基于 GIS 的榆林市土壤风蚀危险度评价

曹晓仪[1]，董治宝[1,2]，李 静[1]，方 兰[1]，李培雄[1]

(1. 陕西师范大学 旅游与环境学院，陕西 西安 710062；
2. 中国科学院 寒区旱区环境与工程研究所 沙漠与沙漠化重点实验室，甘肃 兰州 730000)

摘 要：土壤风蚀是土地沙漠化过程的重要组成部分和首要环节，对其危险度评价的最终目的在于有效地控制土壤风蚀。选取风力、植被、气温、降水、地形、土壤等因子，在 ArcGIS 9.3 平台支持下，建立土壤风蚀环境因子数据库，采用层次分析法(AHP)构建土壤风蚀危险度评价模型，对榆林市土壤风蚀危险度进行评价。结果表明：(1) 基于 GIS 技术的土壤风蚀危险度评价可宏观地揭示该区域土壤风蚀危险度空间格局特征。(2) 风力、植被、气温、降水、地形、土壤等因素控制着土壤风蚀空间分异格局。(3) 榆林市土壤风蚀危险度空间分异格局呈带状分布，表现为危险度从西北向东南逐渐降低。

关键词：土壤风蚀；危险度；榆林；GIS；层次分析法

文献标识码：A **文章编号**：1000-288X(2013)01-0206-05 **中图分类号**：S157.1

GIS-based Evaluation of Soil Erosion Risk by Wind in Yulin City of Shaanxi Province

CAO Xiao-yi[1], DONG Zhi-bao[1,2], LI Jing[1], FANG Lan[1], LI Pei-xiong[1]

(1. *College of Tourism and Environment, Shaanxi Normal University, Xi'an, Shaanxi 710062, China*; 2. *Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Key Laboratory of Desert and Desertification, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou, Gansu 730000, China*)

Abstract: Soil erosion by wind is the main component and an important process of desertification. The aim of the evaluation of soil erosion by wind is to control it effectively. Factors such as wind, vegetation, air temperature, precipitation, topography and soil were selected to establish a risk factor database of wind erosion using ArcGIS 9.3. A model for evaluating the risk of soil erosion by wind in Yulin City of Shaanxi Province was established using AHP. Results show that: (1) Characteristics of the spatial patterns of wind erosion risk in the region can be revealed macroscopically by the GIS-based evaluation of soil erosion risk by wind. (2) Factors of wind, vegetation, air temperature, precipitation, topography and soil control the spatial patterns of wind erosion risk. (3) The spatial patters of soil erosion risk by wind in Yulin City are distributed in a belt pattern and are decreased gradually from southeast to northeast.

Keywords: soil erosion by wind; risk; Yulin City of Shaanxi Province; GIS; AHP

土壤风蚀(soil erosion by wind)指在风力作用下，松散的地表土壤颗粒发生位移，从而导致土壤圈破坏或损失的过程，包括土壤颗粒被风吹起，空间搬运和沉降堆积的过程以及地表物质受到跃移颗粒落地撞击而破碎的磨蚀过程[1-2]。土壤风蚀对与人类生存息息相关的农业生态系统有深刻的影响，是全球性的环境问题[3]。土壤风蚀致使富含营养元素的细土壤颗粒和有机质流失，是土地沙漠化过程的重要组成部分和首要环节[4]，也为沙尘暴提供了物质来源[5]。土壤风蚀影响因子如植被覆盖、土壤结构、气温、降水等具有时空变化特征，使土壤风蚀具有时空性，表现出地域差异[3]。近年来，随着 RS 和 GIS 技术的发展，宏观、高分辨率地揭示土壤风蚀空间格局特征成为可能。张国平等[1]利用 RS 和 GIS 方法对我国土壤风力侵蚀景观进行了宏观的调查，并就驱动力进行了分析；师华定等[6-7]通过神经网络方法和 FCM 模糊聚类方法对内蒙古高原土壤风蚀格局进行了评价，揭示出该区域风蚀危险度“西高东低，中间过渡”的特

收稿日期：2012-01-01 **修回日期**：2012-03-19
资助项目：教育部“长江学者特聘项目“榆林市土壤风蚀危险度研究”(801813)
作者简介：曹晓仪(1986—)，男(汉族)，重庆市綦江区人，硕士研究生，研究方向为城郊水土流失与防治工作。E-mail：caoxiaoyi@stu.snnu.edu.cn。
通信作者：董治宝(1966—)，男(汉族)，陕西省横山县人，教授，研究方向为风沙物理与风沙地貌研究。E-mail：zbdong@lzb.ac.cn。

点;杨光华等[8]运用 GIS 技术和 RBFN 模型,评价了新疆地区 87 个市县的土壤风蚀危险度,并揭示了新疆地区土壤风蚀空间格局。以上研究在分析土壤风蚀影响因子的基础上评价了区域土壤风蚀危险度,对于指导区域经济可持续发展、防沙治沙工程、生态环境保护意义重大。

榆林市地理坐标为 36°37′—39°42′N 和 106°11′—112°23′E,气候属干旱、半干旱湿润气候过渡区,冬春季节干冷多风,年降水量小于 400 mm,地貌属于黄土高原与毛乌素沙地南缘、内蒙古高原过渡区。以长城为界,南部为黄土丘陵沟壑区,占总面积的 58%,北部为风沙草滩区,占总面积的 42%。榆林市的环境组合特征决定了该区域极易发生土壤风蚀,然而针对该区域土壤风蚀及其危险度评价的研究甚少,本文运用 GIS 技术建立区域土壤风蚀环境因子数据库,采用层次分析法(AHP)构建土壤风蚀危险度评价模型,对榆林市土壤风蚀危险度进行评价,并揭示其空间格局特征,为制定区域土壤风蚀防治对策、防沙治沙工程设计和工程实施提供支持。

1　资料与方法

1.1　土壤风蚀环境因子数据库构建

土壤风蚀过程具有复杂性,影响土壤风蚀过程的主要因子对于风蚀危险性评价、全面认识风蚀形成机制起着至关重要的作用。景观尺度下的土壤风蚀空间格局的主要自然环境因子包括风力、植被、气温、降水、土壤性质、地形等[9]。本研究以综合性、主导型、实用性、地带性、层次性为原则,对环境因子进行筛选、归并,选取下述指标进行土壤风蚀危险度评价。

1.1.1　侵蚀性风能　风通过气流或气固两相流的形式将能量传输给地表,进而与地表表层土壤发生作用,产生吹蚀和磨蚀,是土壤风蚀的最根本动力。作用于土壤表面的风能可分为非侵蚀性风能和侵蚀性风能,前者消耗于土壤颗粒之间,后者使土壤颗粒发生运动,两者之间的界限是起动风速。本研究也是基于此出发,采用 Fryberger 提出的侵蚀性风能公式研究风对土壤风蚀的影响,其计算公式为:

$$E=\sum V^2(V-V_t)t \qquad (1)$$

式中:E——侵蚀性风能(m^3/s^3);V——大于起动风速的风速(m/s);V_t——起动风速(m/s),设置为 5 m/s;t——V 作用的时间,一般用频率表示。风速数据采用榆林市定边、府谷、横山、靖边、佳县、米脂、清涧、绥德、神木、吴堡、子洲、榆阳 12 个站点 2005—2010 年各气象站观测的风力数据,采用反距离加权平均(IDW)方法插值获取区域侵蚀性风能空间格局特征。榆林市侵蚀性风能在 156～203 m^3/s^3,其空间分异格局明显,从西北向东南方向逐渐递减,大致以长城和黄土丘陵沟壑地带为界。可将其分为 3 个地区:(1)长城沿线以北风沙草滩区,主要包括定边县大部,靖边、横山、榆阳、神木、府谷北部地区,该区侵蚀性风能在 185～203 m^3/s^3,是陕西省风力最强区域,春季最大风速可达 25～30 m/s。(2)长城沿线以南区域,包括定边县南部、靖边、横山、榆阳、神木、府谷南部和佳县大部、吴旗县北部,该区侵蚀性风能在 165～185 m^3/s^3,春季最大风速可达 20 m/s。(3)黄土丘陵区域,包括子洲、米脂、佳县南部和绥德、吴旗、清涧县,该区地处黄土丘陵沟壑区,侵蚀性风能较小,平均风速多在2 m/s以下,侵蚀性风能在 156～165 m^3/s^3。

1.1.2　植被覆盖　植被通过提高地表粗糙度和吸收风能从而降低风力剪切力对地表的侵蚀,可有效抑制土壤风蚀的发生与发展[10];植物的残余物、根系,土壤有机质含量对土壤可蚀性影响也很重要;植被可改善土壤水分状况,促使土壤形成稳固性结构,进而增加土壤抗蚀性。遥感影像的 NDVI 指数可很好反映地表植被状况,NDVI 值越大,显示植被生长越旺盛,覆盖率越高。考虑到榆林土壤风蚀发生在冬春季节,本研究采用 MODIS 的 2005—2010 年 1—5 月的 250 m分辨率 NDVI 产品平均值代表该区域冬春季节的植被状况(图 1)。从图 1 可知,冬春季节,榆林市植被覆盖较差,植被零星分布于东南部黄土沟壑区域和河流区域,低植被覆盖是导致榆林冬春季节土壤风湿和沙尘暴的重要因素。

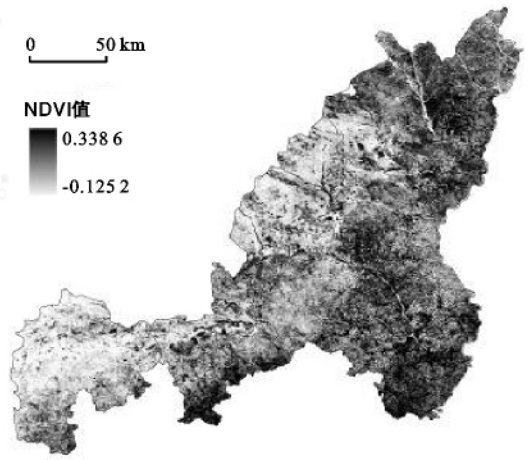


图 1　榆林市归一化植被指数(NDVI)分布

1.1.3　土壤干燥度　土壤水分使土壤颗粒间产生黏附力并通过毛管力增大土壤黏聚力,从而使土壤颗粒不易在风力作用下发生位移[11]。气温越高、降雨量越少,土壤越干燥,其抗风蚀性越差。干燥度是表征

地表土壤干湿程度的重要指标，一般是以区域的水分收支和热量平衡的比值来表示，其计算公式为：

$$D=0.16\sum T_{>10℃}/P \quad (2)$$

式中：D——干燥度（干燥度实质为潜在增发量与降水量的比值）；P——年降水量（mm）；$T_{>10℃}$ 表示大于 10 ℃的积温。当 $D\geqslant 2.0$ 属干旱区，$1.5>D<2.0$ 属半干旱地区。

张燕卿等[12]研究表明，黄河流域气象要素回归分析网格推算较为精确，因此本研究积温数据和降水数据采用网格模型推算。以榆林市各气象站 2005—2010 年平均降水量 P 和平均 $T_{>10℃}$ 积温作为因变量，以经度 X_1，纬度 X_2，海拔高度 X_3 为自变量进行多元回归分析，得到以下回归方程。

$$P=-1\ 995.604+40.851X_i-53.041X_2-0.073X_3 \quad (n=12,\ R^2=0.905) \quad (3)$$

$$T_{>10℃}=14\ 237.153-84.998X_1+5.667X_2-1.264X_3 \quad (n=12,R^2=0.847) \quad (4)$$

式(3)，(4)中，复相关系数 R^2 分别为 0.905 和 0.847，模型精度高，可用于网格推算。在 ArcGIS 9.3 平台下，以 250 m×250 m 大小网格为单位，从 30 m 分辨率 DEM 数据中提取网格中心点经纬度和海拔高度，分别带入式(2)，(3)中，获取榆林市的降水量和积温分布状况，进而利用式(2)计算土壤干燥度。榆林市处在内陆温带季风区边缘地带，距离海洋远，受东南季风影响微弱，其干燥度从西北向东南由干旱区向半干旱区过渡，干旱区主要集中在毛乌素沙地和内蒙古高原，半干旱区主要集中在东南黄土丘陵沟壑地带。

1.1.4 地形起伏度 地形主要通过地表粗糙度影响土壤抗风蚀性能。地形平坦区域，土壤风蚀较为强烈，且多呈片状分布，而在崎岖破碎区域，地表粗糙度大，进而增强土壤颗粒抗风蚀性，且垂直地带性特征使高大且陡峭地区的风力侵蚀程度整体减弱[6]。地形的抗风蚀性可用单位面积内的高程差，即地形起伏度表征。在 ArcGIS 9.3 平台下，以 250 m×250 m 栅格为单元，在 30 m 精度的 DEM 中计算栅格内高差，获取地形起伏度栅格数字矩阵（图 2）。榆林市地势由西北向东南逐渐降低，北部风沙区海拔高度较高，地势平坦，地形起状度小，高差平均 26 m/km²，而东南部黄土丘陵沟壑区，海拔相对较低，地形起伏度较大，多在75 m/km²，最大处为 274 m/km²，地形崎岖破碎。冬春季节，在强烈的冬季西北风的驱动下，位于西北高地势地区的毛乌素沙地极易向地势较低的西南黄土沟壑地区输送沙粒物质，致使沙漠化向东南扩展造成土地沙漠化。

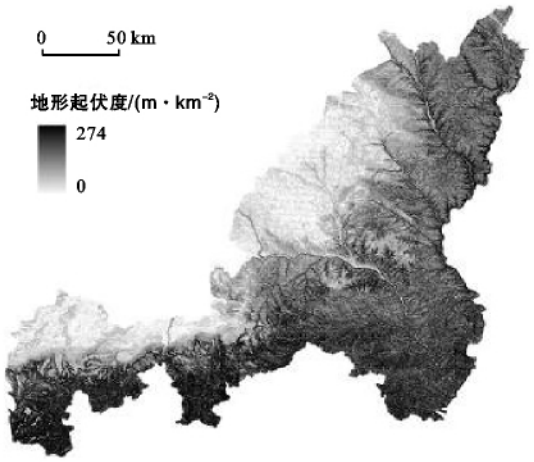


图 2 榆林市地形起伏度分布

1.1.5 沙地面积比例 土地利用方式及其强度是影响土壤风蚀的重要因子，沙区地表裸露、质地松散、植被覆盖差、进而影响区域土壤风蚀强度和范围。沙地所占比例越大，土壤风蚀的危险性就越大。以 250 m×250 m 网格为单位，利用 ArcGIS 9.3 平台统计功能提取沙地面积比例，其中沙漠分布数据来源于中国西部环境与生态科学数据中心获取的 1∶10 万沙漠分布图。榆林市沙漠类型分布主要为流动沙地、半流动沙地、半固定沙地，分布有明显地带性特征。流动沙地、半流动沙地、半固定沙地由榆林东南缘向东北部逐渐过渡。其中流动沙地分布最广泛，面积为 7 876.903 km²，占榆林市总面积 18.21%，集中在毛乌素沙地南缘地带；半流动沙地面积为 718.544 km²，占总面积的 1.65%，集中分布在榆阳区；半固定沙地面积为 4 817.187 km²，占总面积的 11.05%，集中分布在榆阳区东北部和神木县大部。

1.2 土壤风蚀危险度评价

1.2.1 数据标准化 各环境因子数据均转换为栅格大小为 250 m×250 m 的 GRID 文件，采用 Albers 等积圆锥投影，中央经线为 109°E，双标准纬线为 37°N 和 39°N。为消除各环境因子在量纲上的不统一和因子自身变异大小和数值大小的影响，故将转换后的 GRID 数据进行极差标准化处理，使处理后的每个像元的值范围在(0，1)之间，且没有量纲差异，其计算公式为：

$$X_i=\frac{x_i-x_{\min}}{x_{\max}-x_{\min}} \quad (5)$$

式中：X_i——每个像元标准化后的数值；x_i——每个像元的实际值；$x_{\min}$，$x_{\max}$——像元的最小值与最大值。

1.2.2 确定权重 区域环境因子和生态背景共同控制着土壤风蚀，因此确定各因子对土壤风蚀贡献在危险性评价过程中相当重要。层次分析法(analytic hierarchy process，AHP)是一种定性、定量的系统化、

层次化的结合方法,在评价过程中,既集成了专家的知识经验,又不缺乏数学基础,可运用于土壤风蚀危险性评价,其权重确定过程如下:

(1) 建立层次结构模型。在分析土壤风蚀影响因子的基础上建立土壤风蚀层次结构模型,即目标层为土壤风蚀危险度,指标层为上述各环境因子。

(2) 构造成对判断矩阵。根据资料、专家意见和研究人员的经验确定指标层各元素对目标层的重要性排序[4,10-11,13-15],用成对比较法和 1～9 比较尺度构造成对判断矩阵(表 1)。

表 1　土壤风蚀因子权重判断矩阵

风蚀环境因子	侵蚀性风能	植被覆盖度	土壤干燥度	地形起伏度	沙地面积比例	权 重
侵蚀性风能	1	1	3	4	3	0.334 2
植被覆盖度	1	1	2	3	3	0.268 3
土壤干燥度	1/3	1/2	1	1	1	0.160 8
地形起伏度	1/4	1/3	1	1	1	0.105 2
沙地面积比	1/3	1/3	1	1	1	0.141 5

(3) 计算权重向量及一致性检验。首先计算判断矩阵特征向量 W 及最大特征根 λ_{max},其中,特征向量 W 为权重值,然后利用一致性指标(I_C)、随机一致性指标(I_R)和一致性比率(R_C)做一致性检验。当 $R_C<0.1$ 时,一般认为判断矩阵具有满意一致性,否则必须重新调整判断矩阵,直到具有满意一致性。本研究判断矩阵 $R_C=0.006\ 6$,小于 0.1,说明选择的权重合理,可用于土壤风蚀危险性评价。

1.2.3　评价模型　本研究采用加权求和的方法构建榆林市土壤风蚀危险度模型,其计算公式为:

$$R=\sum_{i}^{n} w_i r_i \quad (i=1,2,3,4,5) \qquad (6)$$

式中:R——土壤风蚀危险度;w_i——第 i 个环境因子的权重;r_i——第 i 个环境因子的评价权重值。基于该模型,在 ArcGIS 9.3 支持下,采用栅格计算器将标准化后的侵蚀性风能、植被覆盖度、土壤干燥度、地形起伏度、沙地面积比进行叠加分析,得到榆林市土壤风蚀危险度空间分异格局图(图 3)。由于植被覆盖度、地形起伏度与土壤风蚀成反比,为逆指标,在赋权重过程中用 1 与其作差后的新值用于土壤风蚀评价。

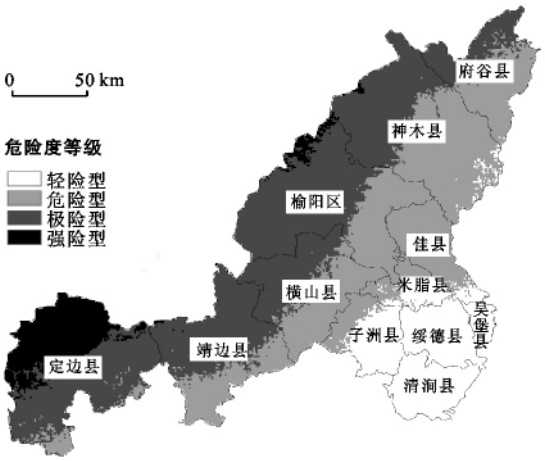


图 3　榆林市土壤风蚀危险度空间格局

2　结果与讨论

榆林市位于内蒙古高原、黄土高原、毛乌素沙地过渡地带,地处内陆,其气温、降水、风况与大陆性季风环流有密切联系,因此土壤风蚀危险度格局表现为西北向东南逐渐降低,且呈带状分布。结合《土壤侵蚀分类分级标准》关于土壤风蚀的标准及已有的研究成果作为参照[1,16],本研究将榆林市土壤风蚀危险度分为轻险型、危险型、强险型、极险型 4 种类型。

(1) 轻险型。主要分布在榆林市东南部,包括清涧县、绥德县、吴堡县、米脂县大部、子洲县大部、佳县南部,其面积为 4 873.659 km^2,占榆林总面积11.18%。该区域地貌上属黄土丘陵沟壑区,地形起伏度大,植被覆盖较高、沙地比例较低、风力作用小,土壤风蚀危险度较低。如清涧县地貌上属典型沟壑丘陵地带,地表支离破碎,平均海拔高度在 900 m 左右,高差 600 m 余,地形起伏度较大,年均降水量约 400 mm,平均气温 10 ℃左右。千沟万壑的地形阻挡了气流对地表的吹蚀,相对湿润的气候增加了地表土壤颗粒的起动风速,因此,区域风蚀危险性较小,属轻险型。

(2) 危险型。主要分布在佳县东南部,子洲县西北部,靖边县、横山县、榆阳区、神木县、府谷县东南部,位于轻险区的西北部,面积为 21 903.874 km^2,占榆林市总面积 50.26%,分布面积最为广泛。该区域地处毛乌素沙地与黄土高原的交界地带,地势相对平坦,植被覆盖差,易发生土壤风蚀,是土壤风蚀危险区域。如佳县位于毛乌素沙漠南缘,面积 2 144 km^2,气候干燥,日照时间长,光热资源丰富,降水量在 380 mm左右,土壤较为干燥。北部片沙区面积占全县总面积的 1/3 左右,冬春季节,西北季风强盛,植被覆盖差,易发生土壤风蚀,属危险型区域。

(3) 强险型。主要分布在定边县东南部、靖边县、

横山县、榆阳区、神木县、府谷县东北部，呈带状分布，与危险型大致以长城为界，其面积为 14 656.640 km^2，占榆林市总面积 33.63%。该区域主体上为毛乌素沙地，位于长城沿线以北的风沙区，地势平坦，植被覆盖差，沙地分布广泛，地表沉积物松散，地表粗糙度小，致使该区域在西北季风的控制下极易发生土壤风蚀。例如榆阳区境内以长城为界，沿北为风沙草滩区，约占总面积的 65%，沙区植被覆盖低下，地势高且平坦，降水稀少，极易发生土壤风蚀。

(4) 极险型。主要分布在定边县西北部、榆阳区、神木县东北部零星分布。定边县位于黄土高原与内蒙古鄂尔多斯荒漠草原过渡地带，地貌上北部为毛乌素沙漠南缘风沙滩区，占总面积的 47.22%，地势高，春多风，冬严寒，日照充足，年均气温 7.9 ℃，年平均日照 2 743.3 h，年均降雨量 316.9 mm，植被退化严重，风力作用强盛，是榆林市风能资源最丰富地区之一，风沙活动频繁，是西北季风主要通道之一，冬春季节极易发生土壤风蚀。

3 结 论

依据土壤风蚀理论和榆林市环境背景，建立起土壤风蚀环境因子数据库，依据已有成果和专家经验，建立层次分析模型，对榆林市土壤风蚀危险度进行评价。

(1) 基于 GIS 技术和土壤风蚀理论构建风蚀环境因子数据库，利用已有研究成果和专家知识经验，运用层次分析法进行土壤风蚀危险度评价可宏观地揭示榆林市土壤风蚀危险度空间格局分异特征。

(2) 风力、植被、气温、降水、地形、土地类型是影响土壤风蚀空间格局的重要因素，控制着土壤风蚀空间分异格局。

(3) 榆林市土壤风蚀危险度可分为轻险型、危险型、强险型、极险型，轻险区面积为 4 873.659 km^2 (11.18%)，危险区面积 21 903.874 km^2 (50.26%)，强险区面积 2 143.827 km^2 (4.91%)，极险区面积 14 656.640 km^2 (33.63%)。

(4) 受地形、土壤及气候因素影响，榆林市土壤风蚀危险度空间分异格局表现为危险度从西北向东南逐渐降低，且呈带状分布。

(5) 土壤风蚀危险度空间格局可反映风蚀的强度、驱动因子、发展方式，对于防沙治沙工程有直接指导作用。

[参 考 文 献]

[1] 张国平，张增祥，刘纪远. 中国土壤风力侵蚀空间格局及驱动因子分析[J]. 地理学报，2001(2)：146-158.

[2] 陈渭南，董光荣，董治宝. 中国北方土壤风蚀问题研究的进展与趋势[J]. 地球科学进展，1994(5)：6-12.

[3] Zobeck T M, Parker N C, Haskell S, et al. Scaling up from field to region for wind erosion prediction using a field-scale wind erosion model and GIS[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2000,82(1):247-259.

[4] 董光荣，李长治，金炯，等. 关于土壤风蚀风洞模拟实验的某些结果[J]. 科学通报，1987(4)：297-301.

[5] Lu Hua, Shao Yaping. Toward quantitative prediction of dust storms: An integrated wind erosion modelling system and its applications[J]. Environmental Modelling & Software, 2001,16(3):233-249.

[6] 师华定，高庆先，庄大方，等. 基于径向基函数神经网络(RBFN)的内蒙古土壤风蚀危险度评价[J]. 环境科学研究，2008(5)：129-133.

[7] 师华定，高庆先，齐永清，等. 蒙古高原土壤风蚀危险度的 FCM 模糊聚类研究[J]. 自然资源学报，2009(5)：881-889.

[8] 杨光华，包安明，陈曦，等. 基于 RBFN 模型的新疆土壤风蚀危险度评价[J]. 中国沙漠，2010(5)：1137-1145.

[9] 师华定，齐永青. 内蒙古高原土壤风蚀研究[M]. 北京：中国环境科学出版社，2010：77-79.

[10] 刘小平，董治宝. 直立植被粗糙度和阻力分解的风洞实验研究[J]. 中国沙漠，2002(1)：82-87.

[11] 董治宝，钱广强. 关于土壤水分对风蚀起动风速影响研究的现状与问题[J]. 土壤学报，2007(5)：934-942.

[12] 张燕卿，刘勤，严昌荣，等. 黄河流域积温数据栅格化方法优选[J]. 生态学报，2009(10)：5580-5585.

[13] 胡孟春，王周龙. 土壤风蚀的自然—社会复合系统动态过程模拟研究[J]. 科学通报，1994(12)：1118-1121.

[14] 李振山. 地形起伏对气流速度影响的风洞实验研究[J]. 水土保持研究，1999,16(4)：75-79.

[15] 梁海超，师华定，白中科，等. 中国北方典型农牧交错区的土壤风蚀危险度研究[J]. 地球信息科学学报，2010(4)：510-516.

[16] 张国平，刘纪远，张增祥，等. 中国风蚀景观面积变化与地表风场强度的关系[J]. 地理学报，2002(1)：1-10.