

重庆饱和紫色土坡面片流与细沟流水力学特性及 临界条件试验研究

谭文浩, 陈晓燕, 陶婷婷, 李丹丹, 麻力文, 孔令勇

(西南大学资源环境学院, 重庆 400716)

摘要: 为比较饱和紫色土坡面片流与细沟流水力学特征并明确其临界水力特性, 进行 5 个坡度 ($2^\circ, 5^\circ, 10^\circ, 15^\circ, 20^\circ$) 和 3 个雨强 (30, 60, 90 mm/h) 组合条件下的室内人工模拟降雨试验, 在测得坡面片流、细沟流及其转变的临界流速的基础上, 计算得到片流、细沟流及其转变的临界水力参数, 包括水深、雷诺数、弗劳德数和达西阻力系数。结果表明: 在不同侵蚀阶段, 片流流速为 0.064~0.151 m/s, 细沟流流速为 0.175~0.350 m/s, 雨强和坡度在不同侵蚀阶段对流速和水深的影响程度存在差异。片流均为层流, $<10^\circ$ 坡时, 片流为缓流, 片流多居缓层流状态; 中、大雨强条件下, 细沟流均为过渡流, $>5^\circ$ 坡时细沟流均为急流, 细沟流多为急过渡流状态。片流达西阻力系数与坡度和雨强呈负相关关系, 细沟流达西阻力系数与坡度和雨强呈正相关关系。坡面径流由片流转为细沟流的临界流速为 0.100~0.165 m/s。流速改变坡面形态, 导致细沟侵蚀发生的临界水流状态和水流阻力随坡度和雨强变化的规律不同。研究结果对于认识饱和土壤条件下坡面不同侵蚀阶段径流水力学特性, 进一步明确由片流转为细沟流的临界水力条件具有一定参考价值。

关键词: 片流; 细沟流; 临界水力条件; 饱和紫色土; 模拟降雨

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2023)03-0066-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcb.2023.03.009

Experiment Study of Sheet and Rill Flow Hydraulic Characteristics and the Critical Conditions on Saturated Purple Soil Slopes in Chongqing

TAN Wenhao, CHEN Xiaoyan, TAO Tingting, LI Dandan, MA Liwen, KONG Lingyong

(College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400716)

Abstract: In order to compare the hydraulic characteristics of sheet flow and rill flow on saturated purple soil slope and clarify their critical hydraulic characteristics, indoor artificial simulated rainfall experiments were conducted under the combined conditions of five slope gradients (SGs: $2^\circ, 5^\circ, 10^\circ, 15^\circ, 20^\circ$) and three rainfall intensities (RIs: 30, 60, 90 mm/h). On the basis of measuring the velocity of sheet flow, rill flow and critical velocity of sheet flow transform to rill flow, the corresponding hydraulic parameters were calculated, including water depth, Reynolds number, Froude number and Darcy resistance coefficient. The results showed that: In different erosion stages, the velocity of sheet flow was between 0.064 and 0.151 m/s and rill flow was between 0.175 and 0.350 m/s. The influence degree of SGs and RIs on velocity and water depth of sheet and rill flow was different. The sheet flow was all laminar and was tranquil when the slope gradient was $<10^\circ$. The sheet flow was mostly in the state of tranquil laminar flow. The rill flow was transitional under the conditions of moderate and heavy rain and was rapid when the slope gradient was $>5^\circ$. The rill flow was mostly in the state of rapid transitional flow. The Darcy resistance coefficient of sheet flow was negatively correlated with SGs and RIs, while that of rill flow was positively. The critical velocity of sheet flow transform to rill flow was between 0.100 and 0.165 m/s. The velocity would change the slope shape, resulting in the difference of the critical flow pattern and flow resistance with SGs and RIs. This study is of great significance to understand the hydraulic characteristics of sheet flow and rill flow on saturated soil slope, and to further clarify the critical hydraulic conditions for the sheet flow to rill flow transition.

Keywords: sheet flow; rill flow; critical hydraulic conditions; saturated purple soil; simulated rainfall

收稿日期: 2022-11-16

资助项目: 国家自然科学基金项目 (42177314); 重庆市研究生科研创新项目 (CYS21114)

第一作者: 谭文浩 (1997—), 男, 湖南宜章人, 硕士研究生, 主要从事土壤侵蚀研究。E-mail: twh17774969415@163.com

通信作者: 陈晓燕 (1971—), 女, 重庆北碚人, 教授, 博士生导师, 主要从事土壤侵蚀与流域治理研究。E-mail: c400716@126.com

紫色土是重庆市境内主要土壤类型,具有“上覆土壤、下伏岩石”的二元岩土结构,上覆土壤土层浅薄、孔隙度大、渗水能力强,下伏基岩结构紧密,透水性差,降雨过程中土壤水分易达饱和^[1-2]。与非饱和土壤相比,饱和土壤抗蚀能力差,相同降雨条件下产流量大、径流流速快,土壤侵蚀强烈^[3]。降雨一旦发生,饱和土壤坡面立即形成片流,发生片蚀。片流在运动过程中不断汇集,冲刷土壤表面,产生细沟,此时,坡面流已由片流转为细沟流,发生细沟侵蚀^[4]。坡面侵蚀强弱受坡面径流水力条件影响,从水力学的角度描述侵蚀发生、发展过程,能更好地揭示土壤侵蚀机理^[5]。用于描述土壤侵蚀过程的水力学参数最常用的是水流流速,其与土壤分离、搬运、沉积过程密切相关,是坡面侵蚀过程的基本变量,也是计算其他水力学指标(如水流流态和水流阻力)的基本参数^[6]。通常用雷诺数和弗劳德数区分水流流态和流型,用达西阻力系数描述地表微地形情况。水力学参数及其组合构成许多土壤侵蚀预报模型^[7]。关于非饱和土壤条件下片流与细沟流水力学特性,已有大量研究^[8-9]。但饱和土壤与非饱和土壤侵蚀过程存在很大不同,关于饱和土壤条件下片流与细沟流水力学特性的研究也较少,还需进一步关注。

给定坡度和雨强条件下,细沟侵蚀总是发生在一定坡长处,此坡长被定义为细沟发生的临界坡长^[10]。临界坡长的意义在于为坡面径流提供足够长的流动距离和汇水面积,从而使径流达到可发生细沟侵蚀的临界水力条件^[11]。前人^[12-13]对细沟产生的临界水力条件进行研究,但由于不同研究的试验条件存在差异,导致研究结果各异。Merz等^[14]进行一系列的室内室外试验,得到计算临界水力条件的公式,但细沟产生的临界水力条件受降雨、径流、土壤性质、地形、地表覆盖物等多种因素的综合影响^[15],这些公式只适用于特定土壤条件和试验装置,对于饱和土壤坡面下细沟产生的临界水力条件仍有待研究。

因此,通过设计不同坡度和降雨强度组合,进行室内人工模拟降雨试验,测定饱和土壤坡面沿程径流流速和细沟发生的临界坡长,对比分析坡面片流与细沟流水力学特性,并探讨由片流转为细沟流的临界水力条件,以期对坡面侵蚀理论的发展和模型构建提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验于2021年7—10月在中国科学院水利部水土保持研究所人工模拟降雨大厅进行。供试土壤采集于重庆市北碚区紫色土坡耕地(106°21′07″E, 29°44′41″N, 230 m),黏粒(<0.002 mm)含量 34.55%,

粉粒(0.002~0.05 mm)含量 48.84%,砂粒(>0.05 mm)含量 16.61%,按美国制划分标准^[16]土壤质地属于黏壤土。试验前先将供试土壤自然风干,剔除其中的石块、草根等杂质后,碾碎过 5 mm 筛。

1.2 试验方法

试验设有3个长、宽、深分别为8.0, 0.2, 0.3 m的土槽,坡度可在0~30°范围内调节。供试土壤分上下2层分别填装,下层模拟犁底层,厚度为5 cm,上层模拟耕作层,厚度为20 cm。将土槽沿长方向每隔1 m划为0.1 m和0.9 m的I、II 2个单元(图1a),在I单元底部先填装3 cm厚土壤,容重控制在1.50 g/cm³,再将直径为2 cm的渗水管横向布设于土层上面,渗水管侧面等间距钻有5个直径为2 mm的渗水孔(图1b),可从底部向上将水供入耕作层中。为防止土壤颗粒堵塞渗水孔,用透水性良好的纱布裹住渗水管并在土层上面铺设2 cm厚直径为2 mm的石英砂。接着在II单元底部填装5 cm厚土壤,容重控制在1.50 g/cm³。耕作层分4层填装并逐层用耙子打毛,每层填装厚度为5 cm,土壤容重与原状土保持一致,控制在1.28 g/cm³。耕作层表面设置成两边略高、中间偏低的浅“U”形,以减弱土槽两侧钢板对水流的导向作用。为减少钢板的边界效应,在钢板两侧涂抹凡士林并黏上供试土壤使其糙度接近试验土层。由于每次试验完成后要将土壤取出并重新填土,为更好地区分耕作层和犁底层,同时,为保证取土时不破坏犁底层,在犁底层上方铺设与土槽尺寸相同的土工布。渗水管连接于垂直向的供水管底端,供水管顶端与耕作层表面高度平齐,保证水位高度与土壤表面一致。供水管顶部连通着1根输水管,其尾端向上开有1个溢流孔,使水流与大气保持连通状态,即按实际水位线对土壤进行饱和。土壤填装完毕后,通过饱和供水装置用极小的流量将水从土槽底部供入土层中,直至土壤表面有明显积水并继续保持供水。饱和土壤坡面设置原理及方法与Huang等^[17]研究的基本一致。

重庆市紫色土耕地坡度范围主要在2°~25°,同时,为便于与前人^[18]研究对比分析以及考虑到坡度分级,将试验坡度设置为2°, 5°, 10°, 15°, 20°。根据多年观测^[19]和已有研究^[20],重庆市短时强降水在20~100 mm/h,细沟发生的临界侵蚀雨强为30~40 mm/h,综合考虑之后,以30 mm/h雨强为梯度,将试验雨强设置为30, 60, 90 mm/h。每场试验开始前先将土槽抬升至目标坡度,然后进行雨强率定。每场降雨持续16 min。为保证水流达到稳定,在降雨进行到15 min后再进行流速测定,测定的具体操作为:将8 m土槽按1 m间距分为8个坡段,用染色剂法同时测定坡面水流流速。试验过程中用温度计测量水温。试验结束后,用精度为1 mm的

卷尺测量由片流转为细沟流的临界坡长。每组试验重复 3 次,共进行 45 场试验。

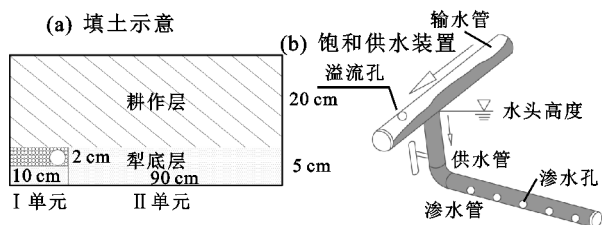


图 1 填土示意及饱和供水装置

1.3 计算方法

(1)通过染色剂法测得的坡面流速为表层最大流速,需乘以修正系数算得水流平均流速,其计算公式为:

$$V = kV_0 \quad (1)$$

式中: V 为平均流速(m/s); V_0 为水流表层最大流速(m/s); k 为修正系数。坡面流流态为层流、过渡流、紊流时的修正系数分别取 0.67, 0.7, 0.8^[21]。

(2)由于坡面流水深较浅,直接测量误差较大,因此,引入平均水深,计算公式为:

$$h = \frac{q}{V} \times 10^3 \quad (2)$$

式中: h 为平均水深(mm); q 为单宽流量(m²/s)。在饱和土壤条件下,降雨全部产流,不同断面处的流量与雨强、坡度、坡长有关,计算公式为:

$$q = \frac{I \cdot L}{3.6 \times 10^6} \cos \theta \quad (3)$$

式中: q 为单宽流量(m²/s); I 为雨强(mm/h); L 为坡长(m); θ 为坡度(°)。

(3)借鉴明渠流的水力学原理和方法,用雷诺数(Re)和弗劳德数(Fr)表征水流运动状况。(Re)是表征水流惯性力与黏滞力比值的无量纲参数,根据(Re)将水流流态分为层流($Re < 500$)、过渡流($500 < Re < 2000$)和紊流($Re > 2000$)。 Fr 是表征水流惯性力与重力比值的无量纲参数,根据 Fr 将水流流型分为缓流($Fr < 1$)、急流($Fr > 1$)和临界流($Fr = 1$)。用达西阻力系数(f)表征坡面水流在运动时所受阻力大小。各水力学参数表达式分别为^[22]:

$$Re = \frac{V \cdot R}{\nu} \quad (4)$$

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{10^{-3} g \cdot h}} \quad (5)$$

$$f = \frac{8 \cdot g \cdot R \cdot J}{V^2} \quad (6)$$

式中: V 为平均流速(m/s); R 为水力半径(m); ν 为水的运动黏滞性系数(m²/s),是水流温度的函数; h 为平均水深(mm); g 为重力加速度(m/s²),取 9.81; J 为水力能坡,取坡度的正弦值。

1.4 数据分析

采用下标 s 表示片流水力学参数,下标 r 表示细沟流水力学参数,下标 c 表示坡面流由片流转为细沟流的临界水力学参数。多重比较采用 LSD 最小显著差数法($p < 0.05$)。使用 SPSS 23 软件进行统计分析,利用 Origin 2021 软件绘制数据统计图,采用 CAD 2016 软件绘制装置示意图。

2 结果与分析

2.1 水流流速与平均水深

图 2 为不同坡度、雨强条件下坡面流流速沿程变化情况,除 2°坡、30 mm/h 雨强条件下未发生细沟侵蚀外,其他条件下均发生片蚀和细沟侵蚀。在坡面上部,水流处于片流阶段,平均流速最小,随着水流沿坡面向下运动不断汇集,流速逐渐增大,大部分坡面在 1~3 m 坡长处形成细沟,细沟流沿坡面向下流速继续增大。大雨强条件下,在 5 m 坡长之后,除部分略有起伏外,细沟流流速整体上趋于稳定。不同坡度和雨强条件下,坡面片流与细沟流平均流速 V 和平均水深 h 结果见表 1, V_s 、 V_r 分别为 0.064~0.151, 0.175~0.350 m/s, V_r 是 V_s 的 2.01~2.77 倍; h_s 、 h_r 分别为 0.72~5.95, 1.66~7.04 mm, h_r 是 h_s 的 1.06~2.38 倍。 V_s 和 h_s 在坡度处理间差异显著,在雨强处理均差异不显著, V_r 和 h_r 在坡度和雨强处理间差异均显著。由表 2 可知,坡度和雨强对坡面流由片流转为细沟流的临界坡长影响显著。随着坡度和雨强的增大,临界坡长在不断缩短,但缩短的幅度在减小。根据临界坡长,采用插值法计算得到不同坡度和雨强条件下坡面流由片流转为细沟流的临界流速 V_c 。由图 3 可知,不同坡度和雨强下 V_c 为 0.100~0.165 m/s,平均值为 0.129 m/s。除 2°坡条件外,坡度和雨强对 V_c 影响显著, V_c 随坡度和雨强增大而增大。

2.2 水流流态

由表 3 可知,不同坡度和雨强条件下坡面片流与细沟流雷诺数 Re_s 、 Re_r 分别为 79~398, 393~1314, Re_s 和 Re_r 在雨强处理间差异显著,在坡度处理间差异不显著。所有片流均处于层流流态。30 mm/h 雨强下细沟流均处于层流流态, 60, 90 mm/h 雨强下细沟流均处于过渡流流态。 Fr_s 、 Fr_r 分别为 0.28~1.31, 0.71~2.18, Fr_s 和 Fr_r 在坡度处理间差异显著,在雨强处理间差异不显著。 <10°坡条件下片流为缓流, >5°坡条件下细沟流为急流。根据不同坡度和雨强条件下,坡面流由片流转为细沟流的临界流速,计算得到由片流转为细沟流的临界雷诺数(Re_c)和临界弗劳德数(Fr_c)。由图 4 可知,不同坡度和雨强下 Re_c 、 Fr_c 分别为 154~467, 0.49~1.44, 平均值分别为 305, 0.92。坡度和雨强对 Re_c 和 Fr_c 影响显著, Re_c 随雨强增大而增大,随坡度

增大而减小,而 Fr_c 与 Re_c 变化规律相反, Fr_c 随雨强增大而减小,随坡度增大而增大。

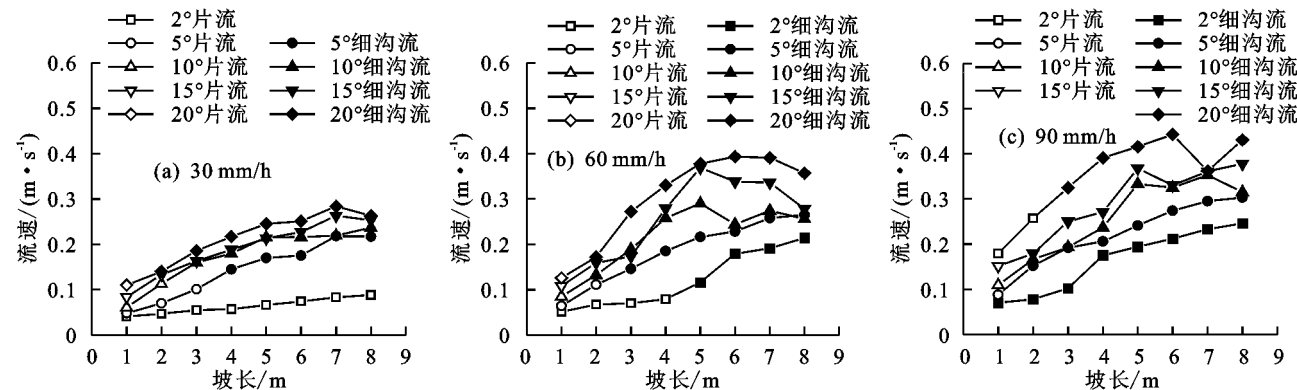


图 2 不同坡度和雨强条件下水流流速沿程变化

表 1 不同坡度和雨强下片流与细沟流平均流速和水深

坡度/(°)	雨强/ (mm·h ⁻¹)	平均流速(V)/(m·s ⁻¹)		平均水深(h)/mm	
		V _s	V _r	h _s	h _r
2	30	0.064±0.001Db	—	5.44±0.09Ab	—
	60	0.067±0.001Db	0.175±0.007Eb	5.95±0.07Aa	6.28±0.16Ab
	90	0.074±0.004Da	0.194±0.007Ea	4.98±0.05Ac	7.04±0.07Aa
5	30	0.073±0.004Cb	0.185±0.004Dc	2.18±0.05Bb	2.66±0.14Ac
	60	0.088±0.009Ca	0.216±0.005Db	2.78±0.10Ba	4.12±0.09Bb
	90	0.088±0.002Ca	0.238±0.009Da	2.82±0.06Ba	5.02±0.11Ba
10	30	0.087±0.004Bb	0.204±0.005Cc	1.40±0.07Cc	2.16±0.03Bc
	60	0.089±0.004Cb	0.235±0.005Cb	1.94±0.08Cb	3.41±0.17Cb
	90	0.109±0.006Ba	0.275±0.007Ca	2.26±0.06Ca	4.33±0.09Ca
15	30	0.109±0.003Ac	0.218±0.005Bc	1.09±0.03Cc	1.98±0.07Bc
	60	0.118±0.006Bb	0.276±0.004Bb	1.50±0.02Db	2.90±0.12Db
	90	0.151±0.002Aa	0.305±0.002Ba	1.61±0.01Da	3.80±0.02Da
20	30	0.110±0.007Ab	0.226±0.007Ac	0.72±0.05Eb	1.66±0.04Cc
	60	0.126±0.006Aa	0.327±0.007Ab	1.24±0.02Ea	2.32±0.03Eb
	90	—	0.350±0.008Aa	—	2.83±0.04Ea

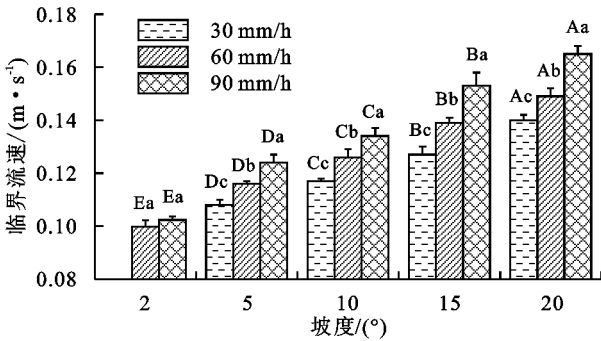
注:表中数值为平均值±标准差;—表示试验未测量;不同大写字母表示同一雨强下坡度处理间差异显著($p<0.05$);不同小写字母表示同一坡度下雨强处理间差异显著($p<0.05$)。下同。

表 2 不同坡度和雨强下细沟出现的临界坡长

坡度/(°)	单位:m		
	30 mm/h	60 mm/h	90 mm/h
2	—	4.521±0.065Aa	2.959±0.063Ab
5	3.277±0.025Aa	2.243±0.033Bb	1.555±0.005Bc
10	2.210±0.073Ba	1.853±0.062Cb	1.477±0.015Cc
15	2.050±0.029Ca	1.620±0.045Db	1.057±0.036Dc
20	1.933±0.053Da	1.491±0.081Eb	0.942±0.044Ec

2.3 水流阻力

由表 3 可知,不同坡度和雨强条件下坡面片流阻力系数 f_s 和细沟流阻力系数 f_r 分别为 1.42~3.68, 0.56~0.98。同一坡度雨强条件下,坡面 f_s 比 f_r 大, f_s 是 f_r 的 1.51~6.02 倍,坡度为 20°时, f_s 与 f_r 比值最小,不同雨强下均 <2 。 f_s 在坡度和雨强处理间均差异显著。根据不同坡度和雨强条件下,坡面流由片流转为细沟流的临界流速计算得到由片流转为细沟流的临界阻力系数 f_c 。由图 5 可知,不同坡度和雨强下 f_c 为 1.03~1.82,平均值为 1.37。坡度和雨强对 f_c 影响显著, f_c 随坡度增大而减小,随雨强增大而增大。



注:不同大写字母表示同一雨强下坡度处理间差异显著($p<0.05$);不同小写字母表示同一坡度下雨强处理间差异显著($p<0.05$)。下同。

图 3 坡度对临界流速的影响

3 讨论

3.1 饱和土壤坡面片流和细沟流水力学特性差异

由试验结果可知,径流水力学特性在不同侵蚀阶段存在差异。在由片流向细沟流转变过程中, V 值增大, h 值增大, Re 值增大, Fr 值增大, f 值减小,表明细沟流对土壤坡面的侵蚀强度要大于片流。主要原

因在于片流产于坡面上部,而细沟流产于坡面下部,在降雨过程中,沿坡面向下汇流不断增加,细沟流的流量大于片流,对坡面的侵蚀也就更强;与分散的片

流相比,受细沟形态影响,细沟中的径流更集中,能量更大。因此,在土壤侵蚀防治实践过程中,应尽量避免细沟发生。

表 3 不同坡度和雨强下片流与细沟流雷诺数、弗劳德数和阻力系数

坡度/ (°)	雨强/ (mm·h ⁻¹)	雷诺数(<i>Re</i>)		弗劳德数(<i>Fr</i>)		阻力系数(<i>f</i>)	
		<i>Re_s</i>	<i>Re_r</i>	<i>Fr_s</i>	<i>Fr_r</i>	<i>f_s</i>	<i>f_r</i>
2	30	361±13Ab	—	0.28±0.01Eb	—	3.68±0.03Aa	—
	60	398±4Aa	1044±20Ab	0.28±0.03Eb	0.71±0.04Ea	3.55±0.06Ab	0.65±0.01Cb
	90	364±1Ab	1314±15Aa	0.34±0.03Da	0.74±0.04Ea	2.43±0.03Ac	0.69±0.01Ca
5	30	166±2Bb	496±1Ac	0.49±0.02Db	1.14±0.03Da	3.35±0.03Ba	0.56±0.01Cb
	60	248±4Ba	896±9Bb	0.53±0.08Da	1.07±0.04Db	2.95±0.05Bb	0.65±0.02Ca
	90	248±4Ba	1209±31Ba	0.53±0.02Ca	1.06±0.05Db	2.26±0.01Bc	0.69±0.02Ca
10	30	124±2Cc	451±6Bc	0.74±0.08Ca	1.41±0.04Ca	3.24±0.01Ca	0.71±0.04Bb
	60	164±2Cb	810±11Cb	0.61±0.07Cb	1.31±0.09Cb	2.80±0.08Cb	0.86±0.00Ba
	90	246±2Ba	1204±28Ba	0.73±0.06Ba	1.33±0.09Cb	1.89±0.07Cc	0.90±0.03Ba
15	30	122±2Cc	444±7Bc	1.04±0.03Bb	1.56±0.06Bb	2.08±0.05Da	0.87±0.03Aa
	60	162±2Cb	800±10Cb	0.89±0.03Bc	1.68±0.04Ba	1.61±0.04Db	0.90±0.02Ba
	90	243±4Ba	1187±16Ba	1.21±0.04Aa	1.58±0.02Bb	1.42±0.04Dc	0.92±0.02Aba
20	30	79±2Db	393±9Cc	1.31±0.09Aa	1.77±0.08Ab	1.60±0.03Ea	0.92±0.04Aa
	60	158±1Ca	783±7Cb	1.15±0.04Ab	2.18±0.02Aa	1.48±0.01Eb	0.98±0.04Aa
	90	—	1047±12Ca	—	2.13±0.02Aa	—	0.96±0.03Aa

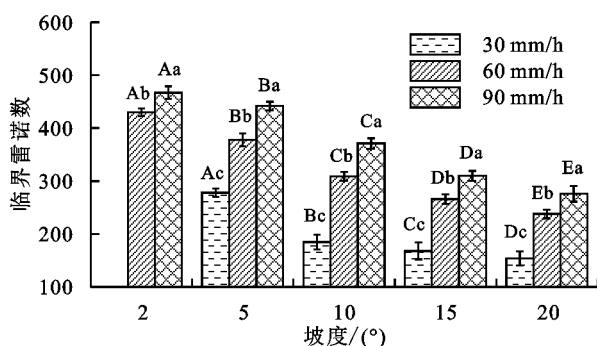


图 4 坡度对临界雷诺数和临界弗劳德数的影响

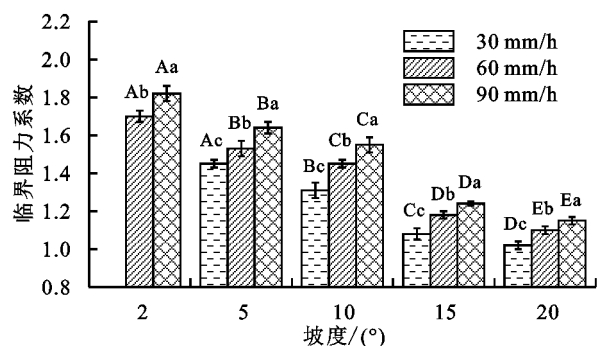
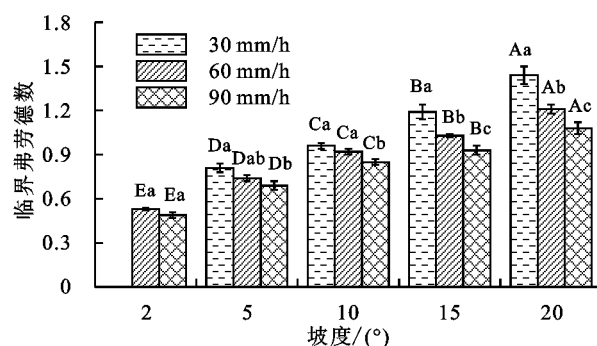


图 5 坡度对临界阻力系数的影响

为进一步了解坡度和雨强影响下饱和土壤坡面片流与细沟流水力学特性差异如何,引入非线性方程来分析各个变量对径流水力学特性的影响,计算公式为:

$$W = \alpha S^\beta I^\gamma \quad (7)$$

式中: W 为不同的径流水力学参数; S 为坡度(°); I 为雨强(mm/h); α 、 β 、 γ 为回归系数。不同水力学参数的回归系数见表 4。由流速的回归方程可知,片流与细沟流的坡度指数(β)和雨强指数(γ)均为正数,说明流速与坡度和雨强呈正相关关系。王志刚等^[23]

研究表明,饱和状态下的紫色土坡耕地稳定产流后的坡面流速随坡度和雨强增大而增大。一方面,因为坡度增大,水流平行于坡面的重力分力和水流能量也增大^[17];另一方面,雨强增大,雨滴具有的动能增大,坡面径流速率也增大^[24],两方面因素都促进流速的增大。由流速的回归系数还可得知,片流流速主要受坡度的影响,而细沟流流速主要受雨强的影响,因此,实际中应优先将雨强作为防治细沟侵蚀的控制因素。

由雷诺数(Re)的回归系数可知, Re_s 主要受坡度影响, Re_r 主要受雨强影响。雷诺数是水流的惯性力与黏滞力之比,其中,惯性力起着扰动水体,改变其规则运动的作用,受流速和水深共同影响。由片流和细沟流的流速和水深回归系数可知, V_s 和 h_s 主要受坡度影响,而 V_r 和 h_r 主要受雨强影响,因此, Re_s 受坡度影响更大,而 Re_r 受雨强影响更大。

小坡度条件下,不论雨强大小,片流和细沟流均为缓流, Fr 主要受坡度影响, Fr_s 和 Fr_r 的回归系数中雨强指数远小于坡度指数也印证这一点。Liu

等^[22]通过室内人工模拟降雨试验表明,坡度对 Fr 的贡献率大于雨强。可能是因为,坡度一定时,雨强增大,虽然 h 增大,但 V 也会增大,使得水流可以保持一个相对稳定的流型。

由阻力系数(f)回归系数可知, f_s 与坡度和雨强呈负相关关系,而 f_r 与坡度和雨强呈正相关关系。吴淑芳等^[25]通过 5 场间歇式人工模拟降雨试验研究黄土坡面细沟侵蚀演化过程中的阻力系数变化。前 2 场降雨下,细沟还未发育,坡面以颗粒阻力为主导,之后的降雨中,随着细沟发育,坡面以形态阻力为主导(颗粒阻力为由高度 <10 倍水流黏性底层厚度的

土壤颗粒和微团聚体所引起的阻力,通常指裸露坡地因土壤颗粒之间的黏结力而引起的水流阻力,而形态阻力为微地形或更大尺度地形变化造成水流表面明显起伏、流线分离或流速突变等产生的阻力)。本试验中,在片流阶段,坡度和雨强增大使 V_s 增大,坡面较松散的土壤颗粒易被水流冲走,表层土壤黏粒含量减少,土壤颗粒间的黏结力降低, f_s 减小;在细沟流阶段,一方面坡度增大,土体稳定性降低;另一方面,雨强增大,径流侵蚀力增强,两者使得坡面易发生细沟侵蚀,形成复杂的坡面形态, f_r 增大。因此,坡度和雨强对 f_s 有抑制作用,而对 f_r 有促进作用。

表 4 片流与细沟流水力学参数和坡度、雨强的回归系数

水力学参数	片流				细沟流			
	α_s	β_s	γ_s	R^2	α_r	β_r	γ_r	R^2
平均流速(V)	0.021	0.298	0.232	0.851	0.039	0.248	0.314	0.935
平均水深(h)	7.011	-0.707	0.057	0.956	0.840	-0.367	0.537	0.975
雷诺数(Re)	171.909	-0.419	0.257	0.855	33.525	-0.096	0.838	0.983
弗劳德数(Fr)	0.169	0.652	0.007	0.909	0.401	0.450	0.056	0.920
阻力系数(f)	13.976	-0.274	-0.309	0.750	0.308	0.211	0.121	0.822

注:回归拟合样本数为 42。

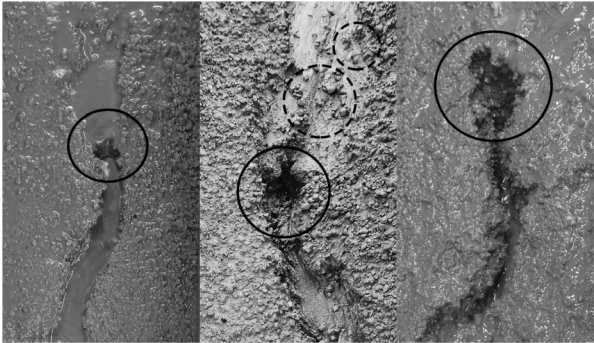
3.2 饱和土壤坡面细沟发生的临界水力特性

由于试验土壤、装置和方法等的差异,坡面细沟发生的临界水力特性也存在差异。本试验坡面细沟发生的临界流速 V_c 为 $0.100\sim0.165$ m/s,与辜婧瑶等^[12]通过模拟降雨试验测得的闽西红壤坡面的 V_c ($0.074\sim0.103$ m/s)结果相近,表明不同土壤细沟侵蚀发生的 V_c 差异并不大。临界雷诺数 Re_c 为 $155\sim467$,平均值为 305,与张科利等^[26]通过径流冲刷试验测得的 Re_c ($50\sim350$) 差异很小,略小于辜婧瑶等^[12]研究结果(Re_c 为 $475\sim724$),与雷阿林等^[27]通过模拟降雨试验测得的 $Re_c\geq 1\,486$ 相差较大。可能与试验土壤含水量条件有关。本试验土壤为饱和土壤,含水量达 50%,张科利等^[26]也在试验前使土壤表面充分饱和,而辜婧瑶等^[12]和雷阿林等^[27]试验中土壤含水量分别为 30%,15%,土壤含水量越高,形成的跌坎越不明显,从片流到细沟流临界处的坡面越光滑,水流越稳定^[28], Re_c 越小。临界弗劳德数(Fr_c) 为 $0.49\sim1.44$,与 Merz 等^[14]通过室内外人工模拟降雨试验测得的 Fr_c ($0.1\sim1.3$) 一致。而张科利等^[26]试验发现,由面状侵蚀向细沟侵蚀过渡时,径流的弗劳德数为 $0.8\sim2.0$,略大于本文研究结果,可能是由试验条件差异导致的。本试验临界阻力系数(f_c) 为 $1.03\sim1.82$,而辜婧瑶等^[12]测得的 f_c 为 $0.10\sim0.25$,造成两者研究结果相差较大的主要原因可能是供试土壤为饱和土壤,而辜婧瑶等^[12]供试土壤为非饱和土壤,饱

和土壤入渗率极低,细沟发生时两者虽然流速相差不大,但饱和土壤的水深要大于非饱和土壤,因此,导致本研究 f_c 偏大。

坡度不变的条件下,雨强增大, V_c 、 Re_c 和 f_c 值增大, Fr_c 值减小。主要在于雨强越大,片流与细沟流临界处流速和水深越大,经过水流冲刷后裸露出更多的碎屑(图 6),增大土壤表面粗糙度,加强对径流的阻滞作用^[29],水流流态更复杂,因此, f_c 和 Re_c 值增大, Fr_c 值减小。雨强不变的条件下,坡度增大, V_c 和 Fr_c 值增大, Re_c 和 f_c 值减小。与小坡度相比,大坡度条件下水流更为集中,水流更急,跌坎更深(图 6),因此, V_c 和 Fr_c 值增大, f_c 值减小。与流速相比,水深减小的幅度更大,因此, Re_c 值减小。表明坡度和雨强主要通过影响坡面临界流速,改变坡面形态,进而影响细沟发生的临界水流流态和水流阻力。

(a) 5° 30 mm/h (b) 5° 90 mm/h (c) 20° 30 mm/h



注:实线圆圈标记的为跌坎;虚线圆圈标记的为碎屑。

图 6 不同试验条件下临界处坡面形态

4 结 论

在不同侵蚀阶段,坡度和雨强对片流和细沟流的水力学特性影响存在差异。在片流阶段,流速、水深和雷诺数主要受坡度影响,而在细沟流阶段,流速、水深和雷诺数主要受雨强影响。片流和细沟流弗劳德数受坡度的影响程度均大于雨强。片流流态多为缓层流,细沟流流态多为急过渡流。由于在不同侵蚀阶段径流所受坡面阻力主要形式不同,导致坡度和雨强对片流阻力系数产生抑制作用,而对细沟流阻力系数产生促进作用。

坡度和雨强通过影响饱和土壤坡面细沟发生的临界流速,改变坡面形态,进而影响细沟发生的临界水流流态和水流阻力。

参考文献:

- [1] 何毓蓉.中国紫色土(Ⅱ)[M].北京:科学出版社,2003:2211.
- [2] 刘纪根,丁文峰,黄金权.长江流域水土保持科学研究进展及展望[J].长江科学院院报,2021,38(10):54-59.
- [3] 邢行,陈晓燕,韩珍,等.饱和与非饱和黄绵土细沟径流水动力学特征及侵蚀阻力对比[J].水土保持学报,2018,32(3):92-97.
- [4] 唐克丽.中国土壤侵蚀与水土保持学的特点及展望[J].水土保持研究,1999,6(2):3-8.
- [5] 刘俊娥,王占礼,高素娟,等.黄土坡面片蚀过程动力学机理试验研究[J].农业工程学报,2012,28(7):144-149.
- [6] Zhang G H, Hu J J. Effects of patchy distributed artemisia capillaris on overland flow hydrodynamic characteristics[J]. International Soil and Water Conservation Research, 2019, 7(1): 81-88.
- [7] Sun J M, Fan D X, Yu X X, et al. Hydraulic characteristics of varying slope gradients, rainfall intensities and litter cover on vegetated slopes[J]. Hydrology Research, 2018, 49(2): 506-516.
- [8] Wang J W, Zhang K D, Yang M Y, et al. The effect of roughness and rainfall on hydrodynamic properties of overland flow[J]. Hydrology Research, 2019, 50(5): 1324-1343.
- [9] Zhuang X H, Wang W, Ma Y M, et al. Spatial distribution of sheet flow velocity along slope under simulated rainfall conditions[J]. Geoderma, 2018, 321: 1-7.
- [10] 郑粉莉.发生细沟侵蚀的临界坡长与坡度[J].中国水土保持,1989(8):23-24.
- [11] 李君兰,蔡强国,孙莉英,等.细沟侵蚀影响因素和临界条件研究进展[J].地理科学进展,2010,29(11):1319-1325.
- [12] 辜婧瑶,李梦雨,魏玉杰,等.降雨条件下闽西花岗岩红壤坡面细沟发生临界水动力学特性[J].中国水土保持科学,2020,18(4):62-72.
- [13] Brunton D A, Bryan R B. Bill network development and sediment budgets[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2000, 25(7): 783-800.
- [14] Merz W, Bryan R. Critical conditions for rill initiation on sandy loam Brunisols: Laboratory and field experiments in southern Ontario, Canada [J]. Geoderma, 1993, 57(4): 357-385.
- [15] Salman M, Manochehr G, Ali J. Effect of rock fragments cover on distance of rill erosion initiation and overland flow hydraulics[J]. International Journal of Soil Science, 2012, 7(3): 100-107.
- [16] 吴克宁,赵瑞.土壤质地分类及其在我国应用探讨[J].土壤学报,2019,56(1):227-241.
- [17] Huang Y H, Chen X Y, Li F H, et al. Velocity of water flow along saturated loess slopes under erosion effects[J]. Journal of Hydrology, 2018, 564: 304-311.
- [18] Han Z, Chen X Y, Li Y H, et al. Quantifying the rill-detachment process along a saturated soil slope[J]. Soil and Tillage Research, 2020, 204(1): e104726.
- [19] 陈鹏,周盈颖,冯萍,等.重庆短时强降雨时空特征分析[J].气象科技进展,2021,11(2):39-45.
- [20] 蔡强国.坡面细沟发生临界条件研究[J].泥沙研究,1998(1):54-61.
- [21] Abrahams A, Parsons A, Luk S. Field measurement of the velocity of overland flow using dye tracing[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 1986, 11(6): 653-657.
- [22] Liu H Q, Yang J H, Diao Y F, et al. The hydrodynamic mechanism of rainfall runoff from loess slopes treated with incorporated straw[J]. Land Degradation and Development, 2021, 32(14): 3812-3822.
- [23] 王志刚,郑粉莉,李靖.不同近地表水文条件下紫色土坡面土壤侵蚀过程研究[J].水土保持通报,2007,27(6):9-11,79.
- [24] 温永福,高鹏,穆兴民,等.黄土高原丘陵沟壑区梯田边坡侵蚀过程对雨强的响应[J].泥沙研究,2017,42(6):46-51.
- [25] 吴淑芳,张永东,卜崇峰.黄土细沟侵蚀演化过程及其水力学特性试验研究[J].泥沙研究,2015(6):72-80.
- [26] 张科利,秋吉康宏.坡面细沟侵蚀发生的临界水力条件研究[J].土壤侵蚀与水土保持学报,1998(1):42-47.
- [27] 雷阿林,唐克丽.黄土坡面细沟侵蚀的动力条件[J].土壤侵蚀与水土保持学报,1998(3):40-44.
- [28] Tao T T, Chen S Q, Chen X Y. Rill flow velocity affected by the subsurface water flow depth of purple soil in Southwest China[J]. Journal of Mountain Science, 2022, 19(3): 704-714.
- [29] 陶婷婷,陈晓燕,陈仕奇,等.饱和紫色土初始态和稳定态细沟水力学特征研究[J].土壤学报,2022,59(1):129-138.