

# 下垫面变化对喀斯特坡地地下产流产沙的影响

严友进<sup>1</sup>, 戴全厚<sup>1</sup>, 伏文兵<sup>1,2</sup>, 杨智<sup>1,3</sup>

(1. 贵州大学林学院, 贵阳 550025; 2. 贵州千山万水环保科技有限公司, 贵阳 550001;

3. 贵州晟泰工程咨询有限公司, 贵阳 550002)

**摘要:** 通过人工模拟降雨试验, 探索表土剥离对喀斯特坡耕地侵蚀产沙的影响。采用钢槽装填土石模拟喀斯特坡地的“二元结构”, 通过正交试验分析了下垫面类型(坡耕地、裸坡地)、雨强(0.5, 0.8, 1.3 mm/min)和地下孔(裂)隙度(1%, 2%, 3%, 4%, 5%)对坡地地下产流、产沙的影响。结果表明: 表土剥离导致下垫面土壤物理性质改变, 是影响坡地产流、产沙特征变化的主要因素。降雨强度主要影响坡地地下产流量和产沙量, 地下孔(裂)隙度主要影响径流和泥沙在地表和地下的分配比例。表土剥离后表层土壤的容重和土壤颗粒分形维数呈显著性增大, 导致土壤透水性、孔隙大小等发生改变。相比之下, 在0.5 mm/min雨强下, 裸坡地的地下产流量、产流系数、产沙比重均大于坡耕地, 雨强增大至0.8, 1.3 mm/min后, 则是坡耕地大于裸坡地。同时, 随着降雨强度的增大, 坡耕地产流量和产沙量随雨强的变化顺序为0.5 mm/min雨强>0.8 mm/min雨强>1.3 mm/min雨强。而裸坡地的产流量大小随雨强的变化顺序为0.8 mm/min雨强>1.3 mm/min雨强>0.5 mm/min雨强, 产沙量大小随雨强的变化顺序为0.5 mm/min雨强>0.8 mm/min雨强>1.3 mm/min雨强。增大地下孔裂隙度能显著( $p<0.05$ )的增大两种坡地的地下产流、产沙的贡献量。地下孔裂隙度为1%~3%条件下, 2种坡地地下侵蚀产沙比重存在极显著差异( $p<0.01$ ), 随着地下孔(裂)隙度增大至4%和5%, 两者间的差异缩小。虽然裸坡地的地下侵蚀产沙量小于坡耕地的, 但是其地下产沙比重更大。在喀斯特地区进行开发建设时, 应注重地下漏失的防治工作。研究成果能够为喀斯特坡地土壤侵蚀研究和水土流失防治提供重要参考。

**关键词:** 喀斯特坡地; 表土剥离; 地下漏失; 产流产沙; 人工降雨

中图分类号:S157.1 文献标识码:A 文章编号:1009-2242(2018)01-0067-07

DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2018.01.011

## Influences of Underlying Surface Changes on Underground Runoff and Sediment Yield in Karst Slope Land

YAN Youjin<sup>1</sup>, DAI Quanhous<sup>1</sup>, FU Wengbing<sup>1,2</sup>, YANG Zhi<sup>1,3</sup>

(1. Forestry College of Guizhou University, Guiyang 550025; 2. Guizhou Qian Shan Wan Shui Environmental Protection Technology Co. Ltd., Guiyang 550001; 3. Guizhou Shengtai Engineering Consulting Co. Ltd., Guiyang 550002)

**Abstract:** The impacts of topsoil stripping on soil erosion and sediment yield and their characteristics were analyzed in karst slope by the simulated rainfall experiments. The “dualistic structure” of karst slope was simulated by a steel tank filled with soil and rock. An orthogonal test was conducted to study the characteristics of underground runoff yield and sediment yield in different underlying surface types (slope farmland, bare slope), different rainfall intensities (0.5, 0.8, 1.3 mm/min) and different degrees of underground hole (crack) (1%, 2%, 3%, 4%, 5%). The results showed that the changes of soil surface physical properties caused by topsoil stripping were the imperative affecting factors on the underground runoff and sediment yield variations. Underground runoff and sediment yield in slope farmland were mainly impacted by rainfall intensities, while the distribution ratios of runoff and sediment in the surface and underground were mainly influenced by different degrees of underground hole (crack). Topsoil stripping resulted in a significant increase in soil bulk density and fractal dimension, which made the soil water permeability, pore size and other soil physical properties change. When the rainfall intensity was 0.5mm/min, the underground runoff

收稿日期: 2017-07-21

资助项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0502604); 国家自然科学基金项目(41671275, 41461057); 贵州省重大专项(黔科合重大专项字[2016]3022号); 贵州省应用基础重大专项(黔科合JZ字[2014]2002)

第一作者: 严友进(1990—), 男, 博士研究生, 主要从事土壤侵蚀研究。E-mail: gs\_yanyj16@gzu.edu.cn

通信作者: 戴全厚(1969—), 男, 博士, 教授, 主要从事水土保持与生态恢复重建研究。E-mail: qhdairiver@163.com

yield, runoff coefficient and sediment proportion in the bare slope were greater than those in the slope land, but when the rain intensity increased to 0.8 and 1.3 mm/min, the results were just reverse, the corresponding values in slope land were greater than the bare slope. The runoff and sediment yields in slope land with different rainfall intensities were  $0.5 > 0.8 > 1.3$  mm/min. However, the runoff yields in bare slope were  $0.8 > 1.3 > 0.5$  mm/min, and the sediment yields were  $0.5 > 0.8 > 1.3$  mm/min. The increased degree of underground pore fissure had a significantly ( $p < 0.05$ ) effect on increasing contribution of runoff and sediment yield of slope. Under the degree of underground hole (crack) of 1%~3%, there was a significantly difference ( $p < 0.01$ ) between the underground erosion proportions in two slopes, but the difference diminished gradually with the degree of underground hole (crack) increasing to 4% and 5%. It was worth noting that, although the amount of underground sediment yield of the bare slope was less than that of the slope land, the proportion of underground sediment yield of the bare slope was greater. It should be paid more attention to control the underground leakage where farmland was employed to development and construction in karst area. The results could provide great assistance and reference for further research and controlling water and soil erosion in the Karst region.

**Keywords:** karst slope; topsoil stripping; underground loss; runoff and sediment yield; artificial rainfall

喀斯特地区特殊的地表—地下二元水土流失方式是导致石漠化发生、发展的主要原因,严重的石漠化问题破坏了喀斯特地区生态环境安全,对人们的生活、生产均造成严重的影响<sup>[1]</sup>。影响水土流失的因素有很多,诸如降雨、下垫面、地形等,其中降雨是诱发水土流失的主要驱动力,而改变下垫面(土壤、植被等)可能会促进水土流失的发生或增强水土保持效益<sup>[2-3]</sup>。“十二五”以来,城镇化和工业园区建设成为西南喀斯特地区的一大热点。在缺乏平原支撑的喀斯特地区,“向山要地,建设工业梯田”成为该地区的场地建设的一大特色。这使得大量的坡耕地或林地被占用。表土剥离是开发建设过程中对表土资源重复利用的一个重要环节,在场地建设前,通常会先将表土资源剥离后集中堆放用于后期场地绿化、土地复垦等<sup>[4]</sup>。不断增加的开发建设项目导致大面积的坡耕地、林地等坡地的表土层被剥离,余下心土层处于裸露状态。由于园区场地建设时,通常会将场地硬化或覆土绿化放在最后。这使得表土剥离后的地表长期处于裸露状态,极易受降雨驱动发生水土流失。

喀斯特地区下伏基岩以碳酸盐岩为主,其在地质或强烈的溶蚀作用下,形成了由落水洞、地下暗河及在表层岩溶带溶蚀形成的各种形态的裂隙组成的地下岩溶管道<sup>[5-7]</sup>。地下岩溶管道的存在使得堆积在地下孔隙中的土壤体在降雨条件下或含水量较高时呈可塑、软塑甚至流塑状态向下漏失<sup>[8-9]</sup>。地下漏失的存在不仅是石漠化发生、发展的主要原因,亦可能导致岩溶塌陷的发生<sup>[10]</sup>。由于地下漏失的复杂性和隐蔽性,使得该地区开展水土流失研究和水土保持工作都难于常态地貌,这也导致了地下漏失在以往的研究工作中被忽视。

目前,关于喀斯特地下土壤侵蚀的研究相对较少。王恒松等<sup>[11]</sup>简要地总结了地下水土流失的特点、机理和影响因素;周念清等<sup>[12]</sup>在对普定县的地形特征、岩性特点和水文条件调查的基础上,综合分析了喀斯特地区水土流失的作用机理;唐益群等<sup>[9]</sup>以普定县陈旗小流域为研究对象,研究得出喀斯特地区特殊的地质环境是导致土壤地下漏失的主要因素之一。当前关于喀斯特地下漏失的研究中,从坡地尺度综合研究地表、地下侵蚀产流产沙的研究是十分有效的研究手段<sup>[6,13-15]</sup>。由于喀斯特工业园区是在近几年才开始集中建设,关于表土剥离后坡地产流产沙特征的研究尚未引起广大研究者的关注,使得该部分的研究十分稀缺。

基于此,本研究在野外调查及查阅相关文献的基础上,利用试验钢槽模拟喀斯特地表地下二元结构,通过室内人工模拟降雨开展对比研究,探索坡耕地表土剥离前和剥离后的坡地地下产流产沙的特征,为喀斯特地区水土流失防治和石漠化治理提供重要的理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

1.1.1 试验土样 本研究采集喀斯特地区主要土壤类型之一的石灰土为供试土样。土壤采集于贵州省花溪区洛平村的坡耕地土壤( $26^{\circ}24'41''$  N,  $106^{\circ}39'53''$  E)。根据试验设计分别采集坡耕地表土层(A层)和心土层(B层)的土壤。试验土样处理方法为:在室内自然风干后剔除土壤中的石砾和根系等杂质,再用木棍将土碎化处理,放置在阴处备用,试验不将土样过筛。供试土样的理化特征如表1所示。

表1 供试土样物理性质

土样 类型	容重/ (g·cm <sup>-3</sup> )	2~0.02 mm	粒径组成/% 0.02~0.002 mm	<0.002 mm	分形维数
表土层	1.09	33.02	15.74	51.24	2.66
心土层	1.25	26.78	15.61	57.61	2.73

1.1.2 试验设备 本研究主要的试验设备为降雨器和试验钢槽。降雨器采用西安清远测控技术有限公司生产的 QYJY-501 型便携式全自动下人工模拟降雨器,由悬挂式喷头、雨量计、水泵及控制器组成。降雨高度 6 m,有效降雨面积为 6.5 m×6.5 m,均匀度>85%,调节精度为 7 mm/min,调节变化时间<30 s。试验钢槽为自主设计的变坡钢槽<sup>[16]</sup>(专利编号 CN:10198886A),规格为长 4.0 m×宽 1.5 m×深 0.35 m;坡度调节范围 0°~45°;钢槽底部由两块均匀分布有 192 个圆孔(直径 5 cm)的钢板组成,通过调节两底板间孔洞重合面积模拟地下孔(裂)隙度大小。

## 1.2 试验设计

试验在钢槽中回填土样并在土样中埋置石灰岩,进行模拟喀斯特坡地地上、地下“二元结构”,采用室内人工模拟降雨方法,探讨降雨条件下坡耕地在剥离表土前后的坡地地下产流、产沙特征。根据 2015 年 5 月至 2016 年 7 月对贵州省贵阳市(花溪区)、遵义市(播州区)、六盘水市(水城县、六枝特区)和毕节市(威宁县、黔西县)共 160 个坡耕地和工业园区的调查结果,试验设置坡面岩石裸露率为 10%,坡度为 25°,地下孔(裂)隙度设置 5 个水平(1%,2%,3%,4%,5%)。根据气象统计资料显示贵州省降雨强度主要在 1.6 mm/min 以下,同时根据课题组前期的研究成果<sup>[14]</sup>,试验雨强设置 3 个水平(0.5,0.8,1.3 mm/min),设置 2 种下垫面(未剥离表土的坡耕地和剥离表土后的裸坡地),进行交叉试验,每个处理重复 3 次,共计 90 场降雨,降雨历时 90 min。

## 1.3 试验方法

1.3.1 坡地“二元结构”模拟 坡地“二元结构”主要的模拟步骤为先调节地下孔(裂)隙度至设计水平,然后在钢槽内随机排列直径≥30 cm 的石灰岩块石,再把供试土样充填在岩石和钢槽的空隙中,最后将钢槽坡度调至设计水平。地下孔(裂)隙度为单位投影面积内地下孔(裂)隙面积的百分比,调节地下孔(裂)隙度的方法为通过调节钢槽底部两个底板间圆孔的重合面积占底板面积(6 m<sup>2</sup>)的百分比进行模拟,其中底板间孔洞完全错开时地下孔(裂)隙度为 0%。岩石裸露率为单位投影面积内岩石出露地表面积的百分比,先将石灰岩石随机排列在钢槽内,然后用数码相机垂直拍摄坡面照片并利用 ArcGis 校核坡面岩石裸露率<sup>[14]</sup>。

1.3.2 下垫面模拟 试验通过在钢槽内回填野外采集的不同土层土样进行模拟坡耕地与裸坡地,其中模

拟坡耕地的供试土样为表土层(A 层)土壤,裸坡地的供试土样为心土层(B 层)土壤。根据野外测定的两种土层土壤容重(表 1)回填土壤,土层厚度均为 30 cm。为减小土壤与钢槽、岩石的接触面的边际作用,用手指压实各接触面的土壤。

1.3.3 降雨步骤 本试验在降雨计时前将钢槽调为水平,然后进行小雨(雨强 0.25 mm/min)沉降,使土壤水饱和,待地下孔(裂)隙产流稳定后停止降雨,滴干重力水。再将钢槽坡度调至设计水平,用设计的雨强进行降雨试验。每场降雨历时为 90 min,以 10 min 为 1 个测定期,每个测定期(10 min)内的径流总量是用多个塑料瓶(容积 500 mL)收集汇总后得到的数据,再用定量滤纸(孔径 12.5 μm)过滤出各个塑料瓶水样中的泥沙,并将泥沙转移至烧杯中,放在 105 °C 的烘箱烘至恒重,用天平(0.01 g)称量,试验测定每个时段的径流量和产沙量,每场降雨的径流总量和产沙总量为各时段的总和。

## 1.4 数据处理

$$\text{产流系数} = \frac{\text{地表或地下径流量}}{(\text{地表径流量} + \text{壤中流径流量} + \text{地下径流量})} \times 100\%$$

$$\text{产沙比重} = \frac{\text{地表或地下产沙量}}{(\text{地表产沙量} + \text{地下产沙量})} \times 100\%$$

试验数据用 SPSS 19.0 统计分析软件和 Excel 软件进行统计分析,分析方法采用方差分析(ANOVA),各处理间采用最小显著差数法进行两两比较,差异显著水平为  $p < 0.05$ 。

## 2 结果与分析

### 2.1 下垫面及降雨强度变化对地下产流、产沙的影响

降雨与下垫面是影响坡地产流产沙的 2 个主要因素。降雨是坡面土壤侵蚀的主要驱动力,主要通过降雨侵蚀力及径流量影响坡面侵蚀产沙过程,降雨强度是降雨主要表征因子之一,对坡面径流流速、径流侵蚀力及雨滴击溅有一定的影响<sup>[17-18]</sup>。在相同的降雨条件下,下垫面对坡地产流产沙至关重要,下垫面中不同的地形、土壤类型等因素必定会对坡地土壤入渗、坡面产流等产生明显的差异<sup>[19]</sup>。

2.1.1 下垫面及降雨强度变化对坡地地下产流的影响 表土剥离后的裸露在地表土壤的物理性质发生变化,与表土层相比心土层土壤的容重和分形维数均增大,可见心土层土壤的透水性比表土层土壤的透水性要弱。从表 2 可以看到,未剥离表土的坡耕地的

地下径流量随降雨强度增大而增大,与 0.5 mm/min 降雨强度下的径流量相比,0.8 mm/min 的增大了 65.35%,1.3 mm/min 的增大了 106.87%;而地下产流系数则随降雨强度呈反比的关系,随降雨强度的变化顺序均为 0.5 mm/min>0.8 mm/min>1.3 mm/min。3 个降雨强度下的坡耕地地下产流系数均大于 50%,为 53.07%~68.41%,其大小随降雨强度呈反比的关系。随降雨强度的增大,剥离表土后仅余心土层的裸坡地的地下径流量呈增大后减小的变化趋势,与 0.5 mm/min 降雨强度下地下径流量相比,0.8 mm/min 的增大了 23.87%,1.3 mm/min 的减小了 14.57%,随降雨强度的大小顺序为 1.3 mm/min<0.5 mm/min<0.8 mm/min。

比较坡耕地与裸坡地地下产流系数随降雨强度变化特征可见,各降雨强度下坡耕地地下产流随降雨强度增大产流系数有所降低,但是地下产流仍是坡地径流主要的流失方式。小雨强(0.5 mm/min)下裸坡地的地下产流系数明显大于坡耕地的地下产流系数,而随着降雨强度的增大,其比重显著小于坡耕地的地下产流系数。随降雨强度的增大,裸坡地的地下产流系数呈显著性( $p<0.05$ )的减小,降雨强度增大至 1.3 mm/min 时,坡地径流在空间上的分配规律由地下产流为主(>56%)转变为地表产流为主(>75%)。

**2.1.2 下垫面及降雨强度变化对坡地地下产沙的影响** 分析下垫面变化随降雨强度变化差异可见(图 1),3 个降雨强度下,坡耕地的地下侵蚀产沙量均显著( $p<0.05$ )大于裸坡地的地下流失量。随着降雨

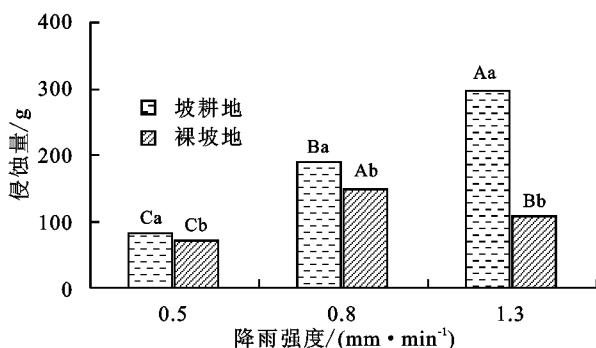
强度的增大,坡耕地与裸坡地间的地下侵蚀产沙量差异从 1.1 倍增大至 3.7 倍。坡耕地的地下产沙量随降雨强度的增大而增大,而裸坡地地下流失量随降雨强度的增大呈先增大后减小的变化趋势,其大小顺序为 0.8 mm/min>1.3 mm/min>0.5 mm/min。

表 2 不同土地利用类型坡地地下产流特征随降雨强度变化特征(地下孔(裂)隙度=5%)

类型	指标	0.5	0.8	1.3
		mm·min <sup>-1</sup>	mm·min <sup>-1</sup>	mm·min <sup>-1</sup>
坡耕地	径流量/L	167.43Bc	276.82Ab	346.31Aa
	径流系数/%	68.41Ba	67.87Aa	53.07Ab
裸坡地	径流量/L	187.41Ab	231.92Ba	160.11Bc
	径流系数/%	76.56Aa	56.86Bb	24.53Bc

注:大写字母表示土地类型间存在显著性差异( $p<0.05$ );小写字母表示降雨强度间存在显著性差异( $p<0.05$ )。

由图 1 可知,0.5,0.8 mm/min 降雨强度下,坡耕地和裸坡地的坡地水土流失均以地下流失为主,其中坡耕地的地下侵蚀比重分别为 65.8%,72.1%,裸坡地的地下侵蚀比重分别为 84.1%,78.3%。同时,裸坡地的地下产沙比重大于坡耕地的地下产沙比重。降雨强度增大至 1.3 mm/min 时,坡耕地的坡地水土流失仍以地下流失为主(65.4%),而裸坡地的地下流失量则降至 29% 左右,坡地侵蚀产沙以地表为主。结果表明,同一降雨条件下,坡耕地的泥沙更容易受降雨作用发生流失;同时,雨强 $\leq 0.8$  mm/min 条件下,裸坡地侵蚀产沙以地下漏失为主。坡耕地比裸坡地更容易在降雨驱动下发生水土流失,而小雨强(0.5 mm/min)和中雨强(0.8 mm/min)条件下,裸坡地的地下产沙比重更大。



注:小写字母表示各降雨强度间存在显著性差( $p<0.05$ );大写字母表示下垫面类型间存在显著性差异( $p<0.05$ )。

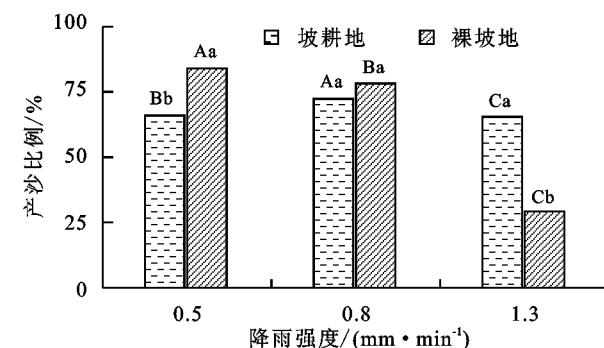
图 1 不同类型下垫面地下侵蚀产沙随降雨强度的变化特征(地下孔(裂)隙度=5%)

## 2.2 下垫面及地下孔(裂)隙变化对地下产流、产沙的影响

**2.2.1 下垫面及地下孔(裂)隙变化对地下产流的影响** 分析各下垫面地下产流随地下孔(裂)隙度变化特征可见(图 2),地下孔(裂)隙度增大有利于促进降雨以地下径流形式流失,增大地下孔(裂)隙度能够显著( $p<0.05$ )的增加地下径流量,坡耕地与裸坡地的径流量、产流系数均随地下孔(裂)隙度的增大而增加。不同下垫面间地下产流随地下孔(裂)隙度的变

化亦存在显著性( $p<0.05$ )差异。通过对地下径流量、径流系数随地下孔(裂)隙度增大的趋势分析,坡耕地的地下径流量增加速率为 21.6,地下径流系数的增加速率为 4.7,而裸坡地的地下径流量增加速率为 8.6,地下径流系数的增加速率为 1.9。

**2.2.2 下垫面及地下孔(裂)隙变化对地下产沙的影响** 地下孔(裂)隙是喀斯特坡地发生地下漏失的主要通道,增大地下孔(裂)隙度能够为径流和泥沙向下运移提供了更多的通道。由地下孔(裂)隙度变化对



坡地地下侵蚀产沙的影响特征(图3)可见,各地下孔(裂)隙度下的地下产沙量、产沙比重存在显著性差异,坡耕地和裸坡地的地下产沙量、产沙比重均随地下孔(裂)隙度的增大呈增加的变化趋势。各地下孔(裂)隙度条件下的坡耕地地下产沙量均比裸坡地的大,但是,与坡耕地相比裸坡地的地下产沙比重更大,尤其是地下孔(裂)隙度为1%,2%,3%条件下,二者间的产沙比重存在极显著差异,坡耕地坡地侵蚀产沙以地表流失为主,而裸坡地的坡地侵蚀产沙以地下流失为主。随着地下孔(裂)隙度增大至4%,5%,坡耕地相比裸坡地的地下产沙比重差异缩小,同时坡耕地和裸坡地的坡地侵蚀产沙的主要途径均为地下孔(裂)隙。结果表明,坡耕地在降雨侵蚀过程中能够产生更多的水土流失量,但是在地下孔(裂)隙度较小( $\leq 3\%$ )的坡地,地表流失是坡地主要的水土流失方式。裸坡地的地下水土流失量虽然较小,但是,裸坡地的地下流失比重更大。

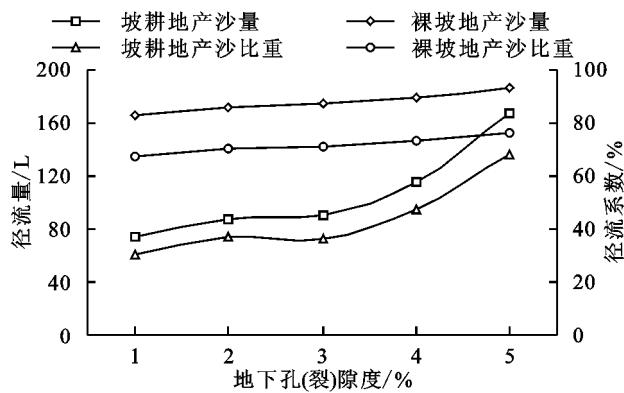


图2 各地下孔(裂)隙度条件下的地下产流系数随降雨历时的变化特征(雨强0.5 mm/min)

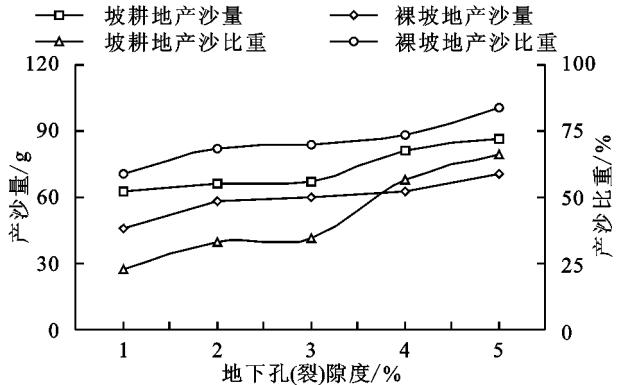


图3 地下孔(裂)隙度变化对坡地地下侵蚀产沙的影响特征

输沙模数能够反映单位时间内泥沙流失速率的大小。分析坡耕地和裸坡地地下输沙模数随地下孔(裂)隙度的变化特征(图4)可知,地下输沙模数随地下孔(裂)隙度的增大而增大,地下孔(裂)隙度越大,单位时间内由地下孔(裂)隙流失的泥沙量就越多。地下输沙模数随降雨历时的变化特征可见,随着降雨历时的延长,地下输沙模数总体上呈减小的变化趋

势。同时,坡耕地和裸坡地的地下输沙模数总体上均非常小,均小于 $4 \times 10^{-2} \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{min})$ 。从下垫面类型上看,单位时间内坡耕地的地下流失量更大。将坡耕地、裸坡地的地下输沙模数与地下孔(裂)隙度分别进行偏相关分析得到,坡耕地、裸坡地的地下输沙模数与地下孔(裂)隙度均呈极显著( $p < 0.01$ )正相关关系,相关系数分别为0.796,0.924。

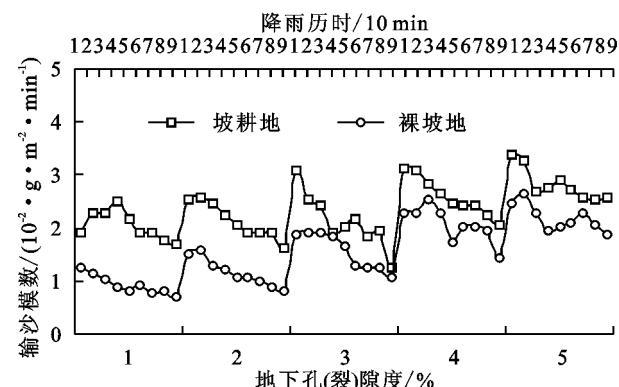


图4 地下输沙模数随地下孔(裂)隙度和降雨历时变化的特征

### 2.3 不同下垫面的地下产流、产沙影响因素分析

影响坡地发生水土流失的因素有很多,诸如降雨强度、下垫面类型等均是影响坡地产流产沙的主要因素。降雨是坡地发生水土流失的主要驱动因子,泥沙在降水转化的径流作用下发生剥离、搬运和沉积作用,发生水土流失<sup>[20-21]</sup>。同时,由于喀斯特坡地因其独特的地下岩溶管道系统,使得地下孔(裂)隙度成为影响该地区水土流失的重要因素之一<sup>[22]</sup>。

在此,本文选取了降雨强度、地下孔(裂)隙度和径流量与坡地地下产流、产沙进行偏相关分析。结果表明(表3),降雨强度是坡地地下产流量和产沙量的主要影响因素,地下孔(裂)隙度主要影响径流和泥沙在地表和地下的分配比例。降雨强度对坡耕地的地下产流量( $p < 0.01, r = 0.937$ )和产沙量( $p < 0.01, r = 0.925$ )均有极显著的正相关关系,其对坡耕地的地下径流系数呈显著的负相关关系( $p < 0.05, r = -0.318$ ),对地下产沙比重无显著性影响( $p > 0.05$ )。通过降雨强度与裸坡地地下产流、产沙的偏相关分析可见,降雨强度与地下产流量( $p < 0.01, r = -0.594$ )、产沙比重( $p < 0.05, r = -0.939$ )均呈极显著性的负相关关系,与地下产流系数( $p < 0.05, r = -0.998$ )、产沙量( $p < 0.05, r = -0.337$ )呈显著性负相关关系。地下孔(裂)隙度对坡耕地地下产流、产沙的量和比重均呈极显著的正相关关系( $p < 0.01$ )。

同时,表3反映出,坡耕地和裸坡地的降雨强度和地下孔(裂)隙度与径流量的相关系数均比二者与地下产沙量偏相关系数大,可见,降雨强度和地下孔

(裂)隙度是通过影响径流量进而影响地下产沙量的。从 2 种坡地地下径流量与地下产沙量、产沙比重的相

关性可见,2 种坡地的地下径流量对地下产沙量、产沙比重均存在显著的正相关关系( $p<0.05$ )。

表 3 不同土地类型的地下产流、产沙与各影响因子的相关性

指标	坡耕地			裸坡地		
	降雨强度	孔隙度	径流量	降雨强度	孔隙度	径流量
径流量	0.937 **	0.835 **		-0.594 **	0.351 *	
径流系数	-0.318 *	0.918 **	-0.362 *	-0.998 *	0.867 **	-0.636 **
侵蚀量	0.925 **	0.809 **	0.714 **	-0.337 *	0.374 *	0.996 **
产沙比重	-0.164	0.948 **	0.368 *	-0.939 **	0.570 **	0.941 **

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

### 3 讨 论

喀斯特石灰土坡地表土层剥蚀后,土壤结构受到破坏,土壤质地和土壤孔隙性变差,直接影响土壤的水分的运输<sup>[23-24]</sup>。本研究通过测定、分析用于模拟坡耕地和裸坡地土壤的容重、分形维数发现,坡耕地的土壤容重(1.09 g/cm<sup>3</sup>)和分形维数(2.66)均明显的小于裸坡地的土壤容重(1.25 g/cm<sup>3</sup>)和分形维数(2.73),这与前人的研究结果存在一致性。土壤颗粒分形维数影响着土壤水分的运动过程、土壤肥力状况及土壤侵蚀特征等<sup>[25-27]</sup>。同时,土壤颗粒分形维数与土壤吸持蓄水量有显著性的正相关关系,土壤颗粒分形维数越大土壤透水性就越差<sup>[28]</sup>。由此可见,喀斯特坡耕地表土层剥离后余下土壤变得紧实,其土壤孔隙性变差,导致了土壤渗透性变差、供给土壤颗粒向下运移的通道减少。本研究中 0.5 mm/min 的雨强中坡耕地的地下径流量和径流系数均小于表土剥离后仅余心土层的裸坡地,而雨强增大至 0.8, 1.3 mm/min 时,坡耕地的地下径流量和径流系数均显著性( $p>0.05$ )的大于裸坡地。其原因主要是由于喀斯特坡地地表产流方式主要为蓄满产流,当土壤入渗率小于地表产流速率的时候才会转变为超渗产流<sup>[6,29]</sup>。坡耕地表层土壤孔隙性较好,土壤的蓄水持水能力较强,在试验雨强的降雨过程中径流先填充土壤孔隙后才由地下孔(裂)隙向下流失,坡地产流方式为蓄满产流。而表土剥离后的裸坡地表层土壤蓄水能力较差,在小雨强条件下降雨入渗土壤后无需填充过多的土壤孔隙,直接由地下孔(裂)隙向下流失,当雨强增大到一定大小后,土壤入渗率小于地表径流产生的速率,使得坡地产流方式由蓄满产流转变为超渗产流。此外,喀斯特地区碳酸盐岩发育的土壤缺少风化母质的过渡层(C 层),土壤与岩石之间的亲和力和黏着力差,该界面易成为径流下渗流失的通道<sup>[30-31]</sup>。表土剥离后裸露心土层与岩石的接触面直接受到径流冲刷作用,成为径流作用下渗流失的通道。因此,在小雨强(0.5 mm/min)降雨过程中,表土剥离后的裸坡地的径流更容易从地下流失,而 0.8, 1.3 mm/

min 雨强下,坡耕地的地下径流量和径流系数均显著性( $p>0.05$ )的大于裸坡地。

龙健等<sup>[30]</sup>分析贵州 5 个市县石漠化区不同深度土壤颗粒分布特征得到,喀斯特坡地土层呈上松下紧的特征,上层土壤粒级以易受侵蚀粉砂粒居多,下层土壤以黏粒居多,垂直方向上形成土壤物理性状不同的界面。本研究中表土层的砂粒(0.02~2 mm)和粉粒(0.02~0.002 mm)均比心土层的高,而心土层的黏粒含量比表土层的高,这与龙健等<sup>[30]</sup>研究结果一致。降雨击溅、分散地表土壤产生的土壤颗粒是泥沙流失的来源,研究表明砂粒或黏粒均不易被溅蚀<sup>[31-32]</sup>,疏松的表层土壤能够为泥沙溅蚀和运移提供更多的物质来源<sup>[33]</sup>。这也就导致了本研究中坡耕地的地下侵蚀产沙量均显著高于裸坡地的地下侵蚀产沙量,同时,研究得到坡耕地的地下产沙量随降雨强度的增大而增大,而裸坡地地下流失量随降雨强度的增大呈先增大后减小的变化趋势。这主要是由于喀斯特坡耕地土壤粉砂粒的比重大于裸坡地的比重,在相同的雨强下坡耕地土壤颗粒更容易被溅蚀分散,为泥沙的向下运移提供物质来源。其次,雨强的增大使得单位时间内地表溅蚀产生的土壤颗粒增多,坡耕地土壤良好的孔隙性,为径流泥沙的向下运移提供更多通道,地表溅蚀产生的土壤颗粒大部分能够及时的通过土壤孔隙向下运移,而土壤孔隙性较差的裸坡地在降雨过程中产生的土壤颗粒来不及向下运移而堵塞土壤孔隙,使得溅蚀产生的土壤颗粒主要随地表径流发生流失。同时,径流为泥沙运移的提供载体和驱动力,由于裸坡地的渗透速率小于地表径流产生速率,导致多数土壤颗粒受到地表径流的挟裹发生地表流失,这也削弱了地下漏失的物质来源。

地下孔(裂)隙的存在是喀斯特坡地水土流失异于常态地貌的主要原因,其在单位投影面积上的比例对地下产流、产沙有显著的正相关作用<sup>[34-35]</sup>。本研究中,地下孔(裂)隙度增大均能显著的促进坡耕地和裸坡地的地下产流、产沙,增大地下漏失占坡地水土流失的比重。但是在土壤物理性质、降雨强度等因素的耦合作用下,地下孔(裂)隙度对坡耕地地下漏失的影

响主要体现在地下漏失量的增加,而对裸坡地的影响更明显的表现为地下漏失比例加重。本研究结果能够为喀斯特地区坡地开展石漠化治理和水土流失防治提供重要参考。

## 4 结论

(1) 表土剥离后心土层土壤的物理性质改变是导致坡地地下产流、产沙特征变化的主要原因。表土剥离后余下心土层的容重和土壤颗粒分形维数比坡耕地表土层的大。降雨强度主要影响坡地地下产流量和产沙量,而地下孔(裂)隙度则主要影响径流和泥沙在地表和地下的分配比例。

(2) 除了 0.5 mm/min 雨强下,裸坡地的地下产流量比坡耕地的大,0.8,1.3 mm/min 雨强下,坡耕地的地下产流量均显著性的高于裸坡地。在 3 个降雨强度下,坡耕地的地下产流系数均比裸坡地的大,坡耕地地下径流系数随降雨强度增大而增大,且坡地径流主要以地下流失为主,地下径流系数为 53%~65%;裸坡地的地下径流量和径流系数总体上随降雨强度呈增大后减小的变化趋势,0.5,0.8 mm/min 雨强下坡地径流以地下流失为主,当雨强增大至 1.3 mm/min 时,地下径流系数仅为 24.53%,坡地径流主要发生在地表。

(3) 试验降雨强度下,坡耕地的地下产沙量均高于裸坡地的。随着降雨强度的增大,坡耕地地下侵蚀产沙量呈增加的变化趋势,产沙比重则呈相反的变化趋势;裸坡地地下产沙量随降雨强度的增大呈先增大后减小的变化趋势,地下产沙比重则随降雨强度的增大持续减小。在 0.5,0.8 mm/min 雨强下,坡耕地和裸坡地的侵蚀产沙均以地下侵蚀产沙为主,其中坡耕地的地下侵蚀比重分别为 65.8%,72.1%,裸坡地的地下侵蚀比重分别为 84.14%,78.29%。雨强增大至 1.3 mm/min,坡耕地的坡地水土流失仍以地下流失为主(65.4%),而裸坡地的地下流失量则降至 29% 左右,坡地侵蚀产沙以地表为主。

(4) 地下孔(裂)隙度增大能够显著的促进坡耕地和裸坡地的地下漏失的发生,但是增大地下孔(裂)隙度对两种坡地的增益效果不同。0.5 mm/min 雨强下,坡耕地的地下径流量增加速率为 21.6,地下径流系数的增加速率为 4.7,而裸坡地的地下径流量增加速率为 8.6,地下径流系数的增加速率为 1.9。地下孔(裂)隙度在 1%~3% 条件下,两种坡地地下侵蚀产沙比重存在极显著( $p < 0.01$ )差异,随着地下孔(裂)隙度增大至 4%,5%,两者间的差异缩小。值得注意的是,虽然与坡耕地相比裸坡地的地下侵蚀产沙量较小,但是裸坡地的地下侵蚀产沙比重更大。鉴于本研究结果,建议西南喀斯特地下岩溶管道系统发育

的地区,开发建设项目开展水土流失防治工作时,应特别注意地下漏失的防治,以避免由地下漏失引发的诸如岩溶塌陷等次生危害。

### 参考文献:

- [1] Xu E, Zhang H, Li M. Mining spatial information to investigate the evolution of karst rocky desertification and its human driving forces in Changshun China[J]. Science of the Total Environment, 2013, 458/460(3): 419~426.
- [2] Chirino E, Bonet A, Bellot J, et al. Effects of 30-year-old Aleppo pine plantations on runoff, soil erosion, and plant diversity in a semi-arid landscape in south eastern Spain [J]. Catena, 2006, 65(1): 19~29.
- [3] Ludwig B, Boiffin J, Joë, et al. Hydrological structure and erosion damage caused by concentrated flow in cultivated catchments [J]. Catena, 1995, 25(1/4): 227~252.
- [4] 谭永忠, 韩春丽, 吴次芳, 等. 国外剥离表土种植利用模式及对中国的启示 [J]. 农业工程学报, 2013, 29(23): 194~201.
- [5] Williams P W. The role of the epikarst in karst and cave hydrogeology: A review [J]. International Journal of Speleology, 2008, 37(1): 1~10.
- [6] 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.
- [7] Katsanou K, Lambrakis N, Tayfur G, et al. Describing the karst evolution by the exploitation of hydrologic time-series data. [J] Water Resources Management, 2015, 29(9): 3131~3147.
- [8] 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.
- [9] 唐益群, 张晓晖, 周洁, 等. 喀斯特石漠化地区土壤地下漏失的机理研究:以贵州普定县陈旗小流域为例 [J]. 中国岩溶, 2010, 29(2): 121~127.
- [10] 石树静, 张勤军, 康志强. 南宁市坛洛镇岩溶塌陷群成因机制分析 [J]. 中国岩溶, 2015, 34(5): 507~514.
- [11] 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.
- [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] 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.
- [14] 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.
- [15] 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.