

雨强和坡度对红壤坡面产流产沙及侵蚀动力过程影响

田培^{1,2}, 仇浩然^{1,2}, 冯宇^{1,2}, 吴浩研^{1,2}, 伍铁牛^{1,2}, 刘目兴^{1,2}

(1.地理过程分析与模拟湖北省重点实验室, 武汉 430079; 2.华中师范大学 城市与环境科学学院, 武汉 430079)

摘 要:采用人工模拟降雨试验, 研究不同雨强(40, 66, 80 mm/h)和坡度(5°, 10°, 15°)条件下, 湖北省武汉市蔡甸区红壤坡面流速、产流产沙时空变化及水动力学过程。使用长 2.5 m, 宽 0.5 m, 高 0.3 m 的可调坡度径流土槽, 每场降雨试验在槽子底端出口开始产流后持续 60 min, 每 3 min 收集一次径流泥沙样品。结果表明: 相同坡度下, 坡面平均产流率和产沙率均随雨强增加而增大; 产流率在降雨初期波动增长, 随降雨时间延长而逐渐稳定; 产沙率在降雨初期急剧上升, 随后稍有下降并逐渐趋于平稳。坡度从 5° 增加到 15°, 雨强为 40, 66, 80 mm/h 下的平均产流率依次增加 24%, 22% 和 15%, 平均产沙率依次增加 89%, 60% 和 84%。随雨强或坡度增加, 流速均增大, 且雨强对流速的影响较坡度更大; 流速沿坡长方向呈增大趋势, 且细沟流速是细沟间的 1.33~2.10 倍。66 mm/h, 10° 条件下, 坡面形成细沟并发生明显下切和溯源侵蚀。相同雨强下, 径流剪切力随坡度增加而增大、达西—韦斯巴赫阻力系数随坡度增加而减小。坡面径流属于层流且为急流, 水动力学参数和侵蚀产沙率的拟合方程表明, 弗劳德数和流速可以较好地模拟坡面产沙率。研究结果可为南方红壤区水土流失治理提供参考。

关键词:红壤; 雨强; 坡度; 产流产沙; 水动力参数; 时空变化

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2020)06-0001-08

Effects of Rainfall Intensity and Slope Gradient on Runoff and Sediment Production and Erosion Dynamic Process on Red Soil Slope

TIAN Pei^{1,2}, QIU Haoran^{1,2}, FENG Yu^{1,2}, WU Haoyan^{1,2}, WU Tieniu^{1,2}, LIU Muxing^{1,2}

(1.Key Laboratory for Geographical Process Analysis & Simulation of Hubei Province, Wuhan 430079, China;

2.College of Urban and Environmental Sciences, Central China Normal University, Wuhan 430079, China)

Abstract: The overland flow velocity, temporal and spatial variations of runoff and sediment yield, and hydrodynamic processes on the red soil slope in Caidian, Wuhan, Hubei Province were studied under different simulated rainfall intensities (40 mm/h, 66 mm/h, 80 mm/h) and slope gradients (5°, 10° and 15°). The soil sample was filled in a steel trough (2.5 m in length, 0.5 m in width, and 0.3 m in height) with adjustable slope gradient. Each rainfall simulation lasted for 60 minutes after the generation of runoff at the outlet of the trough, and runoff and sediment samples were collected every 3 minutes. The results showed that under the same slope gradient, the average runoff and sediment yield increased with the increase of rainfall intensity; the runoff increased with fluctuation in the early stage of the rainfall, and gradually became stable, while the sediment yield rate increased sharply at the beginning of the rainfall, then decreased slightly, and gradually stabilized; with the slope gradient increasing from 5° to 15°, the average runoff rates at rainfall intensities of 40 mm/h, 66 mm/h and 80 mm/h increased by 24%, 22% and 15%, and the mean sediment yields increased by 89%, 60% and 84%, respectively; with the increase of rainfall intensity or slope, runoff velocity increased, and the effect of rainfall intensity on velocity was greater than that of slope gradient; mean flow velocity increased along the downslope direction, and the velocity in rills was 1.33~2.10 times of that in the interrill; under the condition of 66 mm/h and 10°, rills formed on the slope surface and obvious downcutting erosion and headward erosion occurred; under the same rainfall intensity, the runoff shear force increased and the Darcy-Weisbach resistance coefficient decreased with increase of slope gradient. Under the experimental conditions, the overland flow belonged to laminar flow and supercritical flow. The fitting equation of

收稿日期: 2020-04-03

修回日期: 2020-04-28

资助项目: 国家自然科学基金(41907061; 41701323); 长江科学院水利部山洪地质灾害防治工程技术研究中心开放基金(CKWV2019761/KY); 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室基金课题(A314021402-2005)

第一作者: 田培(1988—), 男, 湖北大悟人, 博士, 讲师, 主要从事土壤侵蚀与水土保持、水文水资源研究。E-mail: tianpei@mail.ccnu.edu.cn

hydrodynamic parameters and sediment yield rate indicates that Froude number and flow velocity can well simulate the sediment production rate. The results of this study can provide the reference for the control of soil erosion in the red soil area of southern China.

Keywords: red soil sloping land; rainfall intensity; slope gradient; runoff and sediment yield; hydrodynamic parameters; temporal and spatial variation

根据最近一次(2013 年)全国水利普查公报数据,湖北省现有水土流失面积 3.55 万 km^2 , 约占全省国土面积的 19.8%, 是全国水土流失严重的省份之一^[1]。水土流失导致湖北省耕地面积不断减少, 耕地破碎化严重, 影响农业的可持续发展^[2]。降雨强度和坡度是影响坡耕地土壤侵蚀的两个重要因素, 故研究不同雨强和坡度条件下湖北省红壤坡面侵蚀过程, 可为其水土流失防治提供科学依据。国内外诸多学者^[3-6]通过不同坡度和雨强组合下的人工模拟降雨试验, 来研究坡面侵蚀过程中的产流产沙特征。坡面径流流速会随雨强和坡度的改变而变化, 进而影响径流携沙能力^[7-9]。除流速之外, 雷诺数、弗劳德数、达西-韦斯巴赫阻力系数、曼宁粗糙系数、剪切力、水流功率、单位水流功率等水动力学特征也可以模拟坡面侵蚀过程^[10-12]。土壤类型是影响坡面侵蚀过程的重要因素, 目前相关研究主要集中于西北黄土区、东北黑土区及南方红壤区^[13-14]。洪斌等^[15]对云南红壤坡面土壤侵蚀研究结果表明, 坡面侵蚀模数与雨强、坡度和坡长的相关关系显著。常松涛等^[16]对福建花岗岩红壤坡面的研究表明, 雨强与产流时间、径流率、侵蚀率呈现极显著相关关系。徐铭泽等^[17]通过研究江西不同母质红壤的侵蚀状况, 发现在相同试验条件下产流速率: 花岗岩红壤 > 红砂岩红壤 > 第四纪红壤, 且不同母质红壤的侵蚀程度不同。胡尧等^[18]对四川地区红壤坡面的研究结果表明, 相同坡度下, 径流强度随雨强的增加而增大, 平均入渗率随雨强的增加先增大后减小。王蕙等^[19]针对浙江地区的红壤坡面开展了模拟试验研究, 结果表明该地区红壤坡面产沙强度、次降雨产沙量随雨强和坡度增加而增大。

综上所述, 南方红壤区分布广泛, 对于云南、福建、江西、四川、浙江等地的红壤侵蚀特征, 已有诸多成果; 但不同区域红壤的成土条件具有明显差异, 其侵蚀特征亦不完全相同。例如, 云南地区红壤因红土化作用程度较低, 颗粒组成中的黏粒占比相对较小(约 47%), 土壤孔隙也较大较多, 且土壤发育于地势较高的云贵高原, 含水量相对较低^[20]。福建东南部的地带性土壤为第四纪赤红壤, 其矿物的富铝化程度较深, 物质的淋溶作用较强, 粒度组成以粉砂为主(65% ~ 70%)^[21]。湖北省红壤主要分布于鄂东南海拔 800 m 以

下低山、丘陵或垅岗, 鄂西南(包括武汉)海拔 500 m 以下丘陵、丘陵台地或盆地, 但相关研究主要集中在鄂东南红壤区^[22]。湖北省武汉市蔡甸区位于江汉平原周边的浅丘区, 本研究以当地广泛分布的石英砂岩棕红壤为研究对象, 通过人工模拟降雨试验, 探究不同雨强和坡度条件下, 降雨产流和侵蚀产沙随时间变化特征, 坡面流速的时空变化特征以及坡面侵蚀的水动力学机理, 以期深入揭示该区域红壤坡面侵蚀机理, 并为该区域土壤侵蚀防治提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验在华中师范大学城市与环境科学学院野外专业实习基地—湖北省武汉市蔡甸区西湖流域水土保持科技示范园(30°32'22"N, 113°57'52"E)内进行。示范园位于江汉平原周边的浅丘区, 土壤以棕红壤为主, 属于亚热带季风气候区, 雨热同期, 降水充沛, 多年平均气温 15~17℃, 多年平均降水量 1 269 mm 且主要集中在 5—10 月^[23]。

1.2 试验设计

湖北省内山地丘陵分布广泛, 坡耕地面积较大。本试验根据坡耕地坡度特征, 结合试验条件将坡度设置为 5°, 10°, 15°; 根据试验地区的实际情况, 设计 3 个雨强(40, 66, 80 mm/h), 共计 9 种试验组合, 每场试验重复 2 次。采集试验所需土样, 用环刀法测定土样的含水量和容重。土壤试验前过 2 mm 的筛, 均匀混合。填土前, 将土槽调至水平, 在土槽底部均匀装填 0.1 m 厚的天然沙, 并在沙子表面铺上透水纱布, 保证土壤能够有良好的透水性。试验用土分层填入, 每层填土 5 cm, 边填充边压实并适当洒水, 累积填土厚度 0.15 m。试验前并控制每场试验的初始条件一致, 控制土壤容重及含水量和采样时测得数据相近。每次降雨试验之前, 静置两个小时, 使得添加的水分充分下渗, 使土壤内部水分达到饱和。随后在变坡土槽上遮盖塑料布, 打开降雨器, 使降雨系统趋于稳定, 使用 10 个量筒进行雨强率定, 以辅助验证模拟降雨系统的雨强精度, 确保雨强达到试验标准并保证降雨的均匀度。在达到试验条件后, 掀开塑料布, 开始试验。试验从槽子下端出口产流后开始计时, 连续降雨 1 h。

1.3 试验材料

1.3.1 试验用土 本试验用土为取自湖北省武汉市蔡甸区水土保持科技园内及周边的棕红壤坡耕地,取样时间为 2019 年 7 月。土壤样品采集自坡耕地表层 0—20 cm 的土壤,黏性较强,颗粒较细,淋溶强,天然容重约 1.20 g/cm^3 ,平均质量含水率约 6.0%。

1.3.2 试验装置 模拟降雨试验所用的可调坡钢槽长 2.5 m,宽 0.5 m,高 0.3 m。土槽底部均匀钻孔,使水分可以自由下渗。土槽尾部设置“V”收集口,用于收集模拟降雨试验产生的径流泥沙样品。模拟降雨装置为南林电子公司出产的 NLJY-10 型人工模拟降雨系统,降雨器可根据控制室内的开关调控小雨(40 mm/h)、中雨(66 mm/h)和大雨(80 mm/h),喷头距地面垂直高度 7.0 m,降雨覆盖面积为 $10 \text{ m} \times 10 \text{ m}$,降雨均匀度在 85% 以上,通过压力泵和喷头组合控制雨量和降雨时长,能够达到本试验所需要的要求。试验装置如图 1 所示,模拟降雨试验于 2019 年 7—8 月在示范园进行。

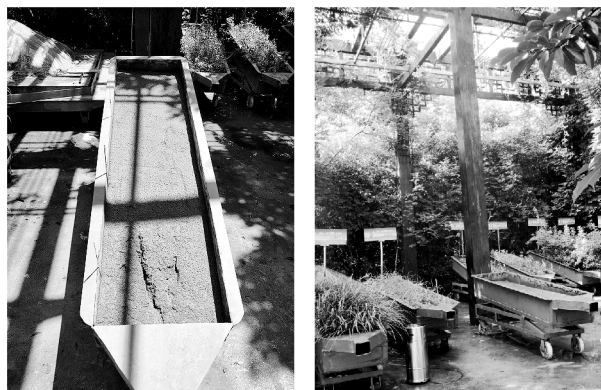


图 1 试验装置示意图

1.4 试验步骤

正式降雨开始后,记录每次试验的产流时间,观察侵蚀过程,坡面产流后使用 1 L 的塑料量筒收集径流泥沙样品,每 3 min 采一次样品,每场试验共计 20 个样品。依据试验过程中的产流量变化不断调整接样时间,控制在 10~20 s。土槽分为 3 个坡段:上坡段(0.125~0.875 m)、中坡段(0.875~1.625 m)、下坡段(1.625~2.375 m),当水流稳定后,在上、中、下 3 个坡段采用染色剂示踪法(KMnO_4)测定坡面径流流速。在水流经过标志签时加入染色剂,利用秒表记录染色剂到达下一个相邻标志签的准确时间,来模拟坡面产流时水流顺坡流动的水文过程,得到水流的平均表层流速。当细沟产生时,分别测量细沟内流速和细沟间流速。降雨试验结束后,称量容器内的样品质量,将样品静置 24 h 使其充分澄清后,倒掉上清液,将容器里的泥沙全部转入铝盒内,采取烘干法测定泥

沙干重。

1.5 试验数据分析方法

坡面径流水力学参数的计算方法^[10]如下:

(1) 细沟间流速计算:以 4 个标志签划分的 3 个坡段为固定距离(0.75 m),记录 KMnO_4 溶液流过相邻两个标志签的时间,两者的比值为细沟间的流速。

$$V_i = \frac{0.75}{t} \quad (1)$$

式中: V_i 为当次细沟间的径流流速(m/s); t 为当次 KMnO_4 溶液流过相邻两个标志签的时间(s)。

(2) 细沟内流速计算:以当次测量的细沟长度为距离,记录溶液流过细沟的时间,两者的比值为细沟间的流速。

$$V_r = \frac{s}{t'} \quad (2)$$

式中: V_r 为当次细沟内的径流流速(m/s); s 为当次细沟的长度(m); t' 为当次 KMnO_4 溶液流过细沟的时间(s)。

(3) 产流率计算:根据接样产流量和接样时间比值计算得来。

(4) 产沙率计算

$$M = \frac{M'}{t} \quad (3)$$

式中: M 为产沙率(g/min); M' 为当次的产沙量(g); t 为接样时间(min);相邻两次的产沙率取平均值,得到 20 个数据。

根据以上数据,联系坡度和雨强对降雨产流率和侵蚀产沙率的关系,利用相关分析法,分析产流率和侵蚀产沙率随时间变化过程特征以及坡面径流流速随时间和空间变化的特征。

(5) 坡面平均径流深计算:根据以下公式测得每场试验 20 个径流深数据,取平均值作为该场次试验的平均径流深。

$$h = \frac{Q}{Vbt} \quad (4)$$

式中: h 为坡面径流深(m); Q 为 t 时间内的径流量(m^3); t 为径流取样历时(min); V 为坡面流平均流速(m/min); b 为过水断面宽度(m)。

(6) 地表径流沿坡面梯度方向导致坡面侵蚀的力称为径流剪切力。径流剪切力是造成径流分离、土壤迁移搬运的主要动力,为土壤侵蚀提供物质来源,造成土壤流失。根据以下公式测得每场试验 20 个径流剪切力数据,取平均值作为该场次试验的平均径流剪切力。

$$\tau = \gamma R \sin \beta \quad (5)$$

式中: τ 为坡面单位面积上径流剪切力(N/m^2); γ 为水体容重,一般取 $9.8 \times 10^3 \text{ N/m}^3$; R 为径流的水力

半径,可用径流深 h 近似代替(m); β 为坡度($^{\circ}$)。

(7) 雷诺数:用以判断流态,层流、紊流或过渡流。

$$Re = \frac{10000VR}{v} \quad (6)$$

$$v = 0.01775 / (1 + 0.0337t + 0.0000221t^2) \quad (7)$$

式中: V 为径流平均流速(m/s); R 为径流的水力半径,可用径流深 h 近似代替(m); v 为水流运动粘滞系数。

(8) 弗劳德数:用以判断流型,急流还是缓流。

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gh}} \quad (8)$$

式中: V 为径流平均流速(m/s); h 为径流深(m); g 为重力加速度(m/s²)。

(9) 达西—韦斯巴赫阻力系数

$$f = \frac{8ghJ}{V^2} \quad (9)$$

式中: g 为重力加速度(m/s²); h 为坡面径流深(m); J 为水流能坡,一般取 $J = \sin\beta$ (β 为坡面坡度); V 为径流平均流速(m/s)。

(10) 曼宁粗糙系数

$$n = \frac{R^{2/3} S^{1/2}}{V} \quad (10)$$

式中: R 水力半径,可用径流深 h 近似代替(m); S 为坡度(弧度); V 为径流平均流速(m/s)。

(11) 水流功率

$$W = \tau V \quad (11)$$

式中: W 为水流功率(J/s); τ 为坡面单位面积上径流剪切力(N/m²); V 为径流平均流速(m/s)。

(12) 单位水流功率

$$P = Vj \quad (12)$$

式中: V 为径流平均流速(m/s); j 为能量梯度,一般取 $j = \cot\beta$ (β 同上)。

2 结果与分析

2.1 产流产沙过程

不同雨强和坡度条件下,试验过程中坡面产流率随降雨历时变化的过程如图 2 所示。总体上看,坡面产流的时间变化趋势在不同雨强和坡度条件下基本一致,平均产流率均随降雨历时延长而缓慢增长,在 8~15 min 的区间内会有小范围的波动,最后达到一个稳定的状态直至降雨结束(图 2)。在坡度 5° 和雨强 40 mm/h 的条件下,产流率非常稳定;在坡度 15° 雨强 80 mm/h 的条件下,产流率在试验后期依然有增大趋势。对比可知,在坡度较缓、雨强较小的条件下,平均产流率相对稳定;而在坡度较陡、雨强较大的条件下,平均产流率波动较大,不易稳定。

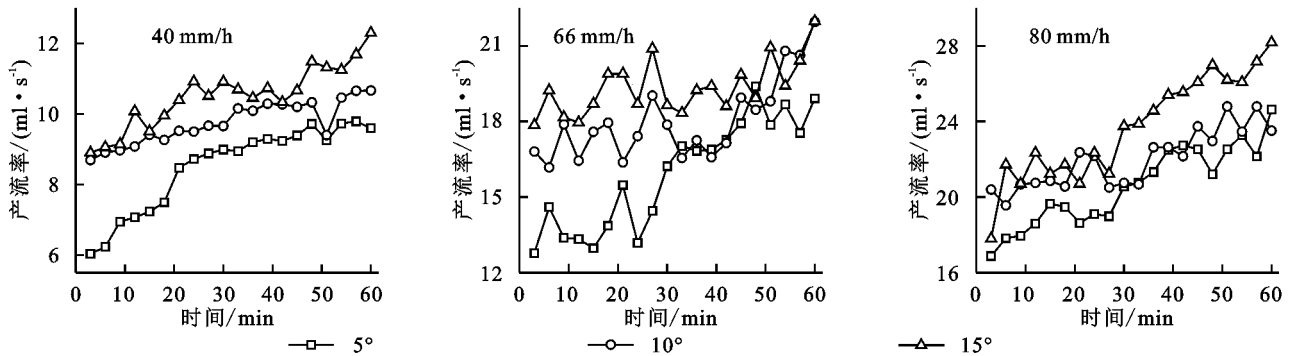


图 2 不同雨强和坡度下红壤坡面平均产流率随时间变化过程线

在相同雨强条件下,随坡度增加,坡面入渗量减小致使更多降雨转化为坡面径流,同时坡度增加致使坡面水流速度加快,单位时间内坡面径流量越大。在相同雨强条件下,平均产流率会随着坡度的增大而增大。随着降雨时间的增加,在产流初期(0~15 min)径流过程表现为波动增加过程,特别是大雨强下波动较为明显,15 min 以后径流量的波动趋于稳定,伴有较小的波动,一直持续到降雨结束;这与 Donjadee 等^[24]认为的不同雨强下产流达稳定的时间不同,大雨强下通常需要更多的时间才能达到平稳状态的结论相一致。

不同雨强和坡度条件下,试验过程中坡面产沙率随降雨历时变化的过程如图 3 所示。由图 3 可知,降

雨初期,红壤坡耕地的侵蚀产沙率急剧上升,在到达最高点之后会稍有下降,随后保持平稳状态直到试验结束。在降雨开始时,由于下渗作用,径流量小,所以携沙能力也较小。随着试验时间的增加,土壤含水量趋于饱和,径流量逐渐增大,其携沙能力也相应变强,所以产沙量也会随之增加。当径流量逐渐趋于平稳时,坡面也产生了相对稳定的细沟,坡面土壤侵蚀逐渐变为细沟侵蚀,所以产沙量趋于稳定。

对于不同条件下,产沙量变化的临界坡度,梁志权等^[25]所给出的结论是在雨强为 50 mm/h 时,在 20°附近存在一个侵蚀产沙量的临界坡度,并且以此论证了不同的雨强大小会影响侵蚀的临界坡度值。王丽园等^[26]认为产沙结果的差异性变化主要由于坡

度变化会影响到垂直坡面分力与滞雨量的不同,从而改变坡面的侵蚀方式,影响产沙过程变化,雨强也对产沙量有一定的影响,小坡度条件下,坡面稳定性较好,坡度对产沙量的影响程度不如雨强,这也与前文

所提到的试验结果相佐证。钟壬琳等^[27]的研究表明红壤坡面侵蚀产沙总量有随降雨强度和坡度增加而增大的趋势,在降雨强度和坡度较小时,产沙量变化幅度较大,这与本试验的结果相吻合。

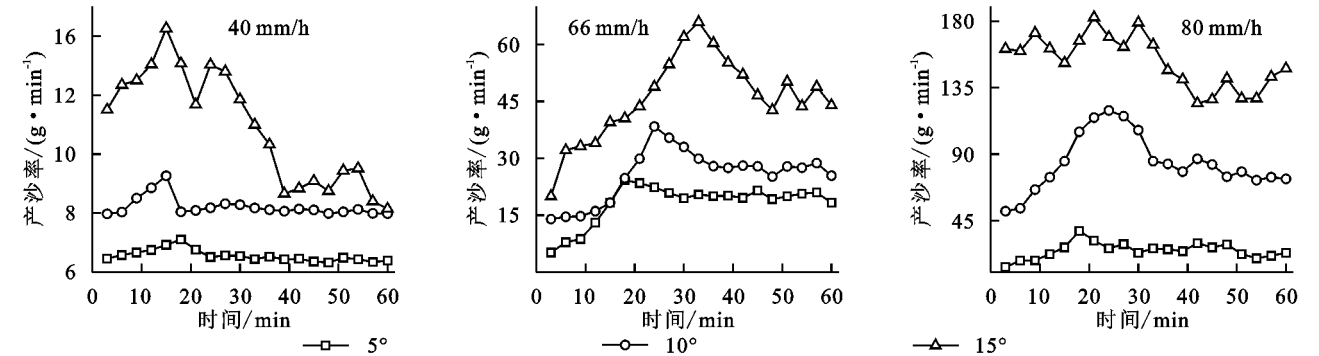


图 3 不同雨强和坡度下红壤坡面平均产沙率随时间变化过程线

2.2 坡面流速时空分异特征

由表 1 可知,坡度和雨强都会对坡面降雨产流后的平均流速产生影响,且流速与坡度和雨强均呈正相关关系。试验前期的降雨到达土壤表层后大多下渗,几乎不形成地表径流。随着降雨时间延长,降雨产生的坡面径流不断冲刷土壤表面,并不断增加土壤的含水量,流速逐渐增大。因此在同一场试验中,细沟内汇集高处水流,增加了坡面产流的动能和势能,此外经过径流的反复打磨,细沟内壁比较光滑,减小了细沟内壁对于坡面产流的摩擦力,因此细沟内产流流速>细沟间的产流流速。

表 1 不同试验条件下的坡面平均流速

坡度/ (°)	坡面平均流速/(m·s ⁻¹)			细沟平均流速/(m·s ⁻¹)		
	40 mm/h	66 mm/h	80 mm/h	40 mm/h	66 mm/h	80 mm/h
5	0.101	0.132	0.170	0.145	0.192	0.228
10	0.104	0.156	0.198	0.143	0.235	0.211
15	0.152	0.176	0.211	—	0.233	0.267

坡面平均流速随着坡度和雨强的增大呈增大趋势(图 4)。随着坡度的增大,流速的平均增长率为 0.4%~17%,雨强越大增长趋势越稳定;而随着雨强的增大,坡面流速的平均增长率为 20%~50%,且增长幅度较大。因此,相对于坡度,雨强对坡面的流速影响更大,这与杨大明等^[28]对坡面薄层水流流速的研究结论一致。

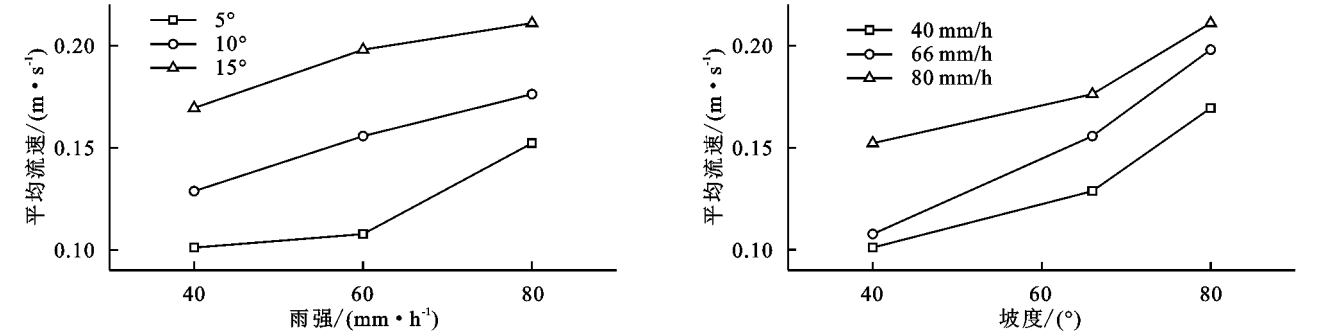


图 4 坡面平均流速随坡度和流量的变化过程

不同坡段平均流速呈现上坡段<中坡段<下坡段的特征。试验前期,降雨增大了土壤的含水量,薄层水流沿坡面向下汇集,水流受到的重力沿坡面向下方向的分力对汇流的运动起到了加速作用,使得流速沿坡面向下呈增加趋势,故下坡段流速最大。上坡段由于降雨下渗较多,且几乎没有形成细沟,因此流速相对较慢;中坡段随着降雨历时延长逐渐产生细沟侵蚀,其流速也伴随着细沟的产生逐渐加快。

由图 5 可知,上坡段的坡面流速相比于中坡段、下坡段的坡面流速比较稳定,起伏相对较少,相邻两个流速相差不超过 0.025 m/s。中坡段和下坡段土

壤的侵蚀更为严重,除了雨强和坡度的影响外,细沟的发育也影响着坡面水流流速,细沟的产生短时间内增加了该坡段平均流速。随着细沟发育,坡面细沟内和坡面表面的粗糙程度不断变化,径流的阻力不断增大,导致部分能量被消耗,流速在部分时间段突然减小。随着坡面发生溯源侵蚀,细沟内部不断下切,流速进而增加。坡面平均流速的变化随着细沟形态的变化而变化,因此中坡段和下坡段的流速随时间波动较大。随着降雨时间的增加,细沟首先在下坡段开始出现,径流雨水不断地向细沟汇集,细沟开始发生下切侵蚀和溯源侵蚀,向中坡段以及上坡段发展。本试验所

观测到的试验现象与吴桐嘉等^[29]的试验结果相符。径流的汇入使得细沟内流速明显增快,细沟下切造成深度不断增加,宽度不断变大,坡面侵蚀不断加剧。

随后细沟的发育形态有 3 种情况:第一,细沟内径流不断打磨细沟内壁,流速在摩擦力减小的情况下

持续增大;第二,细沟仅仅向横断面的下部发育,在细沟出口处产生断崖式高差,这样由于受到细沟出口的坡面阻力,细沟内流速不增反降;第三,细沟仅仅向下坡段水平扩展,下切侵蚀不明显,沿坡面向下,细沟逐渐消失,细沟内流速转变为细沟间流速,流速降低。

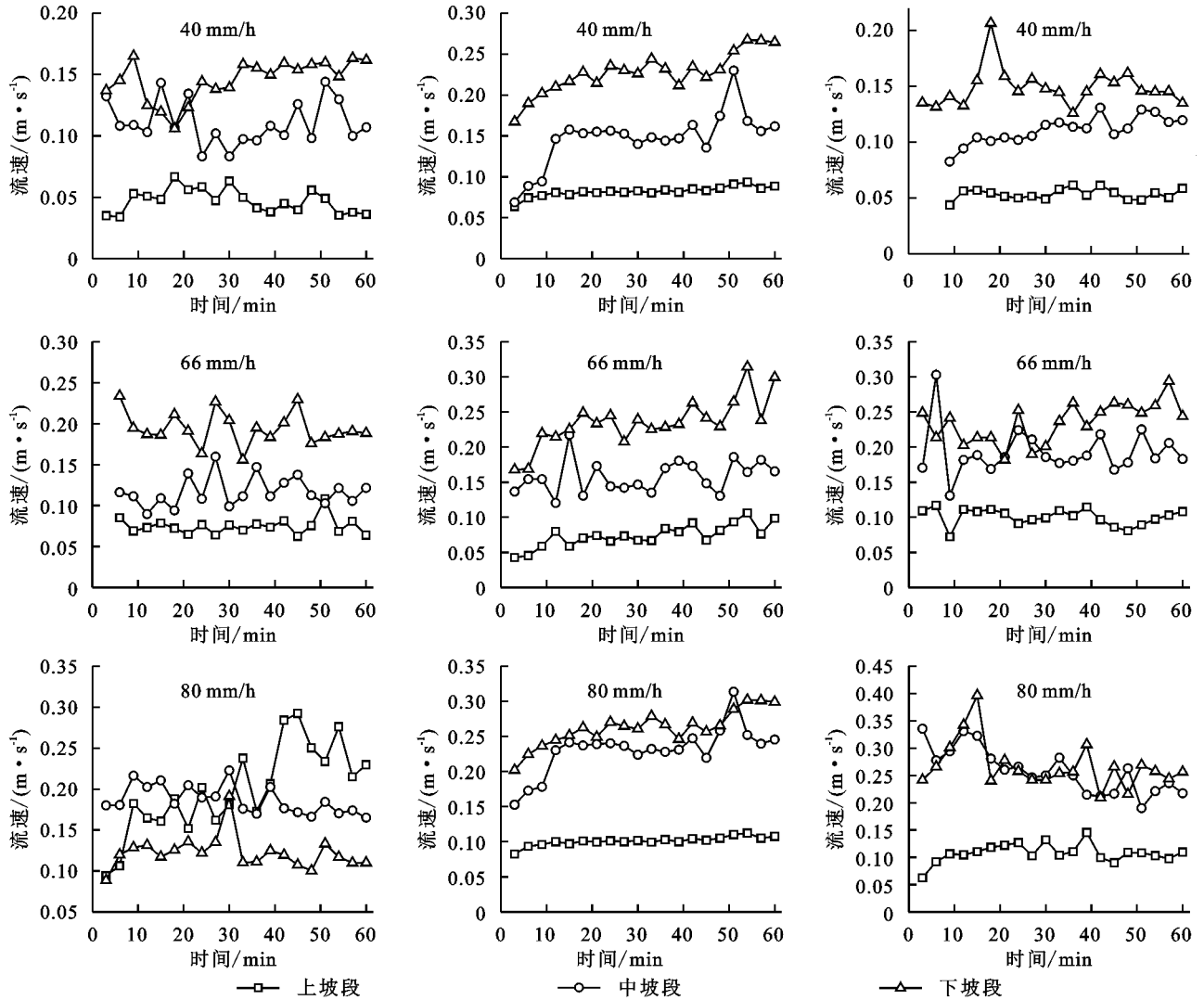


图 5 坡面不同坡段流速随时间变化过程线

2.3 坡面径流水力学特性

试验条件下的坡面径流水力学参数见表 2。结果表明,Re 在不同坡度条件下差异明显。相同雨强条件下,Re 随坡度的增加而增大。相同坡度条件下,Re 又随着雨强的增加而增大。试验条件下的 Re 均小于 500,参考明渠水流划分标准可认为降雨所产生的径流都属于层流。Fr 均大于 1,说明试验条件下的坡面径流属于急流状态。相同雨强条件下,Fr 随坡度的增加而增大。这是因为坡度的增大,导致坡面径流流速增加,同时径流深减小,Fr 增大。相同坡度条件下,Fr 随雨强的增加而增大。 f 和 n 是可以用来反映试验过程中坡面径流阻力特征的水力参数。相同雨强条件下, f 随坡度的增大而减小。坡度增大,径流的动能增加,径流流速加快,因

此可以论证 f 减小的原因。 n 可以反映土壤表面形态,在相同坡度条件下,随雨强的增大 n 也随之增大。雨强增加,径流量增大,雨滴溅蚀愈发严重,坡面形成的细沟发生溯源侵蚀和下切侵蚀明显,导致坡面土壤表面形态更加复杂,因此 n 增大。

2.4 坡面侵蚀的水动力机制

将每场降雨试验得到的 20 个侵蚀产沙率和水动力学参数分别取平均值,得到该场试验的平均侵蚀产沙率和平均水动力学参数,把所有场次试验的平均侵蚀产沙率和平均水动力学参数进行拟合,见图 6。

相同雨强条件下, τ 随坡度的增加而增大,且 τ 和侵蚀产沙率之间呈显著线性正相关关系(图 6)。坡度的增加使得坡面径流流速不断增大,径流量也随

着雨强的增加而增大,进而导致 τ 的增大。 τ 增大,使得导致土壤颗粒分散的有效 τ 增大,剥离的土壤越多,造成的侵蚀就越严重,这与白永会等^[30]的结果相一致。整体而言,侵蚀产沙率和 V, τ, W, P, Re, Fr 均呈正相关关系,侵蚀产沙率随流速的增大而增大, V 增大的同时, τ 随之增大,侵蚀现象也会愈发严重。

侵蚀产沙率和 f, n 呈负相关关系。侵蚀产沙率的增加需要克服土壤抗侵蚀能力带来的阻力, f 越大,证明坡面径流所消耗的能量就越大,所造成的泥沙搬运量就越少。根据拟合效果 R^2 来看: $Fr > V > f > Re > W > \tau > p > n$, 可以认为,本试验条件下 Fr 可以更好地预测侵蚀产沙率的大小。

表 2 不同雨强和坡度条件下的坡面径流水力学参数

雨强/ (mm · h ⁻¹)	坡度/ (°)	平均流速/ (m · s ⁻¹)	雷诺数 (Re)	弗劳德数 (Fr)	达西—韦斯巴赫 阻力系数(<i>f</i>)	曼宁粗糙 系数(<i>n</i>)
40	5	0.101	33.373	1.832	0.421	0.014
	10	0.108	37.692	2.034	0.359	0.017
	15	0.152	41.225	2.329	0.250	0.019
66	5	0.129	62.468	1.915	0.279	0.012
	10	0.156	70.719	2.396	0.264	0.016
	15	0.176	75.896	2.783	0.199	0.016
80	5	0.170	80.654	2.545	0.189	0.011
	10	0.198	86.274	3.106	0.153	0.012
	15	0.211	90.204	3.503	0.115	0.013

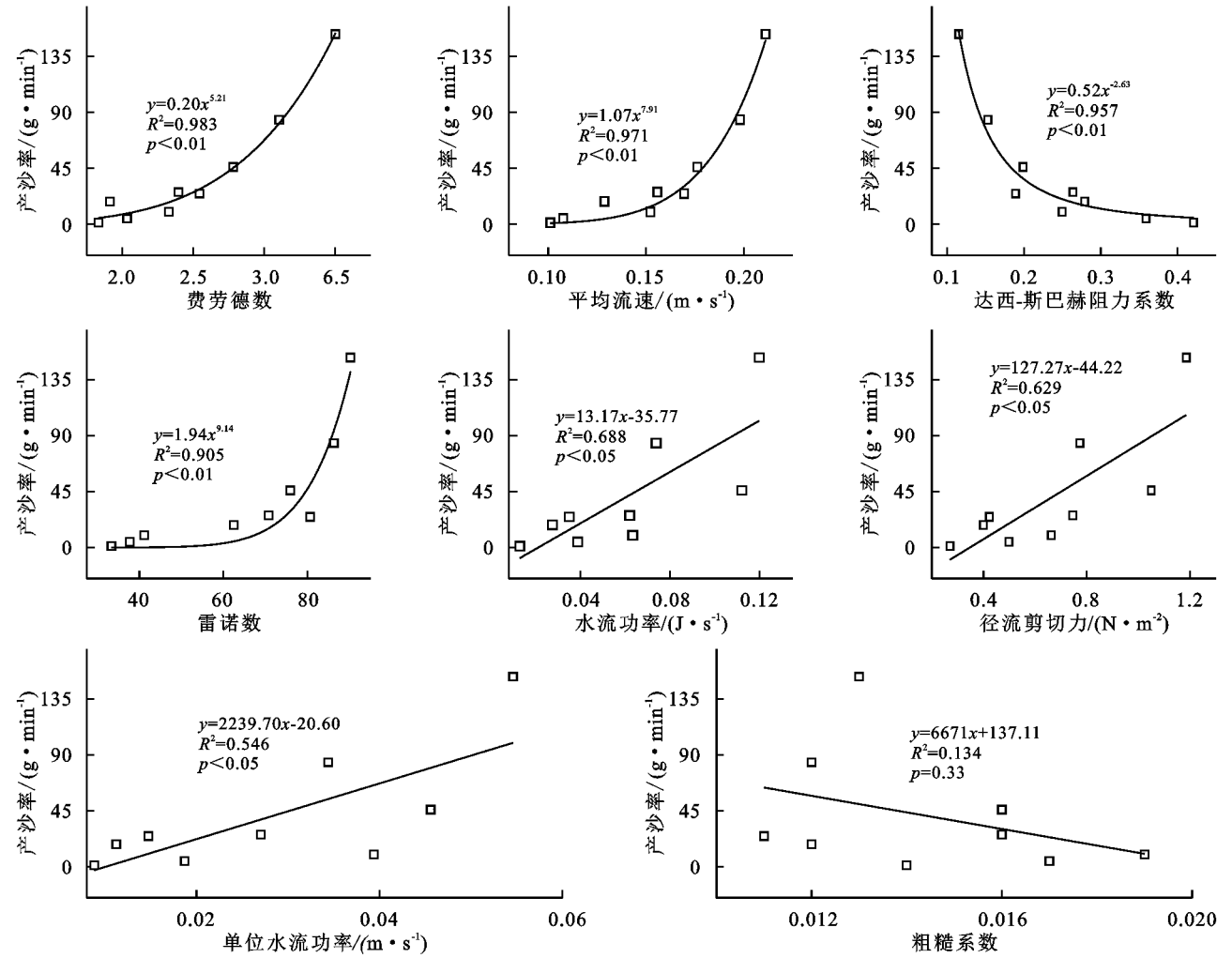


图 6 侵蚀产沙率与水动力学参数拟合关系

3 结论

(1) 坡度较缓,雨量较小的条件下,产流率随降

雨历时相对稳定;而在坡度较陡,雨量较大的条件下,产流率波动相对较大。在相同雨强条件下,坡面的产流率会随着坡度的增大而增大。坡度、雨强和产沙率

之间均呈正相关关系。

(2) 相比于坡度来说,雨强对坡面平均流速影响更大。相同雨强下,坡度从 5° 增大到 15° ,流速的平均增加率是 74%;相同坡度下,雨强从 40 mm/h 增大到 80 mm/h,流速的平均增长率是 61%。坡面平均流速的空间特征表现为:上坡段<中坡段<下坡段。同一坡段内,细沟流速大于细沟间流速,试验条件下细沟流速是细沟间流速的 1.33~2.10 倍。

(3) 试验条件下的坡面径流都属于层流,且为急流。相同雨强下,径流剪切力随坡度的增加而增大,达西-韦斯巴赫阻力系数随坡度增加不断减小。相同坡度下,雨强增加,径流量增大,导致坡面侵蚀严重且土壤表面形态更加复杂,曼宁粗糙系数不断增大。径流水动力学参数和产沙率拟合方程表明,弗劳德数、流速可以较好地预测坡面产沙率。

参考文献:

- [1] 吴遵雄.改革开放 40 年湖北省水土保持成效综述[J].中国水土保持,2018(12):35-37.
- [2] 陶荣,孔雪松,陈翠芳,等.“二调”以来湖北省耕地变化的时空特征及其驱动因子识别[J].水土保持研究,2019,26(6):290-295.
- [3] 张锐波,张丽萍,付兴涛.坡面径流含沙量随雨强和坡长的动态过程[J].水土保持学报,2018,32(1):80-84,90.
- [4] 付兴涛,姚璟.降雨条件下坡长对陡坡产流产沙过程影响的模拟试验研究[J].水土保持学报,2015,29(5):20-24.
- [5] Shi Zhihua, Fang Nufang, Wu Fengzhi, et al. Soil erosion processes and sediment sorting associated with transport mechanisms on steep slopes[J]. Journal of Hydrology, 2012,454/455(3):123-130.
- [6] Asadi H, Ghadiri H, Rose C W, et al. Interrill soil erosion processes and their interaction on low slopes[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2010,32(5):711-724.
- [7] 张祖莲,洪斌,黄英,等.降雨作用下红土型坡面径流特性与土壤侵蚀的关系研究[J].山地学报,2017,35(4):535-542.
- [8] 田培,潘成忠,许新宜,等.坡面流速及侵蚀产沙空间变异性试验[J].水科学进展,2015,26(2):178-186.
- [9] 田野.不同宽度条件下坡面流水动力学特性研究[D].福州:福建农林大学,2019.
- [10] 林庆明,丁文峰,张长伟,等.模拟降雨条件下红壤坡面侵蚀产沙水动力学特征[J].水土保持通报,2019,39(2):16-21.
- [11] 郝好鑫,杜一凡,曹丹妮,等.红壤缓坡水流动力学特性及其对侵蚀影响的试验研究[J].中国水土保持科学,2018,16(2):1-8.
- [12] 王添,任宗萍,李鹏,等.模拟降雨条件下坡度与地表糙度对径流产沙的影响[J].水土保持学报,2016,30(6):1-6.
- [13] 王爱娟,丁文峰,王万君.人工降雨和放水冲刷条件下紫色土坡面产流产沙特征分析[J].长江科学院院报,2015,32(3):31-34.
- [14] Zhao Xining, Wu Pute, Chen Xiaoli, et al. Runoff and sediment yield under simulated rainfall on hillslopes in the Loess Plateau of China[J]. Soil Research, 2013,51(1):50-58.
- [15] 洪斌,张祖莲,黄英,等.人工降雨条件下云南红土坡面土壤侵蚀特性[J].水土保持通报,2016,36(4):118-123.
- [16] 常松涛,黄少燕,查轩,等.雨强和植被覆盖度对红壤坡面产流产沙的影响[J].水土保持学报,2019,33(3):58-63.
- [17] 徐铭泽,杨洁,刘窑军,等.不同母质红壤坡面产流产沙特征比较[J].水土保持学报,2018,32(2):34-39.
- [18] 胡尧,侯雨乐,李懿.模拟降雨入渗对岷江流域红壤坡面产流产沙的影响[J].水土保持学报,2016,30(2):62-67,72.
- [19] 王蕙,胡秀君,山成菊.雨强和坡度对嵌套砾石红壤坡面产流产沙的影响[J].水土保持学报,2018,32(4):24-29.
- [20] 杨恒,黄英,周丹,等.干湿循环对云南红土渗透性的影响[J].科学技术与工程,2019,19(27):289-297.
- [21] 齐升吉,李志忠,陈秀玲,等.福建东南部第四纪红土沉积粒度特征及成因分析[J].华中师范大学学报:自然科学版,2010,044(4):696-701.
- [22] 张会茹,郑粉莉.不同降雨强度下地面坡度对红壤坡面土壤侵蚀过程的影响[J].水土保持学报,2011,25(3):40-43.
- [23] 赵莎.武汉市蔡甸区生态功能区划研究[D].武汉:湖北大学,2014.
- [24] Donjadee S, Chinnarasri C. Effects of rainfall intensity and slope gradient on the application of vetiver grass mulch in soil and water conservation[J]. International Journal Sediment Research, 2012,27(2):168-177.
- [25] 梁志权,张思毅,卓慕宁,等.不同雨强及坡度对华南红壤侵蚀过程的影响[J].水土保持通报,2017,37(2):1-6.
- [26] 王丽园,查轩,黄少燕,等.不同雨强条件下坡度对红壤坡面侵蚀的影响[J].水土保持学报,2017,31(5):40-44.
- [27] 钟壬琳,张平仓.人工降雨和放水冲刷试验下红壤坡面径流与泥沙特征分析[J].长江科学院院报,2019,36(2):33-38.
- [28] 杨大明,高佩玲,刘小媛,等.坡面薄层水流流速研究[J].水土保持学报,2019,33(4):72-80.
- [29] 吴桐嘉,潘成忠,罗明杰,等.降雨和汇流条件下浅沟侵蚀过程试验研究[J].水土保持通报,2019,39(4):22-29.
- [30] 白永会,查轩,查瑞波,等.秸秆覆盖红壤径流养分流失效益及径流剪切力影响研究[J].水土保持学报,2017,31(6):94-99.