

DOI: 10.5846/stxb201812052655

张远瞩, 蒋勇军, 李勇, 王正雄, 段世辉, 吴韦, 彭学义, 王冬. 隧道工程对喀斯特槽谷区坡面产流及土壤侵蚀的影响. 生态学报, 2019, 39(22):

Zhang Y Z, Jiang Y J, Li Y, Wang Z X, Duan S H, Wu W, Peng X Y, Wang D. Effects of tunnel excavation on slope runoff and soil erosion in a karst trough valley. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(22):

隧道工程对喀斯特槽谷区坡面产流及土壤侵蚀的影响

张远瞩^{1,2,*}, 蒋勇军^{1,2}, 李勇^{1,2}, 王正雄^{1,2}, 段世辉^{1,2}, 吴韦^{1,2}, 彭学义^{1,2}, 王冬³

1 西南大学地理科学学院, 重庆 400715

2 岩溶环境重庆市重点实验室, 重庆 400715

3 西南大学附属中学, 重庆 400715

摘要:隧道工程导致地下水系统被破坏,但由此可能带来的土壤侵蚀却很少被涉猎。在重庆观音峡背斜隧道密集影响区和非隧道影响区的两个相邻小流域建立径流小区,基于高分辨率水文资料结合 $\delta D-H_2O$ 、 $\delta^{18}O-H_2O$ 同位素,对比两径流小区坡面、壤中产流规律和地表侵蚀产沙特征。结果表明,观测年内隧道影响区坡面产流对降雨响应更快,地表径流系数 0.027,侵蚀模数 16.68 t km⁻² a⁻¹;非隧道影响区地表径流系数 0.013,侵蚀模数 7.73 t km⁻² a⁻¹。相反,隧道影响区产生的壤中流产流系数仅为非隧道影响区的 31%。对一场强降雨监测发现,两径流小区坡面流中 $\delta D-H_2O$ 、 $\delta^{18}O-H_2O$ 相似,但壤中流中却差异较大。用氢氧同位素混合模型分析得出隧道影响区坡面流、壤中流中降雨贡献率均大于非隧道影响区,侵蚀能力更强。这与土壤含水率减小和土壤结构的差异有关:隧道影响区土壤中粘粒的含量高于非隧道影响区,且出现上粘下松的异常土壤结构,使土壤下渗能力降低,地表径流增加。较小的土壤含水率与土壤粒径也有利于土壤搬运。本研究为隧道工程导致的喀斯特区水土流失研究提供了基础数据,为喀斯特区水土流失防治和石漠化研究提供了新视角。

关键词:隧道工程;坡面径流;壤中流;土壤侵蚀;喀斯特槽谷区

Effects of tunnel excavation on slope runoff and soil erosion in a karst trough valley

ZHANG Yuanzhu^{1,2,*}, JIANG Yongjun^{1,2}, LI Yong^{1,2}, WANG Zhengxiong^{1,2}, DUAN Shihui^{1,2}, WU Wei^{1,2}, PENG Xueyi^{1,2}, WANG Dong³

1 School of Geographical Sciences, Southwest University, Chongqing 400715, China

2 Chongqing Key Laboratory of Karst Environment, Chongqing 400715, China

3 High School Affiliated to Southwest University, Chongqing 400715, China

Abstract: Karst groundwater systems have been destroyed because of the excavation of tunnels. However, the effects of the tunnel excavation on soil erosion in karst areas remain largely unknown. This study aims at investigating disciplines and processes of slope runoff, interflow and surface soil erosion in two runoff plots where are or are not affected by tunnel excavation, respectively, in a karst trough valley, SW, China based on high-resolution hydrological data and isotopic values ($\delta D-H_2O$ and $\delta^{18}O-H_2O$). The results show that the annual coefficient of slope runoff is 0.027 and soil erosion modulus is 16.68 km⁻² a⁻¹ in the tunnel-influenced plot where the slope runoff responds faster to precipitation, while the corresponding values in the tunnel-free plot were 0.013 and 7.73 km⁻² a⁻¹, respectively. In contrast, the interflow in the

基金项目:国家重点研发计划项目课题(2016YFC0502306);重庆市自然科学基金项目(cstc2018jcyj-yszx0013);中央高校基本科研业务费项目(SWU17055)

收稿日期:2018-12-05; 网络出版日期:2019-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zyz@swu.edu.cn

气候区,常年平均气温 18.1℃,平均降雨量 1185 mm,降雨集中在 5—9 月。观音峡背斜轴部为三叠系的飞仙关组(T_{1f})灰岩、泥灰岩和页岩,两翼分别为三叠系的嘉陵江组灰岩(T_{1j})和雷口坡组(T_{2l})白云岩以及须家河组(T_{3xj})砂页岩。岩性组合特征及长期的岩溶作用,使研究区发育出东、西两个近南北走向的大型溶蚀槽谷,形成“三山夹两槽”的“笔架型”的地形,海拔 495—707 m。地带性植被为中亚热带常绿阔叶林。槽谷内土壤为三叠系嘉陵江组灰岩发育的黄色石灰土,土层厚薄不均,15—100 cm。

研究区由凤凰村附近的分水岭分成北、南两个小流域($106^{\circ}23'15''$ — $106^{\circ}28'05''E$, $29^{\circ}40'30''$ — $29^{\circ}48'10''N$),分别为龙凤槽谷(流域面积 11.7 km²)龙车槽谷(流域面积 26.8 km²),槽谷内地表河不发育。1999 年以来,龙凤槽谷流域已建成 3 条横穿背斜核部的隧道(图 1,表 1)。隧道修建前,流域降雨汇集后大部分经南向北的地下河排泄入嘉陵江,另有部分以泉的方式在槽谷内排泄。隧道建成后隧道成为了地下水的排泄通道,排泄量 1.5—23.3 L/s,导致地下河流量减小为不足原来的 20%。原有的流量为 0.08—5 L/s 的 13 泉点中 11 个已被疏干,仅剩 2 个流量很小的季节泉。同时,水田因不能蓄水而被迫变成旱地。可见,隧道建设对该流域水文生态环境影响严重。龙车槽谷流域尚未修建隧道,受北边流域隧道影响较小。两流域相同的地质背景、气候条件、相似的土地利用类型,为对比研究隧道建设对岩溶槽谷区的影响提供了良好的基础。

表 1 龙凤槽谷三条隧道的基本情况

Table 1 Background of three tunnels in Longfeng karst trough valley

隧道序号 Tunnel	隧道名称 Tunnel name	修建时间 Excavated time	隧道长度 Length/m	隧道东西 两端出口高程 Elevation at exit of tunnel/m	隧道东西 两端出口排水量 Discharge of tunnel/(L/S)
1	重庆绕城高速施家梁隧道	2006—2008	4285	260/245	2.3/6.5
2	渝武高速北碚隧道	1999—2001	4035	250/240	2.5/16.8
3	重庆轻轨 6 号线北碚隧道	2010—2013	4322	245/240	1.5/23.3

2 研究方法

2.1 实验设计

在两流域同一顺层坡上分别选择坡度相同的林地建设 20 m×5 m 的径流小区,基本情况见表 2。径流小区四周挖至基岩下,在两侧及坡后灌石浆高出地表,使小区内坡面流、壤中流及泥沙不与外部交换。小区坡前用碎石填至土岩界面,铺不透水膜,再继续填充碎石至坡面,再铺不透水膜,将壤中流与坡面流分隔。坡面流被引入 50 cm×40 cm×30 cm 的收集池,同时沉积泥沙;壤中流被引入 20 cm×20 cm×20 cm 的收集池。收集池排出口装直角三角堰,用于计算流量。

表 2 径流小区情况与 2017.6—2018.5 产水、土壤侵蚀统计

Table 2 Summary of runoff plots, Runoff coefficients and erosion modulus

径流小区 Runoff plot	面积 Area/ m ²	海拔 Elevation/m	坡度 Gradient	土层厚度 Soil thickness/ cm	土壤类型 Soil type	土地利 用类型 Land use pattern	植被 覆盖率 Vegetation coverage/%	植被	隧道影响 Effect of tunnel	距离隧道			
										水平距离 Horizontal distance from the tunnel/m	坡面流径 流系数 Coefficient of slope flow	壤中流径 流系数 Coefficient of interflow	侵蚀模数 Erosion modulus/ (t km ⁻² a ⁻¹)
1	100	580	20°	45	黄色石灰土	林地	70	白蜡树	有	200	0.027	0.009	16.68
2	100	512	20°	50	黄色石灰土	林地	60	白蜡树	无	3500	0.013	0.029	7.73

2.2 数据获取

流域内安装有小型气象站(美国 DAVIS 公司,Vantage Pro2),每个收集池内安装有自动水位记录仪(美国 HOBO 公司,U 20-001-04),根据水位计算流量和径流深度(径流量/投影面积),设定 15 分钟自动记录一次

降雨量和水位。

2017年6月1日到2018年5月31日,根据产沙量不定期收集池中全部泥沙,风干后称重,并计算年侵蚀产沙模数(年泥沙总量/投影面积)。两径流小区沿剖面按0—10 cm、10—20 cm、20—40 cm 分层采集土样,土样风干后磨碎,过筛,用粒径扫描仪得到粒径组成。土壤有机质采取重铬酸钾法测定。研究期间选择一场暴雨,收集降雨,对坡面径流、壤中流进行高频采集。取30 mL水样储存于高密度聚乙烯瓶中,不留气泡,盖紧后用封口胶密封,用于测定水中氢氧稳定同位素值。 $\delta D-H_2O$ 、 $\delta^{18}O-H_2O$ 由自然资源部岩溶动力学重点实验室的采用离轴整合积分腔光谱输出技术(OA2ICOS)的液态水稳定同位素分析仪(LWIA-24-d, Los Gatos Research, USA)测定,测试结果均以V-SMOW标准给出,精度分别为 $\pm 0.6\%$ 和 $\pm 0.2\%$ 。

3 结果与分析

3.1 降雨特征

降雨特征是指每次降雨的雨型、雨量和雨强,对坡面产流影响较大的两个因素是降雨量和雨强,为了更好地揭示降雨影响径流的物理机制,尤其是高强度降雨时段的产流能力,本文选取降雨量和最大15 min雨强两个指标。按两场降雨间隔12小时计算降雨场次,研究年内共降雨128场1170.9 mm,其中5—9月降雨800.4 mm,占全年降雨量的68%,降雨量最高值出现在8月,为198.6 mm,最低值出现在12月,为11.6 mm(图6)。全年暴雨(>50.00 mm/d)8场、大雨(25.00—49.90 mm/d)9场、中雨(10.00—24.90 mm/d)17场,其余为小雨(<10.00 mm/d)。降雨量主要集中在17场暴雨和大雨中,占全年降雨的56%(表3)。全年最大场次降雨量为72.1 mm,出现在2018年4月13—14日;最大日降雨量出现在2017年9月1日,为68.6 mm;15分钟最大雨强为17 mm/15 min,出现在2017年8月25日。

表3 降雨、产流基本情况统计

Table 3 Statistics on the precipitation and runoff times

类型 Type	场次 Times	总降雨量 Rainfall/mm	产生坡面流场次 Times of slope flow		产生壤中流场次 Times of interflow	
			隧道影响区 Tunnel-influenced plot	非隧道影响区 Tunnel-free plot	隧道影响区 Tunnel-influenced plot	非隧道影响区 Tunnel-free plot
			暴雨 Rainstorm	8	429.9	8
大雨 Heavy rain	9	220.6	9	9	2	4
中雨 Moderate rain	17	339.0	15	14	3	4
小雨 Light rain	94	181.4	11	6	0	0
合计 Total	128	1170.9	43	37	13	16

3.2 产流特征对比

3.2.1 年产流

降雨及地表径流是水力侵蚀发生的动力^[12]。在降雨相同的情况下,地表径流差异是产生地表土壤侵蚀差异的重要动力因素。从全年看,两径流小区产流主要集中在6月和9月,7、8月虽有较强的降雨,但强烈的蒸发使产流并不突出(图2)。在全年128场降雨中,1号径流小区(受隧道影响)产生坡面径流的降雨43场(表3),径流系数为0.027(表2);而2号径流小区(无隧道影响)产生坡面径流的降雨37场,径流系数为0.013。说明隧道影响区坡面产流更容易,产流量更大,对土壤的侵蚀能力更强。壤中流是坡地径流的重要组成部分,在两径流小区其产流情况与坡面产流相反。1号径流小区产生壤中流的降雨场次为13场,径流系数为0.009,均小于2号径流小区(表2、3)。说明隧道影响区下渗进入土壤的降雨较少。

如果将坡面流与壤中流相加,两径流小区总产流率低于0.05,根据质量守恒原理,95%以上的降雨被蒸发或经喀斯特区发育的裂隙、管道进入地下,体现出喀斯特区特殊的地表、地下“二元”结构对产流过程的影响^[13-17]。两径流小区中,1号小区径流系数为0.036,低于2号的0.042。因两小区蒸发系数一致,隧道影响区

较低的径流系数说明更多的降雨直接沿岩溶裂隙进入地下。这可能因为隧道建设中放炮破坏了岩石结构,使裂隙、管道增大;也与隧道排水后地下水位下降有关。更多的降水下渗进入地下管道系统将导致流域表层蓄水量减少,对地表生态系统产生影响。

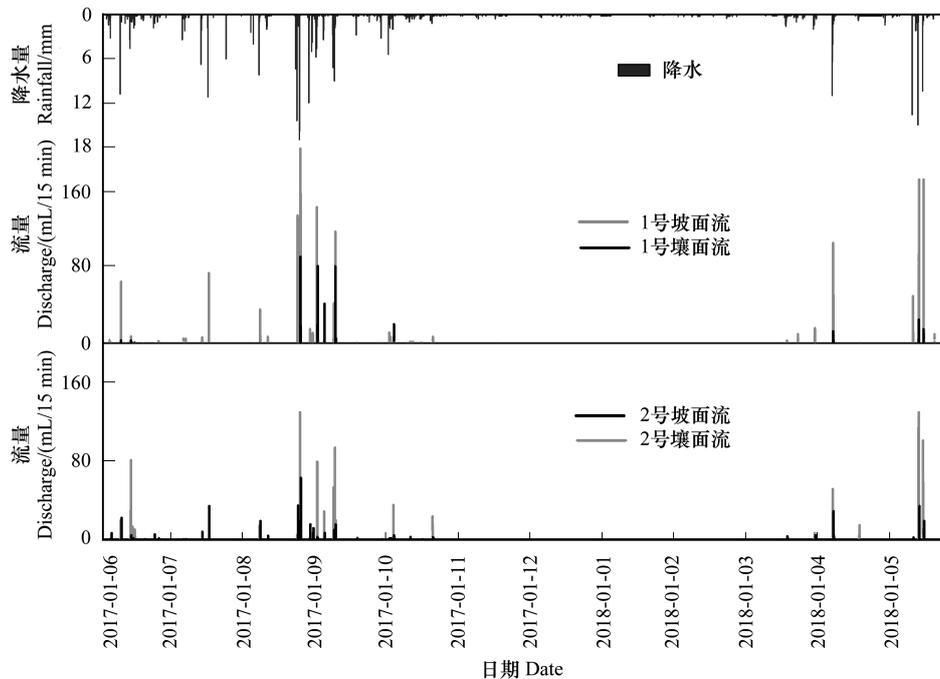


图2 径流小区坡面流和壤中流流量过程线

Fig.2 Discharge curve of slope flow and interflow in runoff plots

此外,两径流小区中次降雨产生的坡面径流系数与最大雨强均具有一定程度的正相关(图3),但在1号径流小区中二者的相关性明显高于2号,拟合直线的斜率也远大于2号。说明在隧道建设影响下坡面产流对雨强响应更快,随雨强的加大也增加得更快,土壤的调蓄作用被削弱。

两径流小区具有相同的降水气候、地质、地形、土地利用类型、植被类型(表2),但在研究年中,坡面流、壤中流径流系数不同,对雨强的响应也存在差异。这与两小区不同的土壤机械组成有关。首先,两径流小区的石灰土中粘粒($d < 0.01$ mm)含量均较高,体现出岩溶区土壤粘重的特征。但1号径流小区粘粒含量(77%—80%)明显高于2号(67%—72%)(表4),粘粒含量的增加将降低土壤渗透能力。其次,两径流小区的土壤剖面结构也存在差异。亚热带季风区降雨量多且强度大,强烈的化学淋溶作用使粒径较小的粘粒不断下移,形成上松下粘的土壤结构。2号径流小区土壤剖面随深度增加粘粒($d < 0.01$ mm与 $d < 0.001$ mm)含量增加,与自然形成的土壤结构一致,该结构有利于降雨下渗。但1号径流小区土壤粘粒含量在土壤剖面0—10 cm处高于10—20 cm,这种上粘下松的异常结构降低了土壤渗透能力。可见,1号径流小区的土壤粒径和剖面结构均不利于降雨的下渗。这样,更多的降水在地表产流,导致地表径流量大于2号,壤中流量小于2号。另外,表层土壤中较高的粘粒含量在较大雨强时更容易结皮,土壤入渗率进一步降低,因此,地表径流系数与最大雨

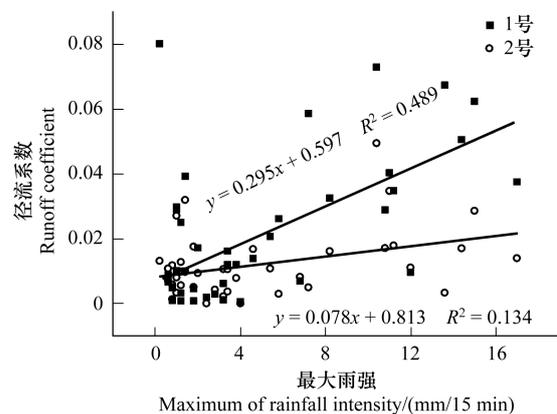


图3 15 min 最大雨强与坡面径流系数相关性

Fig.3 Correlation between the coefficient of slope runoff and maximum of rainfall intensity

强具有了更显著的相关性。

表 4 径流小区土壤机械组成及有机质含量

Table 4 Soil structure and organic matter in runoff plots

径流小区 Runoff plot	土壤深度 Depth of soil/cm	各粒径/mm 级土壤含量 Proportion of soil grain/%					有机质 Organic matter/ (g/kg)
		>0.25	0.25—0.05	0.05—0.01	<0.01	<0.001	
隧道影响区 Tunnel-influenced plot	0—10	1.0	1.0	18.0	80.0	45.0	63.2
	10—20	0.9	3.1	18.6	77.4	43.6	52.4
	20—40	0.9	1.1	18.0	80.0	45.0	44.9
非隧道影响区 Tunnel-free plot	0—10	1.7	3.3	28.0	67.0	31.4	71.8
	10—20	1.6	1.4	26.0	71.0	35.8	57.8
	20—40	1.3	2.7	24.0	72.0	38.0	42.7

土壤的形成受母质、气候、地形、植被、人类干扰等因素的控制。两径流小区具有相同的自然条件及土地利用类型,相异的土壤机械组成可能与隧道建设有关。隧道建设导致地下水位下降,地表泉水干涸(表 1),并使土壤含水率降低。Liu 等在同一研究地监测结果表明,2017 年 1—12 月,1 号径流小区土壤 20 cm、40 cm 平均湿度为 22.3%、25.3%,明显低于 2 号径流小区相同层位处的 25.9%、29.4%。隧道影响区土壤含水率降低影响了生物群落,植物吸收水分的方式已经发生变化^[11],土壤有机质含量下降(表 4),从而逐渐改变土壤结构,削弱土壤下渗能力。研究表明喀斯特群落退化时,土壤有机质含量急剧下降,逐渐向粘质化方向发展,引起土壤板结,使土壤渗透能力下降^[18-19]。可见,喀斯特地区隧道建设可能在一定程度上产生与森林退化相似的影响。

3.2.2 次产流

为研究两径流小区产流过程的差异,对 2017 年 6 月 13—16 日的降雨进行了最高频率为 3 小时的加密采样监测(具体时间间隔视降雨情况确定)。本次降雨共 80.6 mm,最大雨强 4.6 mm/15min。降雨分为两个阶段,第一阶段降雨强度大历时短,第二阶段降雨强度略小,但持续时间长。降雨期间,1 号径流小区产生的地表、壤中流径流系数分别是 0.08 与 0.02,2 号分别为 0.06 与 0.21。其结果与全年观测一致,即坡面径流系数为 1 号径流小区大于 2 号,而壤中流则相反;坡面流+壤中流径流系数为 1 号径流小区小于 2 号。从产流顺序看:两径流小区对降水均迅速响应,首先产生坡面径流,但 1 号径流小区响应更快,且流量过程线涨落更陡(图 4 a, b);2 号坡面产流滞后约 45 分钟,峰值较 1 号低。其次产生壤中流,但 1 号径流小区比 2 号滞后 2 小时 15 分,且波峰低(图 4 c, d)。1 号径流小区壤中流比坡面流滞后约 3 小时 30 分,而 2 号径流小区仅滞后 30 分钟。两径流小区产流顺序的差异进一步说明 1 号径流小区异常的土壤机械组成使土壤下渗率低,降雨在地表产流所需时间短,产流量更大。因渗入土壤的水少,壤中流产流慢,产流量也较少。

降雨既是地表径流和壤中流的主要来源,又是在土壤侵蚀发生与发展过程中水力侵蚀的动力。降雨在产流中的贡献率可以在一定程度上反应其侵蚀能力。为此,运用降雨、“老水”两个端元的氢氧稳定同位素混合模型计算二者在地表径流、壤中流的贡献率^[20]。

$$Q_t = Q_0 + Q_n \quad (1)$$

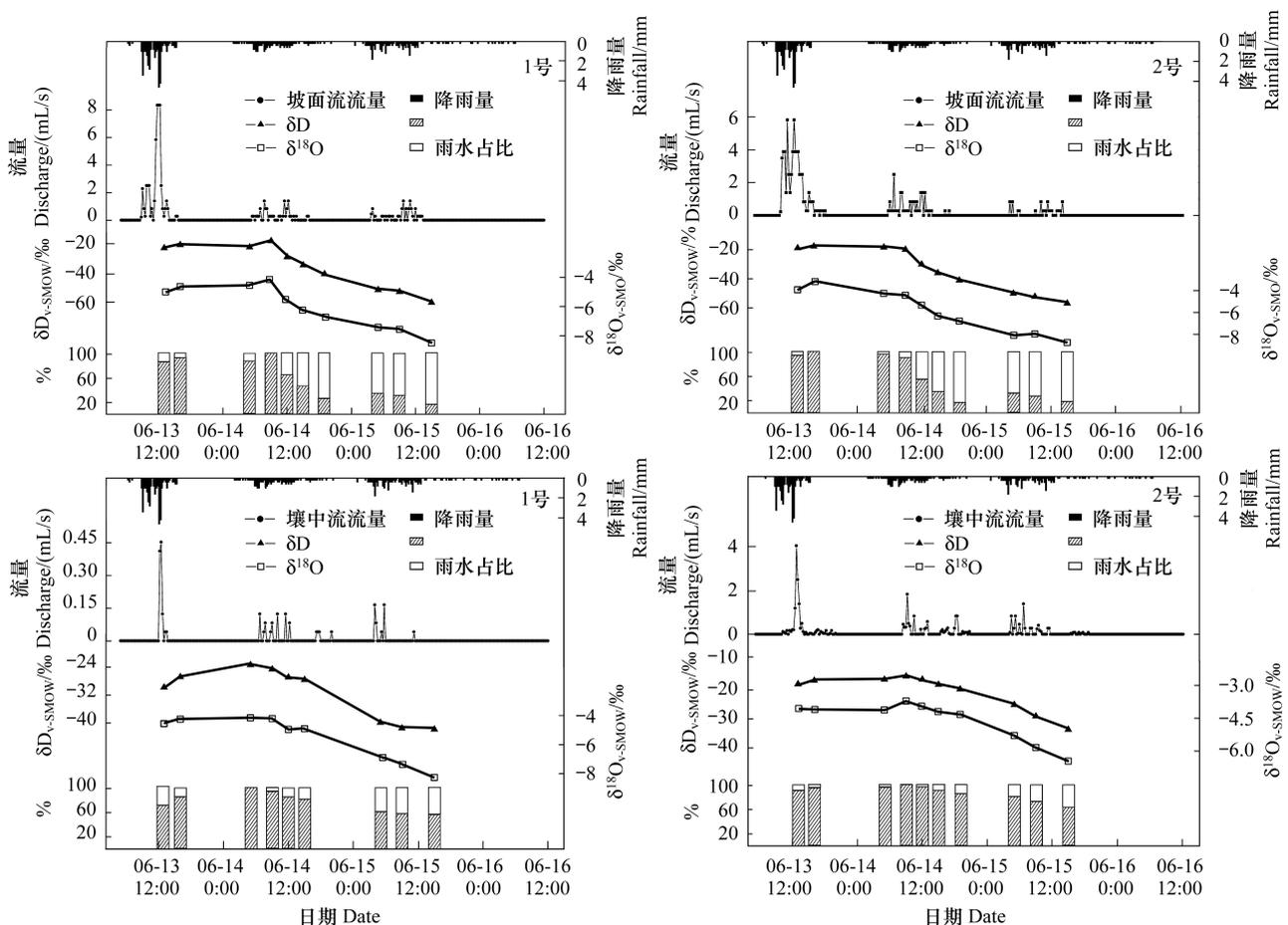
$$C_t Q_t = C_0 Q_0 + C_n Q_n$$

式中, Q_t 、 Q_0 和 Q_n 分别表示径流、“老水”和降雨的体积; C_t 、 C_0 和 C_n 表示对应的 $\delta D-H_2O$ 或 $\delta^{18}O-H_2O$ 同位素值。本研究按朱晓峰等^[21]的研究,选择前期降雨较少的 5 月 22 日降雨事件产流尾水作为“老水”端元,当场降雨为另一端元(表 5)。这种确定“老水”端元的方法因不能完全排除降雨(同位素值偏负)的影响,导致 Q_0 的计算结果可能偏大,但该影响对于两径流小区是一样的,故用该方法进行定量的对比研究仍然可行。

表 5 2017.6.13—6.15 降雨及坡面流、壤中流中“老水”端元氢氧稳定同位素值

降雨 Rainwater				径流 Runoff			
时间 Time	$\delta D/\text{‰}$	$\delta^{18}O/\text{‰}$	径流小区 Runoff plot	坡面流 Slope flow		壤中流 Interflow	
				$\delta D/\text{‰}$	$\delta^{18}O/\text{‰}$	$\delta D/\text{‰}$	$\delta^{18}O/\text{‰}$
2017/06/13-14	-45.3	-7.11	1	-15.58	-4.15	-23.23	-4.16
2017/06/15-16	-64.89	-9.97	2	-17.03	-3.15	-15.17	-3.71

本次降雨事件中,两径流小区 $\delta D\text{-H}_2\text{O}$ 、 $\delta^{18}O\text{-H}_2\text{O}$ 坡面流中氢氧同位素组成均值相似,但壤中流中却差异显著(表 6),1 号径流小区壤中流中 $\delta D\text{-H}_2\text{O}$ 、 $\delta^{18}O\text{-H}_2\text{O}$ 值比 2 号均更偏负,说明 1 号径流小区壤中流中降雨贡献比 2 号大。从产流过程看,两径流小区的坡面流、壤中流的 $\delta D\text{-H}_2\text{O}$ 、 $\delta^{18}O\text{-H}_2\text{O}$ 值均表现出明显的同步下降(图 4),证明同位素值偏负的降雨端元在产流过程中贡献不断增加。用稳定同位素混合模型(式 1)分析降雨贡献率, $\delta D\text{-H}_2\text{O}$ 和 $\delta^{18}O\text{-H}_2\text{O}$ 分析的结果表现出很高的相似度,与朱晓峰等在环江的研究结果一致^[21],故以下以 $\delta D\text{-H}_2\text{O}$ 的计算结果阐述。降雨初期,在两径流小区的坡面流中降雨的贡献率均约 5%,短暂下降后一直增加,直到产流结束时 1、2 号径流小区分别为 85% 和 82%。此过程可解释为产流初期,降雨冲击土壤表层,将其中“老水”不断挤压出去,此时地表径流以“老水”为主。随着降雨的进行,“老水”在表层土壤含量降低,降雨贡献不断增加。对比两径流小区,1 号坡面径流降雨贡献率略高于 2 号。从壤中流产流过程看,降雨

图 4 2017.6.13—6.15 降雨产生的地表径流和坡面流的流量过程线、 $\delta D\text{-H}_2\text{O}$ 、 $\delta^{18}O\text{-H}_2\text{O}$ 值变化及降雨、“老水”贡献率Fig.4 Discharge curve, variations of $\delta D\text{-H}_2\text{O}$ 、 $\delta^{18}O\text{-H}_2\text{O}$ values and the contributions of rainwater and “old water” in the slope flow and the interflow in the rainfall event of June 13—15, 2017

初期,在两径流小区降雨的贡献率差异较大,1号为29%,2号仅9%。随降雨的进行,降水贡献在短暂下降后不断增加,直到产流结束时1、2号小区中降雨贡献率分别为44%和37%。可见,两径流小区中,1号壤中流中降雨贡献率明显高于2号,这与其较低的土壤含水量^[11]有关。较低的土壤含水量使壤中流中“老水”贡献减少,降雨的贡献增加。可见,无论是坡面流还是壤中流,降雨贡献率在隧道影响区都比无隧道影响区大,侵蚀作用也更强。

表6 2017.6.13—6.15 降雨产生的地表径流和坡面流的 $\delta D-H_2O$ 、 $\delta^{18}O-H_2O$ 特征

Table 6 $\delta D-H_2O$ and $\delta^{18}O-H_2O$ values in the slope flow and the interflow for rainfall event of June 13—15, 2017

指标 Item	1		2		
	$\delta D-H_2O/‰$	$\delta^{18}O-H_2O/‰$	$\delta D-H_2O/‰$	$\delta^{18}O-H_2O/‰$	
坡面流 Slope flow	均值±标准差 Mean±SD	-32.6±15.2	-6.0±1.5	-33.9±15.4	-5.9±2.0
	样品数 N	10	10	10	10
壤中流 Interflow	均值±标准差 Mean±SD	-29.9±6.8	-5.1±1.2	-20.8±6.3	-4.6±0.9
	样品数 N	8	8	10	10

3.3 产沙特征对比

降雨及地表径流产生的动力,不断侵蚀搬运土壤。监测年内,1号径流小区产沙量 1.67 kg,侵蚀模数为 $16.68 \text{ t km}^{-2} \text{ a}^{-1}$,而2号径流小区产沙量 0.77 kg,侵蚀模数为 $7.73 \text{ t km}^{-2} \text{ a}^{-1}$ (表2,图5)。可见,隧道影响区土壤侵蚀模数较大,导致1号径流小区土壤厚度比2号小(表2)。分析其原因,首先,隧道影响区具有更强的水动力条件。虽然两径流小区降水一样,但隧道影响区产生了更多地表径流,对土壤有更强的侵蚀作用。同时地表径流和壤中流中具有侵蚀和搬运能力的降水的贡献率都更大,使地表径流和壤中流具有更强的侵蚀能力。其次,隧道影响区土壤的抗侵蚀能力较弱。土壤中较低的含水率使土壤团聚体稳定性降低,在降水条件下更易崩解离散^[22-23]。土壤团聚体崩解后离散出的颗粒细小更容易被降雨和流水搬运。同时,隧道影响区土壤粒径更小,也更容易搬运。当然,从隧道建设到影响土壤流失是一个很复杂的过程,其中还有很多环节需要继续研究完善。

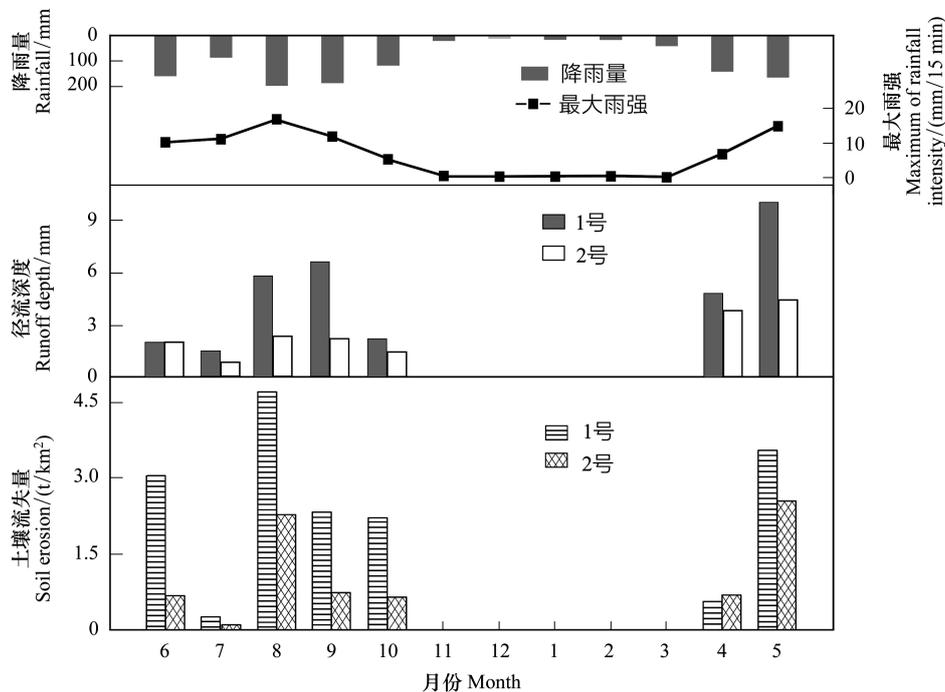


图5 月降雨量、最大雨强、坡面径流深度及土壤侵蚀量变化

Fig.5 Monthly variations of precipitation, maximum of rainfall intensity, runoff depth and soil erosion

坡面土壤侵蚀过程包括雨滴溅蚀和坡面径流侵蚀搬运两个过程^[24],降雨量、降雨强度和坡面径流深度是土壤侵蚀量的直接影响因素。将 13 次收集的土壤侵蚀量与降雨量、15 min 最大雨强、径流深度分别进行相关性分析,发现降雨量和坡面径流深度与土壤侵蚀量的相关性更强,可见,喀斯特槽谷区,降雨量和地表径流深度是土壤侵蚀的重要影响因子。对比两径流小区,1 号土壤侵蚀量受降雨量影响更大,而 2 号受径流深度的影响更显著(图 6),这与二者不同的土壤性质有关。隧道影响区较低的土壤含水量和更小的土壤粒径在雨滴的打击下,更容易被破坏形成分散的土粒。

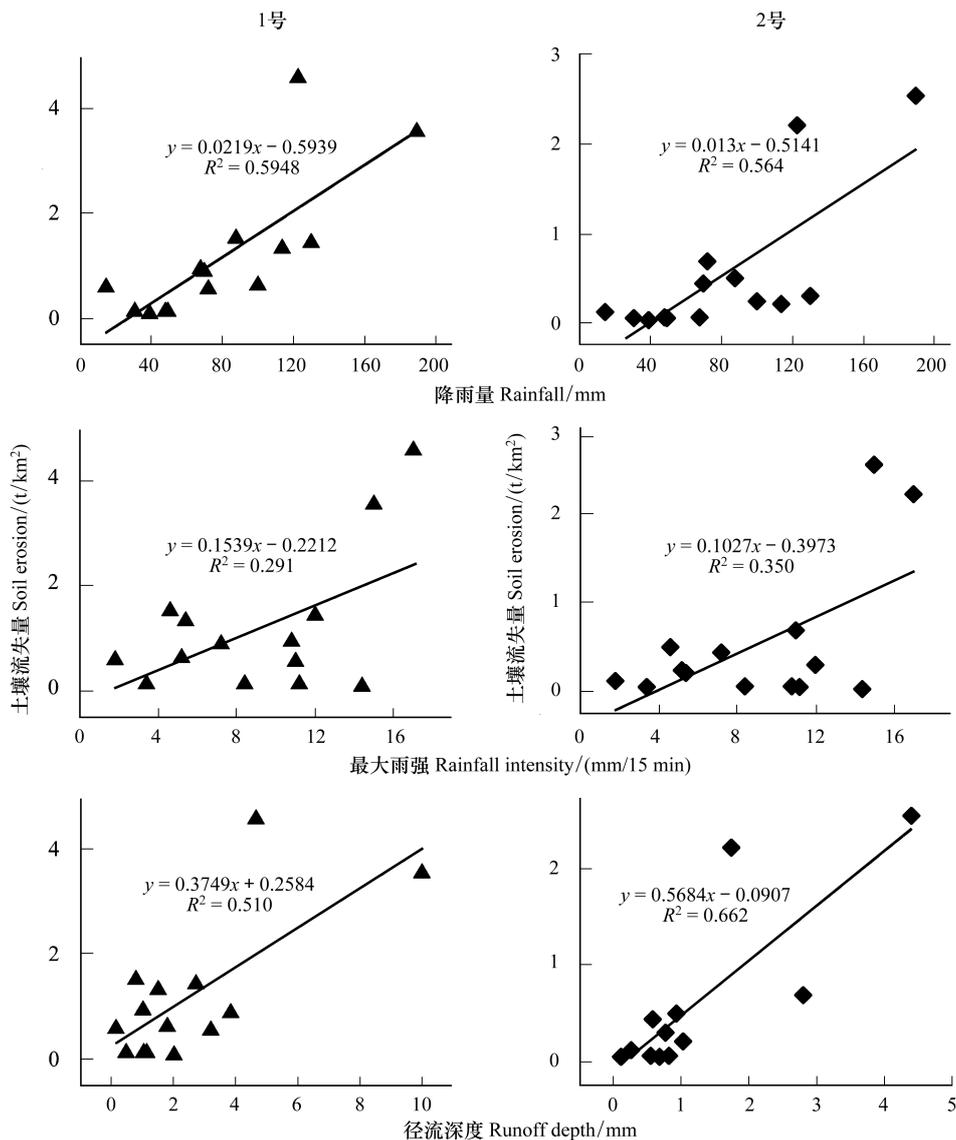


图 6 土壤侵蚀量与降雨量、雨强和径流深度的相关性

Fig.6 Correlation between soil erosion and precipitation, rainfall intensity and slope runoff depth

两径流小区 4—10 月产生了有效坡面径流,并导致明显的产沙。产沙的 7 个月中,两径流小区产沙量最小值均出现在 7 月,因为该月降雨量、地表径流深度都处于最低值,这与重庆的伏旱天气有关;土壤侵蚀最大量在 1、2 径流小区分别出现在 8 月和 5 月,是全年降雨量最高月份,且前期明显干旱。干旱使土壤疏松,力学强度降低、稳定性变差,突然的暴雨在坡面迅速产流,将疏松的土壤带走。

3.4 结论与讨论

喀斯特地区的隧道工程建设不仅降低了地下水位,改变地下水流场,也使坡面产流、壤中流产流和土壤侵

蚀过程受到影响。重庆观音峡背斜 20 多年隧道影响区地表径流系数增加 2.6 倍,而壤中流量减少为无隧道影响区的 31%。用氢氧同位素端元模型,认为受隧道影响区的坡面流和壤中流中降雨的贡献率均增大。地表径流量增加以及地表径流及壤中流中降水贡献率的增加,使降水和径流的侵蚀能力增强。同时,由于隧道影响区土壤含水率减少,土壤团聚体稳定性降低,以及土壤粒径的减小,使隧道影响区土壤的抗侵蚀能力降低。因此,隧道建设区土壤侵蚀模数增加了 2.2 倍。本研究为隧道建设对喀斯特地区土壤侵蚀的研究提供了新的思路 and 基础数据,但喀斯特地区特殊的地表、地下双层结构使降水和土壤不仅从地表流失,更多的可能从地下漏失^[13-17,22,24-25],但目前还没有找到合适的研究方法,这也将是今后的一个重点研究方向。

参考文献 (References):

- [1] Chen H S, Liu J W, Wang K L, Zhang W. Spatial distribution of rock fragments on steep hillslopes in karst region of northwest Guangxi, China. *CATENA*, 2011, 84(1/2): 21-28.
- [2] Wilcox B P, Taucer P I, Munster C L, Owens M K, Mohanty B P, Sorenson J R, Bazan R. Subsurface stormflow is important in semiarid karst shrublands. *Geophysical Research Letters*, 2008, 35(10): L10403.
- [3] 陈洪松, 杨静, 傅伟, 何菲, 王克林. 桂西北喀斯特峰丛不同土地利用方式坡面产流产沙特征. *农业工程学报*, 2012, 28(16): 121-126.
- [4] 李森, 魏兴璇, 张素红, 李红兵, 王明刚, 罗红波, 王金华. 典型岩溶山区土地石漠化过程—以粤北岩溶山区为例. *生态学报*, 2010, 30(3): 674-684.
- [5] 彭韬, 杨涛, 王世杰, 张信宝, 陈波, 汪进阳. 喀斯特坡地土壤流失监测结果简报. *地球与环境*, 2009, 37(2): 126-130.
- [6] 李晋, 熊康宁, 李晓娜. 中国南方喀斯特地区水土流失特殊性研究. *中国农学通报*, 2011, 27(23): 227-233.
- [7] 纪启芳, 张兴奇, 张科利, 杨勇, 杨光徽, 顾再柯. 贵州省喀斯特地区坡面产流产沙特征. *水土保持研究*, 2012, 19(4): 1-5.
- [8] 常勇, 姜光辉, 康彩霞, 于爽. 峰丛洼地坡面径流过程—以丫吉试验场为例. *水文*, 2010, 30(6): 19-23.
- [9] 杨芳, 王克勤, 延红卫. 尖山河流域不同植被类型坡面产流产沙量研究. *林业调查规划*, 2009, 34(1): 10-14.
- [10] Feeser I, O'Connell M. Fresh insights into long-term changes in flora, vegetation, land use and soil erosion in the karstic environment of the Burren, western Ireland. *Journal of Ecology*, 2009, 97(5): 1083-1100.
- [11] Liu J C, Shen L C, Wang Z X, Duan S H, Wu W, Peng X Y, Wu C, Jiang Y J. Response of plants water uptake patterns to tunnels excavation based on stable isotopes in a karst trough valley. *Journal of Hydrology*, 2019, 571: 485-493.
- [12] 徐宪立, 张科利, 庞玲, 孔亚平, 罗利芳. 青藏公路路堤边坡产流产沙规律及影响因素分析. *地理科学*, 2006, 26(2): 211-216.
- [13] 曹建华, 蒋忠诚, 杨德生, 童立强, 裴建国, 罗为群, 杨慧. 贵州省岩溶区水土流失、石漠化受岩溶环境制约. *中国水土保持*, 2009, (1): 20-23.
- [14] Jiang Z C, Lian Y Q, Qin X Q. Rocky desertification in Southwest China: impacts, causes, and restoration. *Earth-Science Reviews*, 2014, 132: 1-12.
- [15] 曹建华, 鲁胜利, 杨德生, 蒋忠诚, 康志强. 西南岩溶区水土流失过程及防治对策. *中国水土保持科学*, 2011, 9(2): 52-56.
- [16] 张信宝, 王世杰, 曹建华, 王克林, 孟天友, 白晓永. 西南喀斯特山水土流失特点及有关石漠化的几个科学问题. *中国岩溶*, 2010, 29(3): 274-279.
- [17] 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. *地理学报*, 2012, 67(7): 878-888.
- [18] 刘方, 王世杰, 刘元生, 何腾兵, 罗海波, 龙健. 喀斯特石漠化过程土壤质量变化及生态环境影响评价. *生态学报*, 2005, 25(3): 639-644.
- [19] 苏跃. 喀斯特小流域土壤质量变化及其对水环境质量的影响[D]. 重庆: 西南大学, 2008.
- [20] 刘春, 杨静, 聂云鹏, 陈洪松, 付智勇. 典型喀斯特小流域水文水化学过程对旱季暴雨的响应. *地球与环境*, 2015, 43(4): 386-394.
- [21] 朱晓锋, 陈洪松, 付智勇, 王克林, 张伟, 徐勤学, 方荣杰. 喀斯特灌丛坡地土壤-表层岩溶带产流及氮素流失特征. *应用生态学报*, 2017, 28(7): 2197-2206.
- [22] 唐益群, 张晓晖, 周洁, 余恬钰, 杨坪, 王建秀. 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. *中国岩溶*, 2010, 29(2): 121-127.
- [23] 龚傲龙, 王保田, 刘磊, 桑伟. 广西石漠化地区坡面土壤团聚体稳定性研究. *科学技术与工程*, 2015, 15(16): 22-27.
- [24] 周念清, 李彩霞, 江思珉, 唐益群. 普定岩溶区水土流失与土壤漏失模式研究. *水土保持通报*, 2009, 29(1): 7-11.
- [25] 蒋忠诚, 罗为群, 邓艳, 曹建华, 覃星铭, 李衍青, 杨奇勇. 岩溶峰丛洼地水土漏失及防治研究. *地球学报*, 2014, 35(5): 535-542.