

适用于河北坝上地区的农田风蚀经验模型

王仁德¹, 常春平², 郭中领², 李庆¹

(1. 河北省科学院 地理科学研究所/河北省地理信息开发应用工程技术研究中心, 河北 石家庄 050021; 2. 河北师范大学 资源与环境科学学院/河北省环境演变与生态建设省级重点实验室, 河北 石家庄 100875)

摘要: 目前, 中国缺少一种被广泛认可、普遍适用于中国自然条件的农田风蚀模型。本研究利用多年的野外风沙观测数据和风洞模拟实验结果, 建立了一种基于河北坝上地区自然环境的农田风蚀经验模型。该模型涵盖风力侵蚀因子、粗糙干扰因子和土壤抗蚀因子三大风蚀影响因子, 包括起沙风速、地表粗糙度、土壤可蚀性和土壤含水率四大风蚀影响要素, 可对各种农田地表的风蚀量进行定量计算和预测。应用该模型对坝上地区 2013 年风蚀季农田风蚀量进行定量计算。结果表明, 翻耕耙平地的平均风蚀量为 $39.45 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 莜麦留茬地的平均风蚀量为 $14.08 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 与采用其他方法得到的结果比较接近。在更广泛地区对模型进行验证和修订, 促进该风蚀模型与“3S”技术融合是下一步的重点工作。

关键词: 风蚀经验模型; 农田; 风力侵蚀因子; 粗糙干扰因子; 土壤抗蚀因子; 坝上

文章编号: 1000-694X(2017)06-1071-08

DOI: 10.7522/j.issn.1000-694X.2016.00094

中图分类号: P931.3

文献标志码: A

0 引言

风力侵蚀是土壤侵蚀的主要类型。全球遭受风蚀的地区涉及全世界 2/3 的国家、1/4 陆地面积和 9 亿多人口^[1]。中国是世界上受风蚀危害最严重的国家之一, 发生风蚀和受其影响的面积占国土总面积的 1/2 以上, 其中, 北方旱作农田最为严重^[2]。为了准确评价风蚀的危害, 进而有效防治农田的风力侵蚀, 国内外学者开发出多种风蚀模型用于农田风蚀的测定和预报。国外风蚀预报研究开展较早, 20 世纪 60 年代以来, 以美国为代表的发达国家已先后开发出若干风力侵蚀预报模型, 包括 WEQ^[3]、RWEQ^[4]、TEAM^[5]、WEAM^[6]、WEPS^[7] 等。这些模型既有经验模型, 也有理论模型, 经验模型往往受建模区域的限制很大, 在模型构建区域应用效果较好, 推广应用则存在很大的局限性; 理论模型一般都是简化了的推导模型, 考虑的因子不全面, 边界难以确定, 缺乏实验和实地观测的验证, 同样存在应用上的局限性^[8]。中国的风蚀预报研究起步较晚, 直到 20 世纪末, 才有学者在风蚀模型研究方面做出探索, 并取得一定的进展^[8-10], 但由于中国土壤风蚀的特殊性、自然环境的复杂性及人为活动影响的深

刻性, 加之基础数据零散、协作研究不够等原因, 无论是在改造国外已有模型, 还是建立自己的风蚀模型方面, 进展都比较缓慢, 至今仍缺少一种被广泛认可、普遍适用于中国自然条件的农田风蚀模型^[11], 这是长期困扰风蚀研究学者的一大难题。

河北坝上地区位于蒙古高原东南缘、中国北方农牧交错带中段。气候属东亚大陆性季风气候, 年降水量 350 mm 左右, 属半干旱地区。该地区原生植被为典型草地, 但由于人口不断涌入, 大面积草地被开垦为农田。目前, 农田已占到该地区面积的一半以上, 并且绝大部分为旱作农田^[12]。每年春季, 频繁发生的大风天气与裸露地表相叠加, 使该地区成为中国北方农田风蚀最严重和土地沙漠化发展最迅速的地区之一^[13]。本研究利用多年的野外风沙观测数据和风洞模拟实验结果, 建立了一种基于坝上地区自然环境、包括主要风蚀因子的农田风蚀经验模型, 以期为中国北方通用风蚀预报模型的建立做出贡献。

1 思路与方法

1.1 建模思路

目前已有的风蚀模型可分为经验模型、物理模

收稿日期: 2016-05-30; 改回日期: 2016-07-12

资助项目: 国家自然科学基金项目(41630747, 41330746, 40110251); 河北省自然科学基金项目(D2013302034, D2014205063); 河北省科学院科技计划项目(16103)

作者简介: 王仁德(1980—), 男, 河北黄骅人, 博士, 副研究员, 主要从事土壤风蚀与风沙灾害防治方面的研究。E-mail: wangrendel0@163.com

型和数学模型三大类^[14]。与物理模型和数学模型相比,经验模型尽管物理意义不是很明确,但具有操作简单、参数易获取等优点。目前国际上主流的风蚀模型,如RWEQ、WEPS等,均为经验模型,计算参数来源于美国大平原的统计值^[15]。尽管这两种模型在世界其他地区应用效果不甚理想,但在美国风蚀区的预测精度较高,从而得到美国农业环境管理部门的广泛采用。在当前对风蚀机制尚未完全掌握的情况下,为满足实际工作的需要,尽快开发一种适用于中国自然环境的风蚀经验模型是很有必要的。本研究在此方面进行了探索,首先建立一种基于坝上地区自然条件的风蚀经验模型。

土壤风蚀过程中,影响风蚀的要素众多,各要素之间存在相互作用,导致现有风蚀模型普遍存在模型结构层次不严谨、各种影响因子中的要素交叉出现等问题。为了避免这一问题的发生,邹学勇等^[16]提出应从风蚀动力学的角度出发,将风蚀影响因子分为风力侵蚀因子、粗糙干扰因子和土壤抗蚀因子3大类,从而将各种风蚀影响要素按照所处空间位置和力学属性合理地分开,以避免风蚀影响因子参数化中交叉出现重复的风蚀影响要素。本研究借鉴了此建模思想,从风力侵蚀因子、粗糙干扰因子和土壤抗蚀因子3个方面分别遴选关键的风蚀影响要素进行表达。

1.2 建模原则

实用性原则:构建该模型的主要目的是为了满足不同实际工作的需要,因此,首先要保证模型的实用性。这主要体现在两个方面:一是模型参数获取容易,通过常规资料或者简单的调查、观测就能得到;二是模型计算不能太复杂,应具有较强的可操作性。

科学性原则:在满足应用性的前提下,应尽量保证模型构建过程的科学性。这表现在3个方面:一是参数选取的科学性。模型参数必须是经过科学遴选得到的,是各因子中最具代表性的风蚀影响要素;二是参数关系式的科学性。模型涉及到的所有参数关系式必须是经过长期实验得到的结果;三是参数之间关系的科学性。参数之间的关系,无论是乘除,还是加减,都应具有科学意义。

全面性原则:这里的全面性是指必须对风力侵蚀因子、粗糙干扰因子和土壤抗蚀因子3大风蚀影响因子进行全面的考虑,每一类因子都应该有相应的风蚀影响要素进行表达。如果单一风蚀影响要素不能全面表达某一风蚀影响因子,就应考虑增加

风蚀影响要素。

简单性原则:风蚀影响要素多且杂,要将所有要素全部纳入模型中是很困难的,也会影响模型的实用性。因此,本研究在考虑模型指标选取全面性的基础上,主要将一些关键性的要素纳入模型中,其他一些关联性要素或次一级要素未直接进行考虑,以尽量简化模型结构。

准确性原则:这主要通过两方面来保证:一是保证所有观测数据的准确性;二是对模型估算结果进行反复的验证和修订,力求所建模型对风蚀量的估算达到最大的准确性。

1.3 建模方法

本次模型构建过程分为以下5个步骤:

第一步:建立标准基础模型。本模型中,用起沙风速来表征风力侵蚀因子。在河北坝上地区一处典型农田区进行长期的野外风沙观测,并采集风蚀原状土进行风洞模拟实验,建立农田风蚀强度与风速之间的定量关系模型。要求建立该模型的土壤质地为坝上地区分布最广的沙质壤土,农田地表类型为冬春季面积最大的翻耕耙平地,表层土壤湿度控制在2.0%以内。因此,所建标准基础模型环境单一,是特定粗糙干扰因子和土壤抗蚀因子条件下的标准基础模型。

第二步:粗糙干扰因子的输入。本模型中,粗糙干扰因子直接用地表空气动力学粗糙度(简称地表粗糙度)来表征。方法是在对典型农田区内翻耕耙平地进行观测的同时,对临近的东西向留茬地、南北向莜麦留茬地、小麦留茬地、油菜留茬地、弃耕地和退耕地等6种地类的风蚀起沙强度进行同步观测,并使用梯度风速仪测定各自的地表粗糙度。由于各观测点之间的距离较近(<200 m),自然条件基本一致,风蚀强度的差异主要是由农田耕作方式不同导致的地表粗糙度的差异造成的。据此,建立地表粗糙度与风蚀强度之间的关系模型,标准化后输入标准基础模型。

第三步:土壤抗蚀因子的输入。影响土壤抗蚀性的特性包括内在属性和暂时性质两类^[17]。土壤内在属性抗蚀性用土壤可蚀性来表征。方法是采用改进粒度对比法对包括典型农田区在内的康保县境内多处具有不同质地的翻耕耙平农田风蚀量进行估算,并测定各种表征土壤可蚀性的指标。由于翻耕耙平地地表较一致,同一县域内包括风速、降水在内的气象条件差异也不大,可以认为各采样点地表风

蚀量的差异主要是由土壤可蚀性的差异造成的。据此,遴选最佳指标建立土壤可蚀性与风蚀强度之间的关系模型,标准化后输入标准基础模型。土壤暂时抗蚀性用表层土壤含水率来表征。方法是在典型农田区的翻耕耙平地上,对风蚀强度、表层土壤含水率与起沙风速进行长期的同步观测,从中提取风速相近的数据组(6.3~6.6 m·s⁻¹)。由于观测点始终位于同一位置,地表状况、风速又比较一致,风蚀强度的差异可以认为主要是由土壤含水率的不同造成的。据此,建立土壤含水率与风蚀强度之间的关系模型,标准化后输入标准基础模型。

第四步:建立多因子风蚀经验模型。将输入粗糙干扰因子、土壤抗蚀因子的风蚀模型进行风速和尺度修订,建立涵盖风力侵蚀因子、粗糙干扰因子和土壤抗蚀因子,包括风速、地表粗糙度、土壤可蚀性和土壤含水率四大风蚀影响要素的农田风蚀经验模型(Wind Erosion Empirical Model,简称 WEEM)。

第五步:模型验证与修订。利用 WEEM 模型对坝上地区不同地点、不同地类风蚀季农田风蚀量进行定量估算,与采用其他方法得到的结果进行比较,对模型进行验证和修订。

2 风蚀影响因子的表达

2.1 风力侵蚀因子

在坝上典型农田区的翻耕耙平地上,利用集沙仪、梯度风速仪、铝盒同步测定地表的输沙强度、起沙风速和表层土壤含水率。2011—2015 年,共收集 142 组数据,其中 45 组数据的土壤含水率<2.0%,满足建模要求。同时,于 2013 年采集观测点附近翻耕耙平地的风蚀原状土进行了风洞模拟实验。具体的野外观测和风洞模拟实验方法在文献[18]中进行了详细介绍。野外观测(图 1A)和风洞模拟实验结果(图 1B)均表明,农田风蚀强度随风速增加呈指数规律变化。风洞条件下农田风蚀的标准基础模型可表达为:

$$Q_{wt} = a_1 \cdot \exp(b_1 \cdot U_{wt}) \quad (1)$$

式中: Q_{wt} 为风洞条件下翻耕耙平地的土壤风蚀模数($g \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$); U_{wt} 为风洞条件下的起沙风速($m \cdot s^{-1}$); a_1 为与土壤类型有关的常数项,取值 6.8179; b_1 为表征风蚀强度随风速变化快慢的常数项,取值 0.3593。

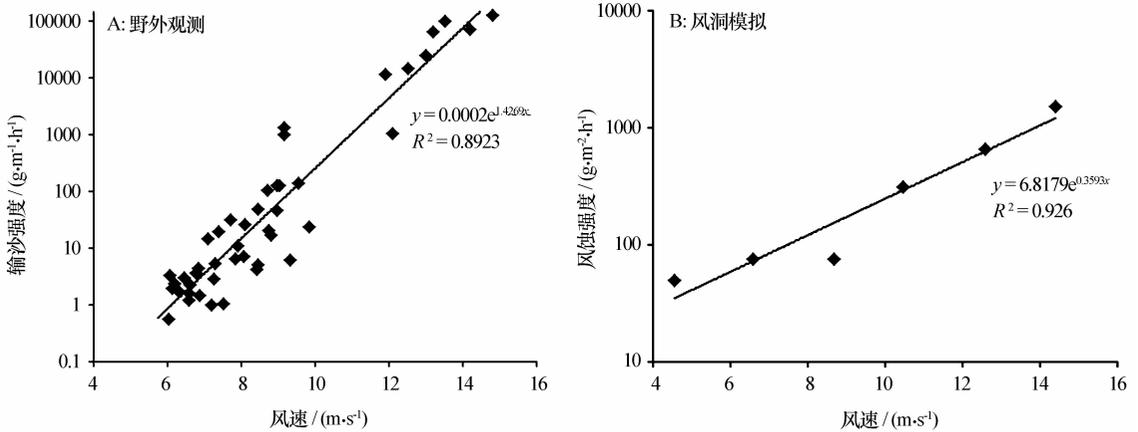


图 1 农田风蚀强度随风速的变化(A:野外观测;B:风洞模拟)

Fig. 1 Change of wind erosion amount with wind speed (A. field observation; B. wind tunnel simulation)

风速修订:计算野外农田土壤风蚀模数时,需要利用当地气象站记录的风速资料,而公式 1 中 U_{wt} 是风洞 50 cm 高度的风速,与气象站 10 m 观测高度测定的风速有一定的差距,因此应将气象站记录的风速换算为风洞 50 cm 高度风速。在通过调节粗糙元使风洞风速廓线与野外风速廓线指数相似得到保证的前提下,气象站观测风速(U)与风洞 50 cm 高度风速(U_{wt})之间的换算关系为:

$$U_{wt} = K \cdot U \quad (2)$$

式中: K 为与下垫面有关的风速修订系数。根据野

外观测结果计算的翻耕耙平地的风速修订系数为 0.6926。

尺度修订:风洞内的土壤风蚀试验样品长度仅为 0.8 m,而田块长度对风蚀强度具有很大的影响^[19],直接利用风洞模拟结果计算大田条件下的风蚀模数,将导致计算结果远高于实际值。通过对比风洞模拟获得的典型农田区土壤风蚀模数与采用改进粒度对比法^[20]计算的实际风蚀模数,大田条件下的土壤风蚀模数约为风洞条件下的 0.072 倍。

根据上述修订,大田条件下农田风蚀的标准基

础模型可表达为:

$$Q_{dt} = a_1 \cdot C \cdot \exp(b_1 \cdot k \cdot U) \quad (3)$$

式中: Q_{dt} 为大田条件下的农田土壤风蚀强度($g \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$); C 为尺度修订系数,为 0.072; k 为风速修订系数订系数,为 0.6926; U 为气象站 10 m 高度的起沙风速($\geq 6 m \cdot s^{-1}$); a_1 、 b_1 的含义与公式 1 相同。

2.2 粗糙干扰因子

用多台集沙仪对典型农田区及其周边的翻耕耙平地、东西向留茬地、南北向茭麦留茬地、小麦留茬地、油菜留茬地、弃耕地和退耕地等 7 种地类表面的风蚀起沙强度进行同步观测。利用梯度风速仪测定每一种地类的地表粗糙度。具体的观测方法在文献[21]中进行了详细介绍。由于各观测点之间的距离较近($< 200 m$),观测时段内,风速、土壤质地、土壤湿度等自然条件基本一致,不同地类风蚀强度的差异主要是由农田耕作方式不同导致的地表粗糙度的差异造成的,据此,建立地表粗糙度与风蚀强度之间的关系模型。结果表明,农田风蚀强度随地表粗糙度的增大呈指数规律降低(图 2),地表粗糙度与风蚀强度之间的关系可用公式 4 进行表达:

$$S_{dt} = a_2 \cdot \exp(b_2 \cdot z_0) \quad (4)$$

式中: S_{dt} 为大田条件下的农田土壤输沙强度($g \cdot m^{-1} \cdot h^{-1}$); z_0 为地表粗糙度(cm); a_2 为与土壤类型有关的常数项,取值 1.4606; b_2 为表征风蚀强度随地表粗糙度变化快慢的常数项,取值 -10.49 。

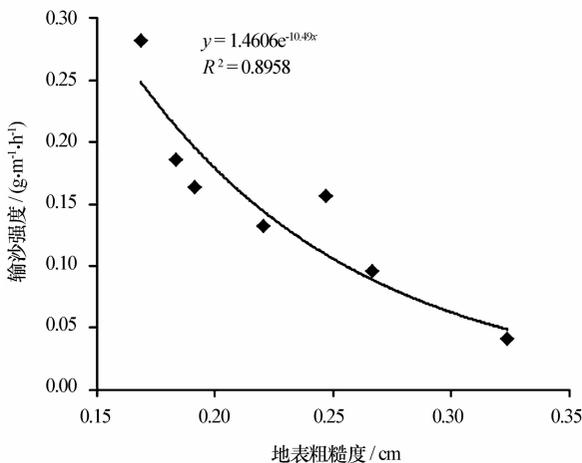


图 2 农田风蚀强度随地表粗糙度的变化

Fig. 2 Change of wind erosion amount with surface roughness

标准基础模型所处翻耕耙平地的地表粗糙度(z_0)为 0.1686 cm。将该值带入式(4)中,计算得到

一个特定地表粗糙度条件下的输沙强度值。以此值作为标准值,则其他地表粗糙度条件下输沙强度与标准值的比例关系(R)可表达为:

$$R = \exp[-10.49 \cdot (z_0 - 0.1686)] \quad (5)$$

式中: R 为随地表粗糙度 z_0 变化的风蚀强度与标准值的比值。由于标准值取自标准基础模型,因此,可将 R 作为粗糙干扰因子以乘的关系带入标准基础模型式(3)中,建立包含粗糙干扰因子的农田风蚀经验模型:

$$Q_{dt} = a_1 \cdot C \cdot R \cdot \exp(b_1 \cdot k \cdot U) \quad (6)$$

2.3 土壤抗蚀因子

影响抗蚀性的土壤特性包括内在属性(如土壤质地、有机质、碳酸钙含量等)和暂时性质(土壤含水率、土壤结皮等)两类^[17]。借鉴国外建模经验,内在属性用土壤可蚀性(E)来表征^[4,7]。暂时性质受土壤湿度影响最大,因此,用表层土壤含水率(W)来表征。

2.3.1 土壤可蚀性

采用改进粒度对比法对包括典型农田区在内的康保县境内 10 处具有不同土壤质地的翻耕耙平农田的风蚀量进行定量估算。具体的采样和估算方法在文献[22]中进行了详细介绍。由于翻耕耙平地地表状况基本一致,同一县域内包括风速、降水在内气象条件的差异也不大,可以认为各采样点农田风蚀量的不同主要是由土壤可蚀性的差异造成的。因此,对各采样点土壤样品中一些可表征土壤可蚀性的指标进行分析,如可风蚀物(粒径 $\leq 0.84 mm$)含量、易风蚀物(粒径 0.05~0.5 mm)含量、粉沙与黏粒(粒径 $< 0.05 mm$)含量等,从中筛选最能反映土壤可蚀性与风蚀量关系的指标。结果表明(图 3),RWEQ、WEPS 等模型中使用的可风蚀物含量指标与农田风蚀量的相关性并不高($r^2 = 0.615$),易风蚀物含量与风蚀量之间具有最佳的相关系数($r^2 = 0.798$)。因此,本模型中用易风蚀物含量作为表征土壤可蚀性的指标,其与农田风蚀量线性相关,可用式 7 进行表达:

$$F_{dt} = a_3 \cdot ef - b_3 \quad (7)$$

式中: F_{dt} 为大田条件下的农田土壤风蚀量($g \cdot m^{-2}$); ef 为土壤中易风蚀物的含量; a_3 、 b_3 为与土壤质地有关的常数项,取值分别为 10 362.0 和 4 690.9。

标准基础模型所处农田土壤中易风蚀物的含量(ef)为 0.6065。将该值带入式 7 中,计算得到一个

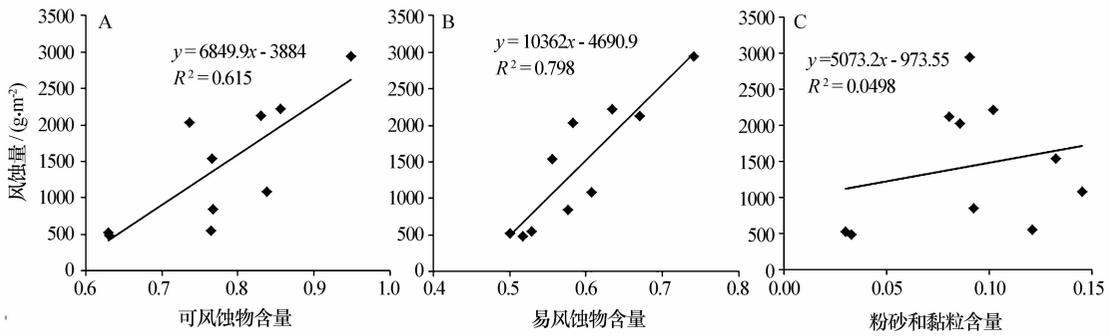


图 3 土壤可蚀性与农田风蚀量的关系

Fig. 3 Relation between soil erodibility and soil loss by wind

特定土壤易风蚀物含量条件下的农田风蚀量。以此值作为标准值,则其他土壤易风蚀物含量条件下农田风蚀量与标准值的比例关系(E)可表达为:

$$E = 6.502ef - 2.9435 \quad (8)$$

式中: E 为随土壤中易风蚀物含量(ef)变化的风蚀量与标准值的比值。由于标准值取自标准基础模型,因此,可将 E 作为土壤可蚀性要素以乘的关系带入标准基础模型(式 3)中,建立包含土壤可蚀性要素的农田风蚀经验模型:

$$Q_{dt} = a_1 \cdot C \cdot E \cdot \exp(b_1 \cdot k \cdot U) \quad (9)$$

2.3.2 土壤含水率

2011—2015 年,在典型农田区的翻耕耙平地上,对输沙强度、表层土壤含水率与起沙风速进行长期同步观测。具体的观测方法在文献[18]中进行了详细介绍。从收集的 142 组数据中筛选风速相近的数据组,要求数据组内风速的差距不超过 $0.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,其中,有 11 组数据的风速较集中($6.3 \sim 6.6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$),满足建模要求。由于观测点始终位于同一位置,地表状况又基本一致,在风速变化较小的情况下,风蚀强度的差异可以认为主要是由土壤含水率的不同造成的,据此建立土壤含水率与风蚀强度之间的关系模型。结果表明,农田风蚀强度随地表土壤含水率的增大呈线性规律降低(图 4),地表土壤含水率与风蚀强度之间的关系可用公式 10 进行表达:

$$S_{dt} = a_4 \cdot \omega f + b_4 \quad (10)$$

式中: S_{dt} 为大田条件下的农田土壤输沙强度($\text{g} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$); ωf 为表层土壤含水率(%); a_4 、 b_4 为与土壤类型有关的常数项,取值分别为 -0.3951 和 2.4329 。

构建标准基础模型所用数据的土壤含水率(ωf) $< 2.0\%$,平均值为 1.45% 。将该值带入式 10 中,计算得到一个特定土壤含水率条件下的输沙强

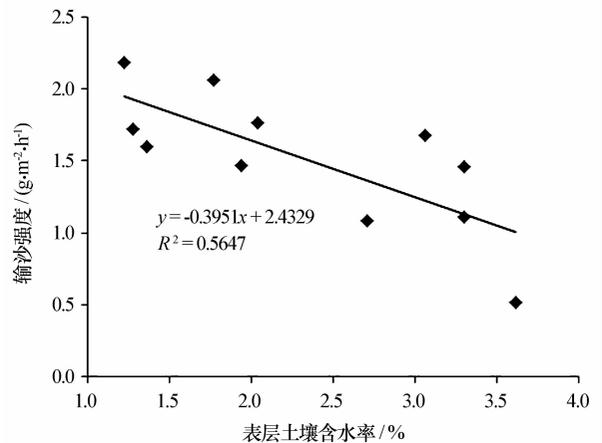


图 4 农田风蚀强度随表层土壤含水率的变化

Fig. 4 Change of wind erosion amount with soil moisture content

度值。以此值作为标准值,则其他土壤含水率条件下输沙强度与标准值的比例关系(W)可表达为:

$$W = -0.2124\omega f + 1.308 \quad (11)$$

式中: W 为随土壤中随土壤含水率(ωf)变化的风蚀量与标准值的比值。由于标准值取自标准基础模型,可将 W 作为土壤含水率要素以乘的关系带入标准基础模型(式 3)中,建立包含土壤含水率要素的农田风蚀经验模型:

$$Q_{dt} = a_1 \cdot C \cdot W \cdot \exp(b_1 \cdot k \cdot U) \quad (12)$$

3 模型建立

由于风力侵蚀因子、粗糙干扰因子和土壤抗蚀因子是相互独立的,因此,将三大因子同时带入标准基础模型中,不会造成影响因子中要素相互干扰的问题。由于粗糙干扰因子、土壤可蚀性要素和土壤含水率要素均是以乘的关系带入到标准基础模型中,三者之间的关系为连乘。由此,涵盖风力侵蚀因子、粗糙干扰因子和土壤抗蚀因子三大风蚀影响因子,包括起沙风速、地表粗糙度、土壤可蚀性和土壤

含水率四大风蚀影响要素的农田风蚀经验模型可表达为:

$$Q_{dt} = a_1 \cdot C \cdot R \cdot E \cdot W \cdot \exp(b_1 \cdot k \cdot U) \quad (13)$$

$$R = \exp[-10.49 \cdot (z_0 - 0.1686)] \quad (14)$$

$$E = 6.502ef - 2.9435 \quad (15)$$

$$W = -0.2124wf + 1.308 \quad (16)$$

式(13~16)只能计算某一起沙风速条件下的农田风蚀量。现实中,风速是不断变化的。在利用该模型计算次风蚀事件、一段风蚀期甚至整个风蚀季的农田风蚀量时,需要将不同等级风速造成的农田风蚀量进行累加,因此,次风蚀事件、风蚀期或风蚀季农田风蚀量计算模型可表达为:

$$Q_{dt} = 10^{-2} \cdot a_1 \cdot C \cdot R \cdot E \cdot W \cdot \sum_{j=1} [T - j \cdot \exp(b_1 \cdot k \cdot U_j)] \quad (17)$$

式中: Q_{dt} 为大田条件下次风蚀事件、风蚀期或风蚀季的农田土壤风蚀模数($t \cdot hm^{-2}$); 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 为风沙活动发生时段内风速为 U_j 的累积时间(h)。

4 模型验证

采用本模型对河北坝上地区康保县境内 4 处地点(后照阳河村东、兴隆村南、西五福堂村西、兴隆村东)翻耕耙平地 and 莜麦留茬地两种地类 2013 年风蚀季农田风蚀量进行定量计算。各地点、地类的位置和地表状况信息在文献[23]中进行了详细介绍。2013 年风蚀季是指从 2012 年 10 月农作物收割后地表翻耕或留茬开始,到 2013 年 5 月底农作物开始

生长这一段时期,共 8 个月时间,是农田风蚀的主要发生期。这一时期不同等级起沙风速累积时间统计结果见图 5。将模型用到的各种参数信息带入式 17 中,计算得到坝上地区 4 处地点两种地类 2013 年风蚀季农田风蚀量。模型计算的翻耕耙平地风蚀量为 26.75~59.61 $t \cdot hm^{-2}$,平均为 39.45 $t \cdot hm^{-2}$,与采用改进粒度对比法估算的结果比较接近^[23],为 0.68~1.66 倍,平均仅为 1.01 倍,这说明该模型对翻耕耙平地的估算结果是比较准确的,这可能与标准基础模型是在翻耕耙平地上建立的有关(表 1)。模型计算的莜麦留茬地的风蚀量为 10.73~21.33 $t \cdot hm^{-2}$,平均为 14.08 $t \cdot hm^{-2}$,为改进粒度对比法估算结果的 0.51~1.21 倍,平均为 0.78 倍,差距也不大。有学者采用插杆法估算的康保县秋翻耕耙平地年风蚀量为 48.28 $t \cdot hm^{-2}$ ^[24],与本模型

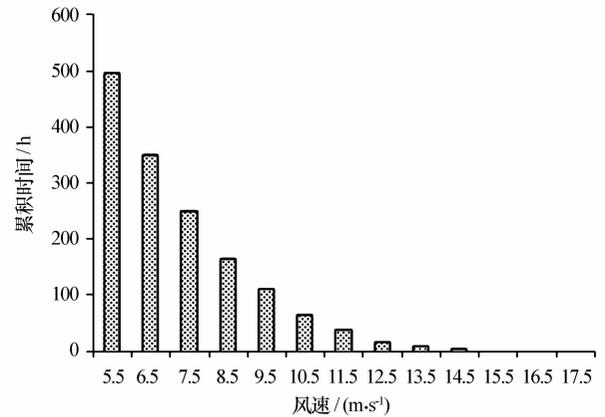


图 5 不同等级起沙风速累积时间

Fig. 5 Statistical results of cumulative time for different wind speeds

表 1 模型计算结果与粒度对比法估算结果的比较

Table 1 Comparison of the results got by model estimation (M) with that by improved particle-size distribution comparison method (L)

地类	地点	模型主要参数			模型(M)计算结果 /($t \cdot hm^{-2}$)	粒度对比法(L)估算 结果/($t \cdot hm^{-2}$)	比值 (M/L)
		z_0/cm	$Ef/\%$	$Wf/\%$			
翻耕耙平地	1	0.1686	53.92	1.8856	26.75	16.16	1.66
	2	0.1686	55.72	1.8856	32.34	47.39	0.68
	3	0.1686	57.91	1.8856	39.10	36.18	1.08
	4	0.1686	64.54	1.8856	59.61	56.73	1.05
	平均	0.1686	58.02	1.8856	39.45	39.12	1.01
莜麦留茬地	1	0.2663	55.90	1.9591	11.60	9.61	1.21
	2	0.2208	52.47	1.9591	12.66	18.90	0.67
	3	0.2663	55.10	1.9591	10.73	21.07	0.51
	4	0.2001	55.02	1.9591	21.33	22.17	0.96
	平均	0.2384	54.62	1.9591	14.08	17.93	0.78

计算的结果($39.45 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$)也比较接近,这都说明应用该模型计算的坝上地区农田风蚀量是比较准确的。

有学者使用 ^{137}Cs 示踪方法测算的康保县农田多年平均风蚀模数为 $8\ 636.29 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ^[13],比本模型的计算结果明显偏大。造成这一结果的原因:一方面可能与采样点位置不同有关;另一方面可能与 ^{137}Cs 示踪方法得到的是多年平均值,本模型计算的则是当前年内值,多年持续的风蚀使农田土壤中可风蚀颗粒物减少,不可风蚀颗粒物增加,从而使风蚀强度降低。

5 结论

目前,中国缺少一种被广泛认可、普遍适用于中国自然条件的农田风蚀模型。本研究利用多年的野外风沙观测数据和风洞模拟实验结果,建立了一种基于坝上地区自然环境的农田风蚀经验模型(WEEM)。该模型涵盖风力侵蚀因子、粗糙干扰因子和土壤抗蚀因子三大风蚀影响因子,包括起沙风速、地表粗糙度、土壤可蚀性和土壤含水率四大风蚀影响要素,可对各种农田地表的风蚀量进行定量计算和预测。

应用该模型对坝上地区2013年风蚀季农田风蚀量进行定量计算。4处地点翻耕耙平地的风蚀量为 $26.75\sim 59.61 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,平均为 $39.45 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$;莜麦留茬地的风蚀量为 $10.73\sim 21.33 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,平均为 $14.08 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,这与采用改进粒度对比法、插杆法等方法得到的结果比较接近,说明应用该模型计算的坝上地区农田风蚀量比较准确。

该模型是根据坝上地区自然环境条件构建的,目前只在康保县局部地区进行了应用和验证。为了提高该模型的预测精度和适用范围,在更广泛地区和更复杂自然条件下对模型进行验证和修订将是今后的重点工作。另外,该模型的大部分参数目前都需要通过野外观测的手段取得,工作量较大,不利于模型的推广和应用,因此,促进风蚀模型与“3S”技术融合,开发基于遥感和GIS技术的大尺度风蚀预报模型也是下一步需要重点考虑的研究方向。

参考文献:

[1] Fernandez-bernal T, Rosa M. Arid Environments and Wind Erosion[M]. New York, USA: Nova Science Publishers, 2009: 1-13.

[2] 董治宝,董光荣,陈广庭. 以北方旱作农田为重点开展我国的土壤风蚀研究[J]. 干旱区资源与环境, 1996, 10(2): 31-37.

[3] Woodruff N, Siddoway F A. A wind erosion equation[J]. Soil Science Society of America Journal, 1965, 29(5): 602-608.

[4] Fryrear D, Saleh A, Bilbro J. A single event wind erosion model[J]. Transactions of the ASAE, 1998, 41(5): 369-374.

[5] Singh U B, Gregory J M, Wilson G R. Texas erosion analysis model: theory and validation[C]//Skidmore E L. Proceeding of An International Symposium/workshop. 1997.

[6] Shao Y, Raupach M, Short D. Preliminary assessment of wind erosion patterns in the Murray-Darling Basin, Australia[J]. Australian Journal of Soil and Water Conservation, 1994, 7: 46-51.

[7] Hagen L A. A wind erosion prediction system to meet user needs[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1991, 46(2): 106-111.

[8] 高尚玉,张春来,邹学勇,等. 京津风沙源治理工程效益[M]. 北京: 科学出版社, 2012: 62-65.

[9] 董治宝. 建立小流域风蚀量统计模型初探[J]. 水土保持通报, 1998, 18(5): 55-62.

[10] 王训明,董治宝,武生智,等. 土壤风蚀过程的一类随机模型[J]. 水土保持通报, 2001, 21(1): 19-22.

[11] 南岭,杜灵通,王锐. 土壤风蚀模型研究进展[J]. 世界科技研究与发展, 2013, 35(4): 505-509.

[12] 常春平. 河北坝上地区农田土壤风蚀防治技术与优化模式[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2006.

[13] 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(2): 724-728.

[14] 吴正等. 风沙地貌与治沙工程学[M]. 北京: 科学出版社, 2003: 100-105.

[15] 董治宝,高尚玉,董光荣. 土壤风蚀预报研究述评[J]. 中国沙漠, 1999, 19(4): 312-317.

[16] 邹学勇,张春来,程宏,等. 土壤风蚀模型中影响因子的分类与表达[J]. 地球科学进展, 2014, 29(8): 875-889.

[17] Zobeck T. M. Soil properties affecting wind erosion[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1991, 6: 112-118.

[18] 王仁德,肖登攀,常春平,等. 农田风蚀量随风速的变化[J]. 中国沙漠, 2015, 35(5): 1120-1127.

[19] Woodruff N P, Siddoway P A. A wind erosion equation[J]. Soil Science Society American Proceeding, 1965, 29(3): 602-608.

[20] 王仁德,肖登攀,常春平,等. 改进粒度对比法估算单次农田风蚀量[J]. 农业工程学报, 2014, 30(21): 278-285.

[21] 李玄姝,常春平,王仁德. 河北坝上地区土地利用方式对农田土壤风蚀的影响[J]. 中国沙漠, 2014, 34(1): 23-28.

[22] Wang R D, Guo Z L, Chang C P, et al. Quantitative estimation of farmland soil loss by wind-erosion using improved particle-size distribution comparison method[J]. Aeolian Research, 2015, 19: 163-170.

- [23] 王仁德,常春平,彭帅,等. 基于粒度对比法的坝上农田风蚀与粉尘释放量估算[J]. 农业工程学报, 2013, 29(21): 108—114.
- [24] 郭晓妮,马礼. 坝上地区不同土地利用类型的地块土壤年风蚀量的对比[J]. 首都师范大学学报:自然科学版, 2009, 30(4): 93—96.

A Wind Erosion Empirical Model of Farmland Applied in Bashang Area of Hebei, China

Wang Rende¹, Chang Chunping², Guo Zhongling², Li Qing¹

(1. Institute of Geographical Sciences/Hebei Engineering Research Center for Geographic Information Application, Hebei Academy of Sciences, Shijiazhuang 050011, China; 2. College of Resource and Environment Sciences/Hebei Key Laboratory of Environmental Change and Ecological Construction, Hebei Normal University, Shijiazhuang 050024, China)

Abstract: There is not a wind erosion model so far that is widely accepted and can be well applied in farmland of China. A wind erosion empirical model applied in farmland of Bashang area, Hebei province was established in the study by years of field observation and wind tunnel simulation. The model was composed of wind erosivity factors, roughness interference factors and soil anti-erodibility factors and included four main elements of influencing wind erosion, which were threshold wind velocity, surface roughness, soil erodibility and soil water content. It can quantitatively estimate and predict soil loss by wind erosion for various farmland surfaces. The soil loss of farmland in the wind erosion season of 2013 was calculated using the model in the Bashang area of Hebei Province. The results showed that the average soil loss by wind erosion was $39.45 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ on ploughed and raked field and $14.08 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ on oat stubble field, which were close to the results obtained by other methods. Validation and revision of the model in a wider area and promoting the technology integration between this model and "3S" technology are the main work in the future.

Key words: wind erosion empirical model; farmland; wind erosivity factors; roughness interference factors; soil anti-erodibility factors; Bashang area