

层次分析法在下垫面因子影响沙尘暴危险度研究中的应用*

杜子璇¹，李宁²，刘忠阳¹，申占营¹，付祥建¹

(1 河南省气象科学研究所 河南 郑州 450003；2 北京师范大学资源学院灾害与公共安全研究所，北京 100875)

摘要：沙尘暴是一种危害严重的气象灾害，其形成依赖于大气环流和沙质地表两种不同密度的物理介质的相互作用，风力条件和下垫面的性质是影响沙尘暴强度和危害程度的两个重要因素。减轻沙尘暴危害的有效方法就是改善沙尘暴源地的下垫面状况，但这需要评估下垫面各因子在不同天气、气候背景条件下对沙尘暴发生的影响程度。从下垫面的角度出发，以内蒙古中西部地区为例，利用气象资料和实测数据，应用AHP方法对下垫面定性与定量因子进行综合分析，得出不同地区下垫面因子对沙尘暴发生作用的权重，为从下垫面角度研究沙尘暴危险度奠定基础。

关键词：沙尘暴 下垫面 层次分析法 危险度 权重

中图分类号：P208 文献标识码：A 文章编号：1000-6060(2007)02-0184-05(184~188)

沙尘暴是一种自然现象，它是指由于大风把地面大量沙尘卷入空中，使空气浑浊，水平能见度低于1 km的天气现象^[1]。沙尘暴的发生直接影响着人类的生存环境，危害极大，国内外对沙尘暴的研究一直在进行^[2~5]。但沙尘暴的发生是一种小概率事件，对于它的发生与危害很难从量上去衡量，只有一些定性的指标，没有确切数值的记录。作者曾根据沙尘暴发生过程中风速和土壤湿度的变化特征，利用数量化理论方法计算了内蒙古中西部地区的二连浩特、乌拉特中旗、乌海三个地区风速和土壤湿度对沙尘暴发生的重要性程度^[6~8]，证明不同地区风速和土壤湿度对沙尘暴发生的作用程度不同，但该方法也存在一定的风险，因为计算的数据在原始数据中不存在，以及这些计算值的意义不明确。因此本文在计算下垫面因子对沙尘暴的影响时，针对沙尘暴记录(有、无)的定性数据的特点，在利用数量化理论Ⅱ分析风和土壤湿度对沙尘暴的影响的基础上运用层次分析法(AHP, Analytic Hierarchy Process)计算各个指标的权重，分析下垫面因子对不同地区的影响，从而为沙尘暴发生危险度的定量研究奠定基础。

1 研究区概况与指标选取

内蒙古中西部地区是我国沙尘暴多发区，常年

受西风带影响，冷空气入侵频繁，春季干燥，多大风天气，气象条件是该地区产生沙尘暴的主要原因。除此之外，广袤的高原、众多的沙漠沙地等地形地貌条件也对沙尘暴的区域分布产生重要影响^[9]。因此地貌格局也是影响沙尘暴区域分布特征的下垫面因子之一。顾卫等曾根据内蒙古中西部地区的地貌资料和地面气象观测资料对沙尘暴分布的地貌特征做了详细分析，结果表明沙漠边缘及沙地地区沙尘暴日数最多，高平原地区次之，山地丘陵地区较少，平原地区最少^[10]。同时他们也对内蒙古中西部地区植被覆盖状况与沙尘暴日数分布进行了研究，得出高平原区和沙地区的夏季地表植被覆盖状况、丘陵区的春季地表植被覆盖状况与沙尘暴日数有明显的负相关，其它地区或季节的地表植被覆盖状况与沙尘暴日数的相关关系不显著的结论^[11]。因此对于本文研究区来说，在沙尘暴发生季节(春季)整个研究区植被覆盖度都较差的情况下，该因子不会成为影响沙尘暴发生的主要因素。

在不同的地貌格局上分布有不同的土壤类型，从而地表沉积物也不相同。从中国科学院地理研究所资源与环境信息系统国家重点实验室制订的1:4 000 000中国土壤图上看，研究区所在的高平

* 收稿日期：2006-06-07；修订日期：2006-11-14

基金项目：中国气象局气候变化专项项目(编号 CCSF-2006-15)

作者简介：杜子璇(1980-)，女，河南扶沟人，硕士，主要从事自然灾害研究。E-mail: dzxbutry@163.com

三方数据

原多为粒径较小的沙质、壤质沉积物,土壤类型为棕钙土;山地和丘陵地区多为砾石沉积物,土壤类型为栗钙土;平原区多为耕地,土壤类型为黑钙土和褐土。沙漠边缘土壤类型主要为风沙土。在进行沙尘暴下垫面研究时可以把植被、地貌、土壤类型这三个因子综合考虑,因为同一地貌类型上的植被覆盖和土壤类型比较相近。

根据数理化理论Ⅱ的研究结果,土壤湿度、风速对沙尘暴的发生与否影响较大^[7,8,12-14],乌拉特中旗和二连浩特地区风速的作用大于土壤湿度的作用,对乌海地区来说,土壤湿度对沙尘暴的作用要大于风速的作用。另外,从下垫面状况来看,地表硬度也是衡量地表状况的一个指标,受研究区域的气候特征影响,地表硬度在一定时期内(如春季)变化不大,当地表硬度大的时候,地表沙粒不易被风吹起,反之当地表硬度小即地表比较松散,沙粒就易被风吹起,从而成为沙尘暴发生的有利条件。在计算硬度等指标的时候,还要考虑到不同地理位置的影响,因为不同位置所处的地貌类型、植被覆盖、土壤类型不同,各个因子影响便不相同,因此本文选取土壤湿度、风速、硬度和位置四个因子作为衡量下垫面状况的主要指标。对于位置又分别选取二连浩特、乌拉特中旗、乌海和呼和浩特四个地区(图1),因为这四个地区所处的位置分别为高平原区、山地丘陵区、沙漠边缘地区和平原区,可以作为不同土壤类型、地貌类型的代表。

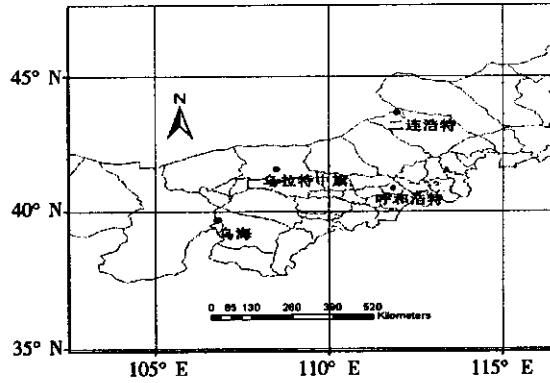


图1 研究区及代表站点示意图

Fig. 1 Study region and the observation sites

2 研究方法与结果

AHP方法的基本原理是对评价系统有关方案的各种要素分解成若干层次,并以同一层次的各种

要求按照上一层要求为准则,进行两两的判断、比较和计算,求出各要素的权重。根据综合权重按最大权重原则确定最优方案。同一层次的要素作为准则,对下一层的某些要素起支配作用,同时它又受上一层次要素的支配。处于最上面的一层称为目标层,这个最高层次通常只有一个要素,是分析问题的目标;中间层次称为准则层,准则层的下一层是子准则层;最低一层的层次称为方案层,这层是解决问题的预选方案。层次之间要素的支配关系不一定是完全的,即可以存在这样的要素,它并不支配下一层次的所有要素。

应用该方法首先要确定每两个因子*i*和*j*之间的相对重要性,为此本文设计了几个等级值(假定*i*和*j*至少同等重要)如下所示:

- 1 *i*和*j*同等重要,
- 3 *i*比*j*稍微重要,
- 5 *i*比*j*明显重要,
- 7 *i*比*j*强烈重要,
- 9 *i*比*j*绝对重要。

它们之间的数2 4 6 8及各数的倒数具有相应的类似意义。

任何判断矩阵都应满足 $a_{ii} = 1$,并且若 $a_{ij} = k$,那么 $a_{ji} = \frac{1}{k}$ 。

根据数理化理论研究的风速、土壤湿度等下垫面因子对沙尘暴的贡献程度,对位置(Location)、风速(Wind Speed)、土壤湿度(Soil Moisture)、硬度(Hardness)构造判断矩阵,根据判断矩阵利用和积法计算各因子的权重值^[15,16]。将判断矩阵每一列正规化,

$$\bar{a}_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sum_{k=1}^n a_{ik}} \quad i, j = 1, 2, \dots, n$$

得到表1

表1 因子判断矩阵及其正规化值

Tab. 1 Indexes identification matrix

and normalized values

	位置	风速	土壤湿度	硬度
位置	0.105	0.103	0.059	0.250
风速	0.526	0.513	0.706	0.250
土壤湿度	0.316	0.128	0.176	0.375
硬度	0.053	0.256	0.059	0.125

每一列经正规化后的判断矩阵按行相加：

$$\bar{W}_i = \sum_{j=1}^n \bar{a}_{ij} \quad j=1, 2, \dots, n, \quad (2)$$

$$\bar{W}_i = \sum_{j=1}^n \bar{a}_{ij} = 0.105 + 0.103 + 0.059 + 0.250 = 0.517$$

$$\bar{W} = [0.517 \ 1.995 \ 0.995 \ 0.493]^T.$$

将所得向量：

$\bar{W} = [0.517 \ 1.995 \ 0.995 \ 0.493]^T$ 正规化得

$$\sum_{j=1}^n \bar{W}_j = 0.517 + 1.995 + 0.995 + 0.493 = 4,$$

$$W_1 = \frac{\bar{W}_1}{\sum_{j=1}^n \bar{W}_j} = 0.517/4 = 0.129, \quad (3)$$

$$W_2 = 1.995/4 = 0.499,$$

$$W_3 = 0.995/4 = 0.249,$$

$$W_4 = 0.493/4 = 0.123,$$

$$\text{则 } W = [0.129 \ 0.499 \ 0.249 \ 0.123]^T.$$

为所求特征向量,即位置、风速、土壤湿度、硬度对沙尘暴影响的权重分别为 0.129、0.499、0.249、0.123。

二连浩特、乌拉特中旗、乌海、呼和浩特分别用大写字母 A、B、C、D 表示,对于这四个不同地区,利用 AHP 方法可以得到风速、土壤湿度和硬度对沙尘暴的影响权重。

根据 40 年来沙尘暴日数的分布和地貌类型与沙尘暴日数关系的研究看,沙尘暴日数分布在沙漠及其边缘、高平原、丘陵山地、平原地区依次减少^[10]。根据数量化理论的分析结果,以及风速和土壤湿度的分布可以计算出风速和土壤湿度在四个地区的权重值。根据 2003 年 11 月和 2004 年 4 月两次实地调查得出土壤硬度的分布图,硬度大小依次为高平原 > 平原 > 丘陵 > 沙漠附近,由于实验条件的限制,不能得到土壤硬度的连续记录。鉴于研究区内气候条件的影响,土壤硬度在一定时期内不会有明显改变,因此考虑在其他条件不变的情况下硬度的作用。综合以上情况,计算各个因子的判断矩阵及其权重(表 2)。这样就得到不同地区四个因子作用的判断矩阵,见表 3:

结合位置、风速、土壤湿度、硬度的权重 $W = [0.129 \ 0.499 \ 0.249 \ 0.123]^T$,可以得到各个地区下垫面因子的综合作用权重值。

表 2 判断矩阵及权重

Tab. 2 Identification matrix and weight of location, wind, soil moisture and soil hardness

指标	地区	A	B	C	D	权重值
位置	A	0.5966	0.5357	0.6618	0.4375	0.558
	B	0.1193	0.1071	0.0735	0.1875	0.122
	C	0.1988	0.3214	0.2206	0.3125	0.263
	D	0.1031	0.0357	0.0441	0.0625	0.061
风速	A	0.543	0.566	0.536	0.438	0.520
	B	0.271	0.283	0.321	0.313	0.297
	C	0.109	0.094	0.107	0.188	0.124
	D	0.078	0.057	0.036	0.063	0.058
土壤湿度	A	0.153	0.321	0.130	0.313	0.229
	B	0.051	0.107	0.130	0.188	0.119
	C	0.765	0.536	0.648	0.438	0.597
	D	0.031	0.036	0.093	0.063	0.055
硬度	A	0.597	0.409	0.357	0.820	0.546
	B	0.199	0.136	0.214	0.039	0.147
	C	0.119	0.045	0.071	0.023	0.065
	D	0.085	0.409	0.357	0.117	0.242

表 3 不同地区下垫面因子权重值

Tab. 3 Weights of land surface factors in different regions

	A	B	C	D
位置	0.55791	0.12187	0.26335	0.06136
风速	0.52049	0.29708	0.12436	0.05808
土壤湿度	0.22916	0.11882	0.59668	0.05536
硬度	0.5458	0.14714	0.06491	0.24217

$W_A = 0.55791 \times 0.129 + 0.52049 \times 0.499 + 0.22916 \times 0.249 + 0.5458 \times 0.123 = 0.4559$ 。同样,其他三个地区的权重值分别为:

$$W_B = 0.2116, W_C = 0.2525, W_D = 0.0805, (4)$$

由(4)式可见,下垫面的影响权重在四个地区分别是 0.4559、0.2116、0.2525 和 0.0805,即二连浩特 > 乌海 > 乌拉特中旗 > 呼和浩特。

从各个因子的权重来看,风速是影响内蒙古中西部地区沙尘暴发生的主导因素,其次是地表的物理状况(如土壤湿度、地表硬度等);对于不同的地区,下垫面状况对沙尘暴发生的作用程度也不同,二连浩特及周边地区地处广阔的蒙古高原上,地势平坦,地表多为粒径较小的颗粒物,地表硬度较大,受气候影响土壤湿度的变化不大,并且是大风日数较多的地区,因此大风是促使该地区发生沙尘暴的主要原因,易发生沙尘暴;乌海地区尽管位于黄河中上游地区,黄河由南向北穿过,但乌海地区东西两侧分

别为库布齐沙漠和乌兰布和沙漠,土壤类型为风沙土,因此土壤湿度的稍微变化即能使下垫面状况发生很大改变,且该地区地势为东西高、中间低,南高北低,这样大风来临时,其地势有减弱风势的作用,因此在沙尘暴发生时,该地区土壤湿度对沙尘暴的作用程度要大于风速的影响,这样的下垫面条件也有利于沙尘暴的发生。乌拉特中旗为丘陵地区,大风天气出现时受山体的阻挡,风势减弱,而且地表多为粒径较大的砾石沉积物,有少量耕地,因此不易发生沙尘暴。呼和浩特地区为平原区,群山环绕,主要以耕地为主,灌溉比较便利,土壤湿度大,植被覆盖度高,因此不易发生沙尘暴。由此可见,利用AHP方法计算出来的不同地区各下垫面因子的作用程度与多年来沙尘暴发生的情况是相符的。

3 结 论

本文在沙尘暴多发区的内蒙古中西部地区选取四个典型站点,以影响沙尘暴发生的风速、土壤湿度、地表硬度、站点所处位置四个因子为指标,应用AHP方法定量分析了沙尘暴发生时下垫面因子的作用,主要得出以下结论:

(1) 从各指标的影响权重分析来看,风速是影响内蒙古中西部地区沙尘暴发生的主导因素,其次是土壤湿度、站点所处地理位置和地表硬度。

(2) 对于不同地区,由于地表条件不一,沙尘暴发生时下垫面因子的贡献度也各有不同:二连浩特地区受大风影响较大,而乌海地区沙尘暴发生与否主要受地表土壤湿度变化的影响;乌拉特中旗和呼和浩特所处的地理位置和地表自然状况不易起沙,因此这两个地区下垫面因子不是引起沙尘暴发生的主导因素。

(3) AHP方法具有较强的逻辑性、实用性和系统性,能够准确的反映研究区域不同站点下垫面因子对沙尘暴发生的定量的贡献程度,符合研究区多年来沙尘暴发生的情况,这种定量的贡献程度研究为下一步进行沙尘暴危险度评估奠定了数量基础。

参考文献(References)

- [1] Yang Debao, Shang Kezheng, Wang Shigong. Dust storm [M]. Beijing: Meteorology Press, 2003. 1-3. [杨德保,尚可政,王式功. 沙尘暴 [M]. 北京:气象出版社, 2003. 1-3.]
- [2] Li Qing, Wang Qiao, Wang Wenjie, et al. Comparative study on methods of monitoring sandstorms based on EOS-Terra/MODIS [J]. Arid Land Geography, 2006, 29(1): 138-142. [厉青,王桥,王文杰,等. 基于 EOS-Terra/MODIS 的沙尘暴遥感监测方法对比研究 [J]. 干旱区地理, 2006, 29(1): 138-142.]
- [3] Zhang Jiahua, Wang Changyao. Landscape disturbance analysis of desertification disaster [J]. Journal of Natural Disasters, 1997, 6(3): 105-111. [张佳华,王长耀. 沙漠化灾害的景观干扰分析 [J]. 自然灾害学报, 1997, 6(3): 105-111.]
- [4] Li Shengyu, Wang De, Lei Jiaqiang. Spatial distribution of sand drift disasters on road surface in the hinterland of the Taklimakan Desert [J]. Arid Land Geography, 2005, 28(1): 93-97. [李生宇,王德,雷加强. 塔克拉玛干沙漠腹地路面沙害的空间分布研究 [J]. 干旱区地理, 2005, 28(1): 93-97.]
- [5] Zhou Changhai, Lei Jiaqiang. Trend of sand drift disasters in the Ebinur Lake Area and their impacts on the Eurasian Continental Bridge [J]. Arid Land Geography, 2005, 28(1): 98-102. [周长海,雷加强. 艾比湖地区风沙灾害趋势及对欧亚大陆桥的影响 [J]. 干旱区地理, 2005, 28(1): 98-102.]
- [6] Li Ning, Gu Wei, Du Zixian, et al. Soil water content observation under different soil classification in central and east Inner Mongolia of China [J]. Advances in Earth Science, 2006, 21(2): 151-156. [李宁,顾卫,杜子璇,等. 内蒙古中西部地区不同土壤类型下土壤水分的研究 [J]. 地球科学进展, 2006, 21(2): 151-156.]
- [7] Du Zixuan. Study on the risk degree of dust storm disaster in the midwest of Inner Mongolia, China [D]. Beijing: Graduate of Beijing Normal University, 2005. [杜子璇. 内蒙古中西部地区沙尘灾害危险度研究 [D]. 北京:北京师范大学研究生院, 2005.]
- [8] Li Ning, Du Zixuan, Shi Peijun, et al. The application of quantification theory II on the risk of dust storm occurrence [J]. 2006, 14(Supplement): 29-33. [李宁,杜子璇,史培军,等. 沙尘风险度研究中量化理论 II 的应用 [J]. 应用基础与工程科学学报, 2006, 14(增刊): 29-33.]
- [9] Qian Zhengan, Cai Ying, Liu Jingtao, et al. Some advances in dust storm research over China-Mongolia Areas [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2006, 49(1): 83-92. [钱正安,蔡英,刘景涛,等. 中蒙地区沙尘暴研究的若干进展 [J]. 地球物理学报, 2006, 49(1): 83-92.]
- [10] Gu Wei, Cai Xuepeng, Li Zhangjun, et al. Geomorphic features of distribution of sandstorm days in western and central Inner Mongolia [J]. Journal of Natural Disasters, 2003, 12(4): 131-136. [顾卫,蔡雪鹏,李彰俊,等. 内蒙古中西部地区沙尘暴日数分布的地貌特征 [J]. 自然灾害学报, 2003, 12(4): 131-136.]
- [11] Gu Wei, Cai Xuepeng, Xiefeng, et al. Study on relationship between vegetation cover and distribution of days of sandstorm-Taking central and western Inner Mongolia for Example [J]. Advance

- in Earth Sciences 2002 ,17 (2) :273 - 277. [顾卫 ,蔡雪鹏 ,谢锋 等. 植被覆盖与沙尘暴日数分布关系的探讨 -- 以内蒙古中西部地区为例 [J]. 地球科学进展 2002 ,17 (2) :273 - 277.]
- [12] Iida Y , Okada N. Analysis of construction program system - Phenomena analysis [M]. Morikita Press , Japan , 1992. 197 - 206 (in Japanese). [饭田恭敬 ,冈田宪夫. 土木计划系统分析 - 现象分析篇 [M]. 森北出版株式会社 ,1992. 197 - 206.]
- [13] Du Zixuan , Li Ning , Gu Wei , et al. Variation of soil moisture content and its relationship with dust storms in the Erleahot Region [J]. Arid Land Geography , 2005 ,28 (4) :501 - 505. [杜子璇 ,李宁 ,顾卫 ,等. 二连浩特地区土壤湿度变化特征及其与沙尘暴关系的初步研究 [J]. 干旱区地理 ,2005 ,28 (4) :501 - 505.]
- [14] Ning Li ,Wei Gu ,Zixuan Du ,et al. Relation between soil moisture and occurrence of dust storms in central Inner Mongolia ,China [J]. Journal of Agriculture Meteorology Japan 2005 ,60 (5) :481 - 484.
- [15] <http://mat.gsia.cmu.edu/mstc/multiple/node4.html>
- [16] Tan Yuejin ,Chen Yingwu ,Yi Jinxian. System engineering principle [M]. Beijing :National University of Defense Technology Press ,1999. 64 - 84. [谭跃进 ,陈英武 ,易进先. 系统工程原理 [M]. 北京 :国防科技大学出版社 ,1999. 64 - 84.]

Application of analytic hierarchy process to dust storm risk assessment

DU Zi-xuan¹ , LI Ning² , LIU Zhong-yang¹ , SHEN Zhan-ying¹ , FU Xiang-jian¹

(1 Meteorological Science Institute of Henan Province , Zhengzhou 450003 , Henan , China ;

2 Institute of Disaster and Public Security , College of Resources Science and Technology , Beijing Normal University , Beijing 100875 , China)

Abstract : Dust storm is the synthesize result of the action of atmospheric motion and physical geographic environment. Formation dust storm depends on the interaction between atmosphere and sandiness surface , which are different physics medium in their density. So wind power and the characteristics of land surface are the main factors that affect the intensity and harm degree of dust storm. In this paper , the risk degree of dust storm in different regions with different land surface conditions is researched from the point of view of land surface in the Midwest region of Inner Mongolia , China. This paper presents an analytic hierarchy process (AHP) method for dust storm risk assessment , which can synthesize the qualitative and quantitative factors. The paper gets the weight of the physiognomy , wind speed , soil moisture and soil hardness with the AHP method , and the respective weight is 0.129 , 0.499 , 0.249 and 0.123 respectively. It shows that wind speed and soil moisture have much contributions to the occurrence of dust storm , especially the wind speed. At the same time , the paper calculates the weight of land surface factors ' contributions to the occurrence of dust storm in different regions. The result shows the weight in different regions is Erleahot > Wuhai > Wulatezhongqi > Huhehaote , and the weight is 0.4559 , 0.2525 , 0.2116 and 0.0805 respectively. The corresponding risk assessment map of dust storm can be obtained according to the weight of land surface factors in different regions , overlaying the physiognomy map and soil map.

Key Words : dust storm ; land surface ; Analytic Hierarchy Process ; risk degree ; weight