

基于 RWEQ 模型的茫崖市防风固沙功能评估及敏感地类识别

王蕾^{1,2}, 赵霞^{1,2}, 张琛悦^{1,2}, 唐文家³

(1. 青海师范大学 青藏高原地表过程与生态保育教育部重点实验室, 西宁 810008;

2. 高原科学与可持续发展研究院高原土壤信息科学研究团队, 西宁 810008; 3. 青海省生态环境监测中心, 西宁 810007)

摘要:为了较准确评估茫崖市的防风固沙功能, 识别对防风固沙功能敏感的土地利用类型, 通过 4 种方法确定修正风蚀模型(RWEQ)中的气候因子(WF)参数, 计算出实际风蚀量和防风固沙量, 依据指南法、自然间断法和文献—实际结合法对防风固沙功能进行了评估分级, 借助 ArcGIS 软件将土地利用类型和防风固沙功能进行空间叠置分析以识别出敏感地类。结果表明: (1) 利用风蚀气候因子(F_q)直接代替法确定的 WF 空间分布和阈值范围最符合实际, RWEQ 模型能较准确地评估荒漠戈壁区茫崖市的防风固沙功能; (2) 茫崖市 2014 年平均风蚀模数为 $57.99 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$, 属于风力侵蚀严重区域, 2014 年全市单位面积防风固沙量介于 $0 \sim 44.93 \text{ kg}/\text{m}^2$, 防风固沙功能整体较弱; (3) 在 3 种评估分级方法中, 文献—实际结合法更为详细地反映出 2014—2018 年茫崖市西南山区较强的防风固沙功能, 且高等级功能的区域范围较广; (4) 草地是茫崖市 2014—2018 年对防风固沙功能变化最敏感的土地利用类型。RWEQ 模型有效评估了茫崖市的防风固沙功能, 并识别出了敏感的土地利用类型。本研究为县级地区防风固沙功能评估技术的应用提供了科学参考。

关键词:修正风蚀模型; 气候因子; 防风固沙功能; 茫崖市

中图分类号: P964; X826

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2023)01-0144-10

Assessment of Windbreak and Sand Fixation Function and Identification of Sensitive Landuse Types in Mangai City Based on RWEQ Model

WANG Lei^{1,2}, ZHAO Xia^{1,2}, ZHANG Chenyue^{1,2}, TANG Wenjia³

(1. Key Laboratory of Tibetan Plateau Land Surface Processes and Ecological Conservation, ministry of Education, Qinghai Normal University, Xining 810008, China; 2. Academy of Plateau Science and Sustainability, Xining 810008, China; 3. Ecological Environment Monitoring Center of Qinghai Province, Xining 810007, China)

Abstract: For accurately evaluating the windbreak and sand fixation function of Mangai City and identifying the sensitive landuse types to the windbreak sand fixation function, this study determined the climatic factor (WF) in the Revised Wind Erosion Equation Model (RWEQ) through four methods, and calculated the amount of soil wind erosion and windbreak and sand fixation in Mangai City. Then, the windbreak and sand fixation function were evaluated and classified according to three methods such as the guideline method, the natural intermittent method and the literature-actuality combination method. Meanwhile, the sensitive land-use types to function changes through superposition the landuse types and spatial distribution of windbreak and sand fixation function were identified by ArcGIS. The results show that: (1) the spatial distribution and threshold range of WF obtained by using method of wind erosion climatic factors (F_q) directly to replace WF

收稿日期: 2022-03-04

修回日期: 2022-03-20

资助项目: 国家第二次青藏高原综合考察项目任务三《土壤质量变化及其对生态系统的影响》专题(2019QZKK0306); 青海省重大科技专项(2019-SF-A12); 典型区域生态保护红线生态功能重要性变化评估项目(HT2019-03-003)

第一作者: 王蕾(1994—), 女, 山西运城人, 博士研究生, 研究方向为资源环境与生态评估。E-mail: 18234145683@163.com

通信作者: 赵霞(1975—), 女, 青海贵德人, 教授, 主要从事资源环境与生态评估研究。E-mail: zhaoxia@qhnu.edu.cn

<http://stbcj.paperonce.org>

were most consistent with the reality; the RWEQ model can accurately evaluate the windbreak and sand fixation function of Mangai City; (2) in 2014, the average wind erosion modulus of Mangai City was 57.99 kg/(m² · a), belonged to the zone with strong wind erosion; the amount of windbreak and sand fixation per unit area of Manyai City in 2014 ranged from 0 to 44.93 kg/m², with a weak windbreak and sand fixation function; (3) among three methods of assessment and classification, the literature-actuality combination method reflected the spatial variation of windbreak and sand fixation function in the mountainous area in southwest of Mangai City from 2014 to 2018; and the regional scope with high-level function was wide; (4) Grassland was the most sensitive landuse type to windbreak and sand fixation function changes of Mangai City from 2014 to 2018. The RWEQ model effectively evaluated the windbreak and sand fixation function of Mangai City, and identified sensitive landuse types. This study provides a scientific reference for the application of windbreak and sand fixation function evaluation technology on county scale.

Keywords: Revised Wind Erosion Equation Model; climate factor; windbreak and sand fixation function; Mangai City

我国是荒漠化严重国家,2014 年全国荒漠化土地面积为 261.16×10⁴ km²,其中风蚀荒漠化的面积最大且分布最广^[1],主要分为“三北”戈壁沙漠及沙地风蚀类型区^[2]。防风固沙是我国北方干旱与半干旱地区的重要生态系统功能,精确地评估防风固沙功能可为生态保护红线划定、生态环境的保护与修复提供科学指导。2014 年国家为保障和维护区域生态安全的底线与生命线,提出了生态保护红线战略,其中生态功能评价是划定生态保护红线的前提。2017 年生态环境部颁布的《生态保护红线划定指南》规范了生态保护红线中生态功能的评价方法^[3-4]。《生态保护红线划定指南》推荐采用修正风蚀模型(RWEQ)^[5-6]来评估全国尺度的防风固沙功能,但未明确规定模型中气候因子 WF 等关键参数的获取方法。RWEQ 模型在我国西北干旱半干旱地区的研究应用多集中在农田、沙地、草地混杂的农牧交错区^[7-19],而应用于以荒漠戈壁为主的县级地区的研究较少。青海省茫崖市位于柴达木盆地,属于典型的荒漠戈壁区,是我国西北典型的强烈风蚀区和生态脆弱区^[20],也是气候变化敏感区^[21-22]。本研究以青海省茫崖市为研究对象,首先通过 F_q 代替 W_f、风场强度因子计算 W_f 法、风场强度因子改进计算 W_f 法、F_q 直接代替 WF 法这 4 种方法确定适宜于荒漠戈壁区的 RWEQ 模型参数——气候因子 WF,然后基于 RWEQ 模型计算出茫崖市的实际土壤风蚀量并分析其防风固沙功能的空

间变异特征,最后利用指南法、自然间断法和文献—实际结合法这 3 种不同分级方法识别茫崖市防风固沙功能的敏感区。本研究旨在通过确定 RWEQ 模型中的气候因子 WF 参数来评估茫崖市的防风固沙功能,并利用不同分级方法识别出防风固沙功能敏

1 材料与方法

1.1 研究区概况

茫崖市地处青海省西北柴达木盆地的西北角,介于 37°02′—38°59′N 和 90°07′—93°09′E(图 1),面积约 5×10⁴ km²,海拔在 2 300 m 以上,属大陆荒漠区气候。年日照时数 3 152 h,年均气温 4.14℃,年均降水量和蒸发量分别为 50 mm 和 2 692 mm^[23-24],年均风速 5.1 m/s,最大风速可达 39 m/s,8 级以上大风年均日数超过 100 d。研究区内土壤类型主要有风沙土、灰棕漠土、漠境盐土、冷钙土和粗骨土等,植被覆盖度不足 0.12 % (表 1),浮尘、沙尘暴频发,是西北典型的极干旱风蚀区^[25]。2014 年,茫崖市被纳入国家级“沙化土地封禁保护区”试点范围,重点开展保护区封禁设施和固沙压沙等生态工程建设。

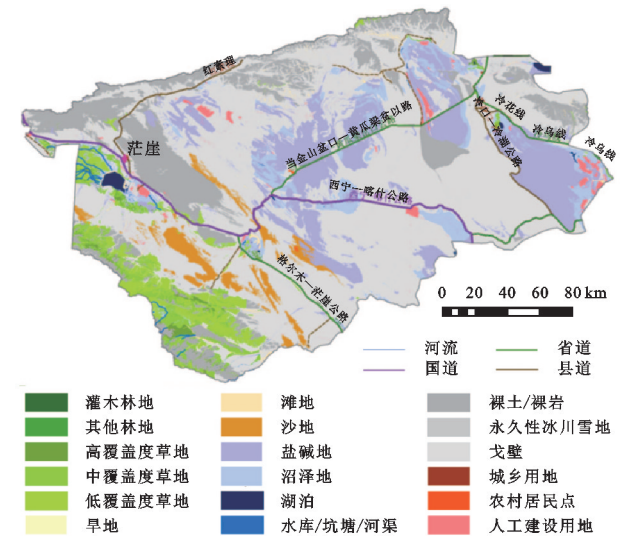


图 1 研究区概况

表 1 茫崖市不同区域土壤、植被及山脉概况

区域	面积/km ²	主要土壤类型	平均植被覆盖度/%	主要山脉
西南部	11458.66	灰棕漠土	2.93	祁漫塔格山、乌兰乌珠尔
北部	18582.31	西北盐壳	0.06	阿尔金山脉、玉勒肯·塔赫达依
中南部	14828.23	荒漠风沙土	0.06	无
东南部	5013.13	西北盐壳	0.07	赛什腾山

注:区域是按照图 1 中交通道路划分。

1.2 RWEQ 模型简介

本研究采用《生态保护红线划定指南》中推荐的 RWEQ 模型评估茫崖市的防风固沙生态功能。该模型计算的防风固沙物质量是无植被/作物(包括残茬)覆盖的潜在风力侵蚀量与实际风力侵蚀量的差值^[26],主要公式和因子见公式(1—7)。

$$SR=S_{L\text{潜}}-S_L$$
 (1)

$$S_{L\text{潜}}=\frac{2z}{S_{\text{潜}}^2}\times Q_{\text{max潜}}\times e^{(-z/S_{\text{潜}})^2}$$
 (2)

$$S_L=\frac{2z}{S^2}\times Q_{\text{max}}\times e^{-(z/S)^2}$$
 (3)

$$Q_{\text{max潜}}=109.8(WF\times EF\times SCF\times K')$$
 (4)

$$S_{\text{潜}}=150.71(WF\times EF\times SCF\times K')^{-0.3711}$$
 (5)

$$Q_{\text{max}}=109.8(WF\times EF\times SCF\times K'\times C)$$
 (6)

$$S=150.71(WF\times EF\times SCF\times K'\times C)^{-0.3711}$$
 (7)

式中:SR 为单位面积年固沙量(kg/m²);S_{L潜} 为潜在风力侵蚀量(kg/m²);S_L 为实际风力侵蚀量(kg/m²);Q_{max潜} 为潜在风沙最大转移量(kg/m);Q_{max} 为风沙滞留量(kg/m);S_潜 为潜在关键地块长度(m);S 为区域关键地块长度(m);z 为最大风蚀出现距离(m),通常采用下风向距离 50 m^[4];WF 为气候因子(kg/m);EF 为土壤可蚀因子(无量纲);SCF 为土壤结皮因子(无量纲);K' 为地表糙度因子;C 为植被覆盖因子。

1.2.1 气候因子 WF WF 表征气温、降水、蒸发和风速等气象因素对防风固沙功能的综合影响^[26],计算见公式(8)。

$$WF=\sum_{i=1}^{12}Wf\times\rho/g\times SW\times SD$$
 (8)

式中:WF 为累加 12 个月风力因子 Wf 得到的年平均气候因子(kg/m);ρ 为空气密度(kg/m³);g 为重力加速度(9.8 m/s²);SW 为各月的年平均土壤湿度因子;SD 为雪盖因子。

由于《生态保护红线划定指南》没有给出 WF 的具体计算方式,本研究采用下列 4 种方法来确定 WF。

(1) 采用联合国粮农组织提出的风蚀气候因子 F_q 代替 Wf,即 F_q 代替 Wf 法,见公式(9)。

$$F_q=\frac{1}{100}\sum_{i=1}^{12}u^3\times\frac{ETP_i-P_i}{ETP_i}\times d,$$
 (9)

$$ETP_i=0.19(20+T_i)^2\times(1-r_i),$$

$$u_2=u_1\times(z_2/z_1)^{1/7}$$

式中:u 为 2 m 高处的月平均风速(m/s);u₁,u₂ 分别表示在 z₁,z₂ 高度处的风速(m/s);ETP_i 为月潜在蒸发量(mm);P_i 为月降水量(mm);d 为当月天数;T_i 为月平均气温(℃);r_i 为月平均相对湿度(%)。

(2) 依据风场强度因子^[18,27] 计算 Wf,即风场强度因子计算 Wf 法,

$$Wf=u_4\times(u_4-u_3)^2\times N_d$$
 (10)

式中:u₃ 为起沙风速,本研究取 5 m/s;u₄ 为气象站点 2 m 处的月均风速(m/s);N_d 为日均风速大于 5 m/s 的天数^[4,28]。

(3) 为体现区域风速的日变化以及日风蚀量,将风场强度因子^[29] 公式(10)改进为公式(11),即风场强度因子改进计算 Wf 法,

$$Wf=\sum_{i=1}^nu_5\times(u_5-u_3)^2$$
 (11)

式中:u₅ 为气象站点 2 m 处的日均风速(m/s);n 为当月天数。

(4) 为反映气候因子对风蚀的影响,采用联合国粮农组织给出的风蚀气候因子 F_q 直接代替气候因子 WF^[30-31],即 F_q 直接代替 WF 法。

1.2.2 土壤可蚀因子 EF 和土壤结皮因子 SCF EF 表示土壤受风力侵蚀影响的程度,由土壤质地、有机质和碳酸钙含量等因素决定;SCF 表示土壤抵抗风蚀能力的强弱^[32-33]。

$$EF=\frac{29.09+0.31sa+0.17si+0.33(sa/cl)-2.59OM-0.95CaCO_3}{100}$$
 (12)

$$SCF=\frac{1}{1+0.0066(cl)^2+0.021(OM)^2}$$
 (13)

式中:sa 为砂粒含量(%);si 为粉粒含量(%);cl 为黏粒含量(%);OM 为土壤有机质含量(%);CaCO₃ 为碳酸钙含量(%)。

1.2.3 地表糙度因子 K' K'指因地形影响产生的地表粗糙程度,反映了土壤风蚀的程度^[34]。

$$K'=e^{(1.86K_r-2.41K_r^{0.934}-0.127Crr)},K_r=0.2\frac{(\Delta H)^2}{L}$$
 (14)

式中:K_r 为土垄糙度(cm),采用 Smith-Carson 方程计算;Crr 为随机糙度因子(cm),本次计算取 0 值;ΔH 为

距离 L 范围内的海拔高程差, L 为地势起伏参数。

1.2.4 植被覆盖因子 C C 表示植被覆盖。植被覆盖增加了地表糙度,使起沙风速增大,这在一定程度上阻碍了土壤颗粒的移动^[35],是控制土壤侵蚀的积极因素,其计算公式如下:

$$C = e^{-(ai \times SC)} \quad (15)$$

式中: SC 为植被覆盖度; ai 为不同植被类型的系数,其中林地 0.153 5,草地 0.115 1,灌丛 0.092 1,裸地 0.076 8,沙地 0.065 8,农田 0.043 8。

综上, RWEQ 模型中 EF , SCF , K' 和 C 均受下垫面条件的限制,可由相应数据计算获得。假设地面条件一致时茫崖市防风固沙功能主要受气候因子 WF 的影响,而 WF 则需要根据实际情况确定,因此本研究采用上述 F_q 代替 W_f 、风场强度因子计算 W_f 法、风场强度因子改进计算 W_f 法以及 F_q 直接代替 WF 法这 4 种方式来确定 WF 。

1.3 数据来源与处理

气象数据来源于中国气象科学数据共享服务网 (<http://data.cma.cn/>), 本研究选取 2014 年和 2018 年各气象观测站点的月均降水、气温、风速、湿度等数据, 借助 ArcGIS 软件通过空间插值得到栅格图层; 平均土壤湿度因子采用 SMAP2017 年逐日数据 (<https://nsidc.org/data/smap>), 空间分辨率为 1 km, 通过 ENVI 软件合成月值; 雪盖数据来源于寒区旱区科学数据中心 (<http://westdc.westgis.ac.cn>) 中国地区的 MODIS 雪盖产品数据集; 土壤质地数据(黏粒、粉粒、砂粒)来自中国 1:100 万土壤数据库中的各类粒径土壤颗粒含量空间分布图, 土壤有机质的图层来自 FAO 中国土壤数据库的有机质含量属性, 本研究按土壤类型的平均有机质含量计算; 数据高程模型 (DEM) 来源于中国科学院资源环境科学数据中心 (<http://www.resdc.cn>), 空间分辨率为 30 m; 植被覆盖来源于“全国生态环境十年变化评估”项目通过遥感解译获得地表覆被数据。

所有参数因子统一采用 2000 国家大地坐标系统 Gauss-Kruger 投影, 各因子重采样按空间分辨率为 250 m 的栅格单元进行模型计算。

2 结果与分析

2.1 模型气候因子确定及关键因素分析

图 2 为通过 F_q 代替 W_f 、风场强度因子计算 W_f 法、风场强度因子改进计算 W_f 法、 F_q 直接代替 WF 法这 4 种方法计算获得的 W_f 和 WF 空间分布情况。从图 2 中可知, 方法 1 即 F_q 代替 W_f (图 2A, B) 和方法 3 即风场强度因子改进计算 W_f 法 (图 2E, F) 获取

的 WF 空间分布格局相似, 如茫崖市西南部祁漫塔格山和乌兰乌珠尔山区均属相对高值区, 但这两种算法得到的 WF 值域相差较大, 其原因是 F_q 经归一化后替代了 W_f 。方法 2 即风场强度因子计算 W_f 法 (图 2C, D) 利用风场强度因子计算的 WF 由于受月均风速 u_4 和风力大于 5 m/s 天数 N_d 的影响, 抹平或削弱了该区域风速的日变化, 导致日风蚀量很大程度上被低估。方法 4 即 F_q 直接代替 WF 法 (图 2G, H) 中 F_q 直接代替 WF 获得的茫崖市 2014 年 WF 空间分布由东北向西南方向减小, 值域范围为 19.94~86.38 kg/m, 最大值出现在冷湖地区, 这与祁栋林获取的柴达木地区 WF 的空间分布与值域范围一致。因此, 选择方法 4 进行 RWEQ 模型运算更为合适^[36]。

图 3 表明, 茫崖市 EF 值介于 0.001~0.617。已有研究表明, 地表 25 mm 范围内粒径小于 0.84 mm 的土壤颗粒为可蚀性颗粒^[37], 而风沙土结构疏松, 发育于砂性母质, 砂粒 (0.05~2 mm) 占 90% 以上, 其 EF 最高 (平均为 0.524, 表 2), 因此极易受风蚀影响。除寒冻土和寒漠土外, 其他类型土壤的 EF 最大值均大于 0.6, 棕漠土 EF 平均值最低 (为 0.229)。 SCF 值介于 0.01~1.00, 棕漠土 SCF 平均值最小 (为 0.364), 所占面积较少, 仅为 167.1 km², 但抗风蚀能力较强, 与 EF 的结果一致。风沙土的 SCF 最大 (为 0.788), 其抗风蚀能力最弱 (表 1)。 K' 介于 0.637~1, 西南部祁漫塔格山、乌兰乌珠尔和北部边缘阿尔金山脉、玉勒肯·塔赫达依以及东部赛什腾山等山脉的 K' 值较低, 这是由于山脉纵横海拔较高、地形起伏明显, 不利于发生风蚀; 而低地势、低海拔的盆地 K' 较高, 易发生风蚀。 C 值介于 0.005~1, 其在西南角的山区较低, 中、东部区较高, 近 90% 地区 C 值接近 1, 由于茫崖市地处柴达木盆地, 自然景观多为干旱荒漠, 植被稀疏, 对风蚀的抑制作用弱, 因此更易发生风蚀。

2.2 茫崖市实际风蚀量和防风固沙量

图 4 为采用方法 4 (F_q 直接代替 WF 法) 的 RWEQ 模型计算出的茫崖市 2014 年风力侵蚀量和防风固沙量的空间分布情况。根据《土壤侵蚀分类分级标准 (SL190-2007)》, RWEQ 模型计算的茫崖市 2014 年实际风蚀量可分为 6 级 (图 4 和表 3)。结果显示, 茫崖市 2014 年平均风蚀模数 (单位面积实际风力侵蚀量) 在 57.42 kg/(m²·a) 以内, 平均风蚀模数总量为 57.99 kg/(m²·a), 实际风蚀总量为 116 814.62 万 t, 属极剧烈等级 (实际风蚀量为 106 421.17 万 t), 占实际风蚀总量的近 91%, 极剧烈侵蚀区面积大于 3 万 km², 占全市总面积的 60% 以上。剧烈等级的实际风蚀量

次之,全市约 10 % 的区域平均风蚀模数为 11.88 kg/(m² · a);除极剧烈和剧烈侵蚀外,其余等级的平均风蚀模数均较小,实际风蚀量也较少。空间分布上,2014 年全市极剧烈侵蚀区主要集中在中东部,主要原因是该区降雨量小蒸发量大,植被盖度低,风场强

度大,而且土壤类型主要为荒漠风沙土;风蚀强度较轻的区域主要分布在阿尔金山脉、祁漫塔格山以及乌兰乌珠尔等西部山区。图 4 与图 3 相比,单位面积实际风蚀量的空间分布格局与 EF 和 SCF 的格局相似,表明 EF 和 SCF 对风蚀影响较大。

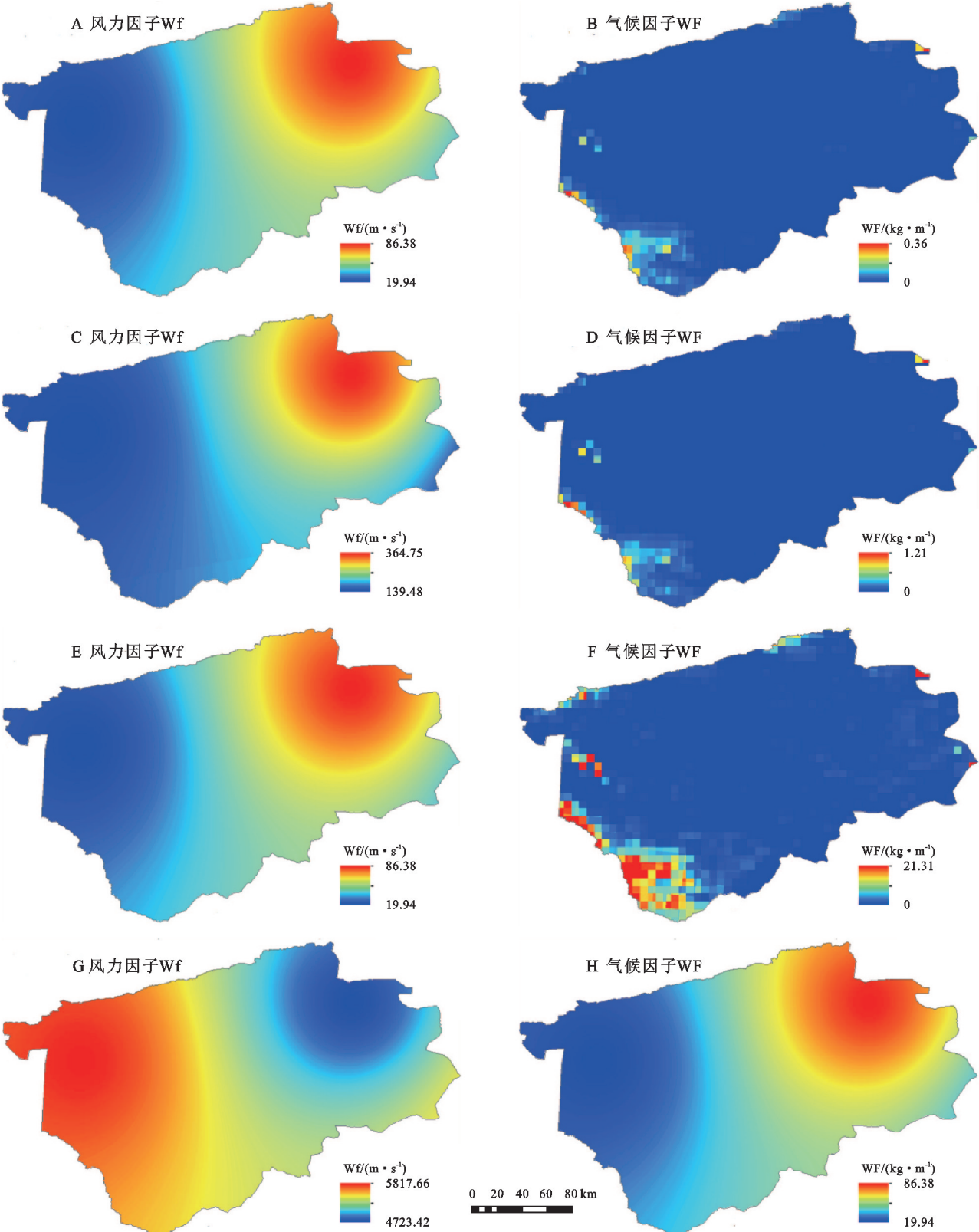


图 2 4 种算法计算的风力因子和气候因子原值

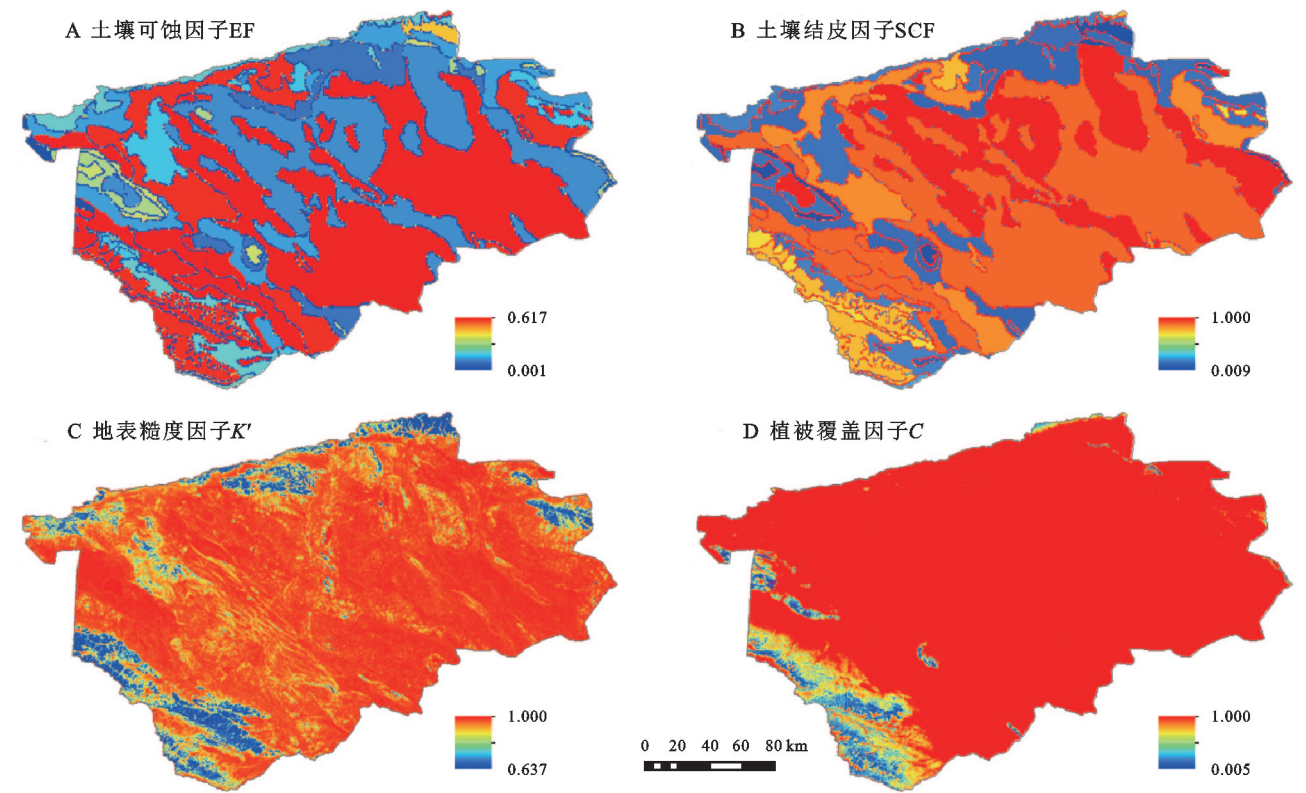


图 3 防风固沙功能关键影响因素

表 2 茫崖市土壤可蚀因子和土壤结皮因子

土壤类型	面积/ km ²	占茫崖市 面积比例/%	土壤可蚀因子(EF)			土壤结皮因子(SCF)		
			最大值	最小值	平均值	最大值	最小值	平均值
风沙土	17733.9	35.5	0.617	0.001	0.524	1.000	0.010	0.788
灰棕漠土	10912.7	21.8	0.617	0.001	0.395	1.000	0.010	0.595
漠境盐土	2697.5	5.4	0.617	0.001	0.278	1.000	0.010	0.373
冷钙土	2179.5	4.4	0.617	0.001	0.322	0.936	0.010	0.406
粗骨土	1867.4	3.7	0.617	0.001	0.304	1.000	0.012	0.433
寒钙土	1522.8	3.0	0.617	0.001	0.436	0.936	0.012	0.740
盐土	1465.3	2.9	0.617	0.001	0.332	1.000	0.010	0.477
寒冻土	822.7	1.6	0.547	0.245	0.441	0.936	0.045	0.757
石质土	690.9	1.4	0.617	0.001	0.414	0.936	0.012	0.688
寒漠土	307.3	0.6	0.500	0.001	0.460	0.936	0.010	0.751
棕漠土	167.1	0.3	0.617	0.133	0.229	0.936	0.047	0.364
新积土	85.1	0.2	0.617	0.245	0.315	0.936	0.053	0.564

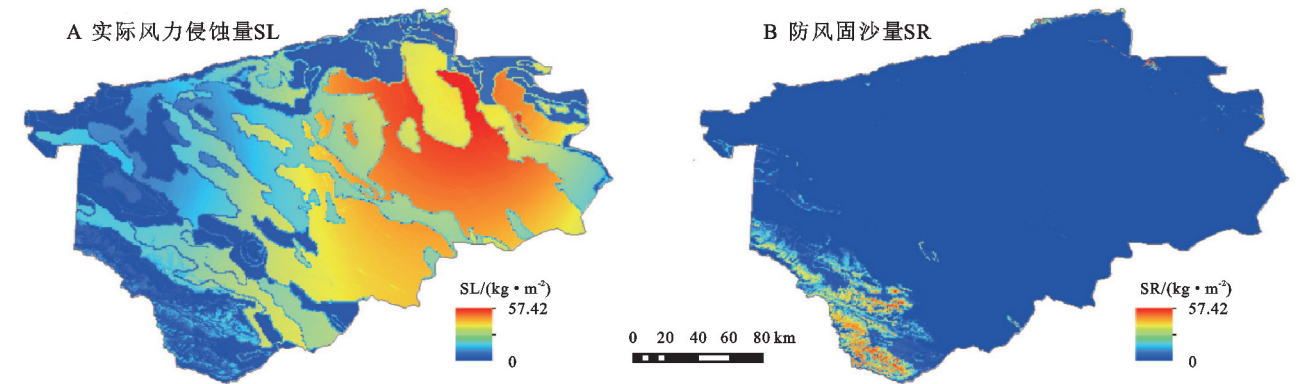


图 4 茫崖市 2014 年实际风力侵蚀量和防风固沙量

2014 年全市单位面积防风固沙量介于 0~44.93 kg/m²。茫崖市 90 % 为未利用地,属自然景观和土地类型单一的荒漠戈壁区,仅西南角的少部分山区抵抗风力侵蚀和防风固沙的能力较强,整体上茫崖市防风固沙能力弱,属风蚀严重区,研究结果与茫崖市的区域地带性(西北干旱荒漠区)的实际情况相符。因此,进一步证实 F_q 直接代替 WF 法确定的模型参数,应用于干旱半干旱荒漠戈壁区的防风固沙功能研究中具有可行性。

表 3 实际风蚀量等级及变化

等级	分级标准/ (kg·m ⁻² ·a ⁻¹)	分布 面积/km ²	平均风蚀模数/ (kg·m ⁻² ·a ⁻¹)	实际风蚀量/ (10 ⁴ t)
无	<0.2	265	0.09	2.39
轻度	0.2~2.5	6607	1.30	860.92
中度	2.5~5.0	3731	3.73	1389.62
强烈	5.0~8.0	3602	6.36	2291.77
剧烈	8.0~15	4922	11.88	5848.75
极剧烈	>15	30732	34.63	106421.17
合计	49859	57.99	116814.62	

表 4 防风固沙服务功能评估分级方法

指南法			自然间断法			文献—实际结合法		
等级	重要性	累积值 占总值/%	等级	重要性	划分依据 SR/ (kg·m ⁻²)	等级	重要性	划分依据 SR/ (kg·m ⁻²)
1	一般重要	20	1	一般重要	0~1.4	1	一般重要	<0.5
2	重要	30	2	比较重要	1.4~4.8	2	比较重要	0.5~2
3	极重要	50	3	中等重要	4.8~8.6	3	中等重要	2~6
			4	高度重要	8.6~13.2	4	高度重要	6~12
			5	极重要	13.2~44.9	5	极重要	>12

从图 5(仅显示差异最明显的西南角)可知,指南法、自然间断法和文献—实际结合法 3 种评估分级方法所得的茫崖市防风固沙功能空间分异具有相似的规律,2014—2018 年防风固沙功能等级的空间分布特征差异较小,其中文献—实际结合法(图 5E,F)刻画的茫崖市西南山区的防风固沙功能识别范围(除一般重要等级)比其他两种方法要广,能够在较大程度上识别出高等级区域,避免因等级划分低而忽视相应的保护措施,并且其极重要等级分布区域面积介于其他两种方法之间。因此,在考虑实施生态保护措施的时间与经济成本时,文献—实际结合法评估分级结果具有更好的参考价值。

通过 ArcGIS 将土地利用类型和防风固沙功能空间分布进行叠置分析,来反映不同土地利用类型的防风固沙能力以及对功能变化敏感的地类^[39]。结果表明,2014 年防风固沙能力最强的土地利用类型为

2.3 防风固沙功能评估分级与敏感地类识别

为更细致地反映茫崖市防风固沙功能的分布特点,以及更好地识别出对防风固沙功能变化敏感的地类,本研究分别采用了《生态保护红线划定指南》推荐的三级分类方法(简称“指南法”)、自然间断法和文献—实际结合法对茫崖市防风固沙功能进行分级,分级依据见表 4。指南法评估技术将防风固沙功能服务值(单位面积年固沙量 SR)从高到低排序,以累加服务值占服务总值比例的 50 % 和 80 % 所对应的栅格值作为生态系统服务功能评估分级的分界点,划分为“1 等:一般重要”,“2 等:重要”和“3 等:极重要”三级;自然间断法是利用 ArcGIS 软件将优化后的 RWEQ 模型计算出的 SR 进行自然分组,使各等级之间的差异最大化,SR 差异相对较大的栅格值设为分级裂点;文献—实际结合法主要是依据茫崖市 SR 值域范围以及实际风蚀量等级(表 3),并结合已有研究设置对应的 SR 分级标准^[38]。同时,通过增加分级数量来更详细地反映功能原值 SR 中蕴含的丰富空间分异特征。

草地,固沙量达到 1 753.9×10⁴ t,其次为未利用地和水域(主要是人工河渠、水库等)(表 5),而城乡居民工矿用地(主要是人工建设地面)、林地和耕地的防风固沙能力较弱,说明草地在防风固沙中起着主导作用。2014—2018 年防风固沙能力变化最敏感的土地利用类型也是草地(敏感系数 3.77),防风固沙量增加了 108.1×10⁴ t,原因可能是生态系统的固沙能力随着草地覆盖度的增加而增强(表 6)。从防风固沙功能重要性等级(普适性的指南法)上看,2018 年一般重要区域(1 级)的主要土地利用类型是未利用地,占茫崖市面积的近 90 %,其次为草地、城乡居民工矿用地和水域等;重要区域(2 级)和极重要区域(3 级)面积最大的土地利用类型均为草地,出现这一现象的原因是茫崖市固沙能力较强的草地面积占比相对较少,仅占 7 % 左右,而未利用地面积虽大但保沙率却较低。2014—2018 年各土地利用类型(除耕地外)的防

风固沙功能等级属于一般重要(1 级),这与茫崖市气候干燥、水资源贫乏的荒漠环境有关。功能等级变化最敏感的土地利用类型是水域,其面积减小导致功能 1 级区域占比降低。

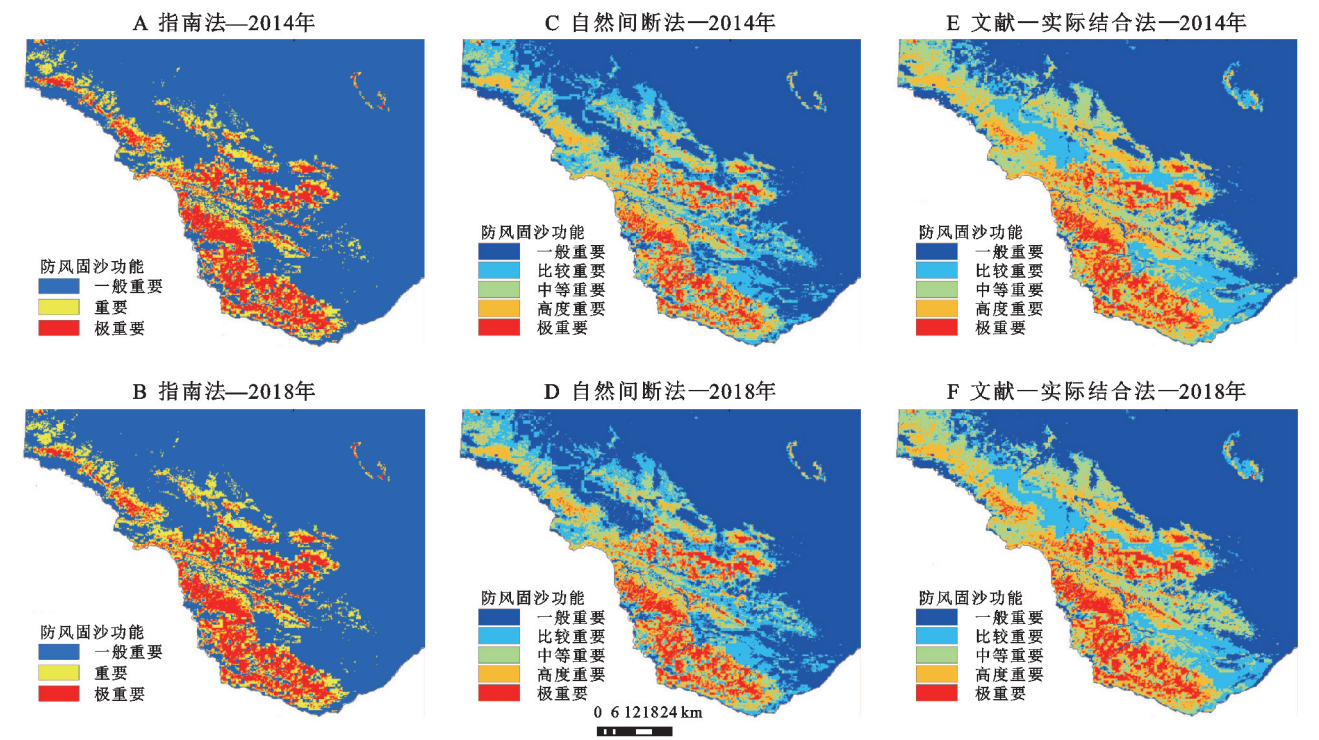


图 5 3 种防风固沙功能评估分级结果

表 5 不同土地利用/覆被类型的防风固沙能力及敏感系数

土地利用类型	固沙量/(10 ⁴ t)		敏感系数
	2014 年	2018 年	
耕地	0.1	0.1	0.00
林地	0.2	0.2	0.00
草地	1645.8	1753.9	3.77
水域	33.6	35.9	0.08
城乡居民工矿用地	2.7	3.0	0.01
未利用土地	1182.2	1260.7	2.74

注:敏感系数指地类对防风固沙功能变化的数量,即固沙量的增长率。

3 讨论

RWEQ 模型在我国西北干旱半干旱地区农田、沙地、草地及其交错区的应用研究报道较多^[7-17],能否用于以荒漠和戈壁为主的县级地区尚不明确,本研究表明通过选择适宜的 WF 获取方法,RWEQ 模型也可用于以荒漠和戈壁为主的干旱半干旱地区。RWEQ 模型的关键因子是气候因子 WF,方法 1 将归一化后风蚀性气候因子 Fq 代替风力因子 Wf,这使计算结果不能反映原始值域的变化。方法 2 与方法 3 的起沙风速统一取值为 5 m/s 未考虑到区域土壤质地对风力搬运土壤颗粒的影响,因此本研究最终采用方法 4 即 Fq 直接代替 WF 法,其空间分布与值

域结果与祁栋林^[40]、董玉祥等^[41]获取的中国干旱与半干旱地区风蚀气候侵蚀力极强区——柴达木盆地一致,这说明茫崖市的风蚀气候因子主要受风速限制,荒漠景观是强风蚀长期作用的结果,并且人类活动也能在一定程度上通过改变植被覆盖度来影响风蚀强度^[18-19]。模型中的土壤可蚀因子 EF、土壤结皮因子 SCF、地表糙度因子 K'短期内变化不明显,其空间分异规律与前人的研究结果相似^[18]。在环境相似地区的风蚀状况对比上,本文与江凌等^[18]对青海省中度以上风蚀区的研究以及迟文峰等^[14]对内蒙古高原荒漠生态系统的研究结果一致。

在功能分级中,《生态保护红线划定指南》规定的累计百分比分级方法能够较好地找出防风固沙功能变化明显的大致空间分布区域,但是由于三级分级方法不够精确,使得目前的分级结果不能反映功能原值中蕴含的空间分异特征,降低了评估结果的政策参考价值。因此本研究探索的文献—实际结合法不仅在分级数量上能够较详细地刻画 SR 的空间分布特征,还能在功能原值的基础上结合茫崖市的实际风蚀量,具有明确的功能分级依据。

茫崖市 2014 年的平均风蚀模数即实际风蚀量为 57.99 kg/(m² · a),与贺倩等^[42]基于 RWEQ 模型计算出的青海三江源地区 2015 年实际风蚀量的最大值 60.86 kg/m² 相近,且最大风蚀量集中在三江源地区

的西部,临近柴达木盆地的茫崖市。本研究中茫崖市的防风固沙功能空间分布特征反映出该市整体防风固沙功能较低,这与温豪^[43]的模拟结果一致,证实了

本研究结果的准确性。综上,RWEQ 模型应用于荒漠戈壁为主的茫崖市县域研究时具有可行性,可为生态保护措施的制定与实施提供理论依据。

表 6 2014—2018 年土地利用/覆被类型面积变化矩阵

km²

项目	耕地	林地	草地	水域	硬化地面	未利用土地	总计
耕地	0.16					0.08	0.24
林地		1.68				1.58	3.26
草地			3361.80			0.00	3361.80
水域				478.53		0.03	478.56
硬化地面			1.05	2.19	537.28	37.34	577.86
未利用土地			0.33	261.44	0.08	45198.77	45460.63
总计	0.16	1.68	3363.18	742.15	537.37	45237.80	49882.33

4 结论

(1) 利用 Fq 直接代替 WF 法获得的空间分布和阈值范围与实际最相符,RWEQ 模型可较准确地评估茫崖市的防风固沙功能,能为县级地区防风固沙功能评估技术的应用研究提供参考。

(2) 茫崖市 2014 年的平均风蚀模数为 57.99 kg/(m²·a),属风力侵蚀严重区;2014 年全市单位面积防风固沙量介于 0~44.93 kg/m²,防风固沙功能整体较弱。

(3) 文献—实际结合法更能详细地反映茫崖市内部防风固沙功能的空间变异特征,且高等级功能的区域范围较广,西南部的防风固沙能力略强于中东部。

(4) 在耕地、林地、草地、水域、城乡居民工矿用地、未利用土地 6 大类土地利用类型中,草地是茫崖市 2014—2018 年期间对防风固沙功能变化最敏感的土地利用类型,敏感系数最大 3.77。

参考文献:

[1] 陈家欢,袁立敏,高永,等.风沙区不同种植制度下的土壤风蚀效果研究[J].土壤通报,2021,52(2):408-415.

[2] Zou X Y, Li H R, Liu W, et al. Application of a new wind driving force model in soil wind erosion area of northern China [J]. Journal of Arid Land, 2020,12(3): 423-435.

[3] 楚智,徐长春,罗映雪,等.基于生态保护红线管理的塔里木河流域土地利用模拟及生态效益评价[J].生态学报,2021,41(18):7380-7392.

[4] 刘军会,马苏,高吉喜,等.区域尺度生态保护红线划定:以京津冀地区为例[J].中国环境科学,2018,38(7): 2652-2657.

[5] Fryrear D W, Bilbro J D, Saleh A, et al. RWEQ:improved wind erosion technology [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2000,55(2):183-189.

[6] Seo I W, Lim C S, Yang J E, et al. An overview of applicability of WEQ, RWEQ, and WEPS models for prediction of wind erosion in lands [J]. Korean Journal of Agricultural Science, 2020,47(2):381-394.

[7] 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.

[8] 胡梦甜,张慧,高吉喜,等.基于 RWEQ 模型修正的土地沙化敏感性评价[J].水土保持研究,2021,28(1):368-372.

[9] 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):26-29,43.

[10] 王洋洋,肖玉,谢高地,等.基于 RWEQ 的宁夏草地防风固沙服务评估[J].资源科学,2019,41(5):980-991.

[11] 贺倩,戴晓爱.基于 RWEQ 的三江源地区防风固沙与 NPP 研究[J].湖北农业科学,2019,58(10):45-50.

[12] 张寒冰,高阳,崔艳智.基于 RWEQ 模型的典型沙区风蚀治理成效研究[J].北京大学学报:自然科学版,2019, 55(2):342-350.

[13] 邢春燕,郭中领,常春平,等. RWEQ 模型在河北坝上地区的适用性[J].中国沙漠,2018,38(6):1180-1192.

[14] 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.

[15] 邢春燕. RWEQ 在河北坝上地区的验证研究[D].石家庄:河北师范大学,2018.

[16] 刘斌.基于 RWEQ 模型的天津近 10 年土壤风蚀量估测[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2017.

[17] 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.

[18] 江凌,肖焱,欧阳志云,等.基于 RWEQ 模型的青海省土壤风蚀模数估算[J].水土保持研究,2015,22(1):21-25.

[19] 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.

[20] 郭兵,孔维华,姜琳.西北干旱荒漠生态区脆弱性动态监测及驱动因子定量分析[J].自然资源学报,2018,33 (3):412-424.

[21] Piao S L, Ciais P, Huang Y, et al. The impacts of climate change on water resources and agriculture in China [J].

- Nature, 2010, 467(7311): 43-51.
- [22] 陈亚宁, 杨青, 罗毅, 等. 西北干旱区水资源问题研究思考[J]. 干旱区地理, 2012, 35(1): 1-9.
- [23] 孔恩阳, 青海朵斯. 茫崖历史沿革及地域考[J]. 青海师范大学学报(社会科学版), 1985, 3(21): 126-136.
- [24] 聪喆, 尕斯. 茫崖地区的历史地理与民族[J]. 青海民族学院学报: 社会科学版, 1985(4): 49-55.
- [25] 张雪玲. 推进茫崖生态文明新城建设浅析[J]. 柴达木开发研究, 2017(5): 39-41.
- [26] Skidmore E L, Tatarko J. Stochastic wind simulation for erosion modeling [J]. Transactions of the Asabe, 1990, 33(6): 1893-1899.
- [27] 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.
- [28] 巩国丽. 中国北方土壤风蚀时空变化特征及影响因素分析[D]. 北京: 中国科学院大学, 2014.
- [29] 姬亚芹, 单春艳, 王宝庆. 土壤风蚀原理和研究方法及控制技术[M]. 北京: 科学出版社, 2015.
- [30] 吴芳芳. 基于模型的准东地区土壤风蚀研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2017.
- [31] Yang F B, Lu C H. Assessing changes in wind erosion climatic erosivity in China's dryland region during 1961—2012 [J]. Journal of Geographical Sciences, 2016, 26(9): 1263-1276.
- [32] 江凌, 肖燧, 饶恩明, 等. 内蒙古土地利用变化对生态系统防风固沙功能的影响[J]. 生态学报, 2016, 36(12): 3734-3747.
- [33] 李宁宁, 张光辉, 王浩, 等. 黄土丘陵沟壑区生物结皮对土壤抗蚀性能的影响[J]. 中国水土保持科学, 2020, 18(1): 42-48.
- [34] 李军, 游松财, 黄敬峰. 基于 GIS 的中国陆地表面粗糙度长度的空间分布[J]. 上海交通大学学报: 农业科学版, 2006, 24(2): 185-189.
- [35] 尚润阳, 祁有祥, 赵廷宁, 等. 植被对风及土壤风蚀影响的野外观测研究[J]. 水土保持研究, 2006, 13(4): 37-39.
- [36] 祁栋林, 韩廷芳, 赵全宁, 等. 青海省冬春季风蚀气候侵蚀力和起沙风日数的区域变化差异特征[J]. 水土保持研究, 2019, 26(2): 23-30.
- [37] Chepil W S. A compact rotary sieve and the importance of dry sieving in physical soil analysis [J]. Soil Science Society of America Journal, 1962, 26(1): 4-6.
- [38] 张彪, 王爽, 锡林郭勒盟风沙源治理区防风固沙功能变化评估[J]. 生态与农村环境学报, 2020, 36(3): 291-299.
- [39] 李艳娇. 陕北地区土地利用变化对防风固沙效益的影响[J]. 西部大开发(土地开发工程研究), 2020, 5(3): 56-63.
- [40] 祁栋林, 李晓东, 苏文将, 等. 近 50 年青海省风蚀气候侵蚀力时空演变趋势[J]. 水土保持研究, 2015, 22(6): 234-239.
- [41] 董玉祥, 康国定. 中国干旱半干旱地区风蚀气候侵蚀力的计算与分析[J]. 水土保持学报, 1994, 8(3): 1-7.
- [42] 贺倩, 戴晓爱. 基于 RWEQ 的三江源地区防风固沙与 NPP 研究[J]. 湖北农业科学, 2019, 58(10): 45-50.
- [43] 温豪. 青海省生态保护红线划定研究与管控[D]. 西安: 西安科技大学, 2019.

~~~~~

(上接第 143 页)

- [19] 田剑, 汤国安, 周毅, 等. 黄土高原沟谷密度空间分异特征研究[J]. 地理科学, 2013, 33(5): 622-628.
- [20] 景可. 黄土高原沟谷侵蚀研究[J]. 地理科学, 1986, 6(4): 50-57.
- [21] 高艳红, 许建伟, 张萌, 等. 中国 400 mm 等降水量变迁与干湿变化研究进展[J]. 地球科学进展, 2020, 35(11): 1101-1112.
- [22] 陈一先, 焦菊英, 魏艳红, 等. 陕北黄土区退耕前(1976—1997)坡面切沟发育特征[J]. 农业工程学报, 2017, 33(17): 120-127.
- [23] Zhao G, Zhai J, Tian P, et al. Variations in extreme precipitation on the Loess Plateau using a high-resolution dataset and their linkages with atmospheric circulation indices[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2017, 133(3): 1235-1247.
- [24] Valentin C, Poesen J, Li Y. Gully erosion: Impacts, factors and control[J]. Catena, 2005, 63(2/3): 132-153.
- [25] 张光辉. 切沟侵蚀研究进展与展望[J]. 水土保持学报, 2020, 34(5): 1-13.
- [26] 李镇, 张岩, 姚文俊, 等. 基于 QuickBird 影像估算晋西黄土区切沟发育速率[J]. 农业工程学报, 2012, 28(22): 141-148.
- [27] 刘斌, 罗全华, 常文哲, 等. 不同林草植被覆盖度的水土保持效益及适宜植被覆盖度[J]. 中国水土保持科学, 2008, 6(6): 68-73.
- [28] Collison A. The cycle of instability: stress release and fissure flow as controls on gully head retreat [J]. Hydrological Processes, 2001, 15(1): 3-12.
- [29] Torri D, Poesen J. A review of topographic threshold conditions for gully head development in different environments[J]. Earth-Science Reviews, 2014, 130: 73-85.
- [30] Shruthi R, Kerle N, Jetten V, et al. Object-based gully system prediction from medium resolution imagery using Random Forests[J]. Geomorphology, 2014, 216: 283-294.