

# 紫色土丘陵区新改土坡面产流产沙及水动力学参数特征

左烽林, 钟守琴, 冉卓灵, 魏朝富

(西南大学资源环境学院, 重庆 400715)

**摘要:** 新改土是刚经过农地整理工程改造工序且处于土体非稳定期的土体, 其土壤结构松散, 在降雨径流作用下易发生水土流失, 研究新改土的产流产沙和水动力学参数特征具有重要意义。通过野外放水冲刷试验, 研究了紫色土丘陵区新改土坡面( $10^\circ$ )在不同上方来水流量(5, 15, 30 L/min)及不同坡长(5, 10, 20, 30, 40, 50 m)条件下的产流产沙和水动力学参数特征。结果表明: (1) 坡面产流率随着放水冲刷过程的变化趋势为波动增长期—稳定发展期, 产沙率变化趋势为波峰波谷变化—逐渐减小—稳定发展, 均在30~50 min后达到稳定; 平均产流率变化范围为0.36~20.46 L/min, 平均产沙率变化范围为1.11~239.09 g/min; 累积产沙量与累积产流量呈极显著的线性正相关关系( $p < 0.01$ )。 (2) 径流稳定时呈层状缓流; 径流剪切力和径流功率变化范围分别为8.36~28.36 Pa和1.42~5.10 N/(m·s), 与上方来水流量分别呈二次曲线函数关系和线性方程函数关系; 径流功率是描述新改土坡面侵蚀产沙的最佳水动力学参数, 二者呈二次曲线函数关系。因此, 上方来水流量和坡长均为紫色土丘陵区新改土坡面侵蚀的影响因素; 产流产沙和水动力学参数与上方来水流量主要呈正相关性( $R^2$ 为0.662~0.999), 20, 30 m坡长是影响新改土 $10^\circ$ 坡面侵蚀的临界坡长。研究结果可为新改土坡耕地水土流失监测、预报和水土保持措施布置提供了理论依据。

**关键词:** 产流产沙; 水动力学参数; 新改土; 丘陵区; 紫色土

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2018)01-0059-08

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2018.01.010

## Characteristics of Sediment and Hydrodynamic Parameters of New Reconstructed Slope Soil in the Hill Area with Purple Soils

ZUO Fenglin, ZHONG Shouqin, RAN Zhuoling, WEI Chaofu

(College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715)

**Abstract:** New reconstruction soil is in an unstable state, and just is the reconstruction of farming plots. In this paper, a field scouring experiment, designed as three scouring inflow rates (5, 15 and 30 L/min) and six different field widths (5, 10, 20, 30, 40, 50 m), was conducted in farming reconstruction soil in hilly-mountainous region of Chongqing, in order to explore the characteristics of runoff and sediment and hydrodynamic parameters. The results showed: (1) During the scouring process, the trend of runoff rate was the fluctuated increasing period-stable development period. The trend of sediment yield rate was the fluctuated period-decrease-stable development period. (2) Hydrodynamic parameters, the mean rate values under the stable condition, and cumulative runoff and sediment yield increased with increasing scouring inflow rate. The effect of runoff and sediment yield and hydrodynamic parameters were different under different scouring inflow rates with different field width. The runoff and sediment yield fluctuated with the increase of field width. Under the scouring inflow rates of 30 and 15 L/min, the fluctuation was relatively large, and under the small scouring inflow rate (5 L/min), which was relatively slow. (3) The cumulative sediment yield increased with the increasing cumulative runoff yield, and there was a significant linear relationship between them ( $p < 0.01$ ). The sediment yield was affected by all hydrodynamic parameters, of which runoff power was the most important. The scouring inflow rate was positively related to the runoff and sediment yield and hydrodynamic parameters. The influence of field width was more complex, and the field width range of 20

收稿日期: 2017-07-22

资助项目: 国家重点研发计划项目“构建源头削减—生物隔离—湿地消纳相结合的高效生态拦截技术体系”(2017YFD0800505)

第一作者: 左烽林(1991—), 女, 硕士研究生, 主要从事土壤水分与水资源开发利用研究。E-mail: 541747690@qq.com

通信作者: 魏朝富(1962—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事土壤物理与工程、土地利用工程研究。E-mail: weicf@swu.edu.cn

and 30 m is the critical of new reconstructed soil erosion at slope  $10^\circ$ . In conclusion, the scouring inflow rate and slope width are both the driving forces of the new reconstructed soil erosion under farming plots reconstruction in hilly-mountainous region.

**Keywords:** runoff and sediment; hydrodynamic parameters; new reconstructed soil; hill area; purple soil

紫色土丘陵区地块破碎度高、地形坡度大,为实现耕地可持续利用和推动农业现代化发展进行了大量的农地整理工程,这种刚经过农地整理工程改造工序且处于土体非稳定期的土体定义为“新改土”<sup>[1]</sup>。农地整理工程的核心是对耕作田块进行改造修筑,耕作田块修筑是通过坡改梯等工程措施减缓原坡耕地坡度,从而有效控制其水土流失。但其效果需要一定年限才可实现,一方面在工程改造过程中,大量的土方开挖、运输及回填使土质变得疏松,容易造成坡地面蚀和风蚀<sup>[2]</sup>;另一方面,刚改造后的土体还处在非稳定期,砾石含量高、物理性质恶化、土壤结构松散<sup>[2]</sup>,不具备稳定梯田的水土保持功能。而该区域修建像平原地区类似的大型水平梯田田块的难度大,故坡式梯田是该区域最常见的一种耕作田块修筑形式。另外,西南丘陵区是以水力为主的侵蚀类型区<sup>[3]</sup>,区域内的紫色土具有土层浅薄、孔隙度大、下渗及抗蚀性差等特点<sup>[4]</sup>。加之地处亚热带湿润气候区,雨量丰富,降雨集中,暴雨频繁等原因,致使紫色土坡耕地水土流失十分严重<sup>[5]</sup>。与自然坡面相比,坡耕地由于受到人类活动等因素的影响,其水土流失过程也变得更加复杂<sup>[6]</sup>。因此,对新改土水土流失特征的研究具有重要的意义。

目前,对紫色土丘陵区不同坡地的水土流失特征已经进行了大量研究<sup>[7-14]</sup>,如自然坡面、耕地坡面、农地坡面、堆积体坡面等。研究方向主要集中在土壤类型、坡长、坡度、雨强、土石比和耕作方式等要素对地表侵蚀的影响。另外,对堆积体坡面侵蚀特征的研究多针对于随机无规律堆放和裸露地貌形成的堆积体,如弃土弃渣、自然灾害和公路与大坝边坡等<sup>[15-17]</sup>,而新改土坡面是经过一定改造工序后形成的,具有独特的立体形态。同时,堆积体侵蚀的研究方法以室内土槽模拟研究为主。

综上,当前缺乏对农地整理工程改造后处于非稳定期新改土侵蚀特征的研究。因此,本文以新改土为研究对象,采用野外实地放水冲刷试验,模拟其坡面径流对坡面的冲刷过程,进而分析在不同上方来水流量和坡长条件下紫色土丘陵区新改土的产流产沙规律和水动力学参数特征,拟为农地整理工程后非稳定期的新改土坡耕地水土流失监测、预报和水土保持措施布置提供了理论依据。

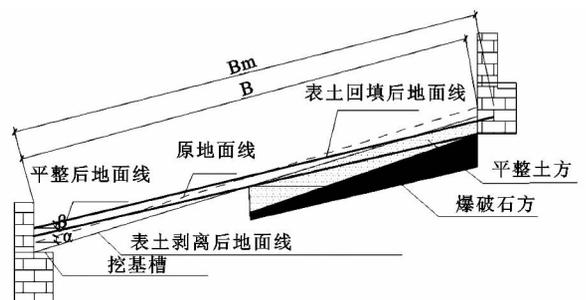
## 1 材料与方法

### 1.1 试验区概况

重庆市位于中国内陆西南部、长江上游地区,地貌以丘陵、山地为主,其中山地占 76%。本次研究的试验点位于重庆市北碚区西南大学国家紫色土监测基地 ( $106^\circ 26' E, 30^\circ 26' N$ ),海拔 230 m,处于“川东平行岭谷区”北碚向斜。该基地属亚热带湿润季风气候,年平均降雨量 1 105 mm,70%集中于 5—9 月,年平均气温  $18.3^\circ C$ ,年日照时数 1 277 h,无霜期年均约 334 d。土壤为侏罗系沙溪庙组母质发育的紫色土。

### 1.2 试验设计

根据《重庆市土地开发整理工程建设标准(试行)》<sup>[18]</sup>中的规定,坡耕地的降坡应遵循以下原则:原田面坡度  $15^\circ$  以上的坡耕地改造后坡度应  $\leq 10^\circ$ ,  $10^\circ \sim 15^\circ$  的原坡耕地改造后坡度应  $\leq 5^\circ$ ,而原坡耕地  $< 10^\circ$  的改造后尽量修建为水平梯田。由于田面坡度越陡,耕作田块修筑的难度越大,因而,本研究选取设计坡度的最大值  $10^\circ$  为基准,布设试验小区坡度为  $10^\circ$ 。在试验点选取一个田面坡度为  $20^\circ$  左右的地块,土地利用类型为农用地,对其进行工程改土,将田面坡度降为  $10^\circ$ ,并根据试验点实际表土层厚度确定表土层剥离厚度为 20 cm。本次研究的旱地采用坡改梯技术,先将原坡耕地 20 cm 厚表土层剥离,再将坡地土方移动、挖高填低,坡式梯田的改土横断面如图 1 所示。



注:  $B_m$  为田面长(m);  $B$  为坡长(m);  $\alpha$  为原台面坡度( $^\circ$ );  $\beta$  为设计田面坡度( $^\circ$ )。

图 1 坡式梯田的改土横断面示意

试验小区共设置为 6 个,小区设计为长方形,坡长(即耕作田块宽度)有 5, 10, 20, 30, 40, 50 m,宽度为 2 m。各小区间以 0.2 m 宽的水泥田埂隔开,小区底面为自然土壤母质,水泥田埂修建在母质层上,水泥田埂高 0.6 m。在小区末端横向水泥田埂处的集流槽中部修建一个 PVC 出水口。各小区均不施肥,不种植作物,在进行放水试验前,把试验小区表土翻

松约 15 cm(相当于农耕地耕作深度),表面耙平,与一般农耕地的翻耕情况相同。试验小区如图 2 所示。



图 2 试验小区

### 1.3 试验方法

试验自制放水装置,利用蓄水桶供水,采用溢流槽、阀门和流量计提供稳定上方来水流量。在无降雨影响的放水试验中,上方来水流量反映了对坡面土体的供水强度。根据该区暴雨发生频率在试验小区产生的单宽流量和当地地形条件,并考虑到地面径流经过汇集后可能出现的最大径流量来确定设计流量大小,设计为 5,15,30 L/min 小中大 3 个流量级。在小区上端放置溢流槽,溢流端与地面等高并且保持水平,使水流通过溢流槽的缓冲,以均匀地薄层水流形式向小区供水。溢流端铺数层纱布,防止水流过度侵蚀。为避免地表粗糙度和土壤初始含水率对试验结果的影响,本研究在下一放水试验前都要将试验小区耙平,并搁置约一周。放水试验前,通过人工洒水的方式使坡面土壤产流后静置 18~24 h,同时测定各小区放水前上、中、下 3 个坡位 0~20 cm 土层的土壤容重、初始含水率及机械组成等物理性质。土壤容重为 1.29~1.68 g/cm<sup>3</sup>,均值 1.54 g/cm<sup>3</sup>,变异系数为 5.76%。土壤初始含水率为 10.57%~24.71%,均值 18.74%,变异系数为 13.84%。小区土壤机械组成 <0.002,0.002~0.02,0.02~0.05,0.05~0.1,0.1~0.25,0.25~0.5,0.5~1,1~2 mm 的平均含量分别为 27.39%,26.62%,10.42%,14.82%,9.48%,7.48%,2.33%,1.46%。每组试验重复 2 次,每次放水冲刷试验前用贴有容量尺的径流桶调试校核上方来水流量,校核误差均控制在 5%之内。各次试验视情况持续时间为 50 min 以上(使径流达到稳定),最高为 80 min(坡长为 40,50 m 的径流小区在 5 L/min 的小流量下没有产流产沙发生)。放水冲刷试验装置示意如图 3 所示。放水试验开始后,在集

流槽下面放置径流桶收集地表径流量,并使用 550 mL 的采集瓶收集泥沙样品。记录放水开始时间和产流开始时间。产流后,前 10 min 每 1 min 收集径流泥沙样 1 次,10 min 后每 3 min 收集径流泥沙样 1 次,用于径流量和泥沙量分析。放水停止后继续接地表径流,直至产流结束为止,泥沙量采用烘干法计算。待产流稳定后使用染色法测定坡面径流流速,多次测定求其平均,实测流速乘以修正系数 0.75,作为水流断面平均流速<sup>[19]</sup>。各小区观测间距均为 1 m,用注射器注射高锰酸钾溶液,当溶液碰到径流表面时,用精确到 0.01 s 的秒表开始计时,观测断面被染料触碰停止计时,得到观测间距内表面流速( $V_s$ ),最后计算求得整个坡面的表面流速。直尺测量法量取断面水深和水面宽。

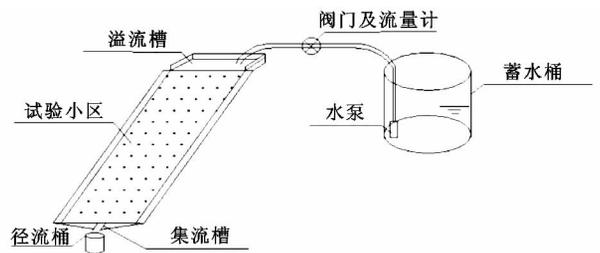


图 3 放水冲刷试验装置示意

### 1.4 计算方法

产流率即单位时间内所产生的径流量,计算公式为:

$$R_t = \frac{Q_t}{t} \quad (1)$$

式中: $R_t$  为产流率(L/min); $Q_t$  为各时段所产生的径流体积量(L); $t$  为产流历时(min)。

产沙率即单位时间内因侵蚀产生的泥沙量,计算公式为:

$$R_s = \frac{Q_s}{t} \quad (2)$$

式中: $R_s$  为产沙率(g/min); $Q_s$  为各时段所收集的泥沙的总干质量(g)。

雷诺数( $Re$ )判断坡面水流型态, $Re < 500$  为层流, $500 \leq Re < 2000$  为过渡流, $Re > 2000$  为紊流;计算公式<sup>[20]</sup>为:

$$Re = \frac{vh}{\eta} \quad (3)$$

式中: $v$  为断面平均速度(m/s); $h$  为断面平均水深(m); $\eta$  为运动黏滞系数(m<sup>2</sup>/s)。

弗劳德数( $Fr$ )判定坡面流流态, $Fr > 1$  时,水流为急流; $Fr < 1$  时,水流为缓流; $Fr = 1$  时,为临界流;计算公式<sup>[20]</sup>为:

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{gh}} \quad (4)$$

式中: $g$  为重力加速度(9.8 m/s<sup>2</sup>)。

Darcy-Weisbach 阻力系数( $f$ )表征径流流动时

沿程所受阻力大小的参数,计算公式<sup>[20]</sup>为:

$$f = \frac{8ghJ}{v^2} \quad (5)$$

式中: $J$ 为水力坡度(m/m),本次研究用坡度的正弦值近似代替, $\tan 10^\circ = 0.1736$ 。

径流剪切力( $\tau$ )表示坡面径流在流动过程中,沿坡面梯度方向产生的一种作用力,引起土壤颗粒分离并输移泥沙的径流冲刷动力,计算公式<sup>[21]</sup>为:

$$\tau = \rho_w ghJ \quad (6)$$

式中: $\tau$ 为水流剪切力(Pa); $\rho_w$ 为浑水密度( $\text{g}/\text{m}^3$ ),由含沙量进行单位换算取得。

径流功率( $P$ )表征作用于单位面积的水流所消耗的功率,反映水流流动时的挟沙能力的参数,计算公式<sup>[16]</sup>为:

$$P = \tau v \quad (7)$$

式中: $P$ 为水流功率( $\text{N}/(\text{m} \cdot \text{s})$ )。

## 2 结果与分析

### 2.1 新改土坡面的产流产沙特征

2.1.1 新改土坡面的产流产沙随冲刷时间的变化规律 由图 4 可知,坡长为 40,50 m 的径流小区在 5 L/min 的小流量下于设置产流历时内没有产流产沙发生,可能的原因是径流路径增大后,入渗面积增大。产流率随时间的变化趋势为先波动增长后趋于稳定,

产沙过程为先波峰波谷变化后逐渐减小达到稳定,均随上方来水流量的增加而增加,且波动幅度随着上方来水流量的增大而增大。30,15,5 L/min 放水条件下产流率范围分别为 0.09~22.17,0.25~5.63,0~2.35 L/min,产沙率范围分别为 1.67~616.18,0.3~349.85,0~31.61 g/min,与上方来水流量呈正相关,与多数学者研究结果一致<sup>[22-24]</sup>。各小区径流产生后的 10~13 min 产流率均波动增加,15 L/min 条件下波动最剧烈,但 30 L/min 条件下增幅最大;50 min 后各小区产流率逐渐稳定。产流率随时间的变化趋势与李学增等<sup>[25]</sup>对崩岗崩积体研究一致,这是由于放水冲刷前期新改土坡面土壤水分含量低,下垫面土壤松散,入渗量大,所以前期产流变化不稳定。各坡面水分入渗一段时间后,产流率基本稳定,土体水分入渗进入稳渗阶段。产沙率在产流后 30 min 内变化十分剧烈,是产沙高峰期,30~50 min 产沙率逐渐减小,50 min 后达到稳定。这与弃土弃渣和自然灾害形成的堆积体的变化趋势一致<sup>[15-16]</sup>,在坡面冲刷初期存在大量松散物质,土壤侵蚀量变化大;随着坡面产沙过程的进行,松散颗粒含量下降,跌坑在沟槽部位出现,加之地表土壤物理结皮的形成,产沙率波动降低<sup>[26]</sup>;随着坡面细沟发育逐渐趋于稳定和跌坑联通之后径流连通过程的增加,产沙率开始趋于稳定。

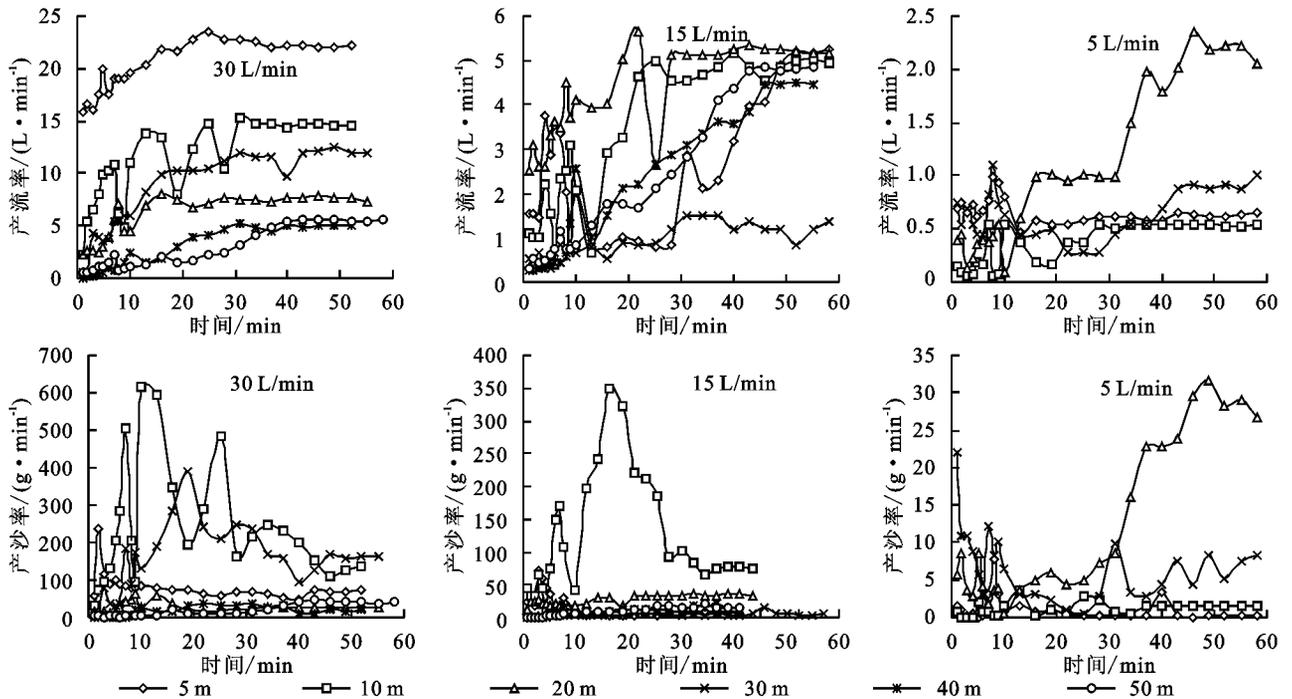


图 4 不同坡长的新改土在不同上方来水流量下产流率和产沙率随时间的变化

### 2.1.2 新改土坡面产流产沙的平均与累积变化特征

由图 5 可知,累积产流和产沙量随时间呈线性增长,也与上方来水流量呈正相关性,且均在 20,30 m 坡长出现变化临界值。由表 1 可知,平均产流产沙率与上方来水流量呈正相关性,平均产流产沙率最大分别为

20.46 L/min(5 m,30 L/min)和 239.09 g/min(10 m,30 L/min),最小分别为 0.36 L/min(10 m,5 L/min)和 1.11 g/min(5 m,5 L/min)。从偏相关系数来看,在控制坡长条件下平均产流率与上方来水流量呈极显著性正相关( $r=0.746, p<0.01$ ),控制上方来水流量条件下与坡

长呈显著性负相关( $r = -0.544, p < 0.05$ );同样,上方来水流量和坡长与平均产沙率的偏相关性分别为  $r = 0.585, p < 0.05$  和  $r = 0.561, p < 0.05$ 。说明上方来水流量和坡长与平均产流产沙率均呈现一定相关性,故上方来水流量和坡长可以作为反映新改土侵蚀特征中径流泥沙量变化的指标之一,且径流泥沙随上方来水流量的变化的程度明显高于坡长。平均产沙率与平均产流率的变化规律相似,主要由于水大沙大的规律。由图 5 可知,累积产流量和累积产沙量均呈线性增长趋势( $R^2 > 0.93$  和  $R^2 > 0.91$ ),在 5, 15 L/min 放水条件下,20 m 坡长新改土坡面累积产流量最大,

30 m 坡长的新改土观测到“径流退化”现象。这一结果与一些学者的研究结果类似,符合随坡长的增加,产流率反而减小的描述<sup>[1,27]</sup>。其可能的原因是 30 m 坡长新改土为径流连续性变化的转折点,坡面汇水面积扩大,径流汇集路径增加,产流具有不连续性,即导致坡面平均产流率降低,同时水流在冲刷土壤表面所形成的细沟沟壁两侧不断崩塌进而阻塞水流,导致入渗量增大,产流减少<sup>[16]</sup>。这与其他学者<sup>[28]</sup>从农业生产角度考虑的较优坡长范围较为一致。然而当坡长减小到 20 m 后,坡面径流连续性转好,坡面放水量大于入渗量,产流增加。

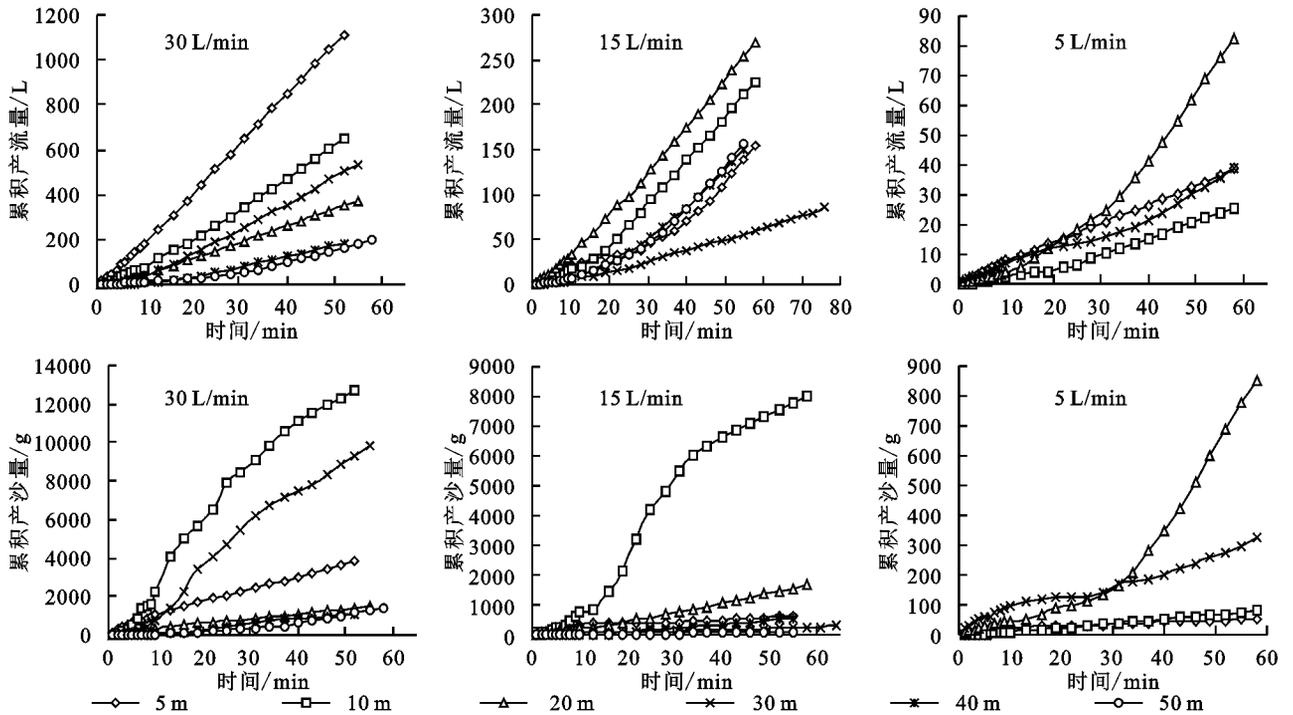


图 5 不同坡长的新改土在不同上方来水流量下累积产流和产沙量变化

表 1 不同坡长和上方来水流量对新改土平均产流率和平均产沙率影响

指标	上方来水流量/ (L · min <sup>-1</sup> )	坡长/m					
		5	10	20	30	40	50
平均产流率	30	20.46 ± 2.37	11.07 ± 3.89	5.99 ± 2.06	8.21 ± 3.85	2.77 ± 2.01	2.78 ± 1.95
	15	2.58 ± 1.54	3.33 ± 1.66	4.30 ± 1.04	1.02 ± 0.42	2.18 ± 1.58	2.25 ± 1.70
	5	0.66 ± 0.11	0.36 ± 0.20	1.09 ± 0.77	0.64 ± 0.23		
平均产沙率	30	81.44 ± 36.48	239.09 ± 160.98	26.98 ± 13.45	151.37 ± 92.07	16.96 ± 12.58	18.50 ± 16.30
	15	16.78 ± 18.76	121.21 ± 89.90	26.54 ± 7.08	4.05 ± 2.52	8.17 ± 5.88	8.63 ± 6.51
	5	1.11 ± 1.69	1.17 ± 0.89	12.05 ± 10.62	6.67 ± 4.54		

注:平均产沙率单位为 g/min;平均产流率单位为 L/min;表中数据为平均值 ± 标准误差。下同。

2.1.3 新改土坡面产沙与产流关系分析 对新改土坡面的累积产沙量和累积产流量进行回归分析,建立了不同坡长的新改土在不同上方来水流量下累积产沙量的经验方程。由表 2 可知,各新改土坡面的累积产沙量和累积产流量呈极显著的线性关系(Sig. < 0.01),关系为:  $U = b + aQ$ , 式中:  $a$  为径流(产沙)系数,  $Q$  为累积产流量,  $U$  为累积产沙量<sup>[17]</sup>。除 30 L/min 时 5 m 坡面和 15 L/min 时 50 m 坡面  $R^2$  值分别为 0.734 和

0.662, 其他均为 0.92 以上。出现这种结果的原因可能是输沙能力和坡面径流系数随产流量增大而增强,土壤侵蚀程度加剧,进而加强径流搬运土壤大颗粒的能力,因此随累积产流量的增大,累积产沙量明显变大<sup>[29]</sup>。这与刘泉等<sup>[30]</sup>对自然坡地所得结果关系不同而与滑坡和高速公路工程堆积体陡坡<sup>[15,17]</sup>结果一致,说明丘陵区新改土坡面与自然坡地的侵蚀规律有所区别,具有普遍工程堆积体的产沙与产流关系特

征。这是因为新改土坡面经过人为扰动重新回填,土层结构被破坏,土质疏松,泥沙极易流失,所以与自然稳定土体相比,产沙率较高。

表 2 不同坡长的新改土在不同上方来水流量下  
累积产流产沙量的经验方程

上方来水流量/ (L·min <sup>-1</sup> )	坡长/ m	经验方程	R <sup>2</sup>	F	Sig.
30	5	$U=362.086+3.17Q$	0.989	2133.922	0.000
	10	$U=681.492+21.508Q$	0.955	485.366	0.000
	20	$U=95.793+3.839Q$	0.978	1034.178	0.000
	30	$U=267.593+19.493Q$	0.976	969.698	0.000
	40	$U=40.393+6.314Q$	0.973	829.396	0.000
15	5	$U=149.419+4.978Q$	0.734	70.004	0.000
	10	$U=408.469+39.904Q$	0.938	377.712	0.000
	20	$U=-3.289+6.078Q$	0.999	17308.812	0.000
	30	$U=-3.838+3.974Q$	0.996	8050.514	0.000
	40	$U=6.367+3.759Q$	0.997	7380.026	0.000
5	5	$U=9.401+0.350Q$	0.662	48.090	0.000
	10	$U=3.154+1.462Q$	0.922	297.892	0.000
	20	$U=3.154+3.293Q$	0.980	1214.578	0.000
	30	$U=-16.167+10.402Q$	0.980	1239.243	0.000
	40	$U=35.035+8.028Q$	0.992	3003.558	0.000

## 2.2 新改土坡面水动力学参数特征

2.2.1 新改土坡面流速流态参数特征 由于采用全坡段瞬时流速描述新改土坡面径流的流速特征存在较大误差,宜采用各试验场次各断面的平均流速来表示其与坡长的分布规律,其他水动力学参数根据所测流速计算后平均所得。由图 6 可知,断面平均流速在不同上方来水流量下随距离小区顶端距离的增大呈先减小后逐渐平稳的变化趋势,而其随坡长的增加呈先减小后增加的趋势,范围为 0.10~0.30 m/s,且波动趋势随坡长的增加表现为由强变弱变化,大于 30 m 坡长新改土的流速变幅明显减弱。平均流速在不同上方来水流量下随坡长的增加呈先减小后增加的趋势,与刘和平等<sup>[31]</sup>研究结果一致,且波动趋势随坡长的增加表现为由强变弱变化,大于 30 m 坡长坡面的流速变幅明显减弱,与平均产流率减小的结果一致。可能的原因是坡长延长而径流深减小,故 30 m 后径流所受重力沿坡面向下使径流流速增加的分力作用减小。

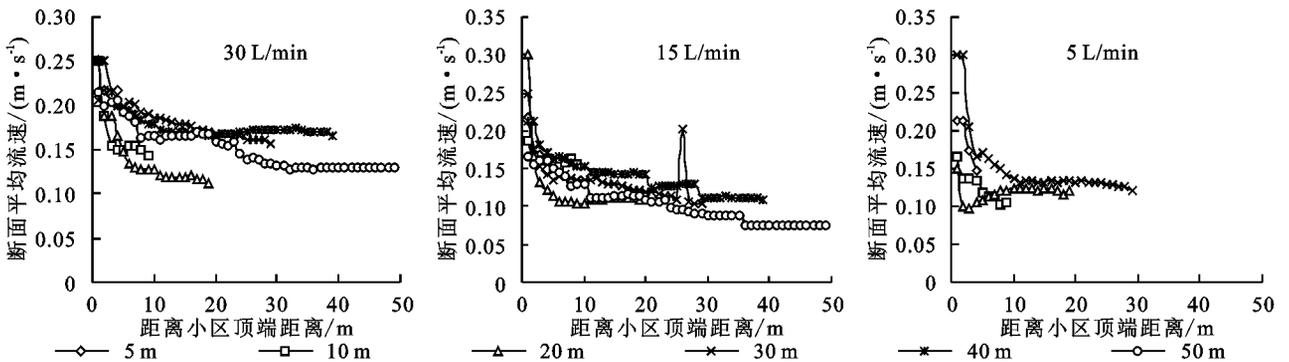


图 6 断面平均流速在不同上方来水流量下随坡长的变化

由图 7 可知,雷诺数变化范围为 88.42~337.23,均小于 500,弗劳德数变化范围为 0.35~0.78,均小于 1,说明试验条件下坡面径流最终均呈层状缓流。研究结果与其他学者<sup>[29,32]</sup>对浅层水流的流动规律研究结果一致,说明新改土坡面流与坡面薄层水流同样属于层流范畴。在相同坡长下,上方来水流量越大雷诺数也越大,说明上方来水流量越大使水流的紊动性变强。雷诺数和弗劳德数随坡长的变化较为复杂,但 20 m 坡长时两个参数值均较小,说明不同坡长对坡面薄层水流的影响不同,20 m 坡面的各流层之间液体质点的混掺作用较小。根据偏因素相关分析可知上方来水流量和坡长分别与平均流速相关性分别为( $r=0.592, p<0.05$ )和( $r=-0.601, p<0.05$ ),上方来水流量与雷诺数呈极显著性相关( $r=0.721, p<0.01$ ),其他均不显著。对其进行回归分析,平均流速与坡长二者呈三次曲线函数关系( $y=-0.017x^3+0.001x^2-7.95E-6x+0.264, R^2=0.594$ ),雷诺数与上方来水流量呈二次曲线函数关系( $y=-5.052x^2+$

$0.278x+171.741, R^2=0.539$ )。

2.2.2 新改土坡面径流阻力与侵蚀参数特征 由图 8 可知,新改土坡面阻力系数变化范围为 1.96~12.47。30,15 L/min 条件下,阻力系数于 20 m 坡面达到峰值,15 L/min 下 20 m 后的阻力系数大于 30 L/min 条件下。各坡面径流剪切力和径流功率随上方来水流量的增大而增大;随坡长的增加,径流剪切力和径流功率整体呈波动变化,波动范围分别为 8.36~28.36 Pa 和 1.42~5.10 (N/(m·s)),与平均产沙率的变化趋势一致。本研究中阻力系数和径流剪切力在 20,30 m 坡长新改土坡面也均具有临界性。30,15 L/min 时,阻力系数在坡长为 20 m 坡面达到峰值。说明在本次试验条件下,20 m 坡长的坡面阻力最大,小于或超过这个坡长阻力都将减小。因阻力系数越大,水流克服阻力所消耗的能量越多,而水流用于侵蚀和泥沙输移的能量越小,土壤侵蚀就越微弱<sup>[33]</sup>,所以 20 m 坡长是影响新改土坡面侵蚀的临界值。出现这种现象的原因可能与该坡面的水深、粗糙度与冲刷形态变化有关,也可能与

坡面土壤粒径组成和结构不同有关。径流剪切力在坡长为 20~30 m 时变幅较小,但坡长为 30 m 后变幅又增大。同时,随着坡长的延长,径流、汇流流路延长,坡面下部径流流深增大,对土粒的冲刷力增强,使得径流分离土壤的能力增强<sup>[21]</sup>。根据偏因素相关分析可知上方来水流量分别与径流剪切力和径流功率

呈显著性相关( $r=0.549, p<0.05$ )和极显著性相关( $r=0.742, p<0.01$ ),其他均不显著。对径流剪切力和径流功率分别与上方来水流量的关系进行回归分析,二者均呈二次曲线函数关系,分别为( $y=-0.113x^2+0.012x+15.448, R^2=0.327$ )和( $y=-0.053x^2+0.004x+2.309, R^2=0.580$ )。

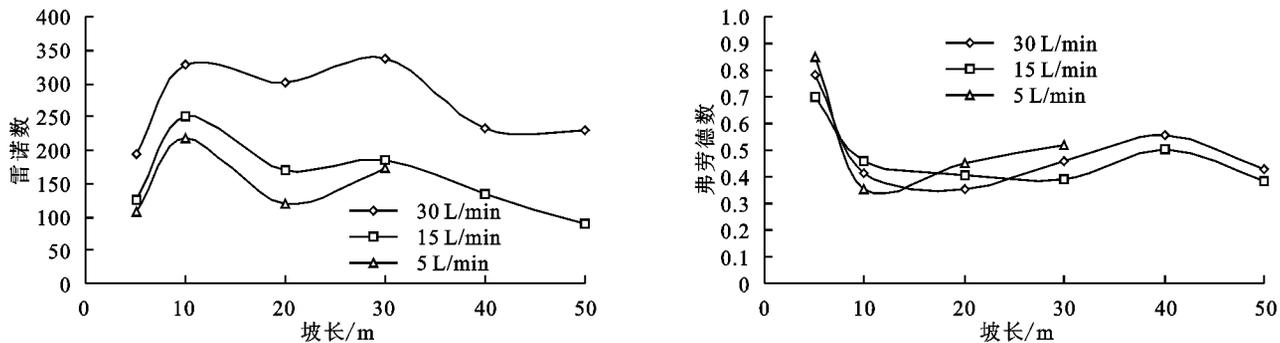


图 7 雷诺数和弗劳德数在不同上方来水流量下随坡长的变化

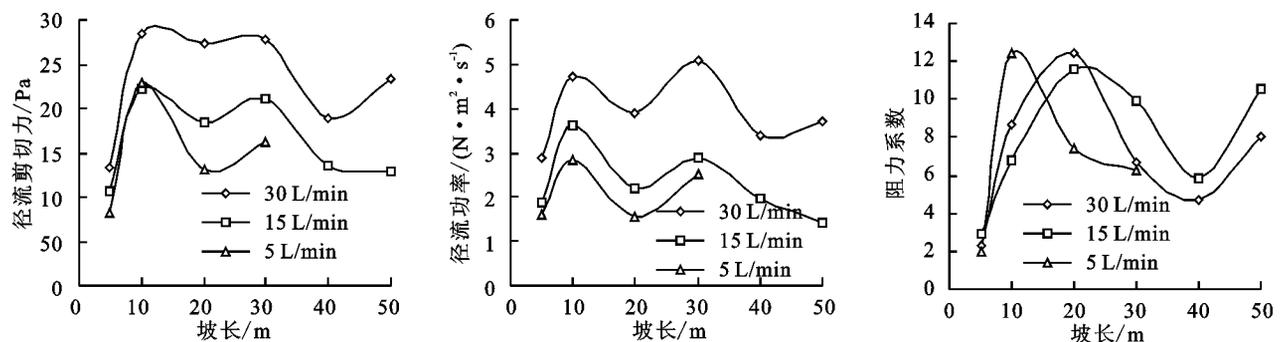


图 8 10°新改土坡面水动力学参数随坡长的变化

### 2.3 新改土坡面产沙与水动力学参数的关系

本研究选取平均产沙率为参考系列,以各水动力学参数为比较系列,运用灰色关联分析法对各水动力学参数与产沙率进行分析。由于平均产沙率与水动力学参数单位存在差异,根据灰色关联度均值标准化的原理<sup>[34]</sup>,计算得到试验条件下产沙率与水动力学参数的灰色关联度。由表 3 可知,各个水动力学参数对坡面产沙率的关联序为  $\gamma_p > \gamma_v, \gamma_{Fr} > \gamma_h > \gamma_\tau > \gamma_{Re} > \gamma_Q > \gamma_b > \gamma_L > \gamma_f$ ,其关联度范围为 0.669~0.968。各水动力学参数与

新改土坡面侵蚀产沙量均有一定关系,其中径流功率对坡面侵蚀产沙量影响最大,流速和弗劳德数对侵蚀产沙量的影响仅次于径流功率,上方来水流量的影响强于坡长。用径流功率与坡面产沙量建立侵蚀产沙量的预测关系式。由图 9 可知,产沙量和径流功率呈二次曲线函数关系  $y=49.317x^2-201.75x+222.04$  ( $R^2=0.7184$ )。与彭旭东等<sup>[16]</sup>研究生产建设项目工程堆积体影响侵蚀产沙的最密切因素不同,说明新改土坡面形态和土体性质是影响其侵蚀产沙的主要因素。

表 3 产沙率与水动力学参数的关联度

参数	$\gamma_Q$	$\gamma_L$	$\gamma_v$	$\gamma_h$	$\gamma_b$	$\gamma_{Re}$	$\gamma_{Fr}$	$\gamma_f$	$\gamma_\tau$	$\gamma_p$
关联度	0.825	0.697	0.951	0.947	0.863	0.926	0.951	0.669	0.940	0.968

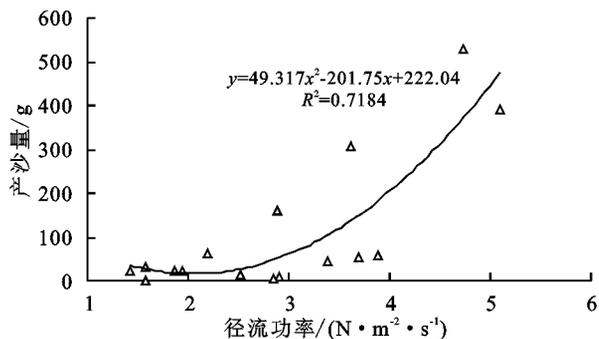


图 9 新改土 10°坡面产沙量与径流功率的关系

### 3 结论

(1) 试验条件下新改土 10°坡面的产流产沙特征为产流率随着放水冲刷过程的变化趋势为波动增长期—稳定发展期,产沙率变化趋势为波峰波谷变化—逐渐减小—稳定发展。新改土的产沙与产流呈  $U=b+aQ$  的线性正相关关系 ( $R^2$  为 0.662~0.999)。

(2) 水动力学参数特征为新改土坡面径流稳定时呈层状缓流,平均流速与坡长呈三次曲线函数关系,雷诺数与上方来水流量呈二次曲线函数关系。径流剪切力

和径流功率与上方来水流量分别呈二次曲线函数关系和线性方程函数关系。径流功率是描述新改土坡面侵蚀产沙的最佳水动力学参数,二者呈二次曲线函数关系  $y=49.317x^2-201.75x+222.04$  ( $R^2=0.7184$ )。

(3)上方来水流量和坡长均为紫色土丘陵区新改土坡面侵蚀的影响因素。产流产沙和水动力学参数与上方来水流量主要呈正相关性,而随坡长的增加呈上下波动变化趋势,其中 20,30 m 坡长(即耕作田块宽度)是影响  $10^\circ$  新改土坡面侵蚀的临界坡长。

#### 参考文献:

- [1] 刘涓. 重庆山地丘陵耕作田块修筑的土壤工程效应研究[D]. 重庆:西南大学,2015.
- [2] 魏朝富,谢德体,杨剑虹,等. 紫色丘陵坡瘠地新改土肥力演变[J]. 山区开发,1994(5):61-66.
- [3] 杨占彪,朱波,林立金,等. 川中丘陵区紫色土坡耕地土壤侵蚀特征[J]. 四川农业大学学报,2010,28(4):480-485.
- [4] 李仲明. 中国紫色土(上)[M]. 北京:科学出版社,1991:1-11,147-160.
- [5] 龙天渝,曹怀亮,安强,等. 三峡库区紫色土坡耕地吸附态磷可迁移污染负荷空间分布[J]. 农业工程学报,2013,29(4):157-164.
- [6] Sklenicka P. Applying evaluation criteria for the land consolidation effect to three contrasting study areas in the Czech Republic [J]. Land Use Policy, 2006, 23(4): 502-510.
- [7] 陈正发,史东梅,郭宏忠,等. 紫色土丘陵区坡耕地坡面侵蚀影响特征研究[J]. 水土保持学报,2011,25(2):52-57.
- [8] 何晓玲,郑子成,李廷轩. 不同耕作方式对紫色土侵蚀及磷素流失的影响[J]. 中国农业科学,2013,46(12):2492-2500.
- [9] 辛伟,朱波,唐家良,等. 紫色土丘陵区典坡地产流及产沙模拟试验研究[J]. 水土保持通报,2008,28(2):32-35.
- [10] Geng X D, Zheng F L, Liu L. Effect of rainfall intensity and slope gradient on soil erosion process on purple soil hill slopes [J]. Journal of Sediment Research, 2010, 31(6): 48-53.
- [11] Stomph T J, de Ridder N, Steenhuis T S, et al. Scale effects of Hortonian overland flow and rainfall-runoff dynamics: Laboratory validation of a process-based model [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2002, 27(8): 847-855.
- [12] Van de Giesen N C, Stomph T J, de Ridder N. Surface runoff scale effects in West African watersheds: Modeling and management option [J]. Agricultural Water Management, 2005, 72(2): 109-130.
- [13] Xu X L, Liu W, Kong Y P, et al. Runoff and water erosion on road side-slopes: Effects of rainfall characteristics and slope length [J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2009, 14(7): 497-501.
- [14] Kara O, Sensoy H, Bolat I. Slope length effects on microbial biomass and activity of eroded sediments [J]. Journal of Soils and Sediments, 2010, 10(3): 434-439.
- [15] 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[J]. 农业工程学报,2016,32(12):158-164.
- [16] 彭旭东. 生产建设项目工程堆积体边坡土壤侵蚀过程[D]. 重庆:西南大学,2015.
- [17] 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[J]. 农业工程学报,2013,29(8):145-153.
- [18] 重庆市国土资源和房屋管理局. 重庆市土地开发整理工程建设标准(试行)[Z]. 重庆,2007.
- [19] Abrahams A D, Parsons A J, Luk S H. Resistance to overland flow on desert hill slopes [J]. Journal of Hydrology,1986, 88: 343-363.
- [20] 罗榕婷,张光辉,曹颖. 坡面含沙水流水动力学特性研究进展[J]. 地理科学进展,2009,28(4):567-574.
- [21] 付兴涛. 坡面径流侵蚀产沙及动力学过程的坡长效应研究[D]. 杭州:浙江大学,2012.
- [22] 唐辉,李占斌,李鹏,等. 模拟降雨下坡面微地形量化及其与产流产沙的关系[J]. 农业工程学报,2015,31(24):127-133.
- [23] 康宏亮,王文龙,薛智德,等. 冲刷条件下黄土丘陵区浅沟侵蚀形态及产流产沙特征[J]. 农业工程学报,2016,32(20):161-170.
- [24] 和继军,吕焯,宫辉力,等. 细沟侵蚀特征及其产流产沙过程试验研究[J]. 水利学报,2013,44(4):398-404.
- [25] 李学增,黄炎和,林金石,等. 不同宽度冲刷槽对崩岗崩积体产流产沙的影响[J]. 农业工程学报,2016,32(9):136-141.
- [26] Kinmaro D N, Poesen J, Masanya B M, et al. Magnitude of soil erosion on the northern slope of the Uluguru Mountains Tanzania: Interrill and rill erosion [J]. Catena, 2008, 75: 38-44.
- [27] 姚云. 不同坡长条件下扰动地表对紫色土坡面土壤可蚀性的影响[D]. 重庆:西南大学,2014.
- [28] 范兴科,蒋定生,赵合理. 陕北黄土丘陵区水平梯田最佳坡长的优化设计[J]. 水土保持研究,1996,3(2):129-134.
- [29] 潘成忠,上官周平. 不同坡度草地含沙水流水力学特性及其拦沙机理[J]. 水科学进展,2007,18(4):490-495.
- [30] 刘泉,李鹏,李占斌,等. 模拟降雨条件下下坡地径流泥沙特征研究[J]. 水土保持研究,2015,22(3):1-5.
- [31] 刘和平,王秀颖,刘宝元. 人工模拟降雨下细沟与细沟间流速的沿程分布[J]. 地理研究,2011,30(9):1660-1668.
- [32] 陈国祥,姚文艺. 降雨对浅层水流阻力的影响[J]. 水科学进展,1996,7(1):42-46.
- [33] 张光辉. 坡面薄层水流水力学特性的实验研究[J]. 水科学进展,2002,13(2):159-165.
- [34] 王雪松,陈曦,马洪超,等. 赣北红土区工程堆积体坡面水动力学特性[J]. 水科学进展,2016,27(3):412-422.