

半干旱草原潜在土壤风力侵蚀空间格局研究

何京丽, 李锦荣, 邢恩德, 郭建英

(水利部牧区水利科学研究所, 呼和浩特 010020)

摘 要:中国绝大多数的干旱半干旱地区遭受着严重的风力侵蚀。风蚀可导致土壤流失、肥力下降,最终导致土地荒漠化。半干旱草原区的荒漠化问题日益突出,由此带来的沙尘暴等灾害天气增多,给人们的生活带来诸多不便。从影响土壤风力侵蚀的风速、干燥度、植被盖度、地形起伏度、土壤可蚀性以及放牧压力 6 个方面出发,借助 GIS 技术,通过主成分分析研究半干旱草原区达茂旗土壤风力侵蚀的空间分布格局。结果表明:达茂旗潜在土壤风力侵蚀指数由南向北呈高—低—高趋势。达茂旗北部地区土壤风蚀主要受风速、干燥度和植被指数影响;中部地区风力侵蚀主要受地形起伏度的影响,地形起伏对风的消减作用增强,使得风力降低,加之该地区土壤可蚀性和干燥度相对较低,风力侵蚀指数低;南部土壤风力侵蚀主要受放牧压力影响,春季正是牧草返青季节,植被盖度低,且牲畜密度相对较大,放牧对草场的压力大,土壤风力侵蚀严重。风力侵蚀各影响因子的时空异质性是导致半干旱草原风力侵蚀空间异质性的主要原因。干旱草原风力侵蚀空间异质性的主要影响因素是风速、干燥度和植被指数,其次受地形和土壤可蚀性的影响,而放牧压力是半干旱草原区土壤风力侵蚀的主要人为因素之一。

关键词:半干旱草原; 风力侵蚀; 空间格局

中图分类号:S157.1

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2012)05-0012-04

Study on Spatial Pattern of Potential Wind Erosion of Soil in Semi-arid Steppe

HE Jing-li, LI Jin-rong, XING En-de, GUO Jian-ying

(Institutes of Water Resources for Pastoral Area, Hohhot 010020, China)

Abstract: The majority of China in the arid and semi arid regions suffered from invasion of severe erosion. Wind erosion can lead to soil loss and soil fertility decline, ultimately cause the desertification. Semi arid grassland desertification problems have become increasingly prominent, resulting in dust storms and other frequency of weather disasters, and leading to a lot of inconveniences to the production and people's living. Based on the wind speed inducing soil wind erosion, aridity, vegetation index, relief amplitude, soil erodibility and grazing pressure, the spatial distribution pattern of soil wind erosion of semi arid grasslands in Damao County was studied by using GIS technology through principal component analysis. The results showed that the potential of wind erosion index presented high-low-high trend from south to north. In northern Damao, soil erosion was mainly affected by wind speed, aridity and vegetation index; central area of wind erosion was mainly affected by the level of relief amplitude, effect of relief amplitude on wind reduction was enhanced, the wind speed was reduced, and the change in soil erodibility and aridity was relatively low, so wind erosion index was low. Southern soil wind erosion was mainly affected by grazing pressure, spring is the season with low grass and vegetation coverage, and livestock density was relatively large, grazing on pasture pressure, soil wind erosion was very serious. Temporal and spatial heterogeneity of each factor influencing wind erosion was the main reason leading to spatial and temporal heterogeneity wind erosion in semi arid prairie. The main factors influencing spatial heterogeneity of wind erosion in semi arid steppe were wind speed, drought and vegetation index, the next factors were the relief amplitude and soil erodibility, and grazing pressure was one of the main human factors on soil wind erosion in semi arid steppe.

Key words: semi arid steppe; wind erosion; spatial pattern

收稿日期:2012-04-28

修回日期:2012-06-06

资助项目:内蒙古自然科学基金(2010MS0614)

作者简介:何京丽(1960—),女,呼和浩特人,学士,教授级高工,主要研究方向:草地水土保持与生态修复。E-mail:mkshjl@126.com

通信作者:李锦荣(1980—),男,呼和浩特人,博士,工程师,主要研究方向:荒漠化防治。E-mail:lijinrong918@126.com

荒漠化是指包括气候变异和人为活动在内的种种因素造成的干旱、半干旱和湿润地区的土地退化。中国是世界上受荒漠化危害最严重的国家之一,而半干旱草原向荒漠草原过渡地带是荒漠化发展最快的区域。中国土壤风力侵蚀区几乎都落在 400 mm 年降雨量线以内干旱和半干旱地区,而且强度侵蚀、极强度侵蚀和剧烈侵蚀几乎都位于 200 mm 年降雨量线以内^[1]。风是造成土壤风蚀的动力因子,又是塑造地貌的主要营力^[2]。关于土壤风蚀的成因,有三种观点,第一种观点认为由不合理的土地利用导致的;第二种认为由于气候的持续干旱导致土壤旱化所致;第三种观点认为应从降水量减少和植被破坏两个方面进行分析。因此,风蚀研究的出现了以 Chepil^[3]为代表的侵蚀力,认为正是这些气候条件决定着年土壤风蚀水平,提出用一个能代表和反映风蚀气候侵蚀力的风蚀气候因子指数去估算一系列气候条件下的土壤风蚀量,即风蚀气候因子指数^[4],开创了风蚀气候侵蚀力或风蚀气候因子研究之先河。土壤风蚀成因中,对人为因素以及综合因素的研究相对较少。关于风力侵蚀的研究主要围绕风场展开^[5],研究风力侵蚀的空间分布格局与风场的相关关系。风只是风蚀的动力条件,是必要条件,但非充分条件,风力侵蚀还应与以下因素有关:(1)地区的气候条件;(2)下垫面自然状况如植被盖度、土壤水分、土壤质地及地形;(3)人为因素如土地利用强度、放牧、开发建设扰动等都是影响土壤风蚀的重要因素。本文从风力侵蚀的主要影响因素出发,对半干旱草原区土壤侵蚀的空间分布格局进行分析,为半干旱草原区土壤风蚀防治提供参考依据。

1 研究区概况

包头市达尔罕茂明安联合旗(以下简称达茂旗)地处内蒙古自治区中部,阴山北麓的乌兰察布高原,北与蒙古国接壤,东与乌兰察布盟的四子王旗相连,南依阴山山脉与呼和浩特市武川县、包头市固阳县交界,西与巴彦淖尔盟乌拉特中旗为邻,处于干旱草原向荒漠草原过渡地带,土壤风力侵蚀严重。地理坐标为北纬 41°20′—42°47′,东经 109°16′—111°25′,南北纵深 160 km,东西跨度 150 km,全旗地域辽阔,总面积 18 177 km²。该旗地处中温带半干旱大陆性气候区,平均气温 3.4℃,年平均降水量 256 mm。全年主要风向为北风和西北风,7~8 级大风日数为 6~7 d,沙尘暴日数 20~25 d。自然条件恶劣,生态环境脆弱。在长期的自然和人为因素的综合干扰下,土地荒漠化日趋严重,如:风蚀沙化、水土流失、土地盐渍

化、草场退化、土地贫瘠化等。近年来,以干旱为主的自然灾害频繁发生,尤其是沙尘暴发生的频率加快、强度越来越大。据有关统计:1954—2007 年共发生强沙尘暴 272 d,其中发生在 4 月份占到 40.07%,一年中春季(3—5 月)占到 73.90%,是典型的春季型沙尘暴发生区(图 1)。

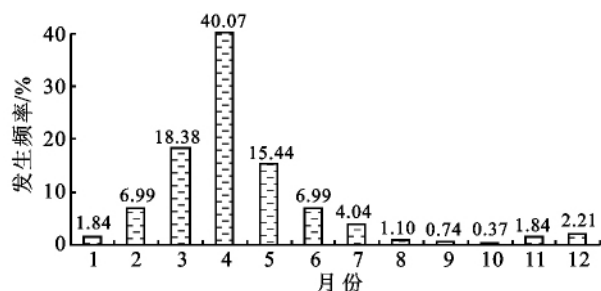


图1 强沙尘暴月变化

强沙尘暴发生 0 d/a 的占到 5.56%, 3 d/a 占到 72.22%, 5 d/a 占到 37.04%, 10 d/a 占到 11.11%, 15 d/a 占到 3.70%。为了有效地控制京津地区的风沙源、改善京津地区的环境质量,保证达茂旗农牧业持续稳定发展,促进全旗人口、资源、环境与经济的进一步协调发展,风蚀研究与防治工作势在必行。

2 研究方法和数据来源

2.1 研究方法

本文从可能造成土壤风力侵蚀的因子出发,研究达茂旗土壤的潜在风蚀强度。对可能导致土壤风力侵蚀的影响因子如风速、干燥度、地表植被盖度、土壤质地和地形等进行主成分分析,建立潜在风力侵蚀指数,研究达茂旗的潜在风力侵蚀空间分布特征,为该地区的风力侵蚀和沙尘暴灾害防治提供依据。

2.2 数据来源

气象数据来源于研究区气象站;牲畜头数来源于达茂旗 2009 年统计年鉴;归一化植被指数数据通过 NASA 网站下载 1 km 分辨率的 MODIS 数据经加工后获得;土壤的属性数据数据来源于国家自然科学基金委员会“中国西部环境与生态科学数据中心”(http://westdc.westgis.ac.cn) 1:100 万土壤数据库;30 m 分辨率的数字高程数据来源于中国科学院计算机网络信息中心国际科学数据镜像网站(http://datamirror.csdb.cn)。

3 土壤潜在风力侵蚀因子分析

3.1 风力空间分布

风是风力侵蚀的主要动力,风力的空间分布,在一定程度上决定着风蚀的空间分布,二者具有较好的

相关性。由前面的分析可以得知,达茂旗的风力侵蚀主要发生在 3—5 月份,以 3—5 月的强沙尘暴发生频率为权重,叠加 3—5 月达茂旗的平均风速,结果见附图 1。风力较大的地区主要分布在北部的满都拉、查干淖尔和巴音塔拉,平均风速为 6.2 m/s。风力以这 3 地为中心,向南呈辐射状减小。

3.2 土壤干燥度空间分布

土壤水分的变化也是影响风力对土壤颗粒搬运的重要因素,降雨量偏少,气温偏高,使得土壤变得干燥,风很易将土壤粉尘带入空气,形成地表风蚀。土壤的干燥度^[6] $D=0.16\sum T\geq 10^{\circ}\text{C}/P$,其中 D 是干燥度, $\sum T\geq 10^{\circ}\text{C}$ 为大于等于 10°C 的积温, P 为降雨量。从干燥度空间分布来看,干燥度最高值分布在北部满都拉,以满都拉为中心辐射分布(附图 2)。

3.3 植被指数空间分布

地表植被覆盖度是影响土壤风力侵蚀的一个重要因素,在冰雪、水域以及植被盖度较高的地区,不易发生风力侵蚀,相反地表裸露,植被稀少的地区,土壤风蚀严重。以每年 3—5 月的植被覆盖度分别构造一个三维向量 f_{spr} ,计算向量的模,用来表示当年春季植被覆盖状况^[7-8]。

$$f_c = \frac{\text{NDVI} - \text{NDVI}_{\min}}{\text{NDVI}_{\max} - \text{NDVI}_{\min}} \quad (1)$$

式中: NDVI_{\max} , NDVI_{\min} ——整个生长季植被 NDVI 的最大值和最小值(年最大 NDVI 可以较好地反映该年度植被长势最好季节地表的植被覆盖程度),本文根据植被覆盖类型从多年 NDVI 值中求得 $\text{NDVI}_{\max}=203$, $\text{NDVI}_{\min}=42$ 。

$$f_{spr}(i) = \begin{bmatrix} f_{i3} \\ f_{i4} \\ f_{i5} \end{bmatrix}, \|f_{spr}(i)\| = \sqrt{f_{i3}^2 + f_{i4}^2 + f_{i5}^2} \quad (2)$$

式中: i ——年; f_{ij} —— i 年 j 月的植被盖度,向量的模表示季节的植被盖度特征。

植被指数的空间分布,整体呈由北向南逐渐递减的趋势, ≤ 0.15 、 $0.15 \sim 0.25$ 、 ≥ 0.25 三部分各占面积的 1/3(附图 3)。植被指数北部满都拉、巴音塔拉以及查干淖尔大部的植被指数小于 0.15;中部红旗牧场、巴音珠日和、巴音敖包去全部以及都荣敖包和查干敖包的北部,植被指数为 0.15~0.25;南部靠东的额尔登敖包、大苏吉、坤兑滩、宝石、希拉穆仁植被指数处于 0.35~0.45,希拉穆仁部分地区植被指数大于 0.45;其余处于 0.25~0.35。

3.4 地形起伏度空间分布

地表粗糙度是衡量地表侵蚀程度的重要量化指

标,在实际应用中用地形起伏度表示。地形起伏度也称为地势起伏度^[9-10],反映地表起伏变化。地形起伏主要通过对气流的扰动极大地影响着土壤风蚀特征^[11]。常用某一确定面积内最高点和最低点海拔高度之差来表示。地形起伏度的计算关键在于统计单元的选择,也就是定义所指的某一确定面积的值。随着统计单元半径的增大,地形起伏度的值也随之增大,但增到一定程度即趋于稳定。本文利用 30 m 分辨率的 DEM 数据,从 3×3 分析窗口开始提取 H_{\max} 和 H_{\min} ,尝试增大分析半径,直到 6×6 分析窗口以后,地形起伏度趋于稳定 $H = H_{\max} - H_{\min}$,数据单元格大小 30 m \times 30 m,面积达到约 32 400 m²,因此本文选择以 6×6 分析窗口的为最佳统计单元,计算地表起伏度(附图 4)。

3.5 土壤可蚀性空间分布

1930 年, Middleton 在对水蚀的研究中最先提出土壤可蚀性的概念,并提出了评估土壤可蚀性的两个重要指标^[12-13]。随后土壤可蚀性被引入到风蚀研究中,1942 年 Chepil 提出了土壤风蚀度(Soil erodibility by wind)的概念,用来反映土壤遭受风蚀的脆弱性程度^[14]。Fryear 提出了土壤风蚀度的计算方法,在 RWEQ 模型中称之为土壤可蚀性^[15-16]。

$$\text{EF} = (29.9 + 0.31\text{SAND} + 0.17\text{SILT} + 0.33\text{SAND/CLAY} - 4.66\text{OC} - 0.95\text{CaCO}_3)/100 \quad (3)$$

式中: SAND——砂粒(0.1~2 mm)含量(%); SILT——粉粒(0.002~0.1 mm)含量(%); CLAY——黏粒(<0.002 mm)含量(%); OC——有机物的含量(%); CaCO_3 ——碳酸钙的含量(%)。

只要知道土壤有机碳和土壤的颗粒分析资料,即可计算土壤的 K 值。1:100 万土壤分类图数据库中提供 T_OC 有机物的含量、T_CaCO₃ 含量以及土壤的颗粒含量,由于其中 T_SAND 砂粒(0.062 5~2 mm),黏粒 T_CLAY(<0.002 mm)和粉粒 T_SILT(0.002~0.062 5 mm)的分类标准不一致,因此需要利用三次样条插值法求得 0.1 mm 处的值,利用上式就可计算 EF 值^[17]。土壤可蚀性值在巴音珠日和南部、查干哈达东部两处最大,达茂旗北部和南部的土壤可蚀性处在 3.5~3.8 这一水平,中部的土壤可蚀性最低 ≤ 0.35 (附图 5)。

3.6 放牧压力空间分布

我国北方地区荒漠化问题十分突出,究其实质,主要是一种人类对土地资源掠夺性利用而诱发的土地退化过程。包头市达茂旗生态环境十分脆弱,降水少且不稳定,日益受到超过土地承载力强度利用的严

重影响。因持续过度放牧,盲目开荒,滥伐树木而引起的草地荒漠化面积仍在扩大。草地荒漠化的结果使下垫面的一些属性发生了深刻变化,而这些变化也在一定程度上表征了荒漠化的发展程度。本文从放牧压力出发,研究牲畜践踏对土壤破坏后引起的土壤风蚀。用单位面积的牲畜头数(头/km²)作为指标,研究达茂旗各乡镇牲畜对环境的压力。牲畜头数数据从达茂旗统计年鉴获得,后输入数据库,通过GIS手段将牲畜密度格网化,得到达茂旗放牧压力空间分布图(附图6)。放牧压力较大的地区主要分布在南部的各乡村和苏木。

利用主成分分析方法对风力强度、土壤干燥度、植被指数、地形起伏度、土壤可蚀性因子和放牧压力6个指标分析驱动土壤风力侵蚀的潜在因子。由于各指标的数据量纲不统一,在进行主成分分析前,利用公式(4)对数据进行标准化处理:

$$y_i = \frac{x_i - \bar{x}}{s} \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (4)$$

式中: $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$; $s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$

对标准化后的数据建立变量的相关系数矩阵 $R = (r_{ij})_{pp}$ 。根据相关系数矩阵计算特征根和特征向量。

$$\alpha_1 = \begin{bmatrix} \delta_{11} \\ \delta_{12} \\ \vdots \\ \delta_{p1} \end{bmatrix}, \quad \alpha_2 = \begin{bmatrix} \delta_{12} \\ \delta_{22} \\ \vdots \\ \delta_{p2} \end{bmatrix}, \quad \alpha_p = \begin{bmatrix} \delta_{1p} \\ \delta_{2p} \\ \vdots \\ \delta_{pp} \end{bmatrix} \quad (5)$$

将特征向量做线性组合,如公式(6)所示:

$$F_i = \alpha_{1i} Y_1 + \alpha_{2i} Y_2 + \dots + \alpha_{pi} Y_p \quad (i=1, 2, \dots, p) \quad (6)$$

输出 m 个主成分后,依据公式(5)进行综合指数的计算:

$$Y = \alpha_1 Y_1 + \alpha_2 Y_2 + \dots + \alpha_m Y_m \quad (7)$$

式中: Y_i ——第 i 个主成分; α_i ——第 i 个特征向量, α_i 计算方法如公式(8)所示:

$$\alpha_i = \lambda_i / \sum_{i=1}^m \lambda_i \quad (8)$$

通过主成分分析,发现4个主成分的累积贡献率达到89.5%,第一主成分贡献率达到42.2%,第一主成分的风速因子(-0.49)、干燥度因子(-0.57)和植被盖度因子(0.55)系数较大,是影响风力侵蚀的主要因子;第二主成分贡献率17.0%,土壤可蚀性因子系数最大(-0.92),是土壤内在性质因子,可称为土壤可蚀性因子;第三主成分贡献率15.5%,地形起伏度因子系数最大(0.69),是地形因子;第四主成分贡献

率14.8%,放牧压力因子系数最大(0.70),是放牧因子。将4个主成分按照公式(7)计算,得到土壤风蚀的潜在风力侵蚀指数分布图(附图7)。

风力侵蚀指数 ≤ 7.4 的地区主要分布在到达茂旗中部,约占达茂旗面积的12.99%,该地区干燥度、土壤可蚀性、放牧压力相对较小,植被指数、地形起伏较大,虽风速相对较大,但地形和植被对风起到消减作用。达茂旗北部地区潜在土壤风力侵蚀较大,主要是因为北部风力较大、地表干燥度大、植被指数低且地势平坦,有利于风力侵蚀的发生。巴音珠日和南部、查干哈达东部潜在土壤风力侵蚀指数 > 9.4 ,主要是因为该地区的土壤可蚀性比较高。达茂旗南部的乌兰忽洞、乌克忽洞、坤兑滩、大苏吉、宝石乡、小公文和希拉穆仁大部风速、干燥度相对较低、植被盖度较高,但潜在风力侵蚀指数在9.4~10.4,达尔罕茂明安联合旗的旗政府所在地潜在风力侵蚀指数 > 10.4 ,这些地区土壤风力侵蚀主要受放牧压力指数影响。

4 结论

通过GIS技术结合影响土壤风力侵蚀的因子对达茂旗土壤风力侵蚀空间格局进行分析,从宏观上建立影响风力侵蚀的主要因子。

(1) 风速、干燥度和植被盖度是影响土壤风力侵蚀空间格局的最主要因子,贡献率达到42.2%。土壤可蚀性、地形起伏度、放牧压力贡献率分别为17%、15%、14.8%。

(2) 风力侵蚀因子在空间上和时间上的叠加是造成达茂旗土壤风力侵蚀指数空间分布差异的主要原因。达茂旗的土壤风力侵蚀空间分布由南向北,呈现高一低一高趋势,且北部风力侵蚀指数最高,其次是南部,中部最低。

(3) 达茂旗北部土壤风蚀主要受风速、干燥度和植被盖度因素影响,3—5月在一年中风速最大且植被盖度小,而此时正值地表最为干燥的时期,使有效风力(即能够引起土粒运动的风)相对增大,加剧了土壤风蚀^[18];南部土壤风力侵蚀主要受放牧压力影响,南部相对北部植被盖度虽高,但春季正是牧草返青季节,南部牲畜密度相对较大,放牧对草场的压力大,土壤风力侵蚀严重;中部地区风力侵蚀主要受地形起伏度的影响,该地区地形起伏对风的消减作用增强,使得风力降低,加之该地区土壤可蚀性和干燥度相对其他地方较低,且植被盖度处于中等水平,各种影响因子在空间上的叠加使得该地区土壤风力侵蚀指数最低。

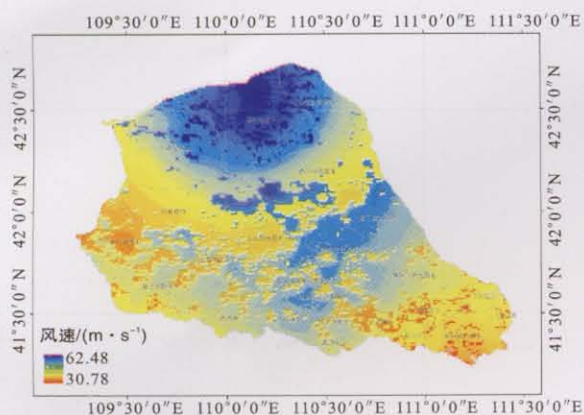
(下转第22页)

- [12] 刘国彬,蒋定生,朱显谟.黄土区草地根系生物力学特性研究[J].土壤侵蚀与水土保持学报,1996,10(3):97-104.
- [13] 张娜,梁一民.黄土丘陵区天然草地地下/地上生物量的研究[J].草业学报,2002,11(2):72-78.
- [14] 朱元龙,王桑,林永刚,等.黄土高原丘陵区柠条根系生长发育特性研究[J].水土保持通报,2011,31(2):232-237.
- [15] 李鹏,李占斌,澹台湛.黄土高原退耕草地植被根系动态分布特征[J].应用生态学报,2005,16(5):849-853.
- [16] 史建伟,王孟本,陈建文,等.柠条细根的空间分布特征及其季节动态[J].生态学报,2011,32(3):726-733.
- [17] 李鹏,李占斌,郝明德,等.黄土高原天然草地根系主要参数的分布特征[J].水土保持研究,2003,10(3):144-149.
- [18] 武春华,陈云明,王国梁,等.黄土丘陵区典型植物群落根系垂直分布与环境因子的关系[J].中国水土保持科学,2008,6(3):65-70.
- [19] 韦兰英,上官周平.黄土高原不同演替阶段草地植被细根垂直分布特征与土壤环境的关系[J].生态学报,2006,26(11):3740-3748.
- [20] 白文娟,焦菊英,张振国.安塞黄土丘陵沟壑区退耕地的土壤种子库特征[J].中国水土保持科学,2007,5(2):65-72.
- [21] 李代琼,姜峻,梁一民,等.安塞黄土丘陵区人工草地水分有效利用研究[J].水土保持研究,1996,3(2):66-74.
- [22] 王军,傅伯杰,邱扬,等.黄土高原小流域土壤养分的空间异质性[J].生态学报,2002,22(8):1173-1178.
- [23] Angela Hodge, Graziella Berta, Claude Doussan. Plant root growth, architecture and function[J]. Plant Soil, 2009,321(1/2):153-187.
- [24] 南京农业大学.土壤农化分析[M].北京:农业出版社,1986.
- [25] 中国土壤学会农业化学专业委员会.土壤农业化学常规分析方法[M].北京:科学出版社,1984.
- [26] 韦兰英,上官周平.黄土高原白羊草、沙棘和辽东栎细根比根长特性[J].生态学报,2006,26(12):4164-4169.
- [27] 陈文庆,李鹏,张良恩.林木细根分布规律与土壤水分响应关系研究[J].水土保持研究,2009,16(6):92-96.
- [28] 李勇,朱显谟,田积莹.黄土高原植物根系提高土壤抗冲性的有效性[J].科学通报,1991,36(12):935-938.
- [30] 鄢燕,张建国,张锦华,等.西藏那曲地区高寒草地地下生物量[J].生态学报,2005,25(11):2818-2823.
- [29] Vogt K A, Vogt D J, Moone E E, et al. Estimating Douglas-fir fine root biomass and production from living bark and starch[J]. Can. J. For. Res., 1985,15(1):177-179.
- [30] 英慧,殷有,于立忠,等.土壤水分、养分对树木细根生长动态及周转影响研究进展[J].西北林学院学报,2010,25(3):36-42.

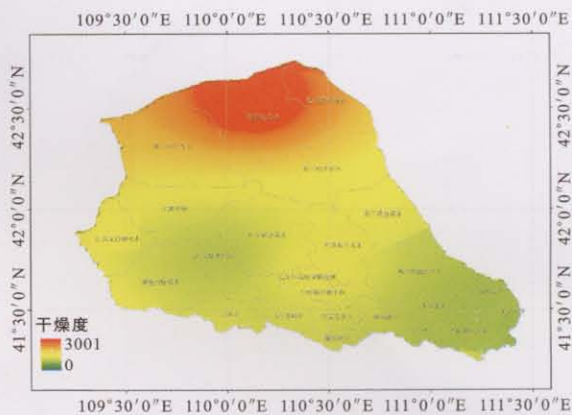
(上接第 15 页)

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,2001,56(2):146-158.
- [2] 赵焕勋,王学东.内蒙古土壤侵蚀灾害研究[J].干旱区资源与环境,1994,8(4):35-42.
- [3] Chapil W S, Hiddoway F H, Armbrust D V. Climatic factor estimating wind erodibility fields[J]. Journal of Soil and Water Conservation,1962,17(4):162-165.
- [4] 董玉祥,康国定.中国干旱半干旱地区风蚀气候侵蚀力的计算与分析[J].水土保持学报,1994,8(3):1-7.
- [5] 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,2002,57(1):1-10.
- [6] 孟猛,倪健,张治国.地理生态学的干燥度指数及其应用评述[J].植物生态学报,2004,28(6):853-861.
- [7] 范一大.沙尘灾害遥感监测模式及其形成机制研究:以中国北方沙尘暴灾害形成过程为例[D].北京:北京师范大学,2003.
- [8] 马月存,陈源泉,隋鹏一,等.土壤风蚀影响因子与防治技术[J].生态学报,2006,25(11):1390-139.
- [9] 涂汉明,刘振东.中国地势起伏度研究[J].测绘学报,1991,20(4):311-319.
- [10] 唐飞,陈曦,程维明,等.基于 DEM 的准噶尔盆地及其西北山区地势起伏度研究[J].干旱区地理,2006,29(3):388-392.
- [11] Middleton H E. Properties of soils which influence soil erosion[J]. USDSA Technical Bulletin, 1930, 173: 1-16.
- [12] 宋阳,刘连友,严平,等.土壤可蚀性研究述评[J].干旱区地理,2006,29(1):124-131.
- [13] Chapil W S. Measurement of wind erosiveness of soils by dry sieving procedure[J]. Sci. Agr., 1942,23:154-160.
- [14] Fryrear D W, Krammes C A. 土壤风蚀度的综合计算[J].水土保持科技情报,1995(2):38-41.
- [15] 殷海军. RWEQ 模型的改进及其在风沙区的应用研究[D].北京:中国农业大学,2010.
- [16] 蔡永明,张科利,李双才.不同粒径制间土壤质地资料的转换问题研究[J].土壤学报,2003,40(4):511-517.
- [17] 李玉宝.干旱半干旱区土壤风蚀评价方法[J].干旱区资源与环境,2000,14(2):48-52.
- [18] 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,1999,6(4):75-79.



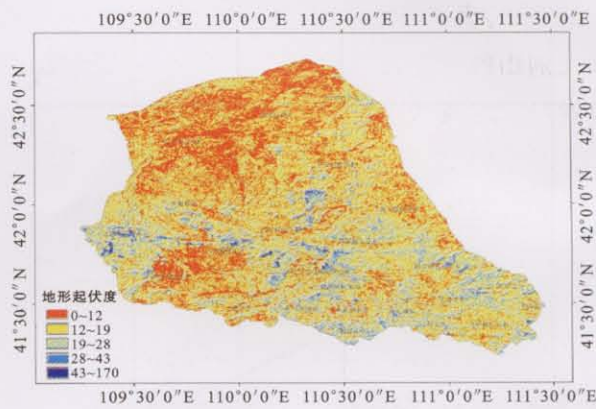
附图1 内蒙古达尔罕茂明安联合旗的风速空间分布



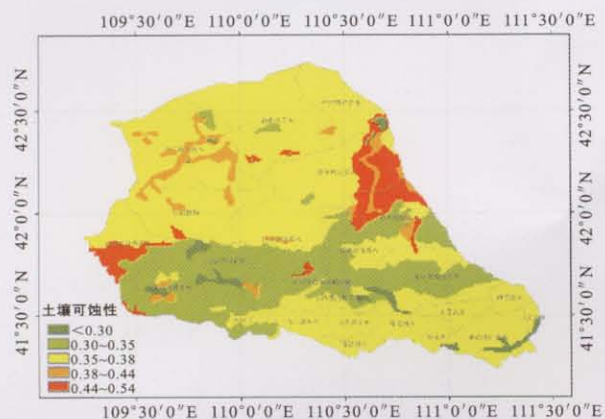
附图2 内蒙古达尔罕茂明安联合旗的干燥度空间分布



附图3 内蒙古达尔罕茂明安联合旗的植被指数空间分布



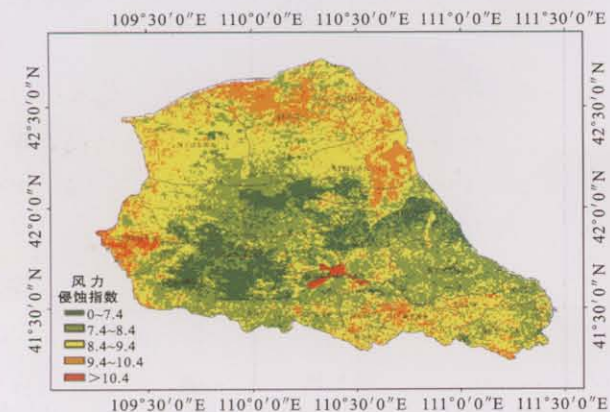
附图4 内蒙古达尔罕茂明安联合旗的地形起伏度空间分布



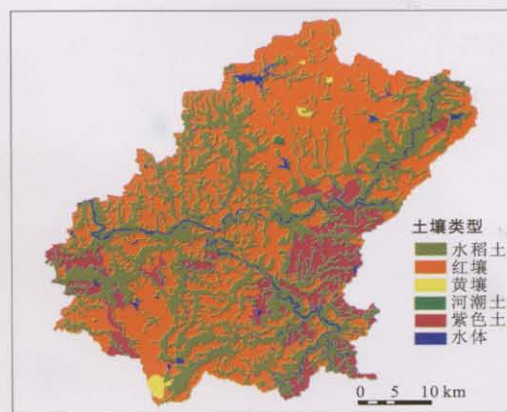
附图5 内蒙古达尔罕茂明安联合旗的土壤可蚀性空间分布



附图6 内蒙古达尔罕茂明安联合旗的放牧压力指数空间分布



附图7 内蒙古达尔罕茂明安联合旗的土壤风力侵蚀指数空间分布



附图8 湖南省醴陵市土壤类型分布