

# 管道孔径对西南喀斯特坡地水土漏失的影响

司琴<sup>1,3</sup>, 赖本忠<sup>3</sup>, 付智勇<sup>1,2</sup>, 徐勤学<sup>3,4</sup>, 陈洪松<sup>1,2</sup>

(1.中国科学院亚热带农业生态研究所亚热带农业生态过程重点实验室,长沙 410125;

2.中国科学院环江喀斯特生态系统观测研究站,广西 环江 547100;

3.桂林理工大学广西环境污染控制理论与技术重点实验室科教结合科技创新基地,广西 桂林 541004; 4.桂林理工大学岩溶地区水污染控制与用水安全保障协同创新中心,广西 桂林 541004)

**摘要:** 基于西南喀斯特坡地近地表岩溶管道的调查统计,建立喀斯特区地表—地下二元空间水土过程试验微区,通过人工模拟降雨试验,研究不同雨强下(52,133 mm/h)岩溶管道孔径大小(1,2,5 cm)对水士地下漏失过程的影响。结果表明:(1)岩溶管道孔径的增大显著增大了地下径流系数和径流强度,但对初始产流时间的影响并不显著;在中雨强(52 mm/h)条件下,随着孔径的增大,初始产流所需要的时间也相应延长;在大雨强(133 mm/h)条件下则相反。(2)随着孔径的增大,中雨强(52 mm/h)下的地下径流特征曲线呈现先增强后趋于平稳状态;大雨强(133 mm/h)下的径流强度随着孔径的增大呈现持续上升的变化趋势,且 2 cm 和 5 cm 孔径的地下总径流强度较 1 cm 时分别扩大 75% 和 74%。(3)不同岩溶管道的地下产沙量均与其孔径大小呈正比。在中雨强(52 mm/h)条件下,2 cm 和 5 cm 岩溶管道孔径的产沙量分别是 1 cm 孔径的 2.5,14.9 倍;大雨强(133 mm/h)条件下,2 cm 和 5 cm 岩溶管道孔径的产沙量分别是 1 cm 孔径的 6.9,10.3 倍。(4)大雨强(133 mm/h)条件下,不同粒径范围的泥沙漏失质量大小顺序为粒径<2 mm>3~2 mm>5~3 mm>5 mm 以上。研究结果有利于深入理解岩溶管道孔径的大小对西南喀斯特区地下漏失的影响,为该地区水土流失防治提供参考。

**关键词:** 喀斯特; 岩溶管道; 模拟降雨; 水土漏失

**中图分类号:** S157.1

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1009-2242(2022)02-0049-08

**DOI:** 10.13870/j.cnki.stbxb.2022.02.006

## Impact of Conduit Aperture on Soil and Water Loss on Karst Slope in Southwest China

SI Qin<sup>1,3</sup>, LAI Benzong<sup>3</sup>, FU Zhiyong<sup>1,2</sup>, XU Qinxue<sup>3,4</sup>, CHEN Hongsong<sup>1,2</sup>

(1.Key Laboratory of Agro-ecological Processes in Subtropical Region, Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125; 2.Huanjiang Karst Ecosystem

Observation and Research Station, Chinese Academy of Sciences, Huanjiang, Guangxi 547100;

3.Key Laboratory for Theory and Technology of Environmental Pollution Control in Guangxi, Science and Technology Innovation Base, Guilin University of Technology, Guilin, Guangxi 541004; 4.Guangxi Collaborative Innovation

Center for Water Pollution Control and Safety in Karst Area, Guilin University of Technology, Guilin, Guangxi 541004)

**Abstract:** Based on the investigation and statistics of karst slope near-surface karst conduits, this paper established a test micro-area of surface-underground binary space water and soil process in Karst area. Through artificial simulated rainfall test, the influence of pore size (1 cm, 2 cm, 5 cm) of karst conduits on water and soil leakage process under different rainfall intensities (52 mm/h and 133 mm/h) was studied. The results showed that: (1) The coefficient of underground runoff and the intensity of runoff increased significantly with the increases of pore size of karst conduits, but the effect on the initial runoff time was not significant. Under the moderate rain intensity (52 mm/h), the time required for initial runoff generation increased with the increases of pore size. However, under heavy rain (133 mm/h), the initial runoff time decreased with the increases of pore size. (2) With the increases of pore size, the characteristic curve of runoff intensity under moderate rain intensity (52 mm/h) showed that it increased first and then tended to be

收稿日期: 2021-09-02

资助项目: 国家自然科学基金项目(51769005, 42077077); 广西自然科学基金项目(2020GXNSFAA297242)

第一作者: 司琴(1998—), 女, 安徽蚌埠人, 硕士研究生, 主要从事水土保持与农业生态研究。E-mail: 1436404909@qq.com

通信作者: 付智勇(1982—), 男, 湖南益阳人, 博士, 副研究员, 主要从事山坡水文和土壤侵蚀研究。E-mail: zyfu@isa.ac.cn

stable. The runoff intensity at mid-slope position was proportional to the pore size, and the upstream and downhill positions were not significantly affected by the pore size. The change order of runoff intensity with the pore size was  $5\text{ cm} > 1\text{ cm} > 2\text{ cm}$ . The runoff intensity under heavy rain ( $133\text{ mm/h}$ ) showed a continuous upward trend with the increases of pore size, and the gross runoff intensity at  $2\text{ cm}$  and  $5\text{ cm}$  aperture increased by  $75\%$  and  $74\%$  respectively compared with that at  $1\text{ cm}$ . (3) Underground sediment yield of different karst conduits was proportional to their pore size. Under medium rain intensity ( $52\text{ mm/h}$ ), the sediment yield of  $2\text{ cm}$  and  $5\text{ cm}$  karst conduits with pore diameter was 2.5 and 14.9 times of that of  $1\text{ cm}$  respectively. Under heavy rain ( $133\text{ mm/h}$ ), the sediment yield of  $2\text{ cm}$  and  $5\text{ cm}$  karst conduit with pore diameter was 6.9 and 10.3 times of that of  $1\text{ cm}$  respectively. (4) Under heavy rain ( $133\text{ mm/h}$ ), the order of mass loss of sediment in different particle size ranges was: particle size less than  $2\text{ mm} > 3\sim 2\text{ mm} > 5\sim 3\text{ mm} > 5\text{ mm}$  or more. These research results are helpful to further understand the influence of karst pore size on underground leakage in southwest karst area and provide reference for water and soil erosion prevention in this area.

**Keywords:** karst; karst conduits; simulated rainfall; water and soil loss

我国西南喀斯特地区成土速率慢,土层浅薄且分布不连续,土壤蓄持水分能力低<sup>[1]</sup>,地下受碳酸盐岩(石灰岩)的溶蚀作用,岩溶管道裂隙发育强烈<sup>[2]</sup>,形成独特地上一地下二元空间结构,这种特殊的“二元三维”水文系统导致该地区水土流失严重,且显著区别于常态地貌<sup>[3-4]</sup>。

地下漏失是喀斯特地区水土流失的重要途径。一些学者<sup>[5]</sup>通过核素示踪、模拟试验等技术,在喀斯特地表地下土壤流失比例、地下土壤流失量的探究上取得了一些进展。Bai 等<sup>[6]</sup>通过测定喀斯特地区沉积物土壤中放射性同位素 $^{137}\text{Cs}$ 的含量表明,喀斯特地区地下漏失是主要侵蚀路径,是地表产沙量的数倍;魏兴萍等<sup>[7]</sup>在重庆岩溶槽谷区运用 $^{137}\text{Cs}$ 和配比法得出地表流失和地下漏失比例分别为 $75\%$ 和 $25\%$ ;Dai 等<sup>[8]</sup>通过人工降雨得到典型喀斯特坡耕地的水土流失主要以地下水土流失为主的结论,特别是小雨强( $\leq 30\text{ mm/h}$ )条件下,坡地地表无产流产沙出现,地下水土流失贡献率接近 $100\%$ ,这与陈洪松等<sup>[9]</sup>对桂西北喀斯特峰丛不同土地利用方式产流产沙特征的研究结果相似。

对于喀斯特地区水土漏失的过程及影响因素,王恒松等<sup>[10]</sup>在为期 1 个水文年的小流域监测中提出,喀斯特地区特殊的二元空间结构是造成该区地下水土流失的实质,降雨是水土流失的主要外营力;戴全厚等<sup>[11]</sup>通过大量野外试验指出,土壤漏失受到地下岩溶管道发育情况和空间尺度的影响,这证明了喀斯特地区土壤可以通过管道、裂隙漏失;周念清等<sup>[12]</sup>对普定岩溶区的地形特征、水文条件进行现场调查发现,岩溶裂隙、落水洞等是造成水土流失的主要因素,这与张信宝等<sup>[13]</sup>对茂兰喀斯特地区水土流失研究结论相似,即岩溶地区地下流失量主要取决于岩溶裂隙和暗河的发育程度;Zhou 等<sup>[14]</sup>基于剪切地下岩溶管

道试验证明了岩溶管道中的地下漏失的发生存在蠕动机理,建立了喀斯特管道中土壤地下流失的概念模型;冯腾等<sup>[15]</sup>在桂西北喀斯特坡地使用 $^{137}\text{Cs}$ 技术手段表明,土壤的地下流失可能以沿裂隙、地下管道的整体蠕移丢失为主;彭旭东<sup>[16]</sup>通过水土裂隙漏失过程模拟降雨试验发现,雨强是决定土壤裂隙漏失量和产流量的主导因素,裂隙度对裂隙产流量也有一定的作用。

由于喀斯特地区水土漏失的复杂性,目前的研究仍难以确定岩溶管道孔径大小、雨强等因素对水土漏失的影响。因此,本文通过模拟降雨试验,以喀斯特石灰土为研究对象,研究不同孔径的岩溶管道对地下漏失的影响。研究结果可揭示不同孔径的岩溶管道对喀斯特地下漏失影响和规律,并确定孔径对地表一地下水土过程的影响机理。进一步确定喀斯特坡地地下漏失的影响因子,为喀斯特地区的地下水土漏失的治理提供科学依据。

## 1 材料与方法

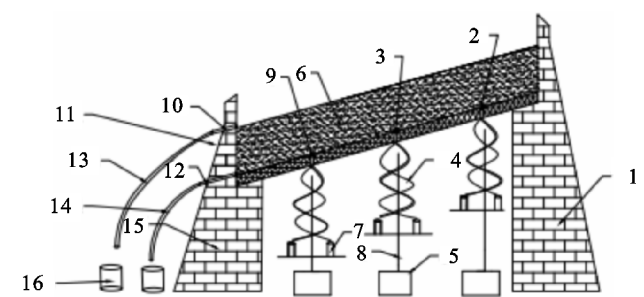
### 1.1 试验材料

(1) 供试土壤。试验所用土壤为中国科学院环江喀斯特生态系统观测研究站附近( $24^{\circ}45'50''\text{N}$ ,  $108^{\circ}17'57''\text{E}$ )表层 0—100 cm 处的黄色石灰土,去除植物根系后,经过自然风干后过 $1\text{ cm}$ 的筛,取样地原土壤植被类型为草、灌木,土壤砂粒含量为 $22.63\%$ ,粉粒含量为 $47.31\%$ ,黏粒含量为 $30.06\%$ ,经过充分混合后分 3 层压实填筑,控制土壤容重为 $1.21\text{ g/cm}^3$ 。

(2) 试验装置。试验微区为自行设计的水泥人工模拟降雨径流微区(图 1),试验微区规格长 $3.0\text{ m}$ ,宽 $1.5\text{ m}$ ,深 $0.5\text{ m}$ ,坡度 $15^{\circ}$ 。按距离盛土槽底部远近将试验微区分为上、中、下 3 个坡位,分别距离盛土槽底部 $60, 140, 220\text{ cm}$ ,每个坡位均设有 $1.2, 5\text{ cm}$  3 种不同孔径的地下管道,每种大小 3 个,每排 9 个,共 3 排。为防止

堵塞,在管道的进出口放置细砂网罩住,在微区中预埋地表径流、岩土界面和地下径流的出水管道,并在每个管道下放置径流收集装置。本试验设计为在平整基岩的上、中、下 3 个坡位,2 种降雨强度(52,133 mm/h)和 3 种地下管道孔径(1,2,5 cm)进行组合试验。

模拟降雨器采用组合的顶喷式降雨器,美国 SPRACO 锥形喷头,通过控制喷头的开关得到不同雨强组合。试验所用降雨器高度调节为 4.5 m,喷嘴采用向上喷的方式降雨,降雨器压力表控制在 0.08 MPa 水压强时,降雨得到的雨滴下降终点速度符合天然降雨特性,在试验前进行多次雨强校准,降雨均匀度均大于 80%,降雨有效面积为 20 m<sup>2</sup>。降雨后使用翻斗流量计记录产流量。



注:1 为第 2 支撑墩柱;2 为第 3 预留孔;3 为第 2 预留孔;4 为第 1 导流弯管;5 为底座;6 为土壤;7 为采样瓶;8 为立杆;9 为第 1 预留孔;10 为地表径流导水管;11 为盛土槽;12 为岩土界面导流水管;13 为地表径流引水管;14 为岩土界面流引水管;15 为第 1 支撑墩柱;16 为接水桶。

图 1 人工水泥径流微区示意

## 1.2 试验方法

试验于 2019 年 7—9 月在中科院亚热带农业生态研究所的环江喀斯特生态系统观测研究站模拟降雨大厅内开展。供试土壤风干后,分 3 层压实填入土槽,每层 12 cm,总填土厚度 36 cm。本试验共设置 3 种不同孔径的岩溶管道(1,2,5 cm),2 个降雨强度,中雨强(52 mm/h)和大雨强(133 mm/h),控制总降雨量为 156 mm,降雨时间分别为 180,70 min。每次试验前只开 1 种孔径大小的管道,其余孔径管道用橡胶塞堵住并用玻璃胶密封缝隙。降雨开始后计时,中雨强(52 mm/h)和大雨强(133 mm/h)下分别每隔 10,4 min 用聚乙烯桶收集 1 次样品,地下分上、中、下 3 个坡位,3 个孔径,一次取样有 9 个样品,地表和岩土界面各 1 个样,共计 11 个。收集样品后立刻称重,采用烘干法测其泥沙重量。对于漏失泥沙的粒径分级处理,选取 5,3,2 mm 的标准土样筛作为一套颗粒分级筛,从小到大依次叠放在取样桶上,得到的每层泥沙颗粒用滤纸包好烘干后使用电子天平(精度为 0.000 01)称重并记录数据。每个处理重复 2 次,共计 24 场降雨。本次试验数据均在 Excel、SPSS 25 和 Origin 2021 软件中进行处理。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同岩溶管道孔径的地下径流特征

岩溶管道孔径的增大可显著增大地下径流系数和径流强度(表 1),且随着孔径的增大,地下径流在总径流中的占比也逐渐增加(图 2),但孔径大小对地下径流的初始产流时间并无显著影响(图 3)。随着雨强的增大,1 cm 孔径的径流系数和径流强度明显减小,与 2,5 cm 孔径管道相反,雨强的增大并不会减小其径流系数和径流强度。在中雨强(52 mm/h)下,1,2 cm 孔径的初始产流时间均早于 5 cm 孔径。3 种孔径的初始产流时间随坡位由下至上均产生不同程度的延迟。不同坡位的初始产流时间均为孔径小的管道产流时间快。在大雨强(133 mm/h)下,孔径的增大在整体上提前初始产流时间,其中 1,2,5 cm 孔径的初始产流时间较中雨强分别减小 1.5,1.7,1.9 倍。各个孔径之间的初始产流时间差异并不显著,但 2,5 cm 孔径的初始产流时间整体上早于 1 cm 孔径的初始产流时间,这与中雨强时的规律相反。

在中雨强(52 mm/h)下,管道孔径的增大可以显著提高地下径流产流占比,同时减小地表径流和岩土界面流占总径流量比例(图 2)。1,2 cm 孔径时,岩土界面流为总径流的重要组成部分,分别为 42% 和 61%,在孔径增大后,岩土界面流明显变小,以地下径流为主。地表径流在各孔径占比均较小。在大雨强(133 mm/h)下,1 cm 孔径时地表径流为主要产流部位(67%),在孔径增大后,地下径流部分显著增加,由 1 cm 时的 14% 分别增加到 40% 和 44%,同时地表径流和壤中流占比明显变小。

对于不同岩溶管道孔径的地下径流系数,在忽略雨强条件下,其平均径流系数与孔径之间呈现明显正相关,孔径改变地下径流在总径流中的占比(表 1)。在中雨强(52 mm/h)条件下,孔径的变化对地下径流系数的影响并不显著。与 1 cm 孔径时相比,2 cm 孔径的地下总径流系数由 23.8 减少到 16.9,而 5 cm 孔径的地下径流系数由 23.8 增大到 34.1。2 cm 孔径的管道上、中、下 3 个坡位径流系数差异显著,其中中坡位和下坡位的径流系数较上坡位分别增大 74% 和 82%。在大雨强(133 mm/h)条件下,地下径流系数随孔径增大而增大,其中 2,5 cm 孔径的地下总径流系数分别为 1 cm 孔径管道的 4.0,3.9 倍,但整体上仍显著小于中雨强条件下各孔径地下径流系数。

在中雨强(52 mm/h)条件下,孔径的增大对径流强度的增加效果并不明显。随着孔径的增大,上、下坡位的地下径流强度均表现为先减小后增大,而中坡位的地下径流强度则与地下孔径大小呈正比。在大雨强(133 mm/h)条件下,2,5 cm 孔径的地下总径流



强度较 1 cm 时扩大 75% 和 74%，但孔径由 2 cm 增大到 5 cm 时，地下径流强度并无显著差异。

表 1 不同岩溶管道孔径的地下径流系数和径流强度

| 管道<br>孔径/cm | 雨强/<br>(mm·h <sup>-1</sup> ) | 径流系数/%     |           |            |            | 径流强度/(mm·h <sup>-1</sup> ) |            |             |             |
|-------------|------------------------------|------------|-----------|------------|------------|----------------------------|------------|-------------|-------------|
|             |                              | 总径流系数      | 上坡位       | 中坡位        | 下坡位        | 总径流强度                      | 上坡位        | 中坡位         | 下坡位         |
| 1           | 52                           | 23.8±0.6Ba | 3.1±0.4Ab | 4.7±2.2Ab  | 16.0±3.2Aa | 12.38±0.31Ba               | 1.60±0.2Ab | 2.46±1.1Bb  | 8.31±1.7Aa  |
|             | 133                          | 5.1±1.0Bb  | 0.4±0.0Ba | 2.0±1.5Ba  | 2.7±0.9Ba  | 6.84±1.39Bb                | 0.54±0.5Bb | 2.65±2.0Bab | 3.65±1.2Ba  |
|             | 平均值                          | 14.5±13.2  | 1.7±1.9   | 3.3±1.9    | 9.4±9.4    | 9.61±3.92                  | 1.07±0.75  | 2.55±0.13   | 5.98±3.30   |
| 2           | 52                           | 16.9±0.5Ba | 1.6±0.7Ac | 6.3±0.1Bb  | 9.1±1.1Ba  | 8.82±0.26Ba                | 0.83±0.3Bc | 3.27±0.0Bb  | 4.72±0.6Ba  |
|             | 133                          | 20.5±4.2Aa | 5.1±2.6Aa | 7.1±1.2Ab  | 8.2±2.8Ac  | 27.21±5.54Ab               | 6.80±3.5Aa | 9.49±1.6Aa  | 10.92±3.7Aa |
|             | 平均值                          | 18.7±2.5   | 3.0±2.5   | 6.7±0.6    | 8.6±0.6    | 18.02±13.00                | 3.82±4.22  | 6.38±4.40   | 7.82±4.38   |
| 5           | 52                           | 34.1±6.7Aa | 3.7±0.2Ab | 11.9±5.5Aa | 18.4±0.8Aa | 17.71±3.45Aa               | 1.93±0.1Ab | 6.21±2.9Ba  | 9.57±0.4Aa  |
|             | 133                          | 20.1±2.1Aa | 5.3±1.3Ab | 7.0±0.2Aab | 7.9±1.0Aa  | 26.78±2.84Aa               | 7.00±1.7Ab | 9.27±0.2Ab  | 10.51±1.3Aa |
|             | 平均值                          | 27.1±9.8   | 4.5±1.1   | 9.6±3.5    | 13.2±7.4   | 22.24±6.42                 | 4.46±3.59  | 7.74±2.17   | 10.04±0.67  |

注：总径流系数和总径流强度大写字母表示相同雨强下不同孔径间差异显著( $P<0.05$ )，小写字母表示相同孔径下不同雨强间差异显著( $P<0.05$ )；其他大写字母表示相同雨强下相同坡位不同孔径间差异显著( $P<0.05$ )，小写字母表示相同雨强下相同孔径不同坡位间差异显著( $P<0.05$ )。

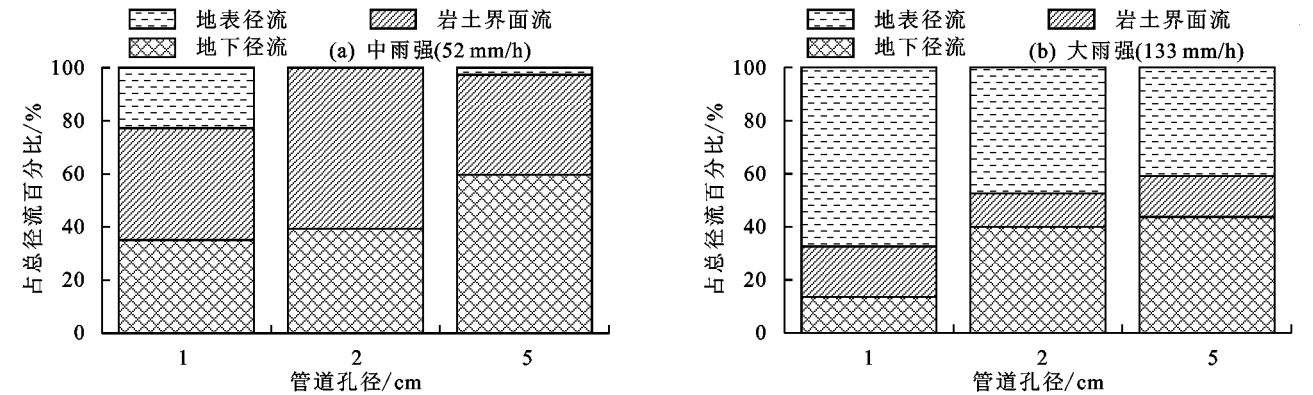


图 2 各部位径流贡献

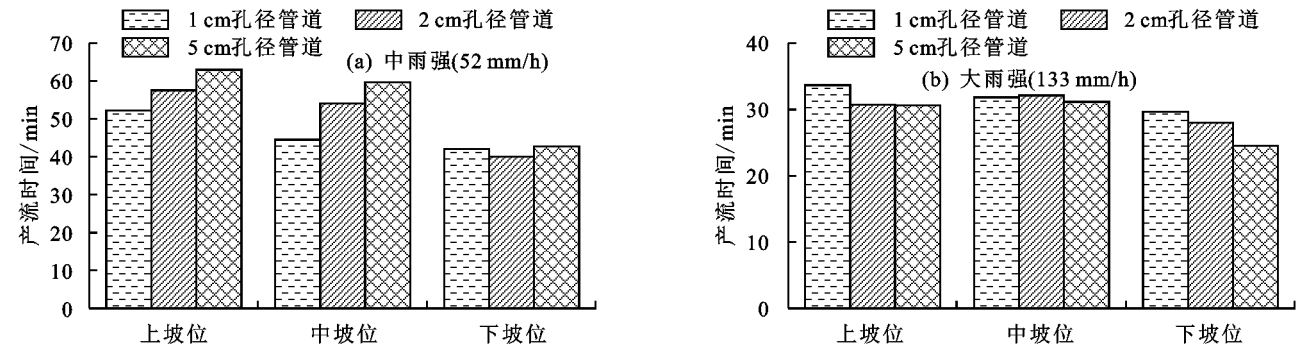


图 3 不同岩溶管道孔径的地下径流初始产流时间

通过 SPSS 软件对不同岩溶管道孔径大小、降雨强度、坡位的组合条件下对地下径流量的多因素方差分析。由表 2 可知，单个因素下，各因素对地下径流量的影响显著性为坡位>降雨强度>孔径大小，其中坡位对地下径流强度影响最显著，孔径大小、降雨强度对地下径流量的影响为显著。坡位和孔径大小之间的交互作用对地下径流量的影响表现为不显著，而坡位和降雨强度、孔径大小和降雨强度之间的交互作用对地下径流量的影响较显著，且远大于 3 种条件相互作用下对地下径流量影响的显著性。

表 2 孔径等多因素与地下径流量的方差分析

| 因素           | <i>F</i> | 显著性    |
|--------------|----------|--------|
| 坡位           | 19.830   | <0.001 |
| 孔径大小         | 6.991    | 0.006  |
| 降雨强度         | 12.208   | 0.003  |
| 坡位×孔径大小      | 0.848    | 0.513  |
| 坡位×降雨强度      | 8.046    | 0.003  |
| 孔径大小×降雨强度    | 5.762    | 0.012  |
| 坡位×孔径大小×降雨强度 | 0.989    | 0.439  |

2.2 不同岩溶管道孔径的地下产流过程

在中雨强(52 mm/h)条件下，上坡位不同管道孔

径的地下径流过程特征均表现为先迅速增大,然后逐渐趋于稳定径流状态(图 4a),不同管道孔径的径流强度大小为  $5\text{ cm} > 1\text{ cm} > 2\text{ cm}$ ,其中  $1\text{ cm}$  孔径最快达到稳定径流状态,其次是  $5\text{ cm}$ ,最后是  $2\text{ cm}$ 。中坡位不同管道孔径的地下径流过程特征与上坡位相似,均为先迅速增大,后逐渐趋于稳定状态,但  $2\text{ cm}$  孔径的地下径流达到稳定径流的时间最晚,直到降雨  $120\text{ min}$  左右才达到稳定径流状态,不同管道孔径径流强度大小为  $5\text{ cm} > 2\text{ cm} > 1\text{ cm}$ ,其中  $5\text{ cm}$  孔径的稳定

径流强度显著高于  $1, 2\text{ cm}$ 。下坡位地下径流过程特征受管道孔径的影响较大(图 4c),  $1, 5\text{ cm}$  孔径时其径流特征表现为先迅速增大,随后速度减小,并持续上升,未见明显稳定径流状态。而  $2\text{ cm}$  孔径的地下径流过程表现为先增大,后逐渐趋于稳定。不同管道孔径径流强度大小为  $5\text{ cm} > 1\text{ cm} > 2\text{ cm}$ ,其中  $5\text{ cm}$  和  $1\text{ cm}$  孔径的径流强度显著高于  $2\text{ cm}$ 。随着坡位由下至上,  $1, 2, 5\text{ cm}$  孔径的平均地下径流强度均表现为逐渐降低趋势。

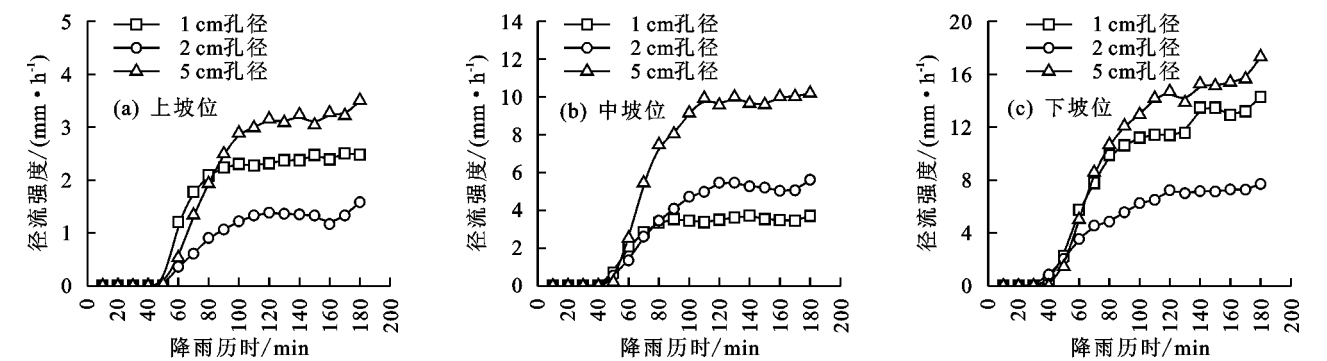


图 4 中雨强(52 mm/h)下不同岩溶管道孔径的地下径流过程

在大雨强( $133\text{ mm/h}$ )条件下,上坡位不同岩溶管道孔径径流强度大小为  $5\text{ cm} > 2\text{ cm} > 1\text{ cm}$ ,其径流过程特征均表现为持续上升状态,未见明显稳定径流状态,其中  $5\text{ cm}$  和  $2\text{ cm}$  的径流强度增大速度显著高于  $1\text{ cm}$  孔径(图 5)。中坡位的各管道孔径地下径流过程特征与上坡位相似,  $1\text{ cm}$  和  $2\text{ cm}$  孔径表现为持续上升状态,但  $5\text{ cm}$  孔径在降雨  $50\text{ min}$  左右开始出现稳定趋势,不同管道孔径径流强度大小为  $2\text{ cm} >$

$5\text{ cm} > 1\text{ cm}$ 。下坡位  $1\text{ cm}$  孔径地下径流呈持续上升状态,而  $2, 5\text{ cm}$  孔径则先增大后逐渐趋于稳定,稳定后二者径流强度相似。

随着坡位由下至上,  $1\text{ cm}$  孔径的地下径流强度表现出明显降低的趋势,而  $2, 5\text{ cm}$  的地下径流强度在中坡位和下坡位的大小无明显差异,但是显著高于上坡位。在上、中、下坡位中,  $2, 5\text{ cm}$  孔径的地下径流强度均相似,且显著高于  $1\text{ cm}$  孔径。

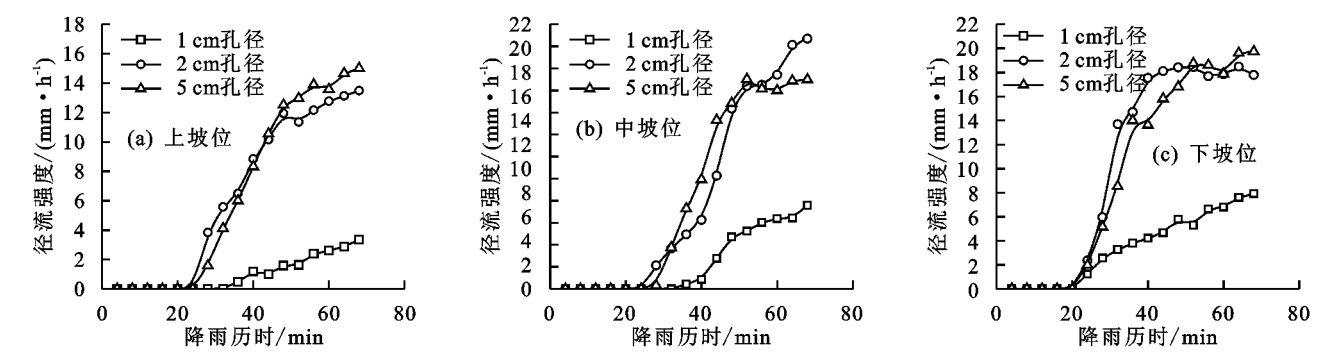


图 5 大雨强(133 mm/h)下不同岩溶管道孔径的地下径流过程

### 2.3 不同岩溶管道孔径的土壤流失

不同岩溶管道的产沙量均与孔径大小呈正比例关系。随着雨强的增大,各个孔径的管道产沙量均显著增加(图 6)。在中雨强( $52\text{ mm/h}$ )条件下,岩溶管道产沙量随地下孔径的增大而持续增大,其中  $5\text{ cm}$  孔径在上、中、下坡位的产沙量分别是  $1\text{ cm}$  孔径的  $5.4, 8.2, 24.4$  倍(图 7)。在大雨强( $133\text{ mm/h}$ )条件下,不同孔径的产沙量与中雨强结果相似,即随着管道孔径的增大,地下产沙量也随之增加(图 8)。  $2, 5\text{ cm}$  孔径的产沙量在中坡位分别达到最大值  $74.9,$

$78.8\text{ g}$ ,较中雨强中坡位分别增大  $2.3, 2.1$  倍。其中  $1\text{ cm}$  孔径在各坡位的产沙量只占中雨强和大雨强总产沙量的  $5\%$ ,且显著低于  $5\text{ cm}$  孔径产沙量。

在中雨强( $52\text{ mm/h}$ )条件下,  $5\text{ cm}$  孔径的地下产沙过程显示出较强的空间异质性,随着坡位由下至上,其产沙量显著降低;不同坡位  $5\text{ cm}$  孔径的地下产沙速率均显著高于  $1, 2\text{ cm}$ ,且表现为极不稳定的锯齿状变化,在开始产沙后快速增大,降雨时间为  $80\text{ min}$  左右达到峰值后逐渐降低。而  $1, 2\text{ cm}$  孔径的地下产沙速率基本相似,均维持在较低水平,其过程特

征变化为先增大后逐渐趋于稳定。

在大雨强(133 mm/h)条件下,随着孔径的增大,其地下产沙量也越大,其中 5 cm 孔径的地下产沙量显著高于 1,2 cm。上坡位不同地下孔径的地下产沙过程特征差异明显,1 cm 孔径的地下产沙量在降雨过程中一直维持在较低水平,无明显波动,2,5 cm 孔径的地下产沙过程均表现为先增大后逐渐减小的趋

势;中坡位时 2,5 cm 的地下产沙过程均表现为先迅速增大,在降雨时间为 42 min 左右达到峰值,且 5 cm 孔径产沙量高于 2 cm,但在降雨后期,2 cm 产沙量明显高于 5 cm。下坡位 5 cm 孔径的地下产沙过程与中坡位和上坡位相同,2 cm 孔径的地下产沙过程除在 22 min 左右突然增大之外,其产沙量变化不明显,且与 1 cm 孔径的产沙过程相似,均维持在较低水平。

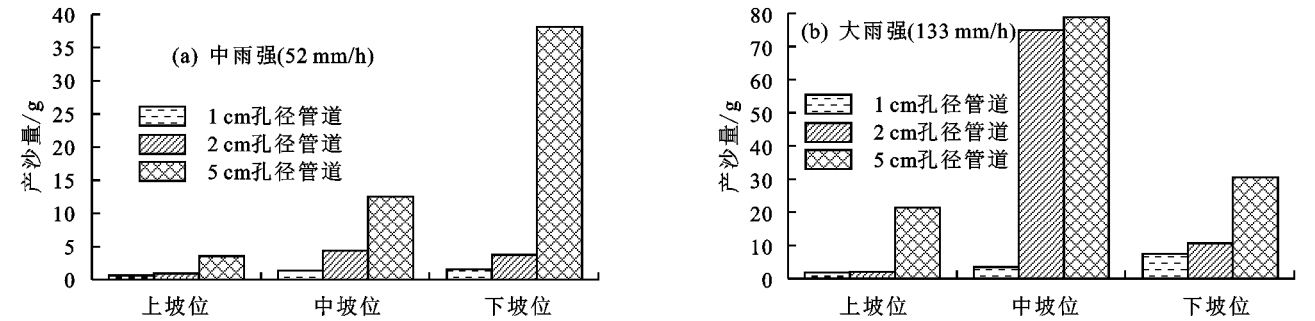


图 6 不同岩溶管道孔径的地下产沙量

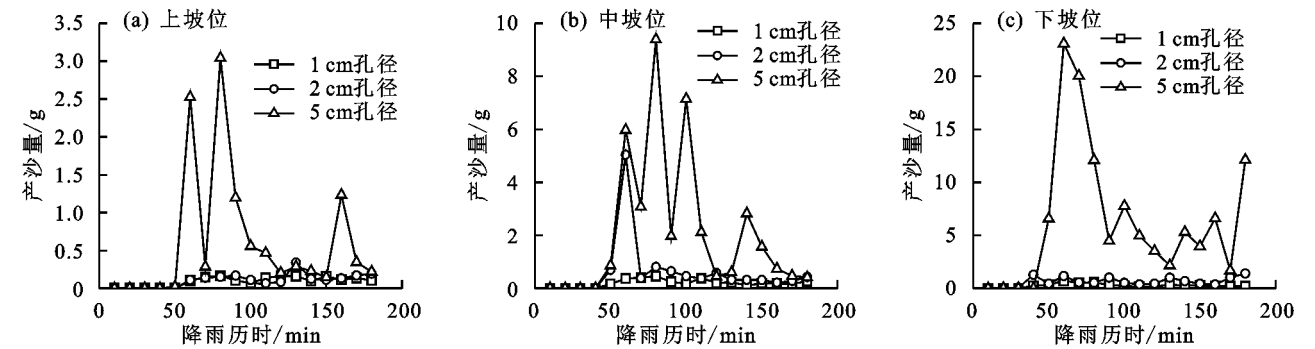


图 7 中雨强(52 mm/h)下不同岩溶管道孔径的地下产沙过程

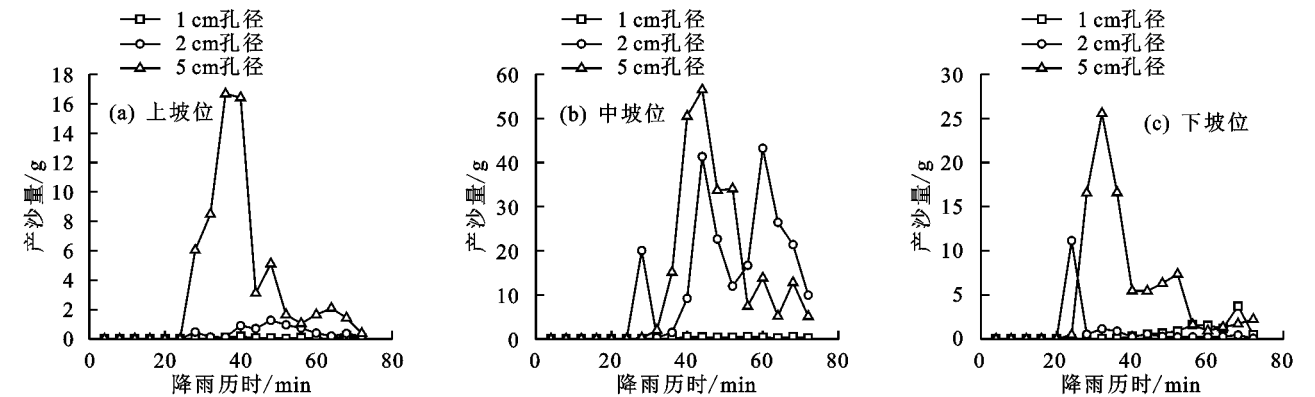


图 8 大雨强(133 mm/h)下不同岩溶管道孔径的地下产沙过程

在大雨强(133 mm/h)条件下,不同粒径的泥沙质量都随孔径的增大而增加。5 cm 孔径的漏失泥沙总量分别是 1,2 cm 孔径时漏失泥沙总量的 27.3,1.8 倍。大粒径的漏失泥沙占比在各个孔径下的大小为 5 cm>1 cm>2 cm(图 9)。其中粒径<2 mm 的漏失泥沙质量在各个孔径中的占比显著大于其他粒径。相同孔径条件下,漏失泥沙颗粒越大,在漏失泥沙总量中占比越少,其中孔径为 1,2 cm 的岩溶管道中几乎没有出现粒径>5 mm 的泥沙。结果表明,在大雨强下,大孔径的漏失泥沙总量比小孔径的大,泥沙粒

径越小,漏失量越大。

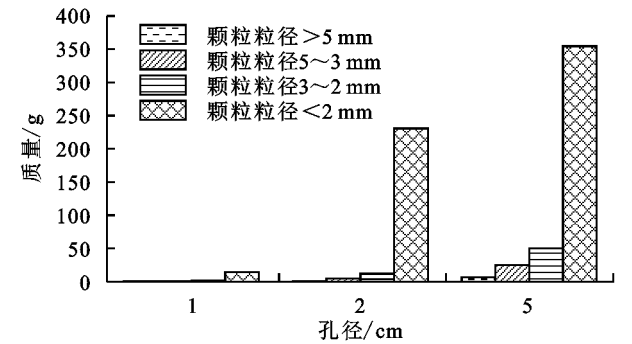


图 9 大雨强不同岩溶管道孔径的漏失泥沙总量



### 3 讨论

地下漏失是喀斯特地区主要的水土流失方式<sup>[17]</sup>,在孔径增大的条件下,地下径流强度和径流系数也随之增加<sup>[18-20]</sup>。而本试验中大雨强下2,5 cm孔径的地下径流强度均相似,且显著高于1 cm孔径,主要是因为大雨强(133 mm/h)条件雨水入渗量相较于中雨强更大,而地下孔径的增大,很大程度上增加了土壤在岩溶管道中崩塌的可能,在岩溶管道上方的土壤崩塌后形成更大的通道使雨水大量下渗,而小孔径管道中漏失量更小,土壤崩塌漏失的可能也越小,甚至可能堵塞岩溶管道,减小地下径流量。

降雨是诱发喀斯特坡地发生土壤侵蚀的主要驱动力<sup>[21]</sup>,随着降雨强度的增加,坡面径流对土壤水的压力势和雨滴打击产生的挤压力增大,促进降雨入渗,增大地下径流量<sup>[22-23]</sup>;同时,有研究<sup>[24-25]</sup>发现,当雨强增大时,起始产流时间也显著提前,这与本研究中的降雨强度与起始产流时间以及地下径流量呈正相关的结论相似。而在不同雨强条件下,下坡位的径流系数均比上坡位和中坡位大。原因是降雨开始后,雨水快速入渗,由于坡度的作用,在上坡位和中坡位入渗的雨水在土壤中垂直向下迁移的同时也会向下坡位入渗,导致下坡位最先产流,径流系数也最大,这与前人<sup>[26]</sup>对喀斯特地区水土漏失过程的研究结果一致。

岩溶管道孔径越大,其地下漏失量越大,相关研究<sup>[27]</sup>认为,地下孔隙度增大为泥沙提供更多流失通道,使得坡地的地下土壤侵蚀产沙量也增大。本研究中各个孔径的整体产沙过程均随降雨历时的延长呈现先增长后降低然后趋于稳定的趋势。根据严友进等<sup>[28]</sup>对喀斯特坡地产流产沙的研究,降雨过程中含沙量不断减小是由于土壤颗粒在径流作用向下运动时堵塞土壤孔隙,导致地下径流含沙量随降雨时间的延长而减小。在大雨强(133 mm/h)条件下,岩溶管道孔径越大,不同粒径泥沙漏失质量越大。这是由于大雨强降雨产生的动能充足,对土壤中的团聚体结构的破坏性较强,导致土壤漏失现象更严重<sup>[29]</sup>。而大雨强下粒径<2 mm的泥沙质量明显大于其他粒径,这表明在降雨过程中,大颗粒在受到雨水的冲刷易分解成较小的颗粒,而地下漏失时粒径较小的泥沙更容易被搬运,说明土壤侵蚀过程对不同粒径的土壤有分选作用<sup>[30-31]</sup>。本试验的结果仅对裸坡的水土漏失进行了初步的探讨,为了更好地研究喀斯特坡地不同岩溶管道孔径对水土漏失的影响,还需要通过增加植被因素对喀斯特坡地不同岩溶管道孔径的水土漏失特征做进一步观测研究。

### 4 结论

(1)岩溶管道孔径的增大显著增大径流系数和径

流强度,但对起始产流时间的影响并无明显规律性。在中雨强(52 mm/h)条件下,不同坡位的起始产流时间均为小孔径管道产流时间快。而在大雨强(133 mm/h)条件下,孔径的增大在整体上提前初始产流时间,但中坡位受孔径大小的影响并不显著。

(2)孔径增大后,中雨强下的地下径流过程特征曲线表现为先增强后趋于平稳状态,中坡位的径流强度随孔径变化的顺序为5 cm>2 cm>1 cm;但上坡位和下坡位的规律性并不显著,其径流强度大小随孔径的变化顺序为5 cm>1 cm>2 cm。在大雨强(133 mm/h)条件下,不同孔径的地下径流过程特征均表现为持续上升状态,无明显稳定趋势,且2,5 cm孔径的地下总径流强度也较1 cm时扩大75%和74%。

(3)地下产沙量与岩溶管道孔径及雨强大小均呈正比。在中雨强(52 mm/h)条件下,2,5 cm孔径的产沙量分别是1 cm孔径的2.5,14.9倍;大雨强(133 mm/h)条件下,2,5 cm孔径的产沙量分别是1 cm孔径的6.9,10.3倍,且不同粒径的泥沙漏失质量均随孔径的增大而增加。粒径越小,漏失泥沙质量越大,其中粒径<2 mm的漏失泥沙质量在1,2,5 cm孔径占比分别为88.41%,93.23%,81.36%。

#### 参考文献:

- [1] 彭旭东,戴全厚,李昌兰.中国西南喀斯特坡地水土流失/漏失过程与机理研究进展[J].水土保持学报,2017,31(5):1-8.
- [2] 刘华清.喀斯特区基岩起伏和岩溶管道形态对水土流失过程的影响[D].武汉:华中农业大学,2020.
- [3] 龙健,江新荣,邓启琼,等.贵州喀斯特地区土壤石漠化的本质特征研究[J].土壤学报,2005,42(3):419-427.
- [4] Wang J X, Zou B P, Liu Y, et al. Erosion-creep-collapse mechanism of underground soil loss for the karst rocky desertification in Chenqi Village, Puding County, Guizhou, China [J]. Environmental Earth Sciences, 2014,72(8):2751-2764.
- [5] 陈洪松,冯腾,李成志,等.西南喀斯特地区土壤侵蚀特征研究现状与展望[J].水土保持学报,2018,32(1):10-16.
- [6] Bai X Y, Zhang X B, Chen H, et al. Using Cs<sup>137</sup> fingerprinting technique to estimate sediment deposition and erosion rates from Yongkang depression in the karst region of Southwest China[J].Land Degradation and Development,2010,21(5):474-479.
- [7] 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.
- [8] Dai Q, Liu Z, Shao H, et al. Karst bare slope soil erosion and soil quality: A simulation case study[J].Solid Earth,2015,6(3):985-995.

- [9] 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.
- [10] 王恒松,熊康宁,刘云.喀斯特区地下水土流失机理研究[J].中国水土保持,2009(8):11-14,64.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 张信宝,王世杰,曹建华.西南喀斯特山地的土壤硅酸盐矿物物质平衡与土壤流失[J].地球与环境,2009,37(2):97-102.
- [14] Zhou J, Tang Y Q, Yang P, et al. Inference of creep mechanism in underground soil loss of karst conduits I. Conceptual mode[J]. Natural Hazards, 2012, 62(3): 1191-1215.
- [15] 冯腾,陈洪松,张伟,等.桂西北喀斯特坡地土壤<sup>137</sup>Cs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.
- [16] 彭旭东.喀斯特高原坡地浅层孔(裂)隙水土漏失过程及特征研究[D].贵阳:贵州大学,2018.
- [17] 张信宝,王世杰,贺秀斌,等.碳酸盐岩风化壳中的土壤蠕滑与岩溶坡地的土壤地下漏失[J].地球与环境,2007,35(3):202-206.
- [18] 伏文兵,戴全厚,严友进.喀斯特坡耕地及其浅层孔(裂)隙土壤侵蚀响应试验研究[J].水土保持学报,2015,29(2):11-16,22.
- [19] 甘艺贤.人工模拟降雨下喀斯特裸露坡耕地溶质迁移特征试验研究[D].贵阳:贵州大学,2018.
- [20] 蔡雄飞,王济,雷丽,等.不同雨强对我国西南喀斯特山区土壤侵蚀影响的模拟研究[J].水土保持学报,2009,23(6):5-8.
- [21] 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.
- [22] 王玉宽,王占礼,周佩华.黄土高原坡面降雨产流过程的试验分析[J].水土保持学报,1991,5(2):25-31.
- [23] 杨智,戴全厚,黄启鸿,等.典型喀斯特坡面产流过程试验研究[J].水土保持学报,2010,24(4):78-81.
- [24] 雷珊,魏兴萍.喀斯特坡地不同地表微地貌产流产沙模拟研究[J].三峡生态环境监测,2019,4(3):80-88.
- [25] 耿晓东,郑粉莉,张会茹.红壤坡面降雨入渗及产流产沙特征试验研究[J].水土保持学报,2009,23(4):39-43.
- [26] 周春衡,陈洪松,付智勇,等.土壤大孔隙形态对喀斯特区水土漏失过程的影响[J].水土保持学报,2020,34(6):70-76.
- [27] 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.
- [28] 严友进,戴全厚,伏文兵,等.喀斯特裸坡产流产沙过程试验研究[J].生态学报,2017,37(6):2067-2079.
- [29] 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.
- [30] 王玲.陡坡地水蚀过程与泥沙搬运机制[D].陕西 杨凌:中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心,2016.
- [31] 郝燕芳,佟帆.侵蚀泥沙颗粒特征研究进展[J].水土保持学报,2020,34(1):1-7.
- (上接第 48 页)
- [20] Zhu X C, Shao M A, Tang X Z, et al. Spatiotemporal variation and simulation of vegetation coverage in a typical degraded alpine meadow on the Tibetan Plateau[J]. Catena, 2020, 190: e104551.
- [21] 周一杨,王恩姮,陈祥伟.模拟降雨条件下黑土溅蚀与团聚体分选特征[J].水土保持学报,2008,22(6):176-179.
- [22] 刘和平,符素华,王秀颖,等.坡度对降雨溅蚀影响的研究[J].土壤学报,2011,48(3):479-486.
- [23] Ruhollah R A, Majid M, Mohammad H F, et al. Experimental investigation of rain-induced splash and wash processes under wind-driven rain[J]. Geoderma, 2019, 337: 1164-1174.
- [24] Ghahamani A, Ishikawa Y, Gomi T, et al. Downslope soil detachment-transport on steep slopes via rain splash[J]. Hydrology Process, 2011, 25(15): 2471-2480.
- [25] 甘艺贤,戴全厚,伏文兵,等.基于模拟降雨试验的喀斯特坡耕地土壤侵蚀特征[J].应用生态学报,2016,27(9):2754-2760.
- [26] 朱高立,王雪琪,李发志,等.秸秆覆盖对崩积体坡面产流产沙影响的模拟试验[J].土壤,2017,49(3):601-607.
- [27] 魏小燕,毕华兴,霍云梅.不同土壤坡面产流产沙特征对比分析[J].水土保持学报,2016,30(4):44-48.
- [28] 吴秋菊,吴佳,王林华,等.黄土区坡耕地土壤结皮对入渗的影响[J].土壤学报,2015,52(2):303-311.
- [29] Almeida W S, Seitz S, Oliveira L F C, et al. Duration and intensity of rainfall events with the same erosivity change sediment yield and runoff rates[J]. International Soil and Water Conservation Research, 2021, 9(1): 69-75.
- [30] Deng L Z, Zhang L P, Fan X J, et al. Effects of rainfall intensity and slope gradient on runoff and sediment yield from hill slopes with weathered granite[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2019, 26(31): 32559-32573.