

喀斯特槽谷区岩石与坡面夹角对产流产沙过程的影响

宋 兰, 张玉启, 何丙辉, 曾荣昌, 李天阳
(西南大学资源环境学院, 重庆 400715)

摘要: 为明确喀斯特槽谷区岩石与坡面夹角对坡面产流产沙过程的影响, 在 6 个岩石与坡面夹角(30°, 60°, 90°, 120°, 150°, 180°)、3 个坡度(10°, 15°, 20°)和 3 个流量(5, 7.5, 10 L/min)组合条件下, 开展室内放水冲刷试验。结果表明: (1) 地表产流率随冲刷历时呈先增加后稳定的趋势, 而含沙量和地表产沙率随冲刷历时均呈波动性减小趋势; (2) 各岩石与坡面夹角下, 地表产流率无显著差异($P>0.05$); 但含沙量与地表产沙率均差异显著($P<0.05$), 表现为含沙量和地表产沙率在 60°夹角下与 30°和 120°夹角下差异不显著($P>0.05$), 但显著高于 90°, 150°和 180°条件下的含沙量和地表产沙率($P<0.05$); (3) 地表产流率与含沙量在 60°, 90°, 120°夹角下均呈显著幂函数正相关($R^2=0.32\sim0.56, P<0.05$), 而在其他夹角下二者关系不显著($P>0.05$)。地表产流率与地表产沙率在 60°, 90°, 120°, 150°, 180°夹角下呈显著线性正相关($R^2=0.35\sim0.86, P<0.05$)。研究表明喀斯特槽谷区岩石与坡面呈一定夹角时, 可加剧坡面产沙, 并改变产流与产沙关系。

关键词: 喀斯特槽谷区; 岩石与坡面夹角; 产流产沙; 水土保持
中图分类号: S157.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2022)03-0009-07
DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2022.03.002

Effects of Angle Between Rock and Slope on the Processes of Runoff and Sediment Yield in the Karst Trough Valley Area

SONG Lan, ZHANG Yuqi, HE Binghui, ZENG Rongchang, LI Tianyang
(College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715)

Abstract: To elucidate the roles of angle between rock and slope in affecting the processes of runoff and sediment yield in the Karst Trough Valley Area of Southwest China, the combined conditions of 6 angles between rock and slope (30°, 60°, 90°, 120°, 150°, 180°), 3 slope gradients (10°, 15°, 20°), and 3 flow rates (5, 7.5, 10 L/min) were employed in laboratory scouring simulation experiments. Results showed that: (1) Surface runoff rate increased to be stable with scouring duration, while sediment concentration and sediment yield rate both increased first and then decreased with the scouring duration; (2) Surface runoff rate showed non-significant differences among different angles between rock and slope ($P>0.05$). Sediment concentration and sediment yield both displayed non-significant differences among the angels of 30°, 60° and 120° ($P>0.05$), which were significant higher than those angels of 90°, 150° and 180° ($P<0.05$); (3) Surface runoff rate presented significantly positive power relationships with sediment concentration under the angles of 60°, 90° and 120° ($R^2=0.32\sim0.56, P<0.05$), while exhibited non-significant relationships with sediment concentration at other angles ($P>0.05$). Similarly, surface runoff rate was significantly linearly correlated with sediment yield at the angles of 60°, 90°, 120°, 150° and 180° ($R^2=0.35\sim0.86, P<0.05$). Our results show that a certain angle between rock and slope in the slope of the Karst Trough Valley area can accelerate the sediment yield and change the relationship between runoff and sediment yield.

Keywords: Karst Tough Valley area; angle between rock and slope; runoff and sediment yield; soil and water conservation

坡面产流产沙过程是水力侵蚀机制研究中最主要的内容之一^[1], 明确坡面尺度水沙输移特性可为坡面土壤侵蚀防控措施的合理布置提供理论支撑^[2]。西南喀斯特槽谷区坡面由于碳酸盐岩发育而存在着

独特的地上地下二元空间地质结构^[3],坡面地表岩层裸露且与坡面形成不同夹角,进而塑造了喀斯特槽谷区坡面特殊的产流产沙过程。然而,关于喀斯特坡面产流产沙的特性的研究,目前主要集中在植被覆盖、岩石裸露率和土地利用方式等对产流产沙过程的影响^[4-8]。杨青等^[4]研究发现,喀斯特坡面植被覆盖减少,径流深和产沙量随之减少;Dai 等^[9]、Xia 等^[10]研究发现,随岩屑覆盖增加,基岩裸露率增大,土壤入渗量增加,地表产流产沙波动性减小,地下产流产沙波动性增大;王涵等^[11]通过观测径流小区发现,植被类型和土地利用方式均会影响坡面产流产沙;Dai 等^[9,12]、彭旭东等^[13]通过室内降雨模拟试验研究发现,喀斯特坡面地下裂隙越发育,地下土壤漏失量越大。而目前对喀斯特槽谷区岩石与坡面夹角下的产流产沙规律认识尚不清楚^[14],这使得利用现有土壤侵蚀模型不能精确预测侵蚀模数,同时也影响了坡面水土流失防治措施的效益评估。因此,本试验基于野外实地调查,室内设置 6 个岩石与坡面夹角、3 个坡度和 3 个流量组合条件,进行放水冲刷试验,以阐明喀斯特槽谷区坡面不同岩石与坡面夹角下产流产沙特性,从而为该区坡面土壤侵蚀模型修正及水土流失防治措施布设提供理论支撑。

1 材料与方法

1.1 供试材料

选取重庆市北碚区鸡公山 0—30 cm 的耕层土壤作为供试土样(106°27'19"E, 29°47'41"N),土壤类型为喀斯特槽谷区碳酸盐岩发育形成的石灰性土。所采集土样容重为 1.21 g/cm³,土壤颗粒粒径分布:2~0.02, 0.02~0.002, <0.002 mm 粒径分别占 20.68%, 51.09%, 28.23%。试验前将风干的土壤过 10 mm 筛再填入冲刷土槽中,计算填土后按上层 15 cm(容重 1.2 g/cm³),下层 5 cm(容重 1.3 g/cm³)分层填装土壤于试验土槽内。

1.2 供试土槽

本试验用土槽长度为 4.8 m,宽度为 1.0 m,填土深度为 0.2 m。土槽前端设置集流槽,用于收集在冲刷过程中产生的地表径流泥沙样。根据在西阳龙潭槽谷区的野外调查,在模拟不同岩石与坡面夹角条件时,选择 9 块直径均>25 cm 的不规则碳酸盐岩石块随机排列在试验所用的冲刷土槽中。经过调试确保在每次变换岩石与坡面夹角时,岩石的裸露率保持在 15%不变。

1.3 冲刷过程

室内模拟放水冲刷试验于 2019 年 9—11 月在西

南大学人工降雨大厅进行。地下裂隙度为 0,以模拟喀斯特槽谷区的地下裂隙仍未开始发育的部分区域的产流产沙过程。岩石与坡面夹角设置为 30°, 60°, 90°, 120°, 150°, 180°(0),其中夹角为 30°, 60°表示岩石倾向和坡向一致,120°, 150°表示岩石倾向和坡向相反,90°表示岩石与坡面垂直,180°(0)表示岩石与坡面平行,同时作为对照组。按照喀斯特槽谷区的水文气象及地形地貌数据,流量设置为 5, 7.5, 10 L/min,坡度设置为 10°, 15°, 20°。每场试验开始前通过人工降雨使土壤完全饱和,按照岩石与坡面夹角、流量和坡度完全组合的方法开始试验,每个组合重复 2 次。冲刷时长设置为 18 min,在前 6 min 每隔 1 min 收集 1 次地表径流泥沙样,后 12 min 每隔 1.5 min 收集 1 次地表径流泥沙样。

1.4 数据处理

试验过程中,按照规定的间隔时间收集地表径流泥沙样,现场称取体积 V ,搅匀后用体积为 590 mL 的取样瓶收集径流泥沙样带回室内。将取样瓶中的径流泥沙样静置至上清液完全澄清,将上清液倒入量筒测量这部分水样体积 V_1 ,称得取样瓶与剩余泥沙的质量之和 m_1 。取 100 mL 烧杯,编号并称得其质量 m_2 ,将取样瓶中剩余泥沙摇匀后取大约 40 mL 于烧杯中,并称取其质量 m_3 ,烘干后再称取其质量 m_4 ,测得其含沙量、地表产流率和地表产沙率,空取样瓶质量为 m_5 。

(1)地表产流率(R)计算公式为:

$$R = V \times \frac{(m_1 - m_5) \times \frac{m_3 - m_4}{m_3 - m_2} + V_1}{590} / t \quad (1)$$

式中: V 为径流泥沙样体积(L); t 为收集径流泥沙样的时间间隔(s); V_1 为上清液体积(L); m_1 为取样瓶与剩余泥沙的质量之和(kg); m_2 为烧杯质量(kg); m_3 为烧杯与泥沙样质量之和(kg); m_4 为烧杯与烘干泥沙质量之和(kg); m_5 为取样瓶质量(kg)。

(2)含沙量(C)计算公式为:

$$C = ((m_1 - m_5) - (m_1 - m_5) \times \frac{m_3 - m_4}{m_3 - m_2}) / 590 \quad (2)$$

式中: m_1 为取样瓶与剩余泥沙的质量之和(kg); m_2 为烧杯质量(kg); m_3 为烧杯与泥沙样质量之和(kg); m_4 为烧杯与烘干泥沙质量之和(kg); m_5 为取样瓶质量(kg)。

(3)地表产沙率(S)计算公式为:

$$S = \frac{V \times C}{t} \quad (3)$$

式中: V 为径流泥沙样体积(L); C 为含沙量(kg/L); t 为收集径流泥沙样的时间间隔(s)。

1.5 数据分析

采用 Microsoft Excel 2019 和 SPSS 26 软件进行数据整理、计算和统计分析,采用单因素方差 (ANOVA) 对不同岩石与坡面夹角下的地表产流率、含沙量和地表产沙率进行分析,各变量间进行 Pearson 相关性分析,再进行回归分析并对回归方程进行显著性检验,建立不同岩石与坡面夹角下的水沙关系。使用 Microsoft Excel 2019 和 Origin 26.0 软件进行相关图表的绘制。

2 结果与分析

2.1 不同岩石与坡面夹角下产流产沙过程变化

由图 1 可知,在岩石与坡面夹角为 30°,60°,90°,

120°,150°,180°的条件下,各组的地表产流率变化范围分别为 0.082~0.135,0.049~0.174,0.065~0.173,0.058~0.184,0.079~0.153,0.050~0.140 L/s。在各个流量和坡度的组合下,不同岩石与坡面夹角下的地表产流率随冲刷历时均呈先增加后趋于稳定的变化趋势。比如,在 10°坡面,5 L/min 流量以及 20°坡面、10 L/min 流量条件下,第 9 min 较第 1 min 的地表产流率分别增加 71.61%,47.53%,第 18 min 较第 9 min 的地表产流率分别增加 5.04%,6.48%。冲刷前期的地表产流率在整个冲刷过程中较低,水流分散,产流滞后。随着冲刷历时延长,沟道发育逐渐集中,地表产流率趋于稳定。

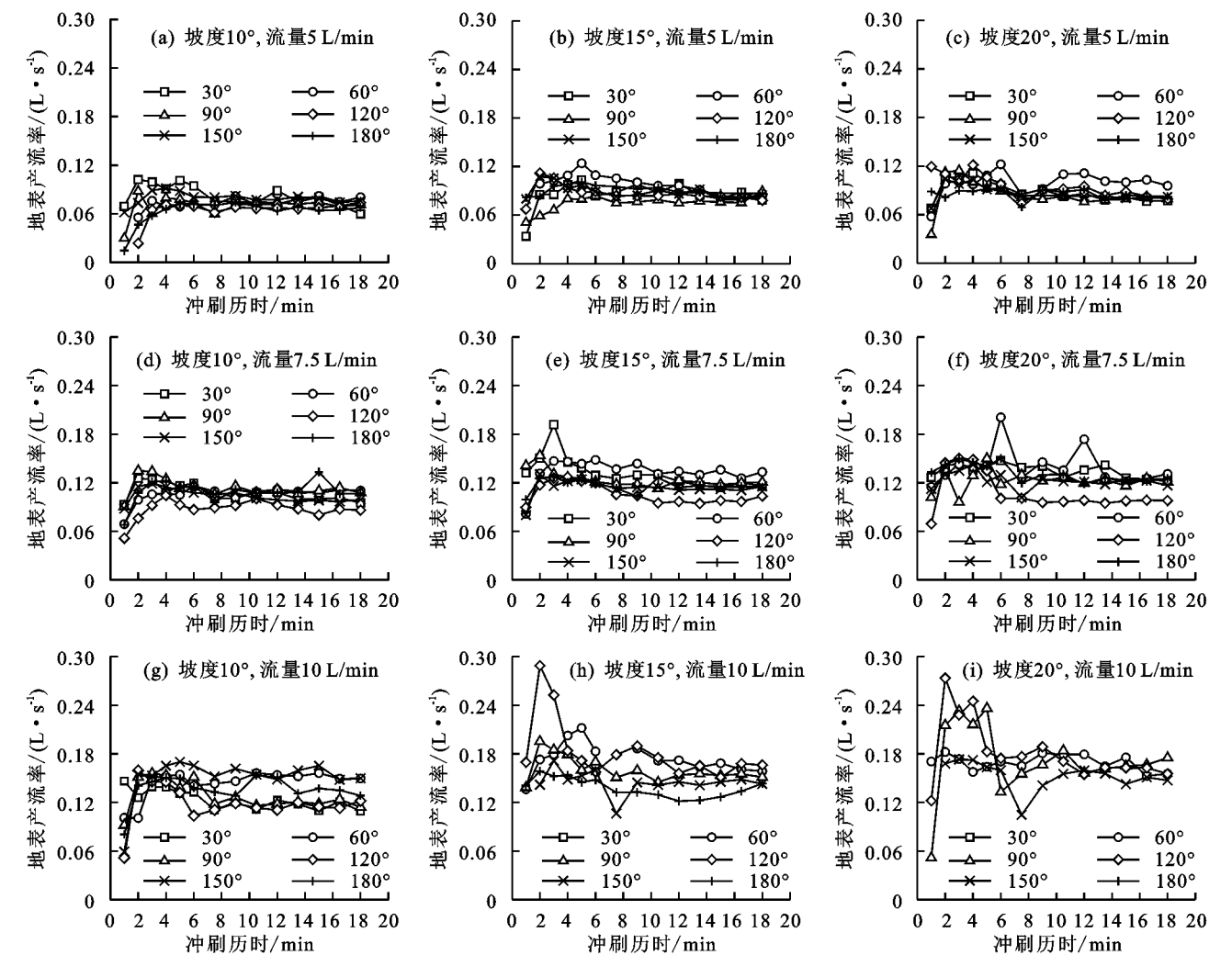


图 1 地表产流率随冲刷历时变化

由图 2 可知,在岩石与坡面夹角为 30°,60°,90°,120°,150°,180°条件下,各组的地表产沙率变化范围分别为 0.017~0.043,0.001~0.065,0.004~0.045,0.001~0.074,0.009~0.042,0.004~0.046 kg/s。流量和坡度较小时,各岩石与坡面夹角下的地表产沙率差异不明显,随着流量和坡度的增大,不同岩石与坡面夹角下的地表产沙率波动性变大。各条件下的地

表产沙率随冲刷历时均呈现波动性减小的变化趋势。在 10°坡面,5 L/min 流量以及 20°坡面、10 L/min 流量条件下,第 9 min 较第 2 min 的地表产沙率分别减少 65.26%,77.74%,第 18 min 较第 9 min 的地表产沙率分别减少 47.51%,72.41%。

2.2 不同岩石与坡面夹角下含沙量过程变化

由图 3 可知,在岩石与坡面夹角为 30°,60°,90°,

120°,150°,180°的条件下,含沙量变化范围分别为0.119~0.362,0.019~0.381,0.051~0.218,0.018~0.338,0.079~0.249,0.035~0.284 kg/L。流量和坡度较小时,各岩石与坡面夹角下的含沙量差异不明显,随着流量和坡度的增大,不同岩石与坡面夹角下的含沙量波动变

大。各试验条件下含沙量随冲刷历时的变化均为初始含沙量最高,而后随冲刷历时呈波动性降低。在 10°坡面,5 L/min流量以及 20°坡面、10 L/min 流量条件下,第 9 min 较第 2 min 的含沙量分别减少 66.05%,69.35%,第 18 min 较第 9 min 的含沙量分别减少 41.34%,65.89%。

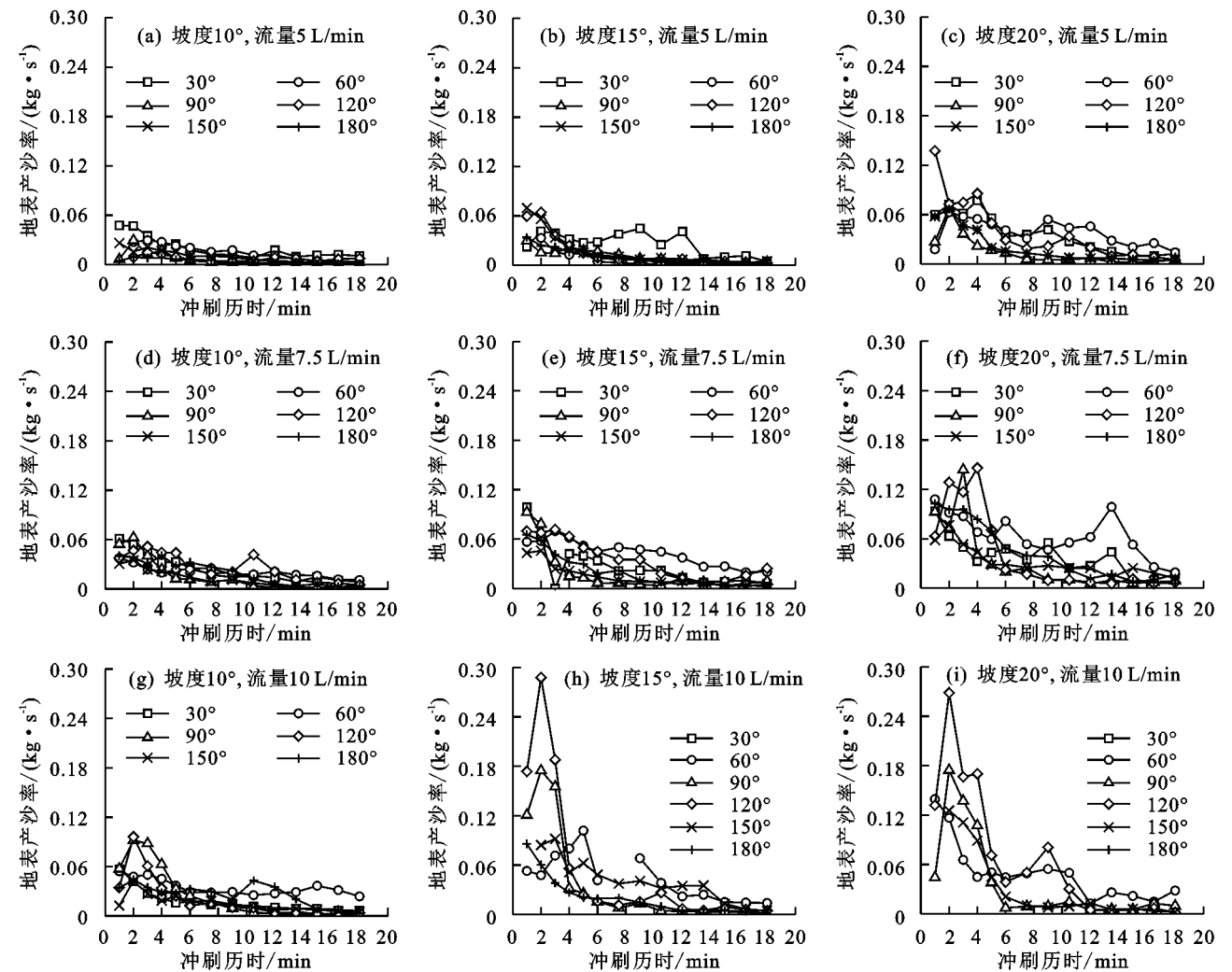


图 2 地表产沙率随冲刷历时变化

2.3 不同岩石与坡面夹角对产流产沙及含沙量的影响

在 30°,60°,90°,120°,150°和 180°的岩石与坡面夹角条件下,地表产流率的变化范围为 0.104~0.119 L/s,地表产沙率的变化范围为 0.020~0.034 kg/s,含沙量的变化范围为 0.144~0.237 kg/L。由图 4 可知,在试验条件下,岩石与坡面夹角为 60°时,地表产流率最高,但与其他岩石与坡面夹角下的地表产流率无显著差异。岩石与坡面夹角为 60°条件下的地表产沙率最高,且较岩石与坡面夹角为 90°,150°和 180°条件下的地表产沙率分别增加 59.27%,61.11%,74.13%。岩石与坡面夹角为 60°条件下的含沙量最高,且显著高于岩石与坡面夹角为 90°,150°,180°条件下的含沙量,分别增加 60.42%,43.23%,64.42%。其次为岩石与坡面夹角为 30°的条件下,显著高于岩石与坡面夹角为 90°

和 180°条件下的含沙量,分别增加 52.29%,56.39%。

2.4 不同岩石与坡面夹角下水沙关系

由表 1 可知,试验条件下,岩石与坡面夹角与含沙量、地表产流率和地表产沙率均无显著关系。流量分别与地表产流率和地表产沙率呈极显著正相关。坡度与地表产流率呈显著正相关,且分别与含沙量和地表产沙率呈极显著正相关。此外,地表产流率与含沙量和地表产沙率之间均呈极显著正相关。

分别对不同岩石与坡面夹角下的地表产流率和含沙量进行回归分析(图 5)。在岩石与坡面夹角为 60°,90°,120°的条件下,地表产流率与含沙量呈幂函数正相关($P<0.05$)。在岩石与坡面夹角为 30°,150°,180°的条件下,地表产流率与含沙量关系均不显著。

分别对不同岩石与坡面夹角下的地表产流率和地表产沙率进行回归分析(图6)。在岩石与坡面夹角为60°,90°,120°,150°,180°的条件下,地表产流率与地表产沙率呈线性正相关($P<0.05$)。在岩石与

坡面夹角为30°的条件下,地表产流率与地表产沙率关系不显著。整体对不同岩石与坡面夹角下的地表产流率和地表产沙率进行回归分析,结果显示地表产流率与地表产沙率呈线性正相关($P<0.01$)。

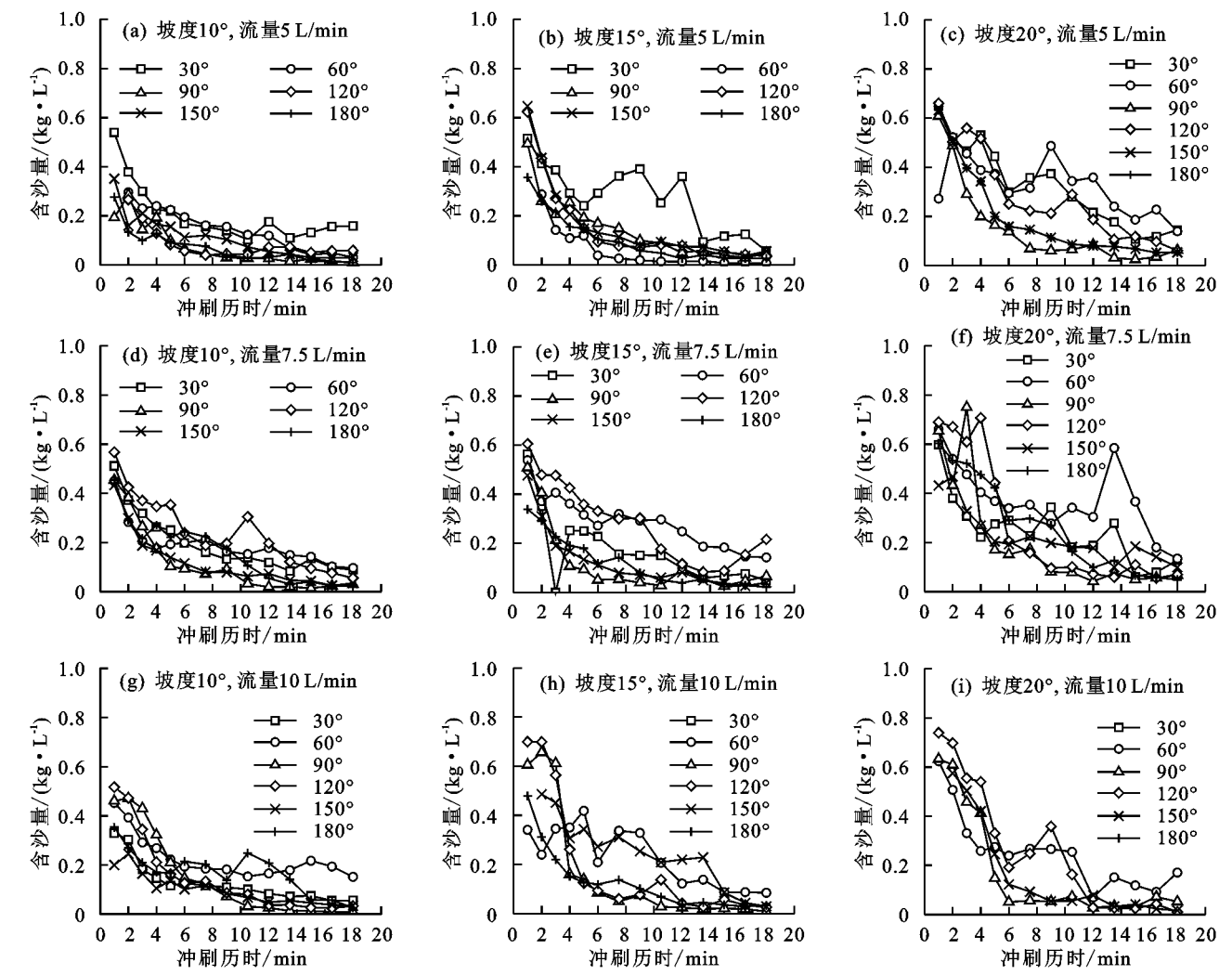


图3 含沙量随冲刷历时变化

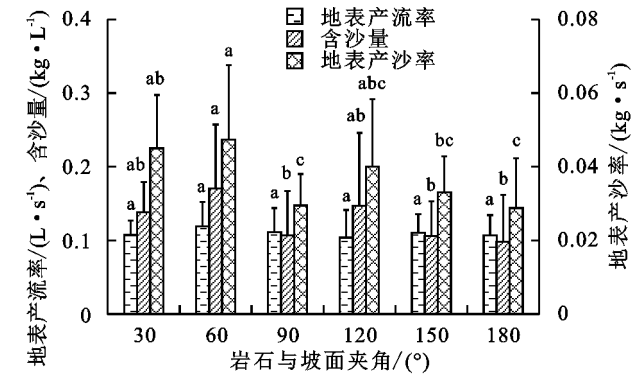


图4 地表产流率、地表产沙率及含沙量随岩石与坡面夹角变化

3 讨论

在本研究中,地表产流率随着冲刷时间的推移呈现先增加后逐渐趋于平稳的趋势。这可能是由于径

流量的增长过程伴随着沟道不断发育^[15],前期水流以入渗为主,随着入渗逐渐稳定,沟道连通,前期沟道中滞留的水流也逐渐产出,地表产流逐渐增大。当沟道发育相对稳定后,对径流的汇集作用也达到稳定状态,因此地表产流率趋于稳定^[13]。与地表产流率不同,地表产沙率随冲刷历时出现波动性减小的变化趋势。这可能是因为随冲刷历时而变化的产沙过程较产流变化更为复杂^[16]。冲刷初始,剥蚀能力较强的清水流会挟带大量地表土壤颗粒沿坡面向下运动。随着沟道中跌坎和壅水的产生,增大了沟道形态阻力,地表水流能量减小,侵蚀能力减小,并且沟道加深,下层的土壤相对紧实,可剥蚀量减少,使得地表产沙随冲刷历时减小。

含沙量随冲刷历时呈现波动性减小的趋势,波动变化程度随着冲刷流量的增大而增大。在冲刷

过程中含沙量突然增加的时刻基本上和沟道出现跌坎的时刻一致,这可能是因为冲刷过程中形成的跌坎、细沟和含沙量与侵蚀速率的变化规律具有同步关系^[15]。冲刷初始地表产沙率较大,地表水流又以入渗为主,因此冲刷前期的含沙量最大。之后地表水流随着沟道发育的稳定而达到稳定状态,地表产沙率仍处于波动性减小的趋势,综合下来含沙量呈波动性减小趋势。

在试验条件下,岩石与坡面夹角为 60°条件下的地表产流率、地表产沙率和含沙量均最高。在本试验设置

表 1 岩石与坡面夹角、流量和坡度与含沙量、地表产流率和地表产沙率的皮尔逊相关系数矩阵

指标	岩石与坡面夹角	流量	坡度	含沙量	地表产流率
流量	-0.071				
坡度	0.019	-0.070			
含沙量	-0.026	0.073	0.508**		
地表产流率	-0.005	0.826**	0.215*	0.327**	
地表产沙率	-0.004	0.431**	0.486**	0.837**	0.717**

注: * 表示 $P<0.05$; ** 表示 $P<0.01$ 。

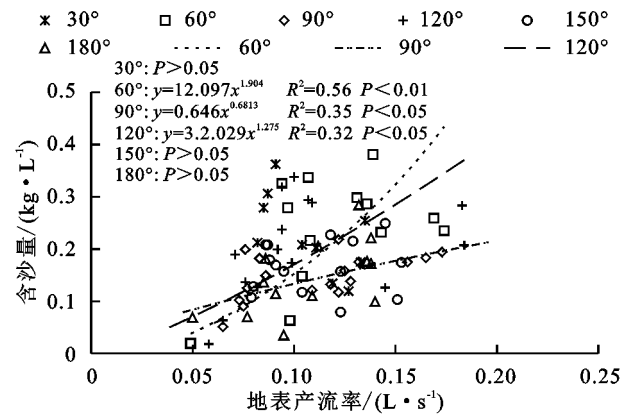


图 5 地表产流率与含沙量的关系

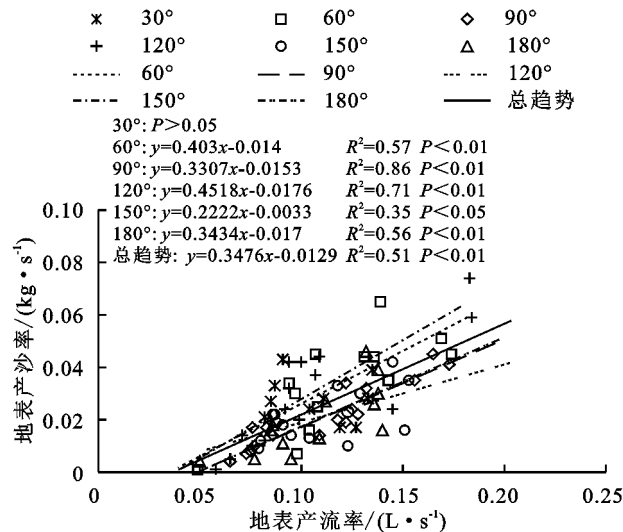


图 6 地表产流率与地表产沙率的关系

在试验条件下,坡面产沙率总体上随产流率的增加而呈线性增加。苏远逸等^[19]研究发现,在不同坡度条件下,坡面的产流率与产沙率间均呈线性关系,

不同的岩石与坡面夹角时,60°为本试验中所设置岩石倾向和坡向一致的夹角中最大的一个。这可能是因为岩石倾向和坡向一致时岩石对土壤的阻挡作用更小,土壤流失较多^[17]。该结果说明当岩石倾向与坡向一致且夹角较大时,可能会导致坡面产沙增加。越大的岩石与坡面夹角会对冲刷产生的径流起到更大的阻挡作用,从而降低径流流速,并且径流的方向发生转变后的一部分动能会由此转变为压强势能。此时有一部分径流由于转向加剧对转向后路径上土壤颗粒的掏蚀,径流所能携带的泥沙量有所增加^[18]。

这与本研究结果相似。此外,在岩石与坡面夹角为 60°,90°,120°时,随着地表产流率增加,含沙量呈幂函数增长,而在其他夹角下(30°,150°,180°),地表产流率与含沙量关系不显著。这表明岩石与坡面夹角的变化可显著改变产流率与泥沙浓度的关系,进而影响坡面土壤分离、搬运及沉积等过程^[20]。目前,已有研究^[21]表明,在小流域尺度下,流量与含沙量变化趋势一致且呈极显著相关,但对坡面尺度水沙关变化过程及影响因素的认识尚不清楚^[22]。因此,结合野外实际情况,需要更多的室内模拟数据来进一步阐明喀斯特槽谷区岩石与坡面夹角对产流产沙的影响。

4 结论

本试验条件下,各岩石与坡面夹角下地表产流率随冲刷历时呈先增加后稳定的趋势,而含沙量和产沙率随冲刷历时均呈波动性减小趋势。不同岩石与坡面夹角之间,地表产流率无显著差异,但含沙量与产沙率均差异显著,且在 30°,60°,120°夹角下相对最大。地表产流率与含沙量在 60°,90°,120°夹角下均呈显著幂函数正相关,在其他夹角下二者关系不显著。地表产流率与产沙率在 60°,90°,120°,150°,180°夹角下呈显著线性正相关。在喀斯特槽谷区,当出露的岩石与坡面形成一定夹角时,可加剧坡面产沙,并改变产流与产沙关系。本研究可为喀斯特槽谷区坡面土壤侵蚀模型修正及水土流失防治措施布设提供理论支撑。

参考文献:

[1] 史志华,刘前进,张含玉,等.近十年土壤侵蚀与水土保持研

- 究进展与展望[J].土壤学报,2020,57(5):1117-1127.
- [2] Hafzullah A, Abdullah G, Murat Y, et al. Soil erosion model tested on experimental data of a laboratory flume with a pre-existing rill [J].Journal of Hydrology,2020, 581:e124391.
- [3] Chittenden H, Delunel R, Schlunegger F, et al. The influence of bedrock orientation on the landscape evolution, surface morphology and denudation (^{10}Be) at the Niesen, Switzerland [J].Earth Surface Processes and Landforms,2014,39(9):1153-1166.
- [4] 杨青,杨广斌,赵青松,等.喀斯特地区不同降雨和植被覆盖的坡面产流产沙特征[J].水土保持通报,2020,40(1):9-16.
- [5] 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.
- [6] 王栋栋,王占礼,张庆玮,等.草地植被覆盖度坡度及雨强对坡面径流含沙量影响试验研究[J].农业工程学报, 2017,33(15):119-125.
- [7] Peng T, Wang S J. Effects of land use, land cover and rainfall regimes on the surface runoff and soil loss on karst slopes in southwest China [J].Catena,2011,90:53-62.
- [8] 励其其,刘鸿涛,孟岩,等.不同降雨强度和下垫面条件对黑土区坡面产流产沙的影响[J].水利水电技术,2020, 51(5):91-98.
- [9] Dai Q H, Peng X D, Yang Z, et al. Runoff and erosion processes on bare slopes in the karst rocky desertification area [J].Catena,2017,152:218-226.
- [10] Xia L, Song X Y, Fu N, et al. Effects of rock fragment cover on hydrological processes under rainfall simulation in a semi-arid region of China [J].Hydrological Processes,2018,32(6):792-804.
- [11] 王涵,刘琦,任标,等.典型喀斯特石漠化地区降雨产流产沙特征[J].贵州师范大学学报,2019,37(3):6-12.
- [12] Dai Q H, Peng X D, Zhao L S, et al. Effects of underground pore fissures on soil erosion and sediment yield on karst slopes [J].Land Degradation and Development,2017,28(7):1922-1932.
- [13] 彭旭东,戴全厚,袁应飞,等.喀斯特坡耕地裸坡侵蚀性降雨产流试验研究[J].应用基础与工程科学学报, 2019,27(6):1211-1224.
- [14] Norton K P, Blanckenburg F V, DiBiase R, et al. Cosmogenic ^{10}Be -derived denudation rates of the Eastern and Southern European Alps [J].International Journal of Earth Sciences,2011,100(5):1163-1179.
- [15] 和继军,孙莉英,李君兰,等.缓坡面细沟发育过程及水沙关系的室内试验研究[J].农业工程学报,2012,28(10):138-144.
- [16] 康宏亮,王文龙,薛智德,等.冲刷条件下黄土丘陵区浅沟侵蚀形态及产流产沙特征[J].农业工程学报,2016, 32(20):161-170.
- [17] 曾荣昌,李天阳,何丙辉.喀斯特槽谷区坡面集中水流曼宁系数变化特征[J].水土保持通报,2020,40(4): 266-273,279.
- [18] 李和谋,梁心蓝,赵小东,等.模拟降雨条件下地表起伏对产流产沙的影响[J].水土保持学报,2019,33(6):99-104.
- [19] 苏远逸,李鹏,任宗萍,等.坡度对黄土坡面产流产沙过程及水沙关系的影响[J].水土保持研究,2020,27(2): 118-122.
- [20] 张光辉.对土壤侵蚀研究的几点思考[J].水土保持学报,2020,34(4):21-30.
- [21] 李红,任兵,周明华,等.山地丘陵区小流域次降雨产流产沙过程研究[J].中国水土保持,2020(3):40-43.
- [22] 王玲玲,姚文艺,王文龙,等.黄土丘陵沟壑区多尺度地貌单元输沙能力及水沙关系[J].农业工程学报,2015, 31(24):120-126.