

邢丽珠,张方敏,邢开成,等.基于RWEQ模型的内蒙古巴彦淖尔市土壤风蚀变化特征及归因分析[J].中国沙漠,2021,41(5): 111-119.

## 基于RWEQ模型的内蒙古巴彦淖尔市 土壤风蚀变化特征及归因分析

邢丽珠<sup>1,2</sup>,张方敏<sup>1</sup>,邢开成<sup>3</sup>,李云鹏<sup>4</sup>,卢琦<sup>5</sup>,鲁飞飞<sup>6</sup>

(1.南京信息工程大学 应用气象学院 气象灾害预报预警与评估协同创新中心/江苏省农业气象重点实验室,江苏南京 210044; 2.枣庄市气象局,山东 枣庄 277800; 3.河北省气候中心,河北 石家庄 050011; 4.内蒙古自治区生态与农业气象中心,内蒙古 呼和浩特 010051; 5.中国林业科学研究院 荒漠化研究所/沙漠林业实验中心,北京 100091; 6.内蒙古自治区巴彦淖尔市林业勘测设计队,内蒙古 巴彦淖尔 015000)

**摘要:**土壤风蚀是干旱半干旱地区面临的主要生态环境问题。基于修正风蚀方程模型(RWEQ)与GIS技术,分析了1980—2018年内蒙古巴彦淖尔市土壤风蚀变化并分析成因。结果表明:(1)研究期间,巴彦淖尔市土壤风蚀模数总体呈下降趋势,多年均值为 $40.26 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,10年倾向率为 $-8.02 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。2000年前以中度风蚀为主,2000年以后以微度风蚀为主。(2)空间上,巴彦淖尔市土壤风蚀高值区主要分布在西北部地区,低值区主要分布在南部地区。不同风蚀强度面积占比排序为中度>轻度>强烈>微度>极强烈>剧烈,微度和轻度风蚀面积呈现增大趋势,中度、强烈、极强烈和剧烈风蚀面积均呈现减小趋势。总体上,全区土壤风蚀均呈现下降趋势,西北部下降幅度最大,南部下降幅度最小。(3)内蒙古巴彦淖尔市土壤风蚀主要受风速( $u$ )、温度( $T_a$ )、植被覆盖度( $VC$ )和土壤含水量( $sw$ )影响, $u$ 的直接作用最明显,而 $T_a$ 、 $VC$ 和 $sw$ 主要产生间接影响。总体来说, $u$ 对巴彦淖尔市土壤风蚀变化的综合决定能力最强, $sw$ 的综合决定能力最弱。

**关键词:** RWEQ模型; 土壤风蚀; 时空变化; 影响因素; 通径分析

**文章编号:** 1000-694X(2021)05-111-09

**DOI:** 10.7522/j.issn.1000-694X.2021.00055

**中图分类号:** S157.1; X171.1

**文献标志码:** A

## 0 引言

风蚀,即地表土壤颗粒在风力作用下发生位移,是一个连续的、动态的自然地貌过程<sup>[1-2]</sup>,是干旱半干旱地区土壤质量退化和沙漠化的主要过程<sup>[3]</sup>。中国受风蚀影响的总面积超过陆地总面积的一半。风蚀导致土壤中养分和有机物的流失,土壤肥力和土地生产力下降,风蚀产生的悬浮土壤颗粒是造成空气污染和沙尘暴的主要原因,对农牧业生产、生态环境及公共健康产生严重影响<sup>[4-5]</sup>。

国内外学者对此进行了一系列研究,野外集沙仪<sup>[6]</sup>、室内风洞及可移动风洞<sup>[2]</sup>、元素示踪<sup>[7-8]</sup>等方法被应用于风蚀量的估算,这些方法对区域尺度评估一般需要耗费大量人力、物力和财力<sup>[9]</sup>。随着遥感与地理

信息技术的发展与应用,风蚀模型逐渐被应用,目前的研究模型主要有Woodruff等<sup>[10]</sup>提出的风蚀方程(Wind erosion equation, WEQ)、基于风速廓线发育的德克萨斯侵蚀分析模型(Texas Erosion Analysis Model, TEAM)<sup>[11]</sup>、原苏联涉及人类活动因素的Bocharov模型<sup>[12]</sup>、修正风蚀方程模型(Revised Wind Erosion Equation, RWEQ)<sup>[13]</sup>及以过程为基础的风蚀预报系统(Wind Erosion Prediction System, WEPS)<sup>[14]</sup>。其中,RWEQ模型由于综合考虑气候因子、植被因子以及土壤特性因子,能够很好地完成风蚀预测,并能在区域尺度对土壤风蚀进行长时间序列估算,因此被广泛应用于土壤风蚀和防风固沙研究中。中国学者对RWEQ模型进行了改进与应用,巩国丽等<sup>[4]</sup>应用

收稿日期:2020-11-25; 改回日期:2021-04-27

资助项目:科技部重大研发计划项目(2018YFC1506606);江苏省优秀青年基金项目(BK20170102)

作者简介:邢丽珠(1995—),女,山东潍坊人,硕士研究生,主要从事应用气象研究。E-mail: 864512419@qq.com

通信作者:张方敏(E-mail: fmin.zhang@nuist.edu.cn)

RWEQ模型分析了20世纪90年代以来锡林郭勒盟土壤风蚀时空格局,揭示了土壤风蚀的主要影响因素,且针对RWEQ模型中土壤结皮和可蚀性因子进行改进<sup>[15]</sup>。王洋洋等<sup>[16]</sup>对2000—2015年宁夏草地土壤风蚀及防风固沙时空格局进行了量化的估算。吴晓光等<sup>[17]</sup>定量反演了1990—2015年内蒙古高原各季节土壤风蚀量,并以<sup>137</sup>Cs法推算土壤风蚀量进行验证,拟合结果较好。这说明RWEQ模型应用于中国风蚀模拟具有较高可行性。

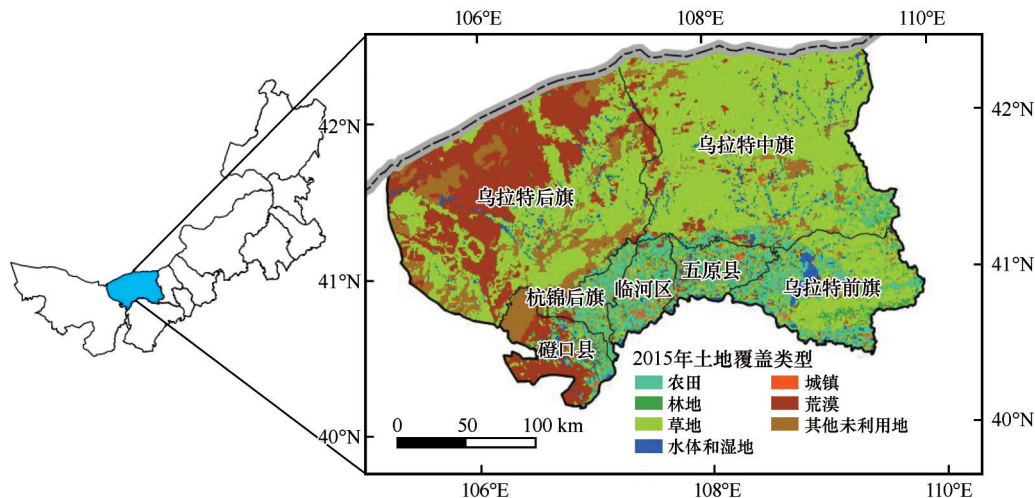
内蒙古巴彦淖尔市位于干旱半干旱区,深居大陆内部,北部为草原,中部为阴山山地,南部为平原,西部为荒漠,受西北干冷季风影响较强,气候寒冷干燥,多风沙,属中温带大陆性季风气候,是典型的农牧交错带和风蚀沙化区,具有自然条件复杂、

生态脆弱、环境退化加剧等诸多特点。基于此,本文采用RWEQ模型估算内蒙古巴彦淖尔市土壤风蚀状况,分析该地1980—2018年土壤风蚀变化特征及其影响因素,以期为该区域生态环境恢复和改善提供科学依据。

## 1 数据与方法

### 1.1 研究区概况

内蒙古巴彦淖尔市(40°13′—42°28′N, 105°12′—109°53′E)辖临河区、五原县、磴口县、杭锦后旗、乌拉特前旗、乌拉特中旗、乌拉特后旗,总面积6.4万km<sup>2</sup>。研究区内土地覆盖类型丰富,草地占一半以上。研究区地理位置及土地覆盖类型如图1所示。



内蒙古巴彦淖尔市地图均基于国家测绘地理信息局标准地图服务网站下载的审图号为GS(2018)2512号的标准地图制作,底图无修改

图1 研究区地理位置

Fig.1 Geographical location of the study area

### 1.2 数据来源

气象数据集来源于国家气象科学数据中心(<http://data.cma.cn/>),包括1980—2018年巴彦淖尔市气象台站的日尺度降水、平均温度、最高温度、最低温度、日照时数、风速、相对湿度。归一化植被指数(NDVI)来源于中国科学院地理科学与资源研究所的资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn/>)基于SPOT/VEGETATION以及MODIS等卫星遥感影像得到的1 km的1980—2018年月尺度融合数据,已经在各尺度区域的植被动态变化监测等研究中得到了广泛的应用。1980—2018的雪深数据来源于寒区旱区科学数据中心(<http://westdc.westgis.ac.cn>),空间分辨率为25 km。30 m分辨率的高程

(DEM)数据来自地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/>)。土壤基础数据包括土壤类型、有机质含量、砂粒和黏粒含量要素,空间分辨率为1 100万,是第二次全国土地调查数据,由南京土壤所制作,来源于中国西部环境与生态科学数据中心(<http://westdc.westgis.ac.cn>);土壤碳酸钙含量(CaCO<sub>3</sub>)分布图,空间分辨率为1 400万,是第二次全国土地调查数据,由全国土壤普查办公室编制,来自于地球系统科学数据共享服务网(<http://www.geodata.cn>)。

所有数据最终投影坐标系统一为Krasovsky\_1940\_Albers,空间分辨率为1 km。为表述方便,将1980—1989、1990—1999、2000—2009、2010—2018年分别表述为1980s、1990s、2000s、2010s。

### 1.3 土壤风蚀量估算方法

本文采用修正风蚀方程(RWEQ)来估算内蒙古巴彦淖尔市的土壤风蚀量<sup>[9,16,18]</sup>。

$$S_L = \frac{2z}{S^2} Q_{\max} e^{-(z/s)^2} \quad (1)$$

$$S = 150.71(WF \times EF \times SCF \times K' \times C)^{-0.3711} \quad (2)$$

$$Q_{\max} = 109.8(WF \times EF \times SCF \times K' \times C) \quad (3)$$

式中: $S_L$ 为土壤风蚀量( $t \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$ ); $Q_{\max}$ 为风沙最大转移量( $kg \cdot m^{-1}$ ); $S$ 为关键地块长度(m); $z$ 为下风向最大风蚀出现距离(m),本次计算取50 m; $WF$ 为气候因子( $kg \cdot m^{-1}$ ); $K'$ 为地表粗糙度因子; $EF$ 为土壤可

蚀因子; $SCF$ 为土壤结皮因子; $C$ 为植被覆盖因子。

气候因子 $WF^{[9,19]}$ :

$$WF = Wf \times \frac{\rho}{g} \times SW \times SD \quad (4)$$

$$Wf = u_2(u_2 - u_1)^2 \times Nd \quad (5)$$

式中: $WF$ 为气候因子( $kg \cdot m^{-1}$ ); $Wf$ 为风力因子( $m \cdot s^{-1}$ ); $\rho$ 为空气密度( $kg \cdot m^{-3}$ ); $g$ 为重力加速度(取 $9.8 m \cdot s^{-1}$ ); $SW$ 为土壤湿度因子; $SD$ 为雪盖因子,根据雪深计算<sup>[4]</sup>;  $u_1$ 为起沙风速(取 $5 m \cdot s^{-1}$ ); $u_2$ 为气象站月均风速( $m \cdot s^{-1}$ ); $Nd$ 为各月风速大于 $5 m \cdot s^{-1}$ 的天数。

土壤可蚀因子 $EF^{[9,19]}$ :

$$EF = \frac{29.09 + 0.31s_a + 0.17s_i + 0.33(s_a/c_1) - 2.59OM - 0.95CaCO_3}{100} \quad (6)$$

式中: $s_a$ 为土壤粗砂含量(%); $s_i$ 为土壤粉砂含量(%); $c_1$ 为土壤黏粒含量(%); $OM$ 为土壤有机质含量(%); $CaCO_3$ 为碳酸钙含量(%)。

土壤结皮因子 $SCF^{[9,19]}$ :

$$SCF = \frac{1}{1 + 0.0066c_1^2 + 0.021OM^2} \quad (7)$$

植被覆盖因子 $C^{[9,19]}$ :

$$C = e^{-0.0483VC} \quad (8)$$

式中; $VC$ 为植被覆盖度(%),根据归一化植被指数( $NDVI$ )得到<sup>[16]</sup>。

地表粗糙度因子 $K'$ :

$$K' = e^{(1.86K_t - 2.41K_t^{0.934} - 0.127C_r)} \quad (9)$$

$$K_r = 0.2 \frac{(\Delta H)^2}{L} \quad (10)$$

式中: $K_t$ 为土垄糙度(cm); $C_r$ 为随机糙度因子(cm); $L$ 为地势起伏参数; $\Delta H$ 为距离 $L$ 范围内的海拔高程差(m)。参数具体计算见江凌等<sup>[20]</sup>、巩国丽等<sup>[4]</sup>。

按照水利部《土壤侵蚀强度分级标准》(SL190-2007,表1)<sup>[21]</sup>,将研究区风蚀强度分为微度、轻度、中度、强烈、极强烈和剧烈6个等级。

表1 风蚀强度分级标准

Table 1 Classification standard for wind erosion intensity

风蚀强度	微度	轻度	中度	强烈	极强烈	剧烈
风蚀模数/( $t \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$ )	<2	2—25	25—50	50—80	80—150	>150

### 1.4 统计方法

采用最小二乘法原理<sup>[22]</sup>对1980—2018年内蒙古巴彦淖尔市土壤风蚀量进行趋势变化分析,计算公式为:

$$slope = \frac{n \times \sum_{i=1}^n (i \times Y_i) - \sum_{i=1}^n i \sum_{i=1}^n Y_i}{n \times \sum_{i=1}^n i^2 - \left( \sum_{i=1}^n i \right)^2} \quad (10)$$

式中: $slope$ 表示变量回归方程的系数; $i$ 表示年份或月份; $Y_i$ 表示第 $i$ 年或第 $i$ 月的土壤风蚀量。若 $slope > 0$ ,说明此像元变量在该时间段的变化趋势是增加,反之则是减少。

根据1980—2018年土壤风蚀和其主要影响因子的变化,采用通径分析方法进行归因分析。通径

分析是一种以多元线性回归方程为基础的分析方法,可以很好地分析多个自变量与因变量之间的关系,处理较为复杂的变量关系。通过将因变量和自变量及其彼此的组合相关联,为每个存在因果关系的变量定义一组独立相关性,这些独立相关性中又互相存在影响,再通过互相之间存在影响的大小与因变量相关性进行分析<sup>[22-23]</sup>。

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤风蚀时间变化分析

1980—2018年内蒙古巴彦淖尔市土壤风蚀模数时间变化如图2所示,范围20.38—57.91  $t \cdot hm^{-2}$ , 39 a均值40.26  $t \cdot hm^{-2}$ ,总体呈现波动下降趋势,10



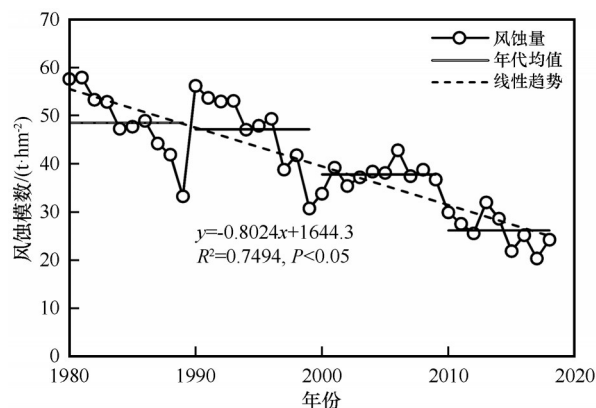


图2 1980—2018年巴彦淖尔市土壤风蚀模数时间变化

Fig.2 Change of soil wind erosion in Bayannur from 1980 to 2018

年倾向率为 $-8.02 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$  ( $P < 0.05$ ), 1980s、1990s、2000s和2010s风蚀模数年均值分别为48.50、47.16、37.8、26.16  $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$ , 其中1990s到2000s下降幅度最大。

1980—2018年巴彦淖尔市不同强度土壤风蚀面积占比如图3, 可以看出, 不同风蚀强度面积占比排序为中度(37.18%) > 轻度(20.14%) > 强烈(15.23%) > 微度(14.06%) > 极强烈(9.70%) > 剧烈(3.69%), 39 a间, 微度和轻度风蚀面积呈现增加趋势, 中度、强烈、极强烈和剧烈风蚀面积均呈现减少趋势, 尤其是2000年以来, 风蚀由高强度向低强度转化加快, 由此说明1980—2018年内蒙古巴彦淖尔市土壤风蚀现象得到好转, 土壤风蚀得到有效抑制。

## 2.2 土壤风蚀空间变化分析

内蒙古巴彦淖尔市在1980s、1990s、2000s和

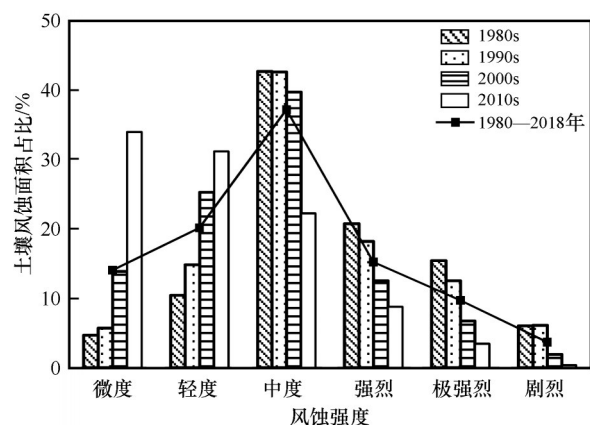


图3 1980—2018年巴彦淖尔市不同强度土壤风蚀面积占比变化

Fig.3 Change of soil wind erosion area with different intensity in Bayannur from 1980 to 2018

2010s土壤风蚀强度空间分布如图4所示, 土壤风蚀高值区主要分布在以荒漠和其他未利用地为主的西北部地区, 低值区主要分布在以农田为主的南部地区。1980s、1990s和2000s巴彦淖尔市土壤风蚀以中度风蚀为主, 主要分布在中部、东部、东南部和北部地区, 包括乌拉特中旗、乌拉特前旗以及乌拉特后旗东部地区。从2000s开始, 部分中度风蚀转为轻度风蚀, 直到2010s, 巴彦淖尔市土壤风蚀以微度风蚀为主, 分布在北部和南部绝大部分区域, 主要包括乌拉特后旗东部、乌拉特中旗北部、杭锦后旗、临河区和五原县, 占全区面积30%以上。

1980—2018年巴彦淖尔市土壤风蚀模数变化趋势如图5所示, 西北部下降幅度最大, 南部下降幅度最小。总体来说, 全区均呈现下降趋势, 风蚀模数高值区下降幅度大, 低值区下降幅度相对小。

## 2.3 土壤风蚀变化主要影响因子分析

### 2.3.1 气候因子变化

影响土壤风蚀的气候因子主要包括风速、降水、温度和湿度。其中风是土壤风蚀的直接驱动力, 气温和降水决定了该地区对风蚀的敏感性, 而湿度会影响该地区的土壤水分。由图6可知, 1980—2018年内蒙古巴彦淖尔市多年平均风速为 $2.90 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 总体呈现下降趋势(每10年 $-0.23 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,  $P < 0.05$ ), 低值处于2010年前后, 近10 a有上升趋势但幅度不大。平均温度多年平均为 $6.45 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , 总体呈现波动上升趋势(每10年 $0.50 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $P < 0.05$ )。年降水量多年平均为168.68 mm, 呈现上升趋势(每10年8.48 mm), 但波动较大, 尤其近10 a以来, 极端现象加剧。相对湿度多年平均为45.50%, 呈现下降趋势(每10年 $-0.64\%$ )。

### 2.3.2 植被覆盖变化

植被覆盖是抑制土壤风蚀的重要因素, 是影响土壤风蚀最敏感的自然因素。由图7可以看出, 目前巴彦淖尔市植被覆盖度高值区主要分布在南部, 植被覆盖度在20%以上, 包括杭锦后旗、临河区、五原县以及乌拉特前旗西部等地区, 土壤风蚀主要为微度风蚀和轻度风蚀。植被覆盖度低值区主要分布在西部以及西北部, 植被覆盖度在15%以下, 最低不足10%, 包括乌拉特后旗以及磴口西部及北部等, 土壤风蚀以中度以上为主。1980—2018年内蒙古巴彦淖尔市植被覆盖度变化总体呈现波动上升趋势(每10年0.29%), 具有与风蚀量相反的变化趋

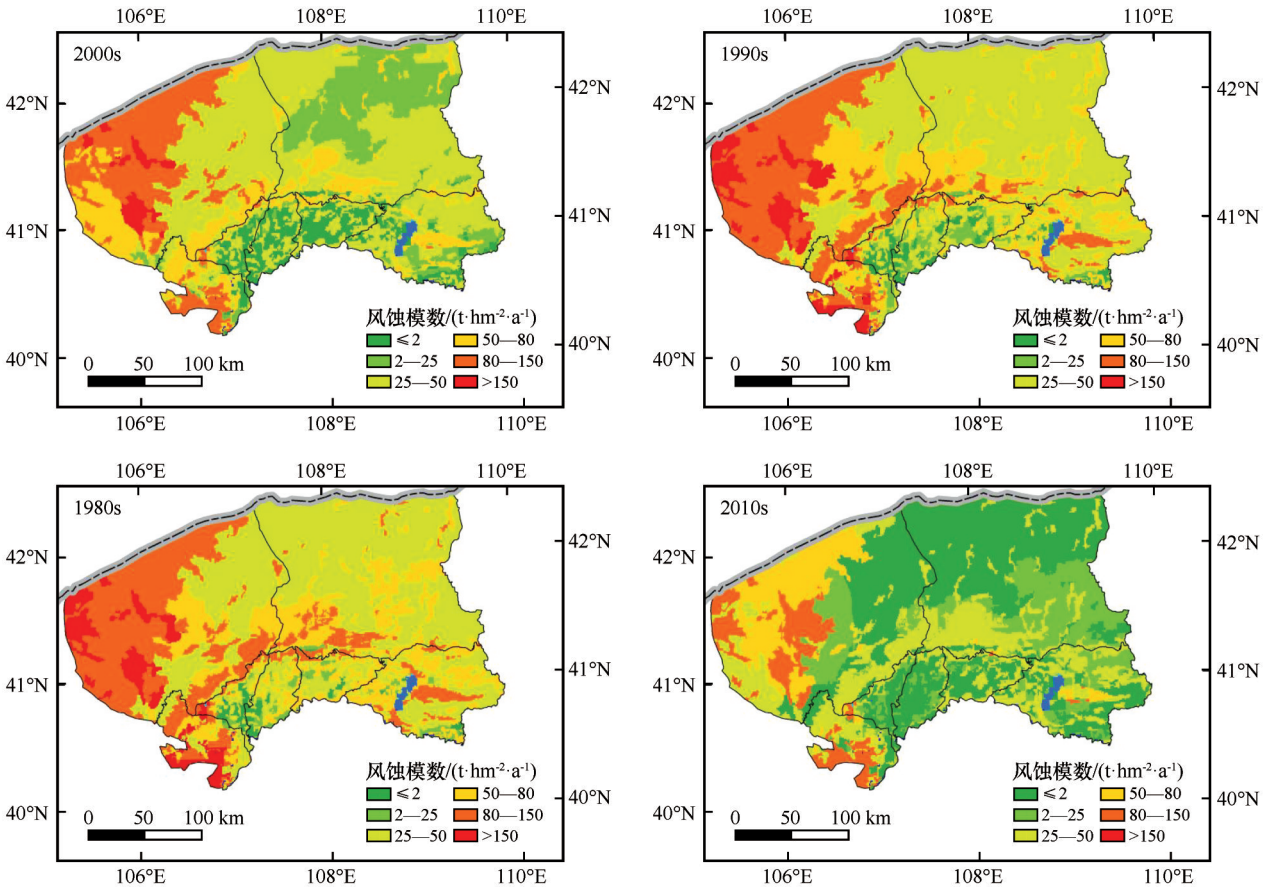


图 4 巴彦淖尔市不同强度土壤风蚀空间分布

Fig.4 Spatial distribution of soil wind erosion with different intensity in Bayannur

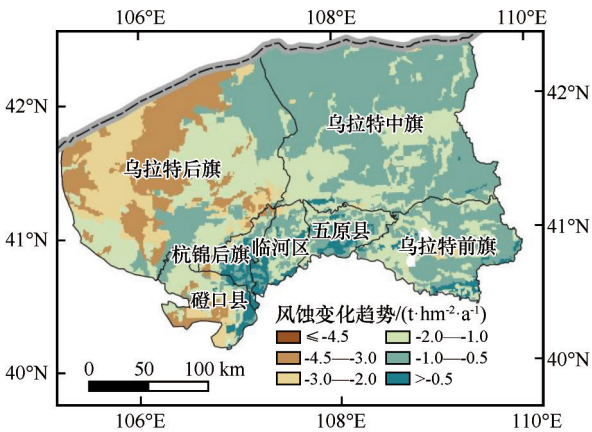


图 5 1980—2018 年巴彦淖尔市土壤风蚀模数变化趋势空间分布

Fig.5 Spatial distribution of variation trend of soil wind erosion in Bayannur from 1980 to 2018

势(图 8)。

2.3.3 土壤水分变化

土壤水分是影响土壤风蚀的重要因素,土壤水分在土壤颗粒间产生张力,增强颗粒间的凝聚力,降低土壤的风蚀性,最终提高土壤表面对风蚀的抵抗

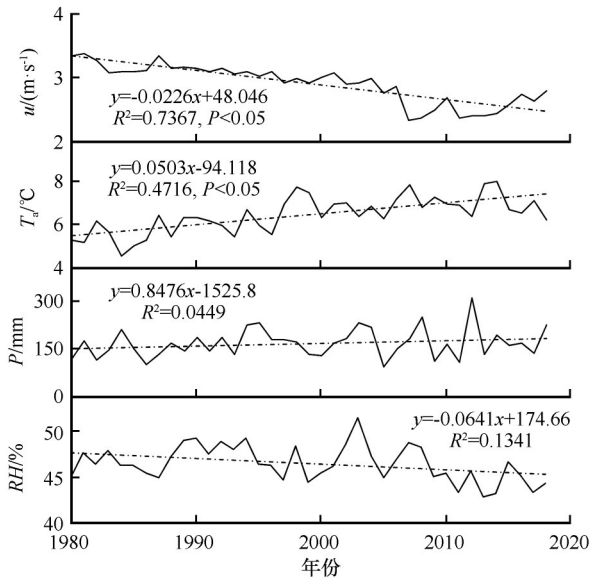


图 6 1980—2018 年巴彦淖尔市气候因子时间变化

Fig.6 Change of climate factors in Bayannur from 1980 to 2018

力<sup>[2,24]</sup>。1980—2018 年内蒙古巴彦淖尔市年均土壤含水量变化总体呈现波动上升趋势(每 10 年 0.56%),具有与风蚀量相反的变化趋势(图 9)。

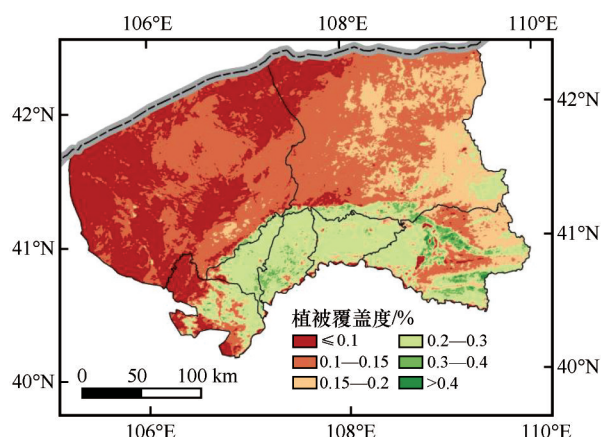


图7 巴彦淖尔市2018年植被覆盖度空间分布

Fig.7 Spatial distribution of vegetation coverage in Bayannur in 2018

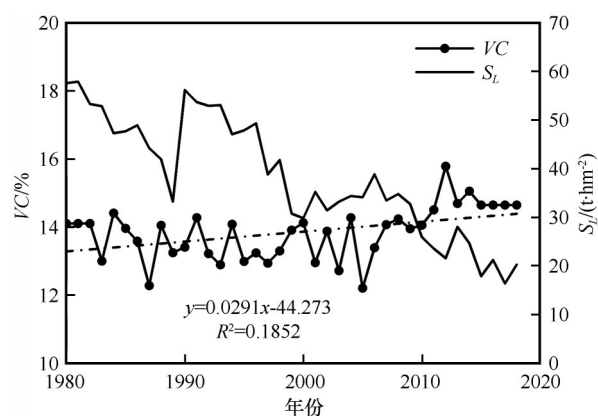


图8 1980—2018年巴彦淖尔市植被覆盖度时间变化

Fig.8 Change of vegetation coverage in Bayannur from 1980 to 2018

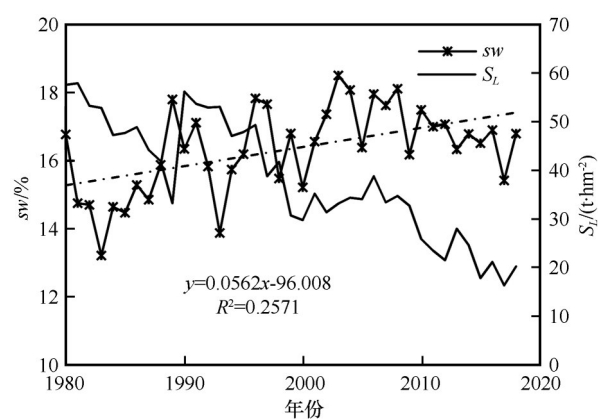


图9 1980—2018年巴彦淖尔市土壤含水量时间变化

Fig.9 Change of soil moisture content in Bayannur from 1980 to 2018

### 2.3.4 影响因子通径分析

以内蒙古巴彦淖尔市1980—2018年土壤风蚀量( $S_L$ )为因变量,以气候因子( $u$ 、 $T_a$ 、 $P$ 和 $RH$ )、植被覆盖度( $VC$ )和土壤含水量( $sw$ )为自变量进行通径

分析,其中气候因子中 $P$ 和 $RH$ 在逐步回归过程中被除去,说明 $P$ 和 $RH$ 对土壤风蚀的影响甚小,可不予考虑。

1980—2018年 $S_L$ 与不同因子间的通径分析结果如图10与表2所示,各个因子由于直接和间接作用的共同贡献,对 $S_L$ 变化的影响(相关系数)依次为 $u>T_a>VC>sw$ 。直接通径系数绝对值排序为 $u>T_a>VC>sw$ ,说明 $u$ 对 $S_L$ 的直接作用最大(直接通径系数为0.508),而 $sw$ 对 $S_L$ 的直接作用最小(直接通径系数为-0.108)。间接通径系数之和绝对值排序为 $T_a>sw>VC>u$ ,说明 $T_a$ 对 $S_L$ 的间接作用最大(间接通径系数之和为-0.407),这种间接影响主要通过 $T_a$ 与 $u$ 以及 $sw$ 的相互作用(相关系数分别为-0.646、0.458,图10),从而进一步对 $S_L$ 产生影响。而 $u$ 对 $S_L$ 的间接作用最小(间接通径系数之和为0.254)。决策系数绝对值排序 $u>T_a>VC>sw$ ,表明 $u$ 对 $S_L$ 变化的综合决定能力最强,对 $S_L$ 的促进作用最明显,其次是 $T_a$ 与 $VC$ 对 $S_L$ 变化的综合决定能力较强,对 $S_L$ 的变化均为抑制作用, $sw$ 对 $S_L$ 变化的综合决定能力最弱,对 $S_L$ 的变化起到抑制作用。

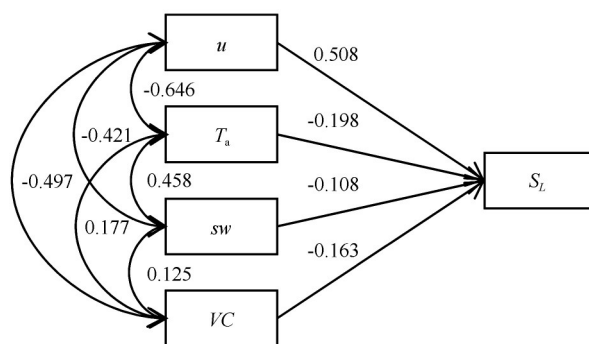


图10 巴彦淖尔市土壤风蚀变化通径分析

Fig.10 Path analysis of soil wind erosion changes in Bayannur

## 3 讨论

### 3.1 RWEQ模型验证

本文通过RWEQ模型对内蒙古巴彦淖尔市土壤风蚀状况进行估算,为了验证结果的准确性,将其与前人研究结果进行比较,由表3可知,本文与内蒙古高原<sup>[25]</sup>、青海省<sup>[20]</sup>土壤风蚀量范围基本一致,且变化趋势均呈下降趋势。本文风蚀量高于内蒙古锡林郭勒盟<sup>[4]</sup>和蒙古高原北部典型草原区<sup>[7]</sup>,原因可能是沙地<sup>[26]</sup>或未利用地<sup>[3]</sup>土壤风蚀量相对较大,而本研究区荒漠和其他未利用地占比明显大于



表 2 巴彦淖尔市土壤风蚀影响因子通径分析

Table 2 Path analysis statistics of influencing factors of soil wind erosion in Bayannur

因子	相关系数	直接通径系数	间接通径系数之和	间接通径系数				决策系数
				$u$	$T_a$	$sw$	$VC$	
风速 $u$	0.762	0.508	0.254	—	0.128	0.045	0.081	0.387
气温 $T_a$	-0.605	-0.198	-0.407	-0.329	—	-0.049	-0.029	0.120
土壤含水率 $sw$	-0.432	-0.108	-0.324	-0.214	-0.090	—	-0.020	0.047
植被覆盖度 $VC$	-0.464	-0.163	-0.301	-0.252	-0.035	-0.014	—	0.076

表 3 本文与前人计算结果对比

Table 3 Comparison between this paper and previous calculation results

研究区域	研究时段	研究方法	计算结果/( $t \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$ )	参考文献
内蒙古巴彦淖尔市	1980—2018 年	RWEQ 模型	40.26(20.38—57.91)	本文
内蒙古高原	1990—2015 年	RWEQ 模型	26—50	迟文峰等 <sup>[25]</sup>
青海省	—	RWEQ 模型	45.99	江凌等 <sup>[20]</sup>
内蒙古锡林郭勒盟	1990—2010 年	RWEQ 模型	16.70	巩国丽等 <sup>[4]</sup>
蒙古高原北部典型草原区	2006 年	<sup>137</sup> Cs 示踪法	0.65—1.69	齐永青等 <sup>[7]</sup>
北方农牧交错带	2000—2012 年	张春来风蚀预报经验模型	沙地 66.4; 农田 18.8; 草地 2.4	王旭洋等 <sup>[26]</sup>
新疆准噶尔盆地东部	2016 年	中国科学院寒区旱区环境与工程研究所大田推广模型	45.71(未利用地 64.56; 林草地 34.37; 耕地 7.59)	曹月娥等 <sup>[3]</sup>

以上两个地区,因此可以解释本文土壤风蚀量大于锡林郭勒盟和蒙古高原北部典型草原区。同时,本研究区土地覆盖类型以荒漠、草地和农田为主,根据图 1 和图 4 的空间分布可以看出,植被覆盖度荒漠<草地<农田,单位面积土壤风蚀量荒漠>草地>农田,与曹月娥等<sup>[3]</sup>的研究相一致。综上,本文的计算结果能够较为客观地表现内蒙古巴彦淖尔市的土壤风蚀量。

3.2 土壤风蚀变化成因

风蚀量的变化不仅受气候环流背景条件的影响,也与生态植被保护工程建设等诸多要素有重要联系。研究发现全球很多地区例如蒙古<sup>[27]</sup>、捷克共和国<sup>[1]</sup>、中亚地区<sup>[28]</sup>以及中国内蒙古<sup>[9]</sup>土壤风蚀量出现下降趋势,这一现象是诸多要素综合作用的结果,但是区域风速对土壤风蚀量的变化有最直接影响。1980s 以来,全球中低纬度地区<sup>[29]</sup>包括中国大部分地区<sup>[30-32]</sup>平均风速呈现下降趋势,巴彦淖尔局地风速变化趋势与其一致(图 6)。其次,全球气候总体变暖,气压梯度力在过去几十年出现了明显的减弱,气压梯度力作为风的主要驱动力,其变化和地面风速存在明显的相关性,会造成风速一定程度

下降<sup>[30]</sup>。本研究发现,巴彦淖尔市土壤风蚀量的变化主要受到风速的促进作用,以及温度、植被覆盖度、土壤含水量的抑制作用,这与 Meng 等<sup>[2]</sup>的研究具有一致性。Řeháček 等<sup>[1]</sup>发现植被对土壤抗风蚀有显著作用,还会影响近地环境的微气候,比如温度、土壤含水量、蒸散量以及土壤温度<sup>[33]</sup>,由此可以解释正是由于 1980—2018 年内蒙古巴彦淖尔市风速下降和植被覆盖度变大,故而造成土壤风蚀模数总体呈下降趋势。从区域上看,该区域风速下降和植被覆盖度增加也与 20 世纪 70 年代末以来中国北方开展的“三北”防护林建设密切相关<sup>[34]</sup>。生态植被修复工程的良好实施能调节局地气候条件。巴彦淖尔市土壤风蚀模数在 1990s 到 2000s 下降幅度最大,可能是由于 21 世纪以前,“三北”工程区虽然种植了大面积的防护林,但由于法律不完备以及群众观念意识比较淡薄,导致滥砍滥伐、毁林开垦现象时有发生,大面积的天然林被破坏<sup>[35-36]</sup>。2000 年以来,国家相继实施了天然林保护、生态公益林保护和退耕还林还草等生态建设与保护工程,滥砍滥伐、毁林开荒得到有效遏制,防护林面积不断扩大<sup>[37]</sup>,该措施也进一步间接促进了土壤风蚀量明显下降,巴彦淖尔市生态质量得到维持并有上升

趋势。

## 4 结论

1980—2018年,内蒙古巴彦淖尔市土壤风蚀模数总体呈下降趋势,多年变化在 $20.38\text{--}57.91\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ ,10年倾向率为 $-8.02\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。巴彦淖尔市不同风蚀强度面积占比排序为中度>轻度>强烈>微度>极强烈>剧烈,土壤微度和轻度风蚀面积呈现增大趋势,中度、强烈、极强烈和剧烈风蚀面积均呈现减小趋势,尤其是2000年以来,风蚀由高强度向低强度转化加快。

巴彦淖尔市土壤风蚀高值区主要分布在西北部地区,低值区主要分布在南部地区。1980s、1990s和2000s巴彦淖尔市土壤风蚀以中度风蚀为主。2000s开始,部分中度风蚀转为轻度风蚀,直到2010s,巴彦淖尔市土壤风蚀以微度风蚀为主。1980—2018年巴彦淖尔市土壤风蚀全区均呈现下降趋势,西北部下降幅度最大,南部下降幅度最小。

巴彦淖尔市土壤风蚀主要受植被覆盖度、风速、温度和土壤含水量影响,风速的直接作用最明显,而温度、植被覆盖度和土壤含水量主要产生间接影响。总体来说,风速对巴彦淖尔市土壤风蚀变化的综合决定能力最强,促进作用最明显,其次是温度和植被覆盖度对土壤风蚀变化的综合决定能力较强,有抑制作用,土壤含水量对土壤风蚀变化的综合决定能力最弱,有抑制作用。

## 参考文献:

- [1] Řeháček D, Khel T, Kučera J, et al. Effect of windbreaks on wind speed reduction and soil protection against wind erosion [J]. *Soil and Water Research*, 2017, 12(2): 128–135.
- [2] Meng Z G, Dang X B, Gao Y, et al. Interactive effects of wind speed, vegetation coverage and soil moisture in controlling wind erosion in a temperate desert steppe, Inner Mongolia of China [J]. *Journal of Arid Land*, 2018, 10(4): 534–547.
- [3] 曹月娥, 吴芳芳, 张婷婷, 等. 基于风蚀模型的准东地区土壤风蚀研究 [J]. *干旱区资源与环境*, 2018, 32(3): 94–99.
- [4] 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.
- [5] 邢春燕, 郭中领, 常春平, 等. RWEQ模型在河北坝上地区的适用性 [J]. *中国沙漠*, 2018, 38(6): 1180–1192.
- [6] Fryrear D W, Stout J E, Hagen L J, et al. Wind erosion: field measurement and analysis [J]. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 1991, 34(1): 155–160.
- [7] 齐永青, 刘纪远, 师华定, 等. 蒙古高原北部典型草原区土壤风蚀的 $^{137}\text{Cs}$ 示踪法研究 [J]. *科学通报*, 2008, 53(9): 1070–1076.
- [8] 孙喜军, 杨明义, 张风宝, 等. 利用风洞实验研究 $^{7}\text{Be}$ 示踪估算土壤风蚀速率的可行性 [J]. *水土保持学报*, 2012, 26(3): 22–25, 29.
- [9] Zhang G F, Azorin-Molina C, Shi P J, et al. Impact of near-surface wind speed variability on wind erosion in the eastern agro-pastoral transitional zone of Northern China, 1982–2016 [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2019, 271: 102–115.
- [10] Woodruff N P, Siddoway F H. A Wind erosion equation [J]. *Proceedings of the Soil Science Society of America*, 1965, 29(5): 602–608.
- [11] Gregory J M, Borrelli J, Fedler C B. TEAM: Texas erosion analysis model [C] // *Proceedings of 1988 Wind Erosion Conference*. Lubbock, Texas, USA: Texas Technical University, 1988: 88–103.
- [12] Bacharov A P. A Description of Devices Used in the Study of Wind Erosion of Soils [M]. Boca Raton, USA: CRC Press, 1984.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 巩国丽, 黄麟. RWEQ模型中土壤结皮和可蚀性因子的改进和应用 [J]. *水土保持通报*, 2018, 38(2): 271–274.
- [16] 王洋洋, 肖玉, 谢高地, 等. 基于RWEQ的宁夏草地防风固沙服务评估 [J]. *资源科学*, 2019, 41(5): 980–991.
- [17] 吴晓光, 姚云峰, 迟文峰, 等. 1990—2015年内蒙古高原土壤风蚀时空差异特征 [J]. *中国农业大学学报*, 2020, 25(3): 117–127.
- [18] 申陆, 田美荣, 高吉喜. 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 [J]. *水土保持研究*, 2016, 23(6): 90–97.
- [19] 张彪, 李庆旭, 王爽, 等. 京津风沙源区防风固沙功能的时空变化及其区域差异 [J]. *自然资源学报*, 2019, 34(5): 1041–1053.
- [20] 江凌, 肖赓, 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): 21–32.
- [21] 中华人民共和国水利部. 土壤侵蚀分类分级标准 (SL190–2007) [S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2008.
- [22] 勒斯木初. 1980—2015年西北地区土壤风蚀评估与防风固沙服务流研究 [D]. 西安: 长安大学, 2019.
- [23] 张雪松, 闫艺兰, 胡正华. 不同时间尺度农田蒸散影响因子的通径分析 [J]. *中国农业气象*, 2017, 38(4): 201–210.
- [24] 孙宝洋, 周蕊, 王喆, 等. 黄河内蒙古段土壤风蚀特征模拟 [J]. *中国沙漠*, 2020, 40(4): 120–127.
- [25] 迟文峰, 白文科, 刘正佳, 等. 基于RWEQ模型的内蒙古高原土壤风蚀研究 [J]. *生态环境学报*, 2018, 27(6): 1024–2033.
- [26] 王旭洋, 郭中领, 常春平, 等. 中国北方农牧交错带土壤风蚀



- 时空分布[J].中国沙漠,2020,40(1):12-22.
- [27] Mandakh N, Tsogtbaatar J, Dash D, et al. Spatial assessment of soil wind erosion using WEQ approach in Mongolia[J]. Journal of Geographical Sciences, 2016, 26(4): 473-483.
- [28] Li J Y, Ma X F, Zhang C. Predicting the spatiotemporal variation in soil wind erosion across Central Asia in response to climate change in the 21st century[J]. Science of The Total Environment, 2020, 709: 1-12.
- [29] Mcvicar T R, Roderick M L, Donohue R J, et al. Global review and synthesis of trends in observed terrestrial near-surface wind speeds: Implications for evaporation[J]. Journal of Hydrology, 2012, 416(3): 182-205.
- [30] 丁一汇, 李霄, 李巧萍. 气候变暖背景下中国地面风速变化研究进展[J]. 应用气象学报, 2020, 31(1): 1-12.
- [31] 邢丽珠, 张方敏, 黄进, 等. 1961—2018年内蒙古风速变化及影响因素分析[J]. 干旱区资源与环境, 2020, 34(11): 162-168.
- [32] 芦佳玉, 延军平, 王鹏涛, 等. 全球气候变暖背景下陕甘宁地区风速时空变化特征[J]. 中国沙漠, 2017, 37(3): 554-561.
- [33] Vigiak O, Sterk G, Warren A, et al. Spatial modeling of wind speed around windbreaks[J]. Catena, 2003, 52: 273-288.
- [34] 江凌, 肖赓, 饶恩明, 等. 内蒙古土地利用变化对生态系统防风固沙功能的影响[J]. 生态学报, 2016, 36(12): 3734-3747.
- [35] 曹世雄, 刘冠楚, 马华. 我国三北地区植被变化的动因分析[J]. 生态学报, 2017, 37(15): 5023-5030.
- [36] 王耀, 张昌顺, 刘春兰, 等. 三北防护林体系建设工程区森林水源涵养格局变化研究[J]. 生态学报, 2019, 39(16): 5847-5856.
- [37] 谢舒笛, 莫兴国, 胡实, 等. 三北防护林工程区植被绿度对温度和降水的响应[J]. 地理研究, 2020, 39(1): 152-165.

## Change of soil wind erosion and attribution in Bayannur, Inner Mongolia based on the Revised Wind Erosion Equation

Xing Lizhu<sup>1,2</sup>, Zhang Fangmin<sup>1</sup>, Xing Kaicheng<sup>3</sup>, Li Yunpeng<sup>4</sup>, Lu Qi<sup>5</sup>, Lu Feifei<sup>6</sup>

(1. Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters / Jiangsu Key Laboratory of Agricultural Meteorology, College of Applied Meteorology, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; 2. Zaozhuang Meteorological Bureau, Zaozhuang 277800, Shandong, China; 3. Hebei Provincial Climate Center, Shijiazhuang 050021, China; 4. Ecology and Agrometeorology Center of Inner Mongolia Autonomous Region, Hohhot 010051, China; 5. Institute of Desertification Studies / Experimental Center of Desert Forestry, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China; 6. Forestry Investigation and Planning Institute of Bayannur, Bayannur 015000, Inner Mongolia, China)

**Abstract:** Soil wind erosion is a major ecological environmental problem in arid and semi-arid regions. The change of soil wind erosion and the causes were analyzed based on the revised wind erosion equation (RWEQ) and GIS technology in Bayannur of Inner Mongolia from 1980 to 2018. The results showed that: (1) during the study period, the annual soil wind erosion modulus generally showed a downward trend in Bayannur, Inner Mongolia, with the annual mean is  $40.26 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ , and the tendency rate was  $-8.02 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$  every 10 years. moderate wind erosion was dominant before 2000, and then mired wind erosion occurred in Bayannur. (2) In space, the high value area of soil wind erosion is mainly distributed in the northwest, and the low value area is mainly distributed in the south in Bayannur. The area proportion of each wind erosion intensity was moderate > mild > strong > mired > very strong > fierce, and mired and mild wind erosion area showed an increasing trend, while moderate, strong, very strong and fierce wind erosion area showed a decreasing trend. In general, soil wind erosion showed a downward trend, with the greatest decline in the northwest and the smallest in the south. (3) Soil wind erosion is mainly affected by vegetation coverage ( $VC$ ), wind speed ( $u$ ), temperature ( $T_a$ ) and soil water content ( $sw$ ) in Bayannur of Inner Mongolia. The direct effect of  $VC$  is the most obvious, while  $u$ ,  $T_a$  and  $sw$  mainly have indirect effects. On the whole,  $VC$  has the strongest comprehensive determination ability on soil wind erosion change, while  $T_a$  has the weakest ability in Bayannur of Inner Mongolia.

**Key words:** RWEQ; soil wind erosion; temporal and spatial variation; influencing factors; path analysis