

雨强和植被覆盖度对红壤坡面产流产沙的影响

常松涛^{1,2}, 黄少燕^{1,2}, 查轩^{1,2}, 姚冲^{1,2},
陈世发^{1,2}, 白永会^{1,2}, 王丽园^{1,2}, 孙丽丽^{1,2}

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

摘要: 为探究雨强和植被覆盖度对花岗岩红壤坡面产流产沙的影响, 通过室内人工模拟降雨试验, 分析了不同雨强(0.5, 1.0, 1.5 mm/min)和植被覆盖度(0, 20%, 40%, 60%)下坡面侵蚀的产流、产沙规律及相关关系。结果表明:(1)同一雨强下, 初始产流时间随植被覆盖度增加而延迟, 并随雨强增大而提前, 雨强越大, 产流时间提前越明显;(2)各坡面径流率、侵蚀率随植被覆盖度增加而减小, 且植被覆盖度越高, 径流率和侵蚀率波动范围越小, 侵蚀过程越稳定;(3)有植被覆盖的坡面, 产沙主要以<0.25 mm的水稳性团聚体为主, 侵蚀泥沙中>0.25 mm水稳性团聚体比重随雨强增大而增加, 且增加的幅度随覆盖度的提高而减小;(4)雨强、植被覆盖度均与产流时间、径流率、侵蚀率呈现极显著相关关系($P < 0.01$), 且坡面产流过程与雨强变化的相关性大于其与植被覆盖度变化的相关性, 坡面产沙过程与植被覆盖度变化的相关性大于其与雨强变化的相关性, 不同雨强下植被覆盖坡面累积径流量和累积产沙量关系符合幂函数模型($R^2 > 0.98$)。研究结果可为南方红壤丘陵区水土流失治理与生态恢复提供科学参考。

关键词: 雨强; 植被覆盖度; 侵蚀过程; 花岗岩红壤

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2019)03-0058-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2019.03.009

Effects of Rainfall Intensity and Vegetation Coverage on Runoff and Sediment Yield on Red Soil Slope

CHANG Songtao^{1,2}, HUANG Shaoyan^{1,2}, ZHA Xuan^{1,2}, YAO Chong^{1,2},
CHEN Shifa^{1,2}, BAI Yonghui^{1,2}, WANG Liyuan^{1,2}, SUN Lili^{1,2}

(1. College of Geographical Science, Fujian Normal University, Fuzhou 350007;

2. Key Laboratory of Humid Sub-tropical Ecology-Geographic Process, Ministry of Education, Fuzhou 350007)

Abstract: In order to investigate the effects of rainfall intensity and vegetation coverage on the runoff and sediment yield on granite red soil slope, this study analyzed regularity of runoff and sediment yield and their correlation under different rainfall intensities (0.5, 1.0, 1.5 mm/min) and vegetation coverages (0, 20%, 40%, 60%) through indoor artificial simulated rainfall test. The results showed that: (1) Under the same rainfall intensity, the initial flow time was delayed with the increasing of vegetation coverage, and it was advanced with the increasing of rainfall intensity. The greater the rainfall intensity, the earlier the flow time was. (2) The runoff rate and erosion rate of each slope decreased with the increasing of vegetation coverage, and the higher the vegetation coverage was, the smaller the fluctuation range of runoff rate and erosion rate was, and the more stable the erosion process was. (3) On the slope covered by vegetation, the sediment was mainly water-stable aggregates less than 0.25 mm. The proportion of water-stable aggregates greater than 0.25 mm in the sediment increased with the increasing of rainfall intensity, and the increase range decreased with the increasing of vegetation coverage. (4) Vegetation coverage and rainfall intensity were significantly correlated with runoff generation time, runoff rate and erosion rate ($P < 0.01$). The correlation between slope runoff generation process and rainfall intensity was greater than that between slope runoff generation process and vegetation cover change. The correlation between slope sediment yield and vegetation cover

收稿日期: 2018-12-05

资助项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0505400); 国家科技支撑计划项目(2014BAD15B02)

第一作者: 常松涛(1994—), 男, 硕士研究生, 主要从事侵蚀过程与生态调控研究。E-mail: stchang0371@foxmail.com

通信作者: 黄少燕(1960—), 女, 高级工程师, 主要从事水土保持与生态恢复研究。E-mail: xzha@fjnu.edu.cn

change was greater than that between slope sediment yield and rain intensity change. The relationship between cumulative runoff and cumulative sediment yield on vegetation covered slope was in consistent with power function model ($R^2 > 0.98$) under different rainfall intensities. The results could provide a scientific reference for soil erosion control and ecological restoration in red soil hilly area of southern China.

Keywords: rainfall intensity; vegetation coverage; erosion process; granite red soil

南方红壤区由于夏季降雨集中、地形起伏大、土壤抗蚀性弱、人口密度高、开发力度强等原因,成为我国水土流失范围最广、严重程度仅次于黄土高原的地区,强烈制约着区域生态环境质量和经济发展^[1-4]。而降雨特征和地表状况是影响水力侵蚀最关键的 2 个因子。降雨是坡面水蚀最根本的动力来源,降雨特性中尤以降雨强度对坡面侵蚀的作用最为明显^[5]。已有研究^[6-7]表明,雨强的增大会增加坡面径流量和侵蚀量。而植被的存在可削弱雨滴降落动能^[8],增强土壤抗蚀性^[9],改善土壤结构^[10],增加土壤入渗^[11],减轻地表遭受雨滴击溅和地表径流等外营力形成的侵蚀,进而减少坡面径流量和产沙量。鲁克新等^[12]通过室内模拟降雨发现,在其他条件一致的前提下,雨强每增加 0.5 mm/min,黄土坡面径流量和产沙量分别增加 43.77% 和 7.45%。王升等^[13]通过野外黄土放水冲刷试验,发现植被覆盖度增加使得平均坡面糙率增大,从而减小了土壤侵蚀量。罗春燕等^[14]通过不同雨强下野外紫色土径流小区降雨试验发现,径

流总量及土壤侵蚀量随雨强的增大急剧增加。戴金梅等^[15]利用人工模拟降雨试验与室内分析相结合的方法分析了紫色土坡面侵蚀过程,结果表明坡面侵蚀泥沙量随植被覆盖度的增加而减少,50%的植被覆盖度是紫色土坡面有效控制水土流失的临界盖度。目前围绕雨强和植被覆盖度的研究主要集中在黄土和紫色土,针对花岗岩红壤的雨强和植被覆盖度综合研究较为薄弱。基于此,本文通过 3 个雨强,对 4 个不同植被覆盖度坡面进行人工模拟降雨试验,旨在进一步揭示雨强和植被覆盖度对花岗岩红壤坡面产流产沙过程影响特征,以期为南方红壤丘陵区的水土流失治理提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试土壤

花岗岩红壤采自福建省长汀县河田镇(116°18′—116°31′ E, 25°33′—25°48′ N)。供试土壤理化性质见表 1。

表 1 供试土壤理化性质

全氮/ (g · kg ⁻¹)	全磷/ (g · kg ⁻¹)	全钾/ (g · kg ⁻¹)	颗粒组成/%					
			>5.0 mm	2.0~5.0 mm	1.0~2.0 mm	0.5~1.0 mm	0.25~0.5 mm	<0.25 mm
0.51	0.09	4.91	7.64	17.88	11.44	10.18	8.26	44.60

1.2 试验设计

试验采用自行设计的可移动钢槽作为试验小区,长宽深规格为 150 cm × 50 cm × 35 cm,坡度 15°,钢槽下部有向外凸出的“V”形出水口,底部均匀钻取 3 × 3 个直径为 1 cm 的排水孔。钢槽底部装填 5 cm 厚的天然细沙,上铺透水纱布,以保证试验过程中钢槽排水良好。将野外采集的试验土壤自然风干后过 10 mm 筛,并混合均匀,采用分层填土法,均匀铺层,每层 5 cm 厚,边填土边压实,并尽量压实四周边壁,减小边界效应影响。每层铺好后,用木板将坡面刮平打毛,使相邻两层土壤之间良好结合,降低下垫面土壤条件的变异性。同时注意控制土壤容重在 1.27~1.33 g/cm²。

试验设 4 个处理,植被覆盖度分别为 0, 20%, 40%, 60%。2018 年 4 月对坡面进行 5 cm 翻耕,随后平整坡面,对 3 个小区分别施播 2, 4, 6 g 宽叶雀稗草籽后进行覆土浇水,生长期注意管护。试验前采用垂直照相机对小区进行垂直拍照记录坡面植被覆盖信息,通过目视解译获取植被覆盖信息并计算植被

覆盖度^[16]。试验期间通过修剪等方法,确保覆盖度满足试验要求。

模拟降雨设备使用 BX—1 型侧喷式野外降雨器,降雨均匀度 > 80%,降雨高度 6 m,降雨强度调控范围 20~200 mm/h,满足试验要求。根据研究区野外径流小区气象观测资料,结合已有研究,经过率定确定降雨强度为 0.5, 1.0, 1.5 mm/min。降雨试验开展时间为 2018 年 7 月 8—30 日。每场模拟降雨重复 3 次,分析计算 3 次试验数据的平均值。为消除土壤前期含水量的影响,每次试验前 1 天用 0.5 mm/min 雨强降雨至坡面产流,静置 24 h,使水分自由下渗以接近自然条件下土壤水分分布状况,确保降雨试验前土壤含水量基本一致。每次降雨量 30 mm。

1.3 样品收集与分析

开始降雨时计时,记录各坡面产流时间。坡面产流后每隔 3 min 收集 1 次水样。降雨结束后,将水样静置 24 h,用量筒测定径流量,并把底层泥沙过筛后冲入铝盒,放置在 105 °C 烘箱 24 h 后称重,得到产沙

量。径流率^[17]和侵蚀率^[18]计算公式分别为:

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

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

式中: I 为径流率(L/min); E 为侵蚀率(g/min); R_t 为接样时间内收集的径流量(L); M_t 为接样时间内收集的径流中所含泥沙量(g); t 为接样时间(min)。

使用 Adobe Photoshop 18.0 软件解译获取植被覆盖度。采用 Excel 2016 和 SPSS 19.0 软件进行数据处理与统计分析,使用 Origin 2017 软件作图。

2 结果与分析

2.1 坡面径流过程

2.1.1 坡面初始产流时间 初始产流时间是指从开始降雨到产生的坡面径流汇集流动到小区出口的时间,延长产流时间可促进入渗,减少地表径流,减轻土壤侵蚀。由表 2 可知,随着降雨强度的增加,初始产流时间逐渐提前。雨强从 0.5 mm/min 增加至 1.5 mm/min,植被覆盖度 0, 20%, 40%, 60% 坡面初始产流时间分别提前了 0.64, 0.80, 0.93, 1.11 min。

同一雨强下,植被覆盖较裸露坡面明显延缓了产流时间,且覆盖度的提高使坡面产流时间进一步延迟,植被覆盖度 40% 坡面的产流时间较植被覆盖度 20% 平均推迟了 0.39 min, 植被覆盖度 60% 坡面产流时间较植被覆盖度 40% 平均推迟了 0.44 min。这主要是与植被对降雨的截留和径流的阻滞有关,降雨过程中,植被将部分降水截留并储存起来,减少了坡面受雨量,同时也增大了地表粗糙度^[19],降低径流速度,增加径流在坡面流动时间,促进下渗,从而推迟坡面产流时间。

表 2 坡面初始产流时间 单位: min

降雨强度/ (mm·min ⁻¹)	植被 覆盖度 0	植被 覆盖度 20%	植被 覆盖度 40%	植被 覆盖度 60%
0.5	2.33	3.21	3.69	4.25
1.0	2.05	3.08	3.43	3.82
1.5	1.69	2.41	2.76	3.14

2.1.2 坡面径流率 径流影响着坡面土壤的剥蚀、搬运、沉积过程,而径流率是表征产流变化情况的重要指标,研究其变化规律有助于认识坡面产流机理。由图 1 可知,不同植被覆盖度的坡面径流率随产流历时增加总体可分为低值、波动上升和趋于稳定 3 个阶段。因为前期土壤较为干燥,降雨主要被土壤所吸收,入渗量较大,径流率较小。随着土壤含水量增加,降雨转化为径流比例不断提高。持续的降雨入渗,使得表层土壤含水量趋于饱和,降雨转化为径流比例基本稳定,径流率也趋于稳定。

径流率随植被覆盖度的增加而减少,植被覆盖度从 0 增加至 60%,坡面径流率减少 0.66~1.84 L/min。因为植被具有削弱雨滴溅蚀导致的土壤孔隙堵塞作用^[8],保持土壤透水孔隙通透,便于水分下渗,降低径流率,且覆盖度越高效果越明显。雨强的增大,使径流率高峰逐渐提前。0.5 mm/min 时植被覆盖坡面产流率高峰平均出现在产流后的第 24 min, 1.0 mm/min 时产流率高峰提前至第 12 min, 1.5 mm/min 下产流率高峰进一步提前至第 9 min。这是因为雨强增加,单位面积的承雨量增多,土壤吸水速度加快,使得径流率高峰逐渐提前。

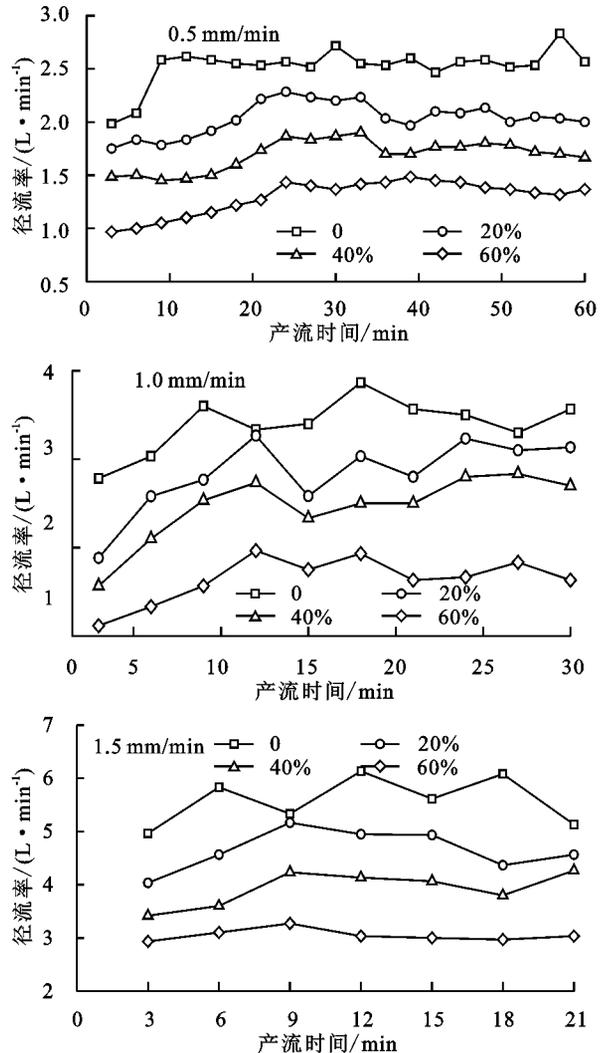


图 1 不同植被覆盖度下坡面径流率随降雨历时变化

2.2 坡面产沙过程

侵蚀率是反映坡面侵蚀强度变化的重要因子,研究侵蚀率有助于了解坡面侵蚀动态变化规律。由图 2 可知,植被覆盖下的坡面产沙过程随降雨历时有着相似的变化规律,大致表现为:前期快速上升,到达顶峰后,波动下降,最后趋于稳定。这是因为降雨在前期阶段主要以下渗为主,降雨转化为径流有限,冲刷搬运能力较小,前期侵蚀泥沙量相对较少,侵蚀率较低。随着降雨持续,土壤含水量不断增加,降雨转化

为较多的径流,径流冲刷搬运能力增大,侵蚀率较高。降雨后期阶段,土壤含水量达到饱和状态,地表径流汇集稳定,侵蚀率也降至较为稳定状态。

裸露坡面侵蚀率随降雨持续呈现波动变化,波动幅度随雨强增大而增大,且侵蚀率一直处于高值状态。植被覆盖的坡面侵蚀率明显低于裸坡,且不同植被覆盖度的坡面侵蚀率存在差异。相同雨强下,植被覆盖度越高,侵蚀率变化范围越小,侵蚀过程越相对稳定。因为覆盖度越高,坡面流受雨滴扰动作用越小,流态越稳定^[20],对土壤的紊动作用越少,侵蚀率越小,说明植被可较好的平衡侵蚀过程。

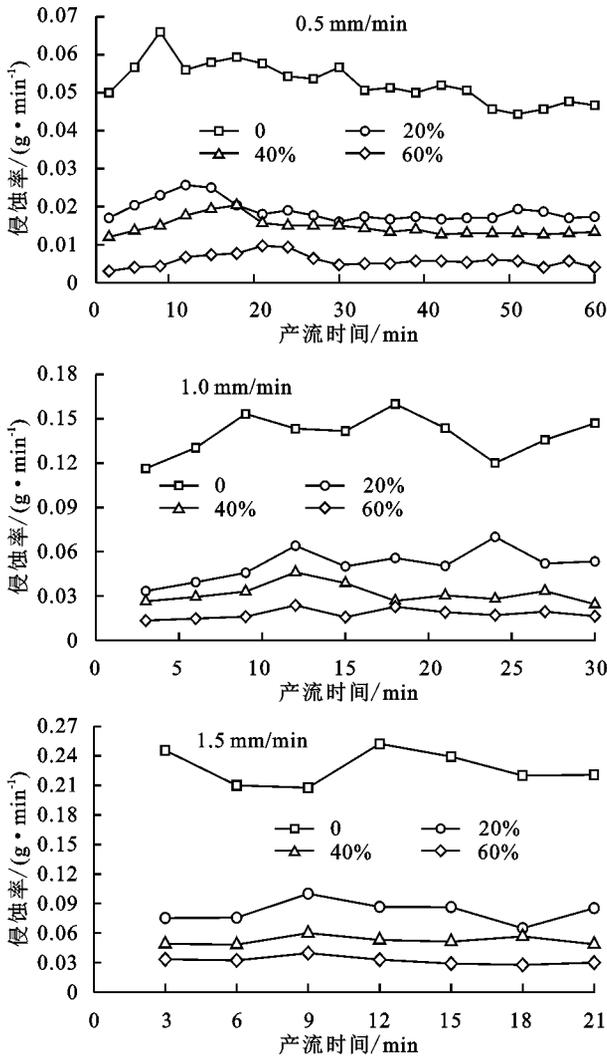


图2 不同植被覆盖度下坡面侵蚀率随降雨历时变化

坡面累积产沙量主要受植被覆盖度、雨强、坡度和坡长的影响^[21],反映了雨滴溅蚀能力和坡面径流的侵蚀搬运能力。由图3可知,雨强增大,使坡面累积产沙量增加。0.5 mm/min雨强增大为1.5 mm/min,植被覆盖度20%的坡面累积产沙量从1.13 g增加至1.72 g,植被覆盖度40%的坡面累积产沙量从0.87 g增加至1.10 g,植被覆盖度60%的坡面累积产沙量从0.35 g增加至0.68 g。雨强的增加,使雨滴直径变大,雨滴打击坡面动能增加,溅蚀能力

增强,导致累积产沙量增加,说明雨强具有增大侵蚀的作用。

随着植被覆盖度的增加,坡面累积产沙量会逐渐减少。雨强0.5 mm/min下,20%坡面累积产沙量分别比40%,60%坡面多0.26 g,0.78 g;雨强1.0 mm/min时,20%坡面的累积产沙量分别比40%,60%坡面多0.57,0.91 g;雨强1.5 mm/min下,20%坡面累积产沙量分别比40%,60%坡面多0.62,1.05 g。主要是因为植被叶面对雨滴起截留缓冲作用,以及根系的固土护坡作用,削弱降雨和径流的侵蚀强度,进而减少坡面土壤的流失,起到保护土壤表层的作用。

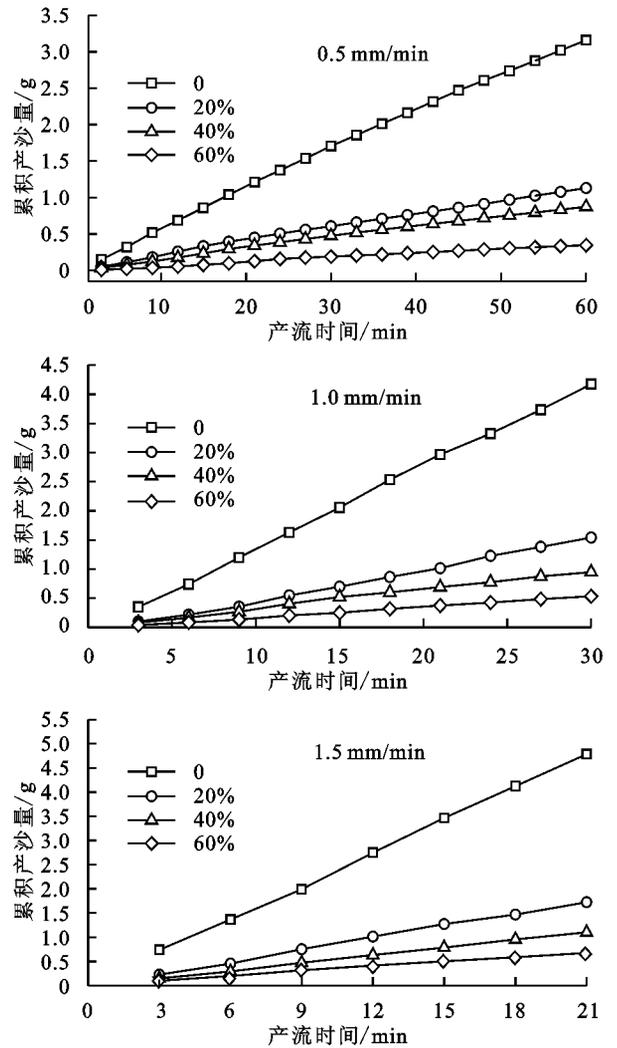


图3 不同植被覆盖度下坡面累积产沙量随降雨历时变化

2.3 侵蚀泥沙水稳性团聚体特征

土壤团聚体是土壤结构的基本单位^[22],其数量与分布影响土壤入渗及抗侵蚀能力。降雨和径流是土壤侵蚀的动力,径流的侵蚀搬运改变坡面土壤质地,破坏土壤结构。而植被可通过增强土壤团聚体的稳定性,提高土壤的抗侵蚀能力^[23],减轻土壤侵蚀。由图4可知,除无植被覆盖坡面外,其余坡面产沙中, $<0.25 \text{ mm}$ 的水稳性团聚体比重均占优势,表明径流侵蚀搬运的泥沙主要以细颗粒泥沙为主。且

>0.25 mm 水稳性团聚体的比重随雨强增大而增加,雨强从 0.5 mm/min 增加至 1.5 mm/min,植被覆盖度 20%,40%,60% 坡面产沙中 >0.25 mm 水稳性团聚体比重从 20.79%,18.67%,15.35% 分别增加至 44.81%,32.20%,23.57%。小雨强下径流搬运能力有限,主要携带运移细颗粒泥沙。雨强增加,雨滴变大,打击能力增强,同时径流量增加,提高了径流携带大颗粒泥沙能力,泥沙中 >0.25 mm 的水稳性团聚体比重上升。

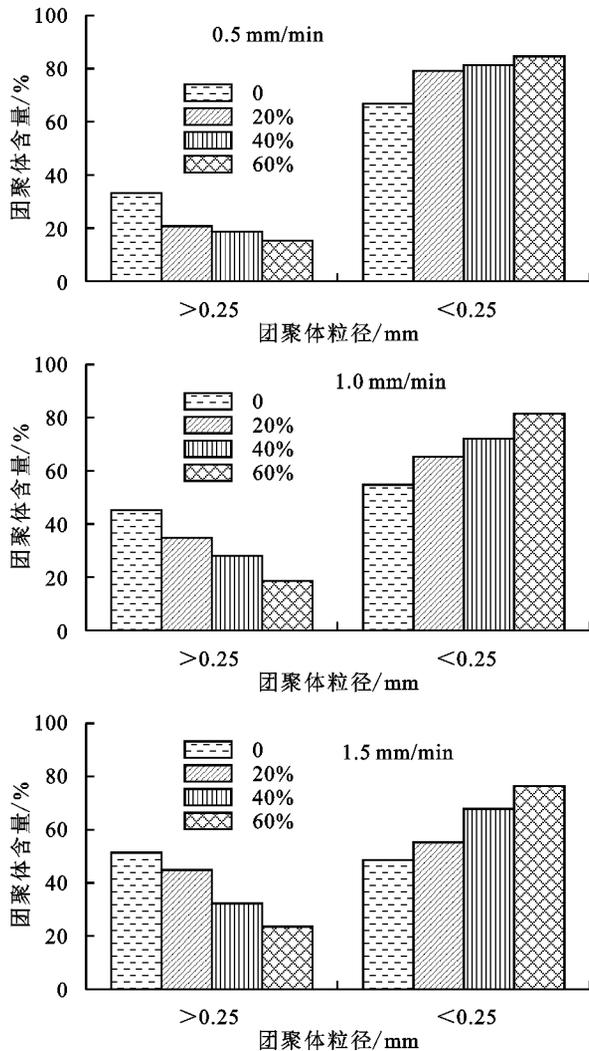


图 4 不同雨强下植被覆盖坡面侵蚀泥沙水稳性团聚体变化

相同雨强下,泥沙中 >0.25 mm 水稳性团聚体比重表现出随覆盖度增加而下降的规律。这是因为植被覆盖度的增加使得坡面不容易形成均匀的薄层水流,径流搬运能力有限,也说明了植被的增加可提高坡面土壤团聚体的稳定性。

2.4 相关性分析

为了综合分析雨强和植被覆盖度对坡面侵蚀的影响,对雨强、植被覆盖度与产流时间、径流率、侵蚀率、累积径流量、累积产沙量进行相关分析(表 3)。结果表明雨强与径流率、侵蚀率、累积径流量呈现极

显著正相关关系,与产流时间呈极显著负相关关系,与累积产沙量呈显著正相关关系。植被覆盖度与径流率、侵蚀率、累积产沙量呈现极显著负相关关系,与产流时间呈极显著正相关关系,与累积径流量呈显著负相关关系。坡面产流过程与雨强变化的相关性大于其与植被覆盖度变化的相关性,坡面产沙过程与植被覆盖度变化的相关性大于其与雨强变化的相关性。因此植物措施在减轻土壤侵蚀中的作用十分重要。

表 3 降雨强度、植被覆盖度与被面侵蚀过程参数的相关性

指标	降雨强度	植被覆盖度
产流时间	-0.515**	0.483**
径流率	0.781**	-0.524**
累积径流量	0.682**	-0.337*
侵蚀率	0.555**	-0.632**
累积产沙量	0.379*	-0.666**

注: * 表示 $P < 0.05$; ** 表示 $P < 0.01$ 。

为进一步分析 3 个雨强下不同植被覆盖度的坡面产流和产沙之间的关系,将累积径流量和累积产沙量进行回归(表 4)。结果表明,累积径流量和累积产沙量构成幂函数关系,相关系数大于 0.98,回归效果较好,表达式为 $Y = AX^B$,这与姚冲等^[24]、于国强等^[25]研究结果一致。

表 4 不同雨强下植被覆盖坡面累积径流量和累积产沙量回归模型

降雨强度/ (mm · min ⁻¹)	植被 覆盖度/%	拟合方程	R ²
0.5	0	$Y = 0.0310X^{0.9276}$	0.9990
	20	$Y = 0.0129X^{0.9394}$	0.9913
	40	$Y = 0.0095X^{0.9959}$	0.9912
	60	$Y = 0.0033X^{1.1004}$	0.9864
1.0	0	$Y = 0.0436X^{0.9894}$	0.9997
	20	$Y = 0.0158X^{1.0296}$	0.9985
	40	$Y = 0.0189X^{0.9212}$	0.9977
	60	$Y = 0.0122X^{0.9687}$	0.9996
1.5	0	$Y = 0.0593X^{0.9155}$	0.9973
	20	$Y = 0.0195X^{0.9781}$	0.9994
	40	$Y = 0.0154X^{0.9697}$	0.9998
	60	$Y = 0.0162X^{0.8049}$	0.9922

注: Y 为累积产沙量(g); X 为累积径流量(L)。

3 结论

(1) 植被覆盖度 0, 20%, 40%, 60% 坡面在 3 个雨强的平均初始产流时间分别为 2.02, 2.90, 3.30, 3.74 min, 覆盖度的增加会延迟坡面初始产流时间。径流率变化可分为 3 个阶段: 低值阶段、波动上升阶段和趋于稳定阶段。同一雨强下, 径流率随不同植被覆盖度的增加而降低; 同一植被覆盖度下, 径流率随雨强的增加而提高。

(2)植被覆盖度的增加,可减少坡面侵蚀率和累积产沙量,覆盖度从0增加至60%,累积产沙量减少了85.90%~89.08%。雨强从0.5 mm/min增加至1.5 mm/min,累积产沙量增加了1.26~1.95倍,坡面产沙量随植被覆盖度的减少幅度大于产沙量随雨强的增加幅度。

(3)无植被覆盖的坡面从雨强0.5,1.0 mm/min增加至1.5 mm/min,侵蚀泥沙中从以<0.25 mm的水稳性团聚体为主变为以>0.25 mm水稳性团聚体占优。而在植被覆盖度20%,40%,60%坡面产沙中,<0.25 mm的水稳性团聚体比重始终占主导地位。4个坡面的侵蚀泥沙中>0.25 mm水稳性团聚体的平均比重分别为43.26%,33.46%,26.29%,19.17%,表现出随植被覆盖度增加而下降的规律。

(4)在花岗岩红壤坡面侵蚀过程中,雨强对坡面产流过程的影响大于植被覆盖度,植被覆盖度对坡面产沙过程的影响大于雨强。坡面累积径流量和累积产沙量关系构成幂函数模型($R^2 > 0.98$)。

参考文献:

- [1] Amundson R, Berhe A A, Hopmans J W, et al. Soil science. Soil and human security in the 21st century [J]. *Science*, 2015, 348(6235): e1261071.
- [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] 何圣嘉,谢锦升,杨智杰,等.南方红壤丘陵区马尾松林下水土流失现状、成因及防治[J].*中国水土保持科学*,2011,9(6):65-70.
- [4] Wu X Y, Zhang L P, Yu X X. Impacts of surface runoff and sediment on nitrogen and phosphorus loss in red soil region of southern China [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2012, 67(7): 1939-1949.
- [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] 王志伟,陈志成,艾钊,等.不同雨强与坡度对沂蒙山区典型土壤坡面侵蚀产沙的影响[J].*水土保持学报*,2012,26(6):17-20.
- [7] 廖义善,蔡强国,程琴娟.黄土丘陵沟壑区坡面侵蚀产沙地形因子的临界条件[J].*中国水土保持科学*,2008,6(2):32-38.
- [8] 丛月,张洪江,程金花,等.草本植物对雨滴动能的影响[J].*水土保持学报*,2014,28(3):114-118.
- [9] Talbot L M, Turton S M, Graham A W. Trampling resistance of tropical rainforest soils and vegetation in the wet tropics of north east Australia. [J]. *Journal of Environmental Management*, 2003, 69(1): 63-69.
- [10] 李裕元,邵明安,陈洪松,等.水蚀风蚀交错带植被恢复对土壤物理性质的影响[J].*生态学报*,2010,30(16):4306-4316.
- [11] Zhou Z C, Shangguan Z P. Effect of ryegrasses on soil runoff and sediment control [J]. *Pedosphere*, 2008, 18(1): 131-136.
- [12] 鲁克新,李占斌,张霞,等.室内模拟降雨条件下径流侵蚀产沙试验研究[J].*水土保持学报*,2011,25(2):6-9.
- [13] 王升,王全九,董文财,等.黄土坡面不同植被覆盖度下产流产沙与养分流失规律[J].*水土保持学报*,2012,26(4):23-27.
- [14] 罗春燕,涂仕华,庞良玉,等.降雨强度对紫色土坡耕地养分流失的影响[J].*水土保持学报*,2009,23(4):24-27.
- [15] 戴金梅,查轩,黄少燕,等.不同植被覆盖度对紫色土坡面侵蚀过程的影响[J].*水土保持学报*,2017,31(3):33-38.
- [16] 章文波,刘宝元,吴敬东.小区植被覆盖度动态快速测量方法研究[J].*水土保持通报*,2001,21(6):60-63.
- [17] 李宏伟,王文龙,王贞,等.神府东胜煤田扰动地面野外降雨试验[J].*水土保持学报*,2012,26(2):11-15,20.
- [18] 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.
- [19] 肖培青,姚文艺,李莉,等.植被影响下坡面流阻力变化特征研究[J].*泥沙研究*,2013(3):1-5.
- [20] 孙佳美,余新晓,樊登星,等.模拟降雨下植被盖度对坡面流水动力学特性的影响[J].*生态学报*,2015,35(8):2574-2580.
- [21] 王栋栋,王占礼,张庆玮,等.草地植被覆盖度坡度及雨强对坡面径流含沙量影响试验研究[J].*农业工程学报*,2017,33(15):119-125.
- [22] Annabi M, Raclot D, Bahri H, et al. Spatial variability of soil aggregate stability at the scale of an agricultural region in Tunisia [J]. *Catena*, 2017, 153: 157-167.
- [23] 曾全超,董扬红,李鑫,等.基于 Le Bissonnais 法对黄土高原森林植被带土壤团聚体及土壤可蚀性特征研究[J].*中国生态农业学报*,2014,22(9):1093-1101.
- [24] 姚冲,查瑞波,黄少燕,等.模拟降雨条件下第四纪红黏土坡面侵蚀过程[J].*水土保持学报*,2018,32(3):10-15.
- [25] 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.