

宽叶雀稗种植对稳定型崩岗崩壁表层 土壤水热动态的影响

汪磊¹, 杨茂进¹, 周家贵², 蒋芳市¹, 林金石¹, 黄炎和¹, 张越¹

(1. 福建农林大学 资源与环境学院, 福建 福州 350002; 2. 长汀县河田镇林业工作站, 福建 龙岩 366399)

摘要: [目的] 探究植被覆盖措施对崩壁表层土壤水热格局与水分时间稳定性的响应规律, 为稳定型崩岗崩壁的生态恢复效果评价提供理论依据。[方法] 以福建省长汀县河田镇崩岗崩壁为研究对象, 在崩壁种植宽叶雀稗(*Paspalum wettsteinii*)作为生草措施, 保留原始裸露崩壁作为对照, 观测 0—20 cm 表层土壤水分与温度的动态变化, 比较 2 种环境土壤水热空间分布特征及水分时间稳定性指标的差异。[结果] 生草处理下崩壁土壤平均温度为 20.93 °C, 显著低于对照的 22.26 °C, 生草坡上和坡下的温度变化幅度分别为 23.76 °C 和 21.95 °C, 均低于对照的坡上(25.32 °C)和坡下(26.36 °C)。生草处理的土壤年均含水量为 18.77 g/kg, 较对照(13.59 g/kg)提高了 38.11%。Spearman 秩相关系数(ρ)分析显示, 生草处理下土壤水分相关系数均值为 0.41, 明显高于对照(0.18)。生草处理的坡上土壤平均相对差(MRD)均值为 19.27%, 标准差为 22.57%, 时间稳定性指数(ITS)为 29.68%, 坡下 MRD 均值为 10.48%, 标准差为 12.47%, ITS 为 16.29%, 均显著高于对照(坡上 MRD 为 -13.43%, 标准差为 16.05%, ITS 为 20.93%; 坡下 MRD 为 -16.32%, 标准差为 9.33%, ITS 为 18.80%)。[结论] 生草处理显著改善崩壁表层土壤水热格局, 降低年均温度, 提高土壤含水量并增强其空间相似性, 但加剧了水分短期波动, 降低其时间稳定性。

关键词: 崩岗崩壁; 宽叶雀稗; 土壤水分; 土壤温度; 时间稳定性

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2025)06-0012-11

中图分类号: S157.2

文献参数: 汪磊, 杨茂进, 周家贵, 等. 宽叶雀稗种植对稳定型崩岗崩壁表层土壤水热动态的影响[J]. 水土保持通报, 2025, 45(6): 12-22. Wang Lei, Yang Maojin, Zhou Jiagui, et al. Effects of *Paspalum wettsteinii* plantation on surface soil water and heat dynamics in stabilized Benggang collapsing gully walls [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025, 45(6): 12-22.

DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2025.06.015

CSTR: 32312.14.stbctb.2025.06.015

Effects of *Paspalum wettsteinii* plantation on surface soil water and heat dynamics in stabilized Benggang collapsing gully walls

Wang Lei¹, Yang Maojin¹, Zhou Jiagui², Jiang Fangshi¹, Lin Jinshi¹, Huang Yanhe¹, Zhang Yue¹

(1. College of Resources and Environment, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou, Fujian 350002, China; 2. Forestry Workstation of Hetian Town, Changting County, Longyan, Fujian 366399, China)

Abstract: [Objective] The mechanisms underlying the responses of vegetation coverage measures to hydrothermal patterns and temporal stability of surface soil on Benggang collapsing gully walls were analyzed, in order to provide a theoretical basis and predictive parameters for evaluating the efficacy of ecological restoration of stable Benggang collapsing gully walls. [Methods] Collapsing gully walls in Hetian Town, Changting County, Fujian Province, were subjected to two treatments, namely, planting *Paspalum wettsteinii* on the gully walls (grass-growing treatment) and maintaining the original bare collapsing gully walls (control). To compare differences in the spatial distribution characteristics of soil water and heat under the two treatments, as well as indicators of soil moisture temporal stability, we monitored the dynamic changes in soil moisture and temperature in the 0—20 cm soil surface layer. [Results] Throughout the period of monitoring, the average soil temperature

收稿日期: 2025-06-14

修回日期: 2025-07-31

采用日期: 2025-08-01

资助项目: 福建省水利科技项目“崩岗崩壁防塌生态治理技术研发与示范”(KJG21009A); 水利部重大科技项目“南方花岗岩崩岗生态治理技术研发与示范”(SKS-2022073)

第一作者: 汪磊(1999—), 男(汉族), 安徽省芜湖市人, 硕士研究生, 研究方向为土壤侵蚀。Email: wl18355308558@163.com。

通信作者: 张越(1990—), 男(汉族), 安徽省芜湖市人, 副教授, 主要从事土壤侵蚀研究。Email: zhangyue@fafu.edu.cn。

under the grass treatment with *P. wettsteinii* was 20.93 °C, which was significantly lower than that of the bare control soil (22.26 °C). Moreover, the ranges of temperature fluctuation on the upper and lower slopes under grass cover (23.76 °C and 21.95 °C, respectively) were both lower than corresponding values for the bare slope (25.32 °C and 26.36 °C, respectively). In addition, the annual average soil moisture content under the grass treatment (18.77 g/kg) was approximately 38.11% higher than that of the bare control (13.59 g/kg). Spearman rank correlation analysis revealed that the mean correlation coefficient (ρ) of soil moisture under grass cover (0.41) was significantly higher than the 0.18 value obtained for bare land, thus indicating enhanced spatial consistency. However, vegetation coverage was found to alter soil moisture cycling, increasing the frequency of dry-wet alternations, as indicated by higher values for the mean relative difference (MRD), standard deviation, and temporal stability index (ITS) under the grass treatment compared with those of the bare land control. Specifically, in response to the grass treatment, we obtained values of 19.27%, 22.57%, and 29.68% for the average MRD, standard deviation, and ITS respectively, on the downslope, whereas on the upslope, the corresponding values were 10.48%, 12.47%, and 16.29%. In contrast, under the control treatment, we obtained MRD, standard deviation, and ITS values of -13.43%, 16.05%, and 20.93%, respectively, on the upslope, and corresponding values of -16.32%, 9.33%, and 18.80% on the downslope. [Conclusion] By reducing temperature, increasing moisture content, and enhancing spatial similarity, the grass-growing treatment assessed in this study contributed to considerable improvements in the water and heat dynamics of the surface soil on collapsing gully walls. However, this treatment also intensified short-term fluctuations in soil moisture and reduced soil temporal stability.

Keywords: Benggang collapsing gully wall; *Paspalum wettsteinii*; soil moisture; soil temperature; time stability

南方红壤丘陵地区由于地形起伏剧烈、强降雨频繁以及不合理的人类活动叠加作用,水土流失问题尤为严重^[1]。其中,崩岗侵蚀作为该区域特有的土壤侵蚀类型,是在水力与重力共同作用下,山坡土体或岩石风化壳发生大面积崩塌、堆积与冲刷,形成的一种复合型侵蚀地貌,其形成过程具有突发性、长期性和高度危害性,被称为自然环境的“生态溃疡”^[2]。崩岗的发生严重危害区域人民生命财产安全,是限制地区经济可持续发展的重要因素。崩壁作为崩岗侵蚀体系中的典型部位,因其坡度大,土体结构疏松,长期裸露等特点,成为水分流失最剧烈,植被恢复最困难的区域^[3]。即使是稳定型崩岗,崩壁自身的水热环境极端且时空异质性强,严重制约生态恢复过程^[3]。而植被恢复作为坡面水土保持的核心措施,不仅通过冠层遮荫与蒸腾调节土壤温度,也通过根系影响水分入参与保持^[4]。所以,从“水—热—植被相互作用”角度分析其调控机制,已成为边坡生态修复领域关注的前沿问题。因此,探究稳定型崩岗崩壁的生态恢复技术和区域安全具有重要意义。

水分是维系植物生长与生态系统稳定运行的关键因子,在边坡治理与生态修复过程中发挥着决定性作用^[5]。土壤水分不仅直接影响植物种子萌发、根系扩展、光合作用与蒸腾调节等植物生理活动,还可以通过调控土壤温度、通气性和微生物活性等过程,间接调节生态系统的演替速率与恢复方向^[6]。因此,

在崩壁生态修复初期,准确识别和掌握土壤水分的时空分布格局与动态演变特征,不仅是衡量植被恢复成效的重要指标,更是判断坡面是否具备稳定恢复潜力的重要基础。已有研究表明,土壤水分含量与空间分布格局受坡位、植被类型与覆盖度、土壤质地以及降雨特征等多种因素共同影响^[7],尤其在坡度大、径流强的崩壁区,其变异性和敏感性远高于普通坡地。因此,深入认识崩壁区域土壤水分的动态变化过程,是推动崩岗区由“工程稳定”向“生态稳定”转变的关键^[8]。

近年来,随着边坡土壤水热过程的研究不断深入,取得了诸多成果,其研究重点主要集中于不同生态修复模式下坡面水分动态、温度变化及其与植物生长和生态系统功能之间的相互影响^[9]。土壤水分是影响植物生长的主要限制因子^[10]。目前,土壤水分研究主要关注其空间分布,季节变化及与降水、蒸散发等环境因子的相互作用^[9-10];而土壤温度作为土壤物理特性中的关键因素之一,直接影响土壤微生物的活性、作物生长、养分转化以及土壤水分迁移及作物生长等过程^[11]。现有研究表明,植被覆盖度与坡位显著影响边坡土壤水热格局响应机制。例如,植被覆盖度越高,坡面土壤水分保持能力越强,空间分布也更均匀^[12];坡位变化对水分空间异质性的影响显著,坡下区域常因汇水效应,含水量高于坡上^[13];而在坡面人工植被恢复初期,随着植被盖度的

增加会减弱土壤侵蚀,然而随着植被地上和地下生物量的增加,土壤水分出现亏缺将会抑制植物生长,从而引起植被退化,进而影响人工植被群落组成及其群落物种多样性^[14]。这些研究从不同角度揭示了土地利用方式、植被覆盖度及坡位差异对边坡土壤水热特征的调控作用,拓展了对坡面生态过程的认识,为边坡水热过程的定量分析和生态恢复模式优化提供了理论支撑。然而,当前相关研究多集中于人工植被恢复早期、黄土高原等典型干旱半干旱区^[15],对南方红壤丘陵区,特别是强侵蚀的崩壁单元中土壤水热时空变异规律的解析仍显不足。

宽叶雀稗(*Paspalum wettsteinii*)为多年生浅根系禾本科草本植物,具有根系发达、固土能力强、覆盖度高等生态优势,在福建长汀等崩岗区已有成功应用实践^[16]。然而,当前仍缺乏对该植物覆被下崩壁土壤的水热时空变化及其生态响应机制的系统研究,尤其缺乏对其土壤水分时间稳定性的量化分析^[17]。基于此,本研究选取福建省长汀县典型崩岗侵蚀区为研究区域,在崩壁种植宽叶雀稗,通过野外定位监测与室内理化分析相结合,系统探讨了不同措施下土壤水分含量、温度变化趋势及其时空稳定性特征。有助于进一步丰富崩岗生态恢复过程中的水分过程认知,为南方红壤丘陵区典型崩壁的水热格局调控提供实证依据,有助于明确生态恢复早期阶段中植物—土壤耦合关系,为区域水土流失治理与生态安全格局重构提供理论支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于福建省长汀县河田镇(116°40′—

116°45′E, 25°40′—25°45′N),该区域属亚热带季风气候,夏季高温多雨,年平均气温 19.0℃,最高气温 39.8℃,最低气温 -4.9℃,年无霜期 265 d,年降水量约 1 700 mm。区域内土壤母岩多为中粗粒花岗岩,受长期高温多雨气候影响,母岩风化强烈,易形成侵蚀区。长汀县作为福建省崩岗数量最多的地区之一,共有崩岗 3 584 处,其中,河田镇为典型侵蚀区,崩岗分布密集^[18]。

1.2 试验设计

本研究于 2023 年 5 月在福建长汀县河田镇崩岗侵蚀区开展,选取典型崩壁作为试验样地。试验设置“生草”和“对照”2 个处理,二者布设于同一崩壁上,其中生草处理区种植宽叶雀稗(图 1a),对照处理区为未种植植物、无人工植被根系影响的原始崩壁(图 1b)。

在试验区内一面崩壁上,人工种植宽叶雀稗,种植年限为 1 a。种植穴的方向与水平呈 45°,直径为 6~10 cm,深度 15 cm,种植穴之间的间距为 25 cm,排列呈“品”字形。宽叶雀稗草种种在装填混合培养基质的无纺布种植袋中,混合培养基质由耕层土壤、1 g/kg 保水剂(PAM)和 15 g/kg 施立富有机肥料(N+P₂O₅+K₂O≥4.0%,有机质≥30%)组成,充分混匀后施用,以确保草种在崩壁环境中的顺利发芽与生长,并在每个种植穴内施用 5 g 阿波罗复合肥(N-P₂O₅-K₂O, 15:15:15, ≥45%),再将种植袋栽入提前挖好的种植穴中。宽叶雀稗是一种多年生暖季草本植物,根系发达,主要分布于 0—10 cm 土层,其耐贫瘠、耐旱能力较强,覆盖度达到 95%。对照的崩壁不进行处理,崩壁上生长少量芒其,覆盖度约 5%(表 1)。



a 生草(种植宽叶雀稗)

b 对照(原始崩壁)

c 监测设备

图 1 崩岗崩壁生草试验布置

Fig.1 Experimental layout of grass plantation on Benggang collapsing gully walls

表1 崩岗崩壁生草试验设计
Table 1 Experimental design of grass plantation on Benggang collapsing gully walls

处理	生草	对照
朝向	西北向	西北向
坡度	85°	85°
面积	115 m ²	300 m ²
植被	宽叶雀稗	少量芒萁
施肥	种植袋施立富有机肥料、种植穴施阿波罗复合肥	无
覆盖度	95%	5%

1.3 土壤水热动态监测

土壤水热动态监测采用山东仁科测控技术有限公司生产的RS485型土壤温湿度传感器。监测系统由太阳能供电板、土壤温湿度传感器、数据采集器、无线通讯模块和监测平台组成(图1c)。每个试验小区以崩壁的最高处(约700 cm)为起点,分别在生草处理区和对照的崩壁上部(150 cm)和下部(550 cm)安装土壤水分温度监测系统,探针安装深度距崩壁壁面10 cm,用于测量崩壁表面0—20 cm土层的水分和温度。

每个试验区分别布置2套监测系统,水平间距300 cm,探针在水平方向保持一致,传感器每60 min自动采集一次土壤温度和土壤质量含水率(g/kg)数据,并通过智能平台同步上传。为确保监测数据准

确性与稳定性,在系统安装初期通过烘干法校准传感器读数,待监测值稳定后正式开展数据采集。此外,借助气象站同步获取降水等气象要素,用于辅助分析土壤水热动态变化。2023年7月,分别在生草处理和对照区开始进行数据收集,选取2023年9月至2024年8月期间的监测数据,分析不同处理下土壤含水率和温度的变化特征。

1.4 土壤理化性质测定

2024年8月,根据土壤温湿度水分传感器探头的分布情况,分别在每个小区从上到下分2层进行土样采集。采样时选择崩壁较为平整的区域,采样深度为0—20 cm。采用环刀(直径50.46 mm,高50 mm)取原状土样品,并取混合样品测定土壤的基本理化性质。土壤容重采用环刀法测定。土壤质地方面,粒径大于0.25 mm的土壤颗粒采用筛分法进行分级,粒径小于0.25 mm的颗粒采用激光粒度分析仪(BT-9300 ST,丹东百特仪器有限公司)测定颗粒组成。土壤pH采用酸度计法测定,土水比为1:2.5。土壤全氮含量通过碳氮元素分析仪测定。土壤全磷采用盐酸-高氯酸(HCl-HClO₄)消解后,以钼锑抗比色法在分光光度计上测定。全钾采用氢氟酸-高氯酸消解后以火焰光度计法测定。碱解氮采用碱解扩散法测定。有效磷采用0.5 mol·L NaHCO₃浸提-钼锑抗显色分光光度法测定。速效钾采用1 mol/L NH₄OAc浸提-火焰光度计法测定。样地0—20 cm土壤的理化性质见表2。

表2 样地0—20 cm土壤基础理化性质

Table 2 Basic physicochemical properties of 0—20 cm soil layer in sample plots

处理	坡位	容重/ (g·cm ⁻³)	pH值	全氮/ (g·kg ⁻¹)	全磷/ (g·kg ⁻¹)	全钾/ (g·kg ⁻¹)	碱解氮/ (mg·kg ⁻¹)	有效磷/ (mg·kg ⁻¹)	速效钾/ (mg·kg ⁻¹)	颗粒分布/%		
										砂粒	粉粒	黏粒
对照	坡上	1.46	4.66	0.02	82.75	3.18	13.90	0.34	158.00	45.04	46.59	8.37
	坡下	1.52	4.53	0.02	85.75	5.42	26.00	0.49	104.00	61.37	34.75	3.88
生草	坡上	1.44	4.66	0.04	104.00	3.03	37.30	0.89	91.50	45.98	45.59	8.43
	坡下	1.50	4.45	0.03	88.00	5.37	22.80	0.91	77.40	69.43	27.89	2.68

1.5 时间稳定性分析

(1) 经典统计方法。为评估土壤水分的时间稳定性,本研究首先使用经典统计方法通过计算不同处理下崩壁土壤水分最大值(W_{max})、最小值(W_{min})、平均值(μ)、标准差(σ)和变异系数(coefficient of variation, C_v)等,定量描述边坡土壤水分时空特性,有利于初步描述土壤水分的变化特征。计算公式为

$$C_v = \frac{\sigma}{\mu} \times 100\% \quad (1)$$

式中: C_v 为变异系数; μ, σ 分别为崩壁土壤水分的平

均值和标准差。

(2) Spearman秩相关系数法。Spearman秩相关系数是一种非参数统计指标,主要用于衡量土壤水分分布格局的时间相关性,强调水分格局的保持性。该方法通过计算各监测点在不同时间的土壤含水率排名序列,判断各点是否在时间尺度上持续保持相对高或低的水分状态,从而反映其时序空间结构的稳定性。该指标适用于不同处理措施下对土壤水分时空变化规律的一致性分析,有助于揭示水分分布格局在时间维度上的相似性与稳定性^[19]。计算公式为

$$\rho = 1 - 6 \sum_{i=1}^N \frac{(R_{ij} - R_{il})^2}{N(N^2 - 1)} \quad (2)$$

式中: ρ 为Spearman秩相关系数; R_{ij}, R_{il} 分别为测点*i*土壤水分观测值按升序排列后时刻*j, l*对应的秩; N 为测点个数。 ρ 越接近于1,说明土壤水分分布在时间上越相似,时间稳定性越强。

(3) 相对差分法。相对差分法(relative difference method, RDM)用于衡量某个监测点在某时刻水分的偏离程度,通过计算各测点平均相对差分(mean relative difference, MRD)值来反映每个监测点的相对稳定性。MDR值表示该测点水分长期平均的“偏离方向”与“代表性”,越接近0,表示该点水分长期最接近群体平均值,即该监测点土壤水分“代表性好”;标准差是衡量每个点相对差异的波动性,即偏差的离散程度,标准差越小,表示水分变化越平稳,时间稳定性越强。因此,MRD及其标准差可共同用于刻画土壤水分的时间稳定性特征。测点*i*在观测时间*j*的土壤含水率相对差分 δ_{ij} 计算公式为^[19]

$$\delta_{ij} = \frac{\theta_{ij} - \bar{\theta}_j}{\bar{\theta}_j} \quad (3)$$

$$\bar{\theta}_j = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \theta_{ij} \quad (4)$$

式中: θ_{ij} 为点*i*在时间*j*下的土壤含水率; $\bar{\theta}_j$ 为时间*j*下所有测点土壤含水率的平均值。

测点*i*处的相对差分平均值 $\bar{\delta}_i$ 和相对差分标准差 $\sigma(\bar{\delta}_i)$ 的计算公式分别为

$$\bar{\delta}_i = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M \delta_{ij} \quad (5)$$

$$\sigma(\bar{\delta}_i) = \sqrt{\frac{1}{M-1} \sum_{j=1}^M (\delta_{ij} - \bar{\delta}_i)^2} \quad (6)$$

式中: M 为观测次数。

一般认为, δ_i 越接近于0,时间稳定性越高,该测点的土壤含水率越能代表坡体内部平均土壤水分含量水平。当 $\delta_i > 0$ 时,说明对应测点水分含量高于平均值,土壤处于较湿润状态;当 $\delta_i < 0$ 时,则处于较干燥状态。

(4) 时间稳定性指数。时间稳定性指数(index of time stability, ITS)是综合MDR和标准差的指标,ITS可同时反映某点土壤水分的长期代表性与短期波动性,是一种更为全面和客观的时间稳定性评价指标,可清晰识别出高稳定性代表点,用于评估土壤水分的整体时间稳定性。ITS越小,时间稳定性越强,其土壤含水率越能代表评估区域土壤含水率的

平均水平^[19]。其计算公式为

$$ITS = \sqrt{\bar{\delta}_i^2 + \sigma(\bar{\delta}_i)^2} \quad (7)$$

式中:ITS是综合MDR和标准差的指标,用于反映土壤水分的长期代表性与短期波动性; $\bar{\delta}_i$ 为观测点*i*的土壤含水率相对差分平均值; $\sigma(\bar{\delta}_i)$ 为观测点*i*的土壤含水率相对差分标准差。

1.6 数据处理

本研究中所有试验数据均采用Microsoft Excel 2016进行整理,将每天每小时测得的24组数据取平均,计算得出日均值。土壤温度和水分数据均以日均值为基础,用于年际动态变化的分析与描述,并利用SPSS软件对数据统计分析,采用单因素方差分析进行差异显著性检验,显著性水平设定为 $p=0.05$ 。文中数据图均采用Origin 2021绘制。

2 结果与分析

2.1 生草处理对土壤温度的影响

崩壁土壤(日均)温度呈典型的单峰型波动特征,且生草处理与对照均表现出明显的季节性变化(图2)。宽叶雀稗作为主要的生态修复植物,其生长旺盛期集中在每年4—10月,11月至翌年3月进入休眠期。图2表明,宽叶雀稗旺盛生长的7月和8月份,坡上生草区土壤温度分别为28.62℃和28.12℃,分别较对照区低0.80℃和0.98℃;坡下9月温度为26.68℃,显著低于对照区的28.71℃,降幅达2.03℃。在冬季休眠期(12月至翌年2月),生草措施对土壤温度的调节效应减弱,但仍普遍低于对照区。如1月坡上生草为13.57℃,低于对照区的15.34℃,坡下为12.86℃,低于对照区的13.23℃。综合全年变化趋势可见,生草措施在夏季有效缓解崩壁土壤高温压力,在冬季亦具一定降温效应,有利于提升坡面热环境稳定性,发挥了植被在调节土壤热动态中的生态功能。

测定结果(表3)表明,2023年9月至2024年8月,生草处理与对照的年均土壤温度及极端温度范围存在显著差异。其中,坡上生草处理的年平均土壤温度为21.28℃,较对照(22.53℃)低1.25℃;坡下生草处理的年平均土壤温度为20.58℃,较对照(21.98℃)低1.40℃。整体来看,生草处理下崩壁土壤的年平均温度显著低于同坡位对照区崩壁土壤。且在同一处理措施下,坡上土壤温度始终高于坡下。此外,生草处理有效降低了土壤温度的极端波动范围,表现出更稳定的土壤热环境。坡上生草处理的极端温度范围为5.84℃(2024年1月)~29.60℃(2024年9月),

而对照区坡上为 6.58 °C(2024 年 1 月)~31.90 °C(2024 年 9 月),说明生草处理可有效降低土壤温度的最高值。在坡下区域,生草处理的极端温度范围为 6.50 °C(2024 年 1 月)~28.45 °C(2024 年 9 月),而对照区坡下为 5.25 °C(2024 年 1 月)~31.61 °C(2024 年 9 月),表明植被覆盖能有效缓解土壤温度的波动,进一步验证了生草措施的热稳定作用。从温度变化幅度来看,一年中,生草处理坡上土壤温度变化幅度为 23.76 °C,坡下为 21.95 °C,均小于对照区坡上的 25.32 °C和坡下的 26.36 °C,表明生草措施不仅降低了夏季崩壁表层土壤温度,还提高了冬季土壤平均温

度,显著增强了土壤温度的稳定性,有利于坡面生态环境的维持和改善。

表 3 生草处理下土壤平均温度统计特征值
Table 3 Statistical characteristics of average soil temperature under grass-growing treatments

处理	坡位	样本数	均值/ °C	极小值/ °C	极大值/ °C	变化 幅度/°C
生草	坡上	366	21.28 ^{bc}	5.84	29.60	23.76
	坡下	366	20.58 ^c	6.50	28.45	21.95
对照	坡上	366	22.53 ^a	6.58	31.90	25.32
	坡下	366	21.98 ^{ab}	5.25	31.61	26.36

注:不同字母表示同一深度不同处理间差异性显著, $p < 0.05$ 。

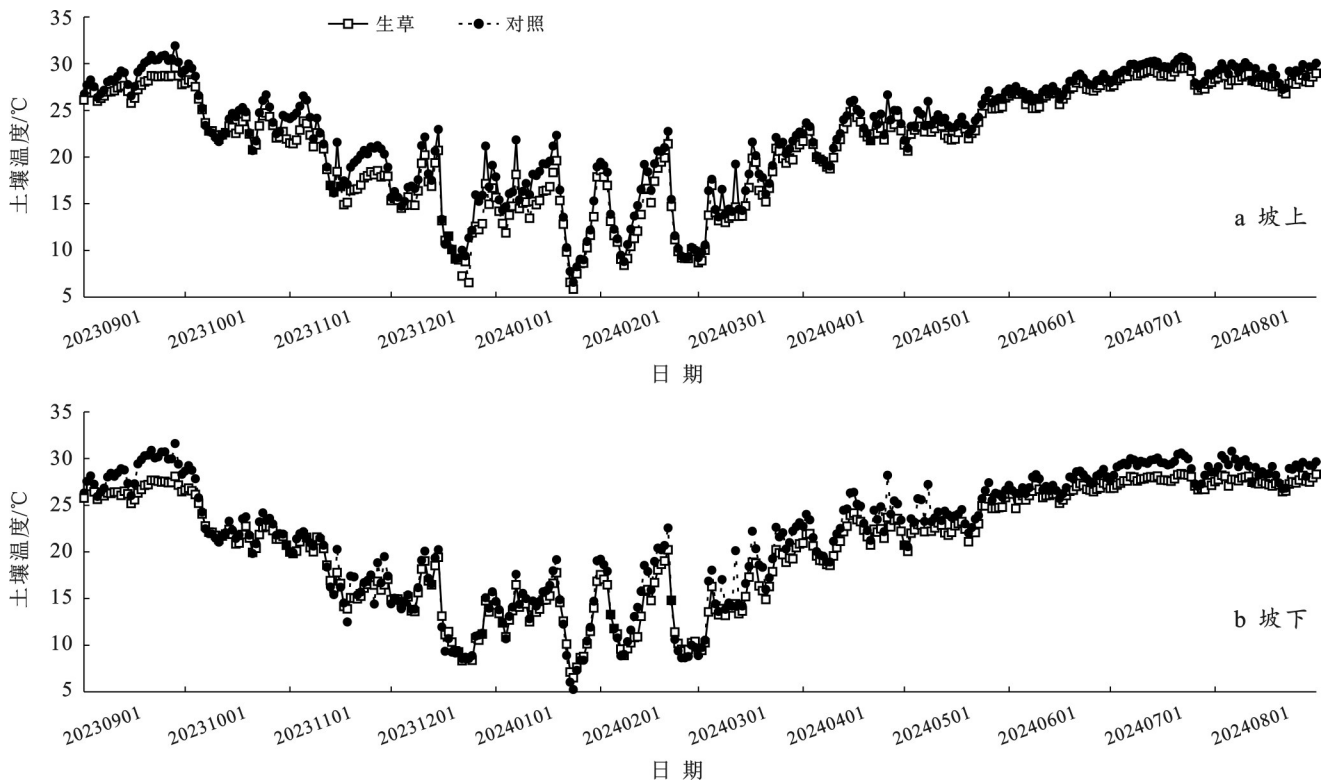


图 2 生草处理 0—20 cm 土层土壤温度动态变化特征

Fig.2 Dynamic variation characteristics of soil temperature under grass-growing treatments at 0—20 cm layer

2.2 生草处理对土壤水分时空动态的影响

从图 3 可以看出,崩壁土壤水分均呈现出明显的时间动态特性,土壤含水率呈现波峰波谷交替出现的现象,生草处理显著提升了土壤含水率及其对降雨的响应能力。图 3a 表明,2023 年 9 月至 2024 年 2 月(旱季),坡上 0—20 cm 土层生草处理与对照的崩壁坡上土壤含水率差异较小,仅相差 2.12 g/kg。然而,2024 年 3—8 月(雨季)期间,受累计降雨量(882 mm)和气温回升的影响,生草处理的土壤含水率显著上升,而对照区含水率仍保持相对平稳。2024 年 8 月 31 日,生草处理的土壤含水率达 23.46 g/kg,显著高于对照(14.06 g/kg),且波动幅度更大,表明植被覆

盖增强了土壤对降水的响应能力。

坡下 0—20 cm 土层土壤含水率变化(图 3b)与坡上趋势相似,但生草处理的含水率长期维持在 20~35 g/kg,显著高于对照处理(5~20 g/kg)。在整个监测周期内,生草处理下土壤含水率整体较高,且对降雨的响应更为显著,表明宽叶雀稗的覆盖增强了土壤对降雨的拦蓄作用,并使得不同季节土壤含水率的变化更加明显。在旱季(2023 年 9 月至 2024 年 2 月),生草处理土壤含水率为 11.48~25.21 g/kg,而对照仅 7.40~17.13 g/kg,二者相差 4.00~8.08 g/kg。进入雨季后(2024 年 3—8 月),生草处理的土壤含水率迅速上升至 20.08~35.12 g/kg,而对照处理最高仅

19.09 g/kg。值得注意的是,2024年6—8月的多次降雨后,生草处理的土壤含水率迅速上升10.15~15.26 g/kg并维持较长时间,而对照处理回升较慢且

回落更快。以上结果表明,宽叶雀稗覆盖不仅提高了土壤含水率,还增强了其对降雨的响应与调蓄能力,有助于改善土壤水分状况。

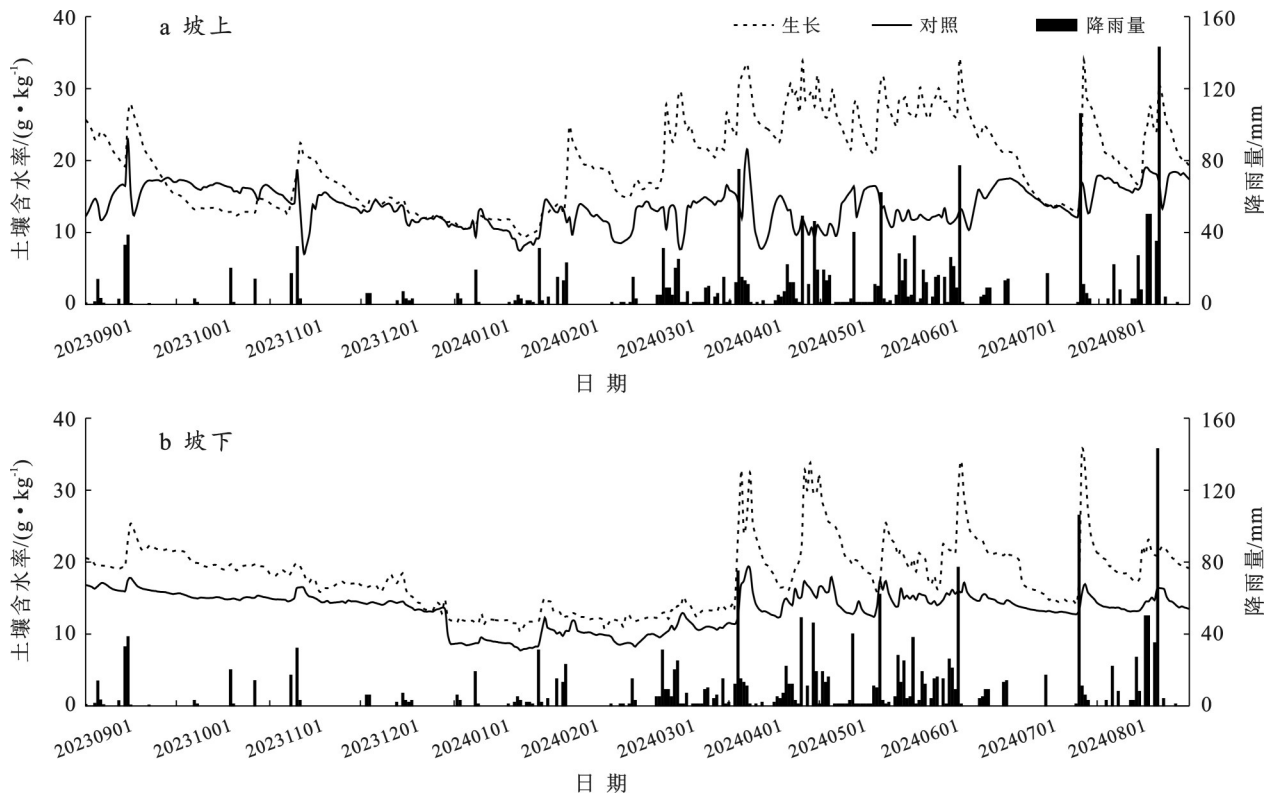


图3 生草处理0—20 cm土层土壤水分动态变化特征

Fig.3 Dynamic variation characteristics of soil moisture under grass-growing treatments at 0—20 cm layer

数据分析表明,坡上生草处理的土壤平均含水率为19.53 g/kg,显著高于对照的13.72 g/kg,增幅达42.34%;坡下生草处理的土壤平均含水率为18.00 g/kg,显著高于对照的13.45 g/kg,增幅达33.83(表4)。此外,生草处理的土壤水分变异性更大,水分动态变化更为显著,生草处理的变异系数在坡上为31.14%,坡下为26.25%,均高于对照区(坡上19.69%,坡下18.71%)。

种植宽叶雀稗,使得土壤水分来源更加稳定,含水率波动较小。极值分析显示,生草处理极大值(坡上34.20 g/kg,坡下35.74 g/kg)显著高于对照(坡上22.95 g/kg,坡下19.09 g/kg),同时极小值(坡上9.26%,坡下10.27%)也高于对照(坡上7.46%,坡下7.71%),表明植被覆盖不仅提高了土壤的最大持水能力,还缓解了低水分胁迫,增强了土壤水分时空变异性及其对降雨事件的响应能力。

表4 生草处理水分统计特征值

Table 4 Statistical characteristics of soil moisture under grass-growing treatment

处理	坡位	样本数	均值/(g·kg ⁻¹)	极小值/(g·kg ⁻¹)	极大值/(g·kg ⁻¹)	变异系数/%
生草	坡上	366	19.53 ^a	9.26	34.20	31.14
	坡下	366	18.00 ^b	10.27	35.74	26.25
对照	坡上	366	13.72 ^c	7.46	22.95	19.69
	坡下	366	13.45 ^c	7.71	19.09	18.71

注:不同字母表示同一坡位不同处理间差异显著($p < 0.05$)。

2.3 生草处理下土壤水分时间稳定性分析

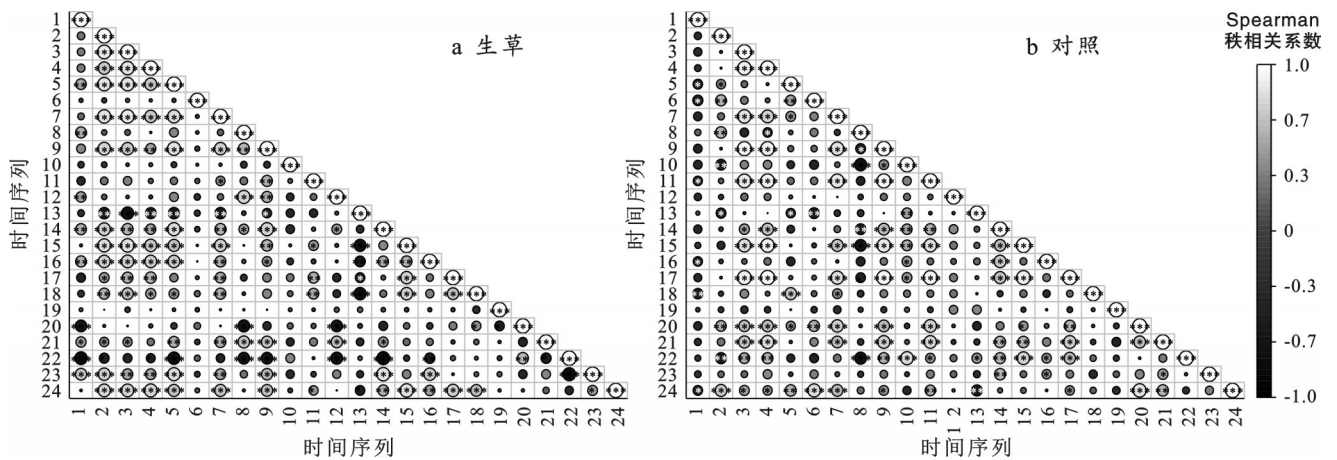
对照与生草处理下的土壤含水率 Spearman 秩相关系数(ρ)均存在时间相关性,但二者差异显著。生

草处理的崩壁 ρ 值变化范围(-0.77~1,均值0.41)明显高于对照处理(-0.72~0.84,均值0.18)。图4a为生草处理下崩壁土壤含水率的 Spearman 秩相关系

数,可以看出,其整体趋势呈现出旱季土壤水分分布的相似性较雨季更弱,时间序列1—12(2023年9月至2024年2月,旱季)的相关系数普遍较低(如2023年9月15日与2023年9月30日, $\rho=0.29$),而时间序列13—24(2024年3月8日,雨季)的 ρ 值显著升高(如2024年3月15日与2024年3月30日的 $\rho=0.76$),表明旱季崩壁的土壤水分分布相似性较弱,雨季水分分布更稳定。生草处理下高稳定性时段为2024年3月至2024年6月($\rho>0.7$),与宽叶雀稗生长旺季吻合,根系网络稳定了水分分布;低稳定性时段为2023年12月至2024年2月($\rho<0.3$),冬季植物处于休眠阶

段,水分动态主要受气温影响。

对照(图4b)的 ρ 值波动更为剧烈,尤其在旱季出现为负值(如2023年11月15日与2023年11月30日, $\rho=-0.51$),表明干旱条件下水分分布的随机性增强。雨季对照的 ρ 均值(0.45)仍低于生草处理(0.62),且全年无稳定期(ρ 值波动范围为 $-0.52\sim 0.84$),说明无植被覆盖时土壤水分格局易受降雨和蒸发等环境因素直接干扰,因此,对照的土壤水分随机性增强。雨季生草处理的 ρ 均值(0.62)高于对照(0.45),表明生草处理下土壤水分格局在不同时间之间的变化更为规律。



注:图4中时间序列1—12依次代表2023年9月15日、9月30日、10月15日、10月30日、11月15日、11月30日、12月15日和12月30日,2024年1月15日、1月30日、2月15日、2月29日;时间序列13—24依次代表2024年3月15日、3月30日、4月15日、4月30日、5月15日、5月30日、6月15日、6月30日、7月15日、7月30日、8月15日和8月30日。

图4 不同测定时间对土壤含水率Spearman秩相关系数

Fig.4 Spearman's rank correlation coefficients of soil moisture content between different measurement times

由表5可知,在生草处理条件下,坡上MDR均值为19.27%,显著高于对照(-13.43%),表明植被覆盖增强了土壤水分的日变化幅度。对照区坡下MDR均值为-16.32%,其整体变化幅度仍小于生草处理,进一步证实植被覆盖对土壤水分日变化具有增强作用。同时,生草处理下的MDR标准差为22.57%,高于对照的16.05%,说明生草处理不仅水分日变化幅度较大,其波动性也更强。相比之下,同坡位对照区的MDR标准差较低,表明对照区土壤水分变化相对稳定。总体而言,生草处理下土壤水分变化更为剧烈且波动性更大,体现了植被对水分动态的重要调节作用,而对照区土壤水分更易流失且储存能力较弱。在时间稳定性方面,生草处理的ITS值为29.68%,高于对照的20.93%,表明植被覆盖降低了土壤水分的时间稳定性,使水分变化更具波动性。对照的ITS值较低,说明其水分随时间波动较小,长期稳定性较高。较低的ITS值进一步证实生草处理增加了水分在时间尺度上的不稳定性,而对照的低

ITS值则意味着其水分时间稳定性较高。这些结果共同表明,植被覆盖虽然增强了土壤水分含量,但也降低了其时间稳定性。

表5 土壤含水率的时间稳定性分析
Table 5 Analysis results of temporal stability of soil moisture content

处理措施	坡位	MRD 均值/%	MRD 标准差/%	ITS/%
生草	坡上	19.27	22.57	29.68
	坡下	10.48	12.47	16.29
对照	坡上	-13.43	16.05	20.93
	坡下	-16.32	9.33	18.80

3 讨论

本研究表明,在植被覆盖、太阳辐射及土壤水分的共同影响下,崩壁土壤温度呈现显著的时空动态特征。宽叶雀稗种植在调控崩壁表层土壤温度方面

效果显著。它通过冠层遮挡太阳辐射、蒸腾散热及提高土壤含水量等多重机制,使坡上和坡下土壤温度分别下降了 1.25 °C 和 1.39 °C。其中,植被冠层有效削弱地表热量输入,显著抑制白天温升,并减缓夜间热量散失,从而改变了土壤热量传输规律,降低了热传导强度,进而稳定了土壤温度的日变化波动^[20]。此外,较高的含水率增强了土壤热容量,有效缓冲温度剧烈变化。随着季节更替,植被生长状况与土壤水分共同影响土壤温度调控机制,植被旺盛期,遮荫与蒸腾作用增强,温度调节能力提升;而植物休眠期,温度波动加剧,降雨和环境温度则成为主导因子^[21]。因此,种植宽叶雀稗能够显著降低夏季崩壁表层土壤温度并提升其冬季温度,降低崩壁土壤温度变化幅度,显著增强土壤温度的稳定性。

本研究表明,宽叶雀稗种植显著提高了崩壁表层(0—20 cm)土壤水分含量,坡上和坡下的生草处理较对照分别增加了 42.34% 和 33.80%。这一结果表明,在强干扰的崩岗坡面上,植被恢复有助于改善土壤水分状况。这是因为植物茎叶对降雨拦截作用可减弱雨滴对土壤结构的破坏,延长降水入渗时间;同时,根系活动改变了毛管水的再分布模式,有助于提高水分的下渗与滞留效率,从而增强土壤在干旱条件下的供水能力^[22]。本研究在前人研究的基础上,进一步印证了植被对土壤水分过程的综合调控作用,突显出宽叶雀稗在崩壁恶劣环境中改善土壤水分状况的应用潜力。已有研究指出,植被冠层能通过削弱太阳辐射强度,降低地表温度以及减少土壤水分蒸发等方式有效提升土壤含水量^[23]。本研究发现,相较于对照,生草处理下土壤水分的日变化幅度和空间变异程度显著增大。这一现象可能与宽叶雀稗根系发达、水分吸收能力强以及叶片蒸腾作用旺盛等生理生态特性有关^[16]。尽管它增强了水分获取能力,但同时也加速了水分消耗,导致土壤水分波动性增强。从空间分布看,年均土壤含水率呈现出:生草(坡下) > 生草(坡上) > 对照(坡下) > 对照(坡上)的格局。这一空间异质性主要受重力驱动的水分再分配过程影响,坡下区域由于接受坡上来水补给,滞水时间更长,从而维持了较高的含水率。

本研究采用 Spearman 秩相关系数(ρ)、平均相对差分(MDR)和时间稳定性指数(ITS)3 项指标对土壤水分的时间稳定性进行评估^[24]。结果显示,生草处理的平均 ρ 值为 0.41,显著高于对照(0.18),表明生草下 0—20 cm 土层土壤水分在时间序列中的空间分布趋势更为一致。相反,对照区由于缺乏植被调控,水分输入输出高度依赖降雨的随机性,其 ρ 值偏

低^[25]。进一步分析表明,生草处理的 MDR 绝对值均值(2.48%)和标准差(13.24%)均显著高于对照(分别为 1.02% 和 10.75%),其 ITS 值亦高于对照(13.47% 和 10.80%)。这些指标综合反映出生草处理下土壤水分在短期与长期尺度上波动性更强,时间稳定性相对较弱。相关研究^[26]表明,植被覆盖的变化会显著降低土壤水分的时间稳定性,表现为植被覆盖会加剧土壤水分动态变化,其潜在机制在于植被根系吸水与叶片蒸腾。宽叶雀稗根系发达,对土层水分的吸收形成较明显的根际耗水带,在不同生长时期,水分利用强度差异显著,生长季节具有较强的蒸腾耗水能力,从而表现为土壤水分的短期波动性增强;宽叶雀稗覆盖后,改善了土壤结构,增加了土壤孔隙度,提高了降雨的入渗速率,使得土壤水分对降雨事件的响应更迅速、更显著,增强了水分的时空异质性^[19]。相比之下,对照的崩壁水分变化主要受降雨和蒸发等气象因子驱动,动态过程较为简单和平稳。尽管生草处理未提升土壤水分的时间稳定性,但其通过增加土壤水分总量,改善入渗和拦蓄作用,依然对土壤水分调节和生态恢复起到了积极的作用。本研究中,对照在干旱期和高温期土壤含水率偏低,部分时段含水量低于 10%。相关研究表明^[27],边坡植被重建初期,需把土壤水分维持在 8.4%~10.8%(即田间持水量的 38%~49%),才能保证植物正常生育生长,若低于该阈值,植物根系吸水受限,难以维持正常的生命活动。另有研究指出,当土壤含水率升高至 12% 时,将对植物生长和土壤营养状况的改善产生显著的激发效应^[28]。因此,对照的崩壁在缺乏植被保护的条件下,其浅层土壤含水率可能已接近或低于生态恢复的下限,难以满足植物建植与自然演替的基本水分条件,严重制约了植被的恢复进程。相比之下,生草处理通过提升土壤保水能力与改善水分分布格局,为生态系统恢复提供了重要支撑。在理解生态系统水分稳定性时,应同时关注平均含水量的提高与时序波动的加强两种机制,并综合考虑植被类型、根系分布与地形因素对水分动态的综合影响。

本研究中,生草处理下土壤含水率的提高为植被建植提供了持续的水分来源,尤其在红壤丘陵区,降雨时空分布不均,水分易流失,生草处理通过减少地表径流、增强入渗,显著提高土壤蓄水能力,为根系发育与植物生理活动创造有利条件^[29]。另一方面,生草处理降低了土壤温度及其昼夜波动幅度,尤其在夏季高温期,具备显著的降温效应。温度的降低不仅减缓了水分蒸发,同时有助于种子萌发、根系伸展及微生

物活动。相比之下,对照区由于缺乏植被庇护,土壤水分偏低,温度波动剧烈,不利于种子萌发、植物生长及微生物活动,形成恶性循环,阻碍生态系统的自然恢复。总之,生草处理通过综合改善土壤水热条件,有效提升了区域生态环境质量,并为后续多物种共存与多层次群落重建奠定了坚实基础。

4 结论

(1) 生草处理由于较高的植被覆盖度,降低了夏季崩壁土壤温度,提高了冬季土壤温度,显著增强了土壤温度稳定性。

(2) 生草处理显著提高了崩壁土壤含水率,宽叶雀稗有助于增强降雨水分的入渗与蓄积,土壤水分变化幅度与变异程度均显著增大,促进了土壤水分的动态运移。

(3) 植被干扰了土壤水分原有分布格局,显著增强了水分的时空异质性,表现出较低的时间稳定性。

综上所述,生草处理在改善崩壁土壤水热条件方面具有积极作用。本研究亦存在一定局限性,土壤监测主要集中于0—20 cm表层,未能深入揭示更深土层水热传输与根系分布间的耦合关系;研究区仅限于单一典型崩壁样区,空间代表性尚有限,未来研究可进一步结合多年连续监测与多指标综合评估,深入探讨不同气候年型下宽叶雀稗的水热调节效应稳定性,及其根系发育与土壤结构演变的协同机制,综合判定崩壁水热格局的长期稳定性与生态恢复的持续性之间的关系,从而为南方崩岗区的生态修复提供理论支撑。

参考文献 (References)

- [1] 邓羽松,蔡崇法.红壤丘陵区崩岗侵蚀调查与监测防治技术进展[J].土壤学报,2025,62(2):322-333.
Deng Yusong, Cai Chongfa. Progress of survey, monitoring, and control technology of Benggang erosion in red soil hilly area [J]. Acta Pedologica Sinica, 2025, 62(2): 322-333.
- [2] 廖义善,唐常源,袁再健,等.南方红壤区崩岗侵蚀及其防治研究进展[J].土壤学报,2018,55(6):1297-1312.
Liao Yishan, Tang Changyuan, Yuan Zaijian, et al. Research progress on Benggang erosion and its prevention measure in red soil region of southern China [J]. Acta Pedologica Sinica, 2018, 55(6): 1297-1312.
- [3] Liao Yishan, Yuan Zaijian, Zheng Mingguo, et al. The spatial distribution of Benggang and the factors that influence it [J]. Land Degradation & Development, 2019, 30(18):2323-2335.
- [4] 杨婷,陈晓冰,许昊,等.辣椒根系影响下的农地土壤水分空间运动分异特征[J].农业工程学报,2023,39(13): 141-150.
- [5] Yang Ting, Chen Xiaobing, Xu Hao, et al. Influence of pepper roots on the spatial movement differentiation of soil moisture in farmland [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2023, 39(13): 141-150.
- [6] 甘菲菲,招礼军,霍灿灿,等.光照和水分对四季米仔兰幼苗生长的影响[J].应用生态学报,2024,35(2):439-446.
Gan Feifei, Zhao Lijun, Huo Cancan, et al. Effects of light and water availability on the growth of *Aglaia duperreana* seedlings [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2024, 35(2): 439-446.
- [7] 王博,段玉玺,王伟峰,等.人工固沙区植被演替过程中土壤水分时空分异特征[J].干旱区研究,2020,37(4): 881-889.
Wang Bo, Duan Yuxi, Wang Weifeng, et al. Spatial and temporal variability of soil moisture content during vegetation succession in sand-binding areas [J]. Arid Zone Research, 2020, 37(4): 881-889.
- [8] 武泽宇,薛亮,张显松,等.喀斯特白云岩坡地旱季不同植被类型土壤水分空间变异性[J].林业科学研究, 2021, 34(4): 74-83.
Wu Zeyu, Xue Liang, Zhang Xiansong, et al. Spatial variability of soil moisture under typical vegetation types on karst dolomite slope in dry season [J]. Forest Research, 2021, 34(4): 74-83.
- [9] Zhang Yue, Zhao Dongfeng, Lin Jinshi, et al. Impacts of collapsing gullies on the dynamics of soil organic carbon in the red soil hilly region of southeast China [J]. Catena, 2020, 190: 104547.
- [10] 杜文志,陈超群,庞学勇,等.我国道路边坡植被修复的研究进展[J].应用生态学报,2023,34(12):3437-3446.
Du Wenzhi, Chen Chaoqun, Pang Xueyong, et al. Research progress on vegetation restoration of road slopes in China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2023, 34(12): 3437-3446.
- [11] 蒋涛,郑文革,余新晓,等.北京山区干旱胁迫下侧柏叶片水分吸收策略[J].生态学报,2022,42(4):1429-1440.
Jiang Tao, Zheng Wenge, Yu Xinxiao, et al. Leaf water absorption of *Platycladus orientalis* under drought stress in Beijing [J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(4): 1429-1440.
- [12] 赵富贵,张龙,李丹,等.不同气候年型下耕作覆盖对宁南旱区土壤水热及马铃薯产量的影响[J].作物学报, 2023, 49(10): 2806-2819.
Zhao Fugui, Zhang Long, Li Dan, et al. Effects of tillage with mulching on soil water and temperature and potato yield on the dry farmland of southern Ningxia under different climate year types [J]. Acta Agronomica Sinica, 2023, 49(10): 2806-2819.

- [12] 王英宇. 公路石质边坡喷播绿化植被的降雨、灌溉水分分配特征[J]. 水土保持学报, 2018, 32(4):128-132.
Wang Yingyu. Water distribution characteristics of highway slope greening under irrigation and rainfall conditions [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2018, 32(4):128-132.
- [13] 奚成刚, 王亮, 倪栋, 等. 黄土区公路边坡土壤水分空间分布特性[J]. 公路交通科技, 2019, 36(5):36-42.
Xi Chenggang, Wang Liang, Ni Dong, et al. Spatial distribution characteristics of soil moisture of highway slope in loess area [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2019, 36(5):36-42.
- [14] 李裕元, 邵明安. 黄土高原北部紫花苜蓿草地退化过程与植物多样性研究[J]. 应用生态学报, 2005, 16(12):2321-2327.
Li Yuyuan, Shao Mingan. Degradation process and plant diversity of alfalfa grassland in north Loess Plateau of China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2005, 16(12):2321-2327.
- [15] 王中琦, 汤晓迪, 杜康, 等. 黄土塬区不同土地利用方式10 m剖面土壤水分年际和季节动态特征[J]. 生态学报, 2024, 44(20):9329-9341.
Wang Zhongqi, Tang Xiaodi, Du Kang, et al. Annual-seasonal dynamics of soil water content in 10 m soil profiles under different land use types in the Loess Tableland region [J]. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(20):9329-9341.
- [16] 何恺文, 黄炎和, 蒋芳市, 等. 2种草本植物根系对长汀县崩岗洪积扇土壤水分状况的影响[J]. 中国水土保持科学, 2017, 15(4):25-34.
He Kaiwen, Huang Yanhe, Jiang Fangshi, et al. Effects of two types of herb plants' roots on soil moisture in the alluvial soil in Changting County [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2017, 15(4):25-34.
- [17] 刘源, 田杰, 王水献. 祁连山草地坡面土壤水时空动态及时间稳定性[J]. 高原气象, 2024, 43(5):1249-1258.
Liu Yuan, Tian Jie, Wang Shuixian. Spatiotemporal dynamics and temporal stability of soil moisture on grassland slopes in Qilian Mountains [J]. Plateau Meteorology, 2024, 43(5):1249-1258.
- [18] 吴菲, 李典云, 夏栋, 等. 中国南方花岗岩崩岗综合治理模式研究[J]. 湖北农业科学, 2016, 55(16):4081-4084.
Wu Fei, Li Dianyun, Xia Dong, et al. Summary of comprehensive governance patterns of granite collapsing gully in southern China [J]. Hubei Agricultural Sciences, 2016, 55(16):4081-4084.
- [19] 周鑫隆, 胡开梦, 顾凯, 等. 植被护坡作用下边坡土壤水分时间稳定性研究[J]. 岩土工程学报, 2023, 45(11):2357-2366.
Zhou Xinlong, Hu Kaimeng, Gu Kai, et al. Temporal stability of soil moisture under slope protection by vegetation [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2023, 45(11):2357-2366.
- [20] 校亮, 熊东红, 张宝军, 等. 葛藤覆被下干热河谷冲沟沟岸土壤水热变化特征[J]. 生态学报, 2018, 38(2):646-656.
Xiao Liang, Xiong Donghong, Zhang Baojun, et al. Effect of kudzu coverage on soil moisture and temperature in the gully bank of the dry-hot valley region [J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(2):646-656.
- [21] 王俊, 郭金龙, 张永旺, 等. 黄土高原自然植被恢复过程中土壤温度和水分的相关性[J]. 水土保持学报, 2022, 36(2):130-137.
Wang Jun, Guo Jinlong, Zhang Yongwang, et al. The correlation between soil temperature and water content during the natural vegetation restoration on the Loess Plateau [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022, 36(2):130-137.
- [22] 任鸿武, 汪星, 吕雯, 等. 宁南黄土丘陵区人工柠条林与苜蓿地土壤水分特征[J]. 水土保持研究, 2025, 32(2):158-166.
Ren Hongwu, Wang Xing, Lü Wen, et al. Soil moisture characteristics of artificial *Caragana korshinskii* Kom. woodland and *Medicago sativa* L. field in loess hilly area of southern Ningxia [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2025, 32(2):158-166.
- [23] 曹艳, 刘峰, 包蕊, 等. 西南丘陵山区坡耕地植物篱水土保持效益研究进展[J]. 水土保持学报, 2017, 31(4):57-63.
Cao Yan, Liu Feng, Bao Rui, et al. Soil and water conservation benefits of hedgerows in sloping cropland in hilly region of southwest China: A review [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2017, 31(4):57-63.
- [24] 单玉琳, 解建仓, 韩霁昌, 等. 黄土高原坡面土壤水分特征及时间稳定性: 以延安市九龙泉沟为例[J]. 中国水土保持科学(中英文), 2021, 19(6):1-7.
Shan Yulin, Xie Jiancang, Han Jichang, et al. Soil moisture characteristics and temporal stability on the slope of the Loess Plateau: A case study of Jiulongquan ditch in Yan'an City [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2021, 19(6):1-7.
- [25] 刘泽彬, 王彦辉, 徐丽宏, 等. 六盘山华北落叶松林坡面的土壤水分时间稳定性[J]. 水土保持学报, 2017, 31(1):153-159.
Liu Zebin, Wang Yanhui, Xu Lihong, et al. Temporal stability of soil moisture on a slope covered by *Larix principis-rupprechtii* plantation in liupan mountains [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2017, 31(1):153-159.