学校代码：	10135
论文分类号：	
学　　号：	20104017042
研究生类别：	全日制

内蒙古師範大學

硕士学位论文

基于 GIS 和 RS 的锡林郭勒盟风沙灾害综合评价研究

Integrated Assessment on Dust Storm Disaster in the Xilingol Based on GIS and RS

学科门类：	理学
一级学科：	地理学
学科、专业：	地图学与地理信息系统
研究方向：	资源与环境遥感
申请人姓名：	春梅
指导教师姓名：	阿拉腾图雅 副教授

二〇一三年四月十五日

独创性声明

本人声明所呈交的学位论文是本人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果，尽我所知，除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含本人为获得内蒙古师范大学或其它教育机构的学位或证书而使用过的材料。本人保证所呈交的论文不侵犯国家机密、商业秘密及其他合法权益。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示感谢。

签名：春梅　　日期：2013 年 6 月 5 日

关于论文使用授权的说明

本学位论文作者完全了解内蒙古师范大学有关保留、使用学位论文的规定：内蒙古师范大学有权保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和磁盘，允许论文被查阅和借阅，可以将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、汇编学位论文，并且本人电子文档的内容和纸质论文的内容相一致。

保密的学位论文在解密后也遵守此规定。

签名：春梅　　导师签名：何胜国

日期：2013 年 6 月 5 日

中 文 摘 要

Y2349586

风沙灾害被认为严重的生态环境问题，目前已经受到了全国乃至全世界的普遍关注和重视。风沙灾害主要包括扬沙、沙尘暴和浮尘等风沙活动。近年来，伴随全球暖干化以及人类不合理的水土资源利用方式，我国风沙灾害的危害日益严重、损失持续增加。其中沙化严重地区是农牧交错带、草原区、大沙漠边缘地带。锡林郭勒盟位于中国的正北方，内蒙古自治区的中部，是中国北方生态安全屏障，其中浑善达克沙地位于内蒙古中部锡林郭勒草原南端，据研究表明，浑善达克沙地已成为近年来困扰北京的沙尘的主要源头之一。从全国沙尘暴的分布来看，该地区属于易发区，且风力较强，环境及其脆弱，如果保护不当有可能成为沙尘暴的高发区，甚至影响首都北京的生态环境，因此研究锡林郭勒盟风沙灾害尤为重要。

本文以自然灾害系统理论和区域灾害理论为基础，基于RS和GIS技术手段，利用内蒙古自然地理环境要素基础图件、锡林郭勒盟以及周边地区29个气象站点的多年气象资料和2011年内蒙古统计年鉴等数据，用加权综合法、主成分析法和GIS空间叠加分析方法，从孕灾环境、致灾因子和承灾体3个方面建立风沙灾害综合评价指标体系并分别对锡林郭勒风沙灾害进行单项评价，在此基础上应用协调模型对锡林郭勒盟风沙灾害进行综合评价，并根据综合评价结果提出针对性的防范措施。主要得出的结论有：

1．锡林郭勒盟风沙灾害孕灾环境敏感度总体上由东北向西南逐渐增强，有南部和背部好于中部，东部好于西部的特点。这与该地的地貌分布和气候条件基本一致。孕灾环境最好的旗县有东乌珠穆沁旗和西乌珠穆沁旗；最差的是苏尼特右旗、二连浩特市。东部受大兴安岭和阴山余脉影响的地区，植被以森林植被、草甸草原和典型草原为主，植被覆盖度高，土壤类型以草甸土、黑钙土和栗钙土为主而且湿地面积也较高，风沙灾害孕灾环境很好；西部地处阴山山脉东北侧，植被以荒漠草原为主，植被覆盖低，土壤抗蚀性能力很低，土壤以棕钙土为主，风沙灾害孕灾环境最差的地区；此外受浑善达克沙地的影响锡林郭勒市南部正蓝

旗、正白旗和镶黄旗的孕灾环境敏感度较高。

2. 锡林郭勒盟风沙灾害致灾因子危险性总体上由东北向西南逐渐增强，总体规律是西部干旱降水量少，气温也高，风速较大，大风日数多，致灾因子危险性也高；向东北方向随着降水量增大，气温降低，风速减小和大风日数的减少，风沙灾害危险性也逐渐减小。其中东乌珠穆沁旗风沙灾害危险性在全盟最小；苏尼特右旗风沙灾害危险性在全盟最高。

3. 锡林郭勒盟风沙灾害承灾体脆弱度高的区域集中分布在生态环境脆弱，人口密度大的南部半农半牧旗和农业县。其中太仆寺旗的脆弱性在全盟最高，多伦县的脆弱性也较高，镶黄旗、锡林浩特市、正蓝旗、和西乌珠穆沁旗的脆弱度中等，苏尼特左旗和二连浩特市的脆弱性最小，总体上，锡林郭勒盟风沙灾害承灾体脆弱性大致东部大于西部地区，农区高于牧区。

4 对锡林郭勒盟风沙灾害孕灾环境敏感性、致灾因子危险性和承灾体的脆弱性评价的基础上计算风沙灾害系统的协调度并综合评价风沙灾害。将可持续发展耦合协调分析理论与方法引用到风沙灾害综合评价研究领域中，分析风沙灾害各子系统之间的组合形式，耦合程度协调平衡状况。研究结果为：锡林郭勒盟风沙灾害系统中属协调发展型和不协调发展型地区面积占全盟总面积的 55.5%；属不协调灾害型和协同灾害型地区占全盟总面积的 44.5%。可见，锡林郭勒盟风沙灾害子系统关系中，不协调型近占一半，政府和有关部门应提高防范意识，采取防治措施。最后在综合分析的基础上将锡林郭勒盟风沙灾害系统分为4个一级类型区和 9 个亚类型区，分析其风沙灾害特征，提出相应的防治措施。

关键词： 锡林郭勒盟，风沙灾害，评价

ABSTRACT

Sand disasters is considered as one of the serious ecological environment problems. At present it has been concerned and payed widespread attention in china and even in the world. Sand disasters mainly includes the following sandstorm activities: flying sand, sandstorms and the dust. In recent years, the dangers of sandstorm disasters in our country is getting worse and losses continue to rise with the global dry situation and unreasonable utilization of water and soil resource. That the most serious Desertification areas are located between the agriculture land and pastureland.

Xilingol lies in the northern part of the China and the central part of Inner Mongolia autonomous region, which is the ecological security barrier in northern China, including HunShanDaKe sand which is located in the southern tip of the central Inner Mongolia's Xilingol grassland. According to the research, HunShanDaKe sand has become one of the main source of dust in Beijing.From the distribution of the sandstorm in China, this region belongs to the field which is easy to cause the sandstorm with strong wind and its fragile environment.The region may become a high frequency incidence area of sandstorm and even affect the ecological environment of capital Beijing , if the appropriate protections are not taken. Therefore the wind sand disaster in xilingol is of significant. In order to prevent and control desertification disaster effectively, we must do some more research on disaster causes system and do some scientific assessment of disaster risk. The research on Xilingol sandstorm is of great significant which influences not only in sustainable development of its society, economy and ecological environment but also in providing scientific theoretical basis for serious desertification and sandstorm disaster areas to take reasonable measure.

The paper is based on natural disaster system theory and the theory of regional disaster as well as RS and GIS technology. The integrated sandstorm disaster evaluation is done from the following three aspects, a disaster lurking environment, the disaster cause and carrier, by means of Inner Mongolia natural geographical environment factors basic datum,

meteorological data of twenty nine weather stations in xilingol and its surrounding areas and the statistical yearbook in 2011, the weighted synthesis method, the main analysis method and GIS spatial overlay analysis method. And then the comprehensive evaluation of wind sand disaster in xilingol will be done and some reasonable measures can be put forward according to the research results. Main conclusions are:

1.The potential disaster environment sensitivity in The xilingol sand disaster is gradually strengthen from the northeast to the southwest, the southern and back part are better than central part, while the western part is better than the eastern part.and this kind of character is in accord with topography distribution and climate conditions. DongWuZhuMuQinQi and XiWuZhuMuQinQi lie in the best disaster preparedness environment. While SuNiTeYouQi and ErLianHot lie in the worst environment. Vegetation in the eastern region is mainly covered with forest vegetation, meadow steppe and typical steppe vegetation affected by Daxinganling mountain and Yinshanyumai mountain. The degree of the vegetation coverage is high, the soil type is mainly consist of chernozem, meadow soil and chestnut soil with the high level of wetland and better disaster preparedness environment. The west region lies in northeastern part of the Yinshanshanmai mountain, and the Vegetation is mainly covered with desert grassland with low degree of the vegetation coverage and low resistance ability of soil erosion. the soil is mainly with brown soil and disaster preparedness environment is worst. In addition, being affected by HunShanDaKe sand, the degree of environment sensitivitycity in ZhengLanQi, Zhengxiangbaiqi and Xianghuangqi is rather high.

2.Gradually,the degree of Sandstorm's hazard factors increased from northeast to southwest in Xilingol, generally with the regularity of dry、less rainfall、high temperature、multi-strong wind and high hazards in the west.On the contrary with the increase of the rainfall, decreases of the temperature and wind speed, the hazard factors wil be lower in the east. The effect of the hazard factors,of all region are minimum in

DongWuzhumuqinqi , while maximum in Suniteqi.

3.The area in which the load carrying capacity relating to sandstorm are weak in Xilingol is distributed in the southern area of fragile ecological environment, high population density and counties with farming and animal husbandry.The load carrying capacity are lowest in Taipusiqi,lower in Duolunxian, moderater in Xianghuangqi、Xilinhaoteshi、Zhenglanqi and Xiwuzhumuqinqi,highest in Sunitezuoqi and Erlianhaoteshi. On the whole,the weakness of the load carrying capacity in Xilinguolemeng are, approximately,higher in the east and agricultural area,lower in the west and pastoral area

4.On the basis of sensitivity degree of disaster preparedness environment In Xilingol and the risk of disaster cause as well as evaluation of the vulnerability of hazard-affected body, coordination degree of sandstorm disasters system and evaluation of sandstorm disaster will be worked out. The sustainable coordinate development coupling analysis theory and method can be applied into comprehensive evaluation of the sand disasters system so as to analyze combination among other subsystems and the coupling degree of coordination and balance.The results as follows: sand disaster system in Xilingol belongs to the coordination and the even coordination area which takes 55.5% of the total area of union-wide. The uncoordinated area and the even uncoordinated area takes 44.5% of the total area of union-wide. Apparently, the half of the land belongs to uncoordinated area in sand disasters sub-system of Xinlingol. Therefore the governments and some relevant departments should pay more attention and take some measures.At last, on the basis of comprehensive analysis of sand disaster in xilingol, we can divide it into four level types and 9 sub-level types, so as to analyze its characteristics of sandstorm disaster and then put forward some appropriate measures.

KEY WORDS: Xilingol，Sand disasters; Evaluation

目 录

1 引言 1
1.1 研究背景与研究意义 1
1.2 基本概念及理论 2
1.2.1 沙尘暴 2
1.2.2 灾害 2
1.2.3 灾害系统 3
1.3 国内外研究进展 3
1.3.1 国外研究进展 3
1.3.2 国内进展 4
1.4 研究内容与方法 6
1.5 论文框架 9
2 研究区概况与评价指标体系 10
2.1 研究区概况 10
2.1.1 地理位置 10
2.1.2 自然环境概况 11
2.1.3 社会、经济基本概况 12
2.2 评价指标体系 12
2.2.1 指标选取的原则 12
2.2.2 指标体系的建立 13
3 数据的获取与评价过程 14
3.1 数据的获取 14
3.1.1 基础数据 14
3.1.2 植被覆盖度 15
3.1.3 气象数据 16
3.1.4 土地利用数据 18
3.1.5 社会统计数据 19
3.2 评价过程 20

3.2.1 权重的确定 20
3.2.2 标准化处理 20
3.2.3 定量与定性数据的叠加 21
3.2.4 加权综合法 21
4 锡林郭勒盟风沙灾害孕灾环境敏感度评价 22
4.1 气候环境的敏感性 22
4.2 地貌环境的敏感性 22
4.3 植被环境的敏感性 23
4.3.1 植被类型 23
4.3.2 植被覆盖度 23
4.4 土壤环境的敏感性 24
4.5 水环境的敏感性 24
4.6 风沙灾害孕灾环境敏感度评价 24
5 锡林郭勒盟风沙灾害致灾因子危险度评价 28
5.1 气温 28
5.2 降水 28
5.3 风速 28
5.4 大风日数 29
5.5 土地利用强度 30
5.6 风沙灾害致灾因子危险度评价 30
6 锡林郭勒盟风沙灾害承灾体脆弱度评价 33
6.1 生命脆弱性评价 33
6.2 经济脆弱性评价 33
6.2.1 地均耕地面积 33
6.2.2 牲畜密度 34
6.2.3 地均第一产业生产值 34
6.3 风沙灾害承灾体脆弱度评价 35
7 锡林郭勒盟风沙灾害综合评价与分区 36
7.1 风沙灾害综合评价 36

7.2 风沙灾害分区评价 38
7.3 锡林郭勒盟风沙灾害防治对策 42
8 结论与讨论 43
8.1 结论 43
8.2 问题与讨论 44
参考文献 45
致谢 49

1 引言

1.1 研究背景与研究意义

风沙灾害作为严重的生态环境问题之一，已经受到世界的普遍关注。风沙灾害包括沙尘暴、扬沙和浮尘等风沙活动，它不仅蚕食可利用土地，侵袭城市，掩埋村舍，毁坏交通和水利设施，而且还能够污染环境，严重危害人民群众身心健康，甚至会造成人员伤亡和经济损失[1]。据相关资料显示，全球 100 多个国家和地区不同程度地受到风沙灾害，9 亿人口受到沙漠化影响。中国是世界上受风沙灾害影响最为严重的国家之一。全国沙化土地面积为 161km^2，占国土总面积的 16%，占全国荒漠化土地面积的 61.3%，其中沙化严重地区是农牧交错带、草原区、大沙漠边缘地带[2]。近年来，伴随全球暖干化以及人类不合理的利用水土资源，使我国风沙灾害的危害日益严重、损失持续增加[3]。2000 年 3-4 月，我国北方地区连续出现了 12 次沙尘暴、浮尘恶劣天气其出现时间之早，发生频率之高，影响范围之广，危害程度之大，为近百年来所罕见，给我国北方地区的交通运输、大气环境及人民生命财产和健康带来了不利的影响，特别是对首都北京及其周边地区造成严重危害，引起了社会各界的广泛关注，因此风沙灾害研究成为当今的热门论题。

锡林郭勒盟位于中国正北方，内蒙古自治区的中部，是中国北方强有力的生态安全屏障，地处蒙古高原地表坦荡平整，起伏和缓，古剥蚀夷平面显著，风沙广布，古有“瀚海”之称。全盟“旱、风、雹、冻、涝”五灾俱全，其中干旱、风沙尤为严重[4]。浑善达克沙地位于内蒙古中部锡林郭勒草原南端，距北京直线距离 180 千米，是离北京最近的沙源。并且由于气候的持续干旱和开垦，草场超灾，造成草场退化，河流湖泊萎缩，沙化日益严重，据研究表明，浑善达克沙地已成为近年来困扰北京的沙尘的主要源头之一。锡林郭勒盟大部分地区属温带大陆性季风气候，寒冷、风沙大、少雨。大风和多风天气主要出现在春、秋、冬三季，特别是秋末至次年春初，冷空气活动和寒潮天气过程较为频繁，是造成该地区风大风多的根本原因。平均风速大部 4-5 m/s，西南部 > 5 m/s。最大风速均在 24-28m/s，局部瞬间 34m/s。大风日数(≥8 级)，全年大部 60-80 天。全年盛行偏西风。从全国沙尘暴的分布来看，该地区属于易发区，且风力较强，环境及其脆弱，如果保护不当有可能成为沙尘暴的高发区，甚至影响首都北京生态环境，因此研究锡林郭勒盟风沙灾害尤为重要。

风沙灾害是严重干扰区域社会经济发展的重要因素之一，因此掌握锡林郭勒盟

风沙灾害的变化特征与规律，并对风沙灾害进行综合评价，不仅能够为锡林郭勒盟地区社会、经济、生态环境的可持续发展提供科学决策依据，同时为荒漠化严重和风沙灾害多发地区合理采取防范措施提供科学理论依据。

1.2 基本概念及理论

1.2.1 沙尘暴

在气象学中，沙尘暴是指由于强风将地面沙尘吹起，致使空气很浑浊，水平能见度小于 1km 的天气现象，分为浮尘、扬尘、沙尘暴 3 个等级（沙尘暴天气等级 GBfI.20480 — 2006）。根据能见度和瞬时最大风速，沙尘暴分为特强、强、中、弱四个等级。（表 1 — 1）。

表 1 — 1 我国沙尘暴强度划分标准

强度	瞬时极大风速(m/s)	最小能见度(m)
特强	≥25	<50
强	≥20	<200
中	≥17	200-500
弱	≥10	500-1000

其中浮尘、扬沙、沙尘暴和强沙尘暴定义如下（沙尘暴天气等级 GB/T20480 2006）：

浮尘：尘土、细沙均匀地浮游在空中，使水平能见度<10km 的天气现象；

扬沙：风将地面尘沙吹起，使空气相当混浊，水平能见度在 1km — 10 km 以内的天气现象；

沙尘暴：强风将地面大量尘沙吹起，使空气很混浊，水平能见度<1km 的天气现象；

强沙尘暴：大风将地面尘沙吹起，使空气模糊不清，浑浊不堪，水平能见度<500m 天气现象。

1.2.2 灾害

灾害（disaster、hazard、ealamity 或 Catastrophe）是自然系统与人类物质文化系统相互作用的产物[5]。没有人员伤亡及财产损失，任何自然事件都不能构成灾害。因此，灾害是由某种不可控制或没有采取控制的破坏因素引起的，突然或在短时期及一定时期内造成一定规模人员伤亡和物质财富的毁坏现象。人类赖以生存的自

然环境无时无刻在发生着变化，当变化程度超过一定限度，就会危及人类生命财产和生存条件的安全，并且产生人员伤亡、财产损失等不利影响，构成自然灾害[6]。

1.2.3 灾害系统

史培军等[7]在综合国内外相关研究成果的基础上提出区域灾害系统理论的观点，根据灾害系统理论，灾害系统是由孕灾环境、致灾因子、承灾体与灾情共同组成具有复杂特性的特殊的变异系统。灾情是由孕灾环境、致灾因子、承灾体之间相互作用形成的。它们的关系为：致灾因子是灾害产生的充分条件，承灾体是放大或缩小灾害的必要条件，孕灾环境是影响致灾因子和承灾体的背景。任何一个特定地区的灾害，都是致灾因子，孕灾环境，承灾体综合作用的结果。其轻重程度取决于孕灾环境的稳定性、致灾因子的危险性以及承灾体的脆弱性，是由上述相互作用的三个因素共同决定的[8]。

1.3 国内外研究进展

1.3.1 国外研究进展

国外对风沙灾害的研究起步较早，最早是对沙尘暴特征的描述阶段，如 1925 年 Sutton 报道了北非苏丹喀土穆地区的黑风的若干特征。20 世纪 20 年代初 Hankin 对印度“Andhi”型沙尘暴气流运行(上升和下沉气流)进行了研究[9]；同时，Sutton 对“Haboob”型沙尘暴也进行了分析；进入 70 年代，国际上开始集中于对沙尘天气与辐射和热量收支的影响研究[10]。

从 80 年代以来，进入了对风沙灾害时空分布、形成机制、成灾过程以及监测与对策方面的深入研究阶段。风沙灾害时空分布主要研究有 Jauregui [11]系统研究了墨西哥城沙尘暴的时空分布，并指出 3 月份沙尘暴的出现的频率最大；在全球范围内，风沙灾害主要的沙源地在北非的撒哈拉沙漠和中亚的戈壁[12]，东亚地区的沙源地主要位于中亚和中国西北地区的沙漠以及黄土分布区，这个区域的年沙尘输送量在 2500×10^4 t 上下，两个强输送区分别位于塔克拉玛干沙漠和内蒙古高原[13]。Brazel [14]总结了美国亚利桑那州西南部的从 1965 年到 1980 年共 15 年产生沙尘暴的四种天气形式，它们分别是：锋面型、雷暴/对流型、热带扰动型及高空切断低压型。90 年代开始，从控制风蚀的角度研究如何控制沙尘暴发生，其基本原理是以植物措施为主，通过退耕、休闲、免耕留茬和秸杆覆盖增加地表覆被，去控制沙尘暴造成的土壤风蚀[15]。美国所采用的免耕、留茬、草田轮作、秸秆还田等技术均收到了显著的成效[16]。同时，开始尝试利用风速、降水等气候因子建立综合气候影响指数

模型,分析气候因素对沙尘暴频率格局的影响[17-19]；卫星监测方面主要有 Norton. C 等人利用静止气象卫星在可见光波段的观测资料监测海洋上空的沙尘,并估算其光学厚度；日本利用气象卫星云图分析 1982 年至 1988 年 21 个发生自东亚的沙尘暴,指出了发生沙尘暴的源地、影响范围,并估算了沙尘暴输送过程中的降尘量。尤其是近年来频繁监测到黄沙天气现象，因此弄清产生黄沙的源地、研究黄沙的长距离输送机理，成了日本当前研究的主要目标[20]。到 2000 年，共有 160 多个国家批准了《联合国防治荒漠化公约》，说明全球在防止沙尘暴方面已达成共识。

进入 21 世纪以来，沙尘暴的研究更为全面的深入，Nilgun（2000）分析了沙尘暴气溶胶的成分和含量，Richard Washington[21]等利用地面气象观测资料和 TOMS 数据，研究了沙尘源地的问题。DeBellLJ（2004）等研究了 2001 年兖州春季沙尘暴的化学组成和在新英格兰气象观测场观测到的沙尘暴具有很大的相关性，介绍了其他距离传输过程。

1.3.2 国内进展

我国对风沙灾害研究起步较晚，20 世纪 50 年代开始,沙尘天气被纳入我国气象观测的常规监测,从 20 世纪 70 年代才开始对沙尘暴天气案例开展较为系统的研究。从 80 年代开始，沙尘天气对大尺度气候和环境的影响开始受到重视[22]。从 90 年代以来，西北地区发生了强沙尘暴天气后,风沙灾害的研究才越来越受到重视，召开了首届全国沙尘暴天气研讨会,并开始使用气象卫星监测风沙活动。几年后正式出版了第一本沙尘暴研究书籍《中国沙尘暴研究》[23]。同时相关科研单位组成专题组，从沙尘暴的成因分析，沙尘暴检测、预报方法研究，西北地区强沙尘暴天气预警系统设计和沙尘暴科普读物编写 4 个方面入手，针对历史的沙尘暴案例，更深入地探索这一重大生态环境灾害现象的成因和活动规律[22]。 90 年代末期，随着风沙活动范围的扩大，风沙活动频率的增加，伴随着遥感技术的发展，风沙灾害的研究进入了新时期，更多高分辨率遥感数据的产生，使得风沙灾害的研究可以定量化。伴随着 GIS 和 RS 技术的发展，基于 GIS 和 RS 技术的风沙灾害风险性评价成为新的研究方法和热点。同时，由于风沙灾害的研究工作受到国家的关注，国际间的合作项目也不断增加，一定程度上弥补了国内研究方法的不足[23]。

目前对风沙灾害的研究主要侧重于风沙灾害时空分布特征、遥感监测、现状及发展趋势、形成原因和整治工程与防治对策研究。风沙灾害时空分布特征研究：潘耀忠,范一大[24]等初步研究近 50 年来中国沙尘暴空间分异格局及季相分布情况；王式功和全林生等研究了我国沙尘暴天气的时空分布特征。钱正安、胡金明和董治宝

等[25]分别分析了我国沙尘暴发生高频区的空间分布规律。风沙灾害现状以及发展趋势研究：史培军、尚玉[1]等研究了中国沙尘暴灾害及其研究进展与展望；张瑛,陈远新[26]研究了辽宁省土地沙漠化现状成因及发展趋势。风沙灾害成因研究：刘纪远、叶笃正[27]等人研究了关于我国华北地区沙尘天气的成因与治理对策；史培军、高尚玉[28,29]等应用野外地表测量和沉积剖面分析等方法，对典型区域风沙变化进行了研究，认为中国风沙灾害加剧是在气候趋于干燥化背景下沙化土地扩展的结果；对于我国风沙活动的成因,相关研究结果表明为近年来风沙活动频繁与风沙灾害加剧是自然因素和人文因素共同作用的结果。防治对策研究：杨根生、拓万全[30]等人研究了关于宁蒙陕农牧交错带重点地区沙尘暴灾害并提出防治对策；叶笃正等[31]研究中国华北地区沙尘天气的治理对策；张春来,邹学勇[32]等对狮泉河盆地第二期风沙灾害进行了整治研究，并提出有效的防治对策。遥感监测研究：遥感监测是指通过遥感图像的解译,统计分析得出风沙活动的位置、影响范围；对风沙灾害移动的路线、强度进行监测,从而总结出其活动的规律；海全胜[33]等人建立了一种新的定量判识沙尘强度的沙尘指数(DSI)模型，检测了内蒙古中部地区的沙尘暴。

风沙灾害风险性评价[34]是对某区受风沙灾害危害后，对出现不利生态后果的可能性进行的评估。目前有关风沙灾害的风险性评价研究主要集中在几下方面：岳德鹏[34]等利用土壤类型、土壤有机含量、植被盖度、土地利用等四个指标评价北京大兴区永定河沙地的风沙灾害危险性；王静爱等[35]曾采用风沙灾害致灾灾次和承灾体指数构建风沙灾害危险度指数，来评价了中国风沙灾害危险性，研究表明:内蒙古部分地区、山西北部、京津地区、河北大部分地区、山东西北部和河南北部风沙灾害危险度最高,成为防沙治沙的核心区域,由核心区分别向南、向西、向东危险度降低，并编制了危险度等级图。徐海量[36]等考虑到风沙灾害的发生与发展不仅与风沙灾害天气有关，并且与其影响区的自然及社会经济状况有关，以承灾体指数和灾次指数的变化分析了塔里木盆地风沙灾害的空间分异规律，构建了风沙灾害危险性评价模型 $D_X=(Zc \times C_H)^{1/2}$。反映一个研究区的风沙致灾强度和承灾强度。马育军,王静爱等[37]以灾害系统理论为基础分别从致灾因子、孕灾环境和承灾体三个方面对宁夏中北部地区风沙灾害的风险进行了对比评价。姜淑琴[38]从孕灾环境的角度对鄂尔多斯市风沙灾害进行了危险性评价；岳耀杰,王静爱等[39,40]利用 GIS 和 RS 技术分别对我国北方沙区的湖泊（水库）和城市进行了风沙灾害危险度评价研究。

存在问题：风沙灾害风险评估工作，缺少有效的指标和方法，没有相应科研成果可以借鉴，造成对我国不同地区沙尘暴灾害可能发生的风险程度了解不够，直接

影响了监测预警、灾情评估等工作的准确性和时效性，沙尘暴的防灾减灾工作又需要有一套科学的评价体系为依据，为防灾减灾工作做指导。一些综合研究,如赵存玉等详细介绍了风沙灾害防治的途径与措施,但在风沙灾害定量评价方面仍缺乏深入研究[41]。因此，开展风沙灾害综合评价研究工作十分必要。研究方法方面：人类活动引起的土地利用覆盖变化、沙漠化、城市化以及各种自然或认为因素引起的地表特征和气候变化，都可能改变沙尘暴天气发生的频率和强度。但对于沙尘暴灾害的形成、输送和沉降过程与下垫面因子间的相互作用机制，都停留在定性描述阶段，定性和定量相结合或定量分析需要加强。

1.4 研究内容与方法

1.4.1 研究内容

本文选取锡林郭勒盟为研究区域，以土壤、地貌类型等数据库为基础信息源，结合本区气象与气候、自然和社会统计等数据，从孕灾环境、致灾因子和承灾体 3 方面选取风沙灾害综合评价指标，建立风沙灾害综合评价指标体系，在进行单项评价的基础上引用协调模型，对锡林郭勒盟风沙灾害进行综合评价与分区研究。论文的总体技术路线可概括为如图 1-1：

（1）评价指标体系的建立：结合土壤类型图等基础数据、社会统计资料、NDVI 数据和气象气候资料，建立锡林郭勒盟风沙灾害评价指标体系。

（2）利用 ArcGis9.3 软件进行各指标要素的叠加分析，运用德尔菲法对已处理好的指标权重进行赋值，最后用加权综合分析法计算各图版的综合值，进行孕灾环境敏感性评价。

（3）利用 SPSS13.0 统计软件整理和处理锡林郭勒盟及周边地区共 29 个气象站点的气象数据，应用 ArcGis9.3 软件对气象数据进行空间插值，生成气象指标因子空间数据，然后把这些气象指标数据和土地利用数据进行叠加分析得出每个图版的综合值，再对致灾因子危险性评价。

（4）应用 Excel 软件统计整理锡林郭勒盟各旗县市的人口密度、人均第一产业生产值、牲畜密度、耕地百分比等社会经济指标数据，进行承载体脆弱性分析和评价。

（5）应用协调模型建立锡林郭勒盟风沙灾害综合评价模型，并进行综合评价和分区研究，最后针对性地提出防灾减灾的有效措施和对策。

1.4.2 研究方法

（1）德尔菲法（专家咨询法）：德尔菲法依据系统的程序，采用匿名发表意见的方式，即团队成员之间不得互相讨论，不发生横向联系，只能与调查人员发生关系，以反复的填写问卷，以集结问卷填写人的共识及搜集各方意见，可用来构造团队沟通流程，应对复杂任务难题的管理技术。这种方法的优点主要是简便易行，具有一定科学性和实用性，具有一定程度综合意见的客观性。本文应用德尔菲法确定锡林郭勒盟风沙灾害孕灾环境各评价指的权重。

（2）空间插值法：降水、气温风速以及大风日数为风沙灾害最主要的致灾指标，是风沙灾害致灾因子评价中不可缺少的区域空间信息。然而，气象观测站点的数量是有限的，且站点的空间分布也是不均匀的，需要利用空间插值将点数据转换成区域面数据信息。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，被广泛用于对连续空间的数值计算[42, 43]。为基于区域内少量气象数据点的数值计算而对区域内任一地点的气候条件进行可靠估计提供了可能。本文应用 spline 法做空间插值，生成锡林郭勒盟风沙灾害致灾因子空间分布图。

（3）叠加分析法：多边形叠加是将两幅矢量文件的几何形状和属性结合在一起，生成新矢量文件的一种 GIS 操作。其输出文件结合了来自输入文件和叠加文件的多边形边界，形成一套新的多边形，新的多边形携带了两幅文件的属性。本文应用 arcgis9.3 软件的 Union 工具将多个评价指标的多边形矢量图进行叠加，得到最小评价单元。

叠加分析原理：地图叠加就是将两幅地图或多幅地图重叠在一起，产生新的多边形和新的多边形属性的函数，其关系可以下列关系式表达：

$$\begin{cases} U = f_1(A_1, B_1, C_1, \cdots) \\ V = f_2(A_2, B_2, C_2, \cdots) \end{cases} \qquad (1—1)$$

式中：U，V ——新多边形及其属性；A_1 ，B_1 ，C_1 ——各叠加层上的图形数据；A_2 ，B_2 ，C_2 ——各叠加层上的属性数据；f_1，f_2 ——取决于各层的图形形状、属性特点及用户需求之间的关系。叠加分析过程：叠加过程一般分为几何求交过程和属性分配过程。几何求交过程首先求出所有多边形边界的交点，再根据这些交点重新进行多边形拓扑运算，对新生成的拓扑多边形图层的每个对象赋予唯一标识码，同时生成一个与新多边形对象对应的属性表，其中被叠加的图层称为本底层，用来叠加的图层称为上复层。

（4）主成分分析法（简成 PCA）：是解决多指标综合评价问题的有力工具。从

数学的角度看，主成分分析利用降维的思想，在不丢失重要信息的基础上，把多指标转化为少数几个不相关的综合指标。由于各主成分是初始变量的线性组合，它们构成数据空间的正交基，即所有的主成分间相互正交，没有多余信息。通过正交交换将原有的指标转换成彼此正交的综合指标，从而消除指标间的信息重叠问题。本文应用主成分分析法将风沙灾害综合评价单元的各评价指标进行主成分分析，提取主分指标，主成分赋权后计算出综合评价值。

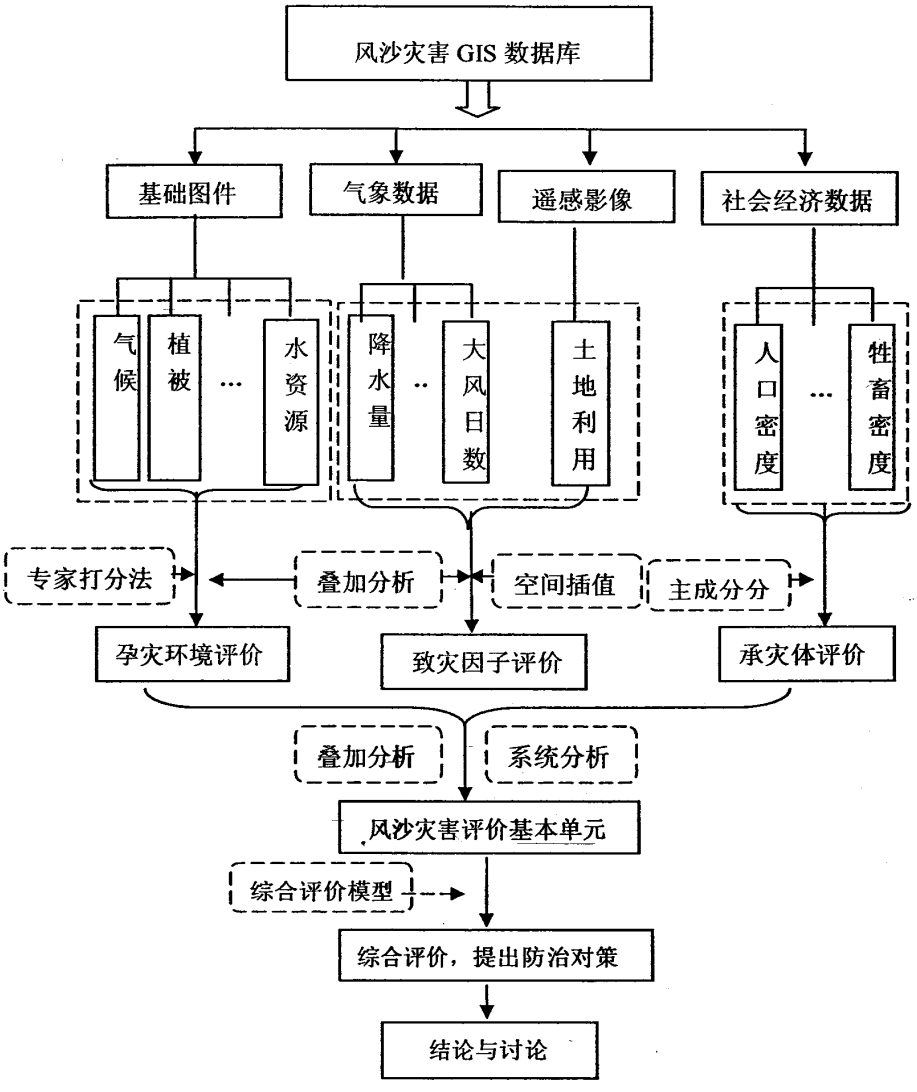

图 1-1 技术路线示意图

1.5 论文框架

本论文共分八章，第一章为引言部分，主要论述本论文的选题背景及其研究意义，介绍国内外风沙灾害评价研究进展，进一步介绍本文的研究内容与研究方法。第二章主要介绍研究区地理位置、自然环境条件和社会经济条件，并建立风沙灾害评价指标体系。第三章主要论述数据获取与评价过程。第四章主要分析锡林郭勒盟风沙灾害孕灾环境指标的敏感性，对各指标进行等级划分的基础上对孕灾环境的敏感度进行评价，再与锡林郭勒盟行政界线做空间叠加，分析行政区域孕灾环境敏感度。第五章分析致灾因子指标，利用加权综合法计算综合值并对致灾因子危险性进行评价。第六章分析风沙灾害承灾体指标，利用主成分分析法对风沙灾害承灾体脆弱性进行评价。第七章应用协调模型对锡林郭勒盟风沙灾害系统进行综合评价，再分区评价并提出针对性的防治风沙灾害的对策与建议。第八章为结论与讨论，对论文的研究成果做总结及对研究中存在的问题进行了探讨。

2 研究区概况与评价指标体系

2.1 研究区概况

2.1.1 地理位置

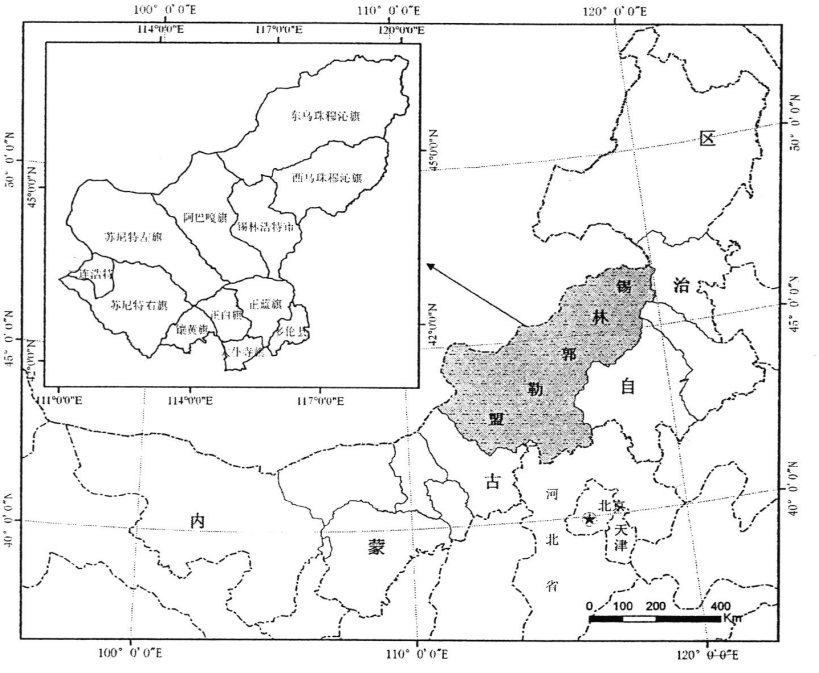

图 2-1 锡林郭勒盟地理位置示意图

锡林郭勒盟位于内蒙古自治区中部，介于东经111° 59′ 至120° 01′ ，北纬42° 32′ 至46° 41′ 之间。北与蒙古国接壤，边境线长1096km；西与乌兰察布市交界；南与河北省毗邻；东与赤峰市、通辽市、兴安盟相连。东西长700多千米，南北宽500多千米，总面积20.26×$10^4$$km^2$，占全区总面积的17.1%,同时位于首都北京的正北方,直线距离460km。

锡林郭勒盟辖锡林浩特市、二连浩特市、东乌珠穆沁旗、西乌珠穆沁旗、阿巴嘎旗、苏尼特左旗、苏尼特右旗、镶黄旗、正镶白旗、太仆寺旗、正蓝旗、多伦县，共二市一县九旗。其中锡林浩特市是锡林郭勒盟行政公署所在地,是锡林郭勒盟政治、经济、文化中心。二连浩特市是中国重要的陆路口岸,是通往蒙古国、俄罗斯和东欧各国的大陆桥,是内蒙古自治区计划单列市。锡林郭勒盟是我国最大的草原与草甸生态景观类型的自然保护区,在草原生物多样性的保护方面占有重要的位置和明显的国际影响。

2.1.2 自然环境概况

地形地貌：锡林郭勒盟位于内蒙古自治区中部，以高平原为主体，兼有多种地貌单元的地区。受大兴安岭与阴山余脉的影响，地势南高北低，自西南向东北缓缓倾斜，平均海拔1000m以上。东、南部多低山、丘陵、盆地错落，为大兴安岭向西和阴山山脉向东延伸的余脉；西、北部地形平坦，零星分布一些低山丘陵和熔岩台地；东北部为乌珠穆沁盆地，河网密布，水源丰富；中南部为浑善达克沙地，多为固定和半固定沙丘。

气候：锡林郭勒盟属温带大陆性气候。春季多风干旱，夏季温凉，秋季凉爽，霜雪早，冬季寒冷漫长。年平均气温0-3℃，1月平均气温-20℃，极端最低气温-42.4℃，7月平均气温21℃，极端最高气温39.9℃。年日照时数为2877-3207h。无霜期90-130天。年平均降水量140-400mm，自东向西递减，西部不足200mm，东部大兴安岭西麓以及南部连接阴山余脉地区，接近400mm，年平均湿润度在60%以下。

土壤：锡林郭勒盟地带性土壤类型有黑钙土、栗钙土、棕钙土等，非地带性土壤类型有草甸土、沼泽土、风沙土、盐土、碱土等。栗钙土从东部的东、西乌珠穆沁旗到西部的苏尼特左旗、苏尼特右旗均有分布。以牧业利用为主，面积为1018.58×10^4hm^2，占总土壤面积的51.13%。棕钙土是草原向荒漠过度的地带性土壤，分布于锡林郭勒盟西部地区的苏尼特左旗、苏尼特右旗以及阿巴嘎旗的西北部地区，面积为352.82×10^4hm^2，占总土壤面积的17.71%。风沙土主要分布于浑善达克沙地和嘎亥额勒苏沙地一带，总面积为248.33×10^4hm^2，占总土壤面积的12.47%。黑钙土主要分布于东乌珠穆沁旗乌拉盖管理局-满都呼宝力格一线以东地区和西乌珠穆沁旗大兴安岭山前低山丘陵地区，面积为106.85×10^4hm^2，占全盟总土壤面积的5.36%。灰色草甸土分布于沿河阶地、河漫滩、丘间低洼地、沙丘间平地及湖盆外缘，各旗县市均有分布，面积为81.84×10^4hm^2，占总土壤面积的4.11%。草甸土分布于乌拉盖河、滦河沿岸低平地和太仆寺旗、多伦县、正蓝旗、正镶白旗和锡林浩特市等地的低山丘陵谷地，面积为47.26×10^4hm^2，占总土壤面积的2.37%。沼泽土分布于乌拉盖水系、巴音河水系、滦河水系的河泛地、湖泊周围、丘间、台间及沙丘间甸子地的低洼处，其面积为44.40×10^4hm^2，占总土壤面积的2.23%。此外，灰色草甸土、灰褐土、石质土、粗骨土、潮土、盐土、碱土等在境内零星分布。

植被：锡林郭勒盟植被基本类型是草原植被，面积为1415.44×10^4hm^2，占全盟草地总面积的71.88%。包括草甸草原，典型草原和荒漠草原。草甸草原主要以牧业利用为主，代表群系为贝加尔针茅草原、羊草草原、线叶菊草原；典型草原是构成锡林郭

勒盟草原的主体部分，面积为893.27×10⁴hm²，占草原植被的63.11%；荒漠草原分布于锡林郭勒盟的最西部，代表群系有小针矛草原、戈壁针茅草原和女蒿草原。居第二位的是草甸植被，主要分布于低地、宽谷、干河床、湖盆边缘、内陆河滩等地，占草地总面积的12.38%。此外还有分布于浑善达克、嘎亥额勒苏和东乌珠穆沁旗的一些零散沙地的沙地植被，西部、西北部地区草原向荒漠过度的荒漠植被，分布于乌拉盖河和上都河流域局部河滩低地的沼泽植被和东部少有的森林植被。

2.1.3 社会、经济基本概况

据2011年内蒙古统计年鉴[44]，全盟年末常住人口102.86万人，男性53.66万人，女性49.20万人。 人口密度约5.1人/km²。其中城镇人口55.47万人，城镇化率54.01%。全盟国内生产总值592.05亿元，其中第一产业59.60亿元，占国内生产总值的11.95%；第二产业398.87亿元，占国内总产值的63.56%；第三产业133.58亿元，占国内总产值的24.49%。全年人均生产总值57727元。现已成为中国重要的能源生产基地，畜牧业生产基地和中国北方重点草原旅游区。

锡林郭勒盟是我国最大的牧区，是国家和自治区重要的绿色畜产品生产基地之一，也是距离京津唐地区最近的草原牧区。2010年农林牧渔业总产值1055324万元，其中牧业总产值690318万元，占农林牧渔业总产值的65.4%。大牲畜和羊的年中总头数635.18万头（只）。2010年农作物种植面积230.03 ×10⁴hm²，粮食总产量27.6×10⁴t。在工业方面，2010年锡林郭勒盟规模以上企业有344个，其中大型企业有1个，中型企业有17个，小型企业有326个；按轻重工业分，轻工业完成工业总产值784784万元，重工业完成工业总产值2929019万元，轻、重工业产值比重为26.79%。

2.2 评价指标体系

2.2.1 指标选取的原则

风沙灾害的发生,是人为因素和自然因素共同影响的结果。根据风沙灾害的发生、发展的机理出发,从选择指标的系统性、综合性、指标自身的独立性、可比性,真实性和实用性以及资料收集的难易度去考虑,在风沙灾害综合评价中，指标的选取一般追寻以下几个原则：

(1) 综合性原则：风沙灾害系统包括自然和人为因素，因此选取指标时尽可能全面、客观、准确地考虑影响风沙灾害的自然和人为因素。

(2)定量与定性相结合的原则：数据的收集难免有些缺陷,如数据缺失或当时未有记录,前后的统计方法不一致等等。这样要就可以采取定量评价和定性评价相结合的方法。

(3)主导性原则：风沙灾害综合评价的相关因子众多，若一一概全即不现实也没有必要，若采用传统的单因子评价势必影响其精度，只有在综合分析研究的基础上，选择确定几个最具有代表性的关键因子为评价指标，采用系统工程学的分析方法，建立科学、完整、实用的主导性评价指标体系，才能既简便又准确的做出科学合理的评价和评估。

2.2.2 指标体系的建立

指标体系是风沙灾害综合评价的理论依据，是评价一个区域风沙灾害情况的基础。本文根据锡林郭勒盟自然、人文地理条件以及孕灾环境、致灾因子和承灾体的区域差异特点，遵循综合、定量与定性相结合、客观性和主导性等原则[45,46]，建立锡林郭勒盟风沙灾害综合评价指标体系（图 2-2）。

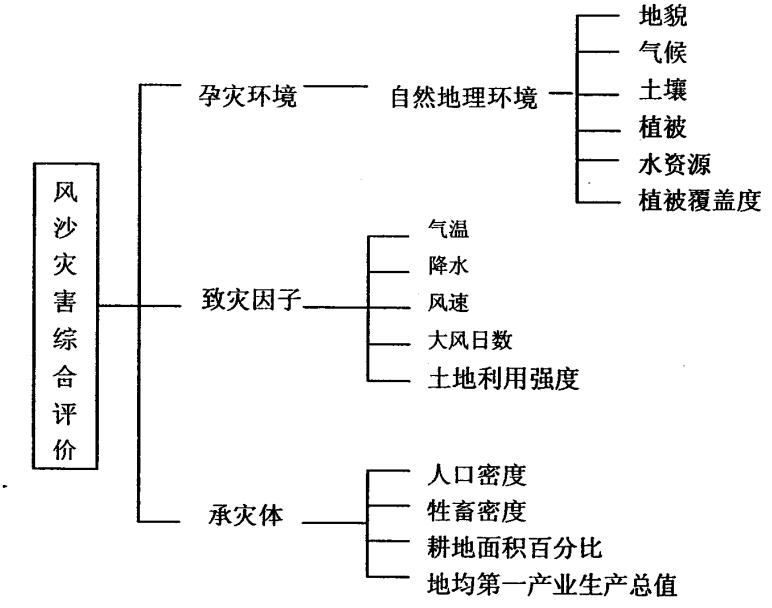

图 2-2 锡林郭勒盟风沙灾害综合评价指标体系

3 数据的获取与评价过程

3.1 数据的获取

3.1.1 基础数据

本文利用内蒙古自然地理环境要素基础图件，作为评价风沙灾害孕灾环境指标。这些基础图件资料主要包括内蒙古农业气候区划图、内蒙古地貌类型图、内蒙古植被类型图、内蒙古土壤图和锡林郭勒盟自治区水文地质图等。

由于以上基础图件均是纸质图件,因此,首先根据研究区地表景观特征,以内蒙古地形图为参考,在 ENVI4.2 软件的支持下对以上图进行配准，按锡林郭勒盟行政界线进行裁剪，定义投影和坐标系，以便在空间叠加分析。其次，在地理信息系统软件 ArcGIS9.3 支持下进行矢量化,建立锡林郭勒盟气候类型、土壤类型、植被类型、地貌和地下水资源等基础数据库，数据格式为 SHAP 格式。最后,利用 ArcGIS 软件的制图功能,生成锡林郭勒盟锡林郭勒盟气候类型、土壤类型、植被类型、地貌和地下水资源等专题图（图 3-1～3-5)。

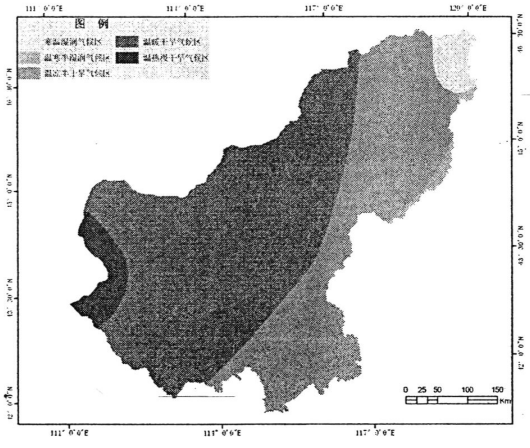

图 3-1 锡林郭勒盟气候类型分布图

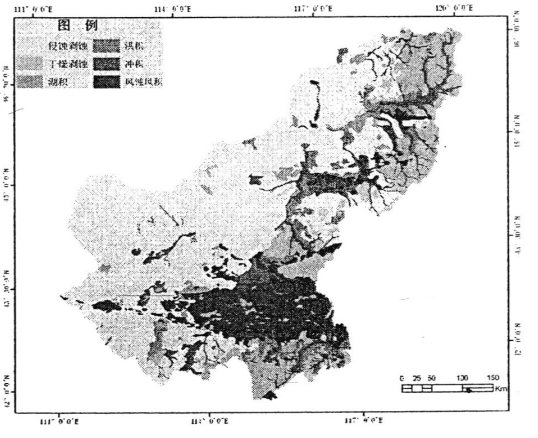

图 3-2 锡林郭勒盟地貌外营力组成分布图

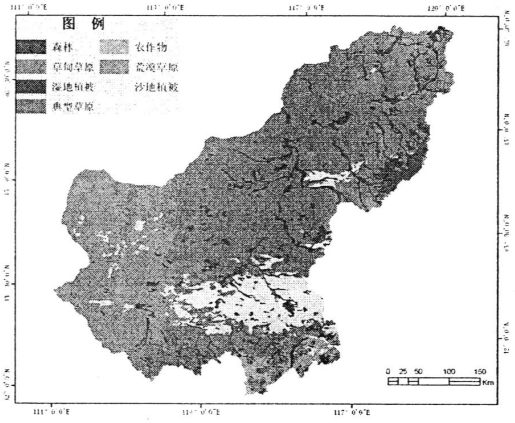

图 3-3 锡林郭勒盟植被类型分布图

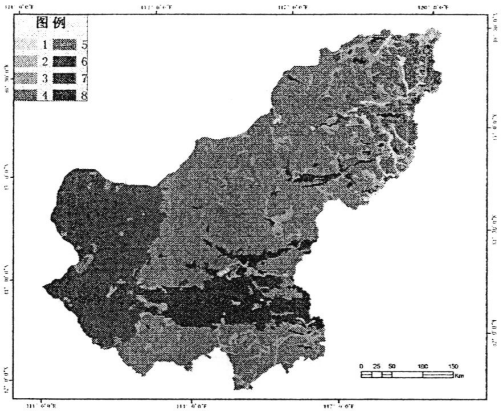

图 3-4 锡林郭勒盟土壤类型分布图

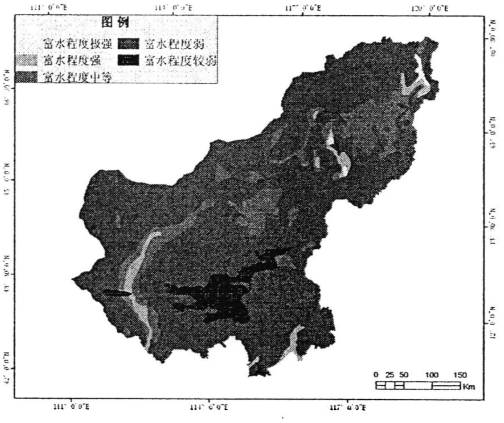

图 3-5 地下水资源分布图

3.1.2 植被覆盖度

（1）NDVI 归一化植被指数

本文所采用的数据为中国地区 1998-2008 年 SPOT_Vegetation 植被指数数据集，数据来源于国家自然科学基金委员会“中国西部环境与生态科学数据中心”(http://westdc.westgis.ac.cn)，10 天最大化合成的 NDVI 数据，每年八月分的数据，空间分辨率为 1km，数据投影为 geographic lat/lon。

首先在 EVVI4.7 软件的支持下把投影转换成 Albert 等面积投影，以便进行下一部的裁剪。然后用锡林郭勒盟行政界线进行裁剪，再次在 EVVI4.7 软件中利用公式（3-1）将 DN 数据转换为 NDVI 值，最后利用 EVVI4.7 软件 baisic tools 菜单下的 Band Math（波段运算）对话框里计算十年的 NDVI 平均值，结果如图 3-6。

RealNDVI =coefficient a * Digital Number + coefficient b

= a * DN +b （3-1）

式中Coefficient a = 0.004, Coefficient b = -0.1

（2）利用NDVI估算植被盖度

植被指数 NDVI 转为植被覆盖度时，选用以下模型 3-2：

$$f=(NDVI- NDVImin)/(NDVI-NDVImmax) \quad (3-2)$$

其中 NDVImin、NDVImax 分别为最小、最大归一化植被指数值，且两者不能直接取由 NDVI 灰度图统计出来的最大和最小值。 取值时，取给定置信度区间的最大值与最小值。置信度的取值主要由图像大小、图像清晰度等情况来决定。因此决定在 NDVI 频率累积表上取频率为 0.5%的 NDVI 为 NDVImin，取频率为 99.5%的 NDVI 值为 NDVImax。

从植被覆盖度（f）的定义可知，f 的值介于 [0，1] 之间，根据前人的研究[47]，将植被覆盖度定义为 5 个等级：（1）无覆被（裸露地表或水体），fc≤0.1；（2）低覆被，0.1＜fc≤0.3；（3）中覆被，0.3＜fc≤0.5；（4）较高覆被，0.5＜fc≤0.8；（5）高覆被，0.8＜fc≤1.0。根据各等级的阈值，在 ENVI 软件下对植被覆盖度图像进行密度分割，得到植被覆盖等级图（图 3-7）。由于考虑植被覆盖度对风沙灾害的影响，把水体和高覆被合并一个等级。

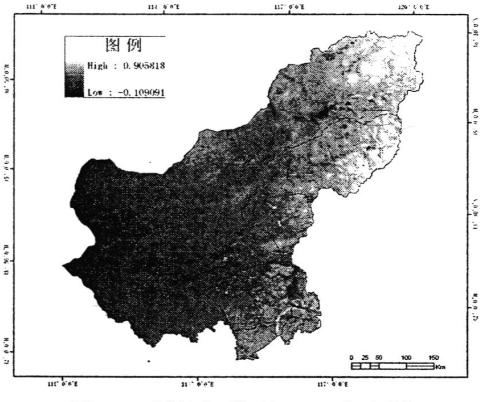

图 3-6 锡林郭勒盟 NDVI 分布图

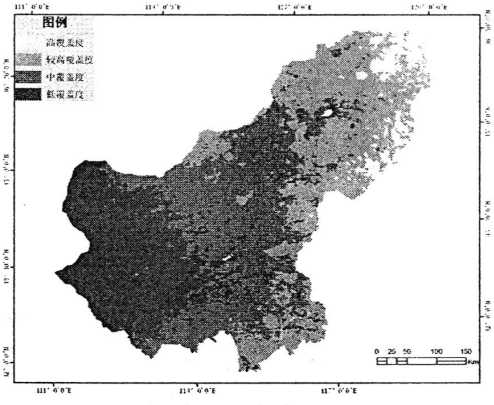

图 3-7 植被覆盖度等级分布图

3.1.3 气象数据

本文利用锡林郭勒盟及周边地区 29 个气象站点的从 1970 一 2011 年共 41 年每日观测的气象资料分析风沙灾害致灾因子危险性。主要包括以下致灾因子：气温(平均)、降水、风速。各气象站点的空间分布如图（3-8）所示，共选取的 29 个站点中，有 15 个位于锡林郭勒盟境内；另有 14 个位于内蒙古自治区其它盟市和河北省境内。本论文尽管以锡林郭勒盟为研究区，但所采用的气象观测站在地域范围上则超过了锡林郭

勒盟的行政区划。这主要是考虑到在研究各气象要素空间分布格局时，需要对相应要素进行空间插值。为了避免插值函数在边沿区因缺乏必要的控制数据而采用外推方法，由此造成在这些边沿地区插值精度大幅下降的情形[48]。

对于原始气象数据，首先进行有必要的预处理，主要是针对缺测数据(原代码为32766)进行插补操作，采用前后两天同一时段数据进行插值；对于记录所得的微量数据(原代码为32700)，采用简单地以数值0替换。然后利用SPSS13.0统计软件计算气温、降水、风速和大风日数等气象要素的月平均和年平均值。最后用ArcGIS9.3软件“Spatial Analyst”模块下的“Spline”样条函数方法做空间插值，并利用锡林郭勒盟的行政边界对插值后的数据集进行剪切，绘制出锡林郭勒盟气温、降水、风速和大风日数等各气象要素的空间分布图（3-9～3-12)。之后将栅格文件转换成矢量格式的等值线，以便为最后各种指标的叠加工作做准备。

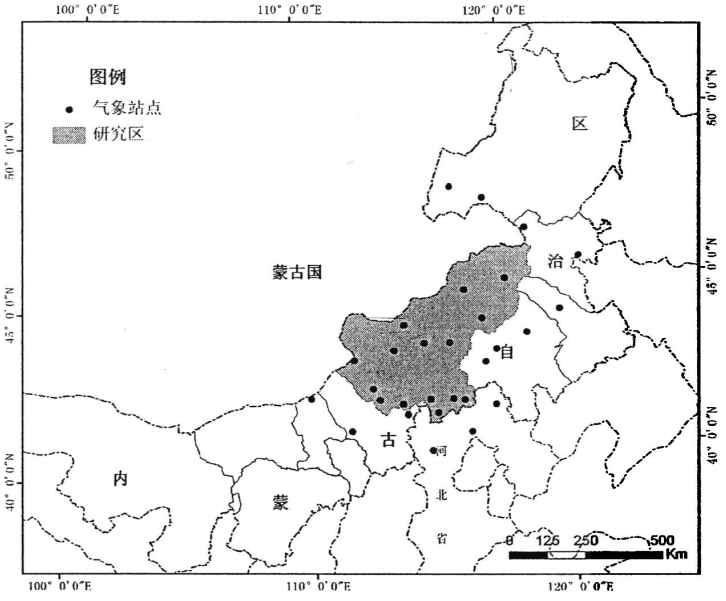

图 3-8 气象站点分布图

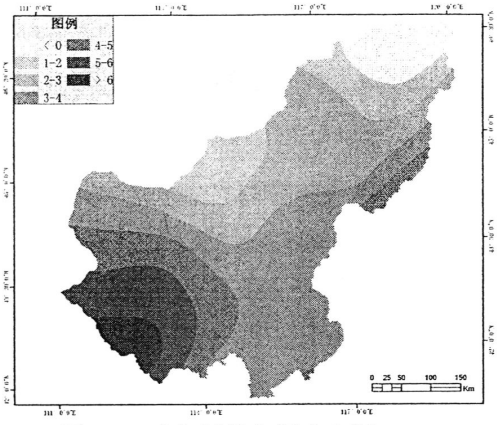

图 3-9 多年平均气温分布图

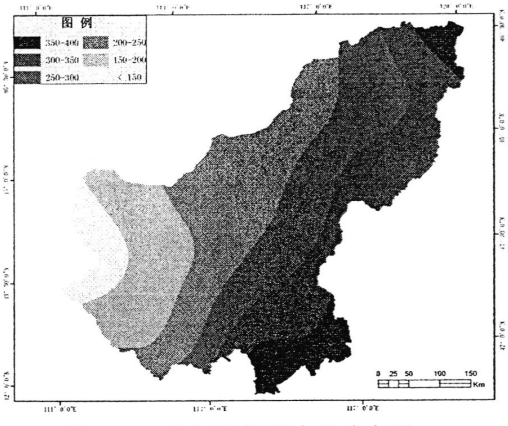

图 3-10 多年平均降水量分布图

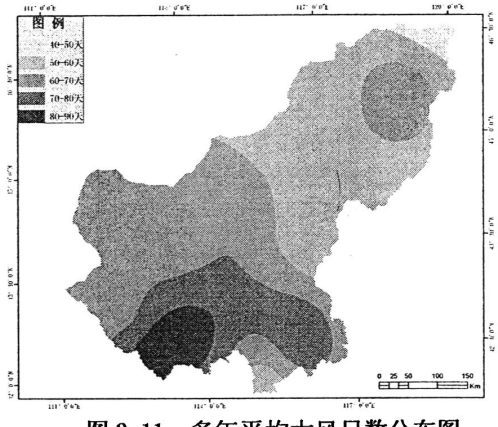

图 3-11 多年平均大风日数分布图

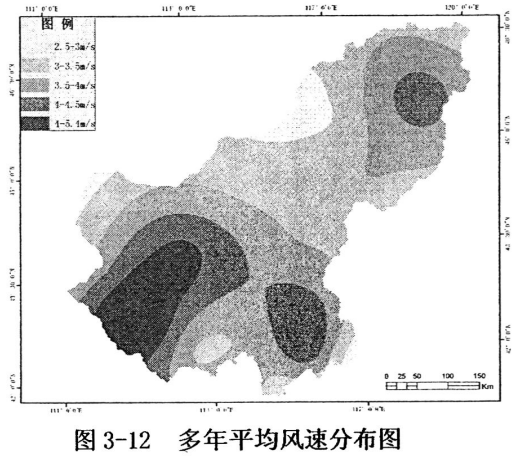

图 3-12 多年平均风速分布图

3.1.4 土地利用数据

本文所用的锡林郭勒盟 2009 年土地利用数据是基于国家科技支撑项目之锡林郭勒盟生态环境评价（2006BAC08B0504-01）项目结果数据。根据风沙灾害综合评价需要把土地利用类型分为 6 个一级类型的基础上把草地分为高覆盖度、中覆盖度和低覆盖度二级类型，未利用土地类型里的沙地也分出来，共分类为 10 个类型（图 3-13）。

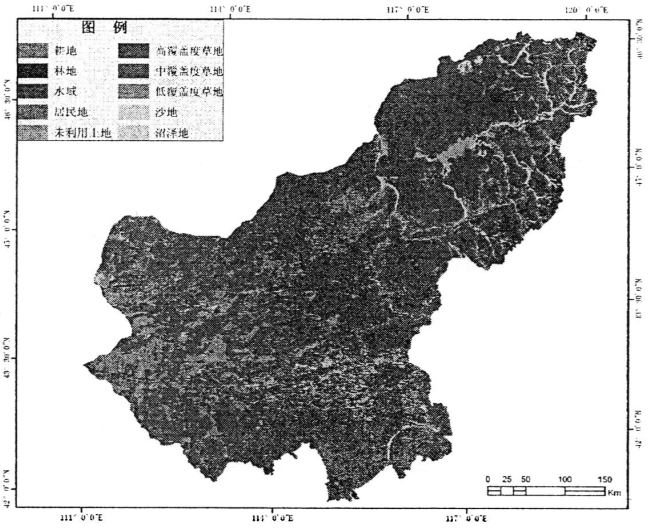

图 3-13 锡林郭勒盟土地利用类型分布图

3.1.5 社会统计数据

本文所用的社会经济数据来源于2011年内蒙古自治区社会经济统计年鉴,主要选取人口密度、耕地百分率、牲畜密度和地均第一产业生产总值等指标进行承灾体脆弱性评价（表 2-1）。

表 2-1 2011 年锡林郭勒盟社会统计数据

旗县	人口密度 (人/km²)	地均生产总值 (元/km²)	耕地面积 (公顷/km²)	牲畜密度 (只/km²)
二连浩特	7	8971	360	12
锡林浩特	12	46809	23370	57
阿巴嘎	2	14769	670	45
苏左旗	1	8472	790	27
苏右旗	3	11727	2690	39
东乌	2	22353	31230	43
西乌	3	35731	1890	63
太仆寺	61	230635	94470	107
镶黄旗	6	43750	3820	58
正白旗	12	51606	15040	75
正蓝旗	8	46055	19700	83
多伦县	27	155466	50720	155

3.2 评价过程

3.2.1 权重的确定

各评价指标对风沙灾害发生几率及其可能造成危害大小的影响程度存在差异，因此有必要对评价指标赋予权重。

首先，应用专家打分法确定孕灾环境指标的权重，结果表 2-2。其次，致灾因子指标之间相对重要性的比较，通过综合分析认为同一评价项目内各评价指标对评价目标的影响程度相似，因此分别赋予相同的权重。然后，应用主成分分析法在 SPSS 软件的支持下计算各因子主成分的贡献率和累积贡献率，最后依据主成分因子负荷量计算各因子对风沙灾害承灾体的作用大小，确定其权重。

表 2-2 风沙灾害孕灾环境指标权重

评价指标	土壤类型	植被覆盖度	气候类型	植被类型	地貌类型	地下水资源
权重	0.31	0.25	0.24	0.10	0.05	0.04

3.2.2 标准化处理

本文将所选 15 个评价指标的原始数值(得分)按照下式进行极差标准化：

$$\text{正向指标：}\ Z_{ij}=\frac{C_{ij}-\min(C_j)}{\max(C_j)-\min(C_j)} \qquad (3\text{-}2)$$

$$\text{负向指标：}\ Z_{ij}=\frac{\max(C_j)-(C_{ij})}{\max(C_j)-\min(C_j)} \qquad (3\text{-}3)$$

式中：C_{ij} 和 Z_{ij} 分别为第 i 年第 j 指标的原值和标准化后的数值：$\max(C_j)$ 和 $\min(C_j)$ 分别为第 j 指标的最大值和最小值。式(3-2)和(3-3)中对正向指标和负向指标采用不同公式进行标准化，所谓正向指标是指随着该指标值的增大风沙灾害危险性也高(例如风速)，而负向指标是指随着该指标值的增大而风沙灾害危险性减小(例如植被覆盖度)。各类指标标准化处理之后，原始评价指标数据的数值范围为 0～1 之间，并且分值越高说明对风沙灾害的影响越大，发生风沙灾害的危险性就越大。采用这种方法进行标准化处理既便于评价单元、评价指标之间相互比较，也避免了人为分级处理造成的原始信息丢失和数据的不连续。

3.2.3 定量与定性数据的叠加

评价指标中孕灾环境和致灾因子指标是自然界形成的数据，而承灾体是按研究区行政区域旗县市为基础单元统计的数据。要计算评价孕灾和致灾指标综合值就首先要利用 ArcGIS9.3 软件 Union 工具对已有的地形地貌、气象气候、土壤、植被等孕灾指标矢量数据相互进行空间叠加处理，确定评价基本单元。再用 ARC 模块对叠置生成的矢量进行拓扑处理。

3.2.4 加权综合法

对孕灾环境、致灾因子分别进行单项评价时，通过 GIS 运算功能，综合考虑各评价指标权重赋值，按照公式(3-4)计算各评价单元对应的同一评价项目所有指标综合得分。用公式表达为：

$$CV_j=\sum_{i=1}^{n} QV_{ij}WC_i \qquad (3\text{-}4)$$

式中 CV_j 是评价因子的总值，QV 是对于因子 j 的指标 i（$QV_{ij}\geqslant 0$），WC_i 是指标 i 的权重值（$0\leqslant WC_i\leqslant 1$），n 是评价指标个数[49]。

4 锡林郭勒盟风沙灾害孕灾环境敏感度评价

孕灾环境是指孕育灾害的自然环境，主要包括大气环境、天气系统、地形、地貌等。孕灾敏感性是指受到气象灾害威胁的所在地区外部环境对灾害或损害的敏感程度。在同等强度的灾害情况下，敏感程度越高，气象灾害所造成的破坏损失越严重，气象灾害的风险也越大[50]。锡林郭勒盟风沙灾害孕灾环境构成要素主要有气候、地貌、土壤、植被和水文等自然环境要素。

4.1 气候环境的敏感性

气候作为自然地理环境的重要组成部分，也是风沙灾害的主要孕灾环境。气温和降水是气候的主要因子，锡林郭勒盟属温带大陆性季风气候。降水自东向西、自南向北逐渐减少。降水量最大的地区是东部大兴安岭西麓以及南部连接阴山余脉地区，接近 400mm，但是西部地区年降水量还不到 200mm。气温的分布基本呈南高北低。气温最低的地区是北部中蒙边境地区和灰腾梁一带，年平均气温 0℃以下，并由此向西向南不断升高。气温年较差大，夏季温凉，秋季凉爽，霜雪早，冬季寒冷漫长。因此这两个气候因子形成了锡林郭勒盟风沙灾害的气候环境的敏感性由东往西逐渐变强的规律。

本文依据气候对风沙灾害的影响，参考内蒙古农业气候区划图，将锡林郭勒盟气候划分 5 个等级（图 3-1）。敏感性等级从小到大分别为：1 寒温湿润气候区（寒温湿润林业区）、2 温寒半湿润气候区（温寒半湿润林业区）、3 温凉半干旱气候区（包括：温凉半干旱林业区、温凉半干旱农业区、温凉半干旱牧业区）、4 温暖干旱气候区（包括：温暖干旱林业、温暖干旱牧业区、温暖干旱农业区）、5 温热极干旱气候区（温热极干旱牧业区）等。

4.2 地貌环境的敏感性

锡林郭勒盟是以高平原为主体的，兼有多种地貌单元的地区。中南部穿过的浑善达克沙地地貌将整个锡林郭勒盟分成了两大地貌单元，沙地以南为低山丘陵区，沙地以北为高平原地区。北部的高平原地区又可分为丘陵区、熔岩台地区和盆地三个小的地貌单元。风沙地貌广泛发育，连片或零星的风沙地貌普遍分布在该盟，不同的地貌单元对风沙灾害的影响程度有所不同，地形起伏的大小关系到水土流失的多寡。例如：平原地区地势低，起伏小，从而地下水位相对高，易于水土保持，敏感性较小；沙地地区的地表为沙质物，持水量小，易于受到水力、风力的侵蚀并提供风沙灾害的物质

来源容易发生风沙灾，从而敏感性较大。考虑到风沙灾害的特殊性用地貌外营力的组成部分划分锡林郭勒盟地区的地貌。

侵蚀剥蚀地貌主要分布在锡林郭勒盟西部地区，说明该地区已经被侵蚀很严重，对风沙灾害的敏感性较低，而风蚀风积地貌主要分布在锡林郭勒中部，浑善达克沙地是风沙灾害的主要物质来源，对风沙灾害的敏感性大。根据地貌外营力组成类型对风沙灾害的影响，分6个类型（图3-2），对风灾害的敏感程度从小到大为侵蚀剥蚀、干燥剥蚀、湖积、洪积、冲积、风蚀风积。

4.3 植被环境的敏感性

4.3.1 植被类型

植被是地表的保护层，植被是控制风沙扩散的主要因子之一。植被可以通过增加界面的粗糙度而减少风沙扩散动力，另一方面，植被通过改变土壤的水份状况，使表层土壤形成稳定性结构，从而增加土壤抗风蚀的能力，最终达到风沙扩散过程中减轻灾害的目的。锡林郭勒盟植被主要以草原植被为主，主要包括草甸草原、典型草原、荒漠草原、沙地植被等。森林面积占全盟面积的 1.99%，而草地面积占全盟面积的88.30%。植被类型和稀疏不同导致水土保持能力和养分含量也有差别。所以，不同的植被类型对风沙灾害孕灾环境的敏感性有着不同的影响。根据植被对风沙灾害的影响程度划分 7 个等级（图 3-3），植被类型的敏感性从小到大依次为：森林、草甸草原、湿地植被、典型草原、农作物、荒漠草原、沙地植被等。

4.3.2 植被覆盖度

因为植被覆盖度可以客观的反映地表植被覆盖状况因此可直接反映植被对风蚀的影响。大量研究表明土壤风蚀率与植被覆盖度呈负指数关系[51, 52]。植被覆盖度对风沙灾害的影响机理是植被盖度高增加土壤抗蚀力，降低风沙灾害的风险，当植被覆盖度下降时，地表裸露部分增加，植被对表层土壤的保护力降低。植被覆覆盖度越差，表层土壤为强风提供沙尘的可能性就越高从而发生风沙灾害的危险性就越高。

从季节上来看，夏季植被覆盖度与沙尘暴日数的相关关系比春季植被覆盖度更明显，因为夏季植被覆盖度的状况对第 2 年春季的植被覆盖产生较大的影响，从而加重风沙灾害的产生。从图（3-7）看出锡林郭勒盟植被覆盖度由东往西越来越低，因此植被环境的敏感性由东往西逐渐增强。

4.4 土壤环境的敏感性

锡林郭勒盟土壤种类较多，有 19 个一级类型，其性质和生产能力各不相同，不同土壤类型具有不同质地，土壤质地对风沙活动有直接影响，因为风沙过程在本质上是风力作用于沙质地表而产生的土壤风蚀、土壤肥力下降、风沙流、流沙堆积和沙丘移动过程。不同的土壤类型有不同的土壤环境，因此在相同的风力和植被条件下，不同类型土壤的起沙风速也不同。地表上覆盖的沙质疏松沉积物和肥沃程度影响风沙灾害。土壤瘠薄，保水蓄水能力差，容易造成风沙灾害。其中地带性土壤类型有黑钙土、栗钙土、棕钙土等。非地带性土壤类型有草甸土、沼泽土、风沙土、盐土、碱土等。其中沼泽土和灰色森林土等类型的自然肥沃力最高，水分条件良好，敏感性为低，黑钙土的自然肥力和持水能力次之，荒漠及其他裸土地和风沙土，其土壤主要来源于坡积物和风积物，植被生长稀疏，土壤保水保肥能力差，维持植被生长的能力极差，风沙灾害的敏感性高。

据各种土壤对风沙灾害的影响程度不同，土壤环境对风沙灾害的敏感性从小到大进行等级划分为 1 级包括：水域、沼泽土；2 级包括：灰色森林土、灰褐土、暗棕壤 3 级为草甸土；4 级包括：黑钙土、潮土和灌淤土；5 级包括栗钙土、粗骨土和石质土；6 级为棕钙土、灰漠土和棕漠土；7 级为碱土、盐土；8 级为风沙土（图 3-4）。

4.5 水环境的敏感性

地下水是指一定范围内多年平均地下潜水层所能得到的外来补给水量。锡林郭勒盟地下水资源量 34.7 亿 m3/a，地下水可开采量 11.1 亿 m3/a。锡林郭勒全盟属于降水量少，虽然境内河流多集中在东部和南部旗县，分属滦河水系、查干淖尔水系和乌拉盖河水系但是这些地表水域发育情况不好，相对而言地下水资源较丰富。地下水资源在空间分布上的差异也较大，该盟地下水资源中以富水程度弱为主，分布在整个锡林郭勒盟地区；富水强度强的主要分布在几个境内河流集中的东部和南部水系中。根据地下水资源对风沙灾害的影响划分 5 个等级（图 3-5），地下水对风沙灾害的敏感性从小到大依次为：富水程度极强、富水程度强、富水程度中等、富水程度弱、富水程度极弱。

4.6 风沙灾害孕灾环境敏感度评价

孕灾环境敏感度是指灾害发生的背景条件，即自然环境与人文环境的稳定程度。一般环境敏感度越大，越容易造成灾害。对上述锡林郭勒盟风沙灾害孕灾环境评价指

标进行分析和敏感性等级划分的基础上计算综合值。

在孕灾环境指标权重中土壤类型的权重最大，说明在风沙灾害中土壤环境的敏感性大，影响较大。其中土壤类型中的风沙土是风沙灾害的主要物质来源（分布在浑善达克沙地）而且锡林郭勒盟地区的风向是西北到东南的方向，考虑到这两个因素，不能直接用加权综合后的敏感度而需要做缓冲。做缓冲带时参考了海全胜的用 MODIS 数据的第 20、1、29 波段合成的最佳彩色沙尘暴影像图（图 4-1），确定沙尘暴发生的范围。

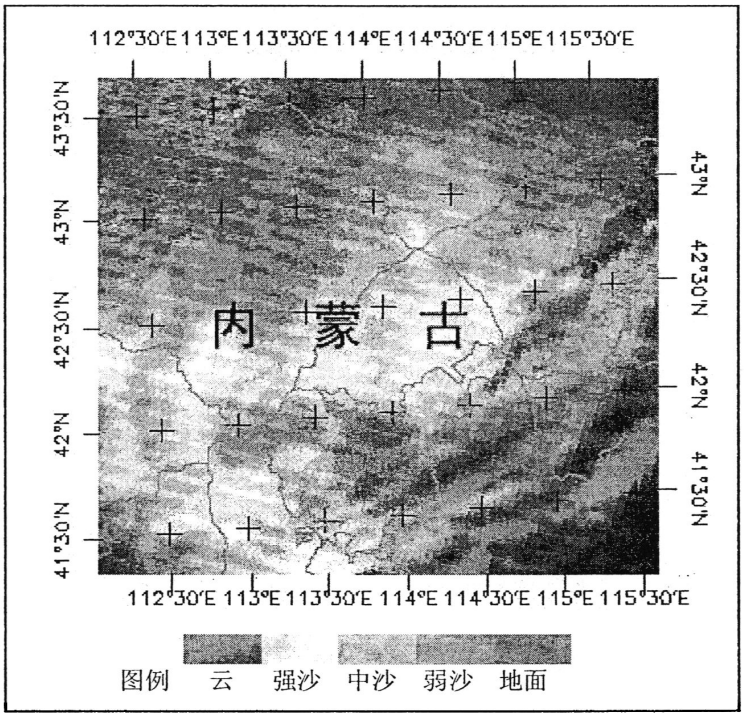

图 4-1 MODIS 数据 20、1、29 波段合成图

在 arcgis9.3 软件的支持下对孕灾环境敏感度综合值进行自然分等级（natural breaks）绘制了锡林郭勒盟风沙灾害孕灾环境敏感度图（图 4-2）。锡林郭勒盟自然条件复杂样，以低覆盖度为主，地表以富沙物质组成等原因加剧孕灾环境的不稳定性。锡林郭勒盟孕灾环境敏感度总体上由东北向西南逐渐增强，其分布如表 4-1 所示。锡林郭勒盟东部的敏感度较小；锡林郭勒盟中部敏感度中等；锡林郭勒盟西部敏感度较高。

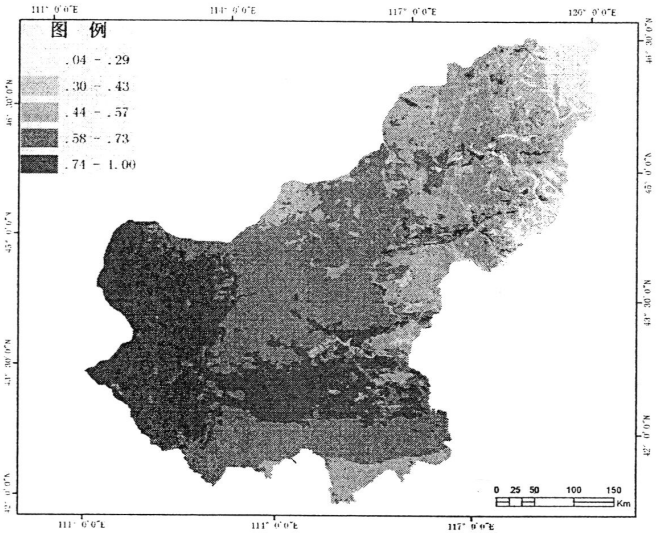

图 4-2 锡林郭勒盟风沙灾害孕灾环境敏感度分布图

表 4-1 孕灾环境敏感度分级标准和区域分布

等级	分级标准	区域分布	面积（%）
1	0.04～0.29	主要分布在东北部森林覆盖的地区和草甸草原区	4.4
2	0.30～0.43	主要分布在东部草甸草原分布的地区	7.6
3	0.44～0.57	主要分布在南部农作物中东部典型草原区	22.9
4	0.58～0.73	主要分布在中部典型草原区	37.1
5	0.74～1	主要分布在西部、中部荒漠草原区和沙地植被分布区	27.9

最后用 arcgis9.3 软件的 Union 工具将孕灾环境敏感度矢量文件与锡林郭勒盟旗县界线进行叠加，计算每个图斑的综合值和综合值所占的面积比例。因为每个综合值所体现的贡献率是不同的，所以把那些综合值乘以面积比例，最终得到每个旗县市的孕灾环境综合值，绘制锡林郭勒盟行政区域敏感度分布图（图 4-3）。

锡林郭勒盟风沙灾害孕灾环境敏感度西部明显高于东部地区。低敏感性区：主要分布在东乌珠穆沁旗和西乌珠穆沁旗。该区气候较湿润，植被以森林和草甸草原为主，土壤类型主要有非地带性草甸土、灰色森林土、灰褐土、暗棕壤、草甸土黑钙土和地带性黑钙土，植被覆盖度高，孕灾环境敏感性低，不容易孕育风沙灾害。较低感性区：主要分布在锡林浩特市和太仆寺旗。该区属于半湿润气候区，锡林浩特市的植被以草甸草原为主，太仆寺旗以农作物为主，植被覆盖度较高，孕灾环境敏感性较低，较不容易孕育风沙灾害。中敏感性区：主要分布在阿巴嘎旗、镶黄旗和多伦县。该区植被以草甸草原为主，中覆盖度为主，其中多伦县以农作物为主，

植被覆盖度较高，孕灾环境敏感性中等，较容易孕育风沙灾害。较高感性区。主要分布在正镶白旗和正蓝旗，以沙地植被为主，土壤类型以风沙土为主，富水程度低，孕灾环境敏感性较高，容易孕育风沙灾害。高敏感性区：主要分布在锡林郭勒盟西部，包括苏尼特右旗、苏尼特左旗和二连浩特市。该区属温暖干旱气候区，植被以荒漠草原，植被覆盖度很低，孕灾环境敏感性高，极容易孕育风沙灾害。

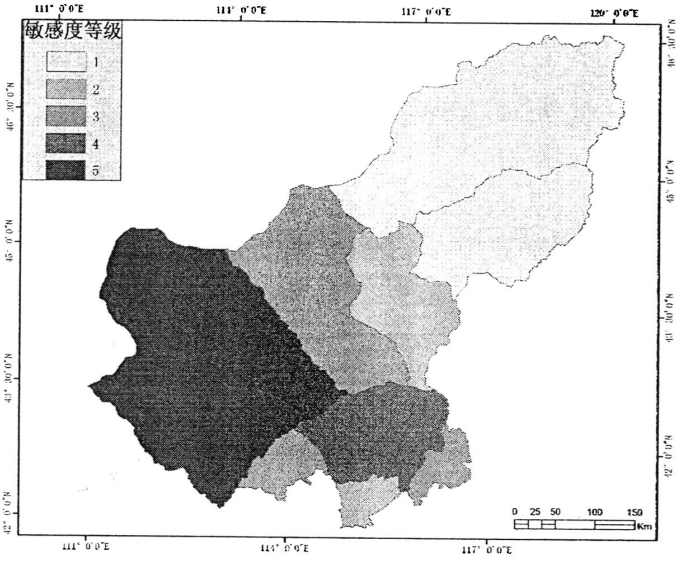

图 4-3 锡林郭勒盟行政区风沙灾害孕灾环境敏感度分布图

5 锡林郭勒盟风沙灾害致灾因子危险度评价

致灾因子是指造成灾害损失的因素，致灾因子的危险性是指造成灾害的变异程度。气温、降水、风速和大风日数等都是锡林郭勒盟风沙灾害的主要的致灾因子。其中大风日数、风速和沙化土地是最主要致灾因子。因为一般认为强风，沙源和热力不稳定是沙尘暴形成的3个基本条件。强风是沙尘暴形成的动力条件，沙源是它的物质基础，不稳定的空气状态是重要的局地热力条件。

5.1 气温

在干旱、半干旱中纬度地区，气温的高低直接影响蒸发量的多少，因此气温是影响风沙灾害的重要因素之一，从而进一步导致研究区荒漠化的加剧。锡林郭勒盟气温的分布基本呈从东向西、从北向南逐渐递增的特点（图3-9），气温等温线分布深受海陆分布与地形因素的影响。锡林郭勒盟气温最低的地区是北部中蒙边境地区和灰腾梁一带，年平均气温0℃以下，大部分地区气温都属于3-4℃带，越往西气温越高，苏尼特右旗、二连浩特市的年均气温最高，为大于5℃。

5.2 降水

降水量是衡量一个地区在某段时间内降水多少的数据。降水的多少会影响植被的生长，从而导致风沙灾害的发生与否。锡林郭勒草原地处中纬度西风气流带，属温带大陆性季风气候。降水自东向西、自南向北逐渐减少（图 3-10）。降水量最大的地区是东部大兴安岭西麓以及南部连接阴山余脉地区，接近400mm，苏尼特右旗西北部、二连浩特市与苏尼特左旗西部的年均降水量最少，均不足200mm，有的地区降水量不足150mm。总之，降水量的分布规律正好与气温年均值的分布规律相反。

5.3 风速

风速则是风力的直接反映。风是风蚀和沙粒移动动能的来源[53]。锡林郭勒盟的主要气候特点是风大、干旱、寒冷。从图（3-12）看出风速最高的地方集中在西南部地区，风速往东逐渐减小而乌拉盖地区出现有点高风速。

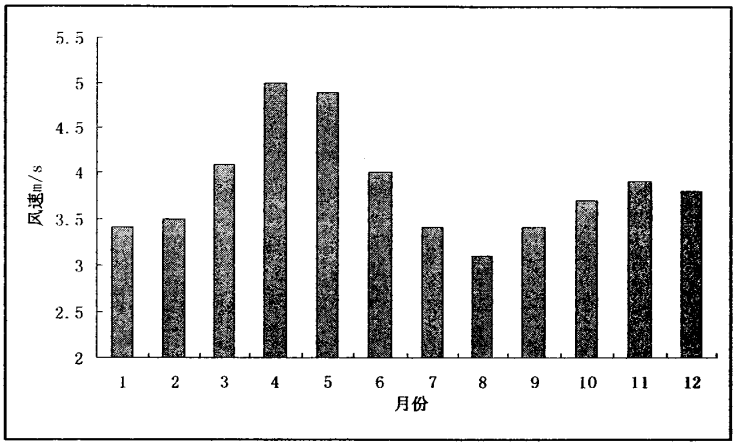

图 5-1 1970—2011 多年月平均风速图

由图 5-1 可见，风速大小年内分布不均匀，4 月份的多年平均风速最大，为 5m/s，8 月份多年平均风速最低，为 3.1m/s。从图上可以反映锡林郭勒地区大风主要发生在 4-5 月份，且发生比较集中，显然春季大风、空气干燥和地面土壤干燥等特点为风沙及风沙灾害的发生提供了有利的动力条件。

5.4 大风日数

大风是发生风沙天气不可缺少的气候因子，其中大风是沙尘暴形成的基本条件之一。据锡林郭勒盟地区 15 个气象站点的气象资料发现多年年平均大风日数 40 天以上，其规律和风速大体一致。大风日数最高地区在于苏尼特左旗的朱日和，年平均大风日数 80 天以上。在华北背部地区，内蒙古的朱日和由于特定的地理位置，经常受到西北路冷空气的袭击，又可受到强西路冷空气的影响，有着内蒙古平均大风日数（83.7d）和年平均风速（5.6m/s）之冠之称[54]，是华北北部强与特强沙尘暴最大的一个中心。

本文对锡林郭勒盟地区各旗县的监测数据按月份进行了统计分析。从图（5-2）看出一年中沙尘暴发生次数和大风日数的变化规律几乎一致，两组随机变量之间的相关系数达到 0.9293。大风日数可以很好的反映锡林郭勒地区沙尘暴频数，进一步说明了大风日数作为风沙灾害的致灾因子是正确和可信的。

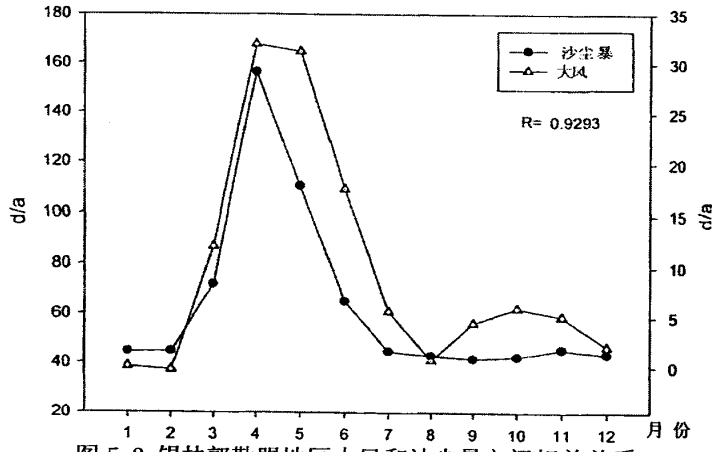

图 5-2 锡林郭勒盟地区大风和沙尘暴之间相关关系

5.5 土地利用强度

不同的土地利用类型和利用强度，其地表粗糙度不同，而粗糙度又是描述表面空气动力学的重要参数，表面粗糙度越大，空气运动越受阻。土地利用强度的不同是造成锡林郭勒盟地区各旗县风沙灾害危险差异的主要原因。研究土地利用类型对风沙灾害的影响尤为重要，是风沙灾害致灾因子之一。

从图 3-13 可看锡林郭勒盟土地利用类型的空间分布特征，锡林郭勒盟的土地利用类型除了太仆寺旗和多伦县有大面积的耕地外，其他旗县土地利用类型主要是牧草地，占全盟土地面积的 88.3%。其中高覆盖度草地占 40.1%，分布在东乌珠穆沁旗和西乌珠穆沁旗；中覆盖度草地占 44.1%，主要分布在阿巴嘎旗和苏尼特左旗；低覆盖度草地占 15.7%，主要分布在阿巴嘎旗、苏尼特左旗、苏尼特右旗和正镶白旗。整体上草地利用强度从东往西逐渐变大，对风沙灾害的影响也变大。说明风沙灾害危险性西部大于东部。

5.6 风沙灾害致灾因子危险度评价

综合考虑锡林郭勒盟风沙灾害致灾因子，选取 5 个致灾因子指标，在 ArcGIS 软件的支持下进行空间叠加分析并计算出每个图斑的综合值，再用自然分等级（natural breaks）法绘制锡林郭勒盟风沙灾害致灾因子危险度等级图（图 5-3）。风沙灾害致灾因子危险度各等级面积所占百分比如表 5-1。从结果看，锡林郭勒盟西部地区干旱少雨，气温高，平均风速较高以及大风日数每年 80 天以上，因此致灾因子危险性也高；向东北方向随着降水量绝对量增大和气温的减小以及风速逐渐变弱风沙灾害危险性也逐渐减小。在季节上冬春季降水量少，土壤干燥，大风频繁，土质疏松，易形成

风沙灾害，这些因素都提高风沙灾害发生的危险性。

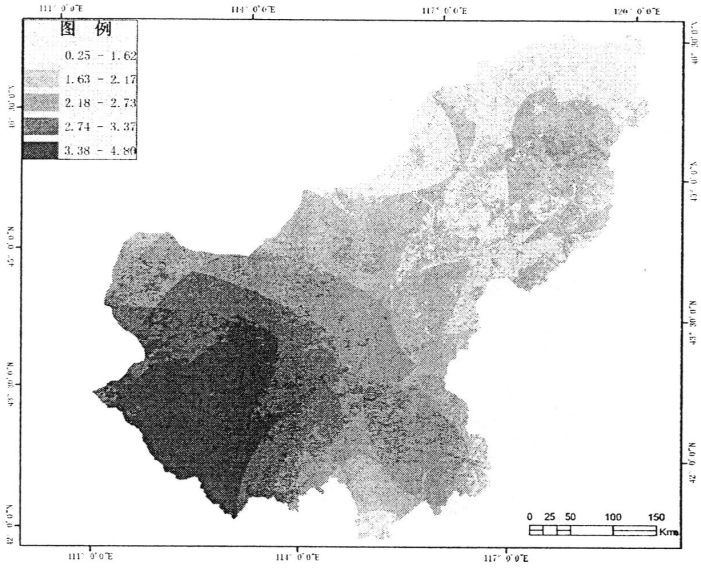

图 5-3 锡林郭勒盟风沙灾害致灾因子危险度评价图

表 5-1 致灾因子危险度分级标准和区域分布

等级	分级标准	区域分布	面积（%）
1	0.25～1.62	主要分布在东、西乌珠穆沁旗	22
2	1.63～2.17	主要分布在锡林浩特市、阿巴嘎旗	27.8
3	2.18～2.73	主要分布在阿巴嘎旗、正蓝旗和正镶白旗	20.8
4	2.74～3.37	主要分布在锡林郭勒盟西部苏尼特左旗	14.5
5	3.38～4.80	主要分布在苏尼特右旗和二连浩特市	14.9

利用 arcgis9.3 软件的 Union 工具将锡林郭勒盟风沙灾害致灾因子危险性评价图与锡林郭勒盟旗县界线进行叠加，统计计算出每个旗县市的综合值，绘制锡林郭勒盟行政区风沙灾害致灾因子危险度分布图（图 5-4）。锡林郭勒盟西乌珠穆沁旗的危险性最低，为 0.470，其次为东乌珠穆沁旗，为 0.491。这两个旗县的等级为一，为低危险。多伦县、太仆寺旗和锡林浩特市的危险性等级为二，较低危险。阿巴嘎旗、正向蓝旗、正镶白旗和镶黄旗的危险等级为三，是中度危险。苏尼特左旗和二连浩特的危险性等级为四，是较高度危险性。苏尼特右旗的危险等级为五，是高度危险性，是全盟危险性最高的旗县。

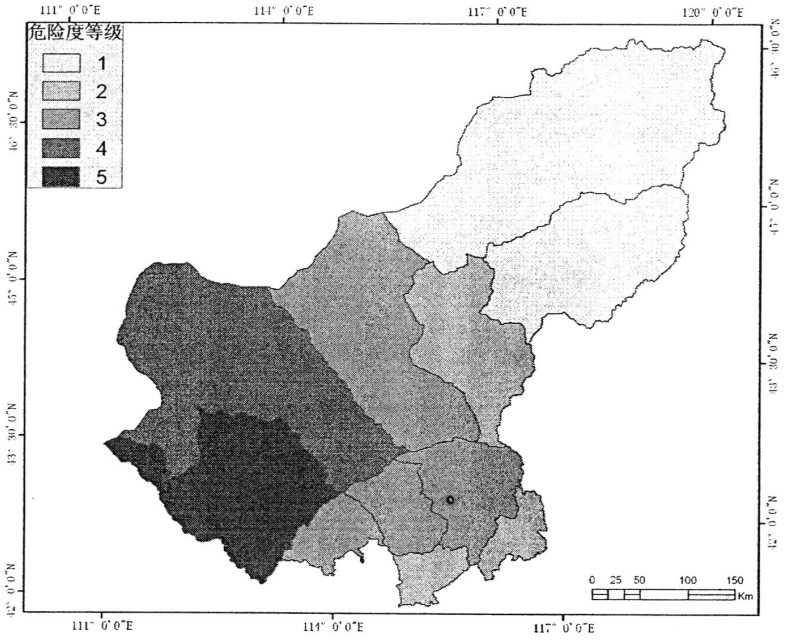

图 5-4 锡林郭勒盟行政区风沙灾害致灾因子危险度分布图

6 锡林郭勒盟风沙灾害承灾体脆弱度评价

风沙灾害承灾体是指风沙灾害作用的对象，即受风沙灾害的灾体。致灾因子只有对承灾体造成损失时才形成灾害。不同特性的承灾体对同等灾害的敏感性不同，其抵制或恢复的内在承受能力不同，造成的灾害损失也不相同，它反映了区域对于灾害损失的敏感程度。锡林郭勒盟以畜牧业为主，多伦县和太仆寺旗以农业为主。风沙灾害承灾体脆弱性大体上可分为生命脆弱性和经济脆弱性，生命脆弱性以人口密度指标表示，经济脆弱性以地均耕地面积、牲畜密度和地均第一产业生产值等指标表示。

同时考虑到数据的易得、系统和可操作性，本文选取人口密度、耕地百分率、地均牲畜头数和地均第一产业生产总值等指标进行锡林郭勒盟风沙灾害承灾体脆弱性评价。如果某旗县地均第一产业总值高、人口密度大、牲畜头数越多，其暴露性越大，其受风沙灾害的影响所造成的损失也越大。

6.1 生命脆弱性评价

自然现象的异常对人类的生存生活和生产构成危害才叫灾害，所以生命是自然灾害系统的主要承灾体。锡林郭勒盟特殊的自然条件，资源、环境承灾力等因素决定了人口的集聚。太仆寺旗人口最密度最高，为 60 / ㎡人以上，说明该旗生命脆弱性高，容易造成生命损失，多伦县和锡林郭勒市地区的也较高，每平方米 11～30 人，脆弱性较高；锡林郭勒盟其他各旗县市人口密度相对低，苏尼特左旗的最低，为每平方米 1 人，说明该地区的生命脆弱性低，不容易造成生命损失（图 6-1）。

6.2 经济脆弱性评价

6.2.1 地均耕地面积

锡林郭勒盟受风沙灾害的重点对象是农业和牧业。农业承灾体的地区差异，可以以耕地面积反映。锡林郭勒盟耕地分布的不均衡反映着农业生产水平在地区上的不平衡性。太仆寺旗和多伦县的农业发展水平高，是锡林郭勒盟的主要农业区。而其他牧业旗县耕地面积都较小。由于承灾体的地区差异，耕作业的受灾重点在锡林郭勒盟南部，该地区的脆弱性较高，容易造成农业经济损失（图6-2）。

6.2.2 牲畜密度

牧业承灾体的地区差异，可以以牲畜密度反映。锡林郭勒盟是内蒙古自治区重要的畜牧业区，虽然广大草原为畜牧业的基地，由于人口、资源方面的需求和饮水、饲草等条件的限制，牲畜分布地区差异较悬殊。东乌旗的牲畜头数最多，160 万只以上；二连浩特和太仆寺旗的最少，不到 10 万只。但从牲畜密度来看镶黄旗最高，地均牲畜头数 40 头以上，该旗脆弱性最高；二连浩特最小，地均牲畜头数 10 头左右，脆弱性最低（图 6-3）。

6.2.3 地均第一产业生产总值

区域国内生产总值是一个地区在一定时期内国民经济各方面的综合发展状况，同时反映该地区国民经济受自然灾害时的可能造成损失程度的敏感度。风沙灾害主要对第一产业生产造成损失，因此风沙灾害对区域国内生产总的影响可以对第一产业生产总值的影响体现。地均第一产业总值分布很大程度上与人口密度分布相一致，其中太仆寺旗和多伦县地均第一产业总值较高，20 万元左右，脆弱度为高；二连浩特市和苏尼特左旗的地均第一产业总值最低，不到 1 万元，脆弱度为低（图 6-4）。

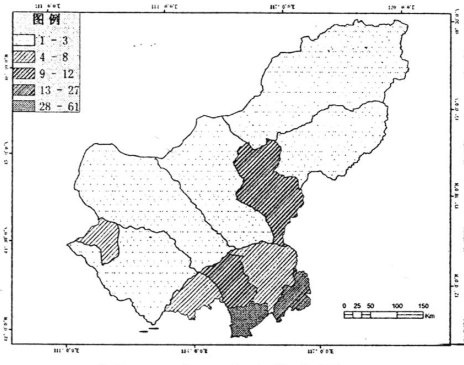

图 6-1 人口密度分布图

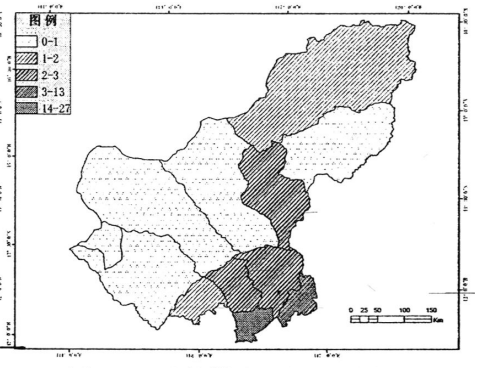

图 6-2　地均耕地面积分布图

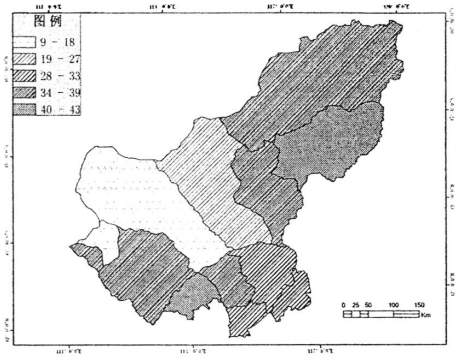

图 6-3 牲畜密度分布图

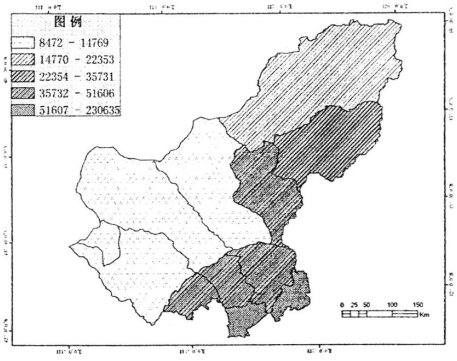

图 6-4 地均第一产业生产值分布图

6.3 风沙灾害承灾体脆弱度评价

承灾体的脆弱性也叫易损性，是指在给定的危险地区存在的所有财产由于危险因素而造成伤害或损失的容易程度，脆弱性越大损失也越大。本文利 spss13.0 软件对风沙灾害承灾体指标进行主成分分析，计算各旗县市的承灾体脆弱度，绘制锡林郭勒盟风沙灾害承灾体脆弱性评价图（图 6-5）。太仆寺旗的脆弱度在全盟最高，综合评价值 1.96，因为该旗县位于环境脆弱带，人口密度大；多伦县的脆弱度也较高，为 0.96；镶黄旗、锡林浩特市、正蓝旗、和西乌珠穆沁旗的脆弱度中等，为 -0.29—0.05；苏尼特左旗和二连浩特市的脆弱性最小，为-0.83—0.98；总体上，锡林郭勒盟风沙灾害承灾体脆弱性东部大于西部地区，农区高于牧区。

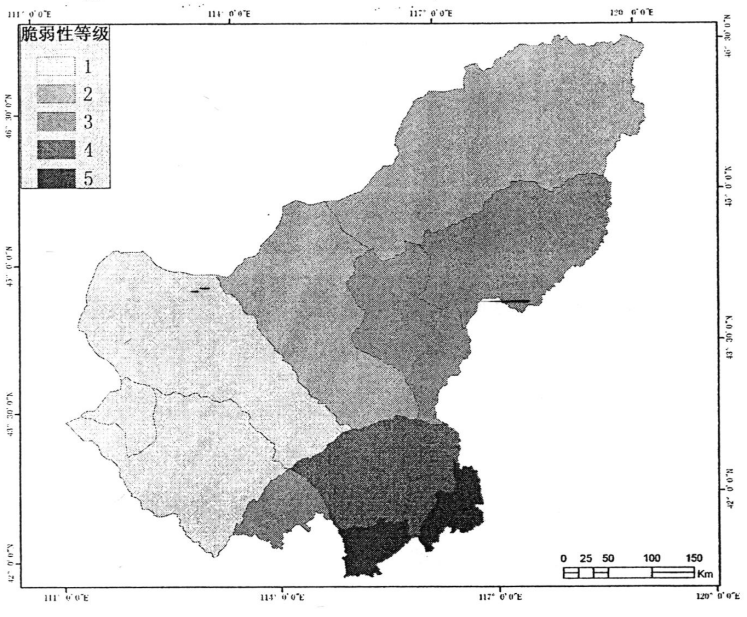

图 6-5 锡林郭勒盟风沙灾害承灾体脆弱度分布图

7 锡林郭勒盟风沙灾害综合评价与分区

风沙灾害是因风沙活动或风沙现象所造成的灾害，根据史培军的灾害系统理论，灾害系统是由孕灾环境、致灾因子、承灾体与灾情共同组成具有复杂特性的特殊的变异系统。因此风沙灾害系统的综合评价需要考虑孕灾环境的敏感度、致灾因子的危险度和承灾体脆弱度等。锡林郭勒盟地域广阔，孕灾环境、致灾因子和承灾体有明显的区域差异。风沙灾害综合评价对于因地制宜，经济而有效的防灾和减灾，最大限度地降低风沙灾造成的损失，发展区域经济有着非常重要的指导意义。本文从协同学的角度，利用耦合关系建立风沙灾害综合评价模型，对锡林郭勒盟风沙灾害进行综合评价。

7.1 风沙灾害综合评价

协调是指系统内部各要素的良性相互关系，协调度是度量系统之间或系统内部要素之间协调状况好坏的定量指标。协调度是一个时间概念，表现为某一状态的值，它是发展的必要条件。耦合度是描述系统或要素彼此相互作用影响的程度，从协同学的角度看，耦合作用和耦合程度决定了系统在达到临界区域时走向何种序与结构，或称决定了系统由无序走向有序的趋势。系统由无序走向有序机理的关键在于系统内部序参量之间的协同作用，它左右着系统相变的特征与规律，耦合度正是反映这种协同作用的度量[55-58]。风沙灾害孕灾环境、致灾因子和承灾体三个子系统相互作用下的耦合关系能反应风沙灾害系统风险类型与程度。以此为理论指导，修订毕军、张晓东、李国彬[59,60,61]等的模型，构建了锡林郭勒盟风沙灾害综合评价模型：其关系式为：

$$C_{XYZ}=\frac{(x+y+z)}{\sqrt{(x^2+y^2+z^2)}} \tag{7-1}$$

式中：x 为孕灾环境敏感度；y 为致灾因子危险度；z 为承灾体脆弱度；C_{XYZ} 为协调系数，$-1.73\leqslant C_{XYZ}\leqslant 1.73$。

当 x、y、z 正值且相等时，C_{XYZ} 值最大，为 1.73；反之，若 x、y、z 均为负值且相等时，C_{XYZ} 值最小，为-1.73；其他任何情形介于二者之间。C_{XYZ} 值越小，则风沙灾害三个子系统的敏感度、危险度和脆弱度越小，灾害系统内部协调型越好，综合风险程度越小，往有序方向发展，反之亦然。据上述划分标准将协调度划分为：-1.73～-0.87 为协调发展型，-0.87～0 为不协调发展型，0～0.87 为不协调灾害型，0.87～1.73 为协同灾害型。

将锡林郭勒盟风沙灾害三个子系统评价的结果根据协调模型计算各旗县市的综合协调系数，按以上协调关系阈值划分绘制锡林郭勒盟行政区域风沙灾害协调类型分布图（图 7-1）。

协调发展型（$-1.73 \leqslant C_{XYZ} < -0.87$）区域主要分布在锡林郭勒盟东部草甸草原及典型草原区，气候较为湿润，降水较丰富，山地和丘陵地貌为主，自然环境条件为优越。孕灾环境敏感度为全盟最小，致灾因子危险性为也全盟最小，承灾体脆弱性中等。该区占全盟面积的 34.28%，为面积最大的类型区。

不协调发展型（$-0.87 \leqslant C_{XYZ} < 0$）区域主要分布在锡林郭勒盟中部地区，该区植被以典型草原为主，气候主要以温暖干旱气候区，土壤类型主要以栗钙土为主，降水量较多，生态环境相对好。该区大部分地区孕灾环境敏感性为中等，致灾因子危险性较低，承灾体脆弱性中等。该区占全盟面积的 21.2%。

不协调灾害型（$0 \leqslant C_{XYZ} < 0.87$）区域主要分布在锡林郭勒盟南部和西北部分，分别是苏尼特左旗，镶黄旗，太仆寺旗和多伦县。其中虽然多伦县和太仆寺旗降水量较高，植被覆盖度较高，孕灾环境敏感度和致灾因子危险度较低，但是人口较多，承灾体脆弱性大。而苏尼特左旗和镶黄旗是降水量少，植被覆盖度低，致灾因子危险性高，承灾体脆弱性低。该区域占全盟面积的 23.2%。

协同灾害型（$-0.87 \leqslant C_{XYZ} < -1.73$）区域主要分布在锡林郭勒盟中西部地区的苏尼特右旗、二连浩特、正蓝旗和正镶白旗。该区主要以高平原地貌为主，降水量较低，植被以荒漠草原为主，土壤类型以风沙土为主等，孕灾环境敏感度较高，致灾因子危险性较高，承灾体脆弱性低。该区面积占全盟面积的 21.3%。

总之，锡林郭勒盟风沙灾害系统中属发展型区面积占全研究区面积的 55.5%；属灾害型地区占全研究区面积的 44.5%。可见，锡林郭勒盟风沙灾害子系统关系中，灾害型近占全锡林郭勒盟面积的一半，政府和有关部门应重视防范和重点采取防治措施。

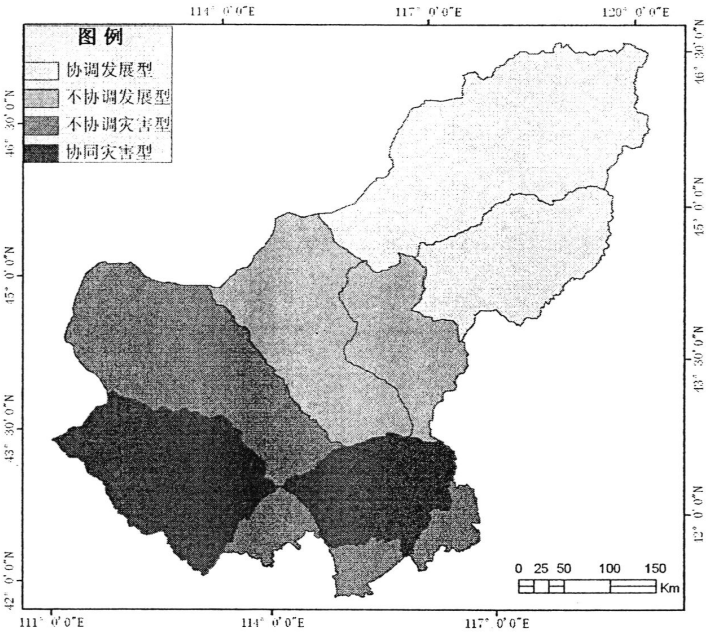

图 7-1 锡林郭勒盟风沙灾害系统协调类型分布图

7.2 风沙灾害分区评价

从风沙灾害系统协调系数的大小可知风沙灾害系统的有序与否外从孕灾环境敏感度、致灾因子危险度和承灾体脆弱度的正负值可以判别三个子系统的耦合关系变化，从而可知其共同影响下的社会、经济、生态系统的可持续与否。

根据协调模型中的 x、y、z 值的变化，选其最大值和大于 0 的因子作为划分亚类型的阈值。当最大值小于 0 为低，0～0.5 为中，0.5～1 高，协调亚类型名称中所携带的因子为其最大值的因子。同样除最大值外某一因子为大于 0 也分低、中、高、三个等级，且将按从大到小顺序出现在协调亚类型名称。根据上述划分标准C_{XYZ}可分为 4 个协调关系类型区和 9 个协调关系亚类型区，如表 7-1 。

表 7-1 锡林郭勒盟风沙灾害系统协调关系判别标准和协调类型及所属旗县市

协调类型标准	协调类型	协调亚类标准	协调亚类型	所属旗县市
-1.73≤C_{XYZ}<-0.87	协调发展型	x、y、z<0 max(x，y，z)= z	低脆弱协调发展型	东乌珠穆沁旗 西乌珠穆沁旗

$-0.87 \leqslant C_{XYZ} < 0$	不协调发展型	y、z<0，0.5>x>0	中敏感度不协调发展型	阿巴嘎旗
		x、y<0，0.5>z>0	中脆弱度不协调发展型	锡林浩特市
$0 \leqslant C_{XYZ} < 0.87$	不协调灾害型	0.5>z>0，x、y<0	中脆弱度不协调灾害型	多伦县
		x、y<0，1>z>0.5	高脆弱度不协调灾害型	太仆寺旗
		z<0，0.5>x、y>0	中危险度中敏感度不协调灾害型	苏尼特左旗 镶黄旗
$0.87 \leqslant C_{XYZ} < 1.73$	协同灾害型	z<0，0.5>x、y>0	中敏感度中危险度协同灾害型	二连浩特市 正蓝旗
		z<0，0.5>x>0，1>y>0.5	中敏感度高危险度协同灾害型	苏尼特右旗
		0.5>x、y、z>0 max(x，y，z)= x	中敏感度中危险度中脆弱度协同灾害型	正镶白旗

1 协调发展型区

该区包括 2 个旗县市，分别是东乌珠穆沁旗和西乌珠穆沁旗。该区的候气较湿润，植被类型以草甸草原、典型草原为主，植被覆盖度高，风沙灾害孕灾环境敏感性为低；平均降水量较多，气温较低，多年平均风速低，土地利用强度较低，多年平均大风日数较少，致灾因子危险性为低；人口密度低，耕地占百分比很少主要以畜牧业为主，承灾体脆弱度为弱。属低脆弱协调发展型，风沙灾害系统最稳定，不仅系统内部最协调，而且对社会、经济、生态环境带来的受风沙灾害影响为最小。其中东乌珠穆沁旗的协调系数在全盟最小，为最协调且危险性最低的旗县。应科学合理地制定草场利用规划和实施方案，进一步保护好生态环境，使生态环境和社会经济的发展都得到更好的效益。

2 不协调发展型区

该区包括 2 个旗县市，分别是锡林浩特市和阿巴嘎旗。锡林浩特市植被以典型草原为主，湿地和林地面积少，植被覆盖度为中等，孕灾环境敏感度小于 0，敏感性较低；降水量较高，多年平均风速较小，大风日数为 50-60 天/年，致灾因子危

险度小于 0，危险性较低；锡林郭勒市作为该盟的盟政府所在地，城市化率较高，人口密度较集中，地均第一产业生产值较高，承灾体脆弱性 0-0.5 之间，属于中度脆弱度不协调发展型区。应通过城市化来减轻自然环境的压力，减少对草原破碎化的影响和大自然的依赖程度，另一方面合理利用水资源，保护和改善生态环境。改变承灾体方面入手改善，是可以发展的

阿巴嘎旗气候较干旱，以典型草原为主，植被覆盖度以中覆盖度为主，孕灾环境敏感度在 0-0.5 之间，敏感性为中；多年平均年降水量 200-250mm，多年平均风速较低，致灾因子危险度小于 0，危险性较低；该旗主要以畜牧业为主，地均耕地面积小，人口密度较小，承灾体脆弱度小于 0，属中敏感度不协调型发展型区。该旗的农牧业生产应在稳定规模的基础上提高草原植被覆盖度，逐步改善孕灾环境，进一步保护生态环境。

3 不协调灾害型区

该区包括 4 个旗县市，分别是太仆寺旗、多伦县、镶黄旗和苏尼特左旗。太仆寺旗的植被类型以农作物为主,植被覆盖度较高，孕灾环境敏感度较低；多年平均年降水量 350mm—400mm，平均风速较低，致灾因子危险度也较低；但是该旗地均第一产业生产值、地均耕地面积、人口密度和牲畜密度等承灾体指标均全盟最大，人类干扰很明显，承灾体脆弱度 0.5-1 之间，脆弱性强，属于高脆弱度不协调灾害型区。应该适当的退耕还林还草，减少载畜量，减少人类干扰度，改善生态环境。

多伦县气候湿润，气温较低，植被覆盖度高，但是该县是锡林郭勒盟的农业区，耕地最多，牲畜密度最大。孕灾环境敏感度和致灾因子危险度均较低，但是承灾体脆弱度 0-0.5 之间，属中等脆弱度不协调灾害型区。应保证和建设基本农田的基础上，根据当地的生态环境调整耕作面积和土地利用类型结构，减少载畜量，进一步保护孕灾环境生态环境。

镶黄旗地处锡林郭勒盟南部，气候较干旱，而且浑善达克沙地从北部贯穿该区，植被类型以沙地植被为主；多年平均大风日数 70—80 天/年，是大风日数较多的地区。苏尼特左旗地处锡林郭勒盟西北部，南部分布有浑善达克沙地的西北缘，气候较干旱，植被以荒漠草原为主，是低覆盖度植被，土壤以棕钙土为主；气温较高，降水量很少，多年平均年降水量只 150mm—200mm，多年平均风速大于 4.5m/s，是全盟风速最大。这两个旗县的孕灾环境敏感度和致灾因子危险度均 0-0.5 之间，但是人口密度较低，地均耕地面积少，承灾体脆弱度低，属于中危险度中敏感度不协调灾害型区。在这两个旗县应合理利用有限的水资源，提高人均资源量，邻近沙地

的地区应围封起来，然后进行有计划的围栏封育，保护生态环境的同时促进经济发展。应有计划的人工种树种草等来保护草场，改善生态环境。荒漠草原自然环境条件、植被自我恢复能力是最差的，植被恢复建设难度较高，所以应该加强建设力度、保护力度。

4 协同灾害区

二连浩特市位于锡林郭勒盟西部，阴山山脉东北侧，气候属于温热极干旱气候区，植被类型是荒漠草原，植被覆盖度低，孕灾环境敏感性 0-0.5 之间；降水量很少，多年平均量都不到 150mm，气温又是最高的地区，多年平均年大风日数 60-70 天，致灾因子危险度 0-0.5 之间；但人口密度低，牲畜头数也低，承灾体脆弱度在全盟旗县内最低，属于中敏感度中危险度协同灾害型区。应通过对草场采取围封禁牧、春季休牧、划区轮牧等措施，使植被等得到有效的恢复。

苏尼特右旗位于锡林郭勒盟西部，浑善达克沙地贯穿苏尼特右旗中间。气候属于温热干旱气候区，植被类型以荒漠草原为主，草地植被覆盖低，孕灾环境敏感度 0-0.5 之间；降水量少，多年平均量 150-200mm，气温较高，多年平均年大风日数 60—70 天，致灾因子危险度 0.5-1 之间，危险度在全盟最高；人口密度、牲畜密度、地均第一产业生产值和耕地百分比等指标均最低，承灾体脆弱度较低，属于中敏感度高危险度协同灾害型区。应通过对草场采取围封禁牧、春季休牧、划区轮牧等措施，使植被等得到有效的恢复，草地生产力也有所提高，顺便从致灾因子方面采取尽可能的减灾的措施。

正镶白旗地处锡林郭勒市南部，气候较干旱，而且浑善达克沙地从北部贯穿该区，植被类型以沙地植被为主，土壤类型以风沙土为主，草地以中覆盖度为主，孕灾环境敏感度 0-0.5 之间；多年平均大风日数为 70-80 天/年，土地利用强度为中等，致灾因子危险度 0-0.5 之间；人口密度等承灾体指标在全盟排中等，属于中敏感度中危险度中脆弱度协同灾害型区。应把邻近沙地的地区应围封起来，然后进行有计划的围栏封育，保护生态环境的同时促进经济发展。

正蓝旗地处锡林郭勒盟中南部，该旗大部分地区处在浑善达克沙地境内，植被以沙地植被为主，土壤类型以风沙土为主，孕灾环境敏感度为中等；多年平均风速较大，多年平均年大风日数 70-80 天，致灾因子危险度为中等；地均第一产业生产值、耕地百分比和牲畜密度等承灾体对象都在锡林郭勒盟内排中等，虽然承灾体脆弱度小于 0，但很接近 0，所以最后的协调系数为最高，属于全盟危险性最高。不利于大强度的开发或发展，政府和有关部分应加强重视和保护生态环境的力度，应

当制定相应的导向性、鼓励政策，最好应明确谁治理谁收益。通过实施和采取各种治沙措施，如“围封禁牧”等，为生态环境的根本好转创造有利条件。防止草原退化，恢复草原植被从而稳定发展畜牧业经济，保护和建设生态环境。

7.3 锡林郭勒盟风沙灾害防治对策

风沙灾害的形成主要有自然因素和人为因素两方面的原因。就目前人类的科技水平来说，对天气系统（致灾因子）的影响是微不足道的，恶劣的天气条件目前人类是无法改变的。但是可以采取综合措施遏止沙漠化的速度和进程，增加植被覆盖度等措施改善孕灾环境，进而减少风沙灾害。根据风沙灾害综合评价结论，提出以下几点建议，供参考：

1 锡林郭勒盟孕灾环境敏感度高地区往往为环境脆弱区，改善该地区下垫面状况是减轻风沙灾害孕灾环境敏感性的最有效和最直接的方法，因此继续实行退耕还林还草工程、围栏封围等政策，增加植被覆盖度，改善生态环境。

2 锡林郭勒盟致灾因子危险性高区水资源不足，因此，合理利用该区有限的水资源，也是恢复植被的关键所在和当务之急。针对该盟水资源分布特点和水的蓄积量，加强水利工程，应该从开发地下水资源和积蓄雨水方面加以考虑；同时调整土地利用方式和牧草地利用强度。

3 锡林郭勒盟承灾体脆弱度强区一方面保护和建设基本农田、基本草牧场的基础上，应加速农业现代化建设，通过城市化途径减轻承灾力；另一方面，转变生产经营方式，改变产业结构，从产业结构由以第一产业为主导的产业结构逐步发展成，以第一产业为特色产业，二三产业并重发展，减轻草原生态系统的承灾力，减少放牧对草原生态系统的压力，对抑制风沙灾害的发生起到积极作用，总之，降低承灾体的脆弱性是抗灾减灾的重要途径。

8 结论与讨论

8.1 结论

本文以自然灾害系统理论和区域灾害理论为基础,应用RS和GIS技术手段,通过对风沙灾害特性的分析，从风沙灾害孕灾环境、致灾因子和承灾体等三方面建立风沙灾害综合评价指标体系，并对锡林郭勒盟风沙灾害子系统进行评价，在此基础上用协调模型对风沙灾害进行综合评价，综合分区分析，全文结论如下：

1．选取锡林郭勒盟风沙灾害孕灾环境评价指标，对其进行等级划分，由于风沙灾害的孕灾环境较为复杂,选择指标繁多,各指标的权重较难确定,本文采取专家打分法,确定孕灾环境指标的权重，用加权综合法计算综合值并对孕灾环境敏感度进行综合评价。研究结果为：锡林郭勒盟风沙灾害孕灾环境敏感度总体上由东北向西南逐渐增强，有南部和背部好于中部，东部好于西部的特点。这与该地的地势地貌分布和气候条件基本一致。孕灾环境最好的旗县有东乌珠穆沁旗和西乌珠穆沁旗；最差的是苏尼特右旗、二连浩特市。东部受大兴安岭和阴山余脉影响的地区，植被以森林植被、草甸草原和典型草原为主，植被覆盖度高，土壤类型以草甸土、黑钙土和栗钙土为主而且湿地面积也较高，风沙灾害孕灾环境很好；西部地处阴山山脉东北侧，植被以荒漠草原为主，植被覆盖低，土壤抗蚀性能力很低，土壤以棕钙土为主，风沙灾害孕灾环境最差的地区；此外受浑善达克沙地的影响锡林郭勒市南部正蓝旗、正白旗和镶黄旗的孕灾环境敏感度较高。

2. 搜集和整理锡林郭勒盟和周边地区 29 个气象观测点 1970～2011 年的逐月气温、降水、风速和大风日数等数据，在 ArcGIS9.3 软件里用养条函数（spline）法做空间插值，用加权综合法计算综合值并对孕灾环境敏感度进行综合评价。研究结果为：锡林郭勒盟风沙灾害致灾因子危险性总体上由东北向西南逐渐增强，总体规律是西部干旱降水量少，气温也高，风速较大，大风日数多，致灾因子危险性也高；向东北方向随着降水量增大，气温降低，风速减小和大风日数的减少，风沙灾害危险性也逐渐减小。其中东乌珠穆沁旗风沙灾害危险性全盟最小；苏尼特右旗风沙灾害危险性全区最高。

3.选取人口密度、地均第一产业生产值、耕地百分比、牲畜密度等风沙灾害承灾体评价指标，利用主成分分析法综合评价承灾体脆弱性。结果为：锡林郭勒盟风沙灾害承灾体脆弱度高的区域集中分布在生态环境脆弱，人口密度大的南部半农半牧旗和农业县。其中太仆寺旗的脆弱性在全盟最高，多伦县的脆弱性也较高，镶黄

旗、锡林浩特市、正蓝旗和西乌珠穆沁旗的脆弱度中等，苏尼特左旗和二连浩特市的脆弱性最小，总体上，锡林郭勒盟风沙灾害承灾体脆弱性大致东部大于西部地区，农区高于牧区。

4 对锡林郭勒盟风沙灾害孕灾环境敏感性、致灾因子危险性和承灾体的脆弱性评价的基础上计算风沙灾害系统的协调度并综合评价风沙灾害。将可持续发展耦合协调分析理论与方法引用到风沙灾害综合评价研究领域中，分析风沙灾害各子系统之间的组合形式，耦合程度协调平衡状况。研究结果为：锡林郭勒盟风沙灾害系统中属协调发展型和不协调发展型地区面积占全盟总面积的 55.5%；属不协调灾害型和协同灾害型地区占全盟总面积的 44.5%。可见，锡林郭勒盟风沙灾害子系统关系中，灾害型近占一半，政府和有关部门应重视防范措施。综合分析的基础上将锡林郭勒盟风沙灾害系统分为 4 个一级类型区和 9 个亚类型区，分析其风沙灾害特征，提出相应的措施。

8.2 问题与讨论

（1）灾害评价是一项十分复杂的工作，目前国内外对于风沙灾害综合评价的研究相对其他灾害研究而言较少，可遵循和借鉴的理论和方法甚少，资料来源不足的情况下本文尝试在前人的研究基础上，根据区域灾害理论与协调模型，结合 GIS 和 RS 等技术和方法，综合评价锡林郭勒盟风沙灾害。研究成果将为当地防治风沙灾害提供科学理论依据，具有一定的理论意义和现实意义。

（2）本文综合评价中虽然有些指标（土壤湿度、积雪覆盖度、受灾人口、作物损失和经济损失）难以进行信息提取、量化和空间化，只能放弃这些因子的选取，会使评价结果稍受影响，但提出了较全面且较客观的风沙灾害综合评价研究指标体系，在今后的工作中跟有专门的数据库支撑和相关部门的合作并在指标体系建立方面需加以完善。

参考文献

[1] 高尚玉,史培军,哈斯,等.我国北方风沙灾害加剧的成因及其发展趋势[J].自然灾害学报,2000,9(3):31-37.

[2] CCICCD.1996.China Country Paper to Combat Desertification.Beijing:China Forestry Publishing House.18-26.

[3] 马育军,王静爱,李小雁.宁夏中北部风沙灾害潜在风险区域对比评价[J].自然灾害学报,2007,16(5):1-8.

[4] 张泽飞.锡林郭勒盟生态灾害风险评价[D].内蒙古师范大学,2010.

[5] 史培军,虞立红,张素娟.国内外自然灾害及我国近期对策.干旱区资源与环境[J],1989:3(3):163-172.

[6] 葛全胜,邹铭,郑景云.中国自然灾害风险综合评估初步研究[M],北京:等科学出版社,2008.

[7] 史培军.灾害研究的理论与实践[J].南京大学学报(自然科学版),1991:37- 42.

[8] 史培军.四论灾害系统研究的理论与实践[J].自然灾害学报,2005,14(6):1-7.

[9] HankinEH.On dustraising winds and deseending currents[J].India Met.Memoirs,1921,22:PartV

[10] I dso S.BraZel A. planetary radiation balance as a function of atmospheric dust: climatological consequences [J].Seienee,1977,198:731-733.

[11] 王静爱,徐伟,史培军,等.2000 年中国风沙灾害的时空格局与危险性评价[J].自然灾害学报,2001,(04)1-7.

[12] Xuan Jie.LiuGuoliang. Dust emission inventory in Northern China [J].Atmospheric Environment，2000, (34):4565-4570.

[13] 杨东贞,房秀梅,李兴生.我国北方沙尘暴变化趋势的分析[J].应用气象学报,1998,9(03):97-103.

[14] JAUREGUIE.the dust storms of Mexico City[J].Inter.J.Climatology,1989,9(2)： 169-180.

[15] 李金荣.基于 RS 和 GIS 的沙尘暴灾害风险评价研究-以内蒙古锡林郭勒盟为例[D].北京林业大学博士学位论文,2009.

[16] Vinit Mody and Jakhete .Dust control handbook[M].Park Ridge ,V.I.U.S.A:Noyes Data Corp. 1998.

[17] Mc Tainsh G H,L ynch A W &Tews EK.Climatic controls upon dust storm occurrence in Eastern Australia,JournalofAridEnvironments,1998,39:457 — 466.

[18] McTainsh G H,Burgess R,PitbLado J R. Aridity ,drought and dust storms in

Australia(1960-1984)[J].Journal of Arid Environment,1989,16:11-22.

[19] MeTainshGH,LynehA W,Burgess R C.Wind erosion in eastrn Australia[J].Australian Journal of Soil Research,1990,323-339.

[20] 杨青,何清.日本在沙尘暴方面的研究进展[J].新疆气象.2002，25（3）:1-4.

[21] Richard Washington,Martin Todd,Nicholas J. Middleton. Dust-Storm Source Areas Determined by the Total Ozone Monitoring Spectrometer and Surface Observations [J]. Annals of the Association of American Geographers,2003,93(2):26-31.

[22] 张继权,李宁.主要气象灾害风险评价与管理的数量化及其应用[M].北京师范大学出版社,2007.

[23] 冯露.风沙灾害危险评价及景观格局优化研究[D].北京林业大学,2009.

[24] 潘耀忠,范一大,史培军 and 顾晓鹤.近 50 年来中国沙尘暴空间分异格局及季相分布——初步研究[J].自然灾害学报,2003,12(01):1-8.

[25] 钱正安,吴统文,吕世华,等.夏季西北干旱气候形成的数值模拟—高原地形和环流场等的影响[J].大气科学,1998,(5):78-87.

[26] 张瑛,陈远新.辽宁省土地沙漠化现状成因及发展趋势[J].中国地质灾害与防治学报,2000,11(4):73-77.

[27] 叶笃正,丑纪范,刘纪远,等.关于我国华北地区沙尘天气的成因与治理对策[J].地理学报,2000,55(5):513-521.

[28] 史培军,严平,袁艺.中国北方风沙活动的驱动力分析[J].第四纪研究,2001,21(1): 41-47.

[29] 王强,张勃,戴声佩, 等.基于 GIMMS AVHRR NDVI 数据的三北防护林工程区植被覆盖动态变化[J].资源科学,2011,33(08):1613-1620.

[30] 杨根生,拓万全.关于宁蒙陕农牧交错带重点地区沙尘暴灾害及防治对策[J].中国沙漠,2002,22(5):452-465.

[31] 叶笃正,丑纪范,刘纪远,等.关于我国华北地区沙尘天气的成因与治理对策[J].地理学报,2000,55(5) :513-521.

[32] 张春来,邹学勇,靳鹤龄,等.狮泉河盆地第二期风沙灾害整治研究[J].中国沙漠，2001,21(2) :157-163.

[33] 海全胜，包玉海，阿拉腾图雅等.利用遥感手段判识沙尘暴的一种新方法——以内蒙古地区为例[J].红外与毫米波学报，2009,28(2):129-132.

[34] 岳德鹏等.基于 GIS 和 RS 的风沙危害风险性评价[J].应用基础与工程科学学报，2006.5(14):69-75.

[35] 王静爱等.2000 年中国风沙灾害的时空格局与危险性评价[J].自然灾害学报，2001,10(4):1-7.

[36] 徐海量,陈亚宁.塔里木盆地风沙灾害危险性评价[J].自然灾害学报,2003,12(2):35-39.

[37] 马育军,王静爱,李小雁.宁夏中北部风沙灾害潜在风险区域对比评价[J].自然灾害学报，2007,16(5):1-8.

[38] 姜淑琴.鄂尔多斯市风沙灾害孕灾环境风险评价[D].内蒙古师范大学,2010.

[39] 岳耀杰,王静爱,邹学勇,等.中国北方沙区湖泊（水库）风沙灾害危险度评价与安全对策--以内蒙古沙区为例[J].干旱区研究,2008,25(4) :574-582.

[40] 岳耀杰,王静爱,易湘生,等. 中国北方沙区城市风沙灾害危险度评价--基于遥感、地理信息系统和模型的研究[J].自然灾害学报,2008,17(1) :15-20.

[41] 王涛.中国沙漠与沙漠化〔M〕.石家庄:河北科学技术出版社,2002:777.

[42] Krige DG. A statistical approach to somemine valuations problems at The Witwatersrand[J]. Journal of the Chemical，Metallurgical and Mining Society of South Africa，1951，52:119-138.

[43] Wahba G， Wendelberger J. Some new mathematical methods for variational objective analysis using splines and cross-validation[J].Monthly Weather Review,1980,108: 1122-1145.

[44] 2011 年内蒙古统计年鉴[M].内蒙古统计局

[45] 马利邦,牛叔文,李永华,等.甘肃省生态安全评价及驱动因子分析[J].干旱区资源与环境,2009,23(5) :30-36.

[46] 张继权,魏民. 加权综合评分法在区域玉米生产水平综合评价与等级分区中的应用[J]. 经济地理,1994,14(5):19-21.

[47] 王强,张勃,张亚宁,等.基于GIMMS AVHRR NDVI数据的三北防护林工程区植被覆盖动态变化[J].资源科学,2011,33(8) :1613-1620.

[48] 燕艳.3S 技术支撑下的锡林郭勒盟草地变化研究[D].内蒙古师范大学,2011.

[49] 张继权,魏民. 加权综合评分法在区域玉米生产水平综合评价与等级分区中的应用[J]. 经济地理,1994,14(5):19-21.

[50] 莫建飞,陆甲,李艳兰,等.基于 GIS 的广西洪涝灾害孕灾环境敏感性评估[J].灾害学,2010,25(04) :33-37.

[51] 董光荣,段庆光,金炯,等.青海共和盆地草原沙漠化现状、成因及其防治的途径——以共和县为例[J].中国草原,1987,(04):13-17.

[52] 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（03):60-63.

[53] 孙金铸.内蒙古的风沙灾害与防治途径[J].内蒙古师大学报，1992, (3)：73-78.

[54] LFSON N,MATSON M. Satellite observations of a phantom in the desert [J]Weather,

1996,41(2):57-60.

[55] 吴大进,曹力,陈立华.协同学原理和应用[M].武汉:华中理工大学出版社，1990:9-17.

[56] 宋学峰,刘耀彬.城市化与生态环境的耦合度模型及其应用[J].资源与环境，2005,23(5):31-33.

[57] 刘耀彬,李仁东,宋学峰.中国城市化与生态环境耦合度分析[J].自然资源学报,2005，20(1):105-112.

[58] 刘燕华,李秀彬.脆弱生态环境与可持续发展[M].北京：商务出版社,2001.

[59] 毕军,章申,唐以剑,等.可持续发展的判别模式及其应用[J].中国环境科学,1998,18(1):30-36.

[60] 张晓东,池天河.90 年代中国省级区域经济与环境协调度分析[J].地理研究，2001,20(4):506-525.

[61] 李国彬.脆弱生态环境与贫困耦合机理下的陕北能源化工基地可持续发展研究[D].西安:西北大学,2007.

致谢

岁月如梭，三年的研究生生活即将接近尾声，毕业在即，感慨万千。回顾三年的学习和生活，每一步成长，都离不开各位老师的教诲、学友的帮助、朋友的提醒，在此论文完成之际，谨向大家致以我最诚挚的感谢。

首先，要深深的感谢我的导师阿拉腾图雅老师。感谢阿老师对我生活、学习上的指导和帮助。导师的启发、指点、支持和督促，使我的论文能够得以顺利完成。从论文的选题、资料收集与整理、论文的撰写、论文的修改到定稿无不凝聚着导师的心血。三年来，在导师的谆谆教导和无微不至的关怀下，无论是学习还是做人，我都获益匪浅。特别是导师渊博的专业知识，严谨的治学态度，精益求精的工作作风，诲人不倦的高尚师德，严以律己、宽以待人的崇高风范，对我影响深远。老师高尚的人格品德和优异的专业素养成为我一生最贴切的榜样。祝愿老师身体健康，工作顺利。

感谢海春兴、包玉海、王承安、李百岁、银山、雷军、巴雅尔、包慧娟、秦树辉等老师，我所取得的每一项成绩都与各位老师的教导、关怀与帮助分不开。感谢内蒙古气象局乌兰师姐在气象数据搜集方面给与的大力帮助。

感谢内蒙古自治区遥感与地理信息系统重点实验室，它是我三年研究生生活和学习的平台，在这里我学到了很多知识。

感谢我的舍友乌云德吉、刘美萍、刘月、隋雪梅等在这三年学习生活中的关心和帮助；感谢我的同学图雅和朋友们为我付出的真诚的友情和无私的帮助，愿我们的友情永恒。感谢海全胜、金阿丽、跟少子、艳燕、包塔娜、尔德尼琪琪格、何雪莲、叶小梅、白秀莲等师哥师姐对我学习和生活上的鼓励与帮助。感谢赵承华、春花、伊如汗等师弟师妹给予我的帮助与支持。

感谢我的家人这么多年来含辛茹苦为我的付出。他们对我无私而厚重的爱和鼓励永远都是我不断前行的动力之源。祝你们健康、快乐、平安！

春梅

2013. 4. 10 日