

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2023.04.031.

魏文杰, 袁利, 李文龙, 等. 县域尺度风力侵蚀栅格计算结果落地研究[J]. 水土保持研究, 2023, 30(4): 42-46, 52.

WEI Wenjie, YUAN Li, LI Wenlong, et al. Study on the Grid Calculation Results of Wind Erosion at County Scale[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(4): 42-46, 52.

县域尺度风力侵蚀栅格计算结果落地研究

魏文杰¹, 袁利², 李文龙¹, 刘卓昊¹, 高睿瑜¹, 张荣华¹, 毛玉磊³

(1. 山东泰山森林生态系统国家定位研究站/山东农业大学 林学院, 山东 泰安 271018;

2. 淮河水利委员会 淮河流域水土保持监测中心站, 安徽 蚌埠 233001; 3. 山东水文水环境科技有限公司, 济南 250014)

摘要: [目的] 探讨基于栅格侵蚀数据确定风力侵蚀地块的状况, 为县域尺度侵蚀计算和水土流失栅格计算结果落地等工作提供参考。 [方法] 以黄泛平原风沙区河南省兰考县为例, 基于耕地风力侵蚀模型, 采用栅格计算和软件判断方法, 结合野外验证, 探讨县域尺度风力侵蚀栅格计算结果落实到地块的状况。 [结果] (1) 栅格计算的兰考县耕地风力侵蚀面积为 125.91 km², 涉及 1 259 128 个栅格, 侵蚀模数集中分布在 200~400 t/(km²·a)。(2) 软件判断法统计的耕地风力侵蚀面积为 125.08 km², 涉及 2 284 个地块, 侵蚀模数集中在 200~400 t/(km²·a); 超过 50% 流失比例的地块占风力侵蚀地块总数的 96%, 100% 流失比例的地块面积分布在 0.000 04~0.6 km²。(3) 在面积相对误差上, 软件判断法与栅格计算法相对误差为 0.66%, 城关镇最大, 达 136.50%, 张君墓镇最小, 为 0.56%; 在空间分布上, 软件判断法比栅格计算法聚集度指数高、离散程度低, 空间分布集中、连续性强。(4) 野外验证中, 34 个风力侵蚀地块强度与软件判断法相符, 一致率为 68%。 [结论] 在控制耕地地块面积的前提下, 软件判断法将栅格计算风力侵蚀结果落实到地块方法可行, 结果基本合理。

关键词: 黄泛平原风沙区; 耕地风力侵蚀模型; 栅格; 地块

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2023)04-0042-05

Study on the Grid Calculation Results of Wind Erosion at County Scale

WEI Wenjie¹, YUAN Li², LI Wenlong¹, LIU Zhuohao¹,

GAO Ruiyu¹, ZHANG Ronghua¹, MAO Yulei³

(1. Shandong Taishan Forest Ecosystem National Positioning Research Station/College

of Forestry, Shandong Agricultural University, Tai'an, Shandong 271018, China; 2. Huaihe River Basin

Soil and Water Conservation Monitoring Center of Huaihe River Water Conservancy Commission, Bengbu,

Anhui 233001, China; 3. Shandong Hydrology and Water Environment Technology Co., Ltd., Jinan 250014, China)

Abstract: [Objective] This paper discusses the situation of determining wind eroded land plot based on grid erosion data, providing reference for county scale erosion calculation and soil erosion grid calculation results landing. [Methods] Lankao County, Henan Province, in the Yellow River alluvial area was taken as an example. Based on the wind erosion model of cultivated land, grid calculation and software judgment method combined with field verification were used to explore the implementation of grid calculation results of wind erosion at county scale to plots. [Results] (1) The wind erosion area of cultivated land in Lankao County was 125.91 km², involving 1 259 128 grids, and the erosion modulus concentrated in the range of 200 t/(km²·a) and 400 t/(km²·a). (2) The wind erosion area of cultivated land calculated by software judgment method was 125.08 km², involving 2 284 plots, and the erosion modulus concentrated between 200 t/(km²·a) and 400 t/(km²·a). The plots with more than 50% in loss proportion accounted for 96% of the total plots

收稿日期: 2022-04-03

修回日期: 2022-06-29

资助项目: 淮河水利委员会项目(SBJ-2020-010); 山东省自然科学基金(ZR2020MD023)

第一作者: 魏文杰(1998—), 女, 山东淄博人, 硕士研究生, 研究方向为水土保持监测与评价。E-mail: 17854337075@163.com

通信作者: 张荣华(1984—), 女, 山东威海人, 博士, 副教授, 主要从事水土保持监测与评价。E-mail: zrhua5766@163.com

<http://stbcy.paperonice.org>

eroded by wind, and the plots with 100% in loss proportion ranged from 0.000 04 km² to 0.6 km². (3) In terms of area relative error, the relative error of software judgment method and grid calculation method was 0.66%, the relative error for Chengguan Town was the largest (136.50%), and the relative error for Zhangjunmu Town was the smallest (0.56%). In the spatial distribution, the software judgment method had higher aggregation index and lower dispersion degree than the grid calculation method, and the spatial distribution was concentrated and continuous. (4) In the field validation, the intensity of 34 wind-erosion plots was consistent with the software judgment method, with an agreement rate of 68%. [Conclusion] Under the premise of controlling the land area of cultivated land, the software judgment method was feasible and reasonable to implement the results of wind erosion calculated by grid into the land area.

Keywords: Yellow River alluvial area; wind erosion model of cultivated land; grid; plot

风力侵蚀是土壤侵蚀的主要类型之一,是干旱、半干旱地区及部分半湿润地区土地荒漠化的根本原因。2020年中国水土保持公报数据显示,全国风力侵蚀总面积为 1.57×10^6 km²,占水土流失总面积的58.41%,占国土面积的16.38%,与2019年相比,风力侵蚀面积减少0.34 km²。风力侵蚀状况整体向好态势进一步稳固,但局部地区严重的风力侵蚀易造成土地沙化贫瘠,进而导致生态失调,影响着区域社会的可持续发展。因此,定期开展土壤风力侵蚀状况调查,掌握区域风力侵蚀现状和发展趋势,对水土流失预防监督、综合治理和规划设计等具有重要的意义^[1-3]。

目前,国内外区域尺度的风力侵蚀监测多采用人机交互解译法、因子叠加法、抽样调查法、模型法等多种方法。随着风力侵蚀预报模型的提出、修正和优化,模型法被广泛使用,我国学者也逐步建立了适合我国风力侵蚀研究的模型^[4-5]。2020年,水利部水土保持监测中心《2020年度水土流失动态监测技术指南》(简称“技术指南”),明确在风力侵蚀地区,根据土地利用类型,分别选用与之对应的耕地、草(灌)地、沙地(漠)风力侵蚀模型,以栅格为基本单元,计算土壤侵蚀模数^[6-7]。基于栅格数据结构进行风力侵蚀计算可快速掌握区域内风力侵蚀强度,但细小栅格把完整的地块破碎化,导致一个地块中含有若干个不同侵蚀强度的栅格^[8]。而水土流失治理和水土保持规划工作中无法精确到栅格,多以地块为基本单元。因此,将栅格计算结果与县域实际治理或规划的地块单元结合起来,对区域风力侵蚀治理具有重要的理论和实践意义。

本文以黄泛平原风沙区河南省兰考县为研究区域,利用耕地风力侵蚀模型,采用栅格算法,借助北京师范大学开发的水土流失图斑确定与判断软件,将风力侵蚀栅格计算结果落实到地块上,并通过野外实地验证,探讨基于栅格侵蚀数据确定风力侵蚀地块的状况,为县域尺度侵蚀计算和水土流失栅格计算结果落地等工作提供参考。

1 研究区概况

兰考县为河南省开封市下辖县,位于黄泛平原风沙区中部,西北部濒临黄河,与山东省接壤,东临曹县,北部与东明县为界,地理坐标位于北纬34°45′—35°02′,东经115°15′—114°41′。全县面积1 116 km²,包括葡萄架乡、仪封乡、三义寨乡、城关镇等15个乡镇。属暖温带季风气候,光热充足,四季分明,全年以冬春风速较大,最大风速在2月,达5.90~10.95 m/s^[9],夏季降水较为集中,平均年降雨量678.2 mm。地处黄河冲积平原,总体上地形平坦。土壤类型主要有沙土、草甸风沙土、小两合土,质地疏松易吹蚀。植被类型属暖温带落叶阔叶林,自然植被破坏严重,绝大部分地区为人工植被,林分结构单一。种植作物有小麦、玉米、花生、山药、地瓜、大豆,西北部大面积种植牧草苜蓿。

2 研究方法

2.1 数据源

(1) 遥感数据。2 m分辨率GF-1, GF-6卫星遥感影像,时像为2020年1月和3月,CGCS2000坐标系, R, G, B, NIR波段。

NASA网站(<http://earthdata.nasa.gov/>)下载2015—2020年9 km分辨率SMAP增强型Level-3辐射计土壤水分日产品(版本2)。

(2) 风速数据。兰考县风力侵蚀定位站及周围各县气象站点1991—2015年逐日整点风速观测数据。

2.2 栅格算法

基于2 m分辨率遥感影像的色彩、形状、纹理等特征,结合兰考县实际情况和野外调查,建立土地利用解译标志,采用人机交互解译方式进行土地利用解译,生成土地利用矢量图层。针对耕地,采用《2020年度水土流失动态监测技术指南》的耕地风力侵蚀模型计算耕地风力侵蚀模数^[7,10-11],按照《土壤侵蚀分类分级标准》

SL190—2007 判断风力侵蚀强度和面积,并根据侵蚀栅格分布生成风力侵蚀地块编号栅格图层。

耕地风力侵蚀模型基本形式为:

$$Q_{in}=0.018(1-W)\sum_{j=1}^{35}T_j\exp\left[-0.9208+\frac{0.018}{Z_0}+1.955(0.893U_j)^{0.5}\right]$$

式中: Q_{in} 为每半个月内耕地风力侵蚀模数 $[\text{t}/(\text{hm}^2\cdot\text{a})]$; W 为每半个月内表土湿度因子,介于 $0\sim 1$; T_j 为每半个月各风速等级的累计时间 (min) ; Z_0 为地表粗糙度 (cm) ; j 为风速等级序号,在 $5\sim 40\text{ m/s}$ 内按 1 m/s 为间隔划分为35个等级,取值 $1, 2, \dots, 35$; U_j 为第 j 个等级的平均风速 (m/s) ,如风速等级为 $5\sim 6\text{ m/s}$, $U_1=5.5\text{ m/s}$ 。

各等级风速累计时间。各站点按 1 m/s 间隔统计临界侵蚀风速以上各等级风速的累积时间,利用普通克里金空间插值方法,对各等级风速累计时间进行插值,生成 10 m 空间分辨率的各等级风速累计时间栅格数据。

粗糙度因子。野外调查作物类型、高度和盖度,结合遥感影像对一年一熟、一年两熟地块进行综合判别,依据兰考县风蚀定位观测站数据,对其粗糙度进行赋值,经数据格式转换生成 10 m 空间分辨率的栅格数据。

表土湿度因子。SMAP 土壤湿度产品经投影转换、重采样、裁剪等处理,获得24个半月 10 m 空间分辨率的栅格数据。

2.3 软件判断法

2.3.1 风力侵蚀地块确定 风力侵蚀地块指具有准确空间位置和边界,且侵蚀强度为轻度及其以上等级的风力侵蚀矢量图斑。

基于土地利用和栅格算法风力侵蚀成果,利用北京师范大学水土流失图斑确定与判断软件,通过平均土壤侵蚀模数和高强度指数等综合分析,划定风力侵蚀地块。

软件判断法所需基础数据包括兰考县行政边界矢量图层,土地利用解译生成的土地利用矢量图层,栅格算法得到的风力侵蚀模数栅格图层、风力侵蚀强度栅格图层、风力侵蚀地块编号栅格图层。

以基于栅格算法计算的耕地风力侵蚀面积作为目标面积,以“地块平均土壤侵蚀模数”为主要条件进行排序,筛选侵蚀模数大的地块,剔除侵蚀模数小的地块;以“高强度指数”为次要条件,筛选出侵蚀强度指数高的土壤侵蚀地块,累加到与目标面积接近。高强度指数是指土壤侵蚀地块内,强烈、极强烈和剧烈侵蚀强度栅格数量之和与地块内轻度、中度、强烈、极强烈和剧烈侵蚀强度栅格数量之和的比值。

对比栅格算法统计的耕地各强度级风力侵蚀面积,按照软件判断法统计的耕地风力侵蚀面积与栅格算法计算的耕地风力侵蚀面积相对误差 $\leq 1\%$ 的原则,从侵蚀模数大的地块中继续筛选直至满足小于相对误差阈值,最终确定出风力侵蚀地块。

2.3.2 野外验证 基于软件判断法耕地风力侵蚀统计成果,随机选取50个地块,通过现场勘察、拍照记录、询问当地老乡、无人机航拍等方式,开展野外调查与复核验证。以地块为单位,根据地块内土壤类型与质地、作物组成配置、熟制、种植方式等,实地判断验证侵蚀强度,并计算其野外一致率。

野外验证一致率是指野外调查风力侵蚀强度为轻度及以上的地块数量在50个抽查图斑中的比例。

2.4 风力侵蚀计算结果差异分析

采用面积相对误差、聚集度指数、斑块密度等,分析不同统计方法的风力侵蚀强度、面积和空间分布差异。

面积相对误差=|软件判断法统计的风力侵蚀面积-栅格算法统计的风力侵蚀面积|/栅格算法统计的风力侵蚀面积 $\times 100\%$ 。

利用Fragstats4.2软件提取分析聚集度指数(Aggregation Index)、斑块密度(Patch Density)^[12]。聚集度指数越接近100,斑块密度越小,地块越集中。

3 结果与分析

3.1 基于栅格算法的耕地风力侵蚀

兰考县土地总面积 $1\,116\text{ km}^2$,其中耕地面积 676.19 km^2 。基于栅格算法计算的兰考县耕地风力侵蚀面积为 125.91 km^2 ,占县域面积的 11.28% ,占耕地面积的 18.62% ;涉及1 259 128个侵蚀栅格,分布于3 493个地块(对应2 721 915个栅格)。从风力侵蚀强度(表1)看,微度风力侵蚀的侵蚀模数集中在 $0\sim 100\text{ t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$;轻度风力侵蚀的侵蚀模数集中在 $200\sim 400\text{ t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$ 。

表1 栅格算法风力侵蚀模数面积及比例

风力侵蚀强度	风力侵蚀模数/ ($\text{t}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)	风力侵蚀面积/ km^2	占风力侵蚀面积比例/%	占耕地面积比例/%
微度	0~100	449.76	0	66.51
	100~200	100.52	0	14.87
	小计	550.28	0	81.38
	200~300	54.13	42.99	8.01
	300~400	59.71	47.43	8.83
轻度	400~500	7.50	5.96	1.11
	500~600	3.14	2.49	0.46
	600~700	1.43	1.13	0.21
	小计	125.91	100.00	18.62
	合计	676.19	100.00	100.00

3.2 基于软件判断法的耕地风力侵蚀

软件判断法确定风力侵蚀面积 125.08 km², 分布于 2 284 个地块(对应 1 250 812 个栅格), 涉及 1 014 575 个侵蚀栅格。从地块数量(表 2)看, 2 284 个风力侵蚀地块的平均侵蚀模数分布在 200~700 t/(km²·a), 其中集中分布在 300~400 t/(km²·a), 200~300 t/(km²·a), 地块数量分别占 47.99%, 41.24%; 600~700 t/(km²·a) 的地块数量最少, 仅有 19 个。从地块面积看, 平均侵蚀模数在 200~300 t/(km²·a), 300~400 t/(km²·a) 的地块面积占耕地风力侵蚀面积的 91.55%; 600~700 t/(km²·a) 地块面积为 0.45 km², 仅占 0.36%。可以看出, 随着平均侵蚀模数的增大, 地块数量及其面积整体上呈下降趋势, 说明兰考县的耕地风力侵蚀强度虽为轻度, 但大部分地块的平均侵蚀模数较小, 侵蚀强度较弱。

从风力侵蚀地块流失比例(表 3)看, 地块内流失比例越大, 风力侵蚀强度越接近轻度。流失比例为

100% 的地块数量占风力侵蚀地块数量 64.23%, 占风力侵蚀地块面积的 37.60%。流失比例<40% 的地块仅有 17 个, 其比例为 0.74%, 面积 1.6 km²。流失比例在 50% 以上的地块数量占 96%, 面积达到 114.76 km², 占地块面积的 91.75%。从地块大小看, 流失比例为 100% 的地块大小分布在 0.000 4~0.594 7 km², 平均地块大小为 0.03 km²。相比于其他流失比例, 地块大小较小。

表 2 软件判断法不同风力侵蚀模数的地块数量与面积

平均侵蚀模数/ (t·km ⁻² ·a ⁻¹)	地块 数量/个	地块数量 百分比/%	地块 面积/km ²	地块面积 百分比/%
200~300	942	41.24	67.95	54.33
300~400	1096	47.99	46.55	37.22
400~500	176	7.71	8.14	6.51
500~600	51	2.23	1.99	1.59
600~700	19	0.83	0.45	0.36
合计	2284	100.00	125.08	100.00

表 3 软件判断法不同流失比例风力侵蚀地块统计

流失 比例/%	地块 数量/个	地块数量 百分比/%	地块 面积/km ²	地块面积 百分比/%	地块大小 范围/km ²	地块平均 大小/km ²
<40	17	0.74	1.6	1.28	0.0024~0.4463	0.09
40~50	67	2.93	8.72	6.97	0.0018~0.6215	0.13
50~60	95	4.16	10.09	8.07	0.0029~0.6503	0.11
60~70	129	5.65	13.07	10.45	0.0014~0.7531	0.10
70~80	139	6.09	15.1	12.07	0.0013~0.8752	0.11
80~90	129	5.65	8.88	7.10	0.0006~0.5472	0.07
90~100	241	10.55	20.59	16.46	0.0015~0.9408	0.09
100	1467	64.23	47.03	37.60	0.0004~0.5947	0.03
合计	2284	100.00	125.08	100.00	0.0004~0.9408	0.05

3.3 栅格算法与软件判断法的风力侵蚀差异

栅格算法和软件判断法的兰考县耕地风力侵蚀面积差异不大, 相对误差 0.66%, 但栅格算法比软件判断法稍大 0.83 km²。从各乡镇的侵蚀分布情况(表 4)看, 仪封乡、张君墓镇、城关乡的耕地风力侵蚀面积较大, 面积占比在全县平均值以上, 其中仪封乡耕地风力侵蚀面积占全县耕地风力侵蚀面积的比例高达 27%, 孟寨乡无耕地风力侵蚀。从两种统计方法下耕地风力侵蚀面积的相对误差来看, 张君墓镇的面积相对误差最小, 为 0.56%; 城关镇的面积相对误差达到 136.50%, 为最大。

从空间分布图(图 1)看, 软件判断法以矢量成图, 聚集度指数 95.83, 斑块密度 5.96%。栅格算法以栅格成图, 聚集度指数 93.67, 斑块密度 19.92%。软件判断法聚集度指数高, 斑块数量少, 离散程度低, 连续性好, 侵蚀地块空间分布集中。栅格算法, 斑块数量多且破碎离

散, 连续性差, 侵蚀空间分布相对分散。

3.4 风力侵蚀地块野外验证

根据实地调查, 获得各地块的土壤类型与质地、作物组成配置、熟制、种植方式和水土保持耕作措施等信息。野外验证的 50 个地块中, 16 个地块风力侵蚀强度为微度, 面积为 1.49 km², 种植制度以玉米-小麦一年两熟轮作为主, 且留茬, 土壤质地为壤土, 不易产生风力侵蚀; 34 个地块风力侵蚀强度为轻度, 面积 5.13 km², 以种植花生、山药为主, 作物熟制为一年一熟, 冬春季土地裸露, 土壤质地为沙土或偏沙土, 易起沙。

从 50 个被抽取的地块看, 基于软件判断法的耕地风力侵蚀面积为 6.17 km², 产生风力侵蚀地块 50 个。野外抽样调查法的面积为 5.13 km², 产生风力侵蚀地块 34 个。通过对比发现野外验证耕地风力侵蚀面积比软件判断法结果小 1.04 km², 地块数量少 16 个, 野外验证一致率为 68%。

表 4 栅格计算和软件判断风力侵蚀差异

镇名	栅格计算法		软件判断法		差异		相对误差
	面积/km ²	百分比/%	面积/km ²	百分比/%	面积/km ²	百分比/%	
仪封乡	33.61	26.69	34.76	27.79	1.16	−138.92	3.44
张君墓镇	27.90	22.16	28.06	22.43	0.16	−18.65	0.56
城关乡	13.76	10.93	15.90	12.71	2.14	−256.67	15.53
三义寨乡	11.80	9.37	10.84	8.67	−0.95	114.50	8.08
葡萄架乡	10.54	8.37	8.23	6.58	−2.31	277.31	21.91
小宋乡	6.87	5.46	5.77	4.61	−1.10	131.94	15.99
许河乡	4.78	3.79	4.59	3.67	−0.19	22.23	3.88
红庙镇	4.62	3.67	4.01	3.20	−0.61	73.32	13.22
东坝头乡	3.20	2.54	3.44	2.75	0.24	−29.12	7.58
南彰镇	3.17	2.52	3.27	2.62	0.10	−11.75	3.08
谷营镇	2.98	2.36	3.19	2.55	0.21	−25.43	7.11
阎楼乡	1.56	1.24	1.61	1.29	0.05	−5.50	2.93
垌阳镇	0.60	0.47	0.36	0.28	−0.24	28.86	40.34
瓜营乡	0.28	0.22	0.44	0.36	0.17	−20.21	61.01
城关镇	0.26	0.20	0.60	0.48	0.35	−41.91	136.50
孟寨乡	0	0	0	0	0	0	0
合计	125.91	100.00	125.08	100.00	−0.83	100.00	0.66

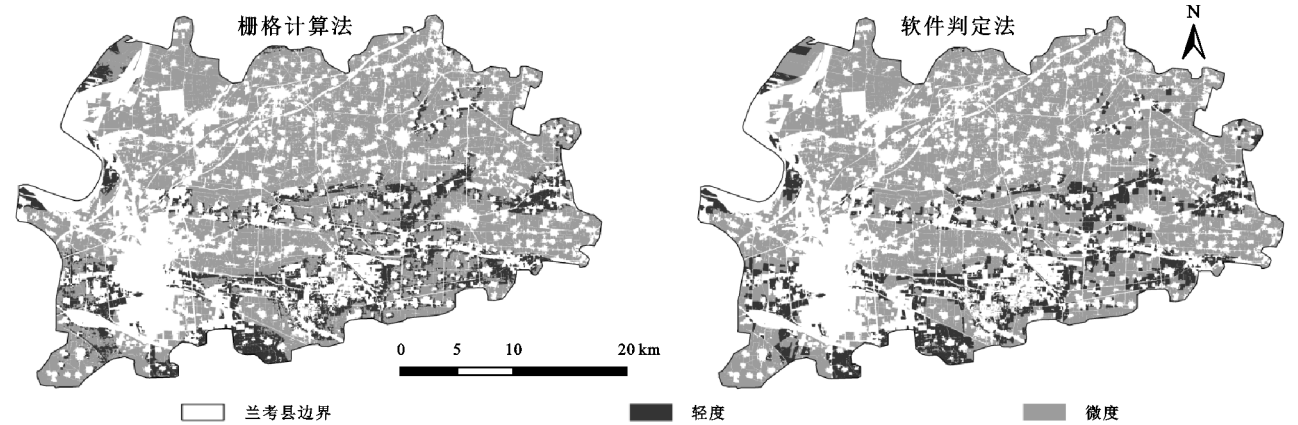


图 1 兰考县耕地风力侵蚀空间分布

4 结 论

栅格计算法计算的耕地风力侵蚀面积为 125.91 km², 占兰考县土地面积的 11.28%, 分布于 3 493 个地块, 侵蚀栅格数量占分布地块总栅格数量的 46.26%, 侵蚀模数集中分布在 200~400 t/(km² · a)。软件判断法统计的耕地风力侵蚀面积为 125.08 km², 占兰考县总面积的 11.21%, 确定 2 284 个风蚀地块, 侵蚀栅格数量占分布地块总栅格数量的 81.11%; 风蚀地块平均土壤侵蚀模数集中在 200~400 t/(km² · a), 96% 的风蚀地块流失比例在 50% 以上, 100% 流失比例的地块面积分布在 0.000 04~0.6 km²。

在风力侵蚀面积上, 栅格计算法与软件判断法统计的耕地风力侵蚀面积相对误差为 0.66%, 城关镇的面积相对误差最大, 张君墓镇的面积相对误差最小。在空间分布上, 栅格计算法风力侵蚀结果栅格数量多且破碎离散, 连续性差; 软件判断法的风力侵蚀分布

离散程度低, 连续性强, 空间分布集中。
遵循两种统计方法耕地风力侵蚀面积相对误差 ≤1% 的原则, 软件判断法涉及侵蚀栅格数量占分布地块总栅格数量的比例远高于栅格计算法, 涉及地块数量远少于栅格计算法, 软件判断法实现了将离散风力侵蚀结果集中落实到平均侵蚀模数较大地块的目的。在控制耕地地块大小的条件下, 软件判断法将栅格计算结果与县域的实际地块结合起来, 解决了风力侵蚀栅格数据在空间分布不连续不集中的问题, 达到 68% 的野外验证精度, 但精度有待于进一步提高。

参考文献:

[1] 王晓艺, 苏正安, 马菁, 等. 基于风力侵蚀模型的张家口市风力侵蚀时空分布特征[J]. 草业科学, 2020, 37(7): 1405-1415.
[2] 赵辉, 黎家作, 李晶晶. 中国水土流失动态监测与评价的现状与对策[J]. 水土保持通报, 2016, 36(1): 115-119.

- [7] Wang Y Q, Shao M A, Zhu Y J, et al. Impacts of land use and plant characteristics on dried soil layers in different climatic regions on the Loess Plateau of China[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2011, 151(4): 437-448.
- [8] 史君怡, 王国梁, 刘国彬. 退耕还林(草)对黄土高原不同土地利用方式下土壤剖面水分含量的影响[J]. 水土保持研究, 2018, 25(2): 81-86.
- [9] 葛楠楠, 石芸, 杨宪龙, 等. 黄土高原不同土壤质地农田土壤碳、氮、磷及团聚体分布特征[J]. 应用生态学报, 2017, 28(5): 1626-1632.
- [10] 王愿昌, 吴永红, 寇权, 等. 砒砂岩分布范围界定与类型区划分[J]. 中国水土保持科学, 2007, 5(1): 14-18.
- [11] 张平仓, 刘玉民, 张仲子. 皇甫川流域侵蚀产沙特征及成因分析[J]. 水土保持通报, 1992, (2): 15-24.
- [12] 唐政洪, 蔡强国, 李忠武, 等. 内蒙古砒砂岩地区风蚀、水蚀及重力侵蚀交互作用研究[J]. 水土保持学报, 2001, 15(2): 25-29.
- [13] Liang Z S, Wu Z R, Yao W Y, et al. Pisha Sandstone: causes, processes and erosion options for its control and prospects[J]. International Soil and Water Conservation Research, 2018, 7: 1-8.
- [14] Li Y, Xie Z, Qin Y, et al. Temporal-spatial variation characteristics of soil erosion in the Pisha Sandstone Area, Loess Plateau, China [J]. Polish Journal of Environmental Studies, 2019, 28(4): 2205-2214.
- [15] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [16] 高宇, 樊军, 彭小平, 等. 水蚀风蚀交错区典型植被土壤水分消耗和补充深度对比研究[J]. 生态学报, 2014, 34(23): 7038-7046.
- [17] 熊小玲, 任寅榜, 吕茂奎, 等. 武夷山不同海拔典型森林土壤有机碳和全氮储量分布特征[J]. 水土保持研究, 2022, 29(4): 83-88.
- [18] Albaladejo J, Ortiz R, Garcia-Franco N, et al. Land-use and climate change impacts on soil organic carbon stocks in semi-arid Spain[J]. Journal of Soils and Sediments, 2012, 13: 265-277.
- [19] 卜繁靖, 郭月峰, 祁伟, 等. 砒砂岩区 3 种沙棘根系特征与固土能力[J]. 水土保持通报, 2022, 42(5): 41-48. DOI: 10.13961/j. cnki. stbctb. 20220525.001.
- [20] 王浩, 黄晨璐, 杨方社, 等. 砒砂岩区沙棘根系的生境适应性[J]. 应用生态学报, 2019, 30(1): 157-164.
- [21] 刘丙霞, 任健, 邵明安, 等. 黄土高原北部人工灌草植被土壤干燥化过程研究[J]. 生态学报, 2020, 40(11): 3795-3803.
- [22] 马俊梅, 满多清, 李得禄, 等. 干旱荒漠区退耕地植被演替及土壤水分变化[J]. 中国沙漠, 2018, 38(4): 800-807.
- [23] 张鹤, 费洪岩, 韩凤朋, 等. 植被恢复和覆土厚度对砒砂岩区土壤水分及养分的影响[J]. 水土保持通报, 2022, 42(2): 98-106.
- [24] 杨敏, 赵西宁, 高晓东, 等. 黄土高原人工林深层土壤水分利用研究[J]. 水土保持研究, 2019, 26(6): 100-106.
- [25] 李佩擎. 林下植被去除和凋落物添加对杉木林土壤关键生态过程的影响[D]. 南昌: 江西农业大学, 2017.
- [26] 息伟峰, 徐新朋, 赵士诚, 等. 长期施肥下 3 种旱作土壤有机碳含量及其矿化势比较研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2021, 27(12): 2094-2104.
- [27] Chai Q L, Ma Z Y, An Q Q, et al. Does artificial *Caragana korshinskii* plantation increase soil carbon continuously in a water-limited landscape on the Loess Plateau [J]. Land Degradation & Development, 2019, 30: 1691-1698.
- [28] 张爱梅, 殷一然, 孙坤. 沙棘属植物弗兰克氏菌研究进展[J]. 微生物学通报, 2020, 47(11): 3933-3944.
- [29] 武昭. 基于室内土柱模拟的稳定性氮肥无机氮转化及淋溶探究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2018.

(上接第 46 页)

- [3] 梁晓珍, 符素华, 丁琳. 地形因子计算方法对土壤侵蚀评价的影响[J]. 水土保持学报, 2019, 33(6): 21-26.
- [4] 戴海伦, 金复鑫, 张科利. 国内外风力侵蚀监测方法回顾与评述[J]. 地球科学进展, 2011, 26(4): 401-408.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 水利部水土保持监测中心. 2020 年度水土流失动态监测技术指南[R]. 北京: 水利部, 2020.
- [8] 邹海天, 李子轩, 张彩云. 基于栅格像元和矢量地块的区域土壤侵蚀计算结果对比分析: 以怀来县外井沟小流域为例[J]. 海河水利, 2020(4): 16-19.
- [9] 宋胜明, 刘霞, 张荣华, 等. 黄泛风沙区耕地土壤风力侵蚀影响因子的通径分析[J]. 水土保持通报, 2017, 37(3): 249-253.
- [10] 袁利, 张春强, 张芷温, 等. 淮河流域黄泛平原风沙区水土流失格局[J]. 中国水土保持, 2019(12): 10-13.
- [11] 高睿瑜, 张芷温, 李文龙, 等. 2018—2019 年河南省兰考县土地利用变化对耕地风蚀的影响[J]. 水土保持通报, 2021, 41(1): 112-117, 124.
- [12] 刘晓君, 李占斌, 李鹏, 等. 基于土地利用/覆被变化的流域景观格局与水沙响应关系研究[J]. 生态学报, 2016, 36(18): 5691-5700.