

# 基于 RWEQ 模型的浑善达克沙漠化防治生态功能区 土壤风蚀与主要影响因子分析

申 陆<sup>1,2</sup>, 田美荣<sup>1</sup>, 高吉喜<sup>1</sup>

(1. 环境保护部 南京环境科学研究所, 南京 210042; 2. 河北师范大学 资源与环境科学学院, 石家庄 050016)

**摘 要:**浑善达克沙漠化防治生态功能区地处生态环境脆弱的东亚夏季风北缘,是我国北方生态屏障的重要组成部分,土壤风蚀是该地区面临的主要生态环境问题,决定了整个区域的生态安全程度。为更好地阐明浑善达克沙漠化防治生态功能区地区土壤侵蚀情况,利用 RWEQ(Revised Wind Erosion Equation)模型定量分析了近 10 年来浑善达克沙漠化防治生态功能区土壤侵蚀强度时空变化特征,并通过地理信息再编码叠加分析技术剖析了强烈土壤风蚀区的主要影响因素。结果显示,研究期间研究区土壤风蚀强度特征空间分布变化较大,受到植被覆盖度、气候条件、土壤特性、地形等因素共同影响,强烈侵蚀区域向西北地区移动,土壤侵蚀程度向恶劣化发展。

**关键词:**修正风蚀方程模型; 土壤风蚀; 时空变化; 因素分析

中图分类号:K903

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2016)06-0090-08

## Analysis on Wind Erosion and Main Factors in Desertification Control Ecological Function Area of Hunshandake Using the Revised Wind Erosion Equation Model

SHEN Lu<sup>1,2</sup>, TIAN Meirong<sup>1</sup>, GAO Jixi<sup>1</sup>

(1. Nanjing Institute of Environmental Science, Ministry of Environmental Protection,  
Nanjing 210042, China; 2. Hebei Normal University, Shijiazhuang 050016, China)

**Abstract:** Desertification control ecological function area of Hunshandake is fragile and an important part of ecological barrier in north China, which is located in the northern margin of the east Asian summer monsoon region. Wind erosion is one of the major ecological environmental problems faced by the Hunshandake region, and determines the degree of regional ecological security. In order to better clarify the situation of soil erosion in the region, we quantitatively analyzed spatial and temporal variation characteristics of soil erosion intensity in the past decade in desertification control ecological function area of Hunshandake region by RWEQ (Revised Wind Erosion Equation) model and analyzed the main influence factors of strong wind erosion area by the recoding superposition analysis technology of geographic information. The results show that the different of spatial distribution of wind erosion intensity in desertification control ecological function area of Hunshandake during the study period is obvious, indicating that the strong erosion area moves north-west and the soil erosion degree becomes more serious, all of these are jointly influenced by various factors such as vegetation coverage, climate condition, soil characteristics and terrain.

**Keywords:** RWEQ model; soil erosion; dynamic change; factor analysis

浑善达克沙漠化防治生态功能区地处生态环境脆弱的东亚夏季风北缘<sup>[1]</sup>,是我国重点生态功能区之一<sup>[2]</sup>,是北方生态屏障的重要组成部分<sup>[3]</sup>,是“京津冀”风沙源治理工程的重点区域,由于其地处北方农牧交错带<sup>[4]</sup>,气候条件恶劣,生态系统十分脆弱<sup>[5]</sup>,国家投入大量的人力、物力、财力对其进行沙漠化防治。

我国学者对该研究区也进行了诸多调查研究,例如:王牧兰等<sup>[6]</sup>利用 GIS 方法对浑善达克沙地景观格局变化进行了研究,康相武等<sup>[7]</sup>以及敖艳红等<sup>[8]</sup>通过对遥感影像的解译分析了 20 世纪末和 21 世纪初浑善达克沙地土地沙漠化时空演变规律,李春兰等<sup>[9]</sup>通过高程数据对浑善达克沙地典型区正镶白旗的荒漠化

收稿日期:2015-11-07

修回日期:2016-01-08

资助项目:国家环境保护公益性行业科研专项(201409055);中央级公益性科研院所基本科研业务专项资金

第一作者:申陆(1989—),男,河北省邯郸市人,硕士研究生,生态演变、环境影响评估与规划研究方向。E-mail:mist\_mail@foxmail.com

通信作者:田美荣(1981—),女,内蒙古鄂尔多斯人,副研究员,博士,主要从事区域生态与恢复等方面的研究工作。E-mail:tianmeirong007@163.com

特征进行了分析,孟庆华<sup>[10]</sup>利用生态足迹分析方法,对浑善达克沙漠化防治生态功能区的5个旗(县)的生态效率进行了计算与分析。诸多的土壤风蚀分析发现,有效的土壤侵蚀时空变化分析和主要影响因素分析是区域防风治沙的前提,可以指引生态治理工程针对性的投入。

土壤风蚀模型是土壤侵蚀分析的重要技术手段,英国科学家 R. A. Bagnold 提出的输沙率方程<sup>[11]</sup>是最早的风蚀模型。随着地理信息系统、遥感与模型模拟等技术的发展与综合应用,基于统计和经验的的风蚀模型研究也随之发展<sup>[12]</sup>,相继提出了通用风蚀方程 WEQ<sup>[13]</sup>、基于风速廓线发育的德克萨斯侵蚀分析模型 TEAM<sup>[14]</sup>、原苏联涉及人类活动因素的 Bocharov 模型<sup>[15]</sup>、修正风蚀方程模型 RWEQ<sup>[16-17]</sup>以及以过程为基础的风蚀预报系统 WEPS<sup>[18]</sup>等主要风蚀模型。

众多模型中,RWEQ 模型充分考虑气候条件因素、植被覆盖状况、土壤可蚀性因素、土壤结皮因素、地表粗糙度等因素,具有因子覆盖全面,构成相对简单,数据易于获取等优势。经验证,通过参数的修正和公式调整可以应用到我国北方草地风蚀评估中,张国平等<sup>[19]</sup>应用 RWEQ 模型计算了全国风场强度指数,进而分析了风蚀景观变化;殷海军<sup>[20]</sup>基于样地试验对 RWEQ 进行了修正;巩国丽等<sup>[21]</sup>应用 RWEQ 模型分析了锡林郭勒盟防风固沙服务功能的时空变化趋势;江凌等<sup>[22]</sup>应用 RWEQ 模型对青海省年均风蚀模数进行了估算,并结合张登山等<sup>[23]</sup>在青海共和盆地以<sup>137</sup>Cs 推算算法计算的风蚀成果进行了对比,具有较高的拟合性,表明 RWEQ 模型在我国区域运用上具有一定可行性。

本文应用修正风蚀方程模型(RWEQ 模型),估算 2000 年和 2010 年浑善达克沙漠化防治生态功能区土壤风蚀强度变化特征,并通过地理信息再编码技术分析了该地区强烈土壤风蚀区的主要影响因素。为实现生态治理提供针对性方案,提高生态修复效率,也为当地生态恢复与持续发展提供理论依据。

## 1 研究区概况

浑善达克沙漠化防治生态功能区位于内蒙古高原东部,阴山北麓,东西长约 600 km,南北宽约 530 km,地势东南高西北低,东北部多河流,总面积约为 16.8 万 km<sup>2</sup>。跨越我国河北省与内蒙古自治区,行政区包括内蒙古 8 旗 1 县(克什克腾旗、阿巴嘎旗、苏尼特左旗、苏尼特右旗、太仆寺旗、镶黄旗、正镶白旗、正蓝旗、多伦县)与河北省 6 县(丰宁满族自治县、围场满族蒙古族自治县、张北县、康保县、沽源县、尚义

县)。浑善达克沙漠化防治生态功能区地处生态环境脆弱的东亚夏季风北缘,属于中纬度半干旱、干旱大陆性季风气候区,功能区由东南边缘的半湿润地区经半干旱地区进入西部的干旱气候区。热量和蒸发量由西北向东南递减。冬季漫长寒冷,夏季短促温热少雨,降水主要集中在 7、8、9 月份,约占全年降雨量的 80%~90%,降水季节分配不均,年变化率大。主要灾害性天气有干旱、冰雹、寒流、大风及沙尘暴<sup>[24]</sup>。沙漠化是浑善达克沙地面临的主要环境问题<sup>[25]</sup>。

## 2 研究方法 with 数据来源

在充分考虑气候条件、植被覆盖状况、土壤可蚀性、土壤结皮、地表粗糙度等要素情况下,RWEQ 模型采用下列公式评估土壤风蚀量:潜在风蚀量:

$$SL = \frac{2z}{S^2} Q_{\max} \cdot e^{-(z/s)^2}$$

$$S = 150.71 \times (WF \times EF \times SCF \times K' \times C)^{-0.3711}$$

$$Q_{\max} = 109.8 \times [WF \times EF \times SCF \times K' \times C]$$

式中:SL 表示计算风蚀量(kg/m<sup>2</sup>);S 表示潜在区域侵蚀系数; $Q_{\max}$  表示潜在风蚀最大转移量(kg/m);C 表示植被覆盖度。

(1) WF:气象因子;

$$WF = WE \times \frac{\rho}{g} \times SW \times SD$$

$$WE = u_2 \times (u_2 - u_1)^2 \times N_d$$

$$SW = \frac{ET_p - (R + I)(R_d/N_d)}{ET_p}$$

式中:WF 表示气象因子;WE 表示风场强度因子; $\rho$  表示空气密度(kg/m<sup>3</sup>);g 表示重力加速度(m/s<sup>2</sup>);SW 表示土壤湿度因子;SD 表示雪盖因子(无积雪覆盖天数/研究总天数),定义雪盖深度小于 25.4 mm 为无积雪覆盖<sup>[26]</sup>;u<sub>2</sub> 表示监测风速(m/s);u<sub>1</sub> 表示起沙风速(m/s);N<sub>d</sub> 表示计算周期天数;R 表示平均降水量;I 表示灌溉量(本文取 0)。对原修正风蚀方程模型(RWEQ 模型)进行了修正,起沙风速数据参考已有学者的起砂风速数据代替原模型假设起沙风速(5 m/s);模型气候风蚀因子中潜在蒸发量的计算采用了更适合我国的北方辐射估算法(MK 方法)<sup>[27-28,29]</sup>。

$$ET_p = 0.7 \times \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \times \frac{R_s}{\lambda}$$

$$\gamma = \frac{1.013 \times 10^{-3} \times \rho}{0.622 \times \lambda}$$

$$\rho = 101 \times \left[ \frac{293 - 0.0065h}{293} \right]^{5.26}$$

$$\Delta = \frac{4096 \times [0.6108 \times \exp(\frac{17.27 \times T}{T + 273.3})]}{(T + 273.3)^2}$$

式中: $R_s$  表示太阳辐射 $[MJ/(m^2 \cdot d)]$ ;  $\Delta$  表示饱和水汽压与气温曲线的斜率 $(kPa/^\circ C)$ ;  $\gamma$  表示干湿表常数;  $\lambda$  表示蒸发的潜热系数;  $P$  表示大气压 $(kPa)$ ;  $T$  表示平均气温 $(^\circ C)$ ;  $h$  表示海拔高度 $(m)$ 。

气象数据来源于中国气象科学数据共享服务网(<http://cdc.cma.gov.cn>)提供的 2000 年、2010 年国家台站数据。月平均风速、月平均降水、月平均温度、月平均日照时数通过计算获得,并应用地理分析软件 ArcGIS 进行 Natural Neighbor 插值方法进行插值。雪盖因子利用中国西部环境与生态科学数据中心(<http://westdc.westgis.ac.cn>)提供的中国雪深长时间序列数据集<sup>[30-31]</sup>进行计算,该数据集提供了 1978—2010 年的积雪厚度分布数据,时间分辨率为日,空间分辨率为 25 km。起沙风速数据参考文献<sup>[32-33,34,35]</sup>数据。

(2) EF:土壤可蚀性因子;

$$EF = \frac{29.09 + 0.311sa + 0.17si + 0.33(sa/cl) - 2.59OM - 0.95CC}{100}$$
式中:EF 表示土壤可蚀因子;sa 表示土壤粗砂含量;si 表示土壤粉砂含量;cl 表示土壤黏粒含量;OM 表示有机质含量;CC 表示土壤中碳酸钙含量。

(3) SCF:土壤结皮因子;

$$SCF = \frac{1}{1 + 0.0066(cl)^2 + 0.021(OM)^2}$$
式中:SCF 表示土壤结皮因子;cl 表示土壤黏粒含量;OM 表示有机质含量。

土壤颗粒含量和有机质含量数据土壤数据来源于中国西部环境与生态科学数据中心(<http://westdc.westgis.ac.cn>)提供的 1:100 万土壤图以及所附的土壤属性表<sup>[36]</sup>。

(4)  $K'$ :地表粗糙度因子;

$$K' = \cos\alpha$$
式中: $\alpha$  表示地形坡度,根据中国 10 km 地形图利用 ArcGIS 软件 Slope 工具实现。

### 3 结果与分析

#### 3.1 土壤风蚀主要影响因子分析

3.1.1 植被盖度变化分析 植被覆盖是抑制土壤风蚀和起沙的重要因素之一,是影响土壤风蚀的最敏感的自然因素之一。植被覆盖可通过多种途径对地表土壤形成保护以减少风蚀输沙量,与此同时植被覆盖程度还影响着土壤结皮的理化特性<sup>[37]</sup>,一些学者认为风蚀率随植被盖度的减少呈指数增加<sup>[38]</sup>,所以植被盖度是决定区域发生风蚀危害程度的主要决定

因素之一。在一定程度上说,干旱半干旱地区的生态环境问题可看成地表覆盖模式的变化问题。本文通过分析浑善达克沙漠化防治生态功能区 2000 年、2010 年的年均植被覆盖度数据以及变化率数据,分析植被盖对功能区土壤风蚀特征的影响。

由表 1 数据分析可知,浑善达克沙漠化防治生态功能区植被覆盖率普遍较低,年均植被覆盖度小于 30% 的范围占到防风固沙功能区的 85% 以上(2000 年 89.83%,2010 年 86.84%),且功能区年均植被覆盖率有向 0.1~0.2 区间发展趋势。虽然研究期间植被覆盖率大于 30% 的面积在增加,但其面积占功能区面积比重太小。

表 1 年均植被覆盖度分级与变化率

年均盖度/%	2000 年/ 10 <sup>4</sup> km <sup>2</sup>	2010 年/ 10 <sup>4</sup> km <sup>2</sup>	2000—2010 年 变化率/%
<10	7.655	6.899	-9.887
10~20	5.793	6.122	5.674
20~30	3.174	3.050	-3.899
30~50	1.675	2.138	27.609
≥	0.208	0.297	43.104

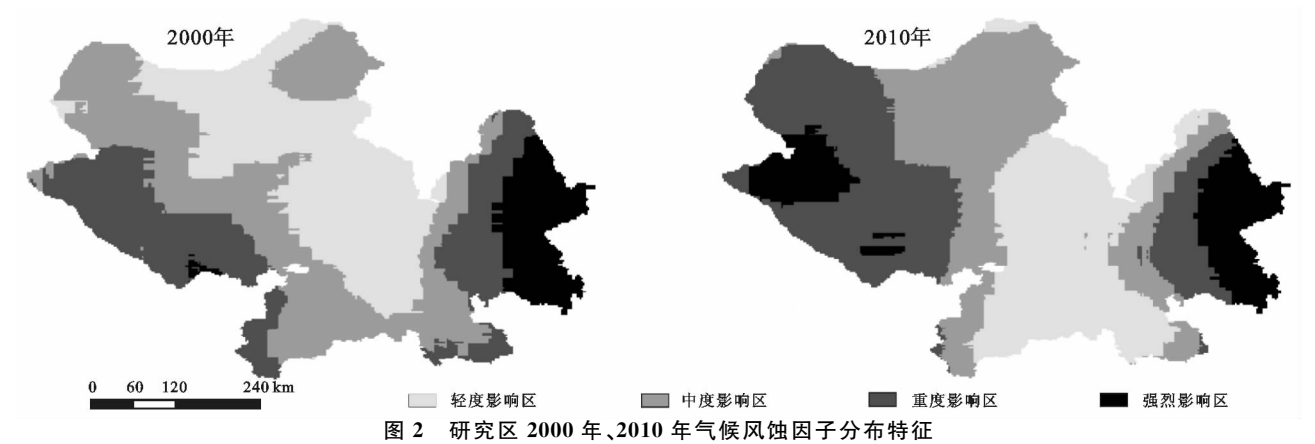
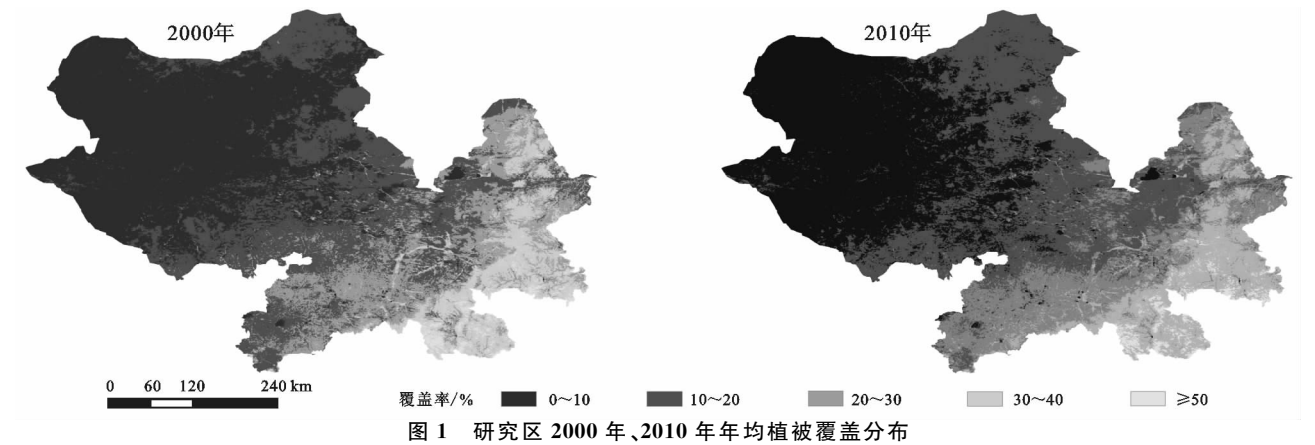
对功能区植被覆盖度分布作图(图 1)分析,可以看出浑善达克沙漠化防治生态功能区植被覆盖度由东南向西北逐渐降低,具有较明显的分级递减特征,中部与西北地区植被覆盖度严重偏低,年均植被覆盖度小于 20%,土壤风蚀情况较为严重。从行政区上看,植被覆盖度较低的地区主要分布在苏尼特右旗和苏尼特左旗。中部地区受到浑善达克沙地的影响,植被盖度普遍偏低并延伸到东北部地区。东南部地区植被盖度情况较好,从行政区域看主要集中在丰宁满族自治县和围场满族蒙古族自治县。且从图中研究期间年均植被覆盖度对比可以发现,功能区植被盖度空间变化较小,北部边缘(即阿巴嘎旗北部)植被覆盖度有所提升。

3.1.2 气候因子分析 RWEQ 模型分析中可见,气候因子是影响土壤风蚀强度的主要因素之一。浑善达克沙地防风固沙功能区地处中纬度属半干旱、干旱大陆性季风气候区,气候条件较为恶劣,生态系统十分脆弱。浑善达克沙漠化过程是以气候为主导的自然过程<sup>[39]</sup>。风场强度从物理动力学角度影响风沙的起降,风和沙尘暴是沙漠化的动力<sup>[40]</sup>;同时降水、辐射量、蒸发量等因素直接影响着土壤湿度,土壤湿度影响土壤颗粒间的粘着性,也对沙尘的起降具有影响。

根据 RWEQ 模型的气候因子分析绘制功能区气候风蚀因子特征图(图 2)。由图可见,气候影响因

素强度年际空间分布变化较大。总体来看功能区西南部(苏尼特右旗、苏尼特左旗南部)和东部边缘(克

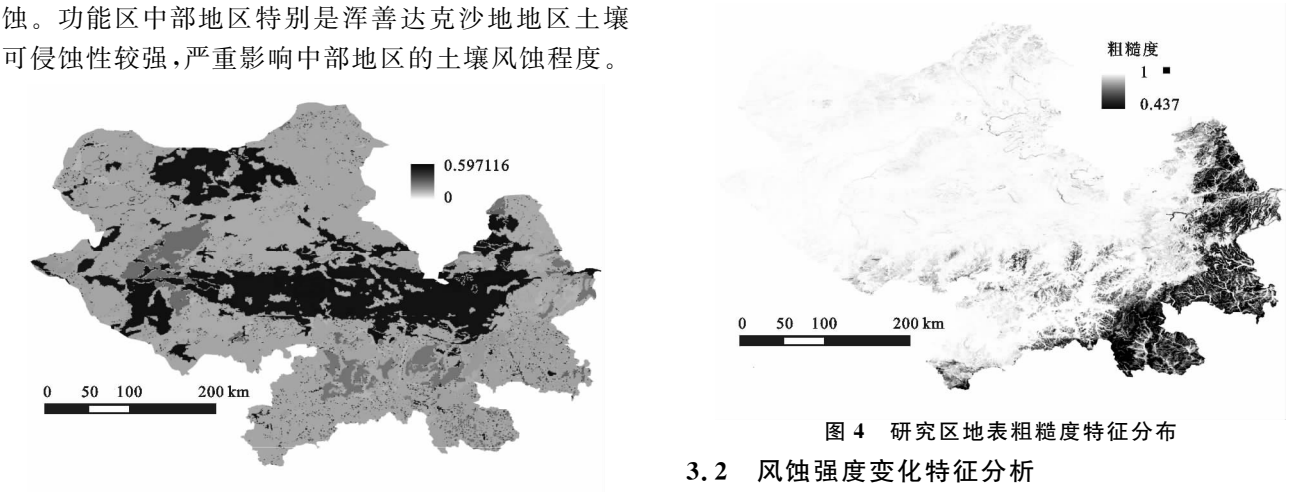
什克腾旗东部、围场满族蒙古族自治县东部)受到气候风蚀因子影响较为强烈。



3.1.3 土壤特性分析 影响土壤风蚀的土壤特性包括土壤的可蚀性和土壤结皮性,土壤可蚀性是表征土壤性质对侵蚀敏感程度的指标,是进行土壤侵蚀和水土流失定量评价的重要依据<sup>[41]</sup>;土壤结皮性受到土壤含水量、温度、水分条件、生物影响、气候干扰等因素影响<sup>[42]</sup>。依据 RWEQ 模型,结合土壤可蚀性和土壤结皮性因子,绘制浑善达克沙漠化防治生态功能区土壤特性分布图(图 3),由图分布可见,功能区中部和西北部土壤特性较为脆弱较强,容易受到风沙侵蚀。功能区中部地区特别是浑善达克沙地地区土壤可侵蚀性较强,严重影响中部地区的土壤风蚀程度。

3.1.4 地表粗糙度因子 坡度对风力侵蚀的因素比较复杂,在考虑相同土壤组成的前提下,地表起伏较大的地区坡度较大,一定程度上使得土壤粗糙度增大,而土壤可蚀性随着土壤粗糙度的增大而降低<sup>[43,44]</sup>,加上山体本身的垂直地带性特征,使高大且陡峭地区的风力侵蚀程度整体变弱<sup>[45]</sup>。

全国高程数据绘制浑善达克沙漠化防治生态功能区地表粗糙度特征图(图 4),由图中可见研究区西北部平坦,东南部地表起伏较大。



3.2 风蚀强度变化特征分析

应用 RWEQ 模型对浑善达克沙漠化防治生态

功能区进行土壤风蚀总量计算,根据《国标土壤侵蚀分类分级标准 SL190—2007》确定的风蚀区土壤侵蚀强度的分级标准,对功能区内土壤侵蚀情况做等级强度的划分。获得浑善达克沙漠化防治生态功能区土壤风蚀分级图及变化率数据(表 2)和功能区土壤风蚀强度分布图(图 5)。

由表 2 数据分析,浑善达克沙漠化防治生态功能区主要以轻度、中度、强烈风蚀为主的区域占功能区总面积 99%以上。研究期间微度侵蚀和轻度侵蚀面积均减少,其中轻度侵蚀区面积减少了约 42.94%;微度和轻度侵蚀区向中度和强烈侵蚀程度转化,其中强烈侵蚀区增加了 26.083%,受强烈土壤侵蚀面积显著增加,土壤侵蚀向恶劣化程度发展,制作功能区土壤风蚀分布图(图 5)。

表 2 研究区土壤侵蚀强度分级与变化率

侵蚀程度	2000 年/ 10 <sup>4</sup> km <sup>2</sup>	2010 年/ 10 <sup>4</sup> km <sup>2</sup>	2000—2010 年 变化率/%
I 微度	0.009	0.008	-8.102
II 轻度	2.181	1.247	-42.838
III 中度	13.544	13.788	1.798
IV 强烈	2.658	3.351	26.083

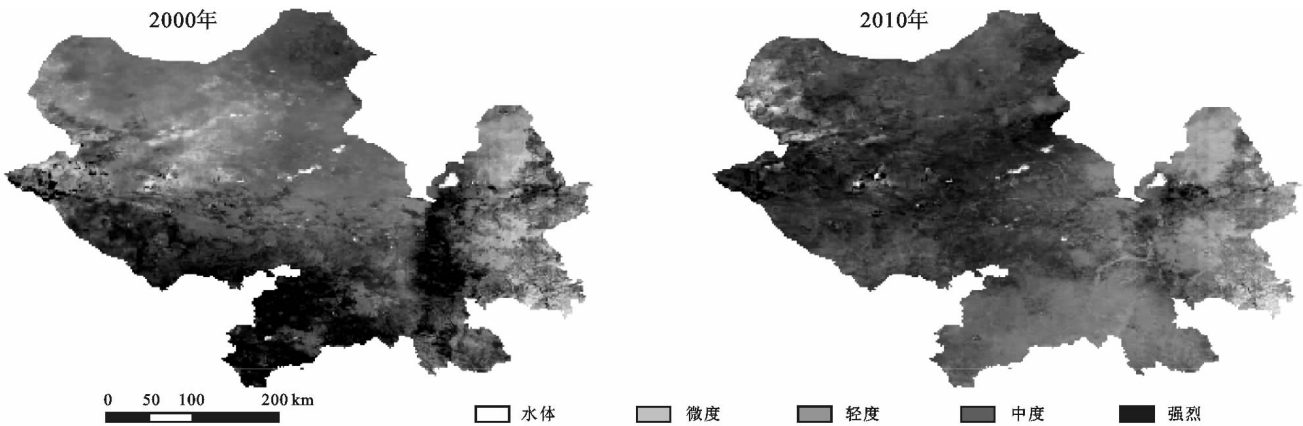


图 5 研究区土壤风蚀分布

3.3 强烈风蚀区主要影响因子解析

根据各要素(植被盖度、气候风蚀因子、土壤可蚀性、地表粗糙度、土壤风蚀)数据计算结果基础上,将各指标分别划分为四个等级(表 3)并重置代码,代码赋值依据不同要素所处组合代码位数不同,同一要素内对土壤风蚀影响程度较大的赋值较大的原则,通过空间叠加方法进行处理。结合 2000 年、2010 年强烈风蚀区数据进行叠加分析,再对各区域主导因素进行分类,得到浑善达克沙漠化防治生态功能区强烈风蚀区影响要素组合列表(表 4)。

土壤风蚀影响要素组合列表中,组合代码表示不同要素所处组合代码位数不同,同一要素内对土壤风

由功能区土壤风蚀分布图,可以发现功能区中部以及西部大面积轻度侵蚀区被中度侵蚀程度所替代。2000 年轻度侵蚀范围主要集中在功能区西北地区中部(苏尼特左旗中部)和东北部(克什克腾旗北部和围场满族自治区中部);到 2010 年轻度侵蚀范围仅集中在防风固沙功能区东北部(克什克腾旗北部和围场满族自治区)。

强烈侵蚀范围增大,并有向功能区西北方向移动扩展的趋势,2000 年强烈侵蚀范围主要集中在浑善达克沙漠化防治生态功能区南部地区(苏尼特右旗、镶黄旗、康保县、尚义县、张北县南部、太仆寺旗西部、沽源县南部)和中部地区(多伦县中部、正蓝旗东部);2010 年强烈侵蚀范围向功能区西部地区中部移动,集中在功能区西部(苏尼特右旗、苏尼特左旗东部、阿巴嘎旗中部、镶黄旗东北部),原强烈侵蚀地区向中度侵蚀程度转变,土壤风蚀程度有所减轻。研究期间功能区西北地区中部(苏尼特左旗中部)恶化尤为严重,由轻度侵蚀程度转化为强烈侵蚀程度;南部地区(尚义县、康保县、张北县)和中部地区(多伦县中部、正蓝旗东部)土壤风蚀状况有所好转,由强烈侵蚀程度转化为中度侵蚀程度。

蚀影响程度较大数值较大。由表中分析可见,土壤风蚀强烈区各要素,不同的年份产生的风蚀特征差异较大。从表 4 中可以看出,强烈风蚀区,地表粗糙度较小,植被盖度偏低,各区域气候条件与土壤特性差异成为土壤风蚀的差异主要影响因素。依照表 4 分类,对功能区强烈风蚀区进行空间分布呈现(图 6)。

由图 6 空间分布图可以看到,不同的年份受到气候和植被盖度等因素变化的影响,主要影响因素也在不断变化。排除植被和地表粗糙度影响因素,受到气候影响的 S1 与 S2 区域在逐步向西北方向移动,与气候风蚀因子的移动较为一致,空间分布变化较为明显。由此可以分析出气候因素的变化很大程度上影

响着浑善达克沙漠化防治生态功能区的土壤风蚀情况。刘树林<sup>[46]</sup>等研究浑善达克地区年均温度呈上升趋势,南北区域温度差逐渐缩小,这一趋势与全球变暖表现一致,西北地区气温一定程度升高。同时春风等<sup>[47]</sup>,张宝林等<sup>[48]</sup>利用 M-K 方法检验表明浑善达克地区近年降水量出现下降趋势,整个研究区域趋于干化。陈重潘<sup>[49]</sup>认为,气温升高造成蒸发量增大,降水减少导致的连续干旱会造成植被退化,成为全球变暖背景下沙漠化发展重要原因<sup>[50-51]</sup>。白美兰等<sup>[52]</sup>利用多年气象观测资料,说明了浑善达克沙地气温的升高,降水的减少,蒸发量的加大,大风日数、沙尘暴日数和极端气候事件的增多,对生态环境造成了很大的影响。气候的不利变化,加速了浑善达克沙地部分地区沙漠化的进程,暖干化趋势使该区域生态环境更加脆弱。

表 3 土壤风蚀要素再编码对照表		
影响因素	分级标准	重置代码
植被 覆盖度/%	0~10	4000
	10~25	3000
	25~40	2000
	>40	1000
	>1000	400
气候风 蚀因子	700~1000	300
	500~700	200
	0~5000	100
土壤可蚀 性因子	>0.45	40
	0.3~0.45	30
	0.15~0.3	20
	0~0.15	10
地表粗糙 度因子	0~4	4
	4~12	3
	12~20	2
	>20	1

表 4 土壤风蚀影响要素组合列表

组合	主要影响要素	2000 年	2010 年
S <sub>1</sub>	植被、地表粗糙度、气候	4334,4324,3323,3324	4334,4324,4424,4434
S <sub>2</sub>	植被、地表粗糙度、气候、土壤	3334,2224	3334
S <sub>3</sub>	植被、地表粗糙度、土壤	3234,3233	3234,4234
S <sub>4</sub>	植被、地表粗糙度	3224,3223	3224,4224,3124

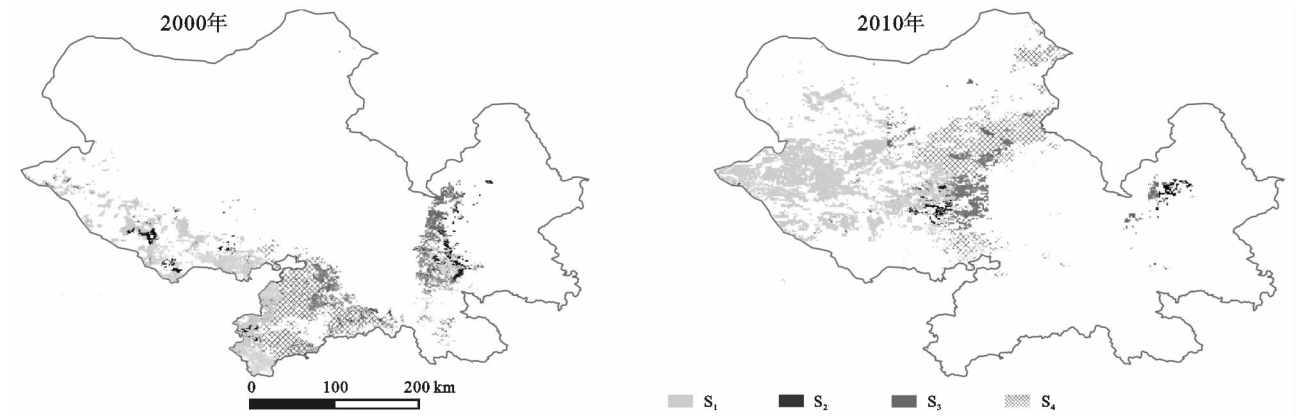


图 6 强烈风蚀区主导侵蚀因子组合分布

4 结论

(1) 土壤风蚀受到多因子的综合影响,受强烈土壤侵蚀面积显著增加研究期间功能区西北地区中部(苏尼特左旗中部)恶化尤为严重,由轻度侵蚀程度转化为强烈侵蚀程度;南部地区(尚义县、康保县、张北县)和中部地区(多伦县中部、正蓝旗东部)土壤风蚀状况有所好转。

功能区西部地区年均植被覆盖度偏低,不足以保护地表土壤以减少风蚀输沙量。受全球气候变化影响,研究期间功能区受到强烈影响的区域在向西北部偏移。受浑善达克沙漠化防治生态功能区中部的浑善达克沙地特殊土壤沙漠化特性<sup>[53]</sup>的影响,功能区中部和西北部土壤抗风蚀性较差,容易受到风沙侵蚀。功能区中部和

西部地区较东部地区地表粗糙度较小,不利于风沙的滞留,间接增加了输沙量,风蚀情况较严重。

(2) 加强生态监测,及时掌握土壤风蚀状态,应用遥感技术进行草地资源的调查准确区分草地类型的空间分布,定期调查获得的周期性遥感资料了解草地牧草的长势与修复工程,控制沙化面积进一步扩大,遏制风蚀现象发展。

(3) 遏制风蚀面积扩大和迁移,实施生态补偿,加大退耕还林还草还牧力度。本着政府主导、市场推进组织原则,生态优先、重点补偿的分配原则,因地制宜、循序渐进的实施原则,宜用模型包括:围栏封育、综合配套措施等修复模式、调整“进一退二还三”战略,把“退、还”放在突出位置,重点治理,加大退耕还林还草还牧力度,建立“建、封、退、调、改”五结合生态

修复模式<sup>[54]</sup>,采用先进的技术修复牧区草原植被覆盖度,选择优良种植作物<sup>[55]</sup>、多种播种方法<sup>[56]</sup>结合、立体栽培<sup>[57]</sup>、有效节水灌溉<sup>[58]</sup>、针对性施肥等草原植被修复措施。科学规划土地利用,统一规划,分区域治理,种草种树;各地坚持统一规划,因地制宜,分类指导,分步实施;通过补助减少牲畜头、改良家畜品种、种植牧草、划区轮牧管理、舍饲半舍饲结合<sup>[59]</sup>等方式维持草—畜的动态平衡关系,实现可持续性发展地区畜牧业。在防治方法上工程措施、生物措施相结合。工程措施重在固定流沙,防护交通等主要公共设施方面;生物措施坚持因地制宜,乔灌木结合,以灌木为主,灌木中以柠条为主。采用涉及覆盖范围广,效率较高的飞播治沙造林,选种采用适于流沙地生长,吸水力强,发芽迅速,扎根快,有较强的抗逆能力。飞播治沙试验的植物种主要有:羊柴、花棒、籽蒿、柠条、沙打旺、草木樨和紫穗槐等。适宜飞播期的选择:五月下旬到六月中旬,选择临近雨季,通过增加人工降雨进行气候调节。

(4) 优化升级产业结构,结合各地区特点发展生态产业,以生态学理论为指导,发展包括生态农业、生态工业和生态旅游业等,实现地区生产、生活、生态与经济效益、生态效益、社会效益有机结合,激活地区新的发展生机,提高人民生活水平。在草原生态监测方面,应用遥感技术进行草地资源的调查准确区分草地类型的空间分布,定期调查获得的周期性遥感资料了解草地牧草的长势与修复工程,控制沙化面积进一步扩大,遏制风蚀现象恶劣化发展。

#### 参考文献:

- [1] 李鸿威,杨小平. 浑善达克沙地近 30 年来土地沙漠化研究进展与问题[J]. 地理科学进展,2010,25(6):647-655.
- [2] 人民出版社. 全国主体功能区规划[M]. 北京:人民出版社,2015.
- [3] 刘树林,王涛,屈建军. 浑善达克沙地土地沙漠化过程中土壤粒度与养分变化研究[J]. 中国沙漠,2008,28(4):611-616.
- [4] 赵哈林,赵学勇,张铜会,等. 北方农牧交错带的地理界定及其生态问题[J]. 地球科学进展,2002,17(5):739-748.
- [5] 裴浩,张世源,敖艳青. 浑善达克沙地气候特征及其气候变化分析[J]. 气象科技,2005,14(3):34-38.
- [6] 王牧兰,包玉海,阿拉腾图雅,等. 浑善达克沙地景观格局变化研究[J]. 干旱区资源与环境,2007,21(5):121-125.
- [7] 康相武,吴绍洪,刘雪华. 浑善达克沙地土地沙漠化时空演变规律研究[J]. 水土保持学报,2009,23(1):1-6.
- [8] 敖艳红,裴浩,王永利,等. 浑善达克沙地遥感监测研究[J]. 中国沙漠,2010,30(1):33-39.
- [9] 李春兰,银山,包玉海,等. 基于高程的浑善达克沙地典型区正镶白旗的荒漠化特征分析[J]. 水土保持研究,2014,21(4):295-306.
- [10] 孟庆华. 浑善达克沙漠化防治生态功能区生态效率评价[J]. 林业资源管理,2014(2):110-114.
- [11] Bangnold R A. A future journey through the Libyan Desert. Pey K, Tsoar H. Aeolian sand and sand dunes [J]. London:Unwin Hyman, 1990:45-78.
- [12] 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.
- [13] Woodruff N P, Siddoway F H. A wind erosion equation[J]. Proceedings of the Soil Science Society of America, 1965,29(5):602-608.
- [14] Gregory J M, Borrelli J, Fedler C B. Team: Texas erosion analysis model[Z]. American Society of Agricultural Engineers, 1988.
- [15] Bocharov A P. A Description of Devices Used in the Study of Wind Erosion of Soil[M]. New Delhi:Oxbonian press, Pvt, Ltd, 1984.
- [16] Fryrear D W, Saleh A, Bibro J D, et al. Revised Wind Erosion Equation (RWEQ) [M]// Wind Erosion and Water Conservation Research Unit. USDA-ARS, Southern Plains Area Cropping Systems Research Laboratory, Technical Bulletin NO. 1, 1998.
- [17] 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.
- [18] Hagen L J. Evaluation of the wind erosion prediction system (WEPS) erosion submodel on cropland fields [J]. Environmental Modelling and Software, 2004,19(2):171-176.
- [19] 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.
- [20] 殷海军. RWEQ 模型的改进及其在中国风沙区的应用研究[D]. 北京:中国农业大学,2007.
- [21] 巩国丽,刘纪远,邵全琴. 草地覆盖度变化对生态系统防风固沙服务的影响分析:以内蒙古典型草原区为例[J]. 地理信息科学学报,2014,16(3):426-434.
- [22] 江凌,肖焱,欧阳志云,等. 基于 RWEQ 模型的青海省土壤风蚀模数估算[J]. 水土保持研究,2015,22(1):21-33.
- [23] 张登山. 青海高原土地沙漠化及其防治[D]. 北京:科学出版社,2009.
- [24] 王革丽,吕达仁,尤莉. 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.
- [25] 刘海江,周成虎,程维明,等. 基于多时相遥感影像的浑善达克沙地沙漠化监测[J]. 生态学报,2008,28(2):627-635.
- [26] 巩国丽,刘纪远,邵全琴. 基于 RWEQ 的 20 世纪 90 年

- 代以来内蒙古锡林郭勒盟土壤风蚀研究[J]. 地理科学进展, 2014, 33(6): 825-834.
- [27] Allen R G. REF-ET; Reference evapotranspiration calculation software for FAO and ASCE standardized equations [CP/OL]. Kimberly, Idaho: University of Idaho Research and Extension Center, 2011. (2012-12-10). [http://www.kimberly.uidaho.edu/ref-et/Ref\\_ETV3.1\\_Users\\_Manual](http://www.kimberly.uidaho.edu/ref-et/Ref_ETV3.1_Users_Manual).
- [28] Makkink G F. Testing the penman formula by means of lysimeters[J]. Journal of the Institution of Water Engineers, 1957, 11(3): 277-288.
- [29] Hossein Tabari. Evaluation of reference crop evapotranspiration equations in various climates[J]. Water Resource Management, 2009, doi:10.1007/s11269-009-9553-8.
- [30] Dai L Y, Che T, Wang J. Snow depth and snow water equivalent estimation from AMSR-E data based on a priori snow characteristics in Xinjiang, China[J]. Remote Sensing of Environment, 2012, (127): 14-29.
- [31] 车涛. 中国雪深长时间序列数据集(1978—2012)[D]. 兰州: 中科院寒区旱区环境与工程研究所, 2011.
- [32] 成天涛, 吕达仁, 徐永福. 浑善达克沙地起沙率和起沙量的估计[J]. 高原气象, 2006, 25(2): 236-241.
- [33] 黄富祥, 张新时, 徐永福. 毛乌素沙地植被覆盖率与风蚀输沙率定量关系[J]. 地理学报, 2001, 56(6): 700-709.
- [34] 李晓岚, 张宏升. 内蒙古科尔沁沙地起沙近地层动力学阈值的试验研究[J]. 高原气象, 2012, 31(1): 38-46.
- [35] 王存忠, 牛生杰, 周悦. 中国风蚀起沙研究进展[J]. 气象, 2009, 35(11): 108-116.
- [36] Shangguan W, Dai Y, Liu B, et al. A soil particle-size distribution dataset for regional land and climate modeling in China[J]. Geoderma, 2012, 171(1): 85-91.
- [37] 赵哈林, 郭轶瑞, 周瑞莲, 等. 植被覆盖对科尔沁沙地土壤生物结皮及其下层土壤理化特性的影响[J]. 应用生态学报, 2009, 20(7): 1657-1663.
- [38] 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, 16(4): 437-443.
- [39] 董玉祥, 刘毅华. 内蒙古浑善达克沙地近五千年内沙漠化过程的研究[J]. 干旱区地理, 1993, 16(2): 45-51.
- [40] 陆均天, 邹旭恺, 王锦贵, 等. 近3年我国沙尘天气较频繁发生的原因分析[J]. 气候与环境研, 2003, 8(1): 107-113.
- [41] 张科利, 彭文英, 杨红丽. 中国土壤可蚀性值及其估算[J]. 土壤学报, 2007, (44)1: 7-13.
- [42] 程军回. 影响生物土壤结皮分布的环境因子[J]. 生态学杂志, 2010, 29(1): 133-141.
- [43] Chepil W S, Woodruff N P. Estimations of wind erodibility of field surfaces [J]. Journal of Soil & Water Conservation, 1954, 9: 265-285.
- [44] Saleh A. Soil surface roughness measurement: A comparison study[J]. Agronomy Abstracts, 1997: 271.
- [45] 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.
- [46] 刘树林, 王涛. 浑善达克沙地地区的气候变化特征[J]. 中国沙漠, 2005, 25(4): 557-562.
- [47] 春风, 李春兰, 包玉海. 近57年锡林浩特市气温与降水量变化的小波分析[J]. 内蒙古师范大学学报: 自然科学汉文版, 2013, 42(1): 47-52.
- [48] 张宝林, 罗瑞林. 浑善达克地区温度和降水的时空变化特征分析[J]. 东北农业大学学报, 2015, 46(5): 51-59.
- [49] 陈重潘. 气候变化对植被和土壤的影响效应[J]. 云南地理环境研究, 2010, 22(2): 39-42.
- [50] McCalley C K, Sparks J P. Abiotic gas formation drives nitrogen loss from a desert ecosystem[J]. Science, 2009, 326(5954): 837-840.
- [51] Schlesinger W H, Reynolds J F, Cunningham G L, et al. Biological feedbacks in global desertification[J]. Science, 1990, 247(4946): 1043-1048.
- [52] 白美兰, 郝润全, 邸瑞琦, 等. 气候变化对浑善达克沙地沙漠化影响的评估[J]. 气候与环境研究, 2006, 11(2): 215-220.
- [53] 刘树林, 王涛. 浑善达克沙地的土地沙漠化过程研究[J]. 中国沙漠, 2007, 27(5): 719-724.
- [54] 崔巍, 何京丽, 荣浩, 等. 论牧区水土保持生态修复技术与模式[J]. 草业科学, 2009, 26(1): 40-44.
- [55] 高凯, 韩国栋, 于永奇, 等. 浑善达克沙地14种植物热值特征[J]. 生态学杂志, 2015, 34(2): 341-346.
- [56] 曹子龙, 郑翠玲, 赵廷宁, 等. 补播改良措施对沙化草地植被恢复的作用[J]. 水土保持研究, 2009, 16(1): 90-97.
- [57] 何京丽. 北方典型草原水土保持生态修复技术[J]. 水土保持研究, 2004, 11(3): 299-301.
- [58] 高天明, 张瑞强, 刘铁军, 等. 不同灌溉量对退化草地的生态恢复作用[J]. 中国水利, 2011, 09: 20-23.
- [59] 谢双红. 北方牧区草畜平衡与草原管理研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2005.