

岩层倾向对喀斯特槽谷区地表/地下产流过程的影响

覃自阳, 甘凤玲, 何丙辉

(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: 喀斯特槽谷区在降雨过程中极易发生水土流失, 这使得该区生态环境被破坏。以喀斯特槽谷区为研究对象, 通过室内模拟其典型顺/逆层坡面特征及地下孔裂隙发育程度, 利用人工降雨试验研究不同雨强条件下地表地下产流特征, 从而揭示喀斯特槽谷区地表地下产流机制。结果表明: (1) 喀斯特槽谷区地表地下产流受雨强影响, 小雨强(30 mm/h)条件下地下产流量大于地表产流量, 中雨强(60 mm/h)条件下地表产流量增大且裸坡条件下地表产流量大于地下产流量, 大雨强(90 mm/h)条件下裸坡与顺层坡的地表产流量均大于地下产流量。(2) 地下孔裂隙发育程度对地表地下产流量的分配比例产生影响, 地下孔裂隙度越大则地下产流量越多, 且2%~3%的地下孔裂隙度时地表地下产流量分配比例发生转变。(3) 不同岩层倾向条件下, 地表产流量及其分配比例最高为裸坡, 最低为逆层坡, 地下产流量及其分配比例最高为逆层坡, 最低为裸坡。(4) 不同岩层倾角条件下, 顺层坡地表产流量最高为30°, 最低为90°, 地下产流量则相反; 逆层坡地表产流量最高为90°, 最低为60°, 地下产流量最高为60°, 最低为90°。研究结果可为喀斯特槽谷区地表及地下产流机制的进一步认识提供科学依据。

关键词: 喀斯特槽谷区; 顺/逆层坡; 降雨强度; 岩层倾向; 产流

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2020)05-0068-08

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2020.05.010

Influence of Strata Tendency on the Surface / Underground Runoff Production Process in Typical Karst Valley

QIN Ziyang, GAN Fengling, HE Binghui

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

Abstract: Karst valley area is prone to soil and water loss during rainfall, which destroy the ecological environment of the area. This study taken the karst valley area as the research object, through indoor simulation of its typical bedding/inverse layer slope characteristics and the development degree of underground hole crack and using artificial rainfall test, the characteristics of the surface underground runoff production under different rainfall conditions were studied, thereby revealing the production mechanism of surface and underground runoff in karst valley. The results showed that: (1) The surface underground runoff yield and discharge in the karst valley area was affected by rain intensity, and the underground runoff yield and discharge was greater than the surface runoff under light rain (30 mm/h), and the surface runoff yield and discharge increased under moderate rain (60 mm/h), meanwhile it was greater than underground runoff under the condition of large and bare slope. Under the condition of heavy rain (90 mm/h), the surface runoff yield and discharge were both greater than the underground runoff on bare slope and bedding slope. (2) The development degree of underground pore fissures impacted the distribution ratio of surface underground runoff yield and discharge. The larger the degree of underground pore fissure was, the greater the underground runoff yield and discharge would be, and the distribution proportion of surface underground runoff yield and discharge would change when the underground hole fissure degree was 2% ~ 3%. (3) Under different strata tendencies, the surface runoff yield and discharge and its distribution ratio were the highest on bare slopes, and the

收稿日期: 2020-02-02

资助项目: 国家自然科学基金项目(41771312); 国家重点研发计划项目(2016YFC0502303)

第一作者: 覃自阳(1994—), 男, 硕士研究生, 主要从事城市水土保持研究。E-mail: 1027068052@qq.com.

通信作者: 何丙辉(1966—), 男, 教授, 博导, 主要从事土壤侵蚀与小流域综合治理研究。E-mail: hebinghui@swu.edu.cn

lowest on reverse slopes, while the underground runoff yield and discharge and its distribution ratio were the highest on reverse slopes, and the lowest on bare slopes. (4) Under different strata inclination angles, the surface runoff yield and discharge was the maximum on the bedding layer of 30° , and the lowest on the bedding layer of 90° , while the underground runoff yield and discharge was opposite. For the reverse slope, the surface runoff yield and discharge was the maximum on the slope of 90° , and the minimum on the slope of 60° , the underground runoff yield and discharge was the highest on the slope of 60° , and the lowest on the slope of 90° . The results could provide scientific basis for further understanding of the production mechanism of surface and underground runoff in the karst valley area.

Keywords: karst valley area; bedding/reverse slope; rainfall intensity; rock inclination; runoff production

喀斯特槽谷区是我国西南地区的典型岩溶地貌类型,其地质主要表现为可溶性岩石如碳酸盐类、硫酸盐类岩石为主,在受到流水的化学溶蚀以及冲蚀等作用形成的地貌则呈现长条形洼地或槽谷。由于喀斯特槽谷区成土速度慢,土层较薄,加上自然环境以及人为活动的影响,导致水土流失严重并出现石漠化现象,这制约了当地经济的发展,部分地区由于水土流失严重甚至出现了无土可蚀的现象^[1]。在自然降雨过程中喀斯特槽谷区极易发生水土流失,土壤养分随着径流及泥沙通过地表及地下流入地下水体及江河湖泊,大量积累后容易造成水体富营养化,污染水源^[2],因此有必要对喀斯特槽谷区的生态环境进行保护及维护,对喀斯特槽谷区地表及地下径流流失机制进行研究是十分必要的。

喀斯特槽谷区的断面呈“U”形,槽谷两侧为原有的地貌类型,岩层倾向一致但坡向相反。水分影响了喀斯特地区植被的恢复^[3],而喀斯特槽谷区具有的地上地下结构以及典型的顺/逆层边坡地质构造,使得该地区地表水缺乏,土层浅薄,水分不易保存从而制约了植被的恢复。顺层坡土层较薄且微生物少,逆层坡土层较厚且微生物较多,岩石裸露率比顺层坡低^[4]。贾金田等^[5]研究表明,喀斯特坡面下伏岩石层的起伏程度对坡面土壤剖面水分分布格局是有影响的。王蓉蓉等^[6]对顺层边坡的研究表明,土体在含水量为13.2%时风化界面的黏聚力和内摩擦角都存在极大值,因此应使土体保持在最佳含水量使边坡保持较好的稳定性。Fábio等^[7]研究发现,在降雨过程中不同岩层倾向对径流的地上地下分配产生了影响,在顺层坡以地表径流为主,逆层坡则以地下径流为主。Norton等^[8]研究发现,顺层坡的地表产流速率高于逆层坡的地表产流率。目前国内对喀斯特槽谷区岩层倾向的研究^[9-10]大多是关于土壤含水量、地埂篱等方面的研究,对地上地下的产流过程以及产流机制的研究很少,而研究喀斯特槽谷区的产流对土壤侵蚀机理以及水土流失机理的认识有重要的意义,特别是对

顺/逆层坡的地质构造的研究能够完善喀斯特槽谷区地表地下产流机制的认识。因此,需要进一步完善对顺/逆层坡的径流流/漏失的研究。

降雨是产生径流的主要原因,而形成径流还受到降雨强度、地形地貌、土壤特性、地表覆盖物等因素的影响^[11]。彭旭东等^[12]研究发现,喀斯特坡地产流产沙的临界雨强在30~50 mm/h,雨强越大,产生的径流量也越大。而横断垄坡能够对地表径流进行有效拦截,同时增加雨水入渗,起到保水保土的作用^[13],被广泛应用于农业的耕作措施中。在特殊的地质条件下,喀斯特槽谷区形成了地表/地下的双层空间结构,其水文循环过程包括了地表径流以及地下漏失^[14],而地表泥沙也随着降雨产生的地表径流或地下径流发生流失。近年来,不少研究都针对喀斯特地区的水土流失进行,杨宇琼等^[15]研究表明,地下产流量随地下裂隙度增加而增加,并与降雨强度呈正相关,相关系数为0.573。这是因为喀斯特地区在发育过程中碳酸盐岩等在水的化学溶蚀作用下极易形成地下裂隙、竖井、落水洞等,这为喀斯特地区的水土流失提供了通道^[16-17]。降雨强度越大,带来的水资源越多,进入到地下的水及泥沙也变多。唐益群等^[18]研究表明,土壤团聚体的分散形成的细小颗粒容易沿着土壤裂隙向地下空间迁移,其中降水为土壤的地下漏失提供了水动力条件。近年来,对于喀斯特地区的研究大多集中于坡面的水土流失^[19-20],对喀斯特槽谷区的地表地下产流的关注较少,因此对喀斯特槽谷区地上地下产流机制的深入研究有利于提出有效的水土保持措施。本研究采用模拟降雨试验,在室内模拟喀斯特槽谷区顺/逆层坡以及地下孔裂隙,在不同雨强条件下地表及地下产流过程,为喀斯特槽谷区产流机制的认识提供依据。

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喀斯特槽谷

区(106°18′14″E, 29°39′10″N) 0—30 cm 石灰性土坡耕地, 经室内分析土壤颗粒组成, 其砂砾、粉粒和黏粒含量分别为 8.36%, 41.42%, 50.22%。试验土壤不过筛, 只对大的土壤团块进行分散处理, 并在自然风干后混合均匀。同时, 选取直径 > 35 cm 的不规则碳酸盐块石随机排列在试验钢槽上, 同时测量 30 cm 以上的裸露面积, 保证岩石裸露率为 15%, 用以模拟野外喀斯特石漠化的区域。填土时用特制木板和铁锤将土壤分层填实, 并使填土表面平整。为减小土壤的边缘效应, 用手将土壤边界处压实, 最后调节坡度以及试验钢槽底板的孔裂隙度达到试验水平。

1.2 试验设计

通过分析文献资料以及野外实地调查, 将试验钢槽坡度设计为 25°, 土层厚度为 30 cm, 土壤容重控制在 1.20 g/cm³ 左右, 岩石裸露率为 15%, 其以不规则碳酸盐块石随机排列在试验钢槽上模拟喀斯特槽谷区顺/逆层边坡。本研究以自制的试验钢槽底部均匀打孔的钢板来模拟喀斯特槽谷区地下孔裂隙, 通过调节圆孔的重合面积来确定地下孔裂隙度, 将地下孔裂隙度设计为 5 个水平, 即 1%, 2%, 3%, 4% 和 5%, 以此对地表地下产流进行研究。基于重庆市的降雨强度设计了 30, 60, 90 mm/h 3 个降雨强度梯度, 每场降雨历时 60 min。根据野外调查, 将顺/逆层坡的岩层倾角设计为 30°, 60°, 90°, 并以无岩石的裸坡作为对照组。本试验将岩层倾角、降雨强度和地下孔裂隙度作为变量, 每场降雨重复 3 次, 每次降雨结束后更换表层 10 cm 土壤后再进行下一场试验。



图1 试验装置示意

1.3 模拟降雨

本试验在重庆市北碚区西南大学后山人工降雨大厅完成, 试验用的降雨器为侧喷式模拟降雨器, 降雨强度可通过更换出水口的圆环进行调节。试验用的自制钢槽规格为长宽高分别为 5.0, 1.0, 0.3 m, 坡度可调范围 0~60°。岩层倾向通过调节槽内岩块与坡面的倾角来模拟, 即先将土槽放平, 再使用罗盘来调节钢槽内的岩石倾斜度, 使岩石倾斜度达到试验设计水平。钢槽底板均匀打孔, 孔径 5 cm, 用以模拟地下孔裂隙, 孔裂隙度可在 0~6% 范围内调节, 在钢槽上下两端各设计 1 个集流槽, 集流槽出水口用标有量程的塑料桶收集产流(图 1)。

降雨试验开始前, 调节坡度和地下孔裂隙度至设计水平, 并在每场降雨前采用非侵蚀性水使土壤水分饱和。然后调节降雨强度至设计水平, 开始降雨后当地表地下开始产流时开始计时, 前 30 min 内, 每间隔 5 min 接取地上地下产流; 径流产生的 31~60 min 内, 每间隔 10 min 接取地上地下产流。共计地上产流样 9 个, 地下产流样 9 个。

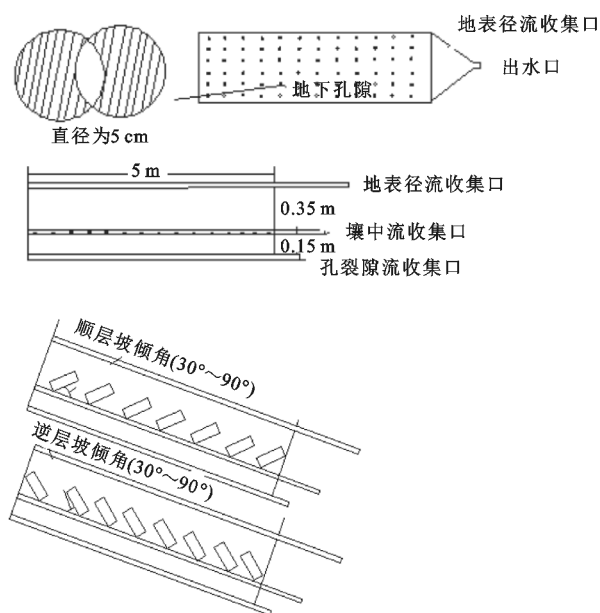
地下孔裂隙度计算公式^[21]为:

$$UPF = S_p / S$$

式中: UPF 为地下孔裂隙度(%); S_p 为圆孔重合区域的面积(m²)。

$$S_p = \frac{\pi R^2 \arcsin \frac{L}{R}}{90} - L^2 R, \pi = 3.14$$

式中: R 为钢槽底板孔洞的半径, 0.025 m; L 为 2 块底板重合面积最大的弦长(m); S 为土槽底板的面积, 5 m²。



1.4 数据处理

试验所产生的径流量数据可在接样时获取。试

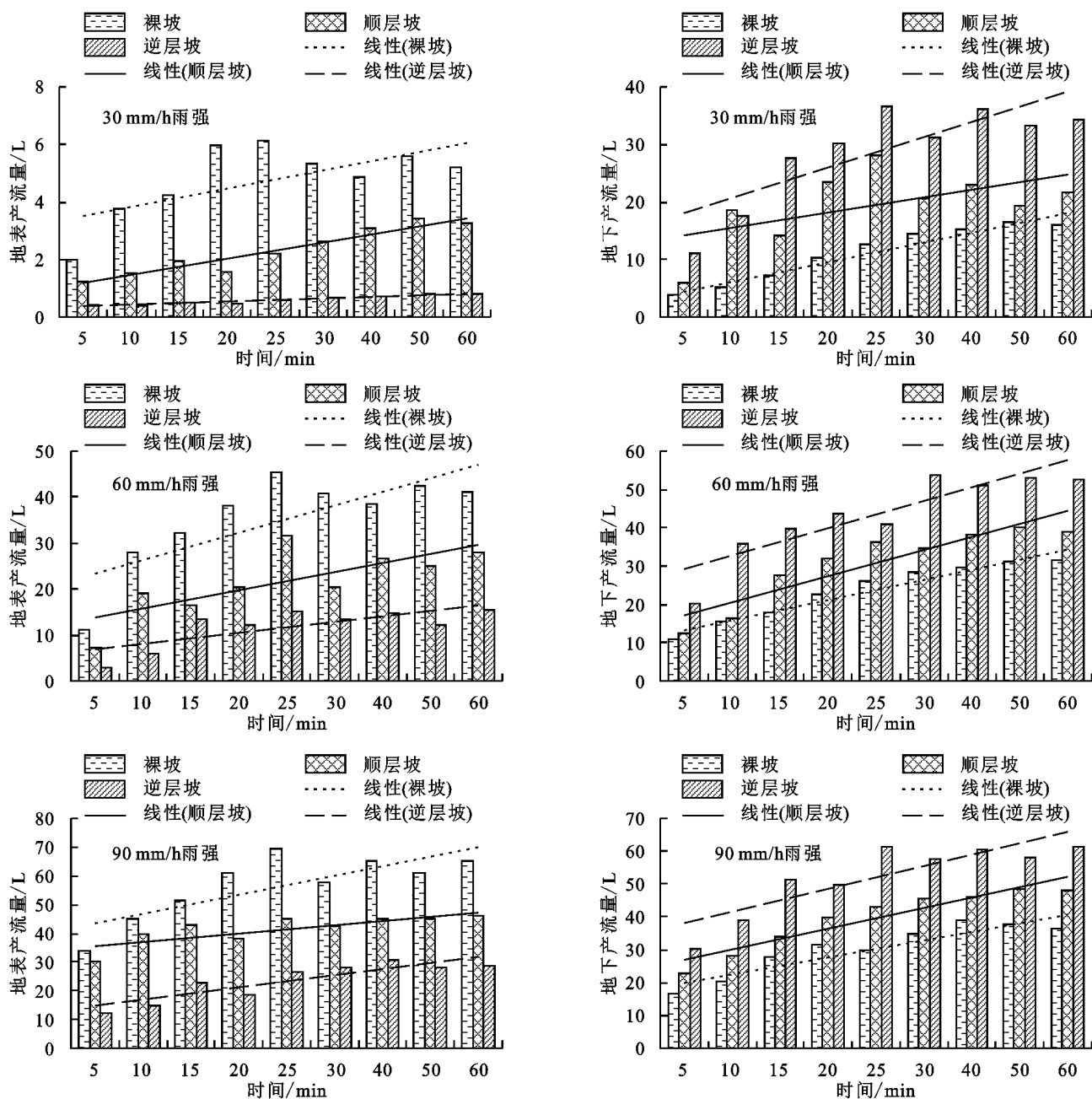
验数据采用 SPSS 19.0 和 Excel 2010 软件进行处理和作图。

2 结果与分析

2.1 降雨强度对地表地下产流的影响

降雨为坡面土体带来了水分,是产生地表及地下径流的主要因素,喀斯特槽谷区的地上地下空间结构以及顺/逆层坡的地质构造影响了地表及地下径流量的分配。由图 2 可知,不同雨强条件下,地表及地下径流量在持续降雨过程中呈波动上升,在降雨 30 min 后到达峰值并趋于稳定。雨强越大,输入的水分越多,产流越多。不同岩层倾向条件下地表及地下径流量均随着雨强增大而增大,且地表地下产流量差异较大。在裸坡条件下,随着降雨强度增大,地表径流量的分配比例由 28.24% 上升到 64.50%,而地下径流量的分配比例则由 71.76% 下降到 35.50%。顺层坡

条件下,随着降雨强度增大,地表径流量的分配比例由 11.36% 上升到 50.58%,地下径流量的分配比例则由 88.64% 下降到 49.42%。逆层坡条件下,随着降雨强度增大,地表径流量的分配比例由 2.08% 上升到 31.47%,地下径流量的分配比例则由 97.92% 下降到 68.53%。总体而言,在各雨强条件下,地表径流量以及分配比例最大的是裸坡,最小的是逆层坡;地下产径流以及分配比例最大的是逆层坡,最小的是裸坡。小雨强(30 mm/h)条件下,地表径流量均小于地下径流量,而当雨强增大到大雨强(90 mm/h)条件时,开始出现地表径流量与地下径流量并重甚至大于地下径流量,其中裸坡最为明显,说明大雨强(90 mm/h)条件下产流方式发生了改变。

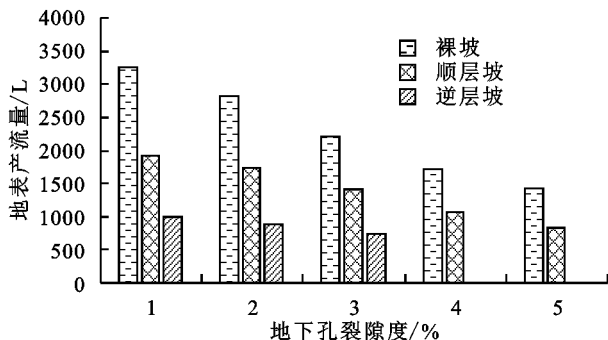


注:地下孔隙度为 3%。

图 2 不同岩层倾向在不同降雨强度下的地表地下产流过程

2.2 地下孔裂隙度对地表地下产流的影响

喀斯特槽谷区地下碳酸盐岩等受到水的溶蚀作用下容易形成裂隙、溶洞等,这使得雨水不仅通过坡面流失,还会通过地下裂隙进入地下发生水土漏



注:降雨历时 60 min,降雨强度为 60 mm/h。

图 3 不同岩层倾向在不同孔裂隙度下的地表地下产流量

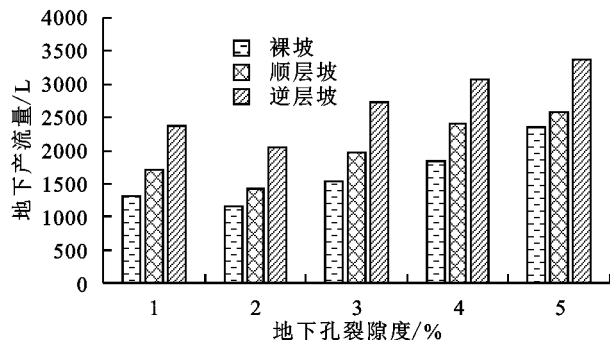
由图 3 可知,不同岩层倾向条件下,由于地下孔裂隙度的差异,地表及地下的径流量分配表现出一定的特征。裸坡条件下,地表径流量随着地下孔裂隙度的增大而减小,其分配比例由 71.26%减小到 37.77%,地下径流量则在地下孔裂隙度 2%时最小,之后随着随着孔裂隙度增大而增大,其分配比例由 28.74%增大到 62.23%。当地下孔裂隙度为 3%时,裸坡的地下径流量分配比例超过了 50%,这说明在地下孔裂隙度达到 3%时裸坡产流方式发生了转变并以地下产流为主。顺层坡条件下,地表径流量随着地下孔裂隙度的增大而先增大再减小,其分配比例在地下孔裂隙度为 2%达到最大值即 55.22%,地下径流量则表现为先减小再增大的趋势,其产流量分配比例在地下孔裂隙度为 2%达到最小值即 44.77%,当地下孔裂隙度超过 2%时,顺层坡以地下产流量为主。逆层坡条件下,地表径流量随着地下孔裂隙度的增大而先增大再减小,在地下孔裂隙度为 2%时地表分配比例达到最大值即 30.44%,而当地下孔裂隙度超过 3%时,逆层坡的地表没有产流,地下径流量则表现为先减小后增大,地下分配比例在地下孔裂隙度为 2%时达到最小值即 69.56%,由此可知,逆层坡主要以地下产流为主。

总体而言,除 1%和 2%地下孔裂隙度的裸坡和顺层坡外,大多数条件下的地表径流量总体上低于地下径流量,且地表径流量及其分配最大为裸坡,最小为逆层坡,地下径流量及其分配最大为逆层坡,最小为裸坡。当地下孔裂隙度低于 3%时,地表径流量大于地下径流量,当地下孔裂隙度高于 3%时,地表径流量小于地下径流量,逆层坡除外,即 3%的地下孔裂隙度是地表地下产流量发生转变的临界值。

2.3 岩层倾向对地表地下产流的影响

喀斯特槽谷区的岩层倾向状况能够对地表地下

失。由图 3 可知,随着降雨进行,不同裂隙条件下的地表产流和地下产流均呈增长趋势,在到达 30 min 时间点后达到产流峰值,之后产流量增长幅度变小并趋于稳定。



径流量的分配产生影响。图 4、图 5 和图 6 显示了在不同岩层倾向条件下地表地下产流的变化特征。在不同降雨强度条件下,随着降雨的进行,不同岩层倾向的地表径流总体上表现为前 30 min 呈波动增加,后 30 min 则趋于稳定;地下径流则在前 40 min 呈波动增加随后趋于稳定。各岩层条件下,地表及地下径流量均随着降雨强度的增大而增大。在不同地下孔裂隙条件下,随着降雨的进行,地表径流量整体上呈现先波动增大再趋于稳定的状态,而地下径流量也随着降雨时间呈现波动式增大的状态。

根据试验结果,不同降雨强度和地下孔裂隙度条件下随着岩层倾向的不同使得地表地下径流量表现出了差异,主要表现为:

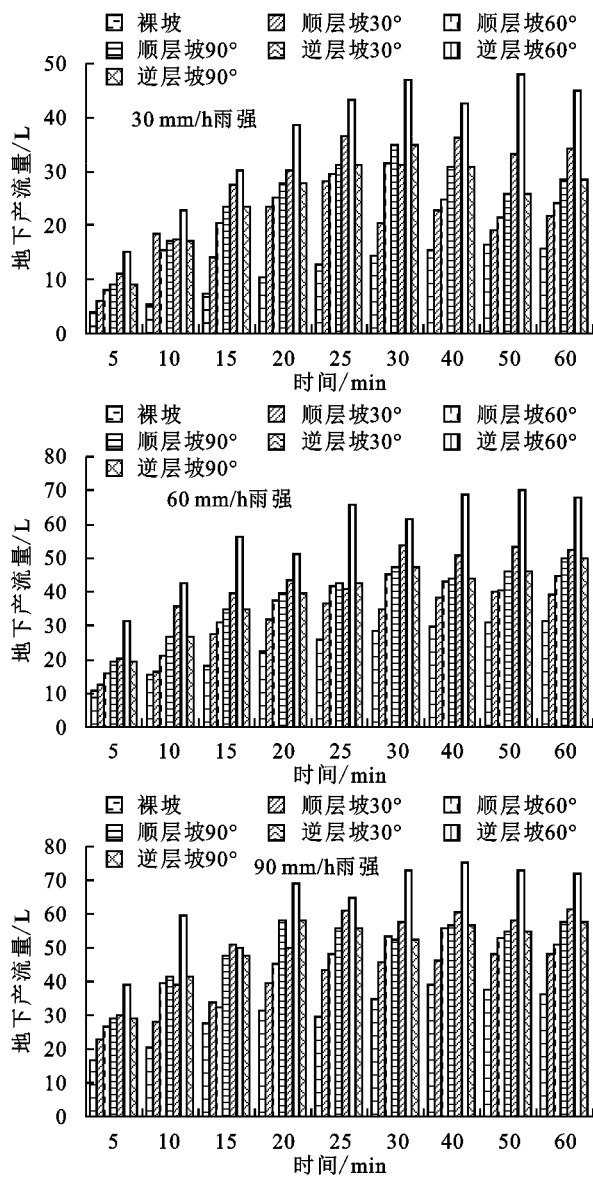
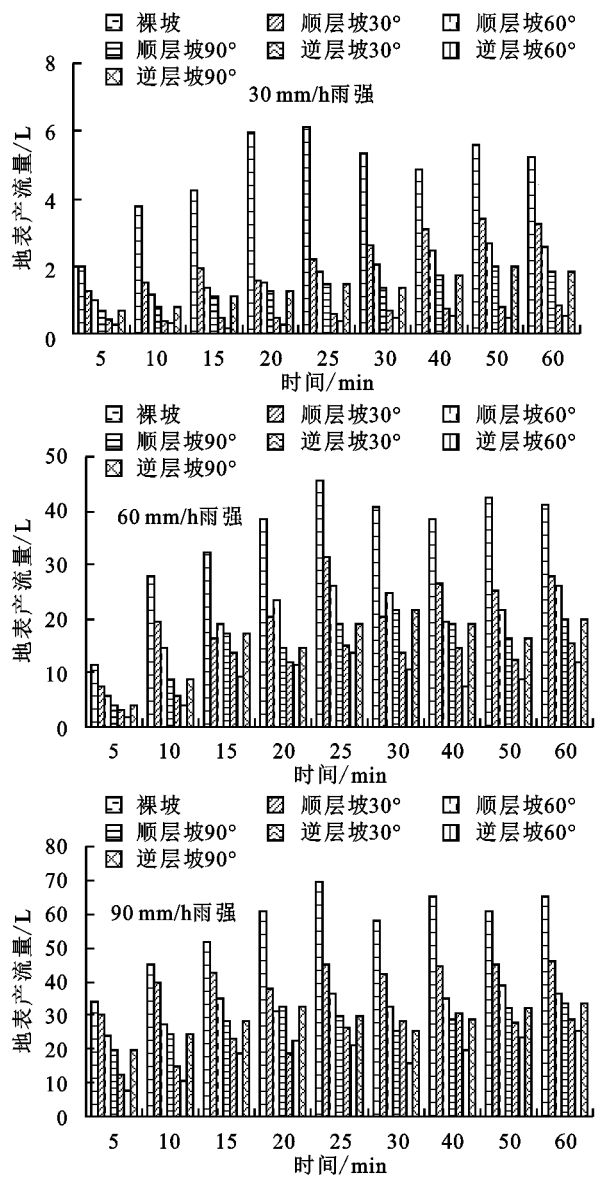
(1)除了大雨强(90 mm/h)条件下,各岩层倾向条件下的地表径流量均低于地下径流量,在顺层坡条件下,地表径流量及分配比例在 30°时最大,在 90°时最小,地下径流量及分配则在 90°下最大,在 30°时最小;在逆层坡条件下,地表径流量及分配比例在 90°时最大,在 60°时最小,地下径流量及分配则在 60°下最大,在 90°时最小,这说明岩层倾向 60°是逆层坡地下径流量达到最大值的临界值;裸坡条件下,小雨强(30 mm/h)时以地下径流为主,中雨强(60 mm/h)时地表地下径流量相近且地表略大于地下径流量,大雨强(90 mm/h)时地表径流量及其分配比例大于地下径流量,因此雨强 60 mm/h 是裸坡地表径流量超过地下径流量的临界值。对于顺层坡岩层倾向 30°下,在中雨强(60 mm/h)条件下,其地表径流量略小于地下径流量,在大雨强(90 mm/h)条件下,地表径流量及其分配比例略大于地下径流量及其分配比例,因此雨强 60 mm/h 是顺层坡岩层倾向 30°地表径流量超过地下径流量的临界值。

(2)当地下孔裂隙为 1%时,裸坡的地表径流量及分配比例大于地下径流量及分配比例。顺层坡条件下,地表径流量分配比例随着岩层倾角的增大而减小,地表径流量在岩层倾角为 30°时取得最大值,在 60°时取得最小值,当岩层倾角 >60°时地表径流量及分配比例小于地下径流量及分配比例, <60°时地表径流量及分配比例大于地下径流量及分配比例。逆层坡条件下,地表径流量在 90°岩层倾角时取得最大值,在 30°时取得最小值,地下径流量则在岩层倾角为 60°时取得最大值 2 722.14 L,90°岩层倾角时取得最小值,而逆层坡的地表径流量及分配比例均小于地下径流量及分配比例。

分配比例大于地下径流量及分配比例。顺层坡条件下,地表径流量在岩层倾角 30°时取得最大值,在 90°时取得最小值,地下径流量则表现相反,在岩层倾角 90°时取得最大值,在 30°时取得最小值。逆层坡条件下,各岩层倾角的地下径流量始终大于地上径流量,且地表径流量在岩层倾角 60°时取得最小值,地下径流量在岩层倾角 60°时取得最大值。

当地下孔裂隙度为 5%时,裸坡的地表径流量及分配比例小于地下径流量及分配比例。顺层坡条件下,地表径流量随着岩层倾角的增大而减小,地下径流量则表现相反,且在岩层倾角 90°时只有地下径流。逆层坡条件下各岩层倾角均无地表径流,只有地下径流。

当地下孔裂隙度为 3%时,裸坡的地表径流量及



注:降雨历时 60 min,地下孔裂隙度为 3%。

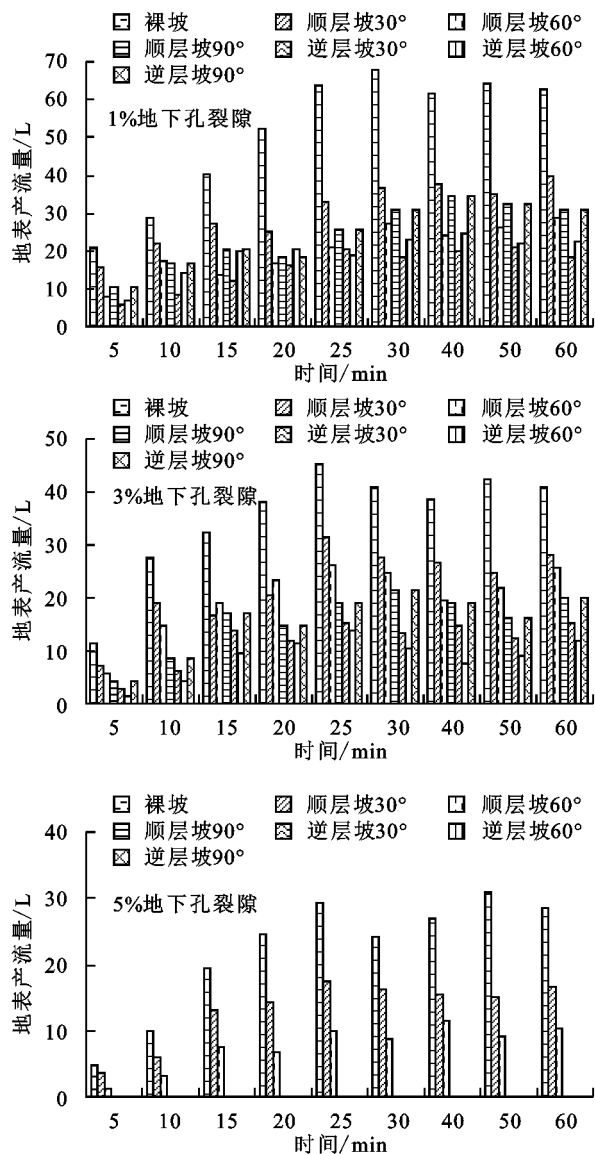
图 4 不同降雨强度下的地表地下产流量随岩层倾角的变化过程

2.4 地表地下产流影响因素分析

降雨是产流的主要原因,而喀斯特槽谷区的径流主要通过地表径流和地下径流流失,影响地表地下产

流的因素有降雨强度、地形地貌、地下孔裂隙、岩石倾角等因素。由表 1 可知,顺层坡条件下,地表产流与降雨强度、地下产流与地下孔裂隙度呈极显著正相关

关系,地下产流与岩层倾角呈显著正相关关系,地表产流与地下孔裂隙度和岩层倾角呈极显著负相关关系,地下产流与降雨强度呈极显著负相关关系,因此降雨强度对顺层坡地表地下产流的影响程度最大。逆层坡条件下,地表地下产流均与降雨强度呈极显著正相关关系,地表产流与地下孔裂隙度以及岩层倾角呈极显著负相关关系,因此降雨强度对逆层坡地表地下产流的影响程度最大。

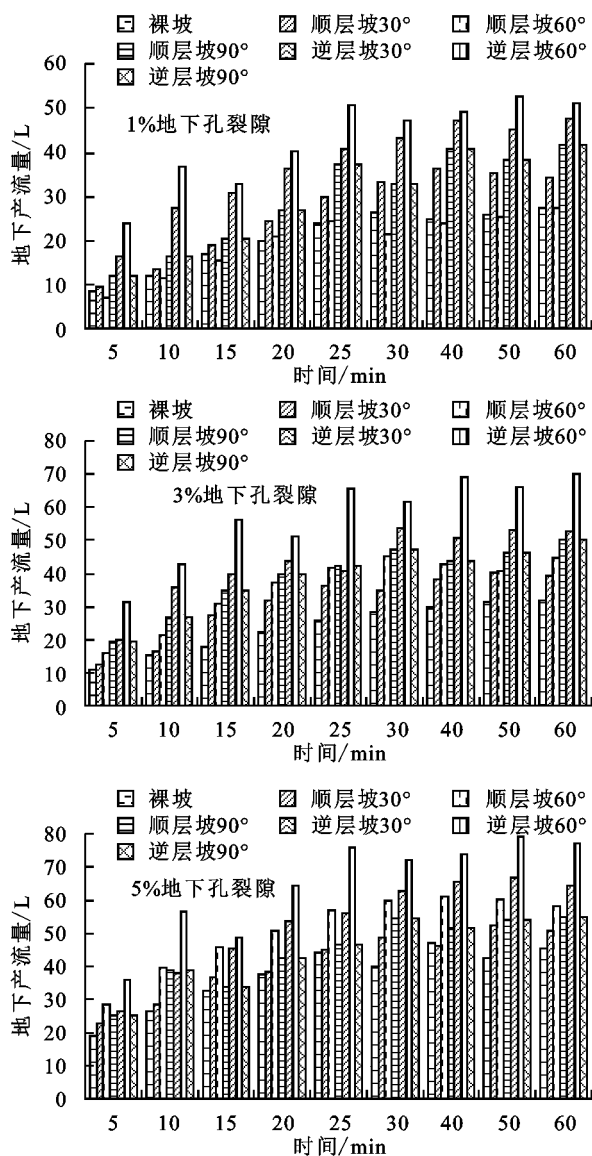


注:降雨历时 60 min,降雨强度为 60 mm/h。

图 5 不同地下孔裂隙度下产流量随岩层倾角变化过程
表 1 喀斯特槽谷区地表地下产流影响因子之间的相关性

坡形	指标	地表产流	地下产流
顺层坡	降雨强度	0.927**	-0.793**
	地下孔裂隙度	-0.678**	0.572**
	岩层倾角	-0.593**	0.297*
逆层坡	降雨强度	0.862**	0.939**
	地下孔裂隙度	-0.516**	0.809**
	岩层倾角	-0.663**	-0.318*

注: * 表示在 0.05 的水平上显著相关; ** 表示在 0.01 的水平上极显著相关。



注:降雨历时 60 min,降雨强度为 60 mm/h。

图 6 不同地下孔裂隙度下的地下产流量
随岩层倾角变化过程

3 讨论

降雨为喀斯特槽谷区输入了大量水分,这也是坡面产生径流的主要原因,而降雨强度则对地表地下产流产生重要影响。喀斯特槽谷区碳酸盐岩在水的化学侵蚀作用下形成了地上地下双层空间结构^[22],在降雨过程中雨水除了通过地表径流流失,还会经地下裂隙进入地下发生地下漏失。袁应飞等^[23]研究表明,降雨强度在 15, 30 mm/h 时无地表径流,雨强为 50 mm/h 时有地表径流,本研究在 30 mm/h 雨强下即产生地表径流,且产流量随着降雨强度增大而增大。雨强较小时,土壤入渗大于雨强,使得地表产流较少甚至无产流,雨水大部分沿地下裂隙进入到地下,此时地表产流小于地下产流;当雨强较大时,土壤能在较短时间内达到饱和,此时逐步转变为地表地下并重并且地表产流略高于地下产流,这与李昌兰

等^[24]研究结果一致。逆层坡条件下,地下产流量均高于地表径流量,说明逆层坡能够在降雨时增加雨水入渗,因此地下产流量分配比例较大。

地下孔裂隙的发育程度对喀斯特槽谷区的地表地下产流产生影响。李昌兰等^[24]研究表明,产流量随地下孔裂隙度的增大而增大,这是由于喀斯特槽谷区在水的化学溶蚀作用下形成了地下裂隙、溶洞、落水洞等^[25],这为地表径流进入地下提供了便道。本研究发现,喀斯特槽谷区在地下孔裂隙度为2%~3%时地表地下产流量分配比例发生转变,地下孔裂隙度在1%~2%时产流以地表径流为主,地下孔裂隙度在4%~5%时产流以地下径流为主。除了地上地下双层空间结构,喀斯特槽谷区还存在顺/逆倾向的典型构造,这在一定程度上影响了地表地下产流量的分配比例。本研究表明,顺层坡以地表产流为主,这是由于顺层坡的岩层倾向与径流流动方向一致,这有利于地表径流汇集,而岩层倾角越大,裸露的岩石对地表径流的阻挡作用越明显,截留的雨水渗入地下,使得地表产流及分配比例减小,地下产流及分配比例增加。逆层坡则由于岩层倾向与径流流动方向相反,这有利于阻拦水流前进并使雨水大量渗入地下,因此逆层坡主要以地下产流为主。分析其原因,这与地表裸露岩层的面积有关,岩层倾角越大,则地表裸露岩层面积越小,地表不透水的面积减小,这增加了水流阻力,同时在岩层与土壤之间存在接触面,这有利于地表水入渗,增加地下产流量,这说明岩石接触面是影响地表地下产流及分配比例的因素。

本研究在模拟喀斯特槽谷区顺/逆层坡以及地上地下双层结构的基础上,通过模拟降雨试验研究喀斯特槽谷区地表地下产流特征。由于野外喀斯特槽谷区环境较为复杂,孔裂隙构造及顺/逆层坡的岩层倾角变化较大,通过室内模拟试验来进行研究存在一定的局限性,不能完全模拟野外环境,因此本试验的研究结果与野外实际情况存在一定的差异。因此,今后的研究将加强野外径流流失的监测,开展野外监测的校验研究。

4 结论

(1)降雨强度越大,喀斯特槽谷区地表地下地上地下产流量越大。小雨强(30 mm/h)条件下地下产流量大于地表产流量;中雨强(60 mm/h)和大雨强(90 mm/h)条件下裸坡产流表现为地表地下并重但地表产流量总体上大于地下产流量,顺层坡和逆层坡则表现为地表产流量小于地下产流量。

(2)地下孔裂隙度越大,则地下产流量的分配比例也增大,其中2%地下孔裂隙度是顺层坡地下产流大于地表产流的临界值,>3%地下孔裂隙度时逆层

坡没有地表产流。

(3)顺层坡条件下,岩层倾角越大,地表产流量及分配比例表现为先增大后减小,地下产流量及分配比例表现为增大;逆层坡条件下,岩层倾角为90°时地表产流量最大,60°时地表产流最小,地下产流则在岩层倾角60°时最大,在90°时最小。

(4)顺层坡条件下,各因子中降雨强度对地表地下产流量的影响程度最大,其次是地下孔裂隙度。逆层坡条件下,各因子中降雨强度对地表产流量的影响程度最大,其次是岩层倾角;影响地下产流量的因子中降雨强度对其影响程度最高,其次是地下孔裂隙度。

参考文献:

- [1] 蒋忠诚,曹建华,杨德生,等.西南岩溶石漠化区水土流失现状与综合防治对策[J].中国水土保持科学,2008,6(1):37-42.
- [2] Giroto E, Ceretta C A, dos Santos D R, et al. Forms of losses of copper and phosphorus in water of runoff and percolation in soil with successive pig slurry application[J].Ciência Rural,2010,40(9):1948-1954.
- [3] 陈洪松,王克林.西南喀斯特山区土壤水分研究[J].农业现代化研究,2008,29(6):734-738.
- [4] 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.
- [5] 贾金田,付智勇,陈洪松,等.喀斯特坡地基岩起伏对土壤剖面水分格局的影响[J].应用生态学报,2016,27(6):1708-1714.
- [6] 王蓉蓉,袁奇,袁鑫.含水量对顺层坡风化界面剪切特性试验研究[J].科学技术与工程,2016,16(20):243-246.
- [7] Fábio C N, Romain D, Fritz S, et al. Bedrock bedding, landsliding and erosional budgets in the Central European Alps[J].Terra Nova,2015,27(5):370-378.
- [8] Norton K P, Von Blanckenburg F, Dibiase R, et al. Cosmogenic ¹⁰Be-derived denudation rates of the Eastern and Southern European Alps[J]. International Journal of Earth Science, 2011,100:1163-1179.
- [9] 刘品,袁奇,曹集仕,等.不同含水量顺层坡风化界面剩余下滑力研究及工程防护意义[J].科学技术与工程,2017,17(9):286-290.
- [10] 唐菡,湛芸,刘泉宏,等.喀斯特坡地拉巴豆地埂篱根及根-土复合体力学特性[J].生态学报,2019,39(16):6114-6125.
- [11] 胡奕,戴全厚,王佩将.喀斯特坡耕地产流特征及影响因素[J].水土保持学报,2012,26(6):45-51.
- [12] 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.
- [13] 刘前进.棕壤横垄土壤侵蚀特征及其影响因素[D].武汉:华中农业大学,2014.

他 3 种布设方式的累计产沙量是坡下条状布设方式的 2~24 倍。

(3) 坡下布设方式在抑制细沟侵蚀发育上优于坡上布设方式, 坡下条状布设方式可以有效控制产生细沟的数量以及沟长, 护坡效益最优。

参考文献:

- [1] 李海燕. 土壤侵蚀危害及其防治措施研究现状[J]. 宁夏农林科技, 2011, 52(1): 71-72.
- [2] 孙路遥. 植被护坡技术及其应用研究[J]. 路基工程, 2012(4): 189-191.
- [3] 吴迪. 不同植被措施下坡耕地产沙规律研究[J]. 水利技术监督, 2018, 24(3): 112-114, 133.
- [4] 赵清贺, 冀晓玉, 徐珊珊, 等. 河岸植被对坡面径流侵蚀产沙的阻控效果[J]. 农业工程学报, 2018, 34(13): 170-178.
- [5] 马璠. 作物植被对坡耕地土壤侵蚀的影响研究[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2009.
- [6] 甘卓亭, 叶佳, 周旗, 等. 模拟降雨下草地植被调控坡面土壤侵蚀过程[J]. 生态学报, 2010, 28(9): 155-164.
- [7] 高军, 尤迎华, 谈晓珊, 等. 植被过滤带阻控径流污染的机制及研究进展[J]. 环境科学与技术, 2019, 42(9): 91-97.
- [8] Zhang X C, Shao M A, Huang Z B, et al. An experimental research on soil erosion and nitrogen loss under different vegetation cover [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2000, 20(6): 1038-1044.
- [9] 李勉, 姚文艺, 陈江南, 等. 草被覆盖对坡面流流速影响的人工模拟试验研究[J]. 农业工程学报, 2005, 21(12): 43-47.

(上接第 75 页)

- [14] Williams P W. The role of the epikarst in karst and cave hydrogeology: A review[J]. *International Journal of Speleology*, 2008, 37(1): 1-10.
- [15] 杨宇琼, 戴全厚, 李昌兰, 等. 模拟降雨条件下喀斯特坡耕地氮磷元素地下漏失特征[J]. 中国水土保持科学, 2018, 16(3): 59-67
- [16] 高建平, 吴桂武, 黄震, 等. 浅析黔东南地区岩溶地下水水化学特征[J]. 地下水, 2015, 37(6): 22-24.
- [17] Dai Q H, Liu Z, Shao H, et al. Karst bare slope soil erosion and soil quality: A simulation case study[J]. *Solid Earth*, 2015, 6(3): 985-995.
- [18] 唐益群, 张晓晖, 周洁, 等. 喀斯特石漠化地区土壤地下漏失的机理研究[J]. 中国岩溶, 2010, 29(2): 121-127.
- [19] 孙钰霞, 李林立, 魏世强. 喀斯特槽谷区表层喀斯特水化学的暴雨动态特征[J]. 山地学报, 2012, 30(5): 513-520.
- [20] 王恒松, 熊康宁, 张芳美. 地形因子对喀斯特坡面水土

- [10] 苏远逸, 李鹏, 李占斌, 等. 坡面植被格局对坡沟系统能量调控及水沙响应关系的影响[J]. 水土保持学报, 2017, 31(5): 32-39.
- [11] 曹梓豪, 赵清贺, 丁圣彦, 等. 坡度和植被盖度对河岸坡面侵蚀产沙特征的影响[J]. 自然资源学报, 2017, 32(11): 1892-1904.
- [12] Ding W, Li M. Effects of grass coverage and distribution patterns on erosion and overland flow hydraulic characteristics[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2016, 75(6): 1-14.
- [13] 林佳, 宋戈, 张莹. 耕地植被人为干扰格局动态变化特征及其尺度效应[J]. 农业工程学报, 2019, 35(9): 275-284.
- [14] 张霞, 李鹏, 李占斌, 等. 不同植被格局下凸型坡径流流速时空变化及产沙研究[J]. 水土保持学报, 2018, 32(6): 16-21.
- [15] 赵清贺, 冀晓玉, 徐珊珊, 等. 河岸植被对坡面径流侵蚀产沙的阻控效果[J]. 农业工程学报, 2018, 34(13): 170-178.
- [16] 朱高立, 黄炎和, 林金石, 等. 不同覆盖度和雨强条件下崩积体坡面侵蚀的动力学特征[J]. 水土保持学报, 2016, 40(2): 1-7.
- [17] 孙丽丽, 查轩, 黄少燕, 等. 不同降雨强度对紫色土坡面侵蚀过程的影响[J]. 水土保持学报, 2018, 32(5): 21-26.
- [18] 陈佩岩, 马岚, 薛孟君, 等. 华北土石山区不同粒径土壤团聚体特征及其与坡面侵蚀定量关系[J]. 北京林业大学学报, 2018, 40(8): 64-71.
- [19] 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[J]. 水科学进展, 2014, 25(2): 189-195.

- 流失影响的机理研究[J]. 水土保持通报, 2015, 35(4): 1-7.
- [21] 严友进, 戴全厚, 伏文兵, 等. 喀斯特坡地裸露心土层产流产沙模拟研究[J]. 土壤学报, 2017, 54(3): 545-557.
- [22] 彭旭东, 戴全厚, 杨智. 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.
- [23] 袁应飞, 戴全厚, 李昌兰, 等. 喀斯特典型坡耕地模拟降雨条件下的土壤侵蚀响应[J]. 水土保持学报, 2016, 30(3): 24-28.
- [24] 李昌兰, 戴全厚, 彭旭东, 等. 喀斯特裸坡地地下孔(裂隙)流养分流失特征研究[J]. 水土保持学报, 2016, 30(3): 19-23, 114.
- [25] Zhang X B, Bai X Y, He X B. Soil creeping in the weathering crust of carbonate rocks and underground soil losses in the karst mountain areas of southwest China[J]. *Carbonates and Evaporites*, 2011, 26(2): 149-153.