

基于无人机摄影测量的平陆运河弃土场 水土流失综合防控研究

莫仁斌¹, 段向锋¹, 莫桂柏¹, 黄玉莉¹,
韦帆泽¹, 容清标², 廖煜亮², 黄钰涵²

(1. 广西壮族自治区自然资源生态修复中心, 广西南宁 530028;
2. 广西大学林学院广西森林生态与保育重点实验室, 广西南宁 530004)

摘要: [目的] 评估平陆运河的弃土场在不同时期的土壤侵蚀量, 并模拟其水土流失倾向, 探讨坡度与侵蚀强度关系, 为运河类线性工程弃土场水土流失综合防控提供科学参考。[方法] 以广西平陆运河的 4 个弃土场为例, 利用无人机低空正摄技术获取弃土场不同时期的高分辨率影像与地形数据; 利用 GIS 技术分析弃土场的水土流失倾向; 结合修正的通用土壤流失方程(RUSLE)对各侵蚀因子进行了量化和估算。[结果] ① 4 个弃土场不同时期的土壤侵蚀模数的范围为 1 977.55~5 748.96 t/(km²·a), 其中侵蚀强度从轻度到强度侵蚀。② 土壤侵蚀模数随着坡度的增大而增大, 特别是在坡度为 8°~25°的区域, 土壤侵蚀量占总侵蚀量的 76.8%~86.4%。③ 在丘间谷地型弃土场, 涓流主要沿着边缘地势较高的区域流向低洼地带; 在边坡型弃土场, 涓流则集中在堆土区域的上坡部分, 流向坡底。[结论] 坡度对弃土场的土壤侵蚀有显著影响, 8°~25°的坡度区域是水土流失防治的重点区域。对于丘间谷地型弃土场, 削坡和布设外侧排水设施是有效防治措施; 边坡型弃土场则应加强坡底排水和沉沙池的建设。此外, 植被覆盖是防治水土流失的关键因子, 尤其在水热条件良好的地区, 植被覆盖对降低土壤侵蚀风险的作用更为显著。

关键词: 土壤侵蚀; RUSLE 模型; 无人机技术; GIS; 弃土场

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2025)03-0119-10

中图分类号: S157.1

文献参数: 莫仁斌, 段向锋, 莫桂柏, 等. 基于无人机摄影测量的平陆运河弃土场水土流失综合防控研究[J]. 水土保持通报, 2025, 45(3): 119-128. Mo Renbin, Duan Xiangfeng, Mo Guibai, et al. Comprehensive prevention and control of soil and water loss in Pinglu Canal spoil ground based on UAV photography measurement [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025, 45(3): 119-128. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2025.03.020; CSTR: 32312.14.stbctb.2025.03.020.

Comprehensive prevention and control of soil and water loss in Pinglu Canal spoil ground based on UAV photography measurement

Mo Renbin¹, Duan Xiangfeng¹, Mo Guibai¹, Huang Yuli¹,
Wei Fanze¹, Rong Qingbiao², Liao Yuliang², Huang Yuhang²

(1. Natural Resources Ecological Restoration Center of Guangxi Zhuang

Autonomous Region, Nanning, Guangxi 530029, China; 2. Guangxi Key Laboratory of

Forest Ecology and Conservation, College of Forestry, Guangxi University, Nanning, Guangxi 530004, China)

Abstract: [Objective] The amount of soil erosion at the spoil ground of the Pinglu Canal linear project at different periods was evaluated, and the erosion tendency was simulated. The relationship between the slope and erosion intensity was explored to provide a scientific reference for soil erosion control in spoil grounds for canal project. [Methods] Four spoil grounds in the Pinglu Canal of the Guangxi Zhuang Autonomous Region were selected as examples. High-resolution photographic and topographic data of the spoil grounds during different periods were obtained using UAV low-altitude photography technology. The soil erosion tendency of the spoil grounds was analyzed using GIS technology. Erosion factors were quantified and estimated by combining with the revised universal soil loss equation (RUSLE). [Results] ① The soil erosion modulus of the four spoil grounds across

different period points ranged from 1 977.55 to 5 748.96 t/(km² · a), with erosion intensity ranging from gentle to severe erosion. ② The soil erosion modulus increased with slope, especially in areas with slopes of 8° to 25°, where soil erosion accounted for 76.8% to 86.4% of the total erosion. ③ In the intermound valley spoil grounds, the trickle flow was mainly along the higher land areas at the edges of the lowland areas. In the sloped spoil grounds, trickle flows were concentrated in the upslope portions of the stockpile areas toward the bottom of the slopes. [Conclusion] This study shows that the slope was significant for soil erosion in spoil grounds, and a slope area of 8°—25° was the key area for soil erosion control. Cutting the slope and arranging external drainage facilities are effective control measures for intermound valley spoil grounds. For sloped spoil grounds, the construction of slope-bottom drainage and sand sedimentation ponds should be strengthened. In addition, vegetation cover is a key factor in the prevention soil erosion, especially in areas with favorable hydrothermal conditions where it was more effective in reducing the risk of soil erosion.

Keywords: soil erosion; RUSLE model; UAV technology; GIS; spoil ground

土壤侵蚀是指土壤及其母质在水力等外营力作用下,被破坏、分离、搬运和沉积的过程^[1]。土壤侵蚀会引起土壤结构降解、养分缺失,所形成的沉积物不仅会导致河床淤塞,造成洪涝灾害,携带着的污染物还会污染河流,对农业发展和人类安全造成严重威胁^[2]。土壤侵蚀是多因素共同作用的结果,其中包括降雨,地形因子,土壤特性,土地利用类型等^[3-5]。Wischmeier^[6]于1965年首次提出的通用水土流失方程(universal soil loss equation, USLE),20世纪90年代,科学家对该方程进行不断修改和调整,最终形成了修订后的通用土壤流失方程(revised universal soil loss equation, RUSLE),该模型综合考虑到降雨、土壤可蚀性、坡度坡长、植被覆盖和水土保持工程措施等因素对土壤流失的影响。廖洪圣等^[7]基于RUSLE土壤侵蚀评估模型,评估黄土丘陵区祖厉河流域土壤侵蚀的时空变化,指出流域土壤侵蚀强度以微度和轻度为主,降雨是影响土壤侵蚀的首要因素。Zerihun等^[8]结合GIS技术,利用RUSLE模型对埃塞俄比亚Dembacha区土壤侵蚀强度进行评估,指出大部分地区的土壤侵蚀强度为非常轻微(面积为24%)到轻微(49%),这与当地的地形主要为缓坡有关。RUSLE模型适用性较强,数据相对易于获取,精准度较高,同时无人机技术监测效率高,数据获取速度快,可到达监测人员难以前往的危险区域进行勘测,获取高分辨率影像与数字高程数据^[9-10]。二者结合GIS技术,能较全面表现出区域土壤侵蚀的变化规律,为土壤侵蚀防治工作提供理论依据。

弃土场土堆通常由于松散的土壤结构、陡峭的坡度、低植被覆盖、丰富的岩石碎片含量以及人为控制不佳,容易发生土壤侵蚀和土体滑坡等问题,因此其管理问题成为了热点。杨煜等^[11]通过研究不同降雨类型对弃土场稳定性的影响发现,降雨直接增加了弃土场土壤重度,并降低土壤基质吸力和抗剪强

度,导致土体失稳和严重水土流失。Zhang Letao^[12]通过在弃土场进行田间冲刷—侵蚀试验发现,径流冲刷是影响弃土场坡面产沙的主要因素,径流量越大,产沙量越高。弃土场丰富的石砾含量也会影响水土流失,Zi Ruyi等^[13]通过量化碎石在土壤侵蚀过程中的作用指出,土壤中的碎石能有效减少地表径流,使土壤流失率降低了41%,但是覆盖地表的碎石反而使表层土的流失率增加了3.64%。因此,需要快速准确估算弃土场的土壤侵蚀状况及分布格局,为后期的水土保持措施的布设提供科学参考。

平陆运河是连通西江航线与北部湾海港的重大交通项目,此线性工程预计共开挖土石方约3.29×10⁸ m³,沿线规划了多个土料弃土场。这使原有地形地貌和植被条件被严重破坏,土体抗蚀能力降低,若不进行科学合理的防护措施,将会造成严重的水土流失。同时线性工程时空跨度大,影响范围广,地形和气象条件复杂,给水土保持工作增加了许多困难,对工程水土流失的研究多数集中在项目建设前后期的对比,鲜有考虑工程施工期间的侵蚀状况。因此,本研究基于无人机正摄航拍技术获取弃土场多时期的地形数据,采用RUSLE模型对平陆运河工程不同时期不同类型弃土场土壤侵蚀量进行预测,利用ArcGIS Pro软件模拟弃土场的水土流失倾向,探究弃土场坡度与侵蚀强度的关系,为弃土场后期的生态修复和复垦工程施工提供科学参考。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

平陆运河工程涉及南宁横州市、钦州灵山县、钦北区和钦南区,始于南宁市平塘江口,经钦州灵山县沿钦江进入北部湾,全程约135 km。地貌特征为低山丘陵分布。多年平均气温21.6~21.7℃,多年平均降雨量1 304.2~1 943.0 mm,10年一遇1 h降雨量为

83.5~102.3 mm,雨季为4—9月,多年平均风速1.8~2.6 m/s。

该区域土壤类型以赤红壤、红壤为主,地带性植被以亚热带常绿阔叶林为主,项目区林草覆盖率约为39.22%。

1.2 弃土场设置

设置在丘间谷地的弃土场分别为2号(0.363 5 km²), 26号(0.815 8 km²)和76号(1.789 0 km²),为丘间谷地型弃土场(图1)。其填土区域为谷地,可以容纳大量土石。同时周围的丘陵限制了弃土的扩散,一定程

度上可以防止弃土的倒塌和流失。但丘间谷地型弃土场地势凹陷明显,小型坡面较多,道路和沟道较密集,降雨过程中极易形成涓流路径,土壤表面受到严重的雨水冲刷,造成大量水土流失。34号(0.198 5 km²)弃土场是沿着大型山体的自然边坡设置的,弃土是沿着边坡分层堆放,故一般形成的坡面较宽较长,坡度较大,而在坡脚处较为平缓。由于该弃土场处于山体边坡,降雨形成的涓流会直接冲刷弃土坡面,形成的侵蚀沟会随着时间的推移不断加宽加深,可能导致土体失稳和大量弃土流失。

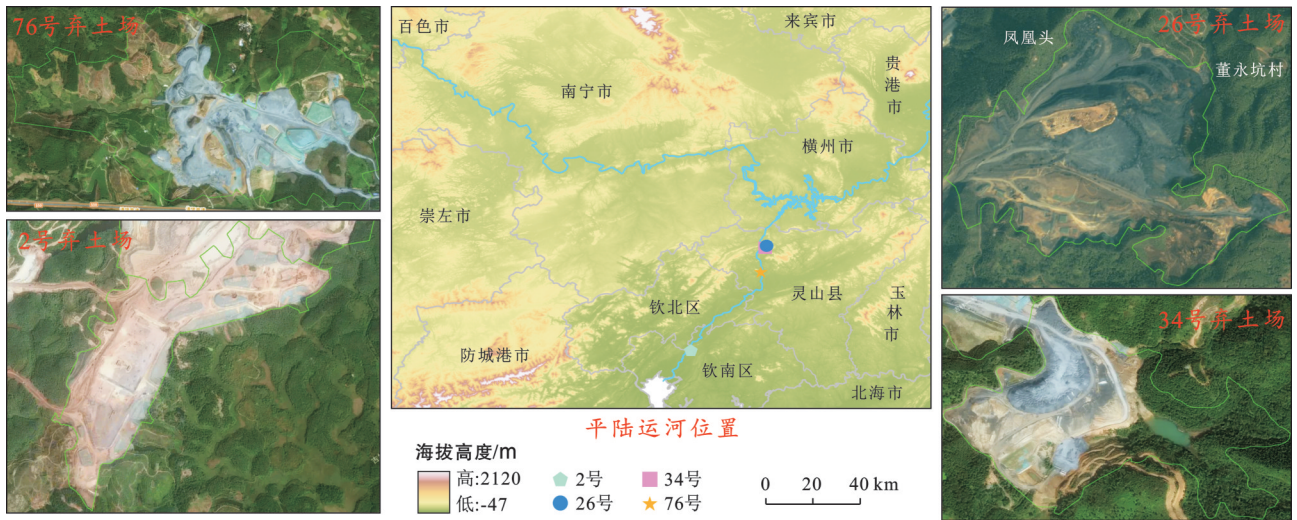


图1 平陆运河位置及弃土场卫星影像

Fig.1 Location of Pinglu Canal and satellite images of spoil grounds

1.3 研究数据来源

根据原地形地貌特征,本研究选取平陆运河建设过程中两种不同类型的弃土场,分别为丘间谷地型和边坡型,每个弃土场包含3个时期(第1个时期:弃土场原地形的自然状态;第2时期:施工初期,地表扰动显现;第3时期:施工中期,弃土场部分堆填完成)。所需数据包括:①弃土场的数字高程模型(DEM)数据:通过无人机(飞马智能航测系统E2000)正摄低空航拍的方法采集地形数据后,利用ArcGIS Pro软件的克里金法和掩膜提取后获取;②逐月降雨数据集:采用国家青藏高原科学数据中心,中国1 km分辨率逐月降水量数据集(1901—2023年)^[14];③土壤数据:基于世界土壤数据库(HWSD)数据集(v1.2)^[15];④植被覆盖度数据:数据来源于国家科技基础条件平台—国家地球系统科学数据中心(<http://www.geodata.cn>)。

1.4 水土流失倾向分析

水土流失倾向分析是根据弃土场不同地形,模拟出降雨过程中在土壤表面形成的涓流路径,反映雨水冲刷造成土壤侵蚀的严重程度,从而因地制宜,

为水土保持提供更加科学合理的建议。本研究利用ArcGIS Pro的水文工具(图2),模拟不同时期弃土场形成的涓流,并使用Strahler河网分级工具将涓流分为不同等级,最后与弃土场的高程图相叠加。在河网分级叠加地形高程图中,可以观察到弃土场不同时期的涓流等级和水土流失倾向,一级涓流汇聚为二级涓流,以此类推,最终停止于低洼区域或流出弃土场。

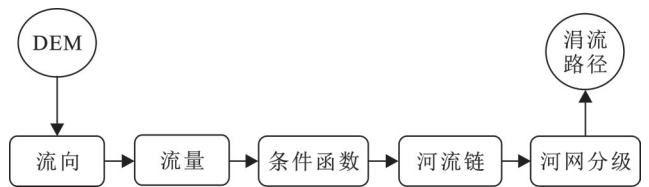


图2 水土流失倾向分析技术路线图

Fig.2 Technology roadmap of tendency analyses on soil and water loss

1.5 土壤侵蚀强度分级

土壤侵蚀分级标准采用中华人民共和国水利部颁布的《土壤侵蚀分类分级标准(SL 190—2007)》^[16],以弃土场年平均侵蚀模数为分级指标,具体分类标准详见表1。

表 1 土壤侵蚀强度分类分级标准(南方红壤丘陵区)

Table 1 Criteria for classification and grading of soil erosion intensity (for hilly red-soil region in south China)

土壤侵蚀强度	平均侵蚀模数/(t·km ⁻² ·a ⁻¹)	土壤侵蚀强度	平均侵蚀模数/(t·km ⁻² ·a ⁻¹)
轻微侵蚀	<500	强度侵蚀	5 000~8 000
轻度侵蚀	500~2 500	极强度侵蚀	8 000~15 000
中度侵蚀	2 500~5 000	剧烈侵蚀	>15 000

1.6 土壤侵蚀模型 RUSLE 模型

本研究采用修订后的通用土壤流失方程(RUSLE),利用 ArcGIS Pro 的栅格计算器工具,预测每个弃土场不同时期的土壤侵蚀状况和平均土壤侵蚀模数,计算公式为:

$$A = R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P \quad (1)$$

式中: A 为平均土壤侵蚀模数[t/(km²·a)]; R 为降雨侵蚀力因子[(MJ·mm)/(km²·a)]; K 为土壤可侵蚀因子[(t·km²·h)/(km²·MJ·a)]; L 为坡长坡度因子; C , P 分别为植被管理覆盖因子和水平保持措施因子。

(1) 降雨侵蚀力因子 R 。 R 因子一般采用研究区代表性站点,通过内插外延法和表面等值线法求算。

$$K = \left\{ 0.2 + \exp\left[-0.256S_{AN}(1.0 - S_{IL}/100)\right] \right\} \times \left\{ S_{IL}/(C_{LA} + S_{IL}) \right\}^{0.3} \times \left\{ 1.0 - 0.025C/[C + \exp(3.72 - 2.95)] \right\} \times \left\{ 1.0 - 0.7SN_1/[SN_1 + \exp(-5.51 + 22.9SN_1)] \right\} \quad (3)$$

式中: S_{AN} 为砂粒含量(%); S_{IL} 为粉粒含量(%); C_{LA} 为黏粒含量(%); C 为有机碳含量(%); $SN_1=1-SAN/100$ 。

(3) 坡长坡度因子 LS 。利用 ArcGIS 软件对 DEM 数据进行填注等一系列处理后,运用栅格计算器计算 LS 。坡长坡度因子 LS 的确定采用的计算方式^[18]:

$$L = \left(\frac{\lambda}{22.13} \right)^m \quad m = \begin{cases} 0.2 & (\theta < 0.5^\circ) \\ 0.3 & (0.5^\circ \leq \theta < 1.5^\circ) \\ 0.4 & (1.5^\circ \leq \theta < 3^\circ) \\ 0.4 & (\theta > 3^\circ) \end{cases} \quad (4)$$

式中: L 为坡长因子; λ 为坡长; m 为坡长指数, θ 为坡度(°)。

$$S = \begin{cases} 10.8\sin\theta + 0.03 & (\theta < 5.2^\circ) \\ 16.8\sin\theta - 0.5 & (5.2^\circ \leq \theta < 10.2^\circ) \\ 21.91\sin\theta - 0.96 & (\theta > 10.2^\circ) \end{cases} \quad (5)$$

式中: S 为坡度因子。

(4) 植被覆盖与管理因子 C 、水土保持措施因子 P 。植被覆盖与管理因子 C 、水土保持措施因子 P 是植被覆盖或采取工程措施后的水土流失量与裸土条件下土壤流失量的比值。弃土场原地形时期地形主要为丘间谷地和边坡林地,因此采用蔡崇法等^[19]的方法,确定 C 值,计算公式为:

本研究的区域面积小,故采用一个 R 值直接对 DEM 数据进行运算的方法,即 $R=8\ 144.721\text{ MJ}\cdot\text{mm}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$ 。 R 因子值的确定采用的计算公式:

$$R = 0.067p^{1.627} \quad (2)$$

式中: R 为多年平均降雨侵蚀力因子[(MJ·mm)/(km²·a)]; p 为多年平均降雨量(mm)。

(2) 土壤侵蚀力因子 K 。Williams 等的 EPIC 模型^[17]给出估算土壤侵蚀性因子的方法,只需要土壤颗粒组成和有机碳含量即可估算 K 值。弃土场土壤来源于附近施工地,机械挖取后由运土车搬移至弃土场堆放,故采用周围地区土壤颗粒组成和有机碳含量的平均值代表弃土场的值,即 $K=0.170$ 。 K 因子值的确定采用的计算公式为:

$$C = \begin{cases} 1 & (f=0) \\ 0.6508 - 0.3436\lg f & (0 < f \leq 78.3\%) \\ 0 & (f > 78.3\%) \end{cases} \quad (6)$$

式中: C 为植被覆盖与管理因子值; f 为植被覆盖度。本研究采用一个 C 值直接对原地形时期的 DEM 数据进行运算,即 $C=0.645$ 。根据前人^[20]的研究,林地的 P 值取 1。弃土场建设时期为裸土且假设无工程措施,故 C, P 取 1 值。

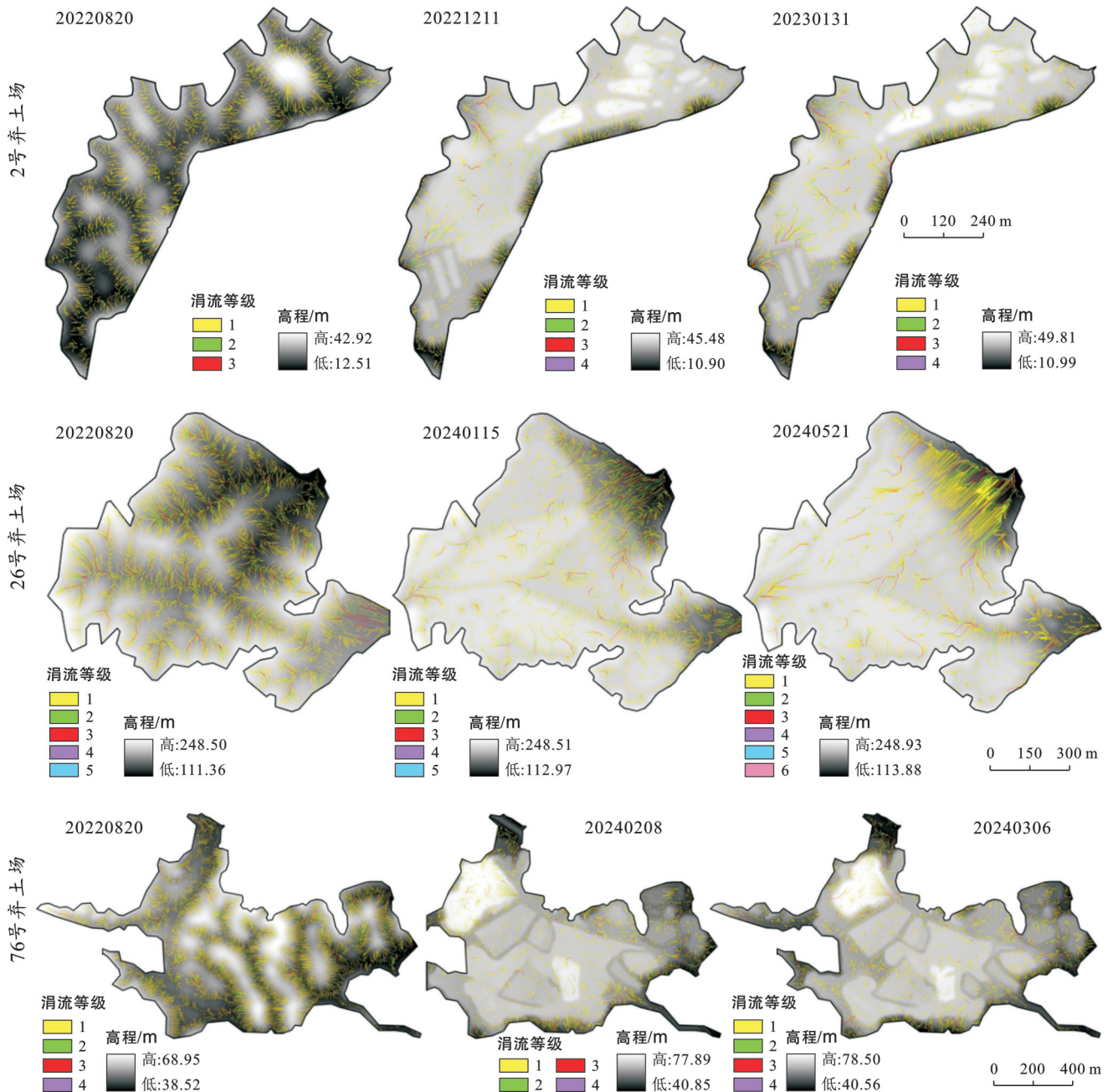
2 结果与分析

2.1 不同类型弃土场水土流失倾向分析

2.1.1 丘间谷地型弃土场水土流失倾向分析 通过 ArcGIS Pro 的水文工具,可以得出各弃土场不同时期的涓流路径。2号、26号和76号弃土场位于丘间谷地,此类型弃土场两侧地势高,形成的涓流汇聚流向谷地(图3)。3个弃土场在2022年08月20日监测日,涓流均在地势高的区域形成,流向低洼区域,分布较广。2号弃土场在2022年12月11日,2023年01月31日监测日与76号弃土场在2024年02月08日,2024年03月06日监测日,涓流主要形成于弃土场边坡堆高区域。26号弃土场在2024年01月15日,2024年05月21日监测日,涓流主要形成于东北坡的堆高区域,汇聚最高可达6级的水流。其东南区域则形成

低洼区域,导致涓流汇聚,最终形成 4 级细流。
 2.1.2 边坡型弃土场水土流失倾向分析 在 2022 年 8 月 20 日的监测中,34 号弃土场的涓流主要形成于地势较高区域,汇聚后流向中间区域(图 4)。同时,边坡区域也形成了较多涓流,沿着坡面汇聚并流出

弃土场。到 2023 年 5 月 21 日,涓流数量相对较少;而 2023 年 10 月 30 日,涓流数量明显增加,主要形成于弃土场北部和中间的堆高区域。2024 年 1 月 15 日的监测显示,大多数涓流形成于北坡的堆高区域,并沿着坡面流向南坡的低洼区域。



注:图中 76 号弃土场 20240208 图幅左侧部分区域受飞行计划及地形遮挡影响未采集到其高程信息。

图 3 丘间谷地型弃土场各时期河网分级叠加高程

Fig.3 Superimposed elevation of river network grades at valley spoil grounds in different periods of inter-mound

2.2 不同时期弃土场侵蚀强度变化

通过 RUSLE 模型计算出各弃土场不同监测日的土壤侵蚀模数,根据《土壤侵蚀分类分级标准》得出各弃土场各监测日的土壤侵蚀等级(表 2)。2 号弃土场在不同监测日内主要以微度侵蚀为主,侵蚀强

度较低。在 2022 年 8 月 20 日监测日,2 号弃土场年平均侵蚀模数分别为 2022 年 12 月 11 日和 2023 年 1 月 13 日监测日的 1.55 和 1.57 倍。随着时间的推移,2 号弃土场微度侵蚀和轻度侵蚀的面积比例增大,年平均侵蚀模数随之下降。26 号弃土场在 2022 年 8 月 20

日的监测显示土壤侵蚀严重,强烈侵蚀及以上侵蚀强度的面积比例高达 27.88%;2024 年 1 月 15 日监测日的弃土场微度侵蚀面积比例增大,达到 51.61%;但在 2024 年 5 月 21 日监测日,轻度侵蚀比例下降(31.70%),年平均土壤侵蚀模数增大。34 号弃土场在 2022 年 8 月 20 日的监测中,微度侵蚀面积比例高达 59.50%;在 2023 年 5 月 21 日监测日,中度侵蚀、强烈侵蚀和极强烈侵蚀面积比例增大(52.91%),年平

均土壤侵蚀模数增加,约为 2022 年 8 月 20 日监测日年平均土壤侵蚀模数的 2.46 倍;微度侵蚀面积在 2023 年 10 月 30 日的监测中有所增加,但剧烈侵蚀区域也增大,年平均土壤侵蚀模数较高;在 2024 年 1 月 15 日的监测中,剧烈侵蚀区域面积比例及年平均土壤侵蚀模数均显著下降。76 号弃土场在 3 个监测日的年平均土壤侵蚀模数差异不大,都是以轻度侵蚀为主,其比例都超过 50%。

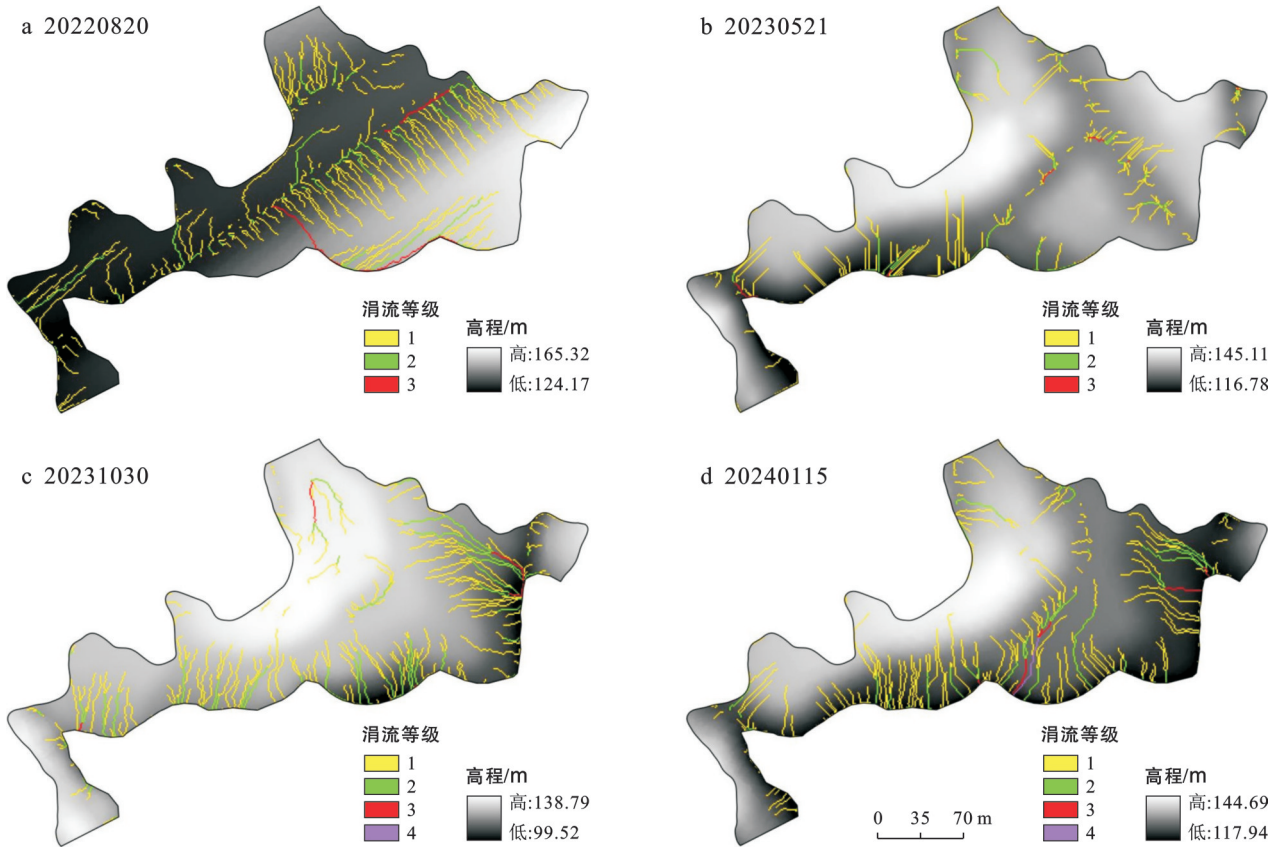


图 4 边坡型弃土场(34号)各时期河网分级叠加高程

Fig.4 Superimposed elevation of river network grades at sloped spoil ground (number 34) in different periods

2.3 土壤侵蚀模数与坡度的关系

本研究聚焦于弃土场的水土流失问题,探究弃土场坡度与土壤侵蚀的关系。由于篇幅限制,选取各弃土场最新的监测数据,代表弃土场当前阶段的侵蚀状况,旨在通过分析现状数据,探索坡度与土壤侵蚀之间的关系。本研究按照《土壤侵蚀分类分级标准(SL 190—2007)》^[16],将弃土场坡度分为 $0^{\circ}\sim 5^{\circ}$, $5^{\circ}\sim 8^{\circ}$, $8^{\circ}\sim 15^{\circ}$, $15^{\circ}\sim 25^{\circ}$, $25^{\circ}\sim 35^{\circ}$, $>35^{\circ}$ 共 6 个等级,统计不同坡度等级下土壤侵蚀量以及各侵蚀强度的面积比例(图 5),以反映不同坡度对土壤侵蚀强度的影响。不同坡度等级下的土壤侵蚀量差异较大,随着坡度的增加,弃土场的土壤侵蚀量呈现先增大后下降的趋势,侵蚀量主要集中在 $8^{\circ}\sim 25^{\circ}$ 区域。各弃土场不同侵蚀强度的土壤侵蚀量在各坡度级别比例

差异较大,随着坡度的增加,微度侵蚀的面积比例逐渐减小,轻度侵蚀和中度侵蚀在各坡度级别的面积比例呈先上升后下降的趋势,强烈侵蚀、极强烈侵蚀和剧烈侵蚀的比例逐渐增大。

3 讨论

本文采用 RUSLE 模型,对广西平陆运河工程的 4 个弃土场在不同填土时间下的土壤侵蚀强度进行评估。弃土场堆积过程几乎没有植被覆盖,土壤直接暴露,侵蚀风险较高。卓慕宁等^[21]曾利用类比法对高速公路弃土场的土壤侵蚀进行估算,得出的土壤侵蚀模数为 $3.24\times 10^4\text{ t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$,表明该区域的侵蚀强度已达到剧烈侵蚀程度。本文利用 RUSLE 模型估算各弃土场的土壤侵蚀模数介于 $2\ 122.3\sim 5\ 740.6\text{ t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$,

侵蚀强度范围在轻度—强度之间,处于合理范围内,与区域内相似地形和气候条件下的预期侵蚀强度相符,表明利用RUSLE模型估算弃土场土壤侵蚀总体结果较可靠。对比动工时期各弃土场的土壤侵蚀模数,26、34号弃土场土壤侵蚀模数分别是2号场的2.39,2.07,2.57倍,76号的土壤侵蚀模数与2号相近。可能是2、76号弃土场在各时期的坡度较小,进一步表明弃土场坡度的差异影响土壤侵蚀模数。王猛等^[22]在研究西南地区侵蚀强度的分布格局表明,坡度对侵蚀起主导作用,定量归因在39.17%~78.34%。前人^[7]研究表明,坡度与土壤侵蚀呈正相关关系,这与本研究在平陆运河弃土场中的研究结果一致,进一步证实了坡度在侵蚀过程中的关键作

用。表明随着施工的进行和土方堆积的完成,由于堆土的压实和坡度的降低,弃土场土壤侵蚀模数随施工进程逐渐减小的原因。从弃土场的各侵蚀强度面积比例来看,微度侵蚀的比例均最高,但弃土场存在局部土壤侵蚀严重现象。由于弃土场的坡度分布不均匀,土壤侵蚀主要发生在弃土场坡度范围为8°~25°的区域,该区域侵蚀量占总侵蚀量的76.8%~86.4%。陈思旭等^[20]利用RUSLE模型研究南方丘陵山区的土壤侵蚀,发现15°~25°坡度区域的侵蚀较为严重,这与本研究结果相似。综上所述,RUSLE模型有效评估弃土场土壤侵蚀,坡度是影响侵蚀强度的关键因素;8°~25°的坡度区域是边坡型和丘间谷地型弃土场土壤侵蚀防治的重点区域。

表2 弃土场各时期侵蚀强度面积比例及年平均侵蚀模数的变化
Table 2 Change in area proportion of erosion intensity and annual average erosion modulus at spoil grounds in each period

弃土场	监测时间	面积比例/%						年平均侵蚀模数/ (t·km ⁻² ·a ⁻¹)	侵蚀强度
		微度侵蚀	轻度侵蚀	中度侵蚀	强烈侵蚀	极强烈侵蚀	剧烈侵蚀		
2号	20220820	53.07	18.37	11.21	6.77	6.42	4.17	3 342.43	中度侵蚀
	20221211	62.89	19.38	7.98	3.89	3.13	2.74	2 157.44	轻度侵蚀
	20230113	62.35	20.30	7.28	3.75	3.36	2.94	2 122.30	轻度侵蚀
26号	20220820	35.92	21.03	15.16	9.15	9.71	9.02	5 532.77	强度侵蚀
	20240115	51.61	19.24	10.18	6.11	6.44	6.41	4 478.60	中度侵蚀
	20240521	31.70	22.49	12.96	11.53	13.24	8.08	5 748.96	强度侵蚀
34号	20220820	59.50	22.87	7.44	3.85	3.77	2.57	1 879.85	轻度侵蚀
	20230521	18.94	28.14	20.38	13.46	14.25	4.82	4 618.50	中度侵蚀
	20231031	39.94	22.27	13.67	7.86	8.57	7.69	4 666.18	中度侵蚀
	20240115	36.87	24.61	14.36	8.64	9.16	6.35	3 988.06	中度侵蚀
76号	20220820	55.82	23.62	9.48	4.67	4.42	1.98	1 977.55	轻度侵蚀
	20240208	59.97	21.16	7.77	4.48	4.08	2.54	2 215.73	轻度侵蚀
	20240306	63.90	18.93	7.13	3.71	3.67	2.67	2 151.75	轻度侵蚀

弃土场实施水土保持工程是遏制水土流失的关键手段之一。研究^[23]表明,排水沟、挡土墙等水土保持工程措施是减少生产建设项目水土流失的有效方法,它们可以迅速发挥作用,有效控制水流并减轻侵蚀。基于水土流失倾向分析结果,丘间谷地型弃土场(2号、26号和76号),弃土将谷地全部掩埋或部分填埋,四周边坡陡峭,降雨时雨水由内向外形成涓流(图3)。径流冲刷是导致弃土场水土流失的主要因素之一^[24]。此类型弃土场宜采用半挖半填的方式削坡,以挖深1/2为界,上部土方回填下部,逐层夯实以减小坡度坡长和水土流失。同时,上部坡肩设挡水埂与外侧截流排水沟,引导水流至两侧并顺坡排出,

减轻径流侵蚀。边坡型弃土场(34号)的堆高平台地势较平坦,坡度集中于边坡区域,涓流主要在北坡形成,流向中间低洼区域。此类弃土场应在坡底及各级坡脚设排水沟,引导降雨径流入自然沟道或排水系统,并设沉砂池拦沙^[25]。同时,设置浆砌石、草袋等护坡工程,增强稳定性,降低水土流失风险。此外,在各弃土场的堆高平台,均发现有车辆经过压出的多处车辙,如果不及时填平随着降雨侵蚀,车辙会加深形成侵蚀沟,造成严重的水土流失^[26]。因此,针对不同类型弃土场,应采取适宜的水土保持措施,丘间谷地型弃土场应侧重削坡,并在外侧设排水沟;边坡型弃土场应侧重在坡底设排水措施以及沉砂池。

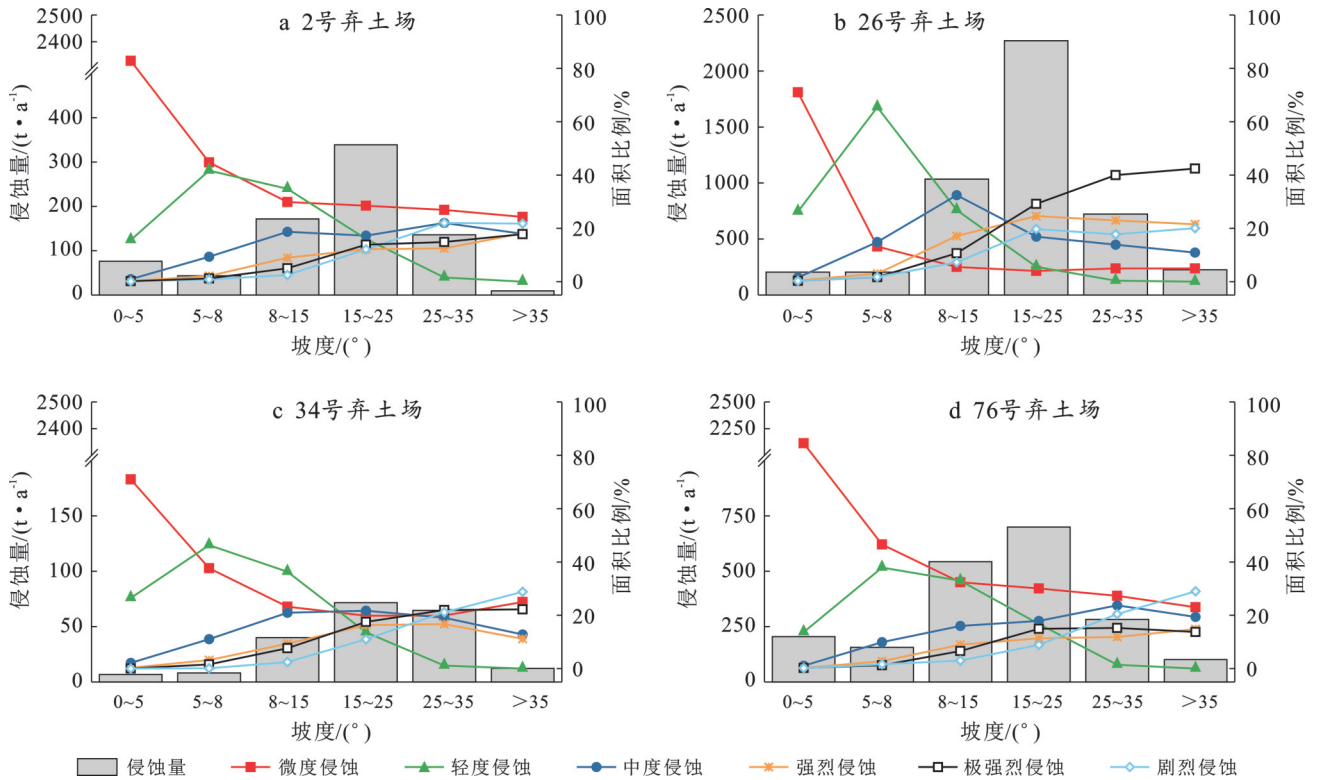


图 5 各弃土场不同坡度下不同土壤侵蚀等级面积百分比和年侵蚀量
 Fig.5 Percentage of area in different soil erosion grades and annual erosion amount under different slopes in each spoil ground

弃土场土壤侵蚀模数较高的原因之一是施工过程中植被覆盖较少,且防尘网苫盖的风化破损严重,导致大部分地表土壤直接暴露在降雨和径流作用下,显著提升了侵蚀风险(图6)。朱锐鹏等^[27]研究黄土丘陵沟壑区不同土地利用类型下的水土流失,发现裸地的土壤侵蚀量显著高于草地和林地,这与本研究对弃土场裸露土壤的侵蚀结果一致。植被在水土保持中起到关键作用,减少土壤侵蚀的原因主要有两个方面:①植被冠层和枯落物层能够有效截留降雨,减少雨滴对裸露土壤的直接冲击,延缓地表径

流的形成^[27];②植被根系通过固着土壤颗粒,增强土壤的抗剪强度,同时增加土壤的渗透性,从而减少土壤侵蚀^[28]。因此,植被对抑制水土流失至关重要。弃土场施工后需及时绿化,包括撒草籽、植灌木等,并养护管理,确保植被快速发挥水土保持效益^[29-30]。因此,植被覆盖是抑制弃土场水土流失的关键,及时绿化比防尘网覆盖更能有效降低侵蚀风险。此外,不同植被及覆盖度对水土保持效果差异显著^[27]。应根据弃土场地形气候选择植被,结合工程措施,促进生态恢复,增强水土保持效果^[31]。



图 6 植被覆盖低及苫盖破损后水土流失状况 (26号弃土场)

Fig.6 Soil erosion condition after low vegetation cover and breakage of dust netting thatch (number 26 spoil ground)

RUSLE模型因结构简单、数据需求少而广泛应用于水土流失评估,能快速估算和分析研究区域各侵蚀因子。然而,RUSLE模型因子计算中,参数数据精度差异导致ArcGIS Pro栅格计算难以避免误差,限制了该模型在小范围土壤侵蚀评估中的应用精度。本研究中,由于弃土场面积较小,区域内的降雨数据、土壤性质和植被覆盖数据难以精确到弃土场尺度,故土壤侵蚀模数估算主要依赖于坡度坡长因子,显著降低模型的精度。因此导致部分弃土场在施工前的土壤侵蚀模数略大于施工后的侵蚀模数。在未来的研究中,应考虑改进模型的部分参数设定,尤其是针对弃土场的具体条件,如土壤性质和降雨特性,进行更高精度的数据采集。此外,可以通过建设径流小区等科研设施,监测和收集弃土场的实地水土流失数据,从而使评估结果更加科学和可靠。

4 结论

(1) 4个弃土场不同时期的土壤侵蚀模数范围为1 977.55~5 748.96 t/(km²·a),RUSLE模型能有效评估弃土场土壤侵蚀;坡度是影响侵蚀强度的关键因素,8°~25°的坡度区域是边坡型和丘间谷地型弃土场土壤侵蚀防治的重点区域,占总侵蚀量的76.8%~86.4%。

(2) 根据不同类型弃土场的特点,应采取针对性的水土保持措施。丘间谷地型弃土场应侧重削坡,并在外侧布置排水措施,减少水流积聚;边坡型弃土场应侧重在坡底设排水措施以及沉砂池,减少水土流失。植被覆盖是抑制弃土场水土流失的关键,比防尘网苫盖更能有效降低侵蚀风险。尽管本研究通过无人机技术获取高分辨率数据,但由于土壤侵蚀因子的精确测量仍面临一定困难,未来的研究应进一步改进模型参数设定,并加强实地数据的收集,以提高评估精度。

参考文献(References)

- [1] 史志华,刘前进,张含玉,等.近十年土壤侵蚀与水土保持研究进展与展望[J].土壤学报,2020,57(5):1117-1127.
Shi Zhihua, Liu Qianjin, Zhang Hanyu, et al. Study on soil erosion and conservation in the past 10 years: Progress and prospects [J]. Acta Pedologica Sinica, 2020, 57(5):1117-1127.
- [2] 孙波,张桃林,赵其国.我国东南丘陵山区土壤肥力的综合评价[J].土壤学报,1995,32(4):362-369.
Sun Bo, Zhang Taolin, Zhao Qiguo. Comprehensive evaluation of soil fertility in the hilly and mountainous region of southeastern China [J]. Acta Pedologica Sinica, 1995, 32(4):362-369.
- [3] Cao Zhen, Chen Guohui, Zhang Song, et al. An assessment of soil loss by water erosion in no-tillage and mulching, China [J]. Water, 2023, 15(15):2821.
- [4] 许月卿,冯艳,周东,等.贵州省猫跳河流域土壤侵蚀动态变化分析[J].水土保持通报,2011,31(1):186-190.
Xu Yueqing, Feng Yan, Zhou Dong, et al. Soil erosion dynamics in Maotiao River watershed of Guizhou Province [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2011, 31(1):186-190.
- [5] 甄子云,赵洋,姜群鸥,等.野外模拟降雨条件下高寒草甸区植被退化和人工植被恢复坡面的产流产沙过程[J].水土保持学报,2024,38(4):153-161.
Zhen Ziyun, Zhao Yang, Jiang Qunou, et al. Field simulation of runoff and sand production on degraded and revegetated slopes in alpine meadows under rainfall conditions [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(4):153-161.
- [6] Wischmeier W H, Smith Donald D. Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning [C]. United States. Dept. of Agriculture. Agriculture handbook (USA), 1978.
- [7] 廖洪圣,卫伟,石宇.黄土丘陵区典型流域土壤侵蚀时空演变特征及其驱动机制:以祖厉河为例[J].生态环境学报,2024,33(6):908-918.
Liao Hongsheng, Wei Wei, Shi Yu. Characteristics of spatial and temporal evolution of soil erosion in typical watersheds in loess hilly areas and its driving mechanisms: A case study of Zuli River [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2024, 33(6):908-918.
- [8] Zerihun M, Mohammedyasin M S, Sewnet D, et al. Assessment of soil erosion using RUSLE, GIS and remote sensing in NW Ethiopia [J]. Geoderma Regional, 2018, 12:83-90.
- [9] 段兴博,苗正红,邱中军,等.无人机遥感技术在水土保持监测中的应用[J].模具制造,2024,24(2):142-144.
Duan Xingbo, Miao Zhenghong, Qiu Zhongjun, et al. Application of UAV remote sensing technology in water and soil conservation monitoring [J]. Die & Mould Manufacture, 2024, 24(2):142-144.
- [10] 习超,李开伟,文刚,等.无人机遥感技术在水土保持监测中的应用[J].中国水土保持,2023(6):66-68.
Xi Chao, Li Kaiwei, Wen Gang, et al. Application of UAV remote sensing technology in soil and water conservation monitoring of production and construction projects [J]. Soil and Water Conservation in China, 2023(6):66-68.
- [11] 杨煜,金宇轩,常森,等.不同降雨条件下对山区公路弃土场稳定性影响分析[J].公路工程,2023,48(5):85-90.

- Yang Yu, Jin Yuxuan, Chang Sen, et al. Stability analysis of spoil ground in mountain highway under different rainfall conditions into account [J]. *Highway Engineering*, 2023, 48(5):85-90.
- [12] Zhang Letao, Gao Zhaoliang, Yang Shiwei, et al. Dynamic processes of soil erosion by runoff on engineered landforms derived from expressway construction: A case study of typical steep spoil heap [J]. *Catena*, 2015, 128:108-121.
- [13] Zi Ruyi, Han Zhen, Chen Tingsheng, et al. Quantifying the effects of rock fragments embedding *vs.* covering on soil erosion in karst sloping cropland [J]. *Catena*, 2024, 244:108234.
- [14] 彭守璋. 中国 1 km 分辨率逐月降水量数据集(1901—2023)[DB/OL]. 北京: 国家生态科学数据中心, 2023. Peng Shouzhang. 1-km monthly precipitation dataset for China (1901—2023)[DB/OL]. National Environment Science Data Center, 2023.
- [15] Fischer, Georg, Nachtergaele, Frank, Prieler, et al. Global agro-ecological zones assessment for agriculture (GAEZ 2008) [R]. Laxenburg, Austria: IIASA; Rome, Italy: FAO, 2008.
- [16] 中华人民共和国生态环境部, 土壤侵蚀分类分级标准: GB/T 35666—2017 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2017. Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. Soil erosion classification and grading standard: GB/T 35666—2017 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2017.
- [17] Sharpley A, Williams J R. EPIC-erosion/productivity impact calculator: 1. Model documentation [R]. US: Department of Agriculture, Agricultural Reserch Sevice, 1990.
- [18] Liu B Y, Nearing M A, Risse L M. Slope gradient effects on soil loss for steep slopes [J]. *Transactions of the ASAE*, 1994, 37(6):1835-1840.
- [19] 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.
- [20] 陈思旭, 杨小唤, 肖林林, 等. 基于 RUSLE 模型的南方丘陵山区土壤侵蚀研究 [J]. *资源科学*, 2014, 36(6):1288-1297. Chen Sixu, Yang Xiaohuan, Xiao Linlin, et al. Study of soil erosion in the southern hillside area of China based on RUSLE model [J]. *Resources Science*, 2014, 36(6):1288-1297.
- [21] 卓慕宁, 李定强, 郑煜基. 高速公路弃土场的水土流失监测及其生态治理 [J]. *水土保持通报*, 2007, 27(4):96-99. Zhuo Muning, Li Dingqiang, Zheng Yuji. Soil and water loss monitoring and its ecological control on spoil ground in expressway construction [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2007, 27(4):96-99.
- [22] 王猛, 王鹤松, 姜超, 等. 基于 RUSLE 和地理探测器模型的西南地区土壤侵蚀格局及定量归因 [J]. *应用基础与工程科学学报*, 2021, 29(6):1386-1402. Wang Meng, Wang Hesong, Jiang Chao, et al. Spatial soil erosion patterns and quantitative attribution analysis in southwestern China based on RUSLE and geo-detector model [J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2021, 29(6):1386-1402.
- [23] 程冬兵, 郑瑞维, 张平仓, 等. “排水保土”措施在生产建设项目水土保持中的应用 [J]. *人民长江*, 2023, 54(12):82-88. Cheng Dongbing, Zheng Ruiwei, Zhang Pingcang, et al. Measures of ‘drainage and soil conservation’ in soil and water conservation of production and construction projects [J]. *Yangtze River*, 2023, 54(12):82-88.
- [24] Lou Yongcai, Gao Zhaoliang, Sun Guanfang, et al. Runoff scouring experimental study of rill erosion of spoil tips [J]. *Catena*, 2022, 214:106249.
- [25] 周晔, 吴玉锋. 陇南土石山区高速公路工程弃渣场水土流失防治 [J]. *中国水土保持*, 2023(11):43-46. Zhou Ye, Wu Yufeng. Prevention and control of soil erosion and water loss in the waste disposal areas of highway projects in Longnan earth-rock mountainous areas [J]. *Soil and Water Conservation in China*, 2023(11):43-46.
- [26] Li Yong, Are K S, Qin Zhaohua, et al. Farmland size increase significantly accelerates road surface rill erosion and nutrient losses in southern subtropics of China [J]. *Soil and Tillage Research*, 2020, 204:104689.
- [27] 朱锐鹏, 刘殿君, 张世豪, 等. 黄土丘陵沟壑区不同土地利用类型水土流失效应 [J]. *水土保持研究*, 2022, 29(4):10-17. Zhu Ruipeng, Liu Dianjun, Zhang Shihao, et al. Characteristics of runoff and sediment yield in different land use types in hilly and gully region of the Loess Plateau [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2022, 29(4):10-17.
- [28] 许小明. 黄土丘陵区不同植被恢复方式的土壤生态水文效应 [D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2022. Xu Xiaoming. Soil eco-hydrological effects of different vegetation restoration patterns in the loess hilly region [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2022.