

DOI: 10.11766/trxb201808210284

# 喀斯特槽谷区的顺/逆层坡面对水动力学参数的影响\*

甘凤玲 何丙辉<sup>†</sup> 覃自阳

(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** 喀斯特槽谷区不仅存在地上/地下双层空间结构, 还存在典型顺/逆层坡两种特殊的地质构造, 因此研究喀斯特槽谷区两翼坡面水流移动规律具有重要意义。根据野外调查结果, 在喀斯特槽谷区临界坡度 $25^\circ$  条件下进行人工模拟降雨试验, 采用顺/逆层坡岩层倾角 ( $30^\circ$ 、 $60^\circ$  和  $90^\circ$ ) 和 3 种雨强 ( $30$ 、 $60$  和  $90 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ ) 作为变量因子, 并以裸坡作为对照因子, 研究喀斯特槽谷区顺/逆层坡面水动力学参数特征。结果表明: 喀斯特槽谷区顺/逆层坡主要以薄层浅流为主, 顺层坡的岩层倾角越大则坡面流速越小, 逆层坡则以岩层倾角  $60^\circ$  为临界点, 裸坡的流速均大于顺/逆层坡。对于喀斯特槽谷区顺层坡而言, 其雷诺数  $Re$  和佛汝德数  $Fr$  均大于逆层坡而小于裸坡, 阻力系数  $f$  均小于逆层坡而大于裸坡。雷诺数  $Re$  和阻力系数  $f$  两个参数呈显著的幂函数正相关关系。地表累积径流量分配比例大小排序为裸坡 > 顺层坡 > 逆层坡, 地下累积径流量分配比例为逆层坡 > 裸坡 > 顺层坡。本研究可为喀斯特槽谷区顺/逆层坡的坡面的土壤侵蚀预报模型提供科学依据。

**关键词** 喀斯特槽谷区; 顺/逆层坡; 降雨强度; 岩层倾角; 水动力学参数

**中图分类号** S157.2 **文献标识码** A

中国西南喀斯特地区是世界上最大的喀斯特地区, 其裸露喀斯特面积大概有  $540\ 000 \text{ km}^2$ , 占中国领土面积的  $5.2\%$  左右<sup>[1]</sup>。喀斯特槽谷区在岩溶作用下能够形成地表和地下双层空间结构, 其地表石漠化是中国西南地区最严重的土壤退化问题, 已经限制了当地社会和经济的可持续发展<sup>[2]</sup>。国外早在 20 世纪 60 年代就有研究表明喀斯特地区存在土壤地下漏失的现象<sup>[3]</sup>, 而国内关于喀斯特槽谷区这种特殊的地表流失研究正式起步于 90 年代, 如林昌虎和朱安国<sup>[4]</sup>研究了贵州喀斯特山区的土壤与防治, 张殿发等<sup>[5]</sup>对喀斯特山区的形成成因进行探讨, 发现喀斯特形成的主要原因是地形切割强烈、坡度陡峭和水蚀作用明显, 地表土层贫瘠, 石漠化严重。直至 21 世纪, 才有科研学者对喀斯特地

区的土壤侵蚀机理进行研究, 张信宝等<sup>[6]</sup>分析了喀斯特地区土壤地下漏失和土地石质化的过程, 探讨了喀斯特地区地下水土漏失形成的原因。彭旭东等<sup>[7]</sup>通过人工降雨模拟研究了地下裂隙对喀斯特地区地表地下侵蚀产流的影响, 研究发现地下径流量总体上高于地表径流, 这说明其径流流失的主要途径是地下漏失。因此, 在喀斯特槽谷区特殊的地质构造下, 其土壤侵蚀发生过程较非喀斯特地区表现更为复杂。鉴于喀斯特槽谷区这种特殊的双层地质构造已经严重威胁到人类的生存发展, 并造成经济与环境严重退化。近几年, 对于喀斯特地区的报道主要侧重于坡面的水土流失, 且大部分以野外径流小区观测为主, 而对于喀斯特槽谷区坡面的水流动力学机制的研究鲜有报道, 深入其

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

<sup>†</sup> 通讯作者 Corresponding author, E-mail: hebingshui@yahoo.com.cn

作者简介: 甘凤玲 (1989—), 女, 重庆市人, 博士研究生, 主要从事农业水土工程研究。E-mail: 359140315@qq.com

收稿日期: 2018-08-21; 收到修改稿日期: 2018-12-05; 优先数字出版日期 (www.cnki.net): 2019-01-28

研究对认识喀斯特槽谷区土壤侵蚀机理具有重要意义。

喀斯特槽谷区除了其特殊的地上/地下双层地理结构,还具有典型的顺/逆层边坡地质构造(图1)。如陈飞等<sup>[8]</sup>通过对喀斯特槽谷区石漠化研究发现,喀斯特槽谷区顺层坡土层较厚,而逆层坡土层较薄。Fábio等<sup>[9]</sup>研究发现,对于顺层坡而言,其水土流失方向主要是沿坡面顺流而下,而对于逆层坡,水土流失主要是沿坡体的垂直方向深入坡体内部形成地下河。在国外,已有相关研究学者验证了不同的岩层倾角会对土壤侵蚀机理产生相关影响<sup>[10]</sup>,而在国内,却鲜有研究针对不同岩层倾角对水土流失影响的报道,其主要集中在地震条件下不同岩层倾角之间的力学形态。如邱俊等<sup>[11]</sup>研究了顺/逆层坡变形形成条件及发育规模特征,发现逆层坡的发育面积和倾角深度均大于顺层边坡。Fan等<sup>[12]</sup>利用振动台研究了不同顺/逆层坡动力响应差异,顺层坡的坡面位移远远大于逆层坡,逆层坡的地震稳定性明显高于顺层坡。此后,Aydan<sup>[13]</sup>和Fayou等<sup>[14]</sup>均表明随着震级的增加,岩层倾角越大则稳定性越大。因此,鉴于喀斯特槽谷区具有典型的顺/逆层岩质边坡地质构造,不同岩层的岩

石坡面对土壤侵蚀过程的影响有着重要的现实意义,则对于该地区坡面的水动力特性研究能够进一步完善对该地区土壤侵蚀机理的研究。

坡面水动力学参数对喀斯特槽谷区坡面径流产生和土壤侵蚀具有决定性作用,因此深入理解其变化规律是坡面土壤侵蚀预报模型的基础<sup>[15]</sup>。坡面水动力学的研究经常利用放水冲刷和人工模拟降雨的方法来测定坡面流速、雷诺数、佛汝德数、Darcy-Weisbach阻力系数等指标,以此说明土壤侵蚀能力和水流能量转换关系<sup>[16]</sup>。而目前开展的坡面水动力学研究基本在非喀斯特地区,主要针对土壤结构单一,大部分径流集中在坡面地表的单层空间结构<sup>[17-18]</sup>,还缺少对喀斯特地区这种地表、地下双层地质构造坡面的研究。因此,本研究采集重庆喀斯特槽谷区广泛分布的黄壤,以野外现场调查典型喀斯特槽谷区的相关参数作为依据,通过模拟喀斯特槽谷区顺/逆层坡面和地下孔裂隙双层空间构造特征,采用室内人工降雨模拟试验,观测不同岩层倾角和雨强条件下喀斯特槽谷区坡面水力学特征,揭示其坡面水动力学参数产流与水动力学参数之间的关系,以期开展喀斯特槽谷区的土壤侵蚀提供依据,为进一步做好喀斯特槽谷区水土流失防治措施打下基础。

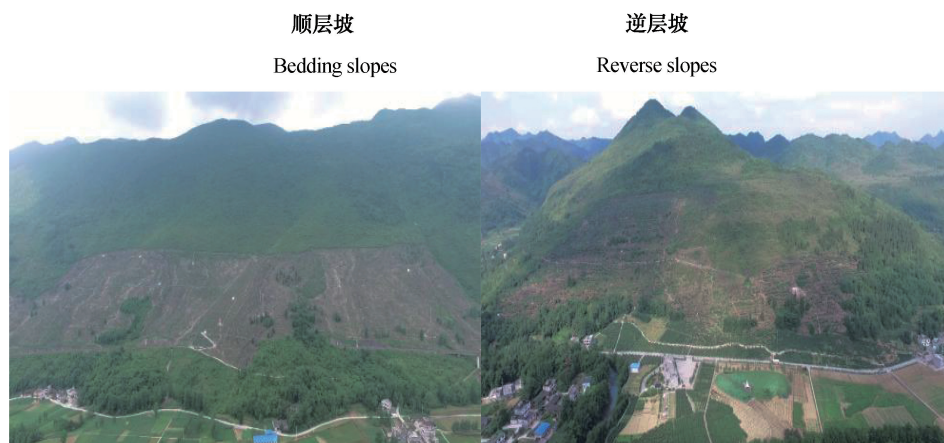


图1 喀斯特槽谷区顺/逆层坡面示意图

Fig. 1 Schematic of bedding / reverse slopes in the Karst Valley area studied

## 1 材料与方法

### 1.1 供试材料

试验土壤采用重庆市北碚区鸡公山(106°18'14"E,

29°39'10"N)碳酸盐发育的石灰性土坡耕地表层土壤,在坡面纵向位置2 m处选取样点,并分层取样(0~10、10~20、20~30 cm),土壤粒径组成见表1。原状土壤自然风干后备用,为模拟喀斯特

槽谷区顺/逆层坡面, 选择11块直径大于35 cm的不规则碳酸盐石块并测量其露出土壤表面的面积, 确

保其岩石裸露率一致, 即为适宜耕种的喀斯特槽谷区坡面。

表1 模拟降雨试验土壤的颗粒组成

Table 1 Particle size composition of test soil for simulated rainfall/%

2 ~ 1 mm	1 ~ 0.25 mm	0.25 ~ 0.05 mm	0.05 ~ 0.01 mm	0.01 ~ 0.005 mm	0.005 ~ 0.001 mm	<0.001 mm
0.03	0.07	8.26	17.53	8.93	14.96	50.22

## 1.2 研究方法

本试验在西南大学人工降雨大厅完成, 选择人工降雨装置为美国农业部土壤侵蚀研究实验室的诺顿侧喷式降雨模拟器<sup>[19]</sup>, 有效降雨面积为3 m × 5 m, 降雨均匀系数达到90%以上, 并在土槽两边放置测量桶测定实际雨强。试验土槽为自制的底部打孔钢槽(模拟喀斯特槽谷区岩溶裂隙), 地下孔(裂)隙度为钢槽底板面积与地下裂隙水平投影面积的百分比, 本试验的地下孔(裂)隙可在0~6%范围内调节, 土槽长5.0 m、宽1.0 m、深0.3 m, 土槽上端和下端分别设置2个集水槽, 用于收集地表径流和地下径流。

根据现场调查重庆市酉阳县喀斯特槽谷区坡地样和岩石坡面, 本试验设置岩石裸露率为15%, 地下孔(裂)隙度为3%, 典型喀斯特槽谷区坡度主要集中在25°左右, 因此设计坡度为25°, 结合实地调查岩层倾角的大小, 顺/逆岩层倾角为30°、60°和90°, 并以无岩石的裸坡作为对照组。岩层倾角以直径大于35 cm的石灰岩块石按岩石裸露率15%随机排列于土槽内, 先将土槽调节坡度为25°, 然后按照试验设定的倾斜度, 采用坡度倾斜仪调节块石进行模拟(图2)。本研究以土槽底板的圆孔来模拟喀斯特地区土层下面的岩石孔裂隙, 通过调节圆孔重叠面积占土槽底板总面积的百分比大小来模拟岩石孔裂隙的大小, 根据重庆市暴雨发生频率并结合前期的试验, 设计降雨强度为30、60、90 mm·h<sup>-1</sup>。采用岩层倾角和降雨强度完全组合的方法进行试验, 每一个组合重复2次。根据野外调查可知, 喀斯特槽谷区坡耕地的土壤容重为0.92~1.28 g·cm<sup>-3</sup>, 因此装土时控制土样干密度约在1.28 g·cm<sup>-3</sup>, 填土时用特制木板和铁锤分三层将其压实, 最后调节地下孔(裂)隙度, 每次试验前, 用非侵蚀性水湿润土样, 然后用塑料薄膜盖住, 静置24 h, 每次降雨前取细土(<2 mm)测定试

样含水率, 细土含水率在8.25%~12.60%之间。

每场降雨历时60 min(以地表径流产生为开始时间), 地表径流产生前30 min内, 每间隔5 min接样; 径流产生31~60 min内, 每间隔10 min接样。在每间隔1 m的距离处设置流速观测点, 采用KMnO<sub>4</sub>染色法记录水流通过一定土槽长度的时间, 用此计算坡面的平均流速。即以土槽边长为基准, 分布在距底端0、1、2、3、4、5 m处设置断面, 降雨试验开始前, 从坡顶开始测量流速, 在距坡顶没有岩石阻挡坡面的0~1 m、1~2 m、2~3 m、3~4 m、4~5 m处每隔1 m测量一次, 并测量从坡顶到坡中每两块岩石之间的流速, 然后取其平均值。测量流速时间为前30 min中每隔5 min测2次, 后30 min中每隔10 min测2次, 为减少试验误差, 每次降雨试验均由同一人从坡顶向坡底依次进行流速测量。水深与水宽用薄钢尺进行测量, 测量间隔时间与流速一样, 用温度计测量水流温度。每次降雨后, 更换表层10 cm的土壤, 每次试验重复两次。

## 1.3 数据处理

用KMnO<sub>4</sub>染色法测出的流速乘以修正系数0.67<sup>[20]</sup>得到水流的平均流速。

由于整个实验过程坡面主要以薄层层流为主, 断面水深较浅, 无法直接用尺子进行测量, 因此由式(1)进行计算 $h$ :

$$h=q/dV \quad (1)$$

式中,  $q$ 为地表产流量, L·min<sup>-1</sup>;  $d$ 为坡面水流宽度, m;  $V$ 为平均流速, m·s<sup>-1</sup>。

雷诺数 $Re$ 计算公式为:

$$Re=VR/\nu \quad (2)$$

式中,  $R$ 为水力半径, 其值近似等于水深 $h$ , m;  $\nu$ 为运动黏滞系数, m<sup>2</sup>·s<sup>-1</sup>。

$$\nu=0.01775 \times 10^{-4}/(1+0.0337t+0.000221t^2) \quad (3)$$

式中,  $t$ 为水温, °C。

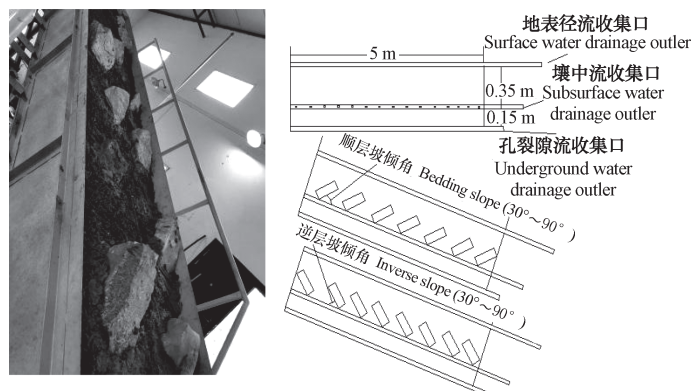


图2 试验装置示意图

Fig. 2 Schematic of the device used in the experiment

佛汝德数 $Fr$ 计算公式为:

$$Fr = V / \sqrt{gh} \quad (4)$$

式中,  $g$ 为重力加速度,  $g = 9.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 。

水流Darcy-Weisbach阻力系数 $f$ 计算公式为:

$$f = 8gRS / V^2 \quad (5)$$

式中,  $S$ 为水力坡度,  $S = \sin \theta$ ,  $\theta$ 为试验坡度,  $^\circ$ 。

使用SPSS19.0对试验数据进行统计分析, 用Excel绘图。

## 2 结果

### 2.1 喀斯特槽谷区坡面水流流速

坡面水力侵蚀的泥沙输移、土壤分离和沉积过程与径流流速有着直接关系<sup>[21]</sup>。不同岩层倾角的坡面流速随降雨产流时间的变化过程如图3可知。在相同降雨强度条件下, 喀斯特槽谷区坡面的水流流速随着降雨产流过程大部分表现为在产流初始阶段波动性极强(产流开始前25 min内), 然后波动性逐渐变缓。降雨强度越大则坡面水流流速越大。无论雨强大小, 坡面水流流进裸坡大于顺层坡大于逆层坡。这是因为顺层坡的岩层方向与水流方向一致, 大部分雨水沿岩层方向顺流而下, 加快了水流流速, 而逆层坡的岩层方向与水流方向相反, 大部分雨水受到岩层的拦截, 沿着岩-土界面向下流失, 进而坡面径流减少, 则流速减缓。

(1) 对逆层坡边坡而言(图3), 在不同降雨强度条件下, 不同岩层倾角的水流流速差异明显, 其数值在 $0.033 \sim 0.062 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 范围内变化。水水流

速表现为岩层倾角 $90^\circ > 30^\circ > 60^\circ$ , 且均小于裸坡的水流流速。当降雨强度为 $30、60、90 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 时, 逆层坡的水流平均流速较裸坡依次减少了 $0.045、0.050$ 和 $0.062 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。这说明喀斯特槽谷区逆层坡的岩层倾角从 $30^\circ$ 到 $60^\circ$ 时, 水流流速随着岩层倾角的增大而逐渐减小, 而从 $60^\circ$ 到 $90^\circ$ 时, 水流流速随着岩层倾角的增大而逐渐增大, 这说明在本研究中逆层坡岩层倾角 $60^\circ$ 是岩层方向造成水流流速发生转变的临界值。

(2) 对顺层坡边坡而言(图3), 其水流平均流速变化范围为 $0.051 \sim 0.089 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。水流流速表现为岩层倾角 $30^\circ > 60^\circ > 90^\circ$ , 且均小于裸坡的水流流速, 说明对于顺层坡而言, 岩层倾角越大, 则坡面裸露的岩石面积越小, 水流流速越小。这是因为由于喀斯特槽谷区顺层坡的岩层倾角方向与水流流速在同一个方向, 能促进坡面水流的流动, 进而减少雨水地下漏失量。雨强越大, 坡面雨水汇集的时间越短, 则水流流速也越大。

### 2.2 喀斯特槽谷区坡面雷诺数 $Re$

大部分研究表明, 坡面的侵蚀过程是指坡面径流在降雨过程中先后发生溅蚀、面蚀和沟蚀, 因此, 在不同降雨时段和不同的坡面断面的侵蚀形态和坡面沟床各有不同, 即坡面的水流流态在降雨过程中会发生较大改变, 具有一定的时空变化<sup>[22]</sup>。图4为在孔裂隙度为3%条件下, 雷诺数 $Re$ 在不同降雨强度和岩层倾角随降雨产流时间的变化过程。由图4可以看出, 在相同的降雨强度条件下, 喀斯特槽谷区雷诺数 $Re$ 随着降雨产流过程大部分表现在降雨前30 min左右的时段中, 雷诺数 $Re$ 值呈现较大的数值波动, 随后逐渐

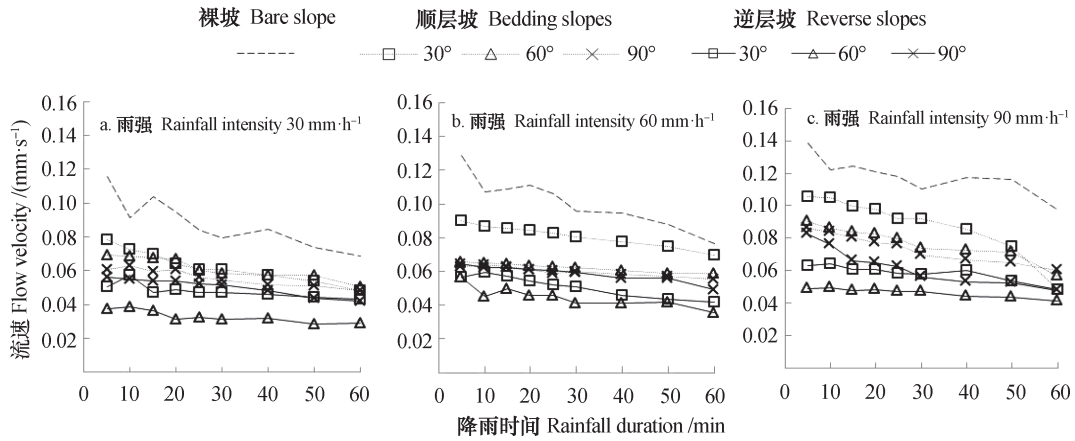


图3 不同雨强条件下喀斯特槽谷区不同岩层倾角坡面流速的变化

Fig. 3 Variation of surface runoff velocity with rainfall intensity and rock layer inclination angle in Karst Valley Area

变缓并趋于稳定。根据临界雷诺数 $Re$ 的基本理论<sup>[23]</sup>，矩形断面的明渠水流层流和紊流的临界值设为500，超过500则为过渡流。而本试验的雷诺数 $Re$ 值在28.12~449.7之间，其数值均在500以下，因此判定本试验中的侵蚀流态均属于层流的范围内。因此可知雷诺数 $Re$ 值有所变化，但其侵蚀形态变化不大<sup>[24]</sup>。

(1) 从喀斯特槽谷区逆层坡来看，其平均雷诺数 $Re$ 在82.68~139.8之间。在降雨强度相同的条件下，平均雷诺数 $Re$ 随着岩层倾角表现为 $90^\circ > 30^\circ > 60^\circ$ ，且均小于裸坡的雷诺数 $Re$ ，当降雨强度为30、60、90 mm·h<sup>-1</sup>时，逆层坡的平均雷诺数 $Re$ 较裸坡依次减少67.35%，42.38%和37.45%。这表明喀斯特槽谷区逆层坡的岩层倾角

从30°到60°，雷诺数 $Re$ 值逐渐减小，而在60°到90°雷诺数 $Re$ 值逐渐增大，这说明本研究中60°为逆层坡水流紊动程度的临界值。

(2) 从喀斯特槽谷区顺层坡来看，其平均雷诺数 $Re$ 变化在78.09~376.47。在试验的降雨强度下，平均雷诺数 $Re$ 随着岩层倾角表现为 $30^\circ > 60^\circ > 90^\circ$ ，且均小于裸坡的雷诺数 $Re$ 。这表明喀斯特槽谷区顺层坡的岩层倾角越小，雷诺数 $Re$ 越大，这是因为顺层坡的水流流动状态受岩层倾角的影响，岩层倾角越大则岩石在坡面裸露面积越小，岩石对水流的阻力变大，增加了水流的紊动程度。相同降雨强度下的喀斯特槽谷区顺层坡的雷诺数 $Re$ 值大于逆层坡的雷诺数 $Re$ 值，这说明顺层坡坡面较逆层坡坡面更容易发生地表侵蚀<sup>[25]</sup>。

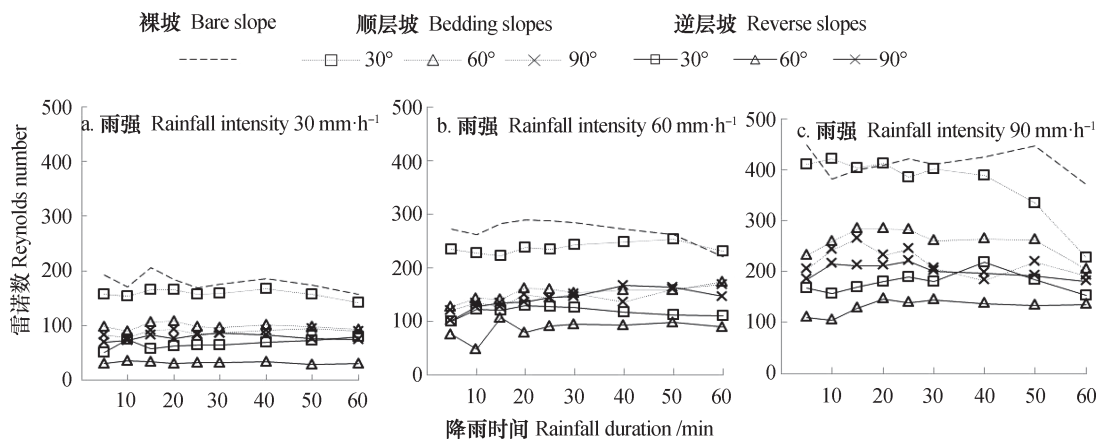


图4 不同雨强条件下喀斯特槽谷区不同岩层倾角坡面雷诺数的变化

Fig. 4 Variation of Reynolds number with rainfall intensity and rock layer inclination angle in Karst Valley Area

### 2.3 喀斯特槽谷区坡面佛汝德数 $Fr$

佛汝德数  $Fr$  是反映坡面的过水断面上径流的势能和动能的对比关系, 它综合反映了流速和水深之间的关系, 是判断缓流或急流的重要参数<sup>[26]</sup>。当佛汝德数  $Fr=1$  时, 坡面水流属于临界流; 当佛汝德数  $Fr<1$  时, 坡面水流为缓流; 当佛汝德数  $Fr>1$  时, 坡面水流为急流。在本试验中(图5), 孔裂隙度为3%的喀斯特槽谷区坡面的佛汝德数  $Fr$  均小于1, 佛汝德数  $Fr$  值变化范围为0.226~0.905, 这说明坡面流在试验范围内均属于缓流, 且裸坡的佛汝德数  $Fr$  值远大于顺/逆层坡的佛汝德数  $Fr$  值。在相同岩层倾角和孔裂隙条件下,  $Fr$  随雨强增加变化比较复杂, 同时在相同降雨强度及地下孔裂隙条件下, 岩层倾角对  $Fr$  值影响也较为复杂, 这是因为降雨强度和岩层倾角的变化对坡面边界条件和微地貌进行了重新塑造, 改变了径流流速和水深, 则  $Fr$  值也随之变化。

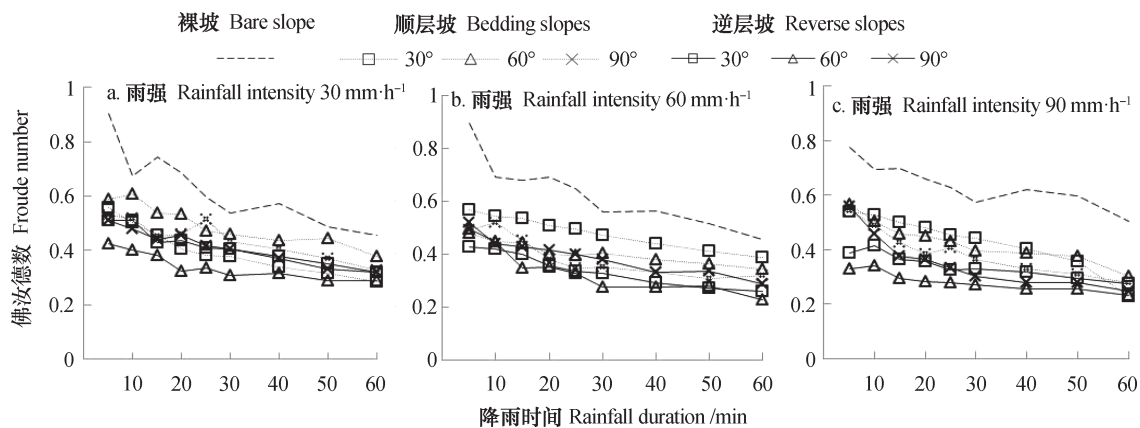


图5 不同雨强条件下喀斯特槽谷区不同岩层倾角坡面佛汝德数的变化

Fig. 5 Variation of Froude number with rainfall intensity and rock layer inclination angle in Karst Valley Area

### 2.4 喀斯特槽谷区坡面阻力系数 $f$

径流阻力指径流在坡面流动过程中所受到的坡面土壤结构的组成、块石排列、水流侵蚀形态等的阻滞作用。Darcy-weisbach阻力系数  $f$  是一个常用的反映水流阻力大小的指标, 在水动力条件相同的情况下, 阻力系数的大小表明径流克服阻力的大小, 则水流用于土壤侵蚀的能量也相应受到反作用的影响<sup>[27]</sup>。由图6可知, 在坡度, 孔裂隙度和岩层倾角相一致时, 坡面的Darcy-weisbach阻力系数  $f$  随降雨强度的变化趋势为: 在裸坡上,  $f$  在小雨强 ( $30 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ ) 条件下, 表现为平稳增大的趋势,

(1) 对喀斯特槽谷区逆层坡来看(图5), 平均佛汝德数  $Fr$  在0.319~0.387之间, 随着岩层倾角表现为  $90^\circ > 30^\circ > 60^\circ$ , 且均小于裸坡的佛汝德数  $Fr$ 。当降雨强度为30、60、90  $\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$  时, 逆层坡的平均佛汝德数  $Fr$  较裸坡依次减少了37.78%, 43.72%和49.08%。这说明逆层坡的岩层倾角从  $30^\circ$  到  $60^\circ$ , 佛汝德数  $Fr$  值逐渐减小, 而在  $60^\circ$  到  $90^\circ$  佛汝德数  $Fr$  值逐渐增大, 这说明本研究中岩层倾角  $60^\circ$  是逆层坡水流佛汝德数  $Fr$  值转变的临界值。

(2) 对喀斯特槽谷区顺层坡来看(图5), 其平均佛汝德数  $Fr$  在0.387~0.443之间, 随着岩层倾角表现为  $60^\circ > 30^\circ > 90^\circ$ , 且均小于裸坡的佛汝德数  $Fr$ 。当降雨强度为30、60、90  $\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$  时, 顺层坡的平均佛汝德数  $Fr$  较逆层坡依次增加11.93%, 19.65%和24.96%, 这表明喀斯特槽谷区顺层坡的水流相对于逆层坡的较快。

而在雨强为60和90  $\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$  时,  $f$  随着降雨时间的变化为S的趋势, 雨强越大, 其波动性变化越为明显。本研究中的喀斯特槽谷区阻力系数主要集中在降雨时间5~20 min之间增大, 这是因为在降雨初期, 坡面只有细小的土壤颗粒对水流造成阻力, 在降雨时间5 min后, 岩石开始松动, 岩-土之间的裂隙增大, 致使阻力  $f$  波动增大。

(1) 从喀斯特槽谷区逆层坡来看, 其坡面平均阻力系数在25.67~36.78之间, 随着岩层倾角表现为  $60^\circ > 30^\circ > 90^\circ$ , 均大于裸坡坡面的阻力系数。当降雨强度为30、60、90  $\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$  时, 逆层坡

的平均阻力系数较裸坡依次增大了1.50倍、2.24倍和3.12倍。这说明逆层坡岩层倾角从30°到60°，平均阻力系数逐渐增大，而60°增至90°的平均阻力系数逐渐减小，即在本研究中岩层倾角为60°的逆层坡的平均阻力系数的临界值。

(2) 从喀斯特槽谷区顺层坡来看，坡面平均阻力系数在18.67~25.67之间，随着岩层倾角表现为90°>60°>30°，即岩层倾角越大则其值越小。

随着降雨强度的增大，顺层坡的平均阻力系数较裸坡依次增大了1.05倍、1.15倍和1.72倍，这是因为雨强大的雨滴对顺层坡的坡面的微地貌形态破坏力较大，径流侵蚀强度增大，造成土壤中的岩石块松动，即岩-土裂隙变大，进一步阻碍了雨水的进程。对比顺/逆层坡坡面的阻力系数可知，逆层坡的坡面阻力系数远大于顺层坡的阻力系数，说明逆层坡的坡面径流所受到的干扰程度远大于顺层坡。

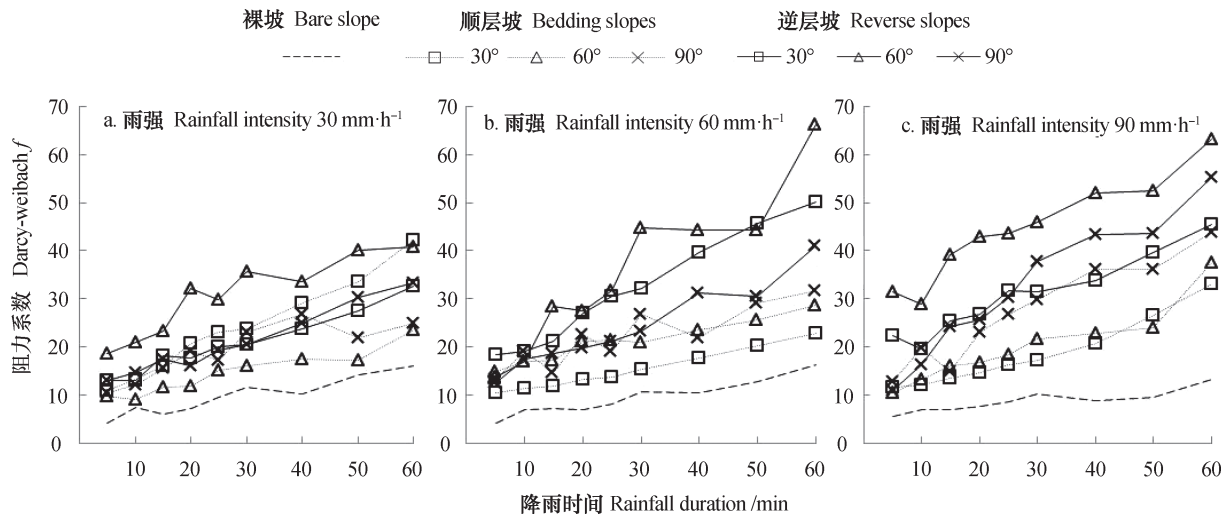


图6 不同雨强条件下喀斯特槽谷区不同岩层倾角坡面阻力系数的变化

Fig. 6 Variation of Resistance coefficient with rainfall intensity and rock layer inclination angle in Karst Valley Area

## 2.5 喀斯特槽谷区坡面阻力系数 $f$ 与雷诺数 $Re$ 的关系

阻力系数  $f$  是用来反映水流阻力特征的水力参数，不同的试验条件下的阻力系数  $f$  与雷诺数  $Re$  的关系各有不同。本试验中(图7)，阻力系数  $f$  值多分布于雷诺数  $Re$  在50~100的范围内，整体而言，阻力系数  $f$  随着雷诺数  $Re$  的增加呈现逐渐减小的趋势。对本试验中点数较密集的雨强为60 mm·h<sup>-1</sup>条件下，坡面的阻力系数  $f$  与雷诺数  $Re$  进行相关变量分析(表2)，其中通过比较拟合度  $R^2$  值的大小可知，含不同岩层倾角的坡面拟合度明显高于裸坡，阻力系数  $f$  与雷诺数  $Re$  呈正相关关系，两者之间存在  $f = aRe^b$  的幂函数关系，而相对于逆层坡而言，顺层坡的拟合程度较高，其中在岩层倾角为60°时，呈现显著的幂函数相关关系。这与张科利<sup>[28]</sup>和Foster等<sup>[29]</sup>的研究结论相一致，即阻力系数  $f$  与雷诺数  $Re$  之间呈幂函数相关关系。而Hessel等<sup>[30]</sup>却发现阻力系数  $f$  与雷诺数  $Re$  之间存在直线型关

系，Roels<sup>[31]</sup>研究结果表明  $f$  与  $Re$  存在较明显的对数关系。这表明了坡面水流阻力不仅受坡面微地貌的影响，还取决于侵蚀形态本身的影响，而在喀斯特槽谷区，不仅要考虑地上地下双层结构，还要考虑岩层倾角对坡面的影响。

## 2.6 喀斯特槽谷区地表地下径流量分配特征

喀斯特槽谷区是具有特殊的地上地下双层空间结构，这是造成地表径流水动力学参数变化的关键因素。为揭示不同顺/逆倾向坡面的喀斯特槽谷区在不同岩石倾角的径流分配特征，点汇在雨强为60 mm·h<sup>-1</sup>条件下，地表地下径流量随降雨时间的变化趋势，如图8所示。可以看出，不同岩石倾向的喀斯特地表径流量均随着降雨时间先波动增大，然后波动缓慢减小，最后在30~60 min以后逐渐趋于稳定，而地下径流量却呈波动减小的趋势，最后在40~60 min以后趋于平稳。

不同岩石倾角的喀斯特地表和地下的产流量具有以下特征：(1) 对逆层坡而言，地表径流

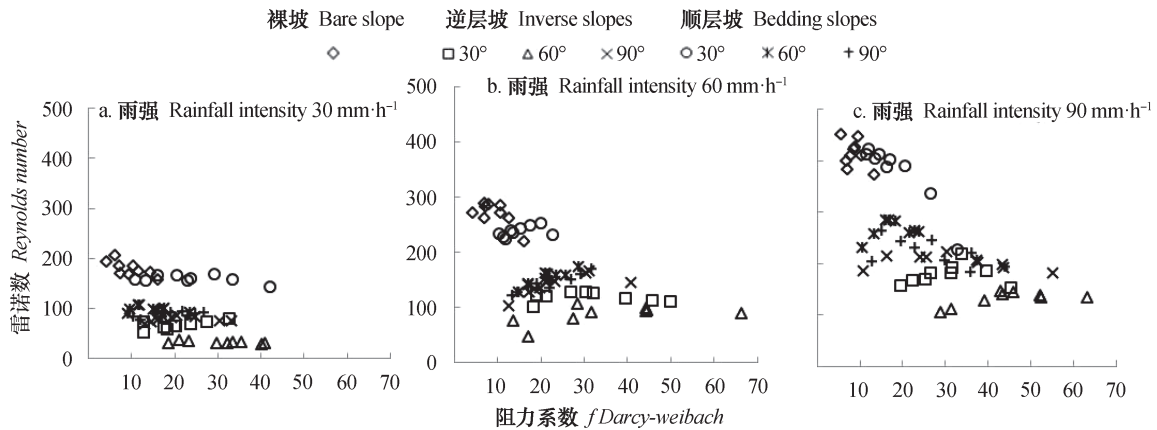


图7 不同雨强条件下喀斯特槽谷区不同岩层倾角坡面阻力系数  $f$  与雷诺数  $Re$  间的变化关系

Fig. 7 Variation of the relationship between Darcy-Weisbach roughness coefficient and Reynolds number with rainfall intensity and rock layer inclination angle in Karst Valley Area

表2 喀斯特槽谷区在雨强  $60 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$  条件下阻力系数  $f$  与雷诺数  $Re$  之间的关系

Table 2 Relationship between Darcy-Weisbach roughness coefficient and Reynolds number under rainfall  $60 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$  in intensity in Karst Valley Area

岩层类型 Rock layer	直线 Line			对数 Logarithm		
	方程 Equation	$R^2$	sig	方程 Equation	$R^2$	sig
裸坡 Bare slope	$f = -0.117Re + 40.947$	0.482	0.038	$f = -30.009 \ln(Re) + 177.247$	0.495	0.034
顺层坡 Bedding slopes	30° $f = 0.211Re - 34.575$	0.233	0.189	$f = 49.702 \ln(Re) - 256.363$	0.230	0.192
	60° $f = 0.288Re - 22.709$	0.840	0.001	$f = 42.426 \ln(Re) - 191.861$	0.826	0.001
	90° $f = 0.335Re - 22.853$	0.543	0.023	$f = 43.829 \ln(Re) - 192.183$	0.535	0.025
逆层坡 Inverse slopes	30° $f = -0.209Re + 56.187$	0.029	0.663	$f = -20.826 \ln(Re) + 130.817$	0.022	0.704
	60° $f = 0.493Re - 6.947$	0.271	0.151	$f = 35.771 \ln(Re) - 123.118$	0.278	0.144
	90° $f = 0.308Re - 20.104$	0.618	0.017	$f = 40.192 \ln(Re) - 157.02$	0.617	0.006
岩层类型 Rock layer	幂函数 Power function					
	方程 Equation	$R^2$	sig			
裸坡 Bare slope	$f = 2.344471^7 Re^{-2.646}$	0.320	0.112			
顺层坡 Bedding slopes	30° $f = 8.83863n^{-8} Re^{3.485}$	0.283	0.141			
	60° $f = 0.001Re^{2.075}$	0.869	0.000			
	90° $f = 0.001Re^{2.055}$	0.704	0.001			
逆层坡 Inverse slopes	30° $f = 68.278Re^{-0.174}$	0.001	0.921			
	60° $f = 0.104Re^{1.292}$	0.387	0.074			
	90° $f = 0.021Re^{1.095}$	0.824	0.000			

量随着岩层倾角表现为  $90^\circ > 30^\circ > 60^\circ$ ，其分配比例在 32.09% ~ 52.2% 之间，且均小于裸坡的累积地表径流量；地下径流量则随着岩层倾角表现为  $60^\circ > 30^\circ > 90^\circ$ 。这说明岩层倾角为  $60^\circ$  是逆层坡累积径流分配比例的临界值，且其地下累积径流分配比例大于地表累积径流分配比例。（2）

对于顺层坡而言，地表径流量随着岩层倾角表现为  $30^\circ > 60^\circ > 90^\circ$ ，均小于裸坡的累积地表径流量，其分配比例在 52.2% ~ 74.82% 之间；地下径流量及分配比例总体上随岩层倾角增加而增加，且均小于地表径流量。总体而言，地表累积径流量大小排序为裸坡 > 顺层坡 > 逆层坡，地下累积径流量分



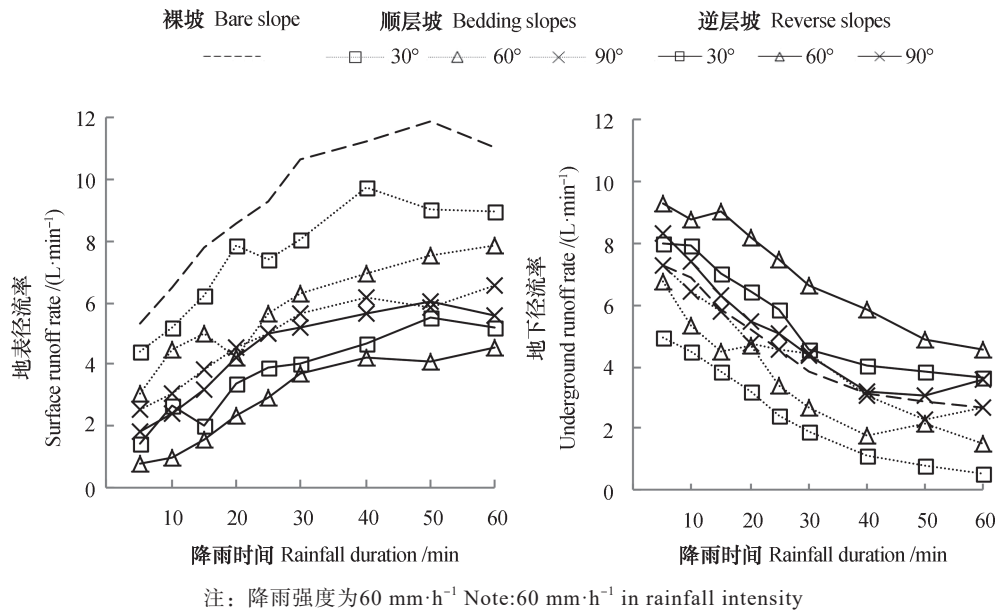


图8 雨强为 $60 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 下的喀斯特槽谷区顺/逆层坡在不同岩层倾角下地表地下产流过程

Fig. 8 Surface and underground runoff yielding processes on bedding slopes and reverse slopes different in rock layer inclination angle in Karst Valley Area

配比例为逆层坡>裸坡>顺层坡。

### 3 讨论

喀斯特槽谷区坡面的径流水动力学特性主要受以下3个方面的影响，一是喀斯特槽谷区特有的地下双层空间结构，雨水在坡面发生了二次分配，大部分沿地下喀斯特与土壤的孔裂隙渗入地下，而减少了在坡面形成的地表径流<sup>[32]</sup>；二是喀斯特槽谷区坡面的岩石裸露增大了坡面的粗糙程度<sup>[33]</sup>；三是喀斯特槽谷区存在典型的顺/逆层，改变了喀斯特槽谷区坡面的地貌形态<sup>[34]</sup>。在降雨初期，坡面裸露的岩石一方面减小了地表土壤可蚀面积，增大了对地表径流的拦截阻力，促使地表径流沿着岩石裂隙漏失，导致地表径流量相对于非喀斯特地区较少；另一方面嵌入土壤中的岩石具有光滑表面，增加了地表不透水面积，对坡面径流起着合并-汇流的作用，此时地表径流流速较快，地表产流量也较大。随着降雨的持续，喀斯特槽谷区坡面岩石的裸露面积增大，坡面光滑水流界面随之增大，分散了水流的动能，同时岩石和土壤之间的交界面在雨水的击打和径流的冲刷作用下，岩-土之间的裂隙增大，土壤松动，坡面糙率和入渗能力增大，地表径流量减少，水流流速随之降低。而后，土壤界面逐渐达到饱和，从岩-土缝隙流转换为岩-土交界面

流，径流流速随之增大，因此水流在坡面的作用力和阻滞力相互作用中达到动态平衡，流速逐渐趋于稳定。该试验结果与王小燕等<sup>[35]</sup>的研究结果相似。整体而言，喀斯特坡面流速较非喀斯特地区的坡面流速小，因此研究喀斯特地区的坡面径流流速变化具有十分重要的意义。

喀斯特槽谷区不仅存在地表径流流失和地下径流漏失两种情况，还存在顺/逆层两种特殊的岩石构造<sup>[36]</sup>。在降雨过程中，顺层坡通过较大的光滑岩石表面增加了坡面的不透水界面，水流沿岩石方向顺流而下，增加坡面径流的汇集，则顺层坡坡面地表径流量分配比例较大；而逆层坡的岩层方向与水流方向相反，对水流汇集起阻碍作用，径流大部分沿岩石裂隙、节理、裂缝等下渗，则地下径流量分配比例较大。由此可知，顺层坡的地表径流量大于逆层坡的地表径流量，其水流流速也明显大于逆层坡，这说明岩层倾向是影响喀斯特槽谷区水流侵蚀的一个重要因素。与非喀斯特坡面相比，喀斯特坡面地表径流量较少，主要以层流为主，雷诺数 $Re$ 主要集中在 $28.12 \sim 449.70$ 之间。喀斯特坡面主要以缓流为主，即佛汝德数 $Fr < 1$ ，这是因为喀斯特槽谷区独特的地上地下双层岩石结构，雨水有一部分漏失进入土层内部，加上坡面岩石阻碍坡面径流的前进，地表径流基本很难汇集成为湍流，这与李宏伟等<sup>[37]</sup>研究结果相似，而目前关于喀斯特槽

谷区坡面的水动力学特征方面的内容基本为空白,因此,需要进一步对其进行深入研究。

本研究中,岩层倾角对坡面水动力学参数影响显著,在雨强一定的条件下,对于顺层坡而言,岩层倾角的增大,则裸露坡面的岩石面积随之减小,坡面粗糙度随之增大,较陡的岩石在坡面形成一个个凸起的点,能够分散水流流动降低流速,水流紊动程度减小,则雷诺数 $Re$ 值减小,径流阻力也随之增加;而对于逆层坡而言,随着岩层倾角越大,坡面的粗糙度呈先增大后减小的趋势,且存在变化临界值(倾斜度为 $60^\circ$ ),这表明逆层坡的地表径流量随着岩层倾角增大到一定程度时而逐渐减小转为地下漏失。这是因为,当逆层坡的岩层倾角较小时,雨水接触坡面土壤面积较大,大部分雨水下渗进入土体内部,雨水受裸露的岩石干扰较大,地表粗糙度增大,阻力增大,流速减小,雷诺数增大;当岩层倾角逐渐增大时,地表的微地貌发生较大的改变,雨水接触不透水界面增大,则地表径流阻力随之减小,流速增大,雷诺数减小,但岩石与土壤之间存在软硬界面,雨水沿着岩石进入土壤界面,造成了土壤的糙率变大,流速也随之减少。

喀斯特槽谷区的侵蚀动力过程可以通过佛汝德数 $Fr$ 、雷诺数 $Re$ 、Darcy-Weisbach阻力系数 $f$ 来进行表现,而其中Darcy-Weisbach阻力系数 $f$ 和雷诺数 $Re$ 存在明显的指数相关关系。已经有不少的研究者发现Darcy-Weisbach阻力系数 $f$ 和雷诺数 $Re$ 之间的关系由于实验条件不同,而两者之间的变化规律各有不同,且大部分研究均集中在非喀斯特地区,对于喀斯特地区的研究较少,并且本实验室内采用侵蚀槽铁板模拟与野外岩石特性有一定的差异性,室内的侵蚀槽铁板只能模拟岩石孔裂隙的大小,无法模拟岩石的可蚀性,其径流漏失量相比野外较大,从而地表径流比例含量减小,其水动力学参数将会受到一定影响,因此需要后期进一步对其进行深入研究,为喀斯特地区径流流失的监测系统提供理论基础。

## 4 结论

喀斯特槽谷区顺/逆层坡主要以薄层流为主。顺层坡的岩层倾角越大则坡面流速越小,而逆层坡却是以岩层倾角 $60^\circ$ 为临界值,低于 $60^\circ$ ,水流

流速随着岩层倾角的增大逐渐减小,高于 $60^\circ$ ,水流流速随着岩层倾角的增大而增大,整体而言,顺/逆层坡均小于裸坡的水流流速。较裸坡而言,逆层坡的雷诺数 $Re$ 减少了 $37.45\% \sim 67.35\%$ ,佛汝德数 $Fr$ 减少了 $37.78\% \sim 49.08\%$ ,阻力系数 $f$ 增大了 $150\% \sim 312\%$ 。对顺层坡而言,其雷诺数 $Re$ 和佛汝德数 $Fr$ 均大于逆层坡而小于裸坡,阻力系数 $f$ 小于逆层坡而大于裸坡。本研究中坡面阻力系数 $f$ 和雷诺数 $Re$ 存在显著的幂函数正相关关系,顺层坡的拟合度更高。在不同岩层类型下的喀斯特槽谷区坡面的地表累积径流量分配比例大小排序为裸坡>顺层坡>逆层坡,地下累积径流量分配比例为逆层坡>裸坡>顺层坡。

## 参考文献

- [1] 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
- [2] 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. Land Degradation & Development, 2017, 28: 1922—1932
- [3] Akdim B. Karst landscape and hydrology in Morocco: Research trends and perspectives. Environmental Earth Sciences, 2015, 74: 251—265
- [4] 林昌虎,朱安国.贵州喀斯特山区土壤侵蚀与防治.水土保持研究,1999,6(2):109—113  
Lin C H, Zhu A G. A study on soil erosion and prevention in Karst Mountainous Region of Guizhou (In Chinese). Research of Soil and Water Conservation, 1999, 6 (2): 109—113
- [5] 张殿发,王世杰,李瑞玲.贵州省喀斯特山区生态环境脆弱性研究.地理与地理信息科学,2002,18(1):77—79  
Zhang D F, Wang S J, Li R L. Study on the eco-environmental vulnerability in Guizhou Karst Mountains (In Chinese). Geography and Geo-Information Science, 2002, 18 (1): 77—79
- [6] 张信宝,王世杰,贺秀斌,等.碳酸盐岩风化壳中的土壤蠕滑与喀斯特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
- [ 7 ] 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
- [ 8 ] 陈飞, 周德全, 白晓永, 等. 典型喀斯特槽谷区石漠化时空演变及未来情景模拟. *农业资源与环境学报*, 2018, 35 ( 2 ): 174—180  
Chen F, Zhou D Q, Bai X Y, et al. Spatial-temporal evolution of karst rocky desertification and future trends based on CA-Markov methods in Typical Karst Valley ( In Chinese ). *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2018, 35 ( 2 ): 174—180
- [ 9 ] Fábio C N, Romain D, Fritz S, et al. Bedrock bedding, landsliding and erosional budgets in the Central European Alps. *Terra Nova*, 2015, 27 ( 5 ): 370—378
- [ 10 ] Marco S, Fritz S, Heinz S, et al. Contrasting sediment flux in Val Lumnezia ( Graubünden, Eastern Swiss Alps ), and implications for landscape development. *Swiss Journal of Geosciences*, 2009, 102 ( 2 ): 211—222
- [ 11 ] 邱俊, 任光明, 王云南. 层状反倾-顺倾边坡倾倒变形形成条件及发育规模特征. *岩土力学*, 2016, 37 ( 增刊2 ): 513—532  
Qiu J, Ren G M, Wang Y N. Characteristics of forming conditions and development scale of toppling in anti-dip and dip stratified slopes ( In Chinese ). *Rock and Soil Mechanics*, 2016, 37 ( Supp. 2 ): 513—532
- [ 12 ] Fan G, Zhang J J, Wu J B, et al. Dynamic response and dynamic failure mode of a weak intercalated rock slope using a shaking table. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2016, 49: 3243—3256
- [ 13 ] Aydan Ö. Large rock slope failures induced by recent earthquakes. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2016, 49: 2503—2524
- [ 14 ] Fayou A, Shimao D, Fan Y H. Study on the stability influence factors of bedding slope under the action of seismic load. *Applied Mechanics and Materials*, 2014, 501/504: 1560—1565
- [ 15 ] 肖海, 刘刚, 刘普灵. 集中流作用下黄土坡面侵蚀率对侵蚀动力学参数的响应. *农业工程学报*, 2016, 32 ( 17 ): 106—111  
Xiao H, Liu G, Liu P L. Response of detachment rate of loess slope to hydrodynamic characteristics under concentrate flow condition ( In Chinese ). *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32 ( 17 ): 106—111
- [ 16 ] 徐锡蒙, 郑粉莉, 吴红艳, 等. 玉米秸秆覆盖缓冲带对细沟侵蚀及其水动力学特征的影响. *农业工程学报*, 2015, 31 ( 24 ): 111—119  
Xu X M, Zheng F L, Wu H Y, et al. Impacts of cornstalk mulching buffer strip on rill erosion and its hydrodynamic character ( In Chinese ). *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31 ( 24 ): 111—119
- [ 17 ] Guo T L, Wang Q J, Li D Q, et al. Flow hydraulic characteristic effect on sediment and solute transport on slope erosion. *Catena*, 2013, 107: 145—153
- [ 18 ] 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. *农业工程学报*, 2015, 31 ( 22 ): 83—88  
Li Y H, Niu Y B, Wang Z Z, et al. The hydrodynamic parameters and the relationship of the runoff hydrodynamic parameters in the engineering stack slope ( In Chinese ). *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31 ( 22 ): 83—88
- [ 19 ] 甘凤玲, 何丙辉, 王涛. 人工模拟降雨下汶川震区滑坡堆积体产沙规律. *农业工程学报*, 2016, 32 ( 12 ): 158—164  
Gan F L, He B H, Wang T. Sediment characteristic of landslide accumulation body in earthquake zone of Wenchuan under artificial rainfall simulation condition ( In Chinese ). *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32 ( 12 ): 158—164
- [ 20 ] Zhang L T, Gao Z L, Yang S W, et al. Dynamic processes of soil erosion by runoff on engineered landforms derived from expressway construction: A case study of typical steep spoil heap. *Catena*, 2015, 128: 108—121
- [ 21 ] 汤珊珊, 李占斌, 鲁克新, 等. 覆沙坡面水动力学参数与径流产沙的关系. *农业工程学报*, 2017, 33 ( 20 ): 136—143  
Tang S S, Li Z B, Lu K X, et al. Relationship between hydrodynamic parameters and runoff and sediment yield on sand-covered slope in rainfall simulation study ( In Chinese ). *Transactions of the*

- Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33 (20): 136—143
- [22] Xiao H, Liu G, Liu P L, et al. Response of soil detachment rate to the hydraulic parameters of concentrated flow on steep loessial slopes on the Loess Plateau of China. *Hydrological Processes*, 2017, 31: 2613—2621
- [23] 马萍, 宋锋惠, 史彦江, 等. 伊犁河流域裸露缓坡地放水试验研究. *中国水土保持科学*, 2010, 8 (1): 34—39  
Ma P, Song F H, Shi Y J, et al. Scouring erosion experiment on bare slight slope in Ili River Basin (In Chinese). *Science of Soil and Water Conservation*, 2010, 8 (1): 34—39
- [24] 张乐涛, 高照良, 李永红, 等. 模拟径流条件下工程堆积体陡坡土壤侵蚀过程. *农业工程学报*, 2013, 29 (8): 145—153  
Zhang L T, Gao Z L, Li Y H, et al. Soil erosion process of engineering accumulation in steep slope undersimulated runoff conditions (In Chinese). *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 29 (8): 145—153
- [25] Niemi N A, Oskin M, Burbank D W, et al. Effects of bedrock landslides on cosmogenically determined erosion rates. *Earth and Planetary Science Letters*, 2005, 237: 480—498
- [26] 丁文斌, 史冬梅, 何文健, 等. 放水冲刷条件下工程堆积体边坡径流侵蚀水动力学特性. *农业工程学报*, 2016, 32 (18): 153—161  
Ding W B, Shi D M, He W J, et al. Hydrodynamic characteristics of engineering accumulation erosion under side slope runoff erosion process in field scouring experiment (In Chinese). *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32 (18): 153—161
- [27] 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. *水利学报*, 2014, 45 (8): 892—902  
Li T Y, He B H, Lei T W, et al. Indoor experiment on eroding rills hydrodynamics characteristics of earth-rock mixed landslide slope in Wenchuan Earthquake area (In Chinese). *Shuili Xuebao*, 2014, 45 (8): 892—902
- [28] 张科利. 黄土坡面细沟侵蚀中的水流阻力规律研究. *人民黄河*, 1998, 20 (8): 13—15
- Zhang K L. Study on the law of water flow resistance in rill erosion of loess slope (In Chinese). *Yellow River*, 1998, 20 (8): 13—15
- [29] Foster G R, Huggins L F, Meyer L D. A laboratory study of rill hydraulics: I. Velocity relationship. *Transactions of American Society of Association Executives*, 1984, 27 (3): 790—796
- [30] Hessel R, Jetten V, Zhang G H. Estimating manning's n for steep slope. *Catena*, 2003, 54 (1/2): 77—91
- [31] Roels J M. Flows resistance in concentrated overland flow on rough slope surface. *Earth Surface Process and Landforms*, 1984, 9: 541—551
- [32] Dai Q H, Liu Z, Shao H, et al. Karst bare slope soil erosion and soil quality: A simulation case study. *Soil Earth*, 2015, 6: 985—995
- [33] Dai Q H, Peng X D, Yang Z, et al. Runoff and erosion processes on bare slopes in the Karst Rocky Desertification Area. *Catena*, 2017, 152: 218—226
- [34] 李阳兵, 王世杰, 谭秋, 等. 喀斯特石漠化的研究现状与存在的问题. *地球与环境*, 2006, 34 (3): 9—14  
Li Y B, Wang S J, Tan Q, et al. Research development and problems of karst rocky desertification (In Chinese). *Earth and Environment*, 2006, 34 (3): 9—14
- [35] 王小燕, 王天巍, 蔡崇法, 等. 含碎石紫色土坡面降雨入渗和产流产沙过程. *水科学进展*, 2014, 25 (2): 189—194  
Wang X Y, Wang T W, Cai C F, et al. Processes of rainfall infiltration, runoff and sediment yield on purple soil slope containing rock fragments (In Chinese). *Advances in Water Science*, 2014, 25 (2): 189—194
- [36] 寸江峰. 喀斯特地区层状岩质边坡破坏机理及其稳定性评价理论研究. 贵阳: 贵州大学, 2007  
Cun J F. Failure mechanism and stability appraisal theory study on layered rock slope in karst region (In Chinese). Guiyang: Guizhou University, 2007
- [37] 李宏伟, 王文龙, 黄鹏飞, 等. 土石混合堆积体土质可蚀性K因子研究. *泥沙研究*, 2014 (2): 49—54  
Li H W, Wang W L, Huang P F, et al. Experimental study of soil erodibility factor of earth-rock engineering accumulation in loess areas (In Chinese). *Journal of Sediment Research*, 2014 (2): 49—54

## Effect of Bedding Slope on Hydrodynamic Parameters in Typical Karst Valley

GAN Fengling HE Binghui<sup>†</sup> QIN Ziyang

(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】 A karst valley has not only surface/underground double-layered structure, but also two special geological structures, bedding slope and reverse slope. During rainstorms, bedrocks seem to form a discontinuous impermeable area, which reduces soil and water loss. Although it seems obvious that rock layer inclination influences hydrology in karst areas, little has been reported in the literature on this subject. Therefore it is of great importance to launch a study on rules of water transport with runoff in Karst Valley areas. So the objective of this study is to investigate roles of rock layer inclination in guiding surface water flow on slopes in karst valleys. 【Method】 Based on field investigations, a simulated rainfall experiment, designed to have bedding/reverse slopes ( $30^\circ$ ,  $60^\circ$  and  $90^\circ$  in gradient), 3 levels of rainfall intensity (30, 60 and  $90 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ ) and a bare slope as CK, was carried out on a slope approximate to the critical gradient ( $25^\circ$ ) of the nearby karst valley to explore runoff rate and hydrodynamic parameters and their relationships with bedding/reverse slopes. A total of 18 treatments and 3 duplicates for each were laid out and conducted in the experiment. The characteristics of soil hydraulics measured included flow velocity, Reynolds number ( $Re$ ), Froude number ( $Fr$ ), Darcy-Weisbach roughness coefficient ( $f$ ), and surface/underground accumulated runoff. 【Result】 Results show that with the rainfall experiment going on, runoff on the bedding slopes and inverse slopes was dominated with shallow watersplash. Over on bedding slopes, the overland flow slowed down in velocity, with rising inclination angle of the rock layer, while on reverse slopes the inclination angle of  $60^\circ$  was the threshold. Surface runoff flew faster on the bare slope than on bedding slopes and reverse slopes. Reynolds number ( $Re$ ) and Froude number ( $Fr$ ) was higher on bedding slopes than on reverse slopes, but lower than on bare slopes, Darcy-Weisbach roughness coefficient ( $f$ ) was lower on bedding slopes than on reverse slopes but higher than on bare slope. Value for Froude number ( $Fr$ ) indicated that the water flow was a subcritical one, and was generally higher on bare slopes than on bedding slopes and reverse slopes. Darcy-Weisbach roughness coefficient ( $f$ ) was much lower on bare slopes than on bedding slopes and ireverse slopes, showing order of reverse slope > bedding slope > bare slope, and decreased with increasing Reynolds number ( $Re$ ), which was in an extremely significant positive power relationship with Reynolds number ( $Re$ ). Accumulated surface runoff varied with rock layer inclination in the order of bare slope > bedding slope > reverse slope, while accumulated underground runoff followed an order of reverse slope > bare slope > bedding slope. 【Conclusion】 Overall, the findings may provide certain data support for analysis of the mechanism of runoff generation and scientific basis for further research on processes of the runoff and models of the soil erosion in karst valley areas. Meanwhile, these findings are expected to be of some help for building prediction models for soil erosions in similar environments different in rock layer inclination.

**Key words** Karst valley area; Bedding/reverse slope; Inclination angles; Hydrodynamic parameters

(责任编辑：檀满枝)