基于风蚀模型的河北省土壤风蚀风险评价

刘 红[1,2], 王 卫[1,2], 郝彦莉[1,2], 左玉珊[1,2]

(1. 河北师范大学 资源与环境科学学院, 河北 石家庄 050024; 2. 河北省环境演变与生态建设实验室, 河北 石家庄 050024)

摘 要: [目的] 对河北省空间范围开展土壤风蚀风险评价研究,以期为研究区基于土壤风蚀的土地退化和大气污染防治提供科学依据。[方法] 在遥感和地理信息系统技术的支持下,采用第一次全国水力普查中推荐的风蚀模型,对研究区 2009 年的土壤风蚀风险进行评价。[结果] 河北省土壤微度侵蚀面积所占比例最大,约占河北省总面积的 65.36%,主要分布在河北平原、太行山地和冀北山地;其次为轻度侵蚀,约占河北省总面积的 12.46%,主要分布在坝上高原和冀西北间山盆地;中强度侵蚀的风蚀面积最小,合计不足河北省总面积的 0.1%,主要为分布在研究区北部的沙地类型;极强侵蚀和剧烈侵蚀没有分布。[结论] 河北省土壤风蚀强度呈现出明显的空间差异性,干燥,风速大,植被覆盖度低的冀西北地区风蚀强度最大,湿润、风速小、植被覆盖度高的冀东北地区风蚀强度最小,南部平原和太行山区风蚀强度中等。

关键词: 土壤风蚀因子; 风蚀模型; 空间分布; 河北省

文献标识码: A **文章编号**: 1000-288X(2016)02-0012-06 **中图分类号**: S157.1

文献参数: 刘红, 王卫, 郝彦莉, 等. 基于风蚀模型的河北省土壤风蚀风险评价[J]. 水土保持通报, 2016, 36(2): 12-17. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2016.02.003

Risk Assessment on Soil Wind Erosion in Hebei Province Based on Wind Erosion Model

LIU Hong[1,2], WANG Wei[1,2], HAO Yanli[1,2], ZUO Yushan[1,2]

(1. *College of Resources and Environmental Sciences, Hebei Normal University, Shijiazhuang, Hebei* 050024, *China*; 2. *Hebei Key Laboratory of Environmental Change and Ecological Construction, Shijiazhuang, Hebei* 050024, *China*)

Abstract: [Objective] A risk assessment on soil wind erosion throughout Hebei Province was conducted to provide some scientific bases for prevention of land degradation and air pollution induced by wind erosion. [Methods] Based on the GIS and remote sensing, the soil wind erosion of Hebei Province in 2009 was evaluated using the wind erosion model recommend in the first national water survey. [Results] The districts assessed at tiny erosion level accounted for 65.36% of Hebei Province, which were mainly distributed in Hebei plain, the Taihang and northern mountainous regions of Hebei Province. The districts with slight erosion were mostly distributed in Bashang plateau and the northwest basins of Hebei Province, covered 12.46% of the whole province. The moderate and strong wind erosion had the smallest area with less than 0.1% coverage throughout Hebei Province, these districts located at the sandy areas of the Northern Hebei Province. No extra-strong and severe erosion in Hebei Province were found. [Conclusion] Wind erosion in Hebei Province had obvious spatial variation, comparating with the highest erosion in the northwest part, moderate level in the southern area and lowest level in the northeast part of the province.

Keywords: **soil wind erosion factor; wind erosion model; spatial distribution; Hebei Province**

土壤风蚀是中国北方干旱、半干旱以及部分半湿润地区土地退化的主要过程之一,其分布范围占国土总面积的 1/2 以上,严重影响这些地区的资源开发和社会经济的可持续发展。土壤风蚀是指一定风速的气流作用于土壤或者土壤母质,土壤颗粒发生位移造成土壤结构破坏、土壤物质损失的过程[1-3]。由于土壤风蚀带来了一系列严重的经济环境问题,引起了国内外学者的广泛关注并进行了大量研究。邵亚平

收稿日期: 2015-02-11 **修回日期**: 2015-04-04

资助项目: 国家自然科学基金项目"基于土地利用的京津冀大气颗粒物浓度时空变化模拟研究"(41471091); 河北省高校重点学科建设项目

第一作者: 刘红(1990—),女(汉族),河北省邢台市人,硕士研究生,研究方向为资源评价与可持续利用。E-mail: liuhongreid@163.com。

通信作者: 王卫(1958—),男(汉族),河北省承德市人,硕士,教授,博士生导师,主要从事综合自然地理学研究。E-mail: wangwei@mail.hebtu.edu.cn。

等[4]提出了风蚀评价模型(WEAM),在综合有关风沙流及大气尘输移的试验与理论研究成果基础上,用此模型估算农田风沙流及大气沙尘输移量,但该模型未能包含风蚀过程中的各主要影响因素以及未能充分考虑各因子间的相互作用。20 世纪 90 年代,美国农业部的科学家们推出了一个新的土壤风蚀预测模型 WEPS,该模型是一个连续的以日为时间尺度、以地块为空间尺度、以过程为基础的模型,适用于农田和草地风蚀的估算,但模型对数据资料的要求较高,模型运算过程较为繁琐,且不适合大面积区域风蚀计算[5]。随着沙尘暴天气日数的逐渐增多以及沙漠化问题的日益严重,中国学者在土壤风蚀方面进行了大量的研究。高尚玉等根据各气象站点数据,利用 GIS 空间差值得到风力因子的空间分布图,并采用典型草原区的耕地、林地、沙地的风蚀预报经验模型估算了 2001 和 2005 年京津风沙源区的土壤风蚀量[13]。张国平[6]利用遥感与地理信息系统方法对全国土壤风力侵蚀状况进行了宏观调查,建立了全国 1∶10 万土壤风力侵蚀数据库。梁海超等[7]在 GIS 的支持下,得到中国北方典型农牧交错区各风蚀因子的空间分布数据,并利用层次分析法构建土壤风蚀危险度评价模型,指出该区土壤风蚀危险度呈现出从东南到西北逐渐增强的趋势。特别是 2010 年启动的第一次全国水利普查项目中首次将基于风洞试验的风蚀模型用于全国尺度的土壤风蚀调查与评价[8],近年来伴随对大气尘污染问题的关注,土壤风蚀研究的区域开始向北方半湿润区扩展[9]。

河北省是全国水土流失最严重的省份之一[10],其中,坝上高原为传统风蚀区,其他区域为传统水蚀区,通常不开展风蚀调查与评价[8]。传统风蚀区的划分是以是否引起土壤退化为标准的,河北省及其毗邻地区传统水蚀区的土壤风蚀强度虽然不会引起土壤退化,但其对大气污染的贡献却不容忽视[11]。为此,本研究应用国内主流风蚀模型方法,对河北省全省空间范围开展土壤风蚀风险评价研究,以期为研究区基于土壤风蚀的土地退化和大气污染防治提供科学依据,同时探讨风蚀模型在北方半湿润地区风蚀评价中的应用。

1　研究区概况与数据来源

1.1　研究区概况

河北省位于东经 113°27′—119°50′,北纬 36°05′—42°40′,地处华北平原东北部,内环京津,面积为 1.89×10^5 km^2。北部与内蒙和辽宁交界,南部与河南和山东接壤,西倚太行山与山西省为临,东临渤海。河北省地势西北高、东南低,呈半环状逐级下降,省域内地貌类型复杂多样,呈现北部坝上高原和冀北山地、西南部太行山地、东南部平原的地貌组合。

河北省属于半湿润半干旱的温带大陆性季风气候,冬季春季寒冷干燥、夏季高温多雨,年均降雨量在 300～800 mm 之间,时空分布不均匀。省内土地利用空间差异明显,坝上高原以草地和耕地为主,山区以林地和草地为主,并有一定数量的耕地,平原以耕地和建筑用地为主。农业种植制度以一年一熟和一年两熟为主。

1.2　数据来源

按照土壤风蚀模型的数据要求,数据主要来源于美国国家气候数据中心(NCDC)网站和河北省气候中心的风速数据,包括研究区内 14 个站点的 2009 年逐日 8 次(0,3,6,9,12,15,18,21 h)观测的数据和 128 个站点的每月≥6 m/s 的累计时间数据,上述数据用于风力因子计算。来源于美国 NASA 网站的 MODIS 数据,包括 2009 年 Mod11 A1(每天合成的空间分辨率为 1 km 的陆地表面温度产品)和 Mod09 GA(每天合成分辨率为 500 m 的 1～7 波段的反射率数据),来源于中国气象科学数据共享网的实测土壤湿度数据,包括研究区内 123 个站点的 2009 年 3—11 月的 10 cm 深土壤相对湿度数据,上述数据用于反演土壤湿度因子。来源于美国 NASA 网站的 MODIS MOD13Q1 数据,为 2009 年 250 m 分辨率归一化植被指数(NDVI)16 d 合成产品,主要用于计算植被覆盖度因子。来源于中国科学院科学数据中心的 2008—2009 年 TM 遥感数据,用于土地利用类型的解译。

2　土壤风蚀研究方法

2.1　风蚀模型

采用第一次全国水力普查中使用的风蚀模型[8],该模型的雏形是国内有关学者以中国半干旱典型草原区栗钙土和风沙土的风洞试验结果建立的[12],并在京津风沙源治理工程等项目中应用并逐渐完善[13]。该模型分别由耕地、草(林)地、沙地风蚀预报模型构成,具体模型为:

$$\text{耕地模型:}\ Q_{fa}=0.018(1-W)\cdot\sum_{j=1}\{T_j\cdot\exp[a_1+b_2/z_0+c_1\cdot(A\cdot U_j)^{0.5}]\}$$

$$\text{草(林)地模型:}\ Q_{fg}=0.018(1-W)\cdot\sum_{j=1}\{T_j\cdot\exp[a_2+b_2\cdot V^2+c_2/(A\cdot U_j)]\}$$

$$\text{沙地模型:}\ Q_{fs}=0.018(1-W)\cdot\sum_{j=1}\{T_j\cdot\exp[a_3+b_3\cdot V+c_3\cdot\ln(A\cdot U_j)/(A\cdot U_j)]\}$$

式中：Q_{fa}——耕地模型区的土壤风蚀模数〔t/(hm^2·a)〕；Q_{fg}——草(林)地模型区的土壤风蚀模数；Q_{fs}——沙地的土壤风蚀模数；U_j——气象站点整点风速统计中大于临界侵蚀风速的第 j 级风速(m/s)；T_j——一年内有风力侵蚀发生期间风速为 U_j 的累计时间(min)。中国北方旱作农田临界侵蚀风速一般略大于流沙地表的 5.0 m/s，气象站点整点风速统计中高于临界侵蚀风速的第一个风速等级为 5.0～5.9 m/s，取其中值 5.5 m/s，因此 $U_{j=1}$=5.5 m/s。$U_{j=2}$=6.5 m/s，以此类推。U_j 最高为整点风速记录中的最大风速。W——表土湿度因子(%)；Z_0——地表粗糙度(cm)；V——植被盖度(%)。A——与下垫面(耕作技术措施)有关的风速修订系数；a_1，b_1，c_1——常数项，分别取值−9.208，0.018 和 1.955(无量纲)；a_2，b_2，c_2 分别取值 2.486 9，−0.001 4 和−54.947 2(无量纲)；a_3，b_3，c_3 分别取值 6.168 9，−0.074 3和−27.961 3(无量纲)。

2.2 风蚀因子的测算

风力因子为不同等级风速。根据研究区内气象站点的逐日 8 次观测的风速数据，按照线性插值方法[8]，计算相邻时刻的整点风速，得到各站点逐日 24 h整点风速估计值；然后按照 1 m/s 间隔统计 1—5 月和 10—12 月大于等于临界风速(U_0=5 m/s)的各等级风速发生的频数，每次代表 1 h，并计算各等级风速的累积时间(频数 60 min/h)；最后采用克里金(Kringing)插值法生成各月各等级风速的 1 km 分辨率的栅格图。并将各等级风速标准化后叠加，再以 IDL 为平台利用逐象元平均法得到不同用地类型大于起沙风速的各等级风速的累计时间的年值。表土湿度因子为土壤表层 0—10 cm 深度范围内的含水率。基于 MODIS 遥感数据和 10 cm 实测土壤湿度数据，采用表观热惯量模型(ATI)和温度植被指数模型(TVDI)反演表层土壤湿度[14]，获得研究区 1—5 月和 10—12 月表层土壤湿度的 1 km 分辨率的栅格图。植被覆盖度因子是通过归一化植被指数(NDVI)数据反演得到，首先使用 250 m 空间分辨率的 MODIS NDVI 16 d 合成产品，采用平均值合成法合成月数据，并采用时间序列谐波分析法对月数据进行滤波处理[15]；然后根据像元二分模型原理[16]逐像元计算 1—5 月和 10—12 月植被覆盖度；最后重采样生成 1 km 分辨率的栅格图。由于缺失研究区地块尺度耕作措施的数据，因此，根据有关学者的相关研究[17]，假定研究区一年一熟耕地在非生长季的地表状态为留茬地或深翻未耙平地，其地表粗糙度统一赋值为 0.10。因此，本研究的风蚀量估算属于土壤风蚀风险评价的范畴[8]。

土地利用类型划分采用 TM 和 MODIS 遥感数据反演得到。按照风蚀模型对土地利用类型划分的要求，首先，基于 TM 影像数据解译得到水田、旱地、林地、草地、水体、盐田、建筑用地、沙地等类型，空间分辨率为 30 m；然后重采样成 250 m 分辨率的栅格图，并配合基于 MODIS 遥感数据得到的 250 m 分辨率的分月植被覆盖率产品，将旱地进一步划分为一年一熟旱耕地和一年两熟旱耕地，将林地进一步划分为植被覆盖度≥70%的高覆被林地和<70%的中低覆被林地；最后重采样生成 1 km 分辨率的土地利用类型栅格图。

2.3 风蚀地类划分与模型应用

在基于 TM 和 MODIS 遥感数据进行土地利用类型划分的基础上，根据风蚀模型对土地利用类型划分的要求和植被覆盖度≥70%不产生风蚀的研究结果[8]，将土地利用类型归并为风蚀地类和非风蚀地类两大类别，其中，风蚀地类主要包括 7 月植被覆盖度<70%的林地、草地、一年一熟旱耕地、一年两熟旱耕地和沙地；非风蚀地类主要包括各类水体、水田、盐田、建筑用地和 7 月植被覆盖度≥70%的林地等。为了使风蚀模型适用于包括了半干旱和半湿润气候的研究区，根据风蚀模型应用条件，对模型应用说明如下：(1) 根据一年两熟耕地在非生长季的作物覆盖状况，该地类的土壤风蚀模数按照草地模型计算；一年一熟耕地的土壤风蚀模数按照耕地模型计算。(2) 由于基于 MODIS NDVI 数据反演的植被覆盖度数据并不能真实反映非生长季草(林)地(含一年两熟耕地)的植被覆盖度，因此，以生长季最后一个月(10月)的植被覆盖度值代表整个非生长季(南部平原及太行山 11—2 月，北部山区坝上 11—翌年 4 月)的植被覆盖度值。(3) 根据风蚀模型的应用条件，耕地的临界风速(U_0)为 5 m/s，沙地和草(林)地的临界风速与植被覆盖度呈正相关，其中，基本无植被覆盖条件下的沙地临界风速为 5 m/s、草(林)地为 8 m/s[8]。(4) 根据土壤风力侵蚀普查方案的要求[8]，计算 1—5 月和 10—12 月共计 8 个月的土壤风蚀模数之和为年土壤风蚀模数。因为研究区 6—9 月植被覆盖度和表土湿度较高、且起沙风速累计时间短，风蚀量的贡献可以忽略不计[13]。

在 ArcGIS 10.0 和 ENVI 4.8 等技术平台的支撑下，利用交互式 IDL 语言编程统一对遥感影像进行预处理，在计算或反演获得各风蚀因子数据的基础上，代入土壤风蚀模型，计算河北省 2009 年 1—5 月

和 10—12 月各月的土壤风蚀模数,最后以各月风蚀模数为基础,以 IDL 为平台利用逐象元加和法得到不同用地类型的年土壤风蚀模数。

3　结果分析

3.1　风蚀因子测算分析

3.1.1　风力因子　风是土壤风蚀形成与发展的自然动力,是进行风蚀定量评价的重要指标。研究[18]表明,风蚀率与风速变化成正相关关系,随着风速增大,风蚀率相应的增加。由图 1 可以看出,河北省全年大于起沙风速(5 m/s)的各等级风速的累计时间的空间分布特征为:高值区主要分布在坝上高原西部和中部、冀西北间山盆地区的盆地部分;次高值区分布在太行山山麓平原区中部、燕山山麓及沿海平原和沧州沿海平原;次低值区主要分布在内陆平原中南部和冀北山地东部地区;低值区主要分布在燕山山地、冀西北间山盆地区的东北部山地和内陆平原北部。

3.1.2　植被覆盖度因子　植被覆盖度是指植被(包括叶、茎、枝)在单位面积内垂直投影面积所占的百分比。植被覆盖度和土壤侵蚀关系密切,是土壤风蚀研究的重要因子。在风蚀过程中,植被覆盖对土壤风蚀具有显著的抑制作用,这种抑制作用通过分解风力,隔断风力对土壤的直接作用,增大地表空气动力学粗糙度和阻挡输沙等多种途径来实现[19-21]。大量研究表明土壤风蚀率与植被盖度呈负指数关系,一定风速下随植被盖度的增大,土壤风蚀率迅速减小[22-23]。由图 1 可以看出,河北省全年植被覆盖度空间分布特征为:冀北山地和太行山地是植被覆盖度高值区,河北平原一年两熟作物区为次高值区,次低值区为河北平原一年一熟作物区,低值区主要分布在冀西北间山盆地、坝上张北高原和沿海平原区。主要原因是山地丘陵区水土资源丰富,适合植被生长发育;坝上高原和冀西北间山盆地区气候高寒干燥、降水少且风沙多,因此植被稀少,覆盖度低。

3.1.3　表土湿度因子　表土湿度因子,是指土壤表层 0—10 cm 深度范围内含水率对土壤风蚀的潜在影响能力,是反映土壤对风力侵蚀的敏感程度的重要因子。由图 1 可以看出,河北省全年表土湿度空间分布特征为:冀北山地、太行山地和滨海地区为表土湿度高值区,河北平原一年两熟作物种植区为次高值区,坝上高原和河北平原一年一熟作物种植区为次低值区,沙土和砾质土分布区为表土湿度低值区。

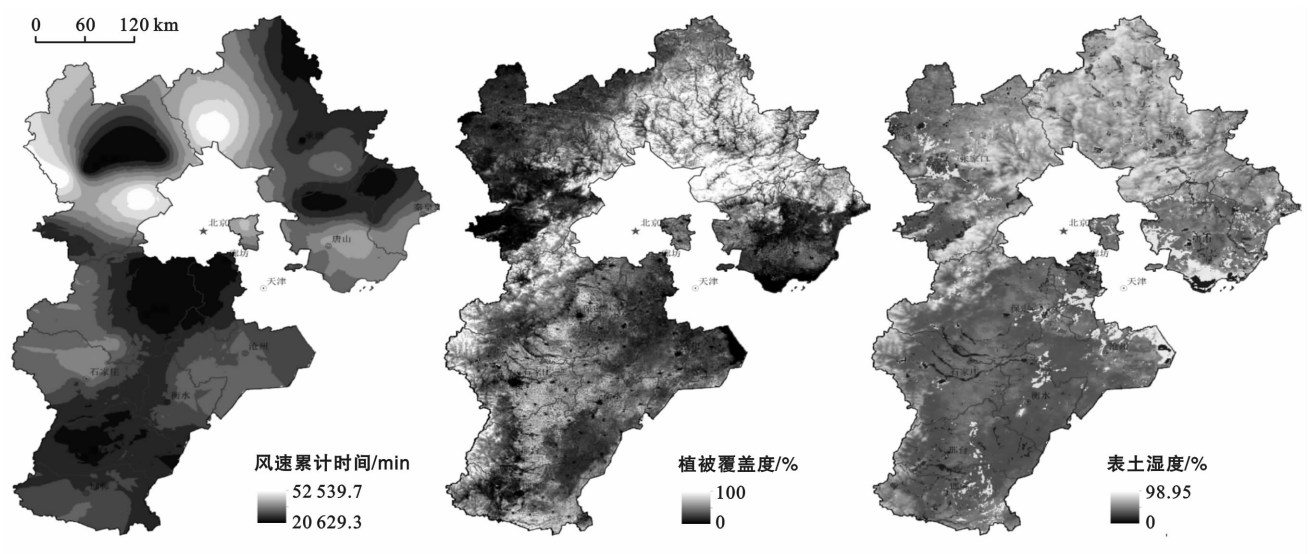


图 1　风力因子、植被盖度因子和表土湿度因子空间分布图

3.2　土地利用类型解译结果分析

由附图 3 可以看出,风蚀地类的空间分布特征为:中低覆被林地和草地主要分布在太行山地、冀北山地和冀西北山地;一年一熟耕地主要分布在河北平原低平原农区、燕山山麓平原区、滨海平原和坝上张北高原;一年两熟耕地主要分布在太行山山麓平原区;沙地主要分布在冀西北间山盆地和冀北山地的小部分地区。非风蚀地类的空间分布特征:植被覆盖度≥70%的高覆被林地主要分布在冀北山地、冀西北山地和太行山地,其中冀北山地分布最广;建筑用地主要分布在广大平原和冀西北盆地;盐田和水田等主要分布在滨海平原。

3.3　土壤风蚀评价结果与分析

参照我国土壤风蚀强度分级标准,将河北省土壤风蚀分为 4 个级别,分别为微度侵蚀、轻度侵蚀、中度侵蚀和强烈侵蚀,并将微度侵蚀和轻度侵蚀各划分为

3个次级级别(表1)。从表1可以看出,微度侵蚀面积最大,约为 1.25×10^7 hm^2,约占河北省总面积的65.36%;其中,微度侵蚀Ⅰ级面积最大,约为 6.21×10^6 hm^2,占整个河北省总面积的32.46%,微度侵蚀Ⅱ级次之,约占河北省总面积的25.47%。轻度侵蚀面积约为 2.38×10^7 hm^2,约占河北省总面积的12.46%。中强度侵蚀面积最小,合计不足总面积的0.1%。

河北省2009年土壤风蚀程度具有明显的空间差异性(附图4),微度侵蚀是河北省主要的土壤风蚀类型,主要分布在河北平原和太行山地,包括保定、石家庄、沧州、衡水、邢台和邯郸的全部,廊坊的大部分以及唐山、秦皇岛的平原区。其次分布在冀西北间山盆地和冀北山地,主要包括张家口的万全、崇礼和赤城3县,承德地区也有少量分布。微度侵蚀虽然对土壤退化影响很小,但却是大气颗粒物污染的重要来源。轻度侵蚀主要分布在坝上高原和冀西北间山盆地,其中冀西北间山盆地西部侵蚀程度较重;其次轻度侵蚀在冀北山地中西部地区也有少量分布。主要是因为这些地区的植被覆盖度较低,风速累计时间较长,对地表土壤的风蚀加剧。中强度侵蚀的风蚀面积最小,主要分布在北部地区,土地利用类型为沙地。轻度以上侵蚀对土壤退化和大气颗粒物污染均有贡献,是冀西北间山盆地和坝上高原地区的主要生态环境问题之一。

表1 河北省2009年土壤风蚀强度评价结果

土壤侵蚀级别	微度侵蚀				轻度侵蚀				中度侵蚀	强烈侵蚀
	Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	小计	Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	小计		
分级标准/($t\cdot hm^{-2}\cdot a^{-1}$)	0~0.5	0.5~1.2	1.2~2	0~2	2~5	5~10	10~25	2~25	25~50	50~80
面积/hm^2	6.21×10^6	4.87×10^6	1.42×10^6	1.25×10^7	1.96×10^6	4.133×10^5	9 000	2.38×10^6	9 900	1 000
比例/%	32.46	25.47	7.42	65.36	10.26	2.16	0.05	12.46	0.05	0.01

4 讨论与结论

(1) 以遥感和地理信息系统为基础平台,采用第一次全国水力普查中推荐的风蚀模型,将应用于传统风蚀区的模型推广到北方半湿润地区,对河北省全省空间范围开展土壤风蚀风险评价研究,并且为了使风蚀模型适用于包括了半干旱和半湿润气候的研究区,根据风蚀模型的应用条件,对模型进行了适当的修正和调整。

(2) 在各土壤风蚀因子的影响下,河北省土壤风蚀强度呈现出明显的空间差异性。微度侵蚀面积最大,约占河北省总面积的65.36%,主要分布在河北平原和太行山地;其次为轻度侵蚀,约占河北省总面积的12.46%,主要分布在坝上高原和冀西北间山盆地;中强度侵蚀的风蚀面积最小,合计不足总面积的0.1%,主要分布在北部沙地;极强侵蚀和剧烈侵蚀为零。京津风沙源研究[13]结果表明,京津风沙源区轻度侵蚀和微度侵蚀面积最大,而中强度侵蚀面积最小,合计不足总面积的1%。这与本研究结果基本一致,说明本文的反演模型具有一定的可行性,反演结果具有一定的可信度。

(3) 土壤风蚀是沙漠化的重要组成部分和首要环节[24],是制约区域可持续发展的关键因素之一。严重的土壤风蚀不仅危害风蚀源区,带走大量的地表颗粒物质,也会造成土壤养分和有机物质的流失,进而导致土地退化和沙化,使风蚀区农田和草地生态系统的生产力下降,影响农牧业发展。土壤风蚀还会使地区生态环境质量下降,进而阻碍社会经济可持续发展,而且还会产生大范围的沙尘暴天气和大气环境污染问题,影响周边地区的大气环境质量和人们正常的生产生活。因此本文给出以下几点土壤风蚀防治措施和减缓对策。① 加强植树造林和生态林网的建设,保持土壤水分,提高植被覆盖度,改善土壤生存环境,削弱风力因子对表层土壤的侵蚀,为区域经济社会的可持续发展提供良好的生态保障。② 调整产业结构,合理利用土地资源。③ 加强科研工作,深入研究土壤风蚀机理,建立和完善土壤风蚀监测预报系统,及时了解风蚀动态,合理安排风蚀防治进度。④ 加强风蚀防治知识的普及和教育,提高全民风蚀防治意识。

(4) 本研究由于缺失研究区地块尺度耕作措施的数据,假定研究区一年一熟耕地在非生长季的地表状态为留茬地或深翻未耙平地,将地表粗糙度统一赋值为0.10,在今后的研究中应增加耕作措施因子的调查;另外,本研究评价单元的空间分辨率也有待进一步提高。

[参 考 文 献]

[1] 胡云峰,刘纪远,庄大方.土壤风力侵蚀研究现状与进展[J].地理科学进展,2003,22(3):288-295.

[2] 陈渭南,董光荣,董治宝.中国北方土壤风蚀问题的研究进展和趋势[J].地球科学进展,1994,9(5):6-12.

[3] 李玉宝.干旱半干旱区土壤风蚀评价方法[J].干旱区资源与环境,2000,14(2):49-52.

[4] Shao Y, Raupach M R, Leys J F. A model for predicting aeolian sand drift and dust entrainment on scales from paddock to region[J]. Australian Journal of Soil Research,1996,34(2):309-342.

[5] Hagen L J. A wind erosion prediction system to meet the users need[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1991,46(2):107-111.

[6] 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.

[7] 梁海超,师华定,白中科. 中国北方典型农牧交错区的土壤风蚀危险度研究[J]. 地球信息科学学报,2010,12(4):510-516.

[8] 郭索彦,刘宝元,李智广,等. 土壤侵蚀调查与评价[M]. 北京:中国水利水电出版社,2014:107-132.

[9] 王仁德,邹学勇,赵婧妍. 半湿润区农田土壤风蚀的风洞模拟研究[J]. 中国沙漠,2012,32(3):640-646.

[10] 侯秀瑞,马为民. 河北省土壤侵蚀现状及防治对策[J]. 河北林业科技,2001,5(2):47-49.

[11] 陈莉,李涛,韩婷婷,等. WEPS 模型下天津郊区风蚀尘对城区空气质量的影响[J]. 中国环境科学,2012,32(8):1353-1360.

[12] 张春来. 现代沙质荒漠化(沙漠化)动力机制若干问题研究[D]. 甘肃 兰州:中国科学院寒区旱区环境与工程研究所,2002.

[13] 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,2008:33-42.

[14] 邸兰杰,王卫,成贺玺,等. 基于 ATI 和 TVDI 模型的河北平原土壤湿度遥感反演[J]. 中国生态农业学报,2014,22(6):737-743.

[15] 左玉珊,王卫,郝彦莉,等. 基于 MODIS 影像的土地覆被分类研究:以京津冀地区为例[J]. 地理科学进展,2014,33(11):1556-1565.

[16] 吴云,曾源,赵炎,等. 基于 MODIS 数据的海河流域植被覆盖度估算及动态变化分析[J]. 资源科学,2010,32(7):1417-1424.

[17] 王仁德,邹学勇,赵婧妍. 北京市农田风蚀的野外观测研究[J]. 中国沙漠,2011,31(2):401-406.

[18] 何文清,高旺盛,妥德宝,等. 北方农牧交错带土壤风蚀沙化影响因子的风洞试验研究[J]. 水土保持学报,2004,18(3):1-4.

[19] Van de Ven T A M, Fryrear D W, Span W P. Vegetation characteristics and soil loss by wind[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1989,44(2):347-349.

[20] Wolfe S A, Nickling W G. The protective role of sparse vegetation in wind erosion[J]. Progress on Physical Geography, 1993,17(3):50-68.

[21] 张春来,邹学勇,董光荣,等. 植被对土壤风蚀影响的风洞试验研究[J],水土保持学报,2003,17(3):32-33.

[22] 胡孟春,刘玉璋,乌兰,等. 科尔沁沙地土壤风蚀的风洞试验研究[J]. 中国沙漠,1991,11(1):22-29.

[23] 刘玉璋,董光荣,李长治. 影响土壤风蚀主要因素的风洞试验研究[J]. 中国沙漠,1992,12(4):41-49.

[24] 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(2):31-37.

(上接第 11 页)

[12] 张健,刘国彬,许明祥,等. 黄土丘陵区植被次生演替灌木初期土壤物理性质特征[J]. 水土保持研究,2008,15(4):101-104.

[13] 勃海锋,刘国彬,王国梁. 黄土丘陵区退耕地植被恢复过程中土壤入渗特征的变化[J]. 水土保持通报,2007,27(3):1-5.

[14] 李勇,徐晓琴,朱显谟,等. 黄土高原植物根系强化土壤渗透能力的有效性[J]. 科学通报,1992,37(4):366-369.

[15] Wu Weidong, Zheng Shizhang, Lu Zhihong, et al. Effect of plant roots on penetrability and anti-scouribility of red soil derived from granite[J]. Pedosphere, 2000, 10(2):183-188.

[16] Joseph L, Pikul J, Kristian J A. Water infiltration and storage affected by subsoiling and subsequent tillage [J]. Soil Science Society of America Journal, 2003,67(3):859-866.

[17] Zhou Zhengchao, Shangguan Zhouping. The effects of ryegrass roots and shoots on loess erosion under simulated rainfall[J]. Catena, 2007,70(3):350-355.

[18] McCully M E, Boyer J S. The expansion of maize root-cap mucilage during hydration(3): Changes in water potential and water content[J]. Physiologia Plantarum, 1997,99(1):169-177.

[19] 李莉,孟杰,杨建振,等. 不同植被下生物结皮的水分入渗与水土保持效应[J]. 水土保持学报,2010,24(5):105-109.

[20] 张侃侃,卜崇峰,高国雄. 黄土高原生物结皮对土壤水分入渗的影响[J]. 干旱区研究,2011,28(5):808-812.

[21] 国家发展改革委,水利部,农业部,国家林业局. 黄土高原地区综合治理规划大纲[OL/S]. (20100910)[20110117]. http://www.sdpc.gov.cn/.

[22] 任宗萍,张光辉,王兵,等. 双环直径对土壤入渗速率的影响[J]. 水土保持学报,2012,26(4):94-97.

[23] 徐敬华,王国梁,陈云明,等. 黄土丘陵区退耕地土壤水分入渗特征及影响因素[J]. 中国水土保持科学,2008,6(2):19-25.