

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2025.02.023

CSTR:32310.14.stbxb.2025.02.023

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 Xinyin, DAI Quanhong, YAN Youjin, 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.

出露基岩形态及空间分布对喀斯特坡地水土流失的影响

张心印¹, 戴全厚¹, 严友进², 徐小金¹

(1. 贵州大学林学院, 贵阳 550025; 2. 南京林业大学生态文明建设与林业发展研究所
南方可持续林业协同创新中心, 南京 210037)

摘要: [目的] 通过研究出露基岩形状及空间分布对喀斯特区坡地水土流失的影响, 为进一步认识喀斯特坡地自然降雨条件下侵蚀规律提供科学依据。[方法] 以喀斯特不同岩土覆被坡地为研究对象, 通过自然降雨监测, 研究自然降雨、出露基岩形状及空间分布对喀斯特坡地产生沙的影响。[结果] 1) 基岩形态在雨中降雨强度下对地表径流影响显著, 小雨、中雨条件下 K 型格局 (2.01、4.79 L) > L 型格局 (1.75、3.34 L), 大雨及以上降雨时, 此趋势出现反转; 空间分布对地表产流无明显影响。2) 基岩形态在 5 种降雨条件下对坡地壤中流影响显著, 呈 K 型格局 > L 型格局; 5 种雨强条件下, 空间分布对壤中流影响为 R 型格局 > M 型格局 > L 型格局。3) 基岩形态对地下径流的影响中, 小雨、中雨下 K 型格局 < L 型格局, 大雨及以上 K 型格局 > L 型格局; 空间分布在暴雨、大暴雨 2 种雨强条件下地下径流量 L 型格局 (2.31、2.5 L)、R 型格局 (2.95、2.36 L) > M 型格局 (0.47、1.21 L)。4) 大暴雨条件下出露基岩的形态及空间分布变化均能显著影响地表侵蚀产沙量 ($p < 0.05$), 产沙量为 L 型格局 (11.17 t/hm²) > R 型格局 (8.99 t/hm²) > M 型格局 (7.93 t/hm²)、L 型格局 > K 型格局 (7.06 t/hm²)。[结论] 出露基岩形态及空间分布对喀斯特坡地产生沙有显著影响, 且该影响受到降雨类型的调控。今后在水土流失防治中应根据不同降雨类型进行重点治理。

关键词: 喀斯特坡地; 自然降雨; 出露基岩形状; 出露基岩空间分布

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2025)02-0021-09

Influence of the Morphology and Spatial Distribution of Exposed Bedrock on Soil Erosion on Karst Slopes

ZHANG Xinyin¹, DAI Quanhong¹, YAN Youjin², XU Xiaojin¹

(1. College of Forestry, Guizhou University, Guiyang 550025, China; 2. Southern Sustainable Forestry
Collaborative Innovation Center, Institute of Ecological Civilization Construction and
Forestry Development, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China)

Abstract: [Objective] By studying the influence of the morphology and spatial distribution of exposed bedrocks on soil erosion on karst slopes, it is helpful to deepen the understanding of erosion laws under natural rainfall conditions on karst slopes, and to provide a reference for rocky desertification control in karst areas. [Methods] Through the monitoring of natural rainfall, the effects of natural rainfall, the morphology and spatial distribution of outcropping bedrock on the sediment production of karst slopes were studied by taking different rock-soil covered slopes as the research objects. [Results] 1) The change in the morphology of exposed bedrock could significantly affect surface runoff, and such effect was rain-intensity dependent. 2) The morphology of exposed bedrock was one of the key factors in the dynamic changes of soil flow, and the spatial distribution of bedrock significantly affected the formation of soil flow under different rainfall intensities. Among them, the aggregation distribution (R-type) was the most conducive to the generation of soil flow. 3) The change of bedrock morphology mainly affected the underground runoff under the conditions of light rain and

收稿日期: 2024-10-11

修回日期: 2024-11-08

录用日期: 2024-11-15

网络首发日期 (www.cnki.net): 2025-02-05

资助项目: 国家自然科学基金项目 (42167044, 42467045)

第一作者: 张心印 (1998—), 男, 硕士研究生, 主要从事水土保持研究。E-mail: 1091781483@qq.com

通信作者: 戴全厚 (1969—), 男, 教授, 博士, 主要从事水土保持研究。E-mail: gzudjj@163.com

http://stbxb.alljournal.com.cn

moderate rain, while in large-scale rainfall events (such as rainstorm and heavy rainstorm), the spatial distribution pattern of bedrock was closely related to the formation of underground runoff. 4) The morphology and spatial distribution of exposed bedrock played an important role in soil erosion and sediment transport during extreme rainfall events. [Conclusion] The morphological changes of exposed bedrock significantly affect the trends of surface runoff and soil flow, and such effects vary with rainfall intensity. In the future, soil erosion control measures should be taken according to different rainfall types.

Keywords: karst slope; natural rainfall; morphology of outcropping bedrock; spatial distribution of outcropping bedrock

Received: 2024-10-11

Revised: 2024-11-08

Accepted: 2024-11-15

Online (www.cnki.net): 2025-02-05

土壤侵蚀是世界公认的最严重的生态环境问题之一,能够导致土地退化和生态系统服务能力降低,甚至消失^[1]。作为全球生态最脆弱地区之一的喀斯特地区,相较于其他地区存在着独特的“二元结构”,即地表和地下形成相连通的双层水文系统^[2]。这种特殊的“二元结构”导致水土流失在地表和地下同时发生^[3]。特殊的水土流失形式使得该地区水土流失治理的难度异于非喀斯特地区,而严重的水土流失已对该地区生态环境问题产生严重的威胁^[4-5]。因此,喀斯特地区土壤侵蚀问题引起全球范围内广大学者的关注。

基岩出露作为典型喀斯特地貌特征之一,从多个方面影响土壤侵蚀^[6],裸露的基岩不仅通过增加不透水面来影响降雨径流的分布,而且通过拦截降雨径流来影响坡面径流的形成过程^[7]。部分学者^[4,8-10]指出,随着基岩裸露率的增加,土壤流失呈线性或指数下降趋势;也有研究^[5]表明,不同的岩面形态均能提升地表径流的挟沙能力,加剧坡面地表产沙;敖利满等^[11]通过模拟降雨发现,出露岩石空间分布格局相较裸坡能够明显增加坡面产流产沙;吴瑶琴等^[12]研究指出,在自然降雨条件下岩面形态和降雨量是影响岩面径流的主要因素。当前关于喀斯特区出露岩石对坡面影响仍主要集中在裸露率,岩石出露特征如岩面形态、岩层倾向等对喀斯特区坡面土壤侵蚀均有着重要影响^[5,13]。岩石形态变化影响降雨转化为岩-土界面流,从而影响坡面产流产沙^[14]。不透水的岩石在空间分布的差异将显著影响坡地水分连通性,进而影响径流驱动的侵蚀产沙过程与机制^[15-16]。目前针对喀斯特出露基岩的研究多集中于用模拟降雨或冲刷探究岩石出露对喀斯特坡地水土流失的影响^[4,17-18]。与模拟降雨不同的是,自然降雨中的降雨模式在整个降雨事件过程中通常是非稳态的,使得二者之间存在显著差异^[19-20],降雨模式的变化不仅直接影响水文和侵蚀过程,而且在地表径流与土壤侵蚀之间发挥着重要的中介作用,直接反映

径流引发侵蚀的能力^[21]。因此,深入比较分析自然降雨条件下出露岩石形状及空间分布变化对喀斯特坡地土壤侵蚀的影响,对于理解土壤侵蚀的动态机制、制定有效的水土保持措施,以及进一步提升石漠化治理效果具有重要意义。本文通过自然监测,探索不同出露基岩形状及空间分布对坡地地表与地下产流产沙的作用,揭示基岩形状与空间分布对喀斯特坡地水土流失的作用。研究结果能够为理解岩土覆被格局对西南喀斯特区土壤侵蚀的影响和防治提供重要的方法与数据参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验区位于贵州省贵阳市花溪区,试验土壤为中国西南喀斯特区石灰土。该地区属于温暖的大陆性季风气候,夏季炎热潮湿,冬季寒冷干燥,年平均气温 15.3℃,年平均降水量 1 200 mm^[22]。雨季主要发生在 4—10 月。

1.2 试验设计

1.2.1 试验土壤 试验土壤样品采自贵州省贵阳市花溪区喀斯特坡地表层碳酸盐发育而成的石灰性黏壤土,该地区土层深度约 20~30 cm,在试验开始前,将土壤样品进行预处理,包括风干、分散、均匀混合,并过 5 mm 筛。

1.2.2 边坡模拟 试验开展前对贵州省主要喀斯特坡地裸露基岩形态及空间分布进行调查。基于野外调查结果,设计尺寸为 2 m×1 m×0.35 m 的试验钢槽,用来模拟不同的基岩出露情形的喀斯特坡地。试验共设计 4 种基岩出露情形,钢槽下部设计集水面板接入集水桶,用于收集地表径流泥沙;在钢槽侧边距土壤样品填充,顶部 30、20、10 位置处开孔并接入集水桶,用来收集壤中流;在钢槽底部开孔,以模拟喀斯特坡地地下孔(裂)隙,并接入钢槽底部安装的集水桶,用于收集沿地下孔(裂)隙的径流(图 1)。

本模拟试验中,坡度设定为 15°,基岩裸露率为

5%,地下孔隙度控制在3%。出露基岩采用人工浇筑混凝土方式来进行模拟,并设计2种基岩形态(K型和L型)和3种空间分布(L型、M型、R型)。其中K型和L型出露基岩长宽比分别为1:1和1:2,空间分布均呈均匀分布,3种典型出露基岩空间分布为L型(均匀分布)、M型(居中分布)、R型(聚集分布),出露基岩长宽比均为1:2(图2)。土槽于2021年9月完成填装,钢槽内填土深度为30 cm,共分为3层填充,由上至下体积分别为表层(0~10 cm)1.14 g/cm³、中层(10~20 cm)1.40 g/cm³和下层(20~30 cm)1.40 g/cm³。

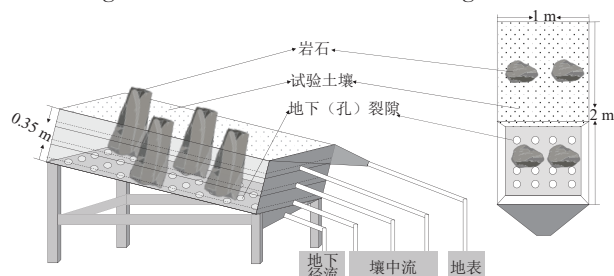


图1 试验径流收集装置示意

Fig. 1 Schematic diagram of the runoff collection device for the experiment

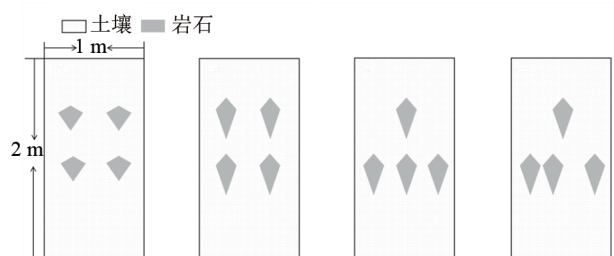


图2 不同基岩形态及空间分布示意

Fig. 2 Schematic diagram of the morphologies and spatial distributions of different bedrocks

1.3 样品收集

从2022年4月1日至10月31日,每次降雨后,通过桶内收集的水来获得每次降雨事件后的径流量。测定完径流量后,倒掉上层水样中多余的水分,剩余的水样在105℃的烘箱中干燥24 h。最后对干燥后的底泥称重,得到该次降雨时间的土壤流失量^[15]。降雨事件按照中国气象局降雨分级标准进行分类^[23],共分为5类,分别为小雨(<10 mm/d)、中雨(10~25 mm/d)、大雨(25~50 mm/d)、暴雨(50~100 mm/d)和大暴雨(100~250 mm/d)。试验钢槽旁放置0.20 mm的翻斗式雨量计,用于实时记录监测时间段内次降雨量。

1.4 数据分析

采用地表径流系数(surface runoff coefficient, SRC)和土壤流失量系数(soil loss coefficient, SLC)表示水土流失响应变量。地表径流系数(SRC)为每

次降雨事件下径流深度与降雨量的比值,%。

$$SRC = (SR/P) \times 100\% \quad (1)$$

式中:SRC为地表径流系数,%;SR为给定降雨事件的地表径流深度,mm;P为降雨深度,mm。

土壤流失系数(SLC)表示单位降雨深度引起的单位面积输沙量,g/(m²·mm)。SRC与SLC能反映不同类型降雨事件产生径流和土壤流失的能力^[24]。

$$SLC = (SM/A)/P \quad (2)$$

式中:SLC为土壤流失系数,g/(m²·mm);SM为土壤流失量,g;A为径流样地面积,m²;P为降雨深度,mm。

通过单因素方差分析不同降雨类型及不同基岩格局条件下SRC与SLC的显著差异性,同时通过双因素方差分析降雨强度与基岩格局间交互效应及主效应,使用SPSS 26.0软件进行统计分析,并在Origin 2021软件中进行绘图。

2 结果与分析

2.1 降雨特征

雨季大雨(25~50 mm/d)及以上降雨事件主要集中在5—9月(图3),各降雨类型下的降雨特征见表1。监测期内侵蚀事件以中雨和暴雨为主,2种降雨事件共占全部侵蚀事件的58%。由表1可知,5种降雨事件中,平均雨强I由小雨向中雨、大暴雨、大雨、暴雨依次递增;而平均I₃₀则由小雨、中雨、大雨、大暴雨、暴雨依次递增。大暴雨平均降雨持续时间最长(600 min),降水量最大(141.3 mm)。相反,大雨平均降雨持续时间最短(204 min),平均雨强却高于大暴雨。

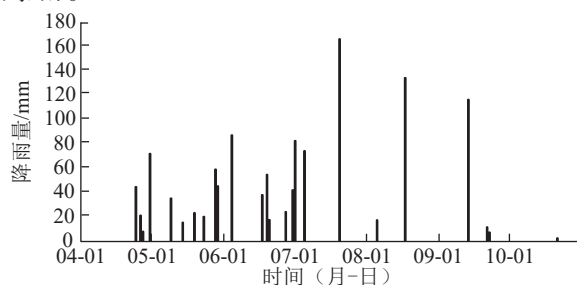


图3 2022年雨季监测期间次降雨事件雨量

Fig. 3 Rainfall during the monitoring period in the rainy season of 2022

2.2 基岩斑块与降雨模式对坡地产流、产沙的影响

2.2.1 基岩斑块与降雨模式对坡地产流的影响 出露基岩的斑块形状变化对地表径流、壤中流及地下径流均有显著影响($p < 0.05$),且这些影响在不同降雨强度下呈不同变化特征(图4)。小雨和中雨时,K型格局的地表产流(2.01、4.79 L)明显高于L型格局(1.75、3.34 L)(图5a)。当发生大雨及以上降雨时,此趋势出现反转。

表 1 监测期内降雨特征

Table 1 Rainfall characteristics during the monitoring period

降雨类型	次数	统计指标	$I_{30}/(\text{mm}\cdot\text{min}^{-1})$	$I/(\text{mm}\cdot\text{min}^{-1})$	D/min	P/mm
小雨	3	平均值	0.058	0.025	300.000	5.600
		最大值	0.160	0.051	420.000	7.600
		最小值	0.007	0.007	150.000	2.200
		标准差	0.072	0.019	112.250	2.417
中雨	8	平均值	0.184	0.075	465.000	18.475
		最大值	0.347	0.231	1 170.000	23.800
		最小值	0.020	0.010	90.000	11.200
		标准差	0.116	0.068	326.573	3.950
大雨	5	平均值	0.672	0.160	204.000	40.800
		最大值	0.967	0.697	330.000	45.000
		最小值	0.340	0.097	60.000	35.000
		标准差	0.229	0.223	87.772	3.853
暴雨	6	平均值	1.098	0.305	150.000	71.433
		最大值	2.033	0.725	370.000	87.000
		最小值	0.287	0.101	120.000	54.600
		标准差	0.613	0.212	158.193	11.635
大暴雨	3	平均值	0.997	0.235	600.000	141.300
		最大值	1.140	0.241	690.000	166.200
		最小值	0.853	0.228	510.000	116.400
		标准差	0.144	0.006	90.000	24.900

注: P 为降雨量; D 为降雨持续时间; I 为降雨事件的平均强度; I_{30} 为降雨事件的最大 30 min 强度。

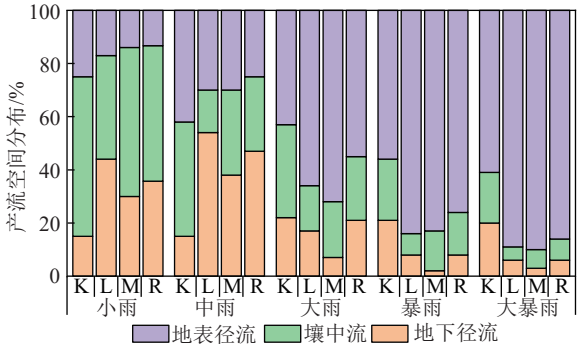


图 4 基岩格局与降雨模式对产流空间分配的影响

Fig. 4 Influence of bedrock pattern and rainfall pattern on the spatial distribution of runoff

基岩形态在 5 种降雨条件下对坡地壤中流影响显著($p<0.05$),表现为 K 型格局>L 型格局(图 5b)。出露基岩形状对地下径流的影响也十分显著($p<0.05$)。在 K 型格局下,地下径流量随着降雨量的增大而增加(图 5c),L 型格局下的情况则较为复杂,小雨和中雨时,其地下径流量(分别为 4.49、9.49 L)显著超过 K 型格局(分别为 1.29、1.18 L);但大雨及以上时,L 型格局的地下径流量(2.31、2.19、2.5 L)则远低于 K 型格局(4.14、7.66、11.79 L)。出露基岩的空间分布也对坡地产流起到调控作用。R 型空间格局在促进壤中流形成方面表现尤为突出,显著优于 L 型和 M 型空间格局($p<0.05$)。具体而言,M 型和 R 型格局下

的壤中流约为 L 型格局的 1.5~2.0 倍,表现为 R 型>M 型>L 型的空间分布效应(图 5b)。在暴雨及大暴雨条件下,出露基岩的空间分布变化对地下径流量的调控作用尤为显著。L 型和 R 型空间格局下的地下径流量(L 型为 2.31、2.5 L,R 型为 2.95、2.36 L)远大于 M 型(0.47、1.21 L)($p<0.05$)(图 5c)。

2.2.2 基岩斑块与降雨模式对坡地产沙的影响 本试验监测期间并未收集到地下泥沙。由于喀斯特区地下孔(裂)隙存在,使得土壤通过降雨下渗所提供的动力向最近的孔(裂)隙移动^[25],但由于孔隙本身的空间小,土壤更多的是充填在其中^[26]。出露基岩的形态及空间分布变化对地表产沙的影响受降雨条件的影响显著(图 6)。其中,大暴雨条件下出露基岩的形态变化能够显著影响地表侵蚀产沙量($p<0.05$)。在该降雨条件下,L 型格局的侵蚀产沙量(11.17 t/hm²)显著超过 K 型格局(7.06 t/hm²)。当出露基岩的斑块形状相同时,L、M、R 3 种不同空间格局在大暴雨条件下产生的泥沙量存在显著差异($p<0.05$)。L 型格局的泥沙量最高(11.17 t/hm²),R 型格局次之(8.99 t/hm²),而 M 型格局最低(7.93 t/hm²),表明出露基岩空间分布在大暴雨条件下对地表产沙的调控作用,并揭示不同基岩斑块空间分布对降雨侵蚀响应的差异性。

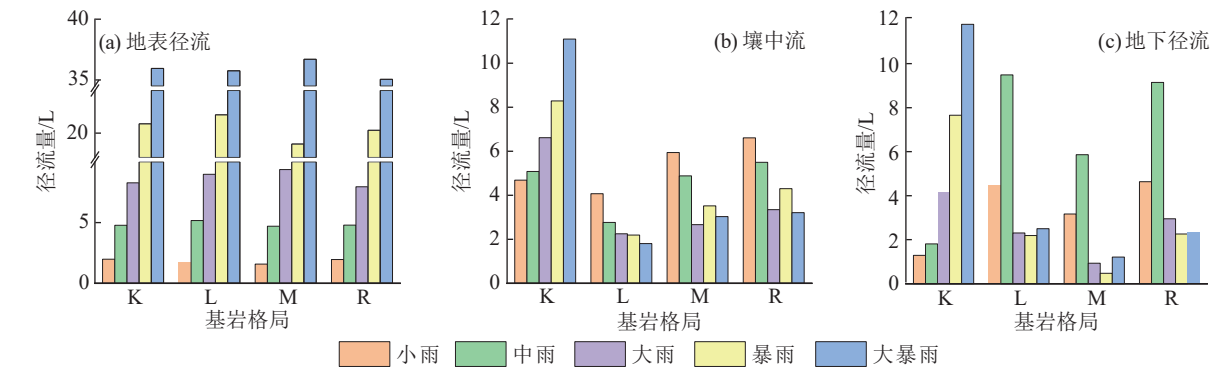


图 5 基岩格局与降雨模式对坡地径流空间分布的影响

Fig. 5 Influence of bedrock pattern and rainfall pattern on the spatial distribution of slope flows

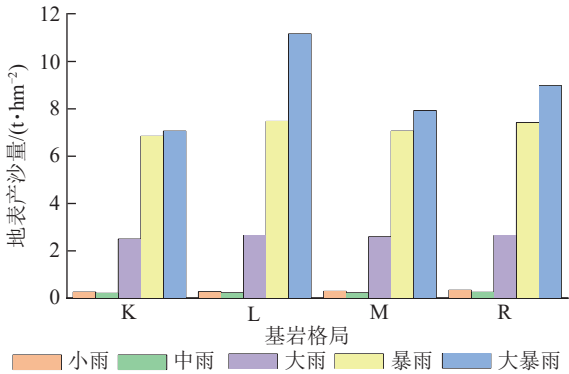


图 6 基岩格局与降雨模式对坡地地表产沙的影响

Fig. 6 Influence of bedrock pattern and rainfall pattern on surface sediment production on slopes

2.2.3 基岩斑块格局和降雨模式对产流产沙的作用

由图 7 可知,不同基岩格局坡面的地表径流量与地表产沙量之间呈显著正相关($p<0.05$)。回归分析结果显示,地表径流量与产沙量之间呈幂函数关系,即产沙量随着径流量的增加而增加。拟合方程进一步揭示基岩格局对喀斯特坡面径流与泥沙关系的重要影响。根据分析结果,不同基岩格局对坡面径流与泥沙关系的影响表现为 $K>M>R>L$ 。具体来说,K 型格局下的出露基岩斑块形状在相同降雨条件下能显著提升坡面的产沙量,相较于 L 型格局表现更为明显。从空间分布的角度来看,M 型格局对坡面径流与泥沙关系的影响略大于 R 型格局,且二者均远大于 L 型格局。

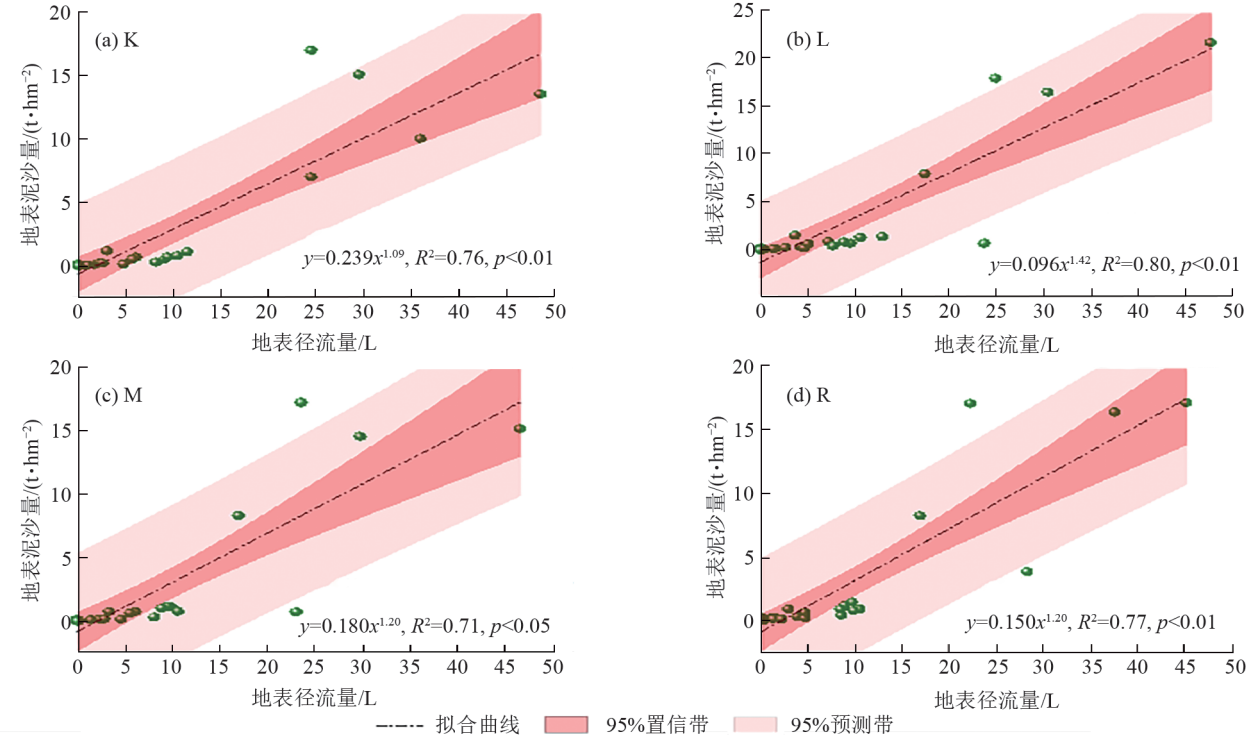


图 7 4 种基岩格局的地表径流量和产沙量之间的关系

Fig. 7 Relationships between surface runoff and sediment production of four bedrock patterns

为进一步明确自然降雨条件下降雨特征、出露基岩形态及空间分布对喀斯特坡地径流产沙影响,对降雨强度、降雨量、产流产沙量等相关因子进行冗余分析(RDA)表明,降雨是驱动地表侵蚀的主要因素,其中降雨量和降雨强度起到重要作用。基岩宽度的增大对地表产流、产沙有抑制作用,与之对应的

则是促进壤中流和地下径流的增加。而同等基岩出露面积条件下,基岩长度越长,越有利于地表产流和产沙。基岩空间分布对坡地产流产沙也有一定的影响(图 8b)。除居中型以外,聚集型和均匀型的基岩

空间分布对坡地产流产沙的作用具有明显的影响。其中,聚集型空间分布对地下产流产沙有明显的促进作用,而均匀型分布则一定程度上抑制壤中流和地下径流的产流产沙。

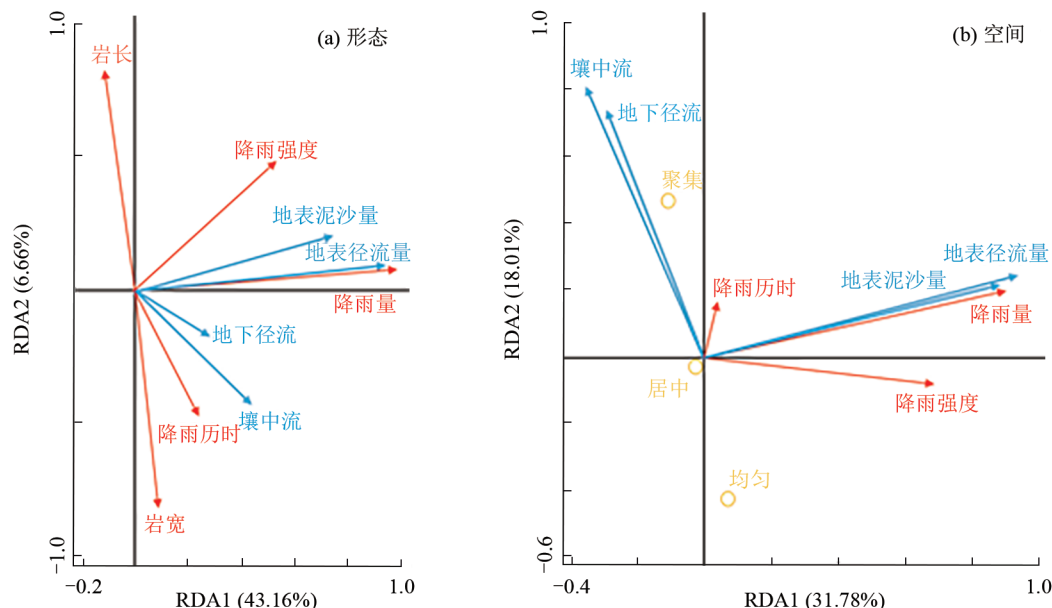


图 8 自然降雨条件下产流产沙与各因子间的冗余分析

Fig. 8 Redundancy analysis between runoff and sediment production and various factors under natural rainfall conditions

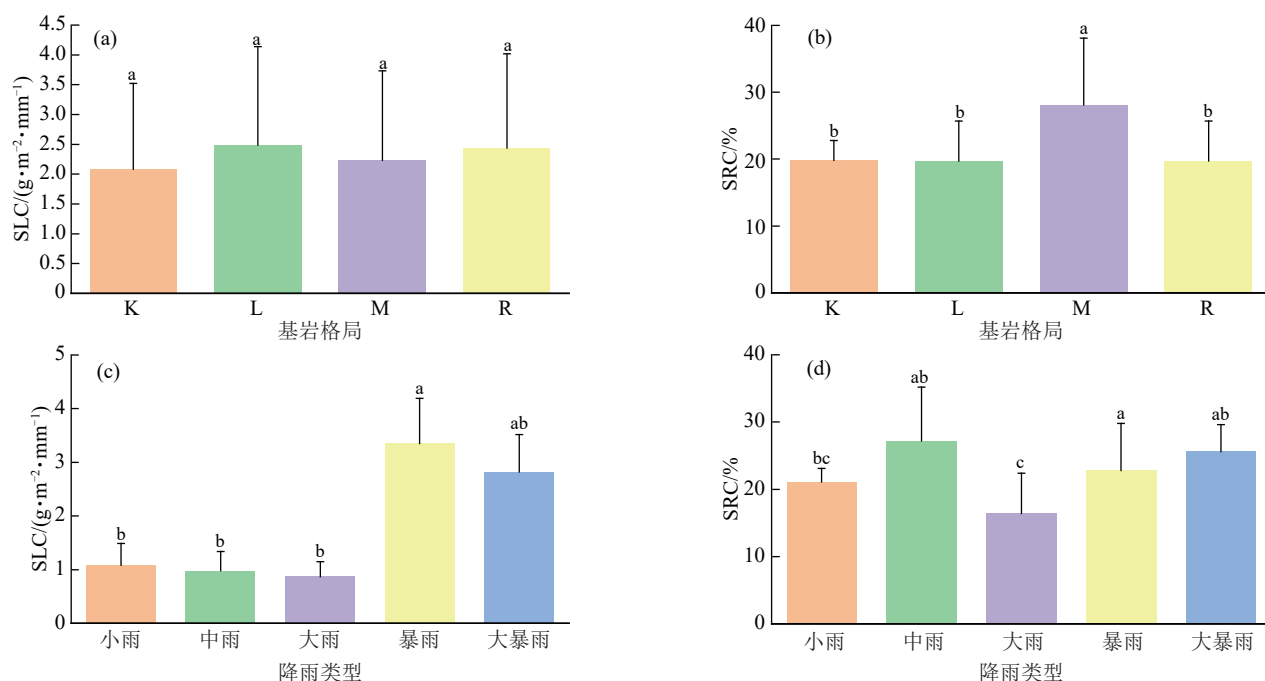
3 讨论

3.1 基岩斑块格局和降雨模式对产流的影响

在岩石裸露率相同情况下,地表径流与降雨强度关系显著($p < 0.01$),本研究中地表径流量整体随着降雨强度的增加而增加(图 5a),与前人^[24]研究结果相同。5 种降雨条件下平均地表径流百分比小雨(24.86%)、中雨(31.75%)、大雨(59.75%)、暴雨(74.75%)、大暴雨(81.50%)(图 4)远大于平均地表径流系数(21.1%、27.2%、16.4%、22.8%、25.6%)(图 9d)。前期土壤体积含水率可以通过影响水分入渗速率,从而影响地表径流形成,前期体积土壤含水率较低条件下,土壤入渗速率约为前期体积土壤含水率较高条件下 1.3~1.8 倍,自然降雨事件之间常存在一定时间间隔,蒸发作用使得损失部分土壤水分。因此,次降雨事件发生时土壤往往处于非饱和状态,使得降雨不能完全转化为径流。前人^[16,22]基于人工模拟降雨的试验表明,在小雨条件下不会产生地表径流,降水几乎全部渗入地下。但本研究发现,在小雨条件下也产生地表径流,且地表径流占比达到 14%~25%(图 4)。主要是由于喀斯特坡地产流以蓄满产流为主^[27]。由表 1 可知,小雨条件下次降雨平均持续时长为 300 min,说明自然条件下小雨强的降雨持续时间普遍较长。因此,在长时间小雨强的降雨条件下土壤达到饱和前主要以入渗为主,在这之后土

壤同时在地表地下形成径流^[28];也有研究^[29]表明,部分岩面流也汇入地表径流,从而增加地表径流。

本研究发现,基岩形状和空间分布对产流存在影响。地下径流在小雨、中雨条件下为 L(1.19、1.81 L) < K(4.49、9.49 L)(图 5c)。由于裸露岩石与土壤形成岩-土界面优先通道,部分岩面流沿着岩-土界面优先通道入渗到地下^[14],而 L 型格局出露基岩斑块与土壤接触面更大,更多的岩面流随着岩-土界面优先通道进入土壤,使得在小雨、中雨条件下地下径流量增多。由图 9b 可知, K 型格局 SRC(19.8%)与 L 型格局的 SRC(19.7%)相差不大,表明在裸露率相同情况下,基岩斑块形状改变对坡面将降雨转化为径流能力影响不大($p > 0.05$)。M 型基岩格局 SRC(28.1%)高于 L 型基岩格(19.7%)和 R 型基岩格(19.7%),表明裸露率 5% 条件下,出露基岩的空间格局与地表径流系数关系密切($p < 0.05$)。由于土壤被出露岩石分割成不同的斑块,减少连续有效入渗面积,从而影响入渗^[4,15]。已有研究^[30]表明,岩土格局虽然促进径流入渗,但不透水的岩石露头和由此导致的可入渗表面积的减少,随着降雨时间长使得汇集在岩石表面的雨水逐渐增多,加速地表径流的启动^[4,9,31]。岩石镶嵌分布显著改变坡地水力特性,岩石露头可以塑造具有更多形态变化的坡面,从而促进集中流动的产生^[4]。



注:图柱上方不同小写字母表示不同斑块格局之间侵蚀响应的显著差异($p < 0.05$)。下同。

图9 不同基岩格局及降雨类型下的平均土壤流失系数(SLC)和平均径流系数(SRC)特征

Fig. 9 Characteristics of soil loss coefficient (SLC) and average runoff coefficient (SRC) under different bedrock patterns and rainfall types

3.2 基岩斑块格局和降雨模式对产沙的影响

本研究与大多数已发表的基于人工模拟降雨的研究之间的一个重要区别是降雨事件的持续时间。降雨持续时间被认为是影响水文和侵蚀过程的重要因素之一^[24,32]。与大多数降雨模拟试验的相当短的持续时间相比,为支持在自然降雨下进行的观测提供进一步论据。就许多人工模拟降雨试验的持续时间较短而言,结果似乎可能是它们未能揭示在较长时间的降雨中变得重要的过程。与已有研究^[30]结果一致,土壤流失量随着雨强的增大而增大,地表径流流速也随着雨强的增大而增大。由图9c可知,与其他降雨模式相比,暴雨、大暴雨能显著提升SLC。由于暴雨、大暴雨相较于其他降雨模式来说,短时间内降雨强度更加集中^[33],容易引发强烈的径流冲刷,产生更强烈的土壤侵蚀^[34]。由图8可知,地表泥沙量与降雨强度呈正相关。L型基岩格局在大暴雨情况下的泥沙量(11.17 t/hm²)远大于K型格局在大暴雨情况下的泥沙量(7.06 t/hm²)(图6),通过RDA分析发现,地表泥沙量与岩长呈正相关(图8a),由于L型格局纵向岩面长度大于K型格局(图2),岩面流的运移路径更长,重力作用使径流速度增大,径流获得的动能更大,地表径流携带泥沙的能力更强^[11]。不同岩土格局坡面地表径流量与地表产沙量之间存在幂函数关系,拟合方程的相关性系数均在0.71以上(图7)。结合拟

合方程与喀斯特坡面产流产沙的实际情况,从空间分布来说,L型格局显著改变地表径流泥沙关系,提升地表产沙量最多。原因可能是L型格局坡面岩石为均匀分布,相较于M型格局与R型格局而言更为分散,岩石四周与土壤接触面积相比其他格局更大,土槽中土壤受岩面流影响的面积更大,岩面流汇入后的地表径流挟沙能力随之增强。

由于本试验所用岩石为人工浇筑混凝土方式进行模拟,其岩面粗糙程度相较自然出露岩石仍存在一定差异,且本自然降雨观测试验在土槽内进行,监测周期仅为1个雨季。因此,为更好地研究不同岩土覆被格局对喀斯特坡地产生产沙特征的影响,未来还需加强不同岩土覆被格局对喀斯特坡地产生产沙特征影响的野外观测研究。

4 结论

1)自然降雨监测下,长时间的小雨促使喀斯特坡地地表出现产流,本研究条件下地表径流占比为14%~25%。地下近乎无泥沙产生,坡地土壤侵蚀以地表流失为主。

2)出露基岩形状能够显著影响坡地产生流,且该影响受降雨特性的调控。小雨和中雨降雨条件下,K型基岩的坡面比L型基岩更能促进地表产流。而大雨及以上强度的降雨下,L型基岩的坡面比K型基岩比更有利于地表产流。

3)基岩空间分布主要影响坡地壤中流和地下产流。在暴雨及大暴雨条件下,出露基岩的空间分布变化对地下径流量的调控作用尤为显著。L型和R型空间格局下的地下径流量(L型为2.31 mL和2.5 L,R型为2.95、2.36 L),显著高于M型空间格局(0.47、1.21 L)。

4)基岩出露形状与空间分布对地表侵蚀产沙的影响主要是发生在大雨及以上强度的降雨下。相较于K型基岩,横断面较小的L型出露基岩斑块分布的坡面侵蚀产沙量更大。L型(均匀分布)格局的地表侵蚀产沙量最高(11.17 t/hm²),R型(聚集分布)次之(8.99 t/hm²),而M型(居中分布)格局最低(7.93 t/hm²)。

参考文献:

- [1] SMIRAGLIA D, CECCARELLI T, BAJOCOCCO S, et al. Linking trajectories of land change, land degradation processes and ecosystem services[J]. Environmental Research, 2016, 147: 590-600.
- [2] SONG X, GAO Y, GREEN S M, et al. Nitrogen loss from karst area in China in recent 50 years: An in-situ simulated rainfall experiment's assessment [J]. Ecology and evolution, 2017, 7(23): 10131-10142.
- [3] FENG T, CHEN H, POLYAKOV V O et al. Soil erosion rates in two karst peak-cluster depression basins of northwest Guangxi, China: Comparison of the RUSLE model with ¹³⁷Cs measurements [J]. Geomorphology, 2016, 253: 217-224.
- [4] ZHANG S Q, MA Q H, KE Q H, et al. Effects of rock outcrops on runoff and erosion from karst slopes under simulated rainfall [J]. Land Degradation and Development, 2024, 35(3): 949-967.
- [5] 敖利满, 蒋超华, 徐勤学, 等. 岩面形态对西南喀斯特坡地产流产沙的影响[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.
- [6] 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.
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.
- [7] WANG X Y, LI Z X, CAI C F, et al. Hydrological response of sloping farmlands with different rock fragmentation covers in the purple soil area of China[J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2013, 18(4): 446-456.
- [8] CERDAN O, GOVERS G, LE BISSONNAIS Y, et al. Rates and spatial variations of soil erosion in Europe: A study based on erosion plot data[J]. Geomorphology, 2010, 122(1/2): 167-177.
- [9] 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 M L, LI R, WU P P, 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.
- [10] 蒋超华. 岩面形状及岩土格局对喀斯特坡地产生产沙的影响[D]. 广西 桂林: 桂林理工大学, 2020.
JIANG C H. Influence of rock surface shape and geotechnical pattern on runoff and sediment yield on karst slope[D]. Guilin, Guangxi: Guilin University of Technology, 2020.
- [11] 敖利满, 蒋超华, 徐勤学, 等. 岩土覆被格局对西南喀斯特坡地产生产沙的影响[J]. 水土保持学报, 2023, 37(1): 90-96.
AO L M, JIANG C H, XU Q X, et al. Influence of rock-soil cover pattern on runoff and sediment yield on karst slopes in southwest China [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023, 37(1): 90-96.
- [12] 吴瑶琴, 蒋超华, 徐勤学, 等. 西南喀斯特地区不同岩面形态下岩面径流特征[J]. 水土保持研究, 2024, 31(1): 10-17.
WU Y Q, JIANG C H, XU Q X, et al. Runoff characteristics of rock surface under different rock surface morphology in southwest karst area [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(1): 10-17.
- [13] 覃自阳, 甘凤玲, 何丙辉. 岩层倾向对喀斯特槽谷区地表/地下产流过程的影响[J]. 水土保持学报, 2020, 34(5): 68-75.
QIN Z Y, GAN F L, HE B H. Influence of strata tendency on the surface/underground runoff production process in typical karst valley [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020, 34(5): 68-75.
- [14] FU Z Y, CHEN H S, XU Q X, et al. Role of epikarst in near-surface hydrological processes in a soil mantled subtropical dolomite karst slope: Implications of field rainfall simulation experiments[J]. Hydrological Processes, 2016, 30(5): 795-811.
- [15] LI S, REN H D, XUE L, et al. Influence of bare rocks on surrounding soil moisture in the karst rocky desertification regions under drought conditions [J]. Catena, 2014, 116: 157-162.
- [16] CHEN H, LIU J, ZHANG W, et al. Soil hydraulic properties on the steep karst hillslopes in northwest Guangxi, China [J]. Environmental Earth Sciences, 2012, 66: 371-379.

- [17] FAN C H, ZHAO L S, HOU R, et al. Quantitative analysis of rainwater redistribution and soil loss at the surface and belowground on karst slopes at the microplot scale[J]. *Catena*, 2023, 227: e107113.
- [18] AO L M, XU Q X, ZHOU Y C, et al. Rock surface flow accelerates rill erosion of excavated slopes in karst mining areas[J]. *Catena*, 2024, 236: e107739.
- [19] CHEN H, ZHANG X P, ABLA M, et al. Effects of vegetation and rainfall types on surface runoff and soil erosion on steep slopes on the Loess Plateau, China[J]. *Catena*, 2018, 170: 141-149.
- [20] DUNKERLEY D. Rain event properties in nature and in rainfall simulation experiments: A comparative review with recommendations for increasingly systematic study and reporting[J]. *Hydrological Processes*, 2008, 22(22): 4415-4435.
- [21] AN J, ZHANG Y Q, WANG Y Y. Rainstorm pattern effects on the size distribution of soil aggregate in eroded sediment within contour ridge systems[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2020, 20(4): 2192-2206.
- [22] YAN Y J, DAI Q H, YUAN Y F, et al. Effects of rainfall intensity on runoff and sediment yields on bare slopes in a karst area, SW China[J]. *Geoderma*, 2018, 330: 30-40.
- [23] ZHOU H, GAN F L, DAI Q H, et al. Migration of dissolved carbon on bare karst slopes in soil in response to natural rainfall events[J]. *Geoderma*, 2023, 436: e116527.
- [24] LIANG Y, GAO G Y, LIU J B, et al. Runoff and soil loss responses of restoration vegetation under natural rainfall patterns in the Loess Plateau of China: The role of rainfall intensity fluctuation[J]. *Catena*, 2023, 225: e107013.
- [25] 何江湖, 张科利. 西南喀斯特地区地下水土流失研究综述[J]. *泥沙研究*, 2022, 47(5): 66-73.
- HE J H, ZHANG K L. A review of underground soil loss in karst area of the southwest China[J]. *Journal of Sediment Research*, 2022, 47(5): 66-73.
- [26] 李晋, 熊康宁, 王仙攀. 喀斯特地区小流域地下水土流失观测研究[J]. *中国水土保持*, 2012(6): 38-40.
- LI J, XIONG K N, WANG X P. Observation of subterranean soil and water loss of karst area[J]. *Soil and Water Conservation in China*, 2012(6): 38-40.
- [27] 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.
- [28] ZHANG M J, ZHANG W, ZHANG K L, et al. Centennial scale temporal responses of soil magnetic susceptibility and spatial variation to human cultivation on hillslopes in northeast China[J]. *Soil and Tillage Research*, 2023, 234: e105865.
- [29] 高鹏宇, 詹振芝, 蒋芳市, 等. 坡度和流量对崩积体坡面细沟水流输沙能力的影响[J]. *水土保持学报*, 2018, 32(3): 68-73.
- GAO P Y, ZHAN Z Z, JIANG F S, et al. Effects of slope and flow on sediment transport capacity of the colluvial deposit for rill flow in Benggang[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018, 32(3): 68-73.
- [30] PENG X D, DAI Q H. Drivers of soil erosion and subsurface loss by soil leakage during karst rocky desertification in SW China[J]. *International Soil and Water Conservation Research*, 2022, 10(2): 217-227.
- [31] 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.
- [32] ZHOU J, FU B J, GAO G Y, et al. Effects of precipitation and restoration vegetation on soil erosion in a semi-arid environment in the Loess Plateau, China[J]. *Catena*, 2016, 137: 1-11.
- [33] HE S J, WANG Z L, WANG D G, et al. Spatiotemporal variability of event-based rainstorm: The perspective of rainfall pattern and concentration[J]. *International Journal of Climatology*, 2022, 42(12): 6258-6276.
- [34] WESTRA S, FOWLER H J, EVANS J P, et al. Future changes to the intensity and frequency of short-duration extreme rainfall[J]. *Reviews of Geophysics*, 2014, 52(3): 522-555.

(上接第20页)

- [28] 刘冉, 余新晓, 蔡强国, 等. 坡长对坡面侵蚀、搬运、沉积过程影响的研究进展[J]. *中国水土保持科学(中英文)*, 2020, 18(6): 140-146.
- LIU R, YU X X, CAI Q G, et al. Research progress in the effect of slope length on slope erosion transportation and deposition processes[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2020, 18(6): 140-146.
- [29] 姚怡航, 张展, 李永红, 等. 基于无人机贴近摄影测量的坡面细沟侵蚀及形态演化研究[J]. *水土保持通报*, 2023, 43(6): 142-147.
- YAO Y H, ZHANG Z, LI Y H, et al. Slope rill erosion and morphological evolution based on UAV nap-of-the-object photogrammetry[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2023, 43(6): 142-147.
- [30] XU X M, ZHENG F L, WILSON G V. Flow hydraulics in an ephemeral gully system under different slope gradients, rainfall intensities and inflow conditions[J]. *Catena*, 2021, 203: e105359.