

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2024.04.008

何茂林,李瑞,吴盼盼,等.裸露岩石对喀斯特坡地水土流失及水动力特征的影响[J].水土保持学报,2024,38(4):103-113.

HE Maolin, LI Rui, WU Panpan, et al. Effects of exposed rock on soil and water loss and hydrodynamic characteristics of Karst slope land[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(4): 103-113.

裸露岩石对喀斯特坡地水土流失及水动力特征的影响

何茂林^{1,2}, 李瑞^{1,2}, 吴盼盼^{1,2}, 熊玲^{1,2}, 肖林绿^{1,2}

(1. 贵州师范大学喀斯特研究院, 贵阳 550001; 2. 国家喀斯特石漠化防治工程技术研究中心, 贵阳 550001)

摘要: [目的] 裸露岩石如何影响坡地产流产沙及水动力特征尚需进一步深入研究。[方法] 通过室内模拟试验, 设置不同岩石裸露率(0, 10%, 30%, 50%, 70%)的坡地, 开展不同雨强(30, 60, 90 mm/h)条件下的人工模拟降雨试验, 旨在探究雨强与裸露岩石对坡地产流产沙及水动力特征的影响。[结果] 坡地地表产流产沙随雨强增大呈增大趋势, 而随岩石裸露率的增加呈减小趋势。在不同雨强条件下, 0 岩石裸露率坡地与 10% 岩石裸露率坡地的产流产沙差异多呈不显著($p > 0.05$), 而与其他岩石裸露率坡地之间呈显著差异($p < 0.05$)。低岩石裸露率坡地(10%)与高岩石裸露率坡地(50%及以上)间产流产沙差异显著($p < 0.05$)。流速(V)、水深(h)、雷诺数(Re)、弗罗德数(Fr)、水流剪切力(τ)及水流功率(w)随雨强增大呈增大趋势, 阻力系数(f)随雨强增大呈减小趋势。流速(V)、弗罗德数(Fr)随着岩石裸露率增加呈减小趋势, 而水深(h)、阻力系数(f)随着岩石裸露率增加呈增大趋势, 雷诺数(Re)、水流剪切力(τ)与水流功率(w)在不同雨强下变化规律有差异。水动力参数变化在不同坡地间具有一定差异性。产沙与水动力参数数量关系以指数函数拟合效果最好, 流速(V)($R^2 = 0.819, p < 0.05$)、水流剪切力(τ)($R^2 = 0.858, p < 0.05$)及水流功率(w)($R^2 = 0.890, p < 0.05$)预测坡地产沙效果较好, 其中水流功率(w)为最佳预测参数。[结论] 研究结果进一步丰富了岩溶坡地土壤侵蚀理论, 并可为建立适合于岩石裸露坡地的水蚀预测模型提供参考。

关键词: 裸露岩石; 坡地; 产流产沙; 水动力特征; 喀斯特; 石漠化; 土壤侵蚀

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242-(2024)04-0103-11

Effects of Exposed Rock on Soil and Water Loss and Hydrodynamic Characteristics of Karst Slope Land

HE Maolin^{1,2}, LI Rui^{1,2}, WU Panpan^{1,2}, XIONG Ling^{1,2}, XIAO Linlü^{1,2}

(1. School of Karst Science, Guizhou Normal University, Guiyang 550001, China;

2. State Engineering Technology Institute for Karst Desertification Control, Guiyang 550001, China)

Abstract: [Objective] The effects of exposed rocks on the runoff, sediment yield, and hydrodynamic characteristics of slope land needs further study. [Methods] Through the laboratory simulation test, the slope lands with different rock exposure rates (0, 10%, 30%, 50%, 70%) were set, and the artificial simulation rainfall test under different rainfall intensities (30, 60, 90 mm/h) was carried out, in order to explore the impact of rainfall intensity and exposed rocks on runoff, sediment yield and hydrodynamic characteristics of slope land. [Results] The surface runoff and sediment yield of slope land increased with the increased of rainfall intensity, and decreased with the increase of rock exposure rate. Under varying rainfall intensities, the runoff and sediment yield of slopes with 0 and 10% rock exposure rates slope land were not significantly difference in most cases ($p > 0.05$), but the slope with a 0 rock exposure rate was significantly difference from other slopes with rock exposure ($p < 0.05$). There was a significant difference in runoff and sediment yield between lands with low rock exposure rates (10%) and lands with high rock exposure rate (50% or more) ($p < 0.05$). Flow velocity (V), Flow depth (h), Reynolds number (Re), Froude number (Fr),

收稿日期: 2023-12-30

修回日期: 2024-02-03

录用日期: 2024-02-22

网络首发日期 (www.cnki.net): 2024-04-30

资助项目: 国家自然科学基金项目(32360421, 32060372); 贵州省基础研究计划项目(黔科合基础-ZK[2023]重点 029 号)

第一作者: 何茂林(2000—), 男, 硕士研究生, 主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail: 3054358836@qq.com

通信作者: 李瑞(1979—), 男, 博士, 研究员, 主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail: rlfer@126.com

http://stbxb.alljournal.com.cn

Water flow shear stress (τ) and Flow power (ω) increased with the increased of rainfall intensity, the Friction coefficient (f) decreased with the increase of rainfall intensity. The Flow velocity (V), and Froude number (Fr) decreased with the increased of rock exposure rate, while the Flow depth (h) and Friction coefficient (f) increased with the increase of rock exposure rate, and the change regulation of Reynolds number (Re), Water flow shear stress (τ) and Flow power (ω) were disparate in different rainfall intensity. Moreover, there were certain differences in hydrodynamic parameters among different slope lands. The quantitative relationship between sediment yield and hydrodynamic parameters was best fitted by Exponential function, Flow velocity (V), ($R^2=0.819$, $p<0.05$), Water flow shear stress (τ) ($R^2=0.858$, $p<0.05$) and Flow power (ω) ($R^2=0.890$, $p<0.05$) had better prediction effects on sediment yield of slope land, and Flow power (ω) was the best prediction parameter. [Conclusion] The development of this study has further enriched the theory of soil erosion in karst areas, and can provide reference for the establishment of water erosion prediction model suitable for exposed rock slope land.

Keywords: exposed rock; slope land; runoff and sediment yield; hydrodynamic characteristics; Karst; rocky desertification; soil erosion

Received: 2023-12-30

Revised: 2024-02-03

Accepted: 2024-02-22

Online(www.cnki.net): 2024-04-30

我国是一个岩溶大国,是世界上喀斯特类型最多,分布最广且面积最大的国家^[1]。裸露型、覆盖型及埋藏型岩溶总面积达 344 万 km^2 ,其中西南喀斯特区又是全球三大喀斯特集中分布区中连片裸露碳酸盐岩面积最大、岩溶发育最强烈的地区^[1-2]。碳酸盐岩广布的西南喀斯特地区成土缓慢,土层瘠薄,极易造成水土流失与石漠化的发生^[2]。水土流失带来的危害巨大,不仅导致土壤资源减少,更可导致土壤贫瘠、耕地资源减少等生态问题^[3]。水土流失是促进石漠化发生发展的重要原因之一,且石漠化表现为碳酸盐岩裸露、植被退化、土地生产力下降等一系列地表土地退化的过程^[4]。需要注意的是,岩石裸露是喀斯特区石漠化坡地显著特征,可能对水土流失与水动力特征产生重要影响。

水土流失是喀斯特地区石漠化形成和发展的核心问题,影响石漠化发生和发展,也是当前石漠化治理的关键^[5-6]。因此,深入研究土壤侵蚀驱动机制对区域土壤侵蚀及石漠化防治至关重要。喀斯特区坡地的土壤和下伏碳酸盐岩之间的土-石界面清晰,为直接接触,坡地典型特征为覆盖有碳酸盐岩等可溶性岩石^[7],对水文和泥沙过程产生重要影响,导致区域土壤侵蚀过程机理极为复杂。针对喀斯特坡地水土流失规律的复杂性,亟需要开展大量相关研究,以进一步丰富区域土壤侵蚀理论。

先前,针对裸露岩石对坡地水土流失的影响相关研究主要聚焦在砾石^[8]与岩石碎片(岩屑)^[9]覆盖于坡地的探讨。这些研究^[8-9]表明,随着砾石/岩石碎片含量或覆盖度的增加,水土流失呈削减趋势,但岩石

嵌入坡地表土层的相关研究还较薄弱,且在喀斯特区,岩石多呈形状不一的块状。喀斯特区的一项雨强为 60 mm/h,裸岩率为 0, 30%, 60% 的模拟试验^[10]表明,径流量与侵蚀量随裸岩率增加而减小。HAN 等^[11]在紫色土区的模拟试验表明,当岩石裸露率为 0~40% 时,坡地产流产沙呈减小趋势。此外,还有在西南喀斯特区的研究^[12]表明,随着岩石裸露率的增加,土壤流失先增大再减少,且土壤流失总体呈现减小趋势,但因岩石裸露对水土流失的影响较为复杂,故为波动性的减小。综上,地表裸露岩石对土壤侵蚀的影响是复杂的,岩石大小、岩石裸露率、土壤类型等都是不可忽视的重要因素^[13]。前期裸露岩石对坡地水土流失的影响研究主要聚焦岩石覆盖于坡面,而在喀斯特区碳酸盐岩嵌入地表的研究中,岩石裸露率大多设置在 50% 及以下。因此,有必要进一步深入开展相关研究,以明晰裸露岩石对喀斯特坡地土壤侵蚀的影响。

对土壤侵蚀过程中的坡面流水动力学进行分析是定量描述土壤侵蚀的必要条件^[14]。前人^[15-16]已对裸土坡面水动力特征进行了具有重要意义的研究。但在喀斯特区,岩石改变土壤特征和微地形,使水文过程比均质土壤更加复杂^[17]。岩石可以保护土壤表面免受雨滴的冲击和地表流量的分离,进一步降低地表流量及其运输能力^[18]。岩石覆盖还降低流速,限制飞溅效应,增加径流通过边坡的时间,避免土壤结皮,促进入渗^[19]。因此,裸露岩石对坡地土壤侵蚀影响还需结合水动力进行深入研究。先前,岩石覆盖的土壤侵蚀过程水动力机制相关研究多以砾石覆

盖^[20],以及岩石碎片覆盖^[21]为主。但土壤中岩石出现的模式在坡地水文过程中起着至关重要的作用^[22],而喀斯特地区碳酸盐岩多以嵌入式埋入土壤,因此还需深入探究其水土流失与水动力特性规律。甘风玲等^[23]通过模拟降雨探究顺/逆坡岩石倾角对坡地水力特性和土壤剥离率的影响发现,顺坡地表径流量高于逆坡,地下则相反,且线性函数可以很好地描述土壤剥离率与水动力参数 $[r, w$ 和 E (水流动能)]之间的关系。同时对岩石倾角进行了研究,但尚需关注岩石出露率对坡地水文过程产生的影响^[24]。

为深入定量探究裸露岩石对坡地水土流失及水动力特征的影响,本研究设置不同雨强降雨与不同岩石裸露率的土槽开展室内模拟试验,以期达到的目的为:(1)比较不同雨强对坡地产生产沙的影响;(2)探讨坡地产生产沙对不同岩石裸露率的响应;(3)探究不同雨强及不同岩石裸露率对坡地水动力特征的影响;(4)构建产沙与水动力参数间的数量关系。本研究的开展,可进一步丰富喀斯特区坡地土壤侵蚀理论,同时为建立适合于岩石裸露坡地的水蚀预测模型提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验材料采自黔西市金兰小流域($26^{\circ}50'58''$ — $26^{\circ}53'24''$ N, $106^{\circ}01'14''$ — $106^{\circ}03'39''$ E)(图1)。根据调查发现,采样区坡地的表层土厚度多在0—30 cm,故室内人工模拟试验土厚设置为20 cm。供试土壤(黄壤)和岩石(石灰岩)均取自金兰小流域。每次模拟降雨试验前,对已填筑的土壤物理背景值如含水率、容重、紧实度等物理特征进行严格厘定,土壤粒径组成为 <0.01 mm 约占比31.62%, $0.01\sim0.05$ mm 约占比46.41%, $0.05\sim1$ mm 约占比21.97%,土壤含水率约为20.22%,土壤容重约为 1.31 g/cm^3 ,总土壤孔隙率约为50.26%,土壤紧实度约为2 235 kPa。在参考喀斯特区前人^[25]试验的基础上,结合喀斯特区坡地地表特征设计室内模拟试验所采用的土槽。土槽长1.5 m、宽0.5 m、深0.3 m(图2)。坡度设置为 15° ,该坡度为喀斯特区的典型坡度(国家水土保持监测站网标准小区采用的坡度)。喀斯特区具有特殊的双重水文地质结构,为了符合喀斯特区坡地特征,确保地表产流产沙观测结果的科学性,在试验装置时考虑“地下漏失”问题,设置裂隙板以模拟地下漏失。依据前期野外采样区(金兰小流域)岩溶裂隙发育调查结果,该区浅层岩溶带裂隙度约为0—3%,本试验取2%,裂隙直径取2 cm,据此制作裂隙板。但由于本研究聚焦坡面地表流水动力特征及土壤流失特征,故

未将地下漏失纳入本研究范畴。

考虑到本试验野外采样区(金兰小流域)以轻—中度石漠化为主,故岩石裸露等级参照《岩溶地区水土流失综合治理技术标准》(SL 461—2009)^[26]关于强(重)度石漠化以下等级划分标准进行设置,采用0,10%,30%,50%,70% 5个岩石裸露等级。供试岩石为石灰岩,直径10 cm,高度30 cm,形状不规则,人工均匀地植入表层土壤中^[27],岩石较为均匀分布在土槽之中,底部抵达裂隙板。

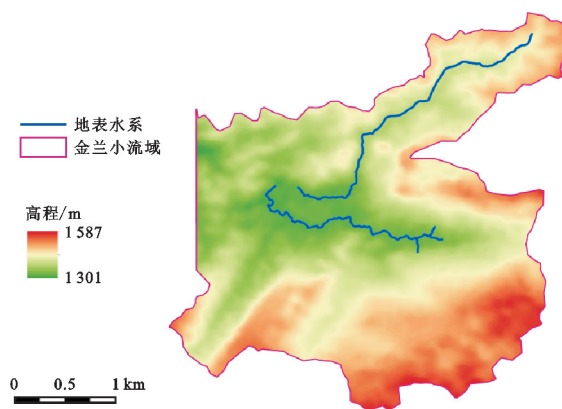


图1 金兰小流域

Fig. 1 Jinlan small watershed

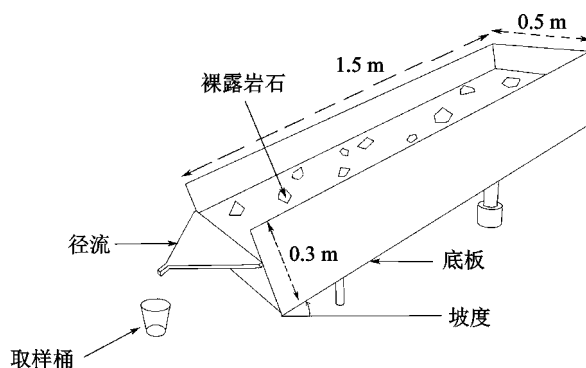


图2 室内试验土槽示意

Fig. 2 Schematic diagram of indoor test soil tank

1.2 人工模拟降雨与取样方法

模拟降雨试验于2022年10月10日至11月15日在贵州师范大学土壤侵蚀过程实验室开展。降雨器由流量计、水泵、喷头、供水管道、回流管道和水箱等部分组成,与GAN等^[28]描述的类似。降雨喷头高度为3.5 m,有效降雨面积为 $3\text{ m}\times4\text{ m}$,均匀度 $>85\%$,降雨强度范围为 $10\sim200\text{ mm/h}$ 。每次降雨试验开始前,严格率定降雨强度、降雨均匀度等参数。根据室内模拟降雨试验特点,在参考前人^[25]已开展的试验的基础上,设置30,60,90 mm/h 3个雨强。降雨试验持续时间设计为60 min(产流开始计算)。本试验主要涉及2个试验因素,即岩石裸露率和降雨强度,为保证试验准确性,对同一雨强下的土槽进行3次重复试验。

降雨产流期间,前 30 min 每 5 min 间隔记录和收集地表浑水样,后 30 min 每 10 min 记录与收集地表浑水样。试验结束后,将收集到的浑水样静置 24 h,然后倒出水样的上清液,其余的沉积物经过滤后在 105 °C 的烤箱中干燥 24 h 并称重。

1.3 水动力试验

本研究参考前人^[23]在喀斯特地区进行的相关研究方法,采用染色法开展水动力试验,染色剂选用常用的 KMnO_4 。沿坡长每间隔 0.5 m 设置流速观测点,记录水流通过一定土槽长度的时间,以此计算坡面的平均流速。本试验土槽坡长 1.5 m,故流速观测断面为 3 处,分别为距底端 0.5,1.0,1.5 m 处。降雨试验开始后,投放染色剂,当染色剂前锋位置到达 3 个观测断面时,分别记录时间,以测算各断面的最大流速。试验频率为,前 30 min 中每隔 5 min 测 1 次,后 30 min 中每隔 10 min 测 1 次。为减少试验误差,每次降雨试验均由同一人从坡顶向坡底依次进行流速测量。因坡面漫流为薄层流,直接测量误差大,故水深采用公式计算。水宽用薄钢尺进行测量,测量间隔时间与流速一致。采用温度计测量水流温度。同降雨试验一致,重复 3 次。

1.4 数据分析

水动力参数相关数据测量及计算:用 KMnO_4 染色法测出的流速乘以修正系数 0.67 得到坡地平均流速 $V(\text{m/s})$ ^[23]。

水深 $h(\text{m})$ 计算公式为:

$$h = q/dV \quad (1)$$

式中: q 为地表产流量(L/min); d 为坡面水流宽度(m); V 为平均流速(m/s)。

雷诺数(Re)计算公式为:

$$Re = VR/v \quad (2)$$

式中: R 为水力半径,其值近似等于水深 $h(\text{m})$; v 为运动黏滞系数(m^2/s); V 为平均流速(m/s)。

$$v = 0.017\ 75 \times 10^{-4} / (1 + 0.033\ 7t + 0.000\ 221t^2) \quad (3)$$

式中: t 为水温($^{\circ}\text{C}$)。

弗罗德数(Fr)计算公式为:

$$Fr = V/\sqrt{gh} \quad (4)$$

式中: g 为重力加速度, $g = 9.8\ \text{m/s}^2$ 。

水流阻力系数(f)计算公式为:

$$f = 8gRS/V^2 \quad (5)$$

式中: S 为水力坡度, $S = \sin \theta$, θ 为试验坡度($^{\circ}$)。

水流剪切力(τ , Pa)计算公式为:

$$\tau = Y_m gRS \quad (6)$$

式中: Y_m 为浑水密度(kg/m^3)。

水流功率 $[\omega, \text{N}/(\text{m} \cdot \text{s})]$ 计算公式为:

$$\omega = \tau V \quad (7)$$

式中: τ 为水流剪切力(Pa)。

试验数据采用 Excel 2019 和 SPSS 26.0 软件进行数据处理和统计分析,采用 Origin 2021 软件制图。运用单因素方差分析探究降雨强度和岩石裸露率对坡地水土流失的影响,以及水动力参数对裸露岩石的响应。使用 Pearson 相关性分析探讨产流产沙与水动力参数相关性。应用数学函数,构建坡地产沙与水动力参数之间的数量关系。

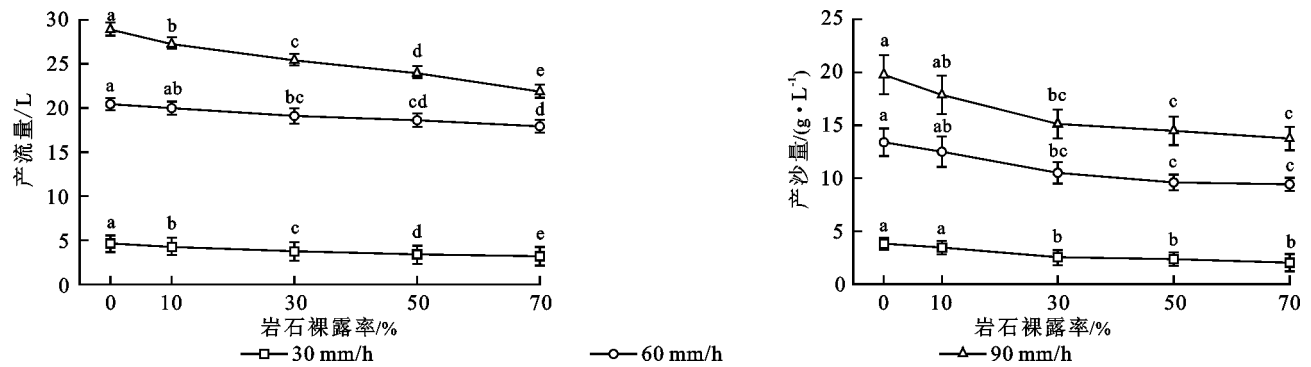
2 结果与分析

2.1 岩石裸露坡地产流产沙特征

2.1.1 雨强对坡地产流产沙的影响 降雨是坡地水土流失的直接因素。总体上,随着雨强的增大,地表产流产沙呈增大的趋势(图 3),即 $90\ \text{mm/h} > 60\ \text{mm/h} > 30\ \text{mm/h}$ 。大雨强($90\ \text{mm/h}$)下,产流量比小雨强($30\ \text{mm/h}$)平均提高 560.4%,比中雨强($60\ \text{mm/h}$)平均高 32.6%。大雨强($90\ \text{mm/h}$)下产沙量分别较小雨强($30\ \text{mm/h}$)和中雨强($60\ \text{mm/h}$)平均提高 469.2%和 46.1%。

2.1.2 裸露岩石对坡地产流产沙的影响 总体来看,地表产流产沙随岩石裸露率增加呈逐渐减小趋势(图 3),即 $0 > 10\% > 30\% > 50\% > 70\%$ 。方差分析发现,不同雨强条件下,不同岩石裸露率坡地地表产流量之间的差异存在一定差别。小雨强下,不同岩石裸露率间坡地产流量均呈显著差异($p < 0.05$);中雨强下,0 岩石裸露坡地分别与 30%,50%,70%岩石裸露坡地产流呈显著差异($p < 0.05$),10%岩石裸露坡地分别与 50%,70%岩石裸露坡地产流呈显著差异($p < 0.05$),30%与 70%岩石裸露坡地呈显著差异($p < 0.05$),其余裸露率坡地间产流差异不显著($p > 0.05$);在大雨强下,不同岩石裸露率间坡地产流呈显著差异($p < 0.05$)。

不同岩石裸露率坡地地表产沙也具有一定差异性,小雨强下,0,10%岩石裸露率坡地分别与 30%,50%,70%岩石裸露率坡地产沙呈显著差异($p < 0.05$),但二者间差异不显著($p > 0.05$);30%,50%,70%岩石裸露率坡地三者间产沙差异不显著($p > 0.05$)。在中、大雨强下,0 岩石裸露率坡地分别与 30%,50%,70%岩石裸露率坡地产沙呈显著差异($p < 0.05$);10%分别与 50%,70%岩石裸露率坡地间产沙呈显著差异($p < 0.05$),其余岩石裸露率坡地间差异不显著($p > 0.05$)。



注:图中不同小写字母表示不同雨强条件下不同岩石裸露率间差异显著($p < 0.05$)。

图3 不同雨强条件下不同岩石裸露率坡地产流产沙

Fig. 3 Runoff and sediment yield in slope land with different rock exposure rates under different rainfall intensities

2.2 岩石裸露坡地水动力特征

2.2.1 岩石裸露坡地水动力参数对雨强的响应 坡地产流产沙与水动力特征密切相关,探究不同雨强下坡地水动力参数变化对于理解产流产沙的机理机制至关重要。由表1可知,不同雨强下坡地水动力参数变化较大,流速(V)、水深(h)、雷诺数(Re)、弗罗德数(Fr)、水流剪切力(τ)及水流功率(w)随着雨强增大呈增大趋势,即 $90 \text{ mm/h} > 60 \text{ mm/h} > 30 \text{ mm/h}$ 。阻力系数(f)随雨强增大呈减小趋势,即 $30 \text{ mm/h} > 60 \text{ mm/h} > 90 \text{ mm/h}$ 。

2.2.2 岩石裸露坡地水动力参数对裸露岩石的响应

由表1可知,总体来看,水动力参数中流速(V)、弗

罗德数(Fr)随着岩石裸露率增加呈减小趋势,即 $0 > 10\% > 30\% > 50\% > 70\%$ 。水深(h)与阻力系数(f)随着岩石裸露率增加呈增大趋势,即 $0 < 10\% < 30\% < 50\% < 70\%$ 。雷诺数(Re)、水流剪切力(τ)及水流功率(w)在不同雨强中变化规律有差异。在小雨强下,雷诺数(Re)随岩石裸露率增加先减小再增大,在中、大雨强下,雷诺数随岩石裸露率增加总体呈增大趋势;在小雨强下,随着岩石裸露率增加,水流剪切力(τ)呈先减小后增大趋势,中、大雨强下总体呈增大趋势;水流功率(w)在小雨强下随着岩石裸露率增加总体呈减小趋势,中雨强下呈先增大后减小趋势,大雨强下呈先减小后增大的趋势。

表1 不同雨强条件下不同岩石裸露率坡地水动力特征

Table 1 Hydrodynamic characteristics of slope land with different rock exposure rates under different rainfall intensities

降雨强度/ ($\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$)	岩石 裸露率/%	流速(V) / ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	水深(h)/m	阻力系数(f)	雷诺数(Re)	弗罗德数(Fr)	水流剪切力(τ)/ Pa	水流功率(w)/ ($\text{N} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)
30	0	0.0366 ± 0.0004 a	0.00042 ± 0.00005 c	16.71 ± 1.39 d	14.21 ± 1.70 a	0.569 ± 0.023 a	0.0104 ± 0.0022 a	0.00039 ± 0.00008 a
	10	0.0302 ± 0.0019 b	0.00047 ± 0.00005 bc	26.71 ± 1.52 c	12.95 ± 2.02 a	0.447 ± 0.013 b	0.0103 ± 0.0019 a	0.00032 ± 0.00006 ab
	30	0.0248 ± 0.0026 c	0.00051 ± 0.00007 bc	44.98 ± 3.35 b	11.57 ± 2.73 a	0.351 ± 0.014 c	0.0082 ± 0.0016 a	0.00021 ± 0.00006 c
	50	0.0246 ± 0.0017 c	0.00057 ± 0.00008 ab	49.24 ± 2.95 b	13.11 ± 2.61 a	0.328 ± 0.010 c	0.0089 ± 0.0019 a	0.00022 ± 0.00004 bc
	70	0.0225 ± 0.0014 c	0.00067 ± 0.00008 a	80.22 ± 5.33 a	14.02 ± 2.46 a	0.276 ± 0.010 d	0.0890 ± 0.0018 a	0.00020 ± 0.00003 c
60	0	0.0529 ± 0.0029 a	0.00051 ± 0.00008 d	9.63 ± 1.66 c	25.11 ± 3.84 a	0.745 ± 0.064 a	0.0449 ± 0.0099 a	0.00250 ± 0.00036 a
	10	0.0470 ± 0.0016 b	0.00064 ± 0.00009 cd	15.27 ± 1.27 c	28.26 ± 4.91 a	0.590 ± 0.024 b	0.0531 ± 0.0123 a	0.00264 ± 0.00063 a
	30	0.0388 ± 0.0010 c	0.00074 ± 0.00009 bc	26.19 ± 2.12 b	26.86 ± 3.77 a	0.454 ± 0.020 c	0.0517 ± 0.0102 a	0.00217 ± 0.00047 a
	50	0.0373 ± 0.0027 c	0.00087 ± 0.00010 ab	32.90 ± 1.66 b	29.96 ± 5.45 a	0.403 ± 0.011 c	0.0553 ± 0.0087 a	0.00219 ± 0.00044 a
	70	0.0310 ± 0.0004 d	0.00101 ± 0.00019 a	26.18 ± 8.51 a	29.37 ± 5.69 a	0.310 ± 0.025 d	0.0551 ± 0.0137 a	0.00186 ± 0.00043 a
90	0	0.0772 ± 0.0078 a	0.00079 ± 0.00010 c	7.06 ± 0.12 e	56.27 ± 8.56 b	0.877 ± 0.009 a	0.1005 ± 0.0203 c	0.00821 ± 0.00243 ab
	10	0.0710 ± 0.0081 ab	0.00090 ± 0.00010 bc	11.16 ± 1.09 d	59.28 ± 13.00 b	0.752 ± 0.047 b	0.1039 ± 0.0196 c	0.00808 ± 0.00214 ab
	30	0.0613 ± 0.0013 bc	0.00108 ± 0.00018 bc	16.17 ± 1.18 c	61.51 ± 10.84 b	0.593 ± 0.037 c	0.1066 ± 0.0239 c	0.00704 ± 0.00134 c
	50	0.0591 ± 0.0033 c	0.00120 ± 0.00019 b	18.60 ± 0.75 b	65.34 ± 13.83 b	0.544 ± 0.011 c	0.1124 ± 0.0256 ab	0.00710 ± 0.00163 c
	70	0.0572 ± 0.0024 c	0.00173 ± 0.00024 a	30.09 ± 1.50 a	91.32 ± 16.43 a	0.440 ± 0.012 d	0.1535 ± 0.0315 a	0.00950 ± 0.00182 a

注:表中数据为平均值±标准差;同列不同小写字母表示不同处理间差异显著($p < 0.05$)。

由表1可知,小雨强下,0,10%岩石裸露坡地流速(V)分别与30%,50%,70%岩石裸露坡地流速(V)具有显著差异性($p < 0.05$),且二者间也呈显著差异($p < 0.05$),但30%,50%,70%岩石裸露坡地三者间流速(V)差异不显著($p > 0.05$);中雨强下,0,10%岩石裸露坡地流速(V)与其余岩石裸露率坡地

流速(V)均呈显著差异($p < 0.05$),二者间也呈显著差异($p < 0.05$),30%,50%岩石裸露坡地流速(V)分别与70%岩石裸露坡地流速(V)呈显著性差异($p < 0.05$),但二者间差异不显著($p > 0.05$);大雨强下,0岩石裸露率坡地流速(V)分别与30%,50%,70%岩石裸露坡地流速(V)呈显著差异($p < 0.05$),10%岩

石裸露率坡地流速(V)与 50%, 70% 岩石裸露率坡地流速(V)呈显著差异($p < 0.05$), 30%, 50%, 70% 岩石裸露坡地三者间流速(V)差异不显著($p > 0.05$)。

由表 1 可知, 小, 中雨强下, 不同岩石裸露坡地间水流剪切力(τ)差异均不显著($p > 0.05$), 大雨强下, 70% 和 50% 岩石裸露坡地间水流剪切力(τ)差异不显著($p > 0.05$), 但二者分别与其他岩石裸露坡地呈显著差异($p < 0.05$), 其余各坡地间差异不显著($p > 0.05$)。小雨强下, 0, 10% 岩石裸露坡地水流功率(w)分别与 30% 和 70% 岩石裸露坡地水流功率(w)呈显著差异($p < 0.05$), 但二者(0, 10%)间差异不显著($p > 0.05$), 其余坡地间差异也不显著($p > 0.05$);

中雨强下, 不同岩石裸露坡地间水流功率(w)差异均不显著($p > 0.05$); 大雨强下, 70% 岩石裸露坡地水流功率(w)分别与 30%, 50% 岩石裸露坡地呈显著差异($p < 0.05$), 但其余岩石裸露坡地间差异不显著($p > 0.05$)。

2.3 岩石裸露坡地产流产沙与水动力特征关系

2.3.1 产流产沙与水动力参数相关性 通过 Pearson 相关性分析探究产流产沙与水动力参数相关性。由表 2 可知, 产流产沙分别与除阻力系数(f)外的水动力参数呈极显著正相关($p < 0.01$), 与阻力系数(f)呈极显著负相关关系($p < 0.01$), 且相关系数大小有差异。各水动力参数间多呈显著相关关系。

表 2 坡地地表产流产沙与水动力参数相关性

Table 2 Correlation between runoff and sediment yield and hydrodynamic parameters on slope land

参数	产流	产沙	流速(V)	水深(h)	阻力系数(f)	雷诺数(Re)	水流剪切力(τ)	水流功率(w)	弗罗德数(Fr)
产流	1.000	0.980 **	0.880 **	0.260	-0.620 **	0.760 **	0.830 **	0.820 **	0.670 **
产沙	0.980 **	1.000	0.938 **	0.240 **	-0.670 **	0.770 **	0.840 **	0.860 **	0.770 **
流速(V)	0.880 **	0.940 **	1.000	0.220 **	-0.740 **	0.790 **	0.820 **	0.900 **	0.860 **
水深(h)	0.260	0.240	0.223	1.000	-0.310 *	0.730 **	0.670 **	0.590 **	0.230
阻力系数(f)	-0.620 **	-0.670 **	-0.744 **	-0.310 *	1.000	-0.390 **	-0.430 **	-0.500 **	-0.840 **
雷诺数(Re)	0.760 **	0.770 **	0.794 **	0.730 **	-0.390 **	1.000	0.990 **	0.960 **	0.410 **
水流剪切力(τ)	0.830 **	0.840 **	0.817 **	0.670 **	-0.430 **	0.990 **	1.000	0.970 **	0.450 **
水流功率(w)	0.820 **	0.860 **	0.900 **	0.590 **	-0.500 **	0.960 **	0.970 **	1.000	0.580 **
弗罗德数(Fr)	0.670 **	0.770 **	0.857 **	-0.230	-0.840 **	0.410 **	0.450 **	0.580 **	1.000

注: * 表示在 0.01 水平上显著相关; ** 表示在 0.05 水平上显著相关。

2.3.2 产沙与水动力参数的数量关系 为深入探析坡地地表产沙与水动力参数之间关系, 通过拟合二者间线性函数、幂函数和指数函数。由图 4~图 10 及表 3 可知, 总体而言, 坡地产沙与水动力参数间多以

指数函数拟合效果最好, 流速(V) ($R^2 = 0.819$, $p < 0.05$)、水流剪切力(τ) ($R^2 = 0.858$, $p < 0.05$)及水流功率(w) ($R^2 = 0.890$, $p < 0.05$)预测坡地产沙效果较好, 其中水流功率(w)为最佳预测参数。

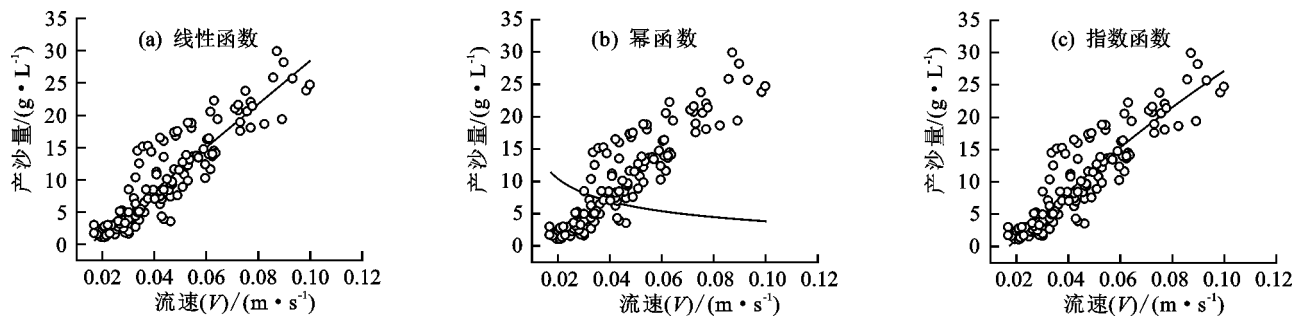


图 4 产沙与流速(V)拟合函数

Fig. 4 Sediment yield and flow velocity V fitting function

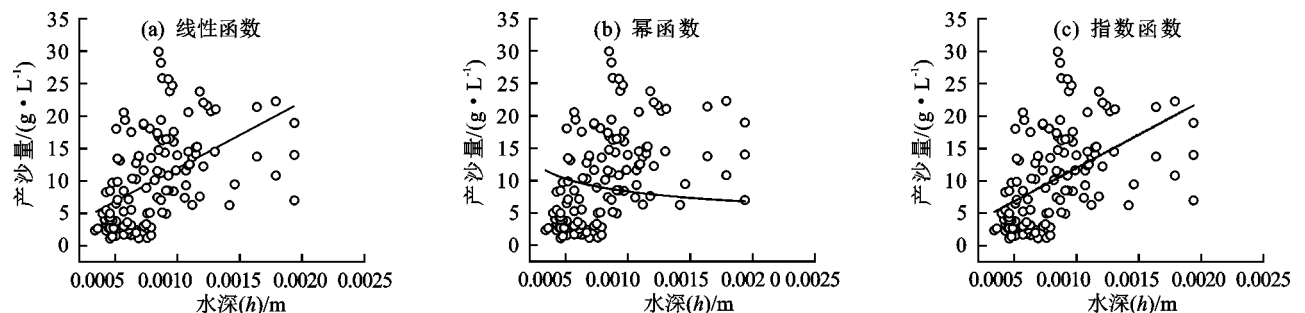


图 5 产沙量与水深(h)拟合函数

Fig. 5 Sediment yield and flow depth (h) fitting function

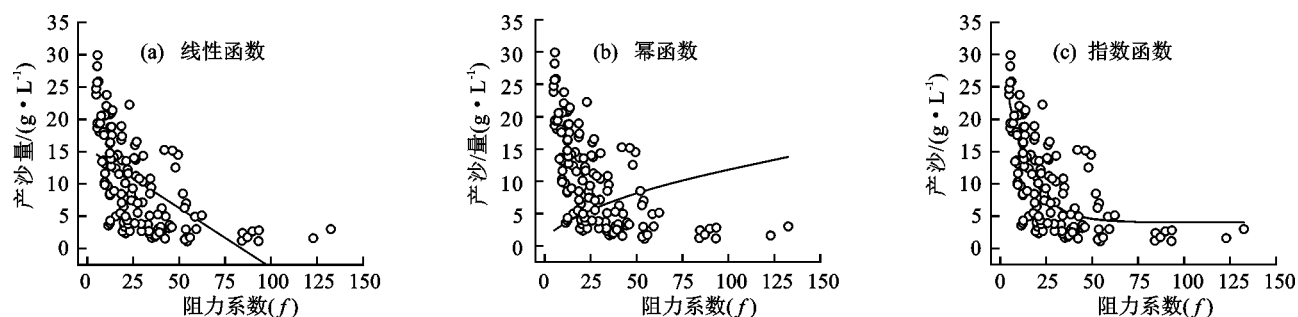
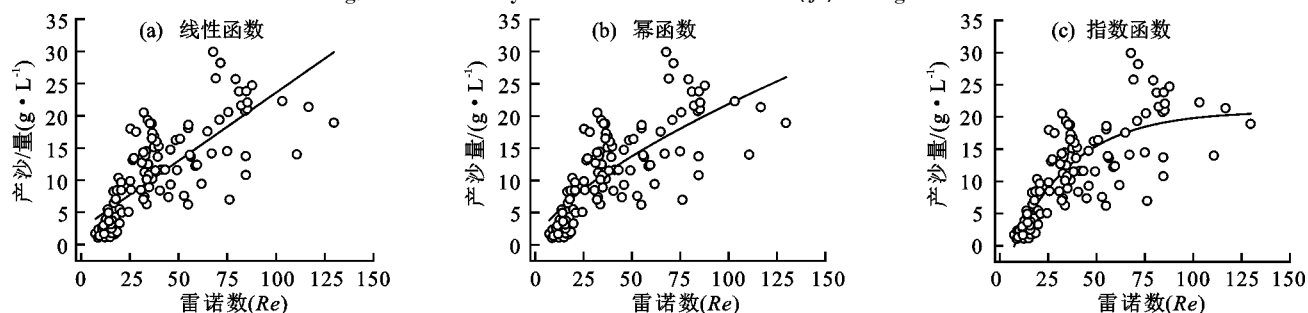
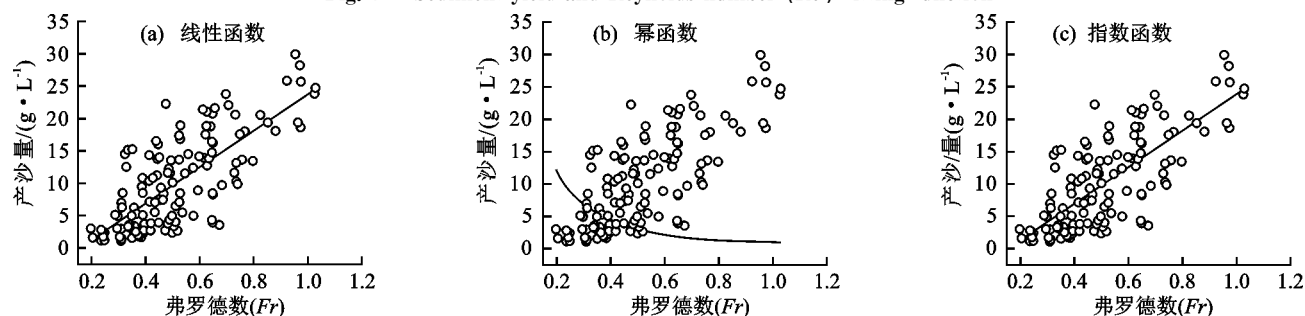
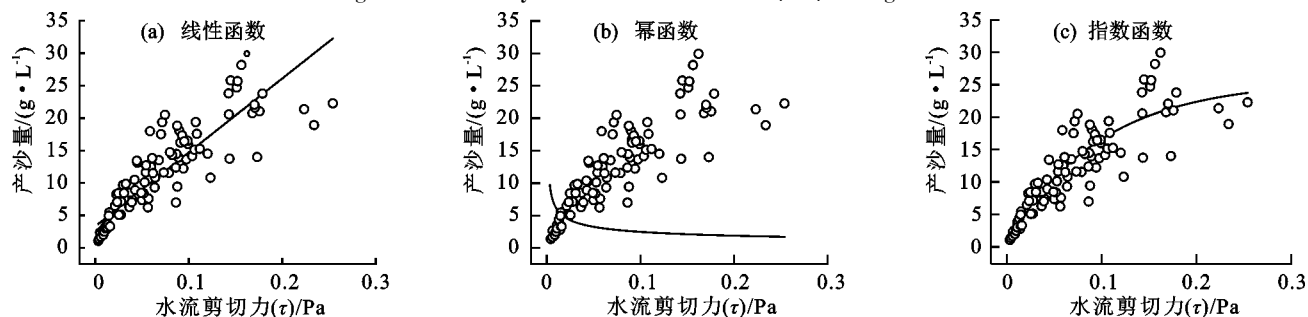
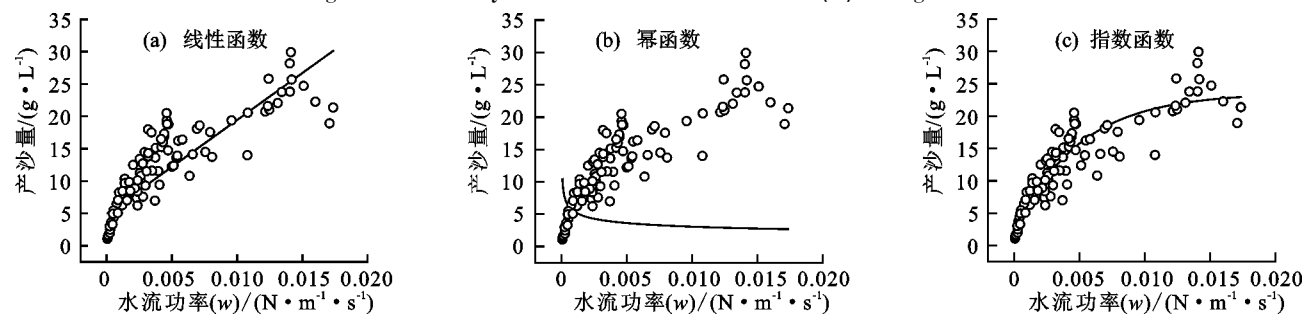
图6 产沙与阻力系数(f)拟合函数Fig. 6 Sediment yield and friction coefficient (f) fitting function图7 产沙与雷诺数(Re)拟合函数Fig. 7 Sediment yield and Reynolds number (Re) fitting function图8 产沙与弗罗德数(Fr)拟合函数Fig. 8 Sediment yield and Froude number (Fr) fitting function图9 产沙与水流剪切力(τ)拟合函数Fig. 9 Sediment yield and water flow shear stress (τ) fitting function图10 产沙与水流功率(w)拟合函数Fig. 10 Sediment yield and flow power (w) fitting function

表 3 产沙与水动力参数拟合函数
Table 3 Fitting function of sediment yield and hydrodynamic parameters

参数	线性函数		幂函数		指数函数	
	方程	R^2	方程	R^2	方程	R^2
流速(V)/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	$y = -5.01 + 335.82x$	0.818	$y = x^{-0.60}$	-0.667	$y = 82.45 - 89.50\exp(-4.82x)$	0.819
水深(h)/m	$y = 1.71 + 10\,287.11x$	0.244	$y = x^{-0.31}$	0.209		
阻力系数(f)	$y = 15.44 - 0.18x$	0.344	$y = x^{0.54}$	-0.890	$y = 4.04 + 27.63\exp(-0.08x)$	0.547
雷诺数(Re)	$y = 2.42 + 0.21x$	0.609	$y = x^{0.69}$	0.646	$y = 20.92 - 26.55\exp(-0.03x)$	0.704
弗罗德数(Fr)	$y = -4.43 + 28.25x$	0.563	$y = x^{-1.54}$	-1.272		
水流剪切力(τ)/Pa	$y = 3.31 + 114.00x$	0.785	$y = x^{-0.39}$	-1.204	$y = 25.61 - 25.00\exp(-10.21x)$	0.858
水流功率(w)/($\text{N} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)	$y = 4.94 + 1\,451.07x$	0.775	$y = x^{-0.24}$	-1.001	$y = 23.57 - 21.52\exp(-202.79x)$	0.890

3 讨论

3.1 坡地产流产沙对裸露岩石的响应

本研究结果表明,坡地地表产流产沙均随岩石裸露率的增加呈减少趋势(图 3),在西南喀斯特区的相关研究^[10]也得到类似结论。随着岩石裸露增加,坡地孔隙度增加,增加入渗率,因此地表径流减少^[29]。同样在喀斯特区的研究证明本研究的猜想,有学者^[30]在位于巴勒斯坦的半干旱岩溶环境条件下探究裸露岩石对径流入渗的影响,结果表明,岩石裸露坡地的径流入渗能力显著高于裸坡。降雨是坡面产流产沙的直接原因,而岩石覆盖可以减少降雨对土壤表面的击溅面积,从而减少对坡地的侵蚀^[31]。此外,随着岩石裸露率的增加,坡面可蚀面积(裸露表土面积)减少^[32],可蚀物质也随之减少^[27],导致土壤侵蚀风险的降低。裸露的岩石还阻止水流流动,从而减少水流,进一步地可减少对坡面的水力侵蚀能量来源;另外,土壤表面的岩石可以通过保护底层土壤防止结皮^[33],通过增大表面粗糙度增加储水量,延迟径流^[34]。已有研究^[35]表明,地表岩石碎片覆盖后延缓地表径流,增加入渗和地下径流,减少沉积物浓度和土壤流失。然而,在喀斯特区进行的模拟降雨试验^[36]表明,在较小的雨强(30 mm/h)下,坡地地表无径流产生,降雨通过漏失转化为地下径流。但本研究在 30 mm/h 雨强下也观测到地表流失,原因可能是前人试验采用的土壤为石灰土,而石灰土黏粒含量低,土壤吸水与保水性能弱,因此具有更高的入渗能力,更容易发生地下漏失。但本研究的试验采用土壤为黄壤,黏粒含量高,土壤吸水及保水性能强,入渗性能较低^[37]。

3.2 岩石裸露对坡地水动力特征的影响

本研究表明,流速(V)随岩石裸露率增加呈减小趋势。可能是岩石覆盖阻碍水流的运动,同时,岩石也增加坡地的粗糙度,故随着岩石裸露率的增加,水流动能被消耗的越多,减小流速。弗罗德数(Fr)是可以用来判断坡面流是否为急流或缓流的参数,当

$Fr > 1$ 时,惯性力大于重力的作用,水流流态判别为急流;当 $Fr = 1$ 时,则表示惯性力等于重力作用,此时水流判别为临界流;当 $Fr < 1$ 时,惯性力 < 重力作用,水流判别为缓流^[38],在本研究试验条件下水流均为缓流。本研究表明, Fr 随着岩石裸露率增加而减小,表明岩石对流态有重要影响。岩石裸露率增加使得坡面横截面面积和有效流宽度减少,导致水流深度(h)与岩石裸露率呈正相关,这也可能是流速(V)及弗罗德数(Fr)减少的原因^[39]。当雷诺数(Re) < 500 时,坡面水流为层流,本研究中坡面流均为层流。总体来看,雷诺数(Re)随着岩石裸露率增加呈非线性增大趋势,这与在伊朗进行的研究^[29]结果相反,可能归因于采用的岩石大小及覆盖方式差异。阻力系数与岩石裸露率呈正相关关系,这是由于岩石覆盖度的增加阻碍水流向下坡运动,并且增大坡面摩擦力,从而导致阻力系数的增大。

3.3 坡地土壤侵蚀的水动力机制

研究坡面径流分离土壤过程的水动力学机制是分析坡面水蚀过程、建立坡面水蚀模型的前提,具有重要的理论和实践意义^[40]。本研究表明,产流产沙与水动力参数间多呈显著相关(表 2),表明水动力参数的变化密切影响坡地的产流产沙过程。雨滴的击溅作用是导致坡地土壤侵蚀的重要因素^[41]。岩石裸露率坡地产流产沙量最大,可能由于降雨对坡面造成的击溅动能最大,水流阻力系数最小,故其流速快,水流侵蚀、挟沙能力强。随着岩石裸露率的增加,产流产沙量呈下降趋势,可能因为由雨滴提供给径流的沉积物将相当有限,加之降雨到岩石上,大大减少其对土壤表面撞击,减缓流速^[34],岩石裸露增加阻力系数,减缓流速,挟沙能力自然减弱。喀斯特区相关研究^[42]表明,岩石覆盖增加坡地粗糙度,提高土壤对水流剪切力的抵抗力,并降低水流的速度和侵蚀率^[29]。此外,岩石裸露率增加,弗罗德数减小,水流减缓,也减小侵蚀能力。本研究与 WANG 等^[35]关于岩石碎片覆盖阻碍土壤侵蚀的研究结果相似,因为雨滴被地表岩石碎片消散,通过消散能量和减少水流路径中的地

表径流来降低土壤剥离率。流速降低,阻力系数增加,促进水流的入渗,在西南喀斯特区的相关研究^[43]表明,裸露岩石增加土壤地下渗漏,进而减少地表流失。

本研究利用函数探究坡地产沙与水动力参数的数量关系(图4~图10、表3)。总体而言,岩溶坡地产沙与水动力参数关系以指数函数拟合效果最好,其中流速(V)($R^2=0.819$, $p<0.05$)、水流剪切力(τ)($R^2=0.858$, $p<0.05$)及水流功率(w)($R^2=0.890$, $p<0.05$)预测坡地产沙效果较好,水流功率(w)为最佳预测参数,本试验结果得到同样在西南喀斯特区进行的相关研究^[28]的证实。原因可能是水流功率(w)表示单位面积水势能的变化率,可以用来描述坡面径流的做功过程。因此,可以通过设置减小流速、减缓坡度的措施来防治水土流失,如坡改梯、植树造林等。但在三峡库区的研究^[35]表明,雷诺数(Re)是预测岩石覆盖坡面土壤流失的最佳参数,它们之间的关系可以用指数函数表示。在伊朗的研究^[29]表明,岩石覆盖地块中, q 、 V 、 h 与 Re 是预测泥沙量的良好水力指标。而三峡库区的相关研究岩石采用3~4 cm大小,且裸露率设置为0~40%,伊朗进行的试验采用岩石为3~6 cm大小,岩石大小及覆盖度的差异可能是与本研究预测产沙最佳水力参数及拟合函数不同有关。

3.4 不足与展望

本研究探讨不同雨强与裸露岩石对坡地地表产流产沙及水动力特征的影响。值得注意的是,喀斯特地区具有特殊的地表—地下双重“二元”水文地质结构。因此,本试验装置的设计中考虑了“地下漏失”的问题。但由于研究目的的原因,本研究并未量化裸露岩石对地下漏失的影响,将在后续研究中加以考虑。

4 结论

本研究利用室内模拟试验,探究了不同雨强与裸露岩石对坡地产流产沙及水动力特征的影响。结果表明,地表产流产沙随雨强增大呈增大趋势,随岩石裸露率增加呈减小趋势。在不同雨强条件下,30%及以上岩石裸露率坡地与0岩石裸露率坡地的产流产沙呈显著差异($p<0.05$)。低岩石裸露率坡地(10%)与高岩石裸露率坡地(50%及以上)间产流产沙差异显著($p<0.05$)。流速(V)、水深(h)、雷诺数(Re)、弗罗德数(Fr)、水流剪切力(τ)及水流功率(w)随雨强增大呈增大趋势,阻力系数(f)随雨强增大呈减小趋势。流速(V)、弗罗德数(Fr)随岩石裸露率增加呈减小趋势,水深(h)、阻力系数(f)随着岩石裸露率增加呈增大趋势,雷诺数(Re)、水流剪切力(τ)与水流功率(w)在不同雨强中变化规律有差异,且水动力参数变化在不同坡地间具有一定差异性。坡地产沙与水

动力参数关系以指数函数拟合效果最好,水流功率(w)为坡地产沙最佳预测参数。本研究的开展,进一步丰富了岩溶区土壤侵蚀理论,并可为建立适合于岩石裸露坡地的水蚀预测模型提供参考。

参考文献:

- [1] JIANG Z C, LIAN Y Q, QIN X Q. Rocky desertification in Southwest China: Impacts, causes, and restoration[J]. *Earth-Science Reviews*, 2014, 132: 1-12.
- [2] 袁道先. 岩溶石漠化问题的全球视野和我国的治理对策与经验[J]. *草业科学*, 2008, 25(9): 19-25.
YUAN D X. Global view on Karst rock desertification and integrating control measures and experiences of China[J]. *Pratacultural Science*, 2008, 25(9): 19-25.
- [3] 苏维词. 贵州喀斯特山区的土壤侵蚀性退化及其防治[J]. *中国岩溶*, 2001, 20(3): 205-210.
SU W C. Soil erosive deterioration and its control in Karst mountainous regions of Guizhou Province[J]. *Carsologica Sinica*, 2001, 20(3): 205-210.
- [4] 张殿发, 王世杰, 周德全, 等. 土地石漠化的生态地质环境背景及其驱动机制: 以贵州省喀斯特山区为例[J]. *农村生态环境*, 2002, 18(1): 6-10.
ZHANG D F, WANG S J, ZHOU D Q, et al. Eco-geo-environment of rocky desertification and its driving mechanism: A typical example in Karst mountainous areas of Guizhou Province[J]. *Rural Eco-Environment*, 2002, 18(1): 6-10.
- [5] 熊康宁, 李晋, 龙明忠. 典型喀斯特石漠化治理区水土流失特征与关键问题[J]. *地理学报*, 2012, 67(7): 878-888.
XIONG K N, LI J, LONG M Z. Features of soil and water loss and key issues in demonstration areas for combating Karst rocky desertification[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2012, 67(7): 878-888.
- [6] WANG S J, LIU Q M, ZHANG D F. Karst rocky desertification in southwestern China: Geomorphology, landuse, impact and rehabilitation[J]. *Land Degradation and Development*, 2004, 15(2): 115-121.
- [7] 张信宝, 王世杰, 曹建华, 等. 西南喀斯特山地水土流失特点及有关石漠化的几个科学问题[J]. *中国岩溶*, 2010, 29(3): 274-279.
ZHANG X B, WANG S J, CAO J H, et al. Characteristics of water loss and soil erosion and some scientific problems on Karst rocky desertification in Southwest China Karst area[J]. *Carsologica Sinica*, 2010, 29(3): 274-279.
- [8] SUN J, YU X, FAN D, et al. Hydrological and erosive response of soil surfaces to rainfall intensity as affected by gravel fragment coverage[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018, 73(3): 353-362.
- [9] LÜ J R, LUO H, XIE Y S. Effects of rock fragment content, size and cover on soil erosion dynamics of spoil

- heaps through multiple rainfall events[J]. *Catena*, 2019, 172:179-189.
- [10] 王济, 蔡雄飞, 雷丽, 等. 不同裸岩率下我国西南喀斯特山区土壤侵蚀的室内模拟[J]. *中国岩溶*, 2010, 29(1):1-5.
WANG J, CAI X F, LEI L, et al. Laboratory simulation on soil erosion under different bedrock outcrop rate in Southwest Karst area, China[J]. *Carsologica Sinica*, 2010, 29(1):1-5.
- [11] HAN Z, WANG X Y, SONG D D, et al. Response of soil erosion and sediment sorting to the transport mechanism on a steep rocky slope[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2019, 44(12):2467-2478.
- [12] 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.
- [13] 李瑞, 盘礼东. 岩石裸露与水土流失关系研究现状及石漠化因子研究存在的问题[J]. *水土保持学报*, 2021, 35(5):10-15, 23.
LI R, PAN L D. Research status of the relationship between rock exposure and soil and water loss and discussion on the existing problems in the research of rocky desertification factors[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2021, 35(5):10-15, 23.
- [14] WIRTZ S, SEEGER M, RIES J B. Field experiments for understanding and quantification of rill erosion processes[J]. *Catena*, 2012, 91:21-34.
- [15] 张科利, 唐克丽. 黄土坡面细沟侵蚀能力的水动力学试验研究[J]. *土壤学报*, 2000, 37(1):9-15.
ZHANG K L, TANG K L. A study on hydraulic characteristics of flow for prediction of rill detachment capacity on loess slope[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2000, 37(1):9-15.
- [16] 张光辉, 刘宝元, 张科利. 坡面径流分离土壤的水动力学实验研究[J]. *土壤学报*, 2002, 39(6):882-886.
ZHANG G H, LIU B Y, ZHANG K L. Experimental simulation of hydraulic mechanism of soil detachment by surface runoff on slopeland[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2002, 39(6):882-886.
- [17] COUSIN I, NICOLLAUD B, COUTADEUR C. Influence of rock fragments on the water retention and water percolation in a calcareous soil[J]. *Catena*, 2003, 53(2):97-114.
- [18] JOMAA S, BARRY D A, HENG B C P, et al. Influence of rock fragment coverage on soil erosion and hydrological response: Laboratory flume experiments and modeling[J]. *Water Resources Research*, 2012, 48(5):213-223.
- [19] ABRAHAM A D, GAO P, AEBLY F A. Relation of sediment transport capacity to stone cover and size in rain-impacted interrill flow[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2000, 25(5):497-504.
- [20] 马晨雷, 戴翠婷, 刘窑军, 等. 砾石覆盖对紫色土坡面流水动力学参数的影响[J]. *水土保持学报*, 2019, 33(6):150-155, 161.
MA C L, DAI C T, LIU Y J, et al. Effects of gravel covering on hydraulic characteristics of slope flow on purple soil[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2019, 33(6):150-155, 161.
- [21] RIEKE-ZAPP D, POESEN J, NEARING M A. Effects of rock fragments incorporated in the soil matrix on concentrated flow hydraulics and erosion[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2007, 32(7):1063-1076.
- [22] SMETS T, LÓPEZ-VICENTE M, POESEN J. Impact of subsurface rock fragments on runoff and interrill soil loss from cultivated soils[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2011, 36(14):1929-1937.
- [23] 甘凤玲, 何丙辉, 覃自阳. 喀斯特槽谷区的顺/逆层坡面对水动力学参数的影响[J]. *土壤学报*, 2019, 56(4):825-837.
GAN F L, HE B H, QIN Z Y. Effect of bedding slope on hydrodynamic parameters in typical Karst valley[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2019, 56(4):825-837.
- [24] JOMAA S, BARRY D, HENG B, et al. Effect of antecedent conditions and fixed rock fragment coverage on soil erosion dynamics through multiple rainfall events[J]. *Journal of Hydrology*, 2013, 484:115-127.
- [25] PENG X D, DAI Q H, DING G J, et al. Role of underground leakage in soil, water and nutrient loss from a rock-mantled slope in the Karst rocky desertification area[J]. *Journal of Hydrology*, 2019, 578:e124086.
- [26] 中华人民共和国水利部. 岩溶地区水土流失综合治理技术标准 SL 461—2009[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2009.
Ministry of water Resources of the Peoples Republic of China. Techniques standard for comprehensive control of soil erosion and water loss in Karst region SL 461—2009 [S]. Beijing: China Water Conservancy and Hydropower Press, 2009.
- [27] LI R, GAO J Y, HE M L, et al. Effect of rock exposure on runoff and sediment on Karst slopes under erosive rainfall conditions[J]. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 2023, 50:e101525.
- [28] GAN F L, HE B H, QIN Z Y. Hydrological response and soil detachment rate from dip/anti-dip slopes as a function of rock strata dip in Karst valley revealed by rainfall simulations[J]. *Journal of Hydrology*, 2020, 581:e124416.
- [29] OMIDVAR E, HAJIZADEH Z, GHASEMIEH H. Sediment yield, runoff and hydraulic characteristics in straw and rock fragment covers[J]. *Soil and Tillage Research*, 2019, 194:e104324.
- [30] SOHRT J, RIES F, SAUTER M, et al. Significance of preferential flow at the rock soil interface in a semi-arid Karst environment[J]. *Catena*, 2014, 123:1-10.

- [31] RODRIGO-COMINO J, GARCÍA-DÍAZ A, BREVIK E C, et al. Role of rock fragment cover on runoff generation and sediment yield in tilled vineyards[J]. *European Journal of Soil Science*, 2017, 68(6): 864-872.
- [32] 李瑞, 袁江. 区域尺度喀斯特区石漠化强度对土壤流失的影响[J]. *农业工程学报*, 2022, 38(15): 84-92.
- LI R, YUAN J. Influence of rocky desertification intensity of Karst areas on soil loss at a regional scale[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2022, 38(15): 84-92.
- [33] POESEN J W, TORRI D, BUNTE K. Effects of rock fragments on soil erosion by water at different spatial scales: A review[J]. *Catena*, 1994, 23(1): 141-166.
- [34] PRATS S, ABRANTES J, COELHO C, et al. Comparing topsoil charcoal, ash, and stone cover effects on the postfire hydrologic and erosive response under laboratory conditions[J]. *Land Degradation and Development*, 2018, 29(7): 2102-2111.
- [35] WANG X Y, LI Z X, CAI C F, et al. Effects of rock fragment cover on hydrological response and soil loss from Regosols in a semi-humid environment in South-West China[J]. *Geomorphology*, 2012, S151/S152: 234-242.
- [36] 彭旭东, 戴全厚, 袁应飞, 等. 喀斯特坡耕地裸坡侵蚀性降雨产流试验研究[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2019, 27(6): 1211-1224.
- PENG X D, DAI Q H, YUAN Y F, et al. Experimental study on runoff yield in erosive rainfalls on bare slope farmland in Karst Regions[J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2019, 27(6): 1211-1224.
- [37] WANG R, LI P, LI Z B, et al. Effects of gully head height and soil texture on gully headcut erosion in the Loess Plateau of China[J]. *Catena*, 2021, 207: e105674.
- [38] 董晓宇. 裸露砒砂岩区土壤—基岩复合坡面水分运移过程及侵蚀特征研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2023.
- DONG X Y. Study on water transfer process and erosion characteristics of soil-bedrock composite slope in bare Pisha Sandstone Area[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2023.
- [39] XIA L, SONG X Y, FU N, et al. Effects of rock fragment cover on hydrological processes under rainfall simulation in a semi-arid region of China[J]. *Hydrological Processes*, 2018, 32(6): 792-804.
- [40] 张光辉. 坡面水蚀过程水动力学研究进展[J]. *水科学进展*, 2001, 12(3): 395-402.
- ZHANG G H. Advances in study of runoff detachment processes based on hydraulics[J]. *Advances in Water Science*, 2001, 12(3): 395-402.
- [41] ELLISON W D. Studies of raindrop erosion[J]. *Agricultural Engineering*, 1944, 25: 131-136.
- [42] JIANG J, LIU D D, FEI Y H, et al. Combined effects of moss colonization and rock fragment coverage on sediment losses, flow hydraulics and surface microtopography of carbonate-derived laterite from Karst mountainous lands[J]. *Catena*, 2023, 229: e107202.
- [43] 彭旭东, 戴全厚, 杨智, 等. 喀斯特山地石漠化过程中地表地下侵蚀产沙特征[J]. *土壤学报*, 2016, 53(5): 1237-1248.
- PENG X D, DAI Q H, YANG Z, et al. Sediment yield of surface and underground erosion in the process of rocky desertification of Karst area[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2016, 53(5): 1237-1248.
- (上接第 102 页)
- [17] WU G L, LIU Y F, CUI Z, et al. Trade-off between vegetation type, soil erosion control and surface water in global semi-arid regions: A meta-analysis[J]. *Journal of Applied Ecology*, 2020, 57(5): 875-885.
- [18] HOU J, WANG H Q, FU B J, et al. Effects of plant diversity on soil erosion for different vegetation patterns[J]. *Catena*, 2016, 147: 632-637.
- [19] SUN W Y, SHAO Q Q, LIU J Y. Soil erosion and its response to the changes of precipitation and vegetation cover on the Loess Plateau[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2013, 23(6): 1091-1106.
- [20] HU J, LU Y H, FU B J, et al. Quantifying the effect of ecological restoration on runoff and sediment yields: A meta-analysis for the Loess Plateau of China[J]. *Progress in Physical Geography Earth and Environment*, 2017, 41(6): 753-774.
- [21] DENG L, KIM D G, LI M Y, et al. Land-use changes driven by 'Grain for Green' program reduced carbon loss induced by soil erosion on the Loess Plateau of China[J]. *Global and Planetary Change*, 2019, 177: 101-115.
- [22] CHEN Y P, WANG K B, LIN Y S, et al. Balancing green and grain trade[J]. *Nature Geoscience*, 2015, 8: 739-741.
- [23] 张琳卿, 覃莉, 刘忠仙, 等. 黔中喀斯特地区坡面种植措施对土壤水分及产流产沙的影响[J]. *水土保持通报*, 2021, 41(3): 15-21, 30.
- ZHANG L Q, QIN L, LIU Z X, et al. Effects of slope planting measures on soil moisture, runoff, and sediment yield in Karst area of central Guizhou Province[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2021, 41(3): 15-21, 30.
- [24] 朱燕琴, 赵志斌, 齐广平. 黄土丘陵区植被类型和降雨对坡面侵蚀产沙的影响[J]. *水土保持学报*, 2019, 33(2): 9-16.
- ZHU Y Q, ZHAO Z B, QI G P. Effects of vegetation types and rainfall regimes on slope erosion and sediment yield in loess hilly and Gully Region[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2019, 33(2): 9-16.