

DOI: 10.11766/trxb202107190368

曾荣昌, 张玉启, 何丙辉, 李天阳, 张海香. 喀斯特槽谷区不同岩石与坡面夹角下集中流侵蚀水动力学特征[J]. 土壤学报, 2023, 60(3): 762–775.

ZENG Rongchang, ZHANG Yuqi, HE Binghui, LI Tianyang, ZHANG Haixiang. Hydrodynamic Characteristics of Concentrated Flow Under Different Angles Between Rock and Slope in the Karst Trough Valley Area[J]. Acta Pedologica Sinica, 2023, 60(3): 762–775.

喀斯特槽谷区不同岩石与坡面夹角下集中流侵蚀水动力学特征*

曾荣昌, 张玉启, 何丙辉[†], 李天阳, 张海香

(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岩石与坡面成不同夹角显著改变地表集中水流特性, 进而影响地表侵蚀过程。目前, 不同岩石与坡面夹角下的坡面集中流侵蚀水动力学特征动态变化过程还不清楚。通过室内模拟放水冲刷试验, 研究了 6 个岩石与坡面夹角角度 (30°、60°、90°、120°、150°、180°)、3 个坡度 (10°、15°、20°)、3 个流量 (5、7.5、10 L·min⁻¹) 组合条件下喀斯特槽谷区坡面土壤侵蚀率与水动力学变化过程。结果表明: 在各岩石与坡面夹角下, 随冲刷历时的推延, 土壤侵蚀率 (E) 先波动性减小后逐渐趋于稳定, 水流功率 (ω) 呈波动变化但趋势不明显, 单位水流功率 (U_p) 逐渐减小, 水流剪切力 (τ) 和过水断面单位能量 (ε) 波动性逐渐增大; 夹角 150° 时平均土壤侵蚀率 (0.078 kg·m⁻²·s⁻¹) 最大, 随着夹角增大, τ 、 ω 和 ε 均呈先减小后增大, U_p 整体呈减小的变化趋势, 各夹角下水动力学指标间差异均显著 ($P < 0.05$); E 、 τ 、 ω 和 U_p 随坡度和流量的增大而增大, ε 随流量增大而增大, 随坡度变化不明显; 试验条件下, E 与 τ ($R^2=0.603$)、 ω ($R^2=0.600$) 和 U_p ($R^2=0.583$) 间的关系用幂函数方程描述较好, 与 ε 间的关系则用线性方程描述较好 ($R^2=0.294$); 相比而言, 水流剪切力可更好地描述喀斯特槽谷区不同岩石与坡面夹角坡面的土壤侵蚀率。研究结果为揭示喀斯特槽谷区不同岩石与坡面夹角下坡面集中水流侵蚀水动力学机制提供了理论依据。

关键词: 喀斯特; 集中流; 岩石与坡面夹角; 水动力学参数; 土壤侵蚀

中图分类号: S157.2 文献标志码: A

Hydrodynamic Characteristics of Concentrated Flow Under Different Angles Between Rock and Slope in the Karst Trough Valley Area

ZENG Rongchang, ZHANG Yuqi, HE Binghui[†], LI Tianyang, ZHANG Haixiang

(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】 The angles formed by exposed rocks and slope surface in a Karst trough area significantly change the

* 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)

[†] 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: 2021-07-19; 收到修改稿日期: 2022-01-24; 网络首发日期 (www.cnki.net): 2022-09-27

hydrodynamic characteristics of the concentrated flow caused by surface runoff convergence. This process of rill erosion is closely related to hydrodynamic characteristics. Thus, it is essential to explore the hydrodynamic characteristics of concentrated flow erosion on a slope at different angles between the rocks and slopes in a Karst Trough Valley area. 【Method】 An indoor scouring experiment was designed having six angles between rock and slope, three slope gradients and three inflow rates to study variations of soil erosion rate and hydrodynamic parameters. 【Result】 The results showed that with scour duration going on, the soil erosion rate first decreased and then tended to be stable. Also, the stream power and shear stress fluctuated but the trend was not obvious. It was also observed that the unit stream power gradually decreased while the unit energy gradually increased. When the angle was 150° , the average soil erosion rate was largest at $0.078 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$. With the increase in angle, the shear stress, stream power and unit energy decreased at first and then increased while the unit stream power decreased as a whole. Under the experimental conditions, the soil erosion rate, flow shear force, stream power and unit stream power increased with change of slope gradients and inflow rates. Importantly, the unit energy of the flow cross-section increased with an increase in inflow rates, but this change was not obvious with the slope gradients. The differences of hydrodynamic indexes among the angles were significant ($P < 0.05$). The relationship between soil erosion rate and shear stress ($R^2 = 0.603$), stream power ($R^2 = 0.600$) and unit stream power ($R^2 = 0.583$) was better described by the power function equation, while the relationship between soil erosion rate and unit energy of flow section was better described by linear equation ($R^2 = 0.294$). Nevertheless, it was better to use shear stress to describe the soil erosion rate on the slope with different angles between rocks and slope in Karst Trough Valley area. 【Conclusion】 This study may provide a theoretical basis for revealing the hydrodynamic mechanism of concentrated flow erosion under different angles between rocks and slopes in a Karst Valley area.

Key words: Karst; Concentrated flow; Angles between rocks and slope; Hydrodynamic parameters; Soil erosion

喀斯特槽谷区特殊的顺/逆层边坡地质构造导致不同倾角岩层出露地面，地表裸露岩石与斜坡面沿坡向形成不同夹角，显著改变地表径流汇聚形成的集中流水动力特性^[1-3]。而该区域地表集中流侵蚀和土壤地下漏失耦合存在，已造成严重的土壤侵蚀^[4]。目前，已有大量研究关注了该区二元空间地质结构及岩石裸露率等因素对产流产沙的影响^[5-7]。如彭旭东等^[5]研究发现，在不同程度石漠化条件下裸坡地表产沙量总体上高于地下产沙量；操玥等^[8]研究表明喀斯特槽谷区盆地的土壤侵蚀模数大于平原地区。但关于喀斯特槽谷区坡面侵蚀水动力学机制的研究还很少见，对该区不同岩石与坡面夹角条件下的地表集中流侵蚀水动力动态变化过程的认识也不深入。

水流剪切力 τ 、水流功率 ω 、单位水流功率 Up 和过水断面单位能量 ε 等是常用的描述土壤侵蚀过程的水动力学指标^[9-10]。由于试验条件和研究方法的差异，学者们对哪种指标可以更好地描述水流侵蚀过程尚未有定论。张光辉等^[11]、Nearing 等^[12]研究认为水流功率可以很好地描述坡面水流土壤剥蚀能力。Govers^[13]认为单位水流功率是表征水流剥蚀过程效果最好的水动力学指标。而肖海等^[14]研究表

明平均单位水流功率和水流功率均可很好地预测集中流作用下的坡面侵蚀率；王秋霞等^[15]、张乐涛等^[16]、吴淑芳等^[17]和师宏强等^[18]通过放水冲刷试验研究表明水流剪切力、水流功率与土壤侵蚀率之间存在良好的线性关系。王瑄等^[19]则发现在流量相同时，水流剪切力与坡面土壤侵蚀率呈相关性较大的幂函数关系。然而，上述研究均集中于非喀斯特区域，对于喀斯特槽谷区不同地表裸露岩石与坡面夹角下集中流水动力学指标变化特征及其与土壤侵蚀率之间关系尚不清楚。基于此，本文通过室内模拟喀斯特槽谷区出露岩石与地表形成不同夹角的坡面，采用放水冲刷试验，研究在一定地下孔隙、不同夹角、流量及坡度组合条件下的适用于描述喀斯特槽谷区坡面土壤侵蚀过程的集中流水动力学指标及其变化特征，为明确喀斯特槽谷区坡面土壤侵蚀水动力学机制及发展土壤侵蚀预测模型提供数据支撑。

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 ($29^\circ 47' 41'' \text{N}$, $106^\circ 27' 19'' \text{E}$) 喀斯特地区碳酸盐岩发育的石灰性土

坡耕地 0~30 cm 耕层土壤, 土壤颗粒组成及容重见表 1。土壤风干后过 10 mm 筛。为模拟喀斯特槽谷区坡面条件, 确保尽可能地接近野外实际情况, 选择 9 块直径大于 25 cm 的不规则碳酸盐石块置于试

验钢槽中, 确保试验过程中岩土接触面积不变; 自下而上按设计容重分层装填土壤, 填土表面用特制木板耙平。钢槽两侧与土壤接触边界处涂抹凡士林, 两边土壤适当填高以减小边缘效应。

表 1 试验土壤颗粒组成及表层容重

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

土壤类型 Soil type	颗粒组成 Soil particle composition/%			容重 Bulk density /(g·cm ⁻³)
	2~0.02 mm	0.02~0.002 mm	<0.002 mm	
石灰性土 Calcareous soil	20.68	51.09	28.23	1.21

1.2 试验设计

重庆市酉阳喀斯特槽谷区存在地表地下双层地质空间结构, 槽谷两侧岩层倾向一致, 坡向相反, 出现坡向和岩层倾向一致的顺倾坡、坡向和岩层倾向相反的逆倾坡, 相对于锥、塔峰喀斯特地貌等类型, 其两翼水土资源漏失严重, 土层较薄, 发育土壤为黄色石灰土, 基岩裸露率大, 大部分径流泥沙沿坡面汇集到槽谷底部的洼地^[20]。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%, 地下裂隙度为地下裂隙水平投影面积与钢槽底板面积的百分比, 本试验设置为 2%(轻度发育)^[21]; 岩石与坡面夹角设置为 30°、60°、90°、120°、150°和 180°(0°); 土层厚度 20 cm, 分上(15 cm)、下(5 cm)两层, 其土壤容重分别

为 1.2、1.3 g·cm⁻³。根据研究区典型坡度和雨强及前人研究^[3], 试验坡度设计为 10°、15°和 20°, 冲刷流量分别为 5、7.5 和 10 L·min⁻¹。前期预试验发现冲刷进行到 18 min 时产流产沙已基本稳定, 且最大流量和坡度下细沟沟道深度已达到土槽底部, 故每场试验冲刷历时 18 min。各组合条件试验重复 2 次, 共计 108 场次。一次冲刷试验结束后, 根据细沟深度更换表层土壤, 待达到设计要求后准备下一场试验。

1.3 模拟冲刷试验

室内模拟试验在西南大学后山人工降雨大厅内进行。试验土槽采用自制的可调孔(裂)隙度的变坡钢槽(图 1), 土槽长 5.0 m、宽 1.0 m、深 0.2 m, 底部设置两块可错位调节的均匀打孔钢槽地板, 用

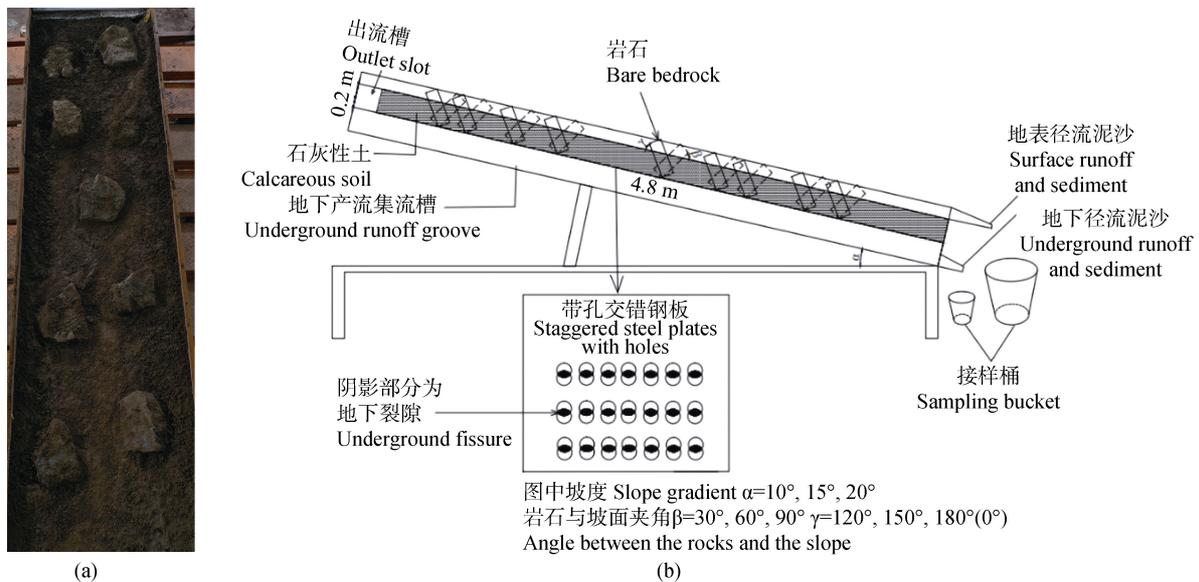


图 1 试验装置

Fig.1 Experimental device

以实现地下裂隙模拟，裂隙度在 0~5%之间可调。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。土槽顶端安装有稳流水箱（长 1 m、宽 0.2 m、深 0.2 m），水箱与土壤接触处填充纱布以使出流平缓，实际有效冲刷坡长为 4.8 m（图 1）。前期预试验结果表明，集中流在试验土槽宽度下均未达小区边界，细沟能够自由发育不受边界限制。试验开始前，调节钢槽地板，使裂隙达到设计值 2%。填土完成后，将岩石随机排列于钢槽内，调试并测量出露地表的面积，采用坡度倾斜仪将岩石与坡面夹角调整到设计水平，岩石出露地面平均高度为 17 cm，压实岩石与土壤接触面，试验过程中岩石位置及岩土接触面积保持不变。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，放置 48 h。

试验开始时，调整水箱与土槽过渡段左右高度使水流在一侧出流，保证水流出流集中。调节坡度和流量至设计水平，其中流量采用手动调节，控制放水流量与设计流量相对误差 $\leq 2.5\%$ 。试验开始后，分别在距底端 1 m、2.5 m、3.5 m 处设置测定断面，在冲刷试验前 6 min 内每分钟测定流速、水深及水宽，后 12 min 每隔 1.5 min 测定流速、水深及水宽。流速测定采用染色法，测距为 0.5 m；水深及水宽用薄钢尺量测，水流温度用温度计测量以计算水运动黏滞系数。

1.4 数据处理

染色法测定的流速为表面流速，根据表面流速计算确定水流流态，将测定的表面流速分别乘 0.67、0.70 和 0.80 的修正系数^[22]得到水流的平均流速。流速计算公式为：

$$V = \alpha V_s \quad (1)$$

式中， V 为水流平均流速， $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ； V_s 为表面流速， $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ； α 为修正系数。

水流剪切力是沿坡面分散和剪切土壤颗粒的作用力^[23]，计算公式为：

$$\tau = \rho g R S \quad (2)$$

式中， τ 为水流剪切力， $\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-2}$ ； ρ 为水的密度， $1\ 000\ \text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ； g 为重力加速度， $9.8\ \text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ ； R 为水力

半径， m ； $R = A/P$ ， A 为过水断面面积， m^2 ； P 为湿周， m ； $P = 2h + b$ ， h 为径流深度， m ； b 为径流宽度， m ； S 为水力坡降， $S = \sin\theta$ ， θ 为试验坡度， $^\circ$ 。

水流功率是指作用于单位面积水流所消耗的动能和势能的速率^[24]，计算公式为：

$$\omega = \tau V = \rho g R S V \quad (3)$$

式中， ω 为水流功率， $\text{kg}\cdot\text{s}^{-3}$ 。

单位水流功率是指单位重量的水体作用于泥沙床面所消耗的功率^[25]，计算公式为：

$$U_p = V S \quad (4)$$

式中， U_p 为单位水流功率， $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

过水断面单位能量是以过水断面最低点做基准面的单位水重的动能与势能之和^[26]，计算公式为：

$$\varepsilon = h + V^2 / 2g \quad (5)$$

式中， ε 为过水断面单位能量， m 。

本文中，土壤侵蚀率为单位时间单位面积上径流剥蚀输移的泥沙量，计算公式为：

$$E = M / t b L \quad (6)$$

式中， E 为土壤侵蚀率， $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ； M 为冲刷时间内的泥沙质量， kg ； t 为冲刷时间， s ； b 为径流宽， m ； L 为试验坡长， m 。

1.5 数据分析方法

采用 Excel2016 进行试验数据整理，利用 SPSS24.0 进行数据统计分析。采用双因素方差分析方法检验坡度、流量对土壤侵蚀率的作用，分别使用多元回归分析拟合土壤侵蚀率、水流剪切力、水流功率、单位水流功率以及过水断面单位能量与坡度、流量的关系；采用单因素方差（One-way ANOVA）对不同夹角下水流剪切力、水流功率、单位水流功率及过水断面单位能量进行分析，用 Duncan 法进行多重比较；采用简单回归分析确定土壤侵蚀率与水流剪切力、水流功率、单位水流功率以及过水断面单位能量间的数学关系。本文显著水平为 $P < 0.05$ 。使用 Origin2018 及 AutoCAD2018 进行作图。

2 结果与讨论

2.1 土壤侵蚀率变化特征

由图 2 可知, 坡面土壤侵蚀率随放水冲刷历时呈波动性减小后逐渐趋于稳定。这是由于试验初期坡面表层平整且土壤较分散, 集中水流阻力较小, 快速冲刷大量泥沙的同时, 形成具有固定流路的细沟, 无坡面漫流过程。随着地下漏渗产生, 细沟形态阻力增大, 水流能量减小, 冲刷能力减弱。细沟中水流不同部位侵蚀动力在岩石影响下发生突变继而冲刷形成跌坑(图 3)。随着冲刷时间延长, 跌坑形态

发育基本稳定, 同时细沟侵蚀下切深度增加导致剥蚀的土壤越来越少, 伴随着水流能量不断减小, 侵蚀动力减弱, 土壤侵蚀率趋于稳定^[15, 27]。由于水流侧切, 细沟深度增加, 试验后期细沟沟道上方土体坍塌, 使得冲刷后期土壤侵蚀率有所波动但总体较为平稳, 如 15°坡面、7.5 L·min⁻¹ 流量、30°和 150°夹角条件下。试验条件下不同夹角坡面的土壤侵蚀率随冲刷历时变化过程交叉变化。但在 60°夹角时, 相同坡度和流量下侵蚀率最小出现的次数较多, 说明相较于其他夹角, 岩石与坡面夹角为 60°条件下集中水流侵蚀能力较弱。15°坡面、10 L·min⁻¹ 流量、

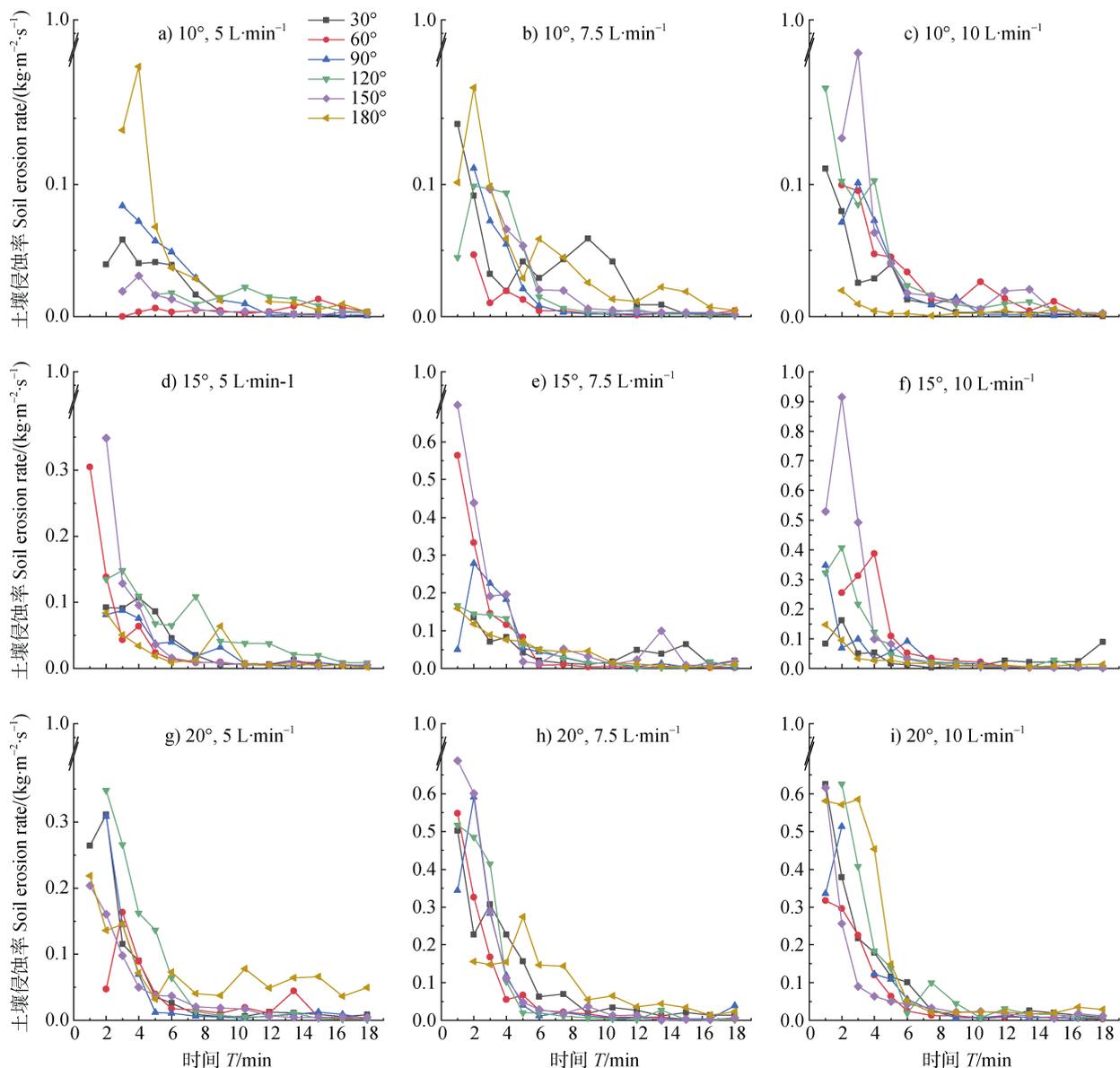


图 2 土壤侵蚀率随冲刷时间的变化

Fig. 2 Variations of soil erosion rate with the duration of scouring



图3 模拟试验坡面侵蚀细沟局部

Fig. 3 Detailed information on the partial erosion rill

150°夹角条件下，初始坡面集中水流较宽，流速较大，冲刷进行到 2 min 时，侵蚀细沟产生，岩石对水流扰动作用较明显，径流深增大，水流侵蚀能力突变，土壤侵蚀率增大，后随冲刷历时而逐渐减小。夹角为 30°、60°、90°、120°、150°和 180°时，土壤侵蚀率变化范围分别为 0.000 3~0.626、0.000 1~0.665、0.000 5~0.591、0.000 5~0.626、0.001~0.915 和 0.000 6~0.585 kg·m⁻²·s⁻¹。夹角 150°时平均土壤侵蚀率最大，为 0.078 kg·m⁻²·s⁻¹，结果表明岩石与坡面夹角大于 90°时，坡面土壤侵蚀加剧，这可能是由于此时岩石有利于维持水流能量集中，水流贯通能力较强，同时由于集中水流与岩石形成的流路较长以及侵蚀突变点的存在，使得土壤侵蚀程度增加^[28]。双因素方差分析结果表明土壤侵蚀率受坡度和流量的显著影响^[29]，其随坡度和流量的增加而增大，坡度对土壤侵蚀率的影响较流量大 ($F_{\text{坡度}}=30.445>F_{\text{流量}}=9.153$)。这是由于坡度和流量增加，使得集中流侵蚀能力增强^[18]。对试验条件下土壤侵蚀率与坡度和流量关系拟合，得到：

$$E=0.007\theta+0.007Q-0.092 \quad R^2=0.587 \quad P<0.01 \quad (7)$$

式中， θ 为坡度，°； Q 为放水流量，L·min⁻¹。

2.2 水流剪切力变化特征

由图 4 可知，在各岩石与坡面夹角条件下，水流剪切力随冲刷历时总体表现出波动性增大的趋势，其中在 20°坡面、10 L·min⁻¹ 流量条件下，其在冲刷试验后期明显表现出减小的变化趋势，转折点在 15 min 左右。这与不同坡度和流量条件下集中流水力半径的变化有关。坡面集中流水流剪切力取决

于水力半径和坡度，而水力半径由试验条件下的水深和水宽决定。试验过程中，随着侵蚀细沟形成和加深，水深逐渐增大，水流剪切力增大^[30]。通过对试验数据分析发现，当坡度和流量均达到最大时，在冲刷后期水宽减小的变化大于水深增大的变化，使得水力半径出现了减小的趋势。这可能是由于大坡度条件下水流更集中地下切侵蚀细沟^[31]，当细沟下切到不同容重土层界面时，形成了宽度小深度大的侵蚀断面，同时地下漏渗增多也会对集中流水力半径产生影响；试验过程中由于水流剥离作用和坍塌作用会影响坡面水流中泥沙含量，从而影响径流对土壤的剪切作用，以上因素综合作用产生如结果所示的波动变化^[14]。随着夹角增大，水流剪切力先减小后增大（表 2）。相比较于其他夹角，60°夹角条件下的水流剪切力较小，而 30°夹角条件下的水流剪切力相对较大，两者平均水流剪切力之间存在显著性差异 ($P<0.05$)，这可能与不同夹角条件下岩石对水流阻挡作用不同有关。夹角 30°条件下，岩石对水流阻挡作用小，且由于岩石光滑面的存在，岩石对水流有促进作用^[4]，水流流速较大，冲刷水流更多以地表径流形式流出，且跌水较多，细沟内水深较大，水流剪切力较大。当夹角为 60°时，岩石倾向与坡向一致，岩石阻挡作用增强，水流流速较 30°条件下有所减小，在地下裂隙影响下漏渗量增多，地表径流减少，水深减小，水流剪切力减小，随着夹角继续增大，岩石阻挡水流作用增强，流速减小，水深增加，水力半径增大，水流剪切力增大。试验条件下，水流剪切力变化范围为 6.382~34.871 kg·m⁻¹·s⁻²，随着冲刷流量和坡度的增加，水

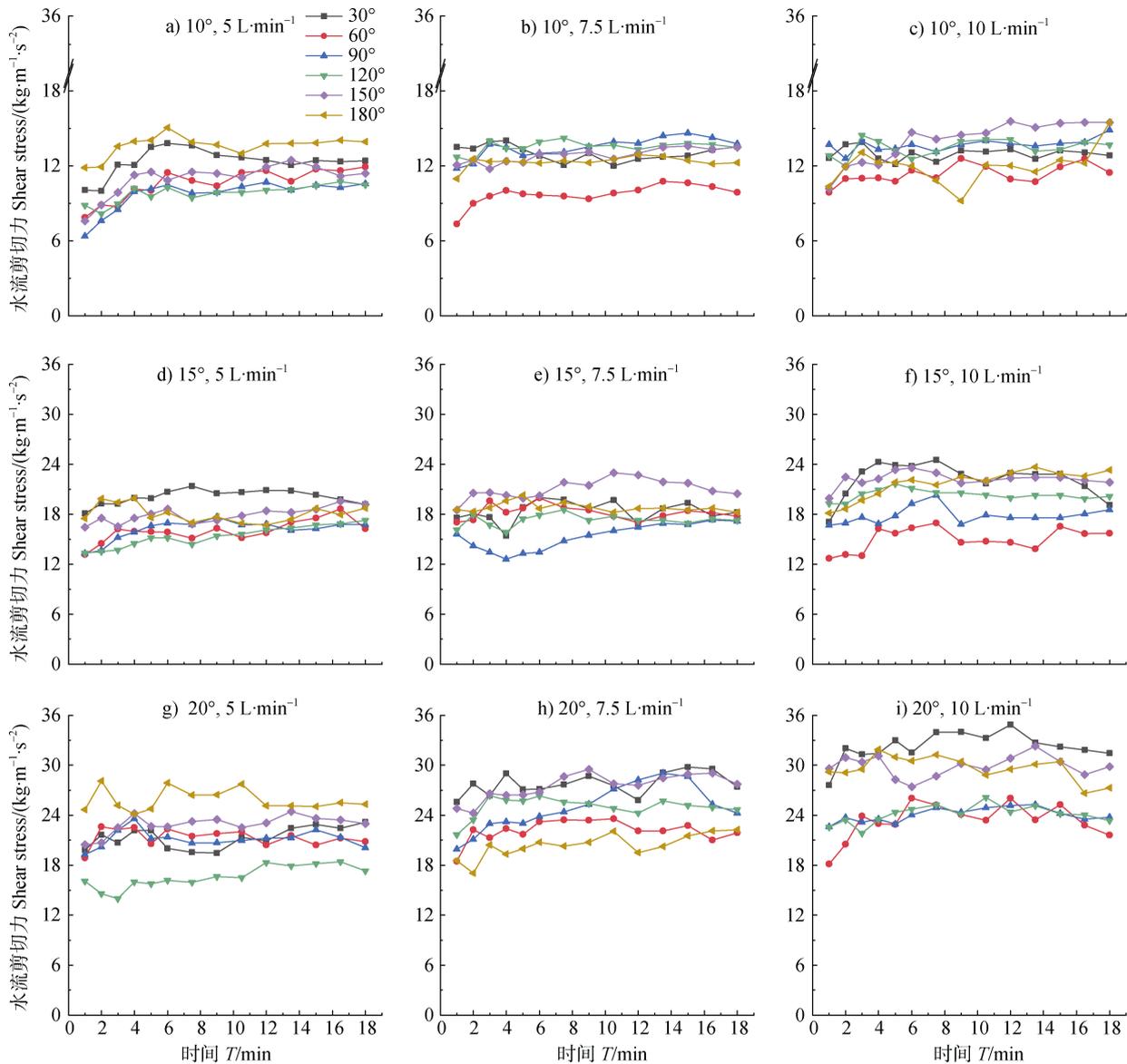


图4 水流剪切力随冲刷时间的变化

Fig. 4 Variations of shear stress with the duration of scouring

流剪切力也随之增大^[32], 且坡度越大其随流量增加而增大表现越明显, 说明本试验条件下的水流剪切力受流量的影响显著。对试验条件下水流剪切力与坡度和流量关系拟合, 得到:

$$\tau = 0.673\theta + 1.224Q - 5.075 \quad R^2 = 0.833 \quad P < 0.01 \quad (8)$$

式中, θ 为坡度, $^\circ$; Q 为放水流量, $L \cdot \min^{-1}$ 。

2.3 水流功率变化特征

水流功率随冲刷历时的变化如图 5 所示。由图可知, 20° 坡面的各流量条件下, 各夹角下的集中水流功率均随冲刷历时延长而减小。而其他条件下,

水流功率随冲刷历时的变化均受流量和坡度的影响, 呈现不特定的变化趋势。总体而言, 坡度对水流功率变化的影响较为显著。细沟水流水动力学特性受到细沟冲刷形态的显著影响^[33]。冲刷过程中, 受与坡面形成不同夹角的岩石影响, 不同坡度条件下的细沟形态发育机制不同^[34], 在流量影响下, 流速和水力半径波动增减不一致, 使得不同夹角条件下的水流功率随冲刷历时表现出不特定的变化趋势。在 20° 坡面下, 水流势能转化为动能, 快速冲刷坡面产生细沟继而改变细沟形态^[35], 冲刷过程中跌坑紊流引起水力损失^[36], 在岩石阻挡作用下, 水

表 2 各水动力学指标随岩石与坡面夹角的变化

Table 2 Variations of hydrodynamic parameters with angles between the rocks and the slope

岩石与坡面夹角 Angles between the rocks and the slope/ $^{\circ}$	水流剪切力 Shear stress $/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-2})$	水流功率 Stream power $/(\text{kg}\cdot\text{s}^{-3})$	单位水流功率 Unit stream power $/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	过水断面单位能量 Unit energy/m
30	20.04±0.60a	5.84±0.15a	7.67×10 ⁻² ±0.005 2a	1.91×10 ⁻² ±0.000 2a
60	16.45±0.67b	4.99±0.14bc	7.67×10 ⁻² ±0.003 3a	1.63×10 ⁻² ±0.000 3bc
90	17.36±0.21b	4.67±0.06c	6.83×10 ⁻² ±0.000 6b	1.58×10 ⁻² ±0.000 3c
120	17.26±0.15b	4.78±0.03c	7.09×10 ⁻² ±0.001 5ab	1.63×10 ⁻² ±0.000 5bc
150	19.87±0.33a	5.45±0.51ab	7.01×10 ⁻² ±0.002 1ab	1.79×10 ⁻² ±0.000 5ab
180	19.39±0.57a	5.12±0.20bc	6.69×10 ⁻² ±0.001 7b	1.81×10 ⁻² ±0.001 3a

注：不同小写字母表示各处理在 0.05 水平差异显著。Note: Different letters indicate significant differences among treatments at 0.05 level.

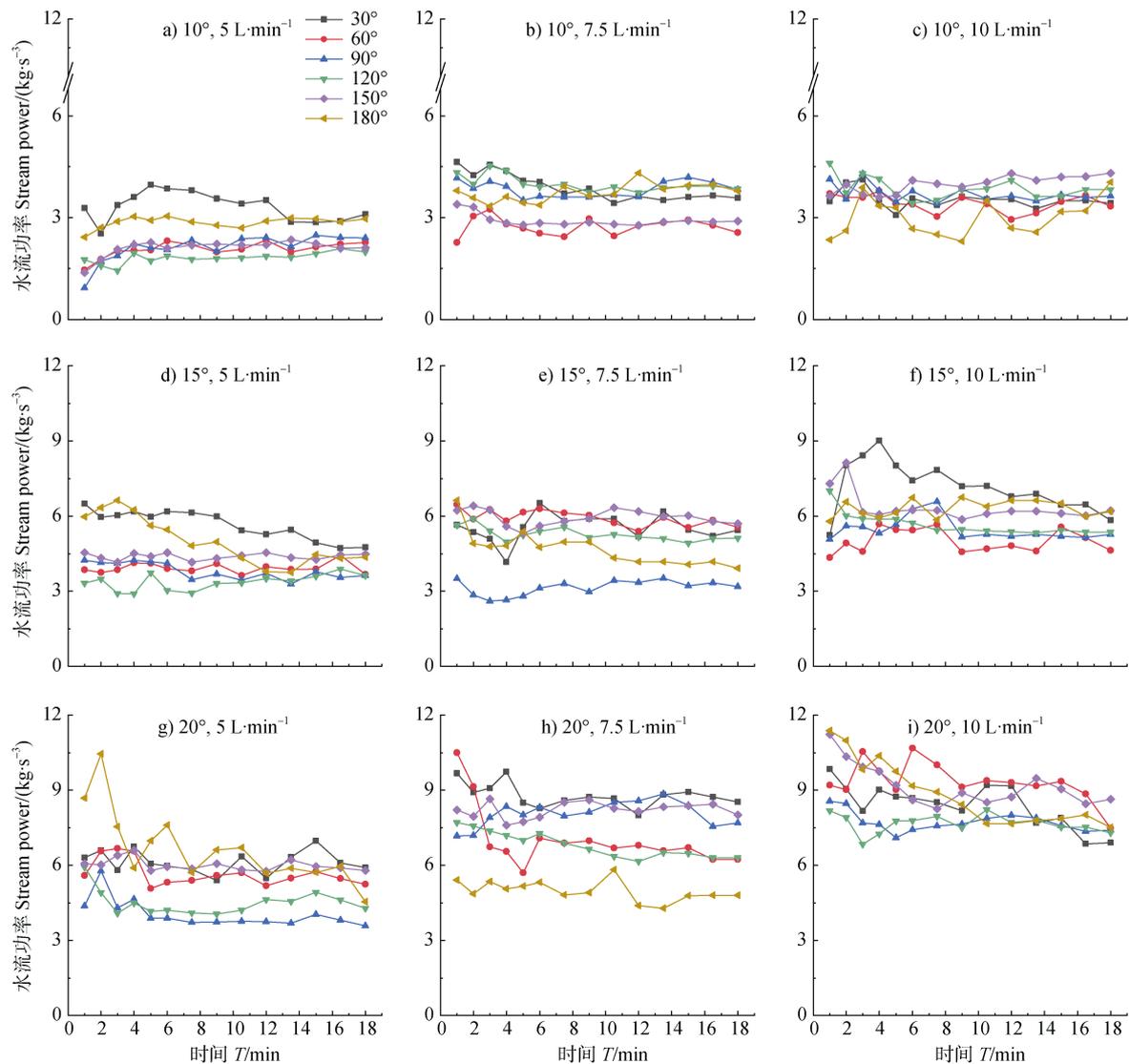


图 5 水流功率随冲刷时间的变化

Fig. 5 Variations of stream power with the duration of scouring

力坡度及水流所受阻滞作用增大,水流运动过程中克服阻力做功增加。同时随着地下漏渗增多,细沟中水流能量减小,水流功率减小^[37]。在 20°坡面、7.5 L·min⁻¹ 流量、180°夹角条件下,由于试验过程中受岩石影响水流发生改道,水流流速及水流剪切力均发生改变,使得在 20°坡面下,相较于其他流量条件,7.5 L·min⁻¹ 流量下试验过程前后水流功率变化不大^[38]。如表 2 所示,同水流剪切力大小变化类似,随着夹角增大,水流功率先减小后增加,各夹角条件下的水流功率表现出显著性差异 ($P<0.05$)。相同坡度和流量下,30°夹角条件的水流功率最大出现的次数较多,这可能是在该夹角条件下岩石阻挡作用小,跌坎发育明显,水流流速和水流剪切力(水深)较大,综合作用使得水流功率较大。当夹角从 90°增大至 150°时,岩石阻挡作用增强,流速减小,水深增大起主导作用,使得此时水流功率随夹角增大而增加。试验条件下,水流功率变化范围为 1.381~11.382 kg·s⁻³,随着流量和坡度的增加而增大。这可能是由于放水流量越大,单宽流量越大,水流流速就越大,进而水流功率越大^[39]。对试验条件下水流功率与坡度和流量关系拟合,得到:

$$\omega=0.391\theta+0.396Q-3.731 \quad R^2=0.813 \quad P<0.01 \quad (9)$$

式中, θ 为坡度, °; Q 为放水流量, L·min⁻¹。

2.4 单位水流功率变化特征

由图 6 可知,不同夹角坡面集中流单位水流功率随冲刷历时整体呈波动减小的变化趋势。单位水流功率受坡度和流速的影响^[40],通过对试验过程中地下产流变化率进行分析发现,12 min 时的平均地下产流率是 3 min 时的 1.97 倍,因此以上结果可能是由于冲刷过程中水流流速在细沟形态阻力增大、岩石阻挡作用和地下漏渗增加的影响下逐渐减小导致的,这与受水深变化影响较大的水流剪切力随时间变化趋势有所不同。同时由图 6 可知,20°坡面、10 L·min⁻¹ 流量和 30°夹角条件下,集中流单位水流功率相对其他夹角条件下较小。试验数据表明,此时的集中水流平均流速为 0.300 m·s⁻¹,相同流量及坡度的其他夹角条件下水流平均流速为夹角 30°时的 1.01 倍~1.30 倍。这可能是因为当坡度和流量均达到最大时,水流能量较大,加之此时岩石阻挡作

用小,侵蚀细沟在试验过程中产生了较深的跌坎,地下漏渗增加,水流流速明显减小,单位水流功率反而较小。夹角为 30°、60°、90°、120°、150°和 180°时,单位水流功率变化范围分别为 0.040~0.131、0.029~0.158、0.034~0.124、0.027~0.125、0.032~0.121 和 0.035~0.133 m·s⁻¹。且随着夹角增大,岩石对水流阻挡作用增强,流速减小,各夹角下平均单位水流功率之间存在显著差异且整体呈减小趋势(表 2)。试验条件下,单位水流功率随着流量的增加而增大,随着坡度增大而增大。对试验条件下单位水流功率与坡度和流量关系拟合,得到:

$$Up=0.003\theta+0.006Q-0.037 \quad R^2=0.893 \quad P<0.01 \quad (10)$$

式中, θ 为坡度, °; Q 为放水流量, L·min⁻¹。

2.5 过水断面单位能量变化特征

由图 7 可知,喀斯特槽谷区不同岩石与坡面夹角下坡面集中流过水断面单位能量随冲刷历时整体呈波动性增加的变化趋势。这可能是由于试验过程中水深增大的变化大于流速减小的变化,使得过水断面单位能量随冲刷历时呈波动性增加。总体上,夹角小于 90°时集中流过水断面单位能量随时间变化波动幅度较夹角大于 90°条件下大,说明当岩石倾向与坡向一致时,水流能量变化波动较大。与水流剪切力变化类似,随着夹角增大,岩石阻挡作用增强,受水深及流速变化的影响,各夹角下平均过水断面单位能量之间存在显著差异且呈先减小后增大的趋势(表 2)。试验条件下,过水断面单位能量变化范围为 0.006~0.029 m,随着流量的增加而增大,随着坡度变化不明显。说明相对于坡度,流量对过水断面单位能量影响更显著。这是因为流速对指标有二次方的影响^[14],流量增大,单宽流量增大,流速增加,过水断面单位能量增大。而坡度变化时,细沟糙度变化和流速随坡度增大的变化之间的相互反馈作用使得坡度对水流流速的影响较流量小,从而导致坡度对过水断面单位能量的影响不明显^[13]。对试验条件下过水断面单位能量与坡度和流量关系拟合,得到:

$$\varepsilon=0.001\theta+0.0002Q+0.008 \quad R^2=0.395 \quad P<0.01 \quad (11)$$

式中, θ 为坡度, °; Q 为放水流量, L·min⁻¹。

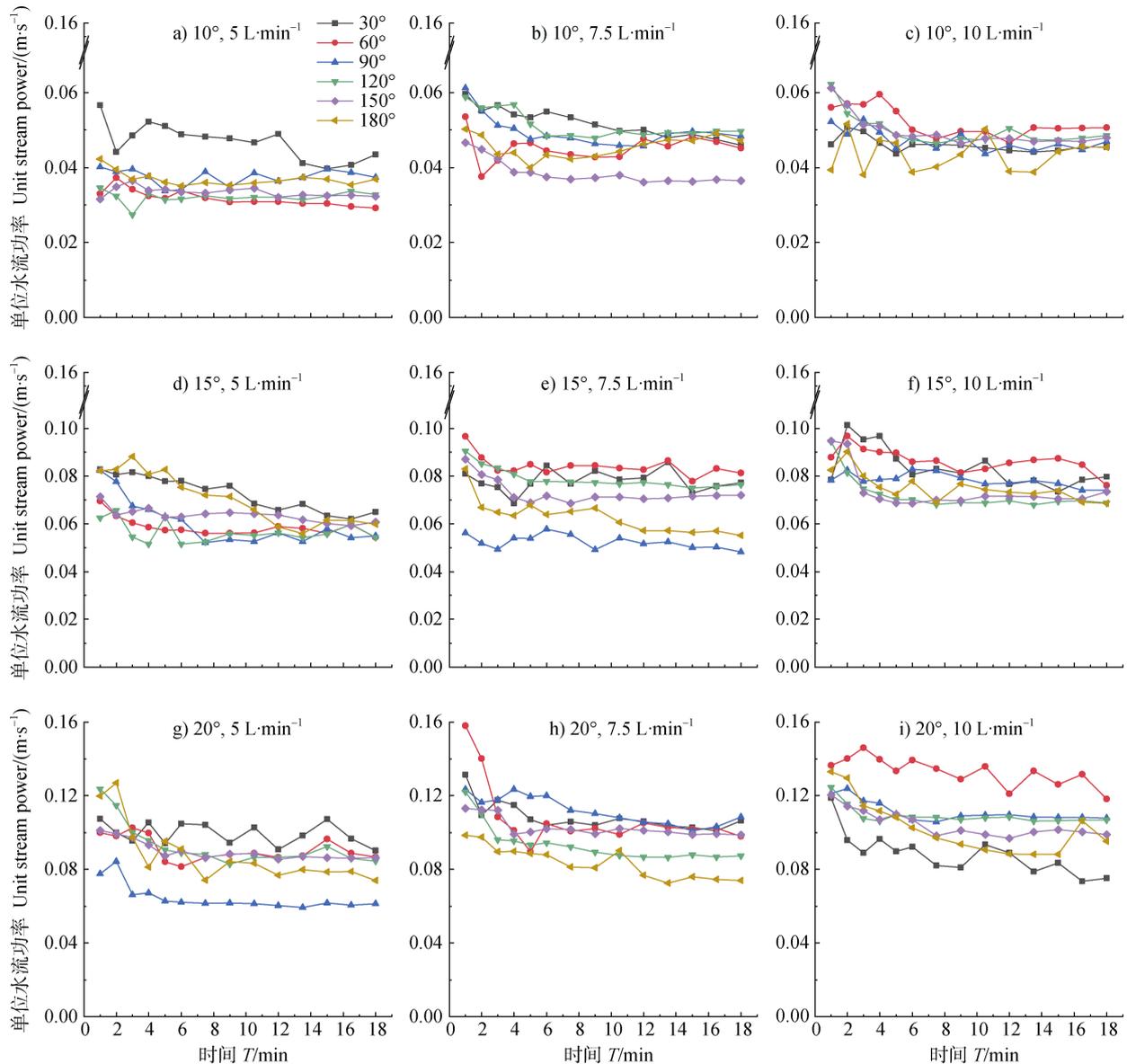


图6 单位水流功率随冲刷时间的变化

Fig. 6 Variations of unit stream power with the duration of scouring

2.6 土壤侵蚀率与各水动力学参数间的关系

由表3可知,土壤侵蚀率与各水动力学参数间均呈极显著正相关。本研究中,各水动力学参数均能较好描述土壤侵蚀率($P < 0.01$),水流剪切力、水流功率和单位水流功率均可采用幂函数方程很好地描述集中流作用下的坡面土壤侵蚀率($R^2 = 0.583 \sim 0.603$)。但相比较各拟合关系式决定系数 R^2 ,其中水流剪切力拟合效果最好,水流功率拟合效果较好,单位水流功率次之。这说明在试验条件下,从以水流剪切力为代表的力的角度来描述坡面土壤侵蚀率效果更好,这与肖海等^[14]研究结果不一致。王秋霞

等^[15]通过室内模拟冲刷试验研究发现,径流剪切力和水流功率均可作为描述花岗岩崩岗各土层土壤侵蚀率的水动力学参数。王瑄等^[19]通过灰色关联分析方法研究了坡面水蚀动力因子与土壤剥蚀率关系,发现流量相同时,水流剪切力与土壤剥蚀率关联度最大,两者存在幂函数关系,这与本试验研究结果类似。

试验条件下,过水断面单位能量描述坡面土壤侵蚀率效果最差($R^2 = 0.294$),两者采用线性方程拟合效果较好。这可能是由于试验过程中易出现侵蚀突变点,使侵蚀细沟中出现台阶结构的跌坎,在岩

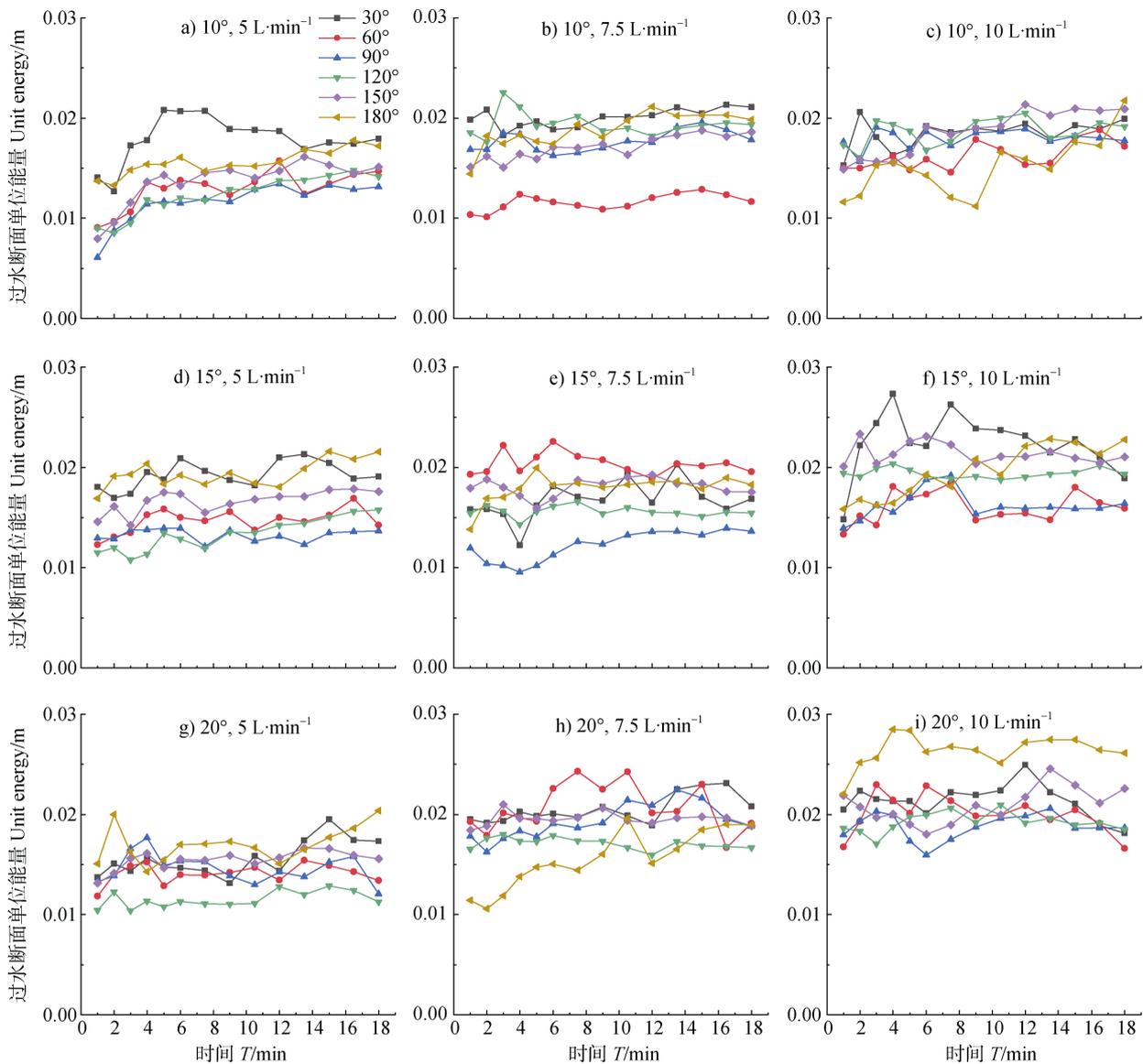


图7 过水断面单位能量随冲刷时间的变化

Fig. 7 Variations of unit energy of flow section with the duration of scouring

石影响下,水流过水断面单位能量沿细沟分布的连续性被破坏,从而使得相较于其他水动力学参数,过水断面单位能量与土壤侵蚀率拟合关系表现较差^[17]。

前人研究表明^[16-17, 39],土壤侵蚀率与水动力学指标之间存在如表3所展示的线性关系:

$$E = k(x - x_c) \quad (12)$$

式中, E 为土壤侵蚀率; k 为土壤可蚀性参数,与土壤性质有关, x_c 为临界水动力学参数。由表可知,

临界水流剪切力、临界水流功率、临界单位水流功率和临界过水断面单位能量分别为 $6.700 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-2}$ 、 $1.200 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-3}$ 、 $0.018 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 0.009 m 。其中临界水流剪切力较张光辉等^[41]的相关研究成果要大,说明本试验条件下水流分离喀斯特槽谷区不同岩石与坡面夹角下的地表土壤颗粒需要更大的剪切力,这可能是由于试验条件以及地表特征的不同导致的^[17]。本试验在水流剪切力和水流功率公式中相应的土壤可蚀性参数分别为 $0.006 \text{ s}\cdot\text{m}^{-1}$ 和 $0.015 \text{ s}^2\cdot\text{m}^{-2}$,均小于Geng等^[42]、王瑄等^[38]在非喀斯特区域所得到的相应结果。以上试验结果表明,在喀斯特槽谷区地表裸

露岩石与坡面形成的夹角和地下裂隙对坡面土壤侵蚀过程及水动力学指标变化均具有重要影响。本文通过室内模拟控制试验,研究了喀斯特槽谷区不同岩石与坡面夹角下的集中水流水动力学指标及坡面土壤侵蚀率变化特征,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动力学变化特征的影响还需进一步研究,同时室内模拟试验条件与野外实际情况可能会有所偏差,因此还需结合野外试验对本研究结果进行进一步验证。

表 3 土壤侵蚀率与水动力学指标的关系

Table 3 Relationships between soil erosion rate and hydrodynamic parameters

水动力学参数 Hydrodynamic parameters	幂函数关系 Power function			线性关系 Linear function		
	函数	R^2	P	函数	R^2	P
水流剪切力 Shear stress	$E=0.0002\tau^{2.2012}$	0.603	<0.01	$E=0.006(\tau-6.7)$	0.600	<0.01
水流功率 Stream power	$E=0.004\omega^{1.535}$	0.600	<0.01	$E=0.015(\omega-1.2)$	0.575	<0.01
单位水流功率 Unit stream power	$E=4.517Up^{1.686}$	0.583	<0.01	$E=1.154(U_p-0.018)$	0.504	<0.01
过水断面单位能量 Unit energy	$E=383.907\epsilon^{2.207}$	0.249	<0.01	$E=7.152(\epsilon-0.009)$	0.294	<0.01

3 结 论

喀斯特槽谷区集中流条件下坡面土壤侵蚀率随放水冲刷历时先波动性减小后逐渐趋于稳定。试验条件下,土壤侵蚀率随坡度和流量的增加而增大,其中坡度对土壤侵蚀率的影响较流量大。各岩石与坡面夹角下,集中水流剪切力及过水断面单位能量随冲刷历时整体表现出波动性增大的趋势,而水流功率随冲刷历时变化规律不明显,单位水流功率随冲刷历时呈波动减小的变化趋势;随着夹角增大,岩石阻挡作用改变,集中水流流速与水深均发生变化使得水流剪切力、水流功率和过水断面单位能量均呈先减小后增大,单位水流功率整体表现出减小的变化趋势,各夹角下水动力学指标存在显著性差异;水流剪切力、水流功率和单位水流功率均随坡度和流量的增大而增大,过水断面单位能量随着流量的增大而增大,随着坡度变化不明显。土壤侵蚀率与水流剪切力、水流功率和单位水流功率间的关系用幂函数方程描述较好,与过水断面单位能量间的关系则用线性方程描述较好;水流剪切力可更好地描述坡面土壤侵蚀率。临界水流剪切力、临界水流功率、临界单位水流功率和临界过水断面单位能量分别为 $6.700 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-2}$ 、 $1.200 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-3}$ 、 $0.018 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 0.009 m 。研究为揭示喀斯特槽谷区不同岩石与坡面夹角条件下的地表集中流侵蚀水动力学机制提供理论依据,也为发展区域土壤侵蚀预报模型提供数据支撑。

参考文献 (References)

- [1] 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.]
- [2] 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.]
- [3] 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.]
- [4] 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.]
- [5] 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.]
- [6] 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.
- [7] Yan Y J, Dai Q H, Yuan Y F, et al. Effects of rainfall intensity on runoff and sediment yields on bare slopes in a Karst area, SW China[J]. *Geoderma*, 2018, 330: 30—40.
- [8] Cao Y, Wang S J, Bai X Y, et al. Spatial-temporal evolution processes and simulation of future soil erosion scenario in the Karst valley of Southern China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39 (16): 6061—6071. [操玥, 王世杰, 白晓永, 等. 喀斯特槽谷区土壤侵蚀时空演变及未来情景模拟[J]. 生态学报, 2019, 39 (16): 6061—6071.]
- [9] Elliot W J, Laflen J M. A process-based rill erosion model[J]. *Transactions of the ASAE*, 1993, 36 (1): 65—72.
- [10] Wang X S, Xie Y S. Hydrodynamic characteristics of tapered spoilbank under simulated rainfall condition[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31 (1): 117—124. [王雪松, 谢永生. 模拟降雨条件下锥状工程堆积体侵蚀水动力特征[J]. 农业工程学报, 2015, 31 (1): 117—124.]
- [11] Zhang G H, Liu B Y, Zhang K L. Experimental simulation of hydraulic mechanism of soil detachment by surface runoff on slopeland[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2002, 39 (6): 882—886. [张光辉, 刘宝元, 张科利. 坡面径流分离土壤的水动力学实验研究[J]. 土壤学报, 2002, 39 (6): 882—886.]
- [12] Nearing M A, Simanton J R, Norton L D, et al. Soil erosion by surface water flow on a stony, semiarid hillslope[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1999, 24 (8): 677—686.
- [13] Govers G. Relationship between discharge, velocity and flow area for rills eroding loose, non-layered materials[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1992, 17 (5): 515—528.
- [14] Xiao H, Liu G, Liu P L. Response of detachment rate of loess slope to hydrodynamic characteristics under concentrate flow condition[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32 (17): 106—111. [肖海, 刘刚, 刘普灵. 集中流作用下黄土坡面剥蚀率对侵蚀动力学参数的响应[J]. 农业工程学报, 2016, 32 (17): 106—111.]
- [15] Wang Q X, Ding S W, Deng Y S, et al. Hydrodynamic characteristics of erosion in different soil layers in granite collapse region[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2017, 54 (3): 570—580. [王秋霞, 丁树文, 邓羽松, 等. 花岗岩崩岗区不同土层的侵蚀水动力学特征[J]. 土壤学报, 2017, 54 (3): 570—580.]
- [16] Zhang L T, Gao Z L, Tian H W. Hydrodynamic process of soil erosion in steep slope of engineering accumulation[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 29 (24): 94—102. [张乐涛, 高照良, 田红卫. 工程堆积体陡坡坡面土壤侵蚀水动力学过程[J]. 农业工程学报, 2013, 29 (24): 94—102.]
- [17] Wu S F, Wu P T, Song W X, et al. Hydrodynamic process of soil detachment by surface runoff on loess slope[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2010, 47 (2): 223—228. [吴淑芳, 吴普特, 宋维秀, 等. 黄土坡面径流剥离土壤的水动力过程研究[J]. 土壤学报, 2010, 47 (2): 223—228.]
- [18] Shi H Q, Liu G, Gu J, et al. Response of sediment transport capacity under different slope to the change of concentrate flow rate[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018, 32 (1): 25—31. [师宏强, 刘刚, 谷举, 等. 不同坡度坡面径流输沙能力对集中流流量变化的响应[J]. 水土保持学报, 2018, 32 (1): 25—31.]
- [19] Wang X, Li Z B, Lu K X, et al. Grey correlation analysis on relationship between soil detachment rate and hydrodynamic erosion factors[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2005, 36 (5): 525—530. [王瑄, 李占斌, 鲁克新, 等. 坡面水蚀动力因子与土壤剥蚀率灰色关联分析[J]. 水利学报, 2005, 36 (5): 525—530.]
- [20] You X H, Yang Y, Xu G, et al. Comparison of the soil moisture variations of inclined slope in Longtan Karst trough valley, Chongqing, China[J]. *Mountain Research*, 2019, 37 (1): 53—61. [游贤慧, 杨琰, 徐刚, 等. 龙潭喀斯特槽谷倾坡土壤水分变异性研究[J]. 山地学报, 2019, 37 (1): 53—61.]
- [21] Li C L, Dai Q H, Peng X D, et al. Characteristics of nitrogen, phosphorus and potassium losses in underground runoff of Karst slope farmlands during the developing process of shallow Karst fissure[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2016, 36 (12): 4437—4445. [李昌兰, 戴全厚, 彭旭东, 等. 喀斯特坡耕地浅层地下孔(裂)隙发育过程中径流产污特征[J]. 环境科学学报, 2016, 36 (12): 4437—4445.]
- [22] 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.
- [23] Foster G R, Huggins L F, Meyer L D. A laboratory study of rill hydraulics: II. shear stress relationships[J]. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 1984, 27 (3): 797—804.
- [24] Bagnold R A. An approach to the sediment transport problem from general physics[J]. *Geological Magazine*, 1967, 104 (4): 409.
- [25] Yang C T, Song C C S. Theory of minimum rate of energy dissipation[J]. *Journal of the Hydraulics Division*, 1979, 105 (7): 769—784.
- [26] Li Z B, Lu K X, Ding W F. Experimental study on dynamic processes of soil erosion on loess slope[J].

- Journal of Soil Water Conservation, 2002, 16(2): 5—7, 49. [李占斌, 鲁克新, 丁文峰. 黄土坡面土壤侵蚀动力过程试验研究[J]. 水土保持学报, 2002, 16(2): 5—7, 49.]
- [27] Ma X L, Zhang K D, Dong X, et al. Study of rill flow soil erosion mechanism on loess slope surface[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(9): 134—140. [马小玲, 张宽地, 董旭, 等. 黄土坡面细沟流土壤侵蚀机理研究[J]. 农业机械学报, 2016, 47(9): 134—140.]
- [28] 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.]
- [29] Zhang G H, Hu J J. Review on the influence factors of soil detachment process by overland flow and its mechanism[J]. Advances in Water Science, 2019, 30(2): 294—304. [张冠华, 胡甲均. 径流驱动土壤分离过程的影响因素及机制研究进展[J]. 水科学进展, 2019, 30(2): 294—304.]
- [30] Li P P, Li B B, Wang B, et al. Effects of simulated nitrogen deposition on the *Bothriochloa ischaemum* community and its hydrodynamic characteristics of overland flow[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(16): 52—61. [李盼盼, 李彬彬, 王兵, 等. 模拟氮沉降对白羊草地群落特征及其坡面流水动力特性的影响[J]. 农业工程学报, 2020, 36(16): 52—61.]
- [31] Armstrong A, Quinton J N, Heng B C P, et al. Variability of interrill erosion at low slopes[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2011, 36(1): 97—106.
- [32] Wang L S, Cai Q G, Cai C F, et al. Hydrodynamic characteristics of stable growth-rill flow on loess slopes[J]. Progress in Geography, 2014, 33(8): 1117—1124. [王龙生, 蔡强国, 蔡崇法, 等. 黄土坡面发育平稳的细沟流水动力学特性[J]. 地理科学进展, 2014, 33(8): 1117—1124.]
- [33] Zhang H, Gao Z L, Niu Y B, et al. A comparative study on relationship between rill morphology and sediment yield on slopes of two types of engineering mounds[J]. Acta Pedologica Sinica, 2021, 58(1): 115—127. [张恒, 高照良, 牛耀彬, 等. 两种工程堆积体坡面细沟形态与产沙关系对比研究[J]. 土壤学报, 2021, 58(1): 115—127.]
- [34] Dong X, Zhang K D, Wang G Q, et al. Formation and mechanism of loess rill flow drop pit[J]. Journal of Sichuan University(Engineering Science Edition), 2016, 48(5): 28—35. [董旭, 张宽地, 王光谦, 等. 黄土细沟流跌坑的形成与作用机理[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2016, 48(5): 28—35.]
- [35] Wang L J, Zhang X C. Hydraulic mechanism of alfalfa controlling soil erosion on steep slopes of pisha-sandstone[J]. Acta Pedologica Sinica, 2020, 57(2): 284—295. [王伦江, 张兴昌. 苜蓿影响砢砂岩陡坡侵蚀的水动力学机理研究[J]. 土壤学报, 2020, 57(2): 284—295.]
- [36] di Stefano C, Palmeri V, Pampaloni V, et al. Dissipative analogies of step-pool features: From rills to mountain streams[J]. Catena, 2019, 174: 235—247.
- [37] 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.]
- [38] Wang X, Li Z B, Li W, et al. Indoor simulation experiment of the relationship between soil detachment rate and stream power[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2006, 22(2): 185—187. [王瑄, 李占斌, 李雯, 等. 土壤剥蚀率与水流功率关系室内模拟实验[J]. 农业工程学报, 2006, 22(2): 185—187.]
- [39] Li P, Li Z B, Zheng L Y. Indoor experiment of characteristics of runoff erosion in loess steep slope[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2005, 21(7): 42—45. [李鹏, 李占斌, 郑良勇. 黄土陡坡径流侵蚀产沙特性室内实验研究[J]. 农业工程学报, 2005, 21(7): 42—45.]
- [40] Zhang G H. Several understandings for sediment transport capacity by overland flow[J]. Advances in Water Science, 2018, 29(2): 151—158. [张光辉. 对坡面径流挟沙力研究的几点认识[J]. 水科学进展, 2018, 29(2): 151—158.]
- [41] Zhang G H, Liu B Y, He X W. Study on hydro-dynamic mechanism of natural soil detachment in loess region[J]. Journal of Soil Water Conservation, 2005, 19(4): 48—52. [张光辉, 刘宝元, 何小武. 黄土区原状土壤分离过程的水动力学机理研究[J]. 水土保持学报, 2005, 19(4): 48—52.]
- [42] Geng R, Zhang G H, Ma Q H, et al. Soil resistance to runoff on steep croplands in Eastern China[J]. Catena, 2017, 152: 18—28.

(责任编辑: 檀满枝)