



**Quantitative assessment of the relative role of  
climate change and human activities in  
sandy desertification  
- A case study in Ordos Plateau, China**

A Dissertation Submitted to  
Nanjing Agricultural University  
For the Science Degree of Doctor of soil science

BY

**Xu Duanyang**

*Supervised by*

**Prof. Dr. Zhuang Dafang (IGSNRR, CAS)**

**Prof. Dr. Pan Jianjun (NAU)**

*College of Natural Resources and Environmental Sciences*

*Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095*



## 原创性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的作品成果。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本人完全意识到本声明的法律结果由本人承担。

学位论文作者（需亲笔）签名：许端阳 2009年6月13日

## 学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解学校有关保留、使用学位论文的规定，同意学校保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅和借阅。本人授权南京农业大学可以将本学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编本学位论文。

保密 ☐，在\_\_\_年解密后适用本授权书。本学位论文属于不保密 ☐.

（请在以上方框内打“√”）

学位论文作者（需亲笔）签名：许端阳 2009年6月13日

导师（需亲笔）签名：[Signature] 2009年6月13日



# 目 录

|                                            |    |
|--------------------------------------------|----|
| 摘 要.....                                   | I  |
| ABSTRACT.....                              | IV |
| 第一章 绪论.....                                | 1  |
| 1.1 研究背景及意义.....                           | 1  |
| 1.1.1 社会经济可持续发展的宏观背景.....                  | 1  |
| 1.1.2 全球变化与陆地生态系统研究的学术背景.....              | 2  |
| 1.1.3 气候变化和人类活动在鄂尔多斯高原沙漠化过程中相对作用研究的意义..... | 2  |
| 1.2 国内外研究进展.....                           | 3  |
| 1.2.1 沙漠化概念及我国沙漠化问题研究概况.....               | 3  |
| 1.2.1.1 沙漠化概念.....                         | 3  |
| 1.2.1.2 我国沙漠化问题研究概况.....                   | 4  |
| 1.2.2 沙漠化监测与评价.....                        | 7  |
| 1.2.2.1 沙漠化监测与评价指标体系.....                  | 7  |
| 1.2.2.2 沙漠化监测与评价方法.....                    | 8  |
| 1.2.3 气候变化和人类活动驱动力研究.....                  | 11 |
| 1.2.3.1 气候变化对沙漠化的影响.....                   | 11 |
| 1.2.3.2 人类活动对沙漠化的影响.....                   | 13 |
| 1.2.3.3 驱动力定量评价方法.....                     | 15 |
| 1.2.4 沙漠化研究中的尺度问题.....                     | 17 |
| 1.3 研究目标、内容与方法.....                        | 20 |
| 1.3.1 研究目标.....                            | 20 |
| 1.3.2 研究内容.....                            | 20 |
| 1.3.3 研究思路与技术方法.....                       | 21 |
| 1.3.3.1 技术路线图.....                         | 21 |
| 1.3.3.2 主要数据来源.....                        | 21 |
| 1.3.3.3 主要研究方法.....                        | 23 |
| 1.3.4 论文结构安排.....                          | 23 |
| 第二章 研究区概况及沙漠化驱动力特征研究.....                  | 25 |
| 2.1 研究区概况.....                             | 25 |

|                                    |    |
|------------------------------------|----|
| 2.1.1 气候与水文.....                   | 26 |
| 2.1.2 地形与地貌.....                   | 27 |
| 2.1.3 土壤与植被.....                   | 28 |
| 2.1.4 社会经济状况.....                  | 30 |
| 2.2 鄂尔多斯高原的沙漠化问题.....              | 30 |
| 2.3 沙漠化驱动力系统构成.....                | 31 |
| 2.4 近 30 年来鄂尔多斯高原沙漠化驱动力系统特征.....   | 32 |
| 2.4.1 气候变化特征.....                  | 32 |
| 2.4.1.1 降水.....                    | 33 |
| 2.4.1.2 温度.....                    | 34 |
| 2.4.1.3 风速.....                    | 36 |
| 2.4.1.4 太阳辐射.....                  | 37 |
| 2.4.1.5 干湿状况.....                  | 40 |
| 2.4.2 人类活动特征.....                  | 42 |
| 2.4.2.1 人类活动的显性层面.....             | 42 |
| 2.4.2.2 人类活动的隐性层面.....             | 44 |
| 本章小结.....                          | 45 |
| 第三章 鄂尔多斯高原沙漠化定量监测及时空演变.....        | 47 |
| 3.1 沙漠化定量监测指标体系的确定.....            | 47 |
| 3.1.1 沙漠化定量监测指标选取的原则.....          | 49 |
| 3.1.2 沙漠化定量监测指标体系的建立.....          | 49 |
| 3.1.3 沙漠化定量监测指标的反演.....            | 51 |
| 3.1.3.1 遥感影像的选择.....               | 51 |
| 3.1.3.2 指标反演方法.....                | 52 |
| 3.2 沙漠化定量监测方法.....                 | 57 |
| 3.2.1 决策树法介绍.....                  | 58 |
| 3.2.2 决策树模型建立.....                 | 59 |
| 3.3 沙漠化监测结果精度评价.....               | 66 |
| 3.4 鄂尔多斯高原沙漠化时空演变.....             | 68 |
| 3.4.1 1980-1990 年鄂尔多斯高原沙漠化变化 ..... | 69 |
| 3.4.2 1990-2000 年鄂尔多斯高原沙漠化变化 ..... | 72 |
| 3.4.3 2000-2005 年鄂尔多斯高原沙漠化变化 ..... | 75 |
| 本章小结.....                          | 77 |

|                                                                     |     |
|---------------------------------------------------------------------|-----|
| 第四章 气候变化和人类活动在沙漠化过程中相对作用定量评价方法研究.....                               | 79  |
| 4.1 气候变化和人类活动在沙漠化过程中相对作用定量评价方法的概念框架.....                            | 79  |
| 4.2 评价所需数据的处理.....                                                  | 81  |
| 4.2.1 沙漠化数据的处理.....                                                 | 82  |
| 4.2.2 矢量数据的栅格化处理.....                                               | 82  |
| 4.2.3 NDVI 数据的处理.....                                               | 83  |
| 4.3 实际和潜在 NPP 计算.....                                               | 85  |
| 4.3.1 实际 NPP 的计算.....                                               | 86  |
| 4.3.1.1 <i>APAR</i> 的估算.....                                        | 86  |
| 4.3.1.2 光能利用率的估算.....                                               | 87  |
| 4.3.2 潜在 NPP 的计算.....                                               | 93  |
| 4.3.2.1 潜在 NPP 的 <i>FPAR</i> 计算.....                                | 94  |
| 4.4 气候变化和人类活动在沙漠化过程中相对作用定量评价方法建立.....                               | 95  |
| 4.5 评价方法的验证与不确定性分析.....                                             | 97  |
| 4.5.1 <i>CASA</i> 模型的精度验证.....                                      | 97  |
| 4.5.2 气候变化和人类活动在沙漠化过程中相对作用的相对验证.....                                | 99  |
| 4.5.3 评价方法的不确定性.....                                                | 104 |
| 4.6 与其他模型方法的比较.....                                                 | 107 |
| 本章小结.....                                                           | 109 |
| 第五章 鄂尔多斯高原沙漠化过程中气候变化和人类活动相对作用的多尺度研究... 111                          |     |
| 5.1 不同时间尺度下鄂尔多斯高原沙漠化过程中气候变化和人类活动相对作用研究.....                         | 111 |
| 5.1.1 1980-1990 年和 1990-2000 年时间尺度下鄂尔多斯高原沙漠化过程中气候变化和人类活动相对作用研究..... | 112 |
| 5.1.2 不同时间跨度下鄂尔多斯高原沙漠化过程中气候变化和人类活动相对作用研究.....                       | 117 |
| 5.2 不同空间尺度下鄂尔多斯高原沙漠化过程中气候变化和人类活动相对作用研究.....                         | 123 |
| 本章小结.....                                                           | 131 |
| 第六章 结论与展望.....                                                      | 133 |
| 6.1 主要研究成果与结论.....                                                  | 133 |
| 6.2 本研究的创新点.....                                                    | 135 |
| 6.3 研究中存在的问题.....                                                   | 135 |

|                      |     |
|----------------------|-----|
| 6.4 未来工作的展望.....     | 136 |
| 参考文献.....            | 137 |
| 致 谢.....             | 157 |
| 攻读博士学位期间发表的学术论文..... | 159 |

# 图 目 录

|                                                      |     |
|------------------------------------------------------|-----|
| 图 1-1 1: 400 万中国北方沙漠化类型图 .....                       | 5   |
| 图 1-2 等级框架下的沙漠化过程 .....                              | 19  |
| 图 1-3 本研究的技术路线图 .....                                | 22  |
| 图 2-1 鄂尔多斯高原示意图 .....                                | 26  |
| 图 2-2 沙漠化驱动力系统 .....                                 | 31  |
| 图 2-3 鄂尔多斯高原周围部分气象站点 .....                           | 32  |
| 图 2-4 鄂尔多斯高原周围四个气象站点年降雨量和春季降雨量的变化趋势 .....            | 34  |
| 图 2-5 鄂尔多斯高原周围四个气象站点年均温度的变化趋势 .....                  | 35  |
| 图 2-6 鄂尔多斯高原周围四个气象站点年均温度距平的变化趋势 .....                | 36  |
| 图 2-7 鄂尔多斯高原周围四个气象站点年均风速和春季平均风速的变化趋势 .....           | 37  |
| 图 2-8 鄂尔多斯高原周围四个气象站点太阳辐射的变化趋势 .....                  | 39  |
| 图 2-9 鄂尔多斯高原周围四个气象站点干湿指数的变化趋势 .....                  | 41  |
| 图 2-10 鄂尔多斯高原总人口、农民人民收入和牲畜数量的变化 .....                | 44  |
| 图 3-1 沙漠化定量监测指标体系建立过程示意图 .....                       | 47  |
| 图 3-2 决策树示意图 .....                                   | 58  |
| 图 3-3 鄂尔多斯高原典型植被类型 .....                             | 60  |
| 图 3-4 野外采样点分布图 .....                                 | 61  |
| 图 3-5 决策树模型及其规则集建立的流程图 .....                         | 62  |
| 图 3-6 沙漠化定量监测的决策树模型 .....                            | 63  |
| 图 3-7 1980、1990、2000 和 2005 年鄂尔多斯高原沙漠化土地空间分布状况 ..... | 69  |
| 图 3-8 1980、1990 年鄂尔多斯高原沙漠化状况 .....                   | 70  |
| 图 3-9 1980-1990 年鄂尔多斯高原沙漠化变化的空间分布 .....              | 71  |
| 图 3-10 1990、2000 年鄂尔多斯高原沙漠化状况 .....                  | 72  |
| 图 3-11 1990-2000 年鄂尔多斯高原沙漠化变化的空间分布 .....             | 74  |
| 图 3-12 2000、2005 年鄂尔多斯高原沙漠化状况 .....                  | 75  |
| 图 3-13 2000-2005 年鄂尔多斯高原沙漠化变化的空间分布 .....             | 76  |
| 图 4-1 人类活动引起的 NPP 降低示意图 .....                        | 80  |
| 图 4-2 沙漠化过程中气候变化和人类活动相对作用评价概念框架 .....                | 81  |
| 图 4-3 不同植被类型区 GIMMS NDVI 和 VGT NDVI 回归关系图 .....      | 85  |
| 图 4-4 实测 NPP 与模型模拟 NPP 的比较 .....                     | 99  |
| 图 4-5 1980-2000 年鄂尔多斯高原干湿指数变化趋势图 .....               | 100 |

|                                                                         |     |
|-------------------------------------------------------------------------|-----|
| 图 4-6 验证区域的空间位置 .....                                                   | 100 |
| 图 4-7 验证区 1 1980、1990 年实际情况及本评价方法判别出的人类活动引起的沙漠化<br>发展区域.....            | 101 |
| 图 4-8 验证区 2 1980、1990 年实际情况及本评价方法判别出的人类活动引起的沙漠化<br>发展区域.....            | 102 |
| 图 4-9 验证区 3 1990、2000 年实际情况及本评价方法判别出的人类活动引起的沙漠化<br>逆转区域.....            | 103 |
| 图 4-10 验证区 4 1990、2000 年实际情况及本评价方法判别出的人类活动引起的沙漠<br>化逆转区域.....           | 104 |
| 图 4-11 不同时段内沙漠化逆转和发展情况下误差的空间分布 .....                                    | 105 |
| 图 4-12 1980-1990 年气候变化和人类活动在伊金霍洛旗沙漠化逆转和发展过程中的相<br>对作用.....              | 109 |
| 图 5-1 1980-1990 和 1990-2000 年气候变化和人类活动在沙漠化逆转过程中的相对作用<br>.....           | 113 |
| 图 5-2 1980-1990 和 1990-2000 年气候变化和人类活动在沙漠化发展过程中的相对作用<br>.....           | 114 |
| 图 5-3 1980-1990 和 1990-2000 年鄂尔多斯高原干湿指数、降雨、温度的变化趋势                      | 116 |
| 图 5-4 1980-2000 年间牲畜数量和年造林面积的变化 .....                                   | 117 |
| 图 5-5 1980-2000 和 1980-2005 年气候变化和人类活动在沙漠化逆转过程中的相对作用<br>.....           | 118 |
| 图 5-6 1980-2000 和 1980-2005 年气候变化和人类活动在沙漠化发展过程中的相对作用<br>.....           | 119 |
| 图 5-7 不同时间尺度下潜在 NPP 的变化趋势.....                                          | 122 |
| 图 5-8 不同空间尺度下沙漠化过程中气候变化和人类活动相对作用评价流程图 ....                              | 124 |
| 图 5-9 不同空间尺度下 1980-2005 年鄂尔多斯高原沙漠化逆转和发展区域的空间分布<br>.....                 | 125 |
| 图 5-11 不同空间尺度下鄂尔多斯高原 1980-2005 年沙漠化逆转过程中气候变化和<br>.....                  | 126 |
| 人类活动的相对作用.....                                                          | 126 |
| 图 5-12 不同空间尺度下鄂尔多斯高原 1980-2005 年沙漠化逆转过程中气候变化和人<br>类活动主导的沙漠化逆转面积的变化..... | 127 |
| 图 5-13 不同空间尺度下鄂尔多斯高原 1980-2005 年沙漠化发展过程中气候变化和人<br>类活动的相对作用.....         | 128 |

|                                                                     |     |
|---------------------------------------------------------------------|-----|
| 图 5-14 不同空间尺度下鄂尔多斯高原 1980-2005 年沙漠化逆转过程中气候变化和人类活动主导的沙漠化发展面积的变化..... | 128 |
| 图 5-15 不同空间尺度下鄂尔多斯高原 1980-2005 年沙漠化逆转和发展评价过程中误差的空间分布.....           | 129 |
| 图 5-16 不同空间尺度下鄂尔多斯高原 1980-2005 年沙漠化逆转和发展评价过程中误差的面积变化.....           | 130 |

## 表 目 录

|                                                                    |     |
|--------------------------------------------------------------------|-----|
| 表 1-1 2000 年中国北方沙漠化土地分布面积 .....                                    | 6   |
| 表 2-1 鄂尔多斯高原周围四个气象站点年均降雨量和平均春季降雨量 .....                            | 33  |
| 表 2-2 鄂尔多斯高原周围四个气象站点不同时段平均干湿指数 .....                               | 42  |
| 表 2-3 1980、1990、2000 和 2005 年鄂尔多斯高原各土地利用类型面积 .....                 | 44  |
| 表 3-1 中国北方沙漠化土地分类分级表 .....                                         | 48  |
| 表 3-2 Landsat 相关参数设置 .....                                         | 51  |
| 表 3-3 本研究沙漠化监测的遥感数据源 .....                                         | 52  |
| 表 3-4 MSS 影像 $L_{min}$ 和 $L_{max}$ 的取值参考表 .....                    | 55  |
| 表 3-5 TM/ETM+影像 $L_{min}$ 和 $L_{max}$ 的取值参考表 .....                 | 56  |
| 表 3-6 MSS, TM/ETM+各波段 $E_{SUN}$ 的取值参考表 .....                       | 57  |
| 表 3-7 MSS 影像决策树规则集 .....                                           | 64  |
| 表 3-8 TM/ETM+影像决策树规则集 .....                                        | 65  |
| 表 3-9 1980 年沙漠化监测精度评价误差矩阵 .....                                    | 67  |
| 表 3-10 1990 年沙漠化监测精度评价误差矩阵 .....                                   | 67  |
| 表 3-11 2000 年沙漠化监测精度评价误差矩阵 .....                                   | 67  |
| 表 3-12 2005 年沙漠化监测精度评价误差矩阵 .....                                   | 67  |
| 表 3-13 1980-1990 年鄂尔多斯高原沙漠化转移矩阵 .....                              | 70  |
| 表 3-14 1980-1990 各旗县沙漠化逆转与发展状况 .....                               | 72  |
| 表 3-15 1990-2000 年鄂尔多斯高原沙漠化转移矩阵 .....                              | 73  |
| 表 3-16 1990-2000 各旗县沙漠化逆转与发展状况 .....                               | 74  |
| 表 3-17 2000-2005 年鄂尔多斯高原沙漠化转移矩阵 .....                              | 75  |
| 表 3-18 2000-2005 各旗县沙漠化逆转与发展状况 .....                               | 77  |
| 表 4-1 鄂尔多斯高原主要植被类型的 $K_c$ 值 .....                                  | 89  |
| 表 4-2 国际制与美国制土粒分级标准对比 .....                                        | 92  |
| 表 4-3 鄂尔多斯高原主要植被类型参数表 .....                                        | 93  |
| 表 4-4 鄂尔多斯高原三个定位监测点情况 .....                                        | 98  |
| 表 4-5 不同时段内沙漠化逆转和发展评价中的误差面积和百分比 .....                              | 106 |
| 表 5-1 1980-1990 年和 1990-2000 年各旗县气候变化和人类活动引起的沙漠化逆转和发展面积统计 .....    | 115 |
| 表 5-2 1980-1990 年和 1990-2000 年各植被类型区气候变化和人类活动引起的沙漠化逆转和发展面积统计 ..... | 115 |

|                                                                                    |     |
|------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 表 5-3 1980-1990 年、1980-2000 年和 1980-2005 年各旗县气候变化和人类活动引起的<br>沙漠化逆转和发展面积统计 .....    | 120 |
| 表 5-4 1980-1990 年、1980-2000 年和 1980-2005 年各植被类型区气候变化和人类活动<br>引起的沙漠化逆转和发展面积统计 ..... | 121 |



# 气候变化和人类活动在沙漠化过程中相对作用的 定量研究—以鄂尔多斯高原为例

## 摘 要

沙漠化是荒漠化的主要类型,它作为极其重要的环境和社会经济问题困扰着当今世界,威胁着人类的生存和发展。中国是世界上受沙漠化影响最为严重的国家之一,沙漠化引起的土壤质量下降、土地资源减少以及沙尘暴等问题严重制约了社会经济的可持续发展以及和谐社会的构建。近年来,尽管我国的沙漠化防治工作取得了一定的成效,但是整体上其形势依然严峻。

沙漠化过程的驱动力作用研究是沙漠化研究的基础。气候变化和人类活动是导致土地沙漠化的两个主要驱动力,在不同尺度下开展气候变化和人类活动在土地沙漠化过程中相对作用的定量评价,对于沙漠化治理和沙漠化的理论研究具有重要意义。气候变化和人类活动在沙漠化过程中相对作用的定量研究,是准确评价沙漠化动态过程、研究沙漠化对全球气候变化响应以及制定沙漠化防治对策与战略的基础。探索有效方法开展气候变化和人类活动在沙漠化过程中相对作用的定量研究,突破目前的研究瓶颈,不仅能够丰富沙漠化科学研究的理论基础、澄清目前沙漠化研究中的一些误区,而且能为区域和国家尺度上沙漠化防治对策与战略的制定提供理论依据。本研究以鄂尔多斯高原为典型研究区,在系统分析近 30 年来鄂尔多斯高原气候变化和人类活动特征变化的基础上,建立沙漠化的定量监测以及沙漠化过程中气候变化和人类活动相对作用的定量评价方法,最终对鄂尔多斯高原沙漠化过程中气候变化和人类活动的相对作用进行多尺度研究。论文以定量研究为主线,从方法论的角度对沙漠化过程中驱动力作用研究进行突破,主要取得了以下的成果和结论:

1、建立基于 Landsat 数据的鄂尔多斯高原沙漠化定量监测方法。从沙漠化引起的地表特征变化入手,选取 NDVI、MSDI 以及 Albedo 三个指标分别代表沙漠化地表的植被丰度、景观格局以及地表微气候条件,来进行沙漠化定量监测。针对 Landsat 数据特点,在提出各个指标的反演算法的基础上,综合考虑不同植被类型区以及遥感影像获取的时间,建立了基于决策树模型的沙漠化定量监测方法。根据精度检验的结果,该方法监测精度较高,可以准确地用于鄂尔多斯高原沙漠化的监测研究。

2、1980-2005 年间,鄂尔多斯高原沙漠化变化趋势呈一种逆转与发展同时存在,但是逆转整体大于发展的态势。在 1980-1990 年间,逆转的沙漠化土地在鄂尔多斯高原分布相对分散,而发展的沙漠化土地的空间分布相对较为集中,主要分布在杭锦旗

东南部的温带落叶灌丛与荒漠草原的过渡区域、准格尔旗西部的温带禾草草原区域、以及鄂托克前旗南部的温带落叶灌丛区。在 1990-2000 年间,沙漠化逆转的土地面积略高于沙漠化发展的土地面积,明显逆转的沙漠化土地集中分布在伊金霍洛旗西北部的温带落叶灌丛与温带禾草草原的过渡区以及鄂托克前旗西部的温带落叶灌丛区;而沙漠化发展的土地主要集中在达拉特旗、杭锦旗、准格尔旗、乌审旗以及东胜。在 2000-2005 年,该时段年均沙漠化的逆转面积最大,逆转的沙漠化土地主要分布于鄂尔多斯高原东北部的准格尔旗、达拉特旗和东胜这三个旗县的大部分地区;而发展的沙漠化土地主要集中分布在伊金霍洛旗以及鄂托克前旗西北部的温带落叶灌丛与荒漠草原的过渡地带。

3、气候变化和人类活动在沙漠化过程中相对作用定量评价方法的建立。选择净初级生产力 NPP 为衡量沙漠化过程中气候变化和人类活动相对作用的公共指标,利用潜在 NPP 以及潜在 NPP 与实际 NPP 的差值来衡量气候变化和人类活动在沙漠化过程中的相对作用,通过拆分复杂的沙漠化驱动力过程,根据沙漠化逆转和发展与气候变化和人类活动引起的 NPP 变化趋势之间的可能情景,构建沙漠化过程中气候变化和人类活动的定量评价方法。在建立概念框架的基础上,对评价过程中所需的数据进行量化,其中用 CASA 模型来模拟实际 NPP,并在 CASA 模型的基础上建立了潜在 NPP 的计算方法。通过对实际 NPP 以及定量评价结果的验证,表明本研究提出的定量评价方法可以用于沙漠化过程中气候变化和人类活动相对作用的评价。

4、不同时间尺度下,鄂尔多斯高原沙漠化过程中气候变化和人类活动相对作用存在明显的差异。1980-1990 年时间尺度下,气候变化是鄂尔多斯高原沙漠化逆转的主要原因,以气候变化为主导因素的逆转的沙漠化土地面积占总逆转面积的 89.45%;人类活动则是沙漠化发展的主要原因,以人类活动为主导因素的发展的沙漠化土地占总发展面积的 83.93%。在 1990-2000 年时间尺度下,人类活动是沙漠化逆转的主导因素,以人类活动为主导因素的逆转的沙漠化土地面积占总逆转面积的 90.04%;而气候变化则主导了该时期的沙漠化发展,以气候变化为主导因素的发展的沙漠化土地面积占总发展面积的 91.20%。在 1980-2000 年时间尺度下,人类活动是鄂尔多斯高原沙漠化逆转的主要原因,以人类活动为主导因素的逆转的沙漠化土地面积占总逆转面积的 93.02%;而气候变化则是导致沙漠化发展的主要因素,以气候变化为主导因素的发展的沙漠化土地面积占总发展面积的 85.77%。1980-2005 年时间尺度下,气候变化和人类活动共同导致了鄂尔多斯高原的沙漠化逆转,其中气候变化主导的沙漠化逆转面积略大,占 59.71%;而对于沙漠化发展,人类活动则是该时间尺度下的沙漠化发展的主导因素,以人类活动为主导因素的发展的沙漠化土地占总发展面积的 62.35%。

5、不同空间尺度下,鄂尔多斯高原沙漠化过程中气候变化和人类活动相对作用

也存在明显的差异。在 1980-2005 年时间尺度下,随着空间尺度的增加,气候变化和人类活动主导的沙漠化逆转面积均呈增加的趋势,直到旗县尺度达到最大;而气候变化和人类活动主导的沙漠化发展以及评价过程中的误差面积都表现为先增加后降低的趋势,直到旗县尺度减低为 0。

**关键词:** 沙漠化; 气候变化; 人类活动; 相对作用; 鄂尔多斯高原; 定量评价

# **QUANTITATIVE ASSESSMENT OF THE RELATIVE ROLE OF CLIMATE CHANGE AND HUMAN ACTIVITIES IN SANDY DESERTIFICATION**

## **— A CASE STUDY IN ORDOS PLATEAU, CHINA**

### **ABSTRACT**

As the main type of desertification, sandy desertification is becoming one of the most serious global social-economic-environmental issues of our time, which threatens human survival and development. China is one of the countries which are severely affected by sandy desertification in the world. Sandy desertification caused a lot of problems such as reduction of land quality, decrease of land resources, sand storm, etc., which seriously impede the sustained development of economy and construction of harmonious society. The whole country is still in a serious condition though we have achieved some good results in preventing sandy desertification in recent years.

Assessing the driving forces of sandy desertification is fundamental and important for sandy desertification research. Climate change and human activities are main driving forces of sandy desertification. The research of the relative role of climate change and human activities in sandy desertification at different temporal and spatial scales has important significance in the prevention of sandy desertification and the research of sandy desertification theory. The quantitative assessment of the relative role of climate change and human activities in sandy desertification is the foundation for accurately evaluating the dynamic progress of sandy desertification, researching the sandy desertification in response to climate change and formulating the strategies of preventing the sandy desertification. Exploring effective methods to carry out the quantitative assessment of the relative role of climate change and human activities in sandy desertification and breaking the present research bottleneck, which not only can enrich the theoretical basis of sandy desertification research and clarify some mistakes in sandy desertification research, but also can provide theoretical basis for formulating strategy of sandy desertification prevention on the district and country scale. In this study, Ordos plateau was selected as the typical research region. Based on analyzing the character of climate change and human activities, this study formulated quantitative monitoring of sandy desertification and quantitative assessment of

the relative role of climate change and human activities in the process of sandy decertification, and carried out the research of the relative role of climate change and human activities in sandy desertification in Ordos plateau at multi-scales. This paper takes the quantitative research as masterstroke and breaks the research of driving forces in the progress of sandy desertification from methodology's point of view. The followings are the productions and conclusions of this dissertation:

1 Developed a quantitative method for monitoring sandy desertification in Ordos Plateau based on Landsat data. Based on the characteristics of the change of land surface induced by sandy desertification, the author selected NDVI, MSDI and Albedo as the indicators to represent the abundant of vegetation, landscape and micrometeorological condition of land surface with sandy desertification respectively for monitoring sandy desertification. Based on the characteristics of Landsat data, the author developed the methods for retrieving the there indicators, and built the quantitative method for monitoring sandy desertification based on Decision tree model with considering the effects of vegetation types and the image date on the value of indicators. According to the results of accuracies checking, there was relative higher accuracy of this method, which made it can be applied to monitor sandy desertification in Ordos Plateau accurately in this study.

2 From 1980 to 2005, some regions of Ordos Plateau experienced sandy desertification reversion and some places experienced sandy desertification expansion; however, there had a situation that the area of sandy desertification reversion was higher than that of sandy desertification expansion in this period. From 1980 to 1990, the distribution of the area of sandy desertification reversion was relatively scattered while the distribution of the area of sandy desertification expansion was relatively concentrative. The areas of reversed sandy desertification were mainly distributed in the transition zone between temperate deciduous scrubs and desert steppe in the south east of Hanjin Banner, temperate steppe in the east of Zhunger Banner and the temperate deciduous scrubs in the south of Etuokeqian Banner. From 1990 to 2000, the area of sandy desertification reversion was higher than that of sandy desertification expansion. The regions experienced obviously sandy desertification reversion mainly distributed in the transition zone between temperate deciduous scrubs and temperate steppe in the north west of Yijinhuluo Banner, and the temperate deciduous scrubs in the west of Etuokeqian Banner. However, the area of sandy desertification expansion mainly distributed in Dalate, Hangjin, Zhungeer, Wushen Banner and Dongsheng city. From 2000 to 2005, mean annul revised sandy desertification area in

this period was biggest in the three periods, which mainly distributed in the most areas of Zhunger Banner, Dalate Banner and Dongsheng city, while the areas of reversed sandy desertification centralizely distributed in Yijinhuluo Banner and the transition zone between temperate steppe and temperate deciduous scrubs in the north west of Wushen Banner.

3 Formulate a quantitative method for assessing the relative role of climate change and human activities in sandy decertification. NPP was selected as the indicator to measure and assess the impact of climate change and human activities on sandy desertification in this study. Potential NPP and the difference between potential NPP and actual NPP were used to measure and assess the impact of climate change and human activities on sandy desertification. Through the process of splitting the driving forces of sandy desertification and basing on the scenarios between the sandy desertification reversion and expansion and the changes of NPP induced by climate change and human activities, formulate the quantitative assessment of the relative role of climate change and human activities in sandy decertification. On the basis of setting up the conceptual model, the author quantified the required date in the assessment process. CASA model was used to simulate the actual NPP, and establish the calculate method of potential NPP based on CASA model. According to the validation of the actual NPP and the results of quantitative assessment, it proved that the quantitative assessing method developed in this study can be used to assess the relative role of climate change and human activities in sandy decertification.

4 The relative role of climate change and human activities in sandy desertification of Ordos Plateau showed significant differences when it assessed at different temporal scales. When it was assessed at the temporal scale from 1980 to 1990, climate change was the dominant factor that induced the reversion of sandy desertification, and the area of reversed sandy desertification which was induced by climate change was 89.45 percent of the total area of reversed sandy desertification. While human activities was the dominant factor that induced the expansion of sandy desertification, and the area of expanded sandy desertification which was induced by human activities was 83.93 percent of the total area of expanded sandy desertification in this period. When it was assessed at the temporal scale from 1990 to 2000, human activities was the dominant factor that induced the reversion of sandy desertification, and the area of reversed sandy desertification which was induced by human activities was 90.04 percent of the total area of reversed sandy desertification. While climate change was the dominant factor that induced the expansion of sandy desertification

in this period, and the area of expanded sandy desertification which was induced by climate change was 91.20 percent of the total area of expanded sandy desertification. When it was assessed at the temporal scale from 1980 to 2000, human activities was the dominant factor that induced the reversion of sandy desertification, and the area of reversed sandy desertification which was induced by human activities was 93.02 percent of the total area of reversed sandy desertification. While climate change was the dominant factor that induced the expansion of sandy desertification, and the area of expanded sandy desertification which was induced by climate change was 85.77 percent of the total area of expanded sandy desertification. However, when it was assessed at the temporal scale from 1980 to 2005, both climate change and human activities induced the reversion of sandy desertification, but the areas of reversed sandy desertification which was induced by climate change were slightly bigger and reached 59.71 percent of the total revised area; while human activities was the dominant factor that induced the expansion of sandy desertification in this period. The area of expanded sandy desertification which was induced by human activities was 62.35 percent of the total area of expanded sandy desertification.

5 When it assessed at different spatial scales, there were also differences in the relative role of climate change and human activities in sandy desertification of Ordos Plateau. Along with the increase of spatial scale, there is a growing tendency for the areas of reversed sandy desertification which was induced by both climate changes and human activities, and both of them reached the biggest when it assessed at banner scale. But the expansion of sandy desertification induced by climate change and human activities and error area in the process of assessment are represented by the trend of lowering after increasing, and both of them reached 0 when it assessed at banner scale.

**KEY WORDS:** sandy desertification; climate change; human activities; relative role; Ordos Plateau; quantitative assessment



## 第一章 绪论

沙漠化(sandy desertification)是荒漠化(desertification)的主要类型,是当今世界面临最大的环境-社会-经济问题之一(王涛和朱震达,2003)。气候变化和人类活动在沙漠化过程中的相对作用一直是沙漠化研究的重要科学问题。本章通过研究背景及意义、国内外研究进展综述以及研究目标、内容和方法三个部分对本篇论文的研究进行整体性介绍。

### 1.1 研究背景及意义

#### 1.1.1 社会经济可持续发展的宏观背景

自然资源和生态环境是人类赖以生存和发展的基本条件,是经济、社会发展的基础。然而,从工业化革命以来,特别是上世纪60年代发达国家开始进入后工业化时期以后,资源短缺和生态环境问题就已成为经济持续增长的重大约束。我国人口众多,资源相对不足,生态环境承载能力弱,同时在我国经济发展的进程中,又长期存在着资本驱动型、资源消耗型的特点,因此,在我国社会主义事业高速发展的进程中,经济增长与资源保障、生态环境保护之间的矛盾日趋尖锐(牛文元,2008)。针对国外国内的历史经验教训,党中央把科学发展观提升到国家战略的高度,用以指导我国社会经济的可持续发展。科学发展观强调人类社会的发展应该是人类活动、自然环境与生态系统之间协调、可持续发展的科学发展。人类的发展既要考虑当前发展的需要,又要考虑未来发展的需要,不能以牺牲后代人的利益为代价来满足当代人的需求。因此,必须把人的发展同资源消耗、环境的退化以及生态的胁迫等联系在一起,寻求人与自然和谐发展及其关系的合理性存在。

沙漠化是当今世界面临最大的环境-社会-经济问题之一(王涛和朱震达,2003),由于沙漠化土地面积的迅速扩展,造成环境退化和巨大的经济损失,引发局部地区政局稳定和社会安全问题,使之成为全球广泛关注的热点。中国是世界上受沙漠化影响最为严重的国家之一,沙漠化的发展严重地制约了区域社会经济可持续发展以及国家整体发展计划的实施。沙漠化过程驱动力作用的研究作为沙漠化科学的研究基础,不仅可以澄清沙漠化过程的科学规律,而且能为沙漠化治理措施以及相关政策地制定提供科学依据。因此,有必要选择沙漠化的典型区域,深入探讨沙漠化过程中驱动力的相对作用并建立相关方法,从而为在更大尺度上制定国家沙漠化防治战略、促进社会经济可持续发展提供理论支撑。

### 1.1.2 全球变化与陆地生态系统研究的学术背景

全球变化是指由于自然和人为的因素而造成的全球性的环境变化,主要包括大气组成变化、气候变化以及由于人口、经济、技术和社会压力而引起的土地利用变化等(周广胜等, 2004)。全球变化对陆地生态系统的强烈影响正在改变着陆地生态系统固有的自然过程、其后果已经、并将愈来愈严重地威胁人类的生存环境及社会经济的可持续发展。因此,这一问题成为当前科学研究的一个重点领域。全球变化与陆地生态系统的研究就是要从生态系统的物质循环与能量平衡的角度,研究地圈-生物圈-大气圈的相互作用,探讨全球变化的成因与控制机制、空间格局变化规律、未来趋势的预测、以及生态系统变化对全球变化的响应与反馈,研究全球、大陆和流域等不同尺度下复杂生态系统的动态过程、系统内部各亚系统间的耦合关系,以及各种生态环境问题的相互作用等科学问题(傅伯杰等, 2005)。

沙漠化土地作为陆地生态系统的重要组成部分与相对生态脆弱地区,其对全球变化的影响较为敏感。为最大限度地减小全球变化对沙漠化土地的不利影响,目前迫切需要明确全球变化背景下沙漠化变化与其驱动因子相互作用的科学问题。气候变化和人类活动是全球变化的两大核心要素,尽管其共同导致沙漠化的发生发展已经得到公认,但是气候变化和人类活动在沙漠化过程中相对作用的科学研究较之其他陆地生态系统研究仍显落后,主要表现为研究的系统性不强、定性研究多于定量研究、单尺度研究多于多尺度研究等。因此,有必要将全球变化与陆地生态系统研究的核心思想以及先进成果在沙漠化过程及其驱动力作用研究中进行拓展,丰富沙漠化科学的研究内涵与方法。

### 1.1.3 气候变化和人类活动在鄂尔多斯高原沙漠化过程中相对作用研究的意义

气候变化和人类活动通过各自的方式深刻地影响了沙漠化过程的发展与逆转。尽管气候变化和人类活动作为沙漠化过程的两大驱动力已得到公认,并有相当一部分研究在不同尺度上探讨了气候变化和人类活动在沙漠化过程中的相对作用(董光荣等, 1998; 苏志珠等, 2006; Prince, 2002)。然而,此类研究多为定性分析,定量研究较少,而以定量研究成果为基础进行多尺度对比研究就更少。目前,从沙漠化监测到驱动力评价过程中缺少统一、定量、合理和科学的评价方法来描述沙漠化变化及其驱动力作用的整个过程,以致不同学者针对同一地区的研究成果可比性较差。因此,目前迫切地需要提出一套适用于多尺度的定量的评价体系,涵盖沙漠化监测到其驱动力作用评价整个过程来系统地研究沙漠化过程问题。这不仅有利于澄清沙漠化发生发展的

科学规律，也有利于在不同尺度制定区域乃至国家的防沙治沙战略。

中国的沙漠化地区主要分布在中国北方的干旱、半干旱以及半湿润地区，东西跨度大。这不仅造成了中国北方沙漠化地区在气候条件上差异明显，同时沙漠化地区在社会经济水平以及居民生活方式上也差异明显。因此，沙漠化研究的典型区选择至关重要。鄂尔多斯高原位于内蒙古的西南部，横跨气候上的干旱、半干旱和半湿润过渡带以及社会经济上的中国北方农牧交错带，沙漠化过程驱动力复杂，代表性强。因此，在该区域上开展气候变化和人类活动在沙漠化过程中的相对作用研究，不仅有利于揭示该区域的沙漠化规律，同时由于鄂尔多斯高原相对整个北方沙漠化地区代表性强，还可以为今后在更大尺度上的研究奠定基础。

## 1.2 国内外研究进展

### 1.2.1 沙漠化概念及我国沙漠化问题研究概况

#### 1.2.1.1 沙漠化概念

沙漠化作为当前最为严重的全球性环境-社会-经济问题之一，正越来越受到国际社会和各级政府的普遍关注。然而与传统学科不同，沙漠化研究作为一门只有几十年时间的年轻学科，许多有关沙漠化的理论问题仍处于不断完善和发展过程中（王涛和朱震达，2003）。对于沙漠化的概念的理解，不同国家、不同地区、不同学者可能会给出不同的概念。

沙漠化（sandy desertification）作为荒漠化（desertification）的主要类型，其名称与概念都源于荒漠化。荒漠化（desertification）一词，最早出现在 Lavauden 1927 年的一篇科学论文中，他使用“desertification”一词来描述 Sahara 地区荒漠化的景观，指出这一地区的荒漠化完全是人为因素造成的（赵哈林等，2003）。但是直到 1949 年，法国植物学家 Aubreville A 在系统地研究了非洲 Sahel 地区生态环境从热带雨林演变为热带沙漠的过程后，使用了“desertification”一词来说明这一土地退化过程，才使得这一词逐渐被研究者所接受。20 世纪 60 年代末到 70 年代初，“Sahel”地区持续大旱，生态环境破坏、经济停滞，导致这一地区的政局动荡，这一区域的环境、经济和社会稳定与发展的问題引起了国际社会和各国科学家的高度重视，联合国于 1975 年通过了“向荒漠化进行斗争行动计划（第 3337 号决议）”。1977 年，联合国在肯尼亚首都内罗毕召开了第一次世界荒漠化大会，从此以后，有关国际组织和许多国家相继开展了荒漠化的专门研究（王涛，2003）。与此同时，不同学者就荒漠化的定义给出了不同的解释与说明，其概念上的差异主要集中在荒漠化的成因上面（方修琦，1987；

任振球, 1990; 董光荣等, 1990; 朱震达和王涛, 1992; 董光荣等, 1993; Dregne, 1984; Mensching and Inbrahim, 1985)。然而, 直到 1992 年联合国环境与发展大会完成的《21 世纪议程》和 1994 年 6 月通过的《防治荒漠化公约》中给出了荒漠化的定义后, 即“荒漠化是在干旱、半干旱和亚湿润干旱区, 由于气候变异和人类活动等多种因素造成的土地退化”(UN, 1994), 荒漠化的概念才逐渐统一并被人们所接受。

根据联合国对荒漠化的定义, 并依据“土地退化”主要形式, 荒漠化主要分为风蚀荒漠化、水蚀荒漠化和土地盐渍化三种类型。其中风蚀荒漠化, 即沙漠化, 自 1977 年联合国荒漠化大会以后, 由于当时的历史背景和工作条件, 成为我国学者研究的重点。借鉴联合国对荒漠化的定义以及我国的实际情况, 国内不同学者对沙漠化给出了不同的定义。其中朱震达等认为, 沙漠化是在干旱、半干旱和部分半湿润地区, 由于过度人为活动与资源环境不相协调所产生的一种以风沙活动为主要标志的土地退化过程(朱震达等, 1980; 朱震达和陈广庭, 1984; 朱震达和王涛, 1990、1992)。吴正认为沙漠化是在干旱、半干旱和部分半湿润地区, 由于自然因素或又受人类活动的影响, 破坏了自然生态系统的脆弱平衡, 使原非沙漠的地区出现了以风沙活动为主要标志的类似沙漠景观的环境变化过程, 以及在沙漠地区发生了沙漠环境条件的强化与扩张过程(吴正, 1987)。董光荣认为, 沙漠化是原非沙漠地区出现以风沙活动为主要标志的类似沙漠景观的环境变化以及原系沙漠地区环境条件的强化与扩张过程(董光荣, 2002)。陈广庭认为, 沙漠化指的是人类不合理的经济活动改变地面结构和覆被状况, 使风对土地风蚀, 产生风沙活动, 地面出现风蚀和风积物, 景观类似沙漠的变化(陈广庭, 2002)。

在本篇论文中, 关于沙漠化的定义, 笔者借鉴中国科学院寒区旱区环境与工程研究所王涛等人根据 20 多年来我国北方土地退化区域的研究与实践提出的沙漠化概念, 即“沙漠化是干旱、半干旱及部分半湿润地区由于人地关系不相协调所造成的以风沙活动为主要标志的土地退化”(王涛和朱震达, 2003)。

#### 1.2.1.2 我国沙漠化问题研究概况

我国沙漠化土地主要分布在我国北方的内蒙古、宁夏、甘肃、新疆、青海、西藏、陕西、山西、河北、吉林、辽宁和黑龙江等省(区)的 200 多个县(旗)(图 1-1)。从沙漠化土地分布的地带性来看, 有 27% 的沙漠化土地面积分布在西部干旱荒漠地带, 即甘肃西部、青海北部、内蒙古西部以及新疆, 以由于水系的变迁以及灌溉水源的减少引起的绿洲沙丘前移并造成的风沙危害和固定沙丘植被由于过度樵采和放牧遭到破坏而造成的沙丘活化为主要特征; 有 32% 的沙漠化土地分布于草原以及荒漠草

原地带，即内蒙古中部、陕北、晋北、宁夏等地，以草场沙漠化以及农牧交错带沙化程度的加剧为主；有 41% 的沙漠化土地分布在大兴安岭两侧的半干旱地带，主要包括东北三省西部，河北坝上地区以及内蒙古东部，以农牧交错带的过度放牧、干旱与风力侵蚀相互作用的风沙危害为主，威胁到东北平原农业区以及首都周围的环境（王涛和朱震达，2001）。

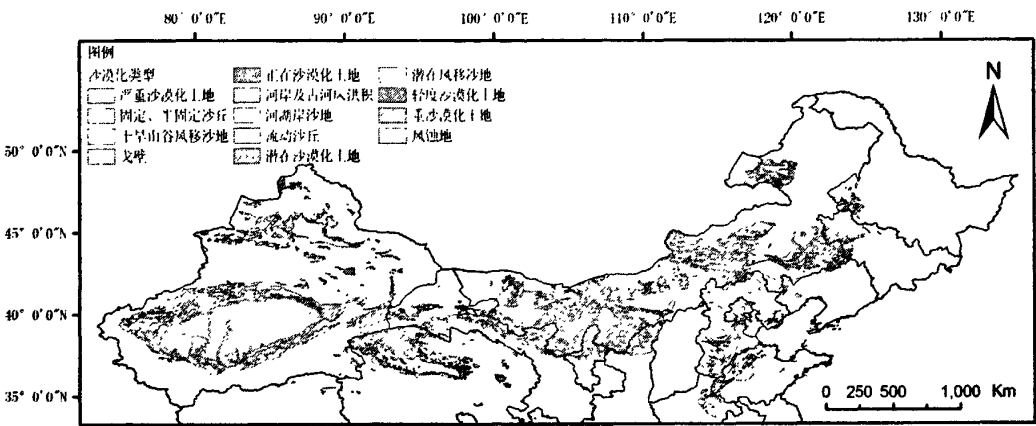


图 1-1 1: 400 万中国北方沙漠化类型图

Fig 1-1 1:4,000,000 sandy desertification map of north China

由于受青藏高原隆起以及东亚季风的影响，我国北方主要呈现干旱、半干旱的气候特征，降雨量普遍在 400 mm 以下且多集中在夏季，并且全区处在西伯利亚、蒙古高压反气旋的中心，从西到东、从北到南大范围频繁的强风，为风力侵蚀提供了充分的动力条件（钱正安等，2001；莫申国等，2004；陈隆勋等，1999；王跃等，1996），加之我国北方地区特别是西北地区经济相对落后，人们不合理的土地利用方式与脆弱的自然环境相耦合，使得沙漠化土地在过去的 50 年中不断的扩展。根据朱振达等人的研究结果（朱震达等，1990；王涛等，1998），上世纪 50 年代末至 70 年代中期，我国北方沙漠化土地以年均  $1,560 \text{ km}^2$  的速度发展，其中已经沙漠化的土地达到  $176,000 \text{ km}^2$ ，轻度和受潜在沙漠化威胁的土地面积为  $158,000 \text{ km}^2$ ；在以后的 10 多年中，则以年均  $2,100 \text{ km}^2$  的速度继续扩展，在 80 年代后期中国北方沙漠化土地面积已经达到  $333,000 \text{ km}^2$ 。根据王涛等人的研究结果（王涛等，2003），到 2000 年，我国北方沙漠化土地面积已经达到  $385,700 \text{ km}^2$ （中国北方各沙地 2000 年沙漠化状况如表 1-1 所示），其中轻度和潜在沙漠化土地为  $139,300 \text{ km}^2$ ，占沙漠化土地面积的 36.1%；中度沙漠化土地为  $99,770 \text{ km}^2$ ，占 25.9%；重度沙漠化土地和严重沙漠化土地面积分别为  $79,090 \text{ km}^2$  和  $67,560 \text{ km}^2$ ，分别占 20.5% 和 17.5%。沙漠化的整体趋势为局部明显逆转，但整体仍在扩展的趋势。

表 1-1 2000 年中国北方沙漠化土地分布面积 (单位:  $\text{km}^2$ ) (王涛等, 2003)

Table 1-1 Distribution of desertified land areas in north China at year 2000

(unit:  $\text{km}^2$ ) (Wang et al., 2003)

| 地区       | 监测面积      | 潜在和轻度<br>沙漠化土地 | 中度沙漠<br>化土地 | 重度沙漠<br>化土地 | 严重沙漠<br>化土地 | 沙漠化总<br>面积 | 占监测<br>面积比<br>/% |
|----------|-----------|----------------|-------------|-------------|-------------|------------|------------------|
| 呼伦贝尔沙地   | 83615.0   | 17890.00       | 852.00      | 1990.00     | 161.00      | 20893.00   | 25.0             |
| 松嫩沙地     | 51588.0   | 1909.76        | 1386.25     | 460.43      | 8.94        | 3765.38    | 7.3              |
| 科尔沁沙地    | 105603.8  | 30669.32       | 9008.79     | 5815.42     | 4673.99     | 50167.52   | 47.5             |
| 内蒙古锡林郭勒盟 | 181309.8  | 20999.21       | 11300.09    | 7274.83     | 5595.37     | 45169.50   | 24.9             |
| 内蒙古乌兰察布盟 | 60967.9   | 9079.36        | 3782.65     | 278.44      | 41.57       | 13182.02   | 21.6             |
| 坝上地区     | 46013.0   | 7824.30        | 3680.73     | 1302.42     | 243.87      | 13051.32   | 28.4             |
| 库布齐沙地    | 87158.5   | 5214.02        | 13025.43    | 5705.72     | 2338.44     | 26283.61   | 30.2             |
| 毛乌素沙地    | 97352.0   | 20509.82       | 14333.78    | 7949.56     | 10679.33    | 53472.49   | 54.9             |
| 石羊河流域    | 120172.0  | 2243.32        | 3692.43     | 16704.70    | 10005.36    | 32645.81   | 27.2             |
| 黑河流域     | 202946.0  | 352.72         | 1568.20     | 2852.74     | 10090.82    | 14864.21   | 7.3              |
| 库姆塔格地区   | 172731.0  | 2594.94        | 4341.53     | 1823.95     | 325.14      | 9085.56    | 5.3              |
| 三江源地区    | 89996.0   | 7728.00        | 2586.00     | 1314.00     | 1377.00     | 13005.00   | 14.5             |
| 柴达木地区    | 446562.7  | 3008.38        | 11170.07    | 2835.49     | 2606.50     | 19620.44   | 4.4              |
| 新疆北部地区   | 272552.0  | 5715.39        | 13609.29    | 12948.15    | 9046.60     | 41319.43   | 15.2             |
| 新疆中部地区   | 158843.0  | 2238.78        | 2502.04     | 4397.90     | 6552.30     | 15691.02   | 9.9              |
| 新疆南部地区   | 386651.0  | 1290.28        | 2929.70     | 5437.88     | 3813.08     | 13470.94   | 3.0              |
| 全部监测地区   | 2564062.0 | 139267.60      | 99768.98    | 79091.36    | 67559.31    | 385687.25  | 15.0             |

进入 21 世纪以来, 国家对沙漠化治理的力度继续加大, 除退耕还林(草)工程继续全面实施、三北防护林的继续建设, 各个沙漠化重点地区加强水利建设、飞播绿化, 同时制定相关政策改善生态环境。据国家林业局 2005 年第三次全国沙漠化最新统计, 全国沙化土地面积为  $1,739,700 \text{ km}^2$ , 占国土面积的 18.12%。与 1999 年同监测范围内相比, 5 年间沙化土地面积净减少  $6416 \text{ km}^2$ , 年均减少  $1283 \text{ km}^2$ 。其中, 流动沙地、半固定沙地面积净减少  $38749 \text{ km}^2$ , 固定沙地增加  $32265 \text{ km}^2$ , 流动、半固定沙化面积在沙漠化土地中的比重则由 1999 年的 36.1% 下降到 2004 年的 33.9%。很明显, 2000 年后我国沙漠化的发展形式与 2000 年之前不同, 在全球气候变暖大的自然背景

下,在人为干预沙漠化朝逆转方向发展新的人文背景下,我国北方沙漠化研究将面临新的机遇与挑战。

### 1.2.2 沙漠化监测与评价

为全面、准确地掌握沙漠化土地的现状和发展动态,为国家沙漠化防治工作提供科学依据,开展沙漠化土地的监测和评价是一项十分必要的工作。沙漠化土地的监测评价主要涉及两个方面的内容,一是监测与评价指标的确定;二是监测与评价方法的选择。下面就这两个方面,对国内外沙漠化监测与评价现状进行综述。

#### 1.2.2.1 沙漠化监测与评价指标体系

目前,国外的相关研究主要以荒漠化为对象进行监测与评价指标体系的研究。虽然自 1977 年联合国荒漠化大会召开以来,荒漠化问题成为研究热点并有许多研究提出了荒漠化监测与评价指标体系,但是目前对指标的选择和应用还没有一个权威、统一的标准。1977 年联合国沙漠化大会后, Berry 和 Ford 提出用于全球范围的 4 级监测指标体系,以气候、土壤、植物和动物等为依据,首次提出了由地面反射率、尘暴、降水、土壤侵蚀与沉积、盐渍化、生产率、生物量、生育率等指标组成的荒漠化指征系统,此指标体系以气候因子为主体,未考虑人为活动因素。Reining(1978)考虑到自然因素和人为因素的相互关系,对荒漠化的有关指征进一步归纳,制定了一个由物理、生物及社会三方面众多指标组成的荒漠化指标体系(Reining, 1978)。Dregne 认为不同土地利用条件下荒漠化的表现不尽相同,提出了一套考虑土地利用变化,由物理、生物和经济指标构成的荒漠化评价指标体系(Dregne, 1980)。前苏联 1984 年出版了 1:25 万的前苏联干旱区荒漠化图,其监测评价指标体系包括物理、植物、动物和社会四个方面的众多指标,该地图虽有不足之处,仍不失为按严格的评价标准编制的典范,在方法上颇有借鉴价值(丁国栋等, 2004)。为满足荒漠化评价实际工作和制图的需要,1984 年世界粮农组织(FAO)与联合国环境规划署(UNEP)据荒漠化的七个过程分别制定了详细的评价指标系统。该指标与评价系统,不但提出了具体的不同荒漠化过程的指征,而且还给出了定量评价指标,其中包括现状、速率与危险性三个方面,并获得多数学者的赞同(FAO and UNEP, 1984)。然而,这种指标体系十分复杂,很多数据难以获得,因此目前荒漠化等级划分都根据这个标准进行简化使用。土库曼斯坦沙漠研究所对于植被退化、风蚀和水蚀荒漠化类型,并从荒漠化现状,荒漠化速度和荒漠化潜在危害三个方面来制定评价标准,依照这个标准修订 FAO/UN 制定的“荒漠化过程的评价及制图条例”,给出了 4 个方面 15 个指标,每个指标 4 个分级。2001

年亚洲区域荒漠化监测与评价网络(TPNI)中心为亚洲成员国制定了一套通用的荒漠化监测指标体系,这套荒漠化指标体系主要由压力指标、状态指标、响应指标和执行指标这四类指标构成(刘爱霞,2004)。

20世纪80年代以来,为了全国荒漠化监测的需要和履行联合国《防治荒漠化公约》,我国学者主要针对砂质荒漠化即沙漠化的监测与评价提出了相应的评价指标体系,得到学术界和政府部门的广泛关注。朱震达(1984)首先提出一套沙漠化评价指标,奠定了我国北方沙漠化评价的理论基础。该套指标体系由沙漠化土地年扩展率大小、流沙面积占土地面积的百分比、沙漠化土地景观的形态组合特征3个指标和植被覆盖度、土地滋生力、农田系统的能量产投比、生物生产量4个辅助指标构成,并将沙漠化程度划分为潜在、正在发展中、强烈发展中和严重4级(朱震达,1984)。随后,董玉祥等提出了沙漠化分区评价的理论、评价的具体内容、评价指标体系及具体方法(董玉祥和陈克龙,1995)。王君厚等在荒漠化类型划分的基础上,提出了荒漠化现状评价的指标体系以及荒漠化现状程度和发展程度判定和评价的方法。高尚武等(1998)在征求专家意见和总结专家经验的基础上,提出了由植被盖度、裸沙占地百分比和土壤质地三个指标组成的沙漠化评价指标体系,首次从荒漠化遥感监测需要的角度来考虑评价指标的选择(高尚武和王君厚,1998)。而后,朱震达(1998)、丁国栋(1998)、贾宝全(2001)等学者针对我国沙漠化问题,提出了不同的指标体系(朱震达,1998;丁国栋,1998;贾宝全和慈龙骏,2001)。

纵观国内外学者对沙漠化监测与评价指标体系的研究,由于对沙漠化概念自身的理解不同,目前为止还未形成共识。同时,国内外现有的沙漠化评价指标体系还存在着评价标准不统一且客观性不强,评价指标缺乏时空尺度的约束,评价指标对沙漠化过程描述不够全面等问题。但是,从评价指标体系的发展趋势上看,复杂且难以量化的指标体系逐渐被简化且易于量化的指标体系所取代。特别是随着3S技术的发展,沙漠化监测与评价的指标的遥感可反演性在指标选择中显得尤为重要。

#### 1.2.2.2 沙漠化监测与评价方法

当沙漠化监测与评价指标体系确定后,选择合适、合理的评价方法就显得尤为重要。评价指标的可量化性是建立一个稳健的评价方法的最重要的一个基础。然而,在国际荒漠化评价研究的初始阶段,即1977年联合国荒漠化大会召开后到1984年FAO和UNEP发表的《荒漠化评价与制图方案》出台之前,荒漠化评价指标都以宏观的定性指标为主,即使是部分直接的定量指标,也没有给出分级的阈值,评价的可操作性较差。1984年FAO和UNEP发表的《荒漠化评价与制图方案》给出了可量化的荒漠

化评价指标,使荒漠化评价进入定量评价阶段。然而由于自身评价方法的局限,即使针对同一评价单元的评价,不同指标的使用可能会得到不同的评价结果(FAO and UNEP, 1984)。针对该评价方法中存在的问题,国内外学者对评价方法进行了改进与发展,试图更全面、准确地反映沙漠化信息。Bergkamp 将生态学中的等级理论引入到荒漠化评价中来,通过结合“自上而下”和“自下而上”两种方法,研究了从单个土体尺度到流域尺度等六个尺度上的荒漠化评价问题(Bergkamp, 1995)。Mouat 等(Mouat et al., 1996)以地理信息系统(Geography Information System, GIS)技术为依托,综合考虑潜在侵蚀情况、放牧压力、气候状况、植被丰度以及物种入侵这五个方面,提出了综合环境评价模型(Integrated Environmental Assessment Model)来对美国科罗拉多高原的荒漠化问题进行综合评价。Rubio & Bechet (1998)针对欧洲的荒漠化问题,提出了一套涵盖物理、化学、生物和人类活动四个方面的指标集,并针对该指标集,提出了一套从指标的选取到沙漠化整体评价的方法体系,该方法体系强调荒漠化评价中核心指标与普通指标的差别,从系统的角度提出了荒漠化评价方法框架(Rubio and Bechet, 1998)。国内一些学者也尝试创立一些综合的沙漠化评价方法,来更合理准确地反映沙漠化信息。胡孟春通过应用模糊数学方法计算单要素如植被盖度、风蚀风积面积百分比、沙土含水率、有机质含量等的指数和不同荒漠化程度的综合指数,应用模糊综合评判方法评定科尔沁沙地的沙漠化(胡孟春, 1991);李振山等提出采用沙漠化评价指标值综合方法,即欧式距离法判定沙漠化程度,排除了靠经验定轻重(李振山和王一谋, 1994);王君厚等依据各指标在荒漠化表征中的重要性确定各个指标的权重,通过先求算各指标不同等级的标准指数,然后再求综合判定指数来判定荒漠化程度(王君厚和孙司衡, 1996);高尚武等先采用 Delphi 法确定各指标的权重,通过线性回归法筛选出裸沙占地百分比、植被盖度和土壤质地三个评价指标,然后用这三个指标建立沙漠化现状综合评价模型(高尚武和王君厚, 1998)。

随着 3S 技术特别是遥感技术的飞速发展,不同航天、航空传感器为沙漠化的评价与监测提供了丰富的数据源,保证了沙漠化数据及时、准确、迅速地更新,为沙漠化监测评价工作提供了便利的手段。不同沙漠化等级土地光谱特征差异是沙化土地遥感监测的基础,是遥感图像分析、最佳波段组合选择、专题信息提取等的重要依据。沙漠化土地光谱特征随时间、地点和环境背景等的变化而变化,影响因素很多,是一种综合作用的结果。从沙漠化土地地物光谱的差异性出发,结合不同的遥感数据源,国内外学者在沙漠化专题信息遥感提取方面做了大量的尝试,并逐渐成为沙漠化监测与评价的主要手段。沙漠化信息遥感目视解译作为沙漠化遥感监测最基本以及最初始的手段在沙漠化研究初期得到广泛的应用,然而工作量大、主观性强、可重复性差的缺陷使得国内外学者多集中于沙漠化信息的遥感自动提取方面的研究。沙漠化信息遥

感自动提取工作的发展,使得沙漠化监测评价指标由原来的不易量化和空间化的指标逐步发展为遥感可反演的指标。沙漠化信息遥感自动提取主要依赖于沙漠化地区植被的光谱特征,以及由于植被变化而引起的其他地表参数的变化来区分不同的沙漠化等级土地。植被指数如归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)、土壤调节植被指数(Soil Adjusted Vegetation Index, SAVI)以及修改型土壤调节植被指数(Modify Soil Adjusted Vegetation Index, MSAVI)常用于沙漠化地区植被状况的监测与评价。另外,从遥感角度反演的土壤水分、陆地表面温度、反照率、沙漠地表结皮以及沙丘形态等指标常用来反映沙漠化地表状况,并用于沙漠化土地的监测与评价。在沙漠化遥感监测研究初期,单一指标如 NDVI 常用于沙漠化的监测。如 Tucker 等(1991, 1998)利用 NOAA-AVHRR 卫星数据获取的 NDVI 数据来监测 1980-1990 年和 1980-1995 年两个时段撒哈拉沙漠的边界及其变化,并证明沙漠化的进退与降水变化存在着密切的关系(Tucker et al., 1991; Nicholson et al., 1998);国内学者龙晶(1998)、李宝林和周成虎(2002)等也做过相似的研究,利用 NOAA-AVHRR 植被指数数据研究中国的沙漠化情况。然而,多数研究选择同时运用多个指标甚至一些辅助数据来尽可能详细的表征沙漠化情况。Tripathy(1996)利用多光谱扫描仪 MSS(Multi Spectral Scanner, MSS)和印度资源卫星(India Resource Sattelite, IRS)数据,通过选取反照率、NDVI、土壤侵蚀速率和土壤水分四个指标来对土地荒漠化进行评价(Tripathy et al., 1996); Sun 等(2005)以 TM 为数据源,通过选择 NDVI、Albedo 和地统计学中的半方差为评价指标,对甘肃民勤地区的土地沙漠化进行评价(Sun et al., 2005);刘爱霞(2005)以 NOAA-AVHRR 和 MODIS 为数据源,通过选择修改型土壤调整植被指数 MSAVI、反照率 Albedo、陆地表面温度 LST、植被覆盖度 FVC 以及土壤湿度 TVDI 五个指标来对中国及中亚地区的土地荒漠化进行评价(刘爱霞, 2005)。随着遥感技术的发展,更多的数据源如 SPOT, ASTER, MODIS、CBERS、星载 SAR 被用于土地沙漠化的监测,从不同角度、不同时相以及不同波段提取更加丰富的沙漠化信息。于此同时,更多的高光谱、超高光谱的卫星以及地面遥感数据用于沙漠化过程机理的监测。在数据源不断更新的同时,先进的评价方法如监督分类、决策树、人工神经网络模型、亚象元分解等技术越来越多地应用于沙漠化的监测评价,以致于沙漠化监测与评价精度不断的提高(牛宝茹等, 2005; 杜明义, 2006; 保家有等, 2008; Huang et al., 2006)。

沙漠化监测与评价工作的发展,不仅体现在遥感监测手段的改进上,同时也体现在其他学科对沙漠化研究工作的渗透方面。景观生态学是一门新兴的学科,其明确强调空间异质性、等级结构和尺度在研究生态学格局和过程中的重要性。沙漠化过程不仅改变了地表植被量的状况,同时也改变了地表植被的格局。因此,沙漠化的评价可

以看作一个景观生态学的问题。从景观生态学的角度对沙漠化过程进行评价,突破了原有沙漠化评价思路的局限。李锋等(李峰, 1997; 李峰和孙时衡, 2001)等尝试对景观生态学在荒漠化监测与评价中的应用进行了理论分析,而且通过初步应用研究,发现多样性指数、优势度指数、均匀度指数和马尔科夫模型等景观生态学指标和方法能较好地评价监测区荒漠化土地动态变化规律;康相武等(康相武等, 2007)筛选出表征沙漠化土地空间分布生态意义的景观格局指数—聚集度,结合遥感和地理信息系统技术构建出区域沙漠化程度评价模型;Sun等(Sun et al., 2007)利用景观连接度指数对区域沙漠化程度进行评价;Tanser和Palmer提出了一个移动标准差指数MSDI(Moving Standard Deviation Index, MSDI)从沙漠化景观退化的角度来评价沙漠化过程(Tanser and Palmer, 1999),而后该指数被Jafari(Jafari et al., 2008)应用于南澳大利亚的荒漠化评价中,并取得了很好的效果。

### 1.2.3 气候变化和人类活动驱动力研究

沙漠化过程的驱动力——即沙漠化的成因问题,一直都是沙漠化研究的热点与焦点(王涛, 2003b; 王涛等, 2004; 贾宝全等, 2003; Rasmussen, 2001)。不同的学者对此问题持有不同的观点,但是目前学术界在该问题上已经达成基本共识,即沙漠化的驱动力主要分为自然因素与人文因素,即气候变化与人类活动。作为全球变化的两个重要方面,气候变化和人类活动通过各自的作用方式影响着沙漠化的进程。如何应对气候变化和人类活动对沙漠化土地带来的后果,我们需要进一步明确气候变化和人类活动的特点以及其对沙漠化土地生态系统的作用方式与机理。

#### 1.2.3.1 气候变化对沙漠化的影响

气候变化是当今国际社会普遍关注的全球性问题,全球气候变化不仅影响人类生存环境,而且也将影响世界经济发展和社会进步。中国是一个易受气候变化影响的发展中国家,尤其是中国沙漠化易发的干旱、半干旱以及亚湿润地区的大陆腹地。由于远离海洋,加上纵横交错的山脉,特别是青藏高原的隆起对水汽的阻隔,使得这一地区成为全球同纬度地区降水量最少、蒸发量最大、最为干旱脆弱的环境地带。加之全区处在西伯利亚、蒙古高压反气旋的中心,从西到东、从北到南大范围频繁的强风,为风蚀提供了充分的动力条件。由于气候条件恶劣,使之该地区成为气候变化的脆弱敏感区。

沙漠化土地生态系统作为陆地生态系统的一部分,深受气候变化的影响。气候变化通过改变降雨、温度、日照以及风速等气候因子来影响沙漠化地区植被的生长,从

而影响沙漠化的正逆发展。降雨和温度作为植被生长的决定性因子, 决定了我国北方不同沙漠化地区的潜在植被的分布状况, 降雨和温度的季节以及年际之间的变化, 决定了我国北方沙漠化地区植被的生长变化 (M.V.K.Sivakumar, 2007; Wu, 1998; 李宝林等, 2001; Ha et al., 1994; Qiu et al., 2001; Tucker C J, 1990)。风是中国北方沙漠化发生发展的主要外部营力 (王涛, 2003a; Wang, 2007; 朱震达等, 1981), 风力侵蚀不但影响风蚀地貌 (Lancaster, 1995; Livingstone and Warren, 1996) 和沙尘的传输与沉降过程 (Greeley and Iversen, 1985; Pye, 1987), 反过来也影响降雨和温度的变异 (Rosenfeld, 2001), 从而显著影响中国北方干旱、半干旱区的沙漠化过程; 风蚀还会影响沙丘的移动性, 使沙丘在不同的固定状态之间转化 (Thomas and Leason, 2005; Tsoar, 2005); 此外, 风蚀通过带走土壤表层细小粘粒, 减少土壤表层有机质以及养分含量, 从而影响地表植被的生长, 加速了沙漠化的发展 (Zobeck and Fryrear, 1986; Zhao, 2006; Gomes et al., 2003)。气候变化对沙漠化的影响还体现在大气成分的变化如  $\text{CO}_2$  浓度的升高对沙漠化地区植被生态系统的影响。大气中  $\text{CO}_2$  的增加对植物生长的影响主要表现在增强光合作用, 进而提高生产力, 降低气孔导度和蒸腾, 提高水分利用效率(WUE), 这将使得世界大多数旱地上生产力都有所增加 (Houerou, 1996)。Melillo 等预测大气中  $\text{CO}_2$  的加倍将使沙漠生态系统的年初级生产力提高 50%~70% (Melillo et al., 1993)。然而一些初步研究结果表明, 在  $\text{CO}_2$  增加的环境下, 沙漠生产力的年际变异增大, 同时一些外来的一年生植物对  $\text{CO}_2$  的增加更加敏感, 这将导致多年生的灌木为多样性低的一年生外来植物所代替, 从而使生态系统功能发生显著的退化 (Jordan et al., 1999; Smith et al., 2000)。

在气候变化对沙漠化影响方面, 我国学者对不同气候带不同沙漠化区域做了大量的研究。韩海涛等分析了玛曲地区 1971-2005 年的气温、降水、大风以及沙尘暴的变化趋势, 认为该地区气候的暖干化是沙漠化发展的重要原因 (韩海涛和祝小妮, 2007); 李宝林对松嫩沙地地区的气候变化与沙漠化关系的研究表明, 该地区本世纪趋于干冷, 沙漠化自然因素增强, 但是目前温室效应引起全球变暖, 使东部季风区边缘降水增加, 两种因素交互作用, 使得沙漠化自然因素不会明显增加 (李宝林, 1996); 魏文寿等对古尔班通古特沙漠气候变化与沙漠化的关系表明, 该地区的沙漠是由于 4000a B.P. 前的气候突然干旱所造成现存的格局, 从北疆 40 年气候变化序列分析, 湿润指数在减小, 从沙漠化气候特征意义上讲, 这些变化对沙漠的作用是极为不利的, 并且更加快了沙漠化的正过程发展 (魏文寿和刘明哲, 2000)。此外, 毛乌素地区 (Wu et al., 1998; 孙继敏等, 1995)、科尔沁地区 (赵哈林等, 2000; 赵云龙, 2004; 王涛等, 2004)、浑善达克地区 (白美兰等, 2006) 气候变化与沙漠化的关系不同学者都做了大量的研究。在时间尺度的研究方面, 董光荣等认为, 我国北方半干旱和半湿润

地区气候变化对沙漠化的作用在不同的时间尺度上是不一样的;苏志珠等的研究分析了从 21ka BP 前后的末次冰期冰盛期,到全新世,以及最近的 50 年中国北方气候变化与沙漠化发展的关系。与此同时,一些学者利用气候模式或相关模型就气候变化对沙漠化的影响做了数值模拟试验。慈龙骏等采用 HADCM2 模型模拟两种气候变化情景下荒漠化生物气候类型区变化,结果表明气候变化下荒漠化生物气候类型区明显扩大,这将增加荒漠化发生的可能性 (Ci et al., 2002)。国外的学者也就气候变化对沙漠化影响的历史数据资料分析和未来情景模拟两方面做了相当的研究。Tucker 等人用 1980~1989 年 10a 间 NDVI 的变化得出撒哈拉沙漠,年扩展率为  $41000 \text{ km}^2$  (Tucker, et al., 1991),而沙漠面积年际变化的 83%是由降水引起,只有 17%由其他因子引起 (Hulme and Kelly, 1994)。Ojima 等人根据 3 种全球生态区的划分方法 (Bailey, 1989; UNEP, 1991; Prentice et al., 1992),用 GFDL/GCM 模型预测了 2040 年  $\text{CO}_2$  加倍的情况下天然草地和旱地(干燥指数为 0.05~0.8)面积的变化,结果表明前两种划分方法(方法 A、B)的面积分别提高了 2.96%和 14.38%,而后一种划分方法(方法 C)的面积减少了 21.01% (Ojima et al., 1993),尽管 3 种生态区的划分方法得出的结果相差甚远,但却从一个侧面反映了气候变化对荒漠化气候类型区的可能影响。

#### 1.2.3.2 人类活动对沙漠化的影响

在全球环境变化的驱动下,地理过程从任何角度看都不再是单纯的自然过程,生态过程的研究也不再仅仅局限于完全自然状态下的生态系统的动态与发展。人类作为生态系统中最为活跃的因子,以其独特的方式对生态系统的结构、过程与功能进行影。近年来,人类活动对生态系统的影响越来越受到人们的关注,与地理-生态过程相关的国际重大科学计划相继启动,如从国际生物圈计划 (IBP) 到人与生物圈计划 (MAB),到千年生态系统评估 (MA);从国际地圈-生物圈计划 (IGBP) 到全球变化的人文影响计划 (IHDP) 等。

由于中国北方沙漠化易发区域的自然环境背景、生态环境条件恶劣,生态系统稳定性较差,自然生态系统功能偏低,人地矛盾问题相对突出,容易受到人类活动的干扰,具体表现为以沙漠化为标志的土地退化现象明显。作为近代沙漠化发展的关键驱动力,人类通过自身的生产生活改变地表植被状况、土壤质量从而影响沙漠化的发展。王涛等认为,在几十年的时间尺度上,沙漠化的发生发展主要受人为活动的影响。苏志珠等认为,人类活动是影响沙漠化发生、扩展与逆转的一个关键因素,尤其是近百年来,人类活动已经明显超过气候冷暖干湿波动对沙质荒漠化发生发展与逆转过程的影响。不合理的土地利用如过度放牧、樵采以及水资源的不合理利用是中国北方沙漠

化发展的主要人文因素(王涛等, 1999; 李香云等, 2004; 孙丹峰, 2005; 慈龙骏等, 2000; 段怡春等, 2002)。人口的增长和社会需求的扩大, 加大了土地资源利用的压力, 也破坏了传统土地利用的合理性(王涛等, 1999)。许多学者利用历史文献资料研究了历史上人类活动与沙漠化土地扩张之间的相互关系(邓辉等, 2007; 王涛等, 1999; 孙继敏等, 1995)。在近代的相关研究中, 根据朱震达等于 1989 年提出的以土地利用为主的人类活动与沙漠化土地的成因分类和发展面积表(朱震达等, 1989), 我国北方地区以草原过度农垦为主造成的沙漠化土地面积为 44,700 km<sup>2</sup>, 占沙漠化土地总面积的 25.4%; 以草原过度放牧为主造成的沙漠化土地面积为 499,00 km<sup>2</sup>, 占总面积的 28.3%; 以过度樵采为主造成的沙漠化土地面积为 56,000 km<sup>2</sup>, 占总面积的 31.8%; 以工矿交通城市建设破坏植被为主造成的沙漠化土地面积为 1,300 km<sup>2</sup>, 占总面积的 0.7%; 以水资源利用不当为主造成的沙漠化面积为 14,700 km<sup>2</sup>, 占总面积的 8.3%(王涛等, 1999)。在一些个例研究中, 胡霞等对不同的耕作措施和留茬方式下农田土壤风蚀的研究表明, 不同的人为措施对土壤风蚀影响显著, 并认为应该采取留茬措施以减少人为扰动从而增加覆盖度以减少风蚀(胡霞等, 2006); 康相武等对华北农牧交错带土地沙漠化成因调查发现, 耕地沙化主要是秋耕和农业大机械的应用为风蚀创造了条件, 连年耕作和经济作物的种植促进了土地沙漠化(康相武等, 2005); Zhao 等通过 1992-1996 在内蒙古的放牧试验来研究放牧对牧场沙漠化的影响, 研究结果表明, 持续的放牧导致植被覆盖、高度、地上地下生物量的大量减少, 而地表牲畜踩踏的影响显著增加, 结果导致小的裸露土壤开始出现, 并最后汇集成大面积的裸露土壤, 从而导致沙漠化的发生(Zhao et al., 2005); Li 等认为过度放牧是中国北方半干旱地区土地沙漠化的主要原因之一, 过度放牧会增加地表的反照率, 从而改变地表的微小气候环境, 同时过度放牧也会减小地表粗糙度, 导致风力侵蚀的发展进而导致沙漠化的发生(Li et al., 2000); Mario 等的研究表明, 过度放牧显著影响了地表植被覆盖度和土壤容重, 为沙漠化的发生发展提供了基础; 此外, 孙武(孙武, 2000), 刘树林等(刘树林等, 2004)、Chen(Chen et al., 2007)、Carly(Carly et al., 2006)、Huang(Huang et al., 2007)等分别从宏观和微观的角度研究了放牧压力与沙漠化的关系。在沙漠化过程人文因素综合作用方面, 董朝阳等认为人类活动对沙漠化的影响是一个复杂的过程, 人类不合理的活动, 施加在脆弱的生态环境条件之上, 导致沙漠化发展加剧(董朝阳等, 2006); 董玉祥认为人文因素对沙漠化的作用有一定的时空域, 而且人文因素对沙漠化过程的作用具有多变性。此外, 人类还可以通过自身的活动抑制沙漠化的发展, 近年来国家实施的三北防护林工程, 退耕还林(草)工程等有效地改变了我国北方的生态环境, 抑制了沙漠化的发展。因此, 合理评价人类活动对沙漠化的影响要从正、逆两个方面来进行评价。

### 1.2.3.3 驱动力定量评价方法

气候变化与人类活动作为沙漠化过程的两大驱动力虽然已经得到公认,但是人们更多地关心在沙漠化过程中到底那些沙漠化过程是气候变化造成的,而哪些是人类活动造成,也即沙漠化过程中气候变化和人类活动的相对作用问题。但是目前的研究多还是处于定性、半定量(给出特定沙漠化发展时期的气候、人口等因素的变化)的方法来研究,而定量的方法不多。虽然这种定性、半定量的分析方法能充分发挥研究者的综合判断能力,但是主观性强、空间表达能力弱、可重复可操作性不强的问题必然使得沙漠化过程中气候变化和人类活动相对作用这一科学问题的研究方法要从定性研究走向定量研究。

纵观近年来沙漠化过程驱动力的定量研究,其方法大致可以分为四类:一是利用简单的线性回归技术来确定各驱动因子与沙漠化土地的关系。章予舒等在对甘肃疏勒河流域环境因子对荒漠化态势的影响时,采用简单的线性回归来分析降雨、温度、大风等自然因素以及人口变化等人文因素对荒漠化的影响(章予舒等, 2003)。孙丹峰利用多元逐步回归模型研究了 1988-1997 年间民勤地区社会经济驱动力对荒漠化的影响(孙丹峰, 2005);徐晓玲等利用简单的线性回归来确定陕北地区土地沙漠化与人文因素如人均耕地面积、人口密度等指标之间的关系(徐晓玲等, 2005);投影寻踪回归模型是近年来发展的一种新方法,一定程度上解决了非线性、非正态分布数据的问题,李香云等人利用该模型对塔里木河下游土地荒漠化的驱动因子贡献度进行了研究(李香云等, 2004)。二是利用主成分或因子分析的方法来研究沙漠化过程驱动力的贡献。这类方法主要是利用了主成分分析法数据压缩的技术,即将多个变量化为几个少数的综合指标,同时又保留绝大部分信息的方法。将各个主成分对总方差的贡献率作为驱动力对沙漠化的贡献率。董玉祥最早将该方法用于定量研究沙漠化驱动力的贡献率上(董玉祥, 1989)。后来又有许多学者将该方法用于确定沙漠化驱动力的贡献率上,成为目前较为流行的一种方法(贾宝全等, 2003;林培松等, 2005;张登山, 2000;董玉祥, 2001;董玉祥, 1992)。Ma 等运用该方法确定了民勤地区不同时段上自然与人文因素的贡献率(Ma et al., 2007);Li 等运用因子分析法研究了 1959-2003 年间海南岛西部土地沙漠化的自然与人文因素贡献率问题(Li et al., 2007)。三是利用模拟无人为干扰下的沙漠化发展情况与实际沙漠化情况的差异来确定人类活动的影响,从而间接估计气候变化的影响。李振山利用这种研究思路,基于草地沙漠化发展过程中流沙面积变化模型和植被盖度变化模型,结合沙漠化监测资料,建立了现代草地沙漠化中自然因素贡献率的确定方法,从而也可以间接推算人为因素在沙漠化中的贡献率(李振山等, 2006);国外的相关研究则更多地关注土地退化或荒漠化过程中植被

的变化,从而间接分析气候变化和人类活动的相对影响。Evans 等在沙漠化地区利用不同降雨时期的累积降雨量与最大 NDVI 之间的良好的线性关系建立预测方程,用该方程预测的植被结果就是理论上完全由气候因素(特别是降雨)引起的植被生长变化,而这个预测值与实际值的偏差,就归因为人类活动引起的植被变化,并将该方法成为回归残差法(Evans et al., 2004); Wessels 等人该研究思路的基础上,比较了水分率用率(NDVI 或净初级生产力 NPP(Net Primary Production, NPP)与降雨量的比值)与回归残差法从降雨的年际变化中区分人为影响的土地退化的能力,并认为回归残差法在国家和省级尺度上都有很好的结果(Wessels et al., 2007; Wessels et al., 2004); Geerken 等和 Herrmann 等也分别利用该方法针对叙利亚沙漠化草原和非洲 Sahel 地区的荒漠化问题中气候变化和人类活动作用做了较为详细的分析(Geerken and Ilaiwi, 2004; Herrmann et al., 2005)。四是将沙漠化过程中各个因子的作用统一到一个可比的指标上,从而确定其各自的相对作用。张春来等以青海贵南草原沙漠化的驱动因子为研究对象,利用风洞模拟实验和  $^{137}\text{Cs}$  示踪技术,将该地区的风速变化、植被变化、牲畜践踏(滥牧)、樵采破坏(滥樵)和草地开垦(滥垦)等五个主要影响因子对沙漠化现状及发展的影响用其各自对风蚀速率的影响建立方程,从而确定这五个影响因子的相对作用(张春来等, 2005)。在国外的相关研究中, HANPP(Human Appropriation of Net Primary Production, HANPP)方法近年来多用于衡量人类活动对净初级生产力的占用(Haberl et al., 2002; Haberl et al., 2007; Rojstaczer et al., 2001; O'Neill et al., 2007)。Zika 等利用 HANPP 方法研究了人类活动引起的沙漠化造成的净初级生产力的减少,以 NPP 的变化作为指标衡量人类活动的影响(Zika et al., 2007)。

以上四种研究沙漠化过程中气候变化和人类活动相对作用的方法,各自从不同的角度利用定量研究的思想对沙漠化过程中气候变化和人类活动相对作用的研究做了尝试。虽然其研究方法各有特点,但是却也都存在着不足之处。线性回归模型法把沙漠化过程及其驱动因子作用看作为简单的线性关系。然而,沙漠化土地生态系统作为陆地生态系统的一部分,其开放性、耗散结构特征以及对外界响应的非线性特征决定了简单的线性回归模型很难模拟驱动因子与沙漠化过程之间的关系。与此同时,在这些利用线性回归模型的研究中,作为因变量的沙漠化变化数据往往是只针对研究区的整体沙漠化变化特征,而不涉及空间上的沙漠化发生发展及其驱动因子作用的差异,因此很难准确地描述沙漠化驱动过程。对于主成分分析或因子分析法,虽然其有坚实的数学基础,但是在其模型中只对驱动因子进行分析,而理应作为因变量的沙漠化变化数据这一方法中不参与模型的运算。同时,该方法同样只针对区域作为整体来研究,而不考虑区域内部的沙漠化过程的空间差异。第三种和第四种方法为研究沙漠化过程中气候变化和人类活动相对作用提供了新的研究思路,然而其各自的方法尚都不完

善,急需进行改进与综合。李振山等(李振山等,2006)虽然在区分自然、人文因素对沙漠化影响的额基础上确定了其各自的贡献率,但是未能将贡献率在空间上进行表达,忽略了驱动力作用的空间差异。这种问题同样存在于第一和第二种方法。王涛(王涛,2003)认为,提取和建立沙漠化过程响应气候变化和人为干扰的判据指标与量化方法,是解决评价驱动力作用的关键。只有将气候变化和人类活动对沙漠化的影响统一到一个可比的层面,才能实现其相对作用的定量研究。第四种方法虽做了一些尝试研究,如张春来等(2005)的研究。但是,该研究采用的风洞模拟实验和 $^{137}\text{Cs}$ 示踪技术很难在大范围进行应用,可重复性比较差,同时,该研究也未能对驱动力的相对作用实现空间表达,忽略了其空间上的差异。国外利用NPP作为评价人类活动作用的指标不仅在生态学角度意义明确,而且易于与遥感数据结合而实现空间上的表达,从而为在不同尺度上研究沙漠化过程中气候变化和人类活动相对作用提供了新的思路。因此,综合提升第三、第四种研究方法的研究思想,势必能突破沙漠化过程中驱动力作用定量研究的一些瓶颈。

#### 1.2.4 沙漠化研究中的尺度问题

尺度的存在根源于地球表层自然界的等级组织的复杂性,它是自然界固有的特征和规律。尽管“尺度”一词在上世纪初就在植物生态学家的相关研究中出现,然而直到上世纪80年代,尺度效应的相关研究才广泛的出现在生态学、水文学以及土壤学等学科的文献中。随着上世纪80年代以来景观生态学的发展,其强调空间格局、生态学过程与尺度之间的相互作用的学科思想,使尺度问题在生态学以及其他相关学科中的研究得到了极大的推动。

广义地讲,尺度是指在研究某一物体或现象时所采用的空间或时间单位,同时又可指某一现象或过程在空间和时间上所涉及到的范围和发生频率。前者又可称为测量尺度,后者又可称为本征尺度。测量尺度是用来测量过程和格局的,是人类的一种感知尺度,随感知能力的发展而不断发展。本征尺度是自然现象固有的而独立于人类控制之外的。测量尺度相当于研究手段,隶属方法论范畴,而本征尺度则是研究对象。尺度研究的根本目的在于通过适宜的测量尺度来揭示本征尺度的规律性(吕一河和傅伯杰,2001)。

生态学或地理学研究对象格局与过程的发生、时空分布、相互耦合等特性都是尺度依赖的。任一相关研究都是在一定空间尺度或时间尺度上进行的,某一尺度上的研究结果通常又不适用于更大或更小尺度上的景观生态学和环境地理学现象或规律,具体研究中的尺度选择和推绎是生态学和地理学研究中无法回避的科学问题。沙漠化问

题作为生态学或者地理学的具体研究内容,同样面临着尺度研究的相关科学问题。目前在沙漠化的相关研究中,涉及尺度问题的研究多集中从景观生态学的角度研究不同时空尺度下沙漠化土地景观格局的变化。常学礼等从时间和空间两个尺度对科尔沁沙地景观结构特征对沙漠化的生态影响进行了多因子主成分分析研究,在时间尺度上,第一和第二分量占总信息量的 90.26%,说明在过去 40 年中景观结构对沙漠化的影响相对简单;在空间尺度上,第一和第二分量占总信息量的 80.20%,景观结构对沙漠化的驱动作用相对复杂,这表明景观结构特征对沙漠化的影响在空间尺度上要比时间尺度上更为复杂(常学礼等, 2005)。常学礼等还在不同时间尺度上对科尔沁沙地景观破碎化与沙漠化过程进行分析,认为流动沙丘景观数量破碎化在时间尺度上的变化趋势呈波动下降趋势,这一变化趋势与同时期的沙漠化过程呈线性正相关(常学礼等, 2006)。然而,沙漠化过程驱动力作用的尺度问题,目前是沙漠化研究的一个薄弱环节,仅有的一些研究多从定性的角度来阐述不同时空尺度下沙漠化过程的驱动力作用问题,少有研究将定量分析引入沙漠化过程驱动力作用的尺度效应问题上。董光荣等从万年以上尺度到数十年的时间尺度对中国北方半干旱和半湿润地区沙漠化的成因进行了分析,认为更新世期间万年以上尺度的沙漠化正逆过程的主要原因是地球轨道要素控制的全球气候变化,全新世时期的气候变化依然是该地区沙漠化正逆过程变化的主要控制因素,沙漠化正逆过程变化在现代时期约存在 20-30 年和数年尺度的周期变化,数年和十年的气候干湿变化仍然是控制我国半干旱和半湿润地区现代沙漠化正逆过程的首要因素(董光荣等, 1998)。苏志珠等也从上万年到十几年的时间尺度上探讨了气候变化和人类活动在我国沙漠化中的相对作用,并得到了相似的结论(苏志珠等, 2006)。针对于现代的沙漠化过程,一些学者尝试了用定量的方法在不同时间尺度上评价沙漠化过程驱动力的相对作用。Ma 等利用因子分析法研究了近 50 年来不同时间尺度上(1956-2001 年和 1981-2001 年)民勤地区沙漠化过程驱动力作用的差异,其研究表明不同时间尺度上自然、人文驱动力的贡献率有着明显的差异(Ma et al., 2007);李香云等利用因子分析法对塔里木河下游土地沙漠化的人为作用进行了不同时间尺度上的分析,其研究表明在 1985-2000 年时间尺度上的人为作用略低于 1949-2001 年的人为作用(李香云等, 2004)。

近年来,国外学者从多尺度分析入手评价沙漠化过程中气候变化和人类活动相对作用的研究也较少。Prince 基于生态学的等级理论将沙漠化过程及其驱动力作用放在一个由不同空间尺度套合的层次中进行研究,从概念模型的角度系统阐述了不同尺度下沙漠化过程驱动力作用的差异(图 1-2)(Prince, 2002)。在这个概念模型中,沙漠化被认为是由土地覆盖动态的反常过程,在  $1^{\circ} \times 1^{\circ}$  的区域上,沙漠化至少受粮食供给、人口密度以及降雨量与持续时间三个因素的影响;在更高一级的国家尺度上,长

期的国家政策、耕作习惯以及区域气候是沙漠化发生的主要因素；而在更小的空间尺度上，沙漠化动态则受土地管理方式以及植被动态的影响。

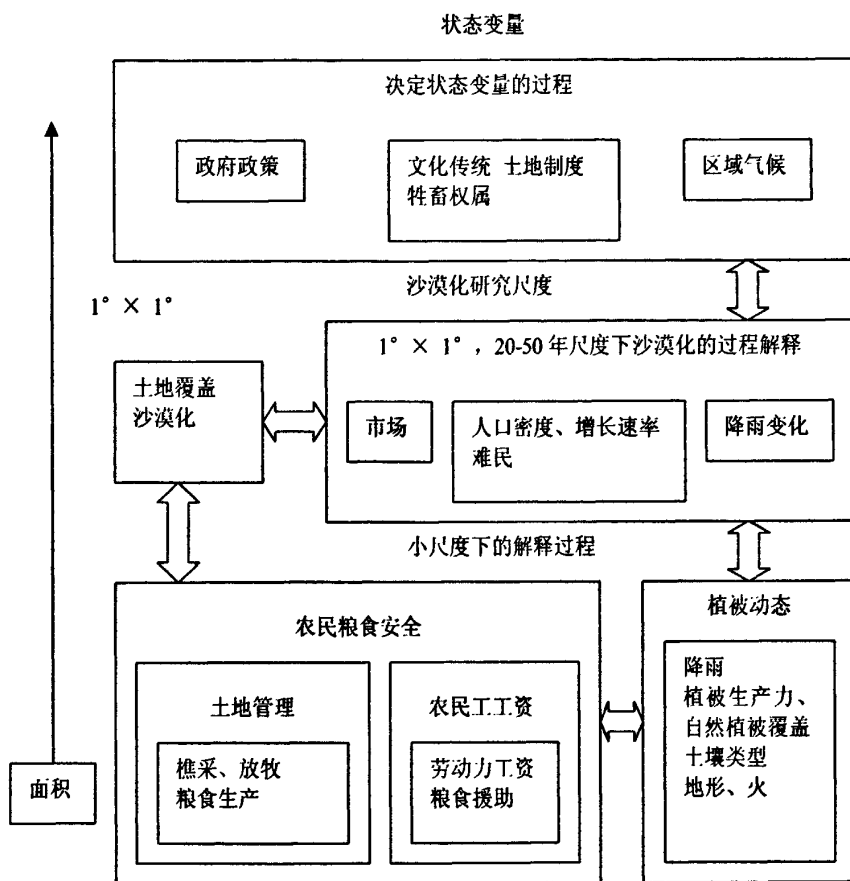


图 1-2 等级框架下的沙漠化过程 (Prince, 2002)

Fig 1-2 The process of desertification placed in a hierarchical (Prince, 2002)

尺度是沙漠化过程及其驱动力作用的研究基础，针对同一地区的沙漠化问题，不同尺度下得到的结论往往不同，因此，要深入了解一个地区的沙漠化成因问题，需要从不同尺度入手进行分析。然而，目前沙漠化驱动力研究中，特别是以定量研究为基础的多尺度分析相当缺乏。而其他地理或生态问题如土地利用/覆被变化、土壤侵蚀的驱动力作用的多尺度研究较之沙漠化问题的多尺度研究更加完善，其原因主要在于驱动力作用定量研究方法较为完善，例如土地利用驱动力问题研究中比较成熟的元包自动机模型、Logistic 回归模型以及以系统动力学为建模基础的过程模型等等，模型方法的成熟使得在此基础上研究不同时空尺度驱动力作用问题成为可能。反观沙漠化过程的驱动力研究，由于缺乏相关模型方法，特别是空间尺度上的研究模型，致使驱动力的多尺度研究特别是空间尺度的研究相对薄弱。因此，有必要借鉴其他地理或生态

问题中驱动力作用的多尺度研究的科学思想与方法,来丰富沙漠化过程中相关问题的研究内涵。

## 1.3 研究目标、内容与方法

### 1.3.1 研究目标

本研究主要针对沙漠化过程驱动力作用的定量化研究这一科学问题,选择中国北方典型的沙漠化地区——鄂尔多斯高原为研究区域,以鄂尔多斯高原 1980-2005 年沙漠化过程中气候变化和人类活动的相对作用为研究对象,通过建立沙漠化定量监测模型、构建沙漠化过程中气候变化和人类活动相对作用的定量评价方法,系统地对鄂尔多斯高原沙漠化过程中气候变化和人类活动相对作用进行多尺度研究,从而揭示鄂尔多斯高原沙漠化过程及驱动力作用的科学规律,为在不同时空尺度下制定沙漠化防治政策以及防沙治沙工作的开展提供理论依据。

### 1.3.2 研究内容

针对以上研究目标,本研究的具体内容主要分为以下几个方面:

#### (1) 基于 Landsat 数据的鄂尔多斯高原沙漠化定量遥感监测研究

鉴于传统的利用遥感影像目视解译监测沙漠化存在着工作量大,可比性差的不足,论文从沙漠化过程中地表特征变化入手,在综合考虑指标选取原则的基础上,选择典型的沙漠评价指标并基于 Landsat 数据建立相应指标的反演算法,分区分季节的建立沙漠化综合评价模型来对研究区域的沙漠化评价。并在此基础上研究鄂尔多斯高原 1980、1990、2000 和 2005 年的沙漠化变化过程。

#### (2) 气候变化和人类活动在沙漠化过程中相对作用的定量评价方法构建

在系统分析以往研究的基础上,提出本研究构建沙漠化过程中气候变化和人类活动相对作用定量评价方法的思路以及概念模型。选择净初级生产力 NPP 作为衡量沙漠化过程中气候变化和人类活动相对作用的公共指标,将气候变化和人类活动对沙漠化的影响统一到一个可比的层面,利用潜在 NPP 以及潜在 NPP 与实际 NPP 之间的差值来衡量沙漠化过程中气候变化和人类活动的相对作用,通过系统分析气候变化和人类活动引起的 NPP 变化趋势与沙漠化动态之间的关系,构建不同气候变化和人类活动作用情景下其各自相对作用的评价方法。在统一数据源的基础上,利用 CASA 模型计算实际 NPP,并基于 CASA 模型的相同构建方式通过气候和植被参数来计算潜在 NPP。在此基础上,对本研究提出的方法中的实际 NPP 计算以及模型评价结果进行验证。

### (3) 鄂尔多斯高原沙漠化过程中气候变化和人类活动相对作用的多尺度研究

在建立的沙漠化过程中气候变化和人类活动相对作用定量评价方法的基础上,以时间和空间两种尺度系统地探讨不同时空尺度下鄂尔多斯高原沙漠化过程中气候变化和人类活动相对作用的差异。

### 1.3.3 研究思路与技术方法

以定量研究作为论文研究的主线贯穿于沙漠化监测与驱动力评价的整个过程。论文的研究思路紧紧围绕这条主线进行,针对研究目标和具体研究内容,提出了整体论文的技术路线图。

#### 1.3.3.1 技术路线图

见下页

#### 1.3.3.2 主要数据来源

遥感影像数据:

用于沙漠化监测的 Landsat 数据其中 1980、1990、2000 年三期覆盖鄂尔多斯地区的 Landsat MSS、TM、ETM+数据来自美国马里兰大学遥感影像数据共享网站 <http://glcf.umd.edu/data/>; 2005 年的 Landsat TM 数据来源于中国科学院资源环境数据中心。

用于 NPP 计算的 NDVI 数据使用 GIMMS 和 SPOT VEGETATION(SPOT VGT)两种数据集的 NDVI 数据。GIMMS 数据来自美国航空航天局(NASA)全球监测与模型研究组(Global Inventor Modeling and Mapping Studies, GIMMS)发布的半月最大值合成(Maximum Value Composites, MVC)数据,空间分辨率是 8 km,时间是 1981-2003。SPOT VGT 数据来自比利时佛莱芒技术研究所(Flemish Institute for Technological Research, Vito)发布的 10 日最大值合成数据,空间分辨率为 1 km,时间是 1998-2007。

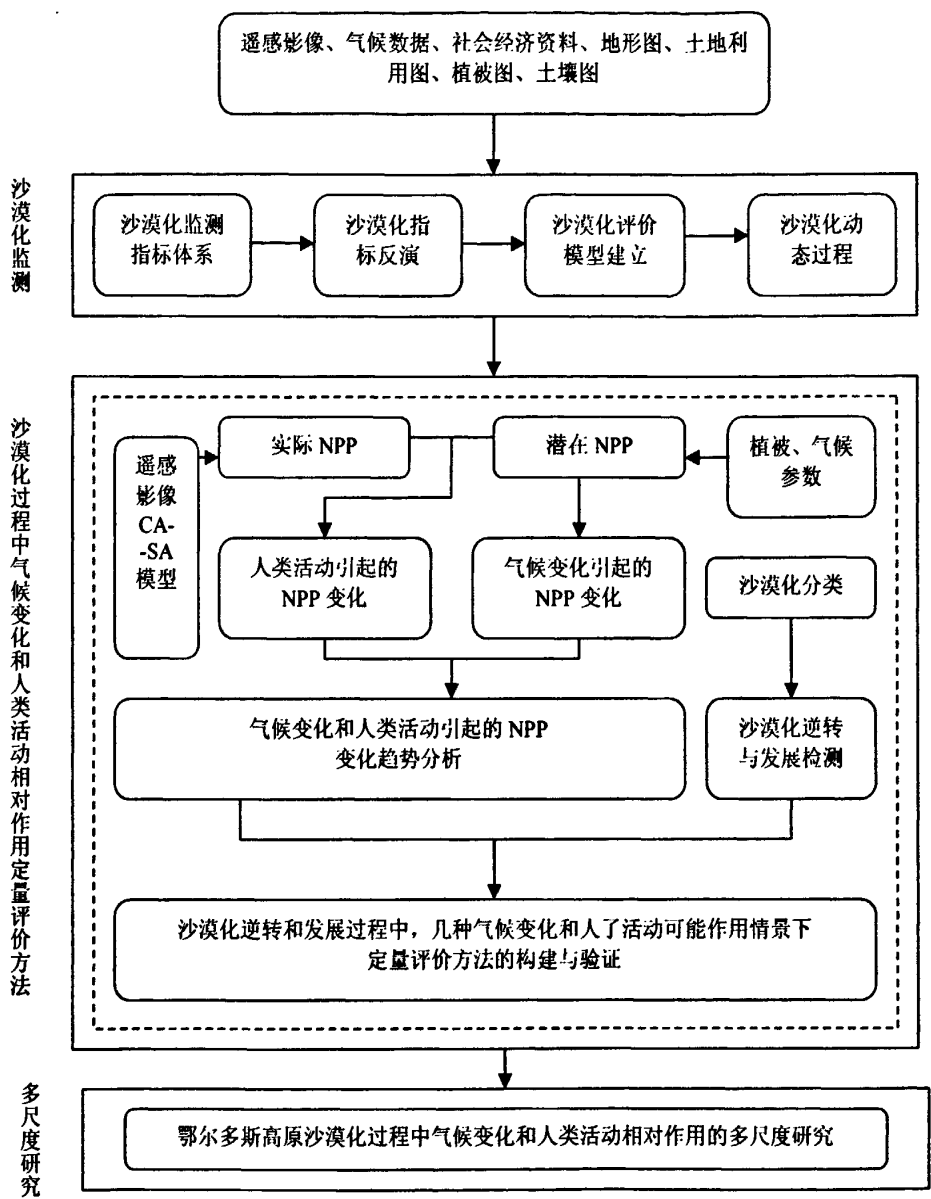


图 1-3 本研究的技术路线图

Fig 1-3 The flow chart of this research

气候数据:

鄂尔多斯高原周围气象站点的各个气象要素的月平均数据来源于中国气象局。

社会经济数据:

1970-2007 年的鄂尔多斯各个旗县的社会经济指标统计数据来源于内蒙古自治区统计年鉴。

其他数据:

1980、1990、2000 和 2005 年四期鄂尔多斯地区 1: 10 万土地利用现状图来源于中国科学院资源环境数据中心; 1: 40 万鄂尔多斯地区土壤图来源于鄂尔多斯土壤普查办公室, 相应的土壤属性数据来源于第二次土壤普查时编制的《中国土种志》; 1: 25 万鄂尔多斯地区植被图来源于《1: 100 万中国植被图集》鄂尔多斯部分, 经扫描矢量化并结合上世纪 80 年代的遥感影像数字化而成。

### 1.3.3.3 主要研究方法

(1) 在沙漠化定量监测研究中, 地表反照率的反演采用 Chavez 等提出的基于影像自身校正的方法来消除大气辐射影像, 得到地表反照率; 在得到地表反照率的基础上, 计算 NDVI; 植被格局的反演采取红光波段的滑动标准差指数 MSDI 来衡量。

(2) 在指标反演的基础上, 利用分层分类的思想, 采用决策树的方法对沙漠化进行定量评价。

(3) 在沙漠化过程中气候变化和人类活动的相对作用研究中, 实际 NPP 的计算采用 CASA 模型, 潜在 NPP 的计算模型采用与 CASA 相同的构建方式, 只是植被层对入射光合有效辐射的吸收比例不通过 NDVI 计算, 而是通过植被类型进行参数设定, 由气候参数计算而得。人类活动的影响通过计算潜在 NPP 与实际 NPP 的差值来衡量。

### 1.3.4 论文结构安排

本论文共分为六章

第一章为绪论, 主要介绍了论文的研究背景及意义, 并对国内外的研究进展进行了综述, 最后对论文的研究目标、内容以及方法进行了简要的介绍。

第二章为研究区概况及沙漠化驱动力特征分析, 从气候、植被、土壤以及人文环境对鄂尔多斯高原进行介绍, 并对近 30 年鄂尔多斯高原沙漠化主要驱动力及其变化进行描述。

第三章为鄂尔多斯高原沙漠化定量监测及时空演变, 介绍沙漠化指标选取、反演以及定量监测模型的建立, 并对 1980-2005 鄂尔多斯高原的沙漠化过程进行研究。

第四章为气候变化和人类活动在沙漠化过程中相对作用定量评价方法的建立。在构建概念模型的基础上, 利用 CASA 模型计算实际和潜在 NPP, 构建沙漠化逆转和发展过程中不同气候变化和人类活动作用情景下其各自相对作用的评价方法, 并对实际 NPP 的模拟以及定量评价的结果进行验证。

第五章为鄂尔多斯高原沙漠化过程中气候变化和人类活动相对作用的多尺度研究。基于第四章建立的定量评价方法, 从时间和空间两种分析尺度入手, 系统分析不

同时空尺度下鄂尔多斯高原沙漠化过程中气候变化和人类活动的相对作用。

第六章为本论文的结论与展望，总结本论文的研究内容与结果，归纳创新点并找出不足之处，提出下一步的工作设想。

## 第二章 研究区概况及沙漠化驱动力特征研究

鄂尔多斯高原是中国北方受沙漠化影响最为严重的地区之一,其境内分布着毛乌素沙地和库布齐沙漠,生态环境和人类社会的经济发展遭到了严重的破坏与阻碍。同时,鄂尔多斯高原还处在具有特殊地理景观的生态过渡带上:在气候方面,它是一个自西北向东南,从干旱、半干旱区到湿润区的过渡;在地质、地貌方面,它处在戈壁、沙漠向黄土高原的过渡;在水文系统方面,它处在大陆内流区向外流区的过渡;在人类活动方面,它处在中国北方典型的农牧交错带。高度的自然、人文过渡特征不仅决定了鄂尔多斯高原沙漠化驱动力系统的复杂性,而且也使得该地区的沙漠化驱动力研究在中国北方地区极具代表性。因此,作为全球变化的敏感区,国内外学者从不同角度,利用不同方法逐渐加强了对鄂尔多斯地区沙漠化问题的研究(Runnstrom, 2000; 牛俊杰和赵淑贞, 2000; 贾宝全等, 2003; 许炯心, 2004; 慈龙骏等, 2007; 马金辉等, 2007)。

### 2.1 研究区概况

鄂尔多斯高原位于内蒙古自治区的西南部,宁夏平原之东,河套平原之南,东北至黄河,南临古长城黄土高原,行政区划上基本属于鄂尔多斯市(原伊克昭盟)。为了便于资料统计与地方应用,在本研究中,鄂尔多斯高原的空间范围特指为鄂尔多斯市的行政范围(图 2-1),其地理位置介于北纬  $37^{\circ}41' \sim 40^{\circ}51'$ ,东经  $106^{\circ}42' \sim 111^{\circ}31'$  之间,处于温带干草原带向荒漠草原带过渡的半干旱地区,东西长约 400 km,南北宽约 340 km,总面积  $86752 \text{ km}^2$ ,总人口 139.5 万,其中蒙古族 15.8 万,是一个以蒙古族为主体、汉族占多数的地级建制的行政专区,现辖伊金霍洛旗、达拉特旗、乌审旗、准格尔旗、杭锦旗、鄂托克旗、鄂托克前旗和市府所在地东胜区,并有 9 个自治区级经济技术开发区。鄂尔多斯是地球上最原始的古大陆之一。漫长的海陆变迁、地质构造运动,蕴育和形成了十分丰富的地上、地下资源。鄂尔多斯素有“地下煤海”之称,含煤面积约占全盟总面积的 70%,煤炭已探明储量 1244 亿吨,约占全国已探明储量的六分之一,全区的二分之一。鄂尔多斯天然气和煤层气极为富集,我国最大的整装气田——苏里格气田就位于该市境内;鄂尔多斯农牧业资源十分丰富,全盟牲畜总头数 700 多万头只,年产绵羊毛 970 万千克,皮张 233 多万张,是我国重要的畜牧业生产加工基地。



图 2-1 鄂尔多斯高原示意图

Fig 2-1 The map of Ordos Plateau

2.1.1 气候与水文

鄂尔多斯高原位于亚洲大陆内部，终年在大陆气团控制下，气候干燥，其大气环流系统处在蒙古-西伯利亚反气旋的高压中心向东南季风区的过渡，并致使其在气候上处于一个自西北向东南，从干旱、半干旱区到湿润区的过渡带上。鄂尔多斯高原气候的基本特征是温带四季分明的强大陆性、弱季风性、干旱半干旱高原气候。全区年降水量为 160-400 mm，自东向西逐渐减少。年平均气温一般在 5.5-7.5℃之间，1 月（冷月）平均气温一般在-10--13℃之间，7 月（热月）平均气温一般在 21-23℃之间，大于等于 10℃活动积温一般为 2500-3600℃。鄂尔多斯高原是太阳辐射极为丰富的区域，太阳年总辐射量为 6000-6500 兆焦耳/平方米/年，分布上西北偏多，约在 6490 兆焦耳/平方米/年；东南偏少，约为 6280 兆焦耳/平方米/年。全区日照时数为 2900-3200 小时，丰富的热量资源使得鄂尔多斯高原具有较大的年蒸发量。鄂尔多斯高原年蒸发量多在 2200-2600 mm，湿润系数多在 0.3-0.096%之间，应该说干旱与半干旱气候是本地区的主要气候特征之一。大风是鄂尔多斯高原气候的主要特征之一，特别是冬春季节的大风往往造成扬沙和沙尘暴天气，年启动风速日数（≥3 米/秒）约为 130 天，全年

8 级以上大风日数在 40 天以上(李博, 1990)。

鄂尔多斯高原地下水资源的补给途径主要来自大气降水与大气凝结水。区域气候特征对于区域地下水的形成起着很重要的作用, 这正是东部地区较西部地区补给条件更有利的根本原因, 进而使东部地下潜水比西部丰富。但由于东部准格尔丘陵地面被割切, 沟谷密度比高原中、西部地区大, 地表产流多, 水量损失严重, 从而造成东部地区潜水补给量相对减少。中、西部地区降水量虽然较东部地区少, 但其地形总体较为平坦, 加之下白垩系砂岩分布面积广, 岩层松散, 利用大气降水直接渗入补给地下水。此外, 鄂尔多斯高原沙漠、沙地覆盖面积较广, 大气凝结水无疑也是高原地下水的主要补给源之一。根据含水介质的不同, 本区地下水的分布可以分为: 桌子山、岗德尔山裂隙岩溶水; 准格尔丘陵中生界和上古生界孔隙裂隙水; 东胜北梁地中新界孔隙裂隙水; 鄂尔多斯波状高平原中新界孔隙裂隙水; 黄河冲积平原第四系孔隙潜水、承压自流水; 毛乌素沙漠第四系风积湖积孔隙水; 库布齐沙区第四系风积、湖积层孔隙水(李博, 1990)。鄂尔多斯高原地表水资源主要以河流和湖泊的形式存在。全区共分为黄河、无定河、窟野河三大水系。积水面积在  $50 \text{ km}^2$  以上的沟、川有 96 个。除无定河、窟野河、都思兔河和西柳沟长流水外, 其余大部分均为季节性河流。鄂尔多斯高原湖泊众多, 水域面积在  $1 \text{ km}^2$  以上的湖泊有 68 个, 水域总面积为  $317 \text{ km}^2$ , 蓄水总量  $6.18 \times 10^8 \text{ m}^3$ (张荣旺等, 2005; 黄金庭等, 2006)。

### 2.1.2 地形与地貌

鄂尔多斯高原地貌首先表现出东西延伸、南北更替的宏观地貌带, 自南向北依次为: 毛乌素覆沙平原→准格尔、东胜丘陵、高平原→库布齐沙带(沙漠与沙地)→黄河沿岸平原等四个地貌带。自东而西依次为: 黄河峡谷→准格尔黄土丘陵→东胜、准格尔披砂丘陵→东胜剥蚀丘陵→杭锦高平原→桌子山山前低丘陵→桌子山剥蚀中低山→桌子山山前低丘陵→桌子山山前倾斜平原→黄河沿岸冲洪积平原等。其次, 在垂直方向上, 发育有四个不同时期的剖夷面, 常呈阶梯状结构。从鄂尔多斯高原中西部向东南部延伸出一些高地—梁地, 这些梁地梁面平坦, 由于遭受河流切割, 梁间形成若干谷地, 当地称为滩地。梁地的基岩类型主要为白垩纪紫红色砂岩和侏罗纪灰绿色砂岩, 这些砂岩固结程度很差, 极易风化, 风化物再经搬运, 构成具有明显沙性的第四纪沉积物和残积物, 成为本区流沙的来源。第四纪沉积物和残积物堆积在一起形成高度远低于基岩构成的梁地的软梁, 多由夹有大量碳酸钙固结物质和结核的细砂和粉砂构成。该区地表广泛覆盖着不同厚度的第四纪及现代风成沙, 覆于上述几种类型基质之上形成各种沙地和沙丘(史培军, 1991)。

### 2.1.3 土壤与植被

鄂尔多斯高原处于暖温带向温带, 东南季风向内陆干旱, 黄土高原向蒙古高原过渡的地带。因而本区南北热量条件和东西水分状况的差异, 是影响土被和土壤地带呈东南向西北变化的主要因素。高原大部分海拔 1200-1500 米, 使本区土被和土壤地带性变化规律, 因受地形的影响, 在一定程度上具有水平地带性和垂直地带性的复合特征。鄂尔多斯高原土壤类型主要分为黑垆土、栗钙土、棕钙土、灰钙土、灰漠土、风沙土、黄绵土、草甸土和沼泽土、盐碱土、石质土和粗骨土十个土类。黑垆土主要分布于十里长川以东的黄土丘陵区, 占全区总面积的 0.2%, 呈零星状态分布于鄂尔多斯高原东部和黄土丘陵区, 它与栗钙土和黄绵土交错分布。栗钙土为本区主要地带性土壤之一, 占总面积的 20.71%, 与半干旱干草原地带基本一致。栗钙土区年平均降水量 300-400 mm, 湿润度在 0.23-0.40 之间。本区除中部四十里梁受覆沙影响较小的硬梁地上栗钙土有成片分布外, 大多与黄绵土、披沙石土、风沙土等呈镶嵌状。棕钙土为本区另一种重要地带性土壤, 占总面积 17.58%, 由于草原向荒漠过渡的土壤类型。分布于栗钙土带以西和桌子山前阿尔巴斯一线之间, 处于鄂尔多斯西部剥蚀波状高原面上。灰钙土仅占据本区西南部分地区, 占全区总面积的 1.5%, 北、东与棕钙土相接, 是灰钙土向北延续的部分。灰漠土主要分布于桌子山以西地区的山前古老冲、洪积扇、阶地上, 占总面积的 2.44%。风沙土分布面积最为广泛, 各类风沙土面积占全区总面积的 39.2%, 一般将风沙土划分为固定、半固定和流动风沙土三个亚类。黄绵土主要分布于东部丘陵黄土母质上的幼年土壤, 占总面积的 2.55%。黄绵土分布区沟壑密布, 地形支离破碎。草甸土和沼泽土主要分布于本区地形低洼的河谷、湖泊盆地、丘间甸子地或湿滩地。占全区面积的 7.08%。盐碱土主要分布于地形低洼, 地下径流不畅, 地下潜水矿化度大于 0.5 克/升的地区, 均呈斑状零星分布。占全区面积的 0.42%。石质土和粗骨土占全区面积的 6.24%。石质土指土层薄(小于 10 cm)而裸露基岩占相当面积(大于 30%)的土壤; 粗骨土土层相对较厚(大于 10 cm), 含砾较多。本区东胜、准格尔旗一带发育在白垩纪、第三纪红色、灰绿色松散砂岩、泥页岩上的披沙石土大多属此类土。

鄂尔多斯高原从东往西随气候的逐渐变干, 出现了不同的植被类型的空间更替, 植被的地带性较为明显。从东部边缘中生性较强的草甸草原, 经典型草原、荒漠化草原, 过渡到西部边缘的草原化荒漠。草甸草原以白羊草群落为代表, 主要分布在鄂尔多斯高原东部相对湿润地区, 但因这里已成为农业区, 原始植被垦殖殆尽。典型草原分布在那尔多斯高原东部, 处于毛不拉孔兑—锡尼镇—毛盖图—三段地一线以东。典型草原群落发育在梁地和黄土丘陵的栗钙土或黄绵土上。典型草原的代表性群系为本

氏针茅 (*Stipa bungeana*) 草原, 由于人类的干扰和破坏, 目前原始植被已被破坏殆尽, 取而代之的是以百里香 (*Thymus mongolicus*) 为主的小半灌木群落, 有时两者镶嵌分布。黄土丘陵区冲沟陡壁上, 则广泛分布着芨芨 (*Artemisia giraldii*) 群落。荒漠草原由一组强旱生禾草及小半灌木建群, 反映了生境进一步旱化。它们的广泛分布, 标志着气候已由半干旱进入干旱。荒漠草原主要分布于鄂尔多斯西部桌子山以东的高平原上。荒漠草原由多年生矮丛生禾草层片建群, 主要包括戈壁针茅 (*Stipa gobica*), 短花针茅 (*Stipa breviflora*), 狭叶锦鸡儿 (*Caragana stenophylla*), 猫头刺 (*Oxytropis aciphylla*) 和藏锦鸡儿 (*Caragana tibetica*) 等。草原化荒漠分布在高平原最西部的桌子山山前倾斜平原及低山上。草原化荒漠已属超旱生植被类型, 种类很贫乏, 以超旱生灌木、半灌木占绝对优势, 一、二年生植物占较大比重, 并伴生一定数量的强旱生多年生草本植物。该区主要植被类型包括红砂 (*Reaumuria Soongorica*), 锦刺 (*Potania mongolica*), 半日花 (*Helinathemum soongolicum*), 四合木 (*Tetraena mongolica*) 和沙冬青 (*Ammopiptanthus mongolica*) 等。

由于沙地遍布鄂尔多斯高原, 沙地的物理特征与地带性生境有很大的不同, 如结构松散、持水力弱、贫瘠、温度日较差大、易于流动等, 使沙地植被与地带性植被也有很大的差别。沙生植被群落类型多样, 随着沙生植物群落的演替, 先是流动沙地广泛出现的沙米 (*Agriophyllum pungens*)、软毛虫实 (*Corispermum puberulum*)、沙旋覆花 (*Inula salsoloides*)、牛心朴子 (*Cynanchum komarovii*) 等植物的先锋群落; 随后是沙鞭 (*Psammochloa villosa*) 和鸡爪芦苇 (*Phragmites australis*) 群系形成的根茎植物阶段; 接下来是油蒿 (*Artemisia ordosica*)、羊柴 (*Hedysarum laeve*) 等群系的小半灌木阶段; 最后, 在固定已久的沙地中往往出现由黑格兰 (*Rhammus erythroxylon*)、沙樱桃 (*Prunus mongolica*) 等中旱生灌木组成的杂灌木林和柠条、麻黄和臭柏等群系。沙生植被虽然是隐域性植被, 但在演替晚期的固定沙地群落中, 常出现一些草原种类, 如短花针茅 (*Stipa breviflora*)、糙隐子草 (*Cleistogenes squarrosa*)、硬质早熟禾 (*Poa sphondylodes*)、草木樨状黄芪 (*Astragalus melilotoides*)、狗娃花 (*Heteropappus hispidus*) 等。

低湿地植被在该区也占有相当大的面积, 大体可分为典型草甸、盐化草甸和盐生草甸, 典型草甸包括寸草 (*Carex stenophylla*)、拂子茅 (*Calamagrostis epigeos*)、假尾拂子茅 (*C.pseudophragmites*) 等群系。盐化草甸包括马阑 (*Iris ensata*)、碱茅 (*Puccinellia tenuifolia*)、芨芨草 (*Achnatherum splendens*) 等群系 (李博, 1990)。

### 2.1.4 社会经济状况

鄂尔多斯高原(市)总面积 86752 平方公里,现辖伊金霍洛旗、达拉特旗、乌审旗、准格尔旗、杭锦旗、鄂托克旗、鄂托克前旗和市府所在地东胜区,114 个乡、苏木和镇。鄂尔多斯自然资源富集,主要有煤炭、化工、建材、羊绒等自然资源,拥有各类矿藏 50 多种,是全区乃至全国正在发展的能源重化工和纺织基地。目前,鄂尔多斯已经构筑起了能源、化工、纺织、高载能、高新材料、生物制药、农畜林沙产品加工、建材、商贸物流、汽车制造等优势产业。据 2007 年的统计资料,鄂尔多斯市总人口为 144 万人,其中乡村劳动力约为 41.4 万人,占总人口的 28.8%;国内生产总值达到 1183.4 亿元,其中第一产业为 50 亿元,第二产业为 647.1 亿元,第三产业为 486.3 亿元,人均生产总值达到 70770 元。随着社会经济的迅速发展,农民的生活水平也得到了显著的特高。到 2007 年,鄂尔多斯市农牧民的人均年收入约为 6233 元,年末牲畜存栏头数达到 838 万头。

## 2.2 鄂尔多斯高原的沙漠化问题

鄂尔多斯高原是风沙活动最频繁的区域之一,分布着毛乌素和库布其两大沙地,沙漠化问题是制约当地社会-经济-环境发展的最为重要的问题之一。由于鄂尔多斯高原存在着丰富的砂性物质,第四纪紫色砂岩、古风成砂,马兰黄土、河湖沉积相等广泛分布于该地区(李智佩等,2006),脆弱的地表物质为沙漠化的发生发展提供了丰富的沙源;同时,恶劣的气候条件加之人类长期不合理的土地利用方式以及较高的土地利用强度,使之该地区的沙漠化问题十分严重。早在上世纪 30 年代,Gressey 等人在他们有关著作中已涉及鄂尔多斯地区的土地沙漠化问题。至上世纪 40 年代,葛绥成已注意到本区沙漠化土地在不断扩大。建国以后,中国科学院治沙队、中国科学院内蒙宁夏综合考察队、中科院地理所、北京大学地理学等单位都对本区土地沙漠化问题进行过专题的研究(李博,1990)。之后,随着遥感技术的发展,使得通过遥感影像可以对沙漠化进行大面积、多时期的监测。据王涛等人通过遥感影像对鄂尔多斯地区的沙漠化监测结果(王涛等,2004),70 年代中期内蒙古鄂尔多斯地区土地沙漠化面积占监测面积的 88.3%,到了 80 年代中期,该比例上升到 93.6%,是沙漠化强烈发展的时期,主要表现为不合理的人类活动导致沙漠化的加剧;而到了 2000 年,鄂尔多斯地区沙漠化土地面积占监测面积的 80.1%,沙漠化有所逆转。

2.3 沙漠化驱动力系统构成

沙漠化或者沙漠化过程作为一个广义的研究对象，从宏观角度对其划分可以分为沙漠化变化的表征和这一变化的驱动因素，即“果”与“因”两个方面。沙漠化变化并不是孤立发生的，而是由多种因素共同参与的动态过程。因此，在研究沙漠化的驱动力时，应将沙漠化的驱动力作为一个系统整体，应用系统的理论和方法对驱动力系统的构成、特征、变化和作用进行辨识与研究。

沙漠化过程驱动力系统是一个由气候变化和人类活动组成的复合系统（图 2-2）。在气候变化系统中，各种气候因子如降雨、温度、太阳辐射、风速等通过各自的方式来影响与改变沙漠化土地下垫面的情况，其综合作用导致了地表的植被、土壤、景观格局的变化，进而导致沙漠化土地的正、逆发展。在人类活动系统中，既可以通过不合理的人类活动如过牧、滥垦滥伐来促使沙漠化的正向发展，也可以通过有利的措施和政策来规范人们的行为进而促使沙漠化的逆向发展。气候变化和人类活动并不是孤立的作用于沙漠化过程，它们之间相互影响、制约，在不同的时间、空间尺度上以其各自的方式共同作用于沙漠化的发生与发展。

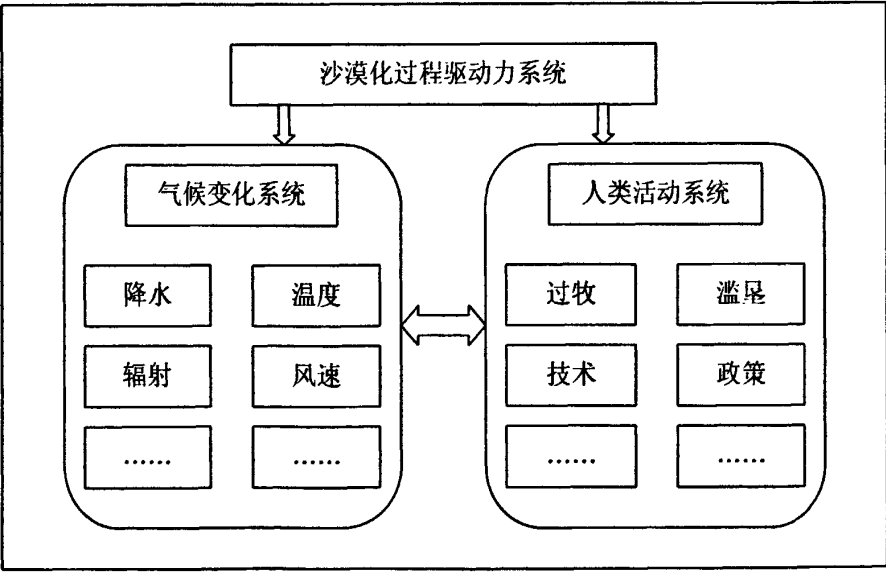


图 2-2 沙漠化驱动力系统

Fig 2-2 Driving system of sandy desertification

## 2.4 近 30 年来鄂尔多斯高原沙漠化驱动力系统特征

### 2.4.1 气候变化特征

通过对 1976-2005 年鄂尔多斯高原的降雨、气温、太阳总辐射、风速、蒸散等气候因子的变化分析，试图对近 30 年鄂尔多斯高原的气候变化总体特征进行说明。由于鄂尔多斯高原在东西方向横跨干旱-半干旱-半湿润的气候过渡带，为了更好的反映鄂尔多斯高原气候变化的特征，我们自西向东选择气象站点来研究鄂尔多斯高原气候变化特征。由于气象站点的设置以及数据完整性的原因，研究区行政边界范围内只有鄂托克旗、伊金霍洛旗和东胜三个站点，而且伊金霍洛旗与东胜相距较近。因此，我们添加研究区行政边界外的两个气象站点，即东部的河曲站（山西）和西部的陶乐站（宁夏）用于分析。最终，我们自西南向东北选择陶乐、鄂托克旗、东胜和河曲四个站点的气象资料用于分析（图 2-3）。

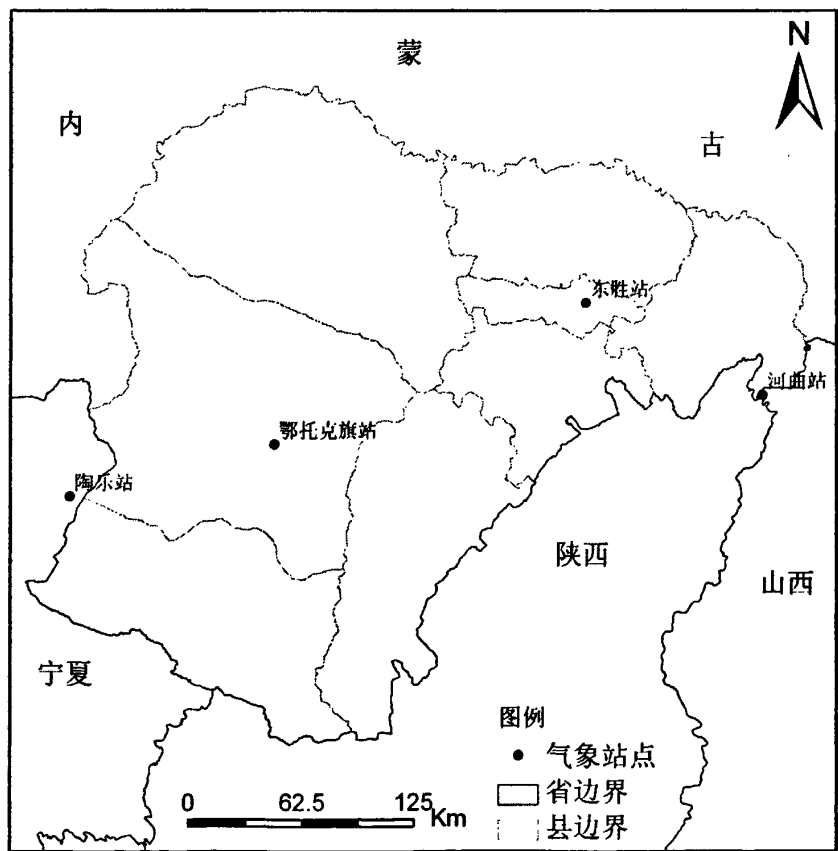


图 2-3 鄂尔多斯高原周围部分气象站点

Fig 2-3 Part of meteorological stations around Ordos plateau

2.4.1.1 降水

鄂尔多斯高原自西向东降雨量变化较大（表 2-1），位于最东部的河曲站点的平均年降雨量要比位于最西部的陶乐站点的年降雨量高近一倍多，而空间位置位于中部的鄂托克前和东胜站点的平均年降雨量也介于前两者之间。气候过渡带的特征对区域的降雨影响较为明显。然而根据近 30 年各个站点的年降雨量变化趋势（图 2-4），各个站点都有相同的减少趋势，其中以位于最东部的河曲站点最为明显。鄂尔多斯高原降雨的年际变化较大，这也符合干旱-半干旱气候过渡带的特征。这四个气象站点年降雨量的年际变化特征相似，在 70 年代中期到 80 年代初期有一个明显的减少阶段；而到 90 年代初期，降雨量逐步增加；在 1990-2000 年间，鄂尔多斯高原的年降雨量波动较大，且略有降低趋势，特别是到 2000 年，降雨量达到了近 10 年来的最低值；在 2000 年后，降雨量逐步回升，在 2003 年达到一个高值，之后略有降低。由于中国北方春季多大风，春季降雨的多少对于干旱-半干旱地区的沙漠化过程有重要影响。鄂尔多斯高原各个站点春季降雨的年际波动相对较小，从图 2-4 中其近 30 年的变化趋势上看，其与年降雨量的变化趋势相反，呈略微增加的趋势。

表 2-1 鄂尔多斯高原周围四个气象站点年均降雨量和平均春季降雨量

Table 2-1 The average total year rainfall and spring rainfall of  
four meteorological stations around Ordos Plateau

|      | 经度（度） | 纬度（度） | 平均年降雨量（mm） | 平均春季降雨量(mm) |
|------|-------|-------|------------|-------------|
| 陶乐   | 106.7 | 38.8  | 142.9      | 29.1        |
| 鄂托克旗 | 108.0 | 39.1  | 228.5      | 40.1        |
| 东胜   | 110.0 | 39.8  | 318.5      | 55.4        |
| 河曲   | 111.2 | 39.4  | 325.8      | 57.7        |

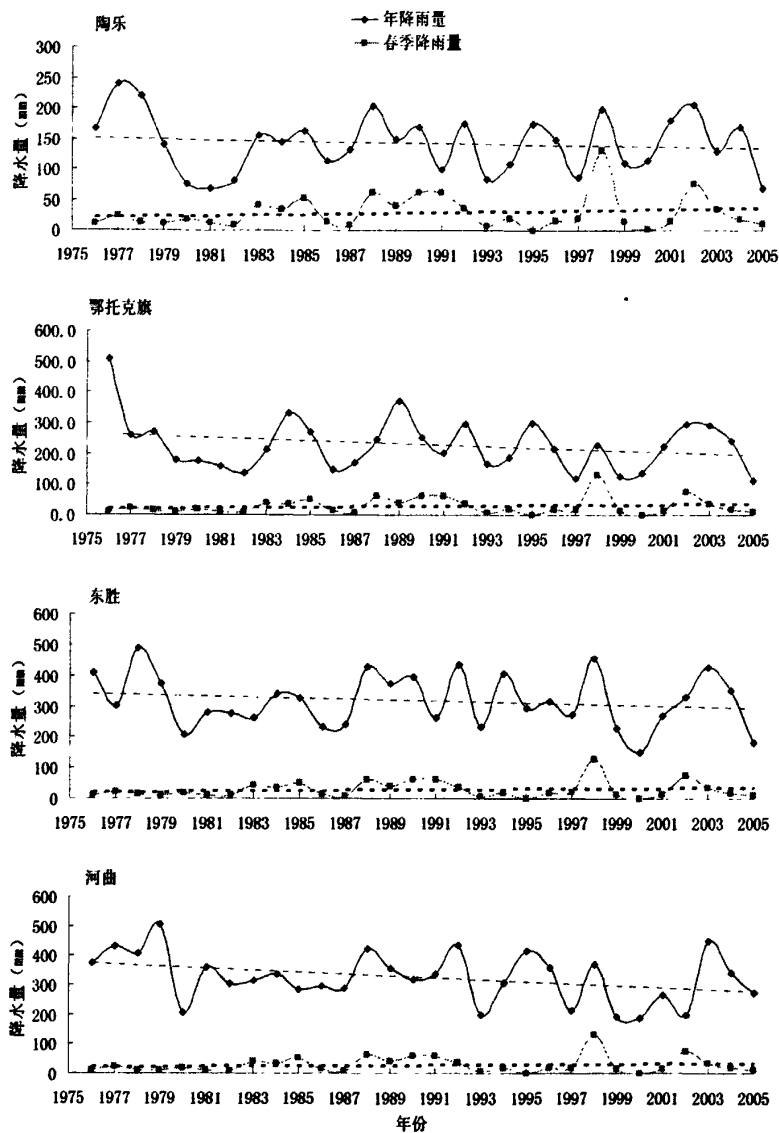


图 2-4 鄂尔多斯高原周围四个气象站点年降雨量和春季降雨量的变化趋势

Fig 2-4 The trend of total year rainfall and spring rainfall of four meteorological stations around Ordos Plateau

2.4.1.2 温度

图 2-5 为四个气象站点 1976-2005 年的平均温度变化，根据其年际波动情况，四个气象站点的年际波动的态势基本一致。从各个站点年均温的线性变化趋势上看，四个站点都呈增加的趋势，说明近 30 年来，鄂尔多斯高原年均温有增加的趋势。为了更清楚的了解温度变化程度，对每年平均气温做了距平处理，所谓距平是指每年气温

平均值与多年气温平均值（至少三十年）之差，用来表示气温的变化过程。图 2-6 为四个气象站点气温距平的变化过程，可以看出近 30 年的气温变化可以分为两个阶段，即以 1990 年为分界点，分为 1976-1990 和 1990-2005 两个阶段，第一阶段距平以负值为主，第二阶段距平以正值为主。这说明从 1976-1990 年，鄂尔多斯高原的气温普遍低于多年平均值，属于低温期；从 1990-2005 年，鄂尔多斯高原的气温普遍高于多年均值，属于暖期。

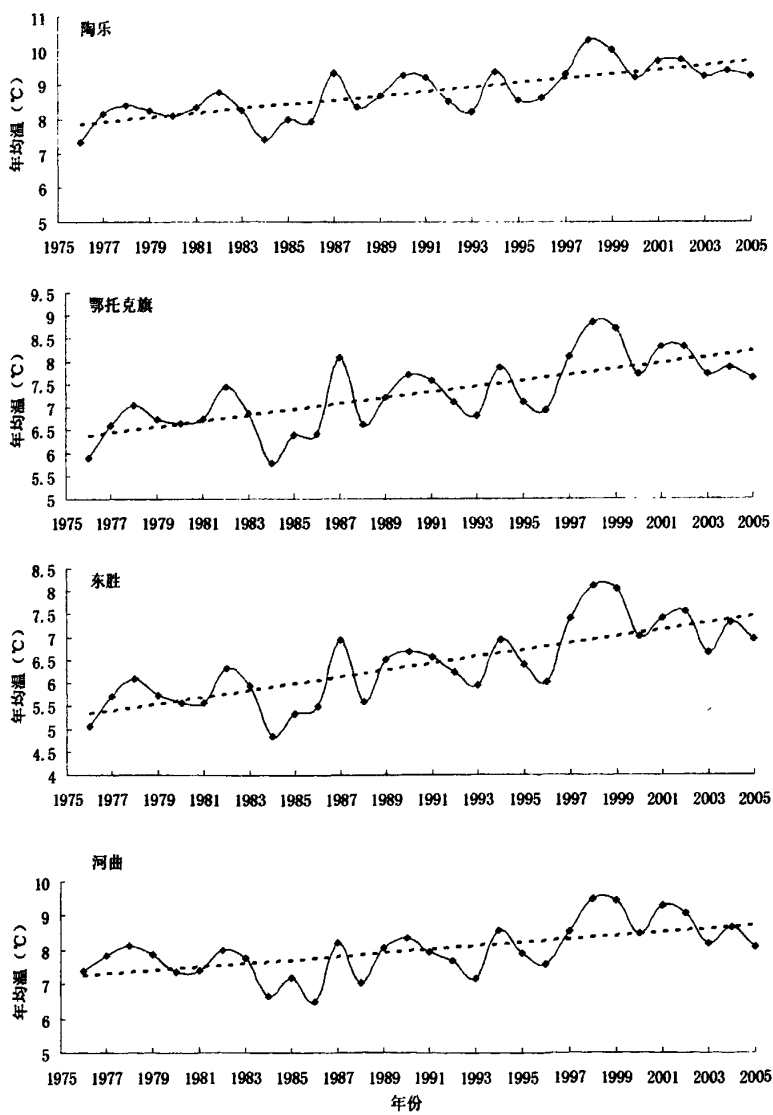


图 2-5 鄂尔多斯高原周围四个气象站点年均温度的变化趋势

Fig 2-5 The trend of average temperature of four meteorological stations around Ordos Plateau

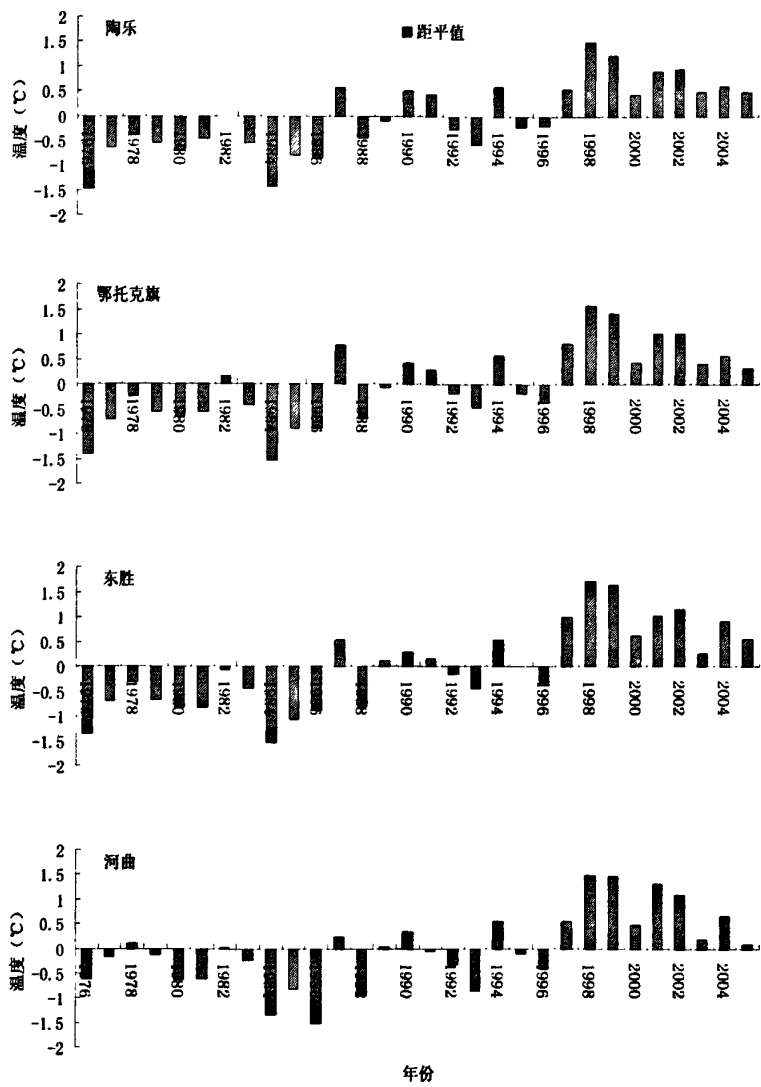


图 2-6 鄂尔多斯高原周围四个气象站点年均温度距平的变化趋势

Fig 2-6 The variation of temperature offset from mean values of four meteorological stations around Ordos Plateau

### 2.4.1.3 风速

图 2-7 为四个气象站点 1976-2005 年的年均风速和春季风速的变化图。可以看出，四个气象站点的春季平均风速均大于年平均风速，说明鄂尔多斯高原春季是大风季节，这也符合干旱-半干旱气候过渡带的特征。从年际波动上看，这四个气象站点年均风速和春季风速的年际波段较为一致。根据 30 年的变化趋势，位于西部的陶乐和东部的河曲的年均风速和春季风速变化不是十分明显，而位于鄂尔多斯高原中部的鄂托

克旗和东胜站点的年均风速和春季风速呈明显下降的趋势。尽管 1976-2005 这 30 年陶乐和河曲的年均风速和春季风速变化不是十分明显，但是 1976-1990 年间这两个站点的年均风速和春季风速还是呈明显的下降趋势。这表明 1976-1990 年间鄂尔多斯高原的风力条件逐渐减小。

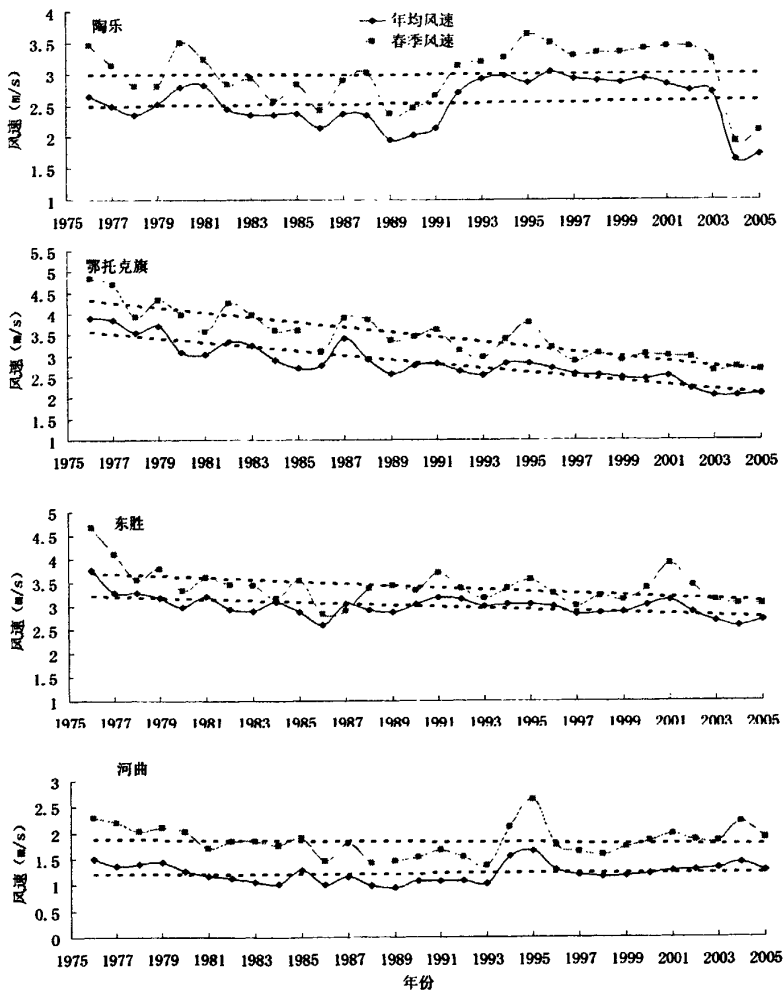


图 2-7 鄂尔多斯高原周围四个气象站点年均风速和春季平均风速的变化趋势

Fig 2-7 The trend of year-averaged wind speed and spring-averaged wind speed of four meteorological stations around Ordos Plateau

2.4.1.4 太阳辐射

太阳辐射是一种重要的气候资源，是地球表面能量的重要来源（韩红等，2008；

文小航等, 2008)。太阳辐射强弱的变化直接决定了地表能量平衡以及生态系统初级生产力的形成。特别是在干旱、半干旱区, 陆地表层植被生态系统对太阳辐射的变化尤为敏感。由于在我国各级气象观测台站中, 具有辐射观测资料的只有 100 个左右。因此, 利用模型方法来获取太阳总辐射资料成为一种十分必要的手段。目前, 在太阳总辐射计算模型中, 以 Angstrom 方法应用最为广泛 (公式 1)。

$$R_s = (a + b \frac{n}{N}) R_{so} \quad (1)$$

其中:  $R_s$  为太阳总辐射;  $R_{so}$  为晴天总辐射;  $n$  为日照时数;  $N$  为可照时数;  $a$  和  $b$  为因地区而异的经验系数。Angstrom 方法以其简单准确的特点得到了广泛的应用与改进, 众多学者研究了经验系数  $a$  和  $b$  的时空变化规律, 尝试对其进行参数化 (Driedger and Gatchpole, 1970; Rietveld, 1978; Martinez-Lozano et al., 1984)。在我国较早应用 Angstrom 方法的是左大康, 他根据我国 26 个日辐射站三年半的实测总辐射和日照百分率的月平均值及晴天月总辐射的资料, 得到较为符合我国实际情况的计算太阳辐射的经验系数  $a=0.248$ 、 $b=0.752$  (左大康等, 1963)。在本研究中, 在太阳总辐射计算中系数  $a$  和  $b$  的取值采用左大康等人的研究结果。晴天总辐射  $R_{so}$  和可照时数  $N$  的计算参考联合国粮农组织 (FAO) 规范的 Penman-Monteith 蒸散模型中的计算方法。其计算可以由以下方程得到。

$$R_{so} = (0.75 + 2 \times 10^{-5} h) R_a \quad (2)$$

$$N = \frac{24}{\pi} \omega_s \quad (3)$$

$$R_a = \frac{24(60)}{\pi} G_{sc} d_r [\omega_s \sin(\varphi) \sin(\delta) + \cos(\varphi) \cos(\delta) \sin(\omega_s)] \quad (4)$$

$$d_r = 1 + 0.033 \cos(\frac{2\pi}{365} J) \quad (5)$$

$$\delta = 0.409 \sin(\frac{2\pi}{365} J - 1.39) \quad (6)$$

$$\omega_s = \arccos[-\tan(\varphi) \tan(\delta)] \quad (7)$$

其中,  $R_a$  为天文辐射 ( $MJ \cdot m^{-1} \cdot day^{-1}$ );  $h$  为海拔高度 ( $m$ );  $\omega_s$  为太阳日落角 ( $rad$ );  $G_{sc}$  为太阳常数 ( $0.082 MJ \cdot m^{-1} \cdot min^{-1}$ );  $d_r$  为日地相对距离 ( $rad$ );  $\varphi$  为纬度 ( $rad$ ) (北半球为正值);  $\delta$  为太阳赤纬 ( $rad$ );  $J$  为天数 (1 月 1 日,  $J = 1$ , 12 月 31 日,

$J = 365$  或  $366$ )。

图 2-8 为四个气象站点年总太阳辐射的变化图。在这四个气象站点中，陶乐、鄂托克旗和河曲三个站点的年总太阳辐射均呈明显的降低趋势，而东胜站点在 1976-1997 年间年总太阳辐射明显降低，而在 1997-2001 年间年总太阳辐射增加明显，致使在 1976-2005 这 30 年间整体呈略微增加的趋势。根据四个气象站点年总太阳辐射均值的变化趋势，鄂尔多斯高原在 1976-2005 年间年总太阳辐射整体降低。

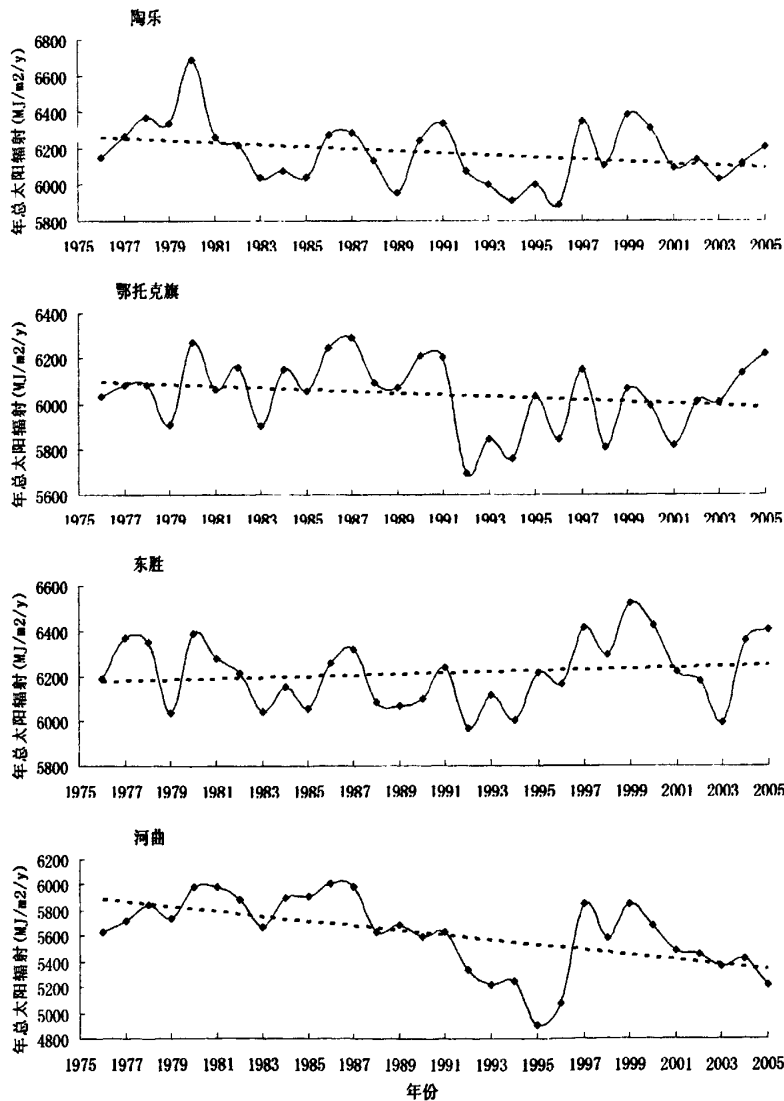


图 2-8 鄂尔多斯高原周围四个气象站点太阳辐射的变化趋势

Fig 2-8 The trend of total radiation of four meteorological stations around Ordos Plateau

#### 2.4.1.5 干湿状况

降水、温度、风速、太阳辐射是决定植被生长的关键因素，也是决定沙漠化过程的关键气候因素。前面对单因素的变化趋势进行了分析，但是不能详细地、整体地反映气候的干湿变化。因此，有必要把单因素指标结合起来，建立能反映气候干湿状况的综合指标，从其变化趋势来反映气候的干湿状况变化趋势。干湿指数是应用较为广泛的一种指标，其形式就是最大可能蒸散与降水量的比值，值越大表明越干燥，值越小表明越湿润。Holdridge 水分指标、Thornthwaite 湿润指数和 Penman 干湿指数都是常用的干湿指数（张新时等，1993；慈龙骏和吴波 1997；慈龙骏等，2002；周晓东等，2002；封志明等，2004；胡顺军等，2005），其区别在于对最大可能蒸散的计算上。本研究采用联合国粮农组织规范的 Penman-Monteith 模型计算最大可能蒸散（公式 8），进而计算干湿指数。该模型物理基础牢靠，考虑的气象因子最多，在理论上有健全的依据并在实践上经过广泛检验，比较适合我国气候复杂、气象因子多变的特点（Jensen et al., 1990；黄秉维，1993；Allen et al., 1998；Walter et al., 2000；吴绍洪等，2005；尹云鹤等，2005）。

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)} \quad (8)$$

其中， $\Delta$  为饱和水汽压曲线斜率 ( $\text{kPa} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ )； $R_n$  为净辐射 ( $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$ )； $G$  为土壤热通量 ( $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$ )； $T$  为平均温度 ( $^\circ\text{C}$ )，是最高温度和最低温度的算术平均值； $U_2$  为 2 米高处的风速 ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )； $e_s$  为平均饱和水汽压 ( $\text{kPa}$ )， $e_a$  为实际水汽压 ( $\text{kPa}$ )； $\gamma$  为干湿常数 ( $\text{kPa} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ )。以上各个参数的计算可以参考联合国粮农组织规范的 Penman-Monteith 模型的计算说明（Allen et al., 1998），其中净辐射  $R_n$  的计算（公式 9）中，经验系数  $a, b, c, d, e, f$  的取值参考左大康等的研究结果，使其更符合中国的实际情况。其值分别为 0.248, 0.752, 0.56, 0.008, 0.1 和 0.9。

$$R_n = (1 - 0.23) \times (a + b \frac{n}{N}) R_{so} - \sigma (\frac{T_{s,k}^4 + T_{n,k}^4}{2}) (c - d \sqrt{e_a}) (e + f \frac{n}{N}) \quad (9)$$

因此，在求出  $ET_0$  之后，根据干湿指数的定义，可以用下面公式来表示（公式 10）：其中  $P$  为降雨量。

$$I_a = \frac{ET_0}{P} \quad (10)$$

图 2-9 为四个气象站点干湿指数的变化图。四个气象站点的多年干湿指数均值自最西边的陶乐到最东边的河曲依次减小（表 2-2），这反映了该区域位于典型的气候过渡带的特征。四个气象站点的干湿指数年际波动较大，有点类似于降水量的年际变化。干湿指数的年际变化趋势显示，除陶乐站点的干湿指数有不明显的减少外，其余三个站点都有不同程度的增加。分析对比 1976-1990 年和 1991-2005 年这两个时间段内的干湿指数均值（表 2-2），发现 1991-2005 时段内四个站点干湿指数均值均大于 1976-1990 时段内的均值，且高于 30 年的平均值。表明了 1990 年后，鄂尔多斯高原的气候趋于暖干化。

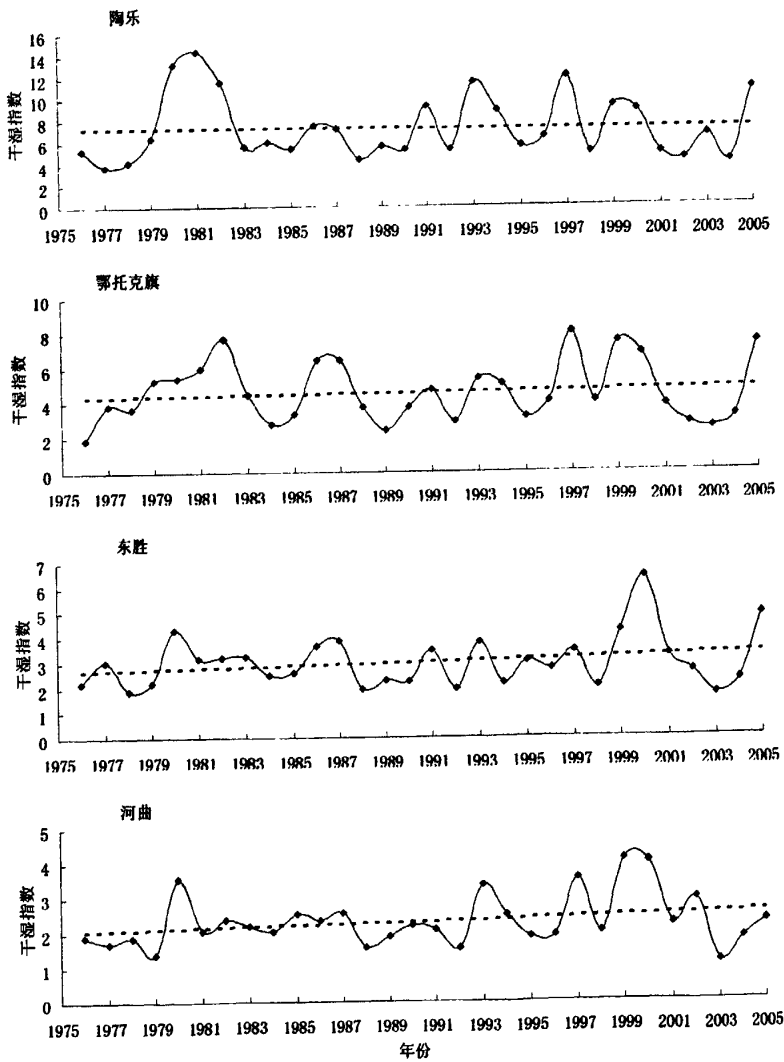


图 2-9 鄂尔多斯高原周围四个气象站点干湿指数的变化趋势

Fig 2-9 The trend of aridity/humidity index of four meteorological stations around Ordos Plateau

表 2-2 鄂尔多斯高原周围四个气象站点不同时段平均干湿指数

Table 2-2 Aridity/humidity index of four meteorological stations around Ordos Plateau at different temporal scales

|      | 30 年均值 | 1976-1990 年 | 1991-2005 年 |
|------|--------|-------------|-------------|
| 陶乐   | 7.2    | 7           | 7.5         |
| 鄂托克旗 | 4.6    | 4.5         | 4.7         |
| 东胜   | 3      | 2.8         | 3.2         |
| 河曲   | 2.3    | 2.1         | 2.5         |

2.4.2 人类活动特征

人类活动涵盖面较为广泛，其具体层面可以包括人口特征、经济特征、人们生产生活方式以及政策、制度等等。然而在这些具体层面中，一些层面是可以用统计指标来放映其变化情况，如人口、经济、生产生活等；而一些层面是很难用相关的统计指标或者缺少相关的统计指标来衡量，如人们的认识水平、政府的政策与制度等。我们对可以利用统计指标衡量的人类活动特征称为人类活动的显性层面，对于难以利用统计指标衡量的人类活动特征称为人类活动的隐性层面。对于显性层面的分析，采用全区统计数据的总和的年际变化图表来反映人类活动特征；而对于隐性层面的分析，采用引证描述的方法进行论述。

2.4.2.1 人类活动的显性层面

为了反映近 30 年鄂尔多斯高原人类活动特征在显性层面的变化，我们选取总人口、农牧民人均收入两个指标分别从人口、经济方面来说明人类活动特征的变化；选择牲畜数量、土地利用方式从生产生活方面来说明人类活动特征的变化。其中对于农牧民人均收入指标，我们利用以 1978 年为基年计算的每年的商品零售价格指数对当年的农牧民人均收入进行重新换算，使其变化趋势不受物价变化的影响。为了统一各种牲畜对草地破坏的影响，牲畜数量的计算以羊单位来统计，主要是大牲畜和羊的总和，其中大牲畜折合 5 个羊单位，而羊本身折合 1 个羊单位。鄂尔多斯高原土地利用方式的统计数据主要是通过对 1980、1990、2000 以及 2005 年鄂尔多斯高原 1：10 万土地利用图的一级分类数据的统计。

图 2-10 为近 30 年鄂尔多斯高原人口、农牧民人均收入以及牲畜数量的变化。鄂尔多斯高原人口呈持续增加的态势，一方面人口的增加势必加重对生态环境的压力，

如过度的开垦、樵采以及过度的水资源都会导致沙漠化的发展；而另一方面，人口数量的增加带来的影响还需从人口结构、政策、制度的变化背景下进行综合评价，如合理的生态保护政策能规范人类活动行为，减弱人类活动对生态环境的负面影响。鄂尔多斯高原农牧民人均收入的变化也呈增加的态势，特别是上世纪 90 年代中期以后，其增加幅度较 90 年代中期以前有较大的提高。农牧民收入的变化可以从侧面反映农牧民生产生活方式对宏观经济变化做出的响应与改变，也能进一步反映其对生态环境的影响。在近 30 年的过程中，农牧民收入来源从单一的放牧、耕作而逐步的走向多元化，收入多元化的结果势必导致传统生产生活方式的改变，从而进一步影响农牧民对生态环境的行为。牲畜数量是体现农牧交错带人类活动对生态环境压力的一个重要指标。放牧活动作为农牧交错带农牧民的最重要的生产活动，由于受传统放牧习俗的影响以及长期缺乏合理政策的约束，使得过牧成为沙漠化最重要的原因之一。然而，相关制度的建立以及政策的引导，能规范农牧民的放牧行为，从而降低畜牧业对生态环境的压力。根据图 12，从近 30 年鄂尔多斯高原的牲畜数量变化上看，2000 年以前变化不是特别明显，而 2000 年后则呈明显增加的态势。由于 2000 年后鄂尔多斯市政府出台了关于禁牧、休牧以及舍饲圈养的相关规定与政策，使得牲畜舍饲圈养迅速发展，致使 2000 后牲畜数量显著增加。因此，合理评价牲畜数量增加对沙漠化的影响还需综合考虑政策、制度等因素的影响。土地利用是人们生产生活方式的一个综合反映，也是沙漠化的一个重要驱动因素。不合理的土地利用方式和结构容易造成沙漠化的发展，而也可以通过规范人们的土地利用方式或者调整土地利用结构来促进沙漠化的逆转。表 2-3 为 1980、1990、2000 和 2005 年鄂尔多斯高原一级土地利用类型的面积变化情况。根据表 2-3，近 30 年来鄂尔多斯高原土地利用结构基本没有发生变化，其中以草地和未利用地的比例最大，其面积总和占总土地面积的 85%以上；以林地的比例最小，不到 2%。1980-2005 年，鄂尔多斯高原的林地和城乡建设用地的面积逐渐增加，而未利用土地面积逐渐的减少，其余土地类型的面积在不同年份之间的变化情况不相一致。耕地在 1980-1990 年间明显增加，而在 1990-2000 年间又相对减少，这可能与 1990 年后原伊克昭盟的相关土地政策有关。2000-2005 年，耕地面积基本没有变化。草地是鄂尔多斯高原最大的土地利用类型，其面积相对较为稳定，然而不同年份之间，不同覆盖度的草地面积变动较大。水域面积在不同年份之间也存在波动，这可能是由于在做遥感解译时一些季节性河流和湖泊面积的变化所造成的。

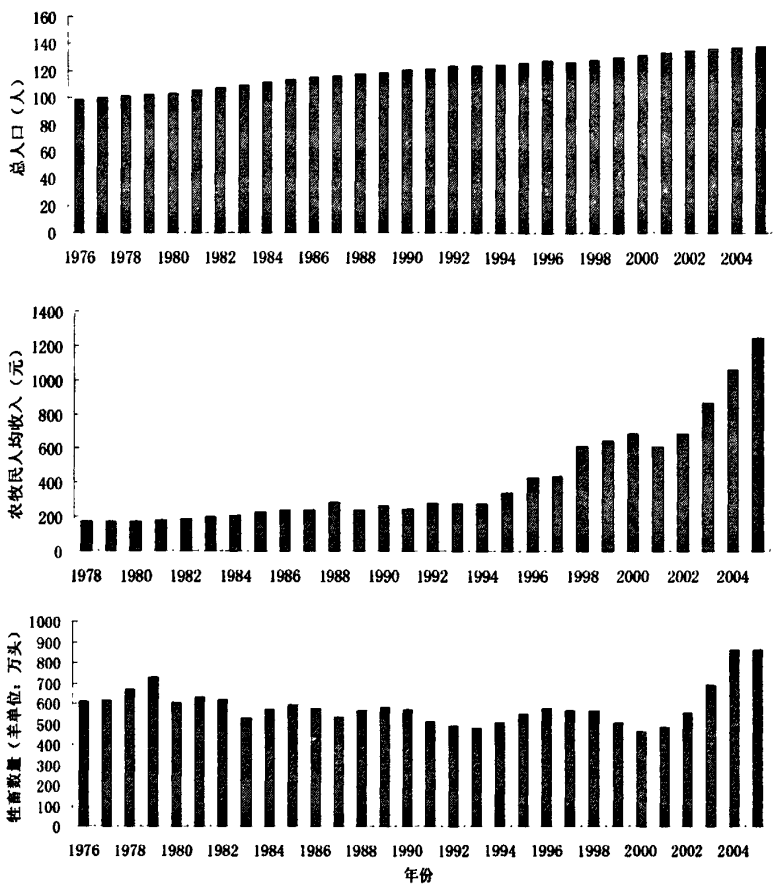


图 2-10 鄂尔多斯高原总人口、农民人民收入和牲畜数量的变化

Fig 2-10 The change population, the income of farmers and livestock number of Ordos Plateau

表 2-3 1980、1990、2000 和 2005 年鄂尔多斯高原各土地利用类型面积（单位：km2）

Table 2-3 The area of each land use type of Ordos Plateau in 1980、1990、2000 and 2005 (unit: km<sup>2</sup>)

|      | 耕地    | 林地    | 草地     | 城乡用地 | 未利用地   | 水域    |
|------|-------|-------|--------|------|--------|-------|
| 1980 | 423.2 | 128.4 | 5308.1 | 66.1 | 2546.4 | 216.5 |
| 1990 | 493.3 | 134.1 | 5256.6 | 78.4 | 2523.8 | 202.4 |
| 2000 | 460.0 | 146.9 | 5327.6 | 79.8 | 2466.3 | 208.0 |
| 2005 | 464.3 | 147.2 | 5326.9 | 79.8 | 2462.5 | 207.9 |

2.4.2.2 人类活动的隐性层面

人们的认识水平、政府的政策与制度等人类活动的隐性层面在不仅在小尺度上决

定了其实施区人民的生产生活行为,而且在大尺度上影响其实施区产业结构布局以及经济发展等方面。不论这些小尺度或大尺度上做出的改变,都会对生态环境造成直接的影响。面对日益恶化的生态环境以及沙漠化问题,鄂尔多斯人民对生态问题的认识水平不断提高,相应生态保护与沙漠化防治的制度在不断健全 1978 年,伊克昭盟党委提出“以牧为主”的方针,在全区率先推行了“草畜双承包”的生产责任制度,推动了草原生态建设。1980 年,伊克昭盟党委召开了全盟以“柠条”为重点的草原建设会议,提出了植被建设是伊盟最大的基本建设的战略决策,做出了《关于建设以柠条为重点的灌木草场的决定》。1981 年,伊盟党委做出每年种树、种草、种柠条各 100 万亩的决定。1982 年,伊盟党委出台了《关于“三种五小”的建设》,使“以牧为主”的方针得到具体深入贯彻。1986 年,伊盟党委发布了《关于树立大牧业观念,进一步落实“林牧为主、多种经营”的经济建设方针的意见》,明确要求立草为业,科学养畜,发展商品经济,走效益畜牧业的路子。1991 年,伊盟党委做出了《丘陵沟壑区实施“两翼一体”战略的决定》,将植被建设作为“一翼”,把草原建设放在重要位置,并在四大类区实施各具特色的工程建设,加快了植被建设进度。1995 年,伊盟党委做出了《关于进一步加强植被建设的决定》,成立了植被建设办公室,负责全盟的植被建设工作。2000 年,伊盟党委做出《建设绿色大盟、畜牧业强盟的决定》,要求东部的准、达、东、伊 4 旗(区)全面禁牧;西部的鄂、杭、乌、鄂前 4 旗生态项目区禁牧和季节性禁牧,实施舍饲养畜和半舍饲养畜,植被恢复效果明显。2001 年起,城郊经济区、水保经济区、高效农牧业经济区全面禁牧,实行舍饲养畜。决定还要求全面实行“退耕还林还草”。政策、制度的出台需要良好的监管与实施才能体现其效果。然而,人的主观能动性决定了政策、制度实施效果也具有两面性,因此,还需对其相关政策与制度进行合理地评价。

## 本章小结

本章从气候与水文、地形与地貌、土壤与植被以及社会经济状况等方面对研究区——鄂尔多斯高原进行了系统的介绍。在介绍鄂尔多斯高原沙漠化问题以及分析沙漠化过程驱动力系统的基础上,对鄂尔多斯高原近 30 年来的气候变化和人类活动特征进行系统的研究。主要的成果与结论有:

- 1、鄂尔多斯高原降雨从东到西逐渐减少,降雨的年际波动较大,而春季降雨的年际波动相对较小且近 30 年呈略微增加的趋势。

- 2、近 30 年来鄂尔多斯高原年平均温度呈增加的趋势,年均温度距平的变化表明从 1976-1990 年鄂尔多斯高原的气温普遍低于多年平均值,属于低温期;而从

1990-2005 年鄂尔多斯高原的气温普遍高于多年均值, 属于高温期。

3、鄂尔多斯高原春季平均风速大于年均风速, 1976-1990 年鄂尔多斯高原的风力条件逐渐减小, 而 1990 年后鄂尔多斯高原不同地区的风力条件的变化趋势却不相一致。

4、1976-2005 年间, 鄂尔多斯高原年总太阳辐射呈整体降低的趋势。

5、1991-2005 年时段内鄂尔多斯高原干湿指数的均值相对较高, 表明 1990 年后, 鄂尔多斯高原的气候趋于暖干化。

6、1976-2005 年间, 鄂尔多斯高原总人口和农牧民人均收入均呈增加的趋势, 而牲畜数量的年际波动较大, 鄂尔多斯高原土地利用结构基本没有变化, 然而不同时期各土地利用类型的面积有所变化; 鄂尔多斯(伊克昭盟)政府相继出台了若干生态保护的政策, 体现了人类活动对沙漠化逆转过程的影响。

## 第三章 鄂尔多斯高原沙漠化定量监测及时空演变

沙漠化监测是一切从宏观角度研究沙漠化问题的基础。沙漠化监测本身作为一个科学问题包含三个层次的内容,即沙漠化的定义、沙漠化监测指标以及沙漠化评价方法。对于沙漠化的定义,尽管目前还存在分歧,但是国内大多数学者倾向于接受基于联合国粮农组织对荒漠化定义的基础上由朱震达、王涛等人提出的沙漠化定义。本研究对沙漠化的定义也采取该定义,即“沙漠化是干旱、半干旱及部分半湿润地区由于人地关系不相协调所造成的以风沙活动为主要标志的土地退化”(王涛和朱震达,2003)。在此基础上,本章主要针对沙漠化监测指标与评价方法两个方面,提出基于 Landsat 数据的沙漠化定量监测体系,进而对鄂尔多斯高原沙漠化的时空演变进行分析。

### 3.1 沙漠化定量监测指标体系的确定

沙漠化评价是通过沙漠化监测指标体系来实现的。沙漠化监测指标体系是研究沙漠化的基础,是衡量沙漠化扩展程度和变化态势的有效途径。沙漠化指标体系是各种能反映沙漠化状况的指标因子的集合,而这些指标必须具有代表性和实用性。

目前,在中国北方的沙漠化研究中使用最为广泛的沙漠化监测指标体系是国家重点基础研究发展计划(973 计划)“中国北方沙漠化过程及其防治”中提出的中国北方沙漠化土地分类分级体系(表 3-1)(王涛等,2003、2004)。然而在该指标体系中,仍有不少监测或评价指标是偏定性的,这需要监测人员对监测区的下垫面情况十分了解,而且能够准确地按照指标体系的要求来划分沙漠化等级。在这种情况下,一方面对监测人员的要求较高,工作量大;另一方面容易引入人为方面的误差,可重复性较弱。基于这些问题,本研究提出的沙漠化定量监测指标体系是希望在已有的指标体系的基础上,通过监测指标的再选择,构建适用于沙漠化定量监测评价的新的指标体系(图 3-1)。参照中国北方沙漠化土地分类体系,本研究将沙漠化分为五个等级:非沙漠化、轻度沙漠化、中度沙漠化、重度沙漠化和严重沙漠化。

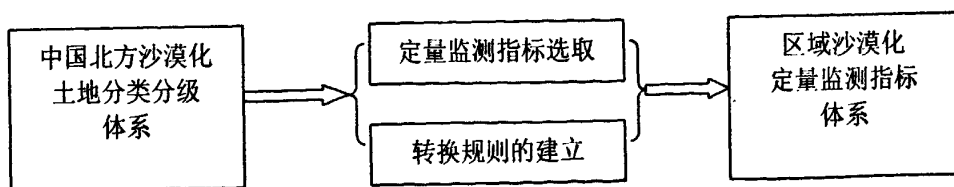


图 3-1 沙漠化定量监测指标体系建立过程示意图

Fig 3-1 The process of building the indicator system for sandy desertification monitoring

表 3-1 中国北方沙漠化土地分类分级表（王涛等，2003、2004）

Table 3-1 The classification system of sandy desertification in north China (wang et al., 2003, 2004)

| 沙漠化程度    | 沙丘活化或流沙入侵                                  | 灌丛沙漠化                                     | 砾质沙漠化（地表粗化）                        | 风蚀劣地化                                | 旱作农田耕地沙漠化                                    |
|----------|--------------------------------------------|-------------------------------------------|------------------------------------|--------------------------------------|----------------------------------------------|
| 分布区域     | 我国东部各沙地；西部沙漠边缘或深入沙漠的河流沿岸                   | 我国西部沙漠和东部沙地的外缘；内蒙古高原中部                    | 戈壁的外缘；内蒙古高原中西部                     | 新疆罗布泊、阿尔金山东侧雅丹分布区的外围；内蒙古高原南部（河北坝上）   | 东部草原农垦区；黄土高原北部                               |
| 原始状态     | 固定沙丘或绿洲草地、农田                               | 干草原或荒漠草原、草原化荒漠                            | 荒漠草原或草原化荒漠                         | 干草原或荒漠草原、草原化荒漠                       | 旱作农田                                         |
| 潜在和轻度沙漠化 | 沙丘迎风坡出现风蚀坑；流沙斑点状分布，面积5-25%；植被为原始盖度的90%以上   | 灌丛生长茂盛；灌丛下出现流沙堆积，并形成各种形态的沙嘴               | 砾石在地表开始明显富集                        | 地表出现风蚀浅坑，但尚未有明显陡坎                    | 春季垄沟有少量积沙，耕耨有明显的风蚀痕迹                         |
| 中度沙漠化    | 沙丘呈现明显的风蚀坡和落沙坡分异；流沙面积25-50%；植被盖度为原始的50-90% | 灌丛有叶期仍不能覆盖整个沙堆；灌丛沙堆迎风侧显现流沙；沙堆间平地有浮沙或出现砾质化 | 地面布满粗沙砾石，但仍有稀疏植被，草群盖度>25%，总景观为砾质草场 | 风蚀坑大部分裸露，地面出现明显的小型陡坎                 | 黄土质耕地明显出现小片流沙；风蚀耕地明显低下，土壤腐殖质层风蚀厚度超过50%       |
| 重度沙漠化    | 沙地成为半流动状态，流沙面积超过50%，植被盖度小于原始状态的50%         | 灌丛开始大片死亡；盖度小于25%，流沙面积超过50%                | 地面完全为砾石覆盖，砾石间少有沙粒，植被盖度10-25%       | 地面出现风蚀残墩、风蚀残丘的低级形态，之间平地有零星草被，砾质化耕地弃耕 | 风蚀耕地腐殖质层几乎蚀净，出露钙积层或土壤母质；沙漠化耕地流沙面积超过25%，大部分弃耕 |
| 严重沙漠化    | 流动沙丘地；植被盖度<10%                             | 流动起伏沙地；植被盖度<10%                           | 戈壁；植被盖度<10%                        | 雅丹                                   | 平沙地或砾石地；植被盖度<10%                             |

### 3.1.1 沙漠化定量监测指标选取的原则

根据图 3-1, 本研究中沙漠化定量监测指标体系是在中国北方沙漠化土地分类分级体系的基础上, 进行重新的指标选择与体系建立。定量监测指标体系需要在遵循中国北方沙漠化土地分类分级体系指标选择原则的同时, 也需要遵循定量监测方面的相关原则。概括起来有以下几个方面:

**代表性:** 沙漠化引起的地表特征变化十分复杂, 因此沙漠化定量监测选取的指标应能都全面代表沙漠化引起的地表特征变化;

**可反演性:** 由于沙漠化定量监测完全基于遥感影像, 因此选取的指标应该能通过遥感反演而得到;

**可靠性:** 与指标有关的数据或信息应该是可靠的, 可利用的, 易于更新的;

**简洁性:** 沙漠化定量监测指标体系应通过尽可能少的指标反映尽可能多的沙漠化特征;

**敏感性:** 选取的指标应该对土地沙漠化的变化较为敏感;

**差异性:** 沙漠化监测指标体系的选择不论在中尺度或者大尺度上, 应该体现区域差异对指标体系的影响。差异性的直接体现在于在一定研究尺度下, 区域内部同质性单元之间相同沙漠化等级的指标阈值有所差别。

### 3.1.2 沙漠化定量监测指标体系的建立

本研究首先从指标的代表性入手, 根据沙漠化过程引起的地表特征变化, 选取可用于定量监测的指标。归纳总结前人关于沙漠化过程的研究, 沙漠化过程引起的地表特征变化主要可以分为四个方: 地表植被丰度 (姚洪林等, 2001; 赵哈林等, 2002; 魏兴琥等, 2007; 蒋德明等, 2008; Zhao et al., 2006; Su et al., 2007)、地表植被格局 (赵存玉和王涛, 2005; 魏兴琥等, 2007; 蒋德明等, 2008; Li et al., 2006; Hanafi and Jauffret, 2008)、土壤质量 (赵哈林等, 2002; 蒋德明等, 2008; 靳虎甲等, 2008; 徐丽恒等, 2008; Zhao et al., 2006; Su et al., 2007) 以及地表微气候条件 (魏文寿, 2000; 慈龙骏和杨晓辉, 2004; Li et al., 2000; Asner and Heidebrecht, 2005)。沙漠化过程引起的土壤质量变化十分复杂, 主要体现在土壤有机质、氮、磷等营养元素的流失 (赵哈林等, 2002; 蒋德明等, 2008; Zhao et al., 2006; Su et al., 2007), 虽然目前利用遥感技术反演土壤理化参数取得了较大的进展, 但是主要集中于实验室分析, 野外光谱以及星载高光谱技术的反演仍然存在较大误差且容易受地表植被的影响 (孙建英等, 2006; 贺军亮等, 2007; 卢艳丽等, 2007; Palacios-Orueta et al., 1998, 1999; Ben-Dor E, Inbar and Chen, 1997; Barnes et al., 2003; Chen et al., 2004; Pinet et al., 2006), 其结

果尚难以应用于实际的沙漠化评价。因此,考虑到目前沙漠化监测体系,特别是基于遥感的指标体系多从地表显性特征的变化入手,本研究从地表植被丰度、地表植被格局和地表微气候条件变化三个方面来选取沙漠化定量监测指标。

地表植被丰度的变化主要体现在植被密度、盖度以及生物量的变化,随着沙漠化程度的加剧,植被丰度逐渐减小。植被丰度可用植被指数如归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)、土壤调节植被指数(Soil Adjusted Vegetation Index, SAVI)、改进的土壤调节植被指数(Modified SAVI, MSAVI)等来评价(龙晶, 1998; 李宝林和周成虎, 2002; Tucker et al., 1991; Tripathy et al., 1996; Nicholson et al., 1998; Geerken and Ilaiwi, 2004; Liu et al., 2005)。也可以通过基于植被指数建立的生物量、植被盖度预测模型,通过预测的生物量与植被盖度来评价(刘广峰等, 2007; 霍艾迪等, 2008)。

地表植被格局的变化主要体现在沙漠化正、逆过程引起的植被、裸地以及流沙等元素空间配置的变化。地表植被格局的变化可以通过一些景观格局指数来评价。Sun等利用景观连接度指数(landscape connectivity index)对民勤地区的沙漠化进行了评价(Sun et al., 2007); Tanser等提出了一种基于遥感的多样性指数—滑动标准差指数(Moving Standard Deviation Index, MSDI)用于评价土地退化引起的异质性问题(Tanser and Palmer, 1999); Jafari等将MSDI用于南澳大利亚土地退化问题的评价中,并认为该指数能很好地应用于土地退化评价(Jafari et al., 2008)。

地表微气候条件的变化主要体现在沙漠化正、逆过程引起的地表反照率、温度、水分等微气候条件的变化。随着沙漠化的发展,地表流沙裸露面积逐渐增大,地表反照率逐渐增加(Charney et al., 1977; Li et al., 2000)。由于反照率的变化使得地表能量平衡被打破(刘立超等, 2004),进而导致地表温度和水分条件的变化。地表微气候条件是很好的沙漠化监测指标,反照率(Albedo)、地表温度(Land Surface Temperature, LST)以及土壤水分常用于沙漠化的监测与评价(曾永年等, 2005; 马金辉等, 2007; Tripathy et al., 1996; Lira, 2004; Liu et al., 2005; Sun et al., 2005)。

遵循沙漠化定量监测指标选取的原则,考虑到本研究两种不同传感器(TM/ETM+和MSS)的波段设置问题,为了保证不同传感器反演指标的一致性(例如MSS缺少热红外波段,难以反演地表温度与水分),本研究选取NDVI, MSDI和Albedo三个指标分别代表地表植被丰度、地表植被格局和地表微气候条件三个方面来对沙漠化进行定量监测与评价。

3.1.3 沙漠化定量监测指标的反演

3.1.3.1 遥感影像的选择

美国国家航空航天局（National Aeronautics and Space Administration, NSAS）的陆地卫星（Landsat）计划从 1972 年 7 月 23 日以来，已发射 7 颗（第六颗发射失败）卫星，其获得的遥感影像数据广泛应用于全球生态环境的变化。特别是针对历史时期（2000 年以前）、长时间序列的生态环境监测，Landsat 数据更具有不可替代的作用。本研究选取 Landsat 数据用于长时间序列的沙漠化监测研究。

目前，Landsat1-4 均相继失效，Landsat5 仍在超期运行（从 1984 年 3 月 1 日发射至今），Landsat7 于 1999 年 4 月 15 日发射升空。Landsat 卫星搭载的传感器主要有 MSS（Multi Spectral Scanner, MSS；搭载于 Landsat1-4），TM（Thematic Mapper, TM；搭载于 Landsat4/5）和 ETM+（Enhanced Thematic Mapper Plus, ETM+；搭载于 Landsat7）。其各自波段设置范围及空间分辨率等参数如表 3-2 所示：

表 3-2 Landsat 相关参数设置

Table 3-2 The parameters of Landsat

| 传感器  | 波段                              | 波长范围/ $\mu\text{m}$ | 空间分辨率/m |
|------|---------------------------------|---------------------|---------|
| MSS  | MSS-4/1 (Landsat4-5/Landsat1-3) | 0.5-0.6             | 78      |
|      | MSS-5/2 (Landsat4-5/Landsat1-3) | 0.6-0.7             | 78      |
|      | MSS-6/3 (Landsat4-5/Landsat1-3) | 0.7-0.8             | 78      |
|      | MSS-7/4 (Landsat4-5/Landsat1-3) | 0.8-1.1             | 78      |
| TM   | 1                               | 0.45-0.53           | 30      |
|      | 2                               | 0.52-0.60           | 30      |
|      | 3                               | 0.63-0.69           | 30      |
|      | 4                               | 0.76-0.90           | 30      |
|      | 5                               | 1.55-1.75           | 30      |
|      | 6                               | 10.40-12.50         | 120     |
|      | 7                               | 2.08-2.35           | 30      |
| ETM+ | 1                               | 0.45-0.515          | 30      |
|      | 2                               | 0.525-0.605         | 30      |
|      | 3                               | 0.63-0.69           | 30      |
|      | 4                               | 0.75-0.90           | 30      |
|      | 5                               | 1.55-1.75           | 30      |
|      | 6                               | 10.40-12.50         | 60      |
|      | 7                               | 2.09-2.35           | 30      |
|      | 8                               | 0.52-0.90           | 15      |

本研究选取能代表 1980、1990、2000 和 2005 年四个时期的覆盖鄂尔多斯高原的 Landsat 数据进行沙漠化监测（表 3-3）。由于历史数据相对难以获取的原因，一些数据的日期位于研究年的前后，由于研究的时间间隔较长，我们认为其能代表研究年前后的一个整体状况。所有数据质量较高，均无云覆盖。

表 3-3 本研究沙漠化监测的遥感数据源

| Table 3-3 Landsat data used in this study for sandy desertification monitoring |      |                                                                                                                                                                  |
|--------------------------------------------------------------------------------|------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 年代                                                                             | 传感器  | 轨道号（行/列）与日期                                                                                                                                                      |
| 1980                                                                           | MSS  | MSS137/32 1979/01/09; MSS137/33 1978/19/08; MSS138/32 1977/16/08; MSS138/33 1977/09/10; MSS138/34 1978/20/08; MSS139/32 1977/20/09; MSS139/33 1979/09/10.        |
| 1990                                                                           | TM   | TM127/32 1990/13/08; TM127/33 1989/11/09; TM128/32 1991/07/08; TM128/33 1988/15/09; TM128/34 1991/23/08; TM129/32 1989/24/08; TM129/33 1991/30/08.               |
| 2000                                                                           | ETM+ | ETM+127/32 2000/13/06; ETM+127/33 2000/06/08; ETM+128/32 2000/11/11; ETM+128/33 2000/11/11; ETM+128/34 1999/22/09; ETM+129/32 2000/11/06; ETM+129/33 1999/12/08. |
| 2005                                                                           | TM   | TM127/32 2005/03/06; TM127/33 2005/03/06; TM128/32 2005/10/06; TM128/33 2005/10/06; TM128/34 2005/10/06; TM129/32 2005/17/06; TM129/33 2005/17/06.               |

3.1.3.2 指标反演方法

（1）归一化植被指数（NDVI）

植被指数（Vegetation Index），又称光谱植被指数，是指由遥感传感器获取的多光谱数据，经过线性和非线性组合而构成的对植被有一定指示意义的各种数值。在植被指数中，通常选用对绿色植物（叶绿素引起的）强吸收的可见光红光波段（0.6-0.7  $\mu\text{m}$ ）和对绿色植物（叶内组织引起的）高反射和高投射的近红外波段（0.7-1.1  $\mu\text{m}$ ）。由于它们对同一生物物理现象的光谱响应截然相反，形成的明显反差，这种反差随着叶冠结构、植被覆盖度而变化，因此可以对它们用比值、差分、线性组合等多种组合来增强或揭示来隐含的植被信息。

归一化植被指数（NDVI）被定义为近红外波段与可见光红波段数值之差和这两个波段数值之和的比值。在植被遥感中，NDVI 的应用最为广泛，不仅因为 NDVI 与植被生长状态的相关因子如植被覆盖度、生物量、叶面积指数以及光合作用参数等有密切的关系，而且 NDVI 经比值处理，可以部分消除与太阳高度角、卫星观测角、地形、云、阴影和大气条件有关的辐照度条件变化（大气程辐射）等的影响（赵英时，

2003)。在本研究中, NDVI 的计算如公式 所示:

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_R}{\rho_{NIR} + \rho_R} \quad (1)$$

其中  $\rho_{NIR}$  和  $\rho_R$  分别代表近红外和红光波段的地表反照率。

### (2) 滑动标准差指数 (MSDI)

沙漠化引起的景观或植被格局变化在本研究中用滑动标准差指数 (MSDI) 来衡量。MSDI 的构建同样基于遥感影像本身, 在选择特征波段的基础上, 利用一个滑动窗口来计算该窗口内象元值的标准差, 然后将计算得的标准差值, 即滑动标准差指数赋予位于窗口中心的象元, 以此类推对整个特征波段进行计算, 从而得到特征波段的滑动标准差指数图。根据标准差的定义, 滑动标准差指数的生态意义可以理解为沙漠化正、逆过程中造成的景观或植被异质性的变化。在本研究中, 选取红光波段为特征波段, 使用  $3 \times 3$  的滑动窗口来计算滑动标准差指数。计算公式如下:

$$MSDI = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (DN_i - \overline{DN})^2}{N}} \quad (2)$$

其中,  $DN_i$  为滑动窗口中第  $i$  个象元的 DN 值;  $\overline{DN}$  为滑动窗口所有象元 DN 值的均值;  $N$  为滑动窗口中的象元个数, 本研究中  $N=9$ 。

### (3) 地表反照率 (Albedo)

地表反照率是太阳辐射被地表反射的比率, 是地表能量平衡的重要参数, 也是对生物圈和气候过程产生影响的重要参数。在一般应用中, 地表反照率指的是一个宽带。对多波段遥感的某个谱段而言, 称为谱反照率 (Spectral albedo), 是指向整个半球的反射。

地表反照率作为整个太阳光谱的半球反射积分值, 随时空变化而变化。其变化特性常用于下垫面特征变化的监测。沙漠化的正、逆过程造成不同等级的沙漠化土地地表反照率的明显差异是用反照率监测沙漠化状况的基础。基于遥感影像的地表反照率的反演方法主要分为两类, 一类是建立实测值与影像 DN 值之间的回归关系, 进而通过回归方程将 DN 值转换为地表反照率; 另一类是根据辐射传输模型, 通过确定一系列参数来对原始影像进行辐射、大气校正以得到地表面波段反照率, 在此基础上, 通过相应的经验公式将单波段反照率转换为谱反照率, 即地表反照率。由于第一类方法涉及大量野外实测数据, 而本研究选用的遥感影像特别是 MSS 多为历史时期的数据,

缺乏实测值, 因此只能采用第二类方法通过模型来反演地表反照率。

大气校正作为反演地表反照率的核心, 目前已有许多大气校正模型如基于详细物理过程的 6S、MODTRAN 等, 以及半过程半经验的校正模型如基于影像自身的大气校正模型 COST 等。由于 6S、MODTRAN 等模型涉及大量物理参数, 除涉及影像自身的一些参数易于获取外, 一些涉及区域气候的参数如实际大气温湿廓线, 气溶胶分布等较难获取。因此, 本研究采用半过程半经验的大气校正模型 COST 来进行大气校正 (Chavez, 1988、1996)。该模型采用暗目标 (象元) 法, 从遥感影像自身信息直接估算大气中的水汽和气溶胶的空间分布。COST 模型基于以下的理论假设: 一是每一波段均存在反射率为 1% 的黑体辐射, 黑体辐射值取决于大气顶层的太阳辐照度; 二是大气性质是均一的, 传感器每一波段的最小辐射亮度值除黑体辐射影响外, 主要还有大气分子的瑞利散射和气溶胶的米氏散射和反射作用的影响。其概念模型可以概括为以下三个步骤: 一是将传感器记录的 DN 值转换为遥感器的光谱辐射值, 即根据遥感器的增益与偏置进行传感器定标; 而是将遥感器的光谱辐射值转换为遥感器的相对反射值; 三是消除因大气吸收和散射造成的大气影响, 即大气纠正, 同时计算地表象元的反射率 (李玉环等, 2005)。

根据太阳辐射和大气传输原理与过程, COST 模型地表反射率反演的数学模型可综合表达为:

$$\rho = \frac{\pi \times D^2 \times (L_{\lambda sat} - L_{\lambda haze})}{E_{SUN\lambda} \times \cos^2 \theta_s} \quad (3)$$

其中,  $\rho$  为地面反射率;  $D$  为日地天文距离 (天文单位);  $L_{\lambda sat}$  为传感器入瞳处光谱辐射值 ( $W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}$ );  $L_{\lambda haze}$  为大气程辐射值 ( $W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}$ );  $E_{SUN\lambda}$  为大气顶层的太阳平均光谱辐射, 即大气顶层太阳辐照度 ( $W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}$ );  $\theta_s$  为太阳天顶角。

模型中的相关参数可以通过以下途径获取: 日地天文距离  $D$  的计算可以采用以下公式:

$$D = 1 - 0.01674 \times \cos(0.9856 \times (JD - 4) \times \pi / 180) \quad (4)$$

其中  $JD$  为儒略日 (Julian Day), 指由公元前 4713 年 1 月 1 日, 协调世界时中午 12 时开始所经过的天数, 其计算过程较为复杂, 可以通过相关的软件或网上公开的儒略日换算界面获得 ([http://wise-obs.tau.ac.il/~eran/Wise/Util/Julian\\_Day.html](http://wise-obs.tau.ac.il/~eran/Wise/Util/Julian_Day.html) 特拉维夫大学儒略日换算界面)。

传感器入瞳处光谱辐射值  $L_{\lambda sat}$  的计算是通过辐射定标公式 (公式 5) 将影像的原始 DN 值转换为辐射值。其中增益系数  $GAIN_{\lambda}$  ( $W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}$ ) 和偏置量  $BIAS_{\lambda}$

( $W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}$ ) 由相应波段的最大辐射值  $L_{max \lambda}$  ( $W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}$ ) 和最小辐射值  $L_{min \lambda}$  ( $W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}$ ) 计算而得。 $QCAL_{max}$  为波段的最大 DN 值, 对于所有 TM/ETM+数据, 该值取 255; 对于 MSS 数据, 除 1979 年 2 月 1 日前获得的第四波段以及 1982 年 10 月 22 号前处理的第四波段该值取 63 外, 其余均取 128。 $L_{max \lambda}$  和  $L_{min \lambda}$  以及均由 NASA 官方提供或从遥感影像头文件获取。表 3-4 和表 3-5 分别列出了 MSS 和 TM/ETM+的  $L_{max \lambda}$  和  $L_{min \lambda}$  的参考数据。

$$L_{\lambda sat} = GAIN_{\lambda} \times DN + BIAS_{\lambda} \tag{5}$$

$$GAIN_{\lambda} = (L_{max \lambda} - L_{min \lambda}) / QCAL_{max} \tag{6}$$

$$BIAS_{\lambda} = L_{min \lambda} \tag{7}$$

表 3-4 MSS 影像 Lmin 和 Lmax 的取值参考表

Table 3-4 The referenced Lmin and Lmax for Landsat MSS

| 卫星                  | MSS1/4            |                   | MSS2/5            |                   | MSS3/6            |                   | MSS4/7            |                   |
|---------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| 时间                  | Lmin <sub>λ</sub> | Lmax <sub>λ</sub> | Lmin <sub>λ</sub> | Lmax <sub>λ</sub> | Lmin <sub>λ</sub> | Lmax <sub>λ</sub> | Lmin <sub>λ</sub> | Lmax <sub>λ</sub> |
| Landsat-1           |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |
| 所有时间                | 0.0               | 248.0             | 0.0               | 200.0             | 0.0               | 176.0             | 0.0               | 153.0             |
| Landsat-2           |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |
| <7/16/75            | 10.0              | 210.0             | 7.0               | 156.0             | 7.0               | 140.0             | 5.0               | 138.0             |
| ≥7/16/75            | 8.0               | 263.0             | 6.0               | 176.0             | 6.0               | 152.0             | 4.0               | 130.0             |
| Landsat-3           |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |
| <6/1/78             | 4.0               | 220.0             | 3.0               | 175.0             | 3.0               | 145.0             | 1.0               | 147.0             |
| ≥6/1/78             | 4.0               | 259.0             | 3.0               | 179.0             | 3.0               | 149.0             | 1.0               | 128.0             |
| Landsat-4           |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |
| <8/26/82            | 2.0               | 250.0             | 4.0               | 180.0             | 4.0               | 150.0             | 3.0               | 133.0             |
| 8/26/82-<br>3/31/83 | 2.0               | 230.0             | 4.0               | 180.0             | 4.0               | 130.0             | 3.0               | 133.0             |
| ≥4/1/83             | 4.0               | 238.0             | 4.0               | 164.0             | 5.0               | 142.0             | 4.0               | 116.0             |
| Landsat-5           |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |
| <4/6/84             | 4.0               | 240.0             | 3.0               | 170.0             | 4.0               | 150.0             | 2.0               | 127.0             |
| 4/6/84-<br>11/8/84  | 3.0               | 268.0             | 3.0               | 179.0             | 4.0               | 159.0             | 3.0               | 123.0             |
| ≥11/9/84            | 3.0               | 268.0             | 3.0               | 179.0             | 5.0               | 148.0             | 3.0               | 123.0             |

a)  $L_{min \lambda}$  和  $L_{max \lambda}$  的单位为:  $W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}$ ;  
b) Landsat-1/2/3 的日期为影像处理日期; Landsat-4/5 的日期为影像获取日期

表 3-5 TM/ETM+影像  $L_{min}$  和  $L_{max}$  的取值参考表

Table 3-5 The referenced  $L_{min}$  and  $L_{max}$  for Landsat TM/ETM+

| 卫星   | TM(03/01/84-05/04/03)         |                  | TM(05/04/03 - )  |                  | ETM+             |                  |
|------|-------------------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| 波段   | $L_{min\lambda}$ <sup>a</sup> | $L_{max\lambda}$ | $L_{min\lambda}$ | $L_{max\lambda}$ | $L_{min\lambda}$ | $L_{max\lambda}$ |
| 1    | -1.52                         | 152.10           | -1.52            | 193.00           | -6.20            | 191.60           |
| 2    | -2.84                         | 296.81           | -2.84            | 365.00           | -6.40            | 196.50           |
| 3    | -1.17                         | 204.30           | -1.17            | 264.00           | -5.00            | 152.90           |
| 4    | -1.51                         | 206.20           | -1.51            | 221.00           | -5.10            | 157.40           |
| 5    | -0.37                         | 27.19            | -0.37            | 30.20            | -1.00            | 31.06            |
| 6(1) | 1.24                          | 15.30            | 1.24             | 15.30            | 0.00             | 17.04            |
| 6(2) |                               |                  |                  |                  | 3.20             | 12.65            |
| 7    | -0.15                         | 14.38            | -0.15            | 16.50            | -0.35            | 10.80            |
| 8    |                               |                  |                  |                  | -4.70            | 243.10           |

a)  $L_{min\lambda}$  和  $L_{max\lambda}$  的单位为:  $W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}$

大气程辐射  $L_{\lambda haze}$  在 COST 模型中的计算是基于影像本身来估计大气参数的影响。根据 COST 模型关于影像具有黑体反射率为 1%的黑体辐射的假设,影像最小 DN 值对应的大气顶层辐射值与 1%的黑体辐射值之差即为大气程辐射值,如公式 8 所示:

$$L_{\lambda haze} = L_{\lambda min} - L_{\lambda 1\%} \tag{8}$$

其中,  $L_{\lambda haze}$  为大气程辐射值;  $L_{\lambda min}$  为传感器各波段最小光谱辐射值;  $L_{\lambda 1\%}$  为反射率为 1%的黑体辐射值。传感器的最小光谱辐射值  $L_{\lambda min}$  的换算式为:

$$L_{\lambda min} = L_{min\lambda} + \frac{(L_{max\lambda} - L_{min\lambda})}{QCAL_{max}} \times QCAL \tag{9}$$

式中,  $QCAL$  为各波段影像内部(相对与影像边界而言)的最小 DN 值;  $L_{max\lambda}$  和  $L_{min\lambda}$  为各波段最大、最小辐射值(表 3-4、3-5);  $QCAL_{max}$  为波段的最大 DN 值。1%黑体辐射  $L_{\lambda 1\%}$  的计算如公式 所示:

$$L_{\lambda 1\%} = \frac{E_{SUN\lambda} \times \cos^2 \theta_s}{\pi \times D^2} \times 0.01 \tag{10}$$

其中,  $D$  为日地天文距离;  $\theta_s$  为太阳天顶角( $90^\circ$  - 太阳高度角),太阳高度角可从遥感影像的头文件中获得;  $E_{SUN\lambda}$  为大气顶层太阳辐照度, MSS、TM 和 ETM+各波段的  $E_{SUN\lambda}$  可从遥感权威单位定期公布的信息中获得(表 3-6)。

表 3-6 MSS,TM/ETM+各波段  $E_{SUN\lambda}$  的取值参考表

Table 3-6 The referenced data of  $E_{SUN\lambda}$  for each band of Landsat MSS, TM/ETM+

| 波<br>段 | Landsat1<br>MSS   | Landsat2<br>MSS | Landsat3<br>MSS | Landsat4<br>MSS | Landsat5<br>MSS | Landsat5<br>TM | Landsat7<br>ETM+ |
|--------|-------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|----------------|------------------|
| 1      | 1852 <sup>a</sup> | 1856            | 1860            | 1851            | 1849            | 1957           | 1969             |
| 2      | 1584              | 1559            | 1571            | 1593            | 1595            | 1829           | 1840             |
| 3      | 1276              | 1269            | 1289            | 1260            | 1253            | 1557           | 1551             |
| 4      | 904               | 906             | 910             | 878             | 870             | 1047           | 1044             |
| 5      |                   |                 |                 |                 |                 | 219.3          | 225.7            |
| 6      |                   |                 |                 |                 |                 |                |                  |
| 7      |                   |                 |                 |                 |                 | 74.52          | 82.07            |
| 8      |                   |                 |                 |                 |                 |                | 1368             |

a) 单位:  $W \cdot m^{-2} \cdot \mu m^{-1}$

在获得各波段地表反射率的基础上,可以通过利用实测值建立模型的方法获取各波段反射率向地表反照率转换的公式,间接的计算地表反照率值。Liang (2000)总结了多种传感器的波段反射率向地表反照率转换的公式,并得到了很好的结果。本研究中, TM/ETM+地表反照率转换采用 Liang (2000) 提供的转换公式(公式 11)。由于缺少实测值,关于 MSS 数据地表反照率转换的相关研究较少。Musick (1986)提出了地表反照率指数的概念,即利用 LOWTRAN6 大气校正模型中关于 MSS 各波段对应的地表辐射在 0.5-1.1  $\mu m$  范围内分布的相对权重计算的一个各波段地表发射率的加权指数,来代表真实地表反照率,并成功地对于旱草原地表反照率在时间序列上的变化进行研究。在本研究中,采用该方法计算的地表反照率指数来表征真实地表反照率的情况(公式 11 和 12)。

$$Albedo_{TM/ETM+} = 0.356\alpha_1 + 0.130\alpha_3 + 0.373\alpha_4 + 0.085\alpha_5 + 0.072\alpha_7 - 0.0018 \tag{11}$$

$$Albedo_{MSS} = 0.228\alpha_1 + 0.217\alpha_2 + 0.182\alpha_3 + 0.373\alpha_4 \tag{12}$$

式中:  $\alpha_{1-7}$  代表 1-7 波段的地表反射率。

3.2 沙漠化定量监测方法

沙漠化定量监测不仅需要在监测指标方面进行定量的反演与计算,而且还需要有能够定量的监测方法进行监测与评价。目前,常用的沙漠化分类或者监测方法主要有非监督分类、监督分类、决策树分类法等。刘爱霞 (2004) 系统比较了这三种方法在

中国及中亚地区荒漠化监测中的精度，认为决策树分类法精度最高；霍艾迪（2008）在对中国北方沙漠化监测方法比较研究中也得出同样的结论，认为决策树法监测效果最为理想。同时，决策树法基于规则的构建方式非常适合定量监测研究，较之前两种方法定量性差的特点有较大的优势，已广泛应用于沙漠化等土地利用/覆盖变化监测研究中（王建等，2000；杜明义，2006；买买提沙吾提等，2008）。因此，本研究选择决策树法对沙漠化进行定量监测。

3.2.1 决策树法介绍

决策树方法是多元统计分类中的一种方法。它利用树结构原则，按一定的分割原则把数据分为特征更为均匀的子集，这些子集在数据结构中称为节点，其基本思想是利用一组自变量来预测每个样本可能对应的类型，即因变量。一个决策树包含一个根节点（Root node——输入变量）、一系列内部节点（Internal nodes——分支）以及终极节点（Terminal nodes——叶）组成，每一节点只有一个父节点和两个或多个子节点（图 3-2）（刘洪勇等，2005）。

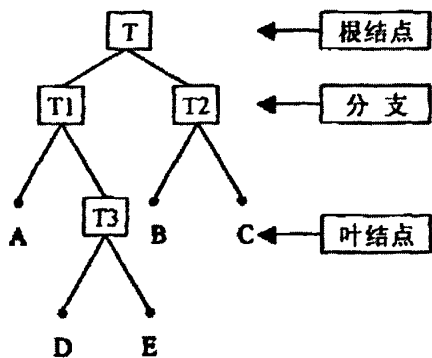


图 3-2 决策树示意图（刘洪勇等，2005）

Fig 3-2 The map of decision tree (Liu et al., 2005)

对一个分类问题或规则学习问题，决策树的生成是一个从上至下（Top-Down），分而治之（Divide and Conquer）的过程。它从根节点开始，对数据样本进行测试，根据不同的结果将数据样本划分为不同数据样本子集，每一个数据样本子集构成一子节点。对每个子节点再进行划分，生成新的子节点，不断反复，直到达到特定的终止准则。1986 年 Quinlan 提出了著名的 ID3 算法（Quinlan,1986），该算法的核心是在决策树各级节点上选择属性时，用信息增益（information gain）作为属性的选择标准，以使得在每一个非叶结点进行测试时，能获得关于被测试记录最大的类别信息。其具体方法是：检测所有的属性，选择信息增益最大的属性产生决策树结点，由该属性的不

同取值建立分支,再对各分支的子集递归调用该方法建立决策树结点的分支,直到所有子集仅包含同一类别的数据为止。最后得到一棵决策树,它可以用来对新的样本进行分类。ID3 算法的优点是:算法的理论清晰,方法简单,学习能力较强;其缺点是:只对比较小的数据集有效,且对噪声比较敏感,当训练数据集加大时,决策树可能会随之改变。在此基础上,Quinlan 又相继提出 C4.5 和 C5.0 算法(Quinlan,1993; Quinlan,1996),改进了以前版本算法的不足,特别是在 C5.0 中采用了 boosting(增强法)(Friedl et al., 1999; Friedl et al., 2002; McIver and Friedl, 2002),该算法已应用到 MODIS 1km 土地覆盖制图产品中,提高了分类的精度(Muchoney et al., 2000; Friedl et al., 2002)。

### 3.2.2 决策树模型建立

在本研究中,根据对沙漠化总体特征以及各沙漠化等级土地特征分异规律的认识,基于分层分类的思想构建决策树,进而根据决策树所描述的总体结构,进行逐级分类,最终达到各等级沙漠化土地定量监测的目的。分类过程中,在结构层次间可以不断加入遥感或非遥感的决策函数,专家知识及有关资料,以进一步改善分类条件,提高分类的精度。

指标体系中各指标阈值的确定是构建决策树模型的关键。然而,由于本研究采用不同传感器获取的遥感影像,而且这些遥感影像获取时间(每年中的具体月份)不尽相同,而且加之鄂尔多斯高原植被类型复杂多样而导致相同沙漠化等级在不同植被类型区中表现为不同的特征,这些因素决定了使用单独的一套指标阈值体系进行该区域的沙漠化监测,势必会产生较大的误差。因此,本研究以鄂尔多斯高原的二级植被类型为基本单元,在综合考虑传感器类型以及遥感影像获取时间的基础上,建立多套指标阈值体系来对鄂尔多斯高原沙漠化状况进行监测。在这里,考虑遥感影像获取时间(在每年中的具体月份)是基于以下假设,即认为在一年范围内,区域的沙漠化状态(或等级)不会发生变化。在这个假设下,遥感影像的获取时间对确定指标阈值有着至关重要的影像。根据 1:100 万中国植被图二级类别的划分,鄂尔多斯高原的植被类型总体可以划分为五类(图 3-3):即一年一熟粮食作物(农田),温带丛生禾草草原(温带禾草草原),温带落叶灌丛(温带落叶灌丛),温带丛生禾草、矮半灌木荒漠草原(荒漠草原)以及草原化、半灌木矮半灌木荒漠(荒漠)(括号中的名称为简称)。

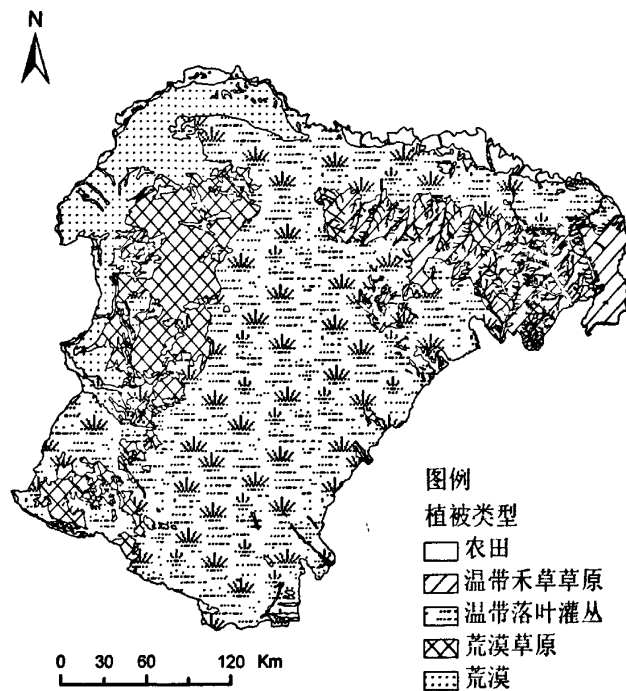


图 3-3 鄂尔多斯高原典型植被类型

Fig 3-3 The typical vegetation in Ordos Plateau

指标阈值体系即决策树规则集的确定可以通过以下步骤来实现：样本点选择—样本点对应指标参数的提取—初始指标阈值体系与决策树构建—初步监测结果评价以及指标阈值体系与决策树调整—最终指标体系与决策树模型的确定。由于本研究选取的遥感影像多为历史时期的数据，不可能完全通过野外实地调查点来作为样本点。因此，在本研究中，通过已有的关于研究区沙漠化情况的数据建立起沙漠化程度判别专家知识库（沙漠化程度判别标准采用 973 计划“中国北方沙漠化过程及其防治”中提出的中国北方沙漠化土地分类分级体系），建立起影像特征与沙漠化程度之间联系，以此为基础，在待监测的影像上选择样本点。本研究已有的关于研究区沙漠化情况的数据主要包括 2006 年野外实地调查采集的样点（图 3-4）、2000 年鄂尔多斯高原 1:10 万的沙地类型图以及有关研究区沙漠化问题的相关文献资料。在具体选择样点时，以“传感器类型—影像获取时间—植被类型—沙漠化等级”为基本对象，例如 Landsat MSS 8 月份影像中温带禾草草原的中度沙漠化地区，选择 60 个点（其中 50 个为建模点，10 个为验证点）用于建模和验证。选择的点尽量均匀的分布于研究区的范围内。在获取建模点的基础上，提取各点对应的监测指标如 NDVI、MSDI 和 Albedo 的值。根据建模点监测指标值的直方图分布，初步确定各指标的阈值，在利用分层思想建立决策树模型的基础上，对沙漠化进行分类。然后，根据目视判别与精度

验证的结果，适当调整各指标阈值与决策树结构，直到达到满意的分类结果为止。具体的流程如图 3-5 所示。

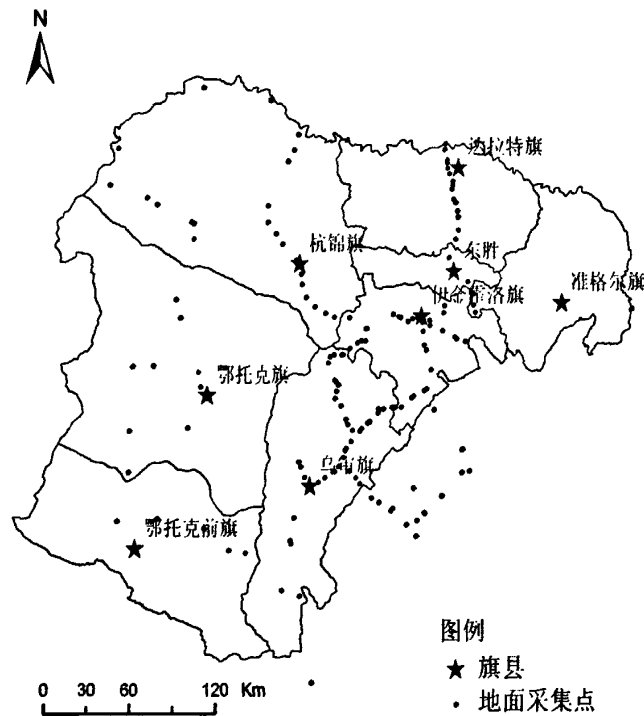


图 3-4 野外采样点分布图

Fig 3-4 The location of field investigated points

根据以上方法，分别针对 MSS 以及 TM/ETM+建立了规则集（表 3-7 和 3-8）以及决策树模型。从决策树规则集列表中可以看出，同一种沙漠化等级，其阈值体系在不同遥感数据源、一年中的不同月份以及不同的植被类型区中表现出明显的差别。总体而言，随着沙漠化等级的加重，NDVI 逐渐下降、Albedo 逐渐上升，而 MSDI 则表现出中度和重度沙漠化的 MSDI 值域高于其他等级。然而，这些变化随植被类型区以及遥感影像获取时间的不同而发生相应的变化。在植被类型区方面，农田和温带落叶灌丛的植被生物量相对较大，表现出同一沙漠化等级的 NDVI 值相对较大，而其他植被类型区的则相对较小；相应的 Albedo 和 MSDI 在不同植被类型区中也存在着明显的差异。在遥感影像获取时间方面，由于鄂尔多斯高原年降雨主要集中在 8-9 月份，因此表现出 8-9 月的 NDVI 相对较高，而 Albedo 相对较低。MSDI 的变化相对不大，由于 MSDI 不像 NDVI 和 Albedo 随沙漠化程度的变化程线性的增减，因此在构建规则集中不同沙漠化等级的 MSDI 判别使用的是一个值域。MSDI 在本研究中主要用于辅助其他两个指标来区分轻度、中度以及重度沙漠化土地（具体见决策树结构图）。

以 8 月份 TM 影像监测温带落叶灌丛沙漠化为例，决策树的构建如图 3-6 所示：

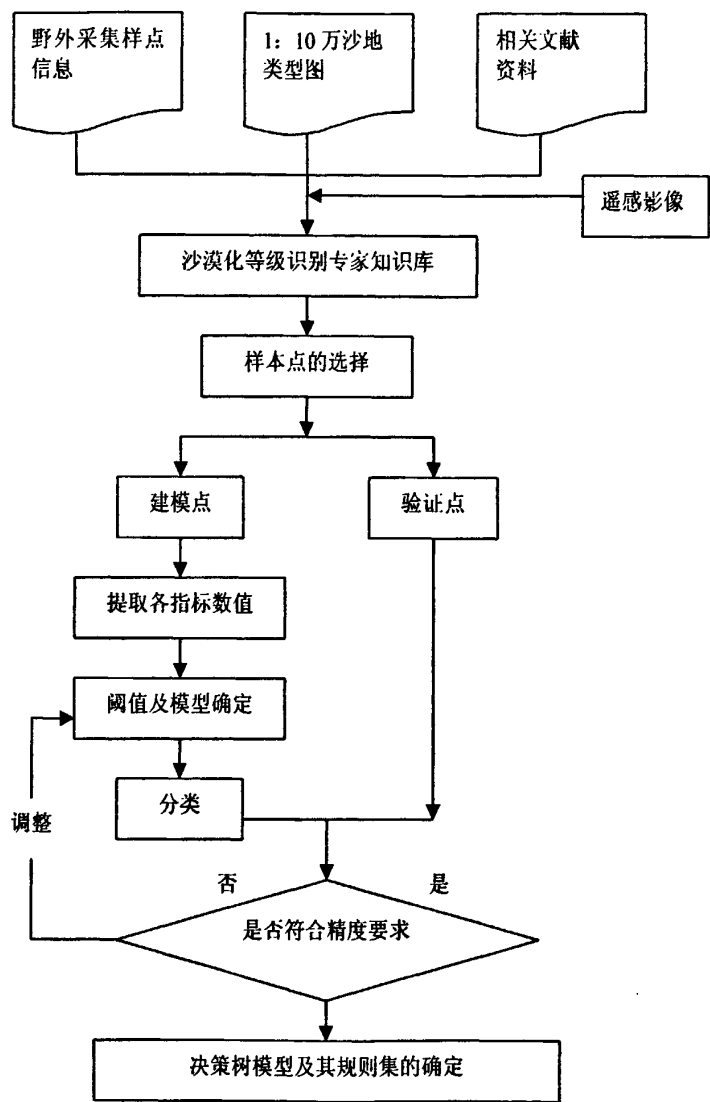


图 3-5 决策树模型及其规则集建立的流程图

Fig 3-5 The flow chart of decision tree modeling and its rule sets building

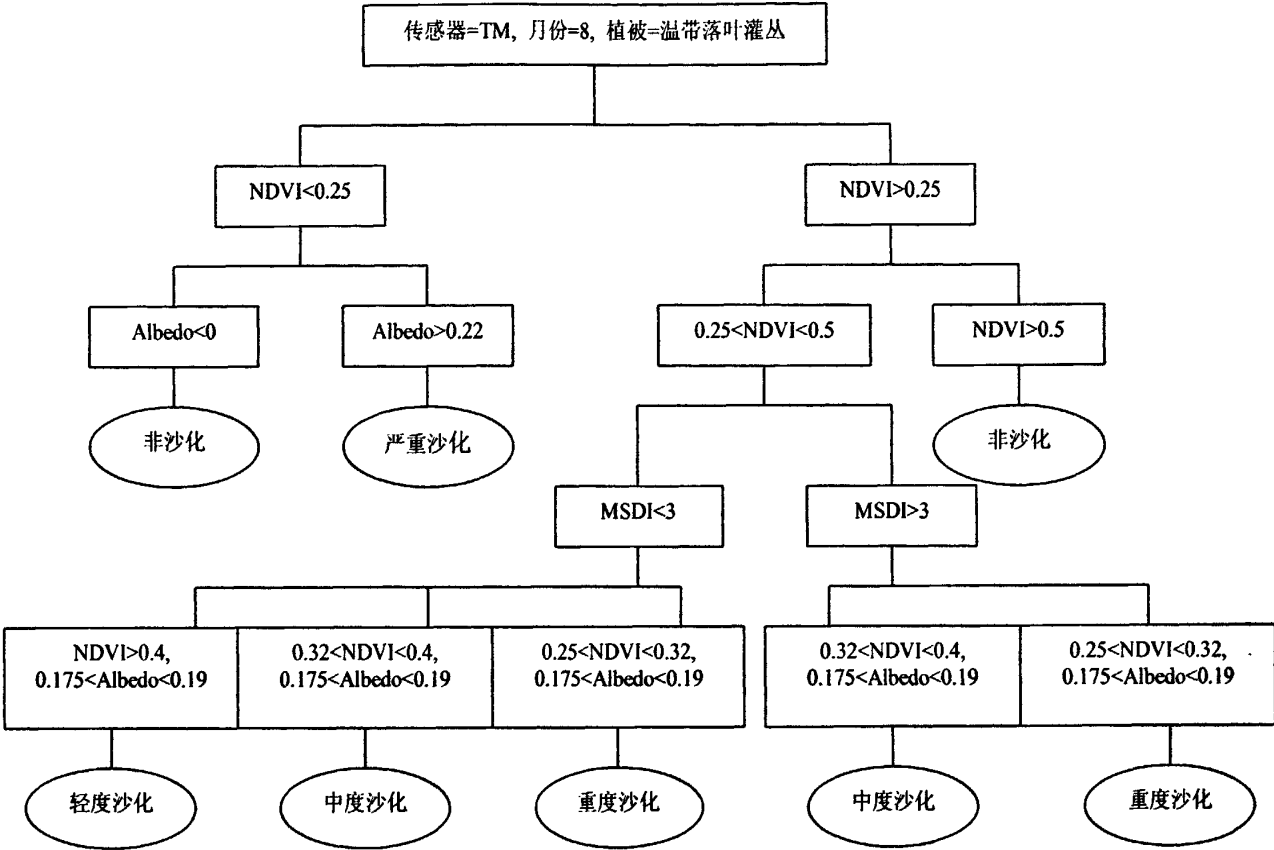


图 3-6 沙漠化定量监测的决策树模型

Fig 3-6 The decision tree for quantitatively monitoring sandy desertification

表 3-7 MSS 影像决策树规则集

Table 3-7 The rule sets of decision tree for Landsat MSS

| 月份 | 沙化等级 | 农田          |      |           | 温带禾草原       |      |             | 温带落叶灌丛      |      |           | 荒漠草原        |      |           | 荒漠            |      |           |
|----|------|-------------|------|-----------|-------------|------|-------------|-------------|------|-----------|-------------|------|-----------|---------------|------|-----------|
|    |      | NDVI        | MSDI | Albedo    | NDVI        | MSDI | Albedo      | NDVI        | MSDI | Albedo    | NDVI        | MSDI | Albedo    | NDVI          | MSDI | Albedo    |
| 8  | 1    | <0 or >0.45 | >1   | 0-0.22    | <0 or >0.25 | >2   | 0-0.26      | <0 or >0.45 | >1   | 0-0.19    | <0 or >0.4  | >1   | 0-0.20    | <0.2 or >0.4  | >2   | 0-0.24    |
|    | 2    | 0.35-0.45   | 0-4  | 0.22-0.24 | 0.2-0.25    | 0-4  | 0.26-0.28   | 0.3-0.45    | 0-4  | 0.19-0.21 | 0.3-0.4     | 0-2  | 0.20-0.22 | 0.28-0.4      | 0-8  | 0.24-0.26 |
|    | 3    | 0.23-0.35   | 0-6  | 0.24-0.26 | 0.15-0.2    | 0-6  | 0.28-0.295  | 0.2-0.3     | 0-7  | 0.21-0.23 | 0.2-0.3     | 0-3  | 0.22-0.25 | 0.18-0.28     | 0-6  | 0.26-0.28 |
|    | 4    | 0.1-0.23    | 0-5  | 0.26-0.28 | 0.1-0.15    | 0-5  | 0.295-0.315 | 0.1-0.2     | 0-5  | 0.23-0.26 | 0.1-0.2     | 0-4  | 0.25-0.26 | 0.06-0.18     | 0-4  | 0.28-0.30 |
|    | 5    | 0-0.1       | 0-3  | >0.28     | 0-0.1       | 0-4  | >0.315      | 0-0.1       | >1   | >0.26     | 0-0.1       | 0-2  | >0.26     | 0-0.06        | 0-3  | >0.30     |
| 9  | 1    | <0 or >0.42 | >1   | <0.25     | <0 or >0.25 | >2   | <0.27       | <0 or >0.4  | >1   | <0.26     | <0 or >0.4  | >1   | <0.20     | <0.2 or >0.35 | >2   | <0.25     |
|    | 2    | 0.3-0.42    | 0-4  | 0.25-0.27 | 0.2-0.25    | 0-5  | 0.27-0.3    | 0.3-0.4     | 0-4  | 0.26-0.28 | 0.28-0.4    | 0-2  | 0.20-0.24 | 0.25-0.35     | 0-6  | 0.25-0.28 |
|    | 3    | 0.2-0.3     | 0-7  | 0.27-0.29 | 0.15-0.2    | 0-6  | 0.30-0.32   | 0.2-0.3     | 0-7  | 0.28-0.3  | 0.18-0.28   | 0-3  | 0.24-0.28 | 0.15-0.25     | 0-5  | 0.28-0.31 |
|    | 4    | 0.1-0.2     | 0-5  | 0.29-0.32 | 0.1-0.15    | 0-4  | 0.32-0.34   | 0.1-0.2     | 0-5  | 0.3-0.33  | 0.06-0.18   | 0-4  | 0.28-0.32 | 0.05-0.15     | 0-4  | 0.31-0.33 |
|    | 5    | 0-0.1       | 0-3  | >0.32     | 0-0.1       | 0-3  | >0.34       | 0-0.1       | >1   | >0.33     | 0-0.06      | 0-2  | >0.32     | 0-0.05        | 0-3  | >0.33     |
| 10 | 1    | <0 or >0.3  | >1   | 0-0.26    | <0 or >0.25 | >1   | 0-0.22      | <0 or >0.35 | >1   | 0-0.24    | <0 or >0.35 | >1   | 0-0.24    | <0.15 or >0.3 | >1   | 0-0.26    |
|    | 2    | 0.2-0.3     | 0-5  | 0.26-0.29 | 0.19-0.25   | 0-2  | 0.22-0.26   | 0.22-0.35   | 0-3  | 0.24-0.27 | 0.25-0.35   | 0-2  | 0.24-0.27 | 0.2-0.3       | 0-5  | 0.26-0.29 |
|    | 3    | 0.145-0.20  | 0-8  | 0.29-0.33 | 0.13-0.19   | 0-5  | 0.26-0.3    | 0.16-0.22   | 0-5  | 0.27-0.3  | 0.16-0.25   | 0-3  | 0.27-0.3  | 0.14-0.2      | 0-4  | 0.29-0.31 |
|    | 4    | 0.085-0.145 | 0-6  | 0.33-0.36 | 0.08-0.13   | 0-4  | 0.3-0.36    | 0.08-0.16   | 0-4  | 0.3-0.33  | 0.06-0.16   | 0-4  | 0.3-0.33  | 0.04-0.14     | 0-3  | 0.31-0.34 |
|    | 5    | 0-0.085     | 0-4  | >0.36     | 0-0.08      | 0-3  | >0.36       | 0-0.08      | >1   | >0.33     | 0-0.06      | 0-3  | >0.33     | 0-0.04        | 0-2  | >0.34     |

注：沙化等级 1、2、3、4、5 分别代表非沙漠化、轻度沙漠化、中度沙漠化和严重沙漠化（表 3-8 相同）

表 3-8 TM/ETM+影像决策树规则集

Table 3-8 The rule sets of decision tree for Landsat TM/ETM+

| 月份沙化等级 | 农田   |             |        | 温带禾草原     |             |        | 温带落叶灌丛      |             |        | 荒漠草原        |             |        | 荒漠            |                |           |           |
|--------|------|-------------|--------|-----------|-------------|--------|-------------|-------------|--------|-------------|-------------|--------|---------------|----------------|-----------|-----------|
|        | NDVI | MSDI        | Albedo | NDVI      | MSDI        | Albedo | NDVI        | MSDI        | Albedo | NDVI        | MSDI        | Albedo | NDVI          | MSDI           | Albedo    |           |
| 6      | 1    | <0 or >0.25 | >1     | 0-0.2     | >2          | 0-0.2  | <0 or >0.26 | >2          | 0-0.2  | <0 or >0.22 | >1          | 0-0.23 | <0.2 or >0.25 | >2             | 0-0.22    |           |
|        | 2    | 0.2-0.25    | 0-6    | 0.2-0.23  | 0.2-0.24    | 0-7    | 0.2-0.23    | 0.21-0.26   | 0-6    | 0.2-0.23    | 0.18-0.22   | 0-3    | 0.23-0.25     | 0-8            | 0.22-0.24 |           |
|        | 3    | 0.17-0.2    | 0-8    | 0.23-0.25 | 0.17-0.2    | 0-8    | 0.23-0.25   | 0.18-0.21   | 0-8    | 0.23-0.25   | 0.16-0.18   | 0-4    | 0.25-0.27     | 0-6            | 0.24-0.26 |           |
|        | 4    | 0.15-0.17   | 0-7    | 0.25-0.27 | 0.15-0.17   | 0-6    | 0.25-0.27   | 0.15-0.18   | 0-7    | 0.25-0.27   | 0.14-0.16   | 0-5    | 0.27-0.29     | 0-5            | 0.26-0.28 |           |
|        | 5    | <0.15       | 0-5    | >0.27     | <0.15       | 0-5    | >0.27       | <0.15       | >2     | >0.27       | <0.14       | 0-4    | >0.29         | <0.14          | 0-4       | >0.28     |
| 8      | 1    | <0 or >0.5  | >1     | 0-0.16    | <0 or >0.5  | >2     | 0-0.18      | <0 or >0.5  | >1     | 0-0.175     | <0 or >0.45 | >1     | 0-0.14        | <0.28 or >0.4  | >1        | 0-0.2     |
|        | 2    | 0.4-0.5     | 0-3    | 0.16-0.18 | 0.4-0.5     | 0-5    | 0.18-0.2    | 0.4-0.5     | 0-3    | 0.175-0.19  | 0.36-0.45   | 0-2    | 0.14-0.16     | 0.32-0.4       | 0-5       | 0.16-0.18 |
|        | 3    | 0.32-0.4    | 0-6    | 0.18-0.20 | 0.32-0.4    | 0-6    | 0.2-0.22    | 0.32-0.4    | 0-5    | 0.19-0.205  | 0.28-0.36   | 0-3    | 0.16-0.19     | 0.26-0.32      | 0-4       | 0.18-0.20 |
|        | 4    | 0.24-0.32   | 0-4    | 0.20-0.22 | 0.25-0.32   | 0-4    | 0.22-0.24   | 0.25-0.32   | 0-4    | 0.205-0.22  | 0.22-0.28   | 0-4    | 0.19-0.21     | 0.22-0.26      | 0-3       | 0.20-0.22 |
|        | 5    | 0-0.24      | 0-3    | >0.22     | 0-0.25      | 0-2    | >0.24       | 0-0.25      | >1     | >0.22       | 0-0.22      | 0-2    | >0.21         | 0-0.22         | 0-2       | >0.22     |
| 9      | 1    | <0 or >0.5  | >1     | 0-0.15    | <0 or >0.45 | >2     | 0-0.18      | <0 or >0.5  | >1     | 0-0.19      | <0 or >0.45 | >1     | 0-0.18        | <0.28 or >0.4  | >1        | 0-0.2     |
|        | 2    | 0.40-0.5    | 0-4    | 0.15-0.17 | 0.37-0.45   | 0-5    | 0.18-0.21   | 0.37-0.5    | 0-3    | 0.19-0.21   | 0.375-0.45  | 0-2    | 0.18-0.20     | 0.34-0.4       | 0-5       | 0.16-0.18 |
|        | 3    | 0.32-0.40   | 0-6    | 0.17-0.20 | 0.3-0.37    | 0-7    | 0.21-0.24   | 0.30-0.37   | 0-5    | 0.21-0.23   | 0.325-0.375 | 0-3    | 0.20-0.22     | 0.28-0.34      | 0-4       | 0.18-0.20 |
|        | 4    | 0.25-0.32   | 0-5    | 0.20-0.23 | 0.25-0.30   | 0-4    | 0.24-0.26   | 0.25-0.30   | 0-4    | 0.23-0.25   | 0.275-0.325 | 0-4    | 0.22-0.24     | 0.22-0.28      | 0-3       | 0.20-0.22 |
|        | 5    | <0.25       | 0-3    | >0.23     | <0.25       | 0-3    | >0.26       | <0.25       | >1     | >0.25       | <0.275      | 0-2    | >0.24         | <0.22          | 0-2       | >0.22     |
| 11     | 1    | <0 or >0.27 | >1     | 0-0.35    | <0 or >0.25 | >3     | 0-0.37      | <0 or >0.25 | >1     | 0-0.35      | <0 or >0.24 | >3     | 0-0.37        | <0.18 or >0.24 | >3        | 0-0.37    |
|        | 2    | 0.22-0.27   | 0-8    | 0.35-0.4  | 0.22-0.25   | 0-10   | 0.37-0.42   | 0.22-0.25   | 0-8    | 0.35-0.4    | 0.20-0.24   | 0-7    | 0.37-0.42     | 0.20-0.24      | 0-8       | 0.37-0.42 |
|        | 3    | 0.18-0.22   | 0-6    | 0.4-0.45  | 0.18-0.22   | 0-8    | 0.42-0.48   | 0.19-0.22   | 0-6    | 0.4-0.45    | 0.17-0.20   | 0-5    | 0.42-0.47     | 0.17-0.20      | 0-6       | 0.42-0.48 |
|        | 4    | 0.15-0.18   | 0-5    | 0.45-0.5  | 0.15-0.18   | 0-6    | 0.48-0.55   | 0.16-0.19   | 0-4    | 0.45-0.5    | 0.15-0.17   | 0-4    | 0.47-0.52     | 0.15-0.17      | 0-5       | 0.48-0.52 |
|        | 5    | 0-0.15      | 0-4    | >0.5      | 0-0.15      | 0-5    | >0.55       | 0-0.16      | >1     | >0.5        | 0-0.15      | 0-3    | >0.52         | 0-0.15         | 0-4       | >0.52     |

### 3.3 沙漠化监测结果精度评价

在获得鄂尔多斯高原四期沙漠化监测的结果基础上,利用选择的验证点对其监测精度进行评价。由于每期监测过程中选择的验证点数目不尽一致,在这里,对于1980、1990和2000年的监测精度评价选择500个验证点来验证;而对于2005年,选择250个验证点进行精度评价(由于2005年遥感影像获取时间均为6月份,故建模点与验证点相对于前三期数据较少)。通过建立误差矩阵(混淆矩阵),对四期沙漠化监测结果进行精度评价(表3-9、3-10、3-11和3-12)。误差矩阵是用来表示精度评价的一种标准格式,是 $n$ 行 $n$ 列的矩阵,其中 $n$ 代表类别的数量。误差矩阵可以清楚地显示各类别的包含误差(commission error)和丢失误差(omission error),除此之外,还可以从误差矩阵中计算出各种精度测量指标,如总体精度(overall accuracy)、制图精度(producer accuracy)和用户精度(user accuracy)。总体精度是误差矩阵内主对角线元素之和(正确分类的个数)除以总的采样个数,制图精度和用户精度可以表示某一单类别的精度。制图精度为某类别正确分类个数除以该类的总采样个数(该类的列总和);而用户精度定义为正确分类的该类个数除以分为该类的采样的个数(该类的行总和)。然而,利用总体精度、制图或用户精度的一个缺点是像元类别的小变动可能导致其百分比的变化。Kappa分析(Kappa系数法)采用另一种离散的多元技术,考虑了矩阵的所有因素,用以克服以上的缺点。Kappa分析产生的评价指标被称为 $K_{hat}$ 统计, $K_{hat}$ 是一种测定两幅图之间吻合度或精度的指标,其公式为:

$$K_{hat} = \frac{N \sum_{i=1}^r x_{ii} - \sum_{i=1}^r (x_{i+} x_{+i})}{N^2 - \sum_{i=1}^r x_{i+} x_{+i}} \quad (13)$$

式中: $r$ 是误差矩阵中总列数(即总的类别数); $x_{ii}$ 是误差矩阵中第 $i$ 行、第 $i$ 列上像元数量(即正确分类的数目); $x_{i+}$ 和 $x_{+i}$ 分别是第 $i$ 行和第 $i$ 列的总像元数量; $N$ 是总得用于精度评估的像元数目。

表 3-9 1980 年沙漠化监测精度评价误差矩阵

Table 3-9 The confusion matrix for accuracy checking of sandy desertification monitoring in 1980

| 年份   | 等级  | 非沙化 | 轻度  | 中度  | 重度 | 严重  | 总和  | 制图精度/%  | 用户精度/% |
|------|-----|-----|-----|-----|----|-----|-----|---------|--------|
| 1980 | 非沙化 | 94  | 4   | 2   | 0  | 0   | 100 | 94.00%  | 97.92% |
|      | 轻度  | 4   | 88  | 5   | 3  | 0   | 100 | 88.00%  | 88.00% |
|      | 中度  | 0   | 8   | 86  | 4  | 0   | 100 | 86.00%  | 85.15% |
|      | 重度  | 0   | 4   | 6   | 87 | 3   | 100 | 87.00%  | 88.78% |
|      | 严重  | 0   | 0   | 0   | 0  | 100 | 100 | 100.00% | 95.24% |
|      | 总和  | 96  | 100 | 101 | 98 | 105 | 500 |         |        |

总体精度：91%；kappa 系数：0.8875

表 3-10 1990 年沙漠化监测精度评价误差矩阵

Table 3-10 The confusion matrix for accuracy checking of sandy desertification monitoring in 1990

| 年份   | 等级  | 非沙化 | 轻度  | 中度  | 重度 | 严重  | 总和  | 制图精度/%  | 用户精度/% |
|------|-----|-----|-----|-----|----|-----|-----|---------|--------|
| 1990 | 非沙化 | 94  | 5   | 1   | 0  | 0   | 100 | 94.00%  | 97.92% |
|      | 轻度  | 2   | 90  | 8   | 0  | 0   | 100 | 90.00%  | 90.00% |
|      | 中度  | 0   | 5   | 88  | 7  | 0   | 100 | 88.00%  | 87.13% |
|      | 重度  | 0   | 0   | 4   | 91 | 5   | 100 | 91.00%  | 92.86% |
|      | 严重  | 0   | 0   | 0   | 0  | 100 | 100 | 100.00% | 95.24% |
|      | 总和  | 96  | 100 | 101 | 98 | 105 | 500 |         |        |

总体精度：92.6%；kappa 系数：0.9075

表 3-11 2000 年沙漠化监测精度评价误差矩阵

Table 3-11 The confusion matrix for accuracy checking of sandy desertification monitoring in 2000

| 年份   | 等级  | 非沙化 | 轻度  | 中度  | 重度 | 严重  | 总和  | 制图精度/%  | 用户精度/% |
|------|-----|-----|-----|-----|----|-----|-----|---------|--------|
| 2000 | 非沙化 | 92  | 3   | 4   | 1  | 0   | 100 | 92.00%  | 95.83% |
|      | 轻度  | 2   | 86  | 6   | 6  | 0   | 100 | 86.00%  | 86.00% |
|      | 中度  | 0   | 7   | 85  | 8  | 0   | 100 | 85.00%  | 84.16% |
|      | 重度  | 0   | 3   | 7   | 87 | 3   | 100 | 87.00%  | 88.78% |
|      | 严重  | 0   | 0   | 0   | 0  | 100 | 100 | 100.00% | 95.24% |
|      | 总和  | 96  | 100 | 101 | 98 | 105 | 500 |         |        |

总体精度：90%；kappa 系数：0.875

表 3-12 2005 年沙漠化监测精度评价误差矩阵

Table 3-12 The confusion matrix for accuracy checking of sandy desertification monitoring in 2005

| 年份   | 等级  | 非沙化 | 轻度 | 中度 | 重度 | 严重 | 总和  | 制图精度/% | 用户精度/% |
|------|-----|-----|----|----|----|----|-----|--------|--------|
| 2005 | 非沙化 | 47  | 3  | 0  | 0  | 0  | 50  | 94.00% | 94.00% |
|      | 轻度  | 2   | 45 | 3  | 0  | 0  | 50  | 90.00% | 86.54% |
|      | 中度  | 0   | 3  | 43 | 4  | 0  | 50  | 86.00% | 87.76% |
|      | 重度  | 0   | 1  | 3  | 44 | 2  | 50  | 88.00% | 89.80% |
|      | 严重  | 1   | 0  | 0  | 1  | 48 | 50  | 96.00% | 96.00% |
|      | 总和  | 50  | 52 | 49 | 49 | 50 | 250 |        |        |

总体精度：90.8%；kappa 系数：0.885

根据四期沙漠化监测精度评价的误差矩阵表,可以看出这四期沙漠化监测精度均大于或等于 90%, kappa 系数均大于 0.87,表明利用本研究的定量监测方法取得了较为理想的监测精度。综合对比四期沙漠化监测的精度,发现 2000 年和 2005 年的监测精度相对于两外两个年份稍低,这主要是由于 2000 年和 2005 年大部分遥感影像的获取时间集中在 11 月份和 6 月份,而这两个月份鄂尔多斯高原植被影像特征相对 8、9 月份不是特别明显,这是导致其精度降低的主要原因。对于不同沙漠化等级的监测精度,可以看出非沙漠化和严重沙漠化的制图和用户精度最高,这主要是由于这两个类别的沙漠化特征最为明显,例如非沙漠化主要包括农业植被、水域、城镇等,而严重沙漠化主要为植被覆盖度较小的流动沙丘,因此通过 NDVI 和 Albedo 两个指标的组合就很容易将其区分出来。中度沙漠化的监测精度相对最差,主要由于该等级的土地沙漠化特征较为复杂,易于错分为重度和轻度沙漠化。然而,其制图与用户精度也均能达到 84%以上,总体上监测的精度达到分析的要求。

### 3.4 鄂尔多斯高原沙漠化时空演变

综合考虑到 MSS 与 TM 数据空间分辨率的差异以及区域沙漠化数据的应用要求,本研究按照 1:20 万比例尺的制图精度要求,对初始的沙漠化监测结果进行碎小像元的处理,并最终按照 100 m×100 m 的空间分辨率对四期鄂尔多斯高原沙漠化数据进行采样,使其具有统一的栅格大小以进行对比分析。图 3-7 为四期鄂尔多斯高原沙漠化分布图。从该图可以看出,1980-2005 年间,鄂尔多斯高原沙漠化情况在时间上和空间上都发生了明显的变化。本节以鄂尔多斯高原沙漠化的时空演变为主线,分析 1980-2005 年不同时段范围内鄂尔多斯高原沙漠化情况的综合变化。

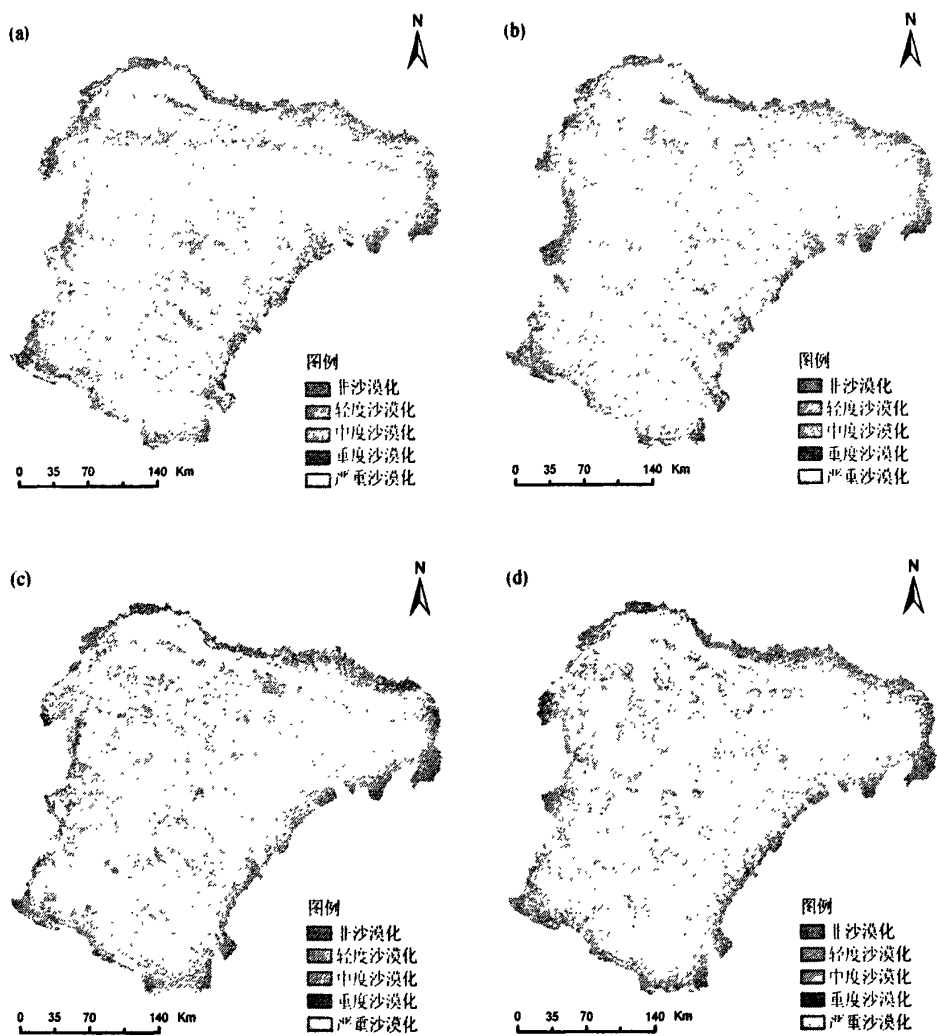


图 3-7 1980、1990、2000 和 2005 年鄂尔多斯高原沙漠化土地空间分布状况

(a) 1980; (b) 1990; (c) 2000; (d) 2005

Fig 3-7 The spatial distribution of desertified land of Ordos Plateau in 1980,1990,2000 and 2005

(a) 1980; (b) 1990; (c) 2000; (d) 2005

3.4.1 1980-1990 年鄂尔多斯高原沙漠化变化

1980-1990 年间鄂尔多斯高原沙漠化发生了明显的变化。根据图 3-8，1980-1990 年间，鄂尔多斯高原非沙漠化和轻度沙漠化土地面积有所增加，其中以轻度沙漠化面积增加最为明显，增加的面积占原有面积的 74.93%，而中度、重度和严重沙漠化土地面积相应的有所减少。这两个时期各等级沙漠化土地面积的转移矩阵（表 3-13）反映了各等级沙漠化土地的转移情况，由于干旱、半干旱地区土地沙漠化对气候变化和人类活动的响应较为敏感，这造成了各沙漠化等级之间的转移比较明显。特别是中度沙

漠化土地，其向轻度和重度沙漠化土地转移的面积分别是原有的 25.48%和 29.33%。

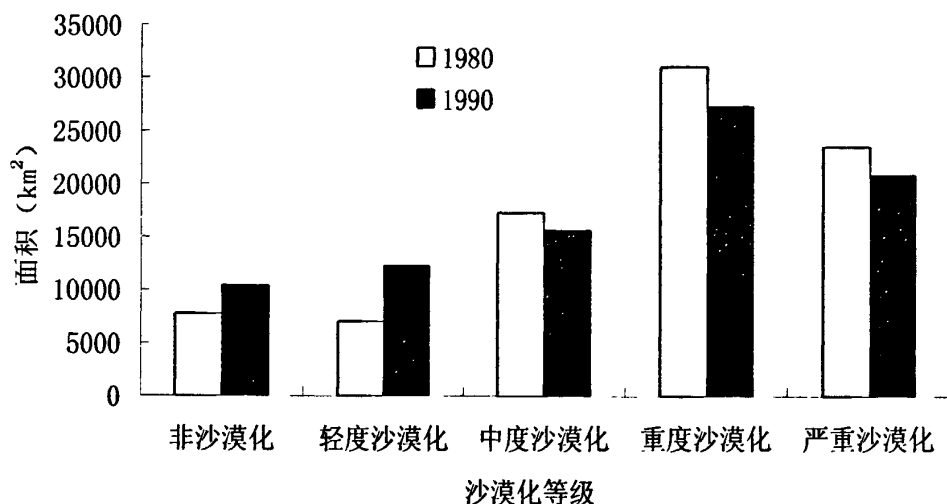


图 3-8 1980、1990 年鄂尔多斯高原沙漠化状况

Fig 3-8 The status of sandy desertification of Ordos Plateau in 1980 and 1990

表 3-13 1980-1990 年鄂尔多斯高原沙漠化转移矩阵 （单位：km2）

Table 3-13 The transfer matrix of sandy desertification of Ordos Plateau from 1980 to 1990 (unit: km<sup>2</sup>)

| 1980-1990 | 非沙漠化    | 轻度沙漠化   | 中度沙漠化   | 重度沙漠化    | 严重沙漠化    |
|-----------|---------|---------|---------|----------|----------|
| 非沙漠化      | 4623.27 | 1501.23 | 686.15  | 609.23   | 347.5    |
| 轻度沙漠化     | 1454.42 | 2494.35 | 1717.89 | 1206.3   | 197.62   |
| 中度沙漠化     | 1644.83 | 4416.85 | 5306.91 | 5084.79  | 880.45   |
| 重度沙漠化     | 1574.51 | 3145.71 | 6810.11 | 16038.98 | 3557.66  |
| 严重沙漠化     | 1172.49 | 810.35  | 1192.07 | 4454.4   | 15938.45 |

图 3-9 从空间上反映了该时期内沙漠化的逆转和发展的空间分布状况。在这里，为了更清楚地反映沙漠化变化过程，笔者定义沙漠化逆转一个等级的为轻微逆转，逆转两个等级及以上的为明显逆转；同样，沙漠化恶化一个等级的为轻微发展，恶化两个等级及以上的为明显发展。1980-1990 年间，鄂尔多斯高原逆转的沙漠化土地面积为 26675.74 km<sup>2</sup>，其中轻微逆转的有 17135.78 km<sup>2</sup>，占总逆转沙漠化土地面积的 64.24%，明显逆转的有 9539.96 km<sup>2</sup>，占总逆转沙漠化土地面积的 35.76%；而发展的沙漠化土地面积有 15788.82 km<sup>2</sup>，轻微和明显发展的沙漠化土地面积分别占总的沙漠化发展面积的 75.13%和 24.87%。总体而言，鄂尔多斯高原 1980-1990 年间沙漠化呈局部发展，整体明显逆转的态势。10 年间的平均每年的净逆转面积为 1088.69 km<sup>2</sup>。

从逆转和发展的沙漠化土地的空间分布上看，逆转的沙漠化土地在鄂尔多斯高原分布的相对分散，其中以鄂尔多斯高原东北部即达拉特旗和准格尔旗北部的农田与温带落叶灌丛区的过渡地带以及东部部分的温带禾草草原区，以及鄂尔多斯高原中部、包括乌审旗和鄂托克旗大部的温带落叶灌丛区为主要逆转区域；而发展的沙漠化土地的空间分布相对较为集中，主要分布在杭锦旗东南部的温带落叶灌丛与荒漠草原的过渡区域、准格尔其西部的温带禾草草原区域、以及鄂托克前旗南部的温带落叶灌丛区。根据各个旗县的沙漠化逆转与发展状况（表 3-14，其中百分比为某旗县变化的沙漠化面积占该旗县面积的百分比，以下相同），除杭锦旗表现为沙漠化发展的大于逆转的土地面积外，其余各旗县均表现为沙漠化逆转的土地面积大于发展的土地面积。就沙漠化逆转与发展占各个旗县面积的比例而言，东胜的沙漠化逆转比例最大，而伊金霍洛旗的沙漠化发展比例最大。

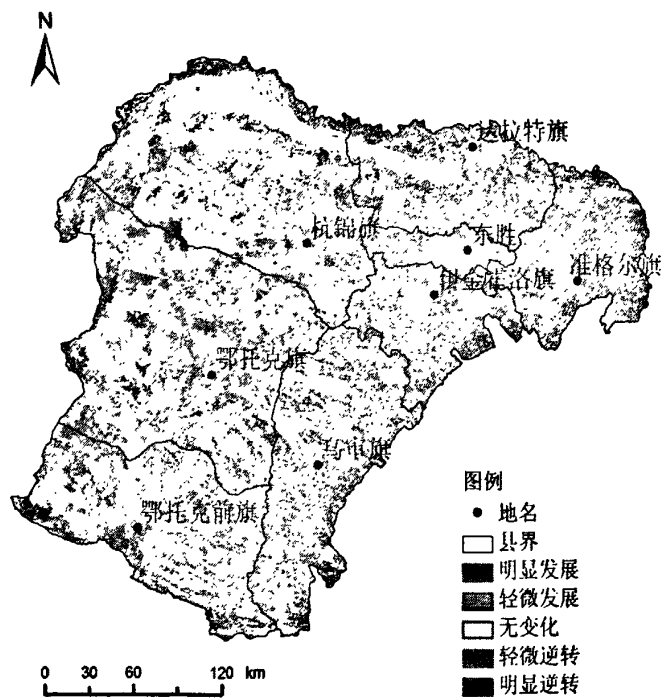


图 3-9 1980-1990 年鄂尔多斯高原沙漠化变化的空间分布

Fig 3-9 The spatial distribution of sandy desertification in Ordos Plateau form 1980 to 1990

表 3-14 1980-1990 各旗县沙漠化逆转与发展状况

Table 3-14 The area of sandy desertification reversion and expansion in each counties from 1980 to 1990

| 旗县    | 轻微逆转                     |            | 明显逆转                     |            | 轻微发展                     |            | 明显发展                  |            |
|-------|--------------------------|------------|--------------------------|------------|--------------------------|------------|-----------------------|------------|
|       | 面积<br>(km <sup>2</sup> ) | 百分比<br>(%) | 面积<br>(km <sup>2</sup> ) | 百分比<br>(%) | 面积<br>(km <sup>2</sup> ) | 百分比<br>(%) | 面积 (km <sup>2</sup> ) | 百分比<br>(%) |
| 杭锦旗   | 2323.95                  | 12.33      | 915.82                   | 4.86       | 2857.12                  | 15.15      | 898.83                | 4.77       |
| 达拉特旗  | 1914.75                  | 23.27      | 1047.43                  | 12.73      | 1038.78                  | 12.62      | 523.63                | 6.36       |
| 准格尔旗  | 1220.62                  | 16.16      | 1608.43                  | 21.29      | 1037.46                  | 13.73      | 711.2                 | 9.41       |
| 鄂托克旗  | 4744.6                   | 23.41      | 2005.29                  | 9.89       | 2507.1                   | 12.37      | 547.15                | 2.70       |
| 东胜    | 535.43                   | 25.08      | 288.9                    | 13.53      | 336.67                   | 15.77      | 148.16                | 6.94       |
| 伊金霍洛旗 | 1145.06                  | 19.47      | 994.54                   | 16.91      | 995.62                   | 16.93      | 366.01                | 6.22       |
| 乌审旗   | 2148.62                  | 18.48      | 1636.09                  | 14.07      | 1501.79                  | 12.92      | 432.41                | 3.72       |
| 鄂托克前旗 | 3102.75                  | 25.15      | 1043.46                  | 8.46       | 1587.03                  | 12.86      | 299.86                | 2.43       |

3.4.2 1990-2000 年鄂尔多斯高原沙漠化变化

1990-2000 年鄂尔多斯高原各等级沙漠化土地面积变化及其转移情况如图 3-10 和表 3-15 所示。1990-2000 年间，鄂尔多斯高原非沙漠化和轻度沙漠化土地面积变化不大，而中度、重度以及严重沙漠化土地面积变化较为明显。其中中度和严重沙漠化土地面积有所增加，其增加的主要来源为重度沙漠化土地的转移。重度沙漠化土地面积下降明显，到 2000 年，其减少的面积占 1990 年面积的 26.93%。由于各等级沙漠化土地之间明显转移，到 2000 年，鄂尔多斯高原各沙漠化等级之间的结构较 1990 年发生了明显的变化，表现为严重沙漠化土地面积占的比重最大，重度与中度沙漠化土地面积的比例基本相当。而对于 1990 年，则表现为重度沙漠化土地的比重最大。

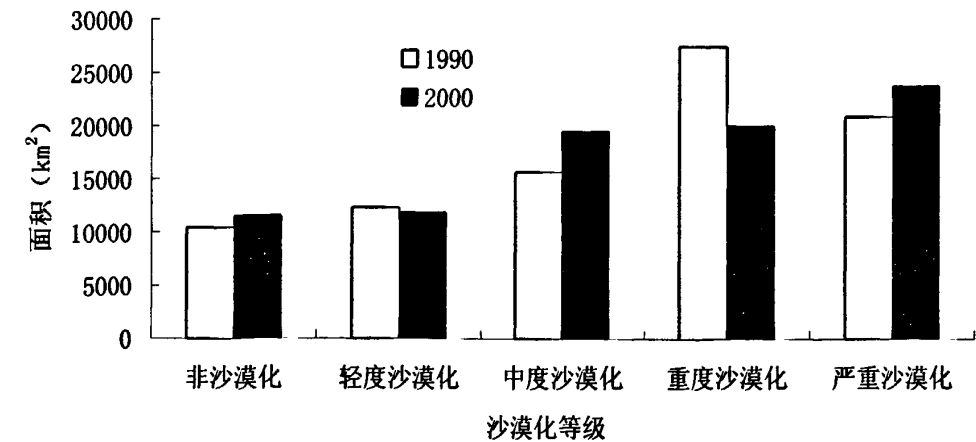


图 3-10 1990、2000 年鄂尔多斯高原沙漠化状况

Fig 3-10 The status of sandy desertification of Ordos Plateau in 1990 and 2000

表 3-15 1990-2000 年鄂尔多斯高原沙漠化转移矩阵 (单位: km<sup>2</sup>)Table 3-15 The transfer matrix of sandy desertification of Ordos Plateau from 1990 to 2000 (unit: km<sup>2</sup>)

| 1990-2000 | 非沙漠化    | 轻度沙漠化   | 中度沙漠化   | 重度沙漠化   | 严重沙漠化    |
|-----------|---------|---------|---------|---------|----------|
| 非沙漠化      | 5753.03 | 988.58  | 1418.13 | 1027.78 | 1280.76  |
| 轻度沙漠化     | 2484.7  | 3377.87 | 3463.19 | 2241.05 | 802.11   |
| 中度沙漠化     | 1302.68 | 3269.04 | 5610.07 | 4062    | 1470.04  |
| 重度沙漠化     | 1365.83 | 3610.05 | 7705.77 | 9280.09 | 5435.65  |
| 严重沙漠化     | 637.41  | 755.51  | 1263.99 | 3406.26 | 14858.45 |

1990-2000 年间鄂尔多斯高原沙漠化的逆转与发展的空间分布状况如图 3-11 所示。在段时期内, 鄂尔多斯高原逆转的沙漠化土地面积为 25801.24 km<sup>2</sup>, 其中轻微逆转的有 16865.77 km<sup>2</sup>, 占总逆转沙漠化土地面积的 65.73%, 明显逆转的有 8935.74 km<sup>2</sup>, 占总逆转沙漠化土地面积的 34.63%; 而发展的沙漠化土地面积有 22189.29 km<sup>2</sup>, 轻微和明显发展的沙漠化土地面积分别占总的沙漠化发展面积的 62.87%和 37.13%。相对于 1980-1990 年, 1990-2000 年沙漠化发展的土地面积明显增加, 但仍小于沙漠化逆转的土地面积。1990-2000 年这 10 年间平均每年的净逆转面积为 361.20 km<sup>2</sup>, 远远低于 1980-1990 年间的年均净逆转面积。从 1990-2000 年间逆转和发展的沙漠化土地的空间分布上看, 轻微逆转的沙漠化土地分布的相对较为均匀, 而明显逆转的沙漠化土地则集中分布在伊金霍洛旗西北部的温带落叶灌丛与温带禾草草原的过渡区以及鄂托克前旗西部的温带落叶灌丛区。与 1980-1990 年发展的沙漠化土地相比, 1990-2000 年间, 发展的沙漠化土地相对分散, 主要集中在以下四个区域: 一是准格尔旗与达拉特旗交界北部的农田区域和南部的温带落叶灌丛与温带禾草草原过渡区域; 二是东胜西部的温带禾草草原与温带落叶灌丛的交界区域; 三是杭锦旗西南部的荒漠区以及东南部的温带落叶灌丛区域; 四是乌审旗、鄂托克旗以及鄂托克前旗交界的温带落叶灌丛区域, 包括了毛乌素沙地的大部分地区。根据各个旗县的沙漠化逆转与发展状况(表 3-16), 除鄂托克旗、伊金霍洛旗和鄂托克前旗逆转的沙漠化土地面积大于发展的沙漠化土地面积外, 其余五个旗县均表现为发展的大于逆转的沙漠化土地面积。在各个旗县中, 伊金霍洛旗逆转的沙漠化土地面积占该旗土地面积的比重最大, 达到了 56.36%; 而达拉特旗发展的沙漠化土地面积占该旗土地面积的比重最大, 达到了 34.91%。

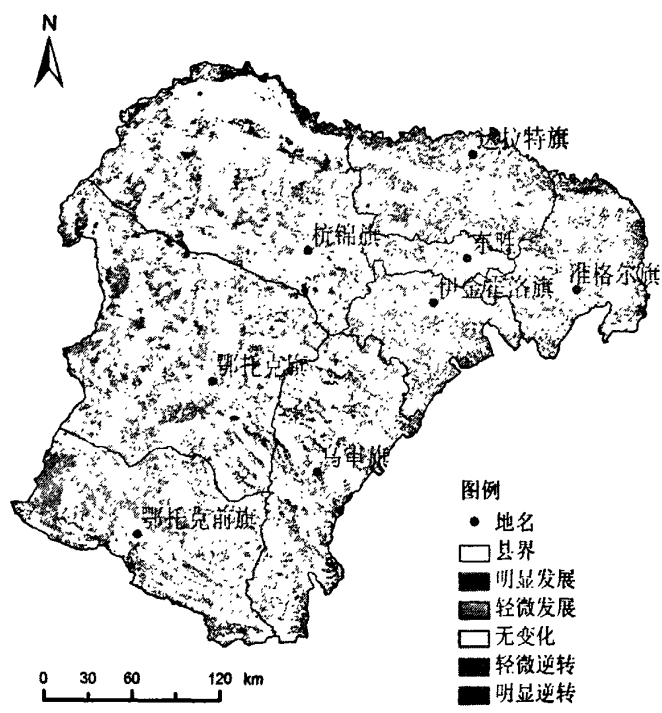


图 3-11 1990-2000 年鄂尔多斯高原沙漠化变化的空间分布

Fig 3-11 The spatial distribution of sandy desertification in Ordos Plateau form 1990 to 2000

表 3-16 1990-2000 各旗县沙漠化逆转与发展状况

Table 3-16 The area of sandy desertification reversion and expansion in each counties from 1990 to 2000

| 旗县    | 轻微逆转                     |            | 明显逆转                     |            | 轻微发展                     |            | 明显发展                     |            |
|-------|--------------------------|------------|--------------------------|------------|--------------------------|------------|--------------------------|------------|
|       | 面积<br>(km <sup>2</sup> ) | 百分比<br>(%) | 面积<br>(km <sup>2</sup> ) | 百分比<br>(%) | 面积<br>(km <sup>2</sup> ) | 百分比<br>(%) | 面积<br>(km <sup>2</sup> ) | 百分比<br>(%) |
| 杭锦旗   | 2404.41                  | 12.75      | 1042.55                  | 5.53       | 3673.29                  | 19.48      | 1454.92                  | 7.72       |
| 达拉特旗  | 1653.6                   | 20.10      | 693                      | 8.42       | 1495.57                  | 18.18      | 1376.7                   | 16.73      |
| 准格尔旗  | 1205.22                  | 15.95      | 721.02                   | 9.54       | 1118.24                  | 14.80      | 1441.66                  | 19.08      |
| 鄂托克旗  | 4775.79                  | 23.56      | 1121.26                  | 5.53       | 3564.09                  | 17.58      | 1658.62                  | 8.18       |
| 东胜    | 394.01                   | 18.46      | 278.4                    | 13.04      | 223.23                   | 10.46      | 463.42                   | 21.71      |
| 伊金霍洛旗 | 1602.84                  | 27.26      | 1711.32                  | 29.10      | 447.41                   | 7.61       | 247.97                   | 4.22       |
| 乌审旗   | 1590.33                  | 13.68      | 1244.73                  | 10.71      | 1755.99                  | 15.10      | 1103.06                  | 9.49       |
| 鄂托克前旗 | 3239.57                  | 26.26      | 2123.19                  | 17.21      | 1671.6                   | 13.55      | 493.52                   | 4.00       |

3.4.3 2000-2005 年鄂尔多斯高原沙漠化变化

2000-2005 年鄂尔多斯高原各等级沙漠化土地面积变化及其转移情况如图 3-12 和表 3-17 所示。2000-2005 年间，鄂尔多斯高原非沙漠化和中度沙漠化土地面积有所增加，而重度和严重沙漠化土地面积有所减少，轻度沙漠化土地面积基本保持不变。从各等级沙漠化土地的转移情况看，轻度和重度沙漠化土地的转移最为明显，其在 2000-2005 年间转移的面积分别占原有面积的 64.93%和 69.21%。其中，轻度到中度沙漠化的转移和重度到中度的沙漠化转移分别为轻度和重度沙漠化土地转移的主要过程，这也是导致 2005 年中度沙漠化土地面积所占的比重最大的主要原因。

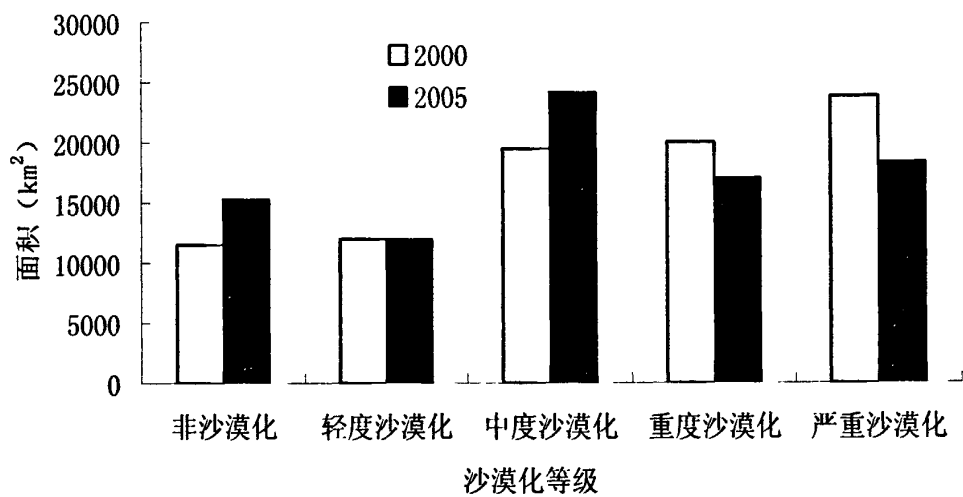


图 3-12 2000、2005 年鄂尔多斯高原沙漠化状况

Fig 3-12 The status of sandy desertification of Ordos Plateau in 2000 and 2005

表 3-17 2000-2005 年鄂尔多斯高原沙漠化转移矩阵 （单位：km2）

Table 3-17 The transfer matrix of sandy desertification of Ordos Plateau from 2000 to 2005 (unit: km<sup>2</sup>)

| 2000-2005 | 非沙漠化    | 轻度沙漠化   | 中度沙漠化   | 重度沙漠化   | 严重沙漠化    |
|-----------|---------|---------|---------|---------|----------|
| 非沙漠化      | 7946.32 | 817.09  | 1440.53 | 851.15  | 489.58   |
| 轻度沙漠化     | 1379.25 | 4208.8  | 4088.41 | 1754.81 | 570.67   |
| 中度沙漠化     | 2456.69 | 3729.24 | 8630.58 | 3609.85 | 1036.53  |
| 重度沙漠化     | 1858.36 | 2001.7  | 7509.69 | 6164.93 | 2484.7   |
| 严重沙漠化     | 1659.95 | 1235.47 | 2485.01 | 4671.47 | 13797.19 |

2000-2005 年间鄂尔多斯高原沙漠化的逆转与发展的空间分布状况如图 3-13 所示。在段时期内，鄂尔多斯高原逆转的沙漠化土地面积为 28986.83 km<sup>2</sup>，其中轻微逆

转的有 17289.65 km<sup>2</sup>，占总逆转沙漠化土地面积的 59.56%，明显逆转的有 11697.18 km<sup>2</sup>，占总逆转沙漠化土地面积的 40.35%；而发展的沙漠化土地面积有 17143.32 km<sup>2</sup>，轻微和明显发展的沙漠化土地面积分别占总的沙漠化发展面积的 64.17%和 35.83%。总体上，2000-2005 年间鄂尔多斯高原沙漠化逆转趋势明显，这五年间年均沙漠化净逆转面积为 2368.70 km<sup>2</sup>，明显高于前两个时期的年均沙漠化净逆转面积。从 2000-2005 年间逆转和发展的沙漠化土地的空间分布上看，逆转的沙漠化土地主要分布于鄂尔多斯高原东北部的准格尔旗、达拉特旗和东胜这三个旗县的大部分地区，杭锦旗南部、鄂托克旗和乌审旗交界以及鄂托克前旗和乌审旗南部交界的温带落叶灌丛区。而发展的沙漠化土地主要集中分布在伊金霍洛旗的大部分地区以及鄂托克前旗西北部的温带落叶灌丛与荒漠草原的过渡地带。根据各个旗县的沙漠化逆转与发展状况（表 3-18），伊金霍洛旗和鄂托克前旗逆转的沙漠化土地面积小于发展的沙漠化土地面积外，其余六个旗县均表现为逆转的沙漠化土地面积大于发展的沙漠化土地面积。在各个旗县中，准格尔旗逆转的沙漠化土地面积占该旗土地面积的比例最大，达到 38.72%；而对于沙漠化发展，伊金霍洛旗发展的沙漠化土地的比例占到该旗土地面积的 38.50%，大于其他旗县。

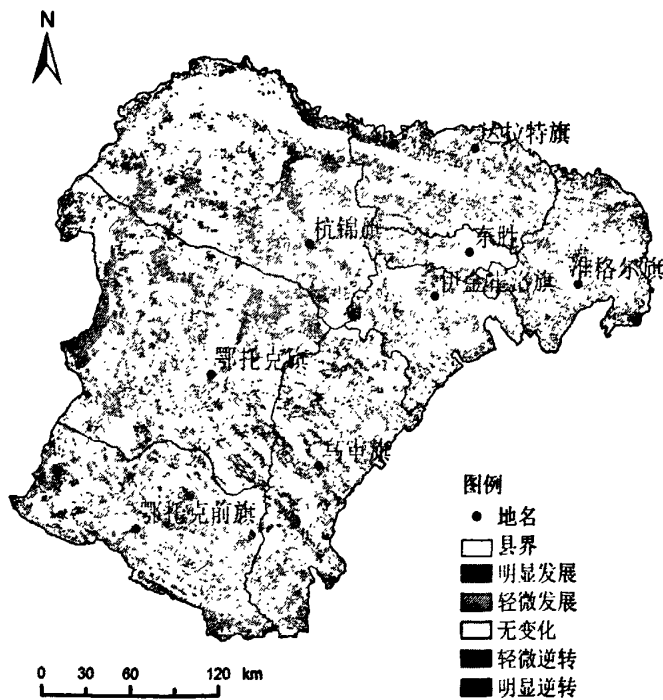


图 3-13 2000-2005 年鄂尔多斯高原沙漠化变化的空间分布

Fig 3-13 The spatial distribution of sandy desertification in Ordos Plateau form 2000 to 2005

表 3-18 2000-2005 各旗县沙漠化逆转与发展状况

Table 3-18 The area of sandy desertification reversion and expansion in each counties from 2000 to 2005

| 旗县    | 轻微逆转               |       | 明显逆转               |       | 轻微发展               |       | 明显发展               |       |
|-------|--------------------|-------|--------------------|-------|--------------------|-------|--------------------|-------|
|       | 面积                 | 百分比   | 面积                 | 百分比   | 面积                 | 百分比   | 面积                 | 百分比   |
|       | (km <sup>2</sup> ) | (%)   | (km <sup>2</sup> ) | (%)   | (km <sup>2</sup> ) | (%)   | (km <sup>2</sup> ) | (%)   |
| 杭锦旗   | 4359.15            | 23.12 | 2458.63            | 13.04 | 1461.78            | 7.75  | 598.5              | 3.17  |
| 达拉特旗  | 1774.39            | 21.57 | 1313.43            | 15.96 | 929.09             | 11.29 | 597.24             | 7.26  |
| 准格尔旗  | 1279.94            | 16.94 | 1645.31            | 21.78 | 343.71             | 4.55  | 613.5              | 8.12  |
| 鄂托克旗  | 4766.48            | 23.52 | 3020.84            | 14.90 | 2617.62            | 12.91 | 849.62             | 4.19  |
| 东胜    | 399.38             | 18.71 | 361.31             | 16.92 | 140.15             | 6.56  | 274.72             | 12.87 |
| 伊金霍洛旗 | 557.46             | 9.48  | 275.84             | 4.69  | 1365.16            | 23.21 | 898.87             | 15.29 |
| 乌审旗   | 2458.87            | 21.15 | 1804.33            | 15.52 | 1094.55            | 9.41  | 582.22             | 5.01  |
| 鄂托克前旗 | 1693.98            | 13.73 | 817.49             | 6.63  | 2747.99            | 22.27 | 1728.6             | 14.01 |

## 本章小结

本章紧紧围绕沙漠化定量监测这一科学问题，在系统分析沙漠化监测指标体系的基础上，提出了适用于本研究的沙漠化定量监测指标体系，并建立相应的沙漠化定量监测方法。以此为基础，对鄂尔多斯高原 1980、1990、2000 和 2005 年的沙漠化状况进行监测，并对其时空动态进行分析。主要的成果与结论如下：

1、从沙漠化过程引起的地表特征变化入手，综合考虑评价指标的代表性、可用遥感反演等特性，选取归一化植被指数 NDVI、滑动标准差指数 MSDI 以及地表反照率 Albedo 三个指标分别代表沙漠化地表的植被丰富、景观格局以及地表微气候条件，用于沙漠化定量监测。

2、针对 Landsat 数据特点，提出了各个指标的反演算法，并详细介绍了利用 COST 模型反演地表反照率的算法。在此基础上，综合考虑不同植被类型区以及遥感影像获取的时间，建立沙漠化定量监测的规则集，最终建立了基于决策树模型的沙漠化定量监测方法。根据精度评价的结果，鄂尔多斯高原四期沙漠化监测结果的精度均在 90% 以上，可以用于鄂尔多斯高原的沙漠化监测。

3、1980-1990 年间，逆转的沙漠化土地在鄂尔多斯高原分布的相对分散，其中以鄂尔多斯高原东北部即达拉特旗和准格尔旗北部的农田与温带落叶灌丛区的过渡地带以及东部部分的温带禾草草原区，以及鄂尔多斯高原中部、包括乌审旗和鄂托克旗

大部的温带落叶灌丛区为主要逆转区域；而发展的沙漠化土地的空间分布相对较为集中，主要分布在杭锦旗东南部的温带落叶灌丛与荒漠草原的过渡区域、准格尔其西部的温带禾草草原区域、以及鄂托克前旗南部的温带落叶灌丛区。

4、1990-2000 年间，轻微逆转的沙漠化土地分布的相对较为均匀，而明显逆转的沙漠化土地则集中分布在伊金霍洛旗西北部的温带落叶灌丛与温带禾草草原的过渡区以及鄂托克前旗西部的温带落叶灌丛区；沙漠化发展的区域主要分布在准格尔旗与达拉特旗交界北部的农田区域和南部的温带落叶灌丛与温带禾草草原过渡区域、东胜西部的温带禾草草原与温带落叶灌丛的交界区域、杭锦旗西南部的荒漠区以及东南部的温带落叶灌丛区域以及乌审旗、鄂托克旗以及鄂托克前旗交界的温带落叶灌丛区域。

5、2000-2005 年，逆转的沙漠化土地主要分布于鄂尔多斯高原东北部的准格尔旗、达拉特旗和东胜这三个旗县的大部分地区，杭锦旗南部、鄂托克旗和乌审旗交界以及鄂托克前旗和乌审旗南部交界的温带落叶灌丛区；而发展的沙漠化土地主要集中分布在伊金霍洛旗的大部分地区以及鄂托克前旗西北部的温带落叶灌丛与荒漠草原的过渡地带。

## 第四章 气候变化和人类活动在沙漠化过程中相对作用定量评价方法研究

根据第三章中的沙漠化定量监测方法,鄂尔多斯高原的沙漠化状况可以被准确的监测。然而,要确定在沙漠化的变化过程中气候变化和人类活动的相对作用大小,需要建立一套方法体系来进行评价。基于此,第四章以建立沙漠化过程中气候变化和人类活动相对作用的定量评价方法为重点,从评价方法概念模型的提出、基础数据的处理、相关参数的量化、模型的相对验证以及与其他模型方法比较等方面进行系统的论述。

### 4.1 气候变化和人类活动在沙漠化过程中相对作用定量评价方法的概念框架

如何确定气候变化和人类活动在沙漠化过程中的相对作用,前人已经做了大量的探索性研究,提出了不同的研究方法和思路。根据本文绪论部分对各种研究方法原理以及优缺点的分析,本研究试图从以下三点入手,提出气候变化和人类活动在沙漠化过程中相对作用定量评价的概念模型:

- 1) 以一定时期内沙漠化动态为基础,反推气候变化和人类活动在此过程中的相对作用;
- 2) 选取一种适合遥感定量反演的且可以衡量气候变化和人类活动对沙漠化相对作用的公共指标;
- 3) 建立该时期内沙漠化动态与衡量气候变化和人类活动相对作用的指标的变化趋势之间的关系,并以此为基础进行定量评价。

在以上三点中,第一点表示了评价方法的基本流程,第二、三点明确了建立评价方法的关键与重点,即选取公共指标和建立沙漠化动态与气候变化和人类活动相对作用之间的关系。

公共指标的选取是建立评价方法的关键,需要综合考虑以下几个方面:1、该指标能够指示沙漠化动态,是沙漠化变化过程中的核心指标,具有明确的生态意义;2、该指标不仅能够反映气候变化的相对作用,也能够反映人类活动的相对作用,即利用该指标能将气候变化和人类活动统一到一个可比的层面上;3、该指标能够通过遥感进行定量反演,进而实现时空上的连续表达并与沙漠化动态信息相对应。基于以上三点,本研究从沙漠化过程引起的植被变化入手,选取植被的净初级生产力(Net Primary Production, NPP)作为公共指标来衡量气候变化和人类活动在沙漠化过程中的相对作

用。

陆地表层植被的格局与变化是气候变化和人类活动共同作用的结果（黄秉维等，1999；信忠保等，2007），特别是人类活动，使得地表植被状况从其稳定状态发生了偏离，形成了具有人类活动特征的地表植被的格局与变化过程（康相武等，2007）。这为从植被变化入手研究气候变化和人类活动对沙漠化的影响提供了理论支持。净初级生产力（NPP）作为陆地表层碳循环的重要组成部分，它直接反映了植被群落在自然条件下的生产能力，是一个估算地球支持能力和评价陆地生态系统可持续发展的一个重要生态指标。NPP 作为沙漠化土地生态系统的核心指标，综合反映了气候变化和人类活动对沙漠化的影响。另外，可以通过潜在 NPP（无人干扰的、只有气候作用的 NPP）与实际 NPP 之间的差值来衡量以土地利用方式和强度变化为主要特征的人类活动造成的 NPP 降低（图 4-1），进而衡量人类活动的影响。关于人类活动引起的 NPP 变化，国外的相关研究在理论与应用两个层面上都做了大量的工作。此外，不论是潜在还是实际 NPP 的计算可以，都可以通过模型并借助气候数据、遥感数据以及相关经验参数来进行计算，能够实现时空上的连续表达。在本研究中，选择潜在 NPP 即只有气候作用下的 NPP 以及潜在 NPP 与实际 NPP 的差值来反映沙漠化过程中气候变化和人类活动的相对作用，将气候变化和人类活动在沙漠化过程中的相对作用统一到了一个可比的层面。

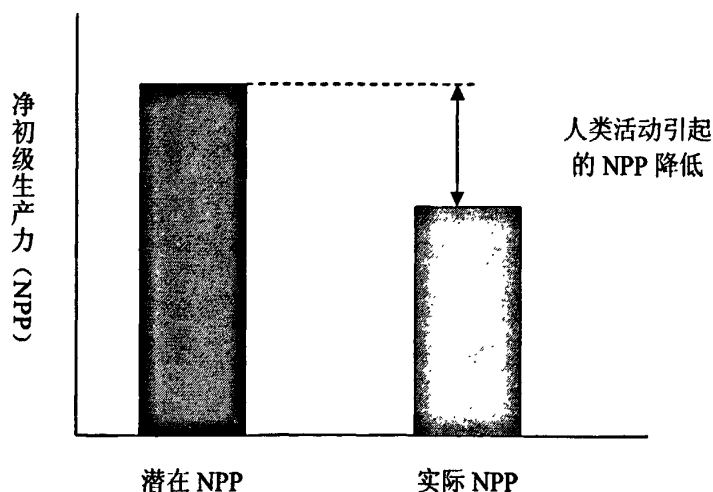


图 4-1 人类活动引起的 NPP 降低示意图

Fig 4-1 The reduction of NPP induced by human activities

在确定公共指标的基础上，建立沙漠化动态与气候变化和人类活动引起的 NPP 变化趋势之间的关系是确定其各自相对作用的重点。其核心思想就是将沙漠化复杂的驱动力过程通过建立沙漠化动态（逆转与发展）与气候变化和人类活动引起的 NPP

变化趋势之间的对应关系拆分为若干个意义简单明确的可能情景，进而达到气候变化和人类活动相对作用评价的目的。整个评价过程的概念模型框架如图 4-2 所示：

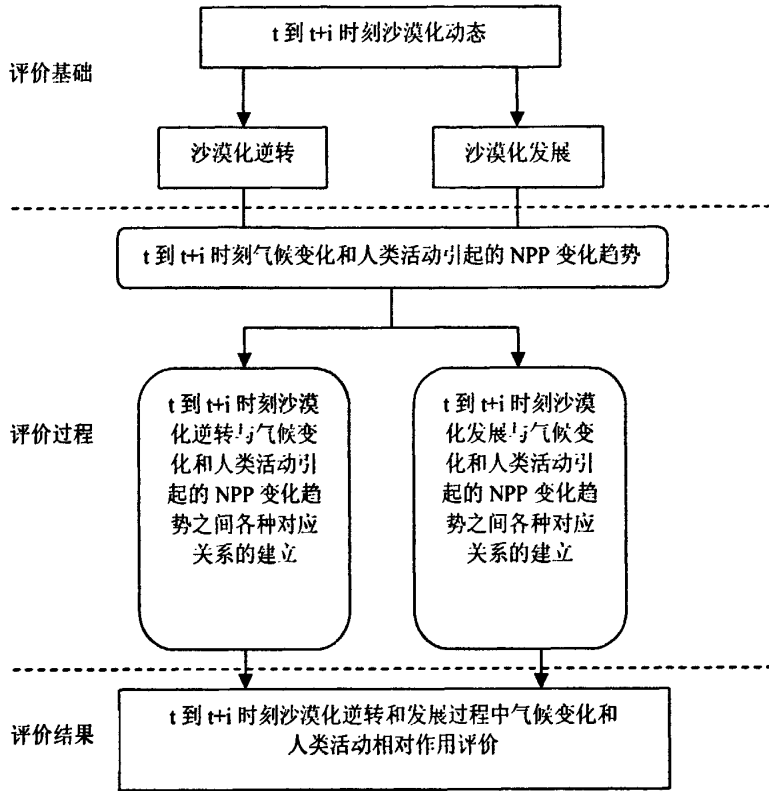


图 4-2 沙漠化过程中气候变化和人类活动相对作用评价概念框架

Fig 4-2 The conceptual frame of assessing the relative role of climate change and human activities in sandy desertification

需要明确的是，本研究中气候变化和人类活动相对作用分别是指各种气候、人类活动因子在沙漠化过程中作用的一个综合，并不代表其中每一个具体因子的作用大小。因此，在本研究中，沙漠化动态（逆转和发展）要么是气候变化综合作用引起的，要么是人类活动综合作用引起、要么是气候变化和人类活动综合作用共同引起的。

## 4.2 评价所需数据的处理

为了能使沙漠化过程中气候变化和人类活动相对作用在时空上连续表达，本研究的评价是基于栅格数据的。然而，由于评价所需数据来源广泛，既包括矢量数据又包括栅格数据，而且不同数据源的栅格数据空间分辨率也不尽一致。因此，需要对各种数据进行栅格转换以及重采样，以达到统一的空间分辨率。在综合考虑各种数据自身

特点以及实际研究需要的基础上,选取 1 km×1 km 的空间分辨率来统一各种数据源。本节在对各种数据源分类的基础上,介绍相关数据的处理方法与步骤。

#### 4.2.1 沙漠化数据的处理

沙漠化数据的处理是将第三章获得的 100 m×100 m 空间分辨率的沙漠化数据通过一定的转换方法将其转换或重采样为 1 km×1 km 空间分辨率的沙漠化数据。在本研究中,转换方法的建立是基于区域沙漠化综合评价的思路,即以 1 km 的栅格作为一个区域,通过设计一个沙漠化综合指数来代表该区域内所有 100 m 栅格数据反映的综合信息,并以此综合指数重新划分沙漠化等级来作为该 1 km 栅格的沙漠化等级,进而实现空间分辨率的转换。1 km 空间分辨率下沙漠化综合指数的计算可以用以下公式表达:

$$SdIndex_{1km} = \sum_{i=1}^n sd_{100i} \times p_i \quad (1)$$

其中,  $SdIndex_{1km}$  为 1 km 空间分辨率下沙漠化综合指数;  $n$  为沙漠化分类等级数,在本研究中  $n=5$ ;  $sd_{100i}$  为 100 m 空间分辨率下第  $i$  个沙漠化等级的取值,在本研究中非沙漠化、轻度、中度、重度以及严重沙漠化分别取 1、2、3、4、5;  $p_i$  为权重值,即 1 km 范围内第  $i$  沙漠化等级土地面积所占的比重。根据计算,  $SdIndex_{1km}$  的取值在 1-5 之间。在此基础上,考虑到 1 km 空间分辨率需要更全面体现区域的综合信息以及最大面积原则,通过分析相邻沙漠化等级面积对等情况下的沙漠化综合指数取值,从而确定 1 km 空间分辨下各个沙漠化等级对应的沙漠化综合指数范围。基于此,笔者确定 1 km 空间分辨率下非沙漠化的  $SdIndex_{1km}$  取值为 1-1.5、轻度沙漠化的  $SdIndex_{1km}$  取值为 1.5-2.5; 中度沙漠化的  $SdIndex_{1km}$  取值为 2.5-3.5; 重度沙漠化的  $SdIndex_{1km}$  取值为 3.5-4.5; 严重沙漠化的  $SdIndex_{1km}$  取值为 4.5-5。依据该方法,将四期鄂尔多斯高原 100 m×100 m 空间分辨率的沙漠化数据转换为 1 km×1 km 空间分辨率的沙漠化数据。

#### 4.2.2 矢量数据的栅格化处理

本研究中矢量数据只有点状和面状两种数据类型。其中,点状矢量数据只有气候数据。气候数据的获取来自在空间上离散分布的气象台站,因此需要通过空间内插的手段将离散的气候数据插值为连续的栅格数据。插值方法是利用采样点数据对未采样点进行估计的数学方法,被广泛应用于对连续空间的数值计算。气候数据空间插值的

方法有许多种,在本研究中,采用“考虑地形因素影响+气候要素距平值”的方法对气候数据进行空间内插。

地形对气候的影响不仅表现在气温随垂直高度的上升而下将,而且也对降雨的空间分布有着明显的影响。大量研究表明,将地形因素引进到气候要素的空间插值上来,能显著的提高空间插值的精度,对于气温尤其明显(廖顺宝等,2003;廖顺宝和李泽辉,2004;蔡福等,2005)。目前常用的考虑地形因素影响的空间插值方法是先建立气候要素与经度、纬度以及高程之间的多元回归模型,然后计算模型值与实际值之间的残差,该残差即认为是地形因素的影响,将残差空间插值后在加上回归模型的结果即得到栅格化的气候数据,这种方法简称为“多元回归+内插残差”法(廖顺宝和李泽辉,2004)。由于考虑到在计算多年数据时该方法工作量大的特点,廖顺宝等人(2004)将气候要素的距平值引入“多元回归+内插残差”法,即只对多年平均气候要素建立多元回归方程和对残差进行内插,其它任何年都使用该回归方程和内插后的残差,同时计算该年气候要素均值与多年均值的距平并在空间上进行内插,然后加上栅格化后的多年平均气候要素数据就得到该年的栅格化气候要素数据。这种方法可以简要地表示为“多元回归+内插残差+内插距平”法,该方法在保证精度的同时,大大节约了工作量(廖顺宝和李泽辉,2004;蔡福等,2005)。本研究采用的“考虑地形因素影响+气候要素距平值”方法即“多元回归+内插残差+内插距平”法。

在本研究中,残差与距平的内插方法采用反距离权重法(Inverse Distance Weighted, IDW)。IDW 是基于“地理学第一定律”的基本假设:即两个物体的相似性随它们间的距离增大而减少。假设已知样点对预测点值的预测都有局部性的影响,其影响随距离增加而减小。离预测点近的已知样点在预测过程中所占权重大于离预测点远的已知样点。本研究选取位于中国北方地区的 267 个气象站点数据建立各气候要素的回归模型,依照“多元回归+内插残差+内插距平”法的计算过程,获得鄂尔多斯高原降雨、温度、辐射等气候要素月均值的 1km 栅格化空间数据。

本研究中面状矢量数据主要包括植被图和土壤图。其栅格化过程可以通过以下几个步骤来实现:1、首先将矢量的植被图和土壤图直接转换为 100 m×100 m 空间分辨率的栅格数据;2、计算 1 km 栅格中各植被和土壤类型的面积百分比;3、以百分比为权重,利用加权平均的方法计算各植被和土壤类型属性的加权平均值,以此平均值作为 1km 栅格新的植被和土壤属性值。

#### 4.2.3 NDVI 数据的处理

NDVI 数据是计算实际 NPP 的基础。本研究所用的 NDVI 数据有两个来源,一是

来自美国航空航天局 (NASA) 全球监测与模型研究组 (Global Inventor Modeling and Mapping Studies, GIMMS) 发布的半月最大值合成的 (Maximum Value Composites, MVC) GIMMS NDVI 数据。这套数据是由搭载与 NOAA 卫星的改进型甚高分辨率辐射计 (Advanced Very High Resolution Radiometer, AVHRR) 获得, 时间范围是 1981-2003 年, 空间分辨率为 8 km。二是来自比利时佛莱芒技术研究所 (Flemish Institute for Technological Research, Vito) 发布的 10 日最大合成的 SPOT VGT NDVI 数据。这套数据是由搭载在 SPOT 卫星的 VEGETATION (VGT) 传感器获得, 时间范围是 1998-2008, 空间分辨率为 1km。这两种数据集的 NDVI 数据都已经经过几何精校正、辐射校正、大气校正等预处理, 且都已采用最大值合成法以减少云、大气、太阳高度角等的影响。此外, GIMMS NDVI 数据集利用经验模式分解 (EMD) 部分消除了由于卫星轨道漂移所产生的噪音, 并且降低了火山喷饭对 NDVI 的影响; 辐射定标方面, GIMMS 数据集利用交叉辐射定标的方法, 增强了数据的精度。

本研究中 NDVI 数据的处理包括两个方面: 一是 GIMMS NDVI 数据的重采样; 二是利用 VGT NDVI 插补 2004-2005 年 GIMMS NDVI 的缺失。由于 GIMMS NDVI 的空间分辨率为 8km, 因此需要将其重采样为 1 km 空间分辨率的数据。在本研究中, 选取最临近距离法进行重采样, 获得 1981-2003 年 1 km 空间分辨率的 GIMMS NDVI 数据集。另外, 由于 GIMMS NDVI 数据的时间序列为 1981-2003 年, 而本研究的时间范围是 1980-2005, 因此, 缺少的 1980 年、2004-2005 年的数据需要进行插补。2004-2005 年的 NDVI 数据可以利用 SPOT VGT 数据进行插补。由于 AVHRR 和 VGT 传感器的红光和近红外波段设置不一致, 因此需要建立 1km 空间分辨率下 VGT NDVI 和 GIMMS NDVI 之间的回归关系, 进而将 VGT NDVI 数据转换为与 GIMMS NDVI 一致的数据。本研究中, 考虑到不同植被类型的 NDVI 对传感器响应的差异, 因此以植被类型为单元, 建立 SPOT VGT 和 GIMMS NDVI 之间的回归方程。回归方程的建立是利用研究区 SPOT VGT 和 GIMMS NDVI 在 1998-2003 年间的重叠数据, 在分别对 GIMMS NDVI 和 VGT NDVI 数据进行月最大值合成的基础上, 以植被类型区为单元, 采集建模点建立回归方程。其中, 建模点的采集综合考虑其在植被类型区的空间均匀分布、年份以及季节等因素。各植被类型区的 SPOT VGT 和 GIMMS NDVI 的散点图及回归方程如图 4-3 所示。然而, 缺少的 1980 年的 NDVI 数据无法通过其他 NDVI 数据源进行插补。在此情况下, 笔者考虑到在 1980 到 1981 年较短的时间内植被变化主要受降雨波动影响, 植被的降雨利用率 (NDVI/降雨) 变化较小, 所以 1980 年的 NDVI 数据可以通过 1981 年逐月的 NDVI 乘以 1980 年同 1981 年逐月降雨的比值来计算。根据以上的处理步骤, 建立起鄂尔多斯高原 1980-2005 年的 1 km 空间分辨率的 NDVI 月最大值合成数据集。

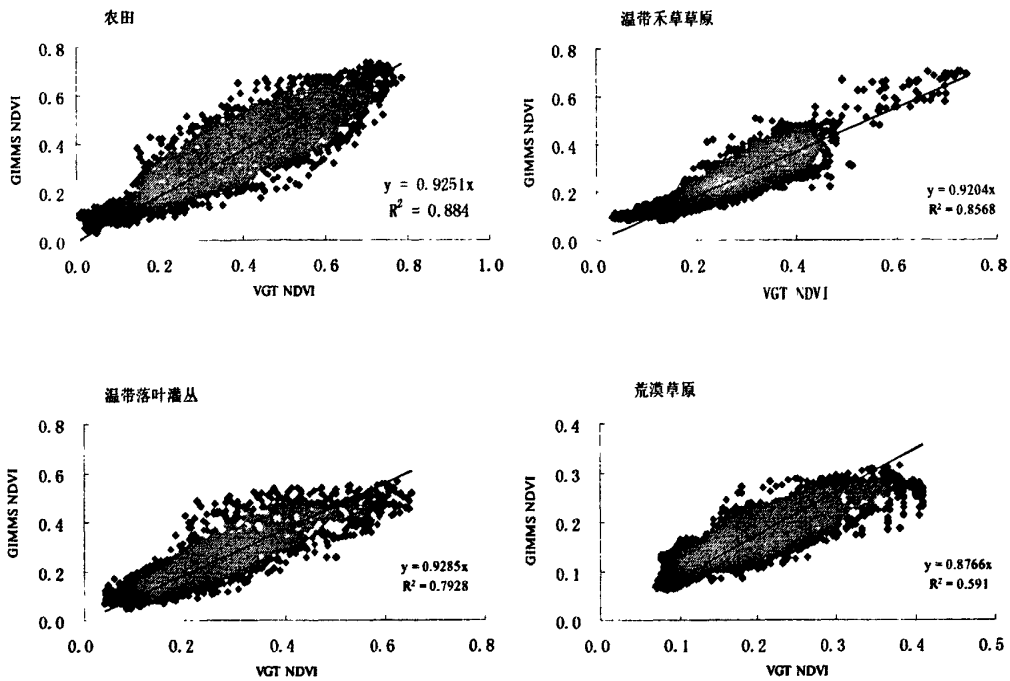


图 4-3 不同植被类型区 GIMMS NDVI 和 VGT NDVI 回归关系图

Fig 4-3 The regression between GIMMS NDVI and VGT NDVI of different vegetation region

### 4.3 实际和潜在 NPP 计算

植被净第一性生产力 (NPP) 指绿色植物在单位时间和单位面积上所积累的有机干物质总量, 它不仅是表征植物活动的重要变量, 而且是判定生态系统碳汇和调节生态过程的主要因子 (Field et al., 1998)。NPP 的获得方法有很多中, 除了基于地面定点实测的方法外, 在区域尺度上, 则必须借助模型的手段来进行估计。目前, 区域尺度上 NPP 的计算模型主要可以分为四类, 即统计模型, 半经验半理论模型, 植物生长机理-过程模型和光能利用率模型。统计模型也称气候模型, 是通过建立 NPP 和气候因子的相关关系来估算 NPP。这类模型虽然能够真实地反映植物 NPP 的地带性分布规律, 但由于缺乏严密的生理、生态理论作依据, 只能是对潜在 NPP 进行研究, 不能很好地反映实际情况。半经验半理论模型是生理生态学和统计相关方法结合的产物, 虽然综合考虑了多种因素的影响以及对分和能量平衡, 但是过于理想的模型条件假设对于在不同地区应用会产生较大的误差。植物生长机理-过程模型有较为完善的理论基础, 根据植物生理、生态学原理, 通过描述光能的转化过程来计算 NPP。这类模型机理明确, 有利于研究全球变化对陆地植被净第一性生产力的影响以及植被分布的变化对气候的反馈, 但是由于该类模型参数复杂、较多, 有些参数难以定量, 为使用带来

了困难。光能利用率模型是基于资源平衡的观点 (Field et al., 1995), 认为任何对植物生长起限制性的资源 (如水、氮、光照等) 均可用于 NPP 的估算。以此为基础, Monteith (1972, 1977) 首先提出用植被所吸收的光合有效辐射和光能转化率来计算 NPP。由于光能利用率模型将所有 NPP 调控因子以相对简单的方法组合在一起, 并且这种方法需要的参数可以直接由遥感数据获取, 这使其成为 NPP 模型的一个主要发展方向。

CASA (Carnegie Ames Stanford Approach, CASA) 模型是目前应用最为广泛的 NPP 估算模型之一。CASA 模型以光能利用率模型为基础进行构建, 综合考虑植被生理生态过程, 模型参数相对简单且易于获得, 在世界各地得到广泛的应用并取得很好的效果。本研究选取 CASA 模型来计算实际 NPP, 并参照 CASA 模型构建方式, 通过对植被吸收的光合有效辐射部分进行修改来计算潜在 NPP。

#### 4.3.1 实际 NPP 的计算

CASA 模型中 NPP 的计算主要有植被吸收的光合有效辐射 (Absorbed Photosynthetically Active Radiation, APAR) 与光能利用率 ( $\epsilon$ ) 两个变量来确定。

$$NPP(x, t) = APAR(x, t) \times \epsilon(x, t) \quad (2)$$

式中:  $APAR(x, t)$  表示像元  $x$  在  $t$  月份吸收的光合有效辐射 (单位:  $\text{MJ}/\text{m}^2/\text{月}$ );  $\epsilon(x, t)$  表示像元  $x$  在  $t$  月份的实际光能利用率 (单位:  $\text{gC}/\text{MJ}$ )。

##### 4.3.1.1 APAR 的估算

植被所吸收的光合有效辐射取决于太阳总辐射和植被对光合有效辐射吸收的比例, 可以用下列公式表达:

$$APAR(x, t) = SOL(x, t) \times FPAR(x, t) \times 0.5 \quad (3)$$

式中:  $SOL(x, t)$  表示  $t$  月份在像元  $x$  处的太阳总辐射量 ( $\text{MJ}/\text{m}^2/\text{月}$ );  $FPAR(x, t)$  为植被层对入射光合有效辐射的吸收比例 (无单位); 常数 0.5 表示植被所能利用的太阳有效辐射 (波长  $0.38\text{--}0.71\mu\text{m}$ )。

太阳总辐射根据 Penman-Monteith 蒸散模型中太阳总辐射的计算公式并采用左大康等人在中国地区的修正系数来计算, 具体计算方法参考论文第二章第四节中关于太阳总辐射计算模型的描述。植被层对入射光合有效辐射的吸收比例  $FPAR$  主要通过 NDVI 和植被类型两个因子来计算, 并使最大值不超过 0.95。

$$FPAR(x, t) = \left[ \frac{SR(x, t) - SR_{\min}}{SR_{\max} - SR_{\min}}, 0.95 \right] \quad (4)$$

式中:  $SR(x, t)$  由  $NDVI(x, t)$  求的:

$$SR(x, t) = \frac{1 + NDVI(x, t)}{1 - NDVI(x, t)} \quad (5)$$

$SR_{\min}$  取值为 1.08;  $SR_{\max}$  的大小与植被类型有关, 取值范围在 4.14-6.17 之间。在本研究中, 不同植被类型  $SR_{\max}$  的取值参照简单生物圈模型 (Simple Biosphere model version 2, SiB2) 以及区域气候系统 (Regional Atmospheric Modeling System, RAMS) 中的陆地生态系统大气圈反馈模型 3 (Land Ecosystem-Atmosphere Feedback model version 3, LEAF3) 中对不同植被类型  $SR_{\max}$  的取值, 对于针、阔叶混交林, 温带落叶阔叶林二级类型下的所有植被类型  $SR_{\max}$  取 6.17; 而对于农业植被、温带禾草草原、温带落叶灌丛、荒漠草原以及荒漠二级类型下的所有植被类型  $SR_{\max}$  取 5.13 (Dickinson et al., 1993; Walko and Tremback, 2005; Lunkeit et al., 2006)。

#### 4.3.1.2 光能利用率的估算

光能利用率是在一定时期单位面积上生产的干物质中所包含的化学潜能与同一时间投影到该面积上的光合有效辐射之比, 即植被把所吸收的光合有效辐射转化为有机碳的效率。植被的光能利用率受物种类型以及环境的影响表现出明显的差异性。Potter 等 (Potter et al., 1993) 认为在理想条件下植被具有最大光能利用率, 而现实条件下的最大光能利用率主要受温度和水分的影响, 其计算公式为:

$$\varepsilon(x, t) = T_{e1}(x, t) \times T_{e2}(x, t) \times W_e(x, t) \times \varepsilon_{\max} \quad (6)$$

式中,  $T_{e1}(x, t)$  和  $T_{e2}(x, t)$  表示低温和高温对光能利用率的胁迫 (无单位);  $W_e(x, t)$  为水分胁迫影响系数 (无单位);  $\varepsilon_{\max}$  是理想条件下的最大光能利用率 (单位: gC/MJ)。

##### (1) 温度胁迫因子的估算:

$T_{e1}(x, t)$  反映在低温和高温时植物的内在生化作用对光合的限制而降低净第一性生产力 (Potter et al., 1993; Field et al., 1995), 其公式如下:

$$T_{e1}(x, t) = 0.8 + 0.02 \times T_{opt}(x) - 0.0005 \times [T_{opt}(x)]^2 \quad (7)$$

式中,  $T_{opt}(x)$  为某一区域一年内 NDVI 值达到最高是的当月平均气温 (单位:  $^{\circ}\text{C}$ ), 当某一月平均气温小于或等于  $-10^{\circ}\text{C}$  时,  $T_{e1}(x, t)$  取 0。

$T_{e2}(x, t)$  表示环境温度从最适温度  $T_{opt}(x)$  向高温和低温变化时植物光能利用率逐渐变小的趋势 (Potter et al., 1993; Field et al., 1995), 这是因为低温和高温时高的呼吸消耗必将会降低光能利用率, 生长在偏离最适温度的条件下, 其光能利用率也一定会

降低。其计算公式如下:

$$T_{e2}(x,t) = 1.1814 / \{1 + \exp[0.2 \times (T_{opt}(x) - 10 - T(x,t))]\} \\ \times 1 / \{1 + \exp[0.3 \times (-T_{opt}(x) - 10 + T(x,t))]\} \quad (8)$$

当某一月平均温度  $T(x,t)$  比最适温度  $T_{opt}(x)$  高  $10^{\circ}\text{C}$  或低  $13^{\circ}\text{C}$  时, 该月的  $T_{e2}(x,t)$  值等于月平均温度  $T(x,t)$  为最适温度  $T_{opt}(x)$  时  $T_{e2}(x,t)$  值的一半。

## (2) 水分胁迫因子的估算

水分胁迫影响系数  $W_e(x,t)$  反映了植物所能利用的有效水分条件对光能利用率的影响, 随着环境中有效水分的增加,  $W_e(x,t)$  逐渐增大, 它的取值范围为 0.5 (在极端干旱条件下) 到 1 (非常湿润条件下) (朴世龙等, 2001), 其计算公式如下:

$$W_e(x,t) = 0.5 + 0.5 \times E(x,t) / E_p(x,t) \quad (9)$$

式中,  $E_p(x,t)$  为潜在蒸散量。在朴世龙等 (2001) 以及朱文泉 (2005) 等人的相关研究中, 利用 Thornthwaite 植被-气候关系模型来计算潜在蒸散量。然而, 由于 Thornthwaite 模型是在美国中东部湿润气候条件下拟合出的经验公式, 而我国地形复杂、气候多变, 该方法结果会与我国实际情况有较大出入 (周晓东等, 2002); 另外, 由于 Thornthwaite 模型对辐射、风速和空气湿度的影响研究不够, 在强风、干燥或晴空环境下该方法值偏低, 在寒冷和湿润环境下的值偏高 (Jensen et al., 1990)。因此, 本研究采用 FAO 推荐的 Penman-Monteith 模型来计算潜在蒸散。该模型理论基础合理, 综合了空气动力学的涡动传导与能量平衡, 考虑了植被的生理特征, 在干旱和湿润条件下准确性都相对较高 (Jensen et al., 1990)。其计算公式如下 (参数的相关描述见第二章第四节):

$$E_0 = \frac{0.408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0.34 U_2)} \quad (10)$$

然而, FAO 推荐的 Penman-Monteith 模型是基于一个假象的参考作物面来计算, 其高为 0.12m, 表面阻力为 70s/m, 反射率为 0.23。然而对于特定的区域, 这种假想的参考作物的潜在蒸发显然不能满足各个地区复杂的下垫面情况, 因此 FAO 在给出参考作物潜在蒸散计算公式的同时也给出了对于特定下垫面情况的修正而得到作物潜在蒸散, 它们之间的关系可以用下式表达:

$$ET_c = K_c \times ET_0 \quad (11)$$

式中,  $ET_0$  为参考作物潜在蒸散;  $ET_c$  为修正的作物潜在蒸散, 也就是本研究中计算

水分对光能利用率胁迫时的潜在蒸散;  $K_c$  为修正系数。  $K_c$  的值随作物类型、季节的变化而变化。根据 FAO 提供的经验参数 (Allen et al., 1998), 结合鄂尔多斯高原实际的植被类型, 得到不同植被在不同月份的  $K_c$  值, 见表 4-1:

表 4-1 鄂尔多斯高原主要植被类型的  $K_c$  值

Table 4-2 The value of  $K_c$  for mainly vegetation in Ordos Plateau

| 植被类型                       | 1月   | 2月   | 3月   | 4月   | 5月   | 6月   | 7月   | 8月   | 9月   | 10月  | 11月  | 12月  |
|----------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 针、阔叶混交林                    | 0.30 | 0.30 | 0.30 | 0.75 | 0.75 | 0.75 | 0.75 | 0.75 | 0.75 | 0.75 | 0.30 | 0.30 |
| 温带落叶阔叶林                    | 0.30 | 0.30 | 0.30 | 0.75 | 0.75 | 0.75 | 0.75 | 0.75 | 0.75 | 0.75 | 0.30 | 0.30 |
| 一年一熟粮食作物及<br>耐寒经济作物田、落叶果树园 | 0.30 | 0.30 | 0.30 | 1.15 | 1.15 | 0.40 | 0.60 | 1.20 | 1.20 | 0.48 | 0.30 | 0.30 |
| 温带丛生禾草草原                   | 0.30 | 0.30 | 0.30 | 0.75 | 0.75 | 0.75 | 0.75 | 0.75 | 0.75 | 0.75 | 0.30 | 0.30 |
| 温带禾草、杂类草草甸草原               | 0.30 | 0.30 | 0.30 | 0.75 | 0.75 | 0.75 | 0.75 | 0.75 | 0.75 | 0.75 | 0.30 | 0.30 |
| 禾草、杂类草草甸                   | 0.30 | 0.30 | 0.30 | 0.75 | 0.75 | 0.75 | 0.75 | 0.75 | 0.75 | 0.75 | 0.30 | 0.30 |
| 禾草、藁草及杂类草沼泽化草甸             | 0.30 | 0.30 | 0.30 | 0.75 | 0.75 | 0.75 | 0.75 | 0.75 | 0.75 | 0.75 | 0.30 | 0.30 |
| 禾草、杂类草盐生草甸                 | 0.30 | 0.30 | 0.30 | 0.75 | 0.75 | 0.75 | 0.75 | 0.75 | 0.75 | 0.75 | 0.30 | 0.30 |
| 温带落叶灌丛                     | 0.30 | 0.30 | 0.30 | 0.75 | 0.75 | 0.75 | 0.75 | 0.75 | 0.75 | 0.75 | 0.30 | 0.30 |
| 温带丛生矮禾草、矮半灌木荒漠草原           | 0.30 | 0.30 | 0.30 | 0.75 | 0.75 | 0.75 | 0.75 | 0.75 | 0.75 | 0.75 | 0.30 | 0.30 |
| 草原化灌木荒漠                    | 0.30 | 0.30 | 0.30 | 0.75 | 0.75 | 0.75 | 0.75 | 0.75 | 0.75 | 0.75 | 0.30 | 0.30 |
| 灌木荒漠                       | 0.30 | 0.30 | 0.30 | 0.30 | 0.30 | 0.30 | 0.30 | 0.30 | 0.30 | 0.30 | 0.30 | 0.30 |
| 半灌木、矮半灌木荒漠                 | 0.30 | 0.30 | 0.30 | 0.75 | 0.75 | 0.75 | 0.75 | 0.75 | 0.75 | 0.75 | 0.30 | 0.30 |
| 多汁盐生矮半灌木荒漠                 | 0.30 | 0.30 | 0.30 | 0.75 | 0.75 | 0.75 | 0.75 | 0.75 | 0.75 | 0.75 | 0.30 | 0.30 |
| 温带丛生禾草草原                   | 0.70 | 0.70 | 0.70 | 0.95 | 0.95 | 0.60 | 0.70 | 1.00 | 1.00 | 0.65 | 0.50 | 0.70 |
| +一年一熟粮食作物                  |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| 温带丛生禾草草原                   | 0.30 | 0.30 | 0.30 | 0.75 | 0.75 | 0.75 | 0.75 | 0.75 | 0.75 | 0.75 | 0.30 | 0.30 |
| +禾草、杂类草草甸                  |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| 温带丛生禾草草原                   | 0.30 | 0.30 | 0.30 | 0.75 | 0.75 | 0.75 | 0.75 | 0.75 | 0.75 | 0.75 | 0.30 | 0.30 |
| +禾草、藁草及杂类草沼泽化草甸            |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| 禾草、杂类草盐生草甸                 | 0.30 | 0.30 | 0.30 | 0.75 | 0.75 | 0.75 | 0.75 | 0.75 | 0.75 | 0.75 | 0.30 | 0.30 |
| +温带丛生禾草草原                  |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| 禾草、杂类草盐生草甸                 | 0.60 | 0.60 | 0.60 | 0.95 | 0.95 | 0.60 | 0.70 | 1.00 | 1.00 | 0.65 | 0.60 | 0.60 |
| +一年一熟粮食作物                  |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| 禾草、藁草及杂类草沼泽化草甸             | 0.60 | 0.60 | 0.60 | 0.90 | 0.90 | 0.70 | 0.65 | 1.05 | 1.05 | 0.58 | 0.45 | 0.60 |
| +温带丛生禾草草原+一年一熟粮食作物         |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| 温带丛生矮禾草、矮半灌木荒漠草原           | 0.30 | 0.30 | 0.30 | 0.75 | 0.75 | 0.75 | 0.75 | 0.75 | 0.75 | 0.75 | 0.30 | 0.30 |
| +温带丛生禾草草原                  |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| 温带落叶灌丛                     | 0.70 | 0.70 | 0.70 | 0.95 | 0.95 | 0.60 | 0.70 | 1.00 | 1.00 | 0.65 | 0.50 | 0.70 |
| +一年一熟粮食作物                  |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| 草原化灌木荒漠                    | 0.30 | 0.30 | 0.30 | 0.53 | 0.53 | 0.53 | 0.53 | 0.53 | 0.53 | 0.53 | 0.30 | 0.30 |
| +半灌木、矮半灌木荒漠                |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| 半灌木、矮半灌木荒漠                 | 0.30 | 0.30 | 0.30 | 0.53 | 0.53 | 0.53 | 0.53 | 0.53 | 0.53 | 0.53 | 0.30 | 0.30 |
| +灌木荒漠                      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| 半灌木、矮半灌木荒漠                 | 0.30 | 0.30 | 0.30 | 0.53 | 0.53 | 0.53 | 0.53 | 0.53 | 0.53 | 0.53 | 0.30 | 0.30 |
| +禾草、杂类草草甸                  |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| 河流                         | 0.63 | 0.63 | 0.63 | 1.25 | 1.25 | 1.25 | 1.25 | 1.25 | 1.25 | 1.25 | 0.63 | 0.63 |
| 湖泊                         | 0.63 | 0.63 | 0.63 | 1.25 | 1.25 | 1.25 | 1.25 | 1.25 | 1.25 | 1.25 | 0.63 | 0.63 |

在水分胁迫影响系数  $W(x,t)$  的计算中,  $E(x,t)$  为实际蒸散, 其计算可以通过土壤

水分子模型求得。当月平均温度小于或等于  $0^{\circ}\text{C}$  时,  $W_i(x,t)$  等于前一个月的值, 即  $W_i(x,t-1)$ 。

### (3) 土壤水分子模型

CASA 模型中的土壤水分子模型是基于综合考虑降雨与蒸散之间关系以及土壤属性的基础上建立的。在土壤水分子模型中, 每一个栅格的月平均土壤含水量可以通过以下两个公式来计算:

当月平均降水量小于潜在蒸散量时,

$$SOILM(x,t) = \text{MAX}[SOILM(x,t-1) - [E_p(x,t) - PPT(x,t)] \cdot RDR, 0] \quad (12)$$

当月平均降水量大于或等于潜在蒸散量时,

$$SOILM(x,t) = \text{MAX}[(SOILM(x,t-1) + [PPT(x,t) - E_p(x,t)], FC] \quad (13)$$

式中:  $SOILM(x,t)$  是指某一月的土壤含水量 (mm);  $E_p$  表示月潜在蒸散 (mm);  $PPT$  表示月平均降水量 (mm);  $RDR$  表示相对干燥率(Relative Drying Rate), 表示土壤水分的蒸发潜力;  $FC$  为田间持水量 ( $\text{m}^3/\text{m}^3$ ), 即土壤所能稳定保持的最高土壤含水量。Potter 等 (1993) 在计算土壤水分时假设当某一月的平均温度小于或等于  $0^{\circ}\text{C}$  时, 土壤含水量不发生变化, 与上一月的土壤含水量相当, 而该月的降水 (雪的形式) 将累加到从该月其第一个出现温度大于  $0^{\circ}\text{C}$  的月份。

相对干燥率  $RDR$  的计算可以通过以下公式实现:

$$RDR = (1+a)/(1+a\theta^b) \quad (14)$$

式中:  $\theta$  表示前一个月的土壤含水量 ( $\text{m}^3/\text{m}^3$ );  $a$  和  $b$  是根据 Saxton 等 (Saxton et al., 1986) 提出的经验公式求出的系数, 其值与土壤类型有关, 可根据土壤中粘粒与沙粒的百分比求的, 其计算公式如下:

$$a = \exp[-4.396 - 0.0715(\%clay) - 4.880 \times 10^{-4}(\%sand)^2 - 4.285 \times 10^{-5} \times (\%sand)^2(\%clay)] \times 100.0 \quad (15)$$

$$b = -3.140 - 0.00222(\%clay)^2 - 3.484 \times 10^{-5} \times (\%sand)^2(\%clay) \quad (16)$$

式中:  $\%clay$  和  $\%sand$  分别是土壤中粘粒和沙粒所占的百分比。

田间持水量  $FC$  以及萎蔫含水量  $WPT$  分别表是单位体积土壤持水能力的上限与下限, 他们与土壤深度 (m) 的乘积可用于确定土壤含水量的上限与下限。田间持水量与萎蔫含水量与土壤质地有关, 可以通过土壤含水量和土壤水势之间的关系求出。

$$\psi = a\theta^b \quad (17)$$

式中： $\psi$  是土壤水势 (kPa)。Potter 等 (1993) 在关于土壤田间持水量和萎蔫含水量的计算中，采用前人关于土壤水分与质地关系的研究成果 (Papendick and Campbell, 1980; Saxton et al., 1986)，即认为粗土壤质地的田间持水量 10 kPa 时的土壤体积含水量，中、细土壤质地的田间持水量等于土壤水势为 33 kPa 时的土壤体积含水量，土壤中萎蔫含水量则等于土壤水势为 1500 kPa 时土壤体积含水量。当土壤含水量大于上限值时，模型假设多余的水分以径流的形式流出该栅格，且相邻的栅格之间没有相互作用。关于土壤深度的假定，Potter 等假设森林类型的土壤深度为 2 m，其他植被类型土壤深度为 1 m。此外，细、中、粗土壤质地类型的划分可以利用土壤粘粒所占的百分比来划分，中、细土壤质地对应的粘粒含量大于 30%，而粗土壤质地对应的粘粒含量小于 30% (Potter et al., 1993)。

水分胁迫因子计算公式中的当月实际蒸散量可以根据上月的土壤含水量、降雨量、潜在蒸散、土壤相对干燥率  $RDR$  以及土壤萎蔫含水量来计算。其计算公式如下：

当月降水量小于潜在蒸散时：

$$E(x, t) = \min \{ \{PPT(x, t) + [E_r(x, t) - PPT(x, t)]RDR\}, \\ \{PPT(x, t) + [SOILM(x, t-1) - WPT(x)]\} \} \quad (18)$$

当月降水量大于或等于潜在蒸散时：

$$E(x, t) = E_r(x, t) \quad (19)$$

另外，在实际运行土壤水分子模型中，牵涉到两个亟待解决的关键问题：一是土壤的初始含水量如何确定；二是土壤质地的相关参数划分是按照美国制土壤质地分级标准来划分，而实际研究所用的土壤图中的质地属性来自于全国第二次土壤普查，是按国际制进行的，如何将国际制式的土壤质地分级转换为适合模型应用的美国制式，是需要解决的第二个问题。

根据土壤水分子模型，当月土壤含水量总依赖于上月土壤含水量的值，因此，如何确定一个初始的土壤含水量用于模型的模拟至关重要。在本研究中，首先将土壤含水量完全饱和状态，即全部达到田间持水量，然后利用上世纪 70 年代的平均气候条件（即计算 70 年代月均温度、降水、蒸散等气候因子）进行循环计算，直到  $t$  次循环和  $t-1$  次循环土壤含水量相差小于 1% 时即认为达到稳定。然后，就可以用  $t$  次循环模拟的 12 月份的土壤含水量作为初始含水量来计算研究起始年 1 月份的土壤水分含量。

目前，我国的土壤属性数据大多来自全国第二次土壤普查所获得的数据，而对于土壤质地的分析，第二次土壤普查采用的是国际标准。然而，本研究中关于利用土壤粘粒、沙粒百分比计算相关参数的经验公式，都是基于美国制式而得出的，因此需要

采取一定的方法将两种制式进行转换。国际制与美国制关于土壤颗粒的划分如表 4-2 所示:

表 4-2 国际制与美国制土粒分级标准对比

| Table 4-2 The comparison of the soil texture classification between USDA and FAO |                           |
|----------------------------------------------------------------------------------|---------------------------|
| 国际制土粒分级标准 (FAO)                                                                  | 美国制土粒分级标准 (USDA)          |
| FAO-A: 粗砂 (2-0.2 mm)                                                             | USA-A: 砂粒 (2-0.05 mm)     |
| FAO-B: 细砂 (0.2-0.02 mm)                                                          | USA-B: 粉粒 (0.05-0.002 mm) |
| FAO-C: 粉砂 (0.02-0.002 mm)                                                        | USA-C: 粘粒 (<0.002 mm)     |
| FAO-D: 粘粒 (<0.002 mm)                                                            |                           |

在本研究中, 采用 Skaggs 等提出的土壤颗粒累积分布模型来进行转换 (Skaggs et al., 2001)。该模型可以通过以下方程来表示:

$$P(r)=\frac{1}{1+(1/P(r_0)-1)\exp(-uR^c)} \tag{20}$$

$$R=\frac{r-r_0}{r_0}, r\geq r_0>0 \tag{21}$$

式中:  $P(r)$  是小于  $r$  粒级的土壤颗粒所占的比例;  $r_0$  是相对于  $r$  粒级更低的一个粒级;  $u$  和  $c$  是模型参数, 可以通过以下方程获得:

$$c=\alpha\ln\frac{v}{w}, u=-v^{1-\beta}w^\beta \tag{22}$$

$$v=\ln\frac{1/P(r_1)-1}{1/P(r_0)-1}, w=\ln\frac{1/P(r_2)-1}{1/P(r_0)-1} \tag{23}$$

$$\alpha=1/\ln\frac{r_1-r_0}{r_2-r_0}, \beta=\alpha\ln\frac{r_1-r_0}{r_0} \tag{24}$$

$$1>P(r_2)>P(r_1)>P(r_0)>0, r_2>r_1>r_0>0 \tag{25}$$

其中,  $r_2$ 、 $r_1$ 、 $r_0$  分别为不同的粒级。在本研究的实际转换中,  $r_2$ 、 $r_1$ 、 $r_0$  分别对应 0.2、0.02 和 0.002。由于国际制与美国制对粘粒的划分采用相同的粒级, 因此对于国际制向美国制的转化, 只需利用上面的方程组计算  $r=0.05$  的  $P(r)$  即可。基于此, 实现了国际制向美国制的转换。

(4) 最大光能利用率  $\varepsilon_m$  的确定

植被的最大光能利用率是在理想条件下所能达到的最大光利用效率。在 CASA 模

型中，全球植被的最大光能利用率被认为是一个固定值，即 0.389gC/MJ（Potter et al., 1993）。然而，人们对它的大小一直存在争议，不同的学者在模型中的取值不一样，取值范围从 0.09-2.16 gC/MJ 不等。在实际情况中，植被最大光能利用率受植被类型、地理位置的限制。朱文泉等通过利用实测的 NPP 数据以及植被吸收的光合有效辐射、温度和水分胁迫因子之间的关系计算得到了全国主要植被类型的最大光能利用效率（朱文泉等，2006）。本研究采取其研究的结果，得到鄂尔多斯高原主要植被类型的最大光能利用率（表 4-3）。

表 4-3 鄂尔多斯高原主要植被类型参数表

Table 4-3 The parameters of mainly vegetaion in Ordos Plateau

| 植被类型                             | 最大光能利用率 (gC/MJ) | LAI <sub>max</sub> | LAI <sub>min</sub> |
|----------------------------------|-----------------|--------------------|--------------------|
| 针、阔叶混交林                          | 0.475           | 6                  | 1                  |
| 温带落叶阔叶林                          | 0.692           | 6                  | 1                  |
| 一年一熟粮食作物及耐寒经济作物田、落叶果树园           | 0.542           | 4.5                | 0.5                |
| 温带丛生禾草草原                         | 0.542           | 3                  | 0.5                |
| 温带禾草、杂类草草甸草原                     | 0.542           | 3                  | 0.5                |
| 禾草、杂类草草甸                         | 0.542           | 3                  | 0.5                |
| 禾草、藁草及杂类草沼泽化草甸                   | 0.542           | 3                  | 0.5                |
| 禾草、杂类草盐生草甸                       | 0.542           | 3                  | 0.5                |
| 温带落叶灌丛                           | 0.429           | 4.5                | 1                  |
| 温带丛生矮禾草、矮半灌木荒漠草原                 | 0.542           | 3                  | 0.5                |
| 草原化灌木荒漠                          | 0.542           | 0.8                | 0.2                |
| 灌木荒漠                             | 0.542           | 0.8                | 0.2                |
| 半灌木、矮半灌木荒漠                       | 0.542           | 0.8                | 0.2                |
| 多汁盐生矮半灌木荒漠                       | 0.542           | 0.8                | 0.2                |
| 温带丛生禾草草原+一年一熟粮食作物                | 0.542           | 3.75               | 0.75               |
| 温带丛生禾草草原+禾草、杂类草草甸                | 0.542           | 3                  | 0.5                |
| 温带丛生禾草草原+禾草、藁草及杂类草沼泽化草甸          | 0.542           | 3                  | 0.5                |
| 禾草、杂类草盐生草甸+温带丛生禾草草原              | 0.542           | 3                  | 0.5                |
| 禾草、杂类草盐生草甸+一年一熟粮食作物              | 0.542           | 3.5                | 0.75               |
| 禾草、藁草及杂类草沼泽化草甸+温带丛生禾草草原+一年一熟粮食作物 | 0.542           | 3.5                | 0.8                |
| 温带丛生矮禾草、矮半灌木荒漠草原+温带丛生禾草草原        | 0.542           | 3                  | 0.5                |
| 温带落叶灌丛+一年一熟粮食作物                  | 0.542           | 4.25               | 0.75               |
| 草原化灌木荒漠+半灌木、矮半灌木荒漠               | 0.542           | 0.8                | 0.2                |
| 半灌木、矮半灌木荒漠+灌木荒漠                  | 0.542           | 0.8                | 0.2                |
| 半灌木、矮半灌木荒漠+禾草、杂类草草甸              | 0.542           | 1.9                | 0.35               |
| 河流                               | 0.542           | 0                  | 0                  |
| 湖泊                               | 0.542           | 0                  | 0                  |

4.3.2 潜在 NPP 的计算

潜在 NPP 多是针对潜在植被而言，即在某一种气候条件下、无人类干扰下所可能存在的植被或植被类型组合。而在本研究中，潜在 NPP 是一个相对的概念，是指以某一历史时刻的植被状态为基准，在无人为干扰而只受气候影响下所达到的一种理想状

态的 NPP，它只是一个相对参考的标准，而非绝对意义上潜在植被 NPP 的值。本研究中的潜在 NPP 一是用来反映气候变化对植被生长，进而对沙漠化的影响；二是作为一种相对参考，来定义人类活动对植被以及沙漠化过程的影响。在本研究中，潜在 NPP 的计算采取与 CASA 模型相同的构造方式，以上世纪 70 年代鄂尔多斯高原 1:25 万植被类型图为基础进行计算，其中植被层对入射光合有效辐射的吸收比例  $FPAR$  的计算采用气候参数与经验值结合的方法计算，而光能利用率以及其他部分的计算与 CASA 模型一致。

#### 4.3.2.1 潜在 NPP 的 $FPAR$ 计算

由于不像在实际 NPP 计算中  $FPAR$  可以由 NDVI 数据计算，潜在 NPP 中  $FPAR$  的计算是由气候参数与植被类型相关的经验值计算得到的。其计算过程如下列方程所示：

$$FPAR = \min(FPAR_e, FPAR_s) \quad (26)$$

式中： $FPAR_e$  为受环境限制的  $FPAR$ ； $FPAR_s$  为受结构限制的  $FPAR$ ，对所有植被类型来说，其值统一取 0.95。 $FPAR_e$  的计算可以通过叶面积指数（Leaf Area Index, LAI）来计算：

$$FPAR_e = 1 - e^{-kLAI} \quad (27)$$

式中： $k$  为常数 0.5； $LAI$  为叶面积指数，其计算如方程 所示：

$$LAI = LAI_{min} + fsw \times fst \times (LAI_{max} - LAI_{min}) \quad (28)$$

其中， $LAI_{min}$  和  $LAI_{max}$  分别为最小和最大叶面积指数，其值由具体植被类型决定。在本研究中，参照区域气候系统（Regional Atmospheric Modeling System, RAMS）中的陆面过程方案以及生物圈大气传输模式（Biosphere-Atmosphere Transfer Scheme, BATS）中对全球植被的相关参数定义（Dickinson et al., 1993; Walko and Tremback, 2005; Lunkeit et al., 2006），进而确定鄂尔多斯高原主要植被类型的  $LAI_{min}$  和  $LAI_{max}$ ，其值如表 4-3 所示。 $fsw$  和  $fst$  分别表示土壤水分和土壤温度对植被生长的限制，其计算如方程 所示：

$$fsw = \min(1, \max(0, \frac{W_{soil} - W_{min}}{W_{crit} - W_{min}})) \quad (29)$$

$$fst = \min(1, \max(0, 1 - 0.0016 \times (298.0 - T)^2)) \quad (30)$$

其中， $W_{soil}$  和  $W_{max}$  分别表示土壤含水量和土壤最大含水量，计算方法参考 CASA 模型

中土壤水分子模型;  $W_m$  为常数 0.25, 表示土壤中凋萎含水量占最大含水量的比例(参考文献);  $T$  为 20cm 深度土壤温度 (K), 该数据是利用 1970-1980 年间原伊克昭盟地方气象站点观测的 20cm 深度土壤温度数据(月值数据, 且只记录到 1980 年)与气温数据所建立的回归模型(逐月建立方程), 从而将 1980-2005 年的气温数据带入回归方程来计算 1980-2005 年逐月的 20cm 深度土壤温度。

根据以上步骤, 在求出  $FPAR$  的基础上, 结合 CASA 模型计算的光能利用率, 就可以求出潜在 NPP。根据实际 NPP 以及潜在 NPP 的计算步骤, 在准备好所有基础数据的基础上, 利用 Arcgis 的 AML 语言进行编程计算, 获得 1980-2005 年逐月的鄂尔多斯高原实际与潜在 NPP 值。

#### 4.4 气候变化和人类活动在沙漠化过程中相对作用定量评价方法建立

根据本章第一节中描述的沙漠化过程中气候变化和人类活动相对作用定量评价方法的概念框架, 评价过程或者评价方法建立的核心是确定  $t$  到  $t+i$  时段内沙漠化动态与该时段气候变化和人类活动引起 NPP 变化趋势之间的关系。在本研究中, 趋势分析以年为单位进行, 因此, 在获得 1980-2005 年逐月的实际与潜在 NPP 的基础上, 进行年值合成处理(逐月相加), 得到 1980-2005 年逐年的实际与潜在 NPP 值。气候作用的 NPP 以潜在 NPP 表示, 而人类活动作用的 NPP 以潜在 NPP 与实际 NPP 的差值表示。在本研究中, 气候和人类活动作用的 NPP 分别以  $CNPP$  和  $HNPP$  表示, 在  $t$  到  $t+i$  时段内各自的变化趋势通过线性回归来计算, 即以年份为自变量、以  $CNPP$  和  $HNPP$  为因变量, 通过最小二乘法拟合得到变化趋势, 即斜率。 $CNPP$  和  $HNPP$  在  $t$  到  $t+i$  时段内的变化趋势分别以  $SlopeCNPP_{t \rightarrow t+i}$  和  $SlopeHNPP_{t \rightarrow t+i}$  表示。其通用计算方程如下所示:

$$Slope = \frac{n \sum xy - (\sum x)(\sum y)}{n \sum x^2 - (\sum x)^2} \quad (31)$$

其中,  $Slope$  代表线性回归斜率;  $x$  代表自变量年份;  $y$  代表因变量, 即  $CNPP$  和  $HNPP$ 。本研究针对栅格图层进行运算, 因此对每一个栅格都计算其回归斜率, 生成新的栅格图层。在本研究中, 将气候变化和人类活动引起的 NPP 变化趋势分为正趋势和负趋势两种变化类型来对其各自的相对作用进行研究。当  $SlopeCNPP_{t \rightarrow t+i}$  为正、 $SlopeHNPP_{t \rightarrow t+i}$  为负时, 分别表示气候变化或人类活动在  $t$  到  $t+i$  时段内有利于 NPP 的增加, 并有助于沙漠化的逆转; 反之则表明气候变化或人类活动有助于沙漠化的逆转。

在本研究中,气候变化和人类活动在沙漠化过程中的相对作用只针对沙漠化等级变化的区域(逆转区域和发展区域)进行计算。因此,在获得  $t$  到  $t+i$  时段内沙漠化逆转和发展动态以及  $SlopeCNPP_{t \rightarrow t+i}$  和  $SlopeHNPP_{t \rightarrow t+i}$  的基础上,通过他们之间的逻辑关系拆分沙漠化驱动作用的复杂过程,建立不同气候变化和人类活动作用可能情景下其各自的相对作用评价方法:

对于沙漠化逆转,气候变化和人类活动作用共有四种可能情景:

可能情景 1  $SlopeCNPP_{t \rightarrow t+i} < 0$ ,  $SlopeHNPP_{t \rightarrow t+i} < 0$

该情景表示只有人类活动促进了沙漠化的逆转。气候变化在  $t$  到  $t+i$  时段内沙漠化逆转中的相对作用为 0%, 人类活动为 100%;

可能情景 2  $SlopeCNPP_{t \rightarrow t+i} > 0$ ,  $SlopeHNPP_{t \rightarrow t+i} < 0$

该情景表示气候变化与人类活动共同促进了沙漠化的逆转,以其各自 NPP 的变化量所占的百分比为各自的相对作用。气候变化在  $t$  到  $t+i$  时段内沙漠化逆转中的相对作用为:

$$\frac{|\Delta CNPP|}{|\Delta CNPP| + |\Delta HNPP|} \times 100\% \quad (32)$$

人类活动在  $t$  到  $t+i$  时段内沙漠化逆转中的相对作用为:

$$\frac{|\Delta HNPP|}{|\Delta CNPP| + |\Delta HNPP|} \times 100\% \quad (33)$$

其中,  $\Delta CNPP$  为  $t+i$  时刻气候作用 NPP 的回归预测值与  $t$  时刻的回归预测值的差值;  
 $\Delta HNPP$  为  $t+i$  时刻人类活动造成的 NPP 变化的回归预测值与  $t$  时刻的回归预测值的差值。

可能情景 3  $SlopeCNPP_{t \rightarrow t+i} > 0$ ,  $SlopeHNPP_{t \rightarrow t+i} > 0$

该情景表示只有气候变化促进了沙漠化的逆转。气候变化在  $t$  到  $t+i$  时段内沙漠化逆转中的相对作用为 100%, 人类活动为 0%;

可能情景 4  $SlopeCNPP_{t \rightarrow t+i} < 0$ ,  $SlopeHNPP_{t \rightarrow t+i} > 0$

该情景表示气候变化和人类活动都有利于沙漠化的发展,而这些地区的沙漠化逆转是由于沙漠化分类误差或该方法的不确定性造成的。

对于沙漠化发展,气候变化和人类活动作用共有四种可能情景:

可能情景 1  $SlopeCNPP_{t \rightarrow t+i} > 0$ ,  $SlopeHNPP_{t \rightarrow t+i} > 0$

该情景表示只有人类活动促进了沙漠化的发展。气候变化在  $t$  到  $t+i$  时段内沙漠化发展中的相对作用为 0%, 人类活动为 100%;

可能情景 2  $SlopeCNPP_{t \rightarrow t+i} < 0$ ,  $SlopeHNPP_{t \rightarrow t+i} > 0$

该情景表示气候变化与人类活动共同促进了沙漠化的发展,以其各自 NPP 的变化量所占的百分比为各自的相对作用。气候变化在  $t$  到  $t+i$  时段内沙漠化发展中的相对作用为:

$$\frac{|\Delta CNPP|}{|\Delta CNPP| + |\Delta HNPP|} \times 100\% \quad (34)$$

人类活动在  $t$  到  $t+i$  时段内沙漠化发展中的相对作用为:

$$\frac{|\Delta HNPP|}{|\Delta CNPP| + |\Delta HNPP|} \times 100\% \quad (35)$$

其中,  $\Delta CNPP$  与  $\Delta HNPP$  的定义与沙漠化逆转下的情景 2 中的定义相同。

可能情景 3  $SlopeCNPP_{t \rightarrow t+i} < 0$ ,  $SlopeHNPP_{t \rightarrow t+i} < 0$

该情景表示只有气候变化促进了沙漠化的发展。气候变化在  $t$  到  $t+i$  时段内沙漠化发展中的相对作用为 100%, 人类活动为 0%;

可能情景 4  $SlopeCNPP_{t \rightarrow t+i} > 0$ ,  $SlopeHNPP_{t \rightarrow t+i} < 0$

该情景表示气候变化和人类活动都有利于沙漠化的逆转,而这些地区的沙漠化发展是由于沙漠化分类误差或该方法的不确定性造成的。

## 4.5 评价方法的验证与不确定性分析

本研究提出的沙漠化过程中气候变化和人类活动相对作用的评价方法的量化主要是基于定量方法的评价指标构建以及气候变化和人类活动综合作用的时空定量表达。因此,评价方法的验证从 NPP 模拟精度以及气候变化和人类活动相对作用的空间识别两个方面进行检验。最后,对于评价方法存在的不确定性进行分析。

### 4.5.1 CASA 模型的精度验证

模型模拟 NPP 的验证往往通过与实测数据对比来实现。由于本研究的模拟时段多在 2000 年以前,因此要借助以往的相关数据集来进行模型验证。“八五”国家攻关专题“北方草地草畜平衡动态监测研究”在关于中国北方主要草地定点监测方面取得了丰富的实测数据资料(任志弼, 1996)。因此,本研究选取位于鄂尔多斯高原范围内的三个定位监测点的样方内植被干重数据来对 CASA 模型模拟的实际 NPP 进行验证。表 4-4 描述了三个定位监测点的相关情况。

表 4-4 鄂尔多斯高原三个定位监测点情况

Table 4-4 Three long-term monitoring point in Ordos Plateau

| 样点号 | 经度         | 纬度        | 高程<br>(m) | 所属<br>旗县 | 样方面积<br>(m <sup>2</sup> ) | 植被<br>类型  | 土壤<br>类型 | 监测<br>年限      | 监测人   |
|-----|------------|-----------|-----------|----------|---------------------------|-----------|----------|---------------|-------|
| 1   | 110°07'    | 39°45'    | 1500      | 东胜       | 10000                     | 典型<br>草原  | 淡栗钙土     | 1984-<br>1995 | 刘云 等  |
| 2   | 108°41'    | 38°17'    | 1100      | 乌审旗      | 10000                     | 低湿地<br>草甸 | 草甸土      | 1984-<br>1995 | 邬建国 等 |
| 3   | 108°17'30" | 39°52'36" | 1313      | 杭锦旗      | 10000                     | 荒漠<br>草原  | 棕钙土      | 1984-<br>1992 | 代玉 等  |

虽然在空间上三个监测点太少，但是每个监测点都有连续多年多月的监测数据，因此，本研究以监测点月实测数据与该点对应的当年月实际 NPP 值作为一个点对来进行统计分析。在统计分析时，需要将植被干重数据的单位 ( $\text{g/m}^2$ ) 转换为与 NPP 的单位 ( $\text{gC/m}^2$ ) 相一致才能比较分析。因此，将实测植被干重数据乘以其体内碳素含量百分比即得到实际的 NPP 值。根据前人的研究成果，本研究取 0.45 作为草地碳素含量的百分比（方精云和徐嵩龄，1996；朴世龙等，2004）。图 4-4 为实测值与模型模拟值的散点图以及线性回归方程。根据线性回归方程，Pearson 相关系数达到 0.814（置信度为 0.01），决定系数  $R^2$  达到 0.663，表明实测数据与模型模拟数据存在较强的相关性，而且模型的拟合能力也较强。然而，根据图 4-4 也可以看出模型的模拟值较实测值偏低，这主要是一方面由于模型中光能利用率的模拟与实际复杂环境下植被的真实光能利用率还有差别，另一方面是由于实际观测与模型模拟之间存在着巨大的尺度差异造成。实际观测往往基于一定大小的样方（在本研究为  $100\text{ m} \times 100\text{ m}$ ），其很难代表模型模拟象元的整体情况。特别是在干旱、半干旱地区，地表植被的空间变异明显，遥感象元往往是一种混合像元，夹杂着裸土、沙地等信息，以此为基础模型模拟值势必要比以纯植被为调查对象的地面实测值要低。总之，CASA 模型的模拟结果还是非常可靠的。

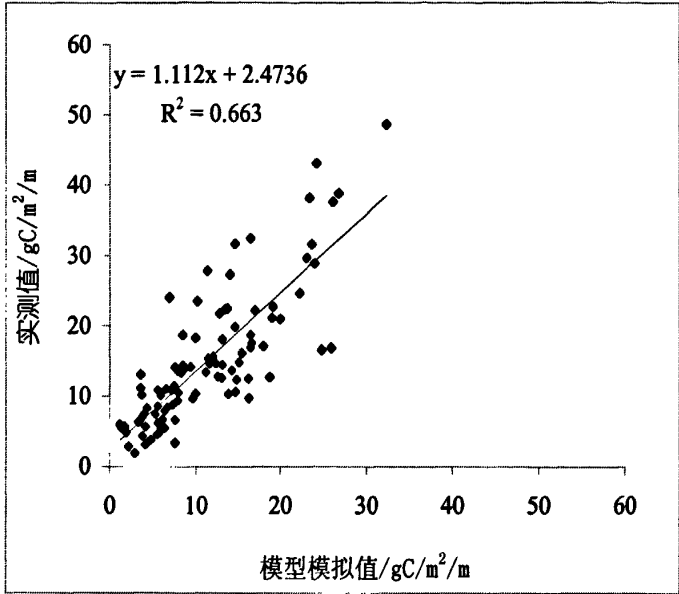


图 4-4 实测 NPP 与模型模拟 NPP 的比较

Fig 4-4 The comparison between actual NPP and modeled NPP

4.5.2 气候变化和人类活动在沙漠化过程中相对作用的相对验证

与模型模拟的 NPP 验证不同,气候变化和人类活动在沙漠化过程中的相对作用很难用实际测量的指标来验证,而且本文提出的评价方法是基于不同逻辑关系的组合而得以进行的,所以只能通过侧面的手段、采用类似对比的方法来进行相对的验证。在本研究中,气候变化和人类活动在沙漠化过程中的相对作用的相对验证具体表现为选取若干典型的、或通过各种信息可以判断出是气候变化或是人类活动引起的沙漠化逆转或发展区域,分析这些区域是否能由本文的评价方法所识别,进而达到相对验证的目的。

由于气候变化对沙漠化过程的影响具有空间上的连续性,因此,很难通过辅助的信息从空间上来确定典型的由气候变化引起的沙漠化动态。然而人类活动相对于气候变化往往具有局部的典型特征,使其能通过辅助信息来选择典型的人类活动引起的沙漠化动态区域,即验证区域。因此,本研究的相对验证特指选择若干典型的人类活动引起的沙漠化动态区域,从而判断这些区域是否能够被本研究的评价方法识别。

根据 1980-2000 年鄂尔多斯高原干湿指数的变化趋势(图 4-5),1980-1990 年鄂尔多斯高原整体气候趋于湿润,而 1990-2000 年鄂尔多斯高原整体气候趋于干燥。因此,可以分别在 1980-1990 年时段内选择典型的人类活动引起的沙漠化发展区域以及在 1990-2000 年时段内选择典型的人类活动引起的沙漠化逆转区域来进行验证,这样

可以在验证人类活动引起的沙漠动态时排除气候因素的干扰。

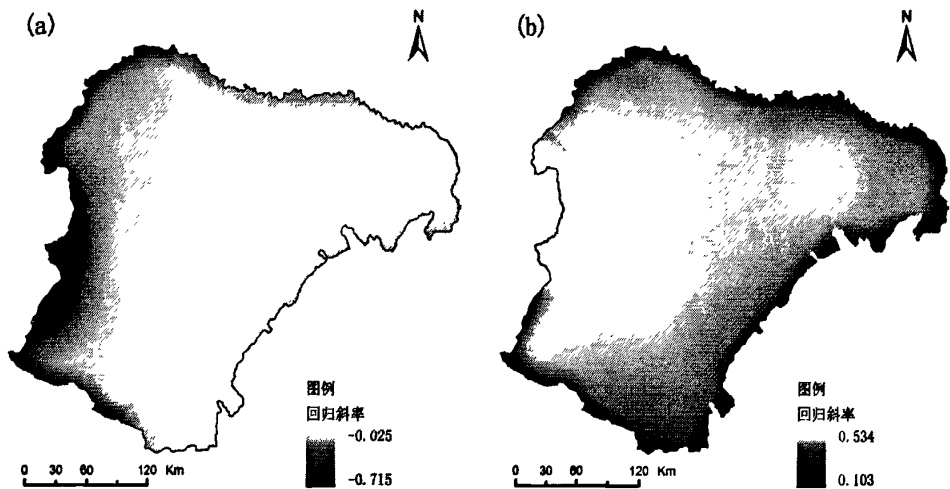


图 4-5 1980-2000 年鄂尔多斯高原干湿指数变化趋势图

(a) 1980-1990 年干湿指数变化趋势; (b) 1990-2000 年干湿指数变化趋势

Fig 4-5 The trend of aridity/humidity index of Ordos Plateau from 1980 to 2000

(a)from 1980 to 1990;(b)from 1990 to 2000

图 4-6 为典型验证区域的空间分布, 其中验证区 1、2 用于验证 1980-1990 年人类活动引起的沙漠化发展, 而验证区 3、4 用于验证 1990-2000 年人类活动引起的沙漠化逆转。

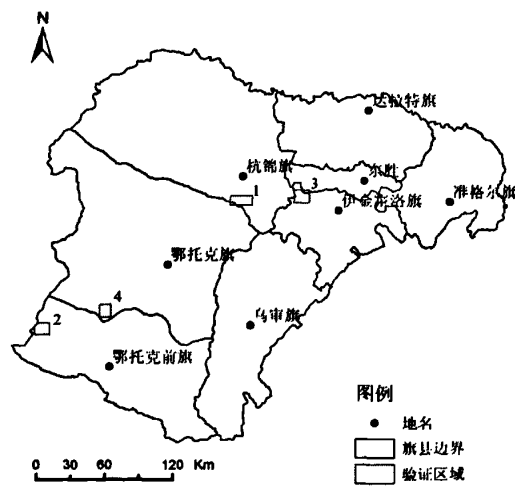


图 4-6 验证区域的空间位置

Fig 4-6 The location of validation regions

验证区 1 1980 年、1990 年地表实际状况 (标准假彩色合成) 以及 1980-1990 年人类活动引起的沙漠化发展的空间分布 (绿色部分) 情况如图 4-7 所示。可以明显地看

出, 该区域 1980-1990 年间沙漠化明显发展, 由于同期气候整体趋于湿润, 因此可以判断该区域的沙漠化发展主要是由于乡镇的扩张、道路增加致使的人类活动增强造成的。图 4-7(c) 中绿色部分显示了由本研究方法判断出的人类活动引起的沙漠化发展, 可以看出其与实际情况吻合的非常好。验证区 2 在 1980-1990 年间沙漠化发展和验证区 1 有相似的特征 (图 4-8), 都表现为人类活动增强导致的沙漠化发展, 也能被本研究方法准确的识别。

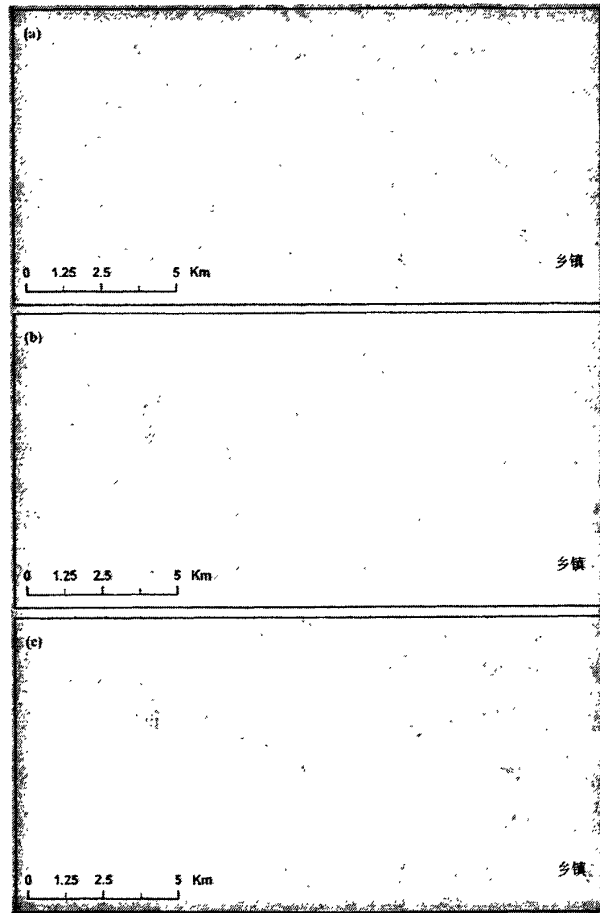


图 4-7 验证区 1 1980、1990 年实际情况及本评价方法判别出的人类活动引起的沙漠化发展区域  
(a) 1980 年实际情况; (b) 1990 年实际情况; (c) 本评价方法判别出的人类活动引起的沙漠化  
发展区域 (绿色部分)

Fig 4-7 The actual status of region 1 for validation in 1980 and 1990 and the area experienced sandy desertification expansion induced by human activities identified by the quantitative method in this study

(a) the actual status in 1980; (b) the actual status in 1990; (c) the area experienced sandy desertification expansion induced by human activities identified by the quantitative method in this study (green part)

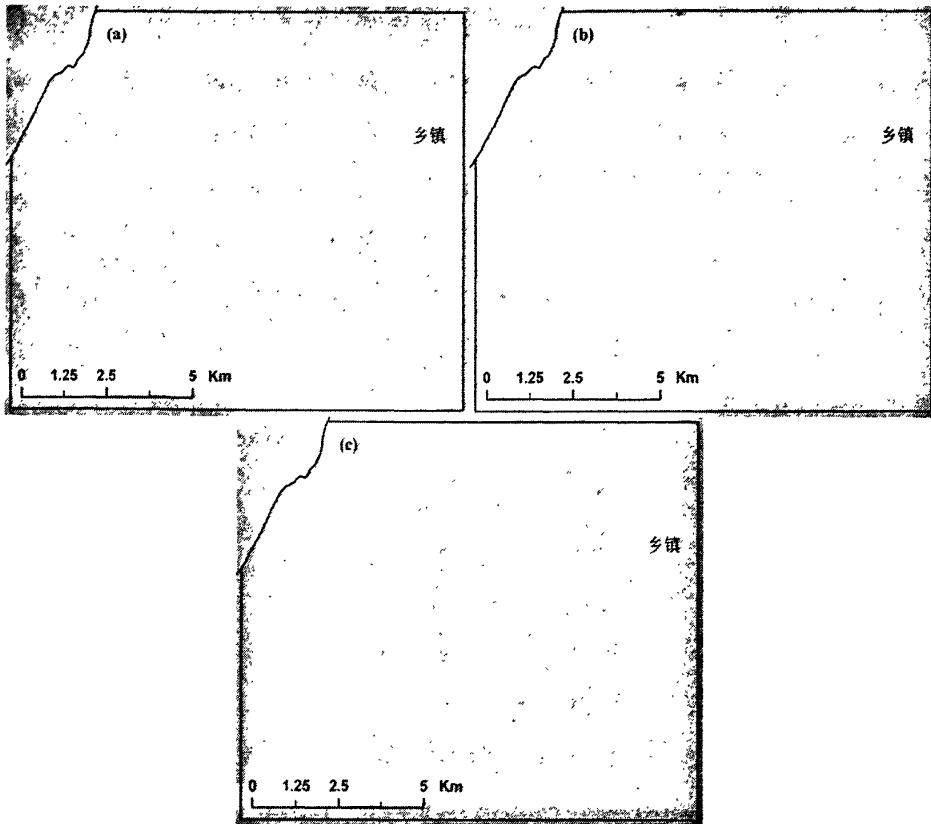


图 4-8 验证区 2 1980、1990 年实际情况及本评价方法判别出的人类活动引起的沙漠化发展区域  
(a) 1980 年实际情况；(b) 1990 年实际情况；(c) 本评价方法判别出的人类活动引起的沙漠化  
发展区域（绿色部分）

Fig 4-8 The actual status of region 2 for validation in 1980 and 1990 and the area experienced sandy  
desertification expansion induced by human activities identified  
by the quantitative method in this study

(a)the actual status in 1980; (b)the actual status in 1990; (c) the area experienced sandy desertification  
expansion induced by human activities identified by the quantitative method in this study (green part)

人类活动对沙漠化的影响不仅表现为其导致的沙漠化发展，也表现为其通过自身的能动性引起的沙漠化逆转。验证区 3 和 4 用于验证本研究方法对人类活动引起的沙漠化逆转的判断。图 4-9 为验证区 3 在 1990、2000 年的实际情况以及根据本研究方法识别出的人类活动导致的沙漠化逆转区域的空间分布。对比 1990 和 2000 年该区域的实际情况，可以看出沙漠化的明显逆转，由于 1990-2000 年鄂尔多斯高原整体气候趋于干燥，因此该区域的沙漠化逆转可以判断是由人类活动造成的。人类活动造成的沙漠化逆转区域的植被纹理特征较为规则，这是从侧面反映人类活动影响的一个重要信息。特别是验证区 4（图 4-10），可以看出到 2000 年，部分沙漠化逆转区域的植被具

有明显规则的纹理（图 4-10(b)），这可能是当地居民进行植被恢复建设的结果。这些典型的人类活动引起的沙漠化逆转的区域可以准确地被本研究方法识别，根据图 4-9(c)和图 4-10(c)中绿色部分的空间分布，即本研究评价方法识别出的人类活动引起的沙漠化逆转区域，评价的结果与实际情况能非常好地吻合。

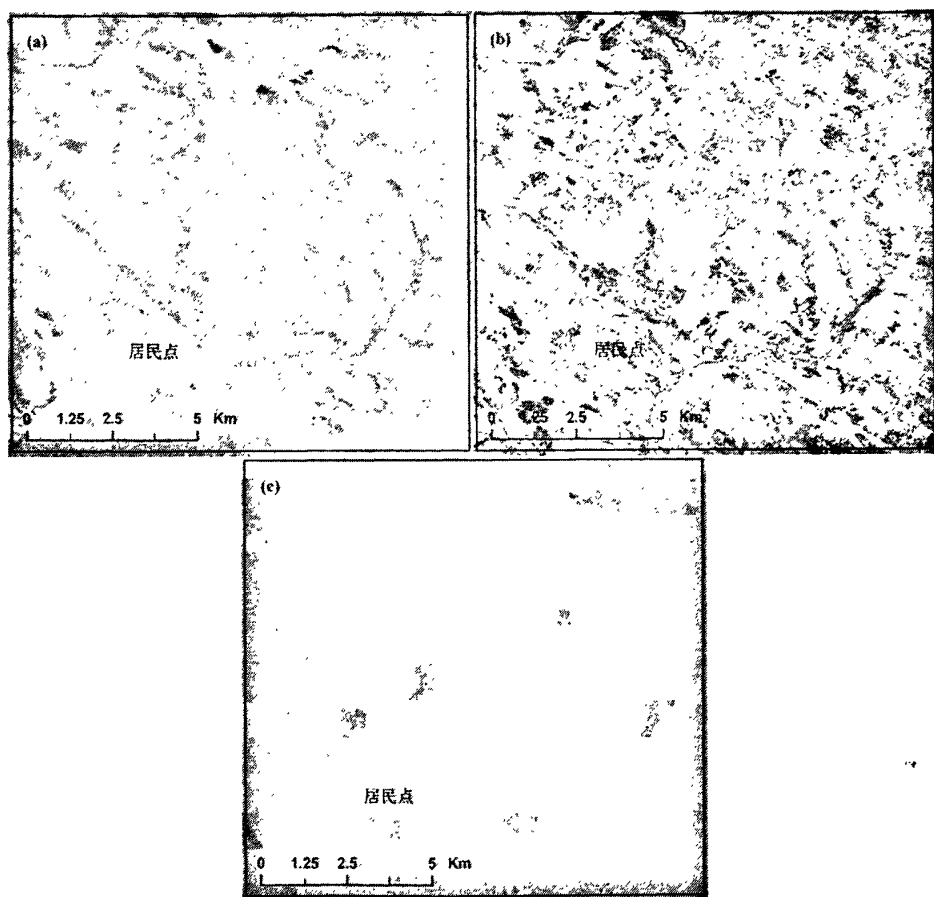


图 4-9 验证区 3 1990、2000 年实际情况及本评价方法判别出的人类活动引起的沙漠化逆转区域  
(a) 1990 年实际情况；(b) 2000 年实际情况；(c) 本评价方法判别出的人类活动引起的沙漠化  
逆转区域（绿色部分）

Fig 4-9 The actual status of region 3 for validation in 1990 and 2000 and the area experienced sandy desertification reversion induced by human activities identified by the quantitative method in this study  
(a) the actual status in 1990; (b) the actual status in 2000; (c) the area experienced sandy desertification reversion induced by human activities identified by the quantitative method in this study (green part)

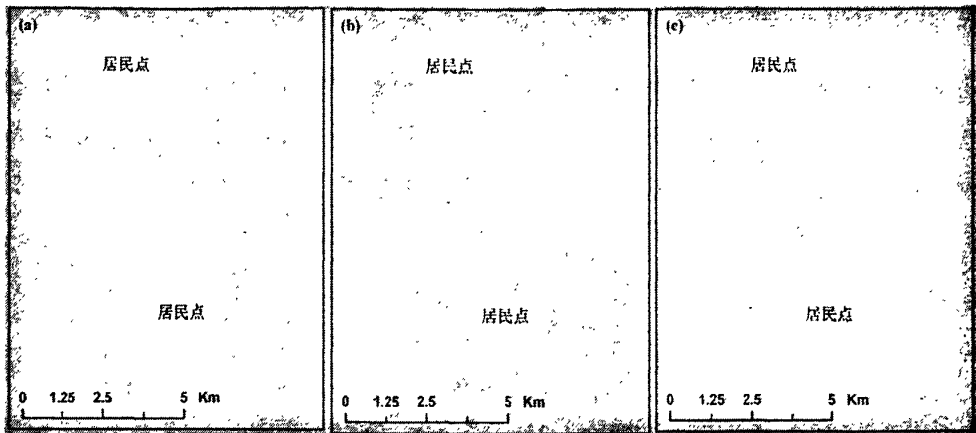


图 4-10 验证区 4 1990、2000 年实际情况及本评价方法判别出的人类活动引起的沙漠化逆转区域  
(a) 1990 年实际情况；(b) 2000 年实际情况；(c) 本评价方法判别出的人类活动引起的沙漠化逆转区域（绿色部分）

(a) 1990 年实际情况；(b) 2000 年实际情况；(c) 本研究评价方法得出的结果

Fig 4-10 The actual status of region 4 for validation in 1990 and 2000 and the area experienced sandy desertification reversion induced by human activities identified by the quantitative method in this study  
(a)the actual status in 1990; (b)the actual status in 2000; (c) the area experienced sandy desertification reversion induced by human activities identified by the quantitative method in this study (green part)

在对于本研究方法的相对验证中，典型区的选择是基于遥感影像中典型的人类活动特征以及相关的辅助信息，如干湿指数的变化趋势等。然而，气候变化和人类活动对沙漠化土地的作用过程及沙漠化土地生态系统的响应具有明显的复杂性以及时空分异特征，一些典型的人类活动如过渡放牧、滥伐等在时空上具有典型的随机性，其引起的沙漠化动态很难通过遥感影像进行判定，除非借助更高分辨率的遥感影像以及过多的辅助信息才能进行准确的判定。不过在现有基础上选择的典型区，能很好验证本研究方法的评价结果。由于本研究方法的评价过程是基于不同对象之间的逻辑关系建立的，因此，合理的评价方法的逻辑框架以及该框架中相关指标的科学性、合理性、准确性决定了评价结果的可靠性。

4.5.3 评价方法的不确定性

在本研究中，评价方法的不确定性是以“误差”的形式表现。根据评价方法中沙漠化逆转和沙漠化发展情况下第四中可能情景的表示：即当沙漠化逆转时，气候和人类活动的变化趋势都不利于沙漠化逆转；或者当沙漠化发展时，气候和人类活动的变化趋势都不利于沙漠化发展。这种情景在本研究中成为评价方法的“误差”，主要由

评价方法的不确定性引起。四个不同时段内沙漠化逆转和发展情况下的误差空间分布如图 4-11 所示。从空间分布上看,不同时段内误差的空间分布并没有很明显的规律性,总体上以鄂尔多斯高原东部的温带禾草草原和温带落叶灌丛区域内的误差多于西部的荒漠草原和荒漠区域内的误差。

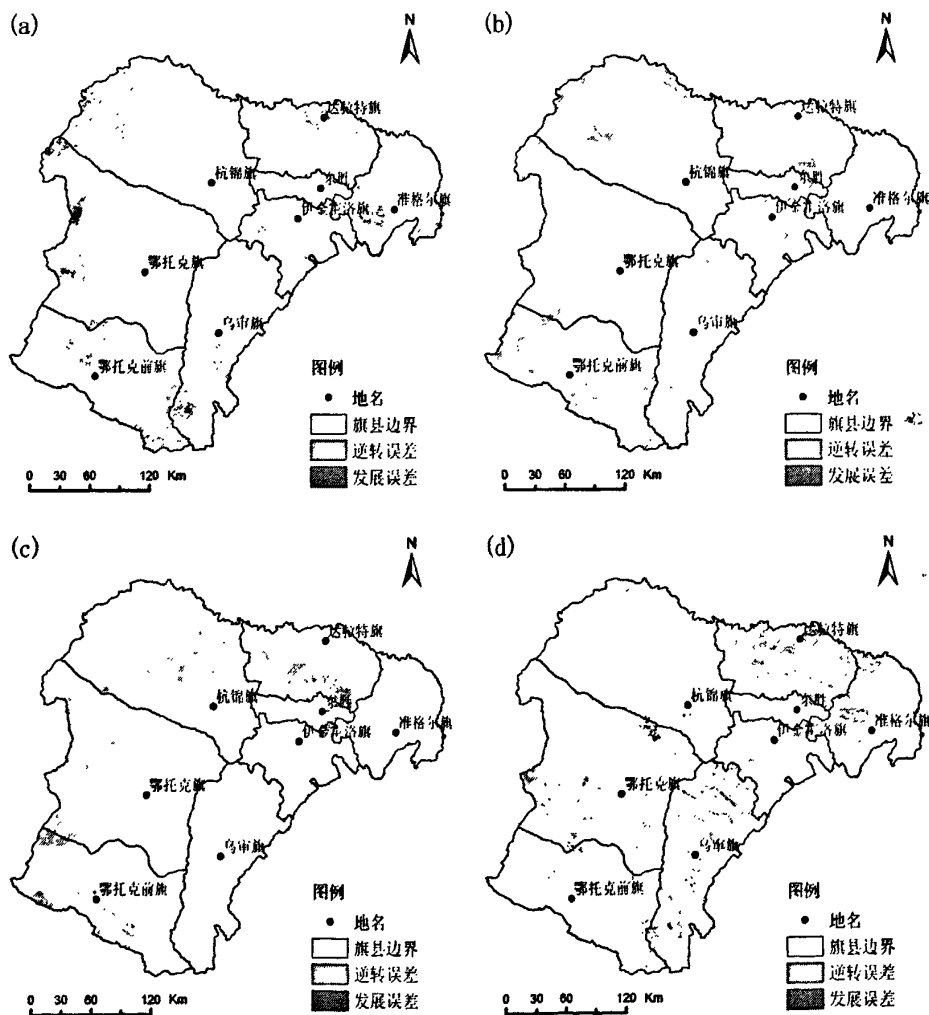


图 4-11 不同时段内沙漠化逆转和发展情况下误差的空间分布

(a) 1980-1990; (b) 1990-2000; (c) 1980-2000; (d) 1980-2005

Fig 4-11 The spatial distribution of errors in the reversion and expansion of sandy desertification at different temporal scales

(a) 1980-1990; (b) 1990-2000; (c) 1980-2000; (d) 1980-2005

表 4-5 为不同时段内沙漠化逆转和发展情况下误差的面积统计。可以看出，沙漠化逆转和发展情况下误差的总和占评价时段内沙漠化变化区域的百分比在 3-6%之间，其中以 1990-2000 年时段内误差的面积和比例最高。在 1980-1990 年和 1980-2005 年时段内，沙漠化逆转评价中的误差面积小于沙漠化发展评价中的误差面积；而在 1990-2000 年和 1980-2000 年时段内，沙漠化逆转评价中的误差面积却大于沙漠化发展评价中的面积。总之，本评价方法产生的误差相对较小，对整体评价结果的影响相对有限。

表 4-5 不同时段内沙漠化逆转和发展评价中的误差面积和百分比

Table 4-5 The area and percentage of errors in the assessment for sandy desertification reversion and expansion at different temporal scales

| 时间        | 沙漠化逆转评价中的误差           |         | 沙漠化发展评价中的误差           |         |
|-----------|-----------------------|---------|-----------------------|---------|
|           | 面积 (km <sup>2</sup> ) | 百分比 (%) | 面积 (km <sup>2</sup> ) | 百分比 (%) |
| 1980-1990 | 20                    | 0.05    | 1376                  | 3.66    |
| 1990-2000 | 1804                  | 4.40    | 370                   | 0.90    |
| 1980-2000 | 1216                  | 2.56    | 435                   | 0.91    |
| 1989-2005 | 110                   | 0.22    | 1838                  | 3.61    |

注：百分比为误差占沙漠化逆转和发展面积总和的百分比

本研究中产生误差的主要原因有以下几个方面：第一，由沙漠化分类误差造成。尽管沙漠化分类总体精度在 90%以上，但是分类误差仍然存在，这就有可能在计算沙漠化逆转和发展区域时产生误差，从而造成可能情景 4 中描述的沙漠化变化与气候变化以及人类活动之间的关系；第二、由 NPP 计算的误差造成。遥感数据源以及模型参数的一些不确定性会影响 NPP 的计算精度。不过这种误差多是系统误差，在进行趋势分析时可以消除。然而，个别的异常点在进行趋势分析时可能会影响趋势分析的结果，从而造成可能情景 4 中描述的关系；第三，由于不同类型、不同空间分辨率数据进行统一的重采样造成。在进行多源数据的重采样时，必然会导致重采样后的数据在反映 1km 实际情况时存在许多不确定性，即尺度上推的不确定性，这种不确定性可能会导致误差的出现。与此同时，鄂尔多斯高原生境破碎度高，在多源数据重采样的过程中势必会将原始数据本身的误差进一步放大，从而造成更大的误差。根据图 4-11，生境破碎度较大的温带落叶灌丛区域（毛乌素沙地腹地）以及温带禾草草原区域（水蚀沟壑发育明显，破碎度高）的误差明显多于荒漠草原（景观均一，破碎度小）；第四，由本研究自身方法的限制造成。在指标选择方面，本研究采用 NPP 作为衡量气候变化

和人类活动对沙漠化的影响,然而沙漠化土地对气候变化和人类活动的响应不仅有 NPP 的变化,同时还有生态系统结构、景观格局以及土地利用方式等的变化。Huenneke 等人的研究认为 (Huenneke et al., 2002), 当草地被灌木入侵而造成的土地退化时,其 NPP 并不一定下降,但其生态系统结构却已经发生了变化。沙漠化地区农田生态系统也有类似特征,长期耕作虽然提高了其 NPP,但其在景观结构上却已表现出了退化特征 (赵哈林等, 2002; Qiu et al., 2007)。因此,单一采用 NPP 作为评价指标,其反映沙漠化信息的限制,特别是在沙漠化过程明显表现为生态系统结构、景观格局以及土地利用方式变化而非单一的 NPP 变化的区域,是本研究误差的来源之一。

尽管误差存在,但总体面积较小,不超过沙漠化变化面积的 10%,而且在整个研究区域的空间范围内分布较为均匀,因此,不会影响沙漠化过程中气候变化和人类活动相对作用的评价。尽管误差不可避免,但可以从改善沙漠化分类方法、提高分类精度,统一数据来源减少重采样过程,改进模型参数设置,并结合沙漠化土地的生态系统结构、景观格局以及土地利用变化特点等方面来进一步完善本研究的方法模型,以期减少误差,达到更好的效果。

#### 4.6 与其他模型方法的比较

对模型或者方法进行评价的一个非常重要的途径就是与其他模型或者方法进行比较,特别是对比不同模型或者方法得到的结果之间的差异。然而,对于不同的沙漠化过程中驱动力作用的定量评价方法,由于其构建的思路不同,往往造成其评价的结果之间很难具有可比性。因此,在本节中,本研究提出的定量评价方法与其他模型方法的比较主要是对其评价的思路与过程以及评价所得出的结果进行分析对比。目前,沙漠化过程中驱动力作用的定量评价方法主要有四种类型 (如第一章所述),其中以主成分分析法应用最为广泛。因此,本节主要对本研究提出的定量方法与主成分分析法进行分析对比。

在评价的思路与过程方面,本研究提出的定量评价方法的思路是通过公共指标,将气候变化和人类活动对一定时期内沙漠化动态的影响统一到一个可以比较的层面,以公共指标来衡量气候变化和人类活动的相对作用,通过分析一定时期内沙漠化动态与气候变化和人类活动的作用趋势之间的关系,实现定量化的目的。主成分分析法是将多个影响因子化为少数综合影响指标,并考察其主要影响因子的一种统计分析方法。沙漠化过程中驱动力作用的主成分分析方法遵循指标选取—主成分判断—综合解释的过程。虽然可以将主成分的方差贡献率作为对沙漠化过程的贡献率,但是在整个评价过程中还是很容易受主观因素的影响。对于指标的选择,不同学者可能选取不同

的指标,这样就会造成分析同一地区的沙漠化问题时得出不同的结论;对于主成分判断,当自然因子与人文因子的主成分荷载相差不大的时候,也容易出现主观判断差异的现象。对于本研究提出的定量评价方法,由于对每一步骤都有明确的计算方法,因此很难引进人为判断上的差异,其客观性更强。

对于评价所得出的结果,本研究提出的定量评价方法可以得到分别针对沙漠化发展和沙漠化逆转过程的气候变化和人类活动的相对作用,而且可以在空间上进行连续的表达。图 4-12 为 1980-1990 年时间尺度下气候变化和人类活动在伊金霍洛旗沙漠化逆转和发展过程中的相对作用(其中  $c_0-100\%$  和  $h_0-100\%$  分别代表气候变化和人类活动的相对作用)。根据统计,在 1980-1990 年时间尺度下伊金霍洛旗沙漠化逆转过程中,完全由气候变化引起的沙漠化逆转占该旗总逆转面积的 76.06%,完全由人类活动引起的沙漠化逆转面积所占的比例不到 1%,而由气候变化和人类活动共同引起的沙漠化逆转面积占 23.76%;在 1980-1990 年时间尺度下伊金霍洛旗沙漠化发展过程中,完全由气候变化引起的沙漠化逆转占该旗总发展面积的 1.13%,完全由人类活动引起的沙漠化发展面积占 93.70%,而由气候变化和人类活动共同引起的沙漠化发展面积占 5.16%。然而,沙漠化过程中驱动力作用的主成分分析法得出的结果相对较为宽泛。例如贾宝全等(贾宝全等, 2003)选择 1959-1999 年 19 个自然与社会经济统计因子对鄂尔多斯高原的伊金霍洛旗荒漠化过程中自然和人为因素的影响进行定量研究,其利用主成分分析法得到的结果表明在伊金霍洛旗的荒漠化发展过程中,人为因素的贡献率为 53.8%,自然因素的贡献率为 10.0%,自然与人为因素共同作用的贡献率为 23.4%。在其研究中,荒漠化发展过程的概念较为宽泛,既包含荒漠化正向发展过程也包含荒漠化的逆向发展过程。因此,很难区分自然和人文因素对荒漠化正向发展过程和逆向发展过程的贡献率,而且其研究以伊金霍洛旗整个旗为单位,忽略了研究区内部的驱动力作用的空间变异。其他利用主成分分析法分析沙漠化过程中驱动力作用的相关研究也存在类似的问题。然而,沙漠化过程中驱动力作用的主成分分析法较之本研究提出的定量评价方法可以识别出对沙漠化影响较大的自然和人文因素,但是也同样没有给出具体影响因素对沙漠化的贡献率。

由于评价思路的不同以及时间尺度的差异,本研究提出的定量评价方法得出的具体结果很难与沙漠化过程中驱动力作用的主成分分析法得出的具体结果进行比较。通过对比评价的思路与过程以及评价结果的表达方式,可以看出本研究提出的定量评价方法更为客观,而且其结果的可表达性更强,然而本研究提出的定量评价方法只关注气候变化和人类活动的综合作用,不能识别对沙漠化影响较大的具体的自然和人文因素。因此,本研究提出的定量评价方法有待与其他方法相结合,进一步完善沙漠化过程中驱动力作用的定量评价方法体系。

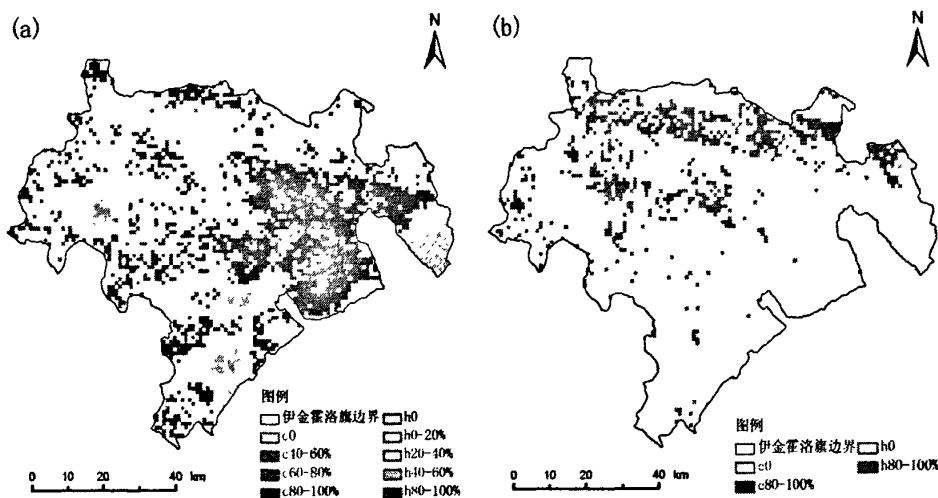


图 4-12 1980-1990 年气候变化和人类活动在伊金霍洛旗沙漠化逆转和发展过程中的相对作用  
(a) 沙漠化逆转; (b) 沙漠化发展

Fig 4-12 The relative role of climate change and human activities in sandy desertification reversion and expansion of Yijinhuoluo Banner during the period from 1980 to 1990

(a) the relative in sandy desertification reversion;(b) the relative role in sandy desertification expansion

## 本章小结

本章在结合前人关于沙漠化过程中驱动力作用定量评价优缺点的基础上,提出了本研究的气候变化和人类活动在沙漠化过程中相对作用的定量评价的思路,建立了定量评价的概念框架。针对评价涉及的不同数据,建立了相应的量化方法,在此基础上,建立了气候变化和人类活动在沙漠化过程中相对作用的定量评价方法,并对该方法进行了相关的验证。主要研究方法、成果和结论如下:

1、建立了气候变化和人类活动在沙漠化过程中相对作用定量评价的概念框架。即以沙漠化动态为基础,选择净初级生产力 NPP 为公共指标将气候变化和人类活动在沙漠化过程中的相对作用统一到一个可比的层面,通过拆分沙漠化动态与驱动力作用的复杂过程,来反推气候变化和人类活动在沙漠化过程中的相对作用。

2、以 CASA 模型为基础,构建了实际 NPP 和潜在 NPP 的计算方法。在实际 NPP 的计算过程中,以经过校正的参考作物蒸散模型作为潜在蒸散的计算方法,并在土壤水分子模型计算过程中,引入了土壤质地的转换方法,将国际制的土壤颗粒分级结果转换为美国制的分级结果用于计算。在潜在 NPP 的计算过程中,采用与 CASA 模型一致的模型构造方式,其中植被层对入射光合有效辐射的吸收比例的计算以 1: 25 万植被类型图为基础,通过相关植被参数设定与气候参数结合的方法进行计算。

3、通过拆分沙漠化动态与气候变化和人类活动引起的 NPP 变化之间的关系,建立了气候变化和人类活动在沙漠化过程中相对作用的定量评价方法。根据野外监测点数据对实际 NPP 的验证以及选定典型区域对评价结果进行相对验证的结果,本研究提出的方法可以用于定量评价气候变化和人类活动在沙漠化过程中的相对作用。

4、本研究提出的气候变化和人类活动在沙漠化过程中相对作用的定量评价方法较之沙漠化过程中驱动力作用的主成分分析法更为客观,而且其结果的可表达性更强,然而本研究提出的定量评价方法只关注气候变化和人类活动的综合作用,不能识别对沙漠化影响较大的具体的自然和人文因素。

## 第五章 鄂尔多斯高原沙漠化过程中气候变化和人类活动相对作用的多尺度研究

尺度是自然过程或观测研究在空间、时间上的特征量度(李双成和蔡运龙, 2005), 其存在根源于地球表层自然界的等级组织和复杂性, 是自然界固有的特征和规律。尺度可分为测量尺度和本征尺度。测量尺度是用来测量过程和格局的, 是人类的一种感知尺度, 随感知能力的发展而不断发展。本征尺度是自然现象固有的而独立于人类控制之外的。尺度研究的目的在于通过适宜的测量尺度来揭示本征尺度的规律性(吕一河和傅伯杰, 2001)。

生态学或地理学研究对象格局与过程的发生、时空分布、相互耦合等特性都是尺度依赖的。任一相关研究都是在一定空间尺度或时间尺度上进行的, 某一尺度上的研究结果通常又不适用于更大或更小尺度上的景观生态学和环境地理学现象或规律, 具体研究中的尺度选择和推绎是生态学和地理学研究中无法回避的科学问题。沙漠化问题作为生态学或者地理学的具体研究内容, 同样面临着尺度研究的相关科学问题。气候变化和人类活动作为沙漠化土地生态系统的生态学干扰, 具有典型的尺度特征。气候变化和人类活动发生在一定的尺度上, 并引起一定尺度下沙漠化的动态表现。沙漠化过程中气候变化和人类活动相对作用的多尺度研究的目的是通过一定的观测尺度来揭示沙漠化动态与其驱动力作用的规律性。

本章基于第四章提出的沙漠化过程中气候变化和人类活动相对作用定量评价方法, 从时间和空间两种尺度上研究鄂尔多斯高原沙漠化过程中气候变化和人类活动相对作用特征与规律。

### 5.1 不同时间尺度下鄂尔多斯高原沙漠化过程中气候变化和人类活动相对作用研究

根据本研究提出的沙漠化过程中气候变化和人类活动相对作用的定量评价方法, 时间尺度是由起始时间  $t$  和时间跨度  $i$  两个参数决定。因此, 本节在研究不同时间尺度下气候变化和人类活动相对作用时从两个方面来定义时间尺度: 1、起始时间  $t$  不同, 而时间跨度  $i$  相同。根据此条件选择 1980-1990 年和 1990-2000 年两个时间尺度来做对比分析; 2、起始时间  $t$  相同, 而时间跨度  $i$  不相同。根据此条件选择 1980-1990 年、1980-2000 年和 1980-2005 年三个时间尺度来做多时间尺度分析。在做不同时间尺度分析时, 将空间尺度固定在  $1\text{ km} \times 1\text{ km}$  的空间尺度下进行研究。

### 5.1.1 1980-1990 年和 1990-2000 年时间尺度下鄂尔多斯高原沙漠化过程中气候变化和人类活动相对作用研究

根据本研究的评价方法, 计算了 1980-1990 年和 1990-2000 年时间尺度下鄂尔多斯高原沙漠化逆转和发展过程中气候变化和人类活动的相对作用。根据图 5-1 (其中  $c_0-100\%$  和  $h_0-100\%$  分别代表气候变化和人类活动的相对作用, 以下相同), 气候变化和人类活动共同导致了鄂尔多斯高原部分沙漠化土地的逆转, 然而其各自的在沙漠化逆转过程中的相对作用在两个时间尺度下却呈不同的特征。在 1980-1990 年时间尺度下, 气候变化是鄂尔多斯高原沙漠化逆转的主要原因, 以气候变化为主导因素 (相对作用大小在 50% 以上) 的逆转的沙漠化土地面积占总逆转面积的 89.45%。从其空间分布特征来看, 以气候变化为主导因素的逆转的沙漠化土地主要分布于鄂托克旗与乌审旗之间的毛乌素沙地, 以及鄂尔多斯东北部的温带禾草草原与温带落叶灌丛区域的过渡地带; 而以人类为主导因素的沙漠化土地逆转区域主要分布在乌审旗东南部、与陕北榆林地区邻近的温带落叶灌丛区域, 以及鄂尔多斯高原东北部的沿黄河农田区域。

然而, 在 1990-2000 年时间尺度下, 人类活动是导致鄂尔多斯高原沙漠化逆转的主要因素, 以人类活动为主导因素的逆转的沙漠化土地占该时段内总逆转面积的 90.40%。根据图 5-1b, 在该时间尺度下, 人类活动引起的沙漠化逆转区域主要分布在鄂托克前旗和伊金霍洛旗的大部分地区; 而气候变化引起的沙漠化逆转区域主要分布在东胜周围的温带禾草草原区域。对比两个时间尺度下气候变化和人类活动在沙漠化逆转过程中相对作用的差异, 气候变化主导了 1980-1990 年鄂尔多斯高原的沙漠化逆转, 而人类活动则是 1990-2000 年该区域沙漠化逆转的主要因素。

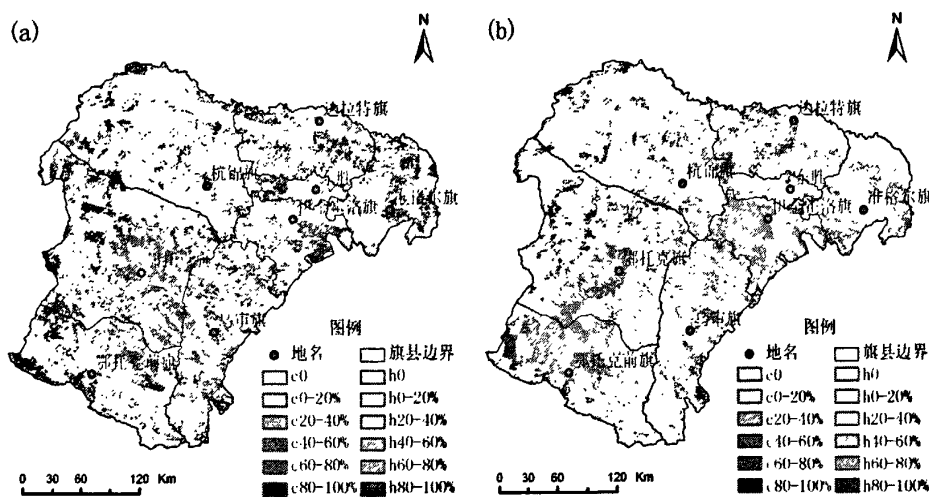


图 5-1 1980-1990 和 1990-2000 年气候变化和人类活动在沙漠化逆转过程中的相对作用

(a) 1980-1990 年; (b) 1990-2000 年

Fig 5-1 The relative role of climate change and human activities in sandy desertification reversion from 1980 to 1990 and 1990 to 2000

(a) from 1980 to 1990; (b) from 1990 to 2000

气候变化和人类活动不仅导致了沙漠化的逆转,而且也共同作用于沙漠化土地的发展。1980-1990 年和 1990-2000 年气候变化和人类活动在鄂尔多斯高原沙漠化发展过程中的相对作用如图 5-2 所示。在 1980-1990 年时间尺度下,人类活动是导致鄂尔多斯高原沙漠化发展的主要因素,以人类活动为主导导致的沙漠化土地发展的面积占总发展面积的 83.93%。然而,在 1990-2000 年时间尺度下,情况截然相反。气候变化成为该时间尺度下沙漠化发展的主导因素,以气候变化为主导导致的沙漠化土地发展的面积占该时间尺度下沙漠化土地总发展面积的 91.20%。

从空间分布上看,在 1980-1990 年时间尺度下人类活动引起的沙漠化土地发展主要分布在鄂尔多斯高原中部,鄂托克旗与杭锦旗、杭锦旗与达拉特旗的过渡地带;而该时间尺度下气候变化引起的沙漠化发展区域主要集中在乌审旗东南部的一小片区域中。在 1990-2000 年时间尺度下,气候变化引起的沙漠化发展区域面积相对 1980-1990 年时间尺度下的要明显增加,主要分布鄂尔多斯高原的东北部以及位于乌审旗、鄂托克旗以及鄂托克前旗的毛乌素沙地的大部分地区;人类活动引起的沙漠化发展区域在该时间尺度下较为分散,而且面积也小于 1980-1990 年时间尺度下人类活动引起的沙漠化土地发展面积。

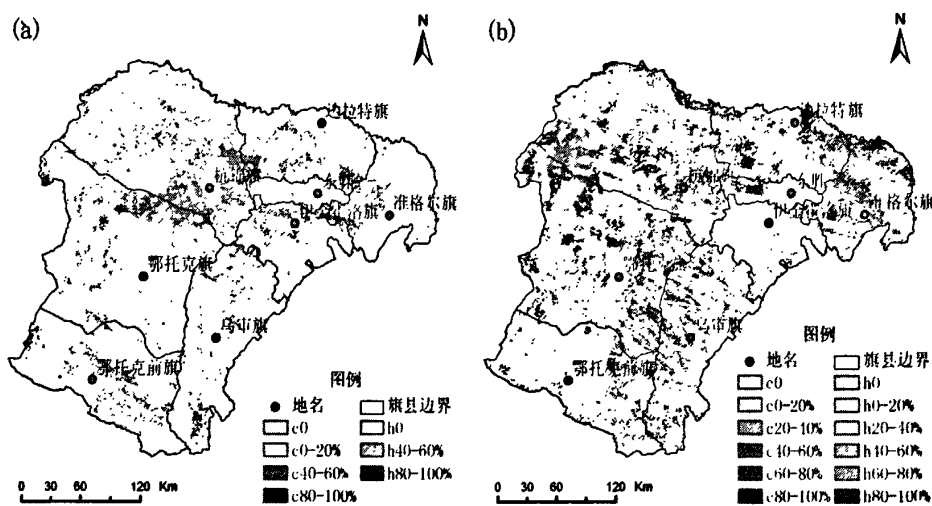


图 5-2 1980-1990 和 1990-2000 年气候变化和人类活动在沙漠化发展过程中的相对作用

(a) 1980-1990 年; (b) 1990-2000 年

Fig 5-2 The relative role of climate change and human activities in sandy desertification expansion from 1980 to 1990 and 1990 to 2000

(a) from 1980 to 1990; (b) from 1990 to 2000

表 5-1 和表 5-2 分别为 1980-1990 年和 1990-2000 年时间尺度下鄂尔多斯高原各个旗县以及不同植被类型区中气候变化和人类活动引起的沙漠化逆转和发展的区域面积统计情况。根据表 5-1, 在 1980-1990 年时间尺度下, 除了杭锦旗表现为人类活动引起的沙漠化发展在各种驱动力作用的沙漠化过程中占主导地位, 其余各个旗县均表现为气候变化引起的沙漠化逆转是该旗县在 1980-1990 年时间尺度下的主要沙漠化过程。在 1990-2000 年时间尺度下, 气候变化引起的沙漠化发展和人类活动引起的沙漠化逆转是该时间尺度下鄂尔多斯高原沙漠化的主要驱动过程。鄂托克前旗和伊金霍洛旗的沙漠化驱动过程表现为明显的人类活动引起的沙漠化逆转, 东胜在该时间尺度下气候变化引起的沙漠化发展与人类活动引起的沙漠化逆转面积相差不大, 其余各旗县在该时间尺度下的沙漠化驱动过程表现为以气候变化为主引起的沙漠化发展占主导地位。

根据表 5-2, 在 1980-1990 年时间尺度下, 鄂尔多斯高原的各个植被类型区的沙漠化驱动过程均表现为气候变化引起的沙漠化逆转占主导地位。在 1990-2000 年时间尺度下, 人类活动引起的沙漠化逆转是温带禾草草原、温带落叶灌丛以及荒漠草原区的占主导地位的沙漠化驱动过程; 而农田与荒漠区域的沙漠化驱动过程则表现为气候变化引起的沙漠化发展占主导地位。

表 5-1 1980-1990 年和 1990-2000 年各旗县气候变化和  
人类活动引起的沙漠化逆转和发展面积统计

Table 5-1 The sandy desertification reversion and expansion induced by climate change and human  
activities in all counties from 1980 to 1990 and 1990 to 2000

| 旗县    | 1980-1990 (单位: km <sup>2</sup> ) |     |      |      | 1990-2000 (单位: km <sup>2</sup> ) |      |      |     |
|-------|----------------------------------|-----|------|------|----------------------------------|------|------|-----|
|       | CR                               | CE  | HR   | HE   | CR                               | CE   | HR   | HE  |
| 杭锦旗   | 2409                             | 44  | 326  | 2796 | 0                                | 4484 | 2397 | 437 |
| 达拉特旗  | 2209                             | 32  | 408  | 1041 | 15                               | 1998 | 1575 | 88  |
| 准格尔旗  | 3057                             | 2   | 182  | 615  | 44                               | 2352 | 1116 | 96  |
| 鄂托克旗  | 6891                             | 4   | 434  | 1902 | 0                                | 4713 | 4492 | 285 |
| 东胜    | 689                              | 1   | 1    | 233  | 106                              | 346  | 397  | 31  |
| 伊金霍洛旗 | 2210                             | 6   | 64   | 750  | 69                               | 113  | 3266 | 10  |
| 乌审旗   | 2986                             | 241 | 1193 | 487  | 2                                | 2223 | 2219 | 106 |
| 鄂托克前旗 | 3687                             | 0   | 218  | 1083 | 11                               | 1229 | 4273 | 56  |

注: CR 表示以气候变化为主导引起的沙漠化逆转; CE 表示以气候变化为主导引起的沙漠化发展;  
HR 表示以人类活动为主导引起的沙漠化逆转; HE 表示以人类活动为主导引起的沙漠化发展  
(以下表相同)

表 5-2 1980-1990 年和 1990-2000 年各植被类型区气候变化和  
人类活动引起的沙漠化逆转和发展面积统计

Table 5-1 The sandy desertification reversion and expansion induced by climate change and human  
activities in all counties from 1980 to 1990 and 1990 to 2000

| 植被类型   | 1980-1990(单位: km <sup>2</sup> ) |     |      |      | 1990-2000(单位: km <sup>2</sup> ) |       |       |     |
|--------|---------------------------------|-----|------|------|---------------------------------|-------|-------|-----|
|        | CR                              | CE  | HR   | HE   | CR                              | CE    | HR    | HE  |
| 农田     | 1163                            | 93  | 451  | 411  | 0                               | 1401  | 957   | 152 |
| 温带禾草草原 | 2686                            | 0   | 98   | 1646 | 139                             | 1691  | 2165  | 64  |
| 温带落叶灌丛 | 16579                           | 237 | 1523 | 5738 | 104                             | 10492 | 13577 | 248 |
| 荒漠草原   | 2464                            | 0   | 0    | 927  | 0                               | 2190  | 2371  | 2   |
| 荒漠     | 1246                            | 0   | 754  | 185  | 4                               | 1684  | 665   | 643 |

尽管研究的时间跨度相同,而且两个时段内鄂尔多斯高原沙漠化总表现为整体逆转的趋势,但是气候变化和人类活动的相对作用却相差甚远,这主要是由于两个时间尺度下区域的气候变化和人类活动特征所决定的。根据干湿指数在两个时间尺度下的变化趋势(图 5-3),可以明显看出鄂尔多斯高原气候的干湿程度变化趋势在两个时间

尺度下呈相反的趋势。在 1980-1990 年时间尺度下，鄂尔多斯高原温度呈增加的趋势，然而由于降雨也明显增加，气候整体趋于湿润，良好的水热条件以及相对湿润的气候有利于植被的生长以及沙漠化逆转。而在 1990-2000 年时间尺度下，由于温度继续呈增加的趋势，然而降雨却明显减少，鄂尔多斯高原气候在该时间尺度下趋于干燥，特别是 1999-2000 年，鄂尔多斯高原出现了大旱，严重影响了植被的生长，有助于沙漠化的发展。降雨的增加和降低是这两个时间尺度下沙漠化逆转和发展中重要的驱动因

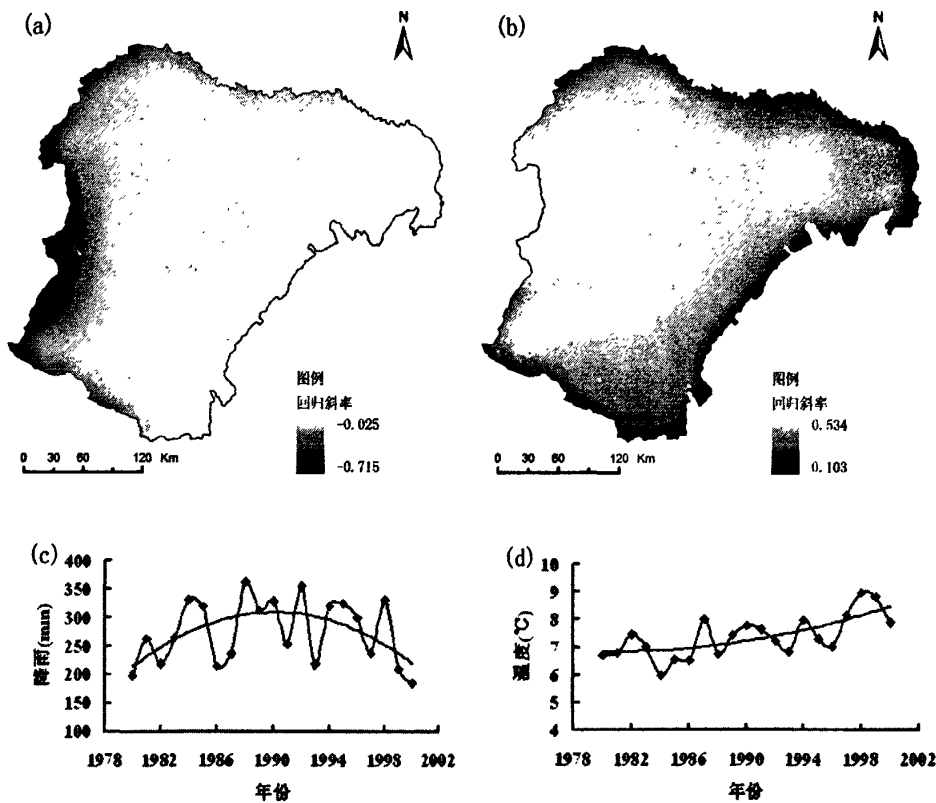


图 5-3 1980-1990 和 1990-2000 年鄂尔多斯高原干湿指数、降雨、温度的变化趋势

(a) 1980-1990 干湿指数变化趋势；(b) 1990-2000 干湿指数变化趋势；(c) 1980-2000 降雨变化趋势；(d) 1980-2000 温度变化趋势

Fig 5-3 The trend of aridity/humidity index, rainfall and temperature of Ordos Plateau from 1980 to 1990 and 1990 to 2000

(a)the trend of aridity/humidity index from 1980 to 1990; (b) the trend of aridity/humidity index from 1990 to 2000; (c)the trend of rainfall from 1980 to 2000; (d)the trend of temperature from 1980 to 2000

子，而温度的升高则分别在 1980-1990 年沙漠化逆转和 1990-2000 年沙漠化发展的气候变化作用过程中起到了加速的作用。人类活动特征在这两个时间尺度下也具有明显

的差异。图 5-4 为 1980-2000 年鄂尔多斯高原牲畜数量和年造林面积的变化趋势。可以看出, 牲畜数量在 1980-2000 年间呈下降的趋势, 特别是 1990-2000 年间, 牲畜数量整体有所减少。在没有实施舍饲圈养政策的情况下, 牲畜数量的多少直接体现在其对草地压力的大小上面。鄂尔多斯高原 2000 年以前还未广泛实施舍饲圈养的政策, 因此 1990-2000 年间牲畜数量的减少可能是该时间尺度下沙漠化逆转的一个人为原因。年造林面积的变化体现了人类活动对沙漠化影响积极的一面, 在 1990-2000 年间, 年造林面积相对于其在 1980-1990 年间有增加的趋势, 这可能与 1990 年后原伊克昭盟政府出台的政策有关。鄂尔多斯(原伊克昭盟)自 1990 年以来相继出台了許多利于植被建设以及沙漠化逆转的政策, 如 1991 年, 伊盟党委做出了《丘陵沟壑区实施“两翼一体”战略的决定》, 将植被建设作为“一翼”, 把草原建设放在重要位置, 并在四大类区实施各具特色的工程建设, 加快了植被建设进度。1995 年, 伊盟党委做出了《关于进一步加强植被建设的决定》, 成立了植被建设办公室, 负责全盟的植被建设工作。尽管 1980-1990 年间, 伊盟党委政府也出台了相关政策用于植被建设, 而这些政策多是指导性意见, 实施效果相对 1990-2000 年的一些措施较差。这些政策上的差异在整体上决定了两个时间尺度下鄂尔多斯高原人类活动总体特征的差异。

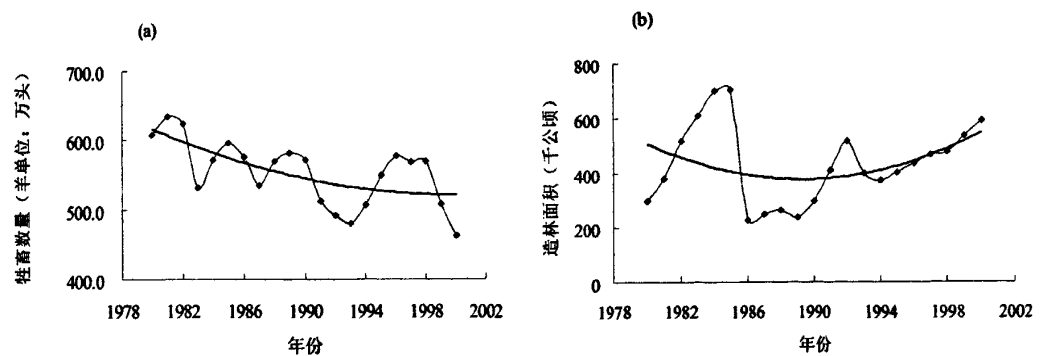


图 5-4 1980-2000 年间牲畜数量和年造林面积的变化

(a) 牲畜数量; (b) 年造林面积

Fig 5-4 The change of livestock number and afforestation area per year from 1980 to 2000

(a) livestock number; (b) annual afforested area

5.1.2 不同时间跨度下鄂尔多斯高原沙漠化过程中气候变化和人类活动相对作用研究

为了分析不同时间跨度下鄂尔多斯高原沙漠化过程中气候变化和人类活动相对作用, 将评价的起始时间  $t$  定位在 1980 年, 研究 1980-1990 年、1980-2000 年以及 1980-2005 年三个时间尺度下鄂尔多斯高原沙漠化过程中气候变化和人类活动相对作

用。由于 1980-1990 年时间尺度下的评价结果已在上节分析,下面重点针对 1980-2000 年和 1980-2005 年进行研究。

在 1980-2000 年和 1980-2005 年时间尺度下,气候变化和人类活动在鄂尔多斯高原沙漠化逆转过程中的相对作用如图 5-5 所示。在 1980-2000 年时间尺度下,人类活动是沙漠化逆转的主导因素,以人类活动为主导致的逆转的沙漠化土地面积占该时间尺度下总逆转面积的 93.02%。从其各自的空间分布情况上看,以人类活动为主导致的沙漠化逆转区域主要集中分布在伊金霍洛旗和鄂托克前旗,其余的主要分布在准格尔旗东部的和鄂托克旗中部,乌审旗东南部与陕北榆林交界的地方也有分布。以气候变化为主导致的沙漠化逆转区域主要集中分布在三个地方,一是东胜周围的温带禾草原区域,二是鄂托克前旗南部的温带落叶灌丛区域,第三个地方是杭锦旗西北部的部分沿黄河农田区域以及部分荒漠草原区域。

在 1980-2005 年时间尺度下,以气候变化为主导致的和以人类活动为主导致的逆转的沙漠化土地面积相差不大,总体上以气候变化为主导致的逆转的沙漠化土地面积相对较大,占总逆转面积的 59.71%。从其各自的空间分布看,以气候变化为主导致的沙漠化逆转区域主要分布在鄂尔多斯高原的西侧,而以人类活动为主导致的沙漠化逆转区域主要分在鄂尔多斯高原的东部,其分界线恰好与 300 mm 等降水线较为吻合。

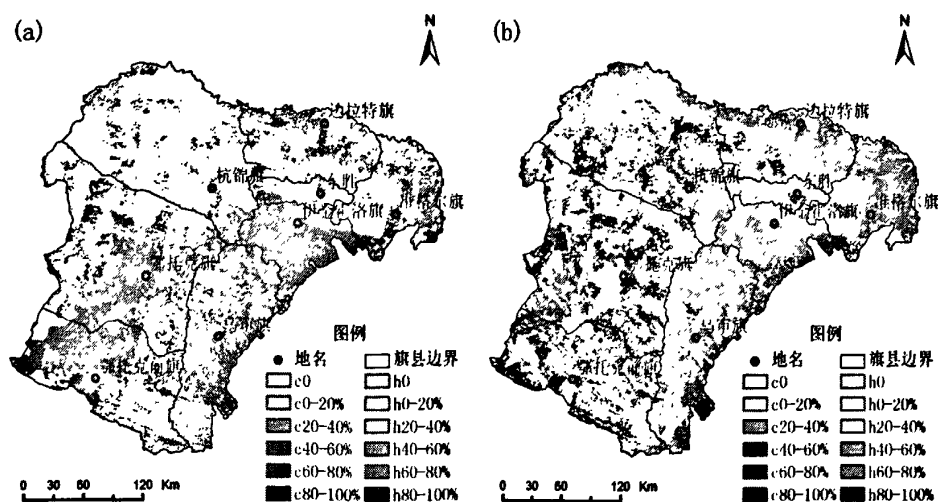


图 5-5 1980-2000 和 1980-2005 年气候变化和人类活动在沙漠化逆转过程中的相对作用

(a) 1980-2000 年; (b) 1980-2005 年

Fig 5-5 The relative role of climate change and human activities in desertification reversion from 1980 to 2000 and 1980 to 2005

(a) from 1980 to 2000; (b) from 1980 to 2005

对于沙漠化发展，气候变化和人类活动在 1980-2000 年和 1980-2005 年两个时间尺度下的相对作用也不相同。根据图 5-6，在 1980-2000 年时间尺度下，气候变化是鄂尔多斯高原沙漠化发展的主导因素，以气候变化为主导导致的沙漠化土地面积占总发展面积的 85.77%。从其空间分布上看，以气候变化为主导导致的沙漠化发展区域主要分布在准格尔旗的温带禾草草原，杭锦旗南部与鄂托克旗交界的区域，以及乌审旗、鄂托克旗、鄂托克前旗三旗交界的毛乌素沙地腹地等地区。而以人类活动为主导导致的沙漠化发展区域主要分布在杭锦旗境内。

在 1980-2005 年时间尺度下，沙漠化发展的面积总体较小。人类活动是该时间尺度下沙漠化发展的主要原因，以人类活动为主导导致的沙漠化土地面积占总发展面积的 62.35%。从其空间分布上看，1980-2005 年时间尺度下人类活动主导的沙漠化发展区域主要分布在鄂尔多斯高原西部的杭锦旗、鄂托克旗以及鄂托克前旗；而以气候变化为主导导致的沙漠化发展区域分布在鄂尔多斯高原西部的荒漠区，以及零星分布在准格尔旗的东南部。

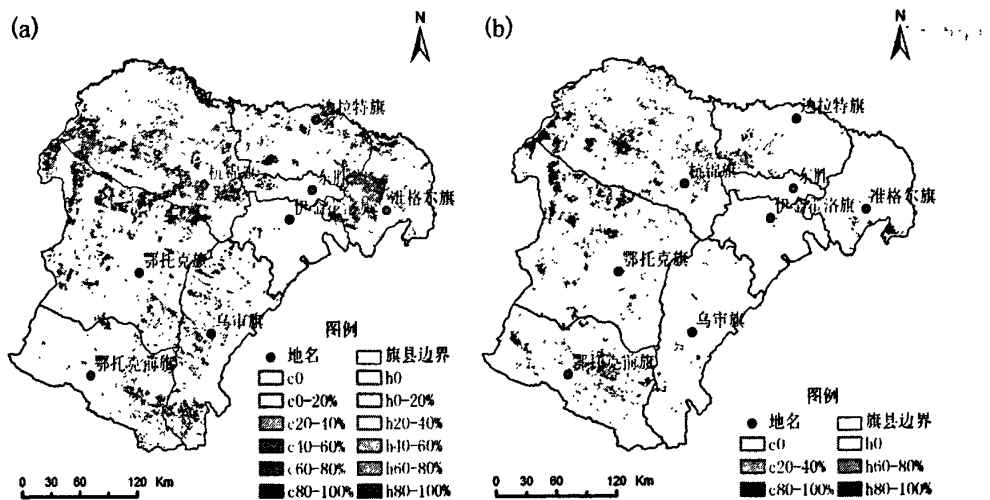


图 5-6 1980-2000 和 1980-2005 年气候变化和人类活动在沙漠化发展过程中的相对作用

(a) 1980-2000 年; (b) 1980-2005 年

Fig 5-6 The relative role of climate change and human activities in sandy desertification expansion from 1980 to 2000 and 1980 to 2005

(a) from 1980 to 2000; (b) from 1980 to 2005

以 1980 年为起始年，不同时间跨度下鄂尔多斯高原各个旗县以及不同植被类型区中气候变化和人类活动引起的沙漠化逆转和发展的区域面积统计情况如表 5-3 和表 5-4 所示。随着时间跨度的变化，鄂尔多斯高原各个旗县占主导地位的沙漠化驱动过程变化明显。1980-1990 年时间尺度下各旗县的沙漠化驱动过程如上节所述，然而在

1980-2000 年时间尺度下, 各旗县的沙漠化驱动过程与 1980-1990 年截然相反, 表现为除气候变化引起的沙漠化发展为杭锦旗占主导地位的沙漠化驱动过程, 其余各旗县均表现为人类活动引起的沙漠化逆转。在 1980-2000 年时间尺度下该旗县的主要沙漠化驱动过程。在 1980-2005 年时间尺度下, 各个旗县的主要沙漠化驱动过程差异更为明显。杭锦旗、东胜、鄂托克旗以及鄂托克前旗的沙漠化驱动过程表现为气候变化引起的沙漠化逆转占主导地位, 而其余各个旗县则表现为人类活动引起的沙漠化逆转占主导地位。

1980-1990 年、1980-2000 年以及 1980-2005 年这三个时间尺度下不同植被类型区的沙漠化驱动过程也存在明显的差异。总体上表现为在 1980-2005 年时间尺度下, 各个植被类型区的沙漠化驱动过程之间的差异最为明显。在该时间尺度下, 农田、温带禾草草原以及荒漠区的沙漠化驱动过程主要表现为人类活动引起的沙漠化逆转, 而其余的两个植被类型区则表现为气候变化引起的沙漠化逆转为主要的沙漠化驱动过程。相对于 1980-2005 年时间尺度, 1980-1990 年以及 1980-2000 年鄂尔多斯高原各植被类型区的沙漠化驱动过程较为一致。在 1980-1990 年时间尺度下, 各植被类型区均表现为气候变化引起的沙漠化逆转为主要的沙漠化驱动过程; 而在 1980-2000 年时间尺度下, 除荒漠区表现为气候变化引起的沙漠化发展为主要的沙漠化驱动过程, 其余各植被类型区的沙漠化驱动过程均以人类活动引起的沙漠化逆转为主。

表 5-3 1980-1990 年、1980-2000 年和 1980-2005 年各旗县气候变化和人类活动引起的沙漠化逆转和发展面积统计

Table 5-3 The sandy desertification reversion and expansion induced by climate change and human activities in all counties from 1980 to 1990、1980 to 2000 and 1980 to 2005

| 旗县    | 1980-1990(单位: km <sup>2</sup> ) |     |      |      | 1980-2000(单位: km <sup>2</sup> ) |      |      |      | 1980-2005(单位: km <sup>2</sup> ) |     |      |      |
|-------|---------------------------------|-----|------|------|---------------------------------|------|------|------|---------------------------------|-----|------|------|
|       | CR                              | CE  | HR   | HE   | CR                              | CE   | HR   | HE   | CR                              | CE  | HR   | HE   |
| 杭锦旗   | 2409                            | 44  | 326  | 2796 | 491                             | 4029 | 1943 | 1414 | 4699                            | 547 | 1231 | 1666 |
| 达拉特旗  | 2209                            | 32  | 408  | 1041 | 37                              | 1306 | 2159 | 222  | 1395                            | 34  | 2325 | 444  |
| 准格尔旗  | 3057                            | 2   | 182  | 615  | 0                               | 1751 | 2756 | 0    | 107                             | 168 | 4186 | 1    |
| 鄂托克旗  | 6891                            | 4   | 434  | 1902 | 0                               | 3360 | 7548 | 63   | 10236                           | 351 | 1171 | 1455 |
| 东胜    | 689                             | 1   | 1    | 233  | 54                              | 176  | 617  | 22   | 845                             | 5   | 182  | 11   |
| 伊金霍洛旗 | 2210                            | 6   | 64   | 750  | 4                               | 105  | 4664 | 3    | 444                             | 11  | 3061 | 7    |
| 乌审旗   | 2986                            | 241 | 1193 | 487  | 0                               | 1609 | 4554 | 0    | 2171                            | 48  | 4832 | 106  |
| 鄂托克前旗 | 3687                            | 0   | 218  | 1083 | 445                             | 865  | 5703 | 31   | 5708                            | 0   | 174  | 1282 |

表 5-4 1980-1990 年、1980-2000 年和 1980-2005 年各植被类型区气候变化和人类活动引起的沙漠化逆转和发展面积统计

Table 5-4 The sandy desertification reversion and expansion induced by climate change and human activities in all counties from 1980 to 1990、1980 to 2000 and 1980 to 2005

| 植被类型   | 1980-1990(单位: km <sup>2</sup> ) |     |      |      | 1980-2000(单位: km <sup>2</sup> ) |      |       |     | 1980-2005(单位: km <sup>2</sup> ) |     |       |      |
|--------|---------------------------------|-----|------|------|---------------------------------|------|-------|-----|---------------------------------|-----|-------|------|
|        | CR                              | CE  | HR   | HE   | CR                              | CE   | HR    | HE  | CR                              | CE  | HR    | HE   |
| 农田     | 1163                            | 93  | 451  | 411  | 103                             | 1204 | 1535  | 10  | 201                             | 122 | 1907  | 47   |
| 温带禾草草原 | 2686                            | 0   | 98   | 1646 | 113                             | 1646 | 3030  | 174 | 1754                            | 151 | 2692  | 536  |
| 温带落叶灌丛 | 16579                           | 237 | 1523 | 5738 | 476                             | 7389 | 20969 | 677 | 18329                           | 118 | 11126 | 2824 |
| 荒漠草原   | 2464                            | 0   | 0    | 927  | 157                             | 1322 | 3142  | 615 | 4022                            | 8   | 1     | 1189 |
| 荒漠     | 1246                            | 0   | 754  | 185  | 182                             | 1640 | 1268  | 279 | 1299                            | 765 | 1436  | 376  |

在评价起始时间相同、但时间跨度不同的三种时间尺度下，鄂尔多斯高原沙漠化过程中气候变化和人类活动的相对作用存在明显的差异。在较长的时间尺度下进行评价时，如 1980-2000 年和 1980-2005 年，短时间尺度下的一些气候变化和人类活动作用趋势往往被减弱或忽略，以至于气候变化和人类活动作用可能在较长的时间尺度下表现与短时间尺度下相反的趋势。图 5-6 为不同时间尺度下潜在 NPP 的线性变化趋势，用于反映不同时间尺度下气候变化的趋势以及尺度差异。根据图 5-7，可以明显地看出在较短的时间尺度下，如 1980-1990 年和 1990-2000 年，潜在 NPP 的变化趋势较为明显，1980-1990 年呈明显的上升趋势，而 1990-2000 年则呈明显的下降趋势。然而，在较长的时间尺度下分析时，如 1980-2000 年，鄂尔多斯高原潜在 NPP 的变化趋势整体呈下降的趋势，且变化趋势相对于短时间尺度较小。因此，在 1980-2000 年时间尺度下进行评价时，1980-1990 年潜在 NPP 上升的趋势就会被减弱或忽略，评价结果则反映的是一种长时间尺度下的一种综合表现。由于在 2001-2005 年，鄂尔多斯高原降水明显增加，这样在进行 1980-2005 年时间尺度下气候变化的相对作用评价时，1990-2000 年时间尺度下潜在 NPP 的下降趋势就会被减弱或忽略，进而在 1980-2005 年时间尺度下表现为整体的潜在 NPP 上升的趋势，然而这种上升的趋势相对 1980-1990 年较弱。因此，在利用本研究方法进行沙漠化过程中气候变化和人类活动相对作用评价时，必须要考虑所研究的时间尺度。不同时间尺度下的评价结果，往往会有明显的差异。

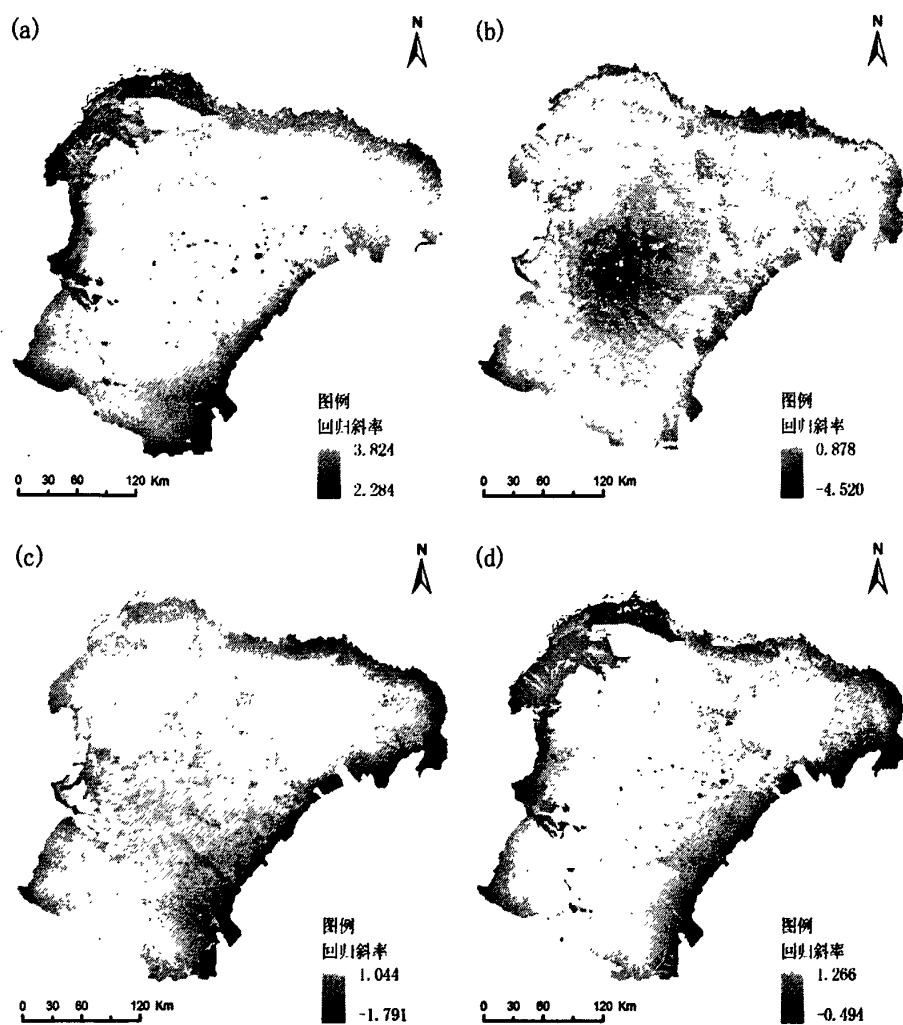


图 5-7 不同时间尺度下潜在 NPP 的变化趋势

(a) 1980-1990 年; (b) 1990-2000 年; (c) 1980-2000 年; (d) 1980-2005 年

Fig 5-7 The trend of potential NPP at different temporal scales

(a)from 1980 to 1990; (b)from 1990 to 2000; (c)from 1980 to 2000; (d)from 1980 to 2005

阶段性的气候和人类活动特点也是造成这三个时间尺度下鄂尔多斯高原沙漠化过程中气候变化和人类活动相对作用差异的重要原因。特别是 2000 年以后, 鄂尔多斯高原的降雨明显增加, 有利于沙漠化的逆转。与此同时, 在 2000 年, 当时的伊盟党委做出《建设绿色大盟、畜牧业强盟的决定》, 要求东部的准、达、东、伊 4 旗(区)全面禁牧; 西部的鄂、杭、乌、鄂前 4 旗生态项目区禁牧和季节性禁牧, 实施舍饲养畜和半舍饲养畜, 植被恢复效果明显。2001 年起, 城郊经济区、水保经济区、高效农牧业经济区全面禁牧, 实行舍饲养畜, 决定还要求全面实行“退耕还林还草”。由于

这段时间的气候和人类活动特征均有利于沙漠化逆转,因此在 2000 年以后鄂尔多斯高原沙漠化全面逆转,具体表现在该时间尺度下沙漠化逆转过程中,气候变化和人类活动共同导致的沙漠化逆转的土地面积较大,以至于 1980-2005 年时间尺度下的评价结果和 1980-2000 年尺度下的评价结果具有明显的差异(图 5-5)。

不同时间尺度下沙漠化过程中气候变化和人类活动相对作用的差异主要由其具体因子的作用差异来决定。然而,气候变化和人类活动的影响因子较多,在沙漠化过程中的作用复杂。尽管基于统计数据变化趋势的定性分析可以得出一些结论,但是仍具有一定得主观性。由于本研究重点关注于沙漠化过程中气候变化和人类活动的综合作用的定量评价,因此,有待结合沙漠化驱动力因子作用的定量评价方法来进行更为深入与客观地评价。与此同时,在进行沙漠化过程驱动力作用评价时必须考虑时间尺度的影响。

## 5.2 不同空间尺度下鄂尔多斯高原沙漠化过程中气候变化和人类活动相对作用研究

气候变化和人类活动在沙漠化过程中的相对作用不仅在不同的时间尺度上明显不同,而且在不同的空间尺度上也具有明显的差异。为了更好的研究不同空间尺度下气候变化和人类活动在沙漠化过程中的相对作用,将分析的时间尺度固定在 1980-2005 年的时间尺度下。在本研究中,不同的空间尺度以不同的栅格大小来表示,选取 1 km, 3 km, 5 km, 10 km, 20 km 序列栅格进行空间尺度分析,同时本研究也选择鄂尔多斯高原的旗县作为一个空间尺度来分析气候变化和人类活动在沙漠化过程中的相对作用。因此,总共有 6 个空间尺度用于分析。

不同空间尺度下用于分析的数据的获取都以 1 km 尺度下的数据为基础进行转换来获得,转换的过程如图 5-8 所示。对于高一级尺度下沙漠化逆转与发展数据的转换,我们通过设定规则即在高一级尺度下的栅格中,其所包含的 1 km 沙漠化逆转的栅格数大于沙漠化发展的栅格数,高一级尺度下该栅格的沙漠化动态就定义为沙漠化发展;反之则定义为沙漠化逆转。对于实际与潜在 NPP 的转换,我们通过计算均值的方式来获取更高一级尺度下的数值,其具体操作利用 ArcGIS 的 Aggregate 函数来完成。

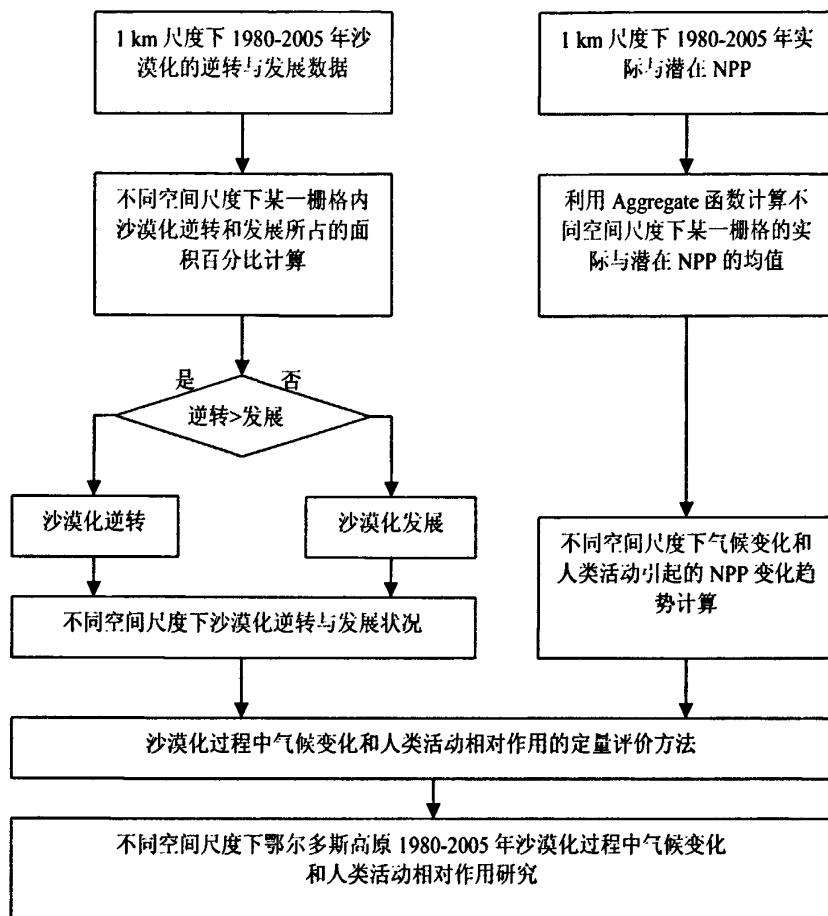


图 5-8 不同空间尺度下沙漠化过程中气候变化和人类活动相对作用评价流程图

Fig 5-8 The flow chart of assessing the relative role of climate change and human activities in sandy desertification at different spatial scales

不同空间尺度下 1980-2005 年鄂尔多斯高原沙漠化逆转和发展的空间分布以及其各自的面积变化如图 5-9 和图 5-10 所示。根据图 5-7 中不同空间尺度下沙漠化逆转和发展的计算规则，随着空间尺度的增加，一些在较小尺度下沙漠化无变化的栅格将参与较高尺度下沙漠化逆转和发展的计算。因此，随着空间尺度的增加，沙漠化无变化的区域逐渐减少，在空间尺度为 20 km 时已经没有沙漠化无变化的区域。由于在沙漠化无变化的栅格将参与较高尺度下沙漠化逆转和发展的计算，沙漠化逆转和发展区域的面积随着空间尺度的增加起初都表现为增加的趋势，沙漠化发展区域的面积在 3km 的空间尺度下达到最大；然而之后在更高一级的空间尺度下逐渐减少，直到在旗县尺度下沙漠化发展区域的面积为 0。沙漠化逆转区域的面积则随着空间尺度的增加一直呈增加的趋势，在旗县尺度下达到最大，各个旗县均表现为沙漠化逆转。

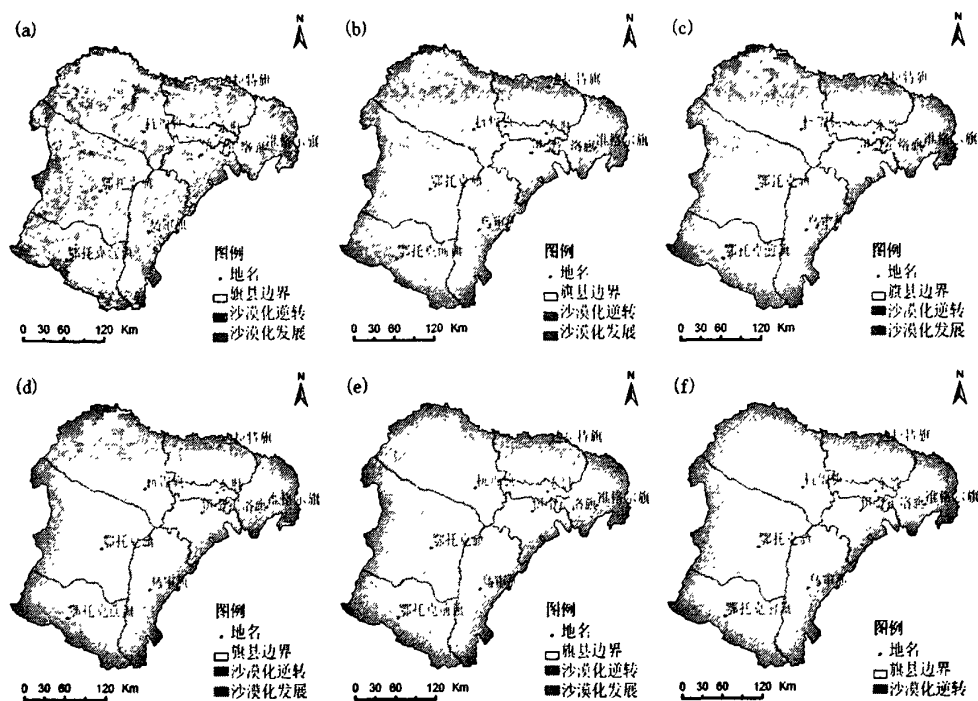


图 5-9 不同空间尺度下 1980-2005 年鄂尔多斯高原沙漠化逆转和发展区域的空间分布

Fig 5-9 The distribution of sandy desertification reversion and expansion in Ordos Plateau from 1980 to 2005 at different spatial scales

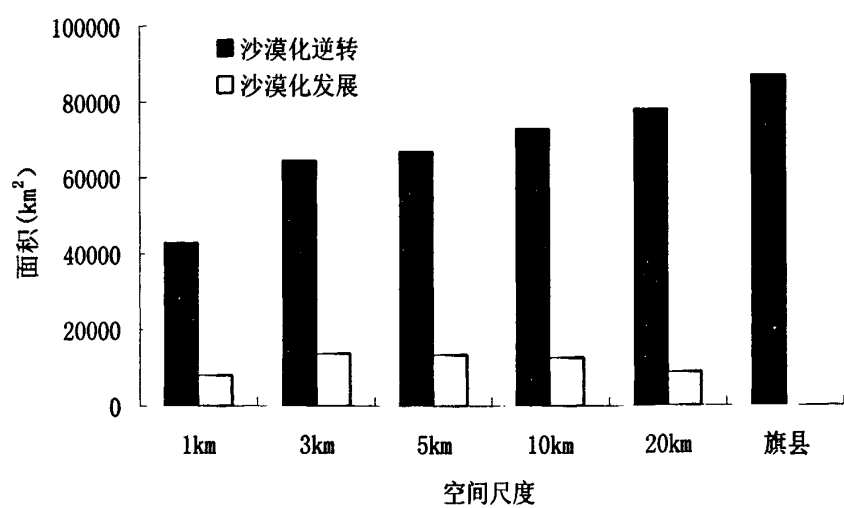


图 5-10 不同空间尺度下 1980-2005 年鄂尔多斯高原沙漠化逆转和发展面积的变化

Fig 5-10 The change of the area of sandy desertification reversion and expansion in Ordos Plateau from 1980 to 2005 at different spatial scales

根据本研究提出的沙漠化过程中气候变化和人类活动相对作用的定量评价方法，不同空间尺度下鄂尔多斯高原 1980-2005 年沙漠化逆转过程中气候变化和人类活动的相对作用如图 5-11 所示。根据不同空间尺度下气候变化和人类活动主导的沙漠化逆转面积的变化（图 5-12），随着空间尺度的增加，气候变化和人类活动主导的沙漠化逆转面积都呈增加的趋势。在旗县尺度下，达拉特旗、准格尔旗、伊金霍洛旗以及乌审旗的沙漠化逆转的驱动过程都表现为人类活动主导的沙漠化逆转，而其余的几个旗县则表现为气候变化主导的沙漠化逆转。

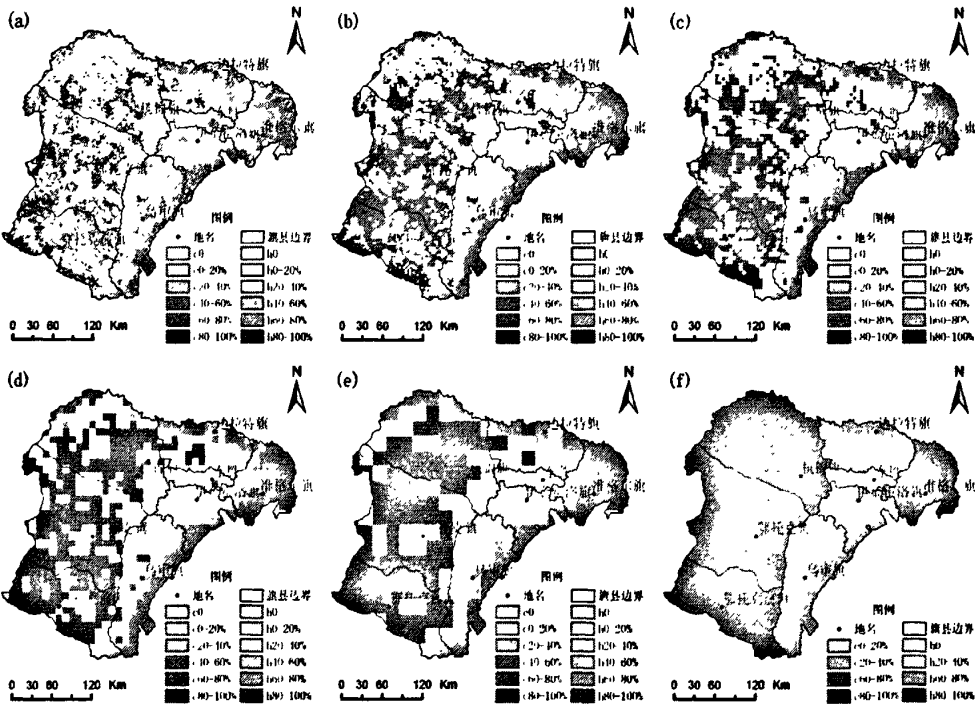


图 5-11 不同空间尺度下鄂尔多斯高原 1980-2005 年沙漠化逆转过程中气候变化和人类活动的相对作用

Fig 5-11 The relative role of climate change and human activities in the sandy desertification reversion of Ordos Plateau from 1980 to 2005 at different spatial scales

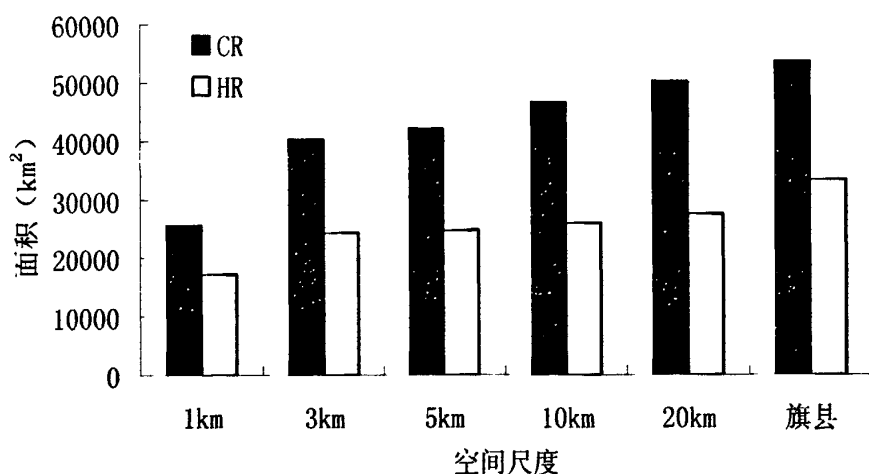


图 5-12 不同空间尺度下鄂尔多斯高原 1980-2005 年沙漠化逆转过程中气候变化和人类活动主导的沙漠化逆转面积的变化

Fig 5-12 The change of the area of sandy desertification reversion mainly induced by climate change and human activities of Ordos Plateau from 1980 to 2005 at different spatial scales

不同空间尺度下鄂尔多斯高原 1980-2005 年沙漠化发展过程中气候变化和人类活动的相对作用如图 5-13 所示。根据不同空间尺度下气候变化和人类活动主导的沙漠化发展面积的变化（图 5-14），随着空间尺度的增加，气候变化和人类活动主导的沙漠化发展面积都呈先增加后减小的趋势。气候变化主导的沙漠化发展面积在 10 km 空间尺度下达到最大，后来逐渐减小；而人类活动主导的沙漠化发展面积则在 3 km 空间尺度下达到最大，后来随空间尺度的增加而减小。在旗县尺度下，气候变化和人类活动主导的沙漠化发展面积均为 0。

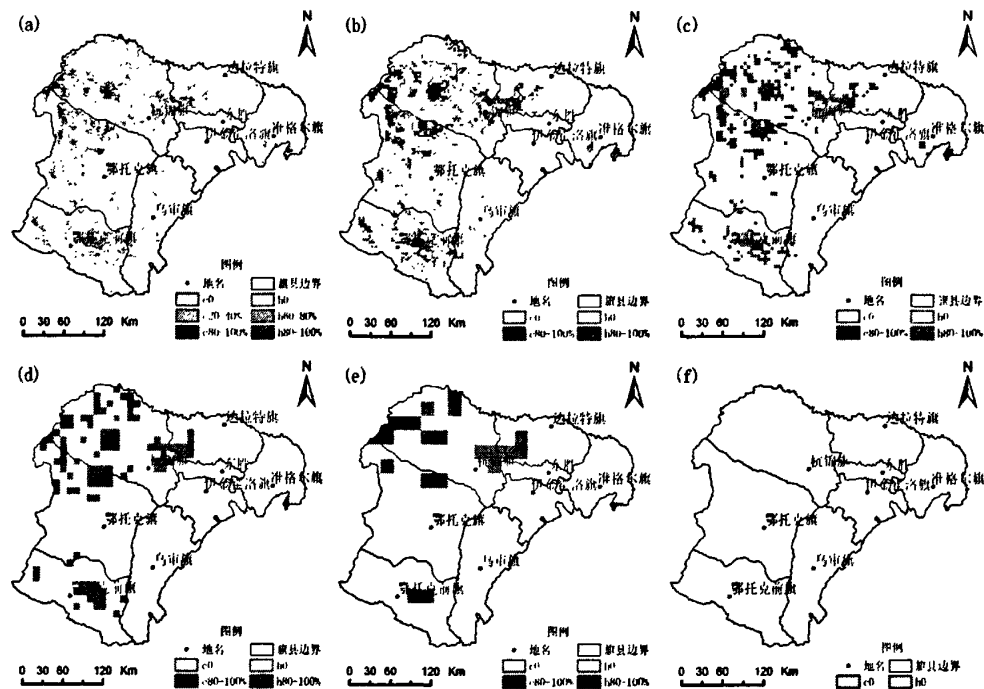


图 5-13 不同空间尺度下鄂尔多斯高原 1980-2005 年沙漠化发展过程中气候变化和人类活动的相对作用

Fig 5-13 The relative role of climate change and human activities in the sandy desertification expansion of Ordos Plateau from 1980 to 2005 at different spatial scales

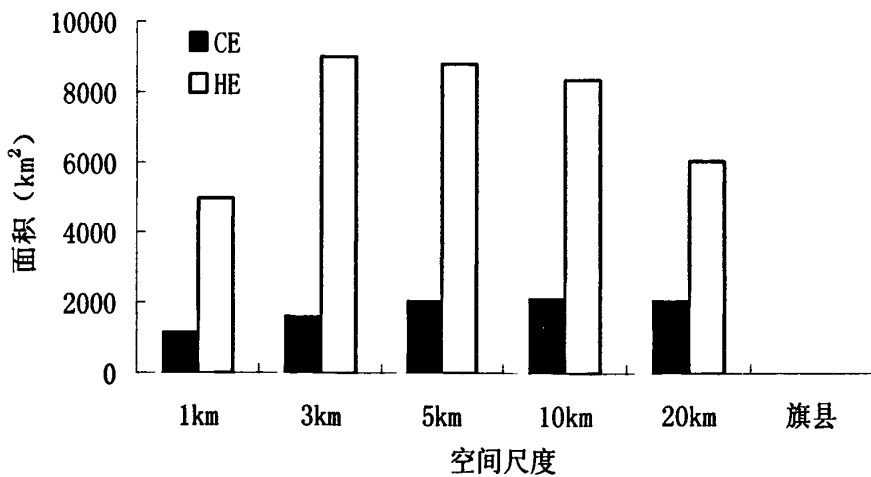


图 5-14 不同空间尺度下鄂尔多斯高原 1980-2005 年沙漠化逆转过程中气候变化和人类活动主导的沙漠化发展面积的变化

Fig 5-14 The change of the area of sandy desertification expansion mainly induced by climate change and human activities of Ordos Plateau from 1980 to 2005 at different spatial scales

空间尺度的变化不仅影响气候变化和人类活动引起的沙漠化逆转和发展面积，而且也评价的误差有明显的影。根据不同空间尺度下沙漠化发展和逆转评价过程中的误差的空间分布和面积变化（图 5-15 和图 5-16），随着空间尺度的增加，沙漠化逆转评价过程中的误差在 20 km 空间尺度下达到最大，而沙漠化发展评价过程中的误差在 3 km 空间尺度下达到最大，然后随着空间尺度的增加而逐渐减小，其变化趋势与人类活动主导的沙漠化发展面积的变化趋势相同。在旗县尺度下，沙漠化发展和逆转评价过程中的误差的面积均降低为 0。

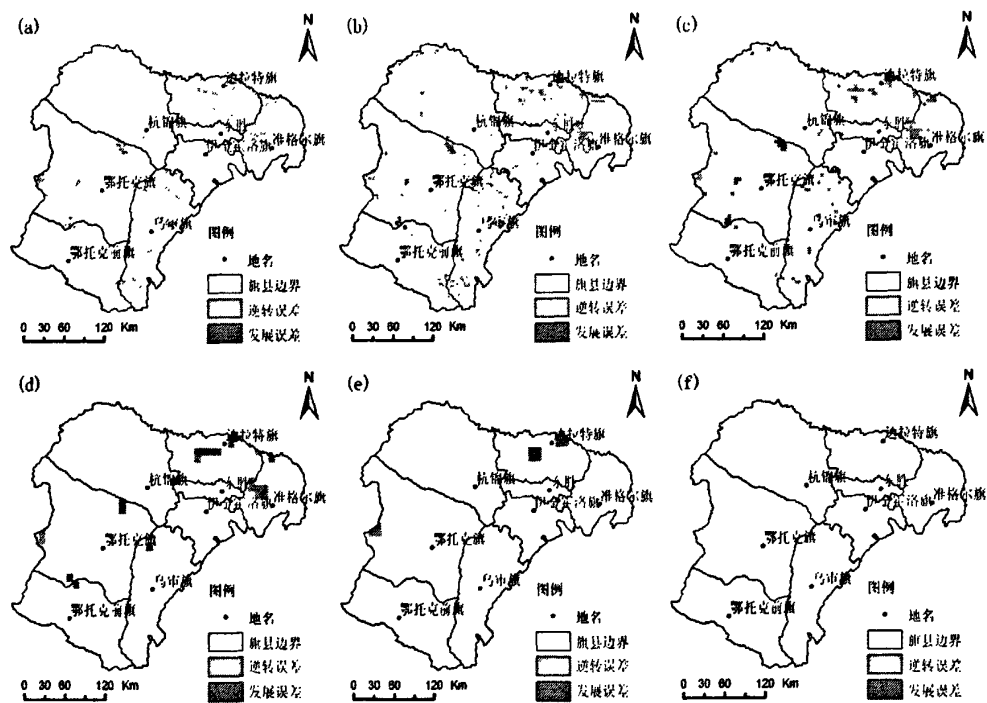


图 5-15 不同空间尺度下鄂尔多斯高原 1980-2005 年沙漠化逆转和发展评价过程中误差的空间分布

Fig 5-15 The spatial distribution of the errors in the assessment of desertification reversion and expansion of Ordos Plateau from 1980 to 2005 at different spatial scales

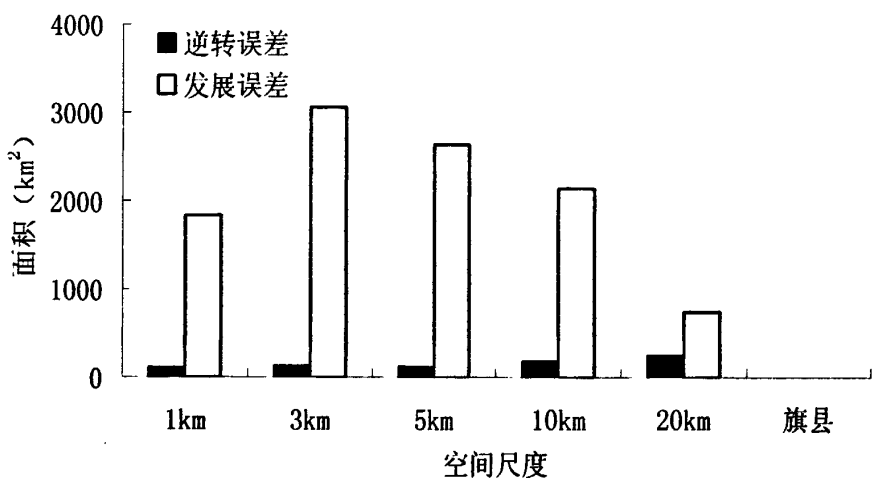


图 5-16 不同空间尺度下鄂尔多斯高原 1980-2005 年沙漠化逆转和发展评价过程中误差的面积变化

Fig 5-16 The change of the areas of errors in the assessment of sandy desertification reversion and expansion of Ordos Plateau from 1980 to 2005 at different spatial scales

根据在不同空间尺度下的评价结果,随着空间尺度的增加,不论是气候变化和人类活动主导的沙漠化逆转和发展区域的面积,还是沙漠化逆转和发展评价过程中的误差面积,起初都呈现为先增加的趋势,具体表现为在 3 km 空间尺度下的各种分析对象的面积均比在 1 km 空间尺度下的大。根据本研究关于在较大空间尺度下的数据转换规则,这主要是由于较小一级空间尺度下(1km)一些沙漠化等级未发生变化的区域在较大一级空间尺度下的评价过程中,被划为沙漠化变化区域,参与了气候变化和人类活动相对作用的计算,进而引起气候变化和人类活动主导的沙漠化逆转和发展区域的面积以及评价误差面积的增加。然而,随着空间尺度的继续增加,气候变化和人类活动主导的沙漠化逆转和发展区域的面积以及评价误差的面积的变化趋势却各不相同。具体表现为,随着空间尺度的继续增加,一些不占主导地位(在这里主要指面积上的优势)的变化过程(气候变化和人类活动主导的沙漠化发展以及评价误差)往往会被忽略,而一些占主导地位的变化过程(如气候变化和人类活动引起的沙漠化逆转)则随着空间尺度的增加而越来越明显。这主要是由于在较大的空间尺度下进行评价时,区域的总体特征往往由占主导地位的因素的特征所决定。因此,随着空间尺度的继续增加,占主导地位的沙漠化驱动过程将会代表区域的总体沙漠化驱动特征,以致于那些具有不占主导地位的沙漠化驱动过程的区域被“概化”,最终导致其面积的减少。空间尺度的增加也会增加评价的不确定性,然而这种不确定性作为一种小尺度

下的“高频分量”会随着空间尺度的增加而逐渐降低,尽管在空间尺度增加的初始阶段会产生一些波动(面积上的增加)。因此,沙漠化过程中气候变化和人类活动的相对作用的研究需要考虑其评价所依赖的空间尺度,这样才能得到合理的结论。

## 本章小结

本章在第四章提出的气候变化和人类活动在沙漠化过程中相对作用定量评价方法的基础上,系统地研究了不同时间和空间尺度下鄂尔多斯高原沙漠化过程中气候变化和人类活动相对作用。主要成果和结论如下:

1、不同时间尺度下,气候变化和人类活动在鄂尔多斯高原沙漠化过程中相对作用存在明显的差异。对于沙漠化逆转,气候变化是 1980-1990 和 1980-2005 年时间尺度下鄂尔多斯高原沙漠化逆转的主要因素,两个尺度下以气候变化为主导导致的沙漠化逆转面积占总逆转面积的百分比分别为 89.45%和 59.71%;而人类活动是 1990-2000 和 1980-2000 年时间尺度下鄂尔多斯高原沙漠化逆转的主要因素,两个尺度下以人类活动为主导导致的沙漠化逆转面积占总逆转面积的百分比分别为 90.40%和 93.02%。对于沙漠化发展,情况则相反,即人类活动是 1980-1990 和 1980-2005 年时间尺度下鄂尔多斯高原沙漠化发展的主要因素;而气候变化则是 1990-2000 和 1980-2000 年时间尺度下鄂尔多斯高原沙漠化发展的主要因素。

2、不同空间尺度下,鄂尔多斯高原 1980-2005 年沙漠化过程中气候变化和人类活动的相对作用以及评价过程中误差也具有明显的差异,主要体现在气候变化和人类活动主导的沙漠化逆转和发展以及评价过程中的误差的面积差异。随着空间尺度的增加,气候变化和人类活动主导的沙漠化逆转面积均呈增加的趋势,直到旗县尺度达到最大,而气候变化和人类活动主导的沙漠化发展以及评价过程中的误差面积都表现为先增加后降低的趋势,直到旗县尺度减低为 0。



## 第六章 结论与展望

气候变化和人类活动是导致土地沙漠化的两个主要驱动力,定量评价气候变化和人类活动在土地沙漠化过程中的相对作用,对于沙漠化的理论研究以及区域和国家尺度上沙漠化防治工作的开展具有重要意义。本研究从方法论的角度针对沙漠化过程中气候变化和人类活动相对作用这一科学问题进行研究,以定量研究为主线,将定量研究贯穿于沙漠化监测及气候变化和人类活动相对作用评价的整个过程,建立沙漠化过程中气候变化和人类活动相对作用定量评价的研究方法,并从时间和空间两种尺度上系统的分析了鄂尔多斯高原沙漠化过程中气候变化和人类活动相对作用的尺度差异。本章主要对本文的主要结论进行归纳,对本研究的创新点与不足之处进行分析,最后对今后的研究工作进行展望。

### 6.1 主要研究成果与结论

1、建立基于 Landsat 数据的鄂尔多斯高原沙漠化定量监测方法。从沙漠化引起的地表特征变化入手,综合考虑评价指标的代表性、可用遥感反演等特性,选取归一化植被指数 NDVI、滑动标准差指数 MSDI 以及地表反照率 Albedo 三个指标分别代表沙漠化地表的植被丰富、景观格局以及地表微气候条件,用于沙漠化定量监测。针对 Landsat 数据特点,在提出各个指标的反演算法的基础上,综合考虑不同植被类型区以及遥感影像获取时间的影响,建立了基于决策树模型的沙漠化定量监测的方法。根据精度检验的结果,该方法监测精度较高,可以准确的用于鄂尔多斯高原沙漠化的监测研究。

2、1980-2005 年,鄂尔多斯高原沙漠化变化趋势呈一种逆转与发展同时存在,但逆转整体大于发展的趋势。在 1980-1990 年间,逆转的沙漠化土地在鄂尔多斯高原分布的相对分散,而发展的沙漠化土地的空间分布相对较为集中,主要分布在杭锦旗东南部的温带落叶灌丛与荒漠草原的过渡区域、准格尔其西部的温带禾草草原区域、以及鄂托克前旗南部的温带落叶灌丛区。在 1990-2000 年间,沙漠化逆转的土地面积略高于沙漠化发展的土地面积,轻微逆转的沙漠化土地分布的相对较为均匀,而明显逆转的沙漠化土地则集中分布在伊金霍洛旗西北部的温带落叶灌丛与温带禾草草原的过渡区以及鄂托克前旗西部的温带落叶灌丛区;而沙漠化发展的土地主要集中在达拉特旗、杭锦旗、准格尔旗、乌审旗以及东胜。在 2000-2005 年,该时段年均沙漠化的逆转面最大,逆转的沙漠化土地主要分布于鄂尔多斯高原东北部的准格尔旗、达拉特旗和东胜这三个旗县的大部分地区;而发展的沙漠化土地主要集中分布在伊金霍洛旗

以及鄂托克前旗西北部的温带落叶灌丛与荒漠草原的过渡地带。

3、气候变化和人类活动在沙漠化过程中相对作用定量评价方法的建立。提出了基于净初级生产力 NPP 为公共指标以及实际与潜在植被情况模拟的沙漠化过程中气候变化和人类活动相对作用定量评价的概念框架。在建立基于 CASA 模型的实际 NPP 与潜在 NPP 的模拟方法的基础上,根据概念模型框架,建立了针对沙漠化逆转和发展情况下的气候变化和人类活动相对作用的定量评价方法。通过对实际 NPP 以及定量评价结果的验证,对评价过程中误差的分析以及与其他方法的比较,表明本研究提出的评价方法可以用于沙漠化过程中气候变化和人类活动相对作用的定量评价。

4、不同时间尺度下,鄂尔多斯高原沙漠化过程中气候变化和人类活动相对作用存在明显的差异。在 1980-1990 年时间尺度下,气候变化是鄂尔多斯高原沙漠化逆转的主要原因,以气候变化为主导因素的逆转的沙漠化土地面积占总逆转面积的 89.45%;人类活动则是沙漠化发展的主要原因,以人类活动为主导因素的发展的沙漠化土地占总发展面积的 83.93%。在 1990-2000 年时间尺度下,人类活动是沙漠化逆转的主导因素,以人类活动为主导因素的逆转的沙漠化土地面积占总逆转面积的 90.04%;而气候变化主导了该时期的沙漠化发展,以气候变化为主导因素的发展的沙漠化土地面积占总发展面积的 91.20%。在 1980-2000 年时间尺度下,人类活动活动是鄂尔多斯高原沙漠化逆转的主要原因,以人类活动为主导因素的逆转的沙漠化土地面积占总逆转面积的 93.02%;而气候变化则是导致沙漠化发展的主要因素,以气候变化为主导因素的发展的沙漠化土地面积占总发展面积的 85.77%。1980-2005 年时间尺度下,气候变化和人类活动共同导致了鄂尔多斯高原的沙漠化逆转,其中气候变化主导的沙漠化逆转面积略大,占 59.71%;而对于沙漠化发展,人类活动则是该时间尺度下的沙漠化发展的主导因素,以人类活动为主导因素的发展的沙漠化土地占总发展面积的 62.35%。不同时间尺度下评价结果的差异表明在进行沙漠化驱动力作用分析以及其他结果比较时,必须考虑评价所基于的时间尺度。

5、不同空间尺度下,鄂尔多斯高原 1980-2005 年沙漠化过程中气候变化和人类活动的相对作用以及评价过程中误差也具有明显的差异。随着空间尺度的增加,气候变化和人类活动主导的沙漠化逆转面积均呈增加的趋势,直到旗县尺度达到最大;而气候变化和人类活动主导的沙漠化发展以及评价过程中的误差面积都表现为先增加后降低的趋势,直到旗县尺度减低为 0。不同空间尺度下评价结果的差异主要是由于在空间尺度增加过程中,小尺度下的不占主导地位的沙漠化驱动过程特征逐渐被忽略或者减弱等原因造成的。

## 6.2 本研究的创新点

在深入剖析沙漠化过程中驱动力相对作用这一科学问题的基础上,本研究从方法论的角度建立从沙漠化定量监测—驱动力定量评价整个过程中的研究方法,并系统的分析其存在的问题,在此基础上进行多尺度的研究。在研究思路和方法上有以下几个创新点:

1、在综合考虑传感器类型、遥感影像获取时间以及区域的植被类型状况对沙漠化监测指标体系影响的基础上,建立了以 NDVI、MSDI 和 Albedo 为指标的沙漠化定量监测指标体系以及基于决策树的沙漠化定量监测方法,在沙漠化监测方法论上有所创新。

2、基于公共指标 NPP 以及沙漠化土地植被的潜在与实际情况比较,在提出气候变化和人类活动在沙漠化过程中相对作用的定量评价的概念框架基础上,建立了定量评价方法,在沙漠化驱动力评价方法论上有所创新。

3、基于本研究提出的气候变化和人类活动在沙漠化过程中相对作用的定量评价方法,从时间和空间两个尺度对鄂尔多斯高原沙漠化过程中气候变化和人类活动的相对作用进行了系统地评价,丰富了鄂尔多斯高原沙漠化驱动力作用的研究成果。

## 6.3 研究中存在的问题

由于沙漠化过程中驱动力作用这一科学问题的复杂性,决定了在进行方法论的突破过程中存在着许多问题与不确定性,主要表现在数据与方法这两个层面。本研究存在的问题主要有以下几个方面:

1、在沙漠化定量监测的方法中,根据鄂尔多斯高原的二级植被类型将研究区划分为几个均质的区域,并以此作为影响沙漠化监测指标阈值的一个因素。然而在实际情况中,二级植被类型并非完全均质的区域,这也势必会影响沙漠化监测的精度。因此,还需借助更多的辅助信息来完善决策树模型以期达到更高的监测精度。

2、在实际 NPP 的计算过程中,NDVI 的数据源不够理想。由于本研究使用的时间序列大部分在 2000 年以前,因此只能使用 NOAA-AVHRR 的 NDVI 数据,而这一数据集较适合大尺度的生态、环境等问题的研究,其应用于中小尺度容易产生误差。因此,还需进一步地提高数据源质量以期达到更好的结果。

3、由于沙漠化过程中气候变化和人类活动相对作用并非像 NPP 具有明确的实际意义且可以测量,因此其验证也具有明显的特殊行。本研究提出了基于典型区分析的验证方法,主要通过系统对比与综合分析来进行相对验证,其中主要研究人类活动造成的沙漠化动态的验证。然而,由于受 MSS 和 TM 的空间分辨率的限制,选取的典

型验证区域较少。因此,还需借助更高分辨率的遥感影像或者专题数据来选取典型验证区。

4、不同时间尺度下,沙漠化过程中气候变化和人类活动一些具体因子的作用是通过统计数据进行的定性分析。然而定性分析有一定的主观性,因此还需要借助定量的分析方法深入分析气候变化和人类活动具体因子在沙漠化过程中的作用。

## 6.4 未来工作的展望

气候变化和人类活动在沙漠化过程中相对作用的定量评价研究不仅能够丰富沙漠化科学研究的理论基础、澄清目前沙漠化研究中的一些误区,而且能为区域和国家尺度上沙漠化防治对策与战略的制定提供理论依据。然而,沙漠化过程及其驱动力作用是一个非常复杂的科学问题,不仅涉及多学科的交叉,而且缺乏方法论上的突破。本研究在沙漠化过程中气候变化和人类活动相对作用的定量评价的方法上面进行了初步的研究,取得了一些进展,同时也存在一些问题。关于未来的工作展望,希望紧紧围绕沙漠化过程与气候变化和人类活动作用这一点从以下方面展开工作:

1、通过提高数据的质量,特别是用同一个遥感数据源来进行沙漠化的定量监测与实际 NPP 的计算,例如选取目前应用较为广泛的 EOS-MODIS 数据,把研究的时间范围重点放在 2000 年以后,将本研究的方法推广到更大的研究区上。系统分析提高数据质量的情况下本研究方法在更大尺度上的适用情况。

2、由于本研究中气候变化和人类活动的相对作用特指其综合作用,因此,在未来的研究工作中希望在建立沙漠化过程中气候变化和人类活动具体因子作用评价方法的基础上,将沙漠化过程中气候变化和人类活动综合作用与其具体因子作用的评价方法进行有机的结合,深入地揭示沙漠化过程与其驱动力作用的规律。

3、在完善研究方法的基础上,开展沙漠化过程及其驱动力作用的系统动力学研究,以沙漠化定量监测和气候变化和人类活动作用评价方法为核心,建立沙漠化动态过程的系统动力学模型,结合不同情景下未来气候变化和人类活动数据,开展沙漠化的动态预测,为防沙治沙的战略工作开展提供理论上的依据和技术上的支撑。

## 参考文献

1. Allen R G, Pereira L S, Raes D, et al. Crop evapotranspiration – Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and drainage paper 56. FAO – Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, 1998
2. Anyamba A, Tucker C J. Analysis of Sahelian vegetation dynamics using NOAA-AVHRR NDVI data from 1981-2003[J]. Journal of Arid Environments, 2005, 63: 596-614
3. Asner G P, Heidebrecht K B. Desertification alters regional ecosystem-climate interactions[J]. Global Change Biology, 2005, 11:182-194
4. Bailey R G. Explanatory supplement to Ecoregions Map of the Continents[J]. Environmental Conservation, 1989, 16: 307-309
5. Barnes E M, Sudduth K A, Hummel J W, et al. Remote- and ground-based sensor techniques to map soil properties[J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 2003, 69(6): 619-630
6. Ben-Dor E, Inbar Y, Chen Y. The reflectance spectra of organic matter in the visible near-infrared and short wave infrared region (400-2500nm) during a controlled decomposition process[J]. Remote Sensing of Environment, 1997, 61: 1-15
7. Bergkamp G. A hierarchical approach for desertification assessment[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 1995, 37(1): 59-78
8. Carly G, Bertrand B. Moderate sheep grazing in semiarid shrubland alters small-scale soil surface structure and patch properties[J]. Catena, 2006, 65: 285-291
9. Charney J G, Quirk W J, Chow S, et al. A comparative study of the effects of a albedo change on drought semi-arid regions[J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 1977, 34: 1366-1385
10. Charney J G, Stone P H. Drought in the Sahara: a biogeophysical feedback mechanism[J]. Science, 1975, 187: 434-435
11. Chavez P S Jr. An improved dark-object subtraction technique for atmospheric scattering correction of Multispectral data[J]. Remote Sensing of Environment, 1988, 24: 459-479
12. Chavez P S Jr. Image-based atmospheric corrections – revisited and improved[J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1996, 62: 1025-1036
13. Chen F, Kissel D E, West L T, et al. Field scale mapping of surface soil clay concentration[J]. Precision Agriculture, 2004, 5: 7-26
14. Chen Y X, Lee G, Lee P, et al. Model analysis of grazing effect on above-ground biomass and above-ground net primary production of a Mongolian grassland ecosystem[J]. Journal of Hydrology, 2007, 333: 155-164

15. Ci L J, Yang X H, Chen Z X. The potential impacts of climate change scenarios on desertification in China[J]. *Earth Science Frontiers*, 2002, 9(2): 287-294
16. Daniel W O, Peter H T, Karen F B. Human appropriation of net primary production (HANPP) in Nova Scotia[J]. *Canada Regional Environment Change*, 2007, 7: 1-14
17. David M, Judith L, Timothy W, et al. Desertification evaluated using an integrated environmental assessment model[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 1997, 48: 139-156
18. Dickinson R E, Henderson-Sellers A, Kennedy P J. Biosphere-Atmosphere Transfer Scheme (BATS) Version 1e as Coupled to the NCAR Community Climate Model, 1993
19. Dregne H. Desertification-present and future[J]. *International Journal for Development Technology*, 1984, 2: 255-259
20. Driedger H L, Gatchpole A J W. Estimation of solar radiation receipt from sunshine duration at Winnipeg[J]. *Meteorological magazine*, 1970, 99: 285-291
21. Dunkerley D. Hydrologic effects of dryland shrubs: defining the spatial extent of modified soil water uptake rates at an Australian desert site[J]. *Journal of Arid Environments*, 2000, 45: 159-172
22. Ellis J E, Price K, Yu F, et al. Dimensions of desertification in the drylands of Northern China. In: Reynolds, J.F., Smith, D.M.S. (Eds.), *Global desertification: Do humans causes deserts?*[M]. Berlin: Dahlem University Press, 2002: 167-180
23. Evans J, Geerken R. Discrimination between climate and human-induced dryland degradation[J]. *Journal of Arid Environments*, 2004, 57: 535-554
24. Fang S B, Xu D Y, Zhang X S. Analysis of desertification processes and its driving Mechanism in Mu Su region, China[C]. In: Wu H Y, Zhu Q, eds. *Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering*, 2006 Oct 28-29, Wuhan. International Society for Optical Engineering, 2006: 476-483
25. FAO, UNEP. Provisional methodology for desertification assessment and mapping(Draft). 1984
26. Field C B, Behrenfeld M J, Randerson J T, et al. Primary production of the biosphere: integrating terrestrial and oceanic components[J]. *Science*, 1998, 281: 237-240
27. Field C B, Randerson J T, Malmstrom C M. Global net primary production: combining ecology and remote sensing[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1995, 51(1): 74-88
28. Friedl M A, Brodley C E, Strahler A H, et al. Maxing land cover classification accuracies produced by decision trees at continental to global scales[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1999, 37: 969-977
29. Friedl M A, Melver D K, Brodley C E. Integration of domain knowledge in the form of ancillary map into supervised classification of remote sensing data[C]. *Proceedings of the International*

- Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2002, 2: 1038-1040
30. Friedl M A, Melver D K, Hodges J C, et al. Global land cover mapping from MODIS: Algorithms and early results[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 83: 287-302
  31. Geerken R, Ilaiwi M. Assessment of rangeland degradation and development of a strategy for rehabilitation[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 90: 490-504
  32. Golodets C, Boeken B. Moderate sheep grazing in semiarid shrubland alters small-scale soil surface structure and patch properties[J]. *Catena*, 2006, 65: 285-291
  33. Gomes L, Arrue J L, Lopez M V, et al. Wind erosion in a semiarid area of Spain: the WELSONS project[J]. *Catena*, 2003, 52: 235-256
  34. Greeley R, Iversen J D. Wind as a Geological Process: on Earth, Mars, Venus and Titan[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1985
  35. Gressey G B. Ordos desert of Inner Mongolia[J]. *Journal of Science Laboratory*, 1993
  36. Ha S. The tendency of precipitation variation in the past nine decades in Bashang Highland[J]. *Journal of Desert Research*, 1994, 14 (2): 47-52
  37. Haberl H, Erb K H, Krausmann F, et al. Quantifying and mapping the human appropriation of net primary production in earth's terrestrial ecosystems[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2007, 104: 12942-12947
  38. Haberl H, Krausmann F, Erb K H, et al. Human Appropriation of Net Primary Production[J]. *Science*, 2002, 296: 1968-1969
  39. Hanafi A, Jauffret S. Are long-term vegetation dynamics useful in monitoring and assessing desertification processes in the arid steppe, southern Tunisia[J]. *Journal of Arid Environments*, 2008, 4: 557-572
  40. Hermann S M, Anyamba A, Tucker C J. Recent trends in vegetation dynamics in the African Sahel and their relationship to climate[J]. *Global Environment Change Part A*, 2005, 15(4): 394-404
  41. Huang D, Wang K, Wu W L. Dynamics of soil physical and chemical properties and vegetation succession characteristics during grassland desertification under sheep grazing in an agro-pastoral transition zone in Northern China[J]. *Journal of Arid Environments*, 2007, 70: 120-136
  42. Huenneke L F, Anderson J P, Remmenga M, et al. Desertification alters patterns of above ground net primary production in Chihuahuan ecosystems[J]. *Global Change Biology*, 2002, 8: 247-264
  43. Hulme M, Kelly M. Exploring the links between desertification and climate change[J]. *Environment*, 1994, 35(6): 5-11, 39-45
  44. Jafari R, Lewis M M, Ostendorf B. An image-based diversity index for assessing land degradation in an arid environment in South Australia[J]. *Journal of Arid Environments*, 2008, 72: 1282-1293

45. Jensen M E, Burman R D, Allen R G. Evapotranspiration and irrigation requirements[M]. ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice No. 70. New York: American Society of Civil Engineer, 1990
46. Jensen M E, Haise H R. Estimating evapotranspiration from solar radiation[J]. Journal of Irrigation and Drainage Division, ASCE, 1963, 89(IR4): 15-41
47. Jordan D N N, Zitzer S F, Hendrey G R, et al. Biotic, abiotic and performance aspects of the Nevada Desert free-air CO<sub>2</sub> enrichment (FACE) facility[J]. Global Change Biology, 1999, 5(6): 659-668
48. Katrina H J, David N. Sensitivity of Tropical Land Climate to Leaf Area Index: Role of Surface Conductance versus Albedo[J]. Journal of Climate, 2004, 4: 1459-1473
49. Le Hou  rou H N. Climate change, drought and desertification[J]. Journal of Arid Environments. 1996, 34(2): 133-185
50. Li S G, Harazono Y, Oikawa T, et al. Grassland desertification by grazing and the resulting micrometeorological changes in Inner Mongolia[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2000, 102: 125-137
51. Li S, Zheng Y, Luo P, et al. Desertification in western hainan island, China (1959 to 2003)[J]. Land Degradation & Development, 2007, 18(5): 473-485
52. Li X R, Jia X H, Dong G R. Influence of desertification on vegetation pattern variations in the cold semi-arid grasslands of Qinghai-Tibet Plateau, North-west China[J]. Journal of Arid Environments, 2006, 64: 505-522
53. Liang S L, Shuey C J, Russ A L, et al. Narrowband to broadband conversions of land surface albedo II Validation[J]. Remote Sensing of Environment, 2002, 84: 25-41
54. Liang S L. Narrowband to broadband conversions of land surface albedo I Algorithms[J]. Remote Sensing of Environment, 2000, 76: 213-238
55. Lira J. A Model of Desertification Process in a Semi-arid Environment Employing Multi-spectral Images. In Progress in Pattern Recognition, Image Analysis and Application, 1<sup>st</sup>Ed.; Sanfeliu, A., Martinez-Trinidad, J.F., Carrasco-Ochoa, J.A., Eds.; Berlin Heidelberg: Springer, 2004, 3287: 249-258
56. Liu A X, Wang J, Liu Z J, et al. Monitoring desertification in arid and semi-arid areas of China with NOAA-AVHRR and MODIS data[C]. Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2005. IGARSS apos; 05. Proceedings. 2005 IEEE international., 2005, 4, 2362-2364
57. Livingstone I, Warren A. Aeolian Geomorphology — An Introduction[M]. Lodon: Addison Wesley Longman, 1996

58. Lunkeit F, Bottinger M, Fraedrich K, et al. Planet Simulator Reference Manual Version 15.0, 2007
59. Ma Y H, Fan S Y, Zhou L H, et al. The temporal of driving factors during the couse of land desertification in arid region of North China: the case of Minqin county[J]. Environment Geology, 2007, 51: 999-1008
60. Martinez-Lozano J A, Tena F, Onrubia J E, et al. The historical evolution of the Angstrom formula and its modifications: review and bibliography[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1984, 33: 109-128
61. McIver D K, Friedl M A. Using prior probabilities in decision-tree classification of remotely sensed data[J]. Remote Sensing of Environment, 2002, 81: 253-261
62. Melillo J M, McGuire A D, Kicklighter D W, et al. Global climate change and terrestrial net primary production[J]. Nature, 1993, 363(6426): 234-240
63. Mensching H, Ibrahim F. Note toward the desertifications and geographical analysis of the problem of desertification in and around arid lands[J]. Scientific Reviews on Arid Zone Research, 1985, 3: 105-114
64. Monteith J L, Moss C J. Climate and the Efficiency of Crop Production in Britain and Discussion[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series B, Biological Sciences (1934-1990), 1977, 281(980): 277-294
65. Monteith J L. Solar radiation and productivity in tropical ecosystems[J]. Journal of Applied Ecology, 1972, 9(3): 747-766
66. Mouat D A, Hutchinson C F. Desertification in developed countries[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 1995, 37: 1-137 (special issue)
67. Mouat D, Lancaster J, Wade T, et al. Desertification evaluated using an integrated environmental assessment model[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 1997, 48(2): 139-156
68. Muchoney D, Borak J, Borak H C, et al. Application of the MODIS global supervised classification to vegetation and land cover mapping of central America[J]. International Journal of Remote Sensing, 2000, 21: 1115-1138
69. Musick H B. Temporal change of Landsat MSS albedo estimates in arid rangeland[J]. Remote Sensing of Envrionment, 1986, 20, 107-120
70. Nezlin N P, Kostianoy A G, Li B L. Inter-annual variability and interaction of remote-sensed vegetation index and atmospheric precipitation in the Aral Sea region[J]. Journal of Arid Environments, 2005, 62:677-700
71. Nicholson S E, Tucker C J, Ba M B. Desertification, drought, and surface vegetation: an example from the west African Sahel[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 1998, 79: 815-829

72. Ojima D S, Dirks B O M, Glenn E P, et al. Assessment of C budget for grassland and drylands of world [J]. *Water Air & Soil Pollution*, 1993, 70: 643-657
73. Onate J J, Peco B. Policy impact on desertification: stakeholders perception in southeast Spain[J]. *Land Use Policy*, 2005, 22: 103-114
74. Palacios-Orueta A, Pinzon J E, Ustin S L, et al. Remote Sensing of Soil Properties in the Monica Mountains: II. Hierarchical Foreground and Background Analysis[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1999, 68: 138-151
75. Palacios-Orueta A, Ustin S L. Remote Sensing of Soil Properties in the Monica Mountains I. Spectral Analysis[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1998, 65: 170-183
76. Papendick R I, Campbell G S. Theory and measurement of water potential[J]. *Water Potential Relations in Soil Microbiology*, 1980, 9: 1-21
77. Pinet P C, Kaufmann C, Hill J. Imaging spectroscopy of changing Earth's surface: a major step toward the quantitative monitoring of land degradation and desertification[J]. *C.R.Geosciences*, 2006, 338: 1042-1048
78. Potter C S, Randerson J T, Field C B, et al. Terrestrial ecosystem production: a process model based on global satellite and surface data[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 1993, 7(4): 811-841
79. Potter C. Predicting climate change effects on vegetation, soil thermal dynamics, and carbon cycling in ecosystems of interior Alaska[J]. *Ecological Model*, 2004, 175(1): 1-24
80. Prentice I C, Cramer W, Harrison S P, et al. A global biome model based on plant physiology and dominance, soil properties and climate[J]. *Journal of Biogeography*, 1992, 19: 117-134
81. Price S D. Spatial and Temporal Scales for Detection of Desertification. *Global Desertification: Do Humans Cause Deserts?*[M] Edited by Reynolds J F and Stafford Smith D M. Berlin: Dahlem University Press, 2002: 23-40
82. Prince S D, Brown de Colstoun E, Kravitz L L. Evidence from rain-use efficiency dose not indicate extensive Sahelian desertification[J]. *Global Change Biology*, 1998, 4: 359-374
83. Pye K. *Aeolian Dust and Dust Deposits*[M]. London: Academic Press, 1987
84. Qiu G, Zhao Y, Wang S. The impacts of climate change on the interlock area of farming-pastoral region and its climatic potential productivity in northern China[J]. *Arid Zone Research*, 2001, 18: 23-28
85. Qiu P H, Xu S J, Xie G Z, et al. Analysis of the ecological vulnerability of the western Hainan island based on its landscape pattern and ecosystem sensitivity[J]. *Acta Ecology Sinica*, 2007, 27(4): 1257-1264
86. Quinlan J R. *C4.5: Programs for machine learning*[M]. San Fransisco: Morgan Kaufmann

- Publishers, 1993
87. Quinlan J R. Improved use of continuous attributes in c 4.5[J]. *Journal of Artificial Intelligence Research*, 1996, 4: 77-90
  88. Quinlan J R. Introduction of decision trees[J]. *Machine Learning*, 1986, 1: 81-106
  89. Rasmus F, Thomas Theis N, Simon S. Evaluation of AVHRR PAL and GIMMS 10-day composite NDVI time series products using SPOT-4 vegetation data for the African continent[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2006, 27: 2719-2733
  90. Rasmussen K, Fog B, Madsen J E. Desertification in reverse? Observations from northern Burkina Faso[J]. *Global Environmental Change*, 2001, 11: 271-282
  91. Reining P. Handbook on Desertification Indicators. American Association for the Advancement of Science, Washington, 1978, 114
  92. Rietveld M R. A new method for estimating the regression coefficients in the formula relation solar radiation to sunshine[J]. *Agricultural Meteorology*, 1978, 19(3): 243-252
  93. Rosenfeld D, Rudich Y, Lahav R. Desert dust suppressing precipitation: a possible desertification feedback loop[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2001, 98: 5975-5980
  94. Rubio J L, Bochet E. Desertification indicators as diagnosis criteria for desertification risk assessment in Europe[J]. *Journal of Arid Environments* 1998, 39(2): 113-120
  95. Runnstrom M C. Is northern China winning the battle against desertification? Satellite remote sensing as a tool to study biomass trend on the Ordos Plateau in semiarid China[J]. *Ambio*, 2000, 29: 468-476
  96. Saxton K E, Rawls W J, Romberger J S, et al. Estimating generalized soil-water characteristics from texture[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1986, 50(4): 10-31
  97. Shukla J, Mintz Y. Influence of Land-Surface Evapotranspiration of the Earth's Climate[J]. *Science*, 1982, 215:1498-1500
  98. Sivakumar M V K. Interactions between climate and desertification[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2007, 142: 143-155
  99. Skaggs T H, Arya L M, Shouse P J, et al. Estimating particle-size distribution from limited soil texture data[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2001, 65(4): 1038-1044
  100. Smith S D, Huxman T E, Zitzer S F, et al. Elevated CO<sub>2</sub> increases productivity and invasive species success in an arid ecosystem[J]. *Nature*, 2000, 408: 79-82
  101. Sperry J S, Hacke U G. Desert shrub water relations with respect to soil characteristics and plantfunctional type[J]. *Functional Ecology*, 2002, 16: 367-378
  102. Stuart R, Shannon M S, Nathan J M. Human Appropriation of Photosynthesis Products[J]. *Science*,

2001, 294: 2549

103. Su Y Z, Zhao W Z, Su P X, et al. Ecological effects of desertification control and desertified land reclamation in an oasis-desert ecotone in an arid region: A case study in Hexi Corridor, northwest China[J]. *Ecological Engineering*, 2007, 29: 117-124
104. Sud Y C, Molod A. A GCM simulation study of the influence of Saharan evapotranspiration and surface-albedo anomalies on July circulation and rainfall[J]. *Monthly weather review*, 1988, 116: 2388-2400
105. Sun D F, Dawson R, Li H, et al. A landscape connectivity index for assessing desertification: a case study of Minqin County, China[J]. *Landscape Ecology*, 2007, 22: 531-543
106. Sun D F, Dawson R, Li H, et al. Modeling desertification change in minqin county, china[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2005, 108: 169-188
107. Tanser F C, Palmer A R. The application of a remotely-sensed diversity index to monitor degradation patterns in a semi-arid, heterogeneous, South African landscape [J]. *Journal of Arid Environments*, 1999, 43: 477-484
108. Tao F L, Yokozawa M, Zhao Z, et al. Remote sensing of crop production in China by production efficiency models: Models comparisons estimates and uncertainties[J]. *Ecological Modelling*, 2005, 183(4): 385-396
109. Thomas D S G, Leason H C. Dune activity response to climate variability in the southwest Kalahari[J]. *Geomorphology*, 2005, 64: 117-132
110. Thomas W, Karl-Heinz E, Niels B S, et al. Linking pattern and process in cultural landscape: an empirical study based on spatially explicit indicators[J]. *Land Use Policy*, 2004, 21: 289-306
111. Tripathy G K, Ghosh T K, Shah S D. Monitoring of desertification process in Karnataka State of India using multi-temporal remote sensing and ancillary information using GIS[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1996, 17(12): 2243-2257
112. Tsoar H. Sand dunes mobility and stability in relation to climate[J]. *Physica A*, 2005, 357: 50-56
113. Tucker C J, Dregne H E, Newcomb W W. Expansion and contraction of the Sahara Desert from 1980 to 1990[J]. *Science*, 1991, 253: 299-301
114. Tucker C J, Pinzon J E, Brown M E, et al. An extended AVHRR 8 km NDVI data set compatible with MODIS and SPOT vegetation NDVI data[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2005, 26: 4485-4498
115. UN. Global alarm: Dust and sand storms from the world's drylands. United Nations, 2002, 345
116. UN. United Nations Convention to Combat Desertification in Those Countries Experiencing Serious Drought and/or Desertification Particularly in Africa. 1994

117. UNCCD (United Nations Convention to Combat Desertification). United Nations Publication, 1994
118. UNEP. Status of Desertification and Implementation of the United Nations Plan of Action to Combat Desertification. Draft Report. UNEP. Nairobi, Kenya. 1991
119. UNEP. UNEP governing council decision-desertification. Desertification Control Bulletin, 1991, 20: 3-5
120. Verburg P H, Chen Y Q. Multiscale Characterization of Land-Use Patterns in China[J]. Ecosystems, 2000, 3: 369-385
121. Verdoodt A, Ranst E V. Environmental assessment tools for multi-scale land resources information systems[J]. Agriculture Ecosystems & Environment, 2006, 114: 170-184
122. Veron S R, Paruelo J M, Oesterheld M. Assessing desertification[J]. Journal of Arid Environments, 2006, 66: 751-763
123. Walko R L, Tremback C J. ATMET Technical Note: Modifications for the Transition, 2005
124. Walter I A, Allen R G, Elliott R, et al. ASCE's Standardized Reference Evapotranspiration Equation[C]. Proceedings of the 4th National Irrigation Symposium, 2000, Phoenix, AZ: ASAE
125. Wang X M, Chen H F, Dong Z B. The relative role of climatic and human factors in desertification in semiarid China[J]. Global Environment Change, 2006, 16: 48-57
126. Wang X M, Chen F H, Hasi E D, et al. Desertification in China: an assessment[J]. Earth-Science Reviews, 2008, 88: 188-206
127. Wang X M, Eerdun H, Zhou Z J, et al. Significance of variations in the windy energy environment over the past 50 years with respect to dust activity and desertification in arid and semiarid northern China[J]. Geomorphology, 2007, 86: 252-266
128. Wang X, Chen F H, Dong Z, et al. Evolution of the southern mu us desert in north china over the past 50 years: an analysis using proxies of human activity and climate parameters[J]. Land Degradation and Development, 2005, 16: 351-366
129. Wessels K J, Prince S D, Frost P E, et al. Assessing the effects of human-induced land degradation in the former homelands of northern South Africa with a 1 km AVHRR NDVI time-series[J]. Remote Sensing of Environment, 2004, 91: 47-67
130. Wessels K J, Prince S D, Malherbe J, et al. Can human-induced land degradation be distinguished from the effects of rainfall variability? a case study in South Africa[J]. Journal of Arid Environments, 2007, 68: 271-297
131. William H S, James F R, Gary L C, et al. Biological Feedbacks in Global Desertification[J]. Science, 1990, 247: 1043-1048
132. Winstenley D. Rainfall patterns and general atmospheric circulation. Nature, 1973, 245: 190-194

133. Wu B, Ci L J. Causes and development stages of desertification in the Mu Us Sandland[J]. Chinese Science Bulletin, 1998, 43: 2437-2440
134. Wu B, Ci L J. Landscape change and desertification development in the Mu Us Sandland, Northern China[J]. Journal of Arid Environments, 2002, 50: 429-444
135. Wu B, Ci L J. Landscape change and desertification development in the Mu Us sandland, Northern China[J]. Journal of Arid Environments, 2002, 50: 429-444
136. Yang X, Zhang K, Jia B, et al. Desertification assessment in China: an overview[J]. Journal of Arid Environments, 2005, 63: 517-531
137. Zeidler J, Hanrahan S, Scholes M, et al. Land-use intensity affects range condition in arid to semi-arid Namibia[J]. Journal of Arid Environments, 2002, 52: 389-403
138. Zeng N, Neelin J D, Lau K M, et al. Enhancement of interdecadal climate variability in the Sahel by vegetation interaction[J]. Science, 1999, 286: 1537-1540
139. Zhao H L, Zhao X Y, Zhou R L, et al. Desertification processes due to heavy grazing in sandy rangeland, Inner Mongolia[J]. Journal of Arid Environments, 2005, 62: 309-319
140. Zhao H L, Zhou R L, Zhang T H, et al. Effects of desertification on soil and crop growth properties in Horqin sandy cropland of Inner Mongolia, north China[J]. Soil & Tillage Research, 2006, 87: 175-185
141. Zheng Y R, Xie Z X, Robert C. Did climate drive ecosystem change and induce desertification in Otindag sandy land, China over the past 40 years?[J]. Journal of Arid Environments, 2006, 64: 523-541
142. Zika M, Erb K. Net Primary Production lossess due to human-induced desertification[C]. Second International Conference on Earth System Modelling (ICESM), 2007, Vol. 1, ICESM2007-A-00260
143. Zobeck, T M, Fryrear D W. Chemical and physical characteristics of windblown sediment II: chemical characteristics and nutrient discharge[J]. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, 1986, 29: 1032-1036
144. 白美兰, 郝润全, 邸瑞琦, 等. 气候变化对浑善达克沙地沙漠化影响的评估[J]. 气候与环境研究, 2006, 11(2): 215-220
145. 白美兰, 郝润全. 气候变化对浑善达克沙地生态环境演变的影响[J]. 中国沙漠, 2006, 26(3): 484-488
146. 包慧娟, 姚云峰, 张学林, 等. 科尔沁沙地景观格局变化的研究[J]. 干旱区资源与环境, 2003, 17(2): 83-88
147. 保家有, 李晓松, 吴波. 基于沙地植被指数的荒漠化评价方法[J]. 东北林业大学学报, 2008,

- 36(001): 69-72
148. 蔡福, 于贵瑞, 祝青林, 等. 气象要素空间化方法精度的比较研究[J]. 资源科学, 2005, 27(5): 173-179
  149. 蔡体久, 琚存勇. 鄂尔多斯草地荒漠化程度定量评价[J]. 北京林业大学学报, 2007, 29(增刊 2): 227-231
  150. 常学礼, 高玉葆, 何兴东, 等. 科尔沁地区流动沙地景观破碎化与沙漠化过程分析[J]. 南开大学学报(自然科学版), 2006, 39(1): 84-89
  151. 常学礼, 鲁春霞, 高玉葆, 等. 科尔沁沙地景观斑块结构对沙漠化过程影响分析[J]. 生态学报, 2004, 24(6): 1237-1242
  152. 常学礼, 鲁春霞, 高玉葆, 等. 科尔沁沙地流动沙丘斑块动态与沙漠化关系[J]. 自然灾害学报, 2003, 12(3): 54-60
  153. 常学礼, 郭建国. 科尔沁沙地景观各具特征分析[J]. 生态学报, 1998, 18(3): 225-232
  154. 常学礼, 于云江, 曹艳英, 等. 科尔沁沙地景观结构特征对沙漠化过程的生态影响[J]. 应用生态学报, 2005, 16(1): 59-64
  155. 常学礼, 于云江, 曹艳英. 半干旱地区沙地景观破碎化趋势分析——以科尔沁沙地为例[J]. 干旱区研究, 2004, 21(1): 21-26
  156. 常学礼, 赵爱芬, 李胜功. 景观格局在沙漠化研究中的作用[J]. 中国沙漠, 1998, 18(3): 210-214
  157. 常学礼. 坝上地区沙漠化过程对景观格局影响的研究[J]. 中国沙漠, 1996, 9: 222-227
  158. 常学礼. 景观间隙度指数在沙漠化研究中的应用[J]. 中国沙漠, 1997, 17(4): 351-354
  159. 陈广庭. 土地荒漠化[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002: 23
  160. 陈隆勋, 刘骥平, 周秀骥, 等. 青藏高原隆起及海陆分布变化对亚洲大陆气候的影响[J]. 第四纪研究, 1999, 4: 314-328
  161. 慈龙骏, 刘玉平. 人口增长对荒漠化的驱动作用[J]. 干旱区资源与环境, 2000, 3, 14(1): 28-33
  162. 慈龙骏, 吴波. 中国荒漠化气候类型划分与潜在发生范围的确定[J]. 中国沙漠, 1997, 17(2): 107-111
  163. 慈龙骏, 杨晓辉, 陈仲新. 未来气候变化对中国荒漠化的潜在影响[J]. 地学前沿, 2002, 9(2): 287-294
  164. 慈龙骏, 杨晓辉, 张新时. 防治荒漠化的“三圈”生态-生产范式机理及其功能[J]. 生态学报, 2007, 27(4): 1450-1460
  165. 慈龙骏, 杨晓辉. 荒漠化与气候变化间反馈机制研究进展[J]. 生态学报, 2004, 24(4): 755-760
  166. 邓辉, 舒时光, 宋豫秦, 等. 明代以来毛乌素沙地流沙分布南界的变化[J]. 科学通报, 2007, 52(21): 2556-2563
  167. 丁国栋. 荒漠化评价指标体系的研究-以毛乌素沙区为例[D]. 北京: 北京林业大学, 1998

168. 丁国栋, 赵延宁, 范建友, 等. 荒漠化评价指标体系研究现状述评[J]. 北京林业大学学报, 2004, 26(1): 92-96
169. 董朝阳, 樊胜岳, 钟方雷, 等. 中国沙漠化过程中人文作用研究进展[J]. 中国沙漠, 2006, 26(4): 657-653
170. 董光荣. 中国西部环境演变评估[A]. 《中国西部环境特征及其演变》(第一卷) [C]. 北京: 科学出版社, 2002: 107
171. 董光荣, 高尚玉, 金炯, 等. 青海共和盆地土地沙漠化与防治途径[M]. 北京: 科学出版, 1993
172. 董光荣, 高尚玉, 金炯, 等. 青海共和盆地土地沙漠化与防治途径[M]. 北京: 科学出版社, 1993: 142-165
173. 董光荣, 高尚玉, 金炯, 等. 晚更新世初以来我国陆生生态系统的沙漠化过程及其成因[A].//: 刘东生主编. 黄土. 第四纪地质. 全球变化(第二集) [C]. 北京: 科学出版社, 1990, 91-101
174. 董光荣, 靳鹤龄, 陈惠忠, 等. 中国北方半干旱和半湿润地区沙漠化的成因[J]. 第四纪研究, 1998, 2: 136-143
175. 董玉祥, 陈克龙. 中国沙漠化程度判定与分区初步研究[J]. 中国沙漠, 1995, 15(2): 170-174
176. 董玉祥, 刘毅华. 国外沙漠化监测评价指标与分级标准[J]. 干旱环境监测, 1992, 6(4): 234-241
177. 董玉祥, 刘玉璋, 刘毅华. 沙漠化若干问题研究[M]. 西安: 西安地图出版社, 1995: 1-271
178. 董玉祥. 人文因子在荒漠化中的作用[J]. 中国沙漠, 1992, 12(1): 16-26
179. 董玉祥. 土地沙漠化影响因子的定量分析[J]. 干旱区研究, 1989, 4: 34-41
180. 董玉祥. 我国半干旱地区现代沙漠化驱动因素的定量辨识[J]. 中国沙漠, 2001, 21(4): 412-416
181. 杜明义. 决策树方法在土地荒漠化分类中的应用研究[J]. 测绘科学, 2006, 31(2): 81-82
182. 段怡春, 陈建平, 厉青, 等. 沙漠化: 从圈层耦合到全球变化[J]. 地学前沿, 2002, 9(2): 277-283
183. 方精云, 柯金虎, 唐志尧, 等. 生物生产力的“4P”概念、估算及其相互关系[J]. 植物生态学报, 2001, 25(4): 414-419
184. 方精云, 徐嵩龄. 我国森林植被的生物量和净生产量[J]. 生态学报, 1996, 16(005): 497-508
185. 方修琦. 陕北鄂尔多斯地区降水变化与沙漠化[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 1987, 1: 90-95
186. 封志明, 杨艳超, 丁小强, 等. 甘肃地区参考作物蒸散量时空变化研究[J]. 农业工程学报, 2004, 20(1): 99-103
187. 傅伯杰, 牛栋, 赵士洞. 全球变化与陆地生态系统研究: 回顾与展望[J]. 地球科学进展, 2005, 20(5): 556-560
188. 高尚武, 王葆芳, 朱灵益, 等. 中国沙质荒漠化土地监测评价指标体系[J]. 林业科学, 1998, 34(2): 1-10
189. 高尚武, 王君厚. 中国沙质荒漠化土地监测评价指标体系[J]. 1998, 34(2): 1-10

190. 韩海涛, 祝小妮. 气候变化与人类活动对玛曲地区生态环境的影响[J]. 中国沙漠, 2007, 27(4): 608-613
191. 韩红, 任国玉, 王文, 等. 黄土高原地区太阳辐射时空演变特征[J]. 气候与环境研究, 2008, 13(1): 61-66
192. 郝成元, 吴绍洪, 杨勤业. 毛乌素地区沙漠化与土地利用研究[J]. 中国沙漠, 2005, 25(1): 33-38
193. 郝兴明, 陈亚宁, 李卫红. 塔里木河流域近 50 年来生态环境变化的驱动力分析[J]. 地理学报, 2006, 61(3): 262-272
194. 贺军亮, 蒋建军, 周生路, 等. 土壤有机质含量的高光谱特性及其反演[J]. 中国农业科学, 2007, 40(3): 638-643
195. 侯学煜. 1:1 000 000 中国植被图集[M]. 北京: 科学出版社, 2001
196. 胡孟春. 科尔沁土地沙漠化分类定量指标初步研究[J]. 中国沙漠, 1991, 11(3): 57-60
197. 胡顺军, 潘渝, 康绍忠, 等. Penam-Monteith 与 Panman 修正式计算塔里木盆地参考作物潜在蒸发量比较[J]. 农业工程学报, 2005, 21(6): 30-35
198. 胡霞, 刘连友, 严平, 等. 不同地表状况对土壤风蚀的影像-以内蒙古太仆寺旗为例[J]. 水土保持研究, 2006, 13(4): 116-119
199. 黄秉维, 郑度, 赵名茶, 等. 现代自然地理[M]. 北京: 科学出版社, 1999
200. 黄秉维. 自然条件与作物生产: 温度. 见: 黄秉维文集编辑小组. 自然地理综合工作六十年-黄秉维文集[M]. 北京: 科学出版社, 1993: 197-212
201. 黄金庭, 王文科, 何渊, 等. 鄂尔多斯沙漠高原湖淖群的形成演化及生态功能探讨[J]. 资源科学, 2006, 28(2): 140-144
202. 霍艾迪, 张广军, 武苏里, 等. 利用 MODIS-NDVI 进行沙化土地评价研究—以陕西省北部地区为例[J]. 干旱地区农业研究, 2008, 26(2): 154-158
203. 霍艾迪. 基于 MODIS 数据的沙漠化遥感监测研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2008
204. 贾宝全, 慈龙骏, 高志刚, 等. 鄂尔多斯高原土地沙化过程中自然与人为因素的定量分析[J]. 林业科学, 2003, 39(6): 15-20
205. 贾宝全, 慈龙骏. 绿洲荒漠化及其评价指标体系的初步探讨[J]. 干旱区研究, 2001, 18(2): 19-24
206. 贾科利, 常庆瑞. 陕北农牧交错带土地沙漠化景观格局动态变化[J]. 应用生态学报, 2007, 18(9): 2045-2049
207. 蒋德明, 曹成有, 押田敏雄, 等. 科尔沁沙地沙漠化过程中植被与土壤退化的特征研究[J]. 干旱区资源与环境, 2008, 22(10): 156-161
208. 靳虎甲, 王继和, 李毅, 等. 腾格里沙漠南缘沙漠化逆转过程中的土壤化学性质变化特征[J]. 水土保持学报, 2008, 22(5): 119-124

209. 康相武, 刘雪华, 张爽, 等. 北京西南地区区域生态安全评价[J]. 应用生态学报, 2007, 18(2): 2846-2852
210. 康相武, 吴绍洪, 尹云鹤, 等. 华北农牧交错带土地沙漠化成因与土地利用调整对策[J]. 农业工程学报, 2005, 21(8): 45-51
211. 李宝林, 周成虎. 东北平原西部沙地的气候变异与土地荒漠化[J]. 自然资源学报, 2001, 16(3): 234-239
212. 李宝林, 周成虎. 东北平原西部沙地沙质荒漠化的遥感监测研究[J]. 遥感学报, 2002, 6(2): 117-122
213. 李宝林. 松嫩沙地沙漠化的气候因素与沙地发育特征[J]. 中国沙漠, 1996, 9: 253-258
214. 李博. 内蒙古鄂尔多斯高原自然资源与环境研究[M]. 北京: 科学出版社, 1990
215. 李双成, 蔡运龙. 地理尺度转换若干问题的初步探讨[J]. 地理研究, 2005, 24(1): 11-18
216. 李双成, 吴绍洪, 戴尔阜. 生态系统相应气候变化脆弱性的人工神经网络模型评价[J]. 生态学报, 2005, 25(3): 621-626
217. 李香云, 王立新, 章予舒, 等. 塔里木河下游绿色走廊土地荒漠化驱动因子贡献度研究——基于投影寻踪回归模型[J]. 干旱区资源与环境, 2004, 18(6): 44-49
218. 李香云, 王立新, 章予舒, 等. 西北干旱区土地荒漠化中人类活动作用及其指标选择[J]. 地理科学, 2004, 24(1): 68-75
219. 李香云, 杨君, 王立新. 干旱区荒漠化的人为驱动作用分析—以塔里木河流域为例[J]. 资源科学, 2004, 26(5): 30-37
220. 李玉环, 王静, 吕春燕, 等. 基于 TM/ETM+遥感数据的地面相对反射率反演[J]. 山东农业大学学报(自然科学版), 2005, 36(4): 545-551
221. 李振山, 贺丽敏, 王涛. 现代草地沙漠化中自然因素贡献率的确定方法[J]. 中国沙漠, 2006, 26(5): 687-692
222. 李振山, 王一谋. 沙漠化评价基本理论初探[J]. 中国沙漠, 1994, 14(2): 84-89
223. 李智佩, 岳乐平, 薛祥熙, 等. 毛乌素沙地东南边缘不同成因类型土地沙漠化的特征[J]. 地质通报, 2006, 25(5): 590-596
224. 廖顺宝, 李泽辉, 游松财. 气温数据栅格化的方法及其比较[J]. 资源科学, 2003, 25(6): 83-88
225. 廖顺宝, 李泽辉. 气温数据栅格化中的几个具体问题[J]. 气象科技, 2004, 32(5): 352-356
226. 林培松, 李森, 李保生, 等. 近 20a 来海南岛西部土地沙漠化与气候变化关联度研究[J]. 中国沙漠, 2005, 25(1): 27-32
227. 刘爱霞. 中国及中亚地区荒漠化遥感监测研究[D]. 北京: 中科院研究生院, 2004
228. 刘广峰, 吴波, 范文义, 等. 基于象元二分模型的沙漠化地区植被覆盖度提取—以毛乌素沙地为例[J]. 水土保持研究, 2007, 14(2): 268-271

229. 刘洪勇, 牛铮, 王长耀. 基于 MODIS 数据的决策树分类方法及应用[J]. 遥感学报, 2005, 9(4): 405-412
230. 刘立超, 王伟红, 宋耀选, 等. 沙漠化过程与气候变化相互作用的研究进展[J]. 中央民族大学学报(自然科学), 2004, 13(3): 197-202
231. 刘树林, 王涛. 浑善达克沙地地区土地沙漠化初步研究[J]. 水土保持学报, 2004, 18(5): 99-103
232. 龙晶. AVHRR 数据在中国荒漠化宏观监测中的应用研究[A]. 98 遥感进展[C]. 大连: 中国地理学会环境遥感分会, 1998
233. 卢艳丽, 白由路, 杨俐萍, 等. 基于高光谱的土壤有机质含量预测模型的建立与评价[J]. 中国农业科学, 2007, 40(9): 1989-1995
234. 吕一河, 傅伯杰. 生态学中的尺度及尺度转移方法[J]. 生态学报, 2001, 21(012): 2096-2105
235. 罗海江, 白海玲, 方修琦, 等. 农牧交错带近十五年生态环境变化评价——以鄂尔多斯地区为例[J]. 干旱区地理, 2007, 30(4): 474-481
236. 马金辉, 蔡迪花, 肖桐. 鄂尔多斯地区沙漠化遥感定量评价[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2007, 43(4): 1-6
237. 马明国, 王雪梅, 角媛梅, 等. 基于 RS 与 GIS 的干旱区绿洲景观格局变化研究——以金塔绿洲为例[J]. 中国沙漠, 2003, 23(1): 53-58
238. 马柱国. 我国北方干湿演变规律及其与区域增暖的可能联系[J]. 地球物理学报, 2005, 48(5): 1011-1018
239. 买买提沙吾提, 塔西甫拉提·特依拜, 丁建立, 等. 基于决策树分类法的塔克拉玛干南缘沙漠化信息提取方法研究[J]. 环境科学研究, 2008, 21(2): 109-114
240. 莫中国, 张百平, 程维明, 等. 青藏高原的主要环境效应[J]. 地理科学进展, 2004, 23(2): 88-96
241. 牛宝茹, 刘俊蓉, 王政伟. 干旱半干旱地区植被覆盖度遥感信息提取研究[J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2005, 30(1): 27-30
242. 牛俊杰, 赵淑贞. 关于历史时期鄂尔多斯高原沙漠化问题[J]. 中国沙漠, 2000, 20(1): 67-70
243. 牛文元. 可持续发展理论的基本认知[J]. 地理科学进展, 2008, 27(3): 1-6
244. 朴世龙, 方精云, 郭庆华. 利用 CASA 模型估算我国植被净第一性生产力[J]. 植物生态学报, 2001, 25(5): 603-608
245. 朴世龙, 方精云, 贺金生, 等. 中国草地植被生物量及其空间分布格局[J]. 植物生态学报, 2004, 28(004): 491-498
246. 钱正安, 吴统文, 宋敏红, 等. 干旱灾害和我国西北干旱气候的研究进展及问题[J]. 地球科学进展, 2001, 16(1): 28-36
247. 乔汉. 土地荒漠化的指标[J]. 世界沙漠研究, 1994, 4: 1-11
248. 任会利, 李萍, 申卫军, 等. 荒漠生态系统对大气 CO<sub>2</sub> 浓度升高响应的干湿年差异[J]. 热带亚

- 热带植物学报, 2006, 14(5): 389-396
249. 任振球. 全球变化[M]. 北京: 科学出版社, 1990: 193-214
250. 任志弼. 中国北方草地畜牧业动态监测研究. (二): 中国北方草地畜牧业动态监测数据集[M]. 呼和浩特: 内蒙古大学出版社, 1996
251. 史培军. 地理环境演变研究的理论与实践——鄂尔多斯地区晚第四纪以来地理环境演变研究[M]. 北京: 科学出版社, 1991
252. 宋乃平, 张凤荣. 鄂尔多斯农牧交错土地利用格局的演变与机理[J]. 地理学报, 2007, 62(12): 1299-1308
253. 苏志珠, 卢琦, 吴波, 等. 气候变化和人类活动对我国荒漠化的可能影响[J]. 中国沙漠, 2006, 26(3): 329-335
254. 孙丹峰. 民勤 1988~1997 年间土地荒漠化社会经济驱动力分析[J]. 农业工程学报, 2005, 21: 131-135
255. 孙继敏, 丁仲礼, 袁宝印. 2000a B.P 以来毛乌素地区的沙漠化问题[J]. 干旱区地理 1995, 18(1): 36-41
256. 孙建英, 李民赞, 郑立华, 等. 基于近红外光谱的北方潮土土壤参数实时分析[J]. 光谱学与光谱分析, 2006, 26(3): 426-429
257. 孙武. 近 50a 坝上后山地区人畜压力与沙漠化景观界线之间的互动关系[J]. 中国沙漠, 2000, 20(2): 154-158
258. 王博, 丁国栋, 顾小华, 等. 毛乌素沙地腹地植被恢复效果初步研究—以内蒙古乌审旗为例[J]. 水土保持研究, 2007, 14(3): 237-242
259. 王建, 董光荣, 李文君, 等. 利用遥感信息决策树方法分层提取荒漠化土地类型的研究探讨[J]. 中国沙漠, 2000, 20(3): 243-247
260. 王君厚, 孙司衡. 荒漠化类型划分及其数量化评价体系[J]. 干旱环境监测, 1996, 10(3): 129-137
261. 王涛, 陈广庭, 赵哈林, 等. 中国北方沙漠化过程及其防治研究的新进展[J]. 中国沙漠, 2006, 26(4): 507-516
262. 王涛, 吴薇, 陈广庭, 等. 近 10 年来中国北方沙漠化土地空间分布的研究[J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2003, 33(增刊 1): 73-82
263. 王涛, 吴薇, 薛娴, 等. 近 50 年来中国北方沙漠化土地的时空变化[J]. 地理学报, 2004, 59(2): 203-212
264. 王涛, 吴薇, 薛娴, 等. 中国北方沙漠化土地时空演变分析[J]. 中国沙漠, 2003, 23(3): 230-235
265. 王涛, 吴薇, 赵哈林, 等. 科尔沁地区现代沙漠化过程的驱动因素分析[J]. 中国沙漠, 2004, 24(5): 519-527

266. 王涛, 吴薇. 沙质荒漠化的遥感监测与评估[J]. 第四纪研究, 1998, 2: 108-118
267. 王涛, 吴薇. 我国北方的土地利用与沙漠化[J]. 自然资源学报, 1999, 14(4): 355-358
268. 王涛, 赵哈林, 肖洪良. 中国沙漠化研究的进展[J]. 中国沙漠, 1999, 19(4): 209-311
269. 王涛, 朱震达, 赵哈林. 我国沙漠化研究的若干问题—4. 沙漠化的防治战略与途径[J]. 中国沙漠, 2004, 24(2): 115-122
270. 王涛, 朱震达. 我国沙漠化研究的若干问题——1. 沙漠化的概念及其内涵[J]. 中国沙漠, 2003, 23(3): 209-214
271. 王涛, 朱震达. 中国北方沙漠化的若干问题[J]. 第四纪研究, 2001, 21(1): 56-64
272. 王涛. 我国沙漠化研究的若干问题——2. 沙漠化的研究内容[J]. 中国沙漠, 2003, 23(5): 477-482
273. 王涛. 我国沙漠化研究的若干问题——3. 沙漠化研究和防治的重点区域[J]. 中国沙漠, 2004, 24(1): 1-9
274. 王跃, 李森, 王建华, 等. 试论青藏高原隆升对中国沙漠形成演化的影响[J]. 干旱区研究, 1996, 13(2): 20-24
275. 魏文寿, 刘明哲. 古尔班通古特沙漠现代沙漠环境与气候变化[J]. 中国沙漠, 2000, 20(2): 178-183
276. 魏文寿. 现代沙漠对气候变化的响应与反馈: 以古尔班通古特沙漠为例[J]. 科学通报, 2000, 45(6): 636-641
277. 魏兴琥, 李森, 杨萍, 等. 藏北高山嵩草草甸植被和多样性在沙漠化过程中的变化[J]. 中国沙漠, 2007, 27(5): 750-757
278. 文小航, 尚可政, 王式功, 等. 1961-2000 年中国太阳辐射区域特征的初步研究[J]. 中国沙漠, 2008, 28(3): 554-561
279. 吴绍洪, 尹云鹤, 郑度, 等. 近 30 年中国陆地表层干湿状况研究[J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2005, 35(3): 276-283
280. 吴薇. 近 50 年来毛乌素沙地的沙漠化过程研究[J]. 中国沙漠, 2001, 21(2): 164-169
281. 吴正. 风沙地貌学[M]. 北京: 科学出版社, 1987: 4-5
282. 谢高地, 肖玉, 鲁春霞. 生态系统服务研究: 进展、局限和基本范式[J]. 植物生态学报, 2006, 30(2): 191-199
283. 信忠保, 许炯心, 郑伟. 气候变化和人类活动对黄土高原植被覆盖变化的影响[J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2007, 37(11): 1504-1514
284. 徐丽恒, 王继和, 李毅, 等. 腾格里沙漠南缘沙漠化逆转过程中的土壤物理性质变化特征[J]. 中国沙漠, 2008, 28(4): 690-695
285. 徐小玲, 延军平. 陕北沙区人为因素与沙漠化的定量关系研究[J]. 干旱区资源与环境, 2005, 9,

- 19(5): 38-41
286. 徐兴奎, 林朝辉, 薛峰, 等. 气象因子与地表植被生长相关性分析[J]. 生态学报, 2003, 23(2): 221-230
287. 许炯心. 土地利用变化对鄂尔多斯高原周边地区沙尘暴的影响[J]. 地理研究, 2004, 23(4): 465-468
288. 延昊, 王绍强, 王长耀, 等. 风蚀对中国北方脆弱生态系统碳循环的影响[J]. 第四纪研究, 2004, 24(6): 672-678
289. 姚洪林, 闫德仁, 杨文斌, 等. 内蒙古沙漠化土地与植被掩体规律的而研究[J]. 内蒙古林业科技, 2001, 1(4): 7-12
290. 伊克昭盟土壤普查办公室. 伊克昭盟土壤[M]. 呼和浩特: 内蒙古人民出版社, 1989
291. 尹云鹤, 吴绍洪, 郑度, 等. 近 30 年我国干湿状况变化的区域差异研究[J]. 科学通报, 2005, 50(15): 1636-1642
292. 尹云鹤. 中国干湿状况变化与生态地理区域对气候变化的响应[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2006: 8-21
293. 曾永年, 冯兆东, 向南平. 基于地表定量参数的沙漠化遥感监测方法[J]. 国土资源遥感, 2005, 64(2): 40-44
294. 曾永年, 冯兆东. 沙质荒漠化遥感监测与环境影响研究进展[J]. 山地学报, 2005, 24(2): 218-227
295. 张春来, 董光荣, 邹学勇, 等. 青海贵南草原沙漠化影响因子的贡献率[J]. 中国沙漠, 2005, 25(4): 511-518
296. 张登山. 青海共和盆地土地沙漠化影响因子的定量分析[J]. 中国沙漠, 2000, 20(1): 59-62
297. 张荣旺, 金桂莲, 马广铭, 等. 鄂尔多斯地表水资源浅析[J]. 内蒙古科技与经济, 2002, 5: 24-26
298. 张新时, 杨莫安, 倪文革. 制备的 PE (可能蒸散) 指标与植被-气候分类几种方法与 PEP 程序介绍[J]. 植物生态学报, 1993, 17(2): 97-109
299. 张新时. 毛乌素沙地的生态背景及其草地建设的原则与优化模式[J]. 植物生态学报, 1994, 18(1): 1-16
300. 章予舒, 王立新, 张红旗, 等. 甘肃疏勒河流域环境因子变异对荒漠化态势的影响[J]. 资源科学, 2003, 25(6): 60-65
301. 赵存玉, 王涛. 沙质草原沙漠化过程中植被演替研究现状和展望[J]. 生态学杂志, 2005, 24(11): 1343-1346
302. 赵哈林, 张铜会, 崔建垣, 等. 近 40a 我国北方农牧交错区气候变化及其与土地沙漠化的关系——以科尔沁沙地为例[J]. 中国沙漠, 2000, 20: 1-6

303. 赵哈林, 赵学勇, 张铜会, 等. 北方农牧交错沙漠化的生物过程研究[J]. 中国沙漠, 2002, 22(4): 309-315
304. 赵哈林, 赵学勇, 张铜会, 等. 科尔沁沙地沙漠化过程及其恢复机理[M]. 北京: 海洋出版社, 2003: 1
305. 赵哈林, 赵学勇, 张铜会, 等. 沙漠化过程中沙质旱作农田土壤环境的变化及其对生产力形成的影响[J]. 水土保持学报, 2002, 16(4): 1-4
306. 赵丽娅, 赵哈林. 我国沙漠化过程中的植被演替研究概述[J]. 中国沙漠, 2000, 20(增刊): 7-14
307. 赵学勇, 常学礼, 张铜会, 等. 景观生态学原理在沙漠化研究中的应用[J]. 中国沙漠, 2000, 20: 38-41
308. 赵英时. 遥感应用分析原理与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2003: 372-374
309. 赵云龙, 唐海萍, 李新宇. 近 40 年来科尔沁沙地沙漠化过程的气候背景分析[J]. 干旱区资源与环境, 2004, 18(5): 8-14
310. 周广胜, 许振柱, 王玉辉. 全球变化的生态系统适应性[J]. 地球科学进展, 2004, 19(4): 642-649
311. 周晓东, 朱启疆, 孙中平, 等. 中国荒漠化气候类型划分方法的初步探讨[J]. 自然灾害学报, 2002, 11(2): 125-131
312. 朱文泉, 潘耀忠, 何浩, 等. 中国典型植被最大光利用率模拟[J]. 科学通报, 2006, 51(6): 700-706
313. 朱文泉. 中国陆地生态系统植被净初级生产力遥感估算及其与气候变化关系的研究[D]. 北京: 北京师范大学研究生院, 2005: 1-3
314. 朱震达, 陈广庭. 中国土地沙质荒漠化[M]. 北京: 科学出版社, 1994
315. 朱震达, 刘恕, 吴正, 等. 中国沙漠概念[M]. 北京: 科学出版社, 1980
316. 朱震达, 刘恕, 肖龙山. 草原地带沙漠化环境的特征及其治理的途径——以内蒙古乌兰察布草原为例[J]. 中国沙漠, 1981, 1(1): 2-12
317. 朱震达, 王涛. 从若干典型地区的研究对近十余年来中国土地沙漠化演变趋势的分析[J]. 地理学报, 1990, 45(4): 430-440
318. 朱震达, 王涛. 中国沙漠化研究的理论与实践[J]. 第四纪研究, 1992, 2: 97-106
319. 朱震达. 关于沙漠化地图编制的原则与方法[J]. 中国沙漠, 1984, 4(1): 4-15
320. 朱震达. 中国土地荒漠化的概念, 成因与防治[J]. 第四纪研究, 1998, 002: 145-155
321. 左大康, 王懿贤, 陈建绥. 中国地区太阳总辐射的空间分布特征[J]. 气象学报, 1963, 33(1): 78-96



## 致 谢

行笔至此,意味着博士阶段的工作即将结束。回首这五年来的每一个日日夜夜,心中有无限的感慨。论文付梓之际,向那些曾经给予我巨大帮助和热情支持的老师、同学、朋友和家人表示诚挚的感谢!

本文是在导师庄大方研究员和潘剑君教授的严格要求和悉心指导下完成的。从论文选题、资料收集到论文写作、修改、定稿的每一个环节都凝聚了两位导师大量的心血和汗水。感谢两位导师在学业上的教导、生活上的关怀,以及对我未来工作发展的关心和帮助。

潘剑君老师是我的硕士生导师,从进入南京农业大学以来一直对我严格要求、不断敦促我向更高的台阶迈进。记得 2004 年刚进入南京农业大学时,较差的专业功底以及工作上的不得方法,使得自己第一次负责的科研项目进展不顺利,第一篇科研论文迟迟难以出稿,是潘老师一次又一次耐心的指导,反反复复认真的修改,使得我在科研的征程中迈出了第一步。潘老师一丝不苟、求真务实的科学精神与敏锐的学术思维,教育和鼓励我不断前进;潘老师平易近人的性格以及热情待人的处世之道也是我学习的榜样。

2006 年我转为庄大方老师的博士生,由二位老师同时指导。庄老师平易近人的大家风范和言传身教的学者风格,使学生受益匪浅。对于研究工作、对于论文,庄老师的每一次指导与教诲,我都能铭记在心。感谢庄老师三年来为我提供了最为优越和宽松的学习环境与研究平台,在生活上也给予我莫大的支持与帮助。庄老师工作繁忙,还不忘关心我的工作和未来发展,看着您忙碌的身影和日益渐多的白发,作为学生感觉为您分担的太少太少。在此,向尊敬的导师表示最崇高的敬意。

感谢中国科学技术信息研究所的康相武副研究员。论文的选题、科研工作的开展以及文章的撰写,都离不开康老师的悉心指导与帮助。感谢康老师为我提供的沙漠化研究平台以及难得的野外工作机会,不仅锻炼了我的能力,更开阔了我的视野。康老师敏锐的学术思维、严谨的学风、对地学相关领域独到的见解以及在宏观上对科技发展的把握都使我受益匪浅。每一次的学术讨论,都能使我发现新的问题,获得新的知识。康老师豁达的性格,真诚待人的处世之道都是我学习的榜样。感谢康老师一直以来对我工作的关心和帮助,在这里表示最诚挚的感谢!

感谢中科院地理科学与资源研究所的邱冬生副研究员。在地理所期间,不论是科研上,还是生活上,都得到了邱老师莫大的关心、支持与帮助。在此,向邱老师表示最诚挚的感谢!

感谢南京农业大学的姜小三副教授。姜老师不仅是良师，更是益友。在科研方面，姜老师忘我的科研精神，雷厉风行的作风都是学生学习的榜样。在为人处事方面，姜老师的每一次点拨都能是学生受益匪浅。在此，对姜老师五年来对我的关心、支持和帮助表示深深的感谢！

感谢南京农业大学的马晶老师、陈效民教授、李辉信教授、邹建文教授、潘根兴教授、徐国华教授、沈其荣教授以及李兆富副教授等老师在平时的科研和工作上的给予的关心与帮助！感谢中科院南京土壤所的史学正研究员和南京大学的居为民教授在论文答辩中给予的指导和帮助。

感谢中国科学院地理所资源环境数据中心的彭中伟老师、温曼萍老师、刘春莉老师、杨小唤研究员、熊利亚研究员在平时的科研工作、数据支持等方面给予的帮助。感谢师弟高文斌、邸苏闯、刘磊，以及同学马欣博士在平时的科研和生活方面给予的帮助！

感谢中国气象局刘志丽副研究员在气象数据、遥感影像处理方面给予的帮助！

感谢长安大学的霍艾迪博士、西北农林科技大学的侯明博士、新疆师范大学的新建辉硕士在野外工作方面给予的巨大帮助。难以忘记我们几个人的团队在野外风餐露宿、艰苦工作的情景。艰苦的工作凝结了坚实的友谊，相信这是我们一生的财富！

感谢南京农业大学实验室的师兄弟姐妹们的帮助，他们是张锐、任红艳、高建峰、尹黎明、张黎明、胡续礼、邱琳、刘邵贵、丁飞、刘海灵、李海鹰、杨萍、提超普、史学军，以及一些还无法叫出姓名的师弟师妹们。还有同学樊剑波、万小羽、陈贵、高迎旭等，感谢他们在这几年的同窗生活中给予的关心与帮助。

博士论文的顺利完成离不开家人的关心和支持。感谢母亲、奶奶、以及其他亲人给与我最无私的爱，这几年来，自己一人求学在外，是家人的理解、关爱和支持，使我一步一步走向了今天。感谢妹妹文雅在繁忙的学习中帮我修改了大量的英文文章。感谢我的爱人宋阿琳博士一直以来对我的鼓励、关心、支持与帮助，在我烦闷时倾听我的苦诉，在我高兴时分享我的喜悦。如果说取得博士学位也算一点成就的话，那么这个成就也有她的一半！

感谢所有给予我关心、帮助、支持和鼓励的朋友们！祝快乐永相随！

许端阳 谨上  
2009年6月于金陵

## 攻读博士学位期间发表的学术论文

Xu Duanyang, Kang Xiangwu, Liu Zhili, Zhuang Dafang, Pan Jianjun. Assessing the relative role of climate change and human activities in sandy desertification in Ordos Plateau, China[J]. Sciences in China Ser.D: Earth Sciences, 2009, 6

Duanyang Xu, Xiangwu Kang, Dongsheng Qiu, Dafang Zhuang, Jianjun Pan. Quantitatively assessing desertification by using Landsat data at regional scale – A case study in Ordos Plateau, China[J]. Sensors, 2009, 9: 1738-1753

许端阳, 康相武, 刘志丽, 庄大方, 潘剑君. 气候变化和人类活动在鄂尔多斯地区沙漠化过程中的相对研究[J]. 中国科学 D: 地球科学, 2009, 39(4): 1-13

霍艾迪, 康相武, 刘志丽, 侯明, 许端阳, 靳建辉, 达伟. 利用 MODIS 影像反演沙漠化地表温度的方法研究[J]. 高技术通讯, 2008, 18(5): 511-518

