

DOI:10.13870/j.cnki.stbcb.2026.01.040 CSTR:32310.14.stbcb.2026.01.040

曾益斌, 罗为群, 张谭锋, 等. 岩溶发育程度对水土漏失的非线性响应[J]. 水土保持学报, 2026, 40(1): 363-372.

ZENG Yibin, LUO Wei-qun, ZHANG Tan-feng, et al. Nonlinear response of water and soil leakage to karst development degree[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2026, 40(1): 363-372.

岩溶发育程度对水土漏失的非线性响应

曾益斌^{1,2,3}, 罗为群^{2,3}, 张谭锋^{2,3}, 李航^{2,3}, 陈雅祺^{2,3}, 肖桂元¹, 覃家鸿^{1,2,3}

(1. 桂林理工大学土木工程学院, 广西 桂林 541004; 2. 广西平果喀斯特生态系统国家野外科学观测研究站, 百色平果喀斯特生态系统广西野外科学观测研究站, 广西 平果 531406; 3. 中国地质科学院岩溶地质研究所, 自然资源部, 广西岩溶动力学重点实验室, 联合国教科文组织国际岩溶研究中心, 广西 桂林 541004)

摘要: [目的] 为揭示岩溶发育程度对水土漏失的影响规律, 完善水土漏失侵蚀机制理论。 [方法] 通过原位岩石三维模型箱进行控制性模拟试验, 分别设置5种人工调控岩溶率(2%、9%、15%、20%、30%)和模拟3种降雨量(中雨25 mm、大雨40 mm、暴雨70 mm), 定量分析岩溶不同发育程度对地下水土漏失量的影响及探究漏失过程的响应规律。 [结果] 1) 岩溶内部空隙介质发育程度是影响水土漏失的重要因素, 岩溶率与地下漏失总量呈正相关($R^2=0.86, p<0.01$), 随雨强增加, 正相关性越强。 2) 受岩溶内部空隙介质发育程度的影响, 漏失总量与岩溶率间为指数关系, 拟合度高($R^2>0.9$)。 3) 泥沙漏失量与岩溶率为3次函数增长曲线, 在3种降雨漏失曲线下均存在最低点, 且15%~20%岩溶率间的泥沙漏失量最少。 4) 岩溶空隙介质的贯通度、长度、斜交通道数量等多种因素共同影响着水土流失过程。在3种雨强条件下均出现漏失量的最低值: 中雨时, 岩溶率为9%, 漏失量为11.05 L; 大雨和暴雨时, 岩溶率为15%, 漏失量分别为10.82和24.22 L。漏失量表现出显著的非线性特征。 [结论] 岩溶发育程度与水土漏失呈非线性关系, 并受降雨强度的协同影响。随着岩溶率增加, 漏失总量呈指数级上升, 泥沙漏失表现出“最优岩溶率”值的存在。当降雨强度加剧时, 水土漏失尤为明显, 尤其在高岩溶率区域更为突出。本研究结果为岩溶地区的水土漏失风险评估及防治措施提供理论依据, 并为相关区域的水土流失预测与防控策略的制定提供重要参考。

关键词: 水土漏失; 岩溶发育程度; 最优岩溶率; 非线性响应; 岩溶三维空隙介质模型

中图分类号: S157.1 文献标识码: A 文章编号: 1009-2242(2026)01-0363-10

Nonlinear Response of Water and Soil Leakage to Karst Development Degree

ZENG Yibin^{1,2,3}, LUO Wei-qun^{2,3}, ZHANG Tan-feng^{2,3}, LI Hang^{2,3},
CHEN Ya-qi^{2,3}, XIAO Gui-yuan¹, QIN Jia-hong^{1,2,3}

(1. School of Civil Engineering, Guilin University of Technology, Guilin, Guangxi 541004, China; 2. Guangxi Pingguo Karst Ecosystem National Field Observation and Research Station, Baise Pingguo Karst Ecosystem Guangxi Field Observation and Research Station, Pingguo 531406, Guangxi, China; 3. Institute of Karst Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Key Laboratory of Karst Dynamics, Ministry of Natural Resources, Guangxi, International Research Center on Karst under the Auspices of United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, Guilin 541004, Guangxi, China)

Abstract: [Objective] To reveal the influence patterns of karst development degree on soil and water leakage and to improve the theory of erosion mechanisms of soil and water leakage. [Methods] Controlled simulation experiments were conducted using an in-situ three-dimensional rock model box. Five artificially regulated karst rates (2%, 9%, 15%, 20%, 30%) and three types of rainfall (moderate rain: 25 mm, heavy rain: 40 mm, and torrential rain: 70 mm) were established to quantitatively analyze the impact of different karst development degrees on subsurface soil and water leakage and explore the response patterns during the leakage process.

收稿日期: 2025-10-16 修回日期: 2025-11-04 录用日期: 2025-11-15 网络首发日期 (www.cnki.net): 2025-11-21

资助项目: 国家重点研发计划项目(2022YFF1300702); 桂林市重大专项计划项目(20220102-1); 广西平果喀斯特生态系统国家野外科学观测研究专项; 中国地质调查局基本科研业务费项目(2023021); 中国地质调查局地质调查项目(DD20221820)

第一作者: 曾益斌(1999—), 男, 硕士研究生, 主要从事岩溶水土资源调控利用与生态修复研究。E-mail: 2987575158@qq.com

通信作者: 罗为群(1980—), 男, 硕士, 研究员, 主要从事岩溶生态修复与水土资源调控利用研究。E-mail: 125639802@qq.com

http://stbcb.alljournal.com.cn

[**Results**] 1) The development degree of internal void media in karst was a crucial factor influencing soil and water leakage, with karst rate showing a significant positive correlation with total subsurface leakage ($R^2=0.86$, $p<0.01$). This correlation became more pronounced with increasing rainfall intensity. 2) Influenced by the development degree of internal pore media in karst formations, the total leakage and the karst rate had an exponential relationship, showing a high goodness-of-fit ($R^2>0.9$). 3) The sediment leakage and karst rate followed a cubic growth curve. Under the three rainfall loss curves, a minimum point existed. The sediment leakage was lowest when the karst rate was between 15% and 20%. 4) Multiple factors such as the connectivity, length, and the number of oblique intersection channels of karst pore media collectively influenced the process of soil and water leakage. Under three rainfall intensity conditions, minimum soil and water leakage values were observed. For moderate rain, the karst rate was 9% with a leakage of 11.05 L, while under heavy and storm rainfall intensities at 15% karst rate, the leakage measured 10.82 L and 24.22 L, respectively. The leakage demonstrated significant nonlinear characteristics. [**Conclusion**] The relationship between karst development degree and soil and water leakage is nonlinear and synergistically influenced by rainfall intensity. As the karst rate increases, the total leakage exhibits an exponential rise, while sediment leakage demonstrates the existence of an "optimal karst rate" threshold. Under intensified rainfall intensity conditions, soil and water leakage becomes particularly pronounced, especially in areas with high karst rates. The findings of this study provide a theoretical basis for the risk assessment and mitigation measures of soil and water leakage in karst regions, and offer important references for the formulation of soil and water erosion prediction and control strategies in related regions.

Keywords: soil and water leakage; karst development degree; optimal karst rate; nonlinear response; karst three-dimensional void media model

Received: 2025-10-16

Revised: 2025-11-04

Accepted: 2025-11-15

Online(www.cnki.net): 2025-11-21

我国岩溶总面积大、分布广,横跨地势三级阶梯,其中,广西西南地区是岩溶集中连片发育并且水土流失尤为严重的区域^[1-3]。岩溶区独特的碳酸盐岩地质构造,其复杂空隙介质结构,根据尺寸的大小可分为管道、裂隙、孔隙3类^[4],在其影响下形成复杂的地下水系统^[5]。岩溶地区地表溶沟、溶槽、溶孔等密布,岩溶裂隙广泛分布^[6],构成土-岩二元结构。二元三维的侵蚀导致水分和土壤流失,加剧石漠化,土壤分布不均,甚至可能引发内涝^[7-8]。岩溶地貌的显著特征是其可溶性岩石中发育的密集裂隙网络和地下管道系统。地表土壤浅薄,水流易冲刷土壤,导致土壤流失,露出岩石。岩土界面的沟槽和裂缝,成为地表水土的“汇集通道”,水沿空隙介质结构向下入渗增强,使得空隙介质结构成为优先通道,加剧水土流失和土地退化^[9],岩溶发育特征直接影响水土流失强度。蒋忠诚等^[10]将水土流失界定为在喀斯特地区独特的地表-地下空间结构中,地表土壤在径流侵蚀与化学溶蚀协同作用下,沿着通道(落水洞、岩溶裂隙)向下流动到达地下河,造成土壤丢失的过程。缓坡区域主要以地下漏失为主,祝怀春等^[11]通过试验表明地下产流可占总径流比例的44.09%~44.65%;魏兴萍等^[12]运用

同位素¹³⁷Cs方法证明地下产沙比例可达25.45%,则岩溶空隙发育程度是防治水土漏失的关键。

基于岩溶地区地表-地下二元结构特征及其显著的岩性非均质性与空间异质性,传统非岩溶区水土流失研究方法已不再适用于该区域水土漏失机制研究。岩溶地区水土漏失研究现主要使用核示踪技术^[13]、野外定点监测^[14]、人工模拟降雨模型箱试验^[15-18]、坡面径流小区监测^[19]。在模拟试验方面,目前研究者^[20]较多关注于在模型箱底部钻取均匀孔隙或长条形缝模拟岩溶空隙,通过模拟降雨研究岩溶空隙对水土的地下漏失影响。但是,此类方法仍有显著局限:其一,该模拟试验装置将岩溶地下裂隙简化为二维孔隙,水土漏失未能经过裂隙下部结构过程,漏失量较大;其二,大多数研究集中于探讨10%以下的空隙率对地下漏失的影响,而可溶性石灰岩岩溶地区往往经历强烈的构造运动形成大量的构造空隙,在经历长时间的构造活动、风化作用、卸荷过程及溶蚀等地质作用的共同影响下,岩溶从中度变为高发育加剧水土流失。岩溶山区,在山坡体内部常常形成多条倾角较陡、向外倾斜且深长的岩溶大裂隙^[21],雨水沿大空隙介质结构形成快速渗漏流极易在山底造成洪涝灾害。因此,研究高发育岩溶条

件下地下漏失的变化机制具有十分重要意义。本试验采用原位石灰岩进行试验,模拟复杂的水土运移过程。通过设置高岩溶率梯度进行试验,研究高岩溶率对地下产流产沙的调控规律机制。本研究通过在模型箱内填充自然石灰岩还原溶蚀状态进行试验,揭示不同发育阶段岩溶对地下产流产沙的调控规律,基于数据建立不同岩溶发育程度的水土漏失指数和三项式关系模型。该结果对强发育岩溶地带水土漏失风险评价、防治工程建设提供定量化的理论支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于广西平果市果化镇龙何屯(23°38′23″N,107°39′24″E),平均海拔550 m。该地区地层主要由二叠系下统的栖霞组和石炭系上统的碳酸盐岩构成,以灰岩为主,基岩表面覆盖着一层浅薄的土壤,土壤下方为碎石填充的石灰岩带,土-石界面起伏显著。该区域属于亚热带季风气候,年平均气温21.5℃,年平均降雨量1200 mm。该地区土壤主要为棕色和黑色石灰土,少部分为红色石灰土,土地利用效率低,荒坡荒地普遍,岩石裸露,土层分布不连续,生态环境脆弱,林地稀疏,多为贫瘠旱地,碎石广泛散布,裸岩、乱石与贫土交错。人地矛盾严重,经济滞后,耕地仅58.41 hm²,人均0.11 hm²,主要种植玉米和黄豆。

1.2 试验材料

1) 供试土壤

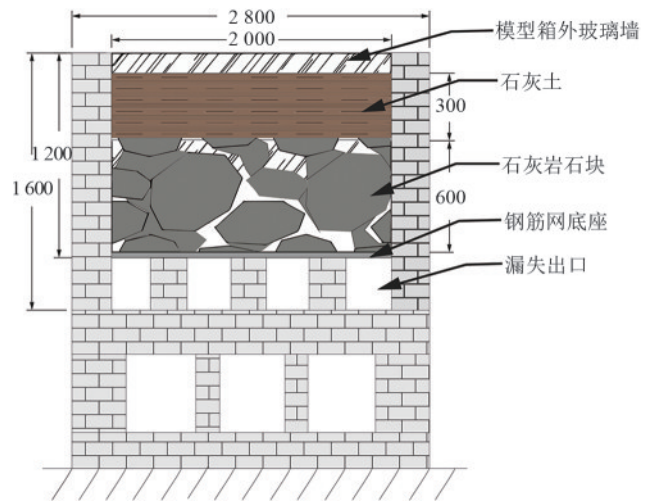
试验所用土壤为广西平果喀斯特生态系统国家野外科学观测站(23°38′45″N,107°38′86″E)耕地表层0~32 cm棕色石灰土体积质量为(1.40±0.13) g/cm³,田间含水率为16.95%±0.45%,黏粒、粉粒、砂粒质量分数分别为55.53%、44.35%、0.12%。将采集的土壤去除植物根系、石砾等杂质过2 mm筛,自然风干后备用。根据中国土壤质地分类标准,试验土壤为黏壤土,排水性和透气性差,易积水。

2) 试验装置

试验区为人工模拟降雨试验小区,长×宽×高为2.0 m×2.0 m×2.0 m(图1),坡度2°~5°,径流出口面用透明玻璃进行围护,以便观测土壤渗漏过程,下面布置钢筋间距5 cm×5 cm,上部依次放置土壤、石灰岩石块,地下径流汇集在出口集水槽,通过水管收集到PVC取样瓶中。

模拟降雨装置由降雨设备喷头(FULLJET旋转下喷式喷头,F123/8)、加压水泵、供水管、控制阀、流量表等组成。试验箱中安装4个喷头,水头高度2.0 m

通过将水加压至0.02 MPa水压开始降雨,此时雨滴落地速度满足自然降雨速度特征,降雨强度为10~220 mm/h,降雨均匀度>85%,试验槽对角位置布置2个雨量桶校准试验降雨。



注:单位为mm。

图1 试验模型箱示意

Fig. 1 Schematic diagram of test model box

1.3 研究方法

于2025年4月20日在广西平果喀斯特生态系统国家野外科学观测站,根据《野外地质工作手册》、样方法等对野外的岩溶率、植被覆盖、坡度、裸岩等进行调查,对2024年的自然降雨收集并进行统计。岩溶发育程度是指衡量可溶性岩石中孔隙、裂隙、管道、溶洞等空隙介质结构的发育状态和规模溶蚀情况,其用单位体积或面积内的数量、张开度、长度、贯通度、粗糙度等参数表征。其中,岩溶率是表征岩溶发育程度的综合量化指标^[22]。根据平果喀斯特地区的侵蚀性降雨特征及野外地质结构调查,结合之前学者^[23]对龙烈峰丛洼地进行地质物探研究,本试验针对研究区附近强发育岩溶区作为模拟对象。采用单一变量控制方法设计5种岩溶率,将模型箱中岩石体岩溶率和面岩溶率都设置相同值,分别为2%、9%、15%、20%、30%,每种岩溶率设定24 h累积降雨量24 mm(中雨型),40 mm(大雨型),70 mm(暴雨型)3种降水量。

降雨试验于2025年5月12日开始,试验箱模拟龙何屯附近无地表覆盖坡耕地情况。石灰岩块按照设定的体岩溶率及面岩溶率安置在模型箱内,在石块上层放置1层孔隙间隔10 mm钢丝网,避免土堵塞空隙介质开口处。石灰土分层填实,每填8~10 cm土层根据野外取土实测压实情况,进行人工反复压实达到标准再进行下一次填土,将最上层土层设置坡度≈2°且向出水口侧倾斜,为避免边缘效应每次

压实时对边缘土单独压实。试验开始用透明薄膜将降雨框架四周及顶部包裹以防止降雨试验中雨水喷出槽,提前下雨使土层湿润,静置 24 h 达到土体内部结构稳定。使用 2 mm/h 的降雨强度使土壤吸水饱和和用雨量筒校准雨强,当水滴均匀下落时开始计时,并取 PVC 取样瓶接取并在采样瓶身做标记,5 min 间隔取样 1 次,过程中记录地下漏失量情况,降雨持续时间为 45 min。每种岩溶率试验结束后,将土壤进行替换,填新土开始新的试验,每次试验土壤放置前均用水冲洗钢丝网和石灰岩空隙中遗留的泥沙杂质,确保初始条件一致,共收集 138 个样品。最后将样品带回室内静置 24 h,用滤纸过滤泥沙进行泥沙称重分析。体积岩溶率的计算公式为:

$$V_0 = a \times b \times c \quad (1)$$

$$V = \frac{\sum M_i}{\rho} \quad (2)$$

$$W = \frac{V_0 - V}{V_0} \times 100\% \quad (3)$$

式中: V_0 为模型箱中填石堆置所占体积; a 为填石宽度 2 m 即模型箱宽度; b 为填石长度 2 m 即模型箱长度; c 为填石高度即模型箱下部钢筋网至填石的最顶面高度; V 为模型箱中填石的实际体积; M_i 为第 i 块石头的质量; ρ 为实测石灰岩的平均密度,取 2.65 g/cm³。 W 为体积岩溶率, %。

面岩溶率计算公式为:

$$K = \frac{A_i}{A} \times 100\% \quad (4)$$

式中: K 为面岩溶率, %; A_i 为第 i 层岩石垂直投影面积; A 为填石面面积即模型箱横截面积。

为掌握不同岩溶的发育程度和岩石空隙的空间分布,试验前将各个石灰岩石块进行刻画和统计描述见表 1。岩溶率为 2% 时,空隙的平均张开度仅有 25 mm,长度较短,且斜交通道条数最少,仅 12 条,显示空隙介质系统较为细微且多为非贯通。9% 时,空隙介质长度有所增加,空隙介质数量和复杂度提升,斜交通道条数为 21 个。15% 时,斜交数为 32 条,空隙交错更加繁密,贯通度下降,空隙网络进入“网络化”阶段,路径变得多变且存在更多堵塞或不连通区域,使水流分散、路径曲折。20% 岩溶率时,空隙介质的平均张开度 \approx 85 mm,空隙系统趋于少数优势通道,斜交通道条数为 24 个,表现出空隙介质的宽大对主通道的主导作用。综上所述,空隙介质系统从细微到繁密再到宽大,展现出复杂的演变过程,其中高岩溶发育阶段伴随空隙介质网络的“网络化”特征对水流输送效率具有双重影响,既增强系统连通性,也

造成路径复杂、流动分散。

表 1 试验岩石特征参数

Table 1 Characteristic parameters of test rocks

岩溶率/%	平均张开度/mm	径长/mm	斜交通道数/条	贯通度/%
2	25	662	12	95
9	27	712	21	93
15	32	732	32	85
20	45	685	24	96
30	165	632	13	98

2 结果与分析

2.1 不同岩溶发育程度对地下漏失速率的影响

在相同降雨强度下,随着岩溶发育程度的增加,地下漏失速率总体显著增加同时波动性增强(图 2)。然而,由于空隙内部结构的非均质性,漏失量速率与岩溶率间呈非线性关系。此外,30% 作为强发育的岩溶,其漏失速率 $>$ 20% 岩溶率漏失速率。

研究结果表明,降雨强度从 25 mm 增加至 70 mm,岩溶漏失速率平均值和最大值呈上升趋势。30% 岩溶率的垂直渗漏通道显著加快水土向地下运移。在 3 种不同降雨条件下,30% 岩溶率漏失速率平均值分别是 20% 岩溶率的 2.59、2.58、3.51 倍,随着降雨时间的累计,30% 岩溶率漏失速率曲线呈上升趋势。随土壤颗粒在 30% 岩溶率空隙介质内积累,当土体积聚到一定程度阻塞空隙介质时,其底部的土体在自重应力作用下发生蠕变变形,沿大岩溶空隙介质结构向下滑动,进入地下水系统,使漏失量增加。

在 25 mm 降雨时,岩溶率为 9% 为临界的最优岩溶率,此时的标准差和平均漏失速率均低于岩溶率为 2% 的情况,9% 岩溶率漏失速率处于最低处,波动小。在雨滴击溅在表土时,带有速度击散土壤颗粒原有结构^[24],随着土壤水分的持续下渗,细小空隙介质逐渐被填土物质所充填^[25],且当空隙介质中积累漏失水量过少,不足击穿泥沙层时,便导致地下漏失速率过慢。

在 40 mm 降雨时,15% 岩溶率连通性较好,但根据空隙介质统计得出,该空隙介质的弯曲度较 9% 和 2% 的斜交通道条数最多,弯曲度更大,贯通度最小,从而使地下水流路径更长,土壤易在空隙中堵塞,试验中在每次试验结束能在该石灰岩空隙中收集较多泥沙。该结论也验证野外孔隙或裂缝大多结构复杂且充填大量泥沙,很少有孔隙完整的孔隙裂缝存在^[26]。

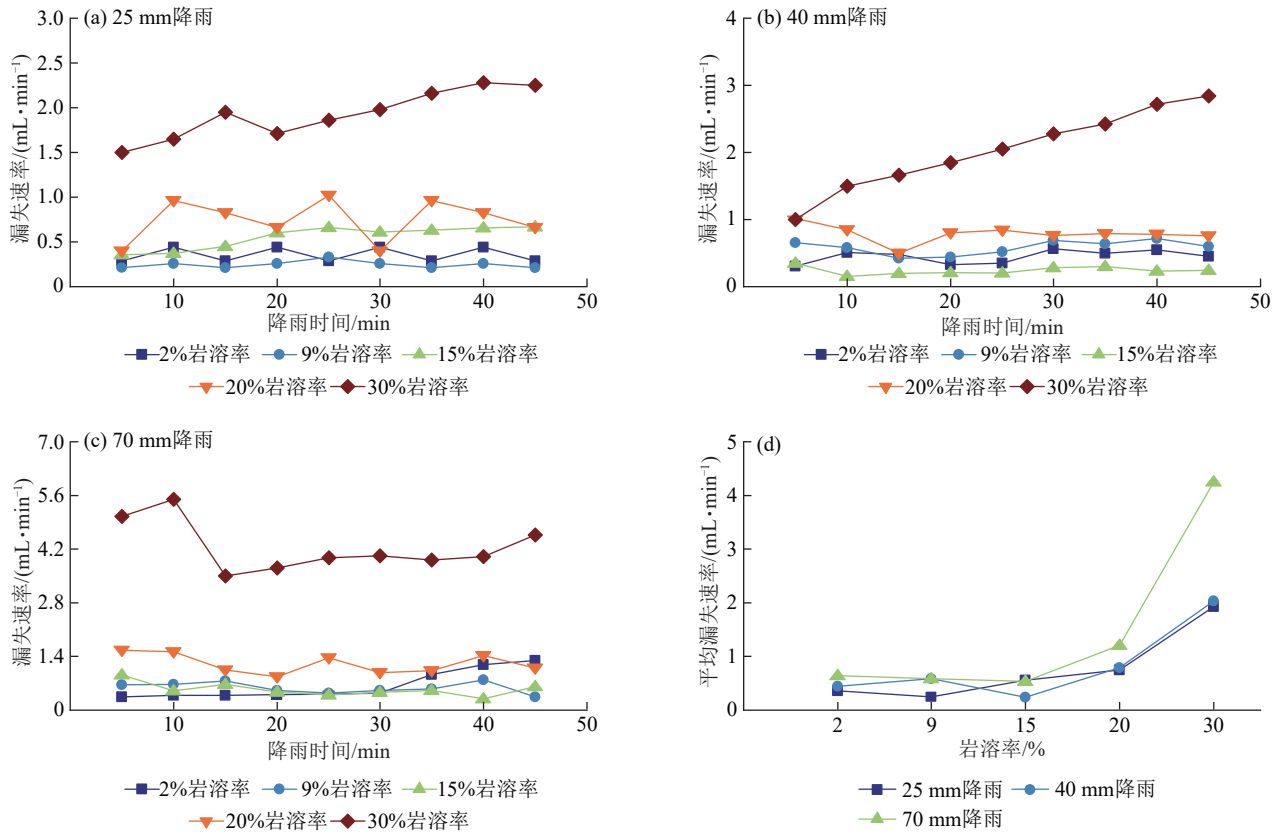


图 2 地下产流速率随降雨时间变化

Fig. 2 Variation of subsurface runoff rate with rainfall time

2.2 不同岩溶发育程度的地下总漏失量变化特征

为进一步探究不同岩溶发育程度对漏失总量的影响,将5种岩溶率分别在25、40、70 mm降水条件下进行试验,降雨试验取样时间共45 min,漏失总量见图3,拟合曲线见图4。地下漏失量与岩溶发育程度间存在显著的指数相关性。随着岩溶发育程度增加,空隙介质出现不同程度堵塞,如在25、40、70 mm降雨时,9%、15%的漏失量相对较少;30%作为漏失优势通道,86.7 L漏失量为2%的漏失量的5.4倍,漏失量远高于其他岩溶率漏失量。岩溶发育程度与漏失量,拟合曲线的相关系数 $R^2 > 0.9$,较为稳定具有较强的正相关性。

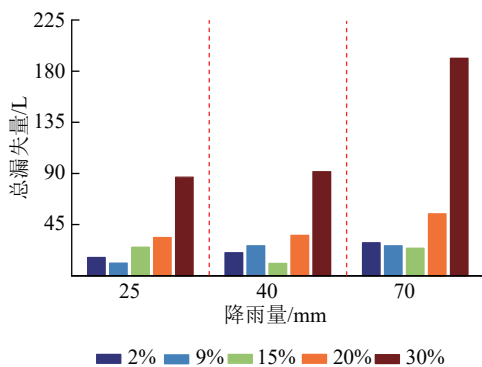


图 3 不同岩溶发育程度下总漏失量

Fig. 3 Total leakage under different karst development degrees

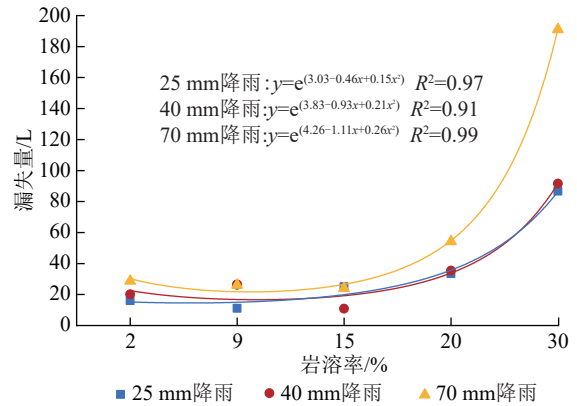


图 4 岩溶发育程度与总漏失量的关系

Fig. 4 Relationship curves between karst development degree and total leakage

当40 mm降雨时,15%岩溶率漏失量为10.82 L 5种岩溶率中漏失量最小,作为中发育岩溶结构的弯曲度大、斜交通道数较多、贯通度最小,导致漏失量较小。该降雨拟合性 $R^2=0.91$,较25 mm降水低,波动性更大。当降雨强度增加到70 mm时,随雨量增多岩溶漏失量均有大幅度增多。30%岩溶率漏失量分别是其25、45 mm时2.0、2.2倍,同理2%岩溶率漏失量分别增加1.2、1.8倍。由图4可知,降雨量对不同发育程度岩溶的漏失影响很大,降水量越大漏失量与岩溶发育程度的相关性越强。在降水协同驱动下,暴雨(70 mm) $R^2=0.99$ 较中雨(25 mm)拟合程度更好。

2.3 不同岩溶发育程度对地下泥沙漏失速率的影响

地下泥沙漏失速率反映水流携带泥沙的能力(图5)。试验结果显示,泥沙漏失速率随降雨历时的推移,初期出现较高值,随后逐渐减小并趋于平稳。在降雨初期(开始10 min),土壤尚未完全饱和,初始渗透速率较快。同时,土壤表层结构较为松散,抗冲刷能力弱。在水流的初始冲刷作用下,大量细颗粒泥沙被迅速剥离并随渗透的水流带入地下。因此,前10 min,9%和15%岩溶率的泥沙漏失速率分别为12.85、15.17 g/min。

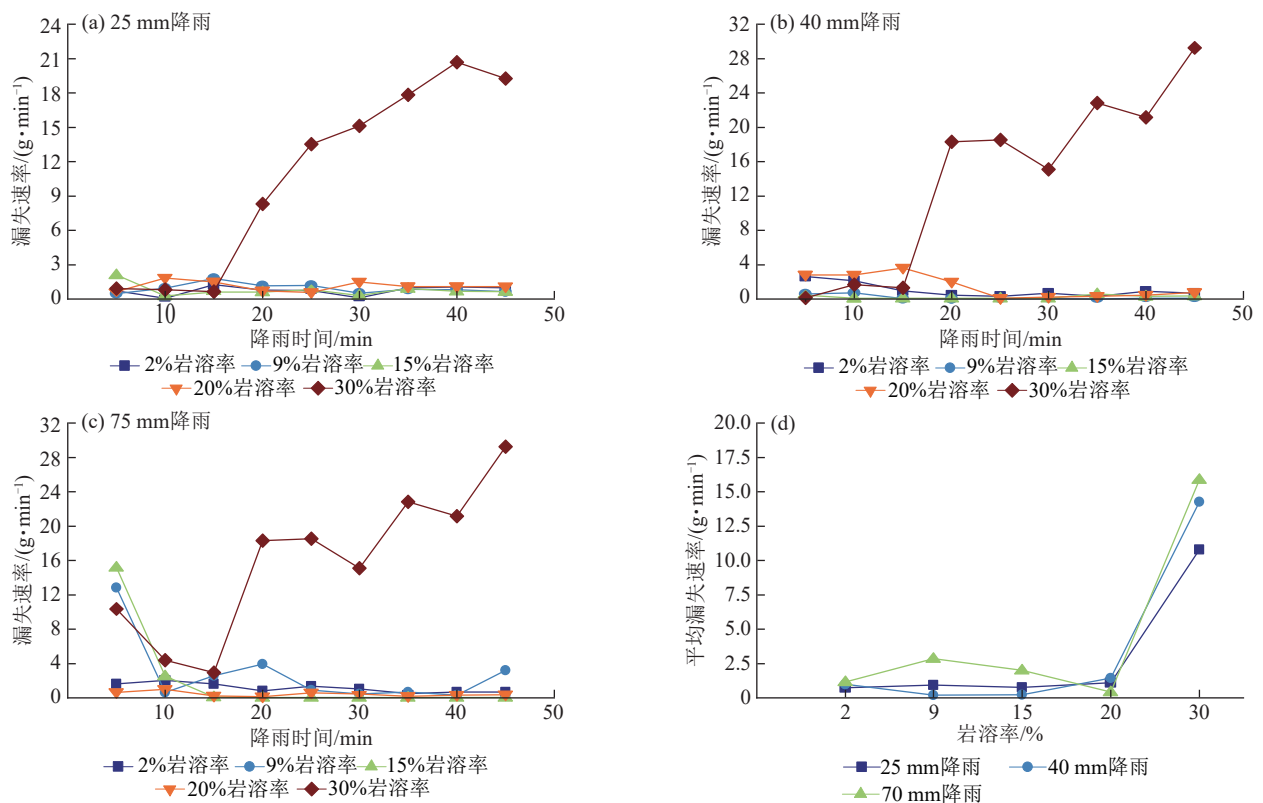


图5 泥沙漏失速率随降雨时间变化

Fig. 5 Variation of sediment leakage rate with rainfall time

2.4 不同岩溶发育程度对地下泥沙漏失的影响

不同岩溶发育程度对地下产沙量的影响呈三次函数关系,其变化受空隙介质结构特征、降雨强度及水流-泥沙耦合运移机制共同调控。大雨(40 mm)条件下,岩溶发育程度从2%增至15%时地下产沙量不升反降,与空隙介质网络弯曲度增加,斜交通道增加有关且水流路径迂回度升高,动能不足以冲刷泥沙;同时,雨滴击溅作用促使土壤颗粒重组,进一步堵塞微小通道。15%岩溶率在大雨(40 mm)下产沙量低于预期,表明空隙介质结构弯曲度、贯通度,径长等对水流阻力的关键调控作用。提升至暴雨(70 mm),产沙量随岩溶发育程度呈三次函数增长,一方面,高水压驱动下空隙介质充填物被冲蚀,有效过水断面扩大;另一方面,30%岩溶率紊流显著增强泥沙输移

能力,粗颗粒通过运移加速流失,细颗粒以悬浮状态随优先流快速迁移。

进入后期,所有降雨条件下,30%岩溶率仍处于快速的集中漏失状态,而其他组的泥沙漏失速率均维持在较低水平(<5 g/min),且随时间变化波动不大。表明在以土壤基质渗透为主的条件下,即使降雨强度有所增加,土壤颗粒的侵蚀和运移能力也相对受限。可能归因于2个方面:一方面空隙介质连通度制约泥沙运移,水流主要通过土壤孔隙缓慢下渗,对泥沙的冲刷和携带作用较弱;另一方面,土壤本身对细颗粒泥沙存在一定的吸附或阻碍作用。

能力,粗颗粒通过运移加速流失,细颗粒以悬浮状态随优先流快速迁移。

为深入量化岩溶发育程度与泥沙漏失量间的关系,本研究进一步分析(图6)得出,在25、40、70 mm降雨量下,泥沙漏失量(y)与岩溶发育程度(x)间的三次多项式拟合关系,且所有拟合方程的决定系数 $R^2 > 0.91$,表明该模型具有良好的拟合精度。从曲线形态来看,泥沙漏失量并非简单地随岩溶发育程度单调变化,呈非线性的复杂趋势,普遍表现为在特定岩溶发育程度范围内泥沙漏失量达到最低值。在25、40 mm降雨量下,曲线显示泥沙漏失量在15%后有回升,存在一个“最优”的岩溶率,在该点防蚀效率最高。而在70 mm降雨条件下,曲线波动更为剧烈,泥沙漏失量在20%岩溶率附近出现一个显著的局部

最小值,20%岩溶率在强降雨下具有独特的防蚀优势。非线性关系可能源于岩溶发育程度对水流行为的影响。当岩溶发育程度过低时,可能因地表径流面积大、渗透不足而导致地表冲刷加剧;而岩溶发育程度过高,若不能形成稳定结构,可能因土壤暴露面积增大或水流集中效应而增加侵蚀风险。

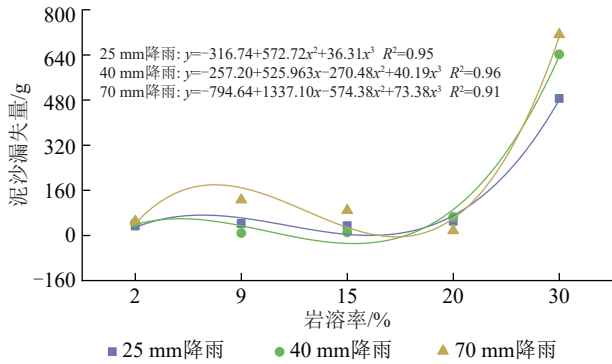


图 6 岩溶发育程度与泥沙漏失量关系

Fig. 6 Relationship curves between karst development degree and sediment leakage

2.5 漏失量与岩溶发育程度的相关性

基于皮尔逊相关系数分析结果表明,岩溶发育程度与水土漏失量间呈高度正相关($R^2=0.86, p < 0.01$)。由图 7 可知,即随着岩溶发育程度的增大,水土漏失现象显著加剧。相较而言,降雨强度与漏失量的相关性较弱($R^2=0.29, p > 0.05$),可能与试验条件密切相关,一方面,试验采用的降雨历时较短;另一方面,试验区黏性石灰壤土具有颗粒细小、排水性差、结构致密且渗透性低等特性,其遇水后极强的塑性特征使得土层本身成为制约漏失量变化的主要因素。值得注意的是,当降雨强度超过土壤入渗能力时,地表径流显著增加。因此,后续研究应结合野外岩溶地貌特征和水文过程动态,深入探讨不同降雨强度条件下水土漏失的响应机制。

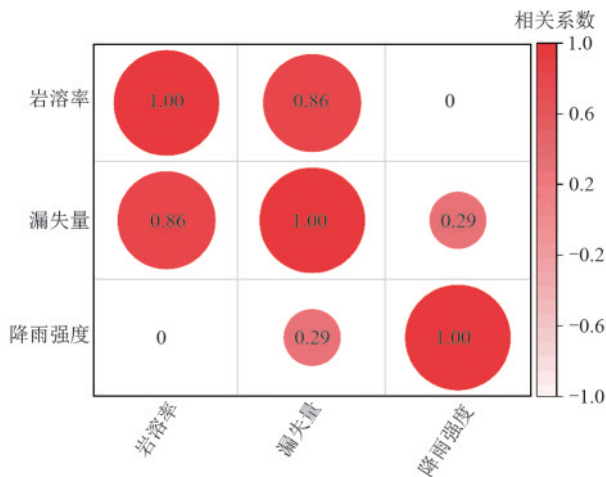


图 7 相关性分析

Fig. 7 Correlation analysis

3 讨论

3.1 不同岩溶发育程度对地下水土漏失的影响

岩溶区水土漏失过程受岩溶发育程度的影响。随岩溶发育程度的提升(2%~30%)显著促进岩溶空隙介质网络发育与连通性,从而增大对水土漏失的贡献。试验表明,低岩溶发育程度阶段(<9%)因网络发育不完善,水分迁移受阻,漏失速率低且波动平缓;当岩溶发育程度增至>9%时,连通性增强,地下漏失速率增长,且强降雨(70 mm)下径流量激增效应尤为突出。目前大部分研究集中于岩溶率在10%以下,对10%以上的研究则相对较少,且采用人工在钢板钻孔或切缝模拟岩石裂缝(如钻孔或切缝),并在裂缝上覆盖土壤进行试验,其水土流失路径直接穿过钢板向下渗漏,从而得出地下渗漏流失的泥沙和径流比例与岩溶发育程度成正比的结论。然而,本研究通过原位岩石试验发现,漏失量受到岩溶空隙介质的非均质性、弯曲度及局部阻塞的综合影响,表现出显著的非线性特征。降雨强度与岩溶发育状态的协同驱动作用增强空隙流波动性,不同降雨强度下,最优岩溶发育程度数值具有差异性,如25 mm降雨时9%漏失总量最低,而40、70 mm降雨时,高空隙介质网络的漏失效率显著提升,40、70 mm降雨最优岩溶发育程度为15%。闫钊全等^[27]研究指出,土壤的地下漏失主要受裂隙宽度、产状和坡度的影响,但是,未深入探讨岩溶发育程度的最优值及其对水土流失的调控作用。本研究强调,空隙介质结构特性(如连通状态和空间布局等)使得水土漏失呈非线性规律,获得最优岩溶发育程度对地下土水迁移的调控意义更为显著。空隙介质结构的弯曲度与路径的不规则性是调控地下水运动的核心因素。高弯曲度的空隙介质结构显著延长水流路径、降低流速,水流路径延长、转向增多层流与紊流共生^[28],并诱发滞留与堵塞现象。本试验证实,空隙介质发育的数量、长度、弯曲度的耦合增长与漏失波动性呈正相关,空隙介质网络越密集、路径越曲折,地下水迁移的速率差异越大。岩溶的发育程度及空隙介质下部的连通情况等对水土的调控及储存有重要作用^[29]。目前在表层岩溶带中强发育空隙介质结构对水土漏失至关重要^[30]。

3.2 不同岩溶发育程度对泥沙漏失运移的影响

岩溶地下泥沙输移与产沙具有选择性特征,细颗粒更易被侵蚀,而较大颗粒则倾向于沉积^[31-32]。空隙介质内部发育程度对泥沙迁移路径和方式具有显著影响,随着岩溶发育程度增加,地表径流中的泥沙比例逐步降低,而地下渗漏中的泥沙和水量比例则

相应提高^[33]。空隙介质结构中斜交通道数、弯曲度和张开度分布等在调控土壤侵蚀和泥沙迁移中起着复杂作用。泥沙的多阶段动态过程体现在, 试验前15 min, 各个岩溶率条件的泥沙速率均波动性较大, 其涉及多次蠕动、堵塞和再冲刷循环^[34-36]。40 mm降雨强度出现一个明显的峰值约在20 min, 随即下降, 表明中等降雨强度能引发泥沙迁移的短暂高峰。而70 mm(暴雨)条件下, 漏失速率明显升高, 在40 min左右出现峰值, 表明强降雨能极大增强泥沙迁移能力。尤其在降雨后期土壤饱和时, 抗剪强度减弱导致沿空隙介质迁移的泥沙显著增加。中快速水流产生的高水力梯度, 提升流速和挟沙能力, 促进更大粒径泥沙的启动和输移。同时, 30%岩溶率的水力连接性导致“集中漏失”现象, 其强度远大于分散渗透。这些因素共同调控岩溶区地下泥沙的分布与演变。

3.3 降雨与岩溶发育程度协同作用对水土漏失的影响

岩溶区水土漏失过程的非线性特征受空隙介质网络发育程度和降雨条件的动态耦合作用影响。本研究通过耦合降雨参数与岩溶发育程度指标, 提出最优岩溶发育程度, 揭示土壤颗粒从稳定态向失稳态转变的临界条件, 而最优岩溶率并非固定参数, 而是受降雨条件与空隙介质空间结构的协同作用影响。在小、中雨降雨时, 岩溶率阈值主要受控于土壤基质渗透性, 降雨需长期累积才能触发局部渗漏, 漏失速率较为稳定; 大雨(40 mm)时, 以空隙介质网络形成的优势渗流通道为主, 短历时强降雨即可突破阈值, 水土漏失呈突发性与局部性, 易受贯通, 斜交条数等因素的影响发生堵塞现象; 暴雨(70 mm)时, 基于降雨强度大, 动能大, 土壤易被剥落, 粗颗粒比大雨时, 漏失量显著增加, 而针对不同岩溶发育程度的土壤出现不同情况的运移过程, 进而产生不同的漏失速率和漏失量。在未来的研究中应结合更多的野外原位观测和多尺度分析进行完善和校准, 加入地表土壤、植被和裸露岩石进行系统整体研究^[37]。

4 结论

1) 在岩溶区岩溶发育程度对水土漏失的影响过程中, 空隙介质结构与降雨强度的协同作用导致水土漏失呈显著的非线性特征。表明在一定范围内, 岩溶率的增加以指数关系促进漏失总量的增长, 然而在泥沙漏失方面, 存在“最优岩溶率”, 在此岩溶率下, 由于水流路径的迂回和堵塞, 泥沙漏失反而达到最低值。该非线性响应的核心机制受到空隙连通性与降雨强度的共同调控, 在不同雨量条件下, 实现最少泥沙漏失所需的岩溶发育程度不同。中雨(25 mm)岩溶率为

9%时, 漏失量最小, 大雨(40 mm)及暴雨(70 mm)岩溶率为15%时, 漏失效果最小。反映出空隙网络的动态变化, 空隙较少时, 水分滞留和慢速渗流作用减弱; 岩溶过度发育时, 形成高效导水通道, 导致漏失剧增。特别值得注意的是, 30%岩溶率空隙介质作为岩溶区重要的渗漏通道, 其漏失速率和产沙量远远高于其他岩溶率, 试验中呈持续的峰值, 凸显出空隙介质空间的异质性与水土过程的强烈调控作用。

2) 强降雨加剧岩溶空隙介质的扩展, 增强漏失速率及空隙介质空间连通性, 进而导致水土漏失速率的加快。如在大流速下水流产生更大的剪切力, 增强对土壤颗粒的剥离和运移能力进而提高泥沙的流速。尤其对于30%岩溶率而言, 其较大的内径允许更大粒径的泥沙通过, 使得在强降雨条件下, 30%岩溶率的漏失效应更为显著, 表明降雨协同空隙介质结构水土漏失呈非线性规律。未来的研究应结合示踪技术, 以阐明泥沙在空隙系统中的迁移路径和累积模式。同时, 有效的水土保持策略应充分考虑空隙介质结构的发育程度、降雨特性及地下通道的水动力学特征。在优化水土流失防控方面, 需重点关注裂隙连通性阈值, 在40、70 mm降水15%的岩溶率下表现出较优的调控效果。通过抑制过度发育的弯曲路径, 可实现对径流稳定性的有效调控。

3) 降雨与岩溶发育程度的协同作用使水土漏失曲线呈非线性规律, 随着雨量增大效果越显著。未来研究应加强野外原位观测, 利用示踪技术多尺度对水土漏失的机理试验研究, 建立降雨-岩溶发育程度的耦合漏失模型, 针对不同的地质地貌因地制宜精准防治防控。

参考文献:

- [1] 袁道先. 我国西南岩溶石山的环境地质问题[J]. 世界科技研究与发展, 1997(5): 41-43.
YUAN D X. On the environmental and geologic problems of karst mountains and rocks in the south-west China[J]. World Sci-Tech R and D, 1997(5): 41-43.
- [2] 黄丽芳, 覃星铭, 胡宝清, 等. 桂西南石漠化综合治理效益评价及其耦合协调关系[J]. 中国岩溶, 2024, 43(1): 126-136.
HUANG L F, QIN X M, HU B Q, et al. Benefit evaluation of comprehensive control of rocky desertification in Southwest Guangxi and the coupling and coordination relationship[J]. Carsologica Sinica, 2024, 43(1): 126-136.
- [3] GUTIÉRREZ F, PARISE M, DE WAELE J, et al. A review on natural and human-induced geohazards and impacts in karst[J]. Earth-Science Reviews, 2014, 138: 61-88.
- [4] 陈崇希. 岩溶管道-裂隙-孔隙三重空隙介质地下水流模

- 型及模拟方法研究[J].地球科学,1995(4):361-366.
- CHEN C X. Groundwater flow model and simulation method in triple media of karstic tube-fissure-pore [J]. Earth Science,1995(4):361-366.
- [5] WU Q L, LIANG H, XIONG K N, et al. Effectiveness of monitoring methods for soil leakage loss in karst regions [J].Environmental Earth Sciences,2021,80(7):e278.
- [6] 罗为群,蒋忠诚,韩清延,等.岩溶峰丛洼地不同地貌部位土壤分布及其侵蚀特点[J].中国水土保持,2008(12):46-49.
- LUO W Q, JIANG Z C, HAN Q Y, et al. Features of soil distribution and erosion in different geomorphic position of karst depression[J].Soil and Water Conservation in China,2008(12):46-49.
- [7] 蒋忠诚,罗为群,邓艳,等.广西岩溶区的水土流失特点及其防治[J].广西科学,2018,25(5):449-455.
- JIANG Z C, LUO W Q, DENG Y, et al. Features and treatment of soil erosion in karst areas of Guangxi [J]. Guangxi Sciences,2018,25(5):449-455.
- [8] JIANG L S, GAN F L, TAN X H, et al. Responses of soil detachment capacity to different rock dip angles in karst trough valley[J].Geoderma,2025,454:e117174.
- [9] 王发,付智勇,陈洪松,等.喀斯特洼地退耕和耕作土壤优先流特征[J].水土保持学报,2016,30(1):111-116.
- WANG F, FU Z Y, CHEN H S, et al. Characteristics of preferential flow in soil of abandoned farmland and cultivated land of karst depression [J]. Journal of Soil and Water Conservation,2016,30(1):111-116.
- [10] 蒋忠诚,罗为群,邓艳,等.岩溶峰丛洼地水土漏失及防治研究[J].地球学报,2014,35(5):535-542.
- JIANG Z C, LUO W Q, DENG Y, et al. The leakage of water and soil in the karst peak cluster depression and its prevention and treatment[J].Acta Geoscientica Sinica,2014,35(5):535-542.
- [11] 祝怀春,高儒学,戴全厚,等.喀斯特区工程堆积体坡面产流特征对降雨强度的响应[J].水土保持学报,2025,39(3):70-77.
- ZHU H C, GAO R X, DAI Q H, et al. Response of runoff production characteristics of the slope of engineering accumulation to rainfall intensity in karst areas [J].Journal of Soil and Water Conservation,2025,39(3):70-77.
- [12] 魏兴萍,谢德体,倪九派,等.重庆岩溶槽谷区山坡土壤的漏失研究[J].应用基础与工程科学学报,2015,23(3):462-473.
- WEI X P, XIE D T, NI J P, et al. Soil erosion and loss on slope in karst valley area, Chongqing with ¹³⁷Cs [J]. Journal of Basic Science and Engineering,2015,23(3):462-473.
- [13] YAN D C, ZHANG X B, WEN A B, et al. Assessment of sediment yield in a small karst catchment by using ¹³⁷Cs tracer technique [J]. International Journal of Sediment Research,2012,27(4):547-554.
- [14] YANG P, TANG Y Q, ZHOU N Q, et al. Characteristics of red clay creep in karst caves and loss leakage of soil in the karst rocky desertification area of Puding County, Guizhou, China [J]. Environmental Earth Sciences,2011,63(3):543-549.
- [15] DAI Q H, PENG X D, WANG P J, et al. Surface erosion and underground leakage of yellow soil on slopes in karst regions of southwest China [J]. Land Degradation and Development,2018,29(8):2438-2448.
- [16] HAN Z, YANG X C, YIN X A, et al. How do the distribution patterns of exposed roots affect the rainfall-runoff processes of sloped land under simulated multi-rainfall conditions in karst region? [J].Catena,2024,236:e107708.
- [17] 敖利满,蒋超华,徐勤学,等.岩面形态对西南喀斯特坡地产生产沙的影响[J].水土保持研究,2023,30(5):52-60.
- AO L M, JIANG C H, XU Q X, et al. Influence of rock surface morphology on runoff and sediment in karst slope of southwest China [J]. Research of Soil and Water Conservation,2023,30(5):52-60.
- [18] 严友进,戴全厚,伏文兵,等.喀斯特坡地裸露心土层产流产沙模拟研究[J].土壤学报,2017,54(3):545-557.
- YAN Y J, DAI Q H, FU W B, et al. Simulation study on bare subsoil runoff and sediment yield on karst slope [J].Acta Pedologica Sinica,2017,54(3):545-557.
- [19] 陈洪松,杨静,傅伟,等.桂西北喀斯特峰丛不同土地利用方式坡面产流产沙特征[J].农业工程学报,2012,28(16):121-126.
- CHEN H S, YANG J, FU W, et al. Characteristics of slope runoff and sediment yield on karst hill-slope with different land-use types in northwest Guangxi [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2012,28(16):121-126.
- [20] 李娟,邵明,李法虎,等.峰丛洼地岩溶裂隙水土漏失过程室内模拟试验[J].水土保持学报,2024,38(2):29-37.
- LI J, SHAO M, LI F H, et al. Laboratory simulation on process of soil and water leakage from fissures in karst peak-cluster depression [J]. Journal of Soil and Water Conservation,2024,38(2):29-37.
- [21] 杨忠平,张益铭,蒋源文,等.采动作用下含深大岩溶结构面坡体裂隙扩展及变形破坏规律[J].岩土工程学报,2022,44(8):1397-1405.
- YANG Z P, ZHANG Y M, JIANG Y W, et al. Propagation of fissures and deformation and failure laws of karst slopes with deep and large structural plane mining action [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2022,44(8):1397-1405.
- [22] 兰晓荀.济南岩溶含水介质空隙性与渗透性关系研究[D].济南:济南大学,2020.

- LAN X X. Study on the relationship between void property and permeability of karst aquifer medium in Jinan[D]. Jinan: University of Jinan, 2020.
- [23] 刘永亮,刘振宇,章程,等.综合物探方法解译表层岩溶带空间结构特征研究:以广西平果市果化镇生态试验基地坡径流场为例[J].中国岩溶,2024,43(1):209-218.
LIU Y L, LIU Z Y, ZHANG C, et al. Study on spatial structure characteristics of epikarst zone interpreted by integrated geophysical method: Taking the slope runoff field of Guohua town ecological experiment base in Pingguo City, Guangxi as an example[J].Carsologica Sinica, 2024,43(1):209-218.
- [24] 李光录,吴发启,庞小明,等.泥沙输移与坡面降雨和径流能量的关系[J].水科学进展,2008,19(6):868-874.
LI G L, WU F Q, PANG X M, et al. Relationship between sediment transport with surface rainfall and runoff energies on sloping [J]. Advances in Water Science, 2008,19(6):868-874.
- [25] WEI X P, YAN Y E, XIE D T, et al. The soil leakage ratio in the Mudu watershed, China [J]. Environmental Earth Sciences, 2016,75(8):e11.
- [26] DAI Q H, PENG X D, YANG Z, et al. Runoff and erosion processes on bare slopes in the karst rocky desertification area[J].Catena, 2017,152:218-226.
- [27] 闫钊全,刘琦,邓大鹏,等.表层岩溶裂隙带土壤地表流失/地下漏失室内模拟实验[J].中国岩溶,2022,41(2):240-248.
YAN Y Q, LIU Q, DENG D P, et al. Laboratory simulation study on soil surface loss and underground leakage in the epikarst fissure zone[J].Carsologica Sinica, 2022,41(2):240-248.
- [28] WANG S, FU Z Y, CHEN H S, et al. Mechanisms of surface and subsurface runoff generation in subtropical soil-epikarst systems: Implications of rainfall simulation experiments on karst slope [J]. Journal of Hydrology, 2020,580:e124370.
- [29] 周利,彭韬,王世杰.中国西南喀斯特水源涵养特点及其生态功能[J].水土保持学报,2025,39(3):1-14.
ZHOU L, PENG T, WANG S J. Characteristics and ecological functions of water conservation in karst regions of southwest China[J].Journal of Soil and Water Conservation, 2025,39(3):1-14.
- [30] DAI Q H, PENG X D, ZHAO L S, et al. Effects of underground pore fissures on soil erosion and sediment yield on karst slopes[J].Land Degradation and Development, 2017,28(7):1922-1932.
- [31] 蒋忠诚,王瑞江,裴建国,等.我国南方表层岩溶带及其对岩溶水的调蓄功能[J].中国岩溶,2001(2):24-28.
JIANG Z C, WANG R J, PEI J G, et al. Epikarst zone in south China and its regulation function to karst water [J].Carsologica Sinica, 2001(2):24-28.
- [32] SUTHERLAND R A, WAN Y, LEE C T, et al. Aggregate enrichment ratios for splash and wash transported sediment from an Oxisol[J].Catena, 1996,26(3):187-208.
- [33] KIANI-HARCHEGANI M, SADEGHI S H, ASADI H. Comparing grain size distribution of sediment and original soil under raindrop detachment and raindrop-induced and flow transport mechanism [J].Hydrological Sciences Journal, 2018,63(2):312-23.
- [34] ZHOU J, TANG Y Q, YANG P, et al. Inference of creep mechanism in underground soil loss of karst conduits I. Conceptual model[J].Natural Hazards, 2012,62(3):1191-1215.
- [35] 周念清,李彩霞,江思珉,等.普定岩溶区水土流失与土壤漏失模式研究[J].水土保持通报,2009,29(1):7-11.
ZHOU N Q, LI C X, JIANG S M, et al. Models of soil and water loss and soil leakage in Puding karst area[J].Bulletin of Soil and Water Conservation, 2009,29(1):7-11.
- [36] 冯腾,陈洪松,张伟,等.桂西北喀斯特坡地土壤¹³⁷Cs的剖面分布特征及其指示意义[J].应用生态学报,2011,22(3):593-599.
FENG T, CHEN H S, ZHANG W, et al.¹³⁷Cs profile distribution character and its implication for soil erosion on karst slopes of northwest Guangxi[J].Chinese Journal of Applied Ecology, 2011,22(3):593-599.
- [37] 张心印,戴全厚,严友进,等.出露基岩形态及空间分布对喀斯特坡地水土流失的影响[J].水土保持学报, 2025,39(2):21-29.
ZHANG X Y, DAI Q H, YAN Y J, et al. Influence of the morphology and spatial distribution of exposed bedrock on soil erosion on karst slopes[J].Journal of Soil and Water Conservation, 2025,39(2):21-29.