

# 土壤大孔隙形态对喀斯特区水土漏失过程的影响

周春衡<sup>1,2,3</sup>, 陈洪松<sup>1,2</sup>, 付智勇<sup>1,2</sup>, 任惠敏<sup>1,2,3</sup>, 兰秀<sup>1,2,4</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.中国科学院大学,北京 100049;4.广西大学农学院,南宁 530005)

**摘要:**在岩溶作用下,喀斯特土壤—表层岩溶带耦合发育,上覆土壤中大孔隙与下伏表层岩溶带中裂隙、管道存在密切的水力联系,然而土壤大孔隙影响土壤—表层岩溶带系统中水土漏失的过程机理尚不清楚。通过人工模拟降雨试验,采用试验微区模拟不同土壤大孔隙形态(出露型、浅埋型、深埋型),并以全土微区为对照,探讨了土壤大孔隙对喀斯特地区水土漏失过程的影响。结果表明:与全土微区相比,土壤大孔隙的存在明显加速了水分的垂直渗漏,其对水分渗漏量的影响表现在峰值不同(出露型>浅埋型>深埋型>全土)。土壤大孔隙也给土壤漏失带来风险性,不同形态土壤大孔隙间土壤漏失存在显著差异,表现为出露型>浅埋型>深埋型>全土。本研究中土壤漏失量总体较少(<10 g),土壤强烈漏失现象只在极端状况下发生(雨强为120 mm/h的出露型土壤大孔隙微区)。漏失泥沙主要以粒径<2 mm的小颗粒为主,>5 mm的大颗粒仅出现在出露型土壤大孔隙微区。土壤漏失因子(土壤漏失量、漏失土壤细颗粒含量)与水分渗漏因子(水分垂直渗漏出流时间、水分渗漏量)存在显著相关关系,说明土壤漏失主要受到水文过程的驱动。土壤大孔隙形态和降雨强度控制了水分渗漏过程,进而影响到土壤漏失过程。研究结果可为该区石漠化治理和地下水污染防控提供科技支撑。

**关键词:**土壤大孔隙;模拟降雨;土壤漏失;泥沙粒径;喀斯特生态系统

**中图分类号:**S157.1      **文献标识码:**A      **文章编号:**1009-2242(2020)06-0070-07

**DOI:**10.13870/j.cnki.stbcxb.2020.06.011

## Effect of Soil Macropore Structures on Soil and Water Loss Progress in Karst Areas

ZHOU Chunheng<sup>1,2,3</sup>, CHEN Hongsong<sup>1,2</sup>, FU Zhiyong<sup>1,2</sup>, REN Huimin<sup>1,2,3</sup>, LAN Xiu<sup>1,2,4</sup>

(1. Key Laboratory of Agro-ecological Processes in Subtropical Region, Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125; 2. Huanjiang Observation and Research Station of Karst Ecosystem, Chinese Academy of Sciences, Huanjiang, Guangxi 547100; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049; 4. Agricultural College, Guangxi University, Nanning 530005)

**Abstract:** Through simulated rainfall experiments, the experimental micro-plots were used to simulate different soil macropore structures (exposed type, shallow-buried type, and deep-buried type), and the totally soil filled micro-plots were used as a control to discuss the effects of soil macropore structure on karst soil and water loss processes. The results showed that: Compared with the totally soil filled micro-plots, the presence of soil macropore significantly accelerated the vertical water leakage, and different soil macropore structures had distinction runoff peaks (exposed > shallow-buried > deep-buried > totally soil filled). The soil macropores also exacerbated soil loss risk, and there were significant differences in soil loss between different soil macropore structure treatments (exposed > shallow-buried > deep-buried > totally soil filled). The soil loss amounts were relatively small (less than 10 g), and larger soil loss amounts only occurred under extreme conditions (exposed soil micropores with a rain intensity of 120 mm/h). Small-sized sediments less than 2 mm were dominated during soil loss processes for all treatments, and the sediments larger than 5 mm mostly occurred in the exposed soil macropore treatments. There were significant correlations between soil loss factors (soil loss amount and fine sediment content) and water leakage factors (water leakage initiation

time and water leakage amount). The water leakage process was mainly affected by rainfall intensity, and the soil loss process was mainly affected by the soil macropore structures. The results of this study can provide scientific and technological support for the prevention and control of rocky desertification and groundwater pollution in karst areas.

**Keywords:** soil macropore; simulated rain fall; soil leakage; sediment particle size; karst ecosystem

在喀斯特地区,土壤大孔隙是常见的一种岩溶作用产物,它的形成和发育与土层的性质、水的活动、岩溶的发育等因素有关。苏亚军<sup>[1]</sup>从基岩、覆盖土层、水文过程、环境因素4个方面分析了喀斯特土壤大孔隙发育的条件,其中地下水或地表水的活动是土壤大孔隙发育最重要最直接的影响因素。喀斯特地区土壤大孔隙的形成与该地区独特的岩溶环境分不开,喀斯特地区由于广泛的可溶性碳酸盐岩存在,使得该地区岩溶裂隙、管道普遍发育<sup>[2]</sup>,可溶性岩石上覆土层的土壤颗粒随水流沿岩溶裂隙流失造成土层中空,从而形成土壤大孔隙<sup>[3]</sup>,土壤大孔隙随着土壤颗粒的持续漏失会继续向上扩展,最终导致地表塌陷<sup>[4]</sup>。康彦仁<sup>[5]</sup>通过对全国800多个塌陷点的研究,提出岩溶塌陷的8种致塌模式。

喀斯特土壤大孔隙的形成发育经过潜蚀作用、崩解作用、真空吸蚀作用3个过程<sup>[6]</sup>,均与地下水文过程密切相关,地下水的活动促成土壤大孔隙的形成,同时土壤大孔隙的存在为地下径流的入渗提供了优先通道,使得土壤水绕过土壤基质,只通过部分土壤体而快速运移形成优先流<sup>[7]</sup>。这不仅会加剧喀斯特地区土壤漏失的风险性,也会降低该地区的土壤水利用效率,降雨快速入渗,只有少量的水保存在土壤—表层岩隙—森林生态系统中<sup>[8]</sup>,形成一种特殊的岩溶干旱环境<sup>[9]</sup>。目前,国内外对土壤大孔隙优先流的研究已取得部分成果<sup>[10-13]</sup>,但多针对地下水文过程研究,较少涉及土壤大孔隙对土壤漏失的影响,喀斯特土壤大孔隙是如何影响该区水土漏失过程?水分渗漏过程驱动土壤漏失的机制是怎样的?尚缺乏清楚地认识。

基于此,本研究针对喀斯特地区普遍存在的土壤大孔隙,通过微区模拟该区不同形态典型土壤大孔隙,实施人工模拟降雨试验,研究不同形态土壤大孔隙和不同降雨强度对喀斯特地区水土漏失过程及特征的影响,为喀斯特地区地下水土漏失的研究、水土保持治理以及该区生态建设与措施提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

1.1.1 试验土壤 本研究采集喀斯特地区典型土壤石灰土作为供试土壤,供试土壤采自广西壮族自治区环江毛南族自治县大才乡新坡村山脚(24°44'21"N, 108°20'24"E)发育于石灰岩之上0—100 cm深黄色

石灰土,土壤容重为1.1 g/cm<sup>3</sup>,土壤砂粒、粉粒和黏粒含量分别为22.63%,47.31%,30.06%。剔除土壤中石砾和植物根系等杂质,将土壤用直径为1 cm筛网过筛后放置在室内自然风干备用。

1.1.2 试验设备 本研究采用的试验设备主要为模拟降雨器和试验小区,模拟降雨器为自主设计的一种适宜高异质性喀斯特坡地的可升降便携式模拟降雨器<sup>[14]</sup>,由4个组合式喷嘴、供水系统和升降式支架组成,降雨高度8 m,有效降雨面积为18.62~20.18 m<sup>2</sup>,降雨均匀度>80%。试验小区为张伟等<sup>[15]</sup>发明的一种适用于喀斯特地区的土壤侵蚀与养分迁移模拟装置,由收纳池、水泥板和承重基槽3部分构成(图1),收纳池内部长、宽、高分别为200,200,120 cm,用于装填试验土壤。水泥板有3排直径为10 cm的PVC排水管,每排9个排水管,用以模拟喀斯特岩溶孔隙。承重基槽下有3个对应收纳池3排排水管的可抽拉不锈钢钢槽,用于收集收纳池渗漏的水分和土壤颗粒。

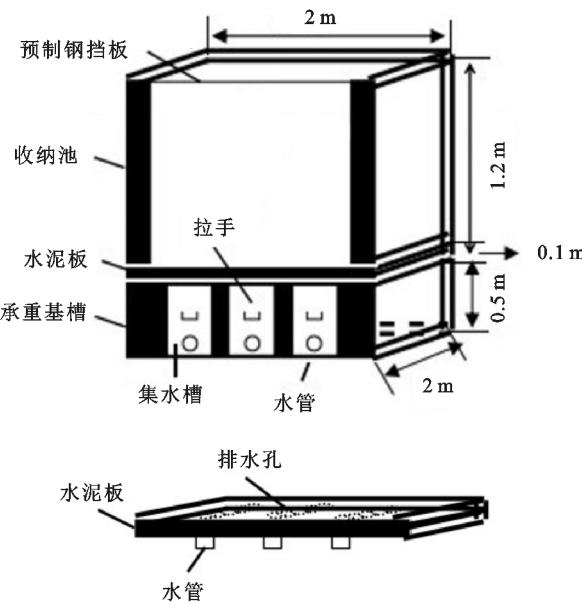


图1 试验小区设计示意

### 1.2 试验设计

将试验小区用红砖隔成9个面积相等(60 cm×60 cm)的微区,每个微区内有3个排水管,用环氧树脂做好防水处理。根据喀斯特地区土壤大孔隙形态,本研究以出露型土壤大孔隙(CL)、浅埋型土壤大孔隙(QM)和深埋型土壤大孔隙(SM)为研究对象,大孔隙孔径为5 cm,以全土(QT)作为对照(图2),每个处理2个重复,

试验结果为每个重复的平均值。供试土壤分 3 层进行填装(每层 20 cm),保证土壤容重为 1.1 g/cm<sup>3</sup>,填土时将土壤与收纳池接触界面压实并将每层土壤表面抓毛以减少边际效应。出露型土壤大孔隙通过填土时放置 PVC 管降雨试验前拔出的方法模拟,浅埋型和深埋型土壤大孔隙通过填土时放置内部塞满水溶棉的 PVC 管,填满该层土壤后拔出 PVC 管,后通过小雨沉降使填充的水溶棉溶解的方法模拟。模拟降雨开始前先降小雨(10 mm/h)进行沉降,使填充土壤紧实度接近野外实测水平,待土壤水分达到饱和状态后,滴干重力水,使土壤含水量达到田间持水量水平,保持土壤前期含水率一致。

野外模拟降雨试验于 2019 年 8—9 月进行,根据当地多年降雨特征,设计降雨强度分别为 30,60,120 mm/h 的低、中、高等雨强。降雨量为 120 mm,对应降雨历时分别为 4,2,1 h,每个处理重复 2 次,共计 24 场降雨。集水槽出水口放置纱网,防止土壤颗粒随径流流出,用 100 mL 自计式翻斗流量计测量渗漏水分流量,出水口出流时记为初始产流时间。降雨结束后用水桶收集集水槽内土壤颗粒,用直径分别为 5,3,2 mm 筛子对其进行湿筛<sup>[16]</sup>后用滤纸包住,放在 105 °C 烘箱烘至恒重,用万分之一天平称重。

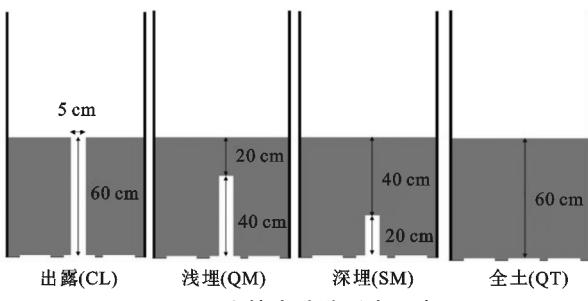


图 2 土壤大孔隙形态示意

### 1.3 数据处理

使用 Excel 2013 和 SPSS 18.0 软件对试验数据进行分析处理,用 Origin 2018 软件进行绘图。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同形态土壤大孔隙水分垂直渗漏对降雨的响应特征

2.1.1 水分垂直渗漏出流时间及速率 不同形态土壤大孔隙微区水分垂直渗漏出流时间见表 1。在不同降雨条件下,各形态土壤大孔隙水分垂直渗漏出流时间均表现出 30 mm/h>60 mm/h>120 mm/h,即雨强越大,水分垂直渗漏出流时间越快,CL、QM、SM 在 30,60 mm/h 雨强下出流时间差异不显著,但与 120 mm/h 雨强则存在显著差异,QT 在 3 个雨强下均存在显著差异。对比分析相同降雨强度下不同形态土壤大孔隙水分垂直渗漏出流时间,总体表现为 QT>SM>QM>CL。土壤大孔隙高度越高,出流时

间越快,在 60 mm/h 雨强下,不同形态土壤大孔隙水分垂直渗漏出流时间存在显著差异,CL 最快,降雨 40.0 min 后水分即开始渗漏出流,其次为 QM 及 SM,分别为 52.5,63.0 min,QT 最慢,为 72.0 min,QM、SM、QT 比 CL 水分垂直渗漏出流时间分别增加 31.3%,57.5%,80.0%。在 120 mm/h 雨强下,CL 出流最快,在降雨开始 19.0 min 后即开始出流,与 QM、SM、QT 存在显著差异。在 30 mm/h 的低雨强下,QT 出流时间最长,为 88.0 min,与 CL、QM、SM 存在显著差异,出流时间分别是 CL、QM、SM 的 1.8,1.6,1.2 倍。

表 1 不同形态土壤大孔隙水分垂直渗漏出流时间

土壤大孔隙状态	水分垂直渗漏出流时间/min		
	30 mm/h	60 mm/h	120 mm/h
CL	48.0±4.24Ca	40.0±1.41Da	19.0±1.41Cb
QM	56.0±4.24Ca	52.5±3.54Ca	24.5±2.12Bb
SM	71.0±4.24Ba	63.0±2.83Ba	27.5±2.12Bb
QT	88.0±5.66Aa	72.0±4.24Ab	37.5±2.12Ac

注:用 LSD 法进行多重比较;同列不同大写字母表示不同形态土壤大孔隙间存在显著差异( $P<0.05$ );同行不同小写字母表示不同降雨强度间存在显著差异( $P<0.05$ )。下同。

由图 3 可知,在 120 mm/h 雨强下,不同形态土壤大孔隙微区水分垂直渗漏量随降雨历时均呈“单尖峰”变化,即在降雨发生后,水分渗漏量迅速达到峰值,CL、QM、SM、QT 水分渗漏量峰值分别为 86.7,76.7,63.3,53.3 mm/h,CL 渗漏量最大,在降雨结束后,水分渗漏量又快速下降。30,60 mm/h 雨强下,CL、QM、SM、QT 水分渗漏量随降雨历时均呈“梯形”变化,渗漏量在降雨初期快速增大,随后达到稳定状态,在降雨结束后快速减少。相同降雨强度下不同形态土壤大孔隙间水分垂直渗漏量的差异表现为峰值不同,且雨强越大差异越显著。在 30 mm/h 雨强下,水分渗漏量无明显差异,均为 26.7 mm/h;在 60 mm/h 雨强下,CL、QM、SM、QT 水分渗漏量峰值分别为 56.7,56.7,53.3,46.7 mm/h;在 120 mm/h 雨强时,水分渗漏量峰值分别为 86.7,76.7,63.3,53.3 mm/h,CL 分别是 QM、SM、QT 的 1.1,1.4,1.6 倍,差异显著。

2.1.2 累积水分渗漏量与累积降雨量的关系 从图 4 可以看出,在不同雨强下,CL 累积水分渗漏量均大于 QM、SM、QT。由表 2 可知,不同形态土壤大孔隙累积水分渗漏量与累积降雨量之间存在显著线性关系,累积水分渗漏量的递增斜率大小在 30,60,120 mm/h 雨强下均表现为 CL>QM>SM>QT,降雨强度越大,递增斜率越小,截距大小也表现为 CL>QM>SM>QT。不同降雨强度下累积水分渗漏量与累积降雨量之间的拟合方程  $R^2$  表现为 30 mm/h>60 mm/h>120 mm/h,雨强越小,拟合线性方程效果更好。

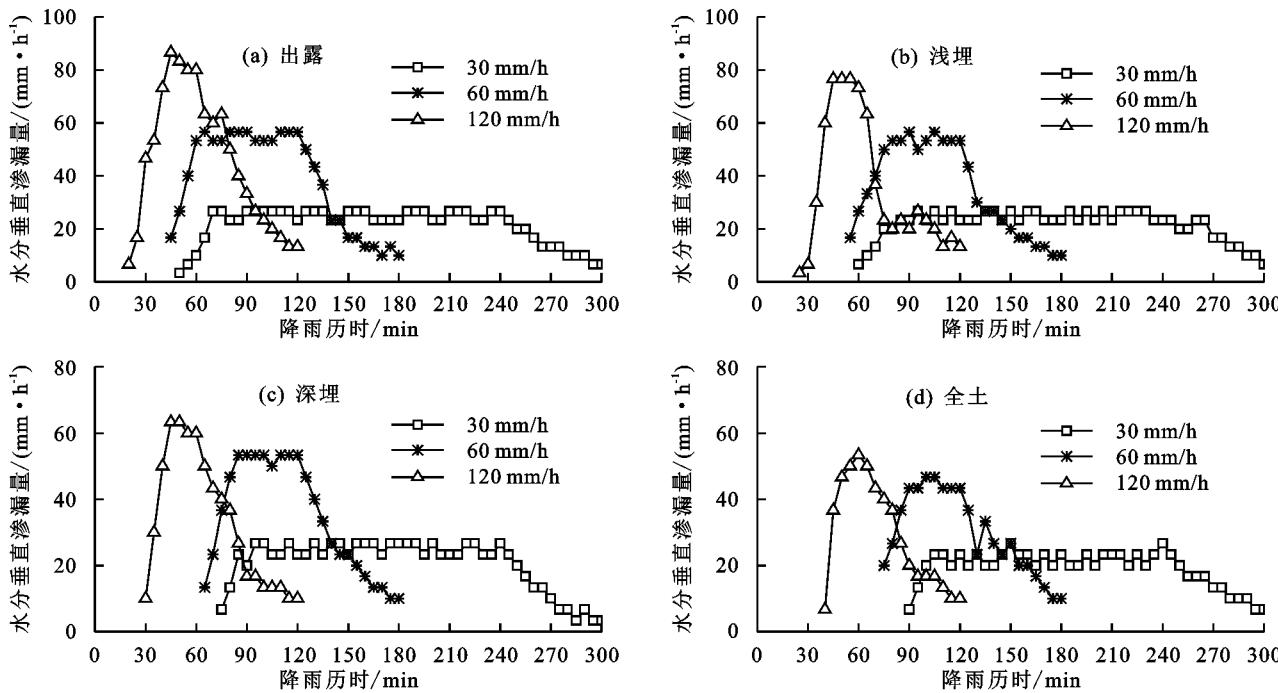


图3 不同土壤大孔隙形态及雨强条件下的水分垂直渗漏过程

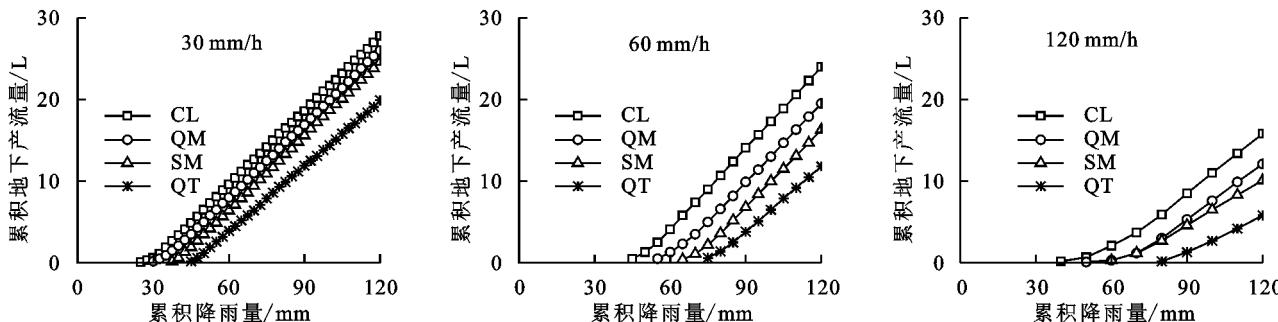


图4 不同土壤大孔隙形态及雨强条件下的累积水分渗漏量

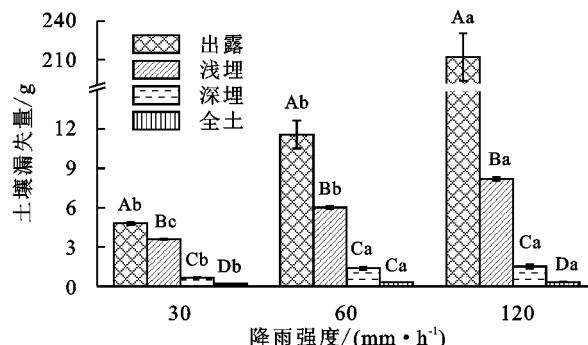
表2 不同土壤大孔隙形态及雨强条件下累积水分渗漏量(y)与累积降雨量(x)拟合方程

土壤大孔隙形态	降雨强度/ $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$	拟合方程	$R^2$
CL	30	$y = 0.30x - 8.42$	0.9994
	60	$y = 0.32x - 14.95$	0.9985
	120	$y = 0.21x - 9.60$	0.9775
	30	$y = 0.30x - 9.59$	0.9993
QM	60	$y = 0.30x - 17.25$	0.9955
	120	$y = 0.18x - 10.60$	0.9621
	30	$y = 0.30x - 11.60$	0.9998
SM	60	$y = 0.30x - 19.98$	0.9959
	120	$y = 0.17x - 10.42$	0.9920
	30	$y = 0.26x - 11.96$	0.9998
QT	60	$y = 0.26x - 19.09$	0.9974
	120	$y = 0.14x - 11.26$	0.9954

## 2.2 不同形态土壤大孔隙土壤漏失特征

2.2.1 不同形态土壤大孔隙土壤漏失量 由图5可知,不同形态土壤大孔隙土壤漏失量总体较少,除CL外,土壤漏失量皆 $<10 \text{ g}$ ,QT在不同雨强下土壤漏失总量 $<0.5 \text{ g}$ 。土壤漏失量在不同降雨强度和土壤大孔隙形态间均存在显著差异,在30 mm/h雨强下,CL土壤漏

失量最大,为4.8082 g,其次为QM(3.5974 g),SM与QT土壤漏失量均很少,分别为0.6702,0.1825 g。60 mm/h雨强时,土壤漏失量表现为CL(11.5800 g) $>$ QM(6.0158 g) $>$ SM(1.3812 g) $>$ QT(0.3134 g)。降雨强度为120 mm/h时,CL土壤漏失量为211.8567 g,远大于其他形态土壤大孔隙与降雨强度下的土壤漏失量,属于土壤大量漏失的极端现象。QM、SM、QT土壤漏失量分别为8.2024,1.5164,0.3275 g。

图5 不同雨强下不同形态土壤大孔隙土壤漏失量差异  
2.2.2 不同形态土壤大孔隙漏失土壤粒径分布特征  
从表3可以看出,粒径 $>5 \text{ mm}$ 的土壤颗粒大部分出

现在 CL 的漏失土壤中,且含量较低,在雨强为 30, 60, 120 mm/h 时占比分别为 2.6%, 12.3%, 38.6%, 雨强越大,占比越大。在其他形态土壤大孔隙的漏失土壤中粒径  $>5$  mm 的土壤颗粒仅出现在部分降雨中,且占比极低,如在 QM 微区 60 mm/h 雨强时占漏失土壤 3.0%, 在 SM 微区 120 mm/h 雨强时占漏失土壤 1.6%。在粒径为 [3, 5 mm) 范围时, QM 在雨强为 120 mm/h 的漏失土壤中占比最大,为 51.3%, 大于其他 2 个雨强。而 CL 是在雨强为 30 mm/h 时最大, 60 mm/h 时占比最小。SM 则在 60 mm/h 雨强时占比最大,为 9.2%, 其次为 30 mm/h 雨强(8.7%), 120 mm/h 雨强占比最小,仅占 2.5%。QT 在不同降雨强度下漏失土壤中都不含粒径  $>3$  mm 的土壤颗粒, 粒径  $>5$  mm 及在 [3, 5 mm) 范围内的土壤颗粒占比为 0。粒径  $<2$  mm 的土壤颗粒占漏失土壤比重最大,绝大部分占比在 70.0% 以上,在 30 mm/h 的 SM 漏失土壤中甚至占到 96.9%, 60, 120 mm/h 雨强时也分别占 83.9%, 80.1%, 高于 CL、QM、SM。漏失土壤中土壤颗粒粒径分布特征总体表现为土壤颗粒粒径越小,漏失土壤中含量越大。

### 2.3 水分渗漏、土壤漏失与影响因素相关性分析

表 4 分析了水分渗漏因子(水分渗漏出流时间、水分渗漏量、累积水分渗漏量)与土壤漏失因子(土壤漏失量、漏失土壤细颗粒含量)的相关性,从中可以看出,土壤漏失量与水分渗漏出流时间呈显著负相关关系,水分渗漏出流时间越快,土壤漏失量越大;与水分

渗漏量呈显著正相关关系,水分渗漏量越大,土壤漏失量越大。漏失土壤细颗粒(粒径  $<2$  mm)含量与水分渗漏出流时间与水分渗漏量呈显著相关关系,水分渗漏出流时间越快,水分渗漏量越小,漏失土壤细颗粒含量越大。累积水分渗漏量与土壤漏失量和漏失土壤细颗粒含量均无显著相关关系。通过水分渗漏因子与土壤漏失因子相关系数综合分析可知,水分渗漏因子对土壤漏失量的影响程度为水分垂直渗漏出流时间(-0.727)  $>$  水分渗漏量(0.636)  $>$  累积水分渗漏量(0.557),对漏失土壤细颗粒含量的影响程度为水分垂直渗漏出流时间(0.788)  $>$  水分渗漏量(-0.676)  $>$  累积水分渗漏量(-0.091)。

表 3 不同形态土壤大孔隙各粒径土壤颗粒占漏失土壤总质量比

土壤大孔隙形态	降雨强度/(mm·h <sup>-1</sup> )	各粒径土壤颗粒占漏失土壤总质量比/%			
		>5 mm	[3~5 mm)	[2~3 mm)	<2 mm
CL	30	2.6	10.6	10.3	76.5
	60	12.3	5.4	11.9	70.3
	120	38.6	7.3	11.3	42.8
QM	30	0	12.7	20.1	67.2
	60	3.0	18.3	4.6	74.0
	120	0	51.3	5.5	43.2
SM	30	0	8.7	9.4	81.9
	60	0	9.2	14.3	76.5
	120	1.6	2.5	10.4	70.5
QT	30	0	0	3.1	96.9
	60	0	0	16.1	83.9
	120	0	0	19.9	80.1

表 4 水分渗漏因子与土壤漏失因子相关性分析

土壤漏失因子	水分渗漏出流时间		水分渗漏量		累积水分渗漏量	
	r	Sig.	r	Sig.	r	Sig.
土壤漏失量	-0.727 **	0.007	0.636 *	0.026	0.189	0.557
漏失土壤细颗粒含量	0.788 **	0.002	-0.676 **	0.016	-0.091	0.790

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

由表 5 可知,降雨强度主要影响水分的渗漏过程,其与水分渗漏出流时间、水分垂直渗漏量、累积水分渗漏量呈极显著相关关系。降雨强度越大,水分垂直渗漏出流时间越快,水分垂直渗漏量越大,累积水分渗漏量

越小,相关系数分别为 -0.769, 0.891, -0.857。而土壤大孔隙形态主要影响土壤漏失过程,其与土壤漏失量和漏失土壤细颗粒含量呈极显著相关关系,土壤大孔隙高度越高,土壤漏失量越大,漏失土壤细颗粒含量越低。

表 5 影响因子与水土漏失因子相关性分析

影响因子	水分垂直渗漏出流时间	水分垂直渗漏量	累积水分渗漏量	土壤漏失量	漏失土壤细颗粒含量
降雨强度	-0.769 **	0.891 **	-0.857 **	0.325	0.459
土壤大孔隙高度	-0.540	0.331	0.497	0.928 **	-0.757 **

## 3 讨论

### 3.1 土壤大孔隙形态对水分渗漏的影响

有研究<sup>[17]</sup>表明,当降雨强度较小时,地面不会产生地表径流,水土流失主要是通过地下孔隙进行流失,地下孔隙流是侵蚀产沙的主要载体,本研究共

设计了 3 个不同形态的土壤大孔隙、3 个不同降雨强度共同作用下对喀斯特地区水土流失过程的影响。有研究<sup>[18-20]</sup>发现,3 种土壤大孔隙形态水分垂直渗漏出流时间均随雨强的增大而缩短,虽影响出流时间的因素很多,如土壤大孔隙形态、坡度、土壤初始含水量

等,但也有研究<sup>[21]</sup>表明,产流时间主要取决于降雨强度,蔡雄飞等<sup>[22]</sup>研究不同雨强对我国西南喀斯特山区土壤侵蚀影响的模拟试验也得到相似结果。喀斯特坡面主要为蓄满产流,降雨通过入渗进入土壤,然后沿地下裂隙、管道等进入地下水系统<sup>[23]</sup>,在同等雨强下,均是出露型产流最快,表明该土壤大孔隙形态对降雨的响应最快,水分垂直渗漏量最大,因为出露型大孔隙为降雨的渗漏提供了快速通道,形成优先流,使雨水迅速地到达微区的底部,在短时间内产生较大的渗漏量,这与吴丽萍等<sup>[24]</sup>、张志才等<sup>[25]</sup>对喀斯特地区地下径流的研究结果有相似之处。本研究还对水分累积垂直渗漏量与累积降雨量进行拟合分析,不同土壤大孔隙形态在不同降雨强度下累积水分渗漏量与累积降雨量之间呈显著线性关系,雨强越小,线性关系越显著。不同土壤大孔隙形态的累积水分渗漏量与累积降雨量拟合效果均较好,但大孔隙间差异不显著,Well<sup>s</sup>等<sup>[26]</sup>通过模拟降雨试验发现,土壤累积渗漏量随着裂隙深度的增加而线性增加,而本研究规律不明显,由于土壤大孔隙空间结构与优先流模拟的复杂性,相关的科学问题需要进一步深入研究。

### 3.2 不同形态土壤大孔隙水文驱动土壤漏失的差异成因分析

本研究中,出露型的土壤漏失量最大,其次是浅埋型及深埋型,全土微区土壤漏失量最小,表明土壤大孔隙高度越高,土壤漏失量越多。同时发现,出露型往往还出现一些极端大量漏失现象,比如在雨强为120 mm/h时,泥沙漏失达到211.856 7 g,试验时发现表土有塌陷现象,可能是因为雨强过大,对土壤的冲刷力比较大。甘艺贤<sup>[17]</sup>、耿晓东等<sup>[27]</sup>的研究结果均表明,降雨强度是引起产流产沙的主要因素之一,土壤漏失量随降雨强度的增大呈现出增大的趋势,佐证了降雨强度是喀斯特地区水土流失加剧的重要驱动因子。在漏失土壤颗粒粒径分级中,粒径>5 mm的土壤颗粒大部分出现在出露型微区,其他微区漏失或者为0或者极少。漏失最多的是粒径<2 mm的土壤颗粒,大多占比70%以上,其次是粒径为2~5 mm的土壤。针对喀斯特地区土壤漏失,虽存在不同的观点,有学者<sup>[28]</sup>认为,地下孔(裂)隙通常为土壤或风化物及其混合物充填,土壤沿裂隙漏失轻微,也有学者<sup>[29]</sup>认为,土壤主要沿孔(裂)隙、地下管道等整体蠕移丢失为主,也有可能是二者并重。因此,需要进一步探索研究。

喀斯特区水土流失/漏失是其生态环境退化的重要因素之一。本研究比较了水分渗漏因子与土壤漏失因子的相关性发现,两者之间呈显著相关关系,符合规律,因为水分流失的同时携带着土壤颗粒,土壤

漏失受水分驱动影响<sup>[30]</sup>。本研究通过分析不同降雨强度和土壤大孔隙高度分别对水分渗漏因子与土壤漏失因子的相关性发现,对水分渗漏因子的影响大小为降雨强度>土壤大孔隙高度,降雨是土壤水分的来源,因此降雨强度对水分漏失的影响最大,该结果与Serrano-Muela等<sup>[31]</sup>的结果相似,而对土壤漏失因子的影响大小为土壤大孔隙高度>降雨强度。土壤大孔隙距地表距离越近,加上受到降雨的驱动力,土壤携带养分顺着大孔隙向地下漏失越多。刘正堂等<sup>[32]</sup>对人工模拟喀斯特裸坡面微地貌特征和地下喀斯特裂隙构造的研究结果也得到土壤侵蚀和各影响因子间相关程度为雨强>降雨历时>地下孔隙度;杨智等<sup>[33]</sup>通过人工降雨模拟试验研究结果表明,在喀斯特地区,产流产沙与雨强、地下孔(裂)隙度、降雨历时等关系密切,与本研究的结果一致,并说明降雨强度与土壤大孔隙形态是影响喀斯特地区地下水土漏失的重要因子。当然,除了降雨,影响喀斯特水土流失的因素还有很多,包括地形因素、土壤理化性质、土地利用方式和下垫面等,它们之间相互影响,相互制约,共同影响喀斯特区水土漏失过程<sup>[34]</sup>。

## 4 结论

(1)土壤大孔隙的存在为降雨的渗漏提供快速通道,使水分能以优先流的形式快速渗漏到地下,不同形态土壤大孔隙水分垂直渗漏出流时间表现为 $QT>SM>QM>CL$ 。且降雨强度越大,水分渗漏出流时间越快。

(2)土壤大孔隙较全土水分垂直渗漏量峰值更大,不同形态土壤大孔隙水分渗漏量表现为 $CL>QM>SM>QT$ ,且雨强越大差异越大。30,60 mm/h雨强下不同形态土壤大孔隙水分渗漏量均在降雨初期达到峰值并呈稳定状态,在降雨结束后减少,在120 mm/h雨强下则表现出在降雨初期迅速达到峰值并在降雨结束后迅速减少的趋势。不同形态土壤大孔隙累积水分渗漏量与累积降雨量存在显著线性关系,雨强越小,线性关系越显著。

(3)不同形态土壤大孔隙间土壤漏失量存在显著差异,且土壤大孔隙的存在增加土壤漏失的风险性,表现为 $CL>QM>SM>QT$ ,本研究土壤漏失量总体较少,大量漏失现象出现在在极端状况下。漏失土壤中大部分为粒径<2 mm的土壤颗粒,>5 mm的土壤颗粒大部分出现在CL漏失土壤中,且雨强越小,细颗粒土壤含量越大。

(4)水驱动土壤漏失的作用下,水分渗漏因子与土壤漏失因子存在不同程度的显著相关关系,土壤漏失量与水分垂直渗漏出流时间呈极显著相关关系,与水分渗漏量呈显著相关关系,漏失土壤细颗粒含量与

水分垂直渗漏量和水分渗漏量均呈极显著相关关系。降雨强度主要影响水分渗漏过程,与水分渗漏因子均呈极显著相关关系,而土壤大孔隙形态主要影响土壤漏失过程,与土壤漏失因子均呈极显著相关关系。

## 参考文献:

- [1] 苏亚军.岩溶地区土洞发育机制的水力学解析及治理原则[J].中国水运,2012,12(10):191-192.
- [2] 白云星,周运超,周鑫伟,等.喀斯特土壤与喀斯特区域土壤关系的探讨:以贵州省普定县后寨和小流域为例[J].土壤,2020,52(2):414-420.
- [3] 何忠明,杨煜,曾新发,等.土洞演化过程中路基变形的响应分析[J].中南大学学报(自然科学版),2018,49(12):3068-3076.
- [4] 蒋小珍,雷明堂,管振德.单层土体结构岩溶土洞的县城机理[J].中国岩溶,2012,31(4):426-432.
- [5] 康彦仁.岩溶塌陷的形成机制[J].南方国土资源,1989(2):83-90.
- [6] 刘之葵.岩溶地区溶洞及土洞对建筑地基影响的研究[D].长沙:中南大学,2004.
- [7] Beven K, Germann P. Water flow in soil macropores II. A combines flow model[J]. Journal of Soil Science, 1981,32(1):15-29.
- [8] 周运超,潘根兴.茂兰森林生态系统对岩溶环境的适应与调节[J].中国岩溶,2001,20(1):47-52.
- [9] 邓艳,蒋忠诚,曹建华.弄拉典型峰丛岩溶区青冈栎叶片形态特征及对环境的适应[J].广西植物,2004,24(4):317-322.
- [10] 王发,付智勇,陈洪松,等.喀斯特洼地退耕和耕作土壤优先流特征[J].水土保持学报,2016,30(1):111-116.
- [11] 张静举.广西喀斯特区甘蔗地土壤大孔隙流特征研究[D].桂林:桂林理工大学,2018.
- [12] Šimůnek J, Jarvis N J, van Genuchten M T, et al. Review and comparison of models for describing non-equilibrium and preferential flow and transport in the vadose zone[J]. Journal of Hydrology,2003,272(1/4):14-35.
- [13] Lottes W S, Hester E T. Filling the void: The effect of stream bank soil pipes on transient hyporheic exchange during a peak flow event[J]. Water Resources Research,2020,56(2):e2019WR025959.
- [14] 付智勇,陈洪松,王克林,等.一种适宜高异质性喀斯特坡地的可升降便携式模拟降雨器:中国,湖南:CN:103691594A[P].2014-04-02.
- [15] 张伟,陈洪松,苏以荣,等.一种适用于喀斯特地区的土壤侵蚀与养分迁移模拟装置:中国,湖南:CN:103454403A[P].2013-12-18.
- [16] 郭伟,史志华,陈利顶,等.红壤表土团聚体粒径对坡面侵蚀过程的影响[J].生态学报,2007,27(6):2516-2522.
- [17] 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.
- [18] 吴继强.非饱和土壤中大孔隙流及溶质优先迁移基本特性试验研究[D].西安:西安理工大学,2010.
- [19] 胡奕,戴全厚,王佩将.喀斯特坡耕地产流特征及影响因素[J].水土保持学报,2012,26(6):46-51.
- [20] 张长保.降雨条件下黄土坡面土壤养分迁移特征试验研究[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2008.
- [21] 常颖.内蒙古希拉穆仁草原产流产沙试验过程研究[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2014.
- [22] 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.
- [23] 彭旭东,戴全厚,李昌兰,等.模拟雨强和地下裂隙对喀斯特地区坡耕地养分流失的影响[J].农业工程学报,2017,33(2):131-140.
- [24] 吴丽萍,陈洪松,付智勇,等.喀斯特岩溶裂隙对地下径流和氮素垂直渗漏的影响[J].水土保持学报,2017,31(5):64-71.
- [25] 张志才,陈喜,程勤波,等.喀斯特山体表层岩溶带水文地质特征分析:以陈旗小流域为例[J].地球与环境,2011,39(1):19-25.
- [26] Wells R, DiCarlo D, Steenhuis T, et al. Infiltration and surface geometry features of a swelling soil following successive simulated rainstorms[J]. Soil Science Society of America Journal,2003,67(5):1344-1351.
- [27] 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.
- [28] 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.
- [29] 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.
- [30] 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.
- [31] Serrano-Muela M P, Nadal-Romero E, Lana-Renault N, et al. An exceptional rainfall event in the central western pyrenees: Spatial patterns in discharge and impact[J]. Land Degradation and Development, 2015, 26(3):249-262.
- [32] 刘正堂,倪九派,杨智.喀斯特地区裸坡面土壤侵蚀的人工模拟降雨试验研究[J].水土保持学报,2013,27(5):12-16.
- [33] 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.
- [34] Nearing M A, Foster G R, Lane L J, et al. A process-based soil erosion model for USDA-water erosion prediction project technology [J]. Transactions of the ASAE,1989,32(5):1587-1593.