

桂西北喀斯特区石灰土与红壤坡地幼龄橘园降雨侵蚀特征

郑金德^{1,2}, 潘焰菲³, 徐勤学^{1,2}, 方荣杰^{1,2}, 张帅普^{1,2}, 付智勇⁴

(1. 桂林理工大学岩溶地区水污染控制与用水安全保障协同创新中心, 广西 桂林 541004;

2. 桂林理工大学广西环境污染控制理论与技术重点实验室科教结合科技创新基地, 广西 桂林 541004;

3. 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司, 杭州 311100; 4. 中国科学院环江喀斯特生态系统观测研究站, 广西 环江 547100)

摘要: 为探究桂西北喀斯特区石灰土与红壤坡地幼龄橘园的降雨侵蚀特征, 通过室内人工模拟降雨试验, 研究 3 种降雨强度 (30, 60, 90 mm/h) 下, 石灰土与红壤坡地幼龄橘园的产流产沙特征。结果表明: (1) 降雨强度为 30, 60 mm/h 时, 红壤橘园的产流总量分别为石灰土橘园的 2.46, 1.83 倍, 且红壤橘园主要以地表产流为主, 石灰土橘园主要以壤中流产流为主; 当降雨强度为 90 mm/h 时, 二者产流总量无显著性差异 ($p > 0.05$), 均以地表产流为主。 (2) 石灰土橘园与红壤橘园地表径流强度随降雨强度增大而增大; 但随着降雨强度增大, 石灰土橘园的壤中流径流强度呈先增大后减小趋势, 红壤橘园壤中流径流强度却在减小。 (3) 降雨强度为 60 mm/h 时, 红壤橘园产沙总量为石灰土橘园的 3.74 倍, 当降雨强度为 90 mm/h 时, 石灰土橘园产沙总量为红壤橘园的 2.86 倍; 在降雨过程中, 石灰土橘园产沙量随着降雨历时增大上下波动较为剧烈, 红壤橘园产沙量随降雨历时增大波动幅度较小。 (4) 当降雨强度 ≥ 60 mm/h 时, 石灰土橘园与红壤橘园累积产沙量与累积产流量存在显著线性关系, 且降雨强度越大线性关系越明显。研究结果可为喀斯特地区石灰土与红壤坡地幼龄橘园水土流失防治提供参考。

关键词: 石灰土; 红壤; 橘园; 产流产沙; 桂西北

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2023)06-0011-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2023.06.002

Rainfall Erosion Characteristics of Young Citrus Orchards on Calcareous Soil and Red Soil Slopes in Karst Areas of Northwest Guangxi

ZHENG Jinde^{1,2}, PAN Yanfei³, XU Qinxue^{1,2}, FANG Rongjie^{1,2}, ZHANG Shuaipu^{1,2}, FU Zhiyong⁴

(1. Key Laboratory for Theory and Technology of Environmental Pollution Control in

Guangxi, Guilin University of Technology, Guilin, Guangxi 541004; 2. Guangxi Collaborative Innovation

Center for Water Pollution Control and Safety in Karst Area, Guilin University of Technology, Guilin,

Guangxi 541004; 3. Power China Huadong Engineering Corporation Limited, Hangzhou 311100; 4. Huanjiang

Karst Ecosystem Observation and Research Station, Chinese Academy of Sciences, Huanjiang, Guangxi 547100)

Abstract: In order to investigate the characteristics of rainfall erosion of young citrus orchards on calcareous soil and red soil slopes in karst areas of northwestern Guangxi, an indoor artificial simulated rainfall experiment was conducted to study the runoff and sediment yield characteristics of young citrus orchards on calcareous soil and red soil slopes under three rainfall intensities (30, 60, and 90 mm/h). The results showed that: (1) When the rainfall intensity was 30 and 60 mm/h, the total runoff yield of red soil citrus orchards was 2.46 and 1.83 times that of calcareous soil citrus orchards, respectively, and the red soil citrus orchards was dominated by surface runoff yield, while the calcareous soil citrus orchards was dominated by subsurface flow yield; when the rainfall intensity was 90 mm/h, there was no significant difference in the total amount of runoff between the two ($p > 0.05$), and both of them were mainly by surface runoff. (2) The surface runoff intensity of calcareous soil citrus orchards and red soil citrus orchards increased with the increase of rainfall intensity. However, with the increase of rainfall intensity, the subsurface flow intensity of calcareous soil citrus orchards showed a trend of first increasing and then decreasing, while the subsurface flow intensity

收稿日期: 2023-04-17

资助项目: 广西自然科学基金项目 (2020GXNSFAA297093); 广西重点研发计划项目 (桂科 AB22035058); 国家自然科学基金项目 (51769005)

第一作者: 郑金德 (1998—), 男, 硕士研究生, 主要从事水土保持与农业生态研究。E-mail: 1601217135@qq.com

通信作者: 徐勤学 (1982—), 男, 博士, 教授, 主要从事水土保持与农业生态研究。E-mail: xqx@glut.edu.cn

of red soil citrus orchards was decreasing. (3) When the rainfall intensity was 60 mm/h, the total sediment yield of red soil citrus orange orchards was 3.74 times that of the calcareous soil citrus orchards, and when the rainfall intensity was 90 mm/h, the total sediment yield of the calcareous soil citrus orchards was 2.86 times that of red soil citrus orchards. During the rainfall process, the sediment yield of calcareous soil citrus orchards fluctuates sharply with the increase of rainfall duration, while the sediment yield of red soil citrus orchards was relatively small with the increase of rainfall duration. (4) When the rainfall intensity was more than 60 mm/h, there was a significant linear relationship between the cumulative sediment yield and cumulative runoff yield of calcareous soil and red soil orchards, and the greater the rainfall intensity, the more obvious the linear relationship was. The research results can provide reference and reasonable suggestions for the prevention and control of soil erosion in young citrus orchards on calcareous soil and red soil slopes in karst areas.

Keywords: calcareous soil; red soil; citrus orchards; runoff and sediment yield; northwest Guangxi

桂西北喀斯特区具有地形起伏大,山地多,平地少,土壤浅薄,下覆基岩类型及构造复杂等特征^[1-2]。峰丛坡地是桂西北喀斯特区的典型地貌,该地区人口多、耕地少,大多数耕作都是在坡地上进行,由于当地人长期开展不合理的耕作活动,导致该区水土流失严重^[3]。近年来,受经济利益驱动,该地区农民在坡地上大量种植柑橘,目前,柑橘已经成为区内种植面积最广的水果^[4],且种植面积还在逐年增加。但是,柑橘在种植初期地表裸露,当发生较大降雨时坡地橘园极易发生水土流失,涂安国等^[5]通过长期原位监测发现,幼龄期橘园土壤侵蚀程度达到极强烈级别;Cerdà等^[6]在石灰土坡地上进行原位降雨试验表明,幼龄橘园土壤侵蚀也很严重。

目前,关于坡地幼龄橘园土壤侵蚀特征的研究主要集中在红壤和紫色土地地区。孙永明等^[7]利用修正后的 RUSLE 模型,对赣南脐橙果园水土流失分布、程度开展调查研究发现,1~3 年生的脐橙果园土壤侵蚀以强烈为主,3 年以上的脐橙果园以轻度、中度侵蚀为主;江才伦等^[8]通过径流小区观测试验分析清耕、生草、覆盖和中耕 4 种不同耕作方式下的水土流失特征发现,生草栽培可显著减少橘园的水土流失量;Duan 等^[9]通过对自然降雨事件的分析认为,在暴雨条件下,种草覆盖的橘园土壤侵蚀量最低,套种农作物的橘园土壤侵蚀量低于无覆盖措施的橘园,但在农作物收获后土壤侵蚀量比较大,建议增加橘园表面的覆盖;刘勇等^[10]对比三峡库区 6 种退耕还林模式的水土保持效益表明,橘园涵养水源效益较好。当土壤类型不相同,在相同降雨条件下的产流产沙特征存在差异^[11-12]。桂西北喀斯特小流域内广泛分布有石灰土和红壤^[13],成土母质以碳酸盐为主,石灰土普遍分布在石山、半石山上,地带性红壤主要分布在土山^[14],桂西北喀斯特坡地石灰土橘园与红壤橘园分布较广,但目前关于喀斯特地区不同土壤类型下的坡

地幼龄橘园的侵蚀特征研究仍较少。因此,研究不同土壤类型下的坡地幼龄橘园的侵蚀特征,对深入认识喀斯特坡地土壤侵蚀机理具有较大意义。

当前,关于坡地橘园土壤侵蚀特征的研究主要集中在非喀斯特区,且对橘园土壤侵蚀特征的研究大多基于野外原位观测,关于喀斯特地区坡地橘园土壤侵蚀的定量认识十分匮乏。由于喀斯特区与非喀斯特区坡地土壤侵蚀过程的差别显著^[15],不能基于非喀斯特地区的研究成果对喀斯特区坡地橘园的土壤侵蚀程度进行合理评价。因此,为深化对桂西北喀斯特区坡地橘园土壤侵蚀特征的认识,以桂西北喀斯特区 2 种不同土壤类型的坡地幼龄橘园为研究对象,通过人工模拟降雨试验,探究在同一地区不同土壤类型的坡地幼龄橘园在不同降雨条件下的产流产沙特征,可为合理评价桂西北喀斯特区坡地幼龄橘园的土壤侵蚀程度提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 供试土样

供试土壤为桂西北喀斯特区内广泛分布的石灰土与红壤,均取自广西壮族自治区环江毛南族自治县大才乡。石灰土取自大才乡路口处(108°13'34"E,24°47'45"N)由石灰岩发育的石灰性坡地幼龄橘园 0—40 cm 土层的黄色石灰土。红壤取自大才乡木莲屯(108°18'57"E,24°43'59"N)坡地幼龄橘园 0—40 cm 土层土壤,试验所用土壤均具有一定的典型性。试验供试土样在室内自然风干后过 10 mm 筛,土壤的基本理化性质见表 1。

1.2 试验装置

试验器材主要由降雨设备和变坡度钢槽组成。模拟降雨器采用组合的顶喷式降雨器,由 4 个喷头组成,喷头为美国 SPRACO 锥形喷头,降雨高度为 4.75 m。降雨器压力表控制在 0.08 MPa 时,雨滴下

降到终点的速度符合自然降雨特性。在降雨前对降雨强度进行校准,降雨均匀度可达到 80% 以上,降雨有效半径为 2 m^[16]。试验土槽为 2 m(长)×1 m(宽)×0.6 m(深)的可升降钢槽,可调节坡度范围为 0~30°,土槽距地面 50 cm。土槽下端设有地表径流

集流槽,在集流槽出水口下方采用径流桶收集径流泥沙样。在土槽下端左侧留出直径为 2 cm 的小孔,连接集流管用于收集壤中流,在土槽底部均匀钻取 6 个直径为 5 cm 的排水孔,以保证试验过程中土槽底部排水良好^[17]。

表 1 供试土壤基本物理性质

土壤类型	土壤颗粒组成/%			容重/ (g·cm ⁻³)	有机质/ (g·kg ⁻¹)
	黏粒 (0~0.002 mm)	粉粒 (0.002~0.02 mm)	砂粒 (0.02~2 mm)		
石灰土	14.79±2.84	14.87±2.90	70.34±5.74	1.22±0.07	12.06±0.13
红壤	15.31±2.30	64.35±9.58	20.34±11.88	1.36±0.05	17.00±0.37

1.3 试验设计

通过对桂西北喀斯特区坡地幼龄橘园的实地调查发现,坡地幼龄橘园的坡度主要集中在 5°~15°,因此,本试验设计坡度为 10°。参照 Fu 等^[18]研究及该地区降雨重现期的统计分析^[19],设计降雨强度分别为 30,60,90 mm/h 的低、中、高雨强。降雨量为 90 mm,对应降雨历时分别为 180,90,60 min。试验设置石灰土橘园、红壤橘园 2 种处理,每种处理设置 3 个重复。土槽填土厚度为 40 cm,分 4 层填入土槽,每层厚度 10 cm,每层填土质量按照表 1 中的容重进行称取。在填土过程中,利用自制的矩形铁板对土层和填土边界进行压实,以减少边界效应对试验的影响。填土完成后,由当地具有 3 年以上柑橘种植经验的农民将 1 棵 1 年生的沃柑树苗(“渝审柑橘 2012002”)移栽到土槽的正中间位置,初始树高为 89.67±3.30 cm,所移栽树苗均为同一批次培育,然后将土槽置于室外自然沉降 6 个月。

室内模拟降雨试验于 2021 年 7—9 月进行,在进行降雨试验前 1 个星期使用透明防水帆布将置于室外自然沉降的土槽四周进行密闭处理,防止突发自然降雨和自然风对降雨试验造成影响。为减轻土壤前期含水量对试验的影响,在正式降雨前 1 天,用 30 mm/h 雨强进行预降雨,直至坡面产流为止,以保证试验前期土壤条件一致性。当降雨器喷头稳定出水时,开始记录地表径流、壤中流的初始产流时间;降雨强度为 30,60,90 mm/h 的地表径流、壤中流的径流泥沙样接样间隔分别为 10,5,3 min。降雨结束后,对收集到的径流泥沙样进行称重,径流泥沙样品静置后倒掉上清液,然后置于 105°烘箱中烘 24 h 至恒重,用精度为 0.000 1 g 电子天平称量出泥沙重量。

1.4 数据处理

利用 Excel 2016 软件对产流量、产沙量数据进行预处理,利用 SPSS 25 软件对收集到的径流、泥沙数据进行统计分析,其中显著性差异性采用 LSD (least signification difference test)进行样本检验,利用 Origin 2018 软件进行制图。

2 结果与分析

2.1 产流总量特征

由表 2 可知,当降雨强度为 30,60 mm/h 时,石灰土橘园与红壤橘园的产流总量存在显著性差异($p<0.05$)。当降雨强度为 30 mm/h 时,红壤橘园的产流总量为石灰土橘园的 2.46 倍;雨强增大到 60 mm/h 时,石灰土橘园、红壤橘园的产流总量分别增加 23.37,4.60 L。当降雨强度为 90 mm/h 时,石灰土橘园与红壤橘园的产流总量无显著性差异($p>0.05$);且与 60 mm/h 雨强时的产流总量相比较,二者的产流总量分别增加 76.34,11.76 L。

表 2 不同坡地橘园产流总量

土地利用 类型	产流总量/L		
	30 mm/h	60 mm/h	90 mm/h
石灰土橘园	60.48±34.51b	83.85±16.33b	160.19±26.49a
红壤橘园	149.02±28.24a	153.62±15.33a	165.38±10.32a

注:同列字母表示同一降雨强度下不同土地利用类型间差异显著($p<0.05$)。下同。

对比不同降雨强度下,石灰土橘园与红壤橘园径流组成(图 1)可知,随着降雨强度增大,石灰土橘园与红壤橘园地表产流量占总产流量比例相应地增大;石灰土橘园与红壤橘园壤中流产流量占总产流量比例却随着降雨强度的增大而减小。降雨强度为 30 mm/h 时,石灰土橘园无地表径流产生(图 1a),其产流主要以壤中流为主;红壤橘园均产生地表径流与壤中流,其壤中流产流量占总产流量的 13%;当降雨强度增大到 60 mm/h 时,石灰土橘园仍以壤中流产流为主,而红壤橘园的壤中流产流占比却比 30 mm/h 时减小 3%;随着降雨强度的继续增大,石灰土橘园与红壤橘园的地表产流量占比均相应地增大,而壤中流产流量占比却相应地减小。

2.2 产流过程

2.2.1 地表径流过程 由图 2 可知,当降雨强度为 30 mm/h 时,石灰土橘园无地表径流产生;红壤橘园地表径流强度在产流开始后快速增大,在产流 60 min 后趋于稳定,并一直持续到降雨结束,其稳定地

表径流强度均值为 23.25 mm/h。当降雨强度增大至 60 mm/h 时,石灰土橘园开始产生地表径流,其地表径流强度随降雨历时增大而缓慢增大,其达到稳定时的径流强度均值为 13.39 mm/h;红壤橘园地表径流强度随降雨历时的变化过程与 30 mm/h 雨强的变化过程一致,其达到稳定径流强度的均值为 49.01 mm/h。

当降雨强度为 90 mm/h 时,石灰土橘园与红壤橘园的地表径流强度在产流初期快速增大,并快速达到稳定值,二者均稳定在某一径流强度值上下波动,其二者的稳定地表径流强度均值分别 57.83, 77.74 mm/h, 分别比 60 mm/h 雨强下稳定地表径流强度增大 331.89%, 58.62%。

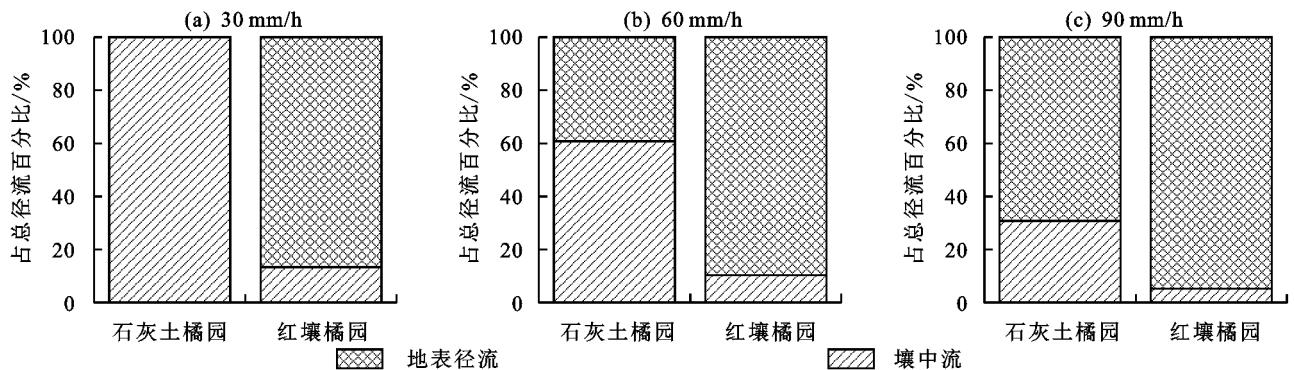


图 1 不同雨强下不同坡地橘园各部分产流总量占比

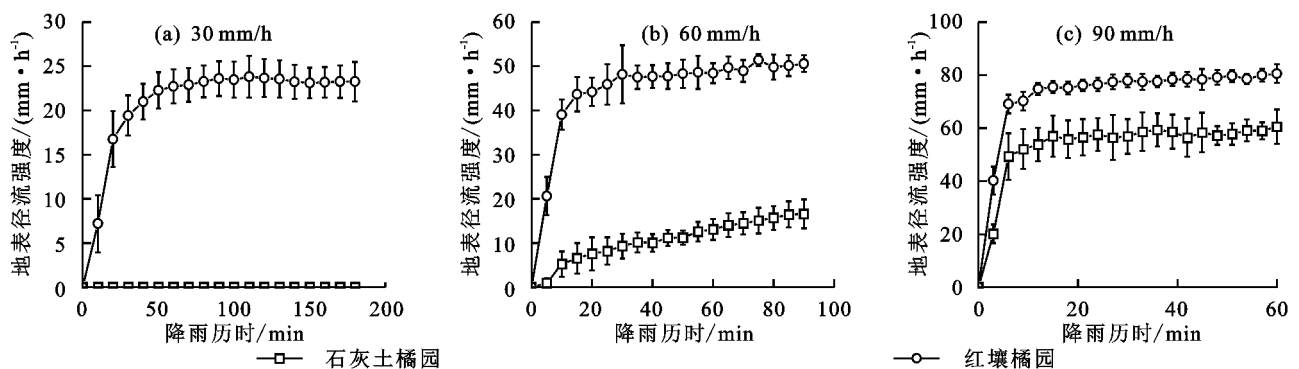


图 2 不同坡地橘园地表径流随降雨历时变化

2.2.2 壤中流径流过程 由图 3 可知,当降雨强度相同时,石灰土橘园壤中流径流强度明显大于红壤橘园。当降雨强度为 30 mm/h 时,石灰土橘园的壤中流径流强度随降雨历时增大缓慢增大,当降雨历时为 50 min 时,其壤中流径流强度快速增大并逐渐趋于稳定,其达到稳定时的壤中流径流强度为 11.44 mm/h;降雨强度为 60 mm/h 的壤中流径流强度快速增大的时间比 30 mm/h 雨强时快,降雨历时为 65 min 时,其达到稳定时的壤中流径流强度均值为 17.68 mm/h。当降雨强度为 30, 60 mm/h 时,红壤橘园的壤中流径流强度随

降雨历时的增大呈先缓慢增大再逐渐趋于平缓的趋势, 60 mm/h 雨强时的稳定壤中流径流强度均值为 1.49 mm/h。当降雨强度由 30 mm/h 增大到 60 mm/h 时,石灰土橘园的稳定壤中流径流强度增大 54.55%, 红壤橘园的稳定壤中流径流强度减小 19.46%。当降雨强度为 90 mm/h 时,石灰土橘园的壤中流径流强度随着降雨历时的增大而增大;红壤橘园的壤中流径流强度变化趋势与 30, 60 mm/h 的变化趋势相同。对比 60 mm/h 雨强时的壤中流径流强度,石灰土橘园与红壤橘园的壤中流径流强度分别减少 19.68%, 3.79%。

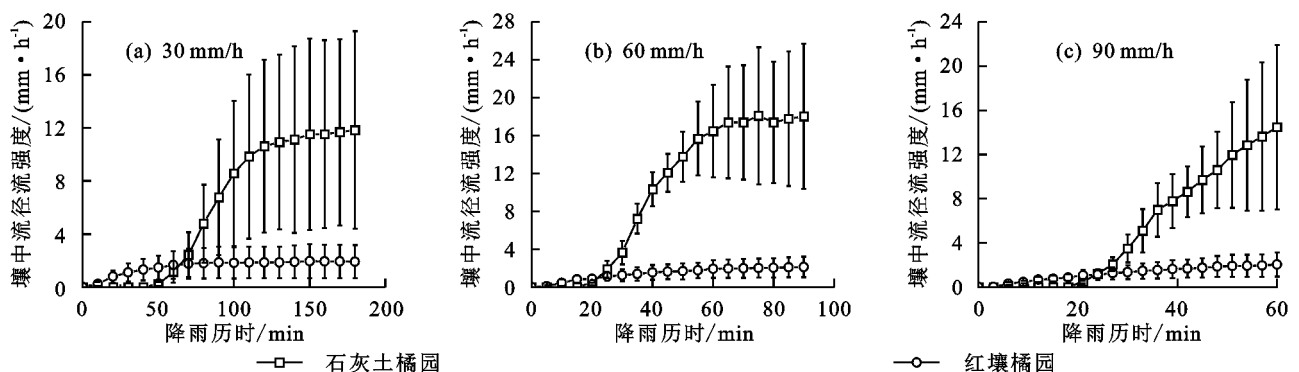
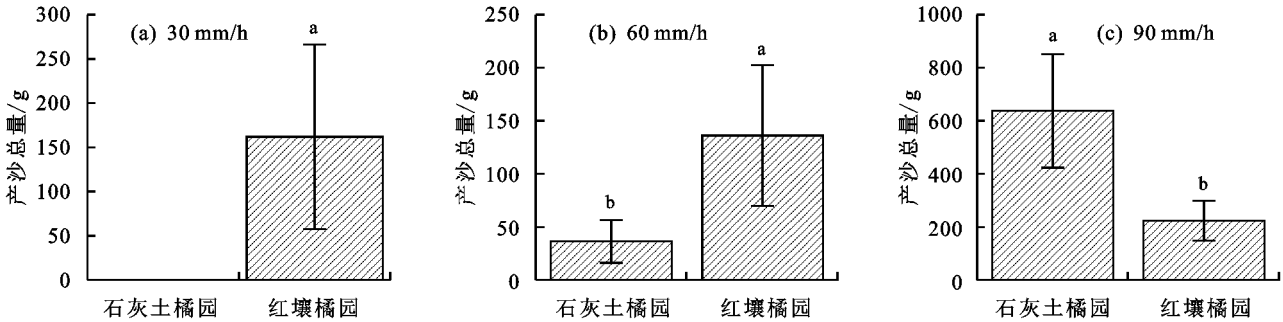


图 3 不同坡地橘园壤中流随降雨历时变化

2.3 产沙过程

由图 4 可知,当降雨强度相同时,石灰土橘园与红壤橘园的产沙总量存在显著性差异($p<0.05$)。当降雨强度为 30 mm/h 时,石灰土橘园地表产沙量为 0,红壤橘园地表产沙总量为 161.91 g。当降雨强

度增大到 60 mm/h 时,石灰土橘园地表产沙总量为 36.40 g;红壤橘园的地表产沙总量比 30 mm/h 时减少 25.87 g。当降雨强度达到 90 mm/h 时,石灰土橘园与红壤橘园的地表产沙总量分别比降雨强度为 60 mm/h 时增加 1 651.43%,63.96%。



注:图柱上方不同小写字母表示同一降雨强度下不同土地利用类型间差异显著($p<0.05$)。

图 4 不同坡地橘园地表泥沙流失总量

由图 5 可知,当降雨强度为 30 mm/h 时,石灰土橘园地表无泥沙产生;红壤橘园的产沙量随降雨历时的增大而增大,但在降雨时段后期,其产沙量呈上下波动趋势。当降雨强度为 60 mm/h 时,石灰土橘园的产沙量在降雨初期快速达到最大值后快速下降到

某一极小值,存在短暂的平衡后,其产沙量呈上下波动趋势。当降雨强度增大到 90 mm/h 时,石灰土橘园的产沙量随降雨历时的增大呈上下波动趋势;红壤橘园的产沙量随降雨历时的增大呈先缓慢增大后趋于平缓的趋势。

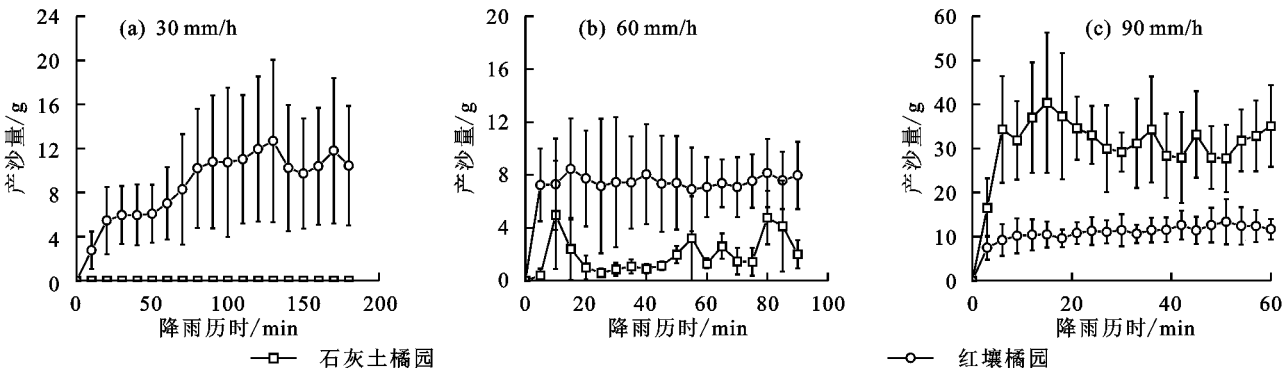


图 5 不同坡地降雨产沙量随降雨历时变化

2.4 累积产沙量与累积产流量的关系

由表 3 可知,当降雨强度为 60,90 mm/h 时,石灰土橘园与红壤橘园的累积产沙量与累积产流量存在显著线性关系,相关系数均大于 0.97,累积产沙量随着累积产流量的增加而增加。当降雨强度相同时,石灰土橘园累积产沙量的递增斜率均大于红壤橘园,降雨强度越大,递增斜率越大;而截距变化并不随雨强的增大而增大,当降雨强度为 30 mm/h 时,石灰土橘园的截距小于红壤橘园,当降雨强度增大到 90 mm/h 时,石灰土橘园的截距大于红壤橘园。拟合方程表明,随着降雨强度的增大石灰土橘园、红壤橘园的累积产沙量与累积产流量的线性关系越显著。

3 讨论

当降雨强度相同时,红壤橘园的地表径流强度大于石灰土橘园,而石灰土橘园的壤中流径流强度却大于红壤橘园。石灰土与红壤因成土母质不相同,

其二者的基本理化性质存在差异,进而二者的径流过程也存在不同。土壤容重作为衡量土壤物理状况的指标之一,容重的大小可以反映土壤的松弛程度,容重大,表明土壤紧实板结,团粒结构少,容重小,则土壤表面孔隙多,结构良好^[20]。本试验中石灰土、红壤容重分别为 1.22,1.36 g/cm³,由此可判断石灰土橘园中土壤表面土壤孔隙大于红壤橘园。已有研究^[20-21]表明,当土壤容重增大时,地表径流系数相应增大,地表产流时间相应提前,同时土壤的入渗速率减小,且在降雨过程中,土壤表面产生结皮,土壤结皮阻碍坡面土壤水分入渗,促进坡面产流^[22]。本研究中,红壤橘园地表径流强度达到稳定的时间早于石灰土橘园,且红壤橘园地表径流强度比石灰土橘园稳定。其主要原因为红壤颗粒组成中黏粒、粉粒含量大于石灰土,当土壤中细小颗粒较多时,在雨滴击溅和土壤颗粒理化分散作用下,红壤表面形成的结皮比石

灰土快,从而导致红壤橘园地表径流强度达到稳定的时间早于石灰土橘园,红壤橘园稳定地表径流强度大于石灰土橘园。当降雨强度为 30 mm/h 时,石灰土橘园地表未发生产流,其主要原因为石灰土橘园的砂砾含量较高,土壤蓄水能力较弱,土壤水分入渗和侧渗能力强^[23],降水全部转化为壤中流和地下孔隙流,只有当降雨强度大于地表入渗速率时,石灰土坡面才产生地表径流。李焱秋等^[24]通过模拟降雨试验指出,在降雨强度较小时(≤ 30 mm/h),石灰土坡地地表无径流形成,主要以地下产流为主,与本文研究结果一致。

表 3 不同坡地橘园累积产沙量(y)与累积产流量(x)拟合方程

降雨强度/ (mm·h ⁻¹)	土地利用 类型	拟合方程	R ²	皮尔逊 相关性
30	石灰土橘园	—	—	—
	红壤橘园	$y = 3.88x - 25.01$	0.9928	0.996
60	石灰土橘园	$y = 2.90x + 10.79$	0.9796	0.990
	红壤橘园	$y = 2.83x + 21.16$	0.9991	0.999
90	石灰土橘园	$y = 17.06x + 77.72$	0.9972	0.999
	红壤橘园	$y = 4.48x - 3.86$	0.9992	0.999

本试验中,当降雨强度为 30,60 mm/h 时,红壤橘园的产沙量大于石灰土橘园,而当降雨强度为 90 mm/h 时,石灰土橘园的产沙量大于红壤橘园。在降雨径流所引起的土壤侵蚀中,径流动能的选择性侵蚀和搬运,使得较小的泥沙颗粒先启动进入径流,且随径流搬运距离较远,而粗颗粒在坡面沉积,引起坡面土壤的粗化^[25]。降雨作为水力侵蚀重要影响因素,降雨强度大小直接影响雨滴对土壤颗粒打击作用的大小,同时降雨形成的径流携带的泥沙主要以黏粒、粉粒以及细砂粒为主^[26]。本试验红壤的颗粒组成中黏粒、粉粒的含量均大于石灰土,因此,在降雨强度较小时(30,60 mm/h),红壤橘园产沙量大于石灰土橘园。当降雨强度为 60 mm/h 时,石灰土橘园的地表径流强度较小,所形成的地表径流不能携带走土壤表层的砂砾,只能带走土壤表层含量较少的黏粒和粉粒,因此,在此雨强下,石灰土橘园的产沙量较少。在降雨过程中,石灰土橘园的产沙量随降雨历时的增大呈上下波动趋势,而红壤橘园的产沙量在整个降雨过程中较为稳定。在降雨过程中,当土壤表面有径流产生时,随着降雨的持续,土壤表面产生结皮,结皮的存在能有效减少土壤侵蚀;在降雨强度相同时,土壤结皮形成强度越大,产沙量越小^[27]。本研究中,红壤的黏粒、粉粒含量大于石灰土,红壤的结皮比石灰土结皮更为发育,红壤橘园的产沙过程较为稳定,与田培等^[28]的研究结果相类似。当降雨强度为 90 mm/h

时,石灰土橘园的产沙量突然增大,其主要原因是随着降雨强度的增大雨滴动能增加,降雨对坡面的打击力度升高,雨滴击溅使得坡面表层的粗颗粒不断被打散^[29],从而导致石灰土橘园具有较高的产沙量,与甘艺贤等^[30]、袁应飞等^[31]的研究结果相类似。在降雨过程中,新老结皮的交替过程使产沙强度呈交替波动趋势^[27],而造成石灰土橘园的产沙过程呈上下波动趋势,而红壤橘园的结皮发育较为完整,所以,红壤橘园的产沙过程较为稳定。本研究对不同土壤类型橘园的累积产沙量与累积产流量进行拟合分析发现,不同土壤类型的累积产沙量与累积产流量存在显著线性关系,雨强越大线性关系越显著,当降雨强度由 60 mm/h 增大到 90 mm/h 时,石灰土橘园的累积产沙量递增斜率增大 5.88 倍,截距增大 7.20 倍,而红壤橘园的累积产沙量递增斜率只增大 1.58 倍,其截距反而随着雨强的增大而减小为负值,由此可说明,红壤橘园产沙量比石灰土橘园的稳定。最后,本试验的研究结果是通过人工模拟降雨获得的,为加深对桂西北喀斯特区石灰土与红壤坡地幼龄橘园降雨侵蚀特征的了解,还需要通过天然降雨对喀斯特坡地幼龄橘园的产流产沙特征进一步观测研究。

4 结论

(1)小雨强时(30,60 mm/h),石灰土橘园与红壤橘园的产流总量存在显著性差异($p < 0.05$),且石灰土橘园主要以壤中流产流为主,红壤橘园主要以地表产流为主;90 mm/h 雨强时,石灰土橘园与红壤橘园的产流总量无显著性差异($p > 0.05$),二者均以地表产流为主。

(2)降雨强度为 30 mm/h 时,石灰土橘园只产生壤中流,在降雨条件相同时,石灰土橘园的稳定地表径流强度小于红壤橘园,但石灰土橘园的稳定壤中流强度大于红壤橘园;在试验过程中,石灰土橘园与红壤橘园的地表径流强度均随降雨强度的增大而增大。随着降雨强度增大,石灰土橘园壤中流径流强度呈先增大后减小趋势,红壤橘园的壤中流径流强度却在减小。

(3)小雨强时(30,60 mm/h),石灰土橘园的产沙总量小于红壤橘园,当降雨强度为 90 mm/h 时,石灰土橘园产沙总量大于红壤橘园。在降雨过程中,石灰土橘园产沙量随降雨历时的增大上下波动较为剧烈,而红壤橘园的产沙量随降雨历时的增大上下波动幅度较小。

(4)当降雨强度 ≥ 60 mm/h 时,石灰土橘园与红壤橘园的累积产沙量与累积产流量存在显著线性关

系,相关系数均在 0.97 以上,且降雨强度越大线性关系越显著。

参考文献:

- [1] 黄凯,刘瑞禄,覃莉,等.不同降雨条件下坡长对喀斯特坡面土壤侵蚀的影响[J].应用生态学报,2021,32(1): 271-280.
- [2] 马芊红,张科利.西南喀斯特地区土壤侵蚀研究进展与展望[J].地球科学进展,2018,33(11):1130-1141.
- [3] 俞月凤,彭晚霞,宋同清,等.喀斯特峰丛洼地不同森林类型植物和土壤 C、N、P 化学计量特征[J].应用生态学报,2014,25(4):947-954.
- [4] 饶珠阳,牙莉.2017 年广西水果产业结构分析[J].广西农学报,2018,33(2):34-38.
- [5] 涂安国,谢颂华,李英,等.红壤坡地柑桔园长期试验下水沙动态变化特征分析[J].水土保持学报,2018,32(2): 160-165.
- [6] Cerdà A, Morera A G, Bodí M B. Soil and water losses from new citrus orchards growing on sloped soils in the western Mediterranean Basin[J].Earth Surface Processes and Landforms,2009,34(13):1822-1830.
- [7] 孙永明,叶川,王学雄,等.赣南脐橙果园水土流失现状调查分析[J].水土保持研究,2014,21(2):67-71.
- [8] 江才伦,彭良志,曹立,等.三峡库区紫色土坡地柑橘园不同耕作方式的水土流失研究[J].水土保持学报,2011, 25(4):26-31,35.
- [9] Duan J, Liu Y J, Yang J, et al. Role of groundcover management in controlling soil erosion under extreme rainfall in citrus orchards of Southern China[J].Journal of Hydrology,2020,582:e124290.
- [10] 刘勇,王玉杰,王红霞,等.长江三峡库区 6 种退耕还林模式涵养水源与保育土壤效益及其价值估算[J].中国水土保持科学,2014,12(6):50-58.
- [11] Gao Z C, Xu Q X, Si Q, et al. Effects of different straw mulch rates on the runoff and sediment yield of young citrus orchards with lime soil and red soil under simulated rainfall conditions in southwest China[J].Water,2022,14(7):e1119.
- [12] 刘晓路,徐文玉,王可,等.红壤和紫色土坡面产流产沙特征对比[J].长江流域资源与环境,2022,31(8):1866-1872.
- [13] 李杨,苏以荣,何寻阳,等.桂西北棕色石灰土和红壤有机碳矿化特征和差异[J].农业现代化研究,2012,33 (5):632-635.
- [14] 俞月凤,何铁光,宋同清,等.桂西北喀斯特地区石灰土养分空间变异特征[J].生态学报,2018,38(8):2906-2914.
- [15] 陈洪松,冯腾,李成志,等.西南喀斯特地区土壤侵蚀特征研究现状与展望[J].水土保持学报,2018,32(1):10-16.
- [16] Fu Z Y, Chen H S, Zhang W, et al. Subsurface flow in a soil-mantled subtropical dolomite karst slope: A field rainfall simulation study [J]. Geomorphology, 2015,250:1-14.
- [17] 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.
- [18] Fu Z Y, Chen H S, Xu Q X, et al. Role of epikarst in near-surface hydrological processes in a soil mantled subtropical dolomite karst slope: Implications of field rainfall simulation experiments [J]. Hydrological Processes,2016,30(5):795-811.
- [19] Wang S, Fu Z Y, Chen H S, et al. Mechanisms of surface and subsurface runoff generation in subtropical soil-epikarst systems: Implications of rainfall simulation experiments on Karst slope[J].Journal of Hydrology,2020,580:e124370.
- [20] 郭成久,孙景刚,苏芳莉,等.土壤容重对草甸土坡面养分流失特征的影响[J].水土保持学报,2012,26(6):27-30.
- [21] 沈奕彤,郭成久,金珊,等.土壤容重对黑土坡面养分流失的影响[J].水土保持学报,2016,30(1):26-30.
- [22] 吴秋菊,吴佳,王林华,等.黄土区坡耕地土壤结皮对入渗的影响[J].土壤学报,2015,52(2):303-311.
- [23] 彭旭东,戴全厚,杨智,等.喀斯特山地石漠化过程中地表地下侵蚀产沙特征[J].土壤学报,2016,53(5):1237-1248.
- [24] 李焱秋,戴全厚,甘艺贤,等.喀斯特裸坡地径流对降雨强度与坡度的响应[J].水土保持学报,2019,33(5):28-33.
- [25] 钱婧,张丽萍,王文艳.红壤坡面土壤团聚体特性与侵蚀泥沙的相关性[J].生态学报,2018,38(5):1590-1599.
- [26] 周梦玲,郭建斌,崔明,等.喀斯特坡地侵蚀泥沙养分流失与粒径分布的关系[J].水土保持学报,2019,33(6): 54-60,71.
- [27] 路培,王林华,吴发启.不同降雨强度下土壤结皮强度对侵蚀的影响[J].农业工程学报,2017,33(8):141-146.
- [28] 田培,仇浩然,冯宇,等.雨强和坡度对红壤坡面产流产沙及侵蚀动力过程影响[J].水土保持研究,2020,27 (6):1-8.
- [29] 刘正堂,戴全厚,倪九派,等.喀斯特地区裸坡面土壤侵蚀的人工模拟降雨试验研究[J].水土保持学报,2013, 27(5):12-16.
- [30] 甘艺贤,戴全厚,伏文兵,等.基于模拟降雨试验的喀斯特坡耕地土壤侵蚀特征[J].应用生态学报,2016,27 (9):2754-2760.
- [31] 袁应飞,戴全厚,李昌兰,等.喀斯特典型坡耕地模拟降雨条件下的土壤侵蚀响应[J].水土保持学报,2016,30 (3):24-28.