

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.

基于RWEQ和WEPS模型的中国北方 农牧交错带潜在风蚀模拟

刘珺¹,郭中领¹,常春平¹,王仁德²,李继峰¹,李庆²,王旭洋¹

(1.河北师范大学 资源与环境科学学院,河北 石家庄 050024; 2.河北省科学院 地理科学研究所,河北 石家庄 050021)

摘要:中国北方农牧交错带是一个典型的受气候和人类活动共同影响的敏感区域,存在严重的土壤风蚀和土地退化问题。风蚀模型是目前获得区域风蚀模数的最有效方法之一。利用修正风蚀方程(RWEQ模型)和风蚀预报系统(WEPS模型)对北方农牧交错带2000—2012年潜在风蚀进行评估。结果表明:两个模型模拟得到的多年平均潜在风蚀量不同,但空间分布、年际减少趋势和季节分布等特征基本相似;风速、土壤湿度和土地利用变化对土壤风蚀均有影响。RWEQ模型($R^2=0.45, P<0.01$)和WEPS模型($R^2=0.57, P<0.01$)中实测值与预测值具有较好的相关性。WEPS模型($NSC=0.54$)纳什系数较RWEQ模型($NSC=0.27$)高。RWEQ模型和WEPS模型均能客观预测北方农牧交错带土壤风蚀情况,WEPS模型预测精度较好。

关键词:风蚀模型;土壤风蚀模数;时空分布;影响因素

文章编号: 1000-694X(2021)02-027-11

DOI: 10.7522/j.issn.1000-694X.2020.00122

中图分类号: S157

文献标志码: A

0 引言

风蚀过程是风力作用下地表物质脱离地表、搬运和再堆积过程的统一^[1],也是发生于干旱、半干旱地区及部分半湿润地区土地沙漠化的首要环节^[2]。现场直接观测^[3]、稀土元素或放射性同位素示踪(如¹³⁷Cs、⁷Be)^[4]和风蚀模拟^[5-7]是定量确定风蚀量的主要方法。目前,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^[8],现有众多风蚀模型用来评估不同尺度的风蚀情况^[9]。

20世纪60年代后,计算机革命与技术更新发展使得风蚀研究定量模型化,Woodruff等^[10]提出了第一个具有预报意义的风蚀方程(WEQ)。随后,美国又开发了修正风蚀方程(RWEQ)^[6]、风蚀预报系统(WEPS)^[11]、德克萨斯分析模型(Team)^[12]、风蚀随机仿真模型(WESS)^[13]等。RWEQ模型和WEPS模型成为这一时期田块尺度风蚀模型的代表。此外,各国学者还建立了一系列区域尺度的风

蚀模型,包括风蚀评估模型(WEAM)^[14]、综合风蚀模型(IWEMS)^[5]、澳大利亚土地可蚀性模型(AUS-LEM)^[9]、中国第一次全国土壤风蚀普查模型(NWESMC)^[15]等。

中国北方农牧交错带由于其特殊的地理位置和气候因素,冬春季风蚀、沙尘暴频发,严重影响了当地及其下风向京津冀地区的环境质量,成为影响区域生态环境安全和社会经济持续健康发展的关键制约因素之一^[15-16]。巩国丽等^[17]应用RWEQ模型评估了内蒙古锡林郭勒盟草地覆盖变化对生态系统防风固沙功能的影响。迟文峰等^[18]利用RWEQ模型反演了20世纪90年代以来内蒙古高原土壤风蚀模数,并分析其时空变化特征及其影响因素。申陆等^[19]应用RWEQ模型估算了浑善达克沙漠化防治生态功能区的土壤风蚀状况,同时分析了土壤风蚀的主要影响因子。陈莉等^[20]采用WEPS模型对天津郊区土壤风蚀起尘量进行估算。Pi等^[21]利用

收稿日期:2020-09-26; 改回日期:2020-12-02

资助项目:国家自然科学基金项目(41877066,41871002,41901001);河北省自然科学基金项目(D2018205192,D2018205212);第三批河北省青年拔尖人才计划项目(13505197)

作者简介:刘珺(1994—),女,山西阳泉人,硕士研究生,主要从事土壤风蚀研究。E-mail: lj9499lj@163.com

通信作者:郭中领(E-mail: gzldhr@163.com)

WEPS模型对新疆地区棉田、麦田以及裸土的 PM_{10} 释放量进行模拟,证实棉田和麦田的 PM_{10} 损失量低于裸土。这些研究表明,区域版本的RWEQ模型和WEPS模型可以很好地模拟北方地区的风蚀情况。但是,以往研究侧重单一模型对风蚀热点区域土壤风蚀状况模拟,而对同一研究区及数据源下模型优选揭示不足。因此,选取RWEQ模型和WEPS模型分别模拟中国北方农牧交错带农田、草地和沙地潜在风蚀模数,分析比较两种模型模拟所得土壤风蚀模数的时空变化以及主要影响因素,为定量评价中国北方的土壤风蚀提供依据。

1 研究区概况

北方农牧交错带是指地处温带季风气候与温带大陆性气候、干旱与湿润、东北平原与内蒙古高原、农业与牧业的复合过渡区,是人类与气候相互作用最激烈的地区之一^[22]。自农牧交错带概念提出以来,有关农牧交错带及范围划分依据存在一定争议^[23],但核心区域基本相同。本研究采用Guo等^[24]对中国北方农牧交错带的地理范围界定(36°30′—46°42′N, 106°16′—124°51′E, 图1),包括内蒙古、辽宁、吉林、河北、山西、陕西等省份,面积543 616 km²。研究区内年均风速为2.49 m·s⁻¹,最大风速16—24 m·s⁻¹,年内降水集中在夏秋两季,年降水300—450 mm;土地利用类型丰富,但由于生态环境敏感,沙漠化急剧发展,大风和沙尘暴天气多发。

2 方法与数据

2.1 风蚀模型

2.1.1 修正风蚀方程(RWEQ模型)

修正风蚀方程(Revised Wind Erosion Equation)是估算田块尺度风蚀模数最常用的经验模型之一^[25]。由于充分考虑了气候和地表因素,数据获取方便,从而被广泛应用。中国研究人员将RWEQ模型应用于土壤风蚀区,估算结果得到了普遍验证^[17-19,26]。在本文中,使用RWEQ模型以半月风蚀

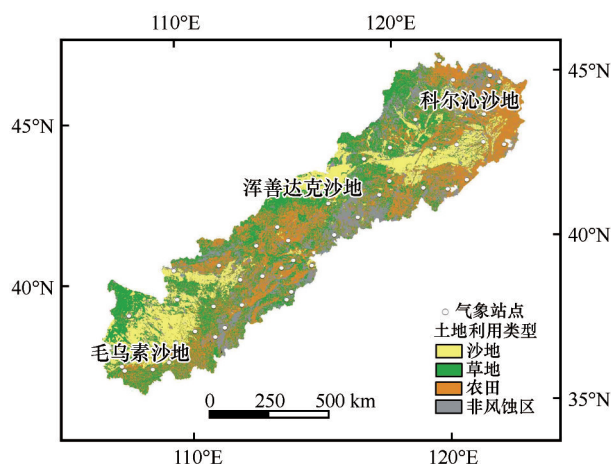


图1 研究区概况

Fig.1 Study area

周期计算潜在风蚀模数。RWEQ模型的基本方程为^[25]:

$$Q_x = Q_{\max} \left[1 - e^{\left(\frac{x}{s} \right)^2} \right] \quad (1)$$

式中: Q_x 为距上风向 x (距迎风方向的距离)处的风沙通量($kg \cdot m^{-1}$); Q_{\max} 为风力的最大输沙能力($kg \cdot m^{-1}$); s 为关键地块长度(m),RWEQ模型将其定义为风沙传输最大距离的63%^[6]。通过大量实测数据拟合出 s 和 Q_{\max} 的估算方程:

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

$$s = 150.71(WF \times EF \times SCF \times K' \times COG)^{-0.3711} \quad (3)$$

式中: WF 表示气候因子($kg \cdot m^{-1}$); EF 表示土壤可蚀性因子(无量纲); SCF 表示土壤结皮因子(无量纲); K' 表示土壤糙度因子(无量纲); COG 表示植被盖度因子(无量纲)。

(1)气候因子(WF):

$$WF = \sum_{i=1}^N \rho \frac{(U_2 - U_i)^2 U_2}{gN} \times N_d \times SW \times SD \quad (4)$$

式中: U_2 为2 m处风速($m \cdot s^{-1}$); U_i 为2 m处临界风速(假定为5 $m \cdot s^{-1}$); N 为风速的观测次数; N_d 为试验的天数(d); ρ 为空气密度($kg \cdot m^{-3}$); g 为重力加速度($m \cdot s^{-2}$),本文取9.8 $m \cdot s^{-2}$; SW 为土壤湿度因子(无量纲); SD 为积雪覆盖度因子(无量纲)。

(2)土壤可蚀性因子(EF)和土壤结皮因子(SCF):

$$EF = \frac{29.09 + 0.31Sa + 0.17Si + 0.33Sa/Cl - 2.59OM - 0.95CaCO_3}{100} \quad (5)$$

$$SCF = \frac{1}{1 + 0.0066(Cl)^2 + 0.021(OM)^2} \quad (6)$$

式中: Sa 为土壤砂粒含量(%); Si 为土壤粉粒含量(%); Cl 是黏土含量(%); Sa/Cl 为土壤砂粒和黏土

含量比; OM 为有机质含量(%); $CaCO_3$ 为碳酸钙含量(%). 由于土壤质地和有机质含量年际变化缓慢, 假设土壤可蚀性因子和结皮因子不会随着时间而改变。

(3) 植被盖度因子(COG):

地表作物以及残茬的数量和定向对风蚀有明显的影 响。该因子用来确定农作物倒放残茬(7)以及作物覆盖(8)对风蚀的影响:

$$SLR_f = e^{-0.0438(SC)} \quad (7)$$

$$SLR_c = e^{-5.614(cc^{0.7366})} \quad (8)$$

式中: SLR_f 为倒放残茬的土壤流失率(无量纲); SC 为倒放残茬地表覆盖率(无量纲); SLR_c 为作物覆盖土壤流失比率(无量纲); cc 是地表植被覆盖度(无量纲)。

(4) 地表粗糙度因子:

$$K' = \cos \alpha \quad (9)$$

式中: α 表示地形坡度^[19], 由 ArcGIS 10.2 从 DEM 数据中提取。

2.1.2 风蚀预报系统(WEPS 模型)

风蚀预报系统(Wind Erosion Prediction System)是一种基于物理的模型, 它以小于天(例如小时)的时间步长模拟天气、地表条件和土壤侵蚀^[27]。WEPS 模型手册规定, 当 10 m 高度处的最大风速超过 $8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, 将启动风蚀子模块^[28]。在本文中, WEPS 模型的潜在风蚀模数以日风蚀周期计算。每个步骤的计算和所需的基本方程如下:

(1) 风蚀通量

$$Q = 0.4u_*^2(u_* - 0.8u_{*c}) \quad (10)$$

式中: Q 为单宽输沙量($\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}$); u_* 为摩阻风速($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$); u_{*c} 为临界摩阻风速($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)。可见, 风是否具有搬运能力, 主要取决于摩阻风速和临界摩阻风速, 输沙的驱动力是摩阻风速 u_* 大于临界摩阻风速 u_{*c} ^[29]。

(2) 摩阻风速 u_*

$$u_* = u_{*f} \left(\frac{z_0}{z_{0f}} \right)^{0.067} \quad (11)$$

式中: u_{*f} 表示气象站摩阻风速($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)^[28]; z_{0f} 表示空气动力学糙度, 在 WEPS 模型中取 25 mm; z_0 为当地空气动力学糙度, 根据李智广等^[30]方法计算得出。

(3) 临界摩阻风速 u_{*c}

临界摩阻风速充分考虑了地表土壤质地因素、

倒放植被因素和地表湿度因素:

$$u_{*c} = WUB_{*ts} + WUC_{*ts} + WUCW_{*ts} \quad (12)$$

式中: WUB_{*ts} 表示光滑平坦地表摩阻风速($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$); WUC_{*ts} 表示由倒放植被覆盖率引起的临界摩阻风速($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$); $WUCW_{*ts}$ 表示地表含水率引起的临界摩阻风速($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)。WEPS 模型中临界起动摩阻风速的最小值设为 $0.35 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

由于农牧交错带研究区面积较大, 一些土壤质地数据难以获取, 导致 WUB_{*ts} 误差过大。Pi 等^[31]用 Lu-Shao 模型^[32]中的 u_{*i} 代替了 SWEEP 模型中的 u_{*c} , 并得到了很好的验证^[33]。因此, 本文使用 IWEMS 模型中 $u_{*i}(ds)$ 代替 WEPS 模型中的 WUB_{*ts} 。

① 光滑平坦地表摩阻风速 WUB_{*ts}

$$WUB_{*ts} = \sqrt{\beta_1 \left(\sigma_p g d + \frac{\beta_2}{\rho d} \right)} \quad (13)$$

式中: σ_p 表示颗粒与空气密度比; d 表示颗粒直径(m); g 表示重力加速度($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$); ρ 表示空气密度($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$); 本文中 β_1 取 0.0123, β_2 取 $3 \times 10^{-4} \text{ kg}\cdot\text{s}^{-2}$ 。

② 倒放植被覆盖率引起的临界摩阻风速 WUC_{*ts}

$$SFC_{cV} = (1 - SF_{cV})BFF_{cV} \quad (14)$$

$$WUC_{*ts} = 0.02 + SFC_{cV} \quad (15)$$

式中: SF_{cV} 为地表覆盖土块/结皮或石块的面积百分比(不起沙面积百分比); BFF_{cV} 为倒放植被覆盖面积。

③ 地表含水率引起的临界摩阻风速 $WUCW_{*ts}$

$$WUCW_{*ts} = 0.48 \frac{HRO_{WC}}{HR15_{WC}}, \frac{HRO_{WC}}{HR15_{WC}} > 0.2 \quad (16)$$

式中: HRO_{WC} 为地表含水率, 由遥感数据反演获取; $HR15_{WC}$ 为 1.5 MPa 时地表含水率, 由 WEPS 模型手册中自带数据计算。

2.2 数据来源

气象数据来源于 2000—2012 年中国气象台站数据(中国气象科学数据共享服务网, <http://data.cma.cn>), 主要包括风速、温度、降水量、日照时数等, 其中风速采用 1 日 24 小时风速数据。NDVI 数据来源于 USGS 网站(<https://www.usgs.gov>)提供的 MODIS 数据产品, 主要用到 MOD13A2、MOD11A2 和 MOD09A1, 同时利用 MODIS 数据反演地表含水率。土地利用数据来自于中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn>) 2000—2010 年

1 km 栅格数据。采用土地利用类型的初步分类(林地、草地、农田、水体、居民用地、未利用地、沙地),其中,林地、水体、居民用地和未利用地视为非风蚀区。土壤数据集来自于中国西部环境与生态科学数据中心(<http://westdc.westgis.ac.cn>)的基于世界土壤数据库(HWSD)的中国土壤数据集,用于计算各地表土壤因子。DEM数据使用中国西部环境与生态科学数据中心(<http://westdc.westgis.ac.cn>)的中国 1 km 分辨率数字高程模型数据集。本文模拟潜在土壤风蚀量的典型田块尺度为 100 m×100 m^[24]。

3 结果与分析

3.1 RWEQ 模型和 WEPS 模型模拟结果

为了比较两个风蚀模型对土壤风蚀状况的模拟精度,收集中国北方农牧交错带实测土壤风蚀模数,具体地点信息见表 1。RWEQ 模型和 WEPS 模型反演的潜在风蚀模数与实测值具有较好的线性关系,RWEQ 模型的 $R^2=0.45(P<0.01)$,WEPS 模型的 $R^2=0.57(P<0.01)$,说明本文的 RWEQ 模型和 WEPS 模型均能较为客观地反映北方农牧交错带的潜在风蚀情况(图 2)。WEPS 模型纳什系数(模型有效系数, $NSC=0.54$)高于 RWEQ 模型纳什系数 $NSC=0.27$,WEPS 模型预测精度比 RWEQ 模型略高。

将本文两个模型估算潜在风蚀模数与迟文峰等^[18]测算的内蒙古高原风蚀模数相比,多年平均潜在风蚀模数处于同一数量级,但潜在风蚀模数最大值相较于迟文峰等估算值略高。原因是两项研究评估阶段和区域不同,另外本文采用小时风速数据计算风力因子,风速时间分辨率高,模拟到的风蚀量较大。RWEQ 模型与 WEPS 模型估算潜在风蚀模数与实测值相比存在不同程度的低估。原因为 RWEQ 模型中,通过 Elliot 法^[33]将中国气象站 10 m 风速数据转为 2 m 风速数据,与真实值相比存在一定偏差。另外,RWEQ 模型和 WEPS 模型由美国农业部开发,土壤质地参数为美国制,具有很强的地域性,应用于北方农牧交错带存在土壤粒径分类系统的差异,会影响模型模拟的精度。今后应加大对北方农牧交错带影响因子的实验和监测工作,不断根据野外实测数据对模型参数进行修正,提高模型模拟的准确性。

表 1 实际风蚀量的观测点
Table 1 Observation points of actual wind erosion

序号	土地利用类型	测量方法	实际侵蚀模数 ($t \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$)	参考文献
1	沙地	插杆法	243	赵羽等 ^[34]
2	农田	野外暗杆法	883.3	徐斌等 ^[35]
3	农田	粒度对比法	14.4	董治宝等 ^[36]
4	农田	粒度对比法	24.6	董治宝等 ^[36]
5	农田	粒度对比法	19.05	董治宝等 ^[36]
6	农田	粒度对比法	41.1	董治宝等 ^[36]
7	农田	粒度对比法	28.8	董治宝等 ^[36]
8	沙地	陷阱诱捕法	83.95	Li 等 ^[37]
9	沙地	¹³⁷ Cs	28.97	赵焯等 ^[38]
10	农田	陷阱诱捕法	1.08	王云超等 ^[39]
11	草地	¹³⁷ Cs	3.51	刘纪远等 ^[40]
12	草地	¹³⁷ Cs	4.18	刘纪远等 ^[40]
13	草地	¹³⁷ Cs	0.53	刘纪远等 ^[40]
14	草地	¹³⁷ Cs	4.8	刘纪远等 ^[40]
15	草地	¹³⁷ Cs	3.1	刘纪远等 ^[40]
16	农田	¹³⁷ Cs	17.65	姜洪涛 ^[41]
17	农田	¹³⁷ Cs	83.62	张加琮等 ^[42]
18	农田	¹³⁷ Cs	59	Li 等 ^[43]
19	草地	¹³⁷ Cs	3.2	Li 等 ^[43]
20	农田	¹³⁷ Cs	65	Li 等 ^[43]
21	沙地	¹³⁷ Cs	48.5	Li 等 ^[43]
22	农田	BSNE	1.96	Guo 等 ^[44]

3.2 土壤风蚀空间分布特征

为了准确地描述北方农牧交错带的土壤风蚀变化,根据《土壤侵蚀强度分级标准》(SL190-2007)^[45],将农牧交错带风蚀强度分为 6 个等级。从空间分布来看,RWEQ 模型和 WEPS 模型模拟风蚀以微度和轻度侵蚀为主,侵蚀强烈地区大都分布在沙地及沙地周边草地和农田(图 3),这与 Du 等^[46]的研究结果基本一致。RWEQ 模型模拟时,毛乌素沙地多为中度侵蚀,浑善达克沙地和科尔沁沙地部分地区能达到极强烈侵蚀,剧烈侵蚀面积较小。WEPS 模型模拟时,毛乌素沙地以强度侵蚀和极强烈侵蚀为主,浑善达克沙地和科尔沁沙地以剧烈侵蚀为主。原因是沙地地表粗糙度、植被盖度、土壤含水率都较周围地区小,沙地平均植被覆盖度大都

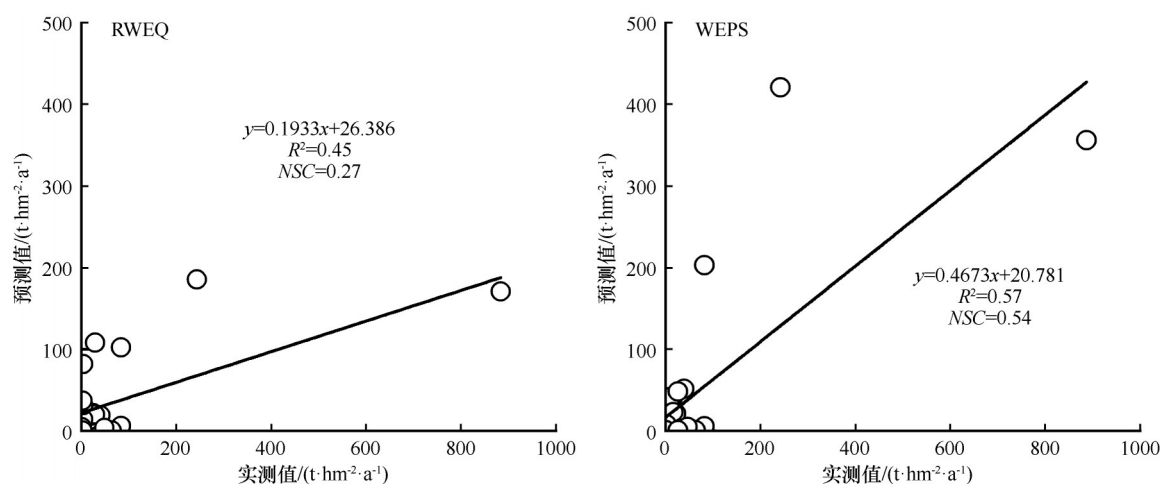


图2 土壤风蚀预测值和实测值的相关性

Fig.2 Correlation between predicted results based on RWEQ and WEPS models and measured results of soil wind erosion

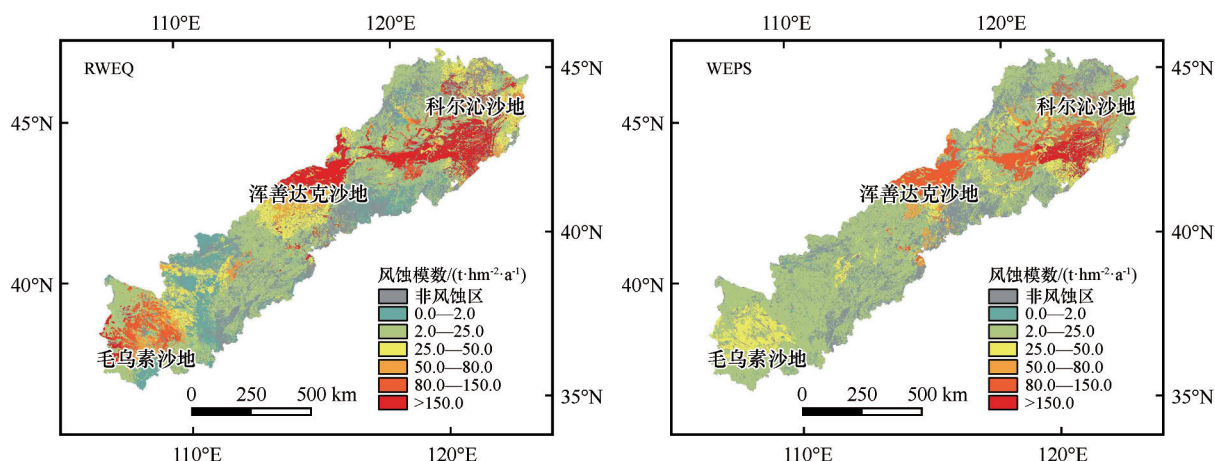


图3 2000—2012年多年平均土壤风蚀模数分布

Fig.3 Distribution of average soil wind erosion modulus based on RWEQ and WEPS models during 2000 to 2012

在20%以下,平均土壤含水率在3%以下,平均风速 $2.2\text{--}2.6\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,土粒间黏聚性弱,缺少植被保护,强风为风蚀提供了主要驱动力。

3.3 土壤风蚀时间变化特征

由图4可以看出,2000—2012年两个模型平均土壤风蚀模数的变化基本相同,呈显著下降。2001年风蚀模数达到最高,RWEQ模型为 $54.88\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$,WEPS模型为 $128.13\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$,而风蚀模数最低值均出现在2011年,RWEQ模型为 $9.18\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$,WEPS模型为 $13.33\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 。2001年后,RWEQ模型中平均风蚀模数每年降低 $3.25\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$,WEPS模型降低 $7.21\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 。为了进一步了解2000—2012年的风蚀年际变化,对两个模型中不同土壤侵蚀强度面积所占比例进行统计,发现研究末期的微度和轻度侵蚀比例较研究初期都有不同程

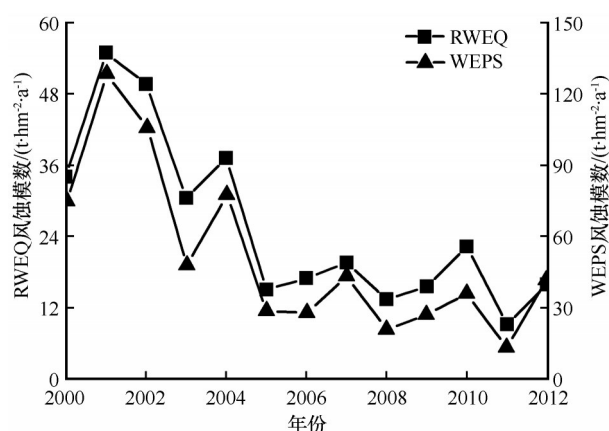


图4 2000—2012年土壤风蚀模数年际分布

Fig.4 Interannual variations of soil wind erosion modulus from 2000 to 2012 based on RWEQ and WEPS models

度的增加,RWEQ模型中微度和轻度侵蚀面积增加 $82\,351\text{ km}^2$,WEPS模型中微度和轻度侵蚀面积增加 $71\,633\text{ km}^2$ 。强烈侵蚀、极强烈侵蚀和剧烈侵蚀强

度所占面积比例较小(图5)。总体呈现出微度、中度侵蚀面积增加,风蚀严重地区面积减少趋势,从

侧面反映出京津风沙源治理工程生态保护与修复效果明显。

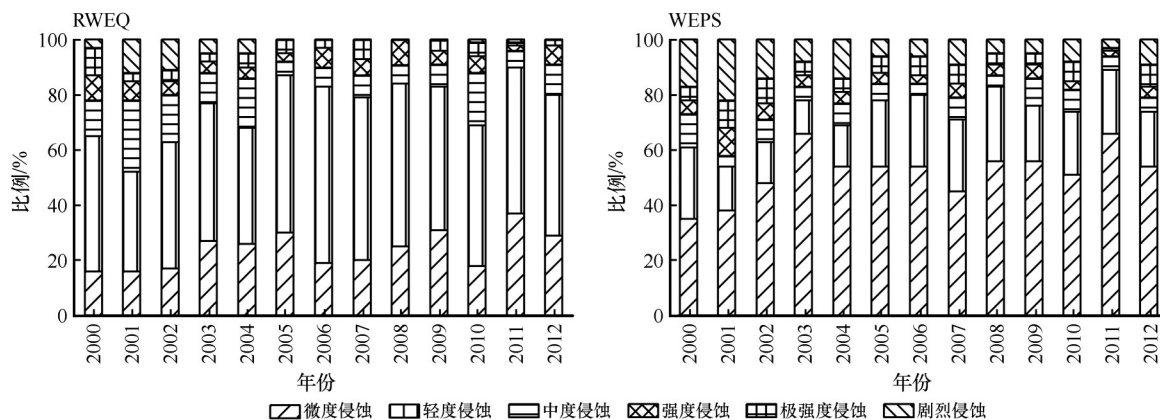


图5 不同等级土壤风蚀强度面积所占比例

Fig.5 The percentage of area of wind erosion hazard based on RWEQ and WEPS models

RWEQ模型风蚀模数以半月时间尺度计算,WEPS模型风蚀模数以日时间尺度计算,将计算结果合成季节尺度。本文将3、4、5月划分为春季,6、7、8月划分为夏季,9、10、11月划分为秋季,12、1、2月划分为冬季。两个模型都表现为冬春季节风蚀模数大于夏秋季节,且4个季节中沙地均有风蚀发生,浑善达克沙地和科尔沁沙地风蚀情况较严重。春季大部分农田和草地为轻度侵蚀,秋冬季节农田和草地多在沙地附近出现轻度侵蚀,侵蚀面积较小,夏季为微度侵蚀,几乎不起沙(图6)。对于北方农牧交错带而言,冬春季节风速较大,沙地气候干燥,农田很少保留作物残茬,裸土面积大,为风蚀提供环境条件。夏秋季降雨量增加以及植被生长茂密,有效降低风速对地表侵蚀力,风蚀量减少。

3.4 影响土壤风蚀的因素

3.4.1 风速

风速是影响土壤风蚀的首要气象因子,风是土壤风蚀最直接的动力来源,风速越大,风蚀能力越强^[47]。图7表明,近85%地区风蚀模数与风速成正相关,RWEQ模型达到显著相关($R^2>0.5529$, $P<0.05$)的面积为41.43%,WEPS模型为26.28%。科尔沁左翼后旗附近的沙地和农田、榆林市附近的沙地相关系数较高,与此地区植被稀疏、大风易造成严重风蚀相吻合。内蒙古翁牛特旗、多伦,山西天镇等地多为耕地和草地,地表植被覆盖度略高,平均风速略小,故风速的影响不是最重要的。根据研究区内47个站点2000—2012年的大风日

数数据,北方农牧交错带大风日数下降趋势明显,大风日数与土壤风蚀模数变化趋势显著相关,RWEQ模型为 $R^2=0.95$ ($P<0.001$),WEPS模型为 $R^2=0.90$ ($P<0.001$)。

3.4.2 土壤湿度

土壤湿度是土壤风蚀的影响因素之一,地表水分能使土壤颗粒间黏聚性增大,增加土壤抗风蚀能力,在一定程度上缓解土壤风蚀。北方农牧交错带2000—2012年多年平均土壤含水率与两个模型模拟的风蚀模数基本呈负相关(图8)。农田土壤湿度与土壤风蚀模数呈显著负相关($R^2>0.5529$, $P<0.05$)面积最多,说明农田土壤风蚀量对于土壤湿度的响应较为敏感。优化农田种植管理措施,收获后地表保留作物残茬,增设农田风障,涵养地表水分,可增强地表抗风蚀能力。

3.4.3 土地利用变化

京津风沙源治理工程初期和末期的土地利用类型面积发生了明显的变化(表2)。与工程治理初期相比,面积增加最大的是林地,增加了1477 km²。植被可以通过减缓风速和减少沙尘的排放保护表层土壤,增加植被覆盖度可以有效固定地表和减少风蚀。此外,13年内北方农牧交错带风蚀模数整体下降,风蚀模数减少量最大值出现在沙地,RWEQ模型中沙地风蚀模数减少121.12 t·hm⁻²,WEPS模型减少313.3 t·hm⁻²。值得注意的是,对地表风蚀有抑制作用的草地和水体均有不同程度减少,草地转为沙地面积占草地转出面积的30.46%,因此位于沙地边缘的荒漠草原,虽在一定程度上增加了下垫面

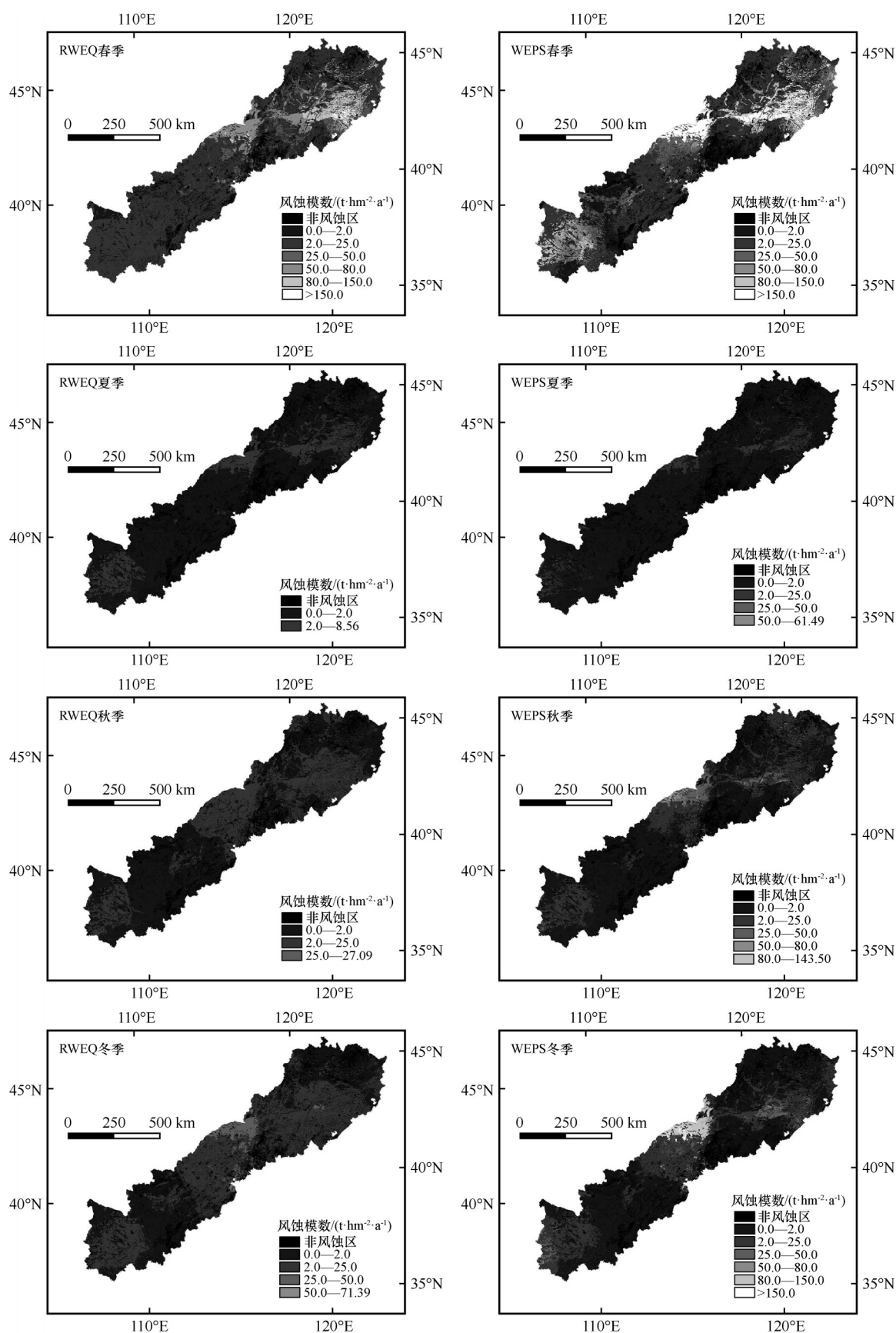


图6 土壤风蚀模数的季节分布

Fig.6 Seasonal distribution of soil wind erosion modulus

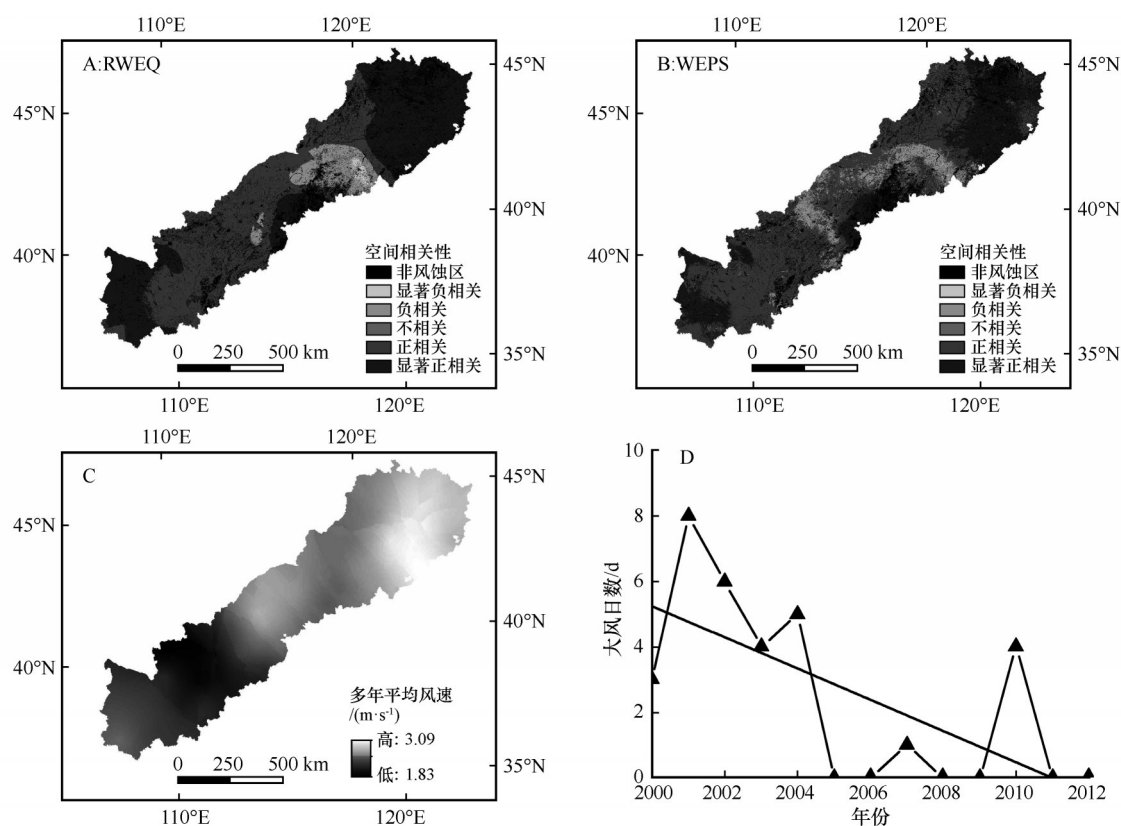


图7 潜在风蚀模数与风速空间相关性 & 风速特征

Fig.7 Spatial correlation between soil wind erosion modulus and wind speed and characteristics of wind speed

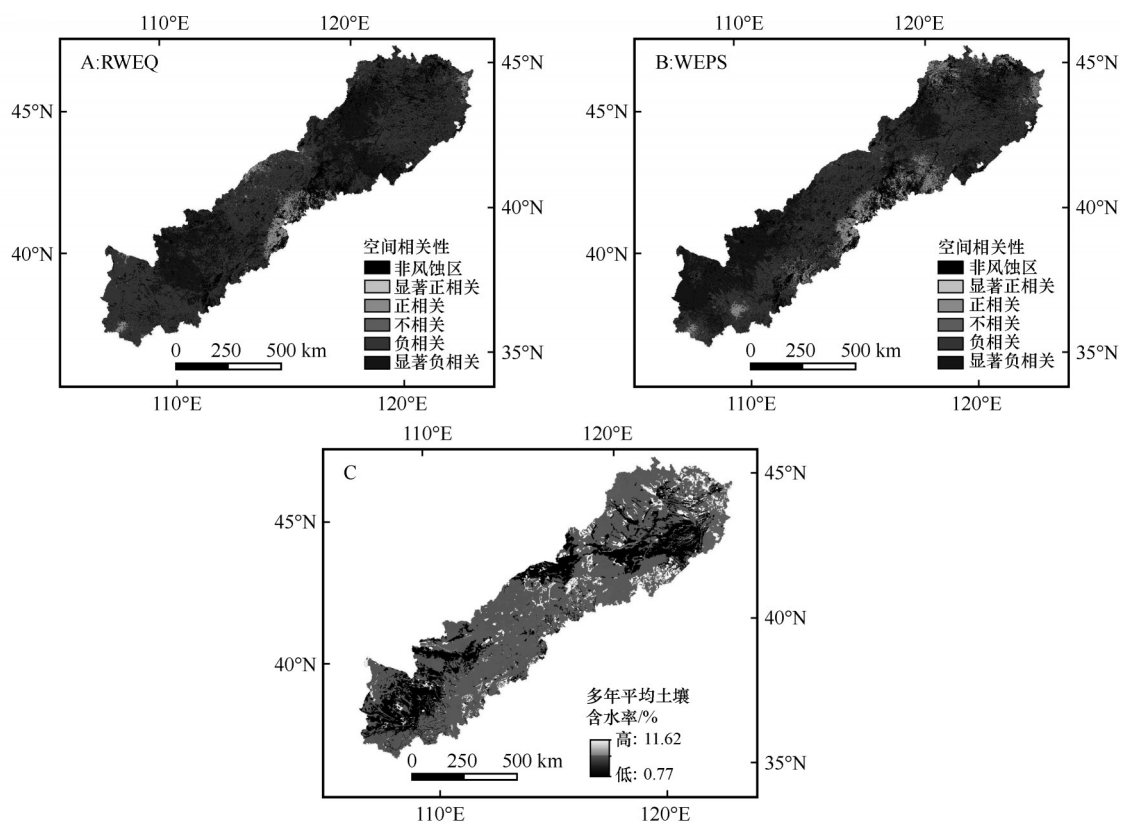


图8 潜在风蚀模数与土壤湿度空间相关性 & 土壤湿度空间特征

Fig.8 Spatial correlation between soil wind erosion modulus and soil moisture and spatial characteristics of soil moisture

表 2 2000—2010 年土地利用转移矩阵(单位: km²)
Table 2 Land use transfer matrix from 2000 to 2010(Unit: km²)

年份	土地利用类型	2010 年							
		草地	居民地	林地	农田	未利用地	沙地	水体	转出量
2000 年	草地	—	290.36	973.21	2 653.69	133.67	1 826.74	119.20	5 996.87
	居民地	30.76	—	10.06	131.31	2.03	2.45	2.23	178.84
	林地	351.31	53.65	—	324.63	5.58	19.01	16.92	771.10
	农田	2 848.30	491.43	1 150.56	—	89.69	52.18	198.37	4 830.53
	未利用地	43.75	5.49	4.06	242.55	—	2.59	49.07	347.51
	沙地	1 275.39	13.28	86.96	70.39	7.81	—	10.47	1 464.30
	水体	135.07	13.75	23.13	340.87	182.31	9.84	—	704.97
	转入量	4 684.58	867.96	2 247.98	3 763.44	421.09	1 912.81	396.26	14 294.12

粗糙度和固沙能力,但也容易被沙化,增加土壤风蚀风险,应继续加强区域治沙工程。

4 结论

两个模型均具有较好的拟合性,RWEQ 模型的 $R^2=0.45$ ($P<0.01$),WEPS 模型的 $R^2=0.57$ ($P<0.01$),均能客观反映北方农牧交错带的潜在风蚀情况;WEPS 模型($NSC=0.54$)预测精度比 RWEQ 模型($NSC=0.27$)略高。

风蚀模数空间分布揭示了北方农牧交错带今后风蚀防治的重点,还是以毛乌素沙地、浑善达克沙地和科尔沁沙地为主。应加强沙地附近农田和草地的保护,防止进一步沙化。2000—2012 年两个模型模拟的风蚀模数的变化趋势基本相同,风蚀模数有明显的年度波动,但总体呈现显著下降,2012 年风蚀模数有小幅增加。

对于主要侵蚀地类(沙地、农田和草地)而言,冬春季节风蚀模数大于夏秋季节,春季沙地风蚀严重,农田和草地多为轻度侵蚀。

气象因子是影响北方农牧交错带土壤风蚀的重要因素,年均风速和大风日数与土壤风蚀模数变化呈显著相关。土壤湿度和林地增加对抑制土壤风蚀有明显效果,农田风蚀模数变化对土壤湿度的响应尤为敏感,因此坚持退耕还林还草、涵养地表水分对提高区域防风固沙具有关键作用。

参考文献:

[1] 董治宝,李振山,严平.国外土壤风蚀的研究历史与特点[J].中国沙漠,1995,15(1):100-104.
[2] 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(4):297-301.
[3] Stout J E,Zobeck T M.The Wolfforth field experiment:a wind erosion study[J].Soil Science,1996,161(9):616-632.
[4] 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.
[5] Shao Y P.Physics and Modelling of Wind Erosion[M].Netherlands:Springer,2000:23.
[6] Fryrear D W,Saleh A,Bilbro J D,et al.Revised Wind Erosion Equation (RWEQ)[R].Wind Erosion and Water Conservation Research Unit,Usda-Ars,Southern Plains Area Cropping Systems Research Laboratory,1998:1.
[7] 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.
[8] 邹学勇,张春来,程宏,等.土壤风蚀模型中的影响因子分类与表达[J].地球科学进展,2014,29(8):875-889.
[9] Webb N P,McGowan H A.Approaches to modelling land erodibility by wind[J].Progress in Physical Geography,2009,33(5):587-613.
[10] Woodruff N P,Siddoway F H.A wind erosion equation[J].Soil Science Society of America Journal,1965,29(5):602-608.
[11] Hagen L J.Wind Erosion Prediction System (WEPS) -Wind Erosion Research Unit[R].Technical Documentation,1996.
[12] Gregory J M,Wilson G R,Singh U B,et al.TEAM:integrated, process-based wind-erosion model [J].Environmental Modelling & Software,2004,19(2):205-215.
[13] Potter K N,Williams J R,Larney F J,et al.Evaluation of EPIC's wind erosion submodel using data from southern Alberta [J].Canadian Journal of Soil Science,1998,78(3):485-492.
[14] Shao Y P,Raupach M R,Leys J F.A model for predicting aeolian sand drift and dust entrainment on scales from paddock to region[J].Soil Research,1996,34(3):309-342.
[15] 高尚玉.京津风沙源治理工程效益[M].第2版.北京:科学出版社,2012.
[16] Guo Z L,Huang N,Dong Z B,et al.Wind erosion induced soil degradation in northern China:status,measures and perspective

- [J].Sustainability,2014,6(12):8951-8966.
- [17] 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].地球信息科学学报,2014,16(3):426-434.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 陈莉,韩婷婷,李涛,等.基于WEPS模型的天津郊区土壤风蚀起尘及对中心城区迁移量估算[J].环境科学,2012,33(7):2197-2203.
- [21] Pi H W, Sharratt B, Lei J Q. Wind erosion and dust emissions in central Asia: spatiotemporal simulations in a typical dust year [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2019, 44 (2) : 521-534.
- [22] 石晓丽,史文娇.北方农牧交错带界线的变迁及其驱动力研究进展[J].农业工程学报,2018,34(20):1-11.
- [23] 崔思朋.历史时期北方农牧交错带范围波动驱动因素的考察及反思[J].青海民族研究,2019,30(3):71-79.
- [24] Guo Z L, Zobeck T M, Zhang K, et al. Estimating potential wind erosion of agricultural lands in northern China using the Revised Wind Erosion Equation (RWEQ) and GIS [J]. *Journal of Soil & Water Conservation*, 2013, 68(1):13-21.
- [25] Fryrear D W, Bilbro J D, Saleh A, et al. RWEQ: improved wind erosion technology [J]. *Journal of Soil & Water Conservation*, 2000, 55(2):183-189.
- [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] Hagen L J. Evaluation of the Wind Erosion Prediction System (WEPS) erosion submodel on cropland fields [J]. *Environmental Modelling & Software*, 2004, 19(2):171-176.
- [28] Hagen L J. WEPS Technical Documentation: Erosion Submode [R/OL]. Manhattan, Kansas, USA: USDA-ARS, Wind Erosion Research Unit, 2006. <http://www.weru.ksu.edu/weps>.
- [29] 王燕,王萍.风蚀预报系统(WEPS)在民勤荒漠地区的应用分析研究[J].干旱区地理,2013,36(1):109-117.
- [30] 李智广,邹学勇,程宏.我国风力侵蚀抽样调查方法[J].中国水土保持科学,2013,11(4):17-21.
- [31] Pi H W, Feng G, Sharratt B S. Performance of the SWEEP model affected by estimates of threshold friction velocity [J]. *Transactions of the ASABE*, 2014, 57:1675-1685.
- [32] Lu H, Shao Y P. Toward quantitative prediction of dust storms: an integrated wind erosion modelling system and its applications [J]. *Environmental Modelling & Software*, 2001, 16(3):233-249.
- [33] Elliot D L. Adjustment and analysis of data for regional wind energy assessments [C]//the Workshop on Wind Climate, Asheville, NC, 1979.
- [34] 赵羽,金争平,史培军.内蒙古土壤侵蚀[M].北京:科学出版社,1988.
- [35] 徐斌,刘新民,赵学勇.内蒙古奈曼旗中部农田土壤风蚀及其防治[J].水土保持学报,1993(2):75-80.
- [36] 董治宝,陈广庭.内蒙古后山地区土壤风蚀问题初论[J].土壤侵蚀与水土保持学报,1997(2):84-90.
- [37] Li F R, Kang L F, Zhang H, et al. Changes in intensity of wind erosion at different stages of degradation development in grasslands of Inner Mongolia, China [J]. *Journal of Arid Environments*, 2005, 62(4):567-585.
- [38] 赵焱,岳建华,徐翠华,等. ^{137}Cs 示踪技术在滦河源区栗钙土风蚀速率估算中的应用[J].环境科学学报,2005(4):562-566.
- [39] 王云超,张立峰,侯大山,等.河北坝上农牧交错区不同下垫面土壤风蚀特征研究[J].中国农学通报,2006(8):565-568.
- [40] 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(23):2785-2791.
- [41] 姜洪涛.基于 ^{137}Cs 技术的中国北方农牧交错带土壤侵蚀研究:以兰州、大同为例[D].呼和浩特:内蒙古师范大学,2010.
- [42] 张加琼,周学雷,张春来,等.张家口坝上地区农田土壤风蚀的 ^{137}Cs 示踪研究[J].北京师范大学学报(自然科学版),2010,46(6):724-728.
- [43] Li M, Yao W, Shen 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]. *Environmental Earth Sciences*, 2016, 75(7):591.
- [44] Guo Q K, Cheng C, Jiang H T, et al. Comparative rates of wind and water erosion on typical farmland at the northern end of the Loess Plateau, China [J]. *Geoderma*, 2019, 352:104-115.
- [45] 中华人民共和国水利部.土壤侵蚀分类分级标准[M].北京:中国水利水电出版社,2007.
- [46] Du H Q, Wang T, Xue X, et al. Modelling of sand/dust emission in Northern China from 2001 to 2014 [J]. *Geoderma*, 2018, 330:162-176.
- [47] 何清,杨兴华,艾力·买买提明,等.塔中地区土壤风蚀的影响因子分析[J].干旱区理,2010,33(4):502-508.

Potential wind erosion simulation in the agro-pastoral ecotone of northern China using RWEQ and WEPS models

Liu Jun¹, Guo Zhongling¹, Chang Chunping¹, Wang Rende², Li Jifeng¹, Li Qing², Wang Xuyang¹

(1.School of Resources and Environmental Sciences, Hebei Normal University, Shijiazhuang 050024, China; 2.Institute of Geographical Sciences, Hebei Academy of Sciences, Shijiazhuang 050021, China)

Abstract: The agro-pastoral ecotone in northern China, a typical region sensitive to interaction between climate and human beings, has always been undergoing wind erosion and soil degradation. At present, the wind erosion model is one of the most effective methods to obtain the regional potential wind erosion. In this study, the regional versions of Revised Wind Erosion Equation (RWEQ) and Wind Erosion Prediction System (WEPS) were used to evaluate the potential wind erosion at the agro-pastoral ecotone in northern China during 2000–2012. The results demonstrate that the magnitudes of average potential wind erosion were different while the spatial distribution, interannual decreasing trend and seasonal distribution of potential wind erosion were similar between the RWEQ and WEPS. It is found that wind speed, soil moisture and land use change have an impact on soil wind erosion by the analysis of the spatial correlation between wind speed, soil moisture and wind erosion modulus, and the influence of land use change on fluctuation of wind erosion amount. The observed wind erosion data are closely related to the values predicted by RWEQ ($R^2=0.45$, $P<0.01$) and WEPS ($R^2=0.57$, $P<0.01$). The Nash (Sutcliffe efficiency coefficient) of WEPS model ($NSC=0.54$) is higher than that of RWEQ model ($NSC=0.27$). Both RWEQ model and WEPS model can objectively predict the soil wind erosion of the APEC, and the prediction accuracy of WEPS model is better.

Key words: wind erosion model; soil wind erosion modulus; temporal and spatial distribution; influence factor