

基于不同风蚀模型的区域土壤风蚀变化及影响因素研究 ——以内蒙古自治区为例

李鑫¹, 武志涛¹, 杜自强¹, 张红²

(1.山西大学黄土高原研究所, 太原 030006; 2.山西大学环境与资源学院, 太原 030006)

摘要: 基于遥感数据、气象数据等, 利用 RWEQ 模型和风蚀预报模型对内蒙古自治区 2000—2017 年土壤风蚀进行评估并分析其驱动因素。结果表明: (1) RWEQ 模型 ($R^2=0.85, P<0.01$) 和风蚀预报模型 ($R^2=0.43, P<0.01$) 的预测值与 ^{137}Cs 示踪技术风蚀的值具有较好的相关性, 其中 RWEQ 模型预测精度更好。 (2) 时间上, RWEQ 和风蚀预报模型模拟的结果均表明 2000—2017 年内蒙古自治区土壤风蚀呈下降的趋势, 下降趋势分别为 $0.73, 1.18 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$, 2 个模型模拟的土壤风蚀模数在 2011 年均达到最低值。空间上, 2000—2017 年, 2 个模型的模拟结果均表明内蒙古自治区土壤风蚀以微度和轻度侵蚀为主, 其中剧烈侵蚀在整个研究区的占比较小 (RWEQ 1.79%, 风蚀预报模型 5.45%), 主要分布于北方风沙区的西南部。趋势上, 89.74% (RWEQ) 和 72.05% (风蚀预报模型) 的土壤风蚀模数呈下降趋势, 其中显著降低的区域主要分布于北方风沙区的巴丹吉林沙漠和乌兰布和沙漠。 (3) 大风天数对土壤风蚀具有显著影响, 随着大风天数的增多, 土壤风蚀呈显著上升趋势, 植被覆盖度和降水量的增长在一定程度上可抑制土壤风蚀的进程。

关键词: 风蚀模型; 土壤风蚀模数; 时空分布; 影响因素

中图分类号: S157

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2021)06-0069-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2021.06.010

Study on Regional Soil Wind Erosion and Its Influencing Factors Based on Different Wind Erosion Models

—Take Inner Mongolia Autonomous Region as An Example

LI Xin¹, WU Zhitao¹, DU Ziqiang¹, ZHANG Hong²

(1. Institute of Loess Plateau, Shanxi University, Taiyuan 030006;

2. College of Environment & Resource Science of Shanxi University, Taiyuan 030006)

Abstract: Based on remote sensing data and meteorological data, RWEQ model and wind erosion prediction model were used to evaluate soil wind erosion and analyze its driving factors in Inner Mongolia Autonomous Region from 2000 to 2017. The results showed that: (1) RWEQ model ($R^2=0.85, P<0.01$) and wind erosion prediction model ($R^2=0.43, P<0.01$) had a good correlation with ^{137}Cs tracer wind erosion, and RWEQ model had a better prediction accuracy. (2) In terms of time, the simulation results of RWEQ and wind erosion prediction model showed that the wind erosion in Inner Mongolia Autonomous Region showed a decreasing trend from 2000 to 2017, and the decreasing trend was $0.73 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ and $1.18 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$, respectively. The wind erosion modulus of soil simulated by the two models reached the lowest value in 2011. Spatially, from 2000 to 2017, the simulation results of the two models showed that the soil wind erosion in Inner Mongolia Autonomous Region was dominated by slight and light erosion, and the severe erosion accounted for a relatively small proportion in the whole study area (RWEQ: 1.79%, wind erosion prediction model: 5.45%), which was mainly distributed in the southwest of the northern sandstorm area. The wind erosion modulus of 89.74% (RWEQ) and 72.05% (wind erosion prediction model) showed a decreasing trend, and the

收稿日期: 2021-05-24

资助项目: 国家自然科学基金项目 (41977412, U1810101, 41871193); 山西省高等学校科技创新项目 (2020L0014)

第一作者: 李鑫 (1997—), 男, 在读硕士研究生, 主要从事水土保持与生态修复研究。E-mail: 806611088@qq.com

通信作者: 武志涛 (1985—), 男, 教授, 主要从事水土保持生态修复与“3S”技术集成应用研究。E-mail: wuzhitao@sxu.edu.cn

significantly decreasing areas were mainly distributed in the Badain Jaran Desert and Ulan Buhe Desert in the wind-swept area of northern China. (3) Wind erosion was significantly impacted by the windy days. With the increase of windy days, soil wind erosion showed a significant upward trend, and the increase of vegetation coverage and precipitation could inhibit the soil wind erosion to a certain extent.

Keywords: wind erosion model; wind erosion modulus of soil; spatio-temporal distribution; influencing factors

目前,为定量分析土壤风蚀,学者们从不同角度采取了适宜于当地的实地勘测方式,如现场直接观测、稀土元素或放射性同位素示踪(如¹³⁷Cs、⁷Be)、插杆法、粒度对比法以及陷阱诱捕法等^[1-2],这些数据为后期土壤风蚀研究以及进一步归因分析奠定了坚实的基础。

风蚀模型通常被认为是获得区域风蚀模数的最有效方法之一,早在 1941 年,Bagnold^[3]最初提出风力对土壤风蚀的作用,并建立主要适用于流沙地表的输沙率公式,该公式成为此后相关研究的理论基础。第一个风蚀方程(WEQ)^[4]诞生于 1965 年,在过去的 40 年中被广泛应用和不断修订。后来许多学者以不同的方法,从不同的角度建立各自的风蚀模型。代表模型有 Pasak 模型^[5]、Bocharov 模型^[6]、德克萨斯侵蚀分析模型(Team)^[7]、风蚀预报系统(WEPS)^[8]和修正风蚀方程(RWEQ)^[9]等。中国科学院寒区旱区环境与工程研究所提出了当前应用较为广泛的土壤风蚀预报模型^[10]。目前,国内学者^[11-12]利用 RWEQ 模型对中国北方土壤风蚀做出较多研究,如基于 RWEQ 模型定量反演内蒙古高原不同季节土壤风蚀模数,分析不同季节土壤风蚀差异,或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;还有一部分学者^[13-14]采用风蚀预报模型对中国北方或其他地区进行了一系列研究,如利用风蚀预报模型对研究区土壤风蚀控制效益进行研究,并对土壤风蚀的影响因素进行分析。

虽然之前有众多学者对内蒙古自治区土壤风蚀进行了大量研究^[15-16],但以往的研究数据更新迟缓,造成研究时间尺度不够长或数据不够新,且对于土壤风蚀归因的时空分析较少。因此,本文基于 RWEQ 和风蚀预报模型 2 种模型,系统研究 2000—2017 年内蒙古自治区土壤风蚀变化及影响因素,以期对内蒙古自治区土壤风蚀防治提供一定科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

内蒙古自治区(37°24′—53°23′N,97°12′—126°04′E)位于中国北部,面积约为 1.183×10⁶ km²。内蒙古自治区地势由东北向西南斜伸,呈狭长形,平均海拔 1 000 m 左右。较大的沙漠与沙地由西向东有

巴丹吉林沙漠、腾格里沙漠、乌兰布和沙漠、毛乌素沙地、库布齐沙漠、科尔沁沙地、浑善达克沙地等^[17]。基于《全国水土保持规划(2015—2030 年)》,综合协调天然林保护、退耕还林还草、草原保护建设、保护性耕作推广、土地整治、城镇建设、城乡统筹发展等相关水土保持内容提出的水土保持区域布局,现将研究划分为东北黑土区、北方风沙区、北方土石山区以及西北黄土高原区 4 个亚区(图 1)。

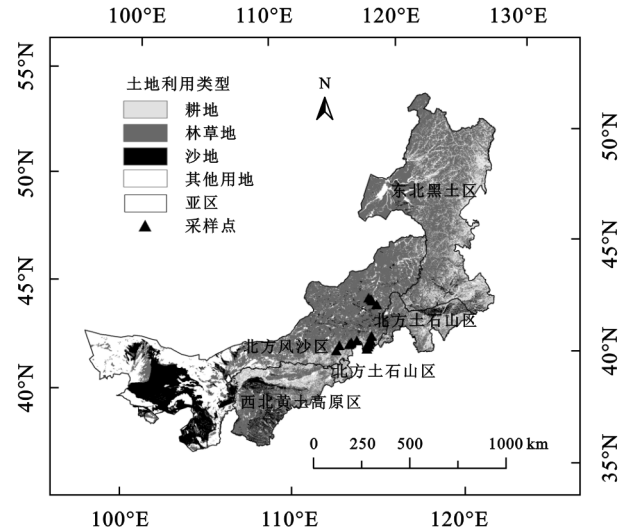


图 1 2018 年内蒙古自治区土地利用类型

1.2 数据来源与方法

1.2.1 遥感数据 本研究以 MODIS 数据为遥感基础数据,该数据从 2000 年开始发布,下载的数据景号为 h25v03、h25v04、h25v05、h26v03、h26v04、h26v05、h27v04,共计 7 个 Title。

1.2.2 自然因子数据 本文所用气象数据来源于国家青藏高原科学数据中心的 中国区域地面气象要素驱动数据集(1979—2018 年)(<http://data.tpdc.ac.cn/>),包括气温、降水数据,1 km;风速(3 h、d)数据,数据为 NC 格式。数字高程数据:SRTM(Shuttle Reader Topography Mission)(<http://dwtkns.com/srtm/>)由美国太空总署(NASA)和国防部国家测绘局(NIMA)联合测量,90 m。雪覆盖因子通过美国国家航空航天局网站(NASA)获取;所有数据最终均重采样到 1 km。

1.3 研究方法

1.3.1 RWEQ 模型

$$SL = \frac{2z}{sp^2} \times Q_{\max} \times e^{-(z/sp)^2} \tag{1}$$

$$Q_{\max}=109.8\times(WF\times EF\times SCF\times K'\times C)\tag{2}$$

$$sr=150.71\times(WF\times EF\times SCF\times K'\times C)^{-0.3711}\tag{3}$$

式中:SL 为实际风蚀量(kg/m²);Q_{max}为实际风力的最大输沙能力(kg/m);sr 为实际关键地块长度(m)。

1.3.2 风蚀预报模型

$$Q_a=10\times\hat{C}\times\sum_{j=1}\langle T_j\times\exp\left\{a_1+\frac{b_1}{z_0}+c_1\times[(A\times U_j)^{0.5}]\right\}\rangle\tag{4}$$

$$Q_b=10\times\hat{C}\times\sum_{j=1}\langle T_j\times\exp[a_2+b_2\times VC^2+c_2/(A\times U_j)]\rangle\tag{5}$$

$$Q_c=10\times\hat{C}\times\sum_{j=1}\langle T_j\times\exp[a_3+b_3\times VC+c_3\times\ln(A\times U_j)/\ln(A\times U_j)]\rangle\tag{6}$$

式中:Q_a、Q_b和 Q_c分别为大田条件下耕地、林草地和沙地的土壤风蚀模数(t/(hm²·a));C 为尺度修订系数;A 为风速修订系数;U_j为气象站整点风速统计中高于临界侵蚀风速的第 j 级风速;T_j为风蚀活动发生月份内风速为 U_j的累计时间(min);VC 为植被覆盖度(%);a、b、c 为常数项。

2 结果与分析

2.1 RWEQ 模型和风蚀预报模型模拟结果验证

为了比较 2 个风蚀模型对土壤风蚀状况的模拟精度,利用文献调查法收集了内蒙古土壤风蚀模数不同年份不同地点的通过¹³⁷Cs 示踪技术所获得的数据^[18-21](表 1)。

将 2 个模型结果进行对比,虽然多年平均土壤风蚀模数处于同一数量级,且多年趋势较为一致,但仍

然存在差异(图 2),究其原因主要为:(1)参数的时间尺度不匹配,风蚀预报模型中所用到的风速数据为小时数据,风速时间分辨率高,模拟到的风蚀量较大,而 RWEQ 模型采用的风速数据为日值;(2)传感器不同,模型模拟中使用的植被盖度数据采用遥感反演获取,并不能完全代表当地实际的植被状况和湿度状况,这些使得模型预测值与¹³⁷Cs 示踪技术得到的土壤风蚀模数之间存在差异。

表 1 实际风蚀量的观测点

采样点	经纬度/(°)	¹³⁷ Cs 示踪技术风蚀/ (t·hm ⁻² ·a ⁻¹)	参考文献
1	115.55E,42.33N	3.51	
2	115.24E,41.92N	7.99	
3	115.24E,41.86N	4.27	
4	115.26E,41.88N	1.81	
5	115.49E,42.11N	4.18	
6	115.17E,41.76N	3.10	吴晓光 ^[18]
7	115.34E,41.96N	37.92	
8	115.33E,42.05N	3.60	
9	116.10E,43.76N	3.91	
10	115.77E,44.03N	3.05	
11	115.83E,43.96N	5.81	
12	115.62E,44.11N	3.60	
13	114.23E,42.13N	3.50	
14	114.09E,42.05N	3.60	刘纪远等 ^[19]
15	114.18E,42.09N	3.50	
16	114.59E,42.19N	31.05	
17	113.45E,42.04N	14.40	胡云峰等 ^[20]
18	113.23E,41.82N	28.80	
19	116.09E,43.76N	19.05	Li 等 ^[21]

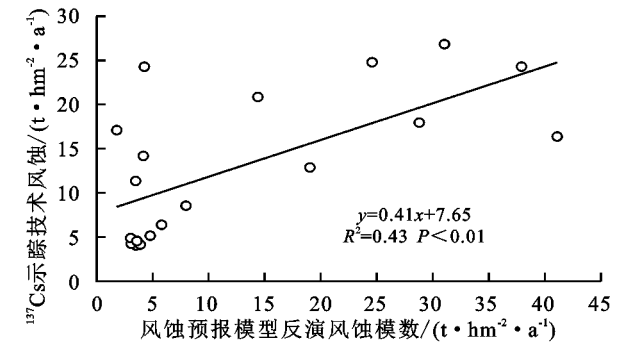
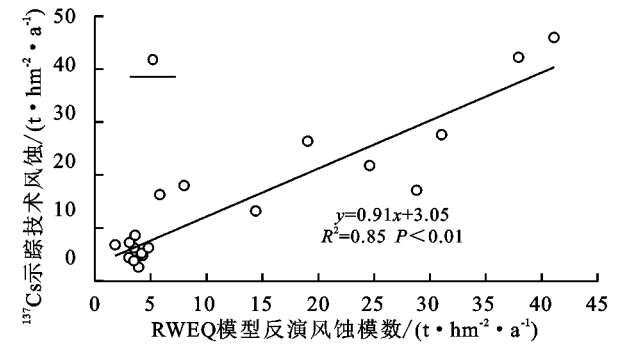


图 2 土壤风蚀预测值和¹³⁷Cs 示踪技术风蚀的相关性

2.2 土壤风蚀时空分布特征

2000—2017 年,2 种模型风蚀模数变化较为相似,均呈显著下降趋势(图 3)。总体上,风蚀预报模型计算的风蚀模数高于 RWEQ 模型。2 种模型风蚀模数最低值均出现在 2011 年,风蚀预报模型为 31.92 t/(hm²·a),RWEQ 模型为 21.67 t/(hm²·a)。2000 年后,RWEQ 模型中平均风蚀模数每年降低 0.73 t/(hm²·a),风蚀预报模型降低 1.18 t/(hm²·a)。

本文依据中国水利部提出的风蚀强度分级标准,对研究区的风蚀状况进行评价,标准为:风蚀模数<2 t/(hm²·a)为微度风蚀,2~15 t/(hm²·a)为轻度风蚀,25~50 t/(hm²·a)为中度风蚀,50~80 t/(hm²·a)为强度风蚀,80~150 t/(hm²·a)为极强风蚀,>150 t/(hm²·a)为剧烈风蚀。从空间分布来看,2 种模型 2000—2017 年风蚀模数均值分布(图 4)相似,研究区土壤风蚀强度总体上以微度和轻度风蚀为主,其中剧烈侵

蚀在整个研究区的占比较小(RWEQ 为 1.79%,风蚀预报模型为 5.45%),主要分布于北方风沙区的西南部(图 5)。相较于风蚀预报模型,RWEQ 模型模拟的风蚀模数在浑善达克沙地和科尔沁沙地较高。

通过对 2 种模型模拟的土壤风蚀模数进行趋势分析得出,2 种模型的趋势在空间分布上较为相似,研究区风蚀模数整体上以不显著下降为主(RWEQ 为 89.74%,风蚀预报模型为 72.05%),下降区间在 $-5\sim 0$,显著减少的区域位于北方风沙区西北部,风蚀增加的区域主要集中在北方风沙区东北以及西北黄土高原区,总体上占比较小(图 6)。

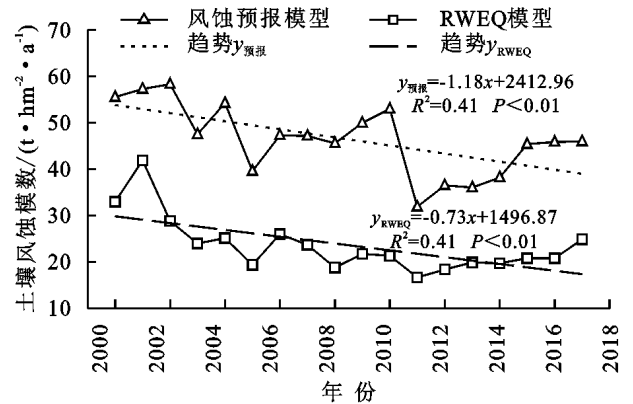
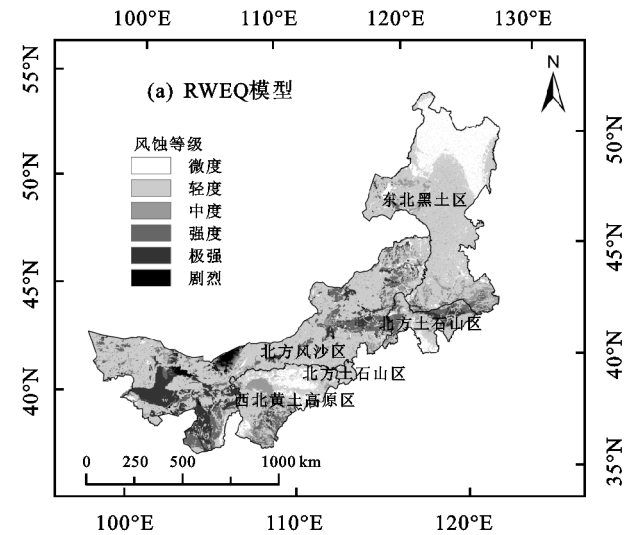


图 3 2000—2017 年内蒙古自治区土壤风蚀模数年际分布

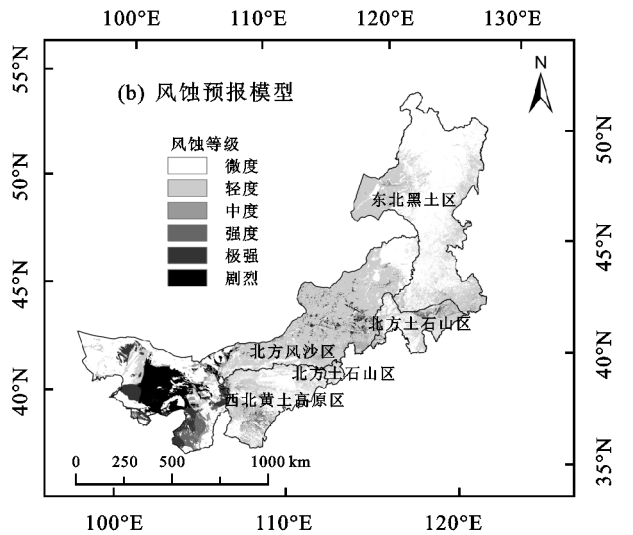


图 4 2000—2017 年内蒙古自治区土壤风蚀模数均值空间分布

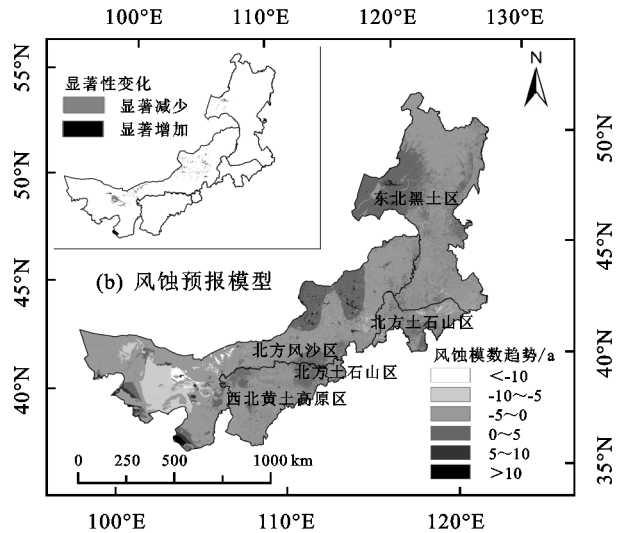
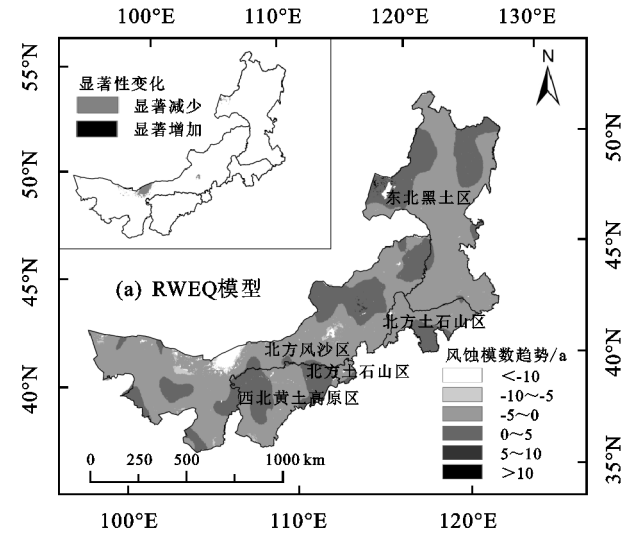


图 5 2000—2017 年内蒙古自治区土壤风蚀模数趋势空间分布

2.3 影响土壤风蚀的因素

由于 RWEQ 模型在该区域的拟合精度较高($R^2 = 0.85, P < 0.01$),本文在研究土壤风蚀的影响因素时采用该模型模拟的结果进行分析。为了验证分析结果的可靠性,将每个影响因素平均划分为若干个区段,并对每个区段的风蚀模数进行均值计算。

风力是土壤风蚀最直接的动力来源,大风天数越多,风蚀能力越强。研究区 82.92%的区域风蚀模

数与大风天数呈正相关,RWEQ 模型达到极显著相关的面积为 58.21%($P < 0.01$),且多年大风天数多的区域空间相关性也高(图 7)。拟合分析的结果表明,大风天数与风蚀模数呈极显著正相关($R^2 = 0.98, P < 0.01$),大风天数越多,造成的土壤风蚀越严重。

降水量是影响土壤风蚀的主要因素之一。2000—2017 年多年平均降水量与 RWEQ 模型模拟的风蚀模数基本呈负相关(图 7),主要集中于东北黑土区,

呈显著负相关的区域面积达到 30.16%，说明降水量可以在很大程度上抑制土壤风蚀，而降水量也正是 RWEQ 模型中的重要参数，验证了该模型在该区域模拟的有效

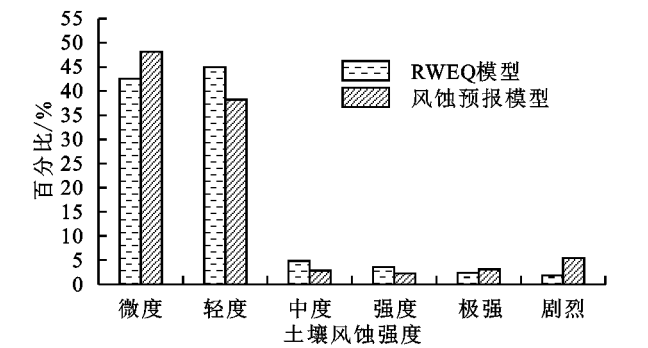


图 6 2000—2017 年内蒙古自治区土壤风蚀强度及趋势量化占比

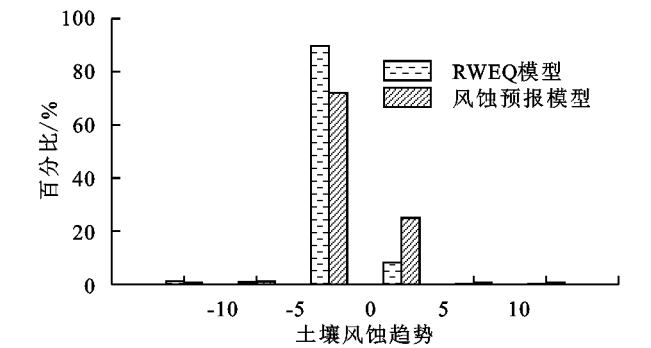
植被作为陆地生态系统的主体，是气候变化的敏感指示器，在一定程度上可以抵御风沙，净化空气。从图 7 还可看出，空间上土壤风蚀与植被覆盖度(VFC)呈正相关的区域主要分布于东北黑土区，占研究区总面积的 45.73%。从拟合曲线来看，随着植被覆盖度升高，土壤风蚀显著下降($R^2=0.94, P<0.01$)。

3 讨论

本文以内蒙古自治区为研究区，基于气象数据和遥感数据，利用 RWEQ 模型和风蚀预报模型对研究区 2000—2017 年土壤风蚀的时空变化进行分析时，2 个模型均具有较好的拟合性，均能客观反映内蒙古自治区的土壤风蚀情况。RWEQ 模型在该区域该时段的拟合精度略高于风蚀预报模型。往期亦有很多学者在不同研究区利用不同的风蚀模型进行了一系列研究，刘珺等^[22]利用 RWEQ 和 WEPS 模型对中国北方农牧交错带土壤风蚀进行模拟表明，2 个模型均能客观预测北方农牧交错带土壤风蚀情况，¹³⁷Cs 示踪技术风蚀与预测值具有较好的相关性；王旭洋^[23]基于 RWEQ 模型、风蚀预报模型、WEPS 模型等对中国北方农牧交错带风蚀潜力进行了研究，模型的模拟结果能够在客观上反映中国北方农牧交错带的土壤风蚀潜力。

RWEQ 模型和风蚀预报模型模拟的多年风蚀模数均值的空间分布显示，2 个模型剧烈风蚀的区域主要分布在北方风沙区西部，而东北黑土区几乎没有风蚀，表明内蒙古自治区今后风蚀防治的重点仍集中于北方风沙区的巴丹吉林沙漠、腾格里沙漠、乌兰布和沙漠、毛乌素沙地以及浑善达克沙地和科尔沁沙地，应加强沙地附近农田和草地的保护，防止进一步沙化。从 2 个模型空间上的趋势变化来看，2000—2017 年以来，土壤风蚀不显著增加的区域主要位于西北黄土高原区，显著降低的区域位于北方风沙区西南部，表明在一定程度上，国家生态工程的实施对于内蒙古自治区土壤风蚀的治理起到了积极作用。时间上，2 个模型模拟的年风蚀模数的变化趋势基本相同，总体呈现显著下降。相关研究中，迟文峰等^[24]在基于 RWEQ 模型的内蒙古

性。从拟合效果来看，降水量在约 $<100\text{ mm}$ 时，土壤风蚀既有高值亦有低值，影响并不显著，当降水量 $>100\text{ mm}$ 时可以显著抑制土壤风蚀的进程。



高原土壤风蚀的研究中，对该研究区的土壤风蚀年际变化的空间分布进行了研究，通过与本文的均值分布图比较，二者风蚀高值区和低值区基本保持一致，验证了本文结果的可靠性。韩柳^[25]曾对我国北方风蚀区风速时空变化特征进行了研究，表明 1970—2017 年我国北方风蚀区年均风蚀模数呈现波动式下降的变化状态，且最低值亦位于 2011 年。

气象因子是影响内蒙古自治区土壤风蚀的重要因素，3 种影响因素均与土壤风蚀模数变化呈显著相关。其中，大风天数与土壤风蚀呈显著正相关关系，土壤风蚀随着大风天数的增多而增加。当降水量 $>100\text{ mm}$ 时，降水量对于土壤风蚀才有显著的抑制效果。降水量 $<100\text{ mm}$ 时，风蚀模数与降水量呈显著正相关，通过分析 2000—2017 年内蒙古自治区年均降水量、气温和植被覆盖度发现，降水量 $<100\text{ mm}$ 的地区主要集中于北方风沙区西南部，年均气温整体位于 $9\sim12\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，整体上植被覆盖度偏低，气温的上升幅度大于降水量，加剧了干旱、高温等极端气候事件的发生，这导致该区域整体气候变干，影响当地植被的生长状况。故而研究结果出现降水量在较少的情况下反而与土壤风蚀呈显著正相关的情况。植被覆盖度在 $<65\%$ 时，对土壤风蚀作用的敏感性高，这与吴晓光等^[11]的研究结果相似，表明 3 种气候因子均能对土壤风蚀产生显著的影响。其他学者对于土壤风蚀的归因也做了很多工作，林锦阔^[26]在研究河西地区土壤侵蚀时空分异及其驱动因素时也表明，平均风速、大风日数、NDVI 共同主导了河西地区的土壤风蚀速率，与本文提到的影响因素较为一致。巩俐等^[27]对于五道梁地区土壤风蚀变化特征及气象影响因子进行分析时发现，降水是影响风蚀的主要因子。杨雪琴等^[28]在进行基于 RWEQ 模型的石渠县土壤风蚀评价及影响因素分析的研究中发现，气象因子为土壤风蚀最主要的影响因子，植被指数的空间分布特征与土壤风蚀模数空间分布特征契合，对其影响较

深,而气象因素在不同的时期有不同的主力因子,本文中亦有极个别范围较小的区域虽然降水量较多,但风蚀模数依旧偏大的情况存在,可见风蚀在一定程度上亦是多种因素共同主导。因此,影响土壤风蚀的驱动因素不是单一的,而是多个因素混合造成的结果,本文在研究过程中由于数据源不足,考虑的因素

尚不充分。¹³⁷Cs 示踪结果是过去近 50 年的平均值,文中采用 2000—2017 年的计算结果与 50 年¹³⁷Cs 示踪结果均值对比验证,存在一定不足。在下一步工作中,将通过野外试验数据对模型的拟合效果进行验证,对于土壤风蚀的长时序高空间分辨率的时空变化研究以及归因分析仍是一项亟待解决的科学问题。

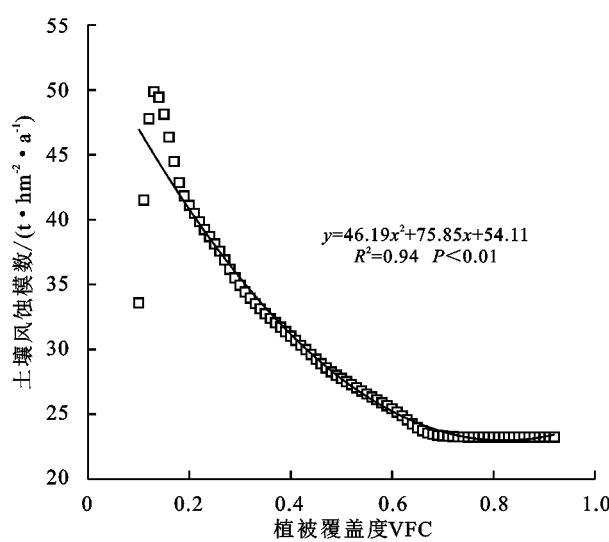
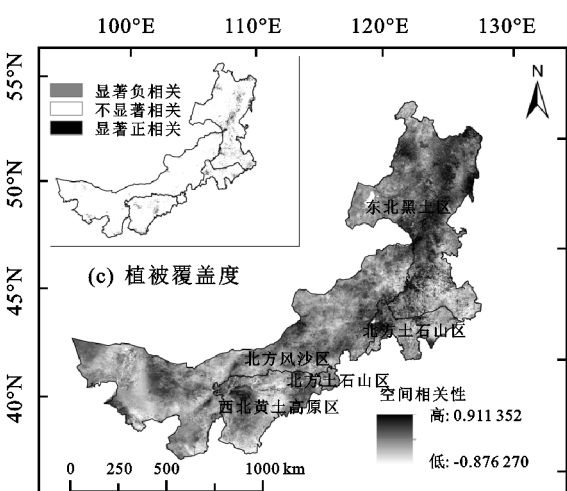
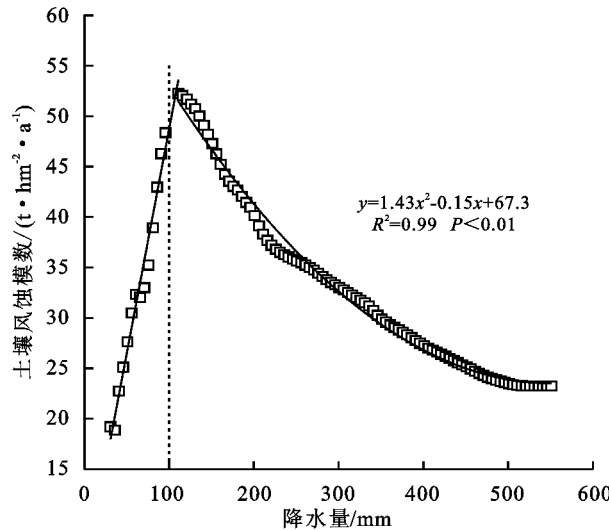
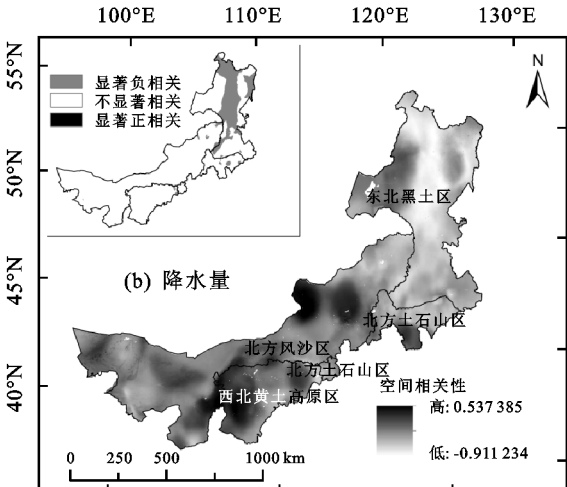
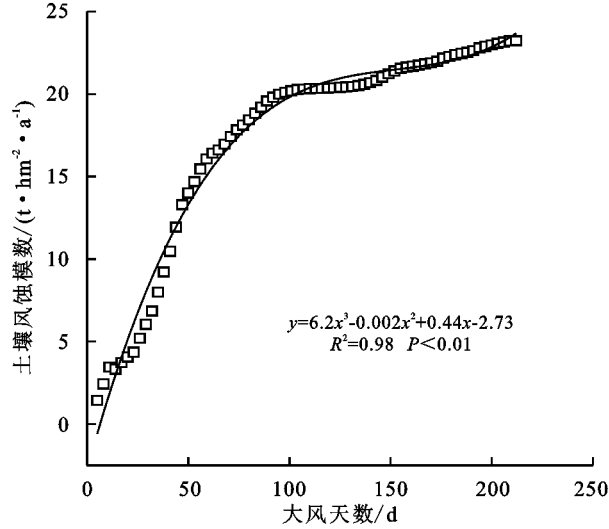
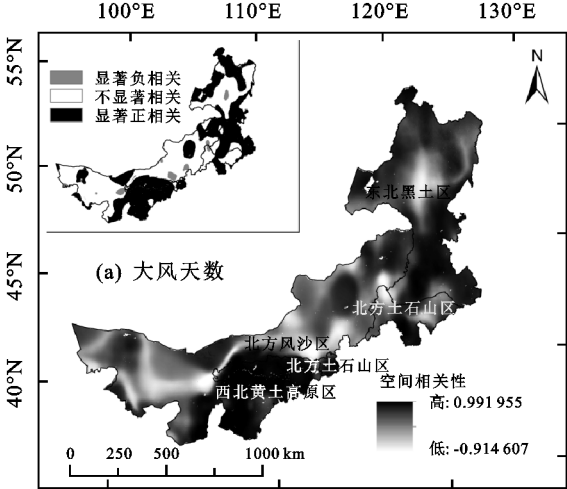


图 7 风蚀模数与影响因子的相关性拟合效果

4 结论

(1)RWEQ 模型($R^2=0.85$, $P<0.01$)与风蚀预报模型($R^2=0.43$, $P<0.01$)拟合的风蚀模数均能与 ^{137}Cs 示踪技术风蚀的值表现出较好的相关性,且在该时段该研究区,RWEQ 模型的拟合精度更高。

(2)2000—2017 年,研究区土壤风蚀变化较为显著,两模型在时间上呈波动性变化,总体表现为显著下降趋势,最低值均出现在 2011 年,风蚀预报模型模拟的风蚀模数整体上略大于 RWEQ 模型。空间上,2 个模型模拟的高值区与低值区分布相近,高值区主要分布于北方风沙区,低值区主要分布于东北黑土区,该地区几乎没有风蚀。

(3)大风天数(风速 $>5\text{ m/s}$)的变化表现出与土壤风蚀的显著正相关,证明区域性强风依然是导致土壤风蚀加重的主要原因之一。降水量与植被覆盖度均与土壤风蚀呈负相关,二者的数值越高,土壤风蚀模数越低,说明在一定程度上增加降水量和植被覆盖度可以抑制土壤风蚀的进程。

参考文献:

- [1] 王燕.武川县旱作农区土壤风蚀特征研究及风蚀量估算[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2019.
- [2] 张春来,宋长青,王振亭,等.土壤风蚀过程研究回顾与展望[J].地球科学进展,2018,33(1):27-41.
- [3] Bagnold R A. The physics of blown sand and desert dunes[M].London: Methuen,1941.
- [4] Woodruff N P, Siddoway F H. A wind erosion equation[J].Soil Science Society of America Journal,1965,29(5):602-608.
- [5] Pasak V. Wind erosion on soil[J].VUM Zbraslaav, Scientific Monographs,1973,930:78-89.
- [6] Bocharov A P. A description of devices used in the study of wind erosion of soils [M]. New Delhi: Oxo-nian Press,1984.
- [7] Gregory J M, Borrelli J, Fedler C B. Team: Texas erosion analysis model[C]// Proceedings of 1988 Wind Erosion Conference. Lubbock. Texas. Texas Technology University,1988:88-103.
- [8] Hagen L J. Wind Erosion Prediction System (WEPS) Wind Erosion Research Unit[R].Technical Documentation,1996.
- [9] Fryrear D W, Chen W N, Lester C. Revised Wind Erosion Equation[J].Annals of Arid Zone,2001,40(3):265-279.
- [10] 高尚玉,张春来,邹学勇,等.京津风沙源治理工程效益[M].2 版.北京:科学出版社,2012.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 于宝勒,吴文俊,赵学军,等.内蒙古京津风沙源治理工程土壤风蚀控制效益研究[J].干旱区研究,2016,33(6):1278-1286.
- [14] 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.
- [15] 张洋,李占斌,张翔,等.内蒙古风蚀水蚀交错区土壤侵蚀的空间分布特征[J].内蒙古农业大学学报(自然科学版),2016,37(6):50-58.
- [16] 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):1024-1033.
- [17] 泉涛,王静璞,党文硕,等.基于相对降水利用率的内蒙古风蚀区沙漠化研究[J].安徽农业科学,2021,49(8):72-76.
- [18] 吴晓光.内蒙古阴山北麓生态退耕对土壤风蚀的影响及效应研究[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2019.
- [19] 刘纪远,齐永青,师华定,等.蒙古高原塔里亚特-锡林郭勒样带土壤风蚀速率的 ^{137}Cs 示踪分析[J].科学通报,2007,52(23):2785-2791.
- [20] 胡云锋,张云芝.内蒙古浑善达克沙地南缘 ^{137}Cs 、 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 复合示踪研究[J].地理学报,2019,74(9):1890-1903.
- [21] Li M, Yao W Y, Shen Z Z, et al. Erosion rates of different land uses and sediment sources in a watershed using the ^{137}Cs tracing method: Field studies in the Loess Plateau of China[J/OL].Environmental Earth Sciences, 2016, 75 (7): 591. <https://doi.org/10.1007/s12665-015-5225-6>.
- [22] 刘珺,郭中领,常春平,等.基于 RWEQ 和 WEPS 模型的中国北方农牧交错带潜在风蚀模拟[J].中国沙漠,2021,41(2):27-37.
- [23] 王旭洋.基于不同风蚀模型的中国北方农牧交错带风蚀潜力研究[D].石家庄:河北师范大学,2020.
- [24] 迟文峰,匡文慧,贾静,等.京津风沙源治理工程区 LUCC 及土壤风蚀强度动态遥感监测研究[J].遥感技术与应用,2018,33(5):965-974.
- [25] 韩柳.我国北方风蚀区风速时空变化特征及其对风蚀气候侵蚀力的影响[D].山东 烟台:鲁东大学,2019.
- [26] 林锦阔.河西地区土壤侵蚀时空分异及其驱动因素[D].兰州:兰州大学,2020.
- [27] 巩俐,王发科,李积芳,等.五道梁地区土壤风蚀变化特征及气象影响因子分析[J].青海草业,2020,29(3):59-63.
- [28] 杨雪琴,丁锐,谢骏锴,等.基于 RWEQ 模型的石渠县土壤风蚀评价及影响因素分析[J].湖北农业科学,2019,58(15):26-29.