

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2024.06.039.

王晨阳, 戴全厚, 甘贤民, 等. 基于放水冲刷草本形态变化对石漠化坡地产流影响研究[J]. 水土保持研究, 2024, 31(6): 22-28.

Wang Chenyang, Dai Quanhong, Gan Xianmin, et al. Study on the Impact of Herbaceous Morphological Changes on Runoff Generation in Karst Rocky Desertification Slopes Based on Water Erosion Experiments[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(6): 22-28.

# 基于放水冲刷草本形态变化对石漠化坡地产流影响研究

王晨阳<sup>1,2</sup>, 戴全厚<sup>1,2</sup>, 甘贤民<sup>1,2</sup>, 徐小金<sup>1,2</sup>, 周红<sup>1,2</sup>, 张心印<sup>1,2</sup>

(1. 贵州大学 林学院, 贵阳 550025; 2. 贵州大学 土壤侵蚀与生态修复研究中心, 贵阳 550025)

**摘要:** [目的] 探究不同坡度条件下, 草本形态变化对石漠化坡面径流时空转换过程的影响, 以期对石漠化地区的水土流失防治提供理论支持。[方法] 用土槽模拟石漠化坡耕地, 设置三种草本凋亡后的坡面覆被情况(全株坡面、根系坡面和裸地坡面), 以及三种坡度(5°, 15° 和 25°), 一个地下裂隙度 0.5%, 一个冲刷流量 6 L/min, 采用冲刷试验, 探索草本形态变化对石漠化坡地产流的影响。[结果] 全株形态是延缓坡面径流形成的最佳草本形态, 当坡度升至 25° 时草本形态对坡面初始产流时间不再有显著影响。裸地的平均地表径流模数最大, 全株形态坡面产流过程最为复杂, 并且全株形态坡面对裂隙流影响最为明显。坡度是坡面径流分配比例的关键因子, 而全株植被形态在固定坡度下仍能对坡面径流的分配比例产生影响。草本形态的变化对坡面产流过程有显著影响, 最大可改变 15% 的径流分配比例。[结论] 全株形态坡面能有效分散径流, 减少地表径流, 降低侵蚀风险; 而根系坡面则能增加径流入渗, 从而降低坡面侵蚀风险。

**关键词:** 石漠化坡地; 产流过程; 草本形态; 冲刷试验

中图分类号: S157

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2024)06-0022-07

## Study on the Impact of Herbaceous Morphological Changes on Runoff Generation in Karst Rocky Desertification Slopes Based on Water Erosion Experiments

Wang Chenyang<sup>1,2</sup>, Dai Quanhong<sup>1,2</sup>, Gan Xianmin<sup>1,2</sup>, Xu Xiaojin<sup>1,2</sup>, Zhou Hong<sup>1,2</sup>, Zhang Xinyin<sup>1,2</sup>

(1. College of Forestry, Guizhou University, Guiyang 550025, China;

2. Institute of Soil Erosion and Ecological Restoration, Guizhou University, Guiyang 550025, China)

**Abstract:** [Objective] The aims of this study are to investigate the impact of herbaceous morphology changes on the spatiotemporal transformation of slope runoff under different slope conditions in karstified areas, and to provide theoretical support for soil and water conservation in these regions. [Methods] A flume experiment was conducted to simulate karst slope cultivated land, setting up three post-senescent herbaceous cover scenarios: whole-plant slope, root-only slope, and bare slope, across three gradients (5°, 15°, and 25°). With a subsurface fissure density of 0.5% and a scouring flow rate of 6 L/min, the effects of herbaceous morphology changes on runoff production in karst slopes were explored. [Results] The whole-plant morphology was found to be the most effective herbaceous state for delaying the initiation of runoff on slope. As the gradient increased to 25°, the influence of herbaceous morphology on the initial runoff timing became non-significant. Bare slopes exhibited the highest average surface runoff modulus, while the runoff processes on whole-plant slopes were the most complex and had the most significant impact on fissure flow. Slope was identified as a key factor in the distribution of slope runoff, and whole-plant morphology could still

收稿日期: 2024-03-09

修回日期: 2024-03-21

资助项目: 国家自然科学基金(42167044); 贵州大学培育项目(贵大培育[2019]10号)

第一作者: 王晨阳(1996—), 男, 陕西咸阳人, 硕士, 主要从事土壤侵蚀方面研究。E-mail: 1309438319@qq.com

通信作者: 戴全厚(1969—), 男, 陕西长武人, 博士, 教授, 主要从事土壤侵蚀方面研究。E-mail: gzudjj@163.com

<http://stbcyj.paperonce.org>

affect the distribution of slope runoff at a fixed gradient, with the potential to alter runoff distribution by up to 15%. [Conclusion] Whole-plant slopes effectively disperse runoff, reduce surface runoff, and decrease erosion risk. Root-only slopes increase runoff infiltration, thereby reducing erosion risk on the slope.

**Keywords:** karst rocky desertification; runoff process; herbaceous vegetation; erosion experiments

中国西南喀斯特地区是世界三大喀斯特分布区中最集中的区域<sup>[1]</sup>,面积大、分布范围广、人类扰动频繁的坡耕地则是喀斯特石漠化地区水土流失的主要策源地<sup>[2]</sup>。草本植物作为喀斯特坡耕地主要的覆被植物,其在缓解土壤侵蚀和调节径流与泥沙关系方面起着主导作用。与其他植被措施相比,草本植物能在更短的时间内实现更有效的侵蚀控制。

通常认为草本的不同部位对侵蚀的控制机制不同,目前的研究表明,草被叶片能减缓雨滴动能,保护土壤表面,减轻溅蚀带来的危害<sup>[3]</sup>。Mu等<sup>[4]</sup>通过人工模拟降雨试验发现,草茎能够有效地增加地表粗糙度与水流弯曲度,从而降低泥沙的运移能力。草根则可以通过增加土壤团聚体,黏结土壤等作用增加土壤抗蚀性,同时增加土壤渗透率,从而减缓侵蚀影响<sup>[5]</sup>。尽管如此,仍有一些草本部分对侵蚀贡献的研究结果不一致。一般而言,草本的茎叶更有助于减少地表径流,而根系则对控制土壤侵蚀更为重要<sup>[6]</sup>。但在Zhang等的研究结果中植被的根系与茎叶对土壤侵蚀的控制作用几乎一样<sup>[7]</sup>,Li等则在试验中发现,草本的地上部分对侵蚀有着更好的控制作用<sup>[8]</sup>。出现这些差异的原因可能是研究者所研究的草本种类不同。例如Wang等通过比较须根型草本与主根型草本发现,须根型较主根型草本有更好的土壤抗剥蚀能力,其临界径流剪切力提升了15.2%<sup>[9]</sup>。Yang等通过对比匍匐茎类植物与直立禾本,发现匍匐茎类植物比直立禾本更能减少地表径流,改善地下径流,降低地表径流的水力特征<sup>[10]</sup>,从而进一步减少了土壤流失率。然而在喀斯特地区,由于独特的二元地质结构,地下漏失的存在使得植被不同部位对该地区径流的调控机制难以预测。

由于石漠化坡耕地的土地资源有限,农民通常在耕作过程中使用除草剂去除杂草,以获得更多的土地资源用于种植作物。喷施除草剂后,草本植物经历地上部分(茎、叶)凋零和地下根系腐烂两个阶段。伴随着植被不同部位的消失,不同植被形态坡面对径流的时空转换过程会产生不同影响,坡耕地水文过程的变化使得土壤侵蚀更加难以预测。并且石漠化区大面积裸露的基岩将石漠化坡耕地切割成许多土壤斑块(图1A),这些裸露的基岩聚集了大量降雨,形成集中水流,直接冲刷土壤斑块,使其比其他坡面土壤更容

易受到地表径流侵蚀的影响<sup>[11]</sup>。

目前,关于对石漠化坡面径流的时空转换过程的研究中主要考虑了降雨、坡度<sup>[12]</sup>、植被<sup>[13]</sup>、基岩出露率<sup>[14]</sup>和产状等因素<sup>[15-16]</sup>。然而,关于植被枯萎死亡过程对石漠化坡面径流时空转换的影响研究较少。因此,本研究通过径流冲刷模拟试验,研究不同草本形态(全株形态、根系形态和裸地形态)在不同坡度(5°~25°)条件下对径流的时空转换过程的影响。本研究旨在:(1)明确不同草本形态坡面上地表、岩面和裂隙径流的分配规律;(2)揭示草本形态对不同坡度下的坡面径流过程影响;(3)量化草本形态变化对石漠化坡地坡面径流的时空转换过程的影响。以期加深对石漠化地区草本不同部位与水文过程关系的认识提供重要支持。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验土壤与草本

试验于2023年4月在贵州大学冲刷试验场完成。供试土样采自贵州省贵阳市花溪区党武乡(26°18'45"N, 106°44'9"E)的坡耕地耕层土壤(0—20 cm)。土壤为碳酸盐岩发育的石灰土,其理化性质如下:土壤容重1.14 g/cm<sup>3</sup>,有机质含量54.4 g/kg,有机碳含量为19.96 g/kg,碳酸钙含量74.89 g/kg,土壤pH值为8.77,EC值为1.43 dS/m。粒径组成为黏粒(<0.002 mm)20.4%±0.7%,粉粒(0.02~0.002 mm)40.4%±1.6%,砂粒(0.02~2 mm)39.2%±2.2%。供试土样去除植物根系、石块等杂物,自然干风干后过5 mm筛网,装袋备用。狗牙根(*Cynodon dactylon*)属多年生草本植物,极耐热耐旱、侵占力强,是石漠化坡耕地常见的草本植物。因此,本试验选择狗牙根用于探索草本形态变化对石漠化坡耕地水动力学特性的影响。在冲刷试验开始前3个月,在花盆中繁殖狗牙根用于试验。用于冲刷的狗牙根的平均茎叶长30 cm,根系长度约为7 cm。

### 1.2 冲刷试验

将粒径小于0.5 mm的石英砂用胶水固定在试验土槽四周及底部,以增强土槽与供试土样间的摩擦力。供水系统包括稳压水泵、流量计、消能池、稳流池等装置。试验时水泵从水池中抽水,水流通过流量计后向土槽前端的消能池供水。消能池与稳流池为一个整体,长×宽×深为0.5 m×0.5 m×0.4 m,中间用

钻有小孔的薄板一分为二(图 1C)。水流通过消能池削减能量后,会通过小孔进入稳流池。这时水流平静动能为零,能排除初始动能对试验的干扰。在试验土槽中距出水口 0.5 m 处布置有 1 个根据野外调查结果用亚克力板制作的人工基岩模型,用于模拟石漠化坡地出露的基岩。在基岩模块周边设置有宽度 1 cm 的裂缝,用于模拟岩石裂隙,并收集由此下渗的岩土

界面流。 $5^{\circ}\sim 25^{\circ}$  是喀斯特坡耕地主要的坡度范围,因此试验坡度设置为  $5^{\circ}$ 、 $15^{\circ}$  和  $25^{\circ}$ 。结合研究区多年水文资料和降雨特点,试验冲刷流量设计为 6 L/min,对应 90 mm/h 雨强。另外,本研究模拟石漠化坡地匍匐类草本(狗牙根)经历外界干扰前后的 3 种草本形态(全株形态、根系形态和裸地形态)。每个试验设计 3 个重复,共计 27 场。

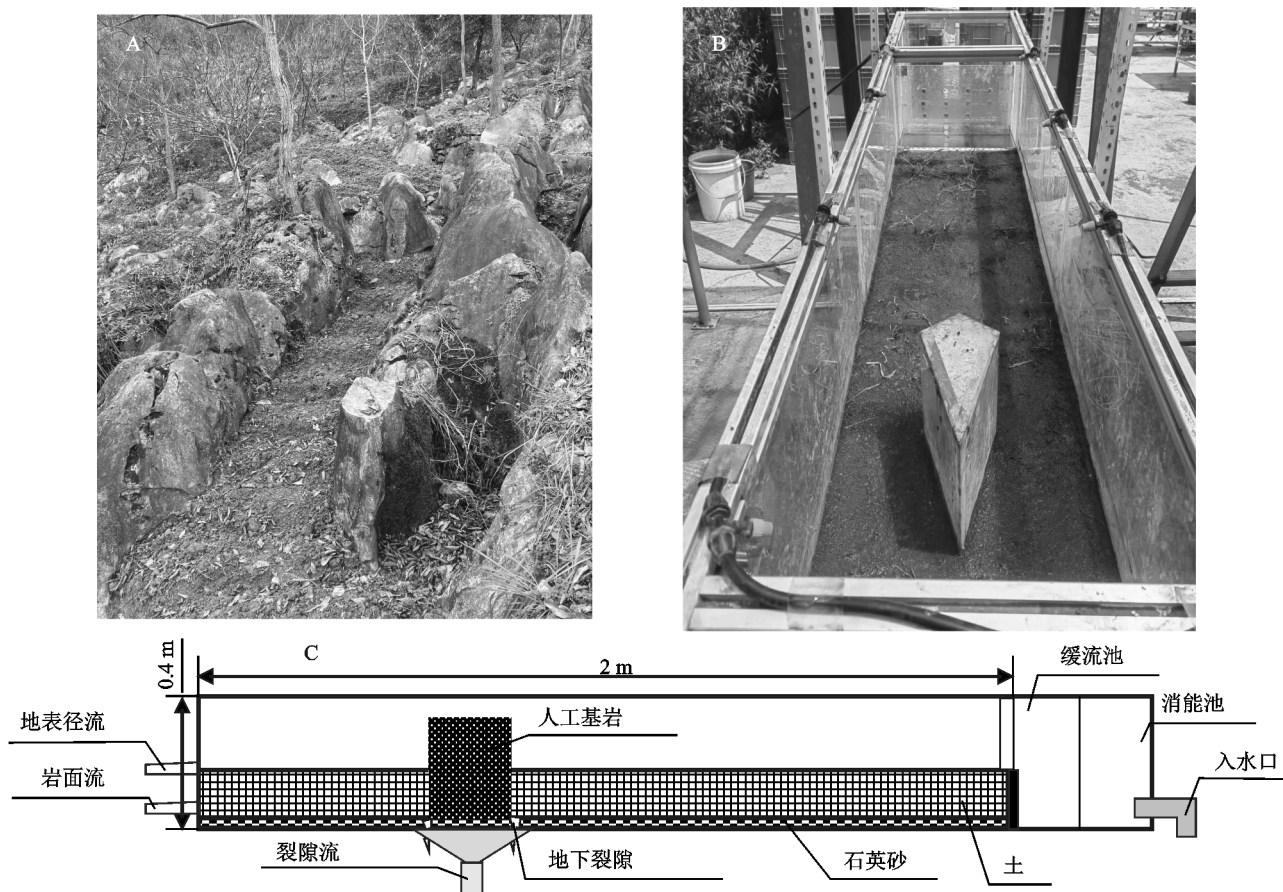


图 1 试验装置图

Fig. 1 Experimental apparatus diagram

根据野外调查结果,试验设计填土厚度为 10 cm。土壤容重为  $1.14 \text{ g/cm}^3$ 。将土壤称重,分层填装在试验土槽中,每层填装完后用木板压实,并用耙子将表面打毛,避免出现隔水层。填土完成后将表面土壤整平,并压实土壤与土槽周围,减少边际效应。对于全株形态坡面,需要将培育好的狗牙根重新回填至水槽中,使用圆形环刀(直径 10 cm,高 6 cm)将花盆中的狗牙根连土取出,并填到土槽中。回填点位在水槽内随机生成坐标,确定好点位后(之后所有的处理都采用此坐标),将草本填入水槽内,重新将坡面整平。之后将草本的匍匐茎按照其自然生长趋势摆放,覆盖度约为 45%。另外,狗牙根的匍匐茎在茎节处会生长侧根,扎入地下。因此,在将茎杆摆放好后,使用与侧根长度、直径均相似的铁丝,将其弯折扎入原本的侧根位置,以模拟侧根。准备根系坡

面时,剪去狗牙根茎杆,只保留所需根系。将其按照全株坡面随机点位重新回填,以便进行对比分析。裸地形态坡面填装,按照上述对坡面的预制过程填装即可。

在每次试验前,先将试验土槽处于水平状态,使用位于水槽上方的喷雾装置雾化水滴,加速土壤沉降,直至地下径流开始稳定产流(图 1B)。冲刷试验开始前,对流量计进行率定,使试验流量与设计流量一致,之后利用滑轮与坡度仪将土槽调整至设计值。每次冲刷历时共计 30 min,当水槽出水口产生连续径流后开始计时,对地表、岩面、裂隙 3 个出水口均进行每 3 min 一桶的无间断采样,并称重记录。岩面流与裂隙流当场率定。地表径流样品,需静置 24 h 后沥去上清液,将所得泥沙样品烘干 24 h,得到径流泥沙量。将所得泥沙量从记录重量中减去,获取径流量。



## 2 结果与分析

### 2.1 草本形态对坡地地表初始产流时间的影响

如表1所示,坡度与不同草本形态的变化会影响坡面径流的初始产流时间。当坡度为 $5^{\circ}$ 与 $15^{\circ}$ 时,全株形态的坡面径流产流时间最长。全株形态的草本能有效延缓径流的生成。同时,在所有坡度梯度中,根系形态的坡面径流产流时间均高于裸地坡面。表明相较于裸地,植被根系能增加土壤孔隙率与渗透性,使得水分能够更快地向土壤层移动,从而减缓地表径流的形成。总的来说,无论是全株形态坡面,还是根系形态坡面,在 $5^{\circ}\sim 15^{\circ}$ 的缓坡都能有效延缓坡面径流的形成时间。当坡度达到 $25^{\circ}$ 的陡坡时,地表径流的初始产流时间表现为全株形态 $<$ 裸地形态 $<$ 根系形态。同时,此时不同草本形态坡面的初始产流时间差异不显著。

### 2.2 草本形态变化对坡地产流模数的影响

2.2.1 地表径流模数 草本形态与坡度的变化显著影响地表径流的动态过程。由图2可知,在 $5^{\circ}$ 坡度条件下,裸地形态坡面与全株形态坡面在9 min时达到径流峰值,而根系形态的坡面径流模数持续增加,直至18 min才显示出稳定迹象。随着冲刷时间的延长,根系形态与全株形态坡面的径流模数逐渐接近。当坡度增至 $15^{\circ}$ 时,所有草本形态坡面的径流模数范

围均有所上升,其中裸地坡面表面径流模数峰值比 $5^{\circ}$ 时增加了 $1\,277\text{ ml}/(\text{min}\cdot\text{m}^2)$ 。所有草本条件的坡面在6 min内径流模数急剧上升,在12 min后开始趋于稳定。在 $5^{\circ}$ 与 $15^{\circ}$ 的缓坡条件下,稳定后地表径流模数均呈现出裸地坡面 $>$ 根系坡面 $>$ 全株坡面的趋势。当坡度增至 $25^{\circ}$ 时,裸地形态与根系形态坡面的地表径流模数差异不显著。这表明当坡度达到一定水平时,根系对于减缓径流的作用会大幅降低。然而,全株形态的坡面仍能减缓坡面的径流模数,与其他坡面相比,稳定后的全株形态坡面地表径流模数减少了 $400\text{ ml}/(\text{min}\cdot\text{m}^2)$ 。

表1 不同草本形态坡面在不同坡度条件下的初始产流时间

Table 1 Initial runoff time for slopes with different herbaceous types under various slope conditions

流量	坡度	草本形态	地表初始产流时间/s
6 L/min	$5^{\circ}$	全株	$244.15\pm 2.11\text{Ca}$
		根系	$122.51\pm 1.23\text{Ba}$
		裸地	$54.39\pm 2.73\text{Ab}$
	$15^{\circ}$	全株	$80.52\pm 0.84\text{Cb}$
		根系	$60.69\pm 2.90\text{Bb}$
		裸地	$45.27\pm 0.91\text{Ac}$
	$25^{\circ}$	全株	$24.66\pm 0.24\text{Cc}$
		根系	$31.32\pm 0.42\text{Bc}$
		裸地	$28.36\pm 1.19\text{Aa}$

注:大写字母表示相同草本形态下不同坡度类型的初始产流差异,小写字母表示相同坡度类型不同草本形态下的初始产流时间差异。

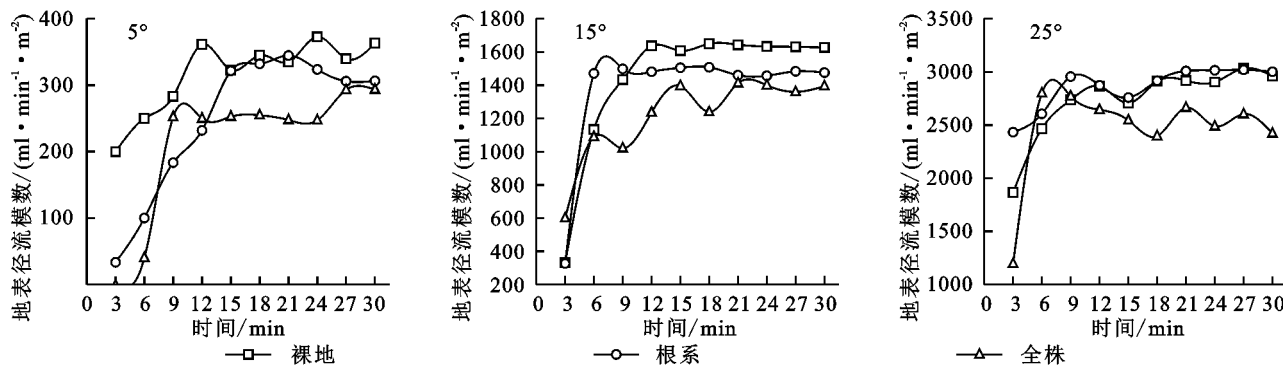


图2 不同草本形态坡面在各坡度条件下的地表径流模数

Fig. 2 Surface runoff modulus for slopes with different herbaceous types under various slope conditions

2.2.2 岩面流径流模数 在冲刷过程中,不同草本形态坡面对岩面流径流模数的影响随时间的分布特征如图3所示。全株坡面的岩面径流在所有坡度下都表现出最大的径流模数,最大差异出现在 $5^{\circ}$ 时,比根系形态坡面高出 $1\,100\text{ ml}/(\text{min}\cdot\text{m}^2)$ 。当坡度为 $5^{\circ}$ 时,三种草本形态坡面的岩面径流模数均达最高峰值,其中裸地形态坡面为 $1\,338\text{ ml}/(\text{min}\cdot\text{m}^2)$ ,根系形态坡面为 $1\,596\text{ ml}/(\text{min}\cdot\text{m}^2)$ ,全株形态坡面 $1\,708\text{ ml}/(\text{min}\cdot\text{m}^2)$ 。此外,根系坡面与裸地坡面的岩面径流模数在3~6 min内

急速增加,说明此时的产流方式以岩面产流为主。当坡面为 $15^{\circ}$ 时,全株形态坡面出现双峰变化趋势,两次峰值分别在6 min与21 min时出现。同时,所有草本形态的坡面均在9 min以内达到最大值,之后开始回落,最后趋于平稳。当坡度为 $25^{\circ}$ 时,岩面流径流模数几乎不受冲刷时长的影响。全株植被坡面的径流模数与其余两种坡面差异明显,而根系形态坡面与裸地坡面的岩面流径流模数没有明显差异。由此可见随着坡度的增大,草本形态对岩面流带来的影响会越来越小。

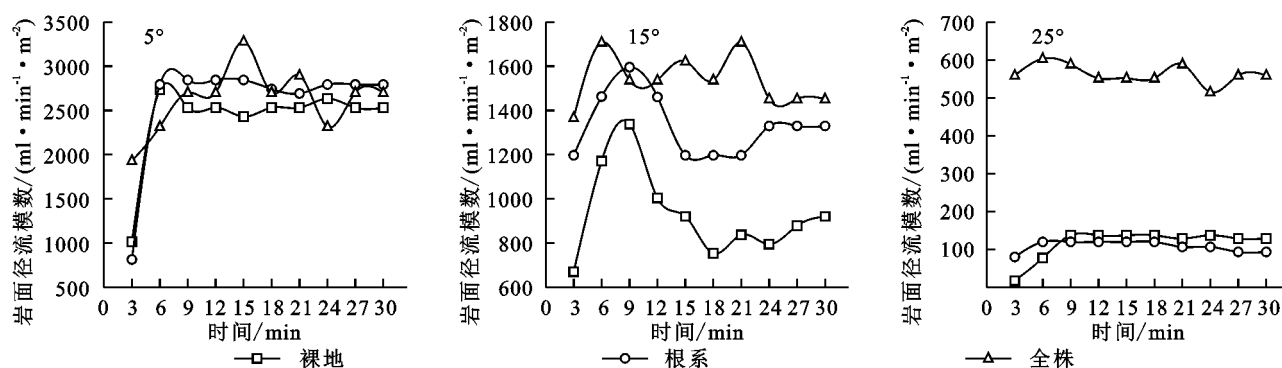


图 3 不同草本形态坡面在不同坡度条件下的岩面径流模数

Fig. 3 Rock surface runoff modulus for slopes with different herbaceous types under various slope conditions

2.2.3 裂隙径流模数 如图 4 所示,坡度为 5°的所有草本形态坡面的裂隙径流在前 9 min 内急剧上升,之后趋于平稳。稳定后的裂隙流变化趋势表现为全株坡面远远大于裸地与根系形态坡面。在 15°坡度时,所有形态坡面均在 12 min 之前达到最高点。裂隙径流模数稳定后,其大小排序为全株形态坡面>根

系形态坡面>裸地形态坡面。当坡度升至 25°时,全株、根系与裂隙形态坡面的裂隙流模数比 15°时少了 4~5 倍,但全株形态坡面的裂隙流仍高于其他形态坡面。植被的存在会让径流在土壤中更为分散,这使得全株坡面下的壤中流能有更多的机会接触到基岩并流向裂隙。

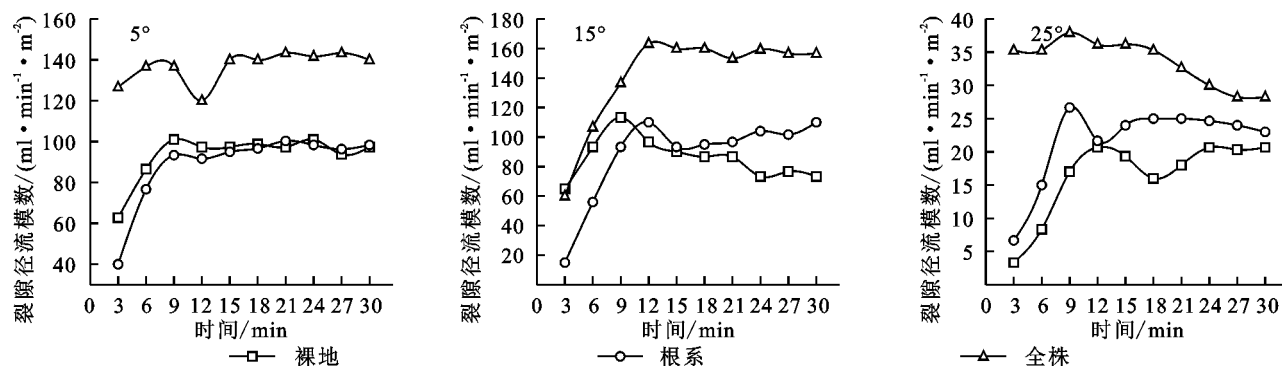


图 4 不同草本形态坡面在各坡度条件下的裂隙径流模数

Fig. 4 Fissure runoff modulus for slopes with different herbaceous types under various slope conditions

### 2.3 草本形态变化对坡地径流空间分配的影响

图 5 显示了冲刷过程中不同坡度下与不同草本形态对坡地径流的空间分布情况。在小坡度 5°时,坡地径流以岩面径流为主,三种草本形态坡面(全株形态、根系形态与裸地)的岩面产流占比分别为 88%, 89% 与 86%。随着坡度的提升,径流的分配方式开始改变,在 15°时,所有草本形态坡面的地表径流占比都达到 38% 以上。当坡度升至 25°时,坡面以地表产流为主,裸地形态坡面与根系形态坡面的地表产流占比均超过 95%。与坡度对坡面径流空间分配的影响相比,草本形态的调控能力较弱。在 5°的条件下,由于产流方式以岩面产流为主,根系坡面与全株坡面仅分别降低 3% 与 5% 的地表径流。与之相比,15°的缓坡条件下,这一比例达到 10% 与 17%。但当坡度升至 25°时,根系几乎很难再对坡面径流的分配情况产生影响,而全株坡面在此时仍能影响坡面流的分布方式,岩面径流与其余两种坡面相比增加了 15%。

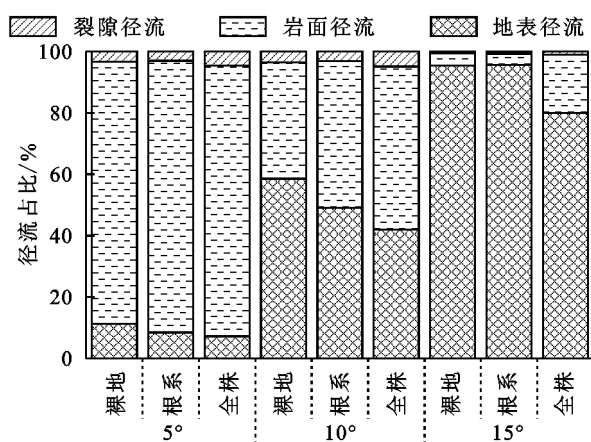


图 5 不同草本形态在不同坡度条件下的径流分布

Fig. 5 Runoff distribution for slopes with different herbaceous types under various slope conditions

## 3 讨论

### 3.1 草本形态的变化对坡地径流过程的影响

植被是减少土壤侵蚀的有效途径,坡面植被的覆

盖能够有效提高坡面抵御集中流冲刷的能力。在本研究中,全株形态坡面能有效阻止坡面汇流,延缓坡面集中流形成的时间。陈泽勋等通过对比不同放牧条件下的坡面初始产流时间也得到了类似结论<sup>[17]</sup>。匍匐类草本除主根系外每处茎节处还有侧根固定匍匐在坡面的茎秆,能延缓径流流速,改变径流通路,从而提高坡面抵御侵蚀的能力。此外,草本植物发达的细根系系统能改善土壤强度和入渗<sup>[18]</sup>。也就是说,密集的草根面起到了屏障作用,将大的集中水流分割成众多的小水流,显著降低了集中水流的侵蚀力,这对控制坡面冲刷侵蚀至关重要。当坡度上升至 $25^{\circ}$ 时,由于径流受重力影响,坡面流速的加快使得草本失去了拦截水流的机会,草本的阻碍作用减弱。此外,平行于坡面的草本茎秆还能水流提供导流作用<sup>[19]</sup>,使全株形态坡面在陡坡上加速径流形成。此时的根系坡面表现出了最好的阻碍径流能力,失去草本茎秆的根系坡面,仍能增加水流的入渗速率,从而抑制坡面径流的形成。

水流在坡面上更长的滞留时间以及土壤更高的人渗速率使不同形态草本坡面之间的径流过程差异巨大。在本研究中,相同坡度下全株形态坡面的地表径流模数小于根系形态与裸地形态。这与张禹洋等发现的结果类似<sup>[20]</sup>。同时,随着坡度的升高全株形态坡面的径流过程更易发生波动。这可能是因为随着坡度升高,坡面会生成明显的细沟侵蚀与优先流通道,根系形态坡面与裸地坡面的大量径流会通过这些流路流出,之后的根系坡面与裸地坡面的径流模数都会趋于稳定。而全株坡面、草本茎秆会阻碍这些径流中的泥沙<sup>[21]</sup>,随着时间的推移,这些优先流通道会被掩埋,导致全株形态的坡面径流过程更为复杂。

### 3.2 草本形态的变化对坡地产生流空间分配的影响

在本研究中,地表径流的最大分配比例出现在坡度为 $25^{\circ}$ 的裸地坡面(大于96%),而最大的岩面流出现在坡度为 $5^{\circ}$ 的全株坡面(大于89%)。坡度的提高使得坡面径流的分配方式产生了显著变化,在 $5^{\circ}$ 条件下,坡面产流以岩面流为主,当坡度升至 $25^{\circ}$ 时则以地表径流为主。Yi等<sup>[22]</sup>认为,流量大小与入渗速率是集中流作用下喀斯特缓坡农田径流时空转化的关键因子。在土层稀薄的石漠化坡地上,由于土层薄,使得土壤缺乏过渡层,下渗的土壤水会迅速在岩面汇流,形成岩面径流。因此在缓坡条件下会出现以岩面流为主的径流分配方式。而随着坡度的升高,坡面径流下渗缓慢,同时受重力作用影响在地表径流流速也随之加快,进一步缩短了土壤入渗时间。因此在陡坡条件下的坡面径流以地表径流为主。

在同一坡度条件下,狗牙根所特有的匍匐茎秆会分散阻滞径流,增加径流的流路,减少地表径流比例。同时在草本全株形态时,草本冠层与根系联合作用能够增加地表粗糙度,从而有效降低坡面流速,增加径流入渗。当坡面仅剩根系覆被时,草本根系通过增加土壤孔隙度以及径流入渗率的方式改变径流的分配规律。不同形态的草本植被都能对坡面径流进行调控,从而减少侵蚀风险。然而,尽管本研究的结果说明草本凋亡的不同时期会减少地表径流,从而减缓坡面侵蚀,但这也相应增大地下径流的比例,是否会使得喀斯特地区的地下侵蚀更为严重尚不明确,仍需进一步研究。

## 4 结论

(1) 在 $5^{\circ}\sim 15^{\circ}$ 的坡度条件下,全株形态的坡面能有效降低坡面的初始产流时间。坡度为 $5^{\circ}$ 的全株形态坡面初始产流速率是相同坡度下裸地初始产流速率的4.4倍。当坡度升至 $15^{\circ}$ 时,这一差异达到1.7倍。当坡度升至 $25^{\circ}$ 时,草本形态的改变对坡面径流初始产流时间的影响不再显著。

(2) 全株形态坡面能降低地表径流模数,随着冲刷历时的增加,全株形态坡面的地表径流模数在三种草本形态中最小。当坡度为 $5^{\circ}$ 时,三种草本形态坡面的岩面径流模数均出现最大值,同时全株形态对裂隙流的影响最大。

(3) 坡度是驱动坡面径流分配比例变化的关键因子。同时,在相同坡度条件下,全株形态植被与根系形态植被均能调控坡面径流的分配比例,全株形态坡面对径流的调控能力优于根系坡面。

### 参考文献(References):

- [1] 王世杰.喀斯特石漠化:中国西南最严重的生态地质环境问题[J].矿物岩石地球化学通报,2003,22(2):120-126.  
Wang S J. The Most Serious Eco-geologically environmental Problem in Southwestern China: Karst Rocky Desertification[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2003,22(2):120-126.
- [2] 戴全厚,严友进.西南喀斯特石漠化与水土流失研究进展[J].水土保持学报,2018,32(2):1-10.  
Dai Q H, Yan Y J. Research progress of Karst rocky desertification and soil erosion in southwest China[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2018,32(2):1-10.
- [3] 丛月,张洪江,程金花,等.草本植物对雨滴动能的影响[J].水土保持学报,2014,28(3):114-118.  
Cong Y, Zhang H J, Cheng J H, et al. Effect of herbaceous plant effects on raindrop kinetic energy[J]. Journal of Soil



- and Water Conservation, 2014, 28(3):114-118.
- [4] Mu H L, Yu X J, Fu S H, et al. Effect of stem cover on hydraulic parameters of overland flow[J]. Journal of Hydrology, 2019, 577:123964.
- [5] 沙小燕, 李魁, 王文龙, 等. 黄土高原沟壑区草地沟头立壁土壤抗冲性特征[J]. 应用生态学报, 2022, 33(1):133-140.
- Sha X Y, Li K, Wang W L, et al. Characteristics of soil anti-scourability in gully head wall of grass-covering on the gullied Loess Plateau, Northwest China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2022, 33(1):133-140.
- [6] Li C J, Pan C Z. The relative importance of different grass components in controlling runoff and erosion on a hillslope under simulated rainfall[J]. Journal of Hydrology, 2018, 558:90-103.
- [7] Zhang X, Yu G Q, Li Z B, et al. Experimental study on slope runoff, erosion and sediment under different vegetation types[J]. Water Resources Management, 2014, 28(9):2415-2433.
- [8] Li J M, Li L, Wang Z G, et al. The contributions of the roots, stems, and leaves of three grass species to water erosion reduction on spoil heaps[J]. Journal of Hydrology, 2021, 603:127003.
- [9] Wang B, Zhang G H, Yang Y F, et al. The effects of varied soil properties induced by natural grassland succession on the process of soil detachment[J]. Catena, 2018, 166:192-199.
- [10] Yang Z M, Li C H, Liu Y J, et al. Roles of the stolon and erect grass species in surface-subsurface flow generation and red soil loss[J]. Journal of Hydrology, 2023, 617:128827.
- [11] Tu N, Dai Q H, Yan Y J, et al. Effects of moss overlay on soil patch infiltration and runoff in Karst rocky desertification slope land[J]. Water, 2022, 14(21):3429.
- [12] Yan Y J, Tu N, Cen L P, et al. Characteristics and dynamic mechanism of rill erosion driven by extreme rainfall on Karst Plateau slopes, SW China[J]. Catena, 2024, 238:107890.
- [13] Li Z W, Xu X L, Wang K L. Effects of distribution patterns of Karst landscapes on runoff and sediment yield in Karst watersheds[J]. CATENA, 2023, 223:106947.
- [14] 彭旭东, 戴全厚. 西南石漠化区地表侵蚀/地下漏失的侵蚀环境特征[J]. 中国水土保持科学, 2023, 21(4):150-158.
- Peng X D, Dai Q H. Erosion environmental characteristics of surface erosion/underground leakage in the rocky desertification area, Southwest China[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2023, 21(4):150-158.
- [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 & Development, 2018, 29(8):2438-2448.
- [16] 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.
- [17] 陈泽勋, 吴英杰, 王文君, 等. 不同放牧条件下坡面初始产流时间和径流流速变化特征[J]. 水土保持研究, 2023, 30(3):62-68.
- Chen Z X, Wu Y J, Wang W J, et al. Characteristics of initial yield time and velocity of runoff under different grazing conditions[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(3):62-68.
- [18] 牛钰杰, 杨思维, 王贵珍, 等. 放牧强度对高寒草甸土壤理化性状和植物功能群的影响[J]. 生态学报, 2018, 38(14):5006-5016.
- Niu Y J, Yang S W, Wang G Z, et al. Effects of grazing disturbance on soil properties and plant functional groups and their relationships in an alpine meadow on the Tibetan Plateau, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(14):5006-5016.
- [19] 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, 236:107708.
- [20] 张禹洋, 聂世豪, 蔡国强, 等. 植被缓冲带对地表径流阻控效果调查及模拟[J]. 水土保持研究, 2022, 29(2):36-42.
- Zhang Y Y, Nie S H, Cai G Q, et al. Investigation and simulation on the effect of vegetative filter strip on surface runoff[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2022, 29(2):36-42.
- [21] 李晓娜, 张国芳, 武美军, 等. 不同植被过滤带对农田径流泥沙和氮磷拦截效果与途径[J]. 水土保持学报, 2017, 31(3):39-44, 50.
- Li X N, Zhang G F, Wu M J, et al. Interception ways and effects of grass filter strips on sediment, nitrogen and phosphorus in agricultural runoff[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2017, 31(3):39-44, 50.
- [22] Yi X S, Dai Q H, Yan Y J, et al. Effects of concentrated flow changes on runoff conversion and sediment yield in gently sloping farmland in a Karst Area of SW China[J]. Catena, 2022, 215:106331.