

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2024.06.017

任亚楠,李龙,张尚轩,等.砒砂岩泻溜侵蚀的坡向分异及其与气象因素的响应[J].水土保持学报,2024,38(6):44-53.

REN Yanan, LI Long, ZHANG Shangxuan, et al. Slope aspect differentiation of Pisha sandstone slide erosion and its response to meteorological factors[J].Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(6):44-53.

砒砂岩泻溜侵蚀的坡向分异及其与气象因素的响应

任亚楠¹, 李龙^{1,2}, 张尚轩¹, 张宇¹, 周星辰¹

(1.内蒙古农业大学沙漠治理学院,呼和浩特 010018;2.国家林业局荒漠生态系统保护与修复重点实验室,呼和浩特 010000)

摘要: [目的] 泻溜作为砒砂岩区典型的重力侵蚀方式,已成为沟道内重要的粗砂物质来源,严重威胁流域生态安全,明确该地区侵蚀机理对黄河流域生态保护和高质量发展战略具有重要意义。[方法] 以内蒙古砒砂岩沟坡系统为研究对象,基于野外定位监测,利用三维激光扫描技术,分析不同坡向下沟坡侵蚀界面微地形变化与侵蚀特征的时空变化规律及其与气象要素之间的响应关系。[结果] (1) 砒砂岩沟坡存在明显的泻溜侵蚀现象,且坡向分异较为明显。其中,阴坡平均侵蚀面积占研究区总面积的 43.11%,阳坡平均侵蚀面积占研究区总面积的 45.48%。阳坡的侵蚀强度大于阴坡,且地表粗糙度的变化幅度在阳坡更为明显。阴坡地表起伏度、地表切割度和高程变异系数的变化规律更具显著性,坡向是影响沟坡重力侵蚀的关键地形因素。(2) 沟坡后退速率与地表起伏度和地表切割度之间呈极显著正相关($p < 0.01$)。阴坡沟坡后退速率与微地形因子的拟合度优于阳坡, R^2 分别为 0.721 和 0.631,不同坡向微地形因子与沟坡后退速率的拟合度优于侵蚀面积与侵蚀量。(3) 在砒砂岩区 7—8 月期间,影响阴坡侵蚀的气象因子重要性依次为气温>降雨量>太阳辐射>相对湿度>风速,阳坡则表现为气温>相对湿度>风速>降雨量>太阳辐射。GAM 模型对侵蚀特征的坡向变异具有较好的解释能力。[结论] 研究结果可为砒砂岩区重力侵蚀机理研究和生态建设提供理论参考。

关键词: 泻溜; 砒砂岩区; 沟坡系统; 坡向

中图分类号:S157.1 文献标识码:A 文章编号:1009-2242-(2024)06-0044-10

Slope Aspect Differentiation of Pisha Sandstone Slide Erosion and Its Response to Meteorological Factors

REN Yanan¹, LI Long^{1,2}, ZHANG Shangxuan¹, ZHANG Yu¹, ZHOU Xingchen¹

(1.College of Desert Management, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China; 2. Key Laboratory of Desert Ecosystem Protection and Restoration, State Forestry Administration, Hohhot 010000, China)

Abstract: [Objective] As a typical mode of gravity erosion in the Pisha sandstone area, debris sliding has become a significant source of coarse sand material within gullies, seriously threatening the ecological security of the basin. Clarifying the erosion mechanisms in this region is of great importance for the ecological protection and high-quality development strategy of the Yellow River Basin. [Methods] Using the gully slope system in Inner Mongolia as the study area, field monitoring and three-dimensional laser scanning technology were employed to analyze the spatial and temporal changes in micro-topography and erosion characteristics of the erosion interface under different slope aspects. Additionally, the relationships between these changes and meteorological factors were investigated. [Results] (1) The Pisha sandstone gully slopes exhibited significant debris sliding erosion, with distinct slope aspect differentiation. The average erosion areas of the shady slope and the sunny slope accounted for 43.11% and 45.48% of the total study area, respectively. The erosion intensity on the sunny slope was greater than that on the shady slope, with the variation in surface roughness being more pronounced on the sunny slope. However, the variations in surface relief, surface dissection and

收稿日期:2024-06-12 修回日期:2024-07-26 录用日期:2024-08-08 网络首发日期(www.cnki.net):2024-11-25

资助项目:国家自然科学基金项目(42267049)

第一作者:任亚楠(2000—),女,在读硕士研究生,主要从事水土保持与荒漠化防治研究。E-mail:ryanan0929@163.com

通信作者:李龙(1989—),男,副教授,博士,主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail:lilongdhr@126.com

<http://stbxb.alljournal.com.cn>

elevation variation coefficient were more significant on the shady slope. Slope aspect was a critical topographic factor influencing gravity erosion on gully slopes. (2) There was a highly significant positive correlation ($p < 0.01$) between the retreat rate of gully slopes and surface relief and surface dissection. The correlation between the retreat rate of gully slopes and micro-topographic factors was better for shady slopes ($R^2 = 0.721$) compared to sunny slopes ($R^2 = 0.631$). The fitting effect of micro-topographic factors with gully slope retreat rate was superior to that with erosion area and erosion volume. (3) During the period from July to August in the Pisha sandstone area, the importance of meteorological factors affecting the erosion of the shaded slope was temperature > rainfall > solar radiation > relative humidity > wind speed. For the sunny slope, the order was temperature > relative humidity > wind speed > rainfall > solar radiation. The GAM model demonstrated a good explanatory ability for the slope aspect variation in erosion characteristics. [Conclusion] The results of this study provide a theoretical reference for the study of gravity erosion mechanisms and ecological construction in the Pisha Sandstone area.

Keywords: debris slide; Pisha sandstone; slope-gully system; aspect

Received: 2024-06-12

Revised: 2024-07-26

Accepted: 2024-08-08

Online(www.cnki.net): 2024-11-25

泻溜是砒砂岩区的一种重要的重力侵蚀类型^[1], 沟坡岩壁是泻溜的主要部位。在干湿循环、冷热交替、冻融风化等外营力的交替影响下, 岩土碎屑物质在重力作用下沿坡面下溜^[2-3], 持续向沟道输送泥沙, 成为砒砂岩区坡面产沙的重要途径之一^[4], 对区域的生态安全构成重大威胁。

国内外现有研究主要集中于崩塌、滑坡、滑塌等形式的大型重力侵蚀, 对于泻溜侵蚀的研究也仅集中于红土区与黄土区, 但在生态脆弱、侵蚀极其强烈的砒砂岩区, 泻溜的发育基本上不受到时间与空间限制, 砒砂岩分布的区域都有发生泻溜的潜在可能, 但由于泻溜发生速度快、频率高, 单次侵蚀量较小, 观测具有一定难度, 目前大多以定性研究为主, 如泻溜的分布特征^[5]、侵蚀规律^[6]、防治模式^[7]和影响因素^[8]等。早期对于重力侵蚀定量化的研究方法多以测针法、兜土法^[9]为主。近年来, 结合水动力学^[10]和模型试验等方法^[11]逐渐被采用, 利用无人机进行重力侵蚀量的计算^[12]也得到验证。随着技术的进步, 三维激光扫描仪技术因其高观测精度和对侵蚀动态过程的良好监测能力^[13-14], 已在土壤侵蚀研究中得到广泛应用。越来越多人已经关注到重力侵蚀对沟道产沙的重要影响, 并开展大量的研究工作, 但对砒砂岩区泻溜侵蚀的认识仍然有限。

地貌因素是影响沟坡泻溜的控制性因素^[15], 其中坡向对重力侵蚀的发生发展以及侵蚀规模存在一定差异^[16]。已有研究^[17]表明, 坡向与侵蚀面积和侵蚀量呈正相关, 但在不同地形条件下的影响存在差异^[18]。气象因素是影响侵蚀的直接因素, 不同地区影响侵蚀量的主要气象因子各不相同, 众多学者在河西地区^[19]、黄土高原地区^[20]、东北地区^[21]的研究也

表明, 侵蚀力的年际变化呈波动变化趋势。然而, 在侵蚀尤为强烈的砒砂岩区, 特别是在泻溜侵蚀量较大的7—8月, 不同坡向对泻溜时空异质性的影响及其与气象因素的关系目前还尚不明确。本研究以裸露砒砂岩区的沟坡系统为研究对象, 采用三维激光扫描技术对具有代表性的阴坡和阳坡进行连续监测, 旨在探讨不同坡向下泻溜侵蚀过程的变化规律, 揭示泻溜侵蚀过程与气象因素的响应关系, 为砒砂岩区重力侵蚀机理研究和生态建设提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于内蒙古鄂尔多斯市准格尔旗的鲍家沟流域(110°32′48″—110°35′13″E, 39°47′34″—39°46′27″N), 流域面积12.67 km²。研究区域属温带大陆性气候, 平均海拔1 200 m, 属于典型丘陵沟壑区, 光照资源丰富, 年日照时间3 100~3 200 h, 年日照天数超过70%, 年平均气温7.2℃, 平均无霜期135天。年平均降水量400 mm, 集中于夏季。砒砂岩区的主要矿物组成和化学成分见表1^[22]。植被属于温带干旱草原植被, 植物类型多以半灌木和多年生草本为主, 包括柠条锦鸡儿(*Caragana korshinskii*)、芨芨(*Artemisia giraldii*)、硬质早熟禾(*Poa sphondylodes*)和猪毛菜(*Salsola collina*)等。

1.2 试验设计

本研究于2023年7月13日至8月30日进行, 试验地点属于典型的裸露砒砂岩区, 在对比分析流域内不同发展阶段和不同规模的沟坡基本特征后, 综合考虑流域地形、地貌、岩性等自然环境特征, 选取10个具有典型代表性的阴坡和阳坡建立固定监测样地,

所选样地的平均坡度为 55° ,除坡向外具有较一致的地形和土壤条件。采用样绳从沟顶到沟底垂直于沟坡拉出 2 条样线,样线间距为 5 m,以样线为边界,在沟坡上建立宽为 5 m 的观测小区。观测小区底部设置有规格为 2.5 m(宽) \times 5.0 m(长)的坡底堆积物观测收集区,小区规格参考沟坡泻溜堆积物的最大堆积体积和历史堆积物所在位置,以便收集和观测泻溜堆积物。在观测小区建立前,将坡底堆积区所残留的历史堆积物清理干净,并在小区底部铺设防水布以便重新开展监测。

表 1 砭砂岩区主要矿物组成和化学成分

Table 1 Main mineral composition and chemical composition of the Pisha Sandstone area

矿物	矿物组成 平均含量/%	化学成分	化学成分 平均含量/%
石英	47.07	SiO ₂	64.73
钾长石	5.70	Al ₂ O ₃	10.06
斜长石	3.96	Fe ₂ O ₃	1.84
方解石	12.58	CaO	7.40
白云石	1.77	MgO	1.16
钙蒙脱石	18.23	K ₂ O	2.74
伊利石	3.27	Na ₂ O	1.38
高岭石	2.04	FeO	0.77

1.3 数据获取

为精确描述坡面微地貌特征,使用三维激光扫描仪对泻溜沟坡每 3 天进行 1 次扫描,共计 16 次。所用的设备为 RIEGL VZ-400 型激光扫描仪,该设备可发出多达 30 万点/s 的激光束,角分辨率达 0.0005° 。为避免强光干扰激光信号接收,监测固定在当日 8:00—9:00,并对同一站点进行多次扫描。待监测的沟坡底端和左右两侧各布设有固定水泥桩作为扫描站点,并选取 8 个固定参考点作为每一站扫描数据后的拼接参考点,仪器通过三脚架架设于距离沟坡 5 m 处,在保证扫描的位置和高度不变的情况下,对样区进行全面扫描,获取沟坡地形动态发展的点云数据。观测小区旁设置有固定 HOBO 气象站及 LPM 激光雨滴谱仪,配备有太阳辐射传感器、空气温湿度传感器、雨量筒、风杯等观测设备,各气象指标的监测频率设置为 2 min/次,以实时监测样地的气象条件。

1.4 测算指标

将获取的点云数据导入扫描仪自带软件 RISCAN PRO 进行预处理,去除噪声和异常值,并完成多点位拼接处理。结合基于 Qt 开发的不同方位同一数据自动配准功能,对不同时间段的扫描数据进行对齐,以确保数据在同一坐标系下进行比

较。将预处理后的三维点云坐标转化为栅格数据,生成微地貌数字高程模型(M-DEM)作为基础图层。在 ArcGIS 10.7 软件中通过相邻 2 次观测坡面之差生成的 Δ M-DEM 可计算沟坡的后退速率,根据研究区内实际侵蚀速率和侵蚀深度可确定侵蚀强度分级。

选取 4 个具有代表性的地形因子(地表粗糙度、地表起伏度、地表切割度、高程变异系数)以描述泻溜搬运过程中微地形的变化特征,基于 ArcGIS 10.7 软件平台提取微地貌指标,从而精确获取每个沟坡的微地貌特征。

(1) 地表粗糙度

地表粗糙度(R)是反映地表的细微高程变化和表面粗糙程度的重要指标,能够反映土壤表层结构的破坏和重塑情况,计算公式为:

$$R = 1/\cos([\text{Slope of DEM}] * \pi/180) \quad (1)$$

式中:[Slope of DEM]为某图层 DEM 坡度; π 取值 3.141 59。

(2) 地表起伏度

地表起伏度(RA)反映地形在侵蚀过程中的整体形态变化,能够反映土壤在侵蚀过程中地表的高低起伏状况,是区域地形的宏观性指标,计算公式为:

$$RA = H_{\max} - H_{\min} \quad (2)$$

式中: H_{\max} 和 H_{\min} 分别为分析区域范围内最大高程与最小高程(m)。

(3) 地表切割度

地表切割度(SI)指在某点相邻区域内平均海拔和最低海拔的差值,揭示侵蚀过程中裂缝的发育情况,反映侵蚀路径和侵蚀网络的形成和扩展,计算公式为:

$$SI = H_{\text{mean}} - H_{\min} \quad (3)$$

式中: H_{mean} 和 H_{\min} 分别为分析区域范围内平均高程与最低高程(m)。

(4) 高程变异系数

高程变异系数(ECV)是地表一定距离范围内高程标准差与平均值的比值,量化地形的复杂度和不均匀性,能够反映侵蚀强度和范围的差异,计算公式为:

$$ECV = H_{\text{std}}/H_{\text{mean}} \quad (4)$$

式中: H_{std} 和 H_{mean} 分别为分析区域内高程的标准差与平均高程(m)。

1.5 数据处理

采用 Excel 2016 软件进行数据的初步统计和处理,使用 Origin 2022 软件绘制不同坡向下微地形因子变化的图件;使用 SPSS 26.0 软件对微地形因子与侵蚀特征进行 Pearson 双尾相关分析以及多元线性

回归分析;用 R 4.3.2 对微地形因子、侵蚀特征指标与气象因子的关系进行 Mantel 检验分析,并进行广义相加模型 (generalized additive model, GAM) 分析, GAM 模型的形式为:

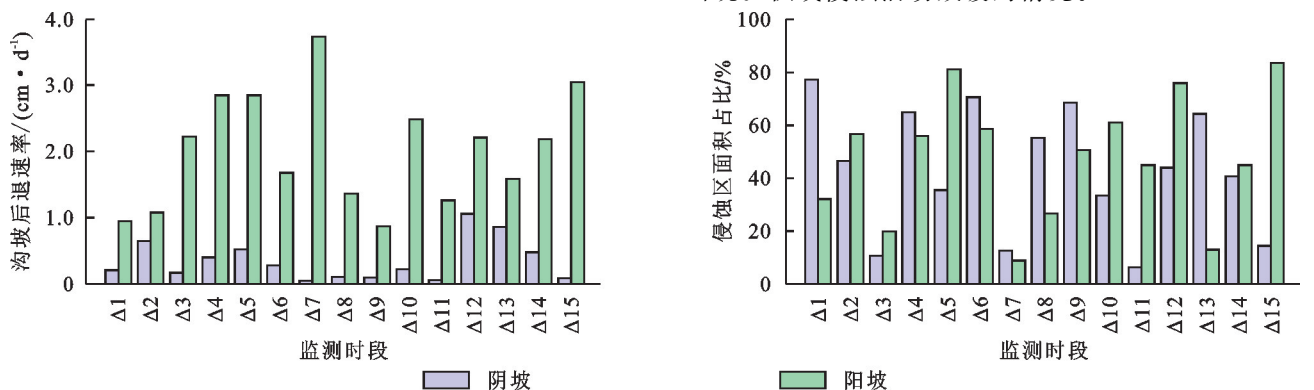
$$Y = \beta_0 + f_1(X_1) + f_2(X_2) + \dots + f_p(X_p) + \epsilon \quad (5)$$

式中: Y 为因变量 (侵蚀面积、侵蚀深度, 侵蚀量); X_1, X_2, \dots, X_p 为自变量 (气温、风速、相对湿度、太阳辐射、降雨量); f_1, f_2, \dots, f_p 为非参数函数, 通常是光滑函数, 表示自变量对因变量的非线性关系; β_0 为截距项; ϵ 为误差项。

2 结果与分析

2.1 泻溜坡面侵蚀特征分析

根据 ΔM -DEM 的大小和空间位置可以确定沟坡后退速率及侵蚀区面积占比, 由图 1 可知, 沟坡在各个监测时段内都有侵蚀的发生。阴坡平均后退速率为 0.35 cm/d, 平均侵蚀面积占研究区总面积的 43.11%; 阳坡平均后退速率大于阴坡, 为 1.54 cm/d,



注: Δn 表示前后 2 次监测, 即第 n 次变化。下同。

图 1 沟坡后退速率及侵蚀区面积占比变化特征

Fig.1 Change characteristics of receding rate of gully slope and area proportion of the erosion area

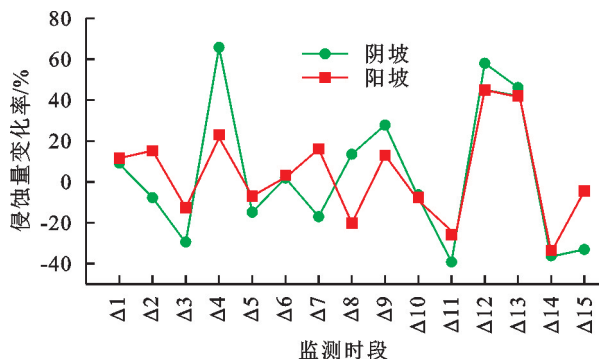


图 2 侵蚀量变化特征

Fig.2 Variation characteristics of the erosion amount

沟坡侵蚀界面微地貌高程的起伏变化是坡面侵蚀的最直接体现, 图 3 为定位监测期间坡面总体的侵蚀情况, 将坡面侵蚀强度划分为 5 个等级 ($>3, 2\sim 3, 1\sim 2, 0\sim 1, <0$ cm), 不同坡向下泻溜坡面在监测时段内大部分都发生侵蚀。从图 3 可以看出, 阴坡侵蚀

平均侵蚀面积占研究区总面积的 45.48%。总体上, 阳坡的后退速率和侵蚀区面积占比大于阴坡。不同坡向的后退速率随时间变化规律不一致, 较为明显的如第 8~9 次监测时段内阳坡后退速率为 2.87 cm/d, 而同时段下阴坡的沟坡后退速率仅为 0.05 cm/d。

2.2 泻溜侵蚀量及侵蚀强度分析

侵蚀量变化率可以体现坡面在不同时间段或环境条件下的侵蚀动态变化, 反映出侵蚀过程的复杂性和多样性。由图 2 可知, 不同坡向侵蚀量变化率呈较大的波动性, 其中阴坡的侵蚀量变化率大于阳坡, 并且变化率有明显的高峰和低谷。在变化率高峰时期, 第 4~5 次监测下阴坡的侵蚀量变化率为 65.84%, 而阳坡的侵蚀量变化率为 23.05%, 阴坡的侵蚀量变化率明显高于阳坡, 表明阴坡在极端天气或降雨条件下更易受到侵蚀; 而在变化率低谷时期, 第 11~12 次监测下阴坡的侵蚀量变化率为 -39.14%, 阳坡的侵蚀量变化率为 23.05%, 表明在稳定条件下, 阴坡更容易出现沉积或侵蚀活动减缓的情况。

强度主要以 0~1 cm 侵蚀为主, >3 cm 侵蚀在坡面下部分布最多。阳坡与阴坡的侵蚀特征有所不同, 从侵蚀强度来看, 阳坡的侵蚀主要以 >3 cm 侵蚀为主; 从侵蚀区的分布来看, 阳坡的非侵蚀区主要分布于坡面中上部。不同坡向下泻溜坡面的非侵蚀区即截留区与 >3 cm 侵蚀区总是相伴出现, 出现这种现象的原因可能是 >3 cm 侵蚀区形成明显的侵蚀路径, 泻溜土体则优先选择从既有路线进行搬运。

2.3 坡面微地形因子变化特征

在泻溜侵蚀过程中, 沟坡的微地形在空间上随着表面土粒剥落、搬运路径的变化发生改变。由于不同坡向坡面微地形的本底情况不同, 将微地形因子的变化用变化率的形式表示更为准确。由图 4 可知, 微地形因子随监测时段呈动态变化趋势, 其中, 地表粗糙度的总体变化幅度表现为阳坡大于阴坡, 变化程度分别为 20.09% 和 1.71%。

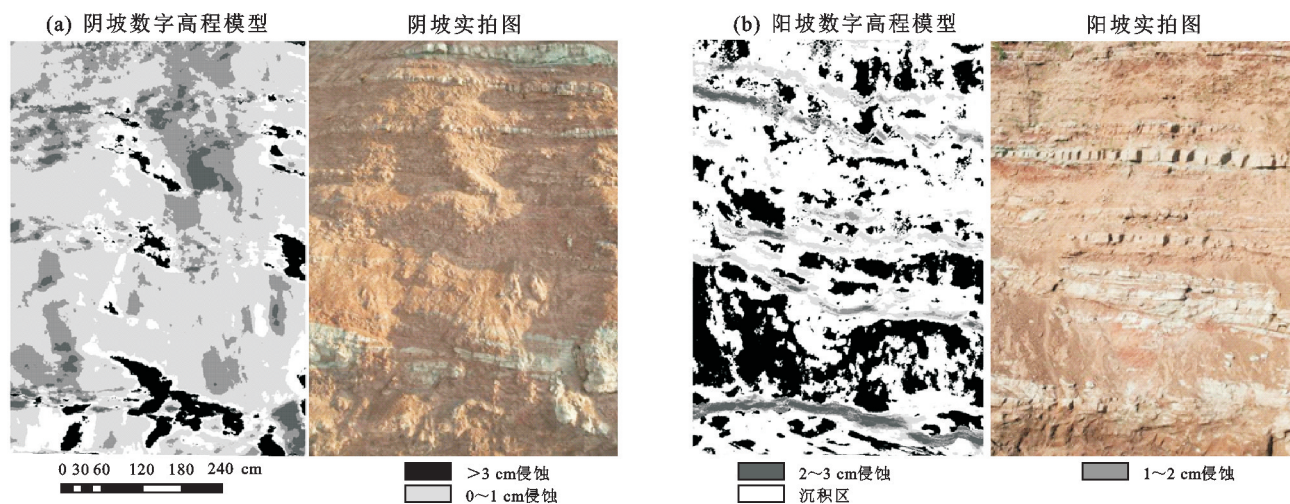


图 3 坡面侵蚀强度

Fig.3 The intensity of slope erosion

在监测期间,第 2 次和第 6 次阳坡地表粗糙度的变化率较高,出现急剧减小而后期较为稳定的趋势。地表起伏度和地表切割度的变化规律一致,表现为阴坡的变化幅度远大于阳坡。总体上,不同坡向地表切割度的变化程度大于地表起伏度。阴坡于第 14~15 次监测下地表起伏度和地表切割度的变化率均出现极大值,分别为 94.42%和 95.05%。阴坡

高程变异系数的变化率为 93.69%,而阳坡高程变异系数的变化较为稳定,总体变化率为 1.07%;阴坡的高程变异系数于第 14~15 次监测下变化率较大,与地表起伏度和地表切割度出现变化率极大值的时段相同。不同坡向泻溜坡面微地形的变化具有明显的差异,坡向对泻溜侵蚀过程中微地形因子的变化有不同的影响。

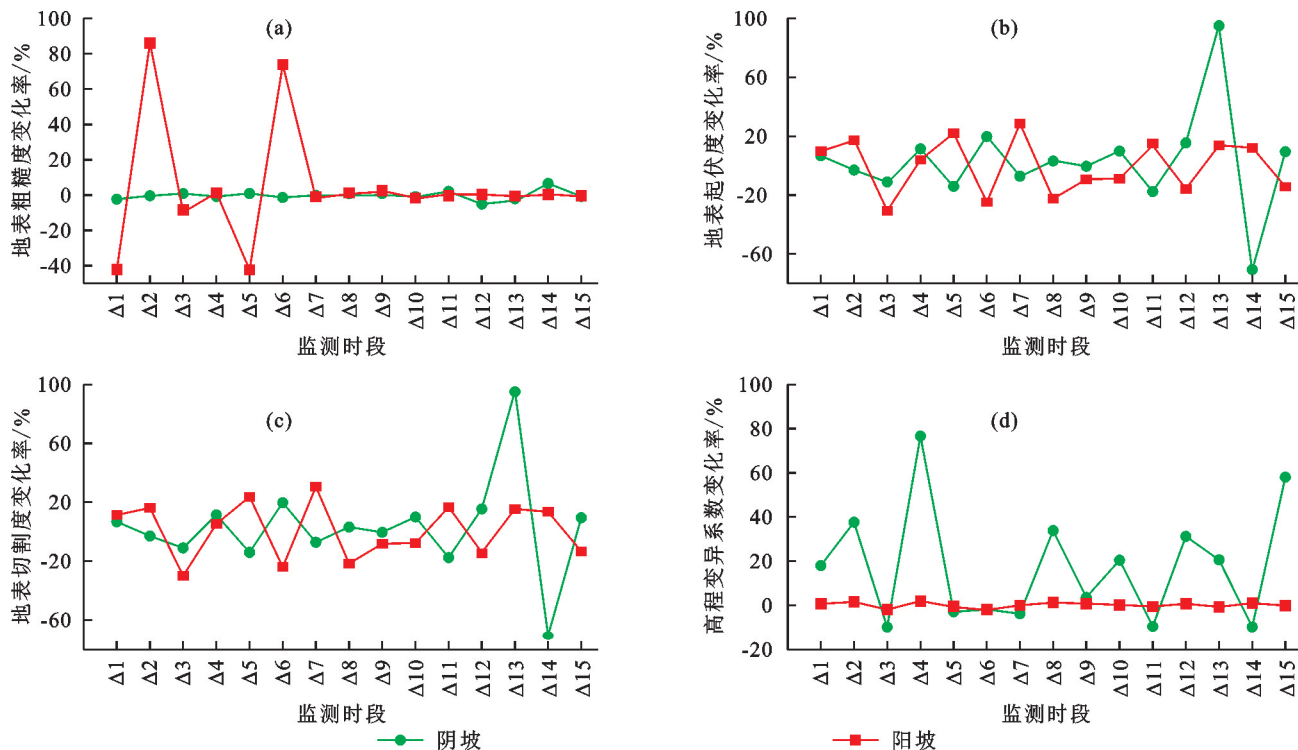


图 4 微地形因子变化特征

Fig.4 Variation characteristics of microtopographic factors

2.4 坡面微地形因子与侵蚀特征的关系

对沟坡后退速率、侵蚀面积、侵蚀量与 4 个微地形因子的相关性进行分析。由表 2 可知,阴坡侵蚀量与地表粗糙度、地表起伏度、地表切割度均存在极显著相关($p < 0.01$),与高程变异系数存在显著相

关($p < 0.05$)。不同坡向沟坡后退速率均与地表起伏度和地表切割度之间呈极显著正相关($p < 0.01$),阴坡的相关性强于阳坡。高程变异系数与阳坡沟坡后退速率之间存在显著相关($p < 0.05$),但与阴坡沟坡后退速率之间无显著相关性。Pearson 相关性结

果表明,不同坡向侵蚀面积与微地形因子之间无显著相关性。

由于不同坡向侵蚀特征的不同,分别研究其沟坡后退速率、侵蚀面积、侵蚀量与微地形因子的关系。通过多元回归分析(表 3)可知,地表粗糙度、地表切割度、高程变异系数可以很好地拟合阴坡侵蚀过程,其中地表切割度对沟坡后退速率及侵蚀量的影响最大,地表粗糙度对侵蚀面积影响最大;在阳坡,4 个微地形因子可以较好地拟合其侵蚀过程,地表起伏度和地表切割度对沟坡后退速率、侵蚀面积及侵蚀量的响应更强。从拟合决定系数(R^2)来看,阴坡沟坡后退速率($R^2=0.721$)的拟合效果优于阳坡($R^2=0.631$),阴坡侵蚀量($R^2=0.627$)的拟合效果也优于阳坡($R^2=0.093$)。总体来看,不同坡向微地形因子

表 3 微地形因子与侵蚀特征的回归分析

Table 3 Regression analysis of microtopographic factors and erosion characteristics

坡向	指标	回归方程	R^2
阴坡	沟坡后退速率	$Y=0.093R+0.871SI+0.112ECV+1.185$	0.721
	侵蚀面积	$Y=-0.167R+0.123SI+0.145ECV-1.561$	0.125
	侵蚀量	$Y=-0.169R+0.490SI-0.292ECV+7.819$	0.627
阳坡	沟坡后退速率	$Y=0.090R+6.380RA+6.957SI+0.145ECV+5.751$	0.631
	侵蚀面积	$Y=-0.068R-10.083RA+9.591SI+0.686ECV+8.423$	0.350
	侵蚀量	$Y=0.247R-4.791RA+4.842SI-0.153ECV+2.172$	0.093

2.5 气象因子对泻溜坡面侵蚀特征的影响

由图 5 可知,各气象因子与侵蚀面积之间存在极显著正相关关系($p<0.01$),其中风速、气温、太阳辐射与侵蚀面积的相关系数均在 0.4 以上,而与微地形因子之间的相关性较弱。为进一步探索不同坡向下各气象因子与泻溜侵蚀面积的关系,进行 GAM 多因素分析。由拟合结果(表 4)可知,泻溜侵蚀在多个气象因子的共同作用下,同时存在线性与非线性关系。阴坡侵蚀面积与气象因子的拟合结果中,太阳辐射与侵蚀面积之间呈极显著相关($p<0.01$),气温和相对湿度与侵蚀面积存在线性不相关关系,它们之间可能存在交互作用;与其他气象因子之间无显著相关性。在阳坡的拟合结果中,气温显著影响侵蚀面积($p<0.05$),气温、太阳辐射及降雨量与侵蚀面积之间存在线性关系。气象因子与侵蚀面积的关系存在明显的坡向分异,影响阴坡侵蚀的气象因子重要性表现为气温>降雨量>太阳辐射>相对湿度>风速,而阳坡则表现为气温>相对湿度>风速>降雨量>太阳辐射。不同坡向侵蚀特征与气象因子的模型的总体方差解释率分别为 85.6% 和 70.5%,拟合决定系数 R^2 为 0.738 和 0.502,说明该模型在泻溜侵蚀特征预测方面具有很好的拟合能力,且对不同坡向的侵蚀特征变异具有较好的解释能力,

与沟坡后退速率的拟合效果优于侵蚀面积及侵蚀量,侵蚀面积和侵蚀量与微地形的响应关系较为复杂。

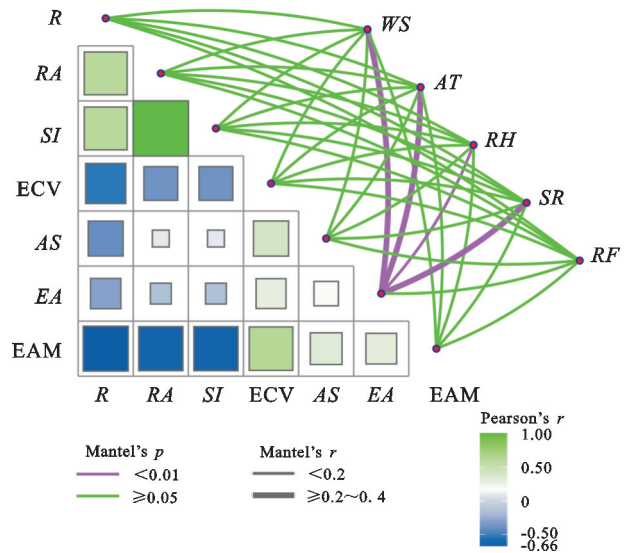
表 2 微地形因子与泻溜侵蚀特征的相关性

Table 2 Correlations between microtopographic factors and debris slide characteristics

坡向	指标	微地形因子			
		地表粗糙度	地表起伏度	地表切割度	高程变异系数
阴坡	沟坡后退速率	-0.610*	0.841**	0.840**	0.407
	侵蚀面积	-0.308	0.305	0.302	0.245
	侵蚀量	-0.646**	0.734**	0.730**	0.542*
阳坡	沟坡后退速率	-0.329	0.723**	0.721**	0.566*
	侵蚀面积	-0.130	-0.174	-0.172	0.347
	侵蚀量	0.177	-0.119	-0.116	-0.243

注: * 表示在 0.05 级别相关性显著; ** 表示在 0.01 级别相关性显著。

但模型对变量间关系的解释能力表现为在阴坡较好。



注: AS 为沟坡后退速率; EA 为侵蚀面积; EAM 为侵蚀量; WS 为风速; AT 为气温; RH 为相对湿度; SR 为太阳辐射; RF 为降雨量。Mantel's p 表示显著性水平; Mantel's r 表示相关性系数,其大小用线条粗细和颜色表示; Pearson's r 表示侵蚀特征指标之间的线性相关性,方块的颜色和大小表示相关系数的大小和方向,颜色越深相关性越强。

图 5 气象因子与泻溜侵蚀特征相关关系

Fig.5 Correlations between meteorological factors and characteristics of sliding erosion

表 4 侵蚀面积与各气象变量的 GAM 拟合结果
Table 4 GAM fitting results of the erosion area and meteorological variables

坡向	解释变量	自由度	<i>F</i>	<i>p</i>	<i>R</i> ²	方差解释率/%
阴坡	风速	2.418	1.480	0.155 2	0.738	85.6
	气温	1.000	8.676	0.208 3		
	相对湿度	1.000	1.571	0.050 6		
	太阳辐射	8.992	2.370	0.004 9		
	降雨量	1.590	8.148	0.100 3		
阳坡	风速	1.124	2.216	0.218 3	0.502	70.5
	气温	1.000	10.413	0.010 4		
	相对湿度	2.307	2.299	0.116 9		
	太阳辐射	1.000	0.612	0.454 0		
	降雨量	1.000	2.010	0.189 9		

3 讨论

3.1 微地形因子与泻溜侵蚀特征的关系

微地形的变化对泻溜侵蚀的发展趋势及最终侵蚀的结果产生影响,是泻溜侵蚀的微观表现形式。已有研究^[23]表明,微地形随着坡面侵蚀的发展动态变化,并反映侵蚀的剧烈程度。然而,以往的研究^[24]大多以大尺度从坡面岩石风化或沟坡产沙角度研究泻溜发生机制,未能充分体现坡向这一重要地形因素与泻溜侵蚀的关系。

本研究根据前人^[25]对侵蚀与微地形因子关系的研究,选取 4 个具有代表性的微地形指标。监测期间,阳坡的沟坡后退速率和侵蚀区面积在总体上大于阴坡,但坡面后退速率和侵蚀面积直接的变化无直接对应关系,在第 1~2 次监测时段下阴坡的后退速率为 0.21 cm/d,小于阳坡的沟坡后退速率 0.73 cm/d,但同时时段下阴坡的侵蚀区面积占比为 77.21% 大于阳坡的 32.12%,表明存在沿坡体表面侵蚀与垂直坡体向内侵蚀 2 种侵蚀结果。阴坡侵蚀量的变化率大于阳坡,说明阴坡的侵蚀过程可能受到气象变化的影响更剧烈,不同时间段侵蚀量的变化率可以揭示侵蚀强度的时空变异性。阴坡的侵蚀强度主要在 0~1 cm,而阳坡则主要在 >3 cm,阳坡的侵蚀强度大于阴坡,与杨吉山等^[26]分析原状黄土风化对泻溜的影响得出的结论具有一致性。本研究发现,阳坡的地表粗糙度变化幅度大于阴坡,而阴坡的高程变异系数变化程度为 17.46%,显著大于阳坡的 0.05%。结合侵蚀强度来看,地形起伏较大的区域沟坡后退速率更容易受到影响,可能是由于地形起伏较大的区域更容易成为泻溜的侵蚀路径,导致沟坡后退速率增加。对微地形之间的相关性分析显示,地表粗糙度与地表起伏度和地表切割度之间

存在强负相关关系($p < 0.01$),地表粗糙度较高的区域往往具有较平坦的地形特征,或者受到较少的侵蚀影响。张发民等^[27]研究表明,截留区土壤黏粒含量显著高于侵蚀区,说明土壤在侵蚀运移过程中由于自身理化性质发生空间格局间的重新分布;陈佳等^[28]研究表明,地形影响泥沙颗粒的运移,因此侵蚀区流失的物质最终由于沟坡微地貌起伏的阻碍停留在截留区。微地形的动态变化影响泻溜侵蚀路径的形成,地表起伏较大的区域更容易形成明显的泻溜路径,导致沟坡后退速率增加。微地形的变化导致侵蚀区与截留区相互转换,影响侵蚀物质的最终分布,地表粗糙度和高程变异系数的变化反映出侵蚀强度的空间异质性,地形起伏较大的区域侵蚀强度更高。综上,沟坡微地貌的重塑与泻溜侵蚀过程之间相互影响,并在一定程度上存在动态平衡。

3.2 泻溜侵蚀过程与气象要素的关系

气象因素作为影响沟坡泻溜的重要因素,参与泻溜侵蚀演变的全过程^[29],沟坡后退速率是垂直于侵蚀界面向沟坡内部侵蚀的具体表现,侵蚀面积是侵蚀界面前后高程产生负增长的所有面积的总和,而侵蚀量特征是侵蚀强烈程度的直接体现。泻溜侵蚀界面受外界环境影响较大,当土体从侵蚀界面剥落后,表层砢砂岩的结构变得疏松,颗粒的胶结性降低,进而在沟壁形成横向或纵向裂隙,最终发展成为泻溜的搬运路径。在本研究第 6 次监测中,最高气温达到 29.2 °C,相对湿度为 26.3%,对应的阳坡侵蚀面积占比达到 81.0%,明显高于其他监测时段。在第 9 次监测中,气温为 21.9 °C,相对湿度为 62.9%,对应侵蚀区面积占比仅为 26.0%,气温与相对湿度对侵蚀的作用相反:气温越高、相对湿度越低,对应的侵蚀区面积占比越大,与汪洋等^[30]的研究结果具有很好的一致性。温度的变化加快岩土的侵蚀,侵蚀是太阳辐射能的主要作用形式,而地表形态的改变是太阳辐射能作用的结果^[31]。坡向的差异导致坡面水热条件的异质性,日照越强烈,坡体表面水分蒸散发的速度越快,从而导致不同坡向表层土壤湿度存在显著差异。同时,相对湿度与侵蚀特征也具有较强的相关性,相对湿度越低,对应局部小气候越干燥,进而影响土壤的黏性和抗侵蚀性,湿润的土壤更难被风力吹动,因此,在高湿度条件下,沟坡泻溜侵蚀可能减少。本文中风速与侵蚀没有显著的相关关系,可能是因为 7—8 月风速较小,对土壤侵蚀的影响受到其他因素的调节或中介,或者存在其他非线性的影响模式。ZOU 等^[32]研究表明,不同坡向的水热条件及稳定性的差异影响坡面风化速率,进而作用于沟坡重力侵蚀

过程。本研究中,侵蚀特征出现明显的坡向分异,影响其侵蚀的主要气象因子不同。由此可见,坡向是影响沟坡重力侵蚀的关键地形因素,本研究初步探讨不同坡向气象因子对泻溜侵蚀过程的影响,未来可结合长时间序列的数据,系统分析不同季节条件下的侵蚀变化趋势,为生态修复和防治措施提供科学依据。

4 结论

(1)砒砂岩沟坡存在明显的泻溜侵蚀现象,且坡向分异较为明显。其中,阴坡平均侵蚀面积占研究区总面积的43.11%,阳坡平均侵蚀面积占研究区总面积的45.48%。阳坡的侵蚀强度大于阴坡,且地表粗糙度的变化幅度在阳坡更为明显。阴坡地表起伏度、地表切割度和高程变异系数的变化规律更具显著性,坡向是影响沟坡重力侵蚀的关键地形因素。

(2)沟坡后退速率与地表起伏度和地表切割度之间呈极显著正相关($p < 0.01$)。阴坡沟坡后退速率与微地形因子的拟合度优于阳坡, R^2 分别为0.721,0.631,不同坡向微地形因子与沟坡后退速率的拟合度要优于侵蚀面积与侵蚀量。

(3)在砒砂岩区7—8月,影响阴坡侵蚀的气象因子重要性依次为气温>降雨量>太阳辐射>相对湿度>风速,阳坡则表现为气温>相对湿度>风速>降雨量>太阳辐射。GAM模型对侵蚀特征的坡向变异具有较好的解释能力。

参考文献:

[1] 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.
FU J X, WANG J, ZHANG B L, et al. Contributions of composite erosion forces on undisturbed Pisha Sandstone slope in different seasons[J].Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(11):66-73.

[2] 柴亚凡,周波,吕文强,等.人工模拟降雨条件下泻溜红土坡积体的侵蚀过程和入渗特征[J].中国水土保持科学,2019,17(1):10-15.
CHAI Y F, ZHOU B, LÜ W Q, et al. Erosion process and infiltration features of red soil slumping slope sediment under artificial simulated rainfall condition[J].Science of Soil and Water Conservation, 2019, 17(1):10-15.

[3] 张攀,姚文艺,刘国彬,等.土壤复合侵蚀研究进展与展望[J].农业工程学报,2019,35(24):154-161.
ZHANG P, YAO W Y, LIU G B, et al. Research progress and prospects of complex soil erosion[J].Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,

2019, 35(24):154-161.

- [4] 谢梦瑶,任宗萍,张晓明,等.砒砂岩区小流域坡沟系统地形及侵蚀分异规律[J].水土保持学报,2022,36(5):112-120.
XIE M Y, REN Z P, ZHANG X M, et al. Topography and erosion differentiation of slope-gully system in small basin in Pisha Sandstone area[J].Journal of Soil and Water Conservation, 2022, 36(5):112-120.
- [5] 刘林,薛丽萍,崔峰,等.黄土丘陵沟壑区典型小流域沟道类型和坡面组成对重力侵蚀的影响[J].中国水土保持科学(中英文),2024,22(5):63-71.
LIU L, XUE L P, CUI F, et al. Influence of gully type and slope composition on gravity erosion in typical small watersheds of the loess hilly and gully region [J]. Science of Soil and Water Conservation (Chinese and English), 2024, 22(5):63-71
- [6] 曾伯庆,马文中,张治国,等.三趾马红土泻溜侵蚀规律研究[J].中国水土保持,1991(7):21-25.
ZENG B Q, MA W Z, ZHANG Z G, et al. Study on erosion of slumping in Sanzhima red clay area[J].Soil and Water Conservation in China, 1991(7):21-25.
- [7] 申震洲,姚文艺,肖培青,等.黄河流域晋陕蒙接壤地区生态治理技术[C]//中国水利学会,黄河水利委员会.中国水利学会2020学术年会论文集第三分册.黄河水利委员会黄河流域生态保护和高质量发展研究中心;黄河水利委员会黄河水利科学研究院;北京林业大学水土保持学院,2020:6.
SHEN Z Z, YAO W Y, XIAO P Q, et al. Ecological management technology in the junction area of Shanxi, Shaanxi and Inner Mongolia in the Yellow River Basin [C]// China Hydraulic Society, Yellow River Conservancy Commission. Proceedings of the 2020 Annual Conference of the China Hydraulic Society. Yellow River Conservancy Commission; Research Center for Ecological Protection and High-Quality Development of the Yellow River Basin; Institute of Water and Soil Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources; Beijing Forestry University, 2020:6.
- [8] 张猛,杨志全,王振霖.坡体重力侵蚀研究现状及展望[J].化工矿物与加工,2023,52(1):48-56.
ZHANG M, YANG Z Q, WANG Z L. Research status and outlook of gravitational erosion of slope[J].Industrial Minerals & Processing, 2023, 52(1):48-56.
- [9] 高健健,艾琦森,韩立钦,等.2017—2018年黄土丘陵沟壑区第一副区辛店沟流域重力侵蚀观测数据集[J].中国科学数据,2021,6(3):113-120.
GAO J J, AI Q S, HAN L Q, et al. An observation-based dataset of gravity erosion of Xindiangu watershed in the

- first sub-region of Loess Hilly-Gully Region during 2017—2018[J].China Scientific Data,2021,6(3):113-120.
- [10] COSTABILE P, CEA L, BARBARO G, et al. Evaluation of 2D hydrodynamic-based rainfall/runoff modelling for soil erosion assessment at a seasonal scale[J].Journal of Hydrology,2024,632:e130778.
- [11] 张茜茜,龚家国,王浩,等.黄土区重力侵蚀研究进展与展望[J].水利水电技术(中英文),2022,53(12):172-184.
ZHANG Q Q, GONG J G, WANG H, et al. Study on progress and prospect of gravity erosion in loess region [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2022,53(12):172-184.
- [12] ZHOU X Q, WEI Y J, HE J, et al. Estimation of gully erosion rate and its determinants in a granite area of Southeast China[J].Geoderma,2023,429:e116223.
- [13] YAO Z H, YANG J C, ZHANG P, et al. The response mechanisms of topographic changes in small loess watershed under rainstorm [J]. Sustainability, 2022, 14 (17):e10472.
- [14] 李朋飞,张晓晨,党旭,等.基于三维激光扫描的坡沟系统侵蚀产沙过程研究[J].水土保持研究,2023,30(2):13-21.
LI P F, ZHANG X C, DANG X, et al. Investigation of erosion processes on the slope-gully system using 3D laser scanning[J].Research of Soil and Water Conservation,2023,30(2):13-21.
- [15] SOLANKI A, GUPTA V. Implications of geomorphometric parameters on the occurrence of landslides in the Kali Valley, Kumaun Himalaya, India[J].Catena,2022, 215:e106313.
- [16] 邢书昆,张光辉,王滋贯,等.黄土丘陵沟壑区浅层滑坡和崩塌形态特征与发育临界地形[J].水土保持学报, 2022,36(2):106-113.
XING S K, ZHANG G H, WANG Z G, et al. Morphological characteristics and critical topography of shallow landslide and collapse in hilly and gully region of the Loess Plateau[J].Journal of Soil and Water Conservation,2022,36(2):106-113.
- [17] 金鑫,刘浩楠,周程风,等.降雨过程中黄土坡面微地形因子与侵蚀关系研究[J].人民长江,2023,54(3):216-223.
JIN X, LIU H N, ZHOU C F, et al. Relationship between micro-topography factors of loess slope and erosion under intermittent rainfall[J].Yangtze River,2023, 54(3):216-223.
- [18] 丁琳,黄婷婷,秦伟,等.西南高山峡谷区土壤侵蚀空间分异特征[J].泥沙研究,2023,48(6):51-58.
DING L, HUANG T T, QIN W, et al. Spatial variation of soil erosion in Southwest Alpine Canyon Area [J]. Journal of Sediment Research,2023,48(6):51-58.
- [19] 许旻,李谭宝,李占斌,等.宁夏风蚀气候侵蚀力时空演变及影响因素分析[J].水土保持研究,2023,30(4):217-227.
XU K, LI T B, LI Z B, et al. Temporal and spatial evolution and influencing factors of wind erosion climatic erosivity in Ningxia[J].Research of Soil and Water Conservation,2023,30(4):217-227.
- [20] 孙应龙,李娜,黄斌斌,等.2000—2019年黄土高原地区土壤保持时空变化及影响因素分析[J].水土保持研究, 2022,29(6):290-297.
SUN Y L, LI N, HUANG B B, et al. Analysis of temporal and spatial changes and influencing factors of soil conservation in the Loess Plateau from 2000 to 2019[J]. Research of Soil and Water Conservation,2022,29(6): 290-297.
- [21] 杨振康,杨婉蓉,刘志娟,等.气候变化对东北三省土壤风蚀的影响[J].应用生态学报,2023,34(9):2429-2435.
YANG Z K, YANG W R, LIU Z J, et al. Effects of climate change on wind erosion in the three provinces of Northeast China[J].Chinese Journal of Applied Ecology,2023,34(9):2429-2435.
- [22] 王立久,李长明,董晶亮.砒砂岩分布及岩性特征[J].人民黄河,2013,35(12):91-93,97.
WANG L J, LI C M, DONG J L. Study on distribution and lithologic characters of feldspathic sandstone [J]. Yellow River,2013,35(12):91-93,97.
- [23] 张若曦,秦富仓,李龙,等.砒砂岩区坡面微地貌变化与侵蚀产沙的响应关系[J].水土保持研究,2022,29(6): 21-27.
ZHANG R X, QIN F C, LI L, et al. Responses of slope micro-geomorphology to erosion and sediment yield in arsenic sandstone area[J].Research of Soil and Water Conservation,2022,29(6):21-27.
- [24] 梁止水,陈煜,孙悦,等.砒砂岩坡面侵蚀产沙规律及多元回归估算模型研究[J].水土保持研究,2024,31(2): 11-17.
LIANG Z S, CHEN Y, SUN Y, et al. Study on slope erosion and sediment production rule of Pisha sandstone and multiple regression estimation model[J].Research of Soil and Water Conservation,2024,31(2):11-17.
- [25] 朱志卓,李龙,张鹏,等.水力侵蚀下砒砂岩区植被格局对微地形和侵蚀的影响[J].水土保持研究,2023,30(3): 10-18.
ZHU Z Z, LI L, Zhang P, et al. Effects of vegetation pattern on microtopography and erosion in Pisha sandstone area under hydraulic erosion[J].Research of Soil and Water Conservation,2023,30(3):10-18.
- [26] 杨吉山,姚文艺,王玲玲.黄土沟道重力侵蚀规律及机理

- 研究[J].人民黄河,2014,36(6):93-96.
- YANG J S, YAO W Y, WANG L L. Study on the regularity and mechanism of gravity erosion in the loess gully[J]. Yellow River, 2014, 36(6):93-96.
- [27] 张发民, 杜兰兰, 袁瀛, 等. 土壤侵蚀和沉积对土壤理化性状的影响[J]. 水土保持学报, 2021, 35(6):161-167.
- ZHANG F M, DU L L, YUAN Y, et al. Effects of soil erosion and deposition on soil physical and biochemical properties[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35(6):161-167.
- [28] 陈佳, 范萍萍, 龙文涛, 等. 土壤侵蚀对重金属迁移的作用规律与机制研究进展[J]. 水土保持研究, 2024, 31(1):460-470.
- CHEN J, FAN P P, LONG W T, et al. Research progress in mechanism of impact of soil erosion on heavy metal migration[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(1):460-470.
- [29] 张庚, 王志强, 朱喆, 黄土丘陵沟壑区坡体稳定性影响因素分析[J]. 水土保持学报, 2022, 36(3):107-114.
- ZHANG G, WANG Z Q, ZHU Z. Analysis on influencing factors of slope stability in loess hilly and Gully Region [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022, 36(3):107-114.
- (下转第 35 页)
- [27] 马中浩. 南方红壤区玉米生育期坡地土壤抗侵蚀性特征 [D]. 武汉: 华中农业大学, 2016.
- MA Z H. Anti-erosion characteristics of sloping land soil during maize growth period in red soil region of South China [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2016.
- [28] BARANIAN KABIR E, BASHARI H, MOSADDEGHI M R, et al. Soil aggregate stability and organic matter as affected by land-use change in central Iran [J]. Archives of Agronomy and Soil Science, 2017, 63(13):1823-1837.
- [29] 褚冰杰, 余光辉, 刘飞飞, 等. 土壤微团聚体中矿物-有机复合体特征[J]. 土壤学报, 2017, 54(6):1451-1458.
- CHU B J, YU G H, LIU F F, et al. Characterization of mineral-organic complex in soil microaggregates with synchrotron radiation infrared micro-imaging method [J]. Acta Pedologica Sinica, 2017, 54(6):1451-1458.
- [30] 代文才, 高明, 王子芳, 等. 紫色丘陵区不同土地利用方式土壤剖面微团聚体组成及分形特征[J]. 水土保持学报, 2016, 30(6):259-264.
- DAI W C, GAO M, WANG Z F, et al. Composition and fractal features of soil micro-aggregates under different land-use types in purple hilly area [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2016, 30(6):259-264.
- [31] 赵锦梅, 徐长林, 马瑞, 等. 东祁连山不同高寒灌丛草地土壤抗蚀性研究[J]. 水土保持学报, 2016, 30(5):119-123.
- ZHAO J M, XU C L, MA R, et al. Study on soil anti-erodibility of different alpine shrub grassland in eastern Qilian Mountain [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2016, 30(5):119-123.
- [32] 陈琳, 王健, 宋鹏帅, 等. 降雨对坡耕地地表结皮土壤水稳性团聚体变化研究[J]. 灌溉排水学报, 2020, 39(1):98-105.
- CHEN L, WANG J, SONG P S, et al. Effect of rainfall on water stability aggregates of crust soil on slope surface [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2020, 39(1):98-105.
- [33] 赵向玲. 施加生物炭基磷肥对西北针茅光合特征和根系生长的影响 [D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2023.
- ZHAO X L. Effects of applying biochar-based phosphate fertilizer on photosynthetic characteristics and root growth of *Stipa northwest* [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2023.