

# 甘肃省武威市风力侵蚀分区治理规划及措施

靳峰<sup>1,2</sup>, 邢瑜<sup>3,4</sup>, 周颖<sup>1</sup>, 张煜<sup>2</sup>, 马涛<sup>5</sup>, 霍云云<sup>6</sup>, 郭建军<sup>3</sup>, 柳本立<sup>3</sup>

(1.兰州大学 资源与环境学院, 甘肃 兰州 730000; 2.甘肃省水利厅, 甘肃 兰州 730000;  
3.中国科学院 西北生态环境资源研究院/沙漠与沙漠化重点实验室, 甘肃 兰州 730000; 4.中国科学院大学,  
北京 100049; 5.甘肃省水土保持科学研究所, 甘肃 兰州 730020; 6.武威市水利科技推广中心, 甘肃 武威 733000)

**摘要:** [目的] 分析甘肃省武威市风力侵蚀空间动态变化特征, 确定风力侵蚀可治理区划及其防治对策, 为该市风蚀水土保持工作和生态环境建设提供科学参考。[方法] 基于多源地理信息数据, 应用遥感、地理信息系统(ArcGIS)等技术手段, 使用修正土壤风蚀方程(RWEQ)计算武威市2000—2020年5期风蚀模数, 获得区域风蚀的面积分布和变化特征。结合重点建设工程分布等空间要素叠加分析方法, 提出该市风力侵蚀可治理区域划分原则, 并将该原则应用于划分武威市风力侵蚀可治理区。[结果] 修正土壤风蚀方程(RWEQ)能较好地估算武威市多年风力侵蚀模数, 其多年风力侵蚀模数为 $5\ 788.98\ [t/(km^2 \cdot a)]$ , 多年平均土壤风蚀总量 $1.92 \times 10^8\ t$ ; 研究区风力侵蚀在时间上呈现总体下降, 偶有上升趋势, 且风力侵蚀强度等级明显减弱; 在空间上具有明显的空间异质性, 主要分布在民勤县、凉州区、古浪县; 依据多要素叠加风蚀分区治理方案, 武威市可治理风力侵蚀面积共 $2\ 872.66\ km^2$ , 其中民勤县 $1\ 468.48\ km^2$ , 凉州区 $708.75\ km^2$ , 古浪县 $695.43\ km^2$ 。[结论] 风力侵蚀分区治理是武威市风蚀水土保持的重点工作, 根据风蚀分区治理划分结果, 针对不同行政区划, 民勤县北部坡度较低的平坦戈壁沙漠地区是其重点关注区域, 治理措施应以风沙防治和植被恢复为主, 并需要注意控制人为工程建设扰动的影响, 明确区域管理范围; 凉州区应注意采取工程措施和生物措施结合的方式进行治理; 古浪县应以封育措施和对天然植被进行保护为主。同时, 在戈壁沙漠地区需特别注意大型光伏电站建设等施工扰动的风沙防治和生态恢复。

**关键词:** 风力侵蚀; 修正土壤风蚀方程模型; 甘肃省武威市; 风蚀水土保持区划

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2024)01-0172-09

中图分类号: S157

**文献参数:** 靳峰, 邢瑜, 周颖, 等. 甘肃省武威市风力侵蚀分区治理规划及措施[J]. 水土保持通报, 2024, 44(1): 172-180. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2024.01.018; Jin Feng, Xing Yu, Zhou Ying, et al. Regionalization and prevention countermeasures for wind erosion in Wuwei City of Gansu Province [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(1): 172-180.

## Regionalization and Prevention Countermeasures for Wind Erosion in Wuwei City of Gansu Province

Jin Feng<sup>1,2</sup>, Xing Yu<sup>3,4</sup>, Zhou Ying<sup>1</sup>, Zhang Yu<sup>2</sup>, Ma Tao<sup>5</sup>, Huo Yunyun<sup>6</sup>, Guo Jianjun<sup>3</sup>, Liu Benli<sup>3</sup>

(1.School of Earth Environmental Sciences, Lanzhou University, Lanzhou,

Gansu 730000, China; 2.Water Resources Department of Gansu Province, Lanzhou,

Gansu 730000, China; 3.Key Laboratory of Desert and Desertification, Northwest Institute of Eco-environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou, Gansu 730000, China;

4.University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 5.Gansu Institute of Soil and Water Conservation, Lanzhou, Gansu 730020, China; 6.Wuwei Water Science and Technology Promotion Centre, Wuwei, Gansu 733000, China)

**Abstract:** [Objective] The characteristics of the spatial dynamics of wind erosion at Wuwei City, Gansu Province and the controlled area of wind erosion and its prevention countermeasures were determined in order to provide scientific references for implementing measures to prevent wind erosion, conserve soil and water, and use ecological environmental construction practices in the city. [Methods] Multi-source geographic

收稿日期: 2023-06-15

修回日期: 2023-08-08

资助项目: 甘肃省水利厅科技项目“河西地区(武威市、嘉峪关市)水土保持精准治理布局与对策研究”; 甘肃省水利科学试验研究及技术推广项目(23GSLK006)

第一作者: 靳峰(1979—), 男(汉族), 甘肃省庄浪县人, 硕士, 审计师, 主要从事半干旱区水文和水土保持管理工作。Email: 493829381@qq.com。

通信作者: 柳本立(1986—), 男(汉族), 河南省漯河市人, 博士, 研究员, 主要从事风沙地貌和风沙灾害防治研究。Email: liubenli@lzb.ac.cn。

information data, applied remote sensing, a geographic information system (ArcGIS), and other technical means were used with the revised wind erosion equation (RWEQ) to calculate the five-period wind erosion modulus of Wuwei City from 2000 to 2020 to obtain the distribution of the regional wind erosion area, change characteristics, etc. These results were combined with a superposition analysis of spatial elements (such as the distribution of key construction projects) to put forward the principles of the city's wind erosion manageable area delineation and to apply them to delineate the manageable area of wind erosion at Wuwei City. [Results] RWEQ was able to estimate the multi-year wind erosion modulus at Wuwei City [ $5\ 788.98\ \text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{yr})$ ], with a multi-year average soil wind erosion of  $1.92 \times 10^8\ \text{t}$ . The model exhibited an overall decreasing and occasionally increasing trend over time, and the wind erosion intensity level was obviously weakened. Wind erosion intensity exhibited obvious spatial heterogeneity that was mainly located in Minqin County, Liangzhou District, and Gulang County. According to the multi-element superimposed wind erosion zoning management program, Wuwei City can manage a total of  $2\ 872.66\ \text{km}^2$  of wind erosion area, of which  $1\ 468.48\ \text{km}^2$  was at Minqin County,  $708.75\ \text{km}^2$  was at Liangzhou District, and  $695.43\ \text{km}^2$  was at Gulang County. [Conclusion] Wind erosion sub-area management should be the focus of wind erosion prevention and soil and water conservation in Wuwei City. According to the results of the wind erosion sub-area management division, for different administrative divisions, the flat Gobi desert area with low slope in the northern part of Minqin County is the key area of regional concern. Management measures should be based on the prevention of wind and sand erosion and the restoration of vegetation cover, and attention should be given to controlling the impact of man-made engineering and construction disturbances to make clear the scope of the regional management. Liangzhou District should focus on using a combination of engineering measures and biological measures, combined with governmental management. Gulang County should focus on closure measures and protecting natural vegetation. At the same time, special attention in the Gobi desert area should be given to the implementation of wind and sand erosion prevention and ecological restoration measures for construction activities such as large-scale photovoltaic power plants.

**Keywords: wind erosion; revised wind erosion equation model; Wuwei City of Gansu Province; prevention countermeasure**

风力侵蚀是在风力作用下地表土壤及细小颗粒被剥离、搬运和沉积的过程<sup>[1]</sup>,是水土流失的主要类型之一<sup>[2]</sup>,多发生于干旱地区<sup>[3]</sup>。自 20 世纪 30 年代以来,随着基础理论与观测、试验方法的不断完善,土壤风蚀研究进入了定量化阶段<sup>[4]</sup>。野外风蚀观测作为最先用于风蚀研究的重要手段,可获得长期风蚀监测的动态数据,为后续风蚀模型的发展提供了数据支撑<sup>[5]</sup>。通过分析风蚀环境影响因素、建立各种要素与风蚀速率和风蚀量的经验关系,发展出了适用于不同空间尺度的多种风蚀模型,如代表性的风蚀方程(wind erosion equation, WEQ)<sup>[6]</sup>,并进一步改进为能有效模拟区域风蚀动态变化的修正风蚀方程(revised wind erosion equation, RWEQ)<sup>[7]</sup>。

甘肃省武威市是河西走廊地区的重要城市,也是土壤风力侵蚀较为严重的地区之一,区域内地貌类型多样,南部为祁连山区、中部为绿洲区、北部为荒漠地区,气候差异巨大,分布有山地、河谷、草原、平原、绿洲和荒漠等多种景观类型,自然条件复杂,不同区域风力侵蚀影响的空间异质性显著。目前对武威市土

壤侵蚀研究多集中于水土流失的整体特点和分布规律。例如,王世国等<sup>[8]</sup>结合水土流失动态监测数据,分析了武威市水土流失现状;袁春霞等<sup>[9]</sup>利用 RS、GIS 空间分析功能建立了武威市土壤侵蚀自动判别模型。以往研究结果表明,武威市存在不同程度的土壤侵蚀且受风力侵蚀影响较大,但对风蚀可治理区域的确定以及具体防治措施的分析评估较少。因此,对武威市进行风力侵蚀分区,构建因地制宜的风力侵蚀防治方案,对武威市生态环境建设、促进社会经济可持续发展具有重要意义。鉴于此,本文利用修正土壤风蚀模型(RWEQ),分析 2000—2020 年甘肃省武威市风蚀速率与时空分布格局,建立了针对性的风力侵蚀可治理区域划分指标体系,确定了风力侵蚀重点防治区域,以期能有效开展风力侵蚀防治,服务武威市水土保持相关工作,为河西走廊其他地区水土保持提供借鉴。

## 1 研究区概况

武威市位于甘肃省中部,地处  $36^{\circ}29' - 39^{\circ}27' \text{N}$ ,

101°49′—104°16′E(图 1)。属于典型温带大陆性气候,气温年较差大,年均温为 7.8℃;降水量在 60~610 mm 之间,多年平均降水量为 310.2 mm,降水量季节分布不均,自西南向东北随海拔高度降低而减少;年均日照时数 2 800 h 左右,无霜期为 125~165 d。研究区海拔在 1 202~4 859 m 之间,地势南高北低,自西南向东北倾斜,区内太阳辐射强、日照时间长,风力、光照资源丰富,发展新能源产业优势突出。研究区约有 11.0% 的土地面积属于黄河流域,87.7% 属于羊羊河流域,境内水资源比较贫乏,属资源型缺水地区;因地形地貌、气温降水的差异,植被也呈现明显的垂直分布特征。

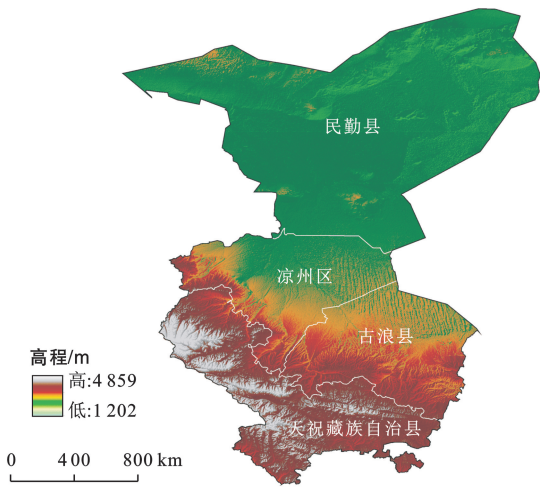


图 1 甘肃省武威市地形

Fig.1 Topography of Wuwei City, Gansu Province

## 2 数据与分析方法

### 2.1 数据来源及说明

为分析武威市多年来的土壤风力侵蚀变化情况,以 5 a 为间隔,分析 2000—2020 年研究区的风力侵蚀模数,所需数据主要包括气象数据和遥感数据。其中风速数据使用欧洲中期天气预报中心(<https://cds.climate.copernicus.eu>)分辨率为 0.05° 的日风速数据,并对该数据预处理,根据 u, v 风向得到研究区风速风向数据;土壤数据,包括土壤质地数据和土壤湿度数据,使用国家青藏高原科学数据中心(<http://data.tpdc.ac.cn/zh-hans/>)分辨率为 30 m 的土壤数据集,由于土壤理化性质在短时间内没有变化,因而假设研究区域土壤质地和化学性质在研究时间段内恒定;土地利用数据以 30 m 分辨率的中国土地利用数据集(<https://zenodo.org/records/8176941>)进行裁剪提取;高程数据与 NDVI(归一化植被指数)来自中国科学院资源环境科学数据中心([https://](https://www.resdc.cn/)

[www.resdc.cn/](https://www.resdc.cn/)),空间分辨率分别为 90 m 和 1 km;研究区行政边界与线状地物分布数据来自于国家基础地理信息中心(<https://www.webmap.cn/com-mres.do?method=result100W>)。

### 2.2 风力侵蚀计算方法

2.2.1 RWEQ 修正土壤风蚀方程 采用修正土壤风蚀方程(RWEQ)对武威市土壤风力侵蚀进行估算,该方程充分考虑了气候和地表因素,数据获取方便,从而被广泛应用。所涉及要素包括气候条件、土壤可蚀性、土壤结皮、植被覆盖状况、地表粗糙度等<sup>[10]</sup>,计算公式为:

$$S_L = \frac{2 \times z}{S^2} \times Q_{\max} \times e^{-(z/s)^2} \quad (1)$$

$$S = 150.71 \times (WF \times EF \times SCF \times K' \times C)^{-0.3711} \quad (2)$$

$$Q_{\max} = 109.8 \times (WF \times EF \times SCF \times K' \times C) \quad (3)$$

式中: $S_L$  为实际风力侵蚀量( $\text{kg}/\text{m}^2$ ); $Q_{\max}$  为最大转移量( $\text{kg}/\text{m}$ ); $z$  为最大风蚀出现距离(m),取 2 m; $S$  为选定侵蚀区域的关键地块长度; $WF$  为气候因子( $\text{kg}/\text{m}$ ); $EF$  为土壤可蚀因子; $SCF$  为土壤结皮因子; $K'$  为地表粗糙度因子; $C$  为植被覆盖因子。

(1) 气候因子(WF)。气候因子(WF)是风速、降水和土壤等因子综合作用的结果,计算公式为:

$$WF = wf \times SW \times SD \times \frac{\rho}{g} \quad (4)$$

式中:wf 为各月多年平均气候风蚀因子( $\text{m}^3/\text{s}^3$ ); $SW$  为各月多年平均土壤湿度因子,无量纲; $SD$  为雪盖因子(无积雪覆盖天数/研究总天数),定义积雪覆盖深度大于 25.4 mm 视为积雪覆盖; $\rho$  为空气密度,取值为 1.29  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $g$  为重力加速度,取 9.8  $\text{m}/\text{s}^2$ 。

wf 的计算公式为:

$$wf = \frac{\sum_{i=1}^N U_2 (U_2 - U_c)^2}{N} \times N_d \quad (5)$$

式中: $U_2$  为距离地面 2 m 处的风速( $\text{m}/\text{s}$ ); $U_c$  为临界风速,一般设为 5  $\text{m}/\text{s}$ ;  $N$  为每月观测风速大于临界风速的天数(d); $N_d$  为每月天数(d)。

SW 的计算公式为:

$$SW = \frac{ET_p - (R + I)R_d / N_d}{ET_p} \quad (6)$$

式中: $ET_p$  为模拟期间标准作物的潜在蒸散率(mm); $R$  为模拟期间的降雨量(mm); $I$  为模拟期间标准作物的灌溉量(mm); $R_d$  表示模拟期间降雨和灌溉的日数的总和。

(2) 土壤可蚀性因子(EF)。土壤的粒度越小,有机质含量低,土壤受到侵蚀的影响可能性加强;反之土壤粒度越大,土壤中有有机质、黏土、碳酸钙等物质

的存在会使土壤颗粒形成微团聚体,进而降低土壤可

$$EF = [29.09 + 0.31SA + 0.17SI + 0.33(SA/CL) - 2.59OM - 0.95CaCO_3] / 100 \quad (7)$$

式中:SA 为土壤粗砂含量(%);SI 为土壤粉砂含量(%);CL 为土壤黏粒含量(%);OM 为土壤有机质含量(%);CaCO<sub>3</sub> 为碳酸钙含量(%),可不予考虑。

(3) 土壤结皮因子(SCF)。土壤结皮是指某些低等生物与土表相互作用或降水滴溅在土表上形成的微层,结皮的存在可以减少可侵蚀颗粒的含量,降低土壤颗粒的磨蚀作用,利于沙丘的固定,能够对土壤风力侵蚀起到一定的作用,因此,土壤结皮因子与土壤抗风蚀能力呈负相关。土壤结皮因子(SCF)的计算方法为:

$$SCF = 1 / [1 + 0.0066(CL)^2 + 0.021(OM)^2] \quad (8)$$

式中:CL 为土壤黏粒含量(%);OM 为土壤有机质含量(%).

(4) 植被覆盖度因子(C)。植被作为地理环境的重要组成部分,强烈地影响着大气圈与土壤圈之间的能量转换与传递,因而是影响土壤风蚀最活跃的因素之一。植被的生长情况对地表粗糙度、起沙风速和移动颗粒都能起到一定作用,不同植被类型的防风固沙效果不同,植被覆盖度因子(C)可由植被覆盖度(cc,%)计算得到,计算公式为:

$$C = \exp \left[ -5.614 * \left( \frac{cc}{100} \right)^{0.7366} \right] \quad (9)$$

蚀性。土壤可蚀性因子(EF)的计算公式为:

(5) 地表糙度因子(K')。

$$K' = e^{(1.86K_r - 2.41K_r^{0.934} - 0.127C_{rr})} \quad (10)$$

$$K_r = 0.2\Delta H^2 / L \quad (11)$$

式中:K<sub>r</sub> 为土垄糙度,以 Smith-Carson 方程加以计算,单位为 cm;C<sub>rr</sub> 为随机糙度因子,取 0,单位为 cm;L 为地势起伏参数;ΔH 为距离 L 范围内的海拔高程差。

### 2.3 风蚀水土保持区划方法

武威市是国家西部生态安全屏障的重要组成部分,区域北部多为植被稀疏、气候干旱的戈壁荒漠,南部则为降水较多、坡度显著变化的山区。因此,在风蚀水土保持空间分区工作主要针对北部的凉州区、古浪县、民勤县;南部天祝县主要受水力侵蚀,风力侵蚀影响较小,本文不予讨论。

2.3.1 分区指标 由于武威市南北区域在土壤风蚀方面存在显著的差异,所采取的分区指标需要涵盖影响土壤风蚀的主要因素。基于生态功能区划原则、武威市生态环境现状和土壤风蚀空间分布特征<sup>[11-12]</sup>,在《武威市黄河流域生态保护和高质量发展水土流失综合治理专项规划》成果基础上,选择自然地理要素、土地利用要素、风力侵蚀要素和重点建设工程内容 4 个要素,制定武威市风蚀水土保持区划指标(表 1)。

表 1 武威市风蚀水土保持区划指标体系

Table 1 Wind erosion soil and water conservation zoning index system in Wuwei City

分区要素	分区指标	分区原则	分区要素描述
自然地理要素	地形坡度 植被覆盖度	坡度小于等于 5° 的耕地和建设用地 坡度在 5° 以上、植被覆盖度大于 45% 的园地和林地	自然地理条件分异规律是影响风力侵蚀发生的内在要素
土地利用要素	各类用地比例	坡度在 25° 以上,面积大于 20 km <sup>2</sup> 的陡坡地; 坡度在 6°~25°,面积大于 0.2 km <sup>2</sup> 的坡耕地; 植被覆盖度大于 45% 的未利用地	土地利用方式是影响风力侵蚀的重要因素之一,调整土地利用结构是风沙防治的重要手段
风力侵蚀要素	轻度以上风蚀土地面积比	风力侵蚀模数大于 2 500 [t/(km <sup>2</sup> ·a)]	土壤风蚀模数能反映地区风蚀水土保持功能状况,是风蚀水土保持区划的重要因素
重点建设工程要素	河道岸坡带和大中型水库 重要交通沿线 绿洲沙地交汇边缘侵蚀区域	设置 100—300 m 缓冲带 设置 100—500 m 防护带 设置 300—1000 m 防风阻沙林带区	河道、湖泊和重要交通沿线等水土保持重点建设地区代表了需要开展水土保持工作的重点区域

2.3.2 分区方法 本文基于空间叠加分析方法对研究区进行风蚀水土保持区划。空间叠加是将同一地区、同一比例尺的两组或更多专题地图图层进行叠加<sup>[13]</sup>,分析提取新的空间和属性关系,分区结果直观可靠。首先利用 ArcGIS 10.2 对武威市地貌坡度图与植被覆盖图进行叠加,根据图层栅格要素相交部分确定分区范围;再将武威市土地利用图和计算得到的

土壤多年风蚀等级图。根据表 1 的指标体系叠加分析得到风蚀可治理区域范围及面积;同时,为保证区划结果的可实践性,以武威市行政区划为边界分县区进行结果统计,列出主要涉及乡镇。

### 2.4 结果验证

由于遥感影像光谱与地物的一致性与差异性需依赖解译人员专业知识和主观判断标准,因此对风蚀



分区结果的具体位置、植被状况、土地利用类型和地表特征需要进行野外调查验证、实地考察,以提高结果准确度。本文将风蚀计算结果与已有类似研究进行比较,并采用点、线结合方式开展野外调查检验,对每县区风力侵蚀典型区域选择 2~5 个样点。调查主要内容包括样点土地利用类型、气候条件、地形地貌和风蚀现状等变化情况。

### 3 结果与分析

#### 3.1 风力侵蚀空间分布与变化分析

参照《土壤侵蚀分类分级标准》<sup>[14]</sup>(SL190—2007),确定武威市各区域风力侵蚀强度等级。2000, 2005, 2010, 2015, 2020 年,武威市年平均风蚀速率分别为 5 399.85, 3 024.55,  $1.07 \times 10^4$ , 5 900.74,

$3 766.45 [t/(km^2 \cdot a)]$ ,最高风蚀速率分别为  $6.32 \times 10^4$ ,  $3.29 \times 10^4$ ,  $1.04 \times 10^5$ ,  $7.02 \times 10^4$ ,  $4.51 \times 10^4 [t/(km^2 \cdot a)]$ ,多年平均风力侵蚀速率为 5 788.98  $[t/(km^2 \cdot a)]$ ,多年平均土壤风蚀总量  $1.92 \times 10^8 t$ 。

2000 年,武威市除天祝县外,其他 3 县区均有大面积强烈、极强烈和剧烈程度风力侵蚀。2005 年之后,武威市风力侵蚀得到较好防控和治理,主要分布在凉州区、民勤县,这与近年来开展的防风固沙和生态建设工程主要集中在武威北部腾格里沙漠和巴丹吉林沙漠有关(图 2)。从风力侵蚀面积变化来看,2000—2020 年轻度风力侵蚀面积减少 2 262.15  $km^2$ ,中度风力侵蚀面积减少 330.92  $km^2$ ,强烈风力侵蚀面积减少 42.33  $km^2$ ,极强烈风力侵蚀面积增加 58.56  $km^2$ ,剧烈风力侵蚀面积减少 3 237.99  $km^2$ 。

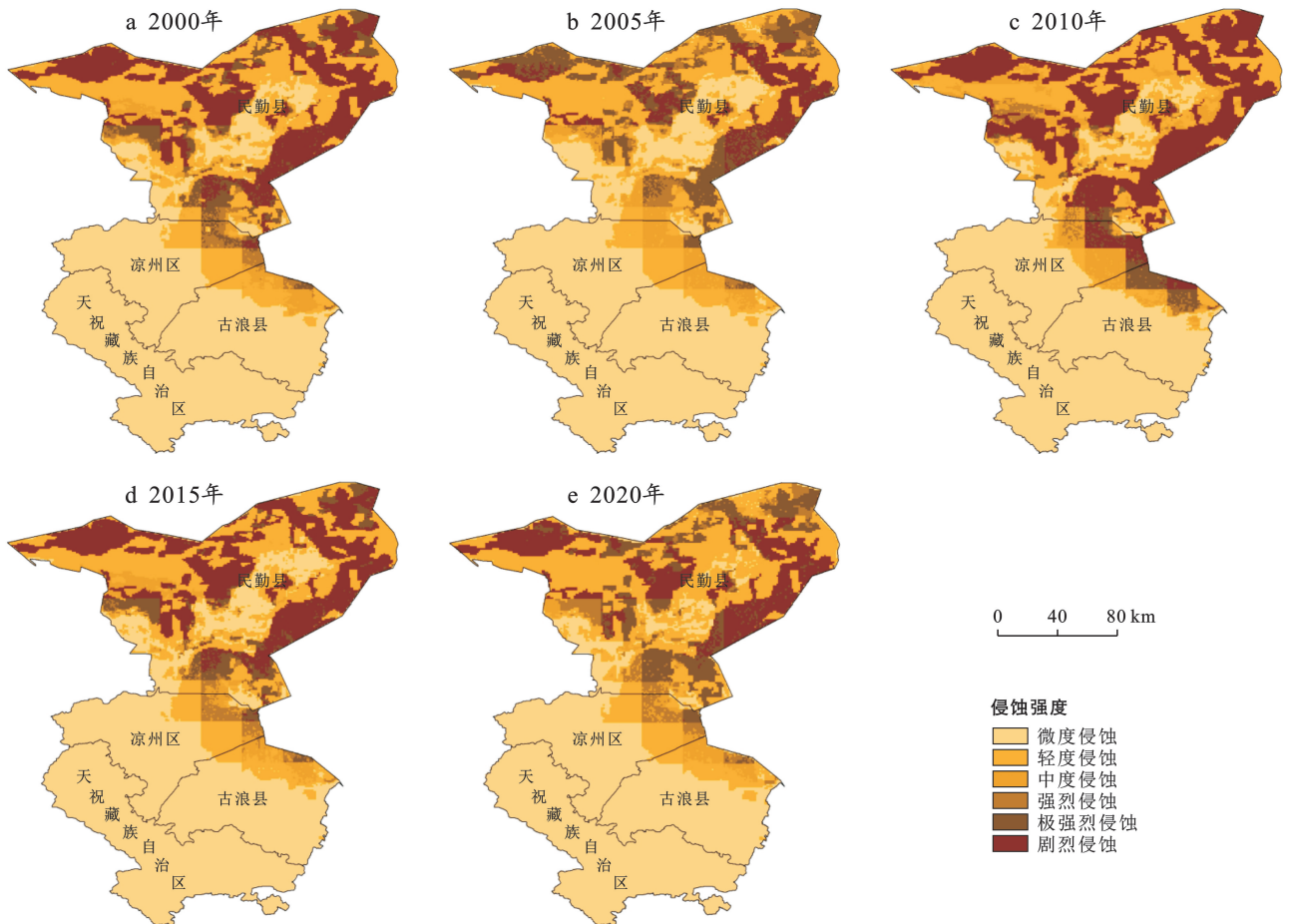


图 2 2000—2020 年武威市土壤风力侵蚀分级

Fig.2 Soil wind erosion classification of Wuwei City from 2000 to 2020

#### 3.2 坡度与土地利用类型影响

武威市坡度范围为  $[0, 72.72^\circ]$ ,按照  $3^\circ \sim 10^\circ$ ,  $10^\circ \sim 25^\circ$ ,  $25^\circ \sim 50^\circ$ ,  $50^\circ \sim 72.72^\circ$  将坡度分为 4 个区间分析武威市风力侵蚀特征。在  $3^\circ \sim 10^\circ$  坡度分区中,土壤风力侵蚀强度主要为轻度侵蚀,占分区面积的

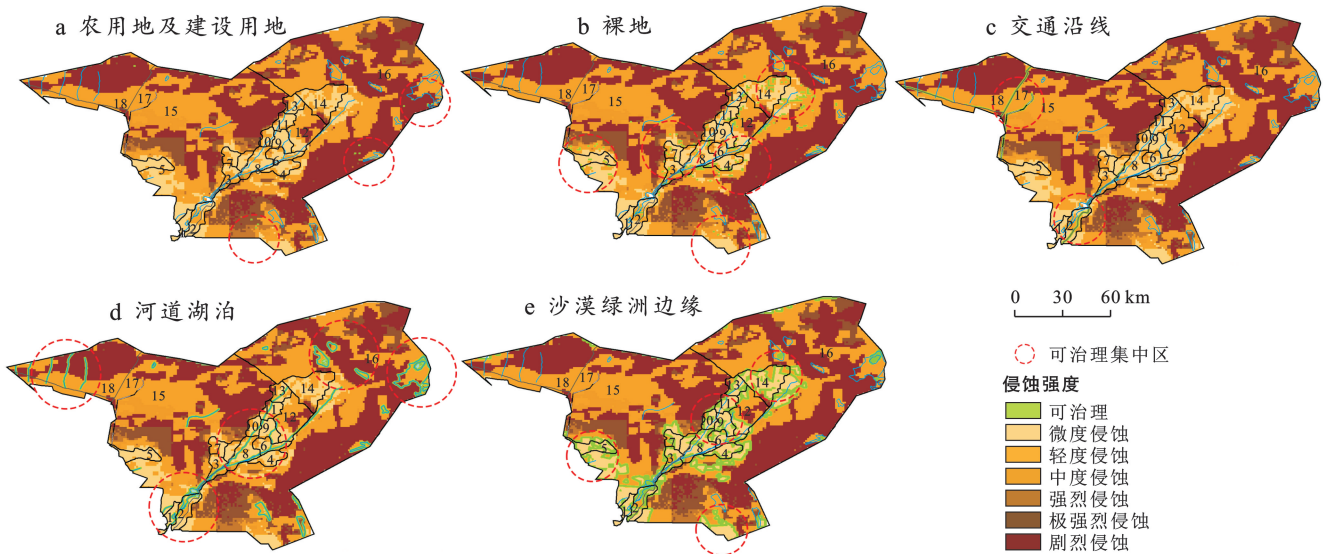
38.35%;在  $10^\circ \sim 25^\circ$  坡度分区中,土壤风力侵蚀强度主要为剧烈侵蚀,占分区面积 35.04%;在  $25^\circ \sim 50^\circ$  坡度分区中,土壤风力侵蚀强度主要为轻度侵蚀,占分区面积的 57.89%;在  $50^\circ \sim 72.72^\circ$  坡度分区中,主要分布在南部天祝县,土壤风力侵蚀强度以微度侵蚀为主。

土地利用类型与土壤风力侵蚀分布关系密切。武威市轻度、中度及以上等级风力侵蚀的区域主要分布在裸地。综合来看,武威市风力侵蚀主要出现在坡度比较低的北部平坦戈壁沙漠地区,集中在民勤县、凉州区、古浪县,因此风蚀水土保持区划和治理方案建议也针对这 3 个县区。

### 3.3 风蚀水土保持区划结果

3.3.1 民勤县 民勤县土壤风力侵蚀轻度以上面积 9 653.87 km<sup>2</sup> (面积占比 60.96%)。2020 年年均土壤风力侵蚀模数为 7 355.84 [t/(km<sup>2</sup> · a)]。民勤县防风固沙区位于平原绿洲和沙漠边缘,主要风力侵蚀问

题包括土壤沙化、土地生产力下降、耕地资源减少。根据本文表 1 确定的可治理原则,民勤县可治理面积共 1 468.48 km<sup>2</sup>,其中包括农用地及建设用地可治理面积 350.35 km<sup>2</sup>,主要分布在东湖镇、城区街道等乡镇;裸地可治理面积 305.61 km<sup>2</sup>,主要分布在西渠镇、昌宁乡、大坝乡和东坝镇等乡镇;交通沿线可治理面积 93.25 km<sup>2</sup>,主要分布在金阿铁路、307 省道和 212 省道等重要交通沿线;河道湖泊可治理面积 252.37 km<sup>2</sup>和沙漠绿洲边缘可治理面积 466.90 km<sup>2</sup>,主要分布在西渠镇、重兴乡、泉山镇、双茨科乡、蔡旗乡和红沙梁乡等乡镇(图 3)。



注:数字为代表性乡镇及道路,依次为 1. 蔡旗乡;2. 重兴乡;3. 薛百乡;4. 夹河乡;5. 昌宁乡;6. 东坝镇;7. 大坝乡;8. 羊路乡;9. 双茨科镇;10. 大滩乡;11. 泉山镇;12. 收成镇;13. 红沙梁乡;14. 西渠镇;15. 红砂岗镇;16. 东湖镇;17. 金阿铁路;18. 212 省道。

图 3 民勤县不同土地类型风蚀可治理区

Fig.3 Controllable area of wind erosion of different land types at Minqin county

3.3.2 凉州区 凉州区土壤风力侵蚀轻度及以上等级面积 920.10 km<sup>2</sup> (面积占比 18.11%)。2020 年年均土壤风力侵蚀模数为 683.01 [t/(km<sup>2</sup> · a)]。凉州区可治理面积 708.75 km<sup>2</sup>,包括农用地及建设用地可治理面积 104.11 km<sup>2</sup>,主要分布在金山乡、五和乡、松树乡等乡镇;裸地可治理面积 97.14 km<sup>2</sup>,主要分布在下双乡;交通沿线可治理面积 167.73 km<sup>2</sup>,主要分布在兰新铁路、干武铁路、211 省道、G30 连霍高速和 312 国道等重要交通沿线;河道湖泊可治理面积 252.38 km<sup>2</sup>,主要分布在张义镇、黄羊镇、谢河镇、河东镇等乡镇;沙漠绿洲边缘可治理面积 87.39 km<sup>2</sup>,主要分布在吴家井乡、清源镇、长城乡、大柳乡等乡镇(图 4)。

3.3.3 古浪县 古浪县土壤风力侵蚀轻度及以上等

级面积 760.10 km<sup>2</sup> (面积占比 15.07%)。2020 年最高土壤风力侵蚀模数为 521.74 [t/(km<sup>2</sup> · a)]。古浪县可治理面积 695.43 km<sup>2</sup>,包括农用地及建设用地可治理面积 138.60 km<sup>2</sup>,主要分布在直滩乡、冰草湾乡、横梁乡、古丰乡和民权乡等乡镇;裸地可治理面积 110.23 km<sup>2</sup>,主要分布在黄花滩乡和直滩乡;交通沿线可治理面积 159.74 km<sup>2</sup>,主要分布在兰新铁路、干武铁路、308 省道、G30 连霍高速、G2012 定武高速和 312 国道等重要交通沿线;河道湖泊可治理面积 117.63 km<sup>2</sup>,主要分布在干城乡、黑松驿镇、新堡乡、十八里堡乡、井泉乡和裴家营镇等乡镇;沙漠绿洲边缘可治理面积 169.23 km<sup>2</sup>,主要分布在干城乡、新堡乡、裴家营镇、直滩乡和大靖镇等乡镇(图 5)。

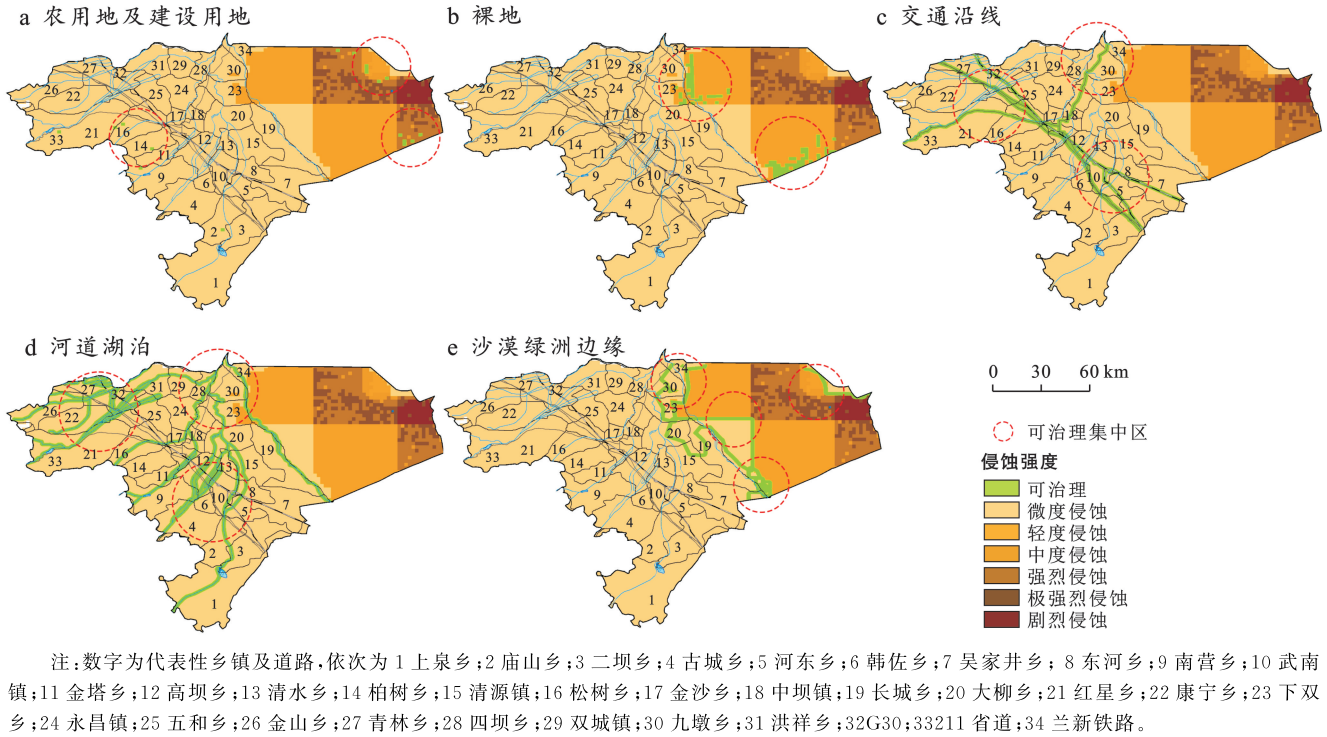


图 4 凉州区不同土地类型风蚀可治理区  
Fig.4 Controllable area of wind erosion of different land types at Liangzhou District

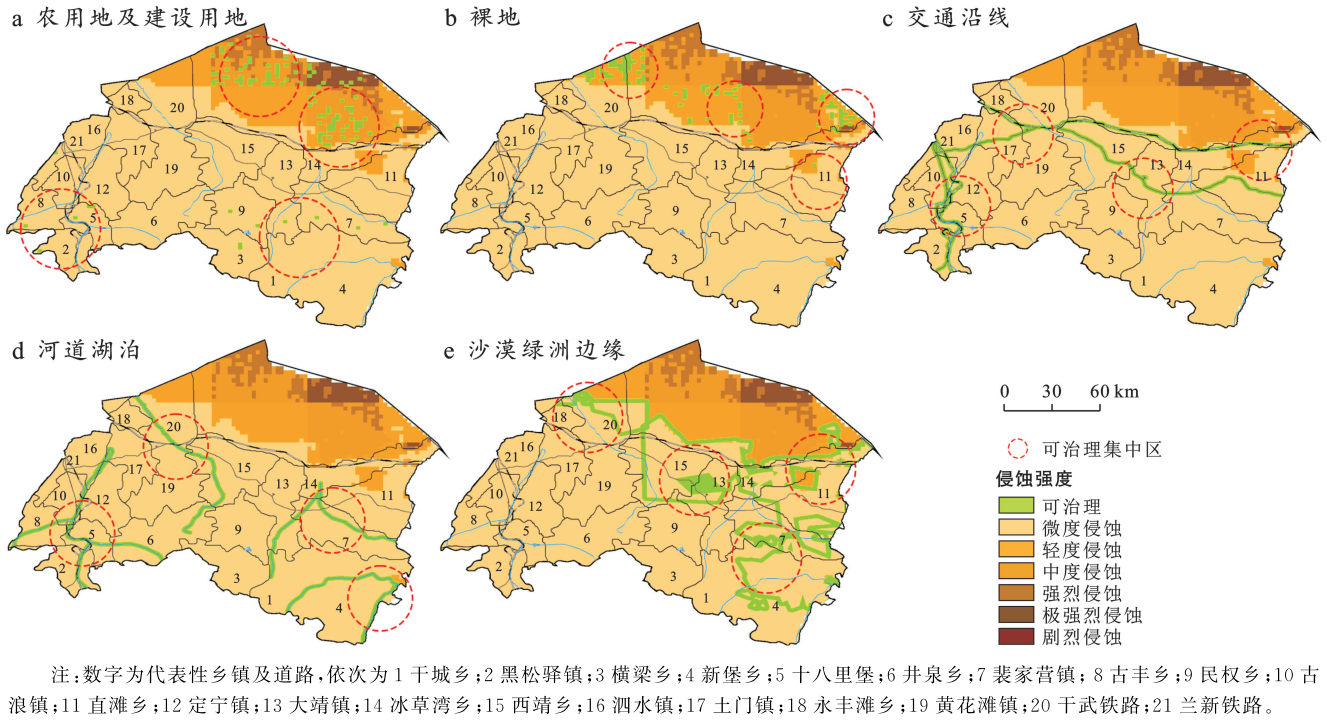


图 5 古浪县不同土地类型风蚀可治理区  
Fig.5 Controllable area of wind erosion of different land types at Gulang County

### 3.4 结果验证

本文计算的平均风蚀量计算结果与同属于干旱区的新疆准格尔盆地、中国干旱区、中亚(中国新疆)、内蒙古的风蚀量计算结果相近,结果较为合理(表 2)。计算结果高于青海省<sup>[15]</sup>及中亚(中国新疆)、内蒙古

部分结果<sup>[16]</sup>,原因是研究区内荒漠和裸地占比较大,相应的风蚀模数数值较高。

风力侵蚀类型野外验证点信息包括样点位置、土地利用类型及风力侵蚀强度等(表 3)。野外验证点均位于对应的研究分区内,所确定的风蚀水土保持可治



理区分区结果也与野外验证点较为一致。调研结果也表明,沙漠戈壁地区光伏电站建设活动在研究区内分

布较为广泛,在建设期间采取的固沙措施有限,对地表扰动程度和风力侵蚀的影响剧烈,尤其需要关注。

表 2 本文与前人风力侵蚀计算结果对比

Table 2 Comparison of the results of wind erosion calculations between this paper and the previous ones

研究区域	研究时段	研究方法	计算结果/(t·km <sup>-2</sup> ·a <sup>-1</sup> )	参考文献
武威市	2000—2020 年	RWEQ	5 788.98	本文
青海省	—	RWEQ	4 599	江凌等 <sup>[15]</sup>
中亚(中国新疆)、内蒙古	1986—2005 年	RWEQ	耕地 474;林地 344;草地 1 556;未利用地 4 308	Wang Wei, et al. <sup>[16]</sup>
新疆准格尔盆地东部	2016 年	中国科学院寒区旱区环境与工程研究所大田推广模型	4 571(未利用地 6 456;林草地 3 437;耕地 759)	曹月娥等 <sup>[17]</sup>
中国干旱地区	1990—2015 年	RWEQ	耕地 1 134~2 106;林地 931~1 943;草地 496~3 329;未利用地 3 694~5 865	Chi Wenfeng, et al. <sup>[18]</sup>

表 3 野外验证点地理位置及侵蚀情况

Table 3 Geographical location and evosion of field validation sites

样点序号	样点类型	经度/(°)	纬度/(°)	侵蚀类型	侵蚀强度
1	民勤县红沙岗光伏电站	102.40E	38.91N	风力侵蚀	剧烈侵蚀
2	民勤县近 G569 国道沟渠	102.89E	38.45N	风力侵蚀	中度侵蚀
3	民勤县南湖镇沙漠雕塑公园	103.31E	38.41N	风力侵蚀	剧烈侵蚀
4	凉州区近 S235 省道农用地	103.07E	38.11N	风力侵蚀	极强烈侵蚀
5	古浪县爱民新村建设用地区	103.38E	37.66N	风力侵蚀	轻度侵蚀

### 3.5 武威市分区治理方案

(1) 民勤县。民勤县绿洲荒漠防风固沙区位于腾格里沙漠草原化荒漠生态亚区,针对耕地、园地、林地等农用地可治理区,因绿洲来水较少,需合理调整农业结构,缩小高耗水农作物种植面积,发展节水农业并采取植物措施,包括布设植被缓冲带及林下植草等措施,同时加大风蚀水土保持监督执法力度,合理控制人类活动;对城乡建设用地(特别是光伏电站建成区)可治理区,采用自然恢复以及人工促进自然恢复的植物措施,修复电站生态,起到防风固沙的作用,也有助于环境和小气候的改善;针对裸地可治理区,需积极开展防沙治沙工作,保护和恢复沙生植被;在重要交通沿线、河道岸坡带、河道缓冲带和大中型水库周边,采取封育和人工植被建设、工程措施和植物技术结合的综合技术,以梭梭树、花棒、沙生赖草等乡土树种为主体,乔灌草合理配置,以带、片结合,构建立体、多结构的综合防护体系,同时明确区域管理范围及保护范围内的封育保护。

(2) 凉州区。凉州区绿洲荒漠防风固沙区位于平原绿洲区,主要风力侵蚀防治措施采取以工程措施和生物措施相结合、田间工程与蓄水保土耕作措施相结合的方式,加强防风固沙林的建设;在农用地可治理区,采取以改变地面微小地形,增加地表粗糙度、地面覆盖和土壤入渗等风蚀水土保持农业措施;在沙漠

绿洲边缘可治理区,营造农田防护林、植物篱、植物保护带等的建设。

(3) 古浪县。古浪县防风固沙土壤保持区位于腾格里沙漠边缘,以风力侵蚀为主,该区域风力侵蚀治理措施主要为铺设麦草方格和柴草沙障抵御风沙,实施封育措施恢复自然植被;在光伏电站建设区内采取工程措施、植物措施和临时措施,以有效控制和减少施工建设造成的风力侵蚀;在河道湖泊可治理区,风力侵蚀防治以预防保护和小流域综合治理为主,采用山水林田湖草沙综合治理措施。在沟头修建沟头防护工程,在沟底修建谷坊,沟岸修建岸坡防护工程,拦挡洪水冲刷,提高沟道水土保持能力;在坡面林地、草地可治理区实施封禁保护,促进自然修复,严格控制生产建设活动;在农牧交错可治理区建立林草防护体系,增强耕地生产能力保护农田。

## 4 结论

利用经过对比验证的修正土壤风蚀方程 RWEQ,分析了武威市 2000—2020 年的风力侵蚀时空变化特征,并在此基础上收集和调查武威市自然条件、社会经济、风力侵蚀现状等数据,针对重要工程建设内容,选取能够反映研究区风蚀水土保持区划的典型指标、叠加主要要素,形成了具有参考价值的武威市风蚀水土保持区划。本研究表明,截止 2020 年,区



域风力侵蚀面积占研究区总面积 34.07%，较 2000 年该区域风力侵蚀强度等级明显减弱，侵蚀强度总体呈下降趋势，其中剧烈侵蚀等级变化最大，其面积减少可达 3 237.99 km<sup>2</sup>。但值得注意的是，武威市仍受风力侵蚀影响明显，针对不同风力侵蚀特征，应对其采取风蚀分区治理措施并践行“因地制宜，突出重点”原则。选取自然地理、土地利用、风力侵蚀和重点建设工程内容四类要素，以区域坡度、农用地和建设用地的分布、轻度以上风蚀面积占比和河道、湖泊与交通沿线缓冲带等范围为主要指标，以乡镇为基本单元，进行武威市风蚀水土保持区划，其中民勤县绿洲荒漠防风固沙可治理区是重点治理区域，治理措施以风沙防治和植被恢复为主；凉州区绿洲荒漠防风固沙可治理区以工程措施和生物措施结合的方式进行治理；古浪县防风固沙土壤保持可治理区以封育措施和对天然植被进行保护为主。同时，在新能源基地在戈壁荒漠地区大规模建设期间，需要注意在光伏电站工程建设中实施风沙防治和生态恢复措施，以控制由人为因素主导的风力侵蚀区域的产生。采取风蚀分区治理的方法，能体现风蚀水土保持精准布局工作的重要意义，为今后生态修复工程部署提供参考。

#### [参 考 文 献]

- [1] Morgan R P C. Soil Erosion and Conservation [J]. Geographical Journal, 2005, 162(2): 304.
- [2] 王礼先, 朱金兆. 水土保持学[M]. 2 版. 北京: 中国林业出版社, 2005.  
Wang Lixian, Zhu Jinzhao. Soil and water conservation [M]. 2nd ed. Beijing: China Forestry Publishing House, 2005.
- [3] Tuo Dengfeng, Xu Mingxiang, Gao Guangyao. Relative contributions of wind and water erosion to total soil loss and its effect on soil properties in sloping croplands of the Chinese Loess Plateau [J]. Science of the Total Environment, 2018, 633: 1032-1040.
- [4] 杨秀春, 严平, 刘连友. 土壤风蚀研究进展与评述[J]. 干旱地区农业研究, 2003, 21(4): 147-153.  
Yang Xiuchun, Yan Ping, Liu Lianyou. Advances and commentaries on wind erosion of soil [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2003, 21(4): 147-153.
- [5] Webb N P, Herrick J E, Van Zee J W, et al. The National Wind Erosion Research Network: Building a standardized long-term data resource for aeolian research, modeling and land management [J]. Aeolian Research, 2016, 22: 23-36.
- [6] Woodruff N P, Siddoway F H. A wind erosion equation 1 [J]. Soil Science Society of America Journal, 1965, 29(5): 602.
- [7] Fryrear F D, Bibro J D, Saleh A, et al. RWEQ: improved wind erosion technology [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2000, 55(2): 183-189.
- [8] 王世国. 武威市水土流失现状及治理对策措施[J]. 甘肃水利水电技术, 2020, 56(6): 62-65.  
Wang Shiguo. Present situation of soil erosion in Wuwei city and its control countermeasures [J]. Gansu Water Resources and Hydropower Technology, 2020, 56(6): 62-65.
- [9] 袁春霞, 颀耀文, 史建尧. RS 与 GIS 支持下的土壤侵蚀自动判别模型: 以武威市凉州区为例[J]. 华中师范大学学报(自然科学版), 2008, 42(4): 665-669.  
Yuan Chunxia, Xie Yaowen, Shi Jianyao. An automatic discriminating model of soil erosion using Remote Sensing and GIS methods: A case study in Liangzhou district in Wuwei city [J]. Journal of Huazhong Normal University (Natural Sciences Edition), 2008, 42(4): 665-669.
- [10] Fryrear D W, Chen W N, Lester C. Revised Wind Erosion Equation [J]. Annals of Arid Zone, 2001, 40(3): 265-279.
- [11] 王丽霞, 钟旭珍, 刘招, 等. 关中一天水经济区生态环境功能分区研究[J]. 环境污染与防治, 2018, 40(7): 843-848.  
Wang Lixia, Zhong Xuzhen, Liu Zhao, et al. Study on the ecological environment function regionalization of Guanzhong-Tianshui economic region [J]. Environmental Pollution & Control, 2018, 40(7): 843-848.
- [12] 王丽霞, 任朝霞, 任志远, 等. 基于生态功能分区的陕北延河流域旱地系统生态需水测评[J]. 农业工程学报, 2012, 28(6): 156-161.  
Wang Lixia, Ren Zhaoxia, Ren Zhiyuan, et al. Evaluation to ecological water requirement of dry land system based on ecological function zones in Yanhe watershed [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(6): 156-161.
- [13] 李鲁群, 邓敏, 刘冰, 等. GIS 中空间数据叠置分析的优化算法设计[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2002, 21(2): 62-64.  
Li Luqun, Deng Min, Liu Bing, et al. Design of an optimal algorithm of realizing spatial overlap analysis within GIS [J]. Journal of Shandong Instof Min & Tech, 2002, 21(2): 62-64.
- [14] 水利部水土保持司. 土壤侵蚀分类分级标准: SL 190—2007 [S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2008.  
Ministry of Water Resources Department of Soil and Water Conservation. Standards for classification and gradation of soil erosion: SL 190—2007 [S]. Beijing: China Water & Power Press, 2008.

- tion, 2018, 25(4):98-103.
- [16] 徐英德, 裴久渤, 李双异, 等. 东北黑土地不同类型区主要特征及保护利用对策[J]. 土壤通报, 2023, 54(2): 495-504.  
Xu Yingde, Pei Jiubo, Li Shuangyi, et al. Main characteristics and utilization countermeasures for black soils in different regions of Northeast China [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2023, 54(2):495-504.
- [17] 巩杰, 柳冬青, 高秉丽, 等. 西部山区流域生态系统服务权衡与协同关系: 以甘肃白龙江流域为例[J]. 应用生态学报, 2020, 31(4):1278-1288.  
Gong Jie, Liu Dongqing, Gao Bingli, et al. Tradeoffs and synergies of ecosystem services in western mountainous China: A case study of the Bailongjiang watershed in Gansu, China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020, 31(4):1278-1288.
- [18] 章文波, 付金生. 不同类型雨量资料估算降雨侵蚀力[J]. 资源科学, 2003, 25(1):35-41.  
Zhang Wenbo, Fu Jinsheng. Rainfall erosivity estimation under different rainfall amount [J]. Resources Science, 2003, 25(1):35-41.
- [19] 魏健美, 李常斌, 武磊, 等. 基于 USLE 的甘南川西北土壤侵蚀研究[J]. 水土保持学报, 2021, 35(2):31-37.  
Wei Jianmei, Li Changbin, Wu Lei, et al. Study on soil erosion in Northwestern Sichuan and Southern Gansu (NSSG) based on USLE [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35(2):31-37.
- [20] 高青峰, 郭胜, 宋思铭, 等. 基于 RUSLE 模型的区域土壤侵蚀定量估算及空间特征研究[J]. 水利水电技术, 2018, 49(6):214-223.  
Gao Qingfeng, Guo Sheng, Song Siming, et al. RUSLE model-based quantitative estimation and spatial characteristics study on regional soil erosion [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2018, 49(6): 214-223.
- [21] 蔡崇法, 丁树文, 史志华, 等. 应用 USLE 模型与地理信息系统 IDRISI 预测小流域土壤侵蚀量的研究[J]. 水土保持学报, 2000, 14(2):19-24.  
Cai Chongfa, Ding Shuwen, Shi Zhihua, et al. Study of applying USLE and geographical information system IDRISI to predict soil erosion in small watershed [J]. Journal of Soil Water Conservation, 2000, 14(2): 19-24.
- [22] 彭建, 杨畅, 谢盼, 等. 基于生态系统服务供需的广东省绿地生态网络建设分区[J]. 生态学报, 2017, 37(13): 4562-4572.  
Peng Jian, Yang Yang, Xie Pan, et al. Zoning for the construction of green space ecological networks in Guangdong Province based on the supply and demand of ecosystem services [J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(13):4562-4572.
- [23] 谢余初, 张素欣, 林冰, 等. 基于生态系统服务供需关系的广西县域国土生态修复空间分区[J]. 自然资源学报, 2020, 35(1):217-229.  
Xie Yuchu, Zhang Suxin, Lin Bing, et al. Spatial zoning for land ecological consolidation in Guangxi based on the ecosystem services supply and demand [J]. Journal of Natural Resources, 2020, 35(1):217-229.
- 
- (上接第 180 页)
- [15] 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.  
Jiang Ling, Xiao Yi, Ouyang Zhiyun, et al. Estimate of the wind erosion modules in Qinghai Province based on RWEQ model [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2015, 22(1):21-25.
- [16] Wang Wei, Samat A, Ge Yongxiao, et al. Quantitative soil wind erosion potential mapping for central Asia using the google earth engine platform [J]. Remote Sensing, 2020, 12(20):3430.
- [17] 曹月娥, 吴芳芳, 张婷婷, 等. 基于风蚀模型的准东地区土壤风蚀研究[J]. 干旱区资源与环境, 2018, 32(3): 94-99.  
Cao Yuee, Wu Fangfang, Zhang Tingting, et al. Research and application of wind erosion model in Zhundong area [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2018, 32(3):94-99.
- [18] Chi Wenfeng, Zhao Yuanyuan, Kuang Wenhui, et al. Impacts of anthropogenic land use/cover changes on soil wind erosion in China [J]. Science of the Total Environment, 2019, 668:204-215.