

模拟降雨条件下第四纪红黏土坡面侵蚀过程

姚冲^{1,3}, 查瑞波², 黄少燕^{1,3}, 陈世发^{1,3},
白永会^{1,3}, 常松涛^{1,3}, 张婧^{1,3}, 毛兰花^{1,3}

(1. 福建师范大学地理科学学院, 福州 350007; 2. 福建师范大学旅游学院, 福州 350007;
3. 湿润亚热带生态—地理过程教育部重点实验室, 福州 350007)

摘要: 通过室内模拟降雨试验, 分析雨强和坡度对第四纪红黏土坡面侵蚀过程的影响, 揭示南方红壤低山丘陵区第四纪红黏土坡面侵蚀机理。根据研究区地形和降雨特点, 设计坡度 10° , 15° , 20° , 雨强 1.0, 1.5, 2.0 mm/min, 研究两者对坡面侵蚀过程的影响。结果表明: (1) 坡面初始产流时间随着坡度和雨强的增大而逐渐减小; 同一雨强下, 径流系数大小为 $20^{\circ} > 15^{\circ} > 10^{\circ}$ 。(2) 不同试验处理条件下, 坡度由 10° 增加到 20° , 坡面累积产沙量增加 0.46~1.98 倍; 降雨强度由 1.0 mm/min 增加到 2.0 mm/min, 坡面累积产沙量增加 1.37~3.85 倍。(3) 1.0, 1.5 mm/min 雨强条件下, 坡面侵蚀泥沙以 < 0.25 mm 水稳性团聚体占优, 2.0 mm/min 雨强条件下, 坡面侵蚀泥沙 > 0.25 mm 水稳性团聚体为主。(4) 坡度与雨强对坡面径流系数、侵蚀率和累积产沙量影响极显著($P < 0.01$), 坡面累积径流量和累积产沙量构成幂函数模型。研究结果为揭示坡度与雨强对第四纪红黏土坡面侵蚀过程的作用机理提供参考。

关键词: 第四纪红黏土; 侵蚀过程; 坡度; 雨强; 径流系数

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2018)03-0010-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2018.03.002

Study on Processes of Erosion on Hillslopes of Quaternary Red Clay Under Simulated Rainfall

YAO Chong^{1,3}, ZHA Ruibo², HUANG Shaoyan^{1,3}, CHEN Shifa^{1,3},
BAI Yonghui^{1,3}, CHANG Songtao^{1,3}, ZHANG Jing^{1,3}, MAO Lanhua^{1,3}

(1. College of Geographical Science, Fujian Normal University, Fuzhou 350007; 2. College of Tourism, Fujian Normal University, Fuzhou 350007; 3. Key Laboratory of Humid Sub-tropical Eco-geographical Process, Ministry of Education, Fuzhou 350007)

Abstract: The effects of rainfall intensity and slope on erosion process for quaternary red soil was analyzed through indoor simulated rainfall test, and the test reveal the mechanism of slope erosion for quaternary red clay in hilly area of South China. According to the characteristics of topography and precipitation in the study area, we designed slopes of 10° , 15° , 20° , and rainfall intensity of 1.0, 1.5 and 2.0 mm/min to explore the influence of rainfall intensity and slope on the erosion process. The results showed that: (1) The initial slope runoff time decreased with the increase of slope and rainfall intensity; under the same rainfall intensity, the runoff coefficient was $20^{\circ} > 15^{\circ} > 10^{\circ}$; (2) While slope degree increased from 10° to 20° , the total amount of erosion and sediment yield increased by 0.46~1.98 times on the slope; when the rainfall intensity increased from 1.0 mm/min to 2.0 mm/min, the cumulative slope sediment yield increased by 1.37~3.85 times; (3) Under the condition of 1.0 and 1.5 mm/min rain intensity, the sediment yield on slope was dominated by < 0.25 mm water-stable aggregates, and the water stability of > 0.25 mm was dominated by the slope erosion under the rainfall intensity of 2.0 mm/min; (4) The effects of slope and the rainfall intensity on runoff coefficient, erosion rate and cumulative sediment yield were significant ($P < 0.01$), and the relationship between runoff and sediment yields could be described by power function. The results provide reference to reveal the mechanism of slope erosion in the quaternary red clay.

Keywords: quaternary red clay; erosion process; slope; rain intensity; runoff coefficient

收稿日期: 2018-01-10

资助项目: 国家重点研发计划项目“南方红壤低山丘陵区水土流失综合治理”(2017YFC05054); 国家科技支撑计划项目“强度侵蚀区退化生态系统修复关键技术的集成与示范”(2014BAD15B02)

第一作者: 姚冲(1991—), 男, 硕士研究生, 主要从事土壤侵蚀和水土保持研究。E-mail: cyaoxm@163.com

通信作者: 查瑞波(1989—), 男, 讲师, 博士, 主要从事水土保持与景观生态研究。E-mail: xzha@fjnu.edu.cn

南方红壤丘陵区水土流失规模和强度仅次于黄土高原水土流失区,严重制约了该区社会经济的发展 and 生态环境的建设^[1-4],开展红壤侵蚀规律研究对区域生态环境建设具有重要意义。降雨是坡面水蚀的动力来源^[5],坡度是影响土壤侵蚀的重要因素,直接影响侵蚀泥沙的粒径组成^[6]。谢哲芳等^[7]研究表明土壤类型、降雨类型显著影响产流速率、产沙速率和产沙量;在黑土区,由于其地形特点,降雨量和降雨强度较大时,易形成较大坡面汇流,对坡面土壤进行集中冲刷^[8-10]。姜义亮等^[11]研究表明降雨强度由 50 mm/h 增加到 100 mm/h 时,坡面径流量和产沙量分别增加了 1.4, 6.1 倍;张晶玲等^[12]研究表明连续降雨条件下产流过程形态和产沙形态呈“W”形;程甜甜等^[13]研究表明导致径流产生的降雨量临界值表现为裸地<农地<草地。坡度在坡面土壤侵蚀中一直是重要的研究对象,土壤流失程度因坡度不同而具有较大差异,直接影响侵蚀泥沙的颗粒组成^[14];Kateb 等^[15]研究表明坡度越大,发生土壤流失的可能性越大;李桂芳等^[16]研究表明坡度对坡面径流量的影响较复杂,受降雨强度和坡长的综合影响;查轩等^[17]研究表明坡度是引起红壤退化地土壤侵蚀的一个重要原因;Zhao 等^[18]研究表明 15°坡面产流产沙显著高于 5°和 25°坡面。目前,南方红壤低山丘陵区侵蚀过程主要集中于花岗岩红壤和紫色土,针对第四纪红黏土主要集中在坡面浅沟侵蚀以及团聚体流失特征研究^[19-20]。基于此,本文针对第四纪红黏土土壤结构不良、保水保肥性能差、易冲刷等特点^[21],并结合第四纪红黏土砂壤、壤土为主、粉砂含量较高等特点^[22-23],开展模拟降雨条件下第四纪红黏土坡面侵蚀过程研究,为揭示第四纪红黏土坡面侵蚀机理提供科学依据,为治理南方红壤低山丘陵区水土流失提供参考。

1 材料与方法

1.1 供试土壤

试验土壤第四纪红黏土于 2017 年 6 月采自福建省清流县(116°38′—117°01′ E, 25°48′—26°21′ N),南方红壤低山丘陵区的典型土壤类型之一。供试土壤 >3.0, 2.0~3.0, 1.0~2.0, 0.5~1.0, 0.25~0.5, <0.25 mm 土壤颗粒含量分别为 21.89%, 10.02%, 11.41%, 21.42%, 12.62%, 22.64%。

1.2 试验设计

模拟降雨所用设备是 BX-1 型便携式野外降雨器,试验设置的降雨高度为 6 m,降雨均匀度大于 85%,降雨强度的调控范围在 20~200 mm/h,符合试验需求。根据研究区地形和降雨特点,设置 10°, 15°, 20° 3 个坡度, 1.0, 1.5, 2.0 mm/min 3 个降雨强度。试验开展时间 2017 年 7 月 28 日至 8 月 24 日。

试验小区自行设计为可移动式钢槽(长 150 cm,

宽 50 cm,深 35 cm),试验土壤自然风干后过 10 mm 筛,装填土槽之前,在土槽底部钻 4 个孔径为 1 cm 的排水孔,在土槽底部填 2 cm 细沙,上铺设棉纱布,以保障试验过程中土槽排水良好,同时使土壤的变异性最小。采取分层填土的方式,每层 10 cm,边填充、边压实并将表面刮平,并通过称重法使土壤容重控制在 1.25~1.32 g/cm³。每次降雨前 1 天用 1.0 mm/min 雨强降雨至坡面产流,并在土壤表面覆盖薄膜防止水分蒸发,第 2 天进行降雨,每次降雨量为 50 mm。

1.3 样品收集与分析

降雨开始后计时,记录各坡面产流时间、坡面产流后开始收集径流泥沙样品,每次采样时间间隔 3 min。降雨试验结束后,样品静置 24 h,用量筒测量径流量,底层泥沙过筛,并冲入铝盒,放入 105 °C 的烘箱烘干 24 h,称量。湿筛法测量各粒径团聚体含量。

径流系数和侵蚀率计算公式^[24]为:

$$\alpha = \frac{R}{P \times A} \quad (1)$$

式中: α 为径流系数; R 为径流量(L); P 为降雨量(mm); A 为径流小区投影面积(m²)。

$$E = \frac{M_t}{t} \quad (2)$$

式中: E 为侵蚀率(g/min); t 为接样时间(min); M_t 为接样时间 t 内的泥沙质量(g)。

2 结果与分析

2.1 径流过程

2.1.1 坡面初始产流情况 由表 1 可知,随着降雨强度的增加,初始产流时间逐渐提前。其中,在 1.0 mm/min 雨强条件下,10°坡面产流时间为 6.80 min, 20°坡面初始产流时间为 4.83 min,与 10°坡面相比,初始产流时间提前 1.97 min;在 1.5 mm/min 雨强条件下,10°坡面初始产流时间为 5.20 min, 20°坡面提前 1.40 min;2.0 mm/min 雨强条件下,随着坡度的增大,初始产流时间变化不明显,10°坡面初始产流时间为 1.97 min, 15°坡面为 1.36 min。

表 1 不同坡度与降雨强度下坡面初始产流时间
单位:min

坡度/(°)	雨强/(mm·min ⁻¹)		
	1.0	1.5	2.0
10	6.80	5.20	1.97
15	5.36	4.24	1.36
20	4.83	3.80	1.06

由降雨初始产流时间可知,在降雨强度一定的条件下,随着坡度的增大,初始产流时间逐步提前,各坡面初始产流时间表现为 10°>15°>20°。同一坡度, 1.0 mm/min 雨强条件下土壤初始产流时间变化最为明显,随着雨强的增大,初始产流时间的变化趋势逐渐减

小。这是因为裸露的地表土壤干燥,土壤孔隙内完全被空气所充满,小雨强条件下,土壤吸湿过程和入渗过程较为缓慢,大雨强条件下表面土壤快速吸湿,土壤孔隙内快速被水分充填,坡面降雨转化为径流。

2.1.2 径流系数变化特征 坡面水流是坡面径流主要的水动力要素之一,其变化影响着坡面水蚀的颗粒剥离、泥沙输移和沉积过程。由图 1 可知,径流系数的变化经历 3 个阶段:产流前期快速增长,中期波动上升,后期趋于稳定。坡面产流前期,坡面土壤含水率较低,土壤不断吸湿,入渗率较大,径流系数较小,增长较快;随着产流历时的增加,坡面土壤含水率增加,入渗能力下降,径流系数增大,最后趋于平稳。3 个雨强条件下,径流系数均表现为 $20^{\circ} > 15^{\circ} > 10^{\circ}$,坡度对径流的影响主要表现在增加水体重力,加速径流,减少入渗^[25-26],使径流系数增大。对比同一坡度,随着雨强的增大,径流系数也增大,这是因为随着雨强增大,雨滴变大,动能增大,对表层土壤的打击力增加,表层结构破坏土壤易分散,使土壤空隙堵塞,透水能力下降,降低入渗,绝大部分的降雨直接形成径流。表明坡面径流系数的变化是坡度和雨强共同作用的结果。

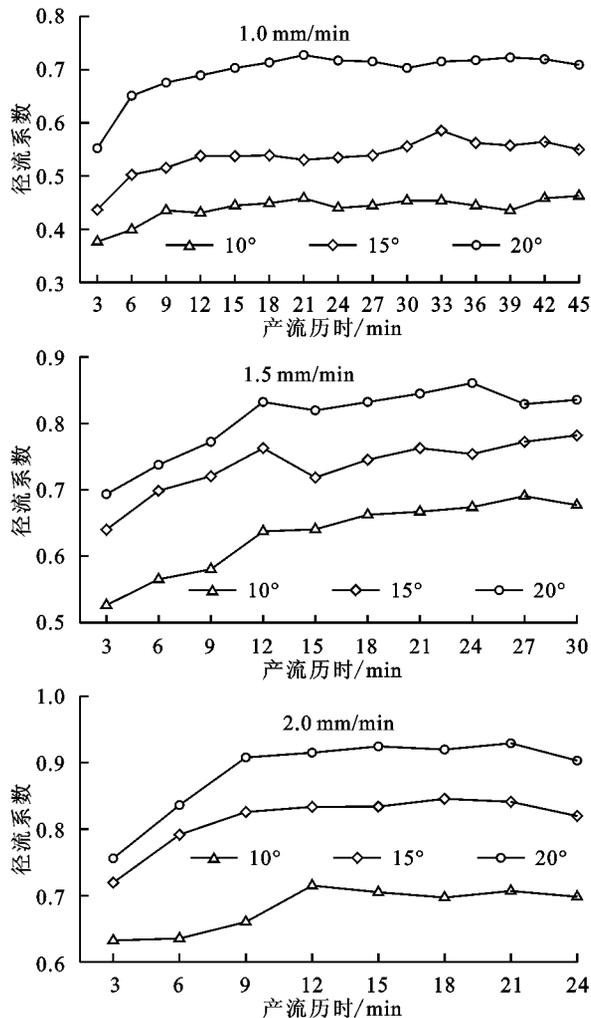


图 1 坡面径流系数变化过程

2.2 产沙过程

侵蚀泥沙是土壤养分流失的主要载体,也是造成土壤贫瘠的重要原因,侵蚀率反映坡面泥沙侵蚀的快慢程度。由图 2 可知,其中坡面侵蚀率是一个动态变化的过程,1.0 mm/min 雨强条件下,坡度 10° 时,坡面侵蚀率在第 15 min 达到峰值 0.89 g/min,坡度为 15° , 20° 时,均在第 12 min 达到峰值;1.5 mm/min 雨强条件下,坡度 10° 时在第 12 min 达到泥沙侵蚀速率峰值 2.50 g/min,坡度 15° 时,第 9 min 达到峰值,坡度 20° 时,第 3 min 达到峰值;2.0 mm/min 雨强条件下,坡度 10° 与 15° 均在第 6 min 达到峰值。说明随着降雨强度和坡度的增大,坡面侵蚀率达到峰值的时间逐渐提前,且侵蚀率峰值随着坡度和雨强的增加而增大。

随着降雨强度和坡度的增加,侵蚀率也在增大;随着产流时间的增加,侵蚀趋于平稳,侵蚀强度减弱。产流前期雨滴动能和径流冲刷力直接作用于土壤颗粒,使得土壤颗粒易被径流冲刷形成侵蚀泥沙;随着降雨时间的增加,表层细颗粒被坡面径流搬运,表层土壤结皮,入渗能力低,侵蚀率达到峰值后有下降的现象。在降雨过程中径流侵蚀是降雨侵蚀的主要组成部分,是坡面侵蚀的主要来源^[16]。

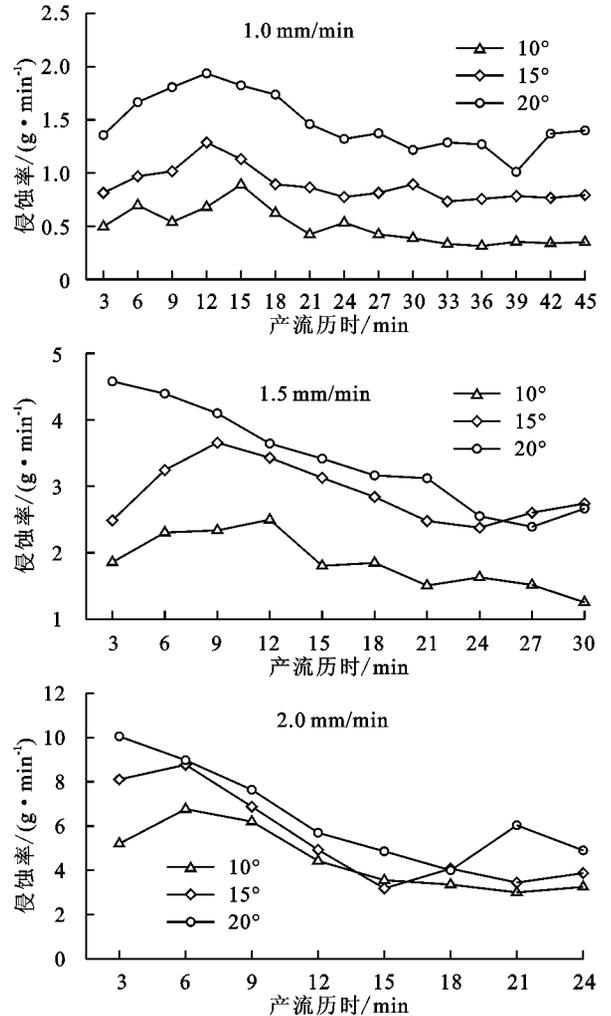


图 2 坡面侵蚀率变化过程

由图3可知,雨强一定条件下,累积产沙量随着坡度的增大而增加,且坡度越大,增幅越明显。雨强1.0 mm/min时,10°坡面累积产沙量22.15 g,15°坡面的累积产沙量39.86 g,20°坡面的累积产沙量66.10 g,为10°坡面的2.98倍;雨强为1.5 mm/min时,10°坡面累积产沙量55.65 g,15°坡面累积产沙量86.94 g,是10°坡面的1.56倍,20°坡面累积产沙量102.04 g,为10°坡面的1.83倍;2.0 mm/min雨强时,10°坡面累积产沙量107.37 g,15°坡面累积产沙量129.85 g,20°坡面累积产沙量156.49 g。坡面坡度由10°增加到20°时,累积产沙量增加0.46~1.98倍,雨强由1.0 mm/min增加到2.0 mm/min时,累积产沙量增加1.37~3.85倍,雨强和坡度都增加时,累积产沙量增加6.06倍,且第四纪红黏土坡面产沙量随坡度的增加幅度小于产沙量随降雨强度的增加幅度。第四纪红黏土坡面产沙量的变化表明降雨强度和坡度对坡面侵蚀的影响存在彼此交互作用,坡度增大,水体重力增大,径流携带泥沙的能力增强,坡面产沙量增大;降雨强度增大,地表径流紊动性增加,增加地表薄层水流侵蚀力,进而增加坡面产沙量,坡面累积产沙量随着产流时间的增大而显著增加。

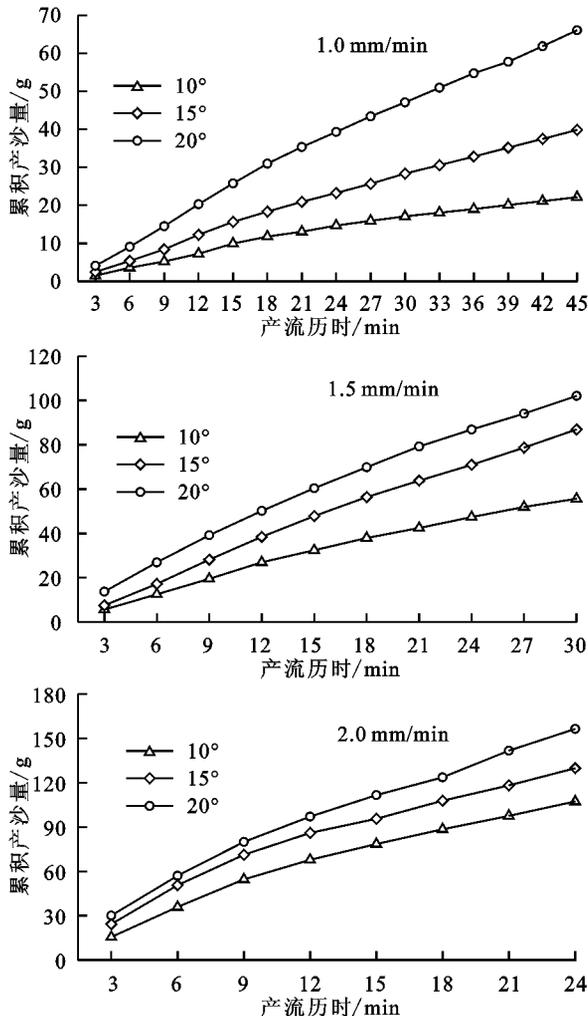


图3 坡面累积产沙量变化过程

2.3 侵蚀泥沙水稳性团聚体特征

土壤团聚体作为土壤结构的基本单元,其粒径分布决定着孔隙的数量搭配和形态特征以及对外界应力的敏感性。而孔隙度、孔径分布、连接度等土壤孔隙特征则影响水分在土表及土体内的运移方式和途径,与地表径流间有密切关系。地表径流则是表征土壤侵蚀的重要指标,影响侵蚀泥沙水稳性团聚体的粒径分布,进而影响原土质地。

由图4可知,1.0,1.5 mm/min雨强条件下,各坡度均以<0.25 mm团聚体占优势,这说明流失泥沙以细颗粒泥沙为主。因为径流是坡面土壤泥沙流失的动力和载体,径流在坡面的传递过程实际上是径流与坡面土壤颗粒相互作用的过程,在这个过程中,径流首先迁移细颗粒泥沙,从而导致泥沙中细颗粒含量显著增加。2.0 mm/min雨强条件下,各个坡度的泥沙中>0.25 mm的水稳性团聚体含量居多,土粒在快速湿润的过程中,随着雨强增大,各坡度径流量增加,流速增大;雨滴变大,动能增加,雨滴携带大颗粒泥沙的能力增强。

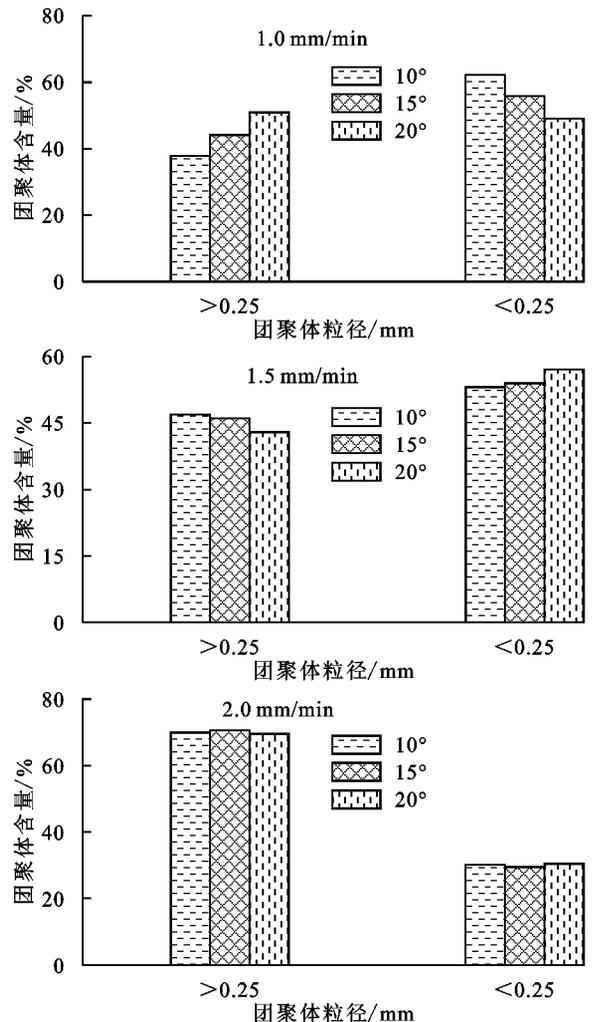


图4 坡面土壤侵蚀泥沙水稳性团聚体变化

2.4 坡面侵蚀过程的相关性

为了综合分析坡度和雨强对第四纪红黏土坡面侵蚀过程的综合影响,分别对坡面侵蚀过程的产流时间、

径流系数、径流率、侵蚀率、累积径流量和累积产沙量进行相关分析。由表 2 可知,坡面径流过程与降雨强度的关系最密切,坡面产流时间与降雨强度呈极显著负相关

关系。坡面侵蚀过程中径流系数、侵蚀率和累积产沙量与坡度、降雨强度二者呈极显著正相关关系,且降雨强度对坡面径流过程和侵蚀过程的影响大于坡度。

表 2 坡面侵蚀过程与雨强和径流坡度的相关系数

测定指标	产流时间	径流率	径流系数	累积径流量	侵蚀率	累积产沙量
坡度	-0.312	0.238*	0.625**	0.192	0.270**	0.318**
雨强	-0.917**	0.958**	0.696**	0.327**	0.839**	0.676**
坡度-雨强	-0.112	0.092	0.191**	0.062	0.098	0.016

注: *表示 $P < 0.05$; **表示 $P < 0.01$ 。

由表 3 可知,随着降雨强度和坡度的增大,累积径流量与累积产沙量呈显著的幂函数递增关系 $Y = AX^B$,这与张军等^[27]、于国强等^[28]研究结果一致。当雨强一定时,第四纪红黏土坡面累积径流量和累积产沙量拟合的幂函数的大小由高到低为 $20^\circ > 15^\circ > 10^\circ$ 。当坡度一定时,第四纪红黏土坡面累积径流量和累积产沙量拟合的幂函数的大小随着雨强的增大而增大。

表 3 第四纪红黏土坡面侵蚀过程
累积径流量和累积产沙量模型

雨强/ (mm · min ⁻¹)	坡度/(°)	拟合方程	R ²
1.0	10	$Y = 2.1131X^{0.9217}$	0.9858
	15	$Y = 2.8038X^{0.9484}$	0.9947
	20	$Y = 3.8966X^{0.9343}$	0.9948
1.5	10	$Y = 3.7795X^{0.9147}$	0.9897
	15	$Y = 3.9175X^{0.9955}$	0.9939
	20	$Y = 7.7524X^{0.8083}$	0.9964
2.0	10	$Y = 7.4200X^{0.8682}$	0.9771
	15	$Y = 11.724X^{0.7345}$	0.9823
	20	$Y = 13.935X^{0.7159}$	0.9943

注: Y 为累积产沙量(g); X 为累积径流量(L)。

3 结论

(1)第四纪红黏土坡面侵蚀过程随着坡度和降雨强度的增大,初始产流时间逐渐减小;径流系数的变化经历快速增大、波动上升、趋于平稳 3 个过程,同一雨强下,坡度越大,径流系数越大;坡度相同时,雨强越大,径流系数越大。

(2)第四纪红黏土坡面侵蚀率的峰值随降雨强度和坡度的变化而变化;产流前期侵蚀率随着径流量的增大而显著增大,产流后期侵蚀率逐步减小后,趋于平稳;随着坡度的增加,累积产沙量增加 0.46~1.98 倍,随着雨强的增大,累积产沙量增加 1.37~3.85 倍,雨强和坡度都增加时,累积产沙量增加 6.06 倍,坡面产沙量随坡度的增加幅度小于产沙量随降雨强度的增加幅度。

(3)1.0 mm/min 雨强条件下,随着坡度的增大,侵蚀泥沙中 < 0.25 mm 水稳性团聚体含量占比下降,1.5, 2.0 mm/min 随着坡度的增大,侵蚀泥沙中 < 0.25 mm 水稳性团聚体含量占比变化不明显;其中 2.0 mm/

min 雨强条件下侵蚀泥沙 > 0.25 mm 水稳性团聚体含量占比占优,坡面侵蚀泥沙 > 0.25 mm 水稳性团聚体占比接近 70%。

(4)第四纪红黏土坡面侵蚀过程中,降雨强度对坡面径流过程和侵蚀过程的影响大于坡度,且累积径流量与累积产沙量为显著的幂函数递增关系。

参考文献:

- [1] 马志阳,查轩.南方红壤区侵蚀退化马尾松林地生态恢复研究[J].水土保持研究,2008,15(3):188-193,196.
- [2] 赵其国,黄国勤,马艳芹.中国南方红壤生态系统面临的问题及对策[J].生态学报,2013,33(24):7615-7622.
- [3] 窦晓琳,李铭,王伟波,等.福建红壤区不同侵蚀强度马尾松林地土壤营养元素变化特征[J].植物科学学报,2012,30(2):161-168.
- [4] 水利部.中国水土流失防治与生态安全(南方红壤区卷)[M].北京:科学出版社,2010.
- [5] 李桂芳,郑粉莉,卢嘉,等.降雨和地形因子对黑土坡面土壤侵蚀过程的影响[J].农业机械学报,2015,46(4):147-154,182.
- [6] 张怡,丁迎盈,王大安,等.坡度对侵蚀产沙及其粒径分布的影响[J].水土保持学报,2015,29(6):25-29.
- [7] 谢哲芳,张光辉,刘如心,等.人工模拟降雨供水水质对坡面产流产沙的影响[J].水土保持学报,2016,30(6):18-23.
- [8] Sui Y, Ou Y, Yan B, et al. Assessment of Micro-basin tillage as a soil and water conservation practice in the black soil region of Northeast China [J]. PLoS One, 2016, 11(3): e0152313.
- [9] Xu X Z, Xu Y, Chen S C, et al. Soil loss and conservation in the black soil region of Northeast China: A retrospective study [J]. Environmental Science & Policy, 2010, 13(8): 793-800.
- [10] Ming C, Cai Q, Zhu A, et al. Soil erosion along a long slope in the gentle hilly areas of black soil region in Northeast China [J]. Journal of Geographical Sciences, 2007, 17(3): 375-383.
- [11] 姜义亮,郑粉莉,温磊磊,等.降雨和汇流对黑土区坡面土壤侵蚀影响的试验研究[J].生态学报,2017,37(24):8207-8215.
- [12] 张晶玲,周丽丽,马仁明,等.天然降雨条件下横垄与顺

- 垄坡面产流产沙过程[J]. 水土保持学报, 2017, 31(5): 114-119.
- [13] 程甜甜, 张兴刚, 李亦然, 等. 鲁中南山丘陵区坡面产流产沙与降雨关系[J]. 水土保持学报, 2017, 31(1): 12-16.
- [14] Shi Z H, Fang N F, Wu F Z, 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.
- [15] Kateb H E, Zhang H, Zhang P, et al. Soil erosion and surface runoff on different vegetation covers and slope gradients: A field experiment in Southern Shaanxi Province, China [J]. *Catena*, 2013, 105: 1-10.
- [16] 李桂芳, 郑粉莉, 卢嘉, 等. 降雨和地形因子对黑土坡面土壤侵蚀过程的影响[J]. 农业机械学报, 2015, 46(4): 147-154, 182.
- [17] 查轩, 黄少燕, 陈世发. 退化红壤地土壤侵蚀与坡度坡向的关系: 基于 GIS 的研究[J]. 自然灾害学报, 2010, 19(2): 32-39.
- [18] Zhao Q, Li D, Zhuo M, et al. Effects of rainfall intensity and slope gradient on erosion characteristics of the red soil slope [J]. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 2015, 29(2): 609-621.
- [19] 曹丹妮, 杜一凡, 郝好鑫, 等. 人工模拟降雨条件下红壤团聚体流失特征研究[J]. 水土保持学报, 2017, 31(4): 141-147.
- [20] 郝好鑫, 郭忠录, 王先舟, 等. 降雨和径流条件下红壤坡面细沟侵蚀过程[J]. 农业工程学报, 2017, 33(8): 134-140.
- [21] 吴雨赤. 第四纪红黏土侵蚀劣地桃树种植试验[J]. 中国水土保持, 1997(11): 25-26.
- [22] 朱丽东, 叶玮, 周尚哲, 等. 中亚热带第四纪红黏土的粒度特征[J]. 地理科学, 2006, 26(5): 5586-5591.
- [23] 聂小东, 李忠武, 王晓燕, 等. 雨强对红壤坡耕地泥沙流失及有机碳富集的影响规律研究[J]. 土壤学报, 2013, 50(5): 900-908.
- [24] 张旭昇, 薛天柱, 马灿, 等. 雨强和植被覆盖度对典型坡面产流产沙的影响[J]. 干旱区资源与环境, 2012, 26(6): 66-70.
- [25] 杨波, 王文龙, 郭明明, 等. 模拟降雨条件下弃渣体边坡不同防护措施的减水减沙效益[J]. 土壤学报, 2017, 54(6): 1-13.
- [26] Cheng Q, Ma W, Cai Q. The relative importance of soil crust and slope angle in runoff and soil loss: A case study in the hilly areas of the Loess Plateau, North China [J]. *Geojournal*, 2008, 71(2/3): 117-125.
- [27] 张军, 李占斌, 李鹏, 等. 移动降雨条件下坡面产流产沙过程试验研究[J]. 水土保持学报, 2017, 31(1): 1-4, 11.
- [28] 于国强, 李占斌, 李鹏, 等. 不同植被类型的坡面径流侵蚀产沙试验研究[J]. 水科学进展, 2010, 21(5): 593-599.
- (上接第9页)
- [82] Oliveira R S, Bezerra L, Davidson E A, et al. Deep root function in soil water dynamics in Cerrado Savannas of central Brazil [J]. *Functional Ecology*, 2010, 19(4): 574-581.
- [83] 朱丽, 黄刚, 唐立松, 等. 梭梭根系的水分再分配特征对其生理和形态的影响[J]. 干旱区研究, 2017, 34(3): 638-647.
- [84] Scholz F G, Bucci S J, Goldstein G, et al. Hydraulic redistribution of soil water by neotropical savanna trees [J]. *Tree Physiology*, 2002, 22(9): 603-612.
- [85] Wan C, Sosebee R E, McMichael B L. Does hydraulic lift exist in shallow-rooted species? A quantitative examination with a half-shrub *Gutierrezia sarothrae* [J]. *Plant & Soil*, 1993, 153(1): 11-17.
- [86] Sekiya N, Yano K. Water acquisition from rainfall and groundwater by legume crops developing deep rooting systems determined with stable hydrogen isotope composition of xylem waters [J]. *Field Crops Research*, 2002, 78(2/3): 133-139.
- [87] 山仑, 张岁岐. 能否实现大量节约灌溉用水? 我国节水农业现状与展望[J]. 资源环境与发展, 2006, 28(1): 71-74.
- [88] 张玉翠, 蔡颖哲, Stephen, 等. 灌溉农田水汽氢氧同位素组成特征研究初探[J]. 中国生态农业学报, 2011, 19(5): 1060-1066.
- [89] 邬佳宾, 苗澍, 徐冰, 等. 滴灌紫花苜蓿根层水分稳定同位素特征分析[J]. 灌溉排水学报, 2017, 36(7): 14-27.
- [90] 吴友杰, 杜太生. 覆膜沟灌下土壤水氢氧同位素分布特征及其水分运动规律研究[J]. 中国农村水利水电, 2016(9): 73-76.
- [91] 苑晶晶, 袁国富, 罗毅, 等. 利用 $\delta^{18}\text{O}$ 信息分析冬小麦对浅埋深地下水的利用[J]. 自然资源学报, 2009, 24(2): 360-368.
- [92] 魏镇华, 张娟, 徐淑君, 等. 交替灌溉下作物水分运移过程的稳定氢同位素示踪研究[J]. 灌溉排水学报, 2013, 32(6): 15-18.
- [93] 吴友杰, 魏镇华, 杜太生. 交替沟灌条件下土壤水稳定氢氧同位素分布特征[J]. 灌溉排水学报, 2014, 33(4): 251-255.
- [94] 史建君, 郭江峰. 氙水在模拟水稻一水一土壤生态系统中的行为[J]. 应用生态学报, 2003, 14(2): 269-272.
- [95] 王云强, 邵明安, 胡伟, 等. 黄土高原关键带土壤水分空间分异特征[J]. 地球与环境, 2016, 44(4): 391-397.
- [96] Lin H. Earth's critical zone and hydrogeology: Concepts, characteristics, and advances [J]. *Hydrology & Earth System Sciences*, 2010, 6(2): 3417-3481.