

DOI: 10.11766/trxb201609050206

喀斯特坡地裸露心土层产流产沙模拟研究*

严友进¹ 戴全厚^{1†} 伏文兵^{1, 2} 靳丽¹ 兰雪^{1, 3}

(1 贵州大学林学院, 贵阳 550025)

(2 贵州晟泰工程咨询有限公司, 贵阳 550002)

(3 贵州师范大学地理与环境科学学院, 贵阳 550001)

摘要 通过人工降雨探索表土剥离后喀斯特坡地侵蚀产沙特征及机制, 为该地区开展地下水流失研究及指导水土流失防治工作具有重要的理论和现实意义。试验采用钢槽装填土石模拟喀斯特地区表土剥离后坡地的“二元结构”, 通过人工模拟降雨揭示了雨强(30、50、80 mm h⁻¹)、坡度(10°、15°、20°、25°)和地下孔(裂)隙度(1%、2%、3%、4%、5%)对坡地土壤侵蚀的影响, 并在此基础上进一步讨论了各因子对剥离表土后的坡地造成的影响。结果表明:(1)表土剥离后地下漏失的隐蔽性增强, 小雨强的坡地土壤侵蚀容易被忽视, 30、50 mm h⁻¹雨强条件下, 仅当坡地坡度≥15°时地表出现径流, 坡地侵蚀产沙以地下流失为主, 地下产流量、产沙量随雨强先增大后减小。(2)喀斯特地区坡地土壤侵蚀治理不应只重视地表水土流失, 更应关注垂直方向上的土壤侵蚀——地下漏失, 低坡度(坡度≤15°)条件下, 地表近乎无产流产沙, 坡地侵蚀产沙集中在地下孔(裂)隙, 而坡度为20°、25°的坡地, 其地下产沙比重仍分别高达0.85~0.97、0.59~0.84。剥离表土后的坡地水土保持应从地表、地下两个方向进行, 避免由地下漏失引起的岩溶塌陷。增大地下孔(裂)隙度能显著提高地下产流量和产流系数, 并促进地下孔裂隙产沙量和产沙比重的增加。

关键词 表土剥离; 土壤侵蚀; 地下漏失; 喀斯特坡面

中图分类号 S157.1 **文献标识码** A

开发建设过程中通常会对被占用的林地或耕地进行表土剥离, 从而用作场地的绿化, 而余下的裸露土层将在建设过程中按照施工进度进行建筑覆盖、地表硬化或长期搁置。表土剥离指对适合耕作的表层土壤进行剥离用于土地复垦或场地绿化等, 表土层包括耕作层与犁底层^[1]。近年来, 工业园区建设已成为推动西南喀斯特地区各省市经济发展的重要力量, 进行工业园区建设成为该区域的一大热点。该地区土地资源短缺, 为满足工业园区用地

需求, 各地政府推出向山要地战略, 提出“工业梯田”建设模式。由此不断增加的开发建设项目使得大面积的坡地地表土壤被剥离, 导致大量的裸地处于无植被覆盖状态, 在降雨的侵蚀作用下发生水土流失。同时, 该地区降雨充沛、雨季漫长, 延缓施工进度, 不仅导致土地裸露时间延长, 也为土壤侵蚀提供了驱动力。

西南喀斯特地区广泛分布的碳酸岩在第三纪以来的地质作用和强烈的溶蚀作用下, 形成由溶

* 国家重点研发计划课题(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)资助 Supported by the National Key Research and Development Plan (No.2016YFC0502604), the National Natural Science Foundation of China (No.41671275, 41461275), the Major Project of Guizhou Province (Qian KeHe Major Project Zi [2016] 3022)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: qhdairiver@163.com

作者简介: 严友进(1990—), 男, 贵州毕节人, 博士研究生, 主要从事土壤侵蚀研究。E-mail: 2824561677@qq.com

收稿日期: 2016-09-05; 收到修改稿日期: 2017-01-14; 优先出版日期: 2017-02-23

缝、岩溶裂隙、落水洞等组成的地下岩溶管道系统，与地表形成双层空间开放的水文系统^[2-3]。特殊的“二元结构”使得喀斯特地区水土流失呈现出地表和地下两个部分的流失，形成紧密联系的地上流失和地下漏失^[4]。相关研究表明，地表及地下孔（裂）隙是喀斯特地区水土流失的重要途径及组成部分^[5]，李德文等^[6]的研究中报道了喀斯特地区地下水垂直作用方式引起的岩溶裂隙的开放是影响该地区地下水流失的主要原因之一，张信宝等^[7]认为地下裂隙和暗河的发育程度是影响土壤地下流失速率的主要因素。当前关于该地区地下流失已有了一定的研究，诸如小流域地下流失观测^[8]、试验模拟坡耕地地表地下土壤侵蚀机理研究^[9]、岩溶槽谷区山坡土壤漏失的研究^[10]等。由于喀斯特地区土壤与碳酸岩之间缺少风化母质的过渡层（C层），在强烈的降水入渗作用下岩土界面易产生侧向径流，导致岩土界面土层根基松散^[11]，坡地有机质多蓄积在表土层（A层），剥离表土层后余下的心土层（B层）有机质含量缺乏，土壤抗蚀抗冲能力降低^[12]。因此，表土剥离后坡地的土壤侵蚀特征必然会有所变化。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

雨探索降雨条件下剥离表土后坡地的土壤侵蚀特征，为防治该地区水土流失提供重要的理论依据。

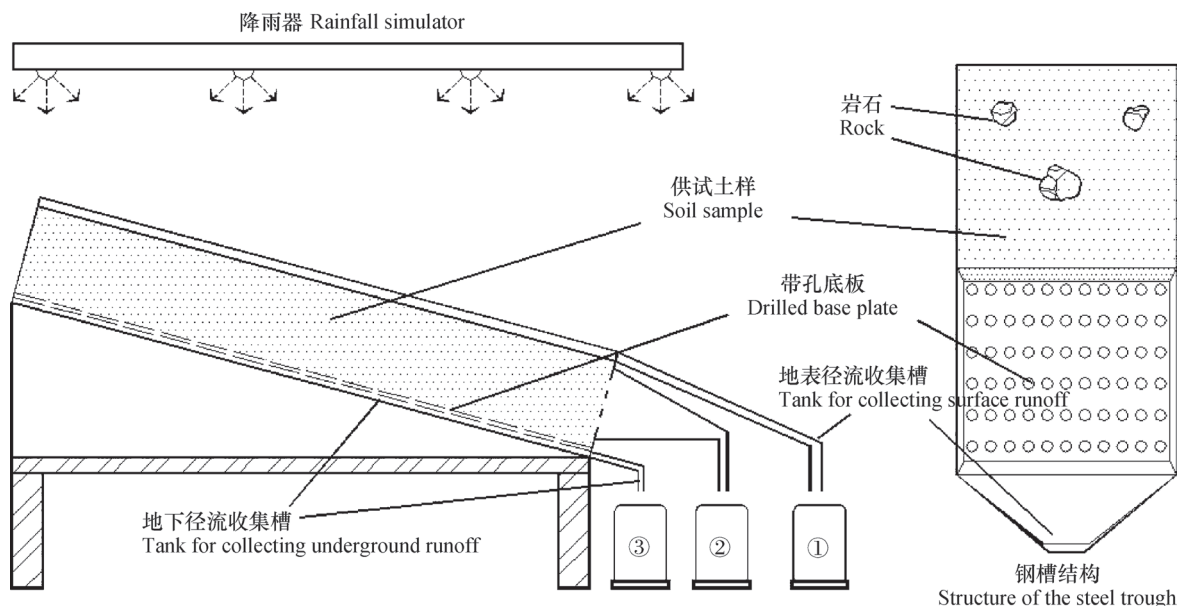
1 材料与方 法

1.1 试验设计

试验采用自主设计的试验钢槽模拟喀斯特坡地上、地下“二元结构”，采用室内人工模拟降雨方法，探讨剥离表土后坡地土壤侵蚀特征。根据对贵州省贵阳市花溪区、南明区和安顺市普定县的30个坡地样地及32个开挖的岩石剖面的调查结果，试验设置坡面岩石裸露率为10%，坡度设置4个水平（10°、15°、20°、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100 mm h⁻¹以下，同时根据张文源等^[13]研究得到的喀斯特黄壤区坡耕地侵蚀性降雨在9.6~10.2 mm h⁻¹之间和课题组前期的研究成果^[2]，试验雨强设置3个水平（30、50、80 mm h⁻¹），进行交叉试验，每个处理重复2次，共计120场降雨。

1.2 试验设备及材料

试验设备由试验钢槽与降雨设备组成，其中试验钢槽为自主设计的变坡钢槽（专利编号



注：①地表径流，②壤中流，③地下径流 Note: ①Surface runoff, ②Soil runoff, ③Underground runoff

图1 降雨设备及试验钢槽示意图

Fig. 1 Sketch of the apparatus of the simulation experiment

ZL201010545602.7) (图1)^[14], 规格为长4.0 m、宽1.5 m、深0.35 m。钢槽的坡度调节范围为0~45°。钢槽底部由两块可活动的底板组成, 每块底板上均匀分布有192个圆孔(直径d=5 cm), 通过调节两块底板间孔洞重合面积进行调节孔隙度大小, 孔隙度调节范围为0~8%。钢槽设有地表、地下孔(裂)隙流收集槽, 用于收集地表径流与地下径流。降雨设备由降雨器、雨量计、水泵及控制器组成, 采用西安清远测控技术有限公司生产的QYJY-501型便携式全自动下喷式人工模拟降雨机。降雨器降雨高度6 m, 有效降雨面积为6.5 m×6.5 m,

均匀度>85%, 降雨设备的调节精度为7 mm h⁻¹, 调节变化时间<30 s, 降雨强度可由控制器自动控制或手动控制, 降雨历时任意可调。

试验材料取自贵阳市花溪区洛平村(26° 24' 41.4396" N, 106° 39' 53.4384" E), 从刚开发建设被剥离表土层(A层)的典型喀斯特坡地采集心土层(B层), 由碳酸性岩发育形成的石灰性黏壤土作为供试土壤。试验供试土样的处理方式: 在室内风干后挑出杂质, 再用木棍将土磨碎放置阴处备用, 试验不对土样进行过筛处理。供试土样理化性质见表1。

表1 土壤理化性质

Table 1 Soil physico-chemical properties

土壤类型 Soil type	粒径组成 Particle size composition (%)					容重 Bulk density (g cm ⁻³)	有机质 Organic matter (g kg ⁻¹)
	<0.001 mm	0.001~0.005 mm	0.005~0.01 mm	0.01~0.05 mm	0.05~1 mm		
石灰土 Lime soil	17.41	24.22	28.47	19.76	10.14	1.25	44.07

1.3 试验方法

(1) 降雨步骤。喀斯特坡地地表产流以蓄满产流为主^[15], 试验开始先将钢槽坡度调至0°, 进行小雨(雨强=15 mm h⁻¹)沉降, 使土壤水分充分饱和, 待土壤地下稳定产流后, 滴干重力水。再将雨强、坡度调至试验设计水平, 进行降雨试验。降雨试验开始时进行计时, 每场降雨历时90 min, 每10 min记为一次测试时段。试验通过在地表径流与地下孔(裂)隙的收集口处放置带刻度的塑料容器(图1)分别收集、测定各时段内地表、地下部分的产流量与产沙量。泥沙量的测定方法为将各测定时段内的水样通过中速定量滤纸(孔径为30~50 μm)滤出水样中的泥沙, 将滤出的泥沙样转移至100 ml的烧杯中, 并放入105 °C烘箱烘干, 用电子天平(精度0.01 g)称重。

(2) 土层模拟。根据野外实测资料, 土壤分3层装填, 每10 cm为1层, 自上而下各层土壤紧实度平均值为410、760、1070 kPa。第一层土壤表面与埋置在坡面上碳酸盐岩石所标记的露头线水平, 并用工具平整土壤表面。在钢槽与土壤接触界面用平板将土压实, 以便减小边缘效应影响。每场降雨结束后更换钢槽内全部的土样再开始下一场降雨, 每

场降雨使用的土样均为同一时期采集的土样。

(3) 岩石裸露率。岩石裸露率模拟步骤为: ①先将实验钢槽的坡度调至设计水平; ②将碳酸盐岩随机排列在钢槽中, 采集岩石露头30 cm区域的面积 S_i , 将露头面积调至钢槽面积的10%; ③采集坡面垂直影片, 通过ArcGIS校核坡面岩石裸露率。

$$Y = \frac{\sum S_i}{S_0} \% \quad (1)$$

式中, Y 为岩石裸露率, %; S_i 为各岩石露头30 cm区域的面积, m²; S_0 为底板的面积, 6 m²。

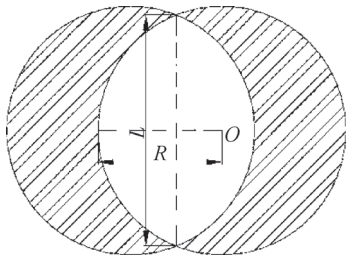
(4) 地下孔(裂)隙度(P)。地下孔(裂)隙度是指地下单位投影面积的岩层上, 受地质作用或溶蚀作用等外营力作用形成的能够漏水漏土的孔(裂)缝的面积百分比^[16-17]。地下孔(裂)度模拟及测定步骤为: ①先计算出设计水平下地下孔(裂)隙度的孔洞的重合面积; ②计算出孔洞重合区域的最大弦长; ③在装填供试土样前, 通过试验钢槽摇臂移动钢槽底部其中一块带孔底板, 改变两底板间孔洞重合区面积大小来调节地下孔(裂)隙度大小, 用游标卡尺测定、控制两底板间孔洞重合区弦长大小。地下孔(裂)隙度计算方

法见公式 (2)、(3) 和图2。

$$S_{\text{孔}} = \frac{\pi R^2 \arcsin \frac{L}{R}}{90} - 2L \sqrt{R^2 - \frac{L^2}{4}} \quad (2)$$

$$P = \frac{S_{\text{孔}}}{S_0} \% \quad (3)$$

式中, P 为孔(裂)隙度, %; $S_{\text{孔}}$ 为孔洞重合区域的面积, m^2 ; S_0 为底板的面积, 6 m^2 ; π 为圆周率, 取3.14; R 为底板孔洞半径, 0.025 m ; L 为孔洞重合区域最大弦长, m 。



注: O 为圆心, R 为半径, L 为弦长 Note: O stands for center of the circle, R for radius, L for chord length

图2 地下孔(裂)隙度计算示意图^[18]

Fig. 2 Sketch for calculation of underground pores and fissures

1.4 数据处理

试验数据采用Excel2013和SPSS18.0进行统计分析。文中雨强、坡度及地下孔(裂)隙度的参照水平分别为 30 mm h^{-1} 、 10° 、1%。

2 结 果

2.1 坡地产流历时对各影响因素的响应

在90 min的降雨历时内, 地表出现产流后在降雨过程中无中断现象, 地下孔(裂)隙产流时长均为90 min。由产流历时变化特征(图3)可见, 地表产流时长随雨强、坡度和地下孔(裂)隙度条件变化有明显的差异。 30 mm h^{-1} 雨强下, 仅 20° 和 25° 坡的地表有径流产生, 同时随地下孔(裂)隙度的增大, 20° 坡的地表产流时间较 25° 的产流时间迟40~60 min; 50 mm h^{-1} 雨强下, 总体上表现为地表产流时间随坡度增大而提前, 同时 15° 和 20° 的地表产流历时总体上随地下孔(裂)隙度的增大而递减; 80 mm h^{-1} 雨强下, 除地下孔(裂)隙度为1%, 坡度为 10° 的地表产流时长为80 min, 其他各坡度和地下孔(裂)隙度条件的地表产流时长均

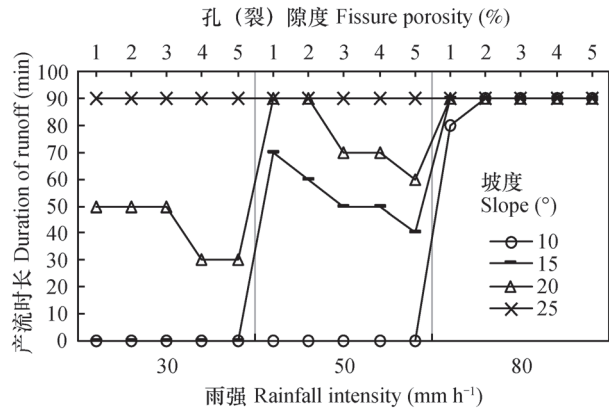


图3 地表产流历时变化特征

Fig. 3 Temporal variation of surface runoff

为90 min。结果表明, 在短时间内的降雨过程中剥离表土后的喀斯特坡地在低雨强(30°)和低坡度(10° 、 15°)条件下, 降雨主要从组成喀斯特“二元结构”的地下岩溶裂隙系统流失; 同时, 地下孔(裂)隙的存在对地表产流历时有削弱作用。其原因在于喀斯特地下岩溶管道的存在, 使得降雨量须大于土壤入渗量和地下孔(裂)隙径流量的基础上才能产生地表径流, 雨强的增大使得单位时间的降雨量增加, 从而缩短了地表出现产流的时间; 地下孔(裂)隙度的增大为地下径流提供了更多的流失通道, 从而导致形成地表径流的时间延后; 一定坡度范围内, 坡度增大能够降低入渗量, 提高地表径流流速, 使地表产生径流。

2.2 雨强与地下孔(裂)隙度对产流产沙的影响

分析雨强和孔(裂)隙度对地表、地下产流的影响(表2)可知, 雨强对地表、地下产流影响明显, 30 、 50 mm h^{-1} 雨强条件下地表不产流; 80 mm h^{-1} 雨强下径流在坡地空间上分配以地表径流为主, 地表径流系数在 $0.59 \sim 0.64$ 之间, 随着地下孔(裂)隙度的增大, 地表径流系数呈减小变化趋势, 地表径流系数与地下径流系数的差值从 0.28 减小至 0.18 。比较3个雨强条件下地下径流量变化特征可见, 地下径流量随雨强的增大呈先增大后减小的变化趋势, 其中 50 mm h^{-1} 雨强下的地下径流量最大, 30 mm h^{-1} 的次之, 80 mm h^{-1} 的最小。可见在 50 与 80 mm h^{-1} 雨强之间存在临界雨强, 使得地下径流量、径流模数均随雨强增大发生变化。地下孔(裂)隙度的增大使得地下岩溶裂隙系统容纳径流的体积增大, 单位时间内更多的降雨从地下孔(裂)隙流失。

表2 地表、地下产流随雨强和地下孔（裂）隙度的变化特征（坡度=10°）

Table 2 Spatial variation of surface and underground runoff with rain intensity and underground fissure porosity (slop gradient=10°)

雨强 Rainfall intensity (mm h ⁻¹)	孔（裂）隙度 Porosity (%)	地表 Surface		地下 Underground	
		径流量 Runoff rate (L)	径流系数 Runoff coefficient	径流量 Runoff rate (L)	径流系数 Runoff coefficient
30	1	0.0	0.00	223.8	1.00
	2	0.0	0.00	230.7	1.00
	3	0.0	0.00	226.8	1.00
	4	0.0	0.00	236.8	1.00
	5	0.0	0.00	248.9	1.00
50	1	0.0	0.00	260.2	1.00
	2	0.0	0.00	268.7	1.00
	3	0.0	0.00	279.4	1.00
	4	0.0	0.00	280.0	1.00
	5	0.0	0.00	291.2	1.00
80	1	356.9	0.64	198.8	0.36
	2	346.5	0.63	204.4	0.37
	3	348.2	0.62	209.2	0.38
	4	336.5	0.61	216.9	0.39
	5	329.8	0.59	225.1	0.41

表3 地表、地下产沙随雨强和孔（裂）隙度的变化特征（坡度=10°）

Table 3 Spatial variation of surface and underground sediment yield with rain intensity and underground fissure porosity (slop gradient=10°)

雨强 Rainfall intensity (mm h ⁻¹)	孔（裂）隙度 Porosity (%)	地表 Surface		地下 Underground	
		侵蚀量 Erosion rate (g)	输沙率 Sediment transport rate (g min ⁻¹)	侵蚀量 Erosion rate (g)	输沙率 Sediment transport rate (g min ⁻¹)
30	1	0.0	0.00	98.9	1.10
	2	0.0	0.00	106.2	1.18
	3	0.0	0.00	110.7	1.23
	4	0.0	0.00	120.7	1.34
	5	0.0	0.00	139.7	1.55
50	1	0.0	0.00	147.6	1.64
	2	0.0	0.00	158.2	1.76
	3	0.0	0.00	173.5	1.93
	4	0.0	0.00	174.3	1.94
	5	0.0	0.00	184.2	2.05
80	1	545.5	6.06	111.1	1.23
	2	524.8	5.83	116.3	1.29
	3	535.5	5.95	123.4	1.37
	4	511.2	5.68	133.7	1.49
	5	495.5	5.51	141.7	1.57

坡度为 10° ，雨强为30和 50 mm h^{-1} 条件下地表无产流（表3），地表输沙率为0，侵蚀产沙以地下产沙为主（表3）。雨强增大至 80 mm h^{-1} 时，坡地侵蚀产沙以地表产沙为主，同一条件下地表输沙率为地下输沙率的3.50倍~4.91倍。随着雨强的增大，地下产沙量呈现先增大后减小的变化趋势，该变化特征与地下产流量变化特征一致。地下输沙模数与地下径流深呈良好的线性正相关关系（ $R^2=0.7563$ ）。地下径流深与地下输沙模数呈极显著正相关关系（ $p < 0.01$, $r=0.876$ ）。这一结果表明径流是土壤颗粒运移的载体，地下孔（裂）隙侵蚀产沙与地下径流相关。喀斯特坡地地下流失主要是土壤颗粒受径流的冲击和携裹作用向下运移流失。可见，通过控制降雨能够有效降低土壤的地下漏失。由表3可知，地下孔（裂）隙度对地表、地下侵蚀产沙有显著性影响，增大地下孔（裂）隙度能够为泥沙提供更多的通道产生地下流失，同时由于地下孔（裂）隙度的增大降低了地表径流量，使得地表侵蚀产沙量减少。

2.3 坡度与地下孔（裂）隙度对产流产沙的影响

坡度影响坡面径流的渗透量、径流量和冲刷能力，间接影响坡地的侵蚀方式和强度。地下径流系数为地下孔（裂）隙总径流量与坡地总径流量的比值，其值可以反映降雨过程中坡地径流在地表与地下孔裂隙间的分配情况。由地下径流系数随坡度、地下孔（裂）隙度的变化特征（图4）可见，坡度对地下产流影响显著，坡度为 10° 与 15° 时地下产流系数均为1，说明该坡度条件下坡地产流以地下孔（裂）隙产流为主而地表无产流行为。当坡度增大至 20° 时地下径流系数开始减小，降幅在3.44%~14.74%之间，但该坡度下的地下径流系数仍高达85.26%~96.56%。坡度从 20° 增大至 25° 时，地下径流系数急剧减小，与 20° 的地下径流系数相比，降幅达20.16%~27.70%。这一结果表明 30 mm h^{-1} 雨强下地表产流存在临界坡度，坡度值在 15° ~ 20° 之间，降雨入渗量随坡度的增大而减小。从图4可以看到，坡度为 10° 和 15° 条件下地下孔（裂）隙度对地下径流系数无显著性影响，坡度增大至 20° 、 25° 时，各地下孔（裂）隙度间的地下径流系数存在显著性差异（ $p < 0.05$ ）。结果表明，坡度 $\leq 15^\circ$ 的剥离表土后的喀斯特坡地径流均从地下孔（裂）隙流失；随着坡度（ 15° ~ 25° ）增大，地下孔（裂）隙径流系数减小，坡度越大地下

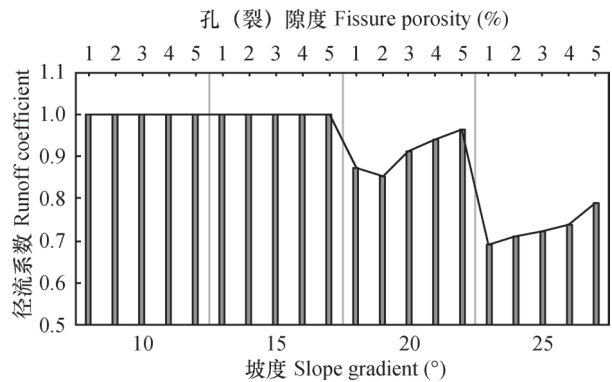


图4 地下径流系数随坡度、地下孔（裂）隙度的变化特征（雨强= 30 mm h^{-1} ）

Fig. 4 Spatial variation of underground runoff coefficient with slope gradient and underground fissure porosity (rainfall intensity= 30 mm h^{-1})

孔（裂）隙径流所占的比例越小；低坡度条件下地下孔（裂）隙产流受地下孔（裂）隙度影响不显著性，坡度为 20° 、 25° 时，降低地下孔（裂）隙度能够促进地表径流的产生而减少降雨从地下孔（裂）隙流失。

通过比较地表、地下侵蚀产沙量占坡地总产沙量的比重可见（图5），地表、地下侵蚀产沙量随坡度变化呈阶梯状变化，在 10° 、 15° 坡度下地表无侵蚀产沙， 20° 坡度条件下地表出现侵蚀产沙，其产沙比重仅在0.03~0.15之间，坡度增大至 25° 时，地表侵蚀产沙比重增大至0.16~0.41，与 20° 坡度相比，增幅达96.21%~503.02%。前文分析了 20° 和 25° 坡度条件下地下径流受地下孔（裂）隙度影响显著，同时侵蚀产沙与径流之间存在显著正相关关系。同时图5反映出地下孔（裂）隙产沙比重随坡度及地下孔（裂）隙度的变化特征与地下孔（裂）隙径流系数的变化特征一致，地下孔（裂）隙径流系数与地下孔（裂）隙产沙比重呈极显著正相关关系（ $p < 0.01$, $r=0.948$ ）。地表与地下（裂）隙产沙比重随地下孔（裂）隙度的增大呈相对的变化趋势，增大地下孔（裂）隙度为泥沙漏失进入地下岩溶裂隙系统提供了更多的地下通道，从而导致地下孔（裂）隙产沙比重随地下孔（裂）隙度的增大而增大，地下产沙比重与地下孔（裂）隙度之间存在极显著正相关关系（ $p < 0.01$, $r=0.536$ ）。

径流含沙量是坡地土壤侵蚀研究中的一个重要参数，其能够很好地反映出坡地土壤侵蚀过程特

征^[19]。随降雨历时的延长, 地下径流含沙量呈线性减小, 地下径流含沙量总体上随降雨历时的延长而减小。各坡度条件下地下径流含沙量随降雨历时的变化特征有所差异, 随坡度的增大, 各坡度在10 min降雨时段的含沙量分别为 0.82 ± 0.12 、 0.56 ± 0.11 、 0.51 ± 0.05 和 $0.44 \pm 0.08 \text{ g L}^{-1}$, 表明坡度越大地下径流初始含沙量越小。比较各坡度条件下的地下径流含沙量的减小变化速率可见, 其大小随坡度的增大而减小, 各坡度的减小速率分别为 6.7×10^{-3} 、 4.1×10^{-3} 、 4.0×10^{-3} 和 2.9×10^{-3} , 而各坡度在90 min的降雨时段内地下含沙量均趋于 $0.2 \sim 0.3 \text{ g L}^{-1}$ 之间。坡度增大降低了地下径流的含沙量, 同时随着降雨历时的延长, 地下含沙量不断减小最终的结果是导致地下孔(裂)隙空间被土壤颗粒充满, 在径流的作用下地下孔(裂)隙中充填的泥沙呈流塑态以蠕移的形式发生地下漏失^[7]。

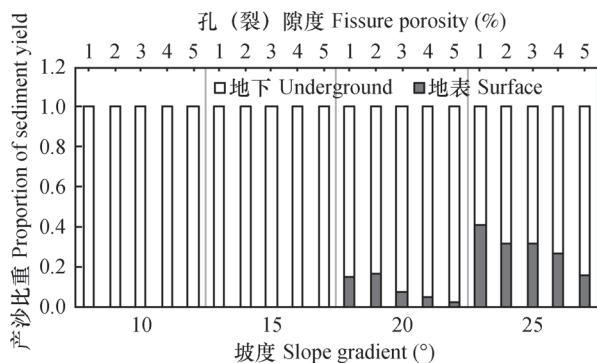


图5 地表、地下产沙比重随坡度和地下孔(裂)隙度的变化特征

Fig. 5 Spatial variation of surface and underground sediment in proportion with slope gradient and underground fissure porosity

2.4 产流产沙的影响因素

坡地产流产沙是一个受雨强、坡度及地下孔(裂)隙度等相互耦合作用的复杂过程, 不同影响因子和变量梯度均能对坡地产流产沙造成不同的结果。通过对地表、地下产流与各影响因子的关系进行偏相关分析(表4)可知, 雨强是影响地表产流的主要因素, 坡度因素次之, 孔裂隙度的影响最小。各因子对地下产流的影响程度依次是坡度 > 地下孔(裂)隙度 > 雨强。可见, 雨强是导致地表产流的最主要因素, 由于喀斯特坡地主要的产流为蓄满产流, 剥离表土后地表土层变薄, 降雨入渗土壤进入地下孔(裂)隙的垂直距离缩短, 使得地表需在降雨量大于入渗量的条件下方能有径流产生。坡

度增大则缩短了径流在水平方向上的运移距离, 使得上坡的径流仅需运移较短的距离即能在下坡蓄积使地表出现径流。地下孔(裂)隙度在大雨强(80 mm h^{-1})条件下由于降雨量已远超出渗量, 使得地下孔裂隙度在1%~5%范围内变化对地表径流的影响较小, 但增大地下孔(裂)隙仍能削弱地表产流。由于地下径流的产生是降雨入渗后土壤水进入地下孔(裂)隙产生的, 坡度增大使得壤中流能够在水平方向上运移更远的距离, 而在垂直方向上的运移距离缩短, 剥离表土后的坡地本身土层厚度相对减小, 受坡度影响减缓水分在垂直方向的运移是坡度增大地下孔(裂)隙径流系数减小主要原因。增大单位面积上地下孔(裂)隙的面积能够容纳和通过更多的土壤水。增大雨强能够提供更多的入渗量从而促使地下径流的形成, 而雨强增大到一定值(临界雨强 $50 \sim 80 \text{ mm h}^{-1}$ 之间)时, 在各因素的耦合作用下地表产生径流分担了部分或绝大部分的降雨量, 使得地下产流系数减小, 因此雨强增大对地下产流有一定的抑制作用, 但其在一定程度上也能促进地下径流量的增加。

从表5可见地表、地下产流量对地表、地下侵蚀量的影响最大, 其与地表、地下侵蚀量均呈极显著正相关关系。结合径流与各影响因子的偏相关分析表明, 雨强、坡度和地下孔(裂)隙度均是通过影响地表、地下产流进而影响地表、地下产沙。雨强对地下产沙量的作用关系异于其与地下产流量的作用关系, 可见雨强对地下产沙量的影响弱于其对产流量的影响, 但是雨强增大能够显著地促进地下产沙量。这是由于雨强增大使得地表土壤受到雨滴的击溅力增大, 土壤团聚体在雨滴击打下能够形成更多更小的土壤颗粒, 在径流的作用下发生垂直方向上的运移, 从而增加地下产沙量。

3 讨论

3.1 雨强对坡地产流产沙的影响

降雨是诱发喀斯特坡地发生土壤侵蚀的主要驱动力, 在一系列降雨过程中, 能产生土壤流失的降雨称为侵蚀性降雨^[20], 魏兴萍等^[10]通过监测岩溶槽谷区坡耕地(坡度 $\leq 10^\circ$)径流小区得到的结果表明喀斯特坡地侵蚀性降雨强度为 25 mm h^{-1} , 而本研究中坡度为 10° 条件下的地表侵蚀性降雨在 $50 \sim 80 \text{ mm h}^{-1}$ 之间。同时, 本研究中地下径流量

表4 地表、地下产流与各影响因子的相关性

Table 4 Correlation analysis of surface and underground runoff with various affecting factors

类型 Type	雨强 Rainfall intensity	坡度 Slope gradient	孔(裂)隙度 Fissure porosity
地表径流 Surface runoff	0.937**	0.511**	-0.105
地下径流 Underground runoff	-0.485**	-0.702**	0.537**

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 Note: *Correlation is significant at 0.05 level, ** Correlation is significant at 0.01 level

表5 地表、地下侵蚀量与各影响因子的相关性

Table 5 Correlation analysis of surface and underground erosion rate with various affecting factors

类型 Type	雨强 Rainfall intensity	坡度 Slope gradient	孔(裂)隙度 Fissure porosity	产流量 Runoff amount
地表侵蚀量 Surface erosion rate	0.922**	0.219*	-0.074	0.991**
地下侵蚀量 Underground erosion rate	0.277*	-0.537**	0.407**	0.969**

和产沙量随降雨强度的变化特征与杨智等^[9]通过人工降雨试验研究基岩裸露率为50%的喀斯特坡面土壤侵蚀特征得到的结果相似,在30~80 mm h⁻¹雨强范围内地下径流量和产沙量均随降雨强度的增大呈先增大后减小的变化趋势。可见剥离表土层对坡地土壤侵蚀影响与增大地表基岩裸露率对坡地土壤侵蚀的影响一致。这主要是由于表土层具有一定的蓄水功能,表土剥离后坡地土壤缺乏表土层缓冲作用,雨水入渗后直接由心土层进入地下(孔)裂隙;同时,表土层剥离后使原先土层以下的岩石出露,而缺乏底土层的岩土界面也更容易成为径流向下游流失的通道,魏兴萍等^[21]的研究中也提出岩石裸露是导致喀斯特地区发生地下漏失的重要原因。本研究通过模拟表土剥离后喀斯特坡地的“二元结构”,以人工降雨为手段,初步探索了降雨条件下表土剥离后喀斯特坡地的产流产沙特征,而关于土壤与岩石之间水分和泥沙运移的过程或机理等仍需进一步的研究。

3.2 坡度对坡地产流产沙的影响

喀斯特地区地形起伏大,在开发建设过程中不可避免的形成较多的裸露边坡,甚至高陡边坡,由于该部分往往受工程特性、雨季等影响而缺乏相应的防护和治理措施,使之成为新的水土流失源

地^[22]。通过分析坡度对坡地产流产沙的影响,有助于开展相应的治理措施。本研究中,增大坡度能够显著性缩短地表产流时间,提高地表径流系数和产沙比重,这与Zhao等^[23]研究得到土壤侵蚀率在5°~25°的坡度范围内随坡度增大而增大的结果相似。相关研究表明,坡地土壤侵蚀存在临界坡度,在某一坡度范围内侵蚀量随坡度的增大而增加,超过该临界值时侵蚀量则随坡度的增大呈现减小趋势^[24],本试验中30 mm h⁻¹雨强下的降雨地表产流产沙的临界坡度为15°,坡度≤15°条件下,地表无侵蚀产沙,坡地土壤侵蚀以地下漏失为主,坡度在15°~25°范围内地下产沙比重随坡度的增大而减小。这表明低坡度下地下漏失是坡地水土流失的主要方式。袁应飞等^[25]以坡耕地表土为供试土样研究喀斯特坡耕地坡地土产流产沙特征得到30 mm h⁻¹雨强下,坡度为20°的坡地地表无产流产沙,而本研究中坡度为20°的坡地地表产沙比重为3%~15%,这主要是由于表土剥离后余下的心土层土壤结构变差,土壤持水能力减弱、土壤抗蚀性降低^[26],在雨强条件相同时,地表土壤颗粒容易被雨滴溅散进入土壤孔隙,从而减小地表糙率,使径流流速增强,从而阻碍降雨的入渗,减少地下孔(裂)隙径流,而径流为泥沙的分散、运移提供了

动力和载体^[27]。

3.3 地下孔（裂）隙度对坡地产流产沙的影响

喀斯特地区地下岩溶裂隙系统的存在是导致该地区坡地水土发生垂直流失的主要原因^[28]。Jones^[29]在1965年的研究中证实了喀斯特地区地下漏失的存在。曹建华等^[30]研究认为喀斯特绝大部分的地下漏失是泥沙通过短距离的坡面运移从低洼处的岩溶孔洞进入地下岩溶裂隙系统。陈洪松等^[31]通过对喀斯特坡地野外径流小区定点监测，获得次降雨条件下地表产流系数 $< 5\%$ 。本研究中地下产流量、产沙量与地下孔（裂）隙度呈正相关关系，贾金田等^[32]通过对喀斯特坡地基岩出露深度对土壤水分格局的研究表明坡地基岩裂隙能够加速地表水的下渗流失，彭旭东等^[33]通过人工降雨研究喀斯特坡耕地土壤侵蚀特征也得到了相同的研究结果。这主要是由于构造作用和溶蚀作用形成的地下岩溶裂隙系统是喀斯特地区发生地下流失的流失通道^[34]，增大地下孔（裂）隙度使地下流失通道增加，从而能够通过和容纳更多的径流和泥沙。胡奕等^[35]对喀斯特坡耕地土壤侵蚀影响因子的研究表明，与地下孔（裂）隙度相比，雨强是影响喀斯特坡耕地地下产流最主要的因素，而本研究中则得到相反的结果，相较于雨强，地下孔（裂）隙度对地下产流和产沙作用效果更大。可见，表土剥离后的坡地更容易发生地下漏失，而这也正是导致喀斯特地区容易出现岩溶塌陷现象的主要原因。

本试验是在模拟坡地二元结构的基础上，通过人工模拟降雨得到了在降雨条件下表土剥离后坡地的产流、产沙在地表和地下的分配特征。试验模拟结果与自然真实情况存在一定的差异，主要体现在：①试验通过控制土层容重模拟坡地土壤特征，由于回填的土样无法完全模拟自然状态土壤结构，一定程度上改变了原有的土壤结构，使得土壤入渗速率增大；②岩土界面的存在一定程度上会加速径流入渗，也使得径流流失方向存在不确定性，本研究中岩石在钢槽内部，与自然状态下岩石分布的不规则形状存在一定的差异，使得试验得到的地下漏失量与实际流失量相比会有所偏大；③试验所模拟的“二元结构”中的地下孔（裂）隙是由布设在钢槽底部孔径均匀的孔洞组成，而自然界中地下孔（裂）隙结构复杂，且在土壤填充水分作用下，一般呈软塑态或流速态形式向下蠕移^[24]。因此，今

后研究工作中应加强试验模拟设计，并在野外开展典型坡地的校验研究。

4 结 论

大于 50 mm h^{-1} 雨强喀斯特坡地表土剥离后地表才开始出现侵蚀产沙，小于此雨强时坡地侵蚀产沙的主要方式为地下漏失。这意味着表土剥离后，小雨强下的降雨过程中坡地水土流失更多的以地下漏失方式流失，受地下漏失的隐蔽性和复杂性影响，使得该部分水土流失更容易受到忽视。坡度影响坡地产流、产沙在空间分配上的规律，增大坡度能够削弱地下产流系数和产沙比重。在雨强和地下孔（裂）隙的综合作用下，在 $15^\circ \sim 20^\circ$ 之间存在临界坡度使地表出现产流、产沙。基于此特点，开展水土流失防治工作时，控制坡度在临界坡度以上能够有效削弱隐蔽性强、防治难度大的地下漏失，使坡地侵蚀产沙比重向可控性大、防治较易的地表流失转变。地下孔（裂）隙是地下漏失的主要通道，其大小对地表侵蚀产沙具有一定的削弱作用，主要是通过促进径流泥沙从地下漏失进而影响坡地的侵蚀产流产沙特征。增大地下孔（裂）隙度能够显著地提高地下产流系数和产沙比重。因此，研发控制地下孔（裂）隙度技术对阻控地下漏失有着重要的作用，这也将是喀斯特地区防治水土流失的关键所在。

参 考 文 献

- [1] 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. 农业工程学报, 2013, 29 (23): 194—201
Tan Y Z, Han C L, Wu C F, et al. Patterns of topsoil stripping for planting use in foreign countries and its enlightenment for China (In Chinese). Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29 (23): 194—201
- [2] Dai Q, Liu Z, Shao H, et al. Karst bare slope soil erosion and soil quality: A simulation case study. Solid Earth, 2015, 6: 985—995
- [3] 刘方, 王世杰, 罗海波, 等. 喀斯特森林生态系统的小生境及其土壤异质性. 土壤学报, 2008, 45 (6): 1055—1062
Liu F, Wang S J, Luo H B, et al. Micro-habitats in karst forest ecosystem and variability of soils (In

- Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45 (6): 1055—1062
- [4] 凡非得, 王克林, 熊鹰, 等. 西南喀斯特区域水土流失敏感性评价及其空间分异特征. *生态学报*, 2011, 31 (21): 6353—6362
Fan F D, Wang K L, Xiong Y, et al. Assessment and spatial distribution of water and soil loss in Karst regions, southwest China (In Chinese). *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31 (21): 6353—6362
- [5] 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. *中国岩溶*, 2010, 29 (2): 121—127
Tang Y Q, Zhang X H, Zhou J, et al. The mechanism of underground leakage of soil in karst rocky desertification areas—A case in Chenqi small watershed, Puding, Guizhou Province (In Chinese). *Carsologica Sinica*, 2010, 29 (2): 121—127
- [6] 李德文, 崔之久, 刘耕年, 等. 岩溶风化壳形成演化及其循环意义. *中国岩溶*, 2001, 20 (3): 183—188
Li D W, Cui Z J, Liu G N, et al. Formation and evolution of Karst weathering crust on limestone and its cyclic significance (In Chinese). *Carsologica Sinica*, 2001, 20 (3): 183—188
- [7] 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. *地球与环境*, 2007, 35 (3): 202—206
Zhang X B, Wang S J, He X B, et al. Soil creeping in weathering crusts of carbonate rocks and underground soil losses on karst slopes (In Chinese). *Earth and Environment*, 2007, 35 (3): 202—206
- [8] 李晋, 熊康宁, 王仙攀. 喀斯特地区小流域地下水流失观测研究. *中国水土保持*, 2012 (6): 38—40, 76
Li J, Xiong K N, Wang X P. Observation of underground water and soil erosion in the small watershed of Karst area (In Chinese). *Soil and Water Conservation in China*, 2012 (6): 38—40, 76
- [9] 杨智, 戴全厚, 黄启鸿, 等. 典型喀斯特坡面产流过程试验研究. *水土保持学报*, 2010, 24 (4): 78—81
Yang Z, Dai Q H, Huang Q H, et al. Experimental study of runoff processes on typical karst slope (In Chinese). *Journal of Soil and Water Conservation*, 2010, 24 (4): 78—81
- [10] 魏兴萍, 谢世友, 张志伟, 等. 重庆南平镇岩溶槽谷区不同土地利用类型地表水土流失. *农业工程学报*, 2011, 27 (6): 42—46
Wei X P, Xie S Y, Zhang Z W, et al. Characteristics of surface soil erosion of karst valley in different land use types at Nanping in Chongqing (In Chinese). *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2011, 27 (6): 42—46
- [11] 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. *土壤学报*, 2005, 42 (3): 419—427
Long J, Jiang X R, Deng Q Q, et al. Characteristics of soil rocky desertification in the karst region of Guizhou Province (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2005, 42 (3): 419—427
- [12] 郑永春, 王世杰. 贵州山区石灰土侵蚀及石漠化的地质原因分析. *长江流域资源与环境*, 2002, 11 (5): 461—465
Zheng Y C, Wang S J. Geological cause of calcareous soil erosion and land rocky desertification in Karst area, Guizhou Province (In Chinese). *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2002, 11 (5): 461—465
- [13] 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. *生态环境学报*, 2014 (11): 1776—1782
Zhang W Y, Wang B T, Yang G X, et al. Erosive rainfall and characteristics analysis of sediment yield on Yellow Soil Area in Karst Mountainous (In Chinese). *Ecology and Environmental Sciences*, 2014 (11): 1776—1782
- [14] 戴全厚, 喻理飞, 杨智, 等. 一种用于研究坡面径流和地下孔裂隙流的模拟试验装置. *ZL201010545602.7*. 2012, 05, 02
Dai Q H, Yu L F, Yang Z, et al. A simulation test device for studying slope runoff and subsurface flow (In Chinese). *ZL201010545602.7*. 2012, 05, 02
- [15] 柴宗新. 试论广西岩溶区的土壤侵蚀. *山地学报*, 1989, 7 (4): 255—260
Chai Z X. Soil erosion in Karst area of Guangxi Autonomous Region (In Chinese). *Journal of Mountain Research*, 1989, 7 (4): 255—260
- [16] Dai Q, Peng X, Yang Z, et al. Runoff and erosion processes on bare slopes in the Karst Rocky Desertification Area. *Catena*, 2017, 152: 218—226
- [17] 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. *农业工程学报*, 2017, 33 (2): 131—140
Peng X D, Dai Q H, Li C L, et al. Effect of simulated rainfall intensities and underground pore fissure degrees on soil nutrient loss from slope farmlands in Karst Region (In Chinese). *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33 (2): 131—140
- [18] 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. *生态学报*, <http://www.cnki.net/kcms/>

- detail/11.2031.Q.20160802.1429.002.html
- Yan Y J, Dai Q H, Fu W B, et al. Runoff and sediment production processes on a Karst bare slope (In Chinese). *Acta Ecologica Sinica*, <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2031.Q.20160802.1429.002.html>
- [19] 王龙生, 蔡强国, 蔡崇法, 等. 黄土坡面细沟发育过程中含沙量与水动力学参数的关系. *水土保持学报*, 2013, 27 (5): 1—6
- Wang L S, Cai Q G, Cai C F, et al. The relationship between runoff sediment and hydrodynamic parameters of rill evolution process on the loess slope (In Chinese). *Journal of Soil and Water Conservation*, 2013, 27 (5): 1—6
- [20] 王万忠. 黄土地区降雨特性与土壤流失关系的研究 II——降雨侵蚀力指标R值的探讨. *水土保持通报*, 1983 (5): 62—64, 26
- Wang W Z. Study on the relations between rainfall characteristic and loss of soil in loess region (In Chinese). *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 1983 (5): 62—64, 26
- [21] 魏兴萍, 袁道先, 谢世友. 运用¹³⁷Cs与土壤营养元素探讨重庆岩溶槽谷区山坡土壤的流失和漏失. *水土保持学报*, 2010, 24 (6): 16—19, 23
- Wei X P, Yuan D X, Xie S Y. Study on soil erosion and loss on slope in karst mountain valley area of Chongqing valley with ¹³⁷Cs and soil nutrient elements (In Chinese). *Journal of Soil and Water Conservation*, 2010, 24 (6): 16—19, 23
- [22] 易仲强, 张习传, 陈小燕, 等. 贵州大中型水电工程水土流失特征和防治措施. *中国水土保持*, 2015 (3): 14—16
- Yi Z Q, Zhang X C, Chen X Y, et al. Characteristics of soil and water loss of large and medium-sized hydro-power engineering of Guizhou Province and prevention and control measures (In Chinese). *Soil and Water Conservation in China*, 2015 (3): 14—16
- [23] Zhao Q, Li D, Zhao M, et al. Effects of rainfall intensity and slope gradient on erosion characteristics of the red soil slope. *Stochastic Environmental Research & Risk Assessment*, 2015, 29 (2): 1—13
- [24] 杨维鸽, 郑粉莉, 王占礼, 等. 地形对黑土区典型坡面侵蚀—沉积空间分布特征的影响. *土壤学报*, 2016, 53 (3): 572—581
- Yang W G, Zheng F L, Wang Z L, et al. Effects of topography on spatial distribution of soil erosion and deposition on hillslope in the typical of black soil region (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2016, 53 (3): 572—581
- [25] 袁应飞, 戴全厚, 李昌兰, 等. 喀斯特典型坡耕地模拟降雨条件下的土壤侵蚀响应. *水土保持学报*, 2016, 30 (3): 24—28
- Yuan Y F, Dai Q H, Li C L, et al. Response of soil erosion in simulated condition rainfall on typical slope farmland in karst (In Chinese). *Journal of Soil and Water Conservation*, 2016, 30 (3): 24—28
- [26] 付允, 贾亚男, 蓝家程. 岩溶区不同土地利用方式土壤抗蚀性分析. *水土保持研究*, 2011, 18 (5): 5—9
- Fu Y, Jia Y N, Lan J C. Analysis of soil anti-erodibility of slope farmland in karst mountain area based on tillage erosion (In Chinese). *Research of Soil and Water Conservation*, 2011, 18 (5): 5—9
- [27] 王军光, 李朝霞, 蔡崇法, 等. 坡面流体力学参数对团聚体剥蚀程度的定量影响. *水科学进展*, 2012, 23 (4): 502—508
- Wang J G, Li Z X, Cai C F, et al. Quantitative effects of hydro-dynamic parameters on abrasion extent aggregates by overland flow (In Chinese). *Advances in Water Science*, 2012, 23 (4): 502—508
- [28] 魏兴琥, 徐喜珍, 雷俐, 等. 粤北岩溶峰丛自然坡面与梯田土壤侵蚀特征分析. *中国水土保持*, 2014 (9): 43—47, 69
- Wei X H, Xu X Z, Lei L, et al. Soil erosion characteristics of natural slopes and terraces of karst peak-cluster in Northern Guangdong Province (In Chinese). *Soil and Water Conservation in China*, 2014 (9): 43—47, 69
- [29] Jones R J. Aspects of the biological weathering of limestone pavement. *Proceedings of the Geologists Association*, 1965, 76 (4): 421—433
- [30] 曹建华, 蒋忠诚, 杨德生, 等. 中国西南岩溶区土壤允许流失量及防治对策. *中国水土保持*, 2008 (12): 40—45
- Cao J H, Jiang Z C, Yang D S, et al. Soil loss tolerance and prevention and measurement of karst area in southwest China (In Chinese). *Soil and Water Conservation in China*, 2008 (12): 40—45
- [31] 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. *农业工程学报*, 2012, 28 (16): 121—126
- Chen H S, Yang J, Fu W, et al. Characteristics of slope runoff and sediment yield on karst hill-slope with different land-use types in northwest Guangxi (In Chinese). *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28 (16): 121—126
- [32] 贾金田, 付智勇, 陈洪松, 等. 喀斯特坡地基岩起伏对土壤剖面水分格局的影响. *应用生态学报*, 2016, 27 (6): 1708—1714
- Jia J T, Fu Z Y, Chen H S, et al. Effect of irregular

- bedrock topography on the soil profile pattern of water content in a Karst hillslope (In Chinese). Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, 27 (6) : 1708—1714
- [33] 彭旭东, 戴全厚, 杨智, 等. 喀斯特山地石漠化过程中地表地下侵蚀产沙特征. 土壤学报, 2016, 53 (5) : 1237—1248
Peng X D, Dai Q H, Yang Z, et al. Sediment yield of surface and underground erosion in the process of rocky desertification of karst area (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2016, 53 (5) : 1237—1248
- [34] Zhang X B, Bai X Y, He X B. Soil creeping in the weathering crust of carbonate rocks and underground soil losses in the karst mountain areas of southwest China. Carbonates & Evaporites, 2011, 26 (2) : 149—153
- [35] 胡奕, 戴全厚, 王佩将. 喀斯特坡耕地产流特征及影响因素. 水土保持学报, 2012, 26 (6) : 46—51
Hu Y, Dai Q H, Wang P J. Runoff features and the influencing factors on karst sloping farmland (In Chinese). Journal of Soil and Water Conservation, 2012, 26 (6) : 46—51

Simulation Study on Bare Subsoil Runoff and Sediment Yield on Karst Slope

YAN Youjin¹ DAI Quanhou^{1†} FU Wenbing^{1, 2} JIN Li¹ LAN Xue^{1, 3}

(1 Forestry College of Guizhou University, Guiyang 550025, China)

(2 Guizhou Shengtai Engineering Consulting Co. Ltd, Guiyang 550002, China)

(3 School of Geographic and Environmental Sciences, Guizhou Normal University, Guiyang 550001, China)

Abstracts 【Objective】The unique “dualistic structured” (land surface and underground) hydrologic system in the karst areas of Southwest China has the areas subjected to two types of soil erosion simultaneously, i.e. surface erosion and underground erosion. Relevant researches show that soil erosions on the land surface and in the underground crevices are the two pathways for and components of the soil and water loss in the karst region. In recent years, with the intensified development in the karst region of Southwest China, construction of industrial parks and urbanization has become a hot spot. Consequently large areas of forest land and/or cultivated land have or are being stripped of topsoil for construction projects, thus depriving the land of its vegetation protection and topsoil cover, and making it completely nude and exposed to rainfall erosion. Currently, though much effort has been done studying underground soil and water loss in karst area, almost nothing has been reported about characteristics of the soil erosion on slope land with topsoil stripped of, and the researches, done or being carried on, fail to illustrate either characteristics of the spatial distribution of runoff and sediment in the surface and underground of slopes or effects of affecting factors, like rainfall, slope, underground fissure porosity, etc. of slope soil erosion on characteristics and mechanisms of runoff and sediment generation on stripped slopes in the areas. Therefore, this study is oriented to illustrate and analyze distribution characteristics of runoff and sediment in the surface and underground along stripped slopes, and further to explore effects of rainfall, slope, underground fissures, pores and holes on soil erosion. 【Method】An indoor experiment was carried out using steel troughs filled up with rocks and soil to simulate the “dualistic structure” of stripped slopes the karst area. In the experiment, troughs were adjusted to slope gradient, 10°, 15°, 20° and 25°, separately, and rainfalls different in intensity (30, 50 and 80 mm h⁻¹) were simulated on troughs of artificial slopes, different in fissure porosity (10°, 15°, 20° and 25°), to explore how the three factors affecting soil erosion on the slopes. 【Result】Results show that: (1) On stripped slopes, underground erosion became more elusive and tended to be neglected when the rainfall event was low in intensity. When rainfall intensity rose up to 30 and 50 mm h⁻¹, underground soil and water loss turned to be in dominancy and surface runoff was observed only on slopes

$\geq 15^\circ$ in gradient. With rainfall rising in intensity, underground soil and water loss varied in a curve of saddle shape, and the variation with rainfall intensity displayed an order of $80 < 30 < 50 \text{ mm h}^{-1}$ in magnitude. (2) On gentle slopes, $\leq 15^\circ$, soil and water loss occurred mainly in the fissures and pores underground, and was not observed on the surface, while on slopes, 20° or 25° in gradient, the underground sediment yield accounted for 85% ~ 97% and 59% ~ 84% of the total on the slope. (3) The effect of underground holes and porosity on underground soil and water loss was significant, and a positive relationship was observed of underground runoff and runoff coefficient with underground fissure porosity. The higher the fissure porosity, the bigger the channels for soil and water loss and the more soil and water lost underground, and hence the higher the proportion of the underground soil and water loss to the total. **【Conclusion】** To control soil erosion in karst areas, it is not wise to pay attention only to surface soil erosion. Downwards erosion or underground soil and water loss should be the focus of attention in the karst region. In development and construction projects, it is crucial to control underground leakage, so as to avoid leakage-triggered collapse of underground karst caves. All the findings in this study are expected to be of some theoretical and practical significance to future studies on underground soil and water loss as well as guidance of soil erosion prevention and control in the karst areas.

Key words Topsoil stripping; Soil erosion; Underground soil and water loss; Karst slope

(责任编辑：檀满枝)