

内蒙古农业大学

硕士学位论文

基于BP神经网络的锡林郭勒地区沙尘暴预测模型研究

姓名：勾芒芒

申请学位级别：硕士

专业：水土保持与荒漠化防治

指导教师：李钢铁;左合君

20090501

## 摘 要\*

本文利用 1971~2000 年锡林郭勒地区 15 个台站的气象资料, 分析近 30 年内蒙古锡林郭勒地区沙尘暴发生日数及其规律。首先应用 SPSS 软件对影响沙尘暴的主要气象因子进行相关分析和主成分分析; 其次应用 Surfer 软件对锡林郭勒地区沙尘暴发生规律和时空分布进行研究; 最后, 在了解锡林郭勒地区沙尘暴成因及分布的基础上, 建立锡林郭勒地区沙尘暴 BP 神经网络模型, 并对 2001~2010 年沙尘暴发生日数进行预测分析。获得的结论主要有以下几个方面:

(1) 锡林郭勒地区沙尘暴受多种气象因子共同影响, 是一个多维的复杂问题, 年大风日数、年平均地温、年蒸发量、相对湿度与年沙尘暴日数有较好的相关性, 其中沙尘暴的发生与年大风日数相关系数达 90% 以上。

(2) 在近 30 年里锡林郭勒地区沙尘暴日数呈下降趋势, 90 年代达到最低水平; 沙尘暴的发生季节主要处于风力大, 热力不稳的春季, 发生频率占全年的 70% 以上; 锡林郭勒地区沙尘暴发生日数西部地区明显多于东部地区, 其中年平均沙尘暴日数最大值出现在苏尼特右旗为 10 天。

(3) 通过输入因子、网络层激活函数和输出因子的确定以及网络层数、节点的选择, 锡林郭勒地区沙尘暴模型可采用三层网络结构 (4-6-1)。比较和试算显示, 快速 BP 算法比普通 BP 算法的训练速度快, 收敛精度高 64.47%; 并与传统多元线性回归数学模型相比较, 结果表明: 快速 BP 神经网络沙尘暴模型的检验精度可达到 98%。

(4) 通过模型预测 2001~2010 年沙尘暴发生日数, 结果表明: 21 世纪初锡林郭勒地区沙尘暴发生日数在波动中呈上升趋势。

关键词: 沙尘暴; 气象因子; 时空分布; BP 神经网络模型; 预测; 锡林郭勒地区

---

\*国家林业软科学研究先导专项“国外干旱土地退化治理技术与政策研究”(2007-14)  
内蒙古农业大学博士基金 (BJ-04-24)

# Study on Sandstorm Model by Using BP Neural Network in the Xilin Gol Area

## Abstract\*

Sand storm is a common natural disasters in arid and semi-arid areas in China, and it is an important indicator of desertification. This phenomenon has caused serious harm to people. With the development of computer performance artificial intelligence technology has been researched and applied in various fields, and it is a very important mean to study sand storm.

Based on the meteorological data during 1971-2000 from around 15 meteorological stations, this paper analyzed the features and changes of sand storms in Xilin Gol league in Inner Mongolia. Firstly, SPSS software is applied to study main meteorological factors which is related to sand storm by related analysis and cluster analysis. Secondly, Surfer software is applied to study the features and changes of time and space about sandstorm. Finally, apply to different BP structure and algorithm of artificial neural network (ANN) to explore model of sandstorm. The main conclusions as follow:

1. There are many climate factors which influence the frequency and strength of the sandstorm in Xilin Gol league in Inner Mongolia, which is many dimensions problem. Influence of climate conditions are most obvious. In the number of days of strong winds, the average annual ground temperature, the annual evaporation, relative humidity are correlated to the number of days of sand storm. Strong wind is the most important and correlation coefficient is up to 90% with sand storm.

2. In the recent 30 years, the trend of sand storm is declining and achieves the lowest level in the 90s; Occurrence season of sand storm is mainly spring and the frequency of the year accounted for more than 70%; Days of sand storm in west is more than in east, Which the annual average number of days of sand storm is maximal in SU Youqi for 10 days.

3. Through determining the input factors, layer, node choice, each activation function and output factor, can use three network structures (4-6-1) in the forecast model of sandstorm. After compare and calculation, the accelerated BP algorithm is better than normal BP both in training speed and convergence accuracy, and restraining precision high 64.47%. The comparison is made between the accelerated BP algorithm and the mathematic model of linear regression, and the conclusion of comparison shows that

---

\*Financed by National Forestry science study on management technology and policy research of land degradation in arid  
Abroad(2007-14)  
Financed by Doctor Fund in Inner Mongolia Agriculture University(BJ-04-24)

precision of the accelerated BP algorithm is near 98%.

4. It can be shown that days of sand storm are increasing from 2001 to 2010 by using BP neural network forecast model.

**Key words:** *Sand storm; Climate factors; Temporal and spatial distribution; BP Neural network; Forecast; Xilin Gol Area*

**Directed by:** Prof.LI Gangtie and Zuo Hejun

**Applicant for Master degree:** GOU Mangmang (Soil and Water Conservation and Desertification Control)  
(College of Ecology and Environmental Science, Inner Mongolia Agricultural University, Huhhot, 010019, China)

## 插图和附表清单

|                                                  |    |
|--------------------------------------------------|----|
| 1. 图 1 论文技术路线图 .....                             | 8  |
| 2. 图 2 锡林郭勒盟行政区划图 .....                          | 9  |
| 3. 图 3 锡林郭勒草场退化图 .....                           | 10 |
| 4. 图 4 典型台站累年各月沙尘暴日数、大风日数、降水量、相对湿度变化特征图 .....    | 14 |
| 5. 图 5 内蒙古锡盟 3~5 月相对湿度和沙尘暴日数距平图 .....            | 18 |
| 6. 图 6 锡林郭勒地区沙尘暴年际变化趋势图 .....                    | 21 |
| 7. 图 7 锡林郭勒地区沙尘暴季节变化图 .....                      | 21 |
| 8. 图 8 锡林郭勒地区 15 个站点年沙尘暴日数等直线分布图 .....           | 23 |
| 9. 图 9 锡林郭勒地区 1971~2000 年 1 月沙尘暴天气的空间分布图 .....   | 24 |
| 10. 图 10 锡林郭勒地区 1971~2000 年 4 月沙尘暴天气的空间分布图 ..... | 24 |
| 11. 图 11 锡林郭勒地区 1971~2000 年 7 月沙尘暴天气的空间分布图 ..... | 25 |
| 12. 图 12 锡林郭勒地区 1971~2000 年 10 月沙尘暴天气的空间分布 ..... | 25 |
| 13. 图 13 BP 网络模型结构图 .....                        | 28 |
| 14. 图 14 不同 BP 层数、隐层单元数与误差关系趋势图 .....            | 31 |
| 15. 图 15 两种估算方法与实测值的比较 .....                     | 34 |
| 16. 图 16 2001~2010 年沙尘暴日数预测趋势图 .....             | 39 |
| 17. 图 17 2001~2007 年沙尘暴日数预测值与实测值趋势对比图 .....      | 40 |
| 18. 表 1 研究区部分站点沙漠化土地面积及其分布 .....                 | 10 |
| 19. 表 2 各台站月平均沙尘暴日数与气象要素相关系数 .....               | 13 |
| 20. 表 3 各站点沙尘暴天气相关要素统计 .....                     | 13 |
| 21. 表 4 气象因子数据统计描述 .....                         | 16 |
| 22. 表 5 主成分分析结果 .....                            | 16 |
| 23. 表 6 气象因子的前 3 个主成分的因子载荷矩阵 .....               | 17 |
| 24. 表 7 30 年间 15 个站点各年代沙尘暴年平均日数统计 .....          | 20 |
| 25. 表 8 15 个站点沙尘暴区划 .....                        | 22 |
| 26. 表 9 15 个站点沙尘暴春季统计表 .....                     | 26 |
| 27. 表 10 年沙尘暴日数与气象因子的相关系数分析 .....                | 30 |
| 28. 表 11 三层 4 因子训练结果 .....                       | 30 |
| 29. 表 12 四层 4 因子训练结果 .....                       | 31 |
| 30. 表 13 不同激励函数组合结果对比 .....                      | 32 |
| 31. 表 14 普通 BP 算法模拟检验结果 .....                    | 33 |

32. 表 15 快速 BP 算法模拟检验结果 ..... 33

33. 表 16 不同气象因子不同预测方法可决系数 ( $R^2$ ) 对比表..... 37

34. 表 17 2001 年~2010 年模型输入因子预测结果 ..... 38

35. 表 18 2001 年~2010 年沙尘暴模型预测结果 ..... 39

36. 表 19 2001 年~2007 年沙尘暴发生日数实测值与预测值对比 ..... 40

## 内蒙古农业大学研究生学位论文独创声明

本人申明所呈交的学位论文是我本人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。据我所知，除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包括其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包括为获得我校或其他教育机构的学位或证书而使用过的材料，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谢意。

申请学位论文与资料若有不实之处，本人承担一切相关责任。

论文作者签名： 勾芒芒 日 期： 2009.6.3

## 导师指导研究生学位论文的承诺

本人承诺：我的研究生 勾芒芒 所呈交的学位论文是在我指导下独立开展研究工作及取得的研究结果，属于我现任岗位职务工作的结果，并严格按照国家及学校有关学术道德规范的规定要求而获得的研究结果。如果违反，我必须接受按国家及学校有关规定的处罚处理并承担相应导师连带责任。

指导教师签名： 李钢钺 日 期： 2009.6.3

## 内蒙古农业大学研究生学位论文版权使用授权书

本人完全了解内蒙古农业大学有关保护知识产权的规定，即：研究生在攻读学位期间论文工作的知识产权单位属内蒙古农业大学。本人保证毕业离校后，发表论文或使用论文工作成果时署名为内蒙古农业大学，且导师为通讯作者，通讯作者单位亦署名为内蒙古农业大学。学校有权保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子文档，允许论文被查阅和借阅。学校可以公布学位论文的全部或部分内 容（保密内容除外），采用影印、缩印或其他手段保存论文。

论文作者签名： 勾芒芒 指导教师签名： 李钢钺  
日 期： 2009.6.3

## 1 引言

沙尘暴是气象学的一个术语,是指强风把地面大量沙尘卷入空中,空气特别混浊,水平能见度低于 1km 的天气现象<sup>[1]</sup>。气象部门在制定国家标准时,依据沙尘天气发生时的风速、空气能见度等天气过程状况,将沙尘天气依次分为浮尘、扬沙、沙尘暴、强沙尘暴和特强沙尘暴 5 个等级。其中,沙尘暴又详细分为 3 类:①沙尘暴是指强风将地面大量沙尘吹起,使空气很混浊,水平能见度小于 500m 至 1km 的天气现象;②强沙尘暴是指大风将地面沙尘吹起,空气非常混浊,水平能见度小于 50m 至 500m 的天气现象;③特强沙尘暴是指狂风将地面沙尘吹起,空气特别混浊,水平能见度小于 50m 的天气现象。有专家又把沙尘暴划分为四个等级:①风速大于 4 级、小于 6 级,能见度在 500m 至 1000m 之间,称为弱沙尘暴;②风速大于 6 级、小于 8 级,能见度在 200m 至 500m 之间,称为中等强度的沙尘暴;③风速大于 9 级,能见度在 50m 至 200m 之间,称为强沙尘暴;④风速在 9 级以上,能见度在 0m 至 50m 之间,称为特强沙尘暴。

从沙尘暴发生发展的成因可知,强风是沙尘暴产生的动力,沙尘源是沙尘暴物质基础,不稳定的热力是形成沙尘天气和沙尘暴的必要条件<sup>[2,3]</sup>。前期干旱少雨,天气变暖,气温回升,是沙尘暴形成的特殊天气气候背景,有利于风力加大、强对流发展,从而夹带更多的沙尘卷扬更高。由此可见沙尘暴的发生需具备三个基本条件:一是有足够强劲的风力,二是地表有丰富、干燥松散的沙物质,三是有冷暖空气活动产生的动力条件。只有第一和第二个条件,仅仅会形成近地面的局地风沙天气,只有三者有机结合时,才会形成较大范围和高度的沙尘暴天气。

某一地区沙尘暴发生、发展及出现频率的多少,是该地区荒漠化程度的重要标志。世界四大沙暴区(中亚、北美、中非和澳大利亚),都与严重的土地荒漠化相关,这也是我国西北地区成为中亚重要沙尘区的原因。

对人类而言,沙尘暴既有它有利的一面,又有它不利的一面,但公众对沙尘暴的认识和关注主要是因为它对人类造成的危害。一些专家认为,沙尘暴将尘土从地面吹向高空,形成浮尘,浮尘落入海洋,可为海洋生物提供铁等丰富的营养成分。也有一些科学家指出,沙尘可能是一种非常重要的、反温室效应的气溶胶,可以抑制气候变暖。然而,沙尘暴作为干旱、半干旱地区特有的一种灾害性天气,主要以大气污染、强风、沙埋、沙割和土壤风蚀等形式危害人类。沙尘暴伴随着大风,大风刮走地表浮土,甚至把人、牲畜、小麦作物幼苗等刮走,造成农田、草场、灌溉水渠、村舍等被掩埋,直接影响到农牧业生产和人民生命财产的安全。1983 年 4 月 27~28 日的一次沙尘暴造成陕北定边县 6 人死亡,10 人失踪。沙尘天气出现后,植物接受到的太阳直接辐射减少,尘土覆盖在植物叶面,影响光合作用和呼吸作用,从而影响了作物的正常生长。1993 年 5 月 5 日我国西北地区发生了罕见的特强沙尘暴,据不完全统计,仅甘肃、宁夏和内蒙古三个省区,共死伤 498 人,死亡丢失牲畜 45.1 万头(只),损



失大牲畜 1791 头, 受灾的农田达 1.4 公万顷<sup>[4]</sup>。2006 年 2 月份中下旬开始, 受蒙古气旋活动频繁, 内蒙古自治区锡林郭勒地区大风沙尘天气明显增多, 出现沙尘暴天气 10 余次, 该盟 10 个旗(县、市) 20 个苏木乡镇 112 个嘎查村遭受强沙尘暴袭击, 苏尼特左旗、苏尼特右旗、镶黄旗等受灾严重。初步统计, 沙尘暴受灾人口共 3.2 万人; 草场严重受灾 829 千公顷; 受灾牲畜 111 万头(只), 死亡牲畜 8602 头(只)。沙尘暴出现时空气污浊, 呛鼻迷眼, 极易引起呼吸道和眼病疾病, 影响人体健康。

## 1.1 国内外研究现状

### 1.1.1 国外研究现状

国外从 20 世纪 20 年代开始就对沙尘暴的时空分布、成因机制以及监测与对策方面进行了研究: 20 年代初期, Hankin<sup>[5,6]</sup>对发生在印度的“*Andhi*”(安德海)沙尘暴进行了初步的研究。之后, Sutton<sup>[7]</sup>对“*Haboob*”(哈布)型沙尘暴也进行了分析, 结果表明哈布沙尘暴是季风内出现的对流性沙尘暴; Joseph<sup>[8,9]</sup>把发生在印度西北部地区的沙尘暴等级进行了划分, 认为沙尘暴等级应该分为以下 3 类: 即 4 级<风速≤6 级, 500m≤能见度<1000m, 称为弱沙尘暴; 6 级<风速≤8 级, 200m≤能见度<500m, 称为中等强度的沙尘暴; 风速≥9 级, 能见度<200m 等级范畴内, 又划分出了特强沙尘暴, 即 50m≤能见度<200m 时, 称为强沙尘暴, 当瞬时最大风速≥25m·s<sup>-1</sup>, 能见度<50m, 甚至降到 0m 时, 称为特强沙尘暴(俗称“黑风”)。80 年代以来, Brazel<sup>[10]</sup>对发生在美国亚利桑那州的沙尘暴天气类型作了统计分类: 把当地形成沙尘暴的天气形势归结为四个天气类型: 锋面型、雷暴和对流型、热带扰动型和上部低压或切断低压型; Jauregui<sup>[11]</sup>对墨西哥城沙尘暴的时空分布进行系统研究后指出 3 月份沙尘暴发生频率最大。Gillette 研究了美国沙尘暴的时空分布规律认为沙尘暴是由于风蚀引起的, 并且通过对粒子质量通量与地面摩擦速度的轨迹分析得出: 到达日本上空的沙尘主要源于 40~50°N、100~110°E 的中国沙漠戈壁、黄土高原、内蒙古地区<sup>[12]</sup>。Ott, S.T. 和 AOtt(1991)曾利用卫星和 GATE 资料对撒哈拉沙尘暴的爆发进行过分析, 立足从大风和气候两个方面研究沙尘暴的影响因素<sup>[13-16]</sup>。Iwasaka 对 1979 年 4 月的一次沙尘暴轨迹进行分析, 结果表明: 到达日本上空的沙尘主要源于中过戈壁、黄土高原和内蒙古地区<sup>[16]</sup>。Shaw 在夏威夷岛的 Mauna Loa 观测站, 发现有来自亚洲的沙尘气溶胶个例<sup>[20]</sup>。

### 1.1.2 国内研究现状

国内从 20 世纪 70 年代开始对沙尘暴天气进行研究。1993 年 9 月在兰州召开了“首届全国沙尘暴天气研讨会”。从此, 沙尘暴研究成为中国科学界关注的重要问题。1997 年, 在中国气象局科技教育司和中国科学院自然与社会协调发展局的安排下, 以 1993 年“5.5”黑风暴分析研究为基础, 方宗义、朱福康等编写了《中国沙尘暴研究》。2000 年, 北京的沙尘暴天气频繁发生后, 沙尘暴再次引起我国政府和学者的关注。徐国昌

[21]、江吉喜<sup>[22]</sup>、王式功<sup>[23]</sup>、胡隐樵<sup>[24]</sup>和光田宁<sup>[25]</sup>等对我国西北地区典型的几次特强沙尘暴做了个例分析和研究;刘树华<sup>[26]</sup>等对沙尘暴的天气成因进行了初步探讨和分析;张玉林<sup>[27]</sup>等对宁夏强沙尘暴的形成机制进行了探索和研究;李宗义<sup>[28]</sup>等分析了1998年4月发生在我国西北地区的一次强沙尘暴天气的大尺度环流形势;叶笃正<sup>[29]</sup>等对2000年发生在我国华北地区沙尘天气的成因进行分析,并提出了相应的治理对策和措施;邱新法、缪启龙等<sup>[30]</sup>对沙尘暴的时空分布规律、移动路径和源地进行了分析和研究;牛生杰等<sup>[31]</sup>对宁夏贺兰山地区沙尘暴发生频次进行了分析,结果表明:春季尤其是4、5月份是该地区沙尘暴的高发期;邱新法等<sup>[32]</sup>、钱正安等<sup>[33]</sup>、王式功等<sup>[34]</sup>、周自江等<sup>[35-38]</sup>先后对我国沙尘暴频次进行了统计分析,结果表明:我国北方沙尘暴的发生日数呈现波动性减少趋势。

#### 1.1.2.1 时空分布的研究进展

牛若芸、薛建军、周自江<sup>[39]</sup>对2002年我国沙尘暴天气特征进行了分析,结果表明:2002年出现的12次沙尘暴过程中,以3月18-22日的强沙尘暴过程影响范围最广、强度最强;我国北方地区的浑善达克沙地以及周边地区的沙尘暴发生日数最多。另外,2002年我国沙尘暴高频期集中、早春多于晚春<sup>[40,41]</sup>。主要原因是前期北方持续气温偏高、降水偏少,三月到四月上中旬影响我国的冷空气十分频繁并且强度较强,4月下旬到5月上旬我国北方地区出现了几次较大范围降水,5月中下旬影响我国的冷空气势力较弱且位置偏东;吕新苗、刘惠清、王文杰<sup>[42]</sup>,对北京周边地区沙尘暴时空分布特征及其环境背景研究,结果表明:沙尘暴高值区位于浑善达克沙地和库布齐沙地的周边。从时间变化看,午后至傍晚是沙尘暴天气易发的高峰期;季节变化总体上春季较多,其次是夏季和初秋;从年际变化看,50-60年代是沙尘暴发生的高值期,70-80年代在波动中呈减少趋势,进入90年代后又呈现了上升趋势,多发期与干冷气候期彼此相对应;肖嗣荣、刘学锋、刘芳圆<sup>[43,44]</sup>对河北省沙尘暴时空分布规律进行了探讨、研究和分析,结果表明:坝上地区是河北省沙尘暴的多发区,干旱多大风的春季是发生沙尘暴天气最多的季节;贺哲、王蕊<sup>[45]</sup>对河南省沙尘暴时空分布特征及其影响因子进行了分析,河南省沙尘暴在东部平原地区发生频率高于西部山区,在驻马店以北,年沙尘暴日数为1的等值线基本上与地势海拔100m地形等高线相吻合;沙尘暴的多发地区,沙尘暴日数年际变化在多数年份较为剧烈;河南省沙尘暴沙源并非全部来自省外,省内下垫面沙尘对沙尘暴的发生也起到了一定的促进作用;沙尘暴的发生与降水量关系极不显著,但在部分年份与月最长无降水日数和日照时数之间却存在着一定的对应关系;江灏、吴虹等<sup>[46]</sup>对河西走廊沙尘暴的时空变化特征及其环流背景进行了研究分析,结果表明:河西走廊沙尘暴的分布主要是沙漠边缘干旱化不稳定过渡带的产物,即在同样的大气条件下,下垫面条件决定沙尘暴的空间分布;河西走廊沙尘暴的时间分布主要与大风有关,在日变化、年变化、年际变化和年代际变化中都是如此,即在确定的下垫面条件下,大气(风)状况决定沙尘暴的时间变化<sup>[47-49]</sup>;蒙古低(槽)、乌拉尔高(脊)

的环流形势配置是沙尘暴过程中的典型背景条件,不仅在天气尺度是如此,在年际、年代际尺度也是如此;河西走廊沙尘暴的EOF分析表明,沙尘暴频数在20世纪末到本世纪初有一个明显的回升趋势,上升幅度已接近总下降幅度的四分之一至三分之一;王宁、张红<sup>[50]</sup>对吉林省沙尘天气的时空分布特征及其分型预报进行了研究,通过普查历史天气图,给出了区域性沙尘天气及区域性浮尘天气的预报指标,并在2002年春季沙尘预报服务中得到了较好的应用;白云岗、宋郁东<sup>[51]</sup>分析40a来塔里木盆地沙尘暴气候时空变化,结果表明:塔里木盆地沙尘暴日数从60年代至90年代,总的趋势是在波动中下降的,高发年代多在20世纪70年代和80年代,90年代沙尘暴的发生明显减少;塔里木盆地沙尘暴天气发生的日数有2个明显的高发区,即以喀什、阿图什的塔东地区和以策勒、和田为中心的塔南地区;塔里木盆地沙尘暴天气对于新疆地区气候的变化响应显著,与平原区的降水和温度相关性较好。唐国利、巢清尘<sup>[52]</sup>近对48年中国沙尘暴的时空分布特征及其变化进行研究,沙尘暴主要分布部分于100°E以西和长江以北的大部分地区,其中频数较高的区域主要集中在内蒙古中西部、新疆大部、甘肃、宁夏和青藏高原等地区;巴丹吉林沙漠、腾格里沙漠、毛乌素沙漠及周边地区和塔克拉玛干沙漠及周边地区是两个十分显著的沙尘暴高发区,同时,在青藏高原的西南偏东和中部偏北还分布着两个次高值区;而华北中北部和东北平原等地的发生频数则远较上述地区为低;除此之外,全国其余地区的沙尘暴一般比较稀少。陈晓光、刘庆军等<sup>[53-56]</sup>通过对宁夏与甘肃沙尘暴过程的时空分布对比研究,结果表明:宁夏沙尘暴过程以春季居多,占全年一半左右,强及特强沙尘暴过程有三分之二发生在春季,冬季和夏季次之,秋季最少;甘肃、宁夏两地的区域性沙尘暴过程存在着较明显的一致性与继发性特征。甘肃省的沙尘暴过程强度越强,移动速度就越快,沙尘暴爆发与影响宁夏的时间差也就越短。雷向杰、杜继稳<sup>[57]</sup>对陕西沙尘暴时空分布进行研究:陕北为陕西沙尘暴天气的多发区,位于毛乌素沙地东南部的陕北长城沿线为陕西沙尘暴天气最多的地区,榆林、定边等地平均年沙尘暴天数10-29d;陕西的沙尘暴天气春季最多,冬季、夏季较少,秋季最少。其中,春季又以4月为最多,秋季9月最少。气候类型、生态环境、前期气候特点、冷空气活动次数、强度等是影响沙尘暴形成的重要原因。退耕还林种草,改善生态环境,建立沙尘暴的监测、预报系统是减少沙尘暴危害的有效措施。赵丹丹、关欣<sup>[58]</sup>对新疆和田降尘的时空分布分析表明:和田降尘量的年内分布极为不均。春夏两季的降尘量占全年总降尘量的93.14%,秋季较少,冬季最少;最大值在6月,最小值出现在12月。降尘量随高度的升高呈减少的趋势,在影响植物生长及人类活动密切相关的两个高度降尘量最大。浮尘日数是影响降尘量的重要因素,降尘量随浮尘日数的增多基本呈上升趋势,但大风、扬沙、沙尘暴天气对降尘量的多少也有着不可忽视的影响<sup>[59-61]</sup>。

#### 1.1.2.2 预报模型的研究进展

高涛等<sup>[62]</sup>参考了Saaty T.L., 提出的综合选优方法<sup>[63]</sup>, 建立判别矩阵, 然后计算归类判别预报, 根据判别函数值判断实时待判样本的归属。参照归属类历史沙尘暴的天气形势和实况出现的范围以及强度作出沙尘暴天气预报, 并设计了一个沙尘暴天气的归类判别分析预报模式。

赵光平, 王连喜等<sup>[64]</sup>通过对产生强沙尘暴天气三大因子的实时诊断, 从强冷空气、热力不稳定和近地层环境分析入手, 依据宁夏沙尘暴天气预报着眼点, 在较全面地对产生沙尘暴天气的三维空间物理量结构和动力过程所进行的动力过程相似检验前提下, 通过渗入有明确天气学意义并对宁夏强沙尘暴有实际预报能力的综合指标和组合模式, 在天气系统自动识别技术的支持下, 应用螺旋度修正方案确定强沙尘暴落区, 建立自动、客观化的宁夏强沙尘暴天气监测和预报系统。

郑新江, 陆文杰等<sup>[65]</sup>利用气象卫星多通道监测沙尘暴, 并利用遥感技术与计算机技术对沙尘暴天气进行预测。

矫梅燕, 周自江<sup>[66]</sup>通过分析沙尘暴的发生机制, 讨论了沙尘暴定性预报和定量预报技术, 指出发展包含大气运动、风蚀物理过程和下垫面地表信息的集合数值预报模式是沙尘暴定量预警技术的发展方向。同时指出, 传统的监测网尚不能全面监测沙尘暴的发生和发展, 建立包含下垫面生态环境要素、大气物理化学要素的专业化沙尘监测网络是深化对沙尘暴特性认识和发展沙尘暴定量预警技术的基础。

李正明<sup>[67]</sup>利用临夏州1955~2004年50年的气候资料, 从地形、气候、环流特征等方面入手, 全面系统地分析了临夏州大风、沙尘天气、气候学成因, 在此基础上, 建立了临夏州春季(3-5月)大风沙尘天气短期实时预报系统。

赵翠光<sup>[68]</sup>使用人工神经网络方法建立了我国沙尘暴短期预测模型, 该神经网络模型的输入因子是几个物理场的REOF展开的一些时间系数, 输出为我国有无沙尘暴。结果表明REOF展开技术和人工神经网络方法两种方法的结合对于预测沙尘暴是可行的; 王汉芝<sup>[69]</sup>利用人工智能和模式识别技术在各个具体领域的广泛应用, 围绕着“样本特征提取和沙尘暴的预报”这一具体问题, 利用人工智能和模式识别技术展开了研究。路志英, 杨玉峰等<sup>[70]</sup>对现有BP神经网络的缺陷, 提出了基于遗传算法的神经网络预测模型, 并利用该模型研究了沙尘暴的预测问题, 仿真预测研究表明提出的方法无论是收敛速度方面还是预报准确率方面都取得了比较满意的结果。

#### 1.1.2.3 与沙尘暴有关的其他方面研究进展

邱金桓等<sup>[71]</sup>于1982年5月首次用激光雷达遥感了沙尘暴粒子的消光特性和沙尘暴垂直分布特性, 结果表明沙尘暴发生时气溶胶光学厚度可以有一个量级的变化; 对1988年4月发生的沙尘暴进行激光雷达探测, 垂直高度达6km以上, 揭示出沙尘暴垂直结构依赖于风场结构。庄国顺等<sup>[72]</sup>利用FA-3型Andersen采样器在北京也对2000年4月6日沙尘暴进行了监测。该项研究主要分析了沙尘暴期间沙尘气溶胶中有关元

素的富集系数及有关组分的来源,但给出的沙尘气溶胶质量浓度谱也是采样时间内的平均谱,同样没能给出沙尘暴期间沙尘气溶胶生消过程中谱分布的连续演变特征。牛生杰等<sup>[73,74]</sup>受国家自然科学基金“贺兰山地区沙尘暴若干问题的观测研究”(项目编号49565010)资助,于1996年—1999年4月—5月深入沙漠源地(腾格里沙漠、巴丹吉林沙漠、毛乌素沙地)利用美制 APS-3310A 激光空气动力学粒子谱仪、KB120、太阳光度计等设备,对沙尘天气进行了系统测量,并利用飞机观测沙漠地区上空沙尘气溶胶粒子谱时空分布特征。

## 1.2 研究目的和意义

作为灾害性天气现象,沙尘暴的频繁发生对区域社会经济和环境均已造成一定程度的危害<sup>[75-81]</sup>。几十年来,受沙尘暴的不断影响,曾经水草丰美的锡林郭勒大草原,生态环境日趋恶化,不仅影响了当地经济社会的发展和人民群众生活水平的提高,同时沙尘暴也波及到京、津及华北地区<sup>[82-85]</sup>。所以对内蒙古锡林郭勒地区沙尘暴的研究对我国沙尘暴预防、治理及其研究是具有特殊意义的。

在锡林郭勒地区,沙尘暴时空分布规律的详细研究还做的不多,本研究旨在找出锡林郭勒地区沙尘暴的发生、发展规律并在此基础上研究沙尘暴短期预测模型,为锡林郭勒地区的生态环境建设提供参考依据,做好锡林郭勒地区沙尘暴预警工作,早发现早预防,以达到防灾减灾的目的。

## 2 研究内容与方法

### 2.1 研究内容

本论文的研究内容主要包括以下几个方面:

(1) 锡林郭勒地区沙尘暴时空分布规律的研究。

本文通过对锡林郭勒地区 15 个台站 1971~2000 年气象资料的收集和整理, 分析了影响沙尘暴发生的主要气象因子, 并从时间和空间上分析沙尘暴发生、发展规律。

(2) 基于影响沙尘暴相关气象因子建立 BP 神经网络沙尘暴预测模型。

应用 BP 神经网络模型分析研究锡林郭勒地区沙尘暴, 通过模型的建立、参数的选取及模型的训练和验证, 得出适合该地区沙尘暴研究的模型。

(3) 预测 2001 年至 2010 年沙尘暴发生日数。

### 2.2 资料来源

本文所用气象数据来源于内蒙古锡林郭勒地区 15 个站点的实测气象数据, 包括沙尘暴日数、大风日数、降水和温度、相对湿度等多项指标, 数据时段为 1971~2000 年。所有数据按全年和季节整理, 即 3~5 月表示春季、6~8 月表示夏季、9~11 月表示秋季、12~2 月(次年)表示冬季。全年沙尘暴日数、大风日数和降水量、相对湿度分别用年平均值表示, 季节气象因子和沙尘暴日数采用各月数据平均值表示。

### 2.3 研究方法

应用 SPSS 统计软件对原始资料进行统计分析, 利用 SURFER 软件进行空间特征分析, 在研究区时空分布规律的分析基础上, 以人工智能技术(ANN)为沙尘暴建模手段, 建立 BP 神经网络的沙尘暴预测模型。

## 2.4 技术路线

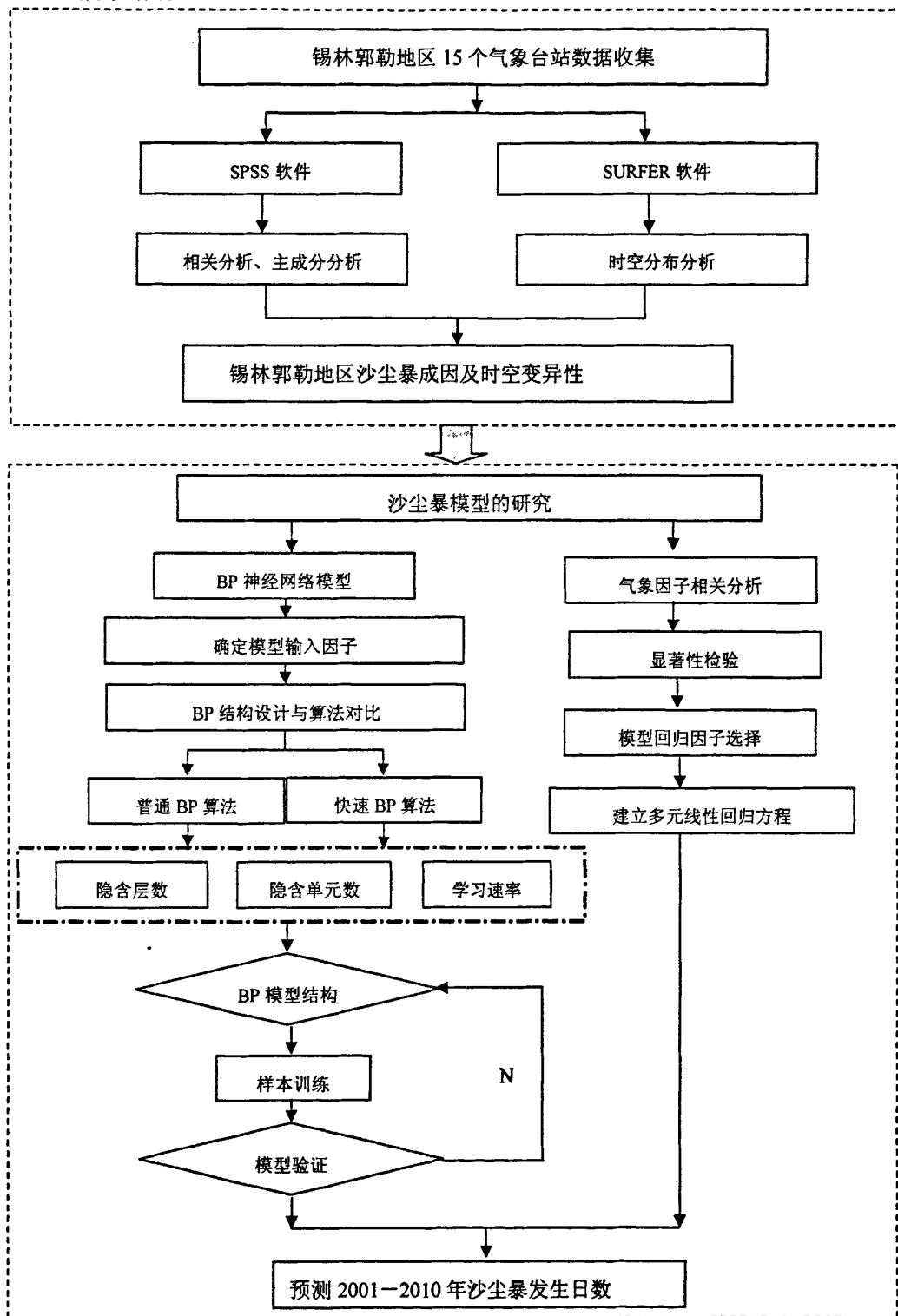


图 1 论文技术路线图

Fig.1 The technical route of dissertation

### 3 研究区概况

#### 3.1 地理位置

锡林郭勒盟位于内蒙古自治区中部,北与蒙古国接壤,国境线长1098km;东邻内蒙古自治区赤峰市、通辽市、兴安盟,西接乌兰察布盟,南与河北省承德、张家口毗邻。总面积202580km<sup>2</sup>。这里既是国家重要的畜产品基地,又是西部大开发的前沿,是距京、津、唐最近的草原牧区。研究区地处东经115°13′~117°06′,北纬43°02′~44°52′(见图2),属北部温带大陆性气候。

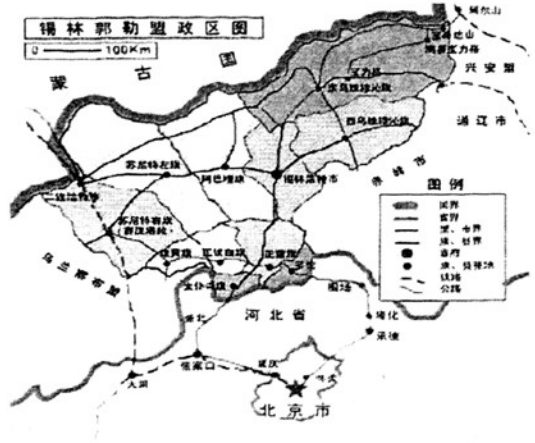


图2 锡林郭勒盟行政区划图

Fig.2 Xilin Gol League administrative map

#### 3.2 气候条件

研究区属北温带大陆性气候,冬季漫长寒冷,夏季温热少雨,春秋季节多大风,昼夜温差大,降雨量少,雨热同季,年平均气温0~4℃,极端最高气温39.9℃,极端最低气温-42.4℃,无霜期100~136d,年平均降水量200~400mm,年平均蒸发量1500~3000mm,年平均风速4~5.5m/s,全年大风日数60~100天(6~8级)。

#### 3.3 地形地貌

研究区地势由东南向西北方向倾斜,东南部多低山丘陵,盆地错落,西北部地形平坦,一些低山丘陵和熔岩台地零星分布其间。东北部为乌珠穆沁盆地,河网密布,水源丰富。西南部为浑善达克沙地,由一系列垄岗沙带组成,多为固定和半固定沙丘。

#### 3.4 土壤和植被

研究区土壤由东北向西南依次为黑土、黑钙土、栗钙土、棕钙土、灰钙土和荒漠土。植被组成,大部为干草原、半荒漠和荒漠地带,间有戈壁和少数沙丘。主要牧草为禾本科和菊科,间有豆科牧草。

#### 3.5 草地沙漠化现状

锡林郭勒草原是我国著名的四大草原之一,它曾以水草丰美而著称于世。可是最近几年草原的旱灾、雪灾,一场场的沙尘暴接连不断,使得锡林郭勒盟这个以畜牧业为主体经济的地区受到了重创,恶化的生态环境不仅影响了当地经济发展和人民群众的生活,而且波及到京、津及华北地区。2000年TM影像解译结果显示(见表1)沙漠化发展速度仍在加快,严重制约着当地的社会经济活动,同时也诱发着其他环境问



题。从表中可以看出，正蓝旗、正镶白旗、多伦县、苏尼特右旗和苏尼特左旗土地沙漠化非常严重。这种状况使得大面积的草场在不断退化和荒漠化(见图3)，而且已经沙漠化了的土地在继续升级恶化，土地沙漠化降低了草地的滋生能力，草地系统承受巨大压力，植被覆盖率低，下垫面防御沙尘暴的能力差，一旦有适合的天气系统，沙尘暴发生频率加强，又会掠夺土地养分进一步诱发土地沙漠化。



图3 锡林郭勒草场退化图

Fig.3 Pasture degeneration chart in Xilin Gol League

表1 研究区部分站点沙漠化土地面积及其分布

Tab.1 Partial Stations Desertification Land Area and Distribution in Research Area

| 旗（县、市） | 总面积<br>(km <sup>2</sup> ) | 沙漠化面积              |       | 不同程度的沙漠化面积 (km <sup>2</sup> ) |          |         |        |
|--------|---------------------------|--------------------|-------|-------------------------------|----------|---------|--------|
|        |                           | (km <sup>2</sup> ) | (%)   | 轻度                            | 中度       | 重度      | 严重     |
| 阿巴嘎旗   | 27207.99                  | 4597.05            | 16.90 | 1842.99                       | 1697.30  | 847.89  | 208.87 |
| 苏尼特左旗  | 34079.08                  | 7511.16            | 21.98 | 4923.90                       | 1475.69  | 753.27  | 385.31 |
| 苏尼特右旗  | 25998.41                  | 8117.50            | 31.22 | 5812.42                       | 1642.55  | 473.70  | 188.83 |
| 锡林浩特   | 15352.87                  | 2403.87            | 15.66 | 952.98                        | 512.16   | 473.17  | 465.56 |
| 镶黄旗    | 5125.68                   | 1295.21            | 25.27 | 702.56                        | 382.18   | 130.94  | 79.53  |
| 正镶白旗   | 6270.91                   | 3236.83            | 51.62 | 1339.46                       | 938.52   | 499.09  | 459.76 |
| 正蓝旗    | 10187.90                  | 7413.76            | 72.77 | 2480.25                       | 1444.29  | 2512.85 | 976.37 |
| 多伦县    | 3906.16                   | 1717.69            | 43.97 | 689.23                        | 440.97   | 211.30  | 376.19 |
| 太仆寺旗   | 3466.90                   | 48.45              | 1.40  | 29.38                         | 14.12    | 3.98    | 0.97   |
| 克什克腾   | 19052.59                  | 4425.33            | 23.23 | 1097.11                       | 1663.30  | 882.05  | 782.87 |
| 合 计    | 150748.49                 | 40766.85           | 27.04 | 19870.28                      | 10211.08 | 6788.24 | 3897.3 |

资料来源：沙漠化监测室.CAREERI(2000)

## 4 锡林郭勒地区沙尘暴发生的气象因素分析

### 4.1 相关分析法

相关分析法 (correlation analysis) 是研究现象之间是否存在某种依存关系, 并对具有依存关系的现象探讨其相关方向以及相关程度, 研究随机变量之间的相关关系的一种统计方法。任何事物的存在都不是孤立的, 是相互联系、相互制约的。说明客观事物相互间关系的密切程度并用适当的统计指标表示出来。相关分析常用相关系数  $r$  来表示两个变量间相互的关系, 并判断其密切程度。相关系数  $r$  没有单位, 在 -1 到 +1 之间波动, 其绝对值越接近 1 说明两个变量之间的相关关系越密切。其相关性主要分为正相关、负相关和无相关。其中, 正相关:  $Y$  随  $X$  的增加而增加,  $X$  亦随  $Y$  的增加而增加,  $0 < r < 1$ ; 负相关:  $Y$  随  $X$  的增加而减少,  $X$  亦随  $Y$  的增加而减少,  $-1 < r < 0$ ; 无相关: 不论  $X$  增加或减少,  $Y$  的大小不受其影响; 反之亦然,  $r = 0$ 。SPSS 的相关分析是借助于 Statistics 菜单的 Correlate 选项完成的。激活 Statistics 菜单选 Correlate 中的 Bivariate... 命令项, 弹出 Bivariate Correlation 对话框。在对话框左侧的变量列表中选  $x$ 、 $y$ , 点击  $\triangleright$  钮使之进入 Variables 框; 再在 Correlation Coefficients 框中选择相关系数的类型, 共有三种: Pearson 为通常所指的相关系数 ( $r$ ), Kendell's tau-b 为非参数资料的相关系数, Spearman 为非正态分布资料的 Pearson 相关系数替代值, 本文选用 Pearson 项。

### 4.2 气象因素的影响

沙尘暴天气的季节分布特征与气候因素有着十分密切的关系, 这种灾害性天气是多种气候条件及地理条件综合影响的结果<sup>[60]</sup>。但是对于沙源区来说, 锡林郭勒地区沙尘暴多为本地起沙<sup>[61]</sup>, 而非沙源区的沙尘暴多为途径沙源区的天气系统引起, 所以与气象因素的关系还有所差异。从表 2 中可以看出, 各台站月平均沙尘暴日数与气象因素的相关关系, 其中沙尘暴日数与大风日数相关性最高, 平均达到 90%, 东乌旗达到 97%。15 个台站的沙尘暴日数与大风日数及平均风速都有着一致的正相关关系, 与相对湿度有着密切的反相关关系, 其相关系数均已通过了 0.05 水平的信度检验, 部分站点的沙尘暴日数还与蒸发量和地表温度有着显著的正相关。通过分析不同旗县月平均沙尘暴日数与气象因素的关系, 可以显现以下特点:

#### (1) 大风条件的影响

大风 (风速大于 6 级) 是沙尘暴形成的主要动力因素之一, 大风日数与沙尘暴天气的季节性变化也表现出很好的一致性<sup>[62]</sup>, 即大风多的季节沙尘暴天气也多, 说明了大风在沙尘暴形成的过程中起到及其重要的作用 (图 4)。但是, 比较不同的站点, 能够发现沙尘暴和大风天气并不是完全呈现正相关关系, 大风最多的地方并不一定是沙尘暴发生最多的地方。由表 3 可以看出, 西乌旗是沙尘暴较少的地区, 但它的大风日数要比一些沙尘暴多的地区大风日数多, 这是因为沙尘暴频繁发生的地区要有充足

的沙源,风力只要达到一定的程度就可以形成很强的沙尘暴天气,风并不是形成沙尘暴的唯一条件,沙尘暴天气少的地区也不是因为大风少,而是因为缺少沙源和受到当地自然条件的制约,虽然大风频繁但是没有来自沙源地区的沙尘暴经过一般也不会起沙。

#### (2) 相对湿度的影响

相对湿度与沙尘暴天气在季节变化上呈现出一致的反相关关系。由图 4 可知,4 月份相对湿度处于一年中的最低水平,而此时正是该地区沙尘暴的多发期。夏季开始后随着降雨量的不断增加沙尘暴日数明显降低,这是因为相对湿度与降水密切相关。但是个别台站沙尘暴发生日数的减少并不在雨量丰沛的夏季而是冬季,这是因为夏季的蒸发量也是最大的,所以相对湿度低,而冬季蒸发量最小,相对而言相对湿度并不是最低的。上述分析表明,相对湿度对沙尘暴的影响也是非常重要的。

#### (3) 地表温度和积雪的影响

地表温度的变化在沙尘暴的季节性变化中起到一定的作用。由于这些站点在 2 月底以前地表温度就上升到  $0^{\circ}\text{C}$  以上,11 月初以后降至  $0^{\circ}\text{C}$  以下,沙尘暴天气也从 3 月份起迅速增加,沙尘暴发生的频数在 4 月份突增。这是由于地表温度低于  $0^{\circ}\text{C}$ ,土壤冻结,并常伴有积雪覆盖,不利于沙尘暴的形成,而春季土壤解冻,土质疏松,同时春季地表升温快,大气处于不稳定的状态,垂直运动加强,加上此时风速明显增加,有利于沙尘暴的形成。

#### (4) 气温的影响

气温因素对沙尘暴的影响不容忽视。气象学家对未来气候的预测是全球增暖不可避免。在全球气候增暖的大背景下,未来北半球中纬度内陆地区的降水量将变化不大,但是温度将显著升高,地表蒸发大,土壤进一步变干<sup>[80]</sup>。这都是有利于沙尘暴天气发生发展的大尺度气候背景,加之人口压力的不断增大及区域经济活动的逐年加强,尤其是土地利用的不合理规划不可能在短期内得到根本性的调整,沙化土地逐年扩大不可能在短期内得到有效遏止,可以预见沙尘暴灾害将进一步加强,随之造成的损失也将成倍增加。

表2 各台站月平均沙尘暴日数与气象要素相关系数  
Tab. 2 Correlation coefficients between the monthly number of duststorms days and the meteorological factors

| 指标<br>站点 | 大风<br>日数 | 平均<br>风速 | 地温    | 相对<br>湿度 | 积雪<br>日数 | 蒸发量   | 降水量   | 平均<br>气温 |
|----------|----------|----------|-------|----------|----------|-------|-------|----------|
| 阿巴嘎旗     | 0.91*    | 0.88*    | 0.3   | -0.81*   | 0.03     | 0.5   | -0.08 | 0.28     |
| 太仆寺旗     | 0.91*    | 0.68*    | 0.15  | -0.39    | -0.06    | 0.54  | -0.29 | 0.12     |
| 多伦       | 0.84*    | 0.70*    | -0.01 | -0.74*   | -0.08    | 0.28  | -0.28 | -0.02    |
| 正兰旗      | 0.84*    | 0.70*    | -0.01 | -0.74*   | -0.08    | 0.28  | -0.28 | -0.02    |
| 正镶白旗     | 0.95*    | 0.91*    | 0.26  | -0.87*   | -0.32    | 0.52  | -0.13 | 0.23     |
| 西乌旗      | 0.903*   | 0.60*    | 0.39  | -0.78*   | -0.35    | 0.51  | 0.03  | 0.31     |
| 镶黄旗      | 0.89*    | 0.82*    | 0.09  | -0.77*   | -0.2     | 0.31  | -0.28 | 0.04     |
| 朱日和      | 0.85*    | 0.72*    | 0.15  | -0.84*   | -0.27    | 0.39  | -0.23 | 0.11     |
| 苏尼特右旗    | 0.92*    | 0.82*    | 0.22  | -0.84*   | -0.33    | 0.43  | -0.17 | 0.19     |
| 苏尼特左旗    | 0.80*    | 0.77*    | 0.18  | -0.70*   | -0.3     | 0.3   | -0.22 | 0.15     |
| 那仁       | 0.80*    | 0.77*    | 0.18  | -0.70*   | -0.3     | 0.3   | -0.22 | 0.15     |
| 二连浩特     | 0.88*    | 0.89*    | 0.26  | -0.58*   | -0.37    | 0.4   | -0.18 | 0.23     |
| 东乌旗      | 0.97*    | 0.93*    | 0.43  | -0.87*   | -0.45    | 0.62* | 0.03  | 0.4      |
| 乌拉盖      | 0.93*    | 0.91*    | 0.18  | -0.83*   | -0.22    | 0.46  | -0.17 | 0.15     |
| 锡林浩特     | 0.94*    | 0.96*    | 0.28  | -0.83*   | -0.35    | 0.49  | -0.13 | 0.25     |

注：用“\*”表示的相关系数值信度显著性水平达 0.05 以上

表3 各站点沙尘暴天气相关要素统计  
Tab.3 Statistics of duststorms related in the selected stations

| 台站    | 年大风日数 | 年沙尘暴<br>日数(天) | 最多季 | 占全年(%) | 最多月 | 占全年(%) |
|-------|-------|---------------|-----|--------|-----|--------|
| 阿巴嘎   | 19.3  | 4             | 春季  | 83     | 4   | 45     |
| 太仆寺   | 17.9  | 4             | 春季  | 89     | 4   | 42     |
| 多伦    | 21.7  | 3             | 春季  | 85     | 4   | 58     |
| 正兰旗   | 24.13 | 7             | 春季  | 78     | 4   | 43     |
| 正镶白旗  | 20.4  | 5             | 春季  | 83     | 4   | 42     |
| 西乌旗   | 16.33 | 1             | 春季  | 86     | 4   | 43     |
| 镶黄旗   | 25.33 | 4             | 春季  | 86     | 4   | 47     |
| 朱日和   | 28.50 | 8             | 春季  | 80     | 4   | 43     |
| 苏尼特右旗 | 22.13 | 10            | 春季  | 70     | 4   | 34     |
| 苏尼特左旗 | 20.3  | 6             | 春季  | 76     | 4   | 47     |
| 那仁    | 19.43 | 3             | 春季  | 86     | 4   | 52     |
| 二连浩特  | 21.33 | 7             | 春季  | 70     | 4   | 37     |
| 东乌旗   | 15.67 | 3             | 春季  | 73     | 4   | 35     |
| 乌拉盖   | 19.57 | 2             | 春季  | 89     | 4   | 40     |
| 锡林浩特  | 17.27 | 3             | 春季  | 67     | 4   | 34     |

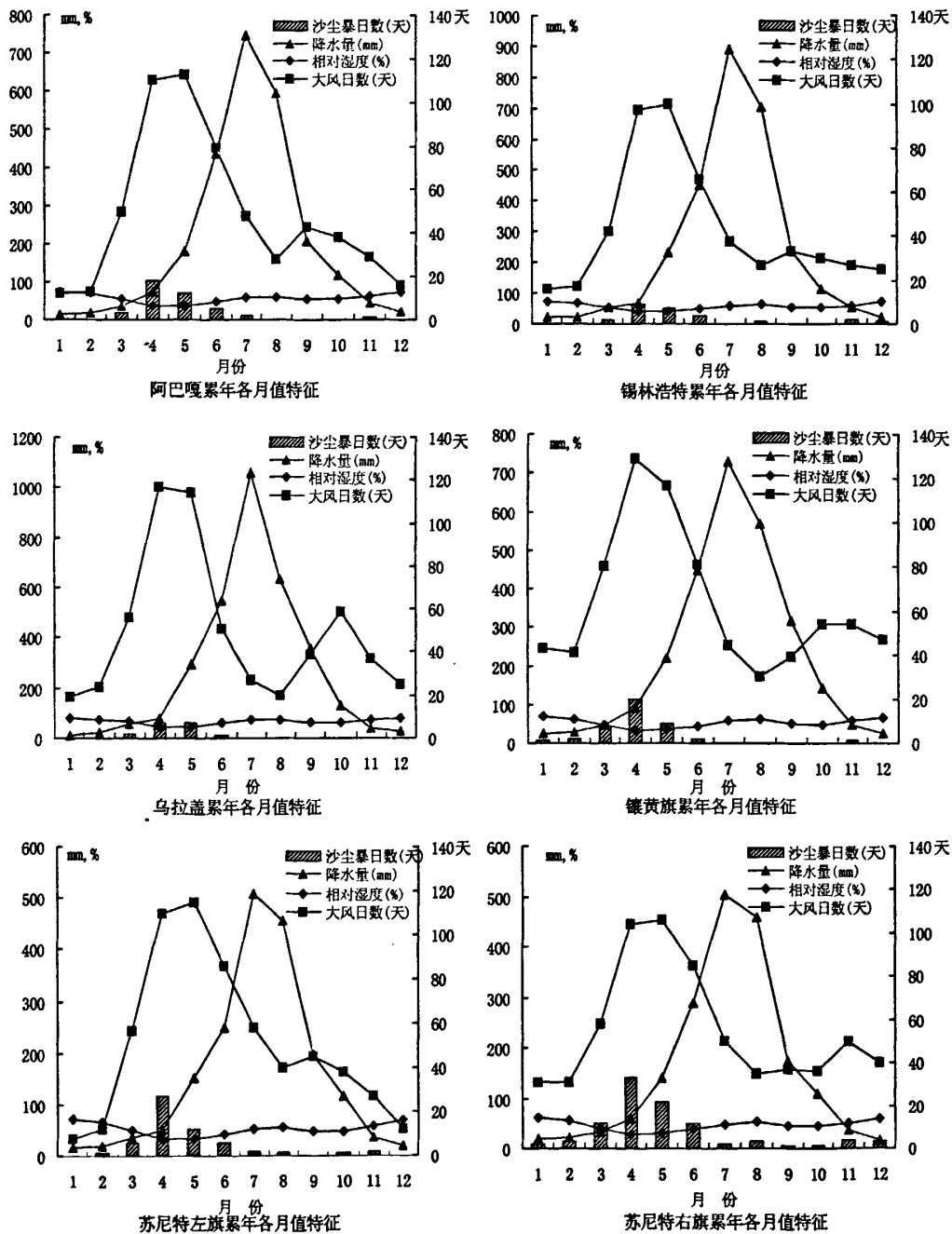


图 4 典型台站累年各月沙尘暴日数、大风日数、降水量、相对湿度变化特征图

Fig.4 The number of duststorms days, the number of high wind days, precipitation and relative humidity in months of 30 years

### 4.3 春季沙尘暴气象因子的分析

在前面的研究中发现,春季是沙尘暴的多发季节,春季沙尘暴发生日数占全年的40%左右,研究春季沙尘暴对全年沙尘暴发生成因具有重要的意义。

#### 4.3.1 主成分分析法

主成分分析是设法将原来众多具有一定相关性(比如  $P$  个指标),重新组合成一组新的互相无关的综合指标来代替原来的指标<sup>[90]</sup>。通常数学上的处理就是将原来  $P$  个指标作线性组合,作为新的综合指标。最经典的做法就是用  $F_1$  (选取的第一个线性组合,即第一个综合指标)的方差来表达,即  $\text{Var}(F_1)$  越大,表示  $F_1$  包含的信息越多。因此在所有的线性组合中选取的  $F_1$  应该是方差最大的,故称  $F_1$  为第一主成分。如果第一主成分不足以代表原来  $P$  个指标的信息,再考虑选取  $F_2$  即选第二个线性组合,为了有效地反映原来信息,  $F_1$  已有的信息就不需要再出现再  $F_2$  中,用数学语言表达就是要求  $\text{Cov}(F_1, F_2)=0$ ,则称  $F_2$  为第二主成分,依此类推可以构造出第三、第四,……,第  $P$  个主成分。

主成分模型:

$$\begin{aligned} F_1 &= a_{11}X_{11} + a_{21}X_{21} + \dots + a_{p1}X_p \\ F_2 &= a_{12}X_{12} + a_{22}X_{22} + \dots + a_{p2}X_p \\ &\dots \\ F_p &= a_{1m}X_{11} + a_{2m}X_{22} + \dots + a_{pm}X_p \end{aligned} \quad (1)$$

式中,  $a_{1i}, a_{2i}, \dots, a_{pi} (i=1, \dots, m)$  为  $X$  的协差阵  $\Sigma$  的特征值多对应的特征向量,  $X_1, X_2, \dots, X_p$  是原始变量经过标准化处理后的值(因为在实际应用中,往往存在指标的量纲不同,所以在计算之前先消除量纲的影响,而将原始数据标准化)。

#### 4.3.2 气象因子分析

沙尘暴的发生是由诸多因子决定的,每个气象因子从某个方面反映出对沙尘暴的影响程度是不同的。众多的气象因子以及各个气象因子之间存在着线性或非线性的相关性,使得它们提供的整体信息发生重叠,不易得出简明的规律,主成分分析就是研究如何将多指标问题化为较少的综合指标问题,以此来简化数据和提高分析结果的精度和信度。本文采用实测数据对春季气象因子进行了主成分分析。通过分析可知各因子统计信息见表4。

表 4 气象因子数据统计描述

Tab.4 Data statistics of meteorological factors

| 气象因子                  | 平均值     | 标准差    |
|-----------------------|---------|--------|
| 大风日数[x <sub>1</sub> ] | 93.13   | 11.62  |
| 地温[x <sub>2</sub> ]   | 74.8    | 16.43  |
| 积雪[x <sub>3</sub> ]   | 57.67   | 23.03  |
| 平均风速[x <sub>4</sub> ] | 46.8    | 5.8    |
| 蒸发量[x <sub>5</sub> ]  | 2307.33 | 421.63 |
| 降水量[x <sub>6</sub> ]  | 117.47  | 41.3   |
| 相对湿度[x <sub>7</sub> ] | 40.93   | 9.46   |
| 气温[x <sub>8</sub> ]   | 38.87   | 14.38  |

主成分分析结果见表 5，由表中可以看出前 3 个主成分的累计方差贡献率超过了 89%，表明这三个主成分基本包含了这 8 个气象因子的所有变异信息，其中第一个主成分方差贡献率达到 61.08%，它综合了最多最重要的变异信息。

表 5 主成分分析结果

Tab.5 Principal components analysis results

| 主成分 | 特征值   | 方差贡献率（%） | 累计方差贡献率（%） |
|-----|-------|----------|------------|
| 1   | 4.886 | 0.6108   | 0.6108     |
| 2   | 1.459 | 0.1824   | 0.7932     |
| 3   | 0.843 | 0.1054   | 0.8986     |

前 3 个主成分可以简化原来观察系统，且能够保留原观察系统变异信息的 89.86%，从而可用 3 个彼此不相关的综合指标分别综合存在于原有的 8 个指标的各类信息中。各综合指标代表的信息不重叠。表 10 为气象因子的前 3 个主成分的因子载荷矩阵。从表 6 中因子载荷的大小可以看出：

表 6 气象因子的前 3 个主成分的因子载荷矩阵

Tab.6 factor loading matrix of meteorological factors 3 principal components

| 气象因子                  | 成分      |         |         |
|-----------------------|---------|---------|---------|
|                       | 1       | 2       | 3       |
| 大风日数[x <sub>1</sub> ] | 0.2572  | 0.6367  | 0.0344  |
| 地温 [x <sub>2</sub> ]  | 0.3889  | -0.3080 | 0.1286  |
| 积雪[x <sub>3</sub> ]   | -0.4084 | 0.2077  | -0.1223 |
| 平均风速[x <sub>4</sub> ] | 0.3042  | 0.5742  | 0.1095  |
| 蒸发量[x <sub>5</sub> ]  | 0.4387  | 0.0987  | -0.0226 |
| 降水量[x <sub>6</sub> ]  | -0.2993 | 0.2852  | -0.4975 |
| 相对湿度[x <sub>7</sub> ] | -0.2534 | 0.1207  | 0.8233  |
| 气温[x <sub>8</sub> ]   | 0.4203  | -0.1455 | -0.1717 |

第一主成分的表达式为:

$$\text{PRIN1}=0.2572x_1+0.3889x_2-0.4084x_3+0.3042x_4+0.4387x_5-0.2992x_6-0.2534x_7+0.4203x_8 \quad (2)$$

其中,  $x_5$ 、 $x_8$ 、 $x_3$ 、 $x_2$  的系数最大, 表明第一主成分值大时, 蒸发量、气温、积雪、地温影响最大, 可以称第一主成分为温度因子, 其中蒸发量和气温是影响沙尘暴的限制性因子。春季温度将显著升高, 地表蒸发大, 土壤进一步变干, 土壤解冻, 土质疏松, 同时春季地表升温快, 大气处于不稳定的状态, 垂直运动加强, 加上此时风速明显加大, 特别有利于沙尘暴的形成。

第二主成分的表达式为:

$$\text{PRIN2}=0.6367x_1-0.3080x_2+0.2077x_3+0.5742x_4+0.0987x_5+0.2852x_6+0.1207x_7-0.1455x_8 \quad (3)$$

其中  $x_1$ 、 $x_4$  系数最大, 表明第二主成分值大时, 大风日数和平均风速影响最大, 可以称第二主成分为风因子。大风是沙尘暴形成的主要动力因素之一, 大风日数与沙尘暴天气的季节性变化也表现出很好的一致性, 即大风多的季节沙尘暴天气也多, 说明了大风在沙尘暴形成的过程中起到及其重要的作用。

第三主成分的表达式为:

$$\text{PRIN3}=0.0344x_1+0.1286x_2-0.1223x_3+0.1095x_4-0.0226x_5-0.4975x_6+0.8233x_7-0.1717x_8 \quad (4)$$



其中,  $x_7$  系数最大, 超过了 50%, 也是影响沙尘暴的一个不可忽略的因子。如图 5 显示, 相对湿度越低沙尘暴日数越高, 说明湿度小的干旱地区植被稀疏、土壤干燥, 沙化严重, 易发生沙尘暴。由以上分析得知 8 个变量分为 3 类:  $\{x_5, x_8, x_3, x_2\}$ 、 $\{x_1, x_4\}$ 、 $\{x_7\}$ 。

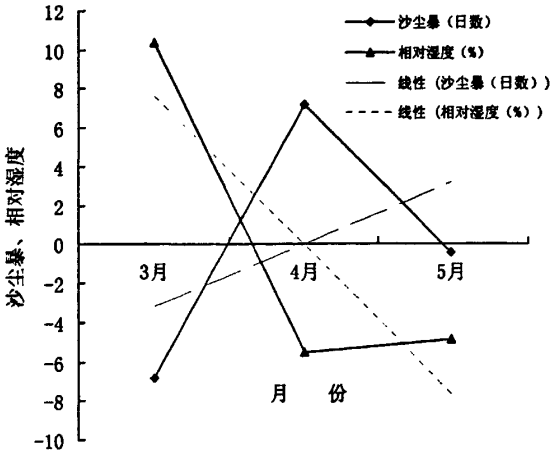


图 5 内蒙古锡盟 3~5 月相对湿度和沙尘暴日数距平图

Fig.5 Relative humidity and sand storm date number distance in March to May in Xilin

综上所述, 春季沙尘暴的气象成因主要有以下几个方面:

- (1) 第一主成分为温度因子, 其中蒸发量和气温是影响沙尘暴的限制性因子。
- (2) 第二主成分为风因子。大风是沙尘暴形成的主要动力因素之一。
- (3) 第三主成分为湿度因子, 相对湿度是影响沙尘暴不可忽视的重要因子, 方差为 0.8233, 大比例的超过 50%。
- (4) 本文通过主成分分析, 得出可以用 3 个新的综合指标 (温度因子、风因子、湿度因子) 来代替原来影响沙尘暴的 8 个气象因子, 且能够保留原观察系统变异信息的 89.86%。

## 5 锡林郭勒地区沙尘暴的时空分布

### 5.1 研究方法

Golden Software Surfer (以下简称 Surfer) 是一款画三维图 (等高线, image map, 3d surface) 的软件。Surfer 最主要的功能是绘制等高线图, 但并不是我们具有了数据文件就可以直接绘制等高线, surfer 要求绘制等高线的数据有特殊的格式要求, 即首先要将数据文件转换成 Surfer 可识别的 grd 文件格式, 才能绘制等高线。假设有三列数据分别为 X, Y, Z, 其中 Z 为点 (x, y) 处的值, 存储在 test.dat 文件中, 其中第一列是 X 坐标, 第二列是 Y 坐标, 第三列是 (x, y) 上的值 Z, 则可绘制等高线。本文中, x 表示经度, y 表示纬度, z 表示在特定区域上沙尘暴的发生日数, 应用此方法即可绘制锡林郭勒地区沙尘暴发生日数等值线分别图, 研究锡林郭勒地区沙尘暴空间分部规律。

根据同类事物应具有相近特性, 而不同事物在这些特性上差异较大的假定, 将所研究的事物进行分类, 这种研究方法称为聚类 Cluster。在 SPSS 中, 有两种方法进行聚类分析, 一种是并不指定最终的类数, 所有个案不断相聚, 最终聚为一类, 结论将在聚类过程中寻求, 这种聚类称为分层聚类。另一种是在指定了用于聚类分析的变量和类数后进行的聚类, 称为快速样本聚类, 本文采用分层聚类。

分层聚类是指事物的性质是通过测量变量来描述的, 因此, 变量可以揭示事物的一些内部属性。如果以 n 个数值型变量 (n 维空间) 来描述某一类事物, 则一个事物就是 n 维空间中是一个点。在 A、B、C 三组数据点群中, 每组内部的数据点的坐标数值都比较接近。用几何距离表示就是:

$$|p_i - p_j| = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 + (z_i - z_j)^2} \dots\dots\dots (5)$$

由于在同一类中数据点的坐标值比较接近或几何距离比较接近, 这点的总体性质就比较接近。分层聚类分析就是通过对变量的测量, 将比较接近的个案找出来归为一类, 进一步再将比较接近的类合并成为新的类, 逐层合并直到最后合并成为一类。应用此方法研究锡林郭勒地区沙尘暴区划。

## 5.2 时间分布特征

### 5.2.1 年代际变化

从表 7 中可以看出, 从 20 世纪 70 年代至 90 年代, 锡林郭勒地区沙尘暴发生频率基本上呈一致的递减趋势, 除那仁以外, 其他各旗县 80 年代较 70 年代略有减少, 而 90 年代较 70 年代大幅度减少。

表7 30年间15个站点各年代沙尘暴年平均日数统计 (天/年)

Tab7 The statistics of the decenary number of duststorms of 15 stations in 30 Years

| 台 站   | 70 年代 | 80 年代 | 90 年代 |
|-------|-------|-------|-------|
| 阿巴嘎旗  | 5.7   | 4     | 2.4   |
| 太卜寺旗  | 8.2   | 4.7   | 0.5   |
| 多 伦   | 5.2   | 2     | 0.5   |
| 正 兰 旗 | 11.4  | 7.7   | 2.9   |
| 正镶白旗  | 7.4   | 6.2   | 2.4   |
| 锡林浩特  | 6     | 1.9   | 0.2   |
| 西 乌 旗 | 2.6   | 1.3   | 0.3   |
| 镶 黄 旗 | 5.2   | 3.9   | 3.8   |
| 朱 日 和 | 8.9   | 8.2   | 7.4   |
| 苏尼特右旗 | 17.1  | 8     | 4.1   |
| 苏尼特左旗 | 7.8   | 5.1   | 4.4   |
| 那 仁   | 2     | 4.9   | 1.8   |
| 二连浩特  | 9.9   | 7.8   | 3.6   |
| 东 乌 旗 | 3.8   | 2.8   | 1.3   |
| 乌 拉 盖 | 3     | 1.9   | 0.4   |

5.2.2 年际变化

从图 6 可知,锡林郭勒地区 15 个站点平均每站沙尘暴出现日数的年际变化趋势。从图中可以看出,从 1971 年到 2000 年 30 年里,沙尘暴出现日数在波动中总体呈下降趋势,尤其是在 1976 年之后沙尘暴日数明显减少,但是在 1984 年和 1990 年又出现两次明显的高峰期,总体看来,30 年沙尘暴的发生日数是呈下降趋势的。

虽然锡林郭勒地区沙尘暴的发生日数总体呈下降趋势,但有关统计表明,我国北方强沙尘暴天气却有加重趋势。强风沙灾害在 10 世纪前平均 100 年一次,20 世纪 50、60 年代发展到每两年一次,进入 90 年代,已发展到一年一次以上。近几年来随着经济的不断发展,人为的不合理开发活动加剧,植被和地表结构受到严重破坏,如滥垦、过渡放牧、乱挖(据调查一根甘草,破坏 3-5m<sup>2</sup> 的土壤)、乱樵、工业污染严重及工农业快速发展,使得部分地区水资源分配利用不当,造成一些地区严重缺水,地下水资源超采,地下水位逐年迅速下降,大面积人工和天然植被出现枯梢和死亡等一系列人为活动造成的生态环境日益脆弱。作为我国荒漠化主体的风蚀荒漠化土地,不仅面积不断扩大,而且其扩展速率也在不断提高。

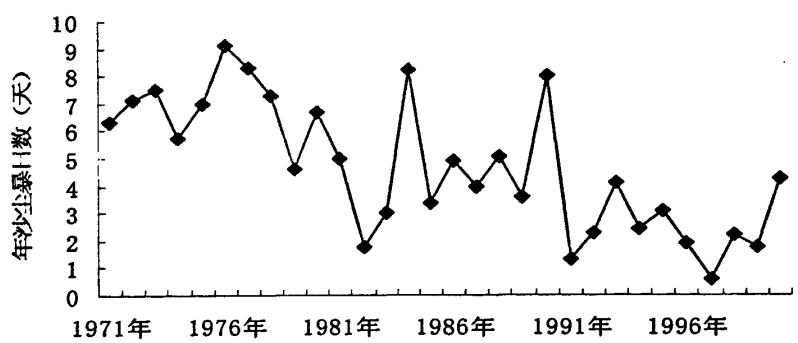


图 6 锡林郭勒地区沙尘暴年际变化趋势图

Fig.6 Sandstorm year border change tendency chart in Xilin Gol Area

因此，为了进一步抑制和减弱沙尘暴的发生次数和强度，加强改善生态环境的力度是根本措施之一。

5.2.3 季节变化

统计锡林郭勒地区 15 个站点各月沙尘暴记录情况，由图 7 和表 9 可知，一年中 3、4 和 5 月沙尘暴发生次数偏高，尤其 4 月份沙尘暴发生次数为全年最高，占全年的 42.8%。5 月以后沙尘暴发生次数极具下降，9 月和 10 月为最低。春季沙尘暴发生频率除了与该地区一年之中以春季风速为最大有关外，还与此时地面开始融化、气温上升、降水稀少，使得裸露的沙土结构变得疏松有关，一旦有较强的天气系统活动就很容易产生沙尘暴。

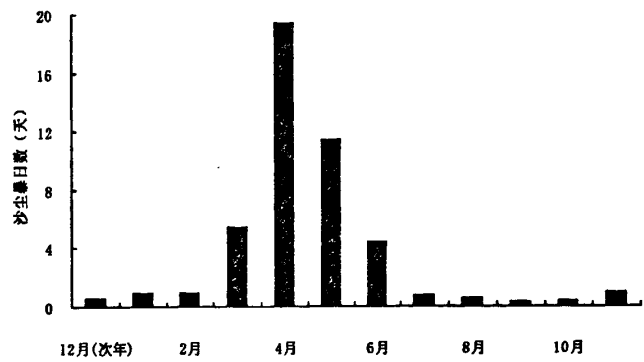


图 7 锡林郭勒地区沙尘暴季节变化图

Fig.7 Sandstorm season change chart in Xilin Gol Area

夏季雨水相应增多，风力减弱，下垫面植被覆盖率增高，沙尘暴发生的机率也随之减少<sup>[61-63]</sup>。秋季地表的植被覆盖状况较好，大风天气少，沙尘暴发生频率为全年最低。冬季地面冻结，一般来说大风难以将冻结的沙土吹离地面而形成沙尘暴天气过程，因此冬季沙尘暴发生的次数也少。

表 8 15 个站点沙尘暴春季统计表

Tab.8 Sandstorm spring statistics in 15 stations

| 台站    | 年沙尘暴日数(天) | 最多季 | 占全年(%) | 最多月 | 占全年 (%) |
|-------|-----------|-----|--------|-----|---------|
| 阿巴嘎   | 4         | 春季  | 83     | 4   | 45      |
| 太卜寺   | 4         | 春季  | 89     | 4   | 42      |
| 多伦    | 3         | 春季  | 85     | 4   | 58      |
| 正兰旗   | 7         | 春季  | 78     | 4   | 43      |
| 正镶白旗  | 5         | 春季  | 83     | 4   | 42      |
| 西乌旗   | 1         | 春季  | 86     | 4   | 43      |
| 镶黄旗   | 4         | 春季  | 86     | 4   | 47      |
| 朱日和   | 8         | 春季  | 80     | 4   | 43      |
| 苏尼特右旗 | 10        | 春季  | 70     | 4   | 34      |
| 苏尼特左旗 | 6         | 春季  | 76     | 4   | 47      |
| 那仁    | 3         | 春季  | 86     | 4   | 52      |
| 二连浩特  | 7         | 春季  | 70     | 4   | 37      |
| 东乌旗   | 3         | 春季  | 73     | 4   | 35      |
| 乌拉盖   | 2         | 春季  | 89     | 4   | 40      |
| 锡林浩特  | 3         | 春季  | 67     | 4   | 34      |

5.3 空间分布特征

我国北方地区春季多大风，是形成大范围沙尘暴的主要动力之一。冷空气是产生沙尘暴的主要因素，冷空气引起我国沙尘天气的路径主要有三条<sup>[64]</sup>，其中东路为：从蒙古国东中部南下，影响我国东北、内蒙古东部、中部和山西、河北、京津及以南地区。锡林郭勒地区正处于东路路径，是处于冷空气入境中国的风口区。

1971~2000 年的 30 年间，锡林郭勒地区 15 个典型代表台站沙尘暴的年平均天数等值线如图。从图 8 中可以看出：

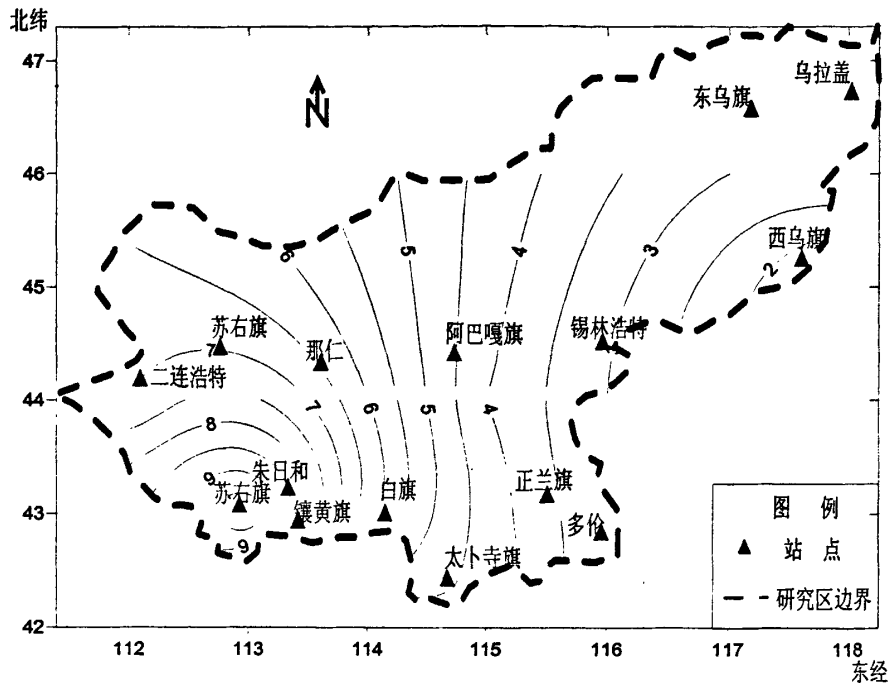


图 8 锡林郭勒地区 15 个站点年沙尘暴日数等直线分布图

Fig.8 Yearly sandstorm date number isoline distribution map

(1) 锡林郭勒地区各旗县有不同程度的沙尘暴出现，其分布特点也是明显的西部地区多于东部地区。东部地区的锡林浩特和多伦年平均沙尘暴日数为 3 天，阿巴嘎为 4 天，正镶白旗为 5 天，而西乌旗仅 1 为天；相比而言，西部地区的沙尘暴明显增多，年平均沙尘暴日数在 7 天左右，苏尼特右旗年沙尘暴日数为 6 天，朱日和为 8 天，年平均沙尘暴日数最大值出现在苏尼特右旗为 10 天。

(2) 多发区集中。从图中可以看出，沙尘暴多发区主要集中在浑善达克沙地周围，这说明这些地区为沙尘暴天气的出现提供了极为丰富的物质源。

(3) 沙尘暴发生在干旱、半干旱、半湿润等区域，从图中可知沙尘暴发生日数的明显差异分布与下垫面的差异有关，锡林郭勒地区东部主要以典型草原和草甸草原为主，植被覆盖率较高，能有效阻止沙土的移动，中部地区多伦和阿巴嘎是典型的农牧交错带，人为干扰显著，而相比西部的景观主要是荒漠草原，松散干燥的地表为沙尘暴的产生提供了丰富的沙源。

图 9~12 是锡林郭勒地区 30 年四个季节各代表月份的沙尘暴天气空间分布图，其中，1 月是冬季的代表月份，4 月是春季的代表月份，7 月是夏季的代表月份，10 月是秋季的代表月份。可以看出：从平均分布发生次数来看，4 月发生沙尘暴最多，10 月最少，这与前面所做的季节统计结果一致。从空间分布来看，4 月沙尘暴分布最

广，10 月范围最小。1 月最大值出现在正蓝旗，4 月苏尼特右旗出现最大值，7 月二连浩特、苏尼特右旗、苏尼特左旗和朱日和出现最大值，10 月那仁、苏尼特右旗、苏尼特左旗和朱日和呈现最大值。由此可见，无论是哪一个季节，沙尘暴发生频繁的地区都集中在锡林郭勒地区西部及靠近浑善达克沙地周边的地区。

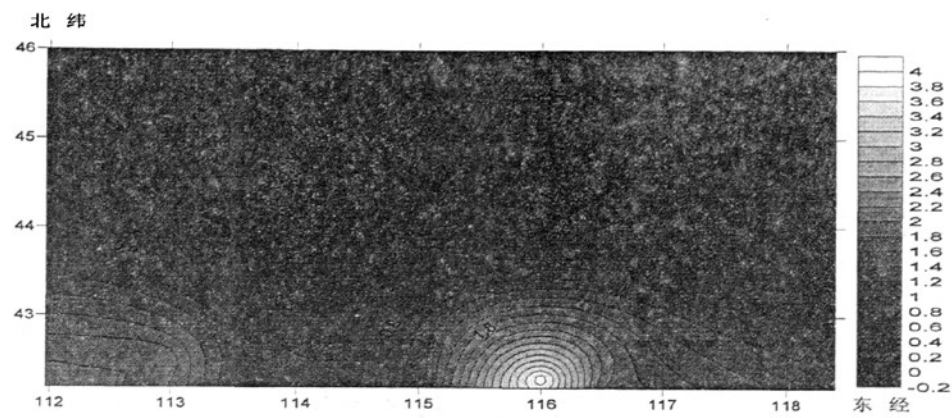


图 9 锡林郭勒地区 1971~2000 年 1 月沙尘暴天气的空间分布图（单位：天/年）

Fig.9 Spatial distribution of sandstorm in January in 1971~2000 year in Xilin Gol Area

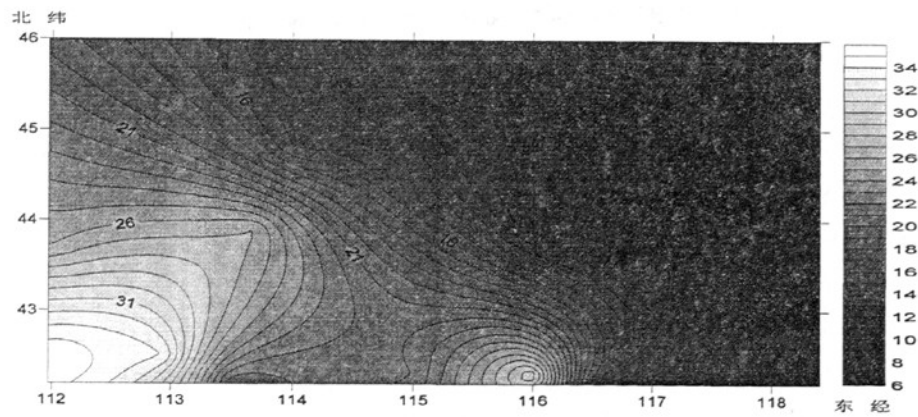


图 10 锡林郭勒地区 1971~2000 年 4 月沙尘暴天气的空间分布图（单位：天/年）

Fig.10 Spatial distribution of sandstorm in January in 1971~2000 year in Xilin Gol Area

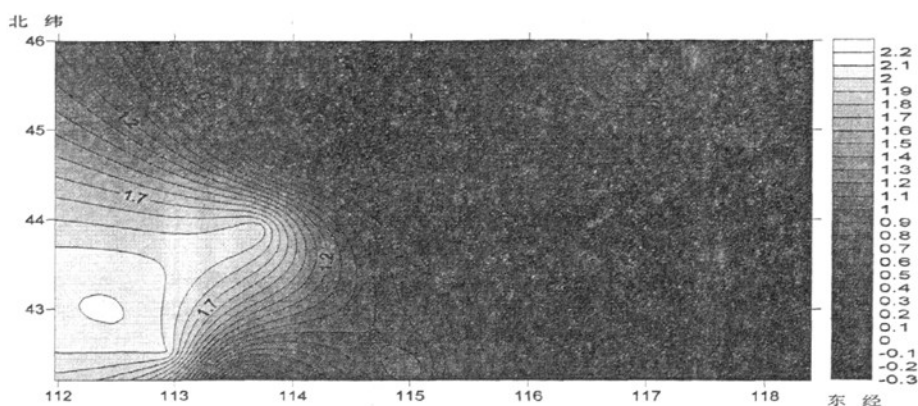


图 11 锡林郭勒地区 1971~2000 年 7 月沙尘暴天气的空间分布图 (单位: 天/年)

Fig.11 Spatial distribution of sandstorm in July in 1971~2000 year in Xilin Gol Area

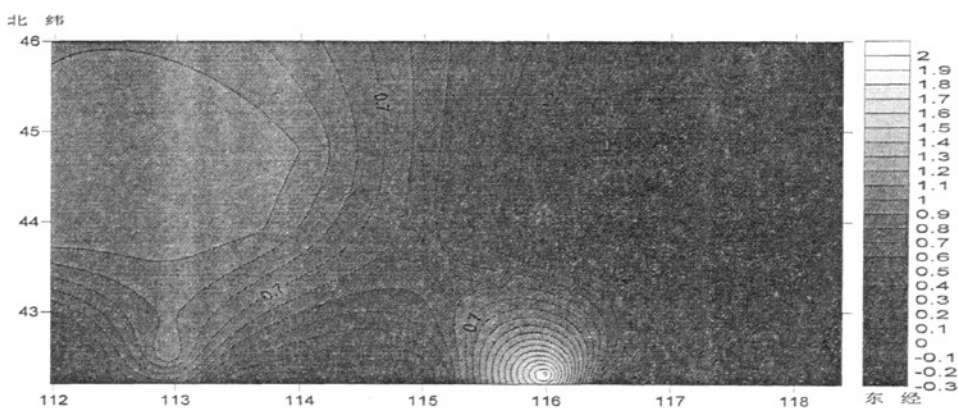


图 12 锡林郭勒地区 1971~2000 年 10 月沙尘暴天气的空间分布图 (单位: 天/年)

Fig.12 Spatial distribution of sandstorm in October in 1971~2000 year in Xilin Gol Area

#### 5.4 沙尘暴的区划

按照沙尘暴等级及我国沙尘暴分布特征研究<sup>[95]</sup>, 沙尘暴发生频率划分为: 年沙尘暴平均日数大于 20 天为高频区; 年沙尘暴平均日数 10~20 天为多发区; 年沙尘暴平均日数 5~10 天为易发区; 年沙尘暴平均日数 5 天以下为影响区。通过分析可知, 锡林郭勒地区有 9 个站点处于易发区, 其中苏尼特右旗沙尘暴发生频率最强; 而其余 6 个站点处于影响区, 其中西乌旗发生频率最低 (表 9)。因此, 改善环境, 退耕还林, 防止过度放牧、砍伐等人为不合理的活动, 把根本不适合耕种的土地还原成林地、牧地, 把已经被破坏的环境恢复原有的平衡状态是防止沙尘暴和土地荒漠化的重要措施。



表9 15个站点沙尘暴区划  
Tab.9 Sandstorm regionalization in 15 stations

| 站点    | 年平均沙尘暴日数 | 分布  |
|-------|----------|-----|
| 苏尼特右旗 | 9.7      | 易发区 |
| 朱日和   | 8.2      |     |
| 正兰旗   | 7.3      |     |
| 二连浩特  | 7.1      |     |
| 苏尼特左旗 | 5.8      |     |
| 正镶白旗  | 5.3      |     |
| 太卜寺旗  | 4.5      | 影响区 |
| 镶黄旗   | 4.3      |     |
| 阿巴嘎旗  | 4.0      |     |
| 那仁    | 2.9      |     |
| 锡林浩特  | 2.7      |     |
| 东乌旗   | 2.6      |     |
| 多伦    | 2.6      |     |
| 乌拉盖   | 1.8      |     |
| 西乌旗   | 1.4      |     |

## 6 基于 BP 神经网络的沙尘暴预测模型

### 6.1 人工神经网络模型

人工神经网络(Artificial Neural Networks-ANN), 又称并行分布处理模型(Parallel distributed processing model)或连接机制模型(Connectionism model), 是基于模仿人类大脑的结构和功能而构成的一类信息处理系统, 它具有很多与人类智能相类似的特点, 诸如结构与处理的并行性、知识分布存储、很强的容错性、通过训练学习而具备适应外部环境的能力、模式识别能力和综合推理能力。20 世纪 80 年代以来, ANN 研究重新崛起, 已成为高技术研究领域中一门令人瞩目的新兴学科分支。世界各国对 ANN 的理论与应用研究得到了迅速发展, ANN 理论的应用已渗透到各个领域, 尤其是在模式识别、知识处理、非线性优化、智能控制、生物工程、机器人研制等方面得到了广泛应用和研究。

ANN 的发展可以追溯到 1800 年 Frued 的前精神分析学时期, 他已经做了一些初步的工作。1943 年美国心理学家 Warren 与数学家 Water H Pitts 合作, 用逻辑的数学工具研究客观世界在形式神经网络中的描述, 从此开创了对神经网络的理论研究。他们在分析、总结神经元基本特性的基础上, 首先提出了神经元的数学模型, 简称 MP 模型。后来此模型最终发展成一种有限自动机理论, 此模型沿用至今, 直接影响着这一领域的研究进展。1949 年 D.O.Hebb 提出了关于 ANN 学习机理的“突触修正假设”; 1957 年 F.Rosenblant 首次提出并设计制作了著名的感知器, 第一次从理论研究转向工程实现阶段, 掀起了研究 ANN 的高潮。1962 年 Bernard Widrow 和 Marcian Hoff 提出了自适应线性元件网络, 实质上是一个两层前馈感知机型网络。进入 20 世纪 70 年代后, 虽然 ANN 相对处于低潮期, 但是仍有不少科学家在其困难的条件下不懈地努力奋斗, 主要是提出了各种不同的网络模型, 开展了增加网络功能和各种学习算法的研究。Stephen Grossberg 是所有研究 ANN 系统中最有影响者, 他周到、广泛地研究了心理学(思维)和生物学(脑)的处理, 以及人类信息处理的现象, 把思维及脑紧密结合在一起, 成为统一理论。神经网络研究第二次高潮到来的标志和揭开神经网络计算机研制序幕的是美国加州工学院物理学家 John Hopfield, 他于 1982 年和 1984 年提出了模仿人脑的神经网络模型, 即著名的 Hopfield 模型。1984 年和 1985 年 Terrence Sejnowski 与 Hinton, Ackley 用数理方法研究神经网络, 提出了 Boltzmann(玻尔兹曼)机。1986 年 McClelland 和 Rumelhart 提出了多层网络的误差反传算法(Back Propagation, 简称为 BP 算法)。

#### 6.1.1 BP 神经网络模型的原理

BP 神经网络按其拓扑结构分, 属于前向网络, 但它采用的是反向传播的学习方法, 故又称为反向传播神经网络(Back-Propagation Neural Network), 简称为 BP 网络。BP 模型是一种多层感知器结构, 由若干层神经元组成, 除输入层和输出层外,

包括一个或多个中间隐含层。一个具有 3 个输入和一个隐含层的 BP 网络模型结构如图 13。

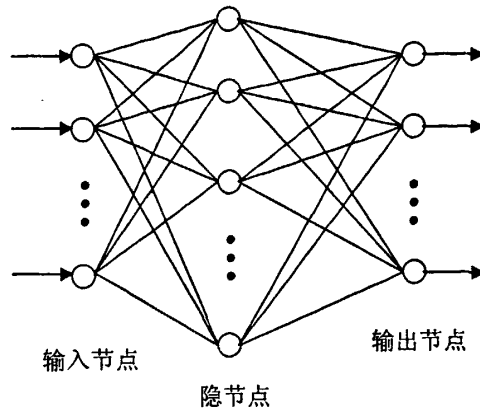


图 13 BP 网络模型结构图

Fig.13 structure of BP network model

BP 网络各层节点之间全部互相连接，同层节点之间不连接，每层节点的输出只影响下一层节点的输出。BP 算法的主要思想是：对于  $n$  个输入学习样本  $a_1, a_2, \dots, a_n$ ，已知与其相对应的输出样本  $y_1, y_2, \dots, y_q$ ，学习的目的是用网络的实际输出  $c_1, c_2, \dots, c_q$ ，与目标矢量  $y_1, y_2, \dots, y_q$  之间的误差来修改其权值，使  $c_k (k=1, 2, \dots, q)$  与其期望的  $y_k$  尽可能的接近。即：使网络输出层的误差达到最小，它是通过连续不断地在相对于误差函数斜率下降的方向上计算网络权值和阈值的变化而逐渐逼近目标的。每一次权值和偏差的变化都与网络误差的影响成正比，并以反向传播的方式传递到每一层。

### 6.1.2 BP 网络训练过程

为了应用神经网络，在选定所要设计的神经网络结构之后（其中包括的内容有网络的层数、每层所含神经元的个数和神经元的激活函数），首先要考虑神经网络的训练过程。下面用两层神经网络来叙述 BP 网络的训练步骤。

(1) 用小的随机数对每一层的权值  $w$  和阈值  $b$  初始化，以保证网络不被大的加权输入饱和，同时还要进行以下参数的设计或初始化。

设定期望误差最小值：err-goal

设定最大循环次数：max-epoch

设置修正权值的学习速率：一般选取 0.01-0.7

从 1 开始的循环训练：for-epoch=1:max-epoch

(2) 计算网络输出矢量  $A1$  及  $A2$ ，以及网络误差  $E$ ：

$A1 = \text{tansig}(w1 * p, b1)$

$$A2 = \text{purelin}(w2 * A1, b2)$$

$$E = T - A$$

(3) 计算各层反向传播的误差变化  $D2$  和  $D1$ ，并计算各层权阈值的修正值及新的权阈值：

$$D2 = \text{deltalin}(A2, E)$$

$$D1 = \text{deltalan}(A1, D2, w2)$$

$$[dw1, db1] = \text{learnbp}(p, D1, lr)$$

$$[dw2, db2] = \text{learnbp}(p, D2, lr)$$

$$w1 = w1 + dw1; b1 = b1 + db1$$

$$w2 = w2 + dw2; b2 = b2 + db2$$

(4) 再次计算修正后的误差平方和：

$$SSE = \text{sumsq}(T - \text{purelin}(w2 * \text{tansig}(w1 * p, b1), b2))$$

(5) 检查  $SSE$  是否小于  $\text{eer-goal}$ ，若是，则训练结束；否则继续。

在沙尘暴的人工神经网络模型预测中，BP 网络模型结构设计与应用案例分析大多停留在起步应用和试探阶段，还没有广泛的应用和深入研究。对于如何合理确定神经网络的结构和算法问题仍有待深入研究。本文在沙尘暴预测中应用 BP 神经网络对网络层数、隐层神经元数、激励函数及改进 BP 算法的具体应用进行探讨。BP 模型结构设计概括起来包括以下三个方面的内容：(1) 网络拓扑结构的设计：隐含层数、隐层神经元数、激励转移函数的选择；(2) 网络主要参数的确定：动量项系数、学习速率、学习次数、训练样本的确定。

## 6.2 BP 神经网络的沙尘暴预测模型

### 6.2.1 数据来源和模型输入因子的选择

本文根据锡林郭勒地区 15 个台站 1971~2000 年的气象资料，结合同行研究沙尘暴的成果，选择反映风、水分、温度特征的 6 个气象因子进行相关分析，作为二次选择沙尘暴预测模型的主要输入因子（见表 10）。相关分析显示，年大风日数、年平均地温、年蒸发量、相对湿度与年沙尘暴日数有较好的相关性，可以把这四个因子作为年沙尘暴日数预测模型的输入因子，以年沙尘暴日数为输出因子。在实际 BP 模型应用中，对输入、输出的因子均经过标准化处理，以消除量纲的影响。在网络的训练过程中，当其权值调得过大，可能使得所有的或大部分神经元的加权输入和过大，这使得激活函数的输入工作在 S 型转移函数的饱和区，从而导致其导数非常小而使得对网络权值的调解工程几乎停顿下来。输入样本采用 0 到 1 之间的数值可使权值较大的输入落在隐含层 Sigmoid 激活函数梯度较大范围内，有效地防止了上述情况的发生<sup>[98, 99]</sup>。

表 10 年沙尘暴日数与气象因子的相关系数分析

Tab.10 Correlation coefficients between the yearly number of duststorms days and meteorological factors

| 年沙尘暴日数 | 1        |          |          |          |          |          |   |
|--------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|---|
| 年大风日数  | 0.59147* | 1        |          |          |          |          |   |
| 年平均风速  | 0.18597  | 0.33007  | 1        |          |          |          |   |
| 相对湿度   | -0.3954* | -0.3492* | -0.6139* | 1        |          |          |   |
| 年降水量   | -0.23523 | -0.04894 | -0.2971  | 0.57612  | 1        |          |   |
| 年蒸发量   | 0.48705* | 0.46031* | 0.27107* | -0.6909* | -0.7727* | 1        |   |
| 年平均地温  | 0.52738* | 0.43479* | 0.5286*  | -0.8256* | -0.6324* | 0.81224* | 1 |

注：\*为显著水平 p<0.05

6.2.2 网络层数

理论上已经证明，三层 BP 网络能够逼近任何有理函数。增加网络的层数主要可以进一步降低误差，但同时也使网络复杂化。目前在 BP 模型的应用中，多见为三层 BP 结构。在网络层数确定时，1971-1997 年气象数据作为训练样本，1998-2000 年气象数据作为检验样本。通过 4 因子三层 BP 与四层 BP 模拟、检验、预测比较，发现对于 27 年训练样本，在相同的收敛误差精度情况下，4 个输入因子的三层模型的检验效果略好于四层模型(见表 11、12 和图 14)，本文采用 3 层网络结构。

表 11 三层 4 因子训练结果

Tab.11 Three levels 4 factors training results

| 隐层神经元<br>隐层单元数<br>(3 层) 4 因子 | 1     | 2    | 4     | 5      | 6     | 9     | 10     |
|------------------------------|-------|------|-------|--------|-------|-------|--------|
| 训练次数 N                       | 8000  | 8000 | 8000  | 8000   | 8000  | 8000  | 8000   |
| 最大拟合误差                       | 0.977 | 0.98 | 0.979 | 1.2955 | 1.034 | 0.979 | 0.9886 |
| 学习速率 lr                      | 0.01  | 0.01 | 0.01  | 0.01   | 0.01  | 0.01  | 0.01   |
| 检验误差                         | 0.069 | 0.07 | 0.068 | 0.0896 | 0.05  | 0.068 | 0.065  |

表 12 四层 4 因子训练结果

Tab.12 Four levels 4 factors training results

| 隐层神经元<br>隐层单元数<br>(4 层) 4 因子 | 1     | 2    | 4     | 5      | 6     | 9     | 10     |
|------------------------------|-------|------|-------|--------|-------|-------|--------|
| 训练次数 N                       | 8000  | 8000 | 8000  | 8000   | 8000  | 8000  | 8000   |
| 最大拟合误差                       | 1.269 | 0.82 | 0.043 | 0.0057 | 0.01  | 0.011 | 0.0072 |
| 学习速率 lr                      | 0.01  | 0.01 | 0.01  | 0.01   | 0.01  | 0.01  | 0.01   |
| 检验误差                         | 0.114 | 0.09 | 2E-04 | 5E-05  | 5E-04 | 3E-05 | 8E-05  |

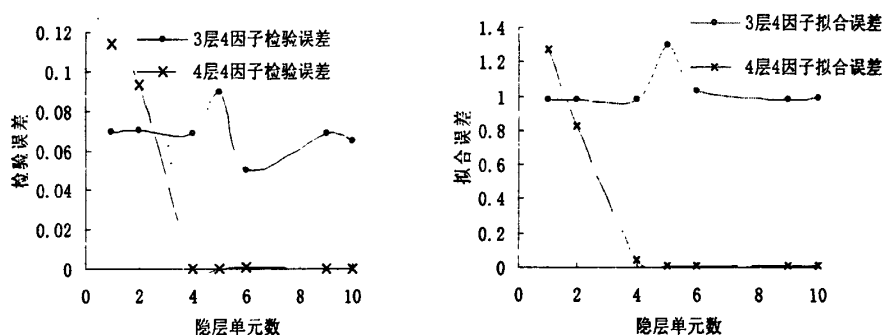


图 14 不同 BP 层数、隐层单元数与误差关系趋势图

Fig.14 Tendency chart of different BP layer, the implicit level unit number and the error

### 6.2.3 隐层神经元数的确定

BP 网络各层节点数的确定关键是隐含层节点数的选取。节点数太少不能满足拟合精度，且训练次数多、训练时间长。目前，一般采用试算法 (Trial-and-error) 来确定隐含层的节点数。输入层与输出层的确定直接与实际问题的输入变量和输出变量密切相关。输入层取 4 个神经元，分别与年大风日数、年平均地温、年蒸发量、相对湿度对应；输出层 1 个神经元，与年沙尘暴日数相对应。由表 12 可知，隐层神经元数为 6 时检验误差最小。因此得出最终的神经网络结构为 4-6-1。

### 6.2.4 每层激活函数

不同的激励函数可以反应样本输入与输出之间的不同对应关系，通过对三层 BP

网络中输入、输出的激励函数进行了不同组合训练对比,以沙尘暴发生日数为训练样本,在相同的训练次数、学习速率条件下,5 组输入层—输出层总的激励函数中(见表 13),使用 Tansig-logsig、Logisig-logsig、Logsig-purelin 组合都出现不收敛现象;Tansig-tansig 组合模型收敛、训练、检验结果最好;Tansig-purelin 前期收敛虽不稳定,但后期稳定收敛,拟合精度略逊于 Tansig-tansig 组合。考虑到 BP 网络的非线性逼近能力是通过 S 型的激活函数体现出来的,因此输入层一般采用 S 型的激活函数。输出层可以采用 S 型或线性的传递函数,采用 S 型传递函数时虽然其非线性逼近速度可以加快,但输出范围受到 0~1 或-1~1 范围的限制;输出层采用 purelin 传递函数,网络输出可以不受约束<sup>[100]</sup>。

表 13 不同激励函数组合结果对比

Tab.13 Combination results of different excitation functions

| 激励函数组合 | 输入层—输出层        | 最大拟合误差 (%) | 收敛情况 | 检验误差 (%) |
|--------|----------------|------------|------|----------|
| 1      | Tansig-tansig  | 0.46       | 收敛   | 2.13     |
| 2      | Tansig-logsig  | 79         | 不收敛  | —        |
| 3      | Logisig-logsig | 290        | 不收敛  | 80       |
| 4      | Logsig-purelin | 256        | 不收敛  | —        |
| 5      | Tansig-purelin | 9.01       | 收敛   | 2.25     |

综合分析,本文沙尘暴预报采用 Tansig-purelin 组合作为 BP 模型的输入输出激励函数,输入层激活函数表达式为  $f(x)=(1-e^{-2x})/(1+e^{-2x})$ ,输出层激活函数表达式为  $f(x)=x$ 。

6.3 普通 BP 算法的改进

6.3.1 快速 BP 算法的基本原理

BP 算法尽管在理论上的完善性和广泛的实用性决定了它在人工神经网络中的重要地位,但其算法本身还存在一些不足。由于普通 BP 算法是采用固定学习速率,训练速度与学习速率的选取有直接关系,学习速率会影响权值和阈值更新的比率。为了保证训练过程的稳定和收敛,一般选取较小的学习速率,这样会导致学习时间增加。另外,BP 算法虽有很强的非线性映射能力,但它的缺点之一是学习收敛速度太慢,网络的学习、记忆具有不稳定性。

快速 BP 算法与普通 BP 算法的主要区别在于,快速 BP 算法采用动量因子和自适应学习速率。动量法降低了网络对于误差曲面局部细节的敏感性,即动量项起到缓

冲与平滑的作用，有效地抑制网络局部最小，改善收敛过程的稳定性，调节网络的收敛速度。

自适应学习速率是先给一个初值，然后利用乘法使之增加或减小，考虑误差在梯度上的影响及在误差曲面上变化趋势的作用来修正网络权值以保持学习速率快而且稳定。一方面快速 BP 算法可以找到更优解；另一方面可以缩短训练时间。

6.3.2 快速与普通 BP 算法结果对比

以锡林郭勒为例，利用普通 BP 算法和快速 BP 算法分别进行训练检验（1971~1997 年为训练样本，1998~2000 年为检验样本），结果显示：在相同的误差条件下，快速 BP 算法的检验误差平均为 0.005，而普通 BP 算法的检验误差平均为 0.0087（见图 15 和表 14、15）。由此说明快速 BP 算法模型的稳定性要优于普通 BP 算法。

表 14 普通 BP 算法模拟检验结果

Tab.14 Simulation and check results of ordinary BP algorithm

| 检验年份 | 1971-1997 年训练样本 |     |        |        |
|------|-----------------|-----|--------|--------|
|      | 普通 BP 预报值       | 实测值 | 拟合误差   | 检验误差   |
| 1998 | 2.189           | 2.2 | 0.011  | 0.0050 |
| 1999 | 1.8245          | 1.8 | 0.0245 | 0.0136 |
| 2000 | 4.2674          | 4.3 | 0.0326 | 0.0076 |

表 15 快速 BP 算法模拟检验结果

Tab.15 Simulation and check results of fast BP algorithm

| 检验年份 | 1971-1997 年训练样本 |     |        |        |
|------|-----------------|-----|--------|--------|
|      | 快速 BP 预报值       | 实测值 | 拟合误差   | 检验误差   |
| 1998 | 2.1957          | 2.2 | 0.0043 | 0.0020 |
| 1999 | 1.8232          | 1.8 | 0.0232 | 0.0129 |
| 2000 | 4.3009          | 4.3 | 0.0009 | 0.0002 |



### 6.3.3 快速 BP 神经网络模型与线性回归方法对比

为了检验 BP 神经网络的预报结果,采用多元线性回归数学模型对年沙尘暴日数进行回归计算。用 1971-2000 年数据建立线性回归数学模型,选取年大风日数( $x_1$ )、年平均地温( $x_2$ )、年蒸发量( $x_3$ )、相对湿度( $x_4$ )对年沙尘暴日数建立回归方程,在 0.05 水平下回归模型显著,得回归方程如下:

$$y = -6.77400 + 0.05619 x_1 - 0.12010 x_2 + 0.01799 x_3 + 0.00742 x_4$$

两种估测值与实测值的比较如图 15 可知,运用快速 BP 神经网络方法预测沙尘暴发生日数,预测精度为 98%,而多元线性回归方法预测精度仅为 61%,快速 BP 神经网络方法明显优于多元线性回归方法,这是因为 BP 神经网络具有的高度非线性映射能力较线性回归更能逼近问题的本质。

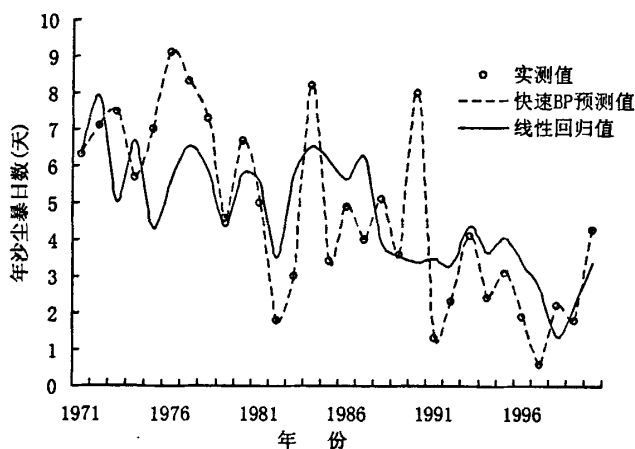


图 15 两种估算方法与实测值的比较

Fig.15 The comparison result between the estimated value of two methods and the real measure value

## 7 2001 年~2010 年沙尘暴发生日数预测分析与结果

根据前文已建立和验证的基于快速 BP 神经网络模型的研究,通过预测不同年限模型的输入因子,分析和预测 2001 年~2010 年沙尘暴发生日数,并对 2001 年~2007 年沙尘暴发生日数进行验证和分析。

### 7.1 模型输入因子的预测

根据锡林郭勒地区 15 个台站 1971~2000 年的气象资料分析,锡林郭勒地区沙尘暴发生日数与年大风日数、年平均地温、相对湿度和年蒸发量之间具有较好的相关性,可以选择作为沙尘暴模型的输入因子,具体情况详见 6.2.1。

#### 7.1.1 预测方法

各种社会经济现象总是随着时间的推移而变化并呈现动态性,对于随时间变化的变量研究就需要采用时间序列分析。时间序列又称动态数列,是把不同时间上的变量值按照先后顺序排列而成的一组数据。时间序列由两个要素构成:时间要素和不同时间下的数据要素。时间序列分析则是对动态数据作统计分析的一种类型,通过研究在不同时间上数据的动态变化和发展过程展现长期趋势和提供定量的分析。

添加趋势线或采用移动平均分析工具可以绘制趋势线并定性的判断长期趋势的方向,但这两种方法均不能给出数据变量与时间定量的关系,对此我们可以应用趋势回归的方法,求出趋势回归方程,给出数据变量随时间的定量关系,并可根据趋势回归方程进行预测。本文采用线性趋势回归方程、二次多项式趋势回归方程和指数趋势回归方程分别对年大风日数、年平均地温、年蒸发量、相对湿度四个气象因子 2001~2010 年的数据进行预测分析。

##### (1) 年大风日数的预测

###### ① 采用线性趋势回归方程进行预测

线性趋势方程是最为简单的一种趋势回归法,其采用时间序列中的  $t$  代替一元线性回归中的自变量  $X$ ,对应的线性趋势方程为:

$$Y = a + bt \quad (6)$$

按照一元线性回归的各种方法即可得到趋势回归方程的参数,并可根据  $t_f$  进行预测。

$$Y_f = \hat{a} + \hat{b}t_f \quad (7)$$

其中,  $t_f$  为时间序列。

根据线性趋势方程测定长期趋势并进行预测,趋势方程为:

$$Y = 73.53241 - 0.7879t, \text{ 回归方程的可决系数为 } R^2 = 0.404.$$

###### ② 采用二次多项式趋势方程进行预测

线性方程是最为简单的趋势方程,但许多情况下,时间序列并非按线性增长,或者说线性关系不能充分的描述时间序列的增长态势,此时可以考虑曲线的趋势方程,首先自然考虑到添加时间的二次项来进行改进,即采用二次多项式的趋势方程来测定长期的趋势。

二次多项式趋势方程用  $t$  取代了二项式回归分析中的  $X$ , 可以表示为

$$Y=a+bt+ct^2 \quad (8)$$

根据二次多项式趋势方程测定长期趋势并进行预测,趋势方程为:

$$y = -0.0623t^2 + 1.1431t + 63.234, \text{ 回归方程的可决系数为 } R^2=0.56.$$

### ③ 采用指数趋势方程进行预测

如果时间序列的各时间对应的数据变量与上期变量之比值大致为一常数变化,则此类时间序列应该选择指数趋势方程测定其长期趋势。趋势方程为:

$$y = 75.098e^{-0.0141t}, \text{ 回归方程的可决系数为 } R^2=0.4379.$$

### ④ 指数平滑法

采用趋势回归方法测定长期趋势虽然可以运用趋势方程进行预测,但是由于所有的预测均基于同一趋势回归方程,因此无法对时间序列的变化做出反应,而指数平滑法则能较好的解决此类问题。指数平滑法采用时间序列本期的实际值与前期对本期预测值的加权平均作为本期的预测值,相当于用本期的实际值对预测值进行不断的修正,以适应数据的变化。指数平滑法的公式可以表示为:

$$\hat{Y}_{t+1} = aY_t + (1-a)\hat{Y}_t \quad (9)$$

其中,  $\hat{Y}_{t+1}$  和  $\hat{Y}_t$  分别为第  $t+1$  期和第  $t$  期的预测值;  $Y_t$  为第  $t$  期的真实值;  $a$  称为平滑系数,反应利用本期的实际值的信息的程度;而  $1-a$  则称被为阻尼系数。

阻尼系数一般介于 0.7 到 0.8 之间,即平滑系数介于 0.2 到 0.3 之间,表明应将当前预测调整 20%到 30%,以修正以前的预测。平滑系数越大反应越快,但是预测变得不稳定,平滑系数较小将导致预测值的滞后。但是根据给定的时间序列的真实值,存在一个最佳的阻尼系数,使得已有数据的真实值和预测值的误差最小,因此在指数平滑时,应首先根据时间序列数据确定最佳阻尼系数,然后在进行指数平滑的预测。对于第一期预测值的计算方法,可以采用第一期真实值代替,也可以采用前几期的实际值的平均值代替,本文中均采用第一期真实值替代。

最佳阻尼系数的确定原则为时间序列的实际值和预测值误差最小,因此可以使得误差平方和最小的阻尼系数值作为最佳阻尼系数。通常满足预测误差的平方和  $S^2$  最小:

$$S^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (Y_i - \bar{Y})^2$$

$$= \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (Y_i - \hat{Y}_i)^2 + \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (\hat{Y}_i - \bar{Y})^2$$

(10)

式中：

N 为时间序列项数；Y<sub>i</sub> 为第 i 期的真实值；

$\hat{Y}_i$  为根据指数平滑的第 i 期的预测值；

$\bar{Y}$  为真实值的平均。

经计算，最佳阻尼系数为 0.6928，指数平滑趋势公式  $y = -0.0549t^2 + 1.3422t + 59.393$ ，方程的可决系数  $R^2 = 0.766$ 。

⑤ 4 种趋势预测方法的比较结果

根据以上 4 种趋势预测方法的比较可知，指数平滑法预测长期趋势效果好，可决系数为 0.766，可作为年大风日数的预测方法。

(2) 其他 3 个输入因子的预测

根据 7.1.1 的研究方法和思路，对年平均地温、相对湿度和年蒸发量的预测分别采用线性趋势方程、二次多项式趋势方程、指数趋势方程和指数平滑法进行计算和比较得出以下结论，指数平滑法预测数据长期趋势效果显著，可决系数平均达到 0.7，具体情况详见表 16。

表 16 不同气象因子不同预测方法可决系数（R<sup>2</sup>）对比表

Tab.16 Compared with R<sup>2</sup> of the different meteorological factors and different forecast methods

| 预测因子<br>预测方法 | 年大风日数  | 年平均地温  | 相对湿度  | 年蒸发量  |
|--------------|--------|--------|-------|-------|
| 采用线性趋势方程     | 0.404  | 0.403  | 0.236 | 0.36  |
| 二次多项式趋势方程    | 0.56   | 0.447  | 0.369 | 0.529 |
| 指数趋势方程       | 0.4379 | 0.387  | 0.52  | 0.618 |
| 指数平滑法        | 0.766  | 0.8387 | 0.693 | 0.857 |

7.1.2 预测结果与分析

通过对预测方法的探讨、研究和比较，本文选择指数平滑法作为年大风日数、年平均地温、相对湿度和年蒸发量 4 个模型输入因子的预测方法，对以上 4 个因子 2001~2010 年的数据进行分析和预测，结果见表 17。

表 17 2001 年~2010 年模型输入因子预测结果

Tab.17 Forecasting results of input factors of model in 2001~2010 years

| 气象因子<br>年 份 | 年大风日数 (天) | 年平均地温 (℃) | 相对湿度<br>(%) | 年蒸发量 (mm) |
|-------------|-----------|-----------|-------------|-----------|
| 2001        | 48        | 4.7       | 59          | 1893      |
| 2002        | 46        | 4.8       | 59          | 1895      |
| 2003        | 44        | 4.9       | 59          | 1896      |
| 2004        | 42        | 5.1       | 58          | 1898      |
| 2005        | 39        | 5.2       | 58          | 1899      |
| 2006        | 37        | 5.3       | 57          | 1901      |
| 2007        | 34        | 5.4       | 57          | 1903      |
| 2008        | 31        | 5.5       | 57          | 1905      |
| 2009        | 28        | 5.6       | 57          | 1906      |
| 2010        | 25        | 5.8       | 56          | 1908      |

7.2 模型输出因子的预测与验证

7.2.1 2001 年~2010 年沙尘暴发生日数预测结果

根据输入因子的预测及已经验证好的 BP 神经网络沙尘暴模型,本文对 2001 年~2010 年沙尘暴发生日数进行预测,预测结果表明:

(1) 从 2001 年到 2010 年锡林郭勒地区沙尘暴日数最大值出现在 2006 年,日数为 7.9 天,具体情况详见表 18。

(2) 十年间沙尘暴日数在波动中呈现上升趋势,详见图 16。分析其原因主要有两方面,一方面近几年随着全球气温的上升,天然降水量降低,草场植被覆盖率降低;另一方面由于生产建设项目的增多,地表原地貌扰动大,裸露土地增多,这也为沙尘暴的发生提供丰富的物质来源。

(3) 沙尘暴的发生加剧土地荒漠化的程度,虽然已经采取了一定的保护措施恢复破坏的土壤和植被,但是继续加大改善环境力度,维护生态平衡,继续走可持续发展的道路是势在必行的。

表 18 2001 年~2010 年沙尘暴模型预测结果  
Tab18. Forecasting results of model in 2001~2010 years

| 年 份  | 年沙尘暴日数 (天) |
|------|------------|
| 2001 | 5.3        |
| 2002 | 2.6        |
| 2003 | 2.3        |
| 2004 | 6.7        |
| 2005 | 5.2        |
| 2006 | 7.9        |
| 2007 | 6.5        |
| 2008 | 4.9        |
| 2009 | 5.6        |
| 2010 | 7.8        |

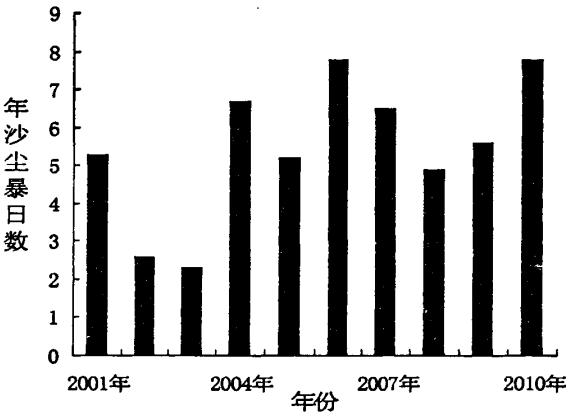


图 16 2001~2010 年沙尘暴日数预测趋势图

Fig.16 Forecasting trend of yearly number of sand storm days in 2001~2010 year

7.2.2 2001 年~2007 年沙尘暴发生日数预测值与实测值对比分析

依据内蒙古气象台王国勤等关于内蒙古自治区 2000 年~2007 年沙尘(暴)天气的统计分析<sup>[101-102]</sup>,对相关数据进行二次整理得出内蒙古锡林郭勒地区沙尘暴发生日数,以此检验应用 BP 神经网络模型预测 2001~2007 年锡林郭勒地区沙尘暴发生日数,结果如表 19 和图 17 所示:

两组数据年沙尘暴发生日数趋势呈现一致性,2003 年发生日数最少,而 2006 年

发生日数达最高值；2001~2007 年沙尘暴日数预测值与实测值的检验误差平均为 16.3%。模型的预测分析可知，2004 年沙尘暴发生日数实测值与预测值检验误差最小，为 4.3%；2001 年、2002 年、2005 年和 2006 年检验误差偏高。究其原因，2001 年由于北半球 500hPa 东亚大陆高压脊的长期维持，直接造成 2001 年夏季我国北方极端干旱、少雨，植被返青期明显晚于往年平均水平<sup>[104]</sup>；2002 年中国环境状况公报显示<sup>[105]</sup>，中国东中部及内蒙古大部地区 1~3 月降水量一般偏少 4 成以上，同期气温又持续异常升高，旱区涉及范围广；2005 年是仅次于 1998 年的第 2 个全球最暖年，2005 年中国平均气温较常年偏高 0.6℃，而内蒙古中东部降雨量比平常低 30%~50%<sup>[106]</sup>；2006 年入春以来，东北西部和内蒙古东部持续少雨，我国北方夏季遭遇百年一遇的大旱<sup>[107]</sup>。因此，以上四个年份属于近几十年来气候反常的年份，总体表现为春季干旱、降雨量较常年大幅度减少，造成草地返青期推迟，一定程度上增加了沙尘暴发生的几率，导致研究区沙尘暴实测值与预测值的偏差有所增大。

表 19 2001 年~2007 年沙尘暴发生日数实测值与预测值对比

Tab19. Comparison on forecast value and measured value of yearly number of sand storm days in 2001~2007 year

| 年 份  | 实测值(天) | 预测值(天) | 检验误差 (%) |
|------|--------|--------|----------|
| 2001 | 7      | 5.3    | 24.3     |
| 2002 | 3.5    | 2.6    | 25.7     |
| 2003 | 2      | 2.3    | 15       |
| 2004 | 7      | 6.7    | 4.3      |
| 2005 | 6.5    | 5.2    | 20       |
| 2006 | 9.5    | 7.9    | 16.8     |
| 2007 | 6      | 6.5    | 8.3      |

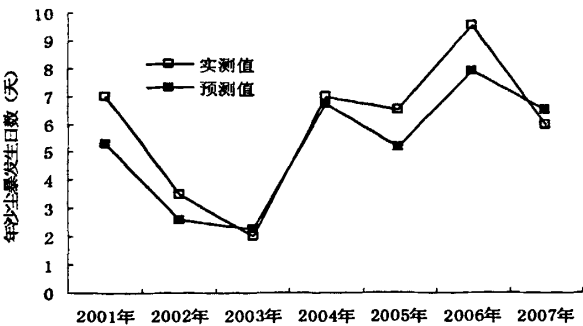


图 17 2001~2007 年沙尘暴日数预测值与实测值趋势对比图

Fig. 17 Trend comparison on forecast value and measured value of yearly number of sand storm days in 2001~2007 year

## 8 结论与讨论

### 8.1 结论

综合上述分析结果,可以得出以下结论:

(1) 1971~2000年,锡林郭勒地区沙尘暴天气在年际振荡和多年变化趋势上均有明显的下降趋势。在影响沙尘暴发生的诸多气象因子中,年大风日数、年平均地温、年蒸发量、相对湿度是主要的影响因子,其中年大风日数对沙尘暴的影响最为显著,相关系数达90%以上。

(2) 一年当中,4月份是沙尘暴发生频率最高的季节,占全年沙尘暴发生频率的42.8%,10月份发生频率最低;若按季节划分,则春季最多,夏季次之,秋季最少。

(3) 锡林郭勒地区沙尘暴空间分布特征明显,西部地区发生沙尘暴的频率明显高于东部地区。东部地区的西乌旗年平均沙尘暴日数为1天,然而地处西部的苏尼特右旗年平均沙尘暴日数高达10天。

(4) 在研究影响锡林郭勒地区沙尘暴的气象因子以及沙尘暴发生的时空分布规律的基础上,建立了基于BP神经网络的沙尘暴模型,经过参数的选择,样本的训练和验证,确定快速BP模型的最适结构为4—6—1三层网络结构。快速BP模型拟合精度高达98%。

(5) 对2001年~2010年沙尘暴日数的预测结果表明,十年间沙尘暴日数在波动中呈上升趋势。2001~2007年沙尘暴实际发生日数对比分析显示,预测值与实测值沙尘暴发生日数变化趋势基本一致。

### 8.2 讨论

(1) 本文研究沙尘暴的发生日数主要从气象因素入手,但是在实际沙尘暴发生的过程中还有诸多影响因素,例如地表植被覆盖度,冷空气传输路径,沙源等等。可加强其他因素对沙尘暴发生日数的研究和分析。

(2) 目前的人工神经网络还存在一些不足,如隐含层数与隐含层节点数还是凭试算和经验。神经网络模型中的参数没有具体的物理意义,不能反映出具体因子之间的关系,因此对模型的局限性及网络训练的方法应进一步探索。

(3) 在对多年气象因子综合分析的基础上,利用相邻年份的气象因子作为模型的主要输入因子在实践中更具有实际意义,也是本项目的后续研究内容。



## 致 谢

本文是在导师李钢铁教授的悉心指导下完成的。导师渊博的知识、严谨的学风和活跃的思维深深地感染着我,从论文的开题到研究无不倾注着李老师的心血。在三年的学习研究中,李老师给了我很多锻炼的机会,培养我理论联系实际的能力,恩师对我的谆谆教诲和语重心长的指点都使我铭记在心。在论文完成之际,谨向导师的精心培养表示衷心的感谢!

同时感谢左合君副教授在科研上给予的指导与关怀。在学习上,左老师高标准、严要求,努力拓宽我的知识面和提高我的专业知识;在科研上,着重培养我的实事求是、一丝不苟、积极创新的科学钻研精神,帮助我解决遇到的困难。左老师严谨的治学作风,忘我的工作热情,极大地感染了我,它将时刻鞭策我更加努力的工作和学习,在此向尊敬的左老师致以诚挚的感谢。

同时我为能加入水土保持与荒漠化防治专业教研室感到无比的自豪,教研室浓厚的学术气氛,协作的工作环境都使我受益非浅,感谢教研室的胡春元教授、秦富仓教授,感谢同学张靖媛,王晓霞,崔力强,感谢师弟、师妹在我论文写作中给予的关心和帮助。

感谢我的父母和亲人,他们永远是我坚强的后盾。在母校我不仅收获了丰富的知识、做人的道理,同时也学会了勇敢和坚强。

最后,向参加本文评阅、答辩并对本文提出宝贵意见的各位专家、师长表示最诚挚的谢意。

## 参 考 文 献

1. 中央气象局.地面气象观测规范.北京:气象出版社.1979.21-27.
2. 路明.我国沙尘暴发生成因及其防御策略[J],中国农业科学,2002,35(4):440-446.
3. 王式功,董光荣,杨德保,金炯,尚可政.中国北方地区沙尘暴变化趋势初探[J].自然灾害学报,1996,2(5):86-94.
4. 赵兴梁.甘肃特大沙尘暴的危害与对策[J],中国沙漠,1993,13(3):1-7.
5. Harkin E.h.,On dust raising winds and descending currents[J].part VI,Indian met Memoirs, 1921,22(1):80-84.
6. 刘晓春.中国近 30 年来沙尘暴基本特征的研究[D].南京:南京气象学院,2002.
7. SutonL J, Haboobs[J],Quart. J. Roy. Meteor. Soc.1925,51(2):25-30.
8. Joseph P V, Raipal D K, Deka S N, "Andhi" the xonvective dust storm of Northwest India[J].Mausam,1980,31(3):431-442.
9. Xu Guochang.Analysis of the"4.22"much stronger sand-dust storm in Gansu Province [J]. Acta Meteorologica Sinica ,1979 ,37(4) :26-35.
10. Brazel,A.J.,and W.C. Nicking,The relationship of weather types dust storm generation in Arizona[J].J.Climotoloey.1986,6(3).255-275.
11. Auregui E.The dust storms of Mexico City [J]. Inter. J. Climatology, 1989, 9(2):169-180.
12. Gillttte,D.A.J.Adams,A.Endo,D.Smith and A.kill,Threshold velociter for input of soil particles into air by desert soils[J].Geophys,Res,1980, 85:5621-5623.
13. 雷向杰.陕西沙尘暴的基本研究和预测研究[D].南京:南京信息工程大学,2005.5.
14. Y. Shao, C.H. Dong.A review on East Asian dust storm climate, modelling and monitoring[J]. Global and Planetary Change,2006 (52):1-22.
15. Xingkui Xu, Jason K. Levy , Lin Zhaohui , Chen Hong. An investigation of sand-dust storm events and land surface characteristics in China using NOAA NDVI data[J]. Global and Planetary Change,2006 (52):182-196.
16. Ikuko Mori, Masataka Nishikawa, Toshifumi Tanimura. Change in size distribution and chemicalcomposition of kosa (Asian dust) aerosolduring long-range transport[J].Atmospheric Environment,2003 (37):4253-4263.
17. Youngsin Chun,Jiyoung Kim,Jae Cheon Choi. Characteristic number size distribution of aerosol during Asian dust period in Korea[J].Atmospheric Environment,2001 (35):2715-2721.
18. Yehouda Enzel, Rivka Amit. The climatic and physiographic controls of the eastern Mediterranean over the late Pleistocene climates in the southern Levant and its neighboring deserts[J]. Global and Planetary Change, 2008 (60):165-192.
19. Iwasaka Y.etal,The transport and special scale of Asian dust storm clouds[J],A case study of the dust storm event of April 1979,Tellus,1983(35):189-196.

20. Shaw G.E. transport of asian desert to the Hawianislands[J],J.Appl.Meteor,1980 (19):1254-1259.
21. 徐国昌,陈敏连,吴国雄.甘肃省“4.22”特大沙尘暴分析[J],气象学报,1979,37 (4):26-35.
22. 江吉喜.一次特大沙尘暴成因的卫星云图分析,应用气象学报[J],1995,6(2):177-184.
23. 王式功,杨德保,周玉素,等.我国西北地区“94.4”沙尘暴成因探讨[J],中国沙漠,1995,15(4):332-338.
24. 胡隐樵,光田宁.强沙尘暴发展与干飚线—黑风暴形成的一个机理分析[J],高原气象,1996, 15 (2):175-185.
25. 胡隐樵,光田宁.强沙尘暴微气象特征和局地触发机制[J],大气科学,1997,21(5):581-589
26. 刘树华,刘新民,高尚玉.沙尘暴天气成因的初步分析[J],北京大学学报,1994,30(5):589-596.
27. 张玉林,赵光平,杨淑萍.宁夏强沙尘暴形成机制的探索和研究[J],中国沙漠,1996,16(4): 351-355.
28. 李宗义,蔡玉琴,张静.一次强沙尘暴天气的大尺度环流分析[J],甘肃气象, 1998, 16(4):35-37.
29. 叶笃正,丑纪范,刘纪远,等.关于我国华北沙尘大气的成因与治理对策[J],地理学报,2000, 55 (5): 513-521.
30. 邱新法,曾燕,缪启龙.我国沙尘暴的时空分布规律及其源地和移动路径[J],地理学报,2001, 56(3):316-322.
31. 牛生杰,孙继明,桑建人.贺兰山地区沙尘暴发生次数的变化趋势[J].中国沙漠, 2000,20 (1):55-58.
32. 邱新法,曾燕,缪启龙.我国沙尘暴的时空分布规律及其源地和移动路径[J].地理学报 2001,56 (3):316-322.
33. 钱正安,宋敏红,李万元.近 50 年来中国北方沙尘暴的分布及其变化趋势分析[J].中国沙漠,2002,22 (2):106-111.
34. 王式功,王金艳,周自江,等.中国沙尘天气的区域特征[J].地理学报,2003,52(2):193-200.
35. 周自江,章国材.中国北方典型的强沙尘暴事件(1954-2002 年)[J].科学通报, 2003,48(11) :1224-1228.
36. Ju-Yeon Lim, Youngsin Chun. The characteristics of Asian dust events in Northeast Asia during the springtime from 1993 to 2004[J]. Global and Planetary Change, 2006 (52):231-247.
37. G. Liu, S.-U. Park. The logarithm-linear relationship of the occurrence frequency to the duration of sand-dust storms: Evidence from observational data in China[J].Journal of Arid Environments, 2007 (71): 243-249.
38. 勾芒芒,戴晟懋,李钢铁,左合君.我国的沙尘暴及防治问题探讨[J].内蒙古林业科技, 2008(34):40-44.
39. 牛若芸,薛建军,周自江.2002 年我国沙尘暴天气特征分析[J]. 南京气象学院学报,2004, 27(2): 178-184.

40. Sui Yu-Zhu, Yuan Han-Min. Agroecological and economic approach of prevention and curing of sandstorms in China[J]. ECOLOGICAL ECONOMICS, 2007(61):129-133.
41. Ming Xu. Seasonal chemical composition variations of wet deposition in Urumchi, Northwestern China[J]. Atmospheric Environment, 2008(42):1042-1048
42. 吕新苗,刘惠清,王文杰.北京周边地区沙尘暴时空分布特征及其环境背景[J].地理研究, 2004, 23(1):38-43.
43. 肖嗣荣,刘学锋,刘芳圆.河北省沙尘暴时空分布特征及其防治对策研究[J].地理学与国土研究, 2000, 16(3):21-26.
44. Ruiping Zu, Xian Xue, Mingrui Qiang. Characteristics of near-surface wind regimes in the Taklimakan Desert[J]. China. Geomorphology, 2008(96) 39-47.
45. 贺哲,王蕊,梁钰.河南省沙尘暴时空分布特征及影响因子分析[J].河南气象, 2005(3):11-12.
46. 江灏,吴虹,尹宪志.河西走廊沙尘暴的时空变化特征与其环流背景[J].高原气象, 2004, 23(4):548-552.
47. Aili Wei, Ziqiang Meng. Evaluation of micronucleus induction of sand dust storm fine particles (PM<sub>2.5</sub>) in human blood lymphocytes [J]. Environmental Toxicology and Pharmacology, 2006 (22):292-297.
48. Hua Zhao, Yanchou Lu, Jinhui Yin. Optical dating of Holocene sand dune activities in the Horqin sand-fields in inner Mongolia, China using the SAR protocol[J]. Quaternary Geochronology, 2007(2):29-33.
49. Jiongxin Xu. Sand-dust storms in and around the Ordos Plateau of China as influenced by land use change and desertification [J]. Catena, 2006(65):279-284.
50. 王宁,张红.吉林省沙尘天气的时空分布特征及其分型预报研究[J].吉林气象, 2003, (2) :24-26.
51. 白云岗,宋郁东.近 40a 来塔里木盆地沙尘暴气候时空变化分析[J].干旱区资源与环境, 2005, 19(5):42-45
52. 唐国利,巢清尘.近 48 年中国沙尘暴的时空分布特征及其变化[J].应用气象学报, 2005, 16:128-132.
53. 陈晓光,刘庆军.宁夏与甘肃沙尘暴过程的时空分布对比研究[J].干旱气象, 2004, 22(2) :1-5.
54. Yan Wang, Sharon L. Cummings, Dorothy W. Gietzen. Temporal-spatial pattern of c-fos expression in the rat brain in response to indispensable amino acid deficiency I. The initial recognition phase[J]. Molecular Brain Research, 1996 (40):27-34.
55. Lian-shin Lin, Cliff. Johnston. Inorganic fouling at quartz:water interfaces in ultraviolet reactors. II. Temporal and spatial distributions [J]. Wat. Res, 1999 (33): 3330-3338.
56. Aike Qiao, Youjun Liu, Zhihong Guob. Wall shear stresses in small and large two-way bypass grafts [J]. Medical Engineering & Physics, 2006 (28):251-258.
57. 雷向杰,杜继稳.陕西沙尘暴时空分布、成因及防御对策分析[J].甘肃气象, 2001, 19(2):21-24.

58. 赵丹丹,关欣.新疆和田降尘的时空分布与影响因子[J].新疆农业大学学报,2005,28(2): 14-17.
59. David Jimeno, Almudena Velasco. Lara.Response of microglial cells after a cryolesion in the peripheral proliferative retina of tench [J]. Brain Research, 1999(816):175-189.
60. YAN Guangsheng, QIU Ruizhao, LIAN Changyun. Quantitative Assessment of the Resource Potential of Porphyry Copper Systems in China [J]. Earth Science Frontiers, 2007, 14(5): 27-41.
61. SUN Li-nanL, ZHANG Yao-hua.Temporal-spatial distribution and variability of cadmium contamination in soils in Shenyang Zhangshi irrigation area,China[J].Joadof Enuironmental Sciences, 2006(18): 1241-1246.
62. 高涛等.沙尘暴天气的归类判别分析预报模式[J].甘肃气象,2001,19(2):14-20.
63. Saaty T. L. The Analytic Hierarchy Process [M] Pittsburgh , RWS Publications, 1996,287-293.
64. 赵光平,王连喜,杨淑萍.宁夏区域性强沙尘暴短期预报系统[J].中国沙漠,2001, 21(2): 175-181.
65. 郑新江,陆文杰等.气象卫星多通道信息监测沙尘暴的研究[J].遥感学报,2001, 5(4): 300-306.
66. 矫梅燕,周自江.中国沙尘暴及其监测预警[J].中国工程科学,2003,5(9):1-6.
67. 李正明.临夏州沙尘天气短期实时预报系统[J].甘肃农业,2005,2:26-27.
68. 赵翠光.人工神经元网络方法在沙尘暴短期预报中的应用[J].气象,2004,30(4):39-41.
69. 王汉芝.基于模糊神经网的沙尘暴预报模型 [D].天津:天津大学, 2002.
70. 路志英,张启孟,赵智超. 基于 SVM 的沙尘暴预测模型[J]. 天津大学学报,2006, 39(9): 1110-1114.
71. 邱金桓,孙金辉等.沙尘基的光学遥感及分析[J].大气科学.1994, 18 (1):1-10.
72. 庄国顺,郭敬华,袁慈,等.2000 年我国沙尘暴的组成、来源、粒径分布及其对全球环境的影响[J].科学通报,2001,46 (3):191-197.
73. 牛生杰,章澄昌,孙继明.贺兰山地区沙尘气溶胶粒子谱分布的观测研究[J].大气科学, 2001, 25(2):243-252.
74. 牛生杰,孙继明,陈跃,等.贺兰山地区沙尘气溶胶质量浓度的观测分析[J].高原气象, 2001, 20(1):82-87.
75. 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.
76. 高国雄.中国北部沙尘暴现状、成因与防治对策[J].水土保持研究,2005,12 (5):178-180.
77. 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.
78. 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.
79. 张仁健.2000 年春季北京特大沙尘暴物理化学特性的分析.气候与环境研究, 2000,5(3): 259-266.

80. Hua Zhao, Yanchou Lu, Jinhui Yin. Optical dating of Holocene sand dune activities in the Horqin sand-fields in inner Mongolia, China, using the SAR protocol[J]. Quaternary Geochronology, 2007(2): 29-33.
81. 彭继平, 李钢铁. 2006 年我国沙尘暴灾害特点及原因分析[J]. 干旱区资源与环境, 2008 (22): 61-64.
82. 刘泉, 李铁松. 我国沙尘天气的时空分布和成因分析[J]. 干旱区研究, 2004, 21(4): 461-465.
83. 杨淑萍, 赵光平. 气候变暖对宁夏气候和极端天气事件的影响及防御对策[J]. 中国沙漠, 2007, 27(6): 1072-1076.
84. 张加云, 刘晓东. 一次强沙尘暴活动对中国城市空气质量的影响[J]. 中国沙漠, 2008, 28(1): 161-168.
85. 戴晟懋, 赵学军, 勾芒芒, 李钢铁, 左合君. 锡林郭勒盟春季沙尘暴成因的气象因子分析[J]. 干旱区资源与环境, 2008, (7): 46-48.
86. 翟盘茂, 李小燕. 中国北方沙尘天气的气候条件[J]. 地理学报, 2003, 58: 125-131.
87. 王革丽, 吕达仁. 浑善达克沙地沙尘暴气候特征分析[J]. 气候与环境研究, 2002, 7(4): 433-439.
88. 范一大, 史培军. 中国北方沙尘灾害影响因子分析[J]. 地球科学进展, 2007, 22(4): 350-355.
89. 王式功, 董光荣. 中国北方地区沙尘暴变化趋势初探[J]. 自然灾害学报, 1995, 5(2): 86-94.
90. 孟第尧, 张先炼. 普通甜荞产量的主成分分析[J]. 上海师范大学学报 (自然科学版) 1998. 27(4): 50-53.
91. 周自江. 近 47 年中国沙尘暴气候特征研究[J]. 应用气象学报, 2002, 13(2): 193-200.
92. 李钢铁, 姚云峰. 科尔沁沙地疏林草原植被恢复技术体系[J]. 内蒙古农业大学学报, 2005 (26): 1-6.
93. 李钢铁, 秦富仓. 旱生灌木生物量预测模型的研究[J]. 内蒙古林学院学报(自然科学版), 1998, 20(2): 25-31.
94. 白云岗, 宋郁东. 近 40a 来塔里木盆地沙尘暴气候时空变化分析[J]. 干旱区资源与环境, 2005, 19(5): 42-45.
95. 周自江. 近 47 年中国沙尘暴气候特征研究[J]. 应用气象学报, 2002(13): 193-200.
96. 霍再林. 基于人工智能的参考作物腾发量与作物水盐响应研究[D]. 内蒙古农业大学, 2004.
97. 金菊良, 丁晶. 水资源系统工程[M]. 成都, 四川科学技术出版社, 2002.
98. 谢新民, 蒋云钟. 基于人工神经网络的河川径流实时预报研究[J]. 水利水电技术, 1999, 9(30): 1-4.
99. 刘国东, 丁晶. BP 网络用于水文预测的几个问题探讨[J]. 水利学报, 1999, 1(11): 65-70.
100. 陈亚新, 屈忠义, 魏占民, 等. 大型灌区节水改造后农田水环境变化的预测研究[M]. 北京: 中国农业出版社, 2007, 4.
101. 王国勤. 内蒙古自治区 2000-2007 年沙尘天气备忘录 (上) [J]. 内蒙古气象, 2007(2): 20-22.

102. 王国勤. 内蒙古自治区 2000-2007 年沙尘天气备忘录 (中) [J]. 内蒙古气象, 2007(3): 16-20.
103. 王国勤, 陈丽芳, 高晓杰. 内蒙古自治区 2000-2007 年沙尘天气备忘录 (下) [J]. 内蒙古气象, 2007(4): 25-27.
104. 艾秀. 2001 年北半球大气环流特征其对中国气候异常的影响[J]. 气象, 28(2): 21-24.
105. 国家气象局, 2002 年中国环境状况公报: 气候与自然灾害.
106. 叶殿秀, 张强, 肖风劲. 2005 年中气候特点[J]. 气候变化研究进展, 2006, 2(2): 71-74.
107. 陈洪滨, 范学花. 2006 年极端天气和气候事件及其他相关事件的概要回顾[J]. 气候与环境研究, 2007, 12(1): 100-112.

---

## 作者简介

勾芒芒，女，汉族，中共党员，1980年6月出生于内蒙古兴安盟。2006年考入内蒙古农业大学攻读水土保持与荒漠化防治硕士学位。在攻读硕士期间发表论文4篇，其中第一作者2篇，第二作者1篇，第三作者1篇。

发表论文：

- 1、《我国沙尘暴及防治问题探讨》，内蒙古林业科技，2008年9月第三期；
- 2、《锡林郭勒地区沙尘暴时空变异与气候特征分析》，干旱区资源与环境，2009年6月（待刊）；
- 3、《BP网络模型在沙尘暴预测中的应用研究》，中国沙漠，2010年2月（待刊）；
- 4、《锡林郭勒盟春季沙尘暴成因的气象因子分析》，干旱区资源与环境，2008年7月第7期。