

# 基于 T-S 模糊神经网络模型的榆林市 土壤风蚀危险度评价

刘新颜<sup>1</sup>, 曹晓仪<sup>1</sup>, 董治宝<sup>1,2</sup>

(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, 甘肃 兰州 730000)

**摘要:** 选择位于风沙过渡区的榆林市为研究区域, 以 GIS 技术和 T-S 模糊神经网络为依托, 从土壤风蚀影响因子及风蚀动力学机制出发构建区域土壤风蚀危险度模型。基于此模型, 对榆林市土壤风蚀危险度空间分异特征进行了分析, 结果表明: T-S 模糊神经网络模型可有效地揭示出区域土壤风蚀危险度与环境之间的映射关系, 为土壤风蚀预测提供依据; 风力、植被、气温、降水、地形等环境要素控制着土壤风蚀危险度空间分异格局; 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。

**关键词:** 榆林市; 土壤风蚀; T-S 模糊神经网络; 危险度评价

**中图分类号:** S157      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-0690(2013)06-0741-07

土壤风蚀(soil wind erosion)指在一定风力作用下, 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<sup>[1-4]</sup>, 是沙漠化的首要环节和重要组成部分<sup>[5]</sup>。20 世纪 80 年代以来, 中国学者出于防治沙漠化的需要, 开展了大量的土壤风蚀研究, 在风蚀因子、防治措施方面取得了大量的成果<sup>[6,7]</sup>, 但系统的评价区域土壤风蚀危险性尚不多见。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。张国平等利用遥感与地理信息系统方法对全国土壤风力侵蚀状况进行了宏观调查, 建立了全国 1:10 万土壤风力侵蚀数据库, 并指出风速、土壤干燥度、地表植被指数、土壤质地和坡度是土壤风力侵蚀的重要驱动因子<sup>[2]</sup>。师华定等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”的特点<sup>[8,9]</sup>; 梁海超等运用层次分析法评价了中国北方典型农牧交错区土壤风蚀危险性, 并指出该区土壤风蚀危险度

格局为由东南向西北逐渐增强<sup>[10]</sup>。以上研究通过土壤风蚀环境因子的分析, 评价区域土壤风蚀危险度及发展趋势, 对于指导区域防沙治沙工程、生态环境保护起到积极的作用。

榆林市地处毛乌素沙地、内蒙古高原、黄土高原相互交接地带, 其地貌和气候特征决定毛其极易发生风蚀且向东南扩展, 因此分析榆林市的土壤风蚀危险度空间分异特征意义重大。本文在前人研究的基础上选择土壤风蚀环境因子, 在 Arc-GIS9.3 平台支持下提取各指标数据, 并根据样点的土壤风蚀危险度进行训练, 确定网络模型参数, 建立起 T-S 模糊神经网络模型, 进而对榆林市土壤风蚀危险度进行评价, 以期辅助榆林市防沙治沙、环境保护政策制定与实施。

## 1 研究区域概况

榆林市地处 36°37'N~39°42'N 和 106°11'E~112°23'E 之间, 东临黄河与山西相望, 西连宁夏、甘肃, 北邻内蒙, 南接延安市, 气候上属暖温带半干旱向半湿润气候过渡区, 大陆性明显, 冬春季节干冷多风, 年降水量小于 400 mm, 地貌上属黄土高原与

收稿日期: 2012-05-05; 修订日期: 2013-01-06

基金项目: 教育部长江学者特聘教授项目(801813)和国家自然科学基金项目(41171090)资助。

作者简介: 刘新颜(1978-), 女, 新疆库尔勒人, 博士研究生, 研究方向: 区域开发与可持续发展。E-mail: liuxy@snnu.edu.cn

通讯作者: 董治宝, 教授。E-mail: zbdong@lzb.ac.cn

毛乌素沙地南缘、内蒙古高原过渡地区,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%。榆林自然环境特征决定了其西北部高海拔的沙地在强烈冬季西北风的作用下向东南部黄土沟壑区扩展,极易致使土地沙漠化。

## 2 材料与方法

### 2.1 土壤风蚀环境因子数据库

景观尺度下的土壤风蚀是多种要素共同作用的结果,其中决定其空间分异格局变化的主要环境因素包括植被、地形、风况、降水、土壤等。土壤风蚀过程异常复杂,侵蚀危险度及其空间格局与环境因素之间多为非线性关系,且环境要素之间也同样存在着强或弱的相关性,具有不易确定性和模糊性<sup>[9]</sup>,土壤风蚀危险度与环境要素之间存在的复杂关系可用公式(1)表示:

$$WER=f(E) \quad (1)$$

式(1)中, $WER$ 代表土壤风蚀危险度, $E$ 代表土壤风蚀环境因子, $f$ 代表两者间的复杂映射关系,如知道某一点的环境条件 $E$ 以及映射关系 $f$ ,则可利用公式(1)推算出该点的土壤风蚀危险度。因此,本文从土壤风蚀影响因子及风蚀动力学机制出发,结合侵蚀区域自然环境特征,选取了侵蚀性风能、植被覆盖度、干燥度、地形起伏度构建土壤风蚀危险度环境数据库。其中所有数据均在ArcGIS9.3环境下转换成栅格大小为250 m×250 m的GRID文件,并采用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。

#### 2.1.1 侵蚀性风能

风是土壤风蚀的最根本动力,它通过气相、气固两相流将能量传输至地表,进而与表土作用,产生吹蚀和磨蚀。作用于表土的风能依据是否使地表颗粒起动可分为非侵蚀性风能和侵蚀性风能,前者将能量消耗在土壤颗粒之间,后者使土壤颗粒发生位移,产生土壤风蚀。本研究采用修正风蚀方程(RWEQ)中关于侵蚀性风能的计算方法<sup>[11]</sup>,其公式为:

$$W = \frac{n}{500} \sum_{i=1}^n U(U - U_c)^2 \quad (2)$$

式(2)中, $W$ 为风场强度( $\text{m}^3/\text{s}^3$ ); $U$ 为离地面2 m处的风速; $U_c$ 为2 m高处土壤颗粒的起动风速,设置为5 m/s。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IDW方法插值获取区域250 m分辨率侵蚀性风能空间格局特征(图1a)。由图可知榆林市风场强度在156~203  $\text{m}^3/\text{s}^3$ 之间,其空间分异格局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: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,该区风场强度在185~203  $\text{m}^3/\text{s}^3$ 之间,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、吴堡县北部,该区风场强度在165~185  $\text{m}^3/\text{s}^3$ 之间,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、吴堡、清涧县,该区地处黄土丘陵沟壑区,风场强度较小,平均风速多在2 m/s以下,风场强度在156~165  $\text{m}^3/\text{s}^3$ 之间。榆林市西北属风沙草滩区,地形平坦开阔,植被差,对流活动明显,对风的阻挡作用小,风速较大,年平均风速在2.1 m/s以上;而东南部各县区,由于位处陕北黄土高原,地形破碎,沟壑纵横,对气流的阻挡作用明显,年平均风速在1.3~2.1 m/s之间。

#### 2.1.2 植被覆盖度

植被通过提高地表粗糙度、改善土壤结构稳定性从而增加土壤的抗风蚀性<sup>[12]</sup>。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<sup>[13,14]</sup>。植被覆盖度可通过象元二分模型从NDVI指数转换获取<sup>[15]</sup>,其计算公式为:

$$f_v = \frac{NDVI - N_s}{N_v - N_s} \quad (3)$$

式(3)中, $f_v$ 为植被覆盖率, $N_v$ 和 $N_s$ 分别是茂密植被覆盖和完全裸土像元的NDVI值,通常 $N_v$ 取NDVI最大值, $N_s$ 取NDVI最小值。本研究考虑到榆林市土壤风蚀发生在冬春季节,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1b)。由图可知,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市冬春季节土壤风蚀和沙尘暴的重要因素。

#### 2.1.3 干燥度

干燥度是表征区域大气水分供应状况和气候干湿程度<sup>[16]</sup>,进而反应土壤干湿程度,一般是区

域的水分收支和热量平衡的比值来表示,其计算公式为:

$$D=0.16\sum T_{>10^{\circ}\text{C}}/P \quad (4)$$

式中: $D$ 为干燥度; $P$ 为年降水量; $T_{>10^{\circ}\text{C}}$ 表示大于 $10^{\circ}\text{C}$ 的积温;当 $D\geq 2.0$ 属干旱区, $1.5<D<2.0$ 属半干旱地区。张燕卿等<sup>[17]</sup>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,其计算过程如下:

以榆林市12个气象站2005~2010年平均降水量 $P$ 和平均 $T_{>10^{\circ}\text{C}}$ 积温作为因变量,经度 $X_1$ ,纬度 $X_2$ ,海拔高度 $X_3$ 作为自变量做多元回归分析,得到以下回归方程:

$$P=-1995.604+40.851X_1-53.041X_2-0.073X_3 \quad (n=12, R^2=0.905) \quad (5)$$

$$T_{>10^{\circ}\text{C}}=14237.153-84.998X_1+5.667X_2-1.264X_3 \quad (n=12, R^2=0.847) \quad (6)$$

式(5)、(6)中,复相关系数 $R$ 分别为0.905和0.847,可信度分别为0.000和0.003,模型精度高,可用于网格推算。在ArcGIS9.3平台下,以 $250\text{ m}\times 250\text{ m}$ 大小网格为单位,从 $30\text{ m}$ 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(5)、(6)中,获取榆林市的降水量和积温分布状况,进而利用公式(4)计算土壤干燥度(图1c)。榆林市位于大陆内部、处温带季风区边缘地带,距离海洋远,受东南季风影响微弱,其干燥度空间分异格局从西北向东南由干旱区向半干旱区过度,干旱区主要集中在毛乌素沙地,半干旱地区主要集中在东南黄土高原沟壑地带。

#### 2.1.4 地形起伏度

地形与土壤风蚀关系密切,通过地表粗糙度影响土壤抗风蚀性。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,进而增强土壤抗风蚀性<sup>[2]</sup>。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。以 $250\text{ m}\times 250\text{ m}$ 栅格为单元,在 $30\text{ m}$ 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1d)。榆林市地势由西北向东南逐渐降低,地貌上以长城为界,北部为风沙区,海拔较高,多在 $1\,200\text{ m}$ 以上,地形起伏度小,高差多在 $26\text{ m}/\text{km}^2$ ,地势平坦,东南部主要为黄土丘陵沟壑,海拔相对较低,多在 $1\,200\text{ m}$ 以下,地势起伏度大,高差多在 $75\text{ m}/\text{km}^2$ ,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。

#### 2.2 T-S模糊神经网络

T-S模糊神经网络将模糊逻辑和神经网络的学习逼近的特点融合在一起,是一种能自动更新,不断修正模糊子集隶属函数模糊系统<sup>[18]</sup>。该模型分为输入层,模糊化层,模糊规则计算层和输出层等四层,采用“if-then”规则形式定义,在规则 $R^i$ 的情况下,其推理过程如下:

$R^i$ : If  $x_1$  is  $A_1^i$ ,  $x_2$  is  $A_2^i$ , ...,  $x_k$  is  $A_k^i$  then  $y_i = p_0^i + p_1^i x_1 + \dots + p_k^i x_k$ ; 其中,  $A_j^i$  为模糊系统的模糊集,  $p_j^i$  为模糊系统参数( $j=1,2,3,\dots,k$ );  $y_i$  为根据模糊规则得到的输出。假设对于输入量  $x=[x_1, x_2, \dots, x_k]$ , 首先根据模糊规则计算各输入变量  $x_j$  的隶属度  $u$ , 其计算公式为:

$$uA_j^i = \exp[-(x_j - c_j^i)^2/b_j^i] \quad j=1,2,\dots,k; i=1,2,\dots,n \quad (7)$$

式中,  $c_j^i$  和  $b_j^i$  分别是隶属函数的中心和宽度,  $k$  为输入参数数量;  $n$  为模糊子集数。

然后将各隶属度进行模糊化计算,采用连乘乘子,其计算公式为:

$$w^i = uA_j^1(x_1) \times uA_j^2(x_2) \times \dots \times uA_j^k(x_k) \quad i=1,2,\dots,n \quad (8)$$

根据模糊计算结果计算模型输出值  $y_i$ :

$$y_i = \frac{\sum_{i=1}^n w^i (p_0^i + p_1^i x_1 + \dots + p_k^i x_k)}{\sum_{i=1}^n w^i} \quad (9)$$

最后进行误差计算,其计算公式为:

$$e = \frac{1}{2}(y_d - y_c)^2 \quad (10)$$

式中,  $e$  为误差,  $y_d$  为期望值,  $y_c$  为网络实际输出。

#### 2.3 神经网络构建及模拟

土壤风蚀景观是各种环境因子相互复杂作用的结果,相同的土壤风蚀景观对应相同的土壤风蚀危险度。本文首先根据样本数据,训练构建出T-S模糊神经网络模型,即 $f$ ,然后将环境条件代入 $f$ ,获取榆林市的土壤风蚀危险度空间分异格局特征。

首先,在Google Earth卫星影像、榆林市土地利用图、中国1:10万沙漠分布图的基础上,以 $50\text{ km}$ 为间隔获取样点,调查样点区域内 $1\sim 2\text{ km}^2$ 地区土壤风蚀危险度。依据《土壤侵蚀分类分级标准》<sup>[19]</sup>和已有研究文献为参考<sup>[4,5,20-23]</sup>将土壤风蚀危险度分为:① 极险型,景观上表现为流动沙丘为主,几乎



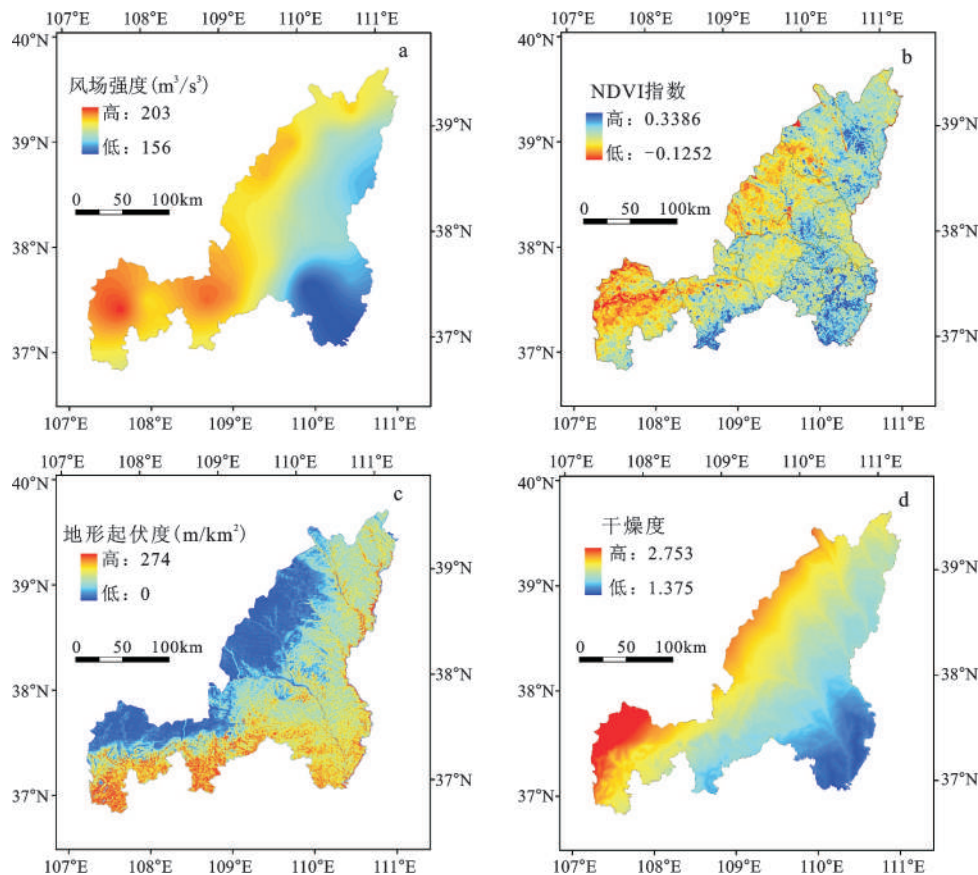


图1 榆林市土壤风蚀环境因子分布

Fig.1 Spatial distribution of environmental elements on wind erosion in Yulin City

无植被覆盖,沙化土地占70%以上,风险等级为IV级;② 强险型,景观上表现为半流沙丘、半固定沙丘为主,植被零星分布,沙化土地占面积50~70%,风险等级为III级;③ 危险型,景观上表现为固定沙丘,黄土塬面等,农耕地出现风蚀槽,风蚀洼地,植被覆盖率15%以上,沙化土地在50%以下,风险等级为II级;④ 轻险型,景观上表现为黄土沟壑区,植被覆盖20%以上,风蚀地貌面积5%以下,风险等级为I级。其次在环境数据库中提取样点的侵蚀性风能( $E_1$ )、植被覆盖度( $E_2$ )、干燥度( $E_3$ )、地形起伏度( $E_4$ )值,将其作为神经元代入T-S神经网络中训练以确定网络参数,构建模型 $f$ 。根据样本训练数据的维数确定输入节点数、模糊隶属函数的个数分别为4和8,输出数据为1维,即该模型的网络结构为4-8-1,选择5组系数 $p_0 \sim p_4$ 。模糊隶属函数中心度和宽度 $c$ 和 $b$ 随机得到,设置停止训练误差为 $10^{-3}$ ,当训练28次时,训练误差为 $1 \times 10^{-5}$ ,停止训练,构建出土壤风蚀危险度与环境条件的映射关系 $f$ 为:

$$f = T-SANN \left\{ \begin{array}{l} I-M-O: 4-8-1 \\ p_i (i=0,1, \dots, 4) \\ e < 10^{-3} \end{array} \right\} \quad (11)$$

式(11)中, $T-SANN$ 代表所用方法为T-S模糊神经网络, $I-M-O$ 代表神经网络层中的输入层(Input),中间层(Midnum)和输出层(Output)的维数, $p_i$ 代表网络结构中的系数,共5组, $e$ 代表训练误差。最后以 $250 \text{ m} \times 250 \text{ m}$ 大小网格为单位,提取侵蚀性风能( $E_1$ )、植被覆盖度( $E_2$ )、干燥度( $E_3$ )、地形起伏度( $E_4$ )值,将其代入 $f$ ,获取榆林土壤风蚀危险度空间分异格局(图2a),其过程由MATLAB软件编程实现。由(图2a)可知,榆林市土壤风蚀危险区域主要分布在沿长城西北部,这与其沙漠分布(图2b)有很好的对应关系,也说明了该方法对于预测区域土壤风蚀及制图可行。

### 3 结果及讨论

榆林市位于内蒙古高原、黄土高原、毛乌素沙地过度地带,地处内陆,其气温、降水、风况与大陆

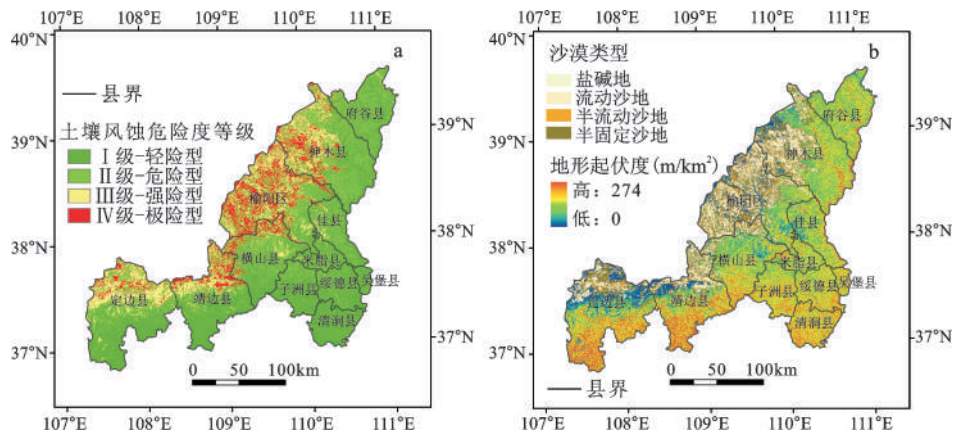


图2 榆林市土壤风蚀危险度(a)和地形地貌分布(b)

Fig.2 Spatial pattern of wind soil erosion risk in Yulin city(a) and the map of landform in Yulin City(b)

性季风环流有密切联系,地形上西北平坦且高,东南崎岖且低,加之地貌大致以古长城为界,西北分布毛乌素沙地,东南分布黄土沟壑区(图2B),因此土壤风蚀危险度格局表现为西北向东南逐渐降低。

1) 极险型:该区大致沿古长城为界呈带零散片状分布,面积为4 810 km<sup>2</sup>,占榆林总面积11.16%,主要分布在榆阳区大部、神木县西部,及零星分布于横山、靖边、定边县北部。该区主体上为毛乌素沙地南缘,属风沙活动区,地貌上多流动沙地,地表沉积物松散,地形起伏度小,地表粗糙度小,气候上春多风、冬严寒,日照充足,年均降水稀少,植被覆盖极少,是西北季风的主要通道,冬春季节极易发生土壤风蚀。

2) 强险型:该区分布范围较极险型区域广,主要集中分布在定边、靖边县中部,以及榆阳区、神木县嵌套分布在极险区域中,其面积为5 824 km<sup>2</sup>,占榆林市总面积13.51%。定边、靖边县属黄土高原与内蒙古鄂尔多斯荒漠草原过渡地带,地势较高且平坦,冬春季节干燥多风,年平均气温7.9℃,年平均日照2 743.3 h,年平均降水量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,易发生土壤风蚀。榆阳区、神木县嵌套分布于极险区中,地貌上属半固定沙地,植被零星分布,在外界因素的干扰下,半固定沙地易向流动沙地转变,因此,该区易发生土壤风蚀。

3) 危险型:该区呈带状分布极险、强险型区东南部,主要分布在府谷县大部,神木县、榆阳区东南部,横山县南部,定边、靖边县南,其面积为13 239 km<sup>2</sup>,占榆林总面积30.71%。该区属毛乌素沙地、内蒙古高原与黄土高原的交接地带,分布有

固定沙丘、黄土塬,地形较为平坦,植被覆盖度10%以下,地表粗糙度小,因此属于土壤风蚀危险区域。

4) 轻险型:主要分布在定边、靖边、横山县南部和子洲、绥德、米脂、佳县、吴堡县大部,其面积为19 234.88 km<sup>2</sup>,占榆林总面积的44.62%。该区域地貌上属黄土丘陵沟壑区,地形起伏度较大,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以上,地形起伏度较大,年均降水量在400 mm左右,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。

## 4 结 论

本文从土壤风蚀影响因子及风蚀动力学机制出发,结合侵蚀区域自然环境特征,选取了侵蚀性风能、植被覆盖、干燥度、地形起伏度构建土壤风蚀危险度环境数据库。利用T-S模糊神经网络构建土壤风蚀模型,对榆林市土壤风蚀危险度进行评价,研究结果表明:

1) 利用样点调查土壤风蚀危险度,依据T-S模糊神经网络训练构建土壤风蚀危险度评价模型,运用该模型可宏观地揭示榆林市土壤风蚀危险度空间格局特征。

2) 风力、植被、气温、降水、地形等土壤风蚀的重要影响因素,控制着土壤风蚀危险度的空间格局。

3) 榆林市土壤风蚀危险度可分为极险型、强险型、危险型、轻险型。极险型面积为 4 810 km<sup>2</sup>, 占榆林总面积 11.16%; 强险型面积为 5 824 km<sup>2</sup>, 占榆林总面积 13.51%; 危险型面积为 13 239 km<sup>2</sup>, 占榆林总面积 30.71%; 轻险型面积为 19 234.88 km<sup>2</sup>, 占榆林总面积的 44.62%。

4) 受地形、地貌、土壤及气候等因素影响, 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。

5) 土壤风蚀危险度空间格局可反映区域土壤风蚀强度、驱动因子, 对于防沙治沙工程有直接指导作用。

## 参考文献:

- [1] 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, **9**(5): 6~12.
- [2] 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, **56**(2): 146~158.
- [3] 包慧娟, 李振山, 王 涛. 沙漠化地区可持续发展的概念模型[J]. 地理科学, 2007, **27**(2): 173~176.
- [4] 于国茂, 刘 越, 艳 燕, 等. 2000~2008 年内蒙古中部地区土壤风蚀危险度评价[J]. 地理科学, 2011, **31**(12): 1493~1499.
- [5] 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, **32**(4): 297~301.
- [6] Shi P, Yan P, Yuan Y, et al. Wind erosion research in china: past, present and future [J] Prog. Phys. Geog. 2004, **28**: 366~386.
- [7] Zhibao D, Xunming W, Lianyou L. Wind erosion in arid and semiarid china: an overview [J] Journal of Soil and Water Conservation, 2000, **55**(4): 439~444.
- [8] 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, **21**(5): 129~133.
- [9] 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, **24**(5): 881~889.
- [10] 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, **12**(4): 510~516.
- [11] Fryrear D W, Bilbro J D, Saleh A, et al. RWEQ: improved wind erosion technology [J] Journal of Soil and Water Conservation, 2000, **55**(2): 183~189.
- [12] 董治宝, 陈渭南, 董光荣, 等. 植被对风沙土风蚀作用的影响[J]. 环境科学学报, 1996, **12**(4): 437~443.
- [13] 李 明, 吴正方, 杜海波, 等. 基于遥感方法的长白山地区植被物候期变化趋势研究[J]. 地理科学, 2011, **31**(10): 1242~1248.
- [14] 穆少杰, 李建龙, 陈奕兆, 等. 2001~2010 年内蒙古植被覆盖度时空变化特征[J]. 地理学报, 2012, **32**(9): 1255~1268.
- [15] 李苗苗, 吴炳方, 颜长珍, 等. 密云水库上游植被覆盖度的遥感估算[J]. 资源科学, 2004, **26**(4): 153~159.
- [16] 陈昌毓. 自然干燥度和实际干燥度及其应用[J]. 气象, 1992, **18**(11): 8~13.
- [17] 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, **29**(10): 5580~5585.
- [18] 李 翔, 陈增强, 袁著祉. 神经网络结构的递归 T-S 模糊模型[J]. 系统工程学报, 2001, **16**(4): 268~274.
- [19] SL190-2007. 土壤侵蚀分类分级标准[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2008.
- [19] 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, **39**(12): 1118~1121.
- [20] 张春来, 邹学勇, 董光荣, 等. 植被对土壤风蚀影响的风洞实验研究[J]. 水土保持学报, 2003, **17**(3): 31~33.
- [21] 移小勇, 赵哈林, 张铜会, 等. 挟沙风对土壤风蚀的影响研究[J]. 水土保持学报, 2005, **19**(3): 58~61.
- [22] 贺山峰, 蒋德明, 阿拉木萨. 植被的防治风蚀作用[J]. 生态学报, 2007, **26**(5): 743~748.
- [23] 裴 欢, 覃志豪. 干旱区绿洲荒漠化演变趋势及成因分析——以吐鲁番绿洲为例[J]. 地理科学, 2012, **32**(4): 506~510.

## Soil Wind Erosion Risk Assessment in Yulin City Using T-S Fuzzy Neural Network Model

LIU Xin-yan<sup>1</sup>, CAO Xiao-yi<sup>1</sup>, DONG Zhi-bao<sup>1,2</sup>

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

**Abstract:** Soil wind erosion, one of the major causes of environmental problems such as farmland degradation and desertification, producing large scale of sandstorm, polluting the environment and harming human beings' health in arid and semi-arid regions, is the detachment, entrainment, transport deposition of soil particles caused by wind. It is also a serious socio-economic issue which limits the development in those ecologically fragile areas. In the previous studies, methods for accessing wind erosion are based on land use information. In this article, however, another approach that uses GIS and T-S fuzzy neural network model to access soil wind erosion risk is presented. The approach is applied to a case study of the Yulin City located on the wind-sand transition regions of Mu Us sandy land, Inner Mongolian plateau and loess plateau, northwest China, where most serious expansion of desertification is proceeding. Environmental elements of soil wind erosion were selected and their spatial distribution data were extracted using GIS technology and T-S fuzzy neural network model was constructed after training the sample data of different wind erosion risk level. The model was applied to mapping wind erosion risk after inputting the extracted data. The entire jobs were based on the software of ArcGIS9.3 and MATLAB. The results show that: Firstly, the comparison of the risk assessment with land use information in Yulin City demonstrates that the result is in conformity with actual conditions. T-S fuzzy neural network model can reveal the relationship between risk of soil wind erosion and its environment effectively, and provide the basis for predicting wind erosion. Secondly, environmental elements such as wind energy, vegetation coverage, temperature, precipitation, topography control the distribution properties of wind erosion risk in Yulin City. Thirdly, there are 4 divisions of wind erosion risk in Yulin City: the severe risk level, the intense risk level, the moderate risk level and the slight risk level, and the area of different risk level are 4 810 km<sup>2</sup>, 5 824 km<sup>2</sup>, 13 239 km<sup>2</sup> and 19 234.88 km<sup>2</sup>. Finally, the distribution of soil wind erosion risk is decreasing gradually from southeast to northeast in Yulin City. Moreover, the assessment of wind erosion risk and its distribution has significant meaning to control desertification and develop economic in wind-sand transition regions.

**Key words:** Yulin City; soil wind erosion; T-S fuzzy neural network model; risk assessment