

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2023.05.050.

杜睿哲, 李文栋, 高文浩, 等. 气候、地表覆被变化对砒砂岩区风蚀时空变化的影响[J]. 水土保持研究, 2023, 30(5): 31-40.

DU Ruizhe, LI Wendong, GAO Wenhao, et al. Influence of Climate and Surface Cover Changes on Spatiotemporal Changes of Wind Erosion in Pisha Sandstone Area[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(5): 31-40.

# 气候、地表覆被变化对砒砂岩区风蚀时空变化的影响

杜睿哲, 李文栋, 高文浩, 付金霞, 齐雁冰, 李志

(西北农林科技大学 资源环境学院, 杨凌 712100)

**摘要:** [目的]揭示气候、地表覆被变化对黄土高原北部砒砂岩区风蚀时空变化的影响, 阐明砒砂岩区风蚀减弱的主控因素, 进而为研究区风蚀综合治理提供科技支撑。[方法]基于修正 WEQ(Wind Erosion Equation)风蚀模型和研究区 1980—2017 年日气象数据, 1990 年、1995 年、2005 年、2015 年 4 期 Landsat 遥感影像和土地利用图, 30 m 分辨率 DEM 数据及土壤数据, 利用 GIS 和 RS 技术分析了砒砂岩区 1980s, 1990s, 2000s, 2010—2017 年风蚀强度的时空变化特征, 基于像元尺度剖析风蚀气象因子(W)、植被覆盖度(VC)和土地利用变化对风蚀时空变化的影响。[结果]随着年代推移, 风蚀气象因子先降低后升高并超过初始值、植被覆盖度持续升高并趋于平稳, 土地利用中草地和耕地变化明显。4 个时期的平均风蚀模数分别为 4 187 t/(km<sup>2</sup> · a), 599 t/(km<sup>2</sup> · a), 724 t/(km<sup>2</sup> · a) 和 870 t/(km<sup>2</sup> · a), 风蚀呈先明显减弱后局部地区略有增强的趋势, 其中, 1990s 风蚀在全境急剧减弱, 2000s—2010s 在西北、东南及北部局部地区侵蚀加重; 强烈以上侵蚀区集中于西北、东南边缘及南部河沟地区。4 个时期, 风蚀模数与 W 呈显著正相关(相关系数 0.248~0.678), W 值增大会加剧风蚀波动增强; 风蚀与 VC 呈显著负相关(相关系数 -0.556~-0.490), 低植被覆盖区易出现风蚀波动增强; 草地、耕地是风蚀主要发生区, 2000s—2010s 草地区风蚀增幅较大, 1990s 后林地风蚀强度最小。覆土砒砂岩区风蚀对 VC 最为敏感, 而覆沙砒砂岩区和裸露砒砂岩区则对 W 较敏感。VC 和 W 对风蚀减弱贡献率之和在覆土区、覆沙区和裸露砒砂岩区分别为 54%, 72%, 83%, 其他因素对这 3 个区减蚀的贡献率分别为 46%, 28% 和 17%。[结论]VC 和 W 对砒砂岩区风蚀减弱贡献率较大, 植被覆盖度的提升对减蚀影响深远, 未来应继续加强植被与工程措施的建设。

**关键词:** 砒砂岩区; 风蚀; 修正 WEQ 模型; 时空变化; 影响贡献; 弹性系数

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2023)05-0031-10

## Influence of Climate and Surface Cover Changes on Spatiotemporal Changes of Wind Erosion in Pisha Sandstone Area

DU Ruizhe, LI Wendong, GAO Wenhao, FU Jinxia, QI Yanbing, LI Zhi

(College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** [Objective] The aim of this study is to explore the influence of climate and surface cover changes on spatiotemporal changes of wind erosion in Pisha Sandstone Area in the northern Loess Plateau as well as its main control factors, and then to provide scientific support. [Methods] Based on Modified Wind Erosion Model (WEQ) and daily meteorological data from 1980 to 2017, Landsat remote sensing images and land use maps of four periods(1990, 1995, 2005, 2015), 30 m resolution DEM data and soil data of the study area, we analyzed the spatiotemporal change characteristics of wind erosion intensity in Pisha Sandstone Area in 1980s, 1990s, 2000s and 2010—2017 using GIS and RS technologies, and the impacts of wind erosion meteorological factors (W), vegetation coverage (VC) and land use change on the spatiotemporal changes of wind

收稿日期: 2022-07-08

修回日期: 2022-11-01

资助项目: 国家重点研发计划项目课题(2022YFF1300805); 国家自然科学基金项目(U2243210, 41807070)

第一作者: 杜睿哲(1996—), 男, 内蒙古乌兰察布人, 硕士研究生, 主要从事生态水文与土壤侵蚀研究。E-mail: duruizhe0808@163.com

通信作者: 付金霞(1978—), 女, 甘肃靖远人, 副教授, 博士, 主要从事气候变化、土地利用覆被变化与土壤侵蚀研究。E-mail: fujinxia405@nwsuaf.edu.cn

<http://stbcyj.paperonce.org>

erosion based on the pixel scale. [Results] With the passage of time, the meteorological factors of wind erosion first decreased and then increased and exceeded the initial value, the vegetation coverage continued to increase and stabilized, and the changes of grassland and cultivated land in land use were obvious. The average wind erosion modulus in the four periods were  $4\,187\text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ ,  $599\text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ ,  $724\text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$  and  $870\text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ , respectively, and the wind erosion showed a trend of obvious weakening and then slightly strengthening in local areas. In the four periods, the wind erosion modulus was significantly positively correlated with  $W$  (correlation coefficient  $0.248 \sim 0.678$ ), and the increase of  $W$  value would aggravate the increase in wind erosion fluctuation; wind erosion and  $VC$  showed the significant negative correlation (correlation coefficient  $-0.556 \sim -0.490$ ), and the low vegetation cover area was prone to wind erosion fluctuation enhancement; grassland and cultivated land were the main areas of wind erosion, and the increase of wind erosion in grassland area in 2000s—2010s was large, and the wind erosion intensity of forest land was the smallest after 1990 s. Wind erosion was most sensitive to  $VC$  in soil-covered region of Pisha Sandstone Area, while it was more sensitive to  $W$  in sand-covered region and bare region of Pisha Sandstone Area. The total contribution rates of  $VC$  and  $W$  to the reduction of wind erosion were 54%, 72% and 83% in soil-covered region, sand-covered region and bare region of Pisha Sandstone Area, respectively, and the contribution rates of other factors to erosion reduction in these three regions were 46%, 28% and 17%, respectively. The improvement of vegetation coverage had a far-reaching impact on the reduction of wind erosion. [Conclusion]  $VC$  and  $W$  are the main control factors of wind erosion reduction in Pisha Sandstone Area, and the improvement of vegetation cover has a profound impact on erosion reduction. The construction of vegetation and engineering measures should be continually strengthened in the future.

**Keywords:** Pisha Sandstone Area; wind erosion; Modified WEQ Mode; spatiotemporal change; impact contribution; elastic coefficient

风蚀是我国干旱与半干旱地区严重环境问题之一,可导致生态环境脆弱区土壤退化和土地沙漠化,削弱土壤保持服务功能,极大影响区域经济发展与粮食安全<sup>[1]</sup>。目前相关研究多聚焦于区域风蚀时空格局的变化<sup>[2-5]</sup>,风蚀时空变化受到气候、植被盖度以及土地利用等多因素的综合影响<sup>[2-3,5]</sup>。已有研究表明,风蚀的发生受气温、降水、风速、太阳辐射等多种气象条件的促进或抑制,其中风速是影响土壤风蚀强度的重要驱动因子<sup>[1,3,5]</sup>;植被可以有效地降低风速进而减少风蚀量,植被盖度的质量极大地影响着风蚀的严重程度<sup>[2,5]</sup>;不同土地利用方式通过植被类型和覆盖度也会影响土壤风蚀强度,改变土地利用结构就会引起风蚀状况的恶化或改善<sup>[4]</sup>。目前,相关研究多聚焦于区域复合侵蚀时空格局以及各因素影响的定性分析<sup>[6-9]</sup>,而单动力侵蚀的深入研究可为复合侵蚀研究奠定基础。因此,研究生态环境脆弱区风蚀时空格局及其驱动因素的影响贡献,对生态环境监测、生态风险和脆弱性评估及其风蚀调控治理具有重要意义<sup>[5]</sup>。

砒砂岩区生态环境极度脆弱,气候干燥,植被稀疏,春秋季节多风沙,尤其是3—5月是风蚀的高峰期<sup>[6]</sup>。砒砂岩区是风水两相侵蚀为主的典型复合侵

蚀区,目前研究多聚焦复合侵蚀的机理分析,忽视了单动力侵蚀研究的重要性<sup>[6-7,9-10]</sup>。要了解复合侵蚀机理,须先剖析单动力侵蚀变化及影响因素,作为复合侵蚀深入研究的基础。付金霞等<sup>[10]</sup>基于准格尔旗暖水乡砒砂岩区2018年1月—2019年4月的气象数据研究发现,3月、4月、5月的月平均风速介于 $4.1 \sim 4.9\text{ m/s}$ ,其他月份平均风速小于 $4\text{ m/s}$ 。3—5月期间, $\geq 5\text{ m/s}$ 的风速、 $\geq 10\text{ m/s}$ 的风速每月可分别出现 $28 \sim 30, 7 \sim 11\text{ d}$ , $\geq 15\text{ m/s}$ 的风速每月各出现 $1\text{ d}$ 。 $5\text{ m/s}$ 的风速已超出起沙风速 $4.8\text{ m/s}$ <sup>[11]</sup>,可见砒砂岩区春季风蚀动力强劲。又因砒砂岩岩性脆弱加之风化作用、植被稀疏、人类活动干扰,致使区域土壤表层疏松破碎,从而加剧了风蚀强度<sup>[8]</sup>。目前,气候、地表覆被变化对砒砂岩区风蚀时空变化的影响研究尚缺乏,本研究试图揭示1980s—2010s砒砂岩区风蚀时空变化特征以及风蚀气象因子、植被覆盖度和土地利用对风蚀时空变化的影响,以期为研究区风蚀防控与生态环境保护提供科学参考。

## 1 资料与方法

### 1.1 研究区概况

黄土高原砒砂岩集中分布在晋陕蒙接壤地区,范

围为  $108^{\circ}45' - 111^{\circ}31'E, 38^{\circ}10' - 40^{\circ}10'N$ , 总面积约  $1.67 \text{ 万 km}^2$  [12] (图 1)。地势西北高、东南低, 由西北向东南倾斜, 海拔  $774 \sim 1\,648 \text{ m}$ 。水系主要有窟野河、皇甫川、孤山川、清水川等黄河一级支流和北部穿越沙漠流入黄河的多条支流。按地表覆盖物不同可大致分为东部覆土砒砂岩区、西部覆沙砒砂岩区、西北裸露砒砂岩区, 面积分别占  $51\%, 22\%, 27\%$  [13]。气候属于干旱、半干旱大陆性季风气候, 年均气温  $6 \sim 9^{\circ}\text{C}$ , 年均降水量  $280 \sim 400 \text{ mm}$ , 年均蒸发量  $2\,200 \sim 2\,750 \text{ mm}$ , 年均风速为  $2 \sim 4 \text{ m/s}$ , 最大风速  $28 \text{ m/s}$  [14]。区内植被稀疏, 自然植被以禾本科、菊科、豆科、藜科等低矮植物为主, 人工植被主要有沙棘、柠条、油松、沙打旺等 [15]。土地利用类型主要为草地和耕地。土壤类型主要有黄绵土、栗钙土、风沙土、粗骨土、新积土等 [16]。

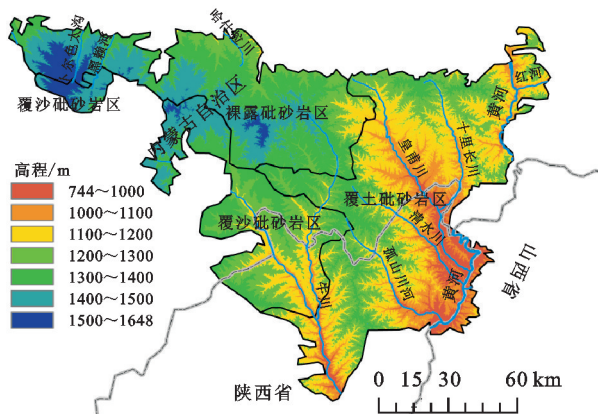


图1 砒砂岩区地理位置及高程分布

## 1.2 数据来源与预处理

本研究数据包括气象数据、土壤数据、DEM 数据、遥感数据和土地利用数据。气象数据为研究区及其周边 13 个气象站点(包头市、准格尔旗、鄂托克旗、兴县、右玉县、达拉特旗、杭锦旗、伊金霍洛旗、府谷县、神木县、东胜区、河曲县、榆林市)1980—2017 年日降水量、平均风速、平均气温、蒸发量及平均相对湿度数据, 下载于中国气象数据网 (<http://data.cma.cn/>) 并经过严格的质量控制。1:100 万比例尺的土壤数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心 (<http://www.resdc.cn/>) 和中国地理监测国情云平台 (<http://www.dsac.cn/>)。研究区 30 m 分辨率 ASTER DEM 数据来源于地理空间数据云 (<http://www.gscloud.cn/>)。遥感影像数据为 1990 年、1995 年、2005 年、2015 年 4 期 Landsat 遥感影像, 来源于地理空间数据云 (<http://www.gscloud.cn/>), 要求所有影像的拍摄日期为当年 6—9 月, 云量控制在  $1\%$  以下。土地利用数据为 1990 年、1995 年、2005 年、2015 年 4 期 1:100 万比例尺的土地利用数据, 来源

于中国科学院资源环境科学数据中心 (<http://www.resdc.cn/>)。所有数据均统一设置坐标为 Gauss Kruger 西安 1980 投影坐标系统, 栅格数据空间分辨率均设置为  $30 \text{ m} \times 30 \text{ m}$ 。

## 1.3 研究方法

WEQ (Wind Erosion Equation) [17] 和 RWEQ (Revised Wind Erosion Equation) [18] 是应用最为广泛的风蚀模型。由于砒砂岩区风蚀气象站较少, RWEQ 模型中部分参数如风向最大风蚀出现距离数据难以获取, 故本研究风蚀模数采用修正 WEQ 模型计算。已有研究 [2, 19] 利用修正 WEQ 模型分别评估蒙古国全境、新疆准噶尔盆地东部北部风沙区的研究也表明: 区域尺度上运用修正 WEQ 模型具有一定的可行性。

由于砒砂岩区特殊的下垫面环境构成, 经典 WEQ 模型的区域地表粗糙度计算方法已不适应于本研究区。在区域地面粗糙度离散化计算方面, GIS 中常基于地面坡度进行计算, 本研究选用基于坡度的坡度因子来表达地面的粗糙度, 这一计算方法也被吴芳芳等 [2] 所应用。在获得研究区 1980s, 1990s, 2000s, 2010—2017 年 4 期风蚀模数的基础上, 根据 SL190-2007 中《土壤侵蚀分类分级标准》进行风蚀强度的分级 [2-3, 20]: 微度 [ $<200 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ ]、轻度 [ $200 \sim 2\,500 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ ]、中度 [ $2\,500 \sim 5\,000 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ ]、强烈 [ $5\,000 \sim 8\,000 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ ]、极强烈 [ $8\,000 \sim 15\,000 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ ]、剧烈 [ $>15\,000 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ ]。基于 GIS 技术分析砒砂岩区风蚀时空变化特征以及风蚀气象因子、植被覆盖度和土地利用变化对风蚀强度空间变化的影响。基于图层像元归一化数据并利用弹性系数法, 量化覆土、覆沙和裸露砒砂岩区风蚀气象因子、植被覆盖度变化对风蚀动态变化的影响贡献。

1.3.1 土壤风蚀量估算方法 修正 WEQ 模型 [2] 具体形式为:

$$E = W \times K \times LS \times B \quad (1)$$

式中:  $E$  为风力侵蚀模数 [ $\text{t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ ];  $W$  为风蚀气象因子, 无量纲;  $K$  为土壤可蚀性因子 [ $\text{t} \cdot \text{hm}^2 \cdot \text{h}/(\text{MJ} \cdot \text{mm} \cdot \text{hm}^2)$ ];  $LS$  为坡长坡度因子, 无量纲;  $B$  为植被因子 ( $\text{kg}/\text{hm}^2$ )。

(1) 风蚀气象因子指数  $W$ 。风蚀气象因子综合反映了各气象因子(风速、降水、相对湿度、温度、蒸发)对风蚀的影响。目前, 联合国粮农组织推荐的风蚀气象因子计算公式应用较为普遍 [21-23], 本研究采用此方法计算风蚀气象因子, 计算公式如下:

$$W = \frac{1}{100} \sum_{i=1}^{12} u^3 \left( \frac{\text{ETP}_i - P_i}{\text{ETP}_i} \right) d \quad (2)$$



式中:  $d$  为该月日数;  $P_i$  为该月降水量(mm);  $ETP_i$  为该月的潜在蒸发量(mm);  $u$  为 2 m 高处月平均风速(m/s)。

其中,  $ETP_i$  的计算公式为:

$$ETP_i = 0.19 (20 + T_i)^2 (1 - r_i) \quad (3)$$

式中:  $r_i$  为该月平均相对湿度;  $ETP_i$  为该月平均气温( $^{\circ}\text{C}$ )。

(2) 土壤可蚀性因子  $K$ 。经典 WEQ 模型采用筛分法确定土壤可蚀性的方法,并不适用于大范围的土壤可蚀性测定<sup>[24]</sup>,而土壤可蚀性值的计算方法与土壤的机械组成、有机质含量有关,此类因素与土壤风蚀密切相关。本文采用 EPIC 模型中应用的土壤可蚀性计算方法<sup>[2,25-26]</sup>:

$$K = \left\{ 0.2 + 0.3 \exp \left[ -0.0256 S_a \left( 1 - \frac{S_i}{100} \right) \right] \right\} \left( \frac{S_i}{C_l + S_i} \right)^{0.3} \left[ 1 - \frac{0.25C}{C + \exp(3.72 - 2.95C)} \right] \left[ 1 - \frac{0.7S_n}{S_n + \exp(-5.51 + 22.9S_n)} \right] \quad (4)$$

式中:  $S_n = 1 - S_a/100$ ;  $C_l$  为黏粒含量% ( $< 0.002$  mm);  $S_i$  为粉砂含量% ( $0.002 \sim 0.05$  mm);  $S_a$  为砂粒含量% ( $0.05 \sim 2$  mm);  $C$  为有机碳含量(%);  $K$  值单位  $(\text{t} \cdot \text{hm}^2 \cdot \text{h}) / (\text{MJ} \cdot \text{mm} \cdot \text{hm}^2)$ 。

(3) 坡长坡度因子  $LS$ 。研究区中,覆土砒砂岩区地貌类型多为丘陵沟壑,裸露砒砂岩区地形起伏也巨大,因而原有模型中坡长因子的计算方法不适用于坡度较陡地区。刘宝元等<sup>[27]</sup>基于黄土高原沟壑纵横、坡度变化大的地形地貌特征,改进了原模型中坡长、坡度因子,此算法被《第一次全国水利普查水土流失普查技术规则》和众多学者<sup>[25]</sup>所采用。本研究基于砒砂岩区 30 m 分辨率 DEM 数据,选用刘宝元等<sup>[27]</sup>提出的坡长坡度因子公式计算  $LS$ :

$$L = \left( \frac{\lambda}{22.13} \right)^m \quad (5)$$

$$\begin{cases} m = 0.2 & \theta \leq 1^{\circ} \\ m = 0.3 & 1^{\circ} < \theta \leq 3^{\circ} \\ m = 0.4 & 3^{\circ} < \theta \leq 5^{\circ} \\ m = 0.5 & \theta > 5^{\circ} \end{cases}$$

$$\begin{cases} S = 10.8 \sin \theta + 0.03 & \theta < 5^{\circ} \\ S = 16.8 \sin \theta - 0.5 & 5^{\circ} \leq \theta < 10^{\circ} \\ S = 21.9 \sin \theta - 0.96 & \theta \geq 10^{\circ} \end{cases}$$

式中:  $L$ ,  $S$  分别表示坡长、坡度因子值;  $\lambda$  表示坡长值(m);  $\theta$  表示坡度值( $^{\circ}$ );  $m$  表示坡长系数。

(4) 风蚀植被因子  $B$ 。植被因子表示一定植被覆盖条件下对土壤风蚀的抑制程度<sup>[28]</sup>,通常基于土

地利用覆被数据和 NDVI 数据获取。采用迟文峰等<sup>[20]</sup>利用的风蚀植被因子计算,公式如下:

$$B = e^{-0.0483VC} \quad (6)$$

式中:  $B$  为风蚀植被因子( $\text{kg}/\text{hm}^2$ );  $VC$  为植被盖度(%)。

$VC$  计算公式如下:

$$VC = \frac{NDVI - NDVI_{\min}}{NDVI_{\max} - NDVI_{\min}} \quad (7)$$

借助 1990 年、1995 年、2005 年、2015 年 4 期 Landsat 遥感影像生成 4 期归一化植被指数(NDVI)图,再根据公式(7)计算植被覆盖度。将累积概率为 5%,95% 的 NDVI 值分别作为 NDVI 最小值( $NDVI_{\min}$ )、最大值( $NDVI_{\max}$ )。根据 SL190-2007 中《土壤侵蚀分类分级标准》将植被盖度分为 5 级:  $\leq 30\%$  (低覆盖度),  $30\% \sim 45\%$  (中低覆盖度),  $45\% \sim 60\%$  (中覆盖度),  $60\% \sim 80\%$  (中高覆盖度),  $> 80\%$  (高覆盖度)。

1.3.2 土壤风蚀变化归因分析 弹性系数法多用于量化影响因子对径流变化的贡献<sup>[29]</sup>,也有学者用其对水蚀动态变化进行归因<sup>[25]</sup>。本研究利用弹性系数法对砒砂岩区风蚀动态变化进行归因。1980—2017 年研究区土壤和地形没有发生根本性变化,风蚀动态变化主要取决于气候、植被因子和其他因素的变化。本研究基于图层逐个像元归一化处理后的风力侵蚀模数值( $E$ )、风蚀气象因子值( $W$ )、植被覆盖度值( $VC$ ),利用 MATLAB 软件建立  $E$ ,  $W$  和  $VC$  的多元回归方程,并利用弹性系数法定量分析  $W$ ,  $VC$  对  $E$  动态变化的影响贡献。

土壤风蚀动态变化( $\Delta E$ )主要是由气候变化( $\Delta E_w$ )、植被覆盖度变化( $\Delta E_{vc}$ )和其他因素变化( $\Delta E_p$ )引起,其原理如下:

$$\Delta E = \Delta E_w + \Delta E_{vc} + \Delta E_p \quad (8)$$

根据弹性系数法原理,风蚀气象因子、植被覆盖度和其他因素的贡献率( $\Delta E_w$ ,  $\Delta E_{vc}$ ,  $\Delta E_p$ )可表达为<sup>[25,30]</sup>:

$$\Delta E_w = \epsilon_w \frac{\Delta W}{W} \quad (9)$$

$$\Delta E_{vc} = \epsilon_{vc} \frac{\Delta VC}{VC} \quad (10)$$

$$\Delta E_p = 1 - (\Delta E_w + \Delta E_{vc}) \quad (11)$$

式中:  $\Delta W$ ,  $\Delta VC$  为数据归一化处理后风蚀气象因子和植被覆盖度 1980s—2010s 的变化量。

各弹性系数可由如下表达式计算<sup>[25,31]</sup>,  $\epsilon_w$  与  $\epsilon_{vc}$  分别为归一化处理后栅格单元年均气象因子值和年均植被覆盖度值对年均风蚀模数值的弹性系数:

$$\epsilon_w = \frac{\partial E / E}{\partial W / W} = \frac{\partial E}{\partial W} \times \frac{W}{E} \quad (12)$$

$$\varepsilon_{vc} = \frac{\partial_E/E}{\partial_{vc}/VC} = \frac{\partial_E}{\partial_{vc}} \times \frac{VC}{E} \quad (13)$$

## 2 结果与分析

### 2.1 风蚀气象因子、植被盖度、土地利用时空变化

2.1.1 风蚀气象因子时空变化 1980s, 1990s, 2000s 和 2010s 砒砂岩区风蚀气象因子(W)值分别为 6.32~119.15, 7.34~100.84, 12.62~69.88, 17.76~106.59, 平均值

分别为 42.53, 33.47, 35.19, 43.20。1980s 和 1990s 的 W 值主要集中在 45 以下、65 以上 2 个区段, 面积分别占 63%, 21% 和 71%, 11%。2000s 和 2010s 的 W 值则主要集中在 20~55, 65 以上 2 个区段, 面积分别占 81%, 8% 和 77%, 13%。综合而言, W 值在 1980s—1990s 下降显著, 而 2000s—2010s 又持续升高; 空间上, 其值在研究区西北部最高, 往东部和南部逐渐减小, 至东南部偶有增大(图 2)。

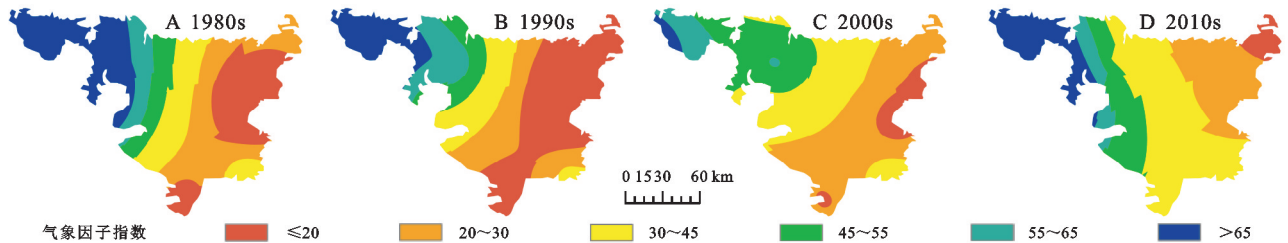


图2 风蚀气象因子指数分级图

2.1.2 植被盖度时空变化 在 1990 年、1995 年、2005 年、2015 年, 砒砂岩区中覆盖度以下植被面积占总面积 70% 以上, 且植被覆盖度越高其面积比例越小。低覆盖度面积占 31%~44%, 中低覆盖度面积占 19%~22%, 中覆盖度面积占 14%~21%, 中高覆盖度面积占 12%~16%, 高覆盖度面积占 12%~14%。与 1990 年相比, 1995 年植被盖度有明显提高, 低覆盖度面积减少 29%, 而中低、中、中高和高覆盖度面积分别增加 17%, 53%, 18% 和 1%。2005 年植被盖度继续提高, 除西北部低覆盖度面积略有增加

外, 其他区域中低、中覆盖度面积分别减少 10%, 14%, 而中高、高覆盖度面积分别增加 15% 和 16%。与 2005 年相比, 2015 年各级植被盖度面积变化不大, 中、高覆盖度面积分别增加、减少 5% 左右, 其他盖度面积变化均在 2% 以下。总体而言, 1990 年以来, 西部覆沙砒砂岩区和西北裸露砒砂岩区植被覆盖度先大幅上升, 后有减小趋势; 东部覆土砒砂岩区植被覆盖度总体不断提高, 但也存在个别地区波动现象; 空间上, 东部覆土砒砂岩区植被盖度高于西部覆沙砒砂岩区和西北裸露砒砂岩区(图 3)。

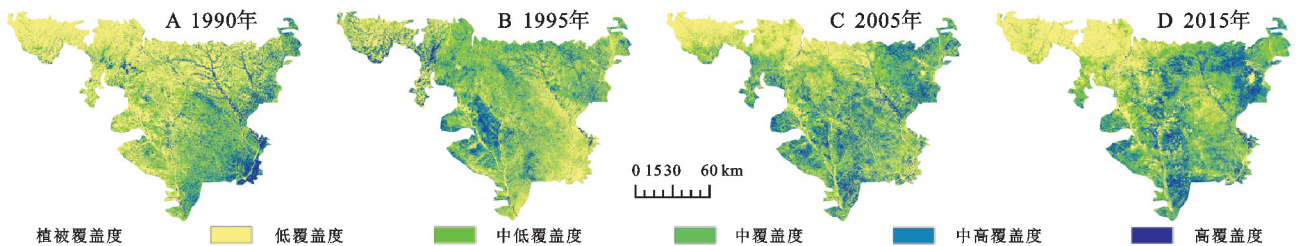


图3 1990年、1995年、2005年、2015年砒砂岩区植被覆盖度空间变化

2.1.3 土地利用时空变化 在 1990 年、1995 年、2005 年、2015 年, 砒砂岩区主要土地利用类型为草地和耕地, 二者占研究区总面积 70%~86%。草地面积最大, 占 44%~65%, 集中分布在北部以及南部局部地区; 耕地面积次之, 面积占 21%~27%, 主要分布在城市周边、研究区南部以及河流附近; 林地面积占 4%~13%, 主要分布在东北部以及河流附近; 其他地类面积比例均在 10% 以下。与 1990 年相比, 1995 年草地增加 48%, 而耕地、林地、城乡用地和未利用地分别减少 23%, 68%, 73% 和 39%, 减少的面积主要转化为草地。较 1995 年、2005 年林地、城乡用地和未利用地分别增加 20%, 22% 和 13%, 耕地和草地略有减少但面积变化不大。与 2005 年相比,

2015 年草地减少 30%, 而其他用地面积均增加, 其中林地增加 167%、城乡用地增加 305%、耕地增加 21%、未利用地增加 39%。基于土地利用动态变化特征发现, 1990 年后研究区生态环境治理强度增大、2005 年后经济建设速度加快(图 4)。

### 2.2 风力侵蚀时空变化

2.2.1 风力侵蚀的时间变化 1980s, 1990s, 2000s 和 2010s 砒砂岩区微度和轻度风力侵蚀占 47%~96%, 中度侵蚀占 3%~24%, 强烈以上侵蚀占 1%~29%, 且强烈以上风蚀强度面积总体呈减少趋势(图 5)。1980s 轻度以下侵蚀占 48%, 中度侵蚀占 24%, 强烈以上侵蚀占 28%。1990s 风力侵蚀显著减弱, 中度以上侵蚀减少且向微度侵蚀转移, 其轻度以下侵蚀占 95%; 1990s 与

1980s相比,微度侵蚀面积增加2310%,轻度侵蚀面积变化不大,中度、强烈、极强烈和剧烈侵蚀面积分别减少85%,93%,97%和99%。2000s较1990s侵蚀有增强趋势,微度侵蚀面积减少8%,轻度至极强烈侵蚀面积分别增加3%,47%,48%和10%,剧烈侵蚀面积减少59%。2010s较2000s侵蚀仍在持续增强,微度侵蚀面积减少8%,轻度至剧烈侵蚀面积分别增加3%,19%,49%,111%和473%;虽然强烈以上各侵蚀强度的绝对面积仍然较小,但其面积增幅较大。1980s,1990s,2000s和2010s,研究区平均风蚀模数分别为4187 t/(km<sup>2</sup>·a),599 t/(km<sup>2</sup>·a),724 t/(km<sup>2</sup>·a)和870 t/(km<sup>2</sup>·a)(图6)。可见,1990s风蚀在全境急剧减弱,2000s—2010s局部地区略有增强。综合而言,4个年代风蚀状况呈先减弱后略有增强趋势,但整个研究期风蚀减弱。

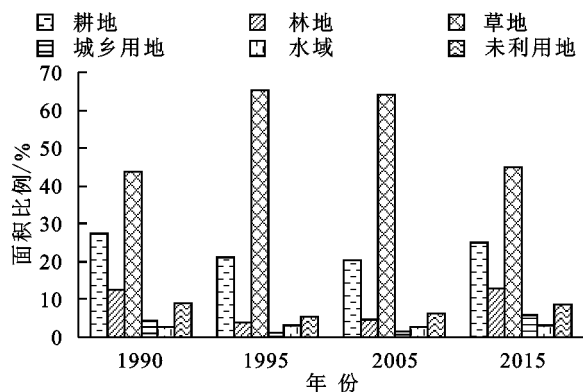


图4 砒砂岩区不同年份土地利用面积比例

2.2.2 风力侵蚀的空间分异 微度和轻度风力侵蚀主要分布在覆土砒砂岩区和覆沙砒砂岩南部,中度侵蚀主要分布在西北裸露砒砂岩区,强烈以上侵蚀主要分布在西北裸露砒砂岩区和覆土砒砂岩东南部(图7)。覆土、覆沙、裸露砒砂岩区轻度以下侵蚀分别占70%~97%,43%~99%,10%~92%,中度侵蚀分别占3%~23%,2%~28%,6%~22%,强烈以上侵蚀

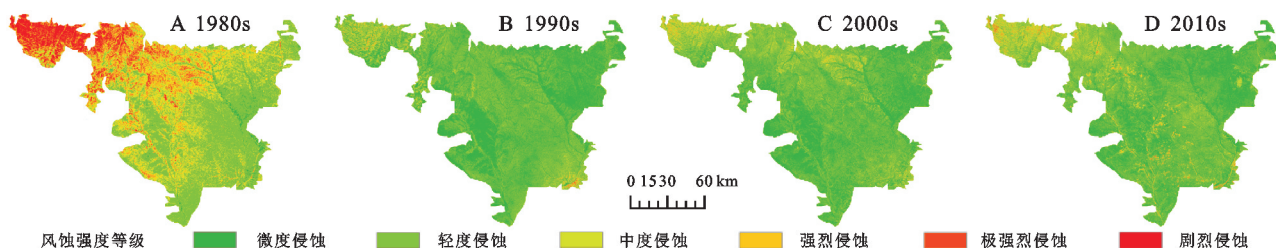


图7 1980—2017年砒砂岩区风力侵蚀强度空间分布

## 2.3 各因素对风蚀空间变异的影响

### 2.3.1 风蚀气象因子W对风蚀空间变异的影响

1980s,1990s,2000s和2010s共4个时期,微度、轻度侵蚀分别有76%~94%,65%~85%的面积分布于W值<45区,中度侵蚀有48%~73%的面积分布于W

分别占0~7%,0~29%,2%~68%(图8)。1980s,覆土砒砂岩区以轻度和中度风蚀为主(占90%),覆沙砒砂岩区以中度以上侵蚀为主(占57%),裸露砒砂岩区以强烈以上侵蚀为主(占68%);自1990s开始,三大区风蚀强度都以轻度以下侵蚀为主(占81%以上)。整个研究期三大区的侵蚀强度减弱,但存在年代波动:覆土砒砂岩区在1990s大幅减弱,2000s和2010s缓慢增强;覆沙砒砂岩区在1990s大幅减弱,2000s持续减弱,2010s有所增强;裸露砒砂岩区在1990s大幅减弱,2000s—2010s增强较为剧烈。总体而言,风力侵蚀在1990s全境均急剧减弱,2000s—2010s在西北、东南及北方局部地区出现侵蚀加重现象,强烈以上侵蚀区主要集中在西北、东南边缘以及南部河沟地区。

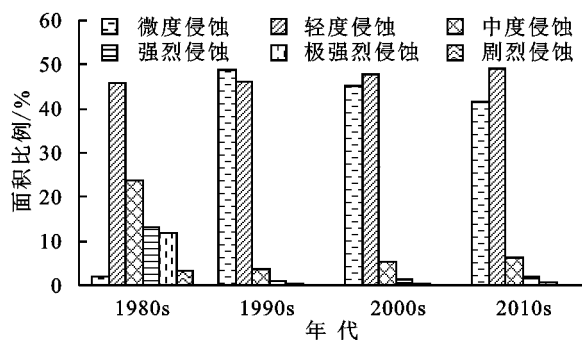


图5 1980—2017年砒砂岩区风蚀强度面积比例

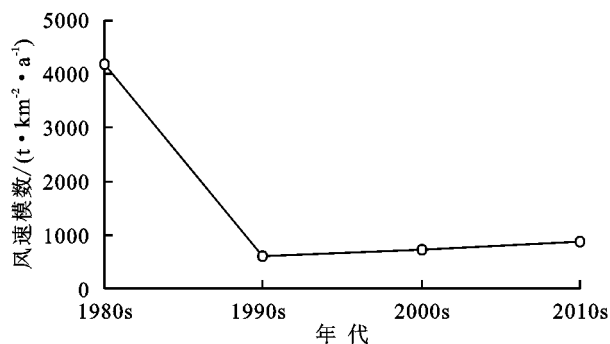


图6 1980—2017年不同时期平均风蚀模数变化趋势

值20~65区,强烈侵蚀有78%~95%的面积分布于W值>30区,极强烈、剧烈侵蚀分别有57%~86%,55%~99%的面积分布于W值>45区。在W≤20,20<W≤30,30<W≤45,45<W≤55,55<W≤65,W>65类风蚀气象因子区中,中度以下侵蚀面积占比逐渐降



低,强烈以上侵蚀面积占比逐渐升高。可见  $W$  低值区侵蚀较弱,而  $W$  高值区侵蚀严重。

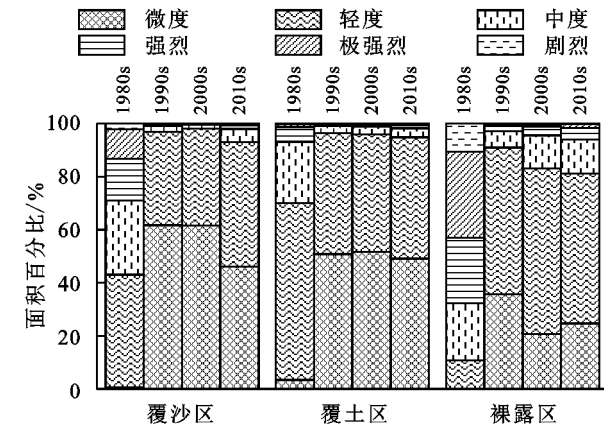


图 8 砒砂岩三大区风蚀强度面积比例

4 个时期,在  $W \leq 20$  区,强烈以上侵蚀分别占 2%,0.2%,0.3%,0.3%;在  $20 < W \leq 30$  区,强烈以上侵蚀分别占 10%,1%,0.6%,0.6%;在  $30 < W \leq 45$  区,强烈以上侵蚀分别占 24%,2%,3%,3%;在  $45 < W \leq 55$  区,强烈以上侵蚀分别占 33%,1%,2%,2%;在  $55 < W \leq 65$  区,强烈以上侵蚀分别占 47%,1%,5%,4%;在  $W > 65$  区,强烈以上侵蚀分别占 74%,6%,12%,10%(图 9)。可见风蚀在 1980s—1990s 急剧减弱,到 2000s—2010s 有波动增强趋势,且随着  $W$  值增大侵蚀波动增强愈发明显。各年代中,随着  $W$  值增大,中度以下侵蚀总体呈减少趋势而强烈以上侵蚀总体呈增加趋势。

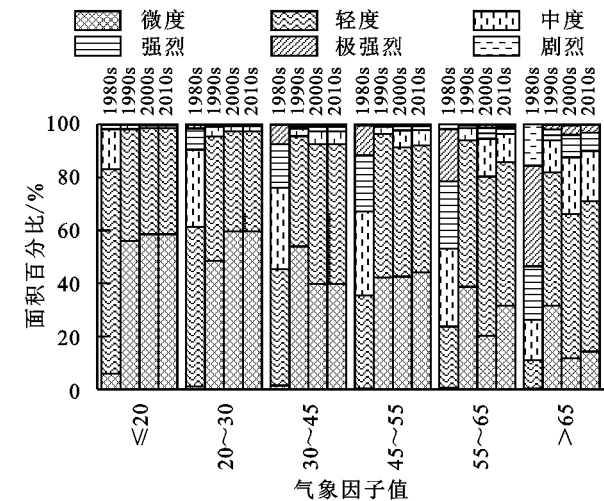


图 9 风蚀强度与风蚀气象因子关系的百分比堆积图

2.3.2 植被盖度对风蚀空间变异的影响 1980s, 1990s, 2000s 和 2010s 这 4 个时期,微度侵蚀有 76%~93% 分布于中度以上植被覆盖区,轻度侵蚀有 82%~100% 分布于中高以下植被覆盖区,中度侵蚀 86%~100% 分布于中度以下植被覆盖区,强烈、极强烈侵蚀分别有 86%~100%, 94%~100% 分布于中低以下植被覆盖区,剧烈侵蚀有 94%~100% 分布于

低植被覆盖区。在低覆盖、中低覆盖、中覆盖、中高覆盖、高覆盖 5 类植被覆盖区中,中度以下侵蚀面积占比逐渐升高,强烈以上侵蚀面积占比逐渐降低。可见植被覆盖度由低转高时,侵蚀会逐渐好转。

1980s,在高覆盖、中高覆盖、中覆盖植被区,中度以上侵蚀分别占 17%,23% 和 31%,其他时期均为 0。1980s,1990s,2000s 和 2010s 这 4 个时期,中低覆盖植被区中度以上侵蚀分别占 45%,0.4%,0.3%,1%,低覆盖植被区中度以上侵蚀分别占 79%,16%,22%,29%(图 10)。可见风蚀在 1980s—1990s 明显好转,到 2000s—2010s 出现波动增强趋势,且波动增强集中发生于低植被覆盖区,在 2010s 中低植被覆盖区个别地区出现侵蚀恶化现象。各年代中,随着植被盖度的提升,中度以上风蚀总体呈下降趋势而轻度以下风蚀总体呈上升趋势,中度以上植被覆盖区在 1990s 后全部为轻度以下风蚀。

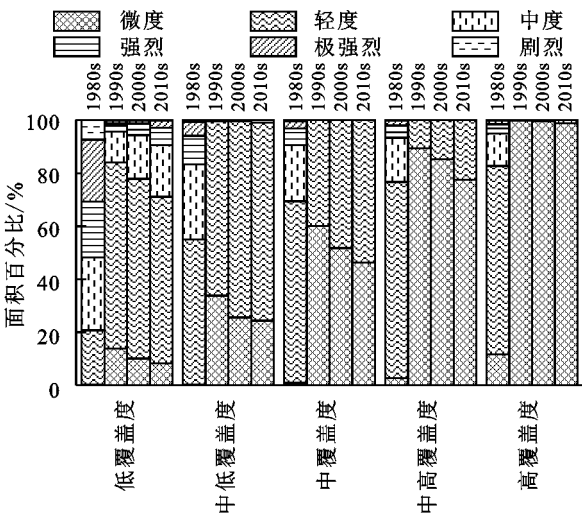


图 10 风蚀强度与植被盖度关系的百分比堆积图

2.3.3 土地利用对风蚀空间变异的影响 1980s, 1990s, 2000s 和 2010s 共 4 个时期,各侵蚀类型 34%~73% 的面积分布于草地区、0~50% 的面积分布于耕地区。4 个时期,强烈以上侵蚀面积的 58%~66%, 18%~22%, 6%~12%, 2%~10%, 1%~6% 分别分布在草地、耕地、未利用地、林地和城乡用地区。可见草地是风蚀主要发生区,其次为耕地。

4 个时期,草地区强烈以上侵蚀分别占 36%, 1%, 2%, 4%, 耕地区强烈以上侵蚀分别占 22%, 1%, 1%, 2%, 林地区强烈以上侵蚀分别占 21%, 0%, 1%, 1%, 未利用地区强烈以上侵蚀分别占 20%, 3%, 3%, 3%, 城乡用地区强烈以上侵蚀占 23%, 4%, 2%, 3%(图 11)。可见风蚀在各地类区总体下降,但在 2000s 后有增强趋势,其中草地风蚀增幅最大,而林地风蚀强度在 1990s 之后最小。

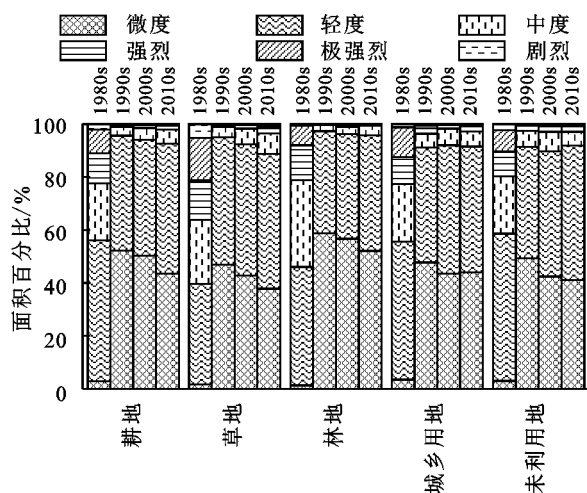


图 11 风蚀强度与土地利用关系的百分比堆积图

## 2.4 各因素对风蚀动态变化的影响

由于土壤和地形在研究期内没有发生根本性变化,本研究主要量化气候和植被因子对风蚀动态变化的贡献率。基于4期逐个像元数据,进行 $E$ 与 $W$ 、 $VC$ 的相关性分析和回归分析,并利用弹性系数法量化 $W$ 、 $VC$ 对 $E$ 动态变化的影响贡献。在进行回归分析时,原30 m空间分辨率栅格数据量巨大,故将各因子数据的像元尺寸转为90 m,每期每个图层像元数据量为241 103个。由于三大区地理环境特征差异较大,在此分别对3大区进行分析。

ArcGIS软件计算的全区和三大区 $E$ 与 $W$ 、 $VC$ 的相关性(表1)表明, $E$ 与 $W$ 呈显著正相关、与 $VC$ 呈显著负相关。 $W$ 对三大区风蚀的影响程度排序为:裸露砒砂岩区>覆沙砒砂岩区>覆土砒砂岩区, $VC$ 对三大区风蚀的影响程度排序为:裸露砒砂岩区>覆土砒砂岩区>覆沙砒砂岩区。通过相关系数可知各因素对风蚀影响强度存在年代变化:在整个研究区, $W$ 对风蚀的影响强度在1980s最高,在1990s急剧减弱,在2000s和2010s又略有增强;而 $VC$ 对风蚀的影响强度在1990s轻微减弱,在2000s和2010s又波动增强且超过1980s的影响强度;总体而言 $VC$ 对风蚀的影响程度大于 $W$ 。4个时期, $W$ 对覆土、裸露砒砂岩区风蚀影响强度先持续减弱后2010s略有增强,对覆沙砒砂岩区风蚀影响强度持续减弱; $VC$ 对覆土、裸露砒砂岩区风蚀影响强度先减弱后持续增强, $VC$ 对覆沙砒砂岩区风蚀影响强度持续增强。

在MATLAB中将数据进行归一化处理并对砒砂岩三大区的 $E$ 、 $W$ 与 $VC$ 进行多元回归,得到三大区的回归方程:

$$E_{\pm} = 0.072 + 0.06W - 0.21VC \quad (14)$$

$$E_{\text{沙}} = 0.068 + 0.22W - 0.19VC \quad (15)$$

$$E_{\text{裸}} = 0.069 + 0.28W - 0.26VC \quad (16)$$

回归系数可反映风蚀对各因子的总体敏感性。结果表明,覆土区中风蚀对 $VC$ 最为敏感,而覆沙区和裸露区则是 $W$ 。经弹性系数法计算得到各因子对风蚀减弱的贡献率:在覆土区、覆沙区和裸露砒砂岩区, $W$ 对风蚀减少的贡献率分别为-15%、21%和55%, $VC$ 对风蚀减少的贡献率分别为69%、51%和28%。 $W$ 、 $VC$ 两者在覆土区贡献率之和为54%,而在覆沙区、裸露区贡献率之和高达72%与83%;其他因素在覆土区贡献率为46%,在覆沙区与裸露区贡献率分别为28%和17%。

表 1 砒砂岩区风蚀与影响因子的相关关系

影响因子	空间范围	与风蚀模数 $E$ 相关系数			
		1980s	1990s	2000s	2010s
风蚀气象因子 $W$	全区	0.678 *	0.248 *	0.298 *	0.328 *
	覆土砒砂岩区	0.358 *	0.264 *	0.151 *	0.154 *
	覆沙砒砂岩区	0.490 *	0.250 *	0.200 *	0.194 *
	裸露砒砂岩区	0.587 *	0.301 *	0.211 *	0.431 *
植被覆盖度 $VC$	全区	0.507 *	0.490 *	0.556 *	0.546 *
	覆土砒砂岩区	0.441 *	0.304 *	0.421 *	0.436 *
	覆沙砒砂岩区	0.107 *	0.383 *	0.400 *	0.436 *
	裸露砒砂岩区	0.476 *	0.435 *	0.446 *	0.457 *

注: \* 代表通过0.01显著性检验。

进一步分析4个时期三大区 $W$ 、 $VC$ 平均值动态变化发现:覆土区 $W$ 平均值分别为22,16,26,31,整体呈升高趋势;覆沙区 $W$ 平均值分别为59,43,39,58,呈先持续下降后升高到近原强度的趋势;裸露区 $W$ 平均值分别为68,58,49,55,整体呈下降趋势。因此,在1980—2017年整个研究期, $W$ 对覆土区减蚀贡献为负,而对覆沙区、裸露区减蚀贡献为正。覆土区 $VC$ 平均值分别为0.50,0.42,0.52,0.53,覆沙区 $VC$ 平均值分别为0.34,0.53,0.51,0.45,裸露区 $VC$ 平均值分别为0.25,0.45,0.29,0.32,三大区4个时期 $VC$ 值虽有波动但整体呈上升趋势。因此,1980—2017年, $VC$ 对砒砂岩三大区的减蚀均为正贡献,可见植被覆盖度的提升对风蚀减弱影响深远。

## 3 讨论

砒砂岩区已有风蚀变化归因研究,仅限于对影响因素的定性分析<sup>[2-3,5-9,21]</sup>,缺乏对影响因素贡献的定量研究。本研究基于像元尺度剖析了气候和地表植被因素(风蚀气象因子、植被覆盖度和土地利用)变化对风蚀空间变异的影响,并利用弹性系数法量化了风蚀气象因子 $W$ 、植被覆盖度 $VC$ 和其他因素对风蚀 $E$ 动态变化的贡献。以风速为代表的风蚀气象因子与风蚀强度呈显著正相关,其值在研究区西北部最高,



而该区域也正是风蚀严重区域<sup>[1,3,5]</sup>。当  $W$  值升高时,风蚀强度也相应增大;覆土、覆沙、裸露砒砂岩区  $W$  的年代波动引起了三大区风蚀强度的年代波动。植被盖度的提升会显著减弱风蚀强度<sup>[1-2,5,32]</sup>,  $VC$  对覆土、覆沙和裸露砒砂岩区  $E$  动态变化的贡献率分别为 69%, 51% 和 28%, 覆土区和覆沙区植被盖度的提升是风蚀减弱的最主要因素。退耕还林还草工程的实施以及沙棘资源建设等生态环境保护与治理项目<sup>[15]</sup>, 大大提升了砒砂岩区植被覆盖度。1990s 以来覆土砒砂岩区  $VC$  显著提高且有持续改善的趋势; 覆沙区和裸露区  $VC$  同样提升显著, 但由于这 2 个区特殊的地表物质组成、气候环境及治理措施等综合原因, 导致植被存活率低, 覆沙区和裸露区在 2000s—2010s 平均植被盖度比 1990s 的平均植被盖度下降最高分别达到 14% 和 36%<sup>[33]</sup>, 因此  $VC$  对覆土区风蚀减弱贡献较大, 而对覆沙区和裸露区风蚀减弱贡献较小, 但  $VC$  仍是风蚀减弱的主要影响因素, 因此, 在后续工作中应投入更多精力到西部覆沙区和西北裸露区的植被覆盖度可持续提高方面。从不同年代  $W$  和  $VC$  组合变化来看, 当  $W$  高而  $VC$  低时, 风蚀强度最大, 如 1980s 的裸露、覆沙砒砂岩区; 当  $VC$  提高但  $W$  增加更大的时候, 风蚀强度也会增强, 这也是导致 2010s 局部地区风蚀加重的原因。

由于研究区风蚀气象站点较少, 难以对整个研究区风蚀时空估算结果进行精度验证。通过与砒砂岩区空间分布有交集的已有研究成果进行对比发现: 迟文峰等<sup>[20]</sup> 对内蒙古高原 1990s—2010s 的风蚀模拟结果(通过<sup>137</sup>Cs 示踪法精度验证)中, 与本研究区相重叠的区域(108°56′58″—111°0′58″ E, 39°0′41″—40°8′41″N) 风蚀动态变化较平稳, 风蚀模数为 5~15 t/(hm<sup>2</sup>·a), 此区域本文模拟风蚀模数为 5.99~8.70 t/(hm<sup>2</sup>·a) 且空间分布规律与之较一致。刘连有等<sup>[34]</sup> 根据晋陕蒙接壤地区不同下垫面的实测输沙率和风力特性因子并结合遥感技术手段, 量测得到 1980s 准格尔旗风蚀模数为 10~20 t/(hm<sup>2</sup>·a), 此区域本文模拟的 1980s 风蚀模数为 21.09 t/(hm<sup>2</sup>·a), 模拟结果略高, 但在可接受范围内。Zhang 等<sup>[35]</sup> 模拟的 1990—2015 年内蒙古风蚀强度空间分布图中, 与本研究区相重叠的区域(108°56′58″—111°20′58″E, 39°26′41″—40°8′41″N) 风蚀强度为轻度以下, 本文研究结果与其相一致。付金霞等<sup>[10]</sup> 于 2018-03—2019-02 对砒砂岩区二老虎沟(110°35′58″E, 39°47′41″N) 的风蚀实测结果为轻度以下, 此区域本文研究与之一致。

本研究仍存在一些不足之处: 受制于 WEQ 模型参数限制, 本研究在分析各因素对风蚀动态变化影响时, 考虑了风蚀气象因子、植被覆盖度和其他因素对风蚀动态变化的贡献, 没有进一步分离各种人类活动对风蚀的影响, 后续将进一步加强这方面研究。

## 4 结论

(1)  $W$  值在 1980s—1990s 下降显著, 而 2000s—2010s 又持续升高; 空间上, 其值在研究区西北部最高, 往东部和南部逐渐减小, 至东南部偶有增大。1990 年以来, 西部覆沙区和西北裸露区植被覆盖度先大幅上升, 后有减小趋势; 东部覆土区植被覆盖度总体不断提高, 但也存在个别地区波动现象; 空间上, 东部覆土区植被盖度高于西部覆沙区和西北裸露区。砒砂岩区主要土地利用类型为草地和耕地, 1995 年和 2005 年草地的面积显著增大; 2015 年草地面积减少, 而耕地、林地和城乡用地的面积显著增大。1980s—2010s 风力侵蚀状况呈先持续减弱后局部地区略有增强趋势; 空间上, 风力侵蚀在 1990s 全境均急剧减弱, 2000s—2010s 在西北、东南及北部地区出现侵蚀加剧现象, 强烈侵蚀区主要集中在西北、东南边缘以及南部河沟地区。

(2) 在  $W$  低值区风蚀较弱, 高值区风蚀严重; 随着  $W$  值在 2000s—2010s 增大, 风蚀有波动增强趋势。  $VC$  由低转高时, 侵蚀会逐渐好转; 2000s—2010s 风蚀波动增强集中发生在低植被覆盖区, 在 2010s 中低植被覆盖区个别地区出现侵蚀恶化现象; 中度以上植被覆盖区在 1990s 后全部为轻度以下风蚀。草地是风蚀主要发生区, 其次为耕地。2000s—2010s 风蚀波动增强主要发生在草地区, 1990s 后林地风蚀强度最小。

(3) 覆土区中风蚀对  $VC$  最为敏感, 而覆沙区和裸露区则对  $W$  较为敏感。覆土区、覆沙区和裸露区中  $W$  和  $VC$  对风蚀减少的贡献率分别为 -15%, 69%, 21%, 51% 和 55%, 28%, 两者在覆土区贡献率之和为 54%, 而在覆沙区与裸露区则高达 72% 与 83%, 其他人类活动等因素贡献之和在 17%~46% 之间,  $VC$  的提升对风蚀减弱影响深远。后续应继续保护并投入资金和力量到植被保护与工程措施的建设上来。

### 参考文献:

- [1] 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.
- [2] 吴芳芳, 曹月娥, 卢刚, 等. 准东地区土壤风蚀影响因子分析与风蚀量估算[J]. 水土保持学报, 2016, 30(6): 56-60.

- [3] 邢丽珠,张方敏,邢开成,等.基于 RWEQ 模型的内蒙古巴彦淖尔市土壤风蚀变化特征及归因分析[J].中国沙漠,2021,41(5):111-119.
- [4] 郑洋,郝润梅,吴晓光,等.典型农牧交错区土地利用变化对土壤风蚀的影响:以内蒙古四子王旗为例[J].西南农业学报,2021,34(3):575-583.
- [5] 江凌,肖燚,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):21-25,32.
- [6] 姚文艺,李长明,张攀,等.砒砂岩侵蚀机理研究与展望[J].人民黄河,2018,40(6):1-7,65.
- [7] 杨晓东,盛明,乔旺林,等.鄂尔多斯市风蚀规律试验研究[J].内蒙古水利,2010,(1):9-11.
- [8] 李晓丽,于际伟,刘李杰.鄂尔多斯砒砂岩土壤侵蚀与气候条件关系的研究[J].内蒙古农业大学学报:自然科学版,2014,35(3):105-109.
- [9] 张攀,姚文艺,刘国彬,等.砒砂岩区典型小流域复合侵蚀动力特征分析[J].水利学报,2019,50(11):1384-1391.
- [10] 付金霞,王静,张宝利,等.砒砂岩原状坡面不同季节复合侵蚀动力的贡献研究[J].农业工程学报,2020,36(11):66-73.
- [11] 伍光 and 自然地理学 [M].4 版.北京:高等教育出版社,2008.
- [12] 武诗琪,饶良懿.砒砂岩不同类型区坡谱特征与空间分异[J].农业工程学报,2021,37(8):125-132.
- [13] 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.
- [14] 赵国际.内蒙古砒砂岩地区水土流失规律研究[J].水土保持研究,2001,8(4):158-160.
- [15] 吴永红,胡建忠,闫晓玲,等.砒砂岩区沙棘林生态工程减洪减沙作用分析[J].中国水土保持科学,2011,9(1):68-73.
- [16] 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.
- [17] Woodruff N P, Siddoway F H. A Wind Erosion Equation[J]. Soil Science Society of America Journal, 1965, 29(5):602-608.
- [18] Fryrear D W, Bilbro J D, Saleh A, et al. RWEQ: improved wind erosion technology[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2000,55:183-189.
- [19] Mandakh N, Tsogtbaatar J, Dash D, et al. Spatial assessment of soil wind erosion using WEQ approach in Mongolia[J]. Journal of Geographical Sciences, 2016, 26(4):473-483.
- [20] 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.
- [21] 雷金银,吴发启,马璠,等.毛乌素沙地土壤风蚀的气候因子分析[J].水土保持研究,2007,14(2):104-105.
- [22] Nourzadeh M, Bahrami H A, Goossens D, et al. Determining soil erosion and threshold friction velocity at different soil moisture conditions using a portable wind tunnel[J]. Zeitschrift Für Geomorphologie, Nf, 2013, 57(1):97-109.
- [23] 董治宝. Wind Erosion in Arid and Semiarid China: An Overview [J].中国沙漠,2000,20(2):134-139.
- [24] Chepil W. Measurement of wind erosiveness of soils by dry sieving procedure[J]. Scientific Agriculture, 1942, 23(3):154-160.
- [25] Jin F, Yang W, Fu J, et al. Effects of vegetation and climate on the changes of soil erosion in the Loess Plateau of China [J]. Science of the Total Environment, 2021,773:145514.
- [26] 王丰,刘金铜,付同刚,等.基于 RUSLE 模型的太行山区土壤侵蚀时空分异特征及影响因子研究[J].中国生态农业学报(中英文),2022,30(7):1064-1076.
- [27] 刘宝元,郭索彦,李智广,等.中国水力侵蚀抽样调查[J].中国水土保持,2013,(10):26-34.
- [28] Bilbro J D, Fryrear D W. Wind Erosion Losses as Related to Plant Silhouette and Soil Cover[J]. Agronomy Journal, 1994,86(3):550-553.
- [29] 张树磊,杨大文,杨汉波,等.1960—2010 年中国主要流域径流量减小原因探讨分析[J].水科学进展,2015,26(5):605-613.
- [30] Zhang S, Yang H, Yang D, et al. Quantifying the effect of vegetation change on the regional water balance within the Budyko framework[J]. Geophysical Research Letters, 2016,43(3):1140-1148.
- [31] Li Z, Li Q, Wang J, et al. Impacts of projected climate change on runoff in upper reach of Heihe River basin using climate elasticity method and GCMs[J]. Science of the Total Environment, 2020,716:137072.
- [32] 姚文艺,肖培青,王愿昌,等.砒砂岩区侵蚀治理技术研究进展[J].水利水电科技进展,2019,39(5):1-9,15.
- [33] 马晓妮,任宗萍,谢梦瑶,等.砒砂岩区植被覆盖度环境驱动因子量化分析:基于地理探测器[J].生态学报,2022,42(8):3389-3399.
- [34] 刘连友.区域风沙蚀积量和蚀积强度初步研究:以晋陕蒙接壤区为例[J].地理学报,1999,54(1):61-64,66-70.
- [35] Zhang H, Fan J, Cao W, et al. Response of wind erosion dynamics to climate change and human activity in Inner Mongolia, China during 1990 to 2015[J]. Science of the Total Environment, 2018,639:1038-1050.