

DOI: 10.11766/trxb202002140046

曾荣昌, 张玉启, 何丙辉, 李天阳, 曾成. 喀斯特槽谷区岩石与坡面夹角对坡面集中流水力学特性的影响[J]. 土壤学报, 2021, 58(5): 1179–1189.

ZENG Rongchang, ZHANG Yuqi, HE Binghui, LI Tianyang, ZENG Cheng. Hydraulic Characteristics of Concentrated Flow Relative to Angle between Rock and Slope in the Karst Trough Valley Area[J]. Acta Pedologica Sinica, 2021, 58(5): 1179–1189.

## 喀斯特槽谷区岩石与坡面夹角对坡面集中流水力学特性的影响<sup>\*</sup>

曾荣昌, 张玉启, 何丙辉<sup>†</sup>, 李天阳, 曾成

(西南大学资源环境学院/三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400715)

**摘 要:** 喀斯特槽谷区地表出露的岩石与坡面形成不同夹角, 塑造了复杂的微地貌, 显著改变坡面集中水流路径, 使得水流特性发生重大变化。目前, 不同岩石与坡面夹角下集中流水力学特性的变化特征还不清楚。通过室内放水冲刷模拟试验, 研究了 3 个坡度 (10°、15°和 20°)、3 个冲刷流量 (5、7.5、10 L·min<sup>-1</sup>) 和 6 个岩石与坡面夹角 (30°、60°、90°、120°、150°和 180° (0°)) 组合条件下喀斯特槽谷区地表集中流的水力学特性。结果表明: 集中水流雷诺数 ( $Re$ ) 随冲刷历时变化趋势较复杂, 试验条件下,  $Re$  随流量的增大而增大, 随坡度变化规律不明显, 变化范围为 517~3 343。Darcy-Weisbach 阻力系数 ( $f$ ) 随冲刷历时表现出增大的变化趋势, 其随坡度增大而增大, 随流量增大而减小, 变化范围为 0.62~5.70。 $Re$  和岩石与坡面夹角关系均不显著,  $f$  和岩石与坡面夹角间的关系在各流量和坡度组合下表现不同。 $f$  与  $Re$  之间的耦合关系受岩石与坡面夹角的显著影响, 当岩石与坡面夹角小于 90°时,  $f$ - $Re$  关系用对数方程描述比较好; 夹角大于等于 90°时, 则用幂函数方程描述更好。试验条件下, 当  $Re < 1 791$  时,  $f$  与  $Re$  关系不显著; 当  $Re > 1 791$  时,  $f$  与  $Re$  则呈显著正相关。本研究可为喀斯特槽谷区土壤侵蚀预报模型的建立提供依据。

**关键词:** 喀斯特; 岩石与坡面夹角; 地下裂隙; 雷诺数; 阻力系数; 集中流

中图分类号: S157.2 文献标志码: A

## Hydraulic Characteristics of Concentrated Flow Relative to Angle between Rock and Slope in the Karst Trough Valley Area

ZENG Rongchang, ZHANG Yuqi, HE Binghui<sup>†</sup>, LI Tianyang, ZENG Cheng

(College of Resources and Environment, Southwest University, Key Laboratory of Eco-environments in Three Gorges Reservoir Region, Ministry of Education, Chongqing 400715, China)

**Abstract:** [Objective] Outcrops of rock in the Karst Trough Valley Area often form angles with slopes, thus making micro landforms complicated and altering significantly paths of concentrated flows, and consequently bringing about great changes in characteristics of the flows. So, it's important to study hydraulic characteristics of the concentrated flows relative to angle

<sup>\*</sup> 国家重点研发计划课题 (2016YFC0502303) 和国家自然科学基金项目 (41771312) 资助 Supported by the National Key Research Developmental Program of China (No.2016YFC0502303) and National Natural Science Foundation of China (No.41771312)

<sup>†</sup> 通讯作者 Corresponding author, E-mail: hebinghui@swu.edu.cn

作者简介: 曾荣昌 (1995—), 男, 河南商城人, 硕士研究生, 研究方向为城市水土保持。E-mail: sjhpforever01@163.com

收稿日期: 2020-02-14; 收到修改稿日期: 2020-06-07; 网络首发日期 (www.cnki.net): 2020-09-27

between rock and slope. 【Method】 To that end, a flume experiment, designed to have combinations of three slope gradients ( $10^\circ$ ,  $15^\circ$  and  $20^\circ$ ), three flow rates (5, 7.5 and  $10 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ ) and six angles between the rock and slope ( $30^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $120^\circ$ ,  $150^\circ$  and  $180^\circ(0^\circ)$ ), was carried out. 【Result】 Results show that hydraulic characteristics of a concentrated flow varied significantly with the angle between the rock and slope. Reynolds number ( $Re$ ) of the concentrated flow changed with duration of the scouring in a complicated trend, but exhibited a significant trend of increasing with rising flow rate, and an insignificant one of changing with slope gradient. And it varied in the range of 517–3 343 in the experiment. Darcy-Weisbach friction coefficient ( $f$ ) of the concentrated flow increased with rising slope gradient and with scouring going on, but decreased with rising flow rate. And it varied in the range of 0.62–5.70 in the experiment. The relationship of  $Re$  with angles between rock and the slope was not significant, but that of  $f$  varied with combinations of slope gradient and flow rate. The coupling relationship between  $f$  and  $Re$  was influenced significantly by the angle between the rock and the slope. It could be better described with a logarithmic equation when the angle between the rock and the slope was narrower than  $90^\circ$ , and with a power function equation when the angle between the rock and the slope was wider than or equal to  $90^\circ$ . In the experiment, when  $Re < 1\ 791$ , the relationship between  $f$  and  $Re$  was not apparent, but when  $Re > 1\ 791$ , it was significantly positive. 【Conclusion】 To sum up,  $f$  and  $Re$  and their relationship vary with the angle between the rock and the slope. The findings in this experiment may provide strong data support for establishing soil erosion prediction models in the Karst Trough Valley Area.

**Key words:** Karst; Angles between rock and slope; Underground fissure; Reynolds number; The resistance coefficient; Concentrated flow

坡面集中水流可剥离、搬运大量泥沙,是坡面土壤侵蚀发生的主要动力源<sup>[1]</sup>。不同于一般明渠流,坡面集中流受降雨特性、坡度及床面状况等因素的影响,水流结构相对复杂,使准确描述其水力学特性变得更加困难<sup>[2]</sup>。水力学参数中雷诺数( $Re$ )和 Darcy-Weisbach 阻力系数( $f$ )等是表征径流水力学特性的主要指标<sup>[3-4]</sup>。目前,国内外关于各类下垫面情况下坡面水流  $Re$  与  $f$  的耦合变化特征研究较多<sup>[5-8]</sup>,但由于试验条件不同,二者间的数学关系还未获得统一认识<sup>[9-13]</sup>。张光辉<sup>[14]</sup>发现坡面薄层水流  $Re$  与  $f$  呈良好的幂函数负相关关系。李占斌等<sup>[15]</sup>发现黄土区陡坡条件下  $Re$  与  $f$  之间存在显著的指数关系。另有研究则认为  $f-Re$  随坡度的变化表现为不同的数学关系<sup>[3, 16]</sup>。因此,还需要更多实测数据来阐明不同条件下  $f-Re$  的耦合关系,并揭示引发二者关系变化的内在机理。

西南喀斯特槽谷区是中国南方喀斯特分布面积最大的“老、少、边、山、穷”地区,其地表岩层裸露,地下裂隙发育丰富,形成了特殊的“二元”空间结构。与其他喀斯特地貌不同,该区紧密式箱型背斜/向斜构造、岩层倾角大、典型顺/逆层边坡地质构造发育充分等特征使得地表裸露的岩石与坡面之间具有不同夹角<sup>[17]</sup>,导致其存在着不同的产流产沙方式和地表径流水力学特性<sup>[18]</sup>。出露地

表的岩石在降雨过程中易改变径流路径,使局部径流汇聚成集中流<sup>[19]</sup>,造成剧烈的土壤侵蚀。目前,针对喀斯特槽谷区坡面水土流失方式<sup>[20-23]</sup>,产流产沙变化<sup>[24-26]</sup>等方面已有大量研究,但对造成侵蚀的水动力学机制认识还不深入。对该区不同岩石与坡面夹角条件下集中流水力学特性,特别是对  $f-Re$  的耦合关系的影响研究还很少见。因此,本文通过模拟喀斯特槽谷区“二元”空间结构,采用室内土槽放水冲刷试验,研究在限定孔隙下,不同坡度、流量和岩石与坡面夹角条件下坡面集中流的流态、阻力等水力学特性随冲刷历时的变化规律,并探究岩石与坡面夹角影响下  $f-Re$  间的耦合关系,以期为建立和完善喀斯特槽谷区土壤侵蚀预报模型提供依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 供试材料

试验土壤采自重庆市北碚区鸡公山( $106^\circ 27' 19'' \text{ E}$ ,  $29^\circ 47' 41'' \text{ N}$ )碳酸盐发育的石灰性土坡耕地( $0\sim 30 \text{ cm}$ ),土壤粒径组成及容重见表 1。试验前将土壤风干并过  $10 \text{ mm}$  筛。为模拟喀斯特槽谷区不同岩石与坡面夹角条件,确保尽可能地接近野外实际情况,选择 9 块直径大于  $25 \text{ cm}$  的不规则碳酸盐石块

表 1 试验用土壤粒径及容重

Table 1 Particle size distribution and bulk density of the test soil

土壤类型 Soil type	2~1 mm	1~0.05 mm	0.05~0.005 mm	<0.005 mm	容重 Bulk density/(g·cm <sup>-3</sup> )
石灰性土 Calcareous soil	0.03	8.33	26.46	65.18	1.21

随机排列在试验钢槽中，调试并测量出露地表的面积，确保试验过程中岩石裸露率不变。因岩石体积一定，故岩土接触面面积保持固定。

试验土槽为自制的可调孔（裂）隙度的变坡钢槽（图 1），地下裂隙度为地下裂隙水平投影面积占钢槽底板总面积的百分比<sup>[24]</sup>。其计算公式<sup>[27]</sup>为：

$$\text{地下孔隙度} = S_{\text{孔}} / S_{\text{底}} \quad (1)$$

$$S_{\text{孔}} = (\pi R^2 \arcsin \frac{1}{R}) / 90 - RL^2 \quad (2)$$

式中， $S_{\text{孔}}$ 为圆孔交错重合部分面积，m<sup>2</sup>； $S_{\text{底}}$ 为土槽底板的面积，5 m<sup>2</sup>； $\pi$ 为圆周率，3.14； $R$ 为底板圆孔半径，0.025 m； $L$ 为两块底板圆孔重合区域的最大弦长，m。

试验的地下裂隙度可在 0~5% 范围内调节，土槽长 5.0 m、宽 1.0 m、深 0.2 m，土槽上、下端分别设置地表、地下裂隙流集流槽，用于收集地表和地下径流泥沙样。前期预试验结果表明，在试验土槽宽度为 1 m 时，集中流及细沟发育均未达小区边界，集中流在坡面形成的细沟能够自由发育不受边界限

制，故冲刷土槽长 5.0 m、宽 1.0 m、深 0.2 m 的尺寸满足试验要求。

## 1.2 研究方法

室内模拟试验在西南大学后山人工降雨大厅内进行。根据野外调查重庆市酉阳喀斯特槽谷区典型基岩裸露坡面，本试验设置岩石裸露率为 15%，地下裂隙度为 2%（轻度发育）。结合实地调查岩石与坡面夹角的大小，岩石与坡面夹角设置为 30°、60°、90°、120°、150°和 180°（0°），其中岩石与坡面夹角 180°（0°）为对照组。岩石与坡面夹角为 30°和 60°时，岩石倾向与坡向一致；夹角为 120°和 150°时，岩石倾向与坡向相反；夹角为 90°和 180°（0°）时，岩石分别与坡面垂直和平行（图 2）。根据研究区典型坡度和雨强，试验坡度设计为 10°、15°和 20°，冲刷流量分别为 5、7.5、10 L·min<sup>-1</sup>。按照岩石与坡面夹角、坡度和流量完全组合的方法进行试验，每个组合试验重复两次，共计 108 场试验。

利用钢制变坡土槽（长 5 m、宽 1 m、深 0.5 m）开展模拟试验。试验中在水槽底部 0.2 m 处设置两块可调节的带圆孔钢槽地板，通过错位调节钢槽圆孔实现地下裂隙模拟。土槽上端安装有稳流水箱（长

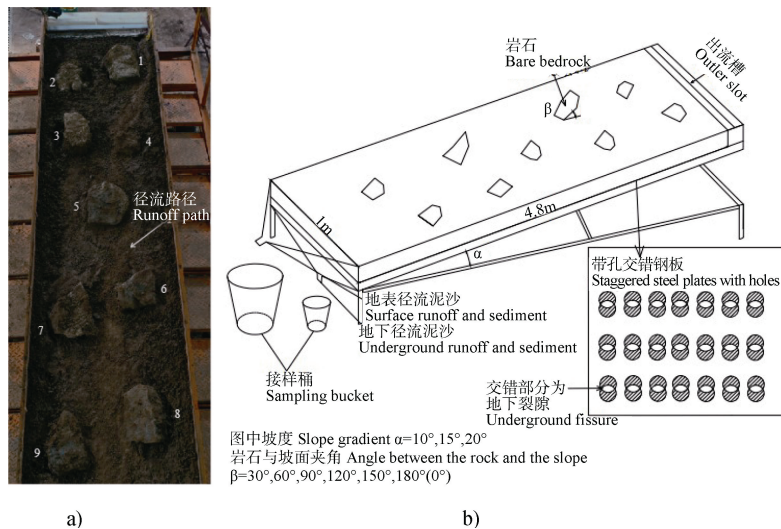


图 1 试验过程 (a) 及装置 (b)

Fig. 1 Flowchart (a) and apparatus (b) of the experiment

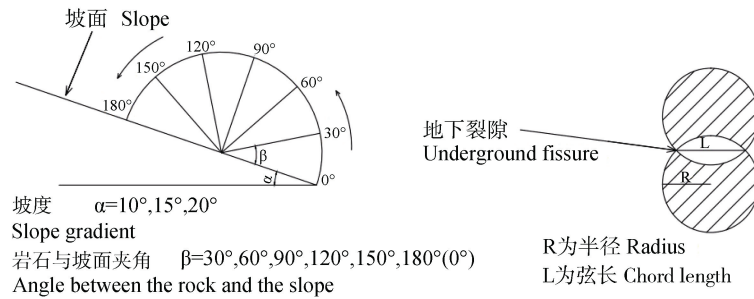


图2 岩石与坡面夹角及地下裂隙示意

Fig. 2 Diagram of angles between rock and slopes and underground fissure

1 m、宽 0.2 m、深 0.2 m), 用于冲刷时放水流量的控制。为保证水箱与土槽紧密连接, 试验过程中不漏水, 水箱放置在土槽内且用木板和纱布填充缝隙, 因此实际冲刷长度为 4.8 m (图 1)。

试验开始前, 调节钢槽地板圆孔错位, 使其裂隙达到设计值 2%。试验填土厚度为 20 cm, 按上层 15 cm(容重  $1.2 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ), 下层 5 cm(容重  $1.3 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ) 计算填土量后分层填装。在土槽两边内壁处涂抹凡士林, 两侧填土稍高于其他部分以减小边缘效应。填土过程中使用特制木板压实耙平土壤。填土完成后将直径大于 25 cm 的石灰岩块石按岩石裸露率 15% 及相应固定岩土接触面积随机排列装于土槽内。采用坡度倾斜仪将夹角调整到设计水平后, 压实岩石与土壤接触面, 保证与野外实际情况一致。使用侧喷式降雨器降小雨, 观察到地下产生均匀不间断漏渗且地表有蓄流时停止降雨, 使其达到饱和, 放置 48 h。

试验开始时, 调整变坡水槽至设计坡度。打开出水阀门, 开始放水。使用量筒对放水流量进行率定, 保证放水流量与设计流量相对误差  $\leq 2.5\%$ 。待流量达到设计值且出流稳定后, 调整水箱与土槽过渡段左右高度使水流集中在一侧出流, 保证水流出流集中。试验中, 分别在距底端 1 m、2.5 m、3.5 m 处设置测定断面, 测定流速、水深及水宽。前期预试验表明, 冲刷历时为 18 min 时产流产沙基本稳定, 故本文冲刷时间设置为 18 min。在前 6 分钟每分钟测定流速、水深及水宽, 后 12 分钟每隔 1.5 min 测定流速、水深及水宽。采用染色法测定流速, 测距为 0.5 m; 用薄钢尺量测水深及水宽, 用温度计测量水流温度用于计算水运动黏滞系数。每场冲刷试验结束后, 根据冲刷沟道深度更换表层土壤, 将表面

抹平打毛后为下一场试验作准备。

### 1.3 数据处理

染色法测得的流速为水流表面流速, 根据表面流速计算所得水流流态, 将测得的流速分别乘 0.67、0.70 和 0.80 的修正系数<sup>[11]</sup>, 从而得到水流的平均流速。本试验水流平均流速变化范围为  $0.17 \sim 0.46 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , 标准差变化于  $0.0001 \sim 0.15$ ; 水流平均水深变化范围为  $0.50 \sim 2.40 \text{ cm}$ , 标准差变化于  $0.005 \sim 0.83$ 。径流雷诺数  $Re$  是判断水流流态的重要指标, 当  $Re < 900$  时, 水流为层流;  $900 < Re < 2000$  时, 水流为过渡流;  $Re > 2000$  时水流处于紊流状态<sup>[7]</sup>, 其计算公式为:

$$Re = VR/\nu \quad (3)$$

式中,  $V$  为水流平均流速,  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ;  $R$  为水力半径,  $\text{m}$ ;  $R=A/P$ ,  $A$  为过水断面面积,  $\text{m}^2$ ;  $P$  为湿周,  $\text{m}$ ;  $P=2h+b$ ,  $h$  为径流深,  $\text{m}$ ;  $b$  为径流宽,  $\text{m}$ ;  $\nu$  为水运动黏滞系数,  $\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$ ,  $\nu=0.01775 \times 10^{-4} / (1+0.0337 t+0.000221 t^2)$ ;  $t$  为水温,  $^\circ\text{C}$ 。

Darcy-Weisbach 阻力系数  $f$  计算公式为:

$$f = 8gRS/V^2 \quad (4)$$

式中,  $g$  为重力加速度,  $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ ;  $S$  为水力坡降,  $S=\sin\theta$ ,  $\theta$  为试验坡度,  $^\circ$ 。

### 1.4 数据分析方法

采用 Excel2016 进行试验数据的整理, 采用 SPSS24.0 对  $Re$  和  $f$  之间关系进行线性、对数和幂函数拟合。本文显著水平设置为:  $P < 0.05$  为关系显著,  $P < 0.01$  为关系极显著。使用 Origin2018 及 AutoCAD2018 进行作图。



## 2 结果与讨论

### 2.1 不同岩石与坡面夹角条件下径流雷诺数 $Re$ 随冲刷历时的变化

不同流量、坡度和岩石与坡面夹角条件下径流雷诺数  $Re$  随冲刷时间的变化过程如图 3 所示。在试验条件下,  $Re$  变化范围为 517~3 343, 与李占斌等<sup>[15]</sup>在陡坡条件下放水冲刷的研究结果相似。集中水流在 1 min 之内快速冲刷出细沟, 使得每场试验  $Re$  变化范围不大。流量为  $5 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$  条件下, 试验时段内各组合的径流流态为过渡流。随着坡度和流量的增大, 水流重力势能和动能增加, 流速增大, 径流紊动性增加, 径流处于以紊流为主过渡流为辅

的交替状态。当流量和坡度均达到最大时, 不同岩石与坡面夹角条件下的地表径流均处于紊流状态。 $Re$  随着流量的增加而增大, 但随坡度变化规律不明显, 这与杨大明等<sup>[28]</sup>在室内放水冲刷黄绵土的研究结果类似。这是由于单宽流量越大, 单位时间通过某一断面的径流量越多, 水深和流速越大,  $Re$  也越大<sup>[4]</sup>。

由图 3 可知, 岩石与坡面夹角对  $Re$  随时间变化过程的影响较复杂, 不同夹角条件下的径流雷诺数对坡度和流量的响应规律不同。 $10^\circ$  坡面、 $5 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$  流量时, 各岩石与坡面夹角下坡面集中流  $Re$  随冲刷历时总体表现出增大的趋势, 这与张乐涛等<sup>[29]</sup>研究结果相似。试验前 5 min 内沟道形态阻力增大, 随

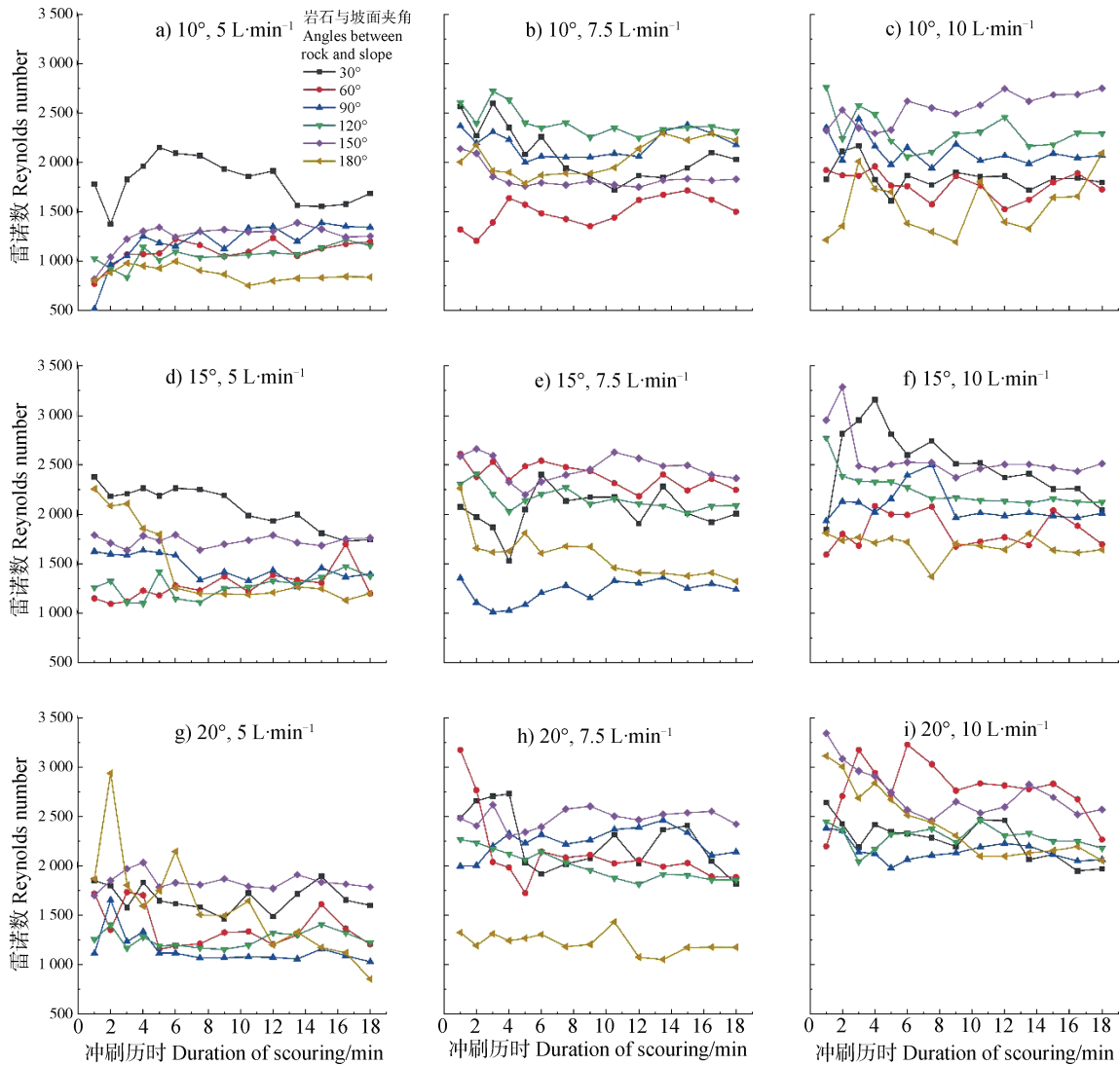


图 3 雷诺数随冲刷时间的变化  
Fig. 3 Variation of Reynolds number with duration of scouring

着沟道深度增加, 岩石对水流阻挡作用增大, 流速减小, 但水力半径增大变化大于流速减小的变化, 使得  $Re$  增加并始终保持发展或稳定态势<sup>[6]</sup>。岩石与坡面夹角为  $180^\circ$  时,  $10^\circ$  坡面各流量条件下,  $Re$  随时间变化波动性增加, 变化范围为  $803 \sim 2\,295$ 。在其他坡度条件下其  $Re$  则随冲刷历时波动减小, 说明坡度对于夹角  $180^\circ$  条件下  $Re$  随冲刷历时变化的影响较大。岩石与坡面夹角为  $30^\circ$  时,  $10^\circ$  坡面、 $7.5\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$  和  $10\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$  流量下与  $15^\circ$  坡面、 $5\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$  流量以及  $20^\circ$  坡面全流量条件下,  $Re$  均随冲刷历时总体呈减小趋势, 这是由于夹角为  $30^\circ$  时, 岩石对地表水流阻挡作用最小<sup>[30]</sup>, 水流受惯性力影响较大。随着坡度和流量的增大, 径流能量增加, 侵蚀能力增强, 沟道深度及侵蚀形态复杂程度增大, 沟道糙度变大, 此时地下裂隙和沟道形态对地表径流雷诺数影响较大<sup>[31]</sup>, 流速减小快于径流深增加,  $Re$  随时间变化逐渐减小。在其他坡度和流量条件下  $Re$  随冲刷历时变化不一, 规律性不强, 表明岩石与坡面夹角  $30^\circ$  的  $Re$  随冲刷历时变化趋势受坡度和流量的双重影响。在岩石与坡面夹角  $60^\circ$  条件下,  $15^\circ$  和  $20^\circ$  坡面、 $10\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$  流量的  $Re$  随时间变化表现为先增大后减小, 最大值出现在  $4 \sim 6\text{ min}$  内, 这与李天阳等<sup>[32]</sup>研究结果类似。这是水深和流速变化综合作用的结果, 在冲刷过程前期流速较大且水力半径快速增加,  $Re$  增大。在  $6\text{ min}$  以后, 跌坎被冲开, 壅水减少, 沟道加深促进了地下漏渗, 沟道中水力半径有减小的趋势, 水流能量减少, 流速减小较快, 二者综合作用导致  $Re$  减小。 $10^\circ$  坡面、 $7.5\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$  流量和  $15^\circ$  坡面、 $5\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$  流量条件下, 其  $Re$  随冲刷历时总体呈增大趋势, 而在  $10^\circ$  坡面、 $10\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$  流量,  $15^\circ$  坡面、 $7.5\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$  流量与  $20^\circ$  坡面下的  $5\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$  及  $7.5\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$  流量条件时, 其  $Re$  随冲刷历时呈减小趋势。这可能是冲刷水流能量不同导致了不同的沟道侵蚀强度, 在岩石与坡面夹角和地下裂隙影响下流速和水深变化不一致所造成的。岩石与坡面夹角为  $90^\circ$  时,  $15^\circ$  坡面、 $10\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$  流量和  $20^\circ$  坡面、 $7.5\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$  流量的  $Re$  随冲刷历时先增大后减小, 其原因与夹角  $60^\circ$  条件下一致。 $15^\circ$  和  $20^\circ$  两个坡面下  $5\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$  流量和  $20^\circ$  坡面、 $10\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$  流量的  $Re$  则随冲刷历时逐渐减小。在  $15^\circ$  和  $20^\circ$  两个坡面、 $10\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$  流量条件下, 岩石与坡面夹角为  $120^\circ$ 、 $150^\circ$  和  $180^\circ$  的  $Re$  随冲刷历时变化规律较为明显, 均

逐渐减小, 且在前  $4\text{ min}$  内减少较快。这可能是因为当夹角大于  $60^\circ$  时, 岩石倾向与坡面水流流向不同, 岩石对能量较大水流阻挡效应明显。前  $4\text{ min}$  内随着冲刷进行, 岩石对水流阻挡作用增强, 水流黏滞力占主导作用, 水深增大; 但随着沟道下切, 地下裂隙也使得地下漏失量增多, 沟道水流能量减小, 在沟道形态阻力和岩石阻挡综合作用下, 流速减小快于水力半径增加,  $Re$  呈现减小趋势。在其他坡度和流量条件下, 夹角  $120^\circ$ 、 $150^\circ$  和  $180^\circ$  的  $Re$  随冲刷历时变化规律不一, 说明冲刷水流能量大小影响着不同岩石与坡面夹角的  $Re$  随冲刷历时变化趋势。

相较于岩石与坡面夹角  $30^\circ$  和  $60^\circ$ , 当夹角大于  $60^\circ$  时, 试验过程中  $Re$  的变化更为稳定。 $Re$  的突变常伴随水流冲刷部位侵蚀作用的增强<sup>[33]</sup>, 这说明岩石与坡面夹角为  $30^\circ$  和  $60^\circ$  时水土流失方向主要是沿坡面顺流而下, 随着岩石与坡面夹角增大, 岩石有利于控制地表侵蚀发生的变化过程, 从而减小地表侵蚀的强度, 此时地表水流在地下裂隙存在的情况下, 主要通过地下漏渗方式带走土壤颗粒, 这与 Cruz Nunes 等<sup>[34]</sup>研究结果类似。

## 2.2 不同岩石与坡面夹角条件下径流阻力系数 $f$ 随冲刷历时的变化

试验条件下阻力系数随时间变化如图 4 所示。细沟侵蚀过程中水流所受阻力与流量和坡度密切相关。本试验结果显示  $f$  随坡度增大而增大, 随流量增大而减小, 这与白玉洁等<sup>[35]</sup>研究结果相反, 与申楠等<sup>[36]</sup>研究结果类似。这可能与在地下裂隙和岩石与坡面夹角的影响下, 流量和坡度变化引起径流深、相对糙度  $D/h$  以及沟道形态的变化有关<sup>[4]</sup>。坡度增大, 水流势能转化为动能的能量增加, 水流冲刷能力增强, 沟道形态阻力增大, 沟道深度增加导致地下漏渗增多, 地表径流能量减小, 增大了径流阻力。当流量增大时, 水深增大, 相对糙率减小, 虽然径流冲刷改变沟道形态产生形态阻力, 但流量由小变大时引起的糙率减小的程度大于形态变化引起的阻力增大的程度<sup>[3]</sup>, 因此  $f$  随流量的增大而减小。

试验过程中  $f$  值介于  $0.62 \sim 5.70$ , 这与张翔等<sup>[37]</sup>研究结果有所不同, 这可能是由于本试验设置的坡度、流量等条件以及下垫面特性、土壤粒径及其排列与前人不同而造成的。随着冲刷时间的延长, 各条件下的  $f$  总体表现出增大的趋势, 这与前人研究

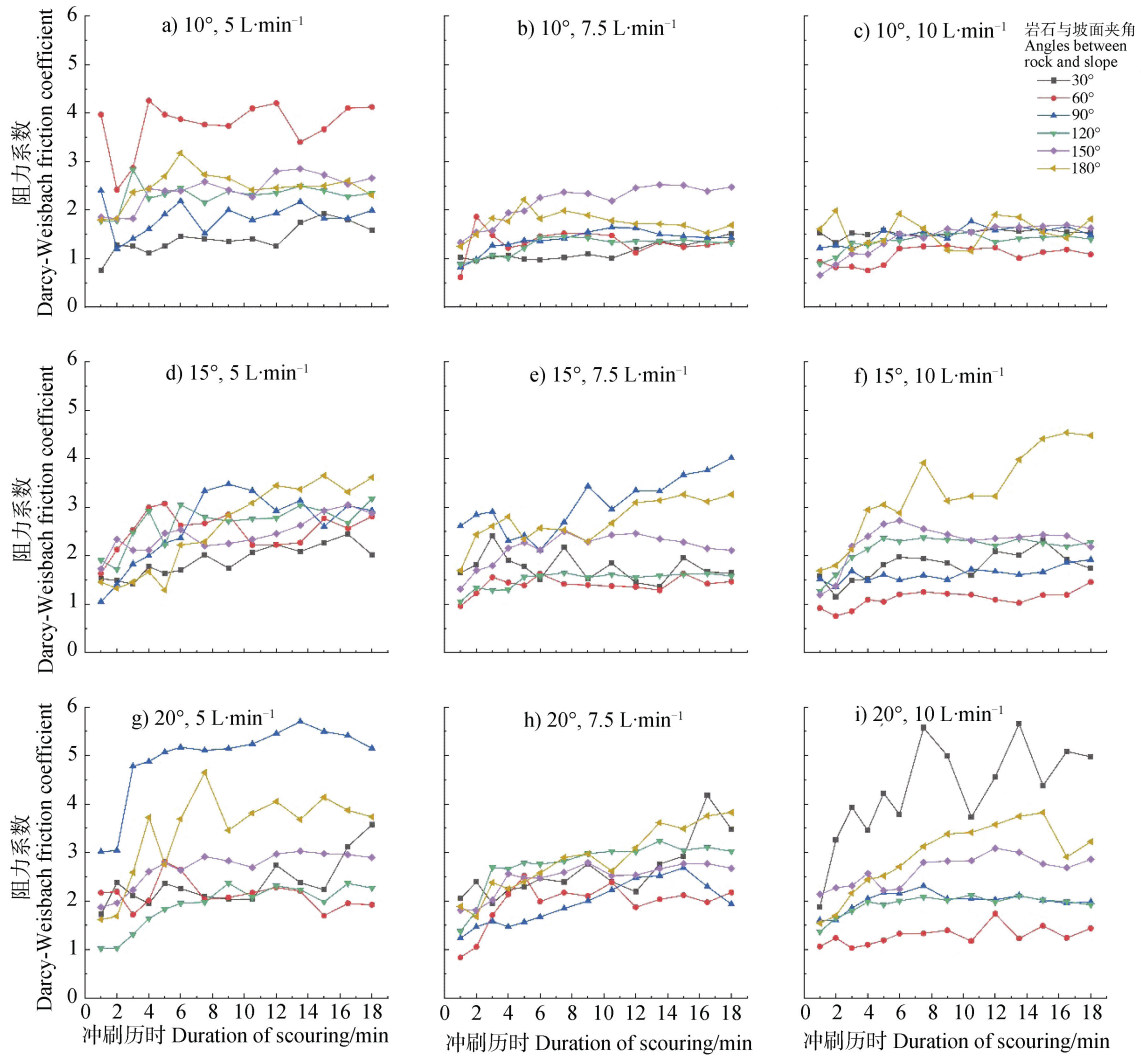


图 4 阻力系数随冲刷时间的变化

Fig. 4 Variation of Darcy-Weisbach friction coefficient with duration of scouring

结果类似<sup>[38]</sup>。试验刚开始时，集中水流仅受到颗粒阻力和岩石阻挡作用，来自细沟床面的摩擦阻力及其产生的水流紊动作用小，阻力较小。随后集中水流快速切出细沟，沟道形态阻力产生， $f$ 增大。在冲刷过程中，由于岩石阻挡作用，岩土界面处流速和水深发生突变，水流紊动性增强，加剧水流沿流程的横断面与纵降比不规则性，对沟床的局部冲刷和剪切作用增强<sup>[33, 39]</sup>。试验中观察到径流流经的岩石上部和侧部出现较深壅水及跌水，该处侵蚀程度较大，沟道形态阻力增加，这与王恒松等<sup>[19]</sup>在喀斯特野外地区观察到的侵蚀现象一致。水流经过岩石时发生明显的侧切现象，流程增加，阻力随之增大<sup>[7]</sup>。且随着侵蚀沟道深度不断增大，岩石阻挡作用进一步增强，水流路径起伏变大，水力坡度逐渐增大，沟道摩擦力对水流的阻滞作用增强，水流在运动过

程中克服阻力所做的功也越大<sup>[40]</sup>。同时地下裂隙的影响程度不断增大，地下漏渗增加，地表水流能量减小，综合作用使得  $f$  增大或保持平稳趋势。由于各条件下水流能量、岩石与坡面夹角不同，使得水流携沙能力、土壤侵蚀程度和岩石阻挡作用不同<sup>[13]</sup>，进而产生不同的细沟形态，在相对糙率  $D/h$  变化和冲刷后期水流对沟道的磨蚀作用影响下，各试验过程中  $f$  的变化不尽相同<sup>[4]</sup>。

与岩石与坡面夹角小于  $90^\circ$  时的  $f$  变化过程相比，夹角为  $120^\circ$  和  $150^\circ$  时  $f$  变化过程更为稳定。说明岩石与坡面夹角大于  $60^\circ$  时，岩石对于水流有较强的阻挡作用，此时岩石有利于控制径流冲刷过程平稳。上述研究结果表明在喀斯特槽谷区，沟道水流阻力不仅受坡度、流量等水力条件和侵蚀形态本身的影响，还与地下裂隙和岩石与坡面夹角有关。

### 2.3 $Re$ 、 $f$ 和岩石与坡面夹角的关系

本试验研究结果表明各坡度和流量组合条件下,  $Re$  和岩石与坡面夹角关系不显著 ( $P>0.05$ ), 而  $f$  和岩石与坡面夹角间的关系在各流量和坡度组合下表现不同。在  $20^\circ$  坡面、 $10 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$  流量条件下,  $f$  与岩石与坡面夹角 ( $x$ ) 间的作用关系可表示为:

$$f=4.031x^{-0.122} \quad R^2=0.039 \quad P=0.706$$

(含  $30^\circ$  夹角数据) (5)

$$f=0.077x^{0.697} \quad R^2=0.923 \quad P=0.009$$

(无  $30^\circ$  夹角数据) (6)

式中,  $f$  为阻力系数;  $x$  为岩石与坡面夹角,  $^\circ$ 。

由式 (5) 和式 (6) 可知, 水流能量较大时, 岩石与坡面夹角  $30^\circ$  条件对于  $f$  和岩石与坡面夹角关系影响显著。结合图 4 分析, 这和夹角  $30^\circ$  时冲刷过程中的岩石对于大能量水流阻挡作用较小有关。此时集中水流冲刷能力强, 试验中观察到由于能量较大, 水流更易直接流经岩石光滑表面, 冲击岩石下部土体, 产生深度较大的跌水, 剧烈的冲刷作用使得沟道形态阻力较大。同时沟道被快速下切出较大的深度, 地下漏渗增加, 这与严友进等<sup>[27]</sup>研究结果类似。冲刷过程中发现岩石与坡面夹角  $150^\circ$  条件下地下产流速率从 3 min 的  $0.52 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$  增大至 18 min 的  $1.18 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ , 而夹角  $30^\circ$  的地下产流速率

从 3 min 的  $0.3 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$  增大至 18 min 的  $2.06 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ 。地表冲刷流量减小, 水流流速减小,  $f$  增大。以上综合因素作用使得水流能量较大时, 岩石与坡面夹角  $30^\circ$  的  $f$  相对于其他夹角较大, 从而影响着  $f$  和岩石与坡面夹角关系。

同时由式 (6) 可知, 无夹角  $30^\circ$  影响时,  $20^\circ$  坡面、 $10 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$  流量条件下  $f$  和岩石与坡面夹角呈显著的幂函数正相关关系。这可能是由于岩石的存在重塑了坡面构造, 随着岩石与坡面夹角的增大, 岩石对大能量的水流阻挡作用也逐渐增大, 不同夹角条件下的岩石通过影响沟道中集中水力坡降从而影响坡度的实际作用效果, 在水力作用下产生不同侵蚀形态和径流深, 进而影响到径流阻力<sup>[41]</sup>。

### 2.4 $f$ 与 $Re$ 的关系

不同岩石与坡面夹角下  $f$  和  $Re$  的拟合关系见表 2。Roels<sup>[13]</sup>研究了细沟出现前后的  $f$ - $Re$  关系, 发现二者的关系可以用对数方程式描述。在本试验条件下, 岩石与坡面夹角小于  $90^\circ$  时, 对数方程可较好描述  $f$  与  $Re$  之间的关系; 夹角大于等于  $90^\circ$  时, 幂函数方程决定系数  $R^2$  较大。岩石与坡面夹角  $180^\circ$  情况下的方程决定系数  $R^2$  最小。

表 2 不同岩石与坡面夹角条件下  $f$ - $Re$  之间的关系

Table 2 Relationships between  $f$  and  $Re$  relative to angle between the rock and the slope

岩石与坡面夹角 Angle between the rock and the slope/ $^\circ$	$f$ - $Re$ 关系 Relationship between $f$ and $Re$											
	$f=aRe+b$				$f=a \ln(Re)+b$				$f=aRe^b$			
	a	b	$R^2$	$P$	a	b	$R^2$	$P$	a	b	$R^2$	$P$
30	0.001	-0.046	0.085	0.447	2.078	-13.77	0.082	0.455	0.005	0.79	0.068	0.498
60	-0.001	3.601	0.401	0.067	-1.997	16.71	0.507	0.031	1682	-0.927	0.465	0.043
90	-0.002	5.029	0.497	0.034	-2.598	21.63	0.506	0.032	4259	-1.023	0.571	0.018
120	-0.001	3.031	0.304	0.124	0.884	8.602	0.272	0.149	71.96	-0.484	0.296	0.130
150	-0.0002	-0.0002	0.060	0.525	-0.360	5.031	0.06	0.524	9.964	-0.195	0.067	0.500
180	$-7.518 \times 10^{-5}$	2.601	0.001	0.989	0.001	2.585	0.001	0.999	3.226	-0.303	0.001	0.924

本研究中, 岩石与坡面夹角为  $30^\circ$  时,  $f$  与  $Re$  呈正相关。当岩石与坡面夹角逐渐增大, 两者呈负相关, 表明存在临界岩石与坡面夹角值, 使得  $Re$  增加,  $f$  开始减小。张科利<sup>[3]</sup>研究发现受坡度陡缓影响, 沟道侵蚀程度及形态会有很大差异, 从而使得坡度小于  $10^\circ$  时,  $f$  与  $Re$  呈指数函数负相关; 而在

坡面为  $12^\circ$  和  $15^\circ$  时, 二者呈指数函数正相关, 表明坡度对水流阻力的变化趋势有着决定性的影响作用。本文中, 相同水力条件下, 不同夹角的岩石对水流能量消减作用不同, 在地下裂隙影响下产生不同的沟道冲刷形态和侵蚀程度, 表明岩石与坡面夹角显著影响  $f$ - $Re$  关系, 这与甘凤玲等<sup>[30]</sup>研究结果一



致。试验条件下,当  $Re < 1791$  时,  $f$  与  $Re$  关系不显著,当  $Re > 1791$  时,  $f$  与  $Re$  则呈显著正相关(图 5)。Shen 和 Li<sup>[42]</sup>在光滑下垫面条件下通过试验得出  $Re > 2000$  时,  $f$  随  $Re$  的增大而减小。这与本研究结果不同,可能是由于本试验为集中水流动床冲刷试验,水力条件不一致,同时特殊二元结构和岩石与坡面夹角存在改变了坡体构造,使得在紊流状态下,水流冲刷作用导致地下漏渗增多、岩石阻挡作用以及沟道形态阻力增大,  $f$  随  $Re$  的增大而增大。本文研究了喀斯特槽谷区不同岩石与坡面夹角条件下集中流  $f$ - $Re$  的变化耦合关系,但基于该区域特殊二元地质结构特性,不同地下裂隙度对于地表集中流水力学特性的影响作用还需进一步研究。

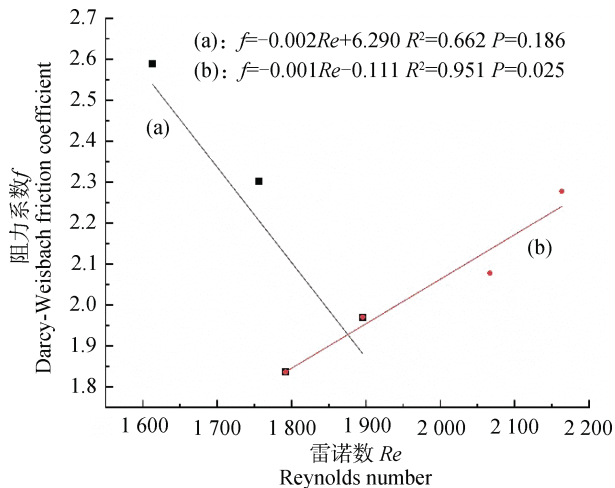


图 5 试验条件下  $f$  与  $Re$  间的变化关系

Fig. 5 Regression relationships between  $f$  and  $Re$  under the experiment conditions

### 3 结论

试验条件下,喀斯特槽谷区坡面集中水流  $Re$  变化范围为 517~3343,其随流量的增加而增大,随坡度变化规律则不明显。岩石与坡面夹角对  $Re$  随时间变化过程的影响较复杂。 $10^\circ$ 坡面、 $5 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ 流量下,各岩石与坡面夹角的  $Re$  随冲刷历时均表现出增大趋势。在其他条件下,则出现  $Re$  随冲刷进行而减小的现象。 $f$  值介于 0.62~5.70,随坡度增大而增大,随流量增大而减小。各试验条件下的  $f$  随冲刷历时呈增大的变化趋势。各坡度和流量组合条件下,  $Re$  和岩石与坡面夹角关系均不显著,  $f$  和岩石与坡面夹角间的关系在各流量和坡度组合

下表现不同。 $f$  与  $Re$  的耦合关系受岩石与坡面夹角的显著影响。岩石与坡面夹角小于  $90^\circ$  时,可用对数方程式来描述二者关系;夹角大于等于  $90^\circ$  时,用幂函数方程描述二者关系更好。当  $Re < 1791$  时,  $f$  与  $Re$  关系不显著,当  $Re > 1791$  时,  $f$  与  $Re$  则呈显著正相关。本研究可丰富土壤侵蚀水动力学理论,并为建立和完善喀斯特槽谷区土壤侵蚀预报模型提供依据。

### 参考文献 (References)

- [1] Poesen J, Nachtergaele J, Verstraeten G, et al. Gully erosion and environmental change: Importance and research needs[J]. Catena, 2003, 50 (2/4): 91—133.
- [2] Sha J D, Jiang Y J. Attempt for expounding basic dynamic characteristics of very shallow flow on preliminary eco-erosion slopes[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1995, 9 (4): 29—35. [沙际德, 蒋允静. 试论初生态侵蚀性坡面薄层水流的基本动力特性[J]. 水土保持学报, 1995, 9 (4): 29—35.]
- [3] Zhang K L. Study of flow resistance law in rill erosion on loess slope[J]. Yellow River, 1998, 20 (8): 13—15, 46. [张科利. 黄土坡面细沟侵蚀中的水流阻力规律研究[J]. 人民黄河, 1998, 20 (8): 13—15, 46.]
- [4] Zheng L Y, Li Z B, Li P. Experimental study on hydraulic characteristics of runoff on steep slope in loess area[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004, 35 (5): 46—51. [郑良勇, 李占斌, 李鹏. 黄土区陡坡径流水动力学特性试验研究[J]. 水利学报, 2004, 35 (5): 46—51.]
- [5] 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.
- [6] Li M, Yao W Y, Yang J F, et al. Experimental study on the effect of grass cover on the overland flow pattern in the hillslope-gully side erosion system[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2009, 17 (4): 513—523. [李勉, 姚文艺, 杨剑锋, 等. 草被覆盖对坡面流流态影响的人工模拟试验研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2009, 17 (4): 513—523.]
- [7] Yao W Y. Experiment study on hydraulic resistance laws of overland sheet flow[J]. Journal of Sediment Research, 1996 (1): 74—82. [姚文艺. 坡面流阻力规律试验研究[J]. 泥沙研究, 1996 (1): 74—82.]
- [8] Li P, Li Z B, Zheng L Y. Experimental study on dynamic mechanism of critical erosion on loess steep slopes[J]. Journal of Sediment Research, 2008 (1): 17—20. [李鹏, 李占斌, 郑良勇. 黄土陡坡土壤侵蚀临界动力机制试验研究[J]. 泥沙研究, 2008 (1): 17—20.]
- [9] Li Y H, Niu Y B, Wang Z Z, et al. Hydrodynamic parameters and their relationships of runoff over

- engineering accumulation slope[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31 (22): 83—88. [李永红, 牛耀彬, 王正中, 等. 工程堆积体坡面径流水动力学参数及其相互关系[J]. 农业工程学报, 2015, 31 (22): 83—88.]
- [ 10 ] Wang W L, Lei A L, Li Z B, et al. Experimental study on soil erosion dynamic mechanism of slope flow in loess hilly region[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2003, 34 (9): 66—70. [王文龙, 雷阿林, 李占斌, 等. 黄土丘陵区坡面薄层水流侵蚀动力机制实验研究[J]. 水利学报, 2003, 34 (9): 66—70.]
- [ 11 ] Abrahams A D, Parsons A J. Resistance to overland flow on desert pavement and its implications for sediment transport modeling[J]. Water Resources Research, 1991, 27 (8): 1827—1836.
- [ 12 ] Nearing M A, Norton L D, Bulgakov D A, et al. Hydraulics and erosion in eroding rills[J]. Water Resources Research, 1997, 33 (4): 865—876.
- [ 13 ] Roels J M. Flow resistance in concentrated overland flow on rough slope surfaces[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 1984, 9 (6): 541—551.
- [ 14 ] Zhang G H. Study on hydraulic properties of shallow flow[J]. Advances in Water Science, 2002, 13 (2): 159—165. [张光辉. 坡面薄层水动力学特性的实验研究[J]. 水科学进展, 2002, 13 (2): 159—165.]
- [ 15 ] Li Z B, Qin B S, Kang W, et al. Indoor experimental studies on hydrodynamic characteristics of runoff in rill erosion procession steep slope[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2008, 24 (6): 64—68. [李占斌, 秦百顺, 亢伟, 等. 陡坡面发育的细沟水动力学特性室内试验研究[J]. 农业工程学报, 2008, 24 (6): 64—68.]
- [ 16 ] Abrahams A D, Li G, Parsons A J. Rill hydraulics on a semiarid hillslope, southern Arizona[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 1996, 21 (1): 35—47.
- [ 17 ] Jiang Y J, Liu X M, He S Y, et al. Research and development of comprehensive rehabilitation measures for land rocky desertification in Karst trough valley area[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36 (22): 7092—7097. [蒋勇军, 刘秀明, 何师意, 等. 喀斯特槽谷区土地石漠化与综合治理技术研发[J]. 生态学报, 2016, 36 (22): 7092—7097.]
- [ 18 ] Gan F L, He B H, Qin Z Y. Hydrological response and soil detachment rate from dip/anti-dip slopes as a function of rock strata dip in Karst valley revealed by rainfall simulations[J]. Journal of Hydrology, 2020, 581: 124416.
- [ 19 ] Wang H S, Xiong K N, Zhang F M. Mechanism study on effects of terrain on soil erosion of Karst slope[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2015, 35 (4): 1—7. [王恒松, 熊康宁, 张芳美. 地形因子对喀斯特坡面水土流失影响的机理研究[J]. 水土保持通报, 2015, 35 (4): 1—7.]
- [ 20 ] Zhang X B, Wang S J, Cao J H, et al. Characteristics of water loss and soil erosion and some scientific problems on Karst rocky desertification in southwest China Karst area[J]. Carsologica Sinica, 2010, 29 (3): 274—279. [张信宝, 王世杰, 曹建华, 等. 西南喀斯特山地水土流失特点及有关石漠化的几个科学问题[J]. 中国岩溶, 2010, 29 (3): 274—279.]
- [ 21 ] Peng X D, Dai Q H, Li C L. Research progress on the process and mechanism of soil water loss or leakage on slope in Southwest Karst of China[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2017, 31 (5): 1—8. [彭旭东, 戴全厚, 李昌兰. 中国西南喀斯特坡地水土流失/漏失过程与机理研究进展[J]. 水土保持学报, 2017, 31 (5): 1—8.]
- [ 22 ] Akdim B. Karst landscape and hydrology in Morocco: Research trends and perspectives[J]. Environmental Earth Sciences, 2015, 74 (1): 251—265.
- [ 23 ] Dai Q H, Peng X D, Wang P J, et al. Surface erosion and underground leakage of yellow soil on slopes in Karst regions of southwest China[J]. Land Degradation & Development, 2018, 29 (8): 2438—2448.
- [ 24 ] 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[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33 (2): 131—140. [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.]
- [ 25 ] 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 & Development, 2017, 28 (7): 1922—1932.
- [ 26 ] 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[J]. Acta Pedologica Sinica, 2016, 53 (5): 1237—1248. [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[J]. 土壤学报, 2016, 53 (5): 1237—1248.]
- [ 27 ] Yan Y J, Dai Q H, Fu W B, et al. Runoff and sediment production processes on a Karst bare slope[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37 (6): 2067—2079. [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[J]. 生态学报, 2017, 37 (6): 2067—2079.]
- [ 28 ] Yang D M, Gao P L, Liu X Y, et al. Hydraulic characteristics of slope land under rill erosion[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2017, 36 (10): 65—73. [杨大明, 高佩玲, 刘小媛, 等. 细沟侵蚀下的坡面水动力学特性研究[J]. 水力发电学报, 2017, 36 (10): 65—73.]
- [ 29 ] Zhang L T, Gao Z L, Tian H W. Hydro-dynamic characteristics of steep slope runoff of engineering

- accumulation under simulated runoff conditions[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2013, 27(4): 34—38. [张乐涛, 高照良, 田红卫. 工程堆积体陡坡坡面径流水动力学特性[J]. *水土保持学报*, 2013, 27(4): 34—38.]
- [ 30 ] Gan F L, He B H, Qin Z Y. Effect of bedding slope on hydrodynamic parameters in typical Karst Valley[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2019, 56(4): 825—837. [甘凤玲, 何丙辉, 覃自阳. 喀斯特槽谷区的顺/逆层坡面对水动力学参数的影响[J]. *土壤学报*, 2019, 56(4): 825—837.]
- [ 31 ] Wang L S, Cai Q G, Cai C F, et al. Morphological changes of rill on loess slope and its relationship with flow velocity[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30(11): 110—117. [王龙生, 蔡强国, 蔡崇法, 等. 黄土坡面细沟形态变化及其与流速之间的关系[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(11): 110—117.]
- [ 32 ] Li T Y, He B H, Lei T W, et al. Indoor experiments on eroding rills hydrodynamics characteristics of earth-rock mixed landslide slope in Wenchuan Earthquake area[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2014, 45(8): 892—902. [李天阳, 何丙辉, 雷廷武, 等. 汶川震区滑坡堆积体土石混合坡面细沟水动力学特征室内试验[J]. *水利学报*, 2014, 45(8): 892—902.]
- [ 33 ] Ding W F, Li Z B, Lu K X, et al. The elementary study of the reason of rill erosion on slope[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2003, 40(6): 822—828. [丁文峰, 李占斌, 鲁克新, 等. 坡面细沟发生临界水动力条件初探[J]. *土壤学报*, 2003, 40(6): 822—828.]
- [ 34 ] Cruz Nunes F, Delunel R, Schlunegger F, et al. Bedrock bedding, landsliding and erosional budgets in the Central European Alps[J]. *Terra Nova*, 2015, 27(5): 370—378.
- [ 35 ] Bai Y J, Zhang F B, Yang M Y, et al. Variation of hydraulic parameters of shallow flow on steep loess slope[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2018, 55(3): 641—649. [白玉洁, 张凤宝, 杨明义, 等. 急陡黄土坡面薄层水流水力学参数变化特征[J]. *土壤学报*, 2018, 55(3): 641—649.]
- [ 36 ] Shen N, Wang Z L, Liu J E, et al. Experimental study of rill flow resistance on loess hillslope[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2012, 32(6): 34—37. [申楠, 王占礼, 刘俊娥, 等. 黄土坡面细沟水流阻力的试验研究[J]. *水土保持通报*, 2012, 32(6): 34—37.]
- [ 37 ] Zhang X, Gao Z L, Yuan X H, et al. Study on hydraulic parameters of rill flow on slopes of engineering accumulation[J]. *Journal of Sediment Research*, 2016(4): 34—40. [张翔, 高照良, 袁雪红, 等. 工程堆积体坡面细沟流体力学参数特性研究[J]. *泥沙研究*, 2016(4): 34—40.]
- [ 38 ] Li M, Yao W Y, Chen J N, et al. Experimental study on runoff resistance of hilly slope gullied surface with grass coverage[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2007, 38(1): 112—119. [李勉, 姚文艺, 陈江南, 等. 草被覆盖下坡面-沟坡系统坡面流阻力变化特征试验研究[J]. *水利学报*, 2007, 38(1): 112—119.]
- [ 39 ] Yu X X, Zhang X M, Li J L, et al. Process and mechanism of soil erosion[J]. Beijing: Science Press, 2009. [余新晓, 张晓明, 李建芳, 等. 土壤侵蚀过程与机制[J]. 北京: 科学出版社, 2009.]
- [ 40 ] Liang X L, Zhao L S, Wu J, et al. Simulation of response law for soil surface roughness and hydraulics parameters of runoff[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30(19): 123—131. [梁心蓝, 赵龙山, 吴佳, 等. 地表糙度与径流水力学参数响应规律模拟[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(19): 123—131.]
- [ 41 ] Zhang K L. Hydrodynamic characteristics of rill flow on loess slopes[J]. *Journal of Sediment Research*, 1999(1): 57—62. [张科利. 黄土坡面发育的细沟水动力学特征的研究[J]. *泥沙研究*, 1999(1): 57—62.]
- [ 42 ] Shen H W, Li R M. Rainfall effect on sheet flow over smooth surface[J]. *Journal of the Hydraulics Division*, 1973, 99(5): 771—792.

(责任编辑: 檀满枝)