

喀斯特裸坡地径流对降雨强度与坡度的响应

李焱秋¹, 戴全厚^{1,2,3,4}, 甘艺贤^{1,5}, 严友进¹, 高儒学¹

(1. 贵州大学林学院, 贵阳 550025; 2. 农业生物工程研究院, 贵阳 550025;

3. 山地植物资源保护与种质创新教育部重点实验室, 贵阳 550025;

4. 山地生态与农业生物工程协同创新中心, 贵阳 550025; 5. 水城县自然资源局, 贵州 六盘水 553000)

摘要: 为探究喀斯特裸坡坡面在不同降雨强度与坡度组合下径流过程及其径流总量特征。将表层岩溶带中孔(裂)隙视为可透水的“筛孔”, 设定地下“二元”结构中孔(裂)隙度(5%)一致的情况下, 探索裸坡地在不同降雨强度与坡度组合下地表/地下径流过程与总径流量的特征, 并以此为基础揭示降雨强度、坡度对喀斯特坡面水文特征的影响。结果表明: (1) 在较小降雨强度条件下(≤ 30 mm/h), 裸坡地表并未出现产流迹象, 以地下所产生的径流为主。在中大雨强(≥ 50 mm/h)条件下, 裸坡地地表产流, 且在设计降雨 30 min 时长内其径流过程并未出现规律性变化, 而地下径流过程则在不同坡度与雨强下均呈现出先增加后趋于平缓的趋势, 且其转折点多居于 9~12 min 时段内。 (2) 30 min 内裸坡地地下总径流量在 15 mm/h 降雨强度且坡度为 $5^\circ, 10^\circ, 15^\circ, 20^\circ$ 这 4 个坡度条件下变化并不显著($P > 0.05$), 而其余降雨强度下地下/地表径流量均随着坡度增加差异显著($P < 0.05$); 同时除地下径流量与坡度呈极显著负相关($P < 0.01$)外, 其余地表/地下径流均与降雨强度与坡度均呈现出极显著正相关($P < 0.01$); (3) 降雨强度为大雨强(90 mm/h)条件下首次出现了地下径流系数 < 0.5 的情况, 证明大雨强(90 mm/h)条件下存在着临界坡度使得地表与地下径流量相接近。研究成果能够为喀斯特坡地水土流失防治提供参考和合理意见。

关键词: 降雨强度; 坡度; 坡面水文; 石灰土; 喀斯特

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2019)05-0028-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2019.05.005

Response of Runoff to Rainfall Intensity and Slope on Bare Slope Land in Karst

LI Yanqiu¹, DAI Quanhou^{1,2,3,4}, GAN Yixian^{1,5}, YAN Youjin¹, GAO Ruxue¹

(1. College of Forestry, Guizhou University, Guiyang 550025; 2. Agricultural Bioengineering Research

Institute, Guiyang 550025; 3. Key Laboratory of Mountain Plant Resources Conservation and Germplasm Innovation

Ministry of Education, Guiyang 550025; 4. Collaborative Innovation Center of Mountain Ecology and Agricultural

Bioengineering, Guiyang 550025; 5. Natural Resources Bureau of Shuicheng County, Liupanshui, Guizhou 553000)

Abstract: The aim of this research was to study the runoff process and total runoff characteristics of karst bare slope under different rainfall intensity and slope combinations. In this study, the caves and fissures in surface karst zone was regarded as a permeable “sieve hole”. By setting the porosity (fissure) of the underground “dualistic structure” structure to be the same (5%), the characteristics of surface/subsurface runoff process and total runoff on bare slopes under different rainfall intensity and gradient combinations were studied. Then, the effects of various factors on the hydrological characteristics of karst slopes were discussed. (1) Under the small rainfall intensities (15 and 30 mm/h), the runoff on bare slope was primarily dominated by the subsurface runoff without surface runoff. But, under the heavy rainfall intensity (≥ 50 mm/h), the surface runoff occurred, which process did not change regularly within 30 minutes of the designed rainfall; however, the subsurface runoff process increased first and then leveled off under all different slope and rainfall intensities, and the turning points were mostly in 9 ~ 12 minutes. (2) The differences of total subsurface runoff were not significant ($P > 0.05$) in $5^\circ, 10^\circ, 15^\circ$ and 20° slopes under the rainfall intensity of 15 mm/h in 30 minutes, while the surface/subsurface runoff had significant differences with the increase of slope gradients ($P < 0.05$). All the surface/ subsurface runoff was positively correlated with the rainfall

收稿日期: 2019-03-05

资助项目: 国家自然科学基金项目(41671275); 国家重点研发计划项目(2016YFC0502604); 贵州省高层次创新型人才项目(黔科合平台人才[2018]5641); 贵州省重大专项(黔科合重大专项字[2016]3022号); 贵州省科技计划项目(黔科合平台人才[2017]5788); 贵州省一流学科建设(GNYL[2017]007)

第一作者: 李焱秋(1995—), 男, 贵州安顺人, 硕士研究生, 主要从事土壤水文及石漠化治理研究。E-mail: 815350799@qq.com

通信作者: 戴全厚(1969—), 男, 陕西长武人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事喀斯特水力侵蚀与生态恢复重建研究。E-mail: qhdairiver@163.com

intensities and slope gradients ($P < 0.01$), except that the total subsurface runoff was negatively correlated with the slope gradients ($P < 0.01$). (3) The subsurface runoff coefficient was less than 0.5 for the first time under the heavy rainfall intensity (90 mm/h), which proved that there was a critical gradient which made the surface and subsurface runoff equal to each other. These research results can provide reference and reasonable suggestions for the prevention and control of soil erosion in Karst slopes.

Keywords: rainfall intensity; slope; slope hydrology; limestone soil karst

我国西南喀斯特区由于其特殊的地质背景和强烈的岩溶作用和近代人类不合理的开发利用地下水流失严重,石漠化加剧^[1-3],具有贮水作用的土层日渐浅薄,加之其“二元三维”水文地质结构的双重影响^[4-5],容易引起地表水分的漏失^[6-8]。被视为石头“筛子”^[9]的表层岩溶带通常成为了水分漏失的传输通道。土壤中的养分、污染物等随水分进入地下岩溶含水层,引起地下水富营养化。

目前,国内外诸多学者^[10-14]对于坡面径流形成机制已进行了大量的研究,其研究对象多集中于西北黄土高原地区黄土、东北地区黑土以及南方红壤土等地区。姜义亮等^[10]利用降雨和汇流分析了黑土区坡面侵蚀产沙过程。石亚芳等^[11]研究了踩踏干扰对生物结皮土壤渗透性的影响。孙丽丽等^[12]通过不同降雨强度揭示了紫色土坡面产流产砂特征。史倩华等^[13]对红壤区含砾石情况下工程堆积体的产流产沙过程进行研究。Hosseini 等^[14]研究发现,林地植被覆盖度不同将会影响着径流量的多少。显然,非喀斯特地区的研究者们多采用不同雨强、坡度、下垫面、植被覆盖度、生物结皮等探究其对坡面水文的影响。而我国西南喀斯特地区对于坡面产流的研究起步相对较晚,且未形成一套完善有效的研究体系。已有研究^[15-16]指出,坡度、雨强均为坡面径流产生的重要影响因素。但由于其观测时长的影响并未明确出其转折点处于什么时段,以及径流产生过程的细致变化。本研究基于地下径流量直接观测难度较大,将表层岩溶带中孔(裂)隙视为“筛孔”,在野外调查及相关文献查阅的基础上,利用试验钢槽模拟喀斯特坡地“二元”结构产流特征。以期进一步明确喀斯特坡面尺度上地表/地下在不同坡坡度与降雨强度的影响下对地表与地下径流的特征,同时明确喀斯特裸坡地表/地下径流过程曲线变化规律,从而为该区域水土保持工作及石漠化治理提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验设备

试验设备由自主设计的降雨钢槽以及西安清远测控技术有限公司 QYJY—501 型便携式全自动下喷式人工模拟降雨器组成。自主设计的降雨钢槽规格为长 4.0 m,宽 1.5 m,深 0.35 m,坡度可调 0~45°,底板均匀分布着可调节孔(裂)隙度(0~8%)的孔洞。钢槽上下都设计有地表、地下孔(裂)隙径流集流槽,并在集流槽出口出

放置塑料小桶采集径流量。人工模拟降雨器高度 6 m,有效降雨面积 6.5 m×6.5 m,均匀度>85%。

1.2 试验土壤

本研究土样于 2017 年 6 月 3 日采自贵州省贵阳市花溪区(26°19′17″N,106°39′18″E)喀斯特坡耕地表层(A 层)石灰土作为试验土样。其土壤砂粒(0.02~2 mm)质量百分数 37.34%,粉粒(0.002~0.02 mm)质量百分数 47.53%,黏粒(<0.002 mm)质量百分数 15.03%。土壤不过筛,自然风干后挑出植物根系、碎石等杂物后按照野外所测土壤紧实度自下而上进行分层填装。

1.3 试验设计

试验于 2017 年 6 月 5 日至 9 月 15 日在贵州大学降雨大厅进行。通过对贵阳市花溪区、安顺普定县野外调查及文献资料查阅分析,岩石裸露率在 20%~45%的分布较多。本研究设定 30%作为坡面岩石裸露率,将直径≥35 cm 石灰岩块石随机布置于试验钢槽中模拟,以裸露岩石占坡面水平投影面积的百分率作为基岩裸露率,最后使用坡面垂直影像和 ArcGIS 校核基岩裸露率,模拟降雨钢槽及降雨器示意图(图 1)参照严友进等^[15]方法绘制。而坡度则设置 5 个水平(5°,10°,15°,20°,25°),并根据张文源等^[16]对贵州喀斯特区耕地侵蚀性降雨研究结论与贵州省降雨资料设定 5 个降雨强度,其中小雨强为 15,30 mm/h,中雨强为 50,70 mm/h,大雨强为 90 mm/h 每场降雨历时 30 min,重复 3 次,最后孔(裂)隙度通过调节钢槽两块底板重合面面积孔(裂)隙度的大小完成,本试验设定孔(裂)隙度为 5%。试验土样则根据野外实测记录,土壤分为 3 层进行填装(每层 10 cm),其自下而上的紧实度分别为 410,760,1 070 kPa。在向钢槽填装土壤时,钢槽与土壤所接触界面用平板压实减小边缘效益的影响。每次降雨前先调节降雨器高度至 6 m 以保证雨滴终点速度满足天然特征,之后将降雨钢槽坡度调为 0 并降小雨使土体充分湿润饱和,待到土壤地下稳定产流后,滴干土壤重力水。最后将降雨钢槽调至设计坡度的同时也将降雨强度调至设计水平进行降雨试验。在降雨钢槽地表、地下径流收集口放置带有刻度的塑料容器收集各时段内的地表与地下径流。并且在每场降雨结束后更换钢槽内全部土样后重复上述步骤后再进行下一场降雨,每场降雨所使用土样均为同一时期所采集。

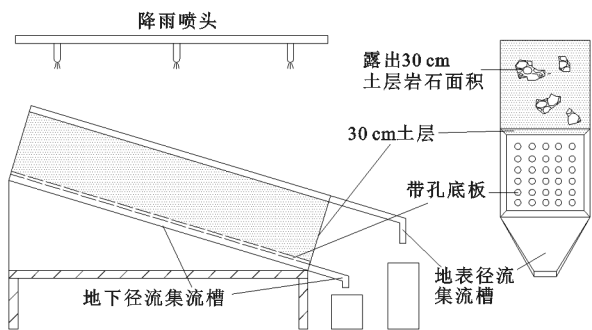


图 1 降雨器及模拟钢槽示意

1.4 数据处理

采用 Excel 2013 和 SPSS 18.0 软件对试验数据进行统计分析,Origin Lab 9.1 软件进行绘图。

2 结果与分析

2.1 降雨强度与坡度对裸坡地表径流的影响

降雨与坡度均为坡面土壤侵蚀的原动力,是导致产流的直接原因^[15]。本研究中,5 个降雨强度中 15, 30 mm/h 小雨强条件下地表均未产生径流,而在产生地表径流的 3 个降雨强度条件中 30 min 降雨时段内发生地表产流后均未出现中断现象。由图 2 可知,地表径流动态变化曲线与坡度、降雨强度的变化均有明显的差异。当降雨强度越大时,各坡度下地表径流过程曲线均处于较高位置;且在同一雨强下,坡度的增大也会造成地表径流过程曲线所处位置越高。地表径流过程虽然随着产流时长的变化呈波动性增大,但曲线本身的变化并未出现一定的规律性。

对裸坡地表径流总量而言(表 1),降雨强度的增大会造成裸坡面地表径流总量的增加,且各降雨强度下地表径流总量差异性显著($P<0.05$);而坡度的增加亦使得裸坡地表径流总量呈上升的趋势且同一降雨强度下各坡度间地表径流总量存在着显著差异

($P<0.05$)。同时地表产流的 3 个雨强条件下大雨强(90 mm/h)径流量数值上为最小地表产流雨强条件(50 mm/h)的 2.50~6.95 倍,且伴随着坡度的增大,这一比值逐渐降低。

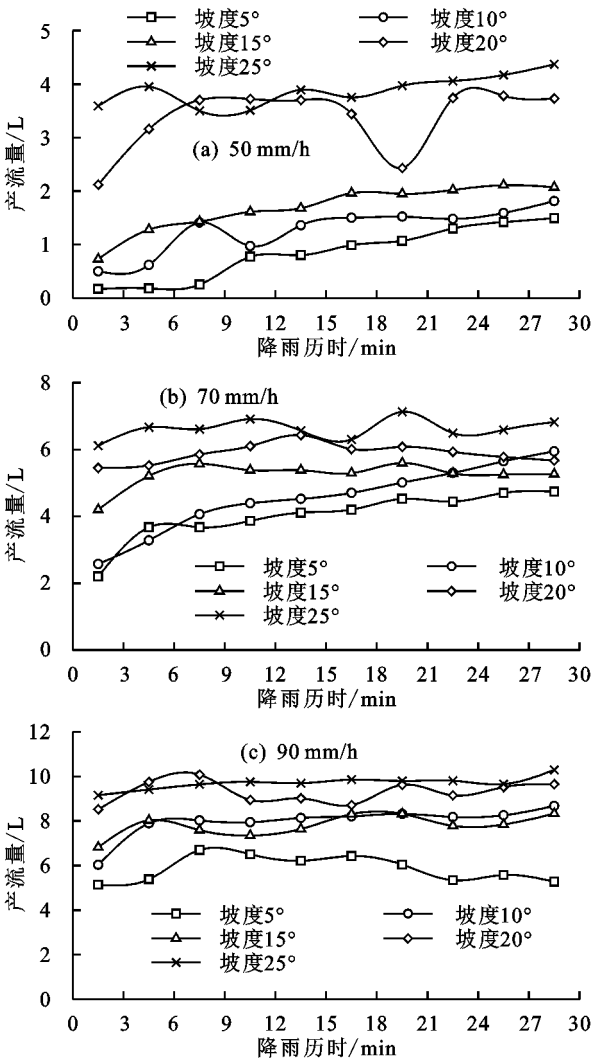


图 2 不同雨强和坡度的地表产流过程

表 1 不同雨强和坡度对地表径流总量的影响

坡度/(°)	地表径流量/L				
	15 mm/h	30 mm/h	50 mm/h	70 mm/h	90 mm/h
5	0Da	0Da	8.42±0.47Ce	40.11±1.61Bd	58.58±2.78Ac
10	0Da	0Da	12.76±0.78Cd	45.42±2.51Bd	79.64±3.97Ab
15	0Da	0Da	16.86±0.82Cc	52.40±2.48Bc	78.00±4.14Ab
20	0Da	0Da	33.54±1.33Cb	58.82±3.15Bb	92.97±3.65Aa
25	0Da	0Da	38.76±1.56Ca	66.17±3.14Ba	97.05±4.60Aa

注:用 LSD 法进行多重比较;同行不同大写字母表示同一坡度不同雨强间差异($P<0.05$);同列不同小写字母表示同一雨强不同坡度间差异显著($P<0.05$)。下同。

2.2 降雨强度与坡度对裸坡地下径流的影响

喀斯特由于地下孔(裂)隙的发育使得水分不单在坡面汇聚形成地表径流,还通过地下孔(裂)隙进入地下河系统。由图 3 可知,随着坡度与降雨强度的变化,地下径流动态变化过程出现较大差异。设计 5 个雨强在 30 min 的降雨过程中地下均出现了径流,且随着降雨强

度的增大,地下径流动态变化特征曲线亦处于较高位置。与地表径流动态特征曲线不同的是地下径流动态变化特征曲线在 30 min 降雨时长内伴随时间变化而递增,最终会趋于平缓,其趋于平缓的转折点多集中于 9~12 min 时段内。地下径流过程曲线在经过转折点后在相同雨强的条件下均随着坡度增大而减小,与相同雨强

下地表产流过程曲线随坡度变化规律相反。

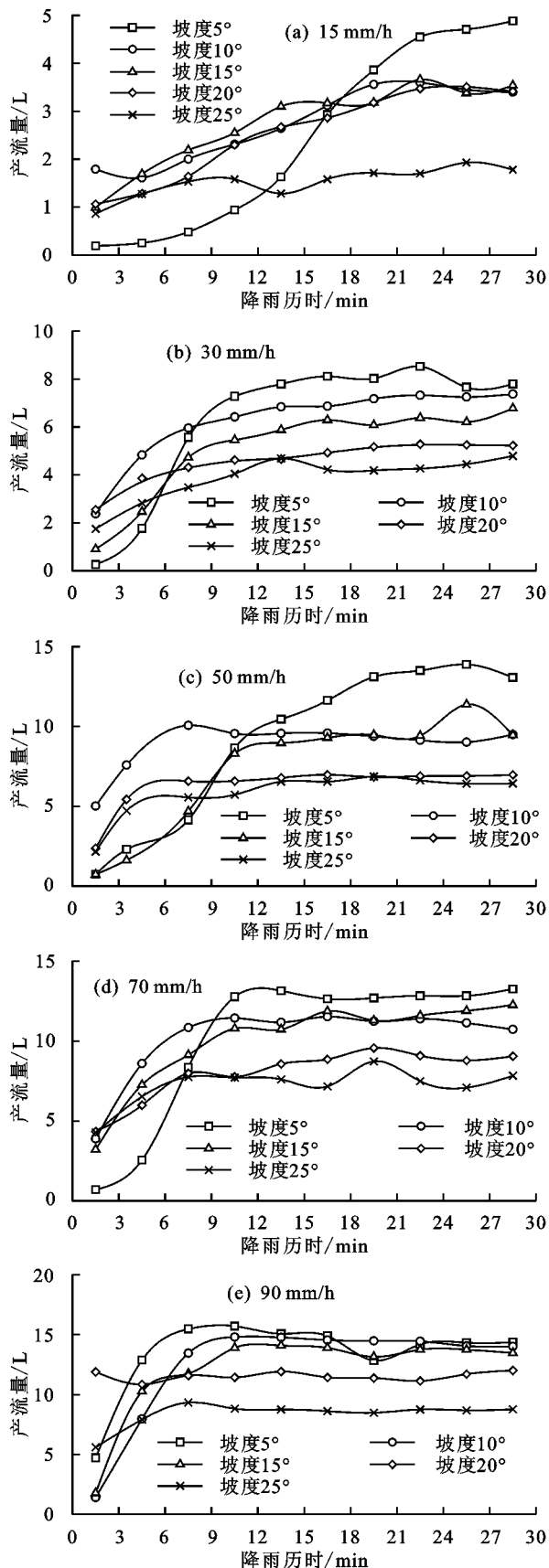


图3 不同雨强和坡度的地下产流过程

由表2可知,地下径流总量在小雨强(15 mm/h)的5°,10°,15°,20°4个坡度条件下差异不显著($P>0.05$);而其余降雨强度与坡度条件下,地下径流量均呈现出显著

差异($P<0.05$)。同时伴随降雨强度的增大,裸坡地下径流总量变化规律与地表径流总量变化规律相一致,均呈上升趋势;而降雨强度一致、坡度增加则与地表径流总量的变化趋势相反,呈波动性递减的趋势。

2.3 喀斯特裸坡地径流与影响因素的关系

通过前文分析可知,喀斯特地区裸坡面在地下孔(裂)隙度一定的情况下,其径流动态变化过程、径流总量受到雨强、坡度共同影响,而坡面径流总量等于坡面动态变化过程中各时段径流量总和。因此,本研究在拟定地下孔(裂)隙度为5%的情况下,通过对地表、地下30 min内径流总量与坡度、雨强的偏相关分析(表3)可知,降雨强度与坡度虽然都与地表、地下径流存在着相关性,且均为极显著相关($P<0.01$),但相较于坡度,降雨强度对裸坡地表及地下径流影响更大,同时坡度与地下径流相关性为负,表明坡度的增大会抑制裸坡地下径流的发育。

地下径流系数变化特征(图4)在降雨强度 >30 mm/h后,地表径流开始发育,地下径流系数开始出现小于1的现象发生,而同一降雨强度下伴随着坡度的增大,地下径流系数表现为依次递减的规律,并且由于在90 mm/h降雨强度下地下径流系数首次降到0.5以下,证明在这一降雨强度下存在着一零界坡度使得地表与地下径流量相等。而在降雨强度 <30 mm/h时,裸坡面只存在着地下径流的发育,因此,较小降雨强度下,其地下径流系数为1。不同坡度裸坡面径流总量(Y)与降雨强度(X)间符合线性拟合方程 $Y=aX+b$,相关系数均达0.98以上(表4)。

3 讨论

喀斯特裸坡在较小降雨强度(15,30 mm/h)仅存在地下径流的现象,当降雨强度达到50 mm/h后地表才产生径流。其原因是由于喀斯特地区坡面在降雨强度增大后使土壤入渗率小于地表产流速率,从而造成原本以蓄满产流为主的坡面产流方式转换为超渗产流^[17-20]。在雨强较小时,相比于南方丘陵红壤,本研究中所使用的石灰土入渗性能更高,且更容易发生壤中流,从而造成较小降雨强度条件下坡面并未发生汇流从而形成径流。而当降雨强度增大达到地表产流条件后,坡度的增大导致降水进入土壤后在垂直方向上的运移距离增加,造成在土壤中滞留时间增长,促进运移规律复杂的壤中流发育,最终抑制水分在土壤中垂直方向上的运移。并且入渗量的减少使得地表水流速度加快并转换为地表径流,从而造成坡度越大,地表径流动态过程曲线越大及地下径流动态过程曲线在经过转折点后随着坡度增大而减小的规律,这一结果与王丽园等^[21]的研究结论相似。

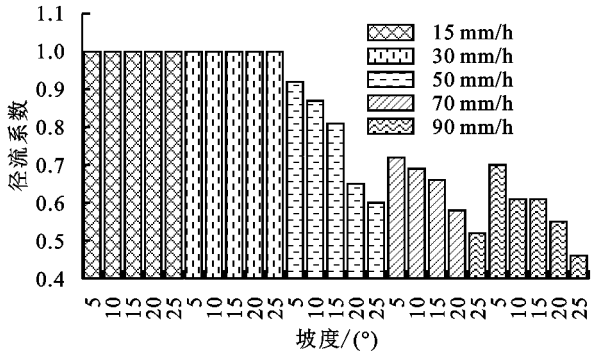
表 2 不同雨强和坡度对地下径流的影响

坡度/(°)	地下径流量/L				
	15 mm/h	30 mm/h	50 mm/h	70 mm/h	90 mm/h
5	24.42±1.6Ea	62.75±2.77Da	91.52±3.90Ca	101.83±3.68Ba	134.45±4.29Aa
10	27.50±2.03Ea	62.42±2.50Da	88.39±4.13Ca	101.99±4.24Ba	123.91±5.50Aab
15	27.45±2.15Ea	51.16±3.61Db	73.32±3.99Cb	100.07±5.51Ba	119.75±6.75Ab
20	25.37±2.25Ea	45.89±2.84Db	62.33±2.99Cc	80.00±3.91Bb	115.29±7.96Ab
25	15.23±1.35Eb	38.70±2.99Dc	57.61±3.56Cc	72.20±3.96Bb	83.67±4.22Ac

表 3 地表、地下径流量与降雨强度、坡度的相关性

径流类型	降雨强度	坡度
地表径流	0.955 **	0.576 **
地下径流	0.965 **	-0.778 **

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。



注：地下径流系数=地下径流量/总径流量

图 4 不同雨强、坡度下地下径流系数变化特征

表 4 不同降雨强度坡面总径流量拟合方程

坡度/(°)	拟合方程	R ²
5	Y=2.190x-7.279	0.9970
10	Y=2.303x-9.052	0.9956
15	Y=2.336x-15.336	0.9887
20	Y=2.427x-20.950	0.9828
25	Y=2.271x-21.925	0.9950

注：Y 为径流量(L)，x 为降雨强度(mm/h)。

通过单因素方差分析,除 15 mm/h 降雨强度下的 5°,10°,15°,20° 4 个设计坡度下地下径流量未出现差异性外,其余降雨强度与坡度组合下的地表及地下径流总量均呈显著性差异。由此可见,降雨强度与坡度二者共同作用于坡面径流的形成^[22]。并且当降雨强度增大时,雨滴动能逐渐增大造成雨滴打击产生的纵向挤压力增大,加快了降雨入渗的速度^[23],最终造成了地下径流总量随雨强增大而增大的现象,这与鲁克新等^[24]研究结果相一致。相较于坡度,降雨强度对裸坡面地表、地下径流总量的影响力大于坡度,是坡面产流的主要影响因子,且与地表、地下径流总量均呈显著正相关关系($P=0.955$ 和 $P=0.965$)。反观坡度,由研究结果可知,较小降雨强度下,无论坡度怎样变化,坡面地表均未出现产流现象。因此,在

较小降雨强度条件下,坡度的改变并不能决定喀斯特地区裸坡地地表径流的形成。这是由于本研究中石灰土特有的多孔、疏松等特点,使得降水在通过渗透能力较高的土壤后来不及在地表汇流形成地表径流而通过地下孔(裂)隙形成地下径流^[25]。通过不同降雨强度坡面总径流量拟合方程可看出,在除 25°坡外,其余坡度下在不同降雨强度下的拟合方程的斜率均随着坡度的增大而依次增大,表明坡度越大,降雨强度增幅对径流总量的影响越大。综上所述,坡度与降雨强度一样与裸坡地表径流存在显著正相关关系,但坡度的增大一定程度上会抑制地下径流的形成。由此可见,坡度的增加使得水分在土壤中运移路径并非单一的垂直向下运动,而是一个复杂的过程。

喀斯特地区由于特殊的地质条件,其水土流失过程不同于非喀斯特地区。基岩中裂隙、节理的存在使得这一地区地表水土流失与地下漏失二者共存。正是由于这一地区地下孔(裂)隙与拥有较强入渗能力石灰土的共同影响,使得坡面在较小降雨强度条件下造成了地表不产流的现象。其原因是降水通过土壤中大孔隙后未在土壤中停留而快速进入地下孔(裂)隙形成地下径流。当降雨雨强增大时,坡面不仅形成了地下径流,而且由于地表产流速率大过入渗速率造成原本蓄满产流为主的坡面转变为超渗产流,从而形成了地表径流。但这一地区复杂的地下孔(裂)隙中通常被土壤(或类似土壤的物质)充填且植物根系也从裂隙中填充土壤汲取所需水分与养分,因此当水分通过地表土壤进入到地下孔(裂)隙后,其孔(裂)隙中所填充土壤的渗透能力与根系的导水能力将直接影响着地下径流的形成,这与试验所设计的“筛孔”模拟野外地下孔(裂)隙存在着不小的差距,同时钢槽中底板圆孔不能完全反映出野外孔(裂)隙的形态特征。因此,今后喀斯特坡面径流工作应多趋向于野外观测进行校验,为我国西南喀斯特地区坡面水文及石漠化治理提供更为科学的依据。

4 结论

(1)试验设计的 30 min 降雨历时过程中,地表在小雨强条件(15,30 mm/h)下并未出现产流迹象,且降雨强度较小时,坡度的改变并不能影响地表径流的

形成。地表径流动态变化曲线在同一雨强条件下随着坡度的上升依次递增,同时地表产流过程在30 min内虽缓慢递增,但未出现地表径流过程趋于稳定的转折点;反观地下径流动态变化曲线,在设计5个降雨条件下均产生径流且随着坡度的增大逐渐降低,同时期的地下径流过程在设计30 min时段内随时长的变化表现为先上升后趋于平缓的变化趋势,其平稳转折点多居于9~12 min这一时段内。

(2)同一坡度下雨强的增大对地表与地下径流总量均起到促进的作用,而在降雨强度一致时,虽然地表径流总量也随着坡度的增大而增大,但地下径流总量则与坡度增大基本呈现负相关关系;并且除15 mm/h降雨强度下的5°,10°,15°,20°坡度地下径流总量未呈现显著性差异外,其余降雨强度下不同坡度均呈现出显著性差异的特点。

(3)50 mm/h降雨强度下地表开始产生径流,其地下径流系数一致呈现出 >0.5 的特点,但在90 mm/h、25°坡度下首次出现地表径流量多于地下径流量,因此,在90 mm/h降雨强度下,20°~25°坡度存在着—临界坡度使得地表与地下径流量相同。西南喀斯特地区坡地由于地下孔(裂)的发育,使得这一区域水分在裸坡不单在地表中运移,更存在于地下,因此这一地区在进行农业生产与开发建设项目时不仅针对地表水分流失的治理,更应注意地下水分流失的防治,以免由于地下径流携带的污染物等造成地下水体污染以及塌陷等次生灾害的发生。

参考文献:

- [1] Field M S. A lexicon of cave and karst terminology with special reference to environmental karst hydrology [M]. Washington, DC: United States Environmental Protection Agency, 2002: 107.
- [2] 袁道先. 中国岩溶学 [M]. 北京: 地质出版社, 1994.
- [3] 王世杰, 李阳兵. 喀斯特石漠化研究存在的问题与发展趋势 [J]. 地球科学进展, 2007, 22(6): 573-582.
- [4] 袁道先. 我国西南岩溶石山的环境地质问题 [J]. 世界科技研究与发展, 1997(5): 41-43.
- [5] 蔡运龙. 中国西南岩溶石山贫困地区的生态重建 [J]. 地质学进展, 1996, 11(6): 84-88.
- [6] Academic Divisions of the Chinese Academy of Sciences. Some suggestions of carrying forward the comprehensive harnessing desertification in Southwest karst region [J]. Advance in Earth Sciences, 2003, 18(4): 489-492.
- [7] 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.
- [8] Yuan D X. Rock desertification in the subtropical karst of south China [J]. Zeitschrift fur Geomorphologie Neue Folge, 1997, 108: 81-90.
- [9] 张信宝, 白晓永, 李豪, 等. 西南喀斯特流域泥沙来源、输移、平衡的思考——基于坡地土壤与洼地、塘库沉积物 ^{137}Cs 含量的对比 [J]. 地球与环境, 2017, 46(3): 247-258.
- [10] 姜义亮, 郑粉莉, 温磊磊, 等. 降雨和汇流对黑土区坡面土壤侵蚀的影响试验研究 [J]. 生态学报, 2017, 37(24): 8207-8215.
- [11] 石亚芳, 赵允格, 李晨辉, 等. 踩踏干扰对生物结皮土壤渗透性的影响 [J]. 应用生态学报, 2017, 28(10): 3227-3234.
- [12] 孙丽丽, 查轩, 黄少燕, 等. 不同降雨强度对紫色土坡面侵蚀过程的影响 [J]. 水土保持学报, 2018, 32(5): 18-23.
- [13] 史倩华, 王文龙, 郭明明, 等. 模拟降雨条件下含砾石红壤工程堆积体产流产沙过程 [J]. 应用生态学报, 2015, 26(9): 2673-2680.
- [14] Hosseini M, Geissen V, González-Pelayo O, et al. Effects of fire occurrence and recurrence on nitrogen and phosphorus losses by overland flow in maritime pine plantations in north-central Portugal [J]. Geoderma, 2017, 289: 97-106.
- [15] 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.
- [16] 张文源, 王百田, 杨光橄, 等. 喀斯特黄壤区侵蚀性降雨及产沙特征分析 [J]. 生态环境学报, 2014, 23(11): 1776-1782.
- [17] 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.
- [18] 柴宗新. 试论广西岩溶区的土壤侵蚀 [J]. 山地研究, 1989, 7(4): 255-260.
- [19] 严友进, 戴全厚, 伏文兵, 等. 下垫面变化对喀斯特坡地地下产流产沙的影响 [J]. 水土保持学报, 2018, 32(1): 67-73, 79.
- [20] Bates B C, Aryal S K. A similarity index for storm runoff due to saturation excess overland flow [J]. Journal of Hydrology, 2014, 513: 241-255.
- [21] 王丽园, 查轩, 黄少燕, 等. 不同雨强条件下坡度对红壤坡面侵蚀的影响 [J]. 水土保持学报, 2017, 31(5): 40-44.
- [22] 郭星星, 吕春娟, 陈丹, 等. 雨强和坡度对铁尾矿砂坡面复垦前后产流产沙的影响 [J]. 水土保持研究, 2019, 26(1): 8-13.
- [23] 彭旭东, 戴全厚, 李昌兰. 模拟降雨下喀斯特坡耕地土壤养分输出机制 [J]. 生态学报, 2018, 38(2): 624-634.
- [24] 鲁克新, 李占斌, 张霞, 等. 室内模拟降雨条件下径流侵蚀产沙试验研究 [J]. 水土保持学报, 2011, 25(2): 6-9.
- [25] 张川, 陈洪松, 张伟, 等. 喀斯特坡面表层土壤含水量、容重和饱和导水率的空间变异特征 [J]. 应用生态学报, 2014, 25(6): 1585-1591.