

# 紫鹊界梯田区坡面产流产沙特征的模拟试验研究

张冠华, 程冬兵, 张平仓, 许文盛, 沈盛彧, 张长伟, 徐文玉

(长江科学院 水土保持研究所, 湖北 武汉 430010)

**摘要:** 通过野外模拟降雨试验, 研究了紫鹊界梯田区红薯地与裸地土壤入渗及坡面产流产沙特征。结果表明, 与裸地坡面相比, 红薯地坡面由于覆盖度高, 土壤疏松, 其土壤入渗率比裸地高。在小雨强(0.65 mm/min)条件下无径流产生, 中(1.15 mm/min)、高(1.65 mm/min)雨强下坡面产流产沙速率以及径流系数均有很大程度的降低, 表现出较强的减流减沙效益, 但径流含沙量分别为裸地的 1.3 和 2.8 倍; 试验条件下的坡面产流产沙和土壤入渗过程均符合幂函数关系, 产流率与产沙率之间呈线性关系。

**关键词:** 产流产沙; 土壤入渗; 模拟降雨; 紫鹊界梯田

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2013)06-0009-04

中图分类号: S157.1

## Runoff and Sediment Yield Characteristics on Slopes in Ziquejie Terrace Area Under Simulated Rainfall

ZHANG Guan-hua, CHENG Dong-bing, ZHANG Ping-cang,

XU Wen-sheng, SHEN Sheng-yu, ZHANG Chang-wei, XU Wen-yu

(Department of Soil and Water Conservation, Changjiang River Scientific Research Institute, Wuhan, Hubei 430010, China)

**Abstract:** Simulated field rainfall experiments were conducted to study the runoff and sediment production as well as soil infiltration characteristics on sweet potato and bare lands in Ziquejie terrace area. The results showed that compared to the two bare lands, sweet potato land had a much higher infiltration rate due to its high coverage and loose soil. No runoff was generated on sweet potato land during the low rainfall intensity of 0.65 mm/min, and the runoff, sediment rate and runoff coefficient reduced substantially in comparison to bare lands during medium(1.15 mm/min) and high(1.65 mm/min) rainfall intensities, showing a strong runoff and sediment reduction effect. However, it had a relatively higher sediment concentration with the value being 1.3 and 2.8 times of bare lands, respectively. In the current study, runoff, sediment, and infiltration processes fitted well by power functions. The sediment rate was linearly correlated with runoff rate.

**Keywords:** runoff and sediment yield; soil infiltration; simulated rainfall; Ziquejie terrace

紫鹊界梯田起源于秦汉, 盛于唐宋, 迄今已有两千多年的历史, 是当今世界修筑最早的梯田之一<sup>[1-2]</sup>。该区梯田的突出特点是分布梯度大(分布于 25°~40°的山坡上, 通常大于 25°的坡地因保水困难不易进行水稻田耕作), 并且通过自流灌溉实现旱涝保收, 因而堪称农田水利灌溉工程之典范<sup>[3]</sup>。

目前, 很多学者就紫鹊界梯田原生态自流灌溉体系及形成机理进行了初步分析<sup>[1-7]</sup>, 其结果对该区的规划开发具有理论指导意义, 但关于其水土流失、水分运移过程和水资源调配机制方面尚未见报道。基于此, 本研究通过野外模拟降雨试验分析该区坡面产流产沙特征, 以期揭示该区土壤入渗、水土流失过程

及影响因子, 同时也为构建梯田区天然原生态自流灌溉系统中水分运移转化过程模型及进一步提出保护措施奠定基础。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验区概况

紫鹊界梯田区位于湖南省新化县西南部水车镇(110°52'—111°01'E, 27°40'—27°45'N), 为中低山丘陵地貌, 海拔 400~1 236 m。该区属亚热带季风气候, 年平均气温为 13.7 °C, 最高气温 39 °C, 最低气温 -5 °C; 年降雨量为 1 650~1 700 mm。土壤质地系砂岩, 为花岗岩风化发育的黄土、红沙土、麻沙土,

收稿日期: 2013-05-16

修回日期: 2013-05-22

资助项目: 水利部公益性行业科研专项“紫鹊界梯田原生态自流灌溉体系机理研究”(201101030); 国家自然科学基金“三峡库区草地土壤分离能力动态变化及其驱动机制”(41301298)

作者简介: 张冠华(1983—), 女(蒙古族), 内蒙古自治区赤峰市人, 博士, 工程师, 主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail: zgh83113@126.com。

结构性和透水性均较好。紫鹊界梯田面积 3 801.6 hm<sup>2</sup>, 遍布于海拔 500~1 200 m 的山坡上, 共 10 余万丘, 500 余级; 横跨 8 面坡, 5 条沟, 4 列支山脉。梯田平均宽度 1.75 m (最宽约 10 m), 级与级之间平均高差 1.25 m, 田埂平均宽度 0.3 m, 高 0.25 m。尽管该区梯田分布于 25°~40° 山坡上, 且无任何水利设施, 但其水分存储、分配体系却很完善, 一年四季水满田畴, 粮丰人旺, 是该区传统保水保土耕作与特定生态环境和谐发展创造的奇迹。

## 1.2 模拟降雨设备

降雨器采用长江科学院水土保持研究所可移动水土流失实验系统的下喷摆动式人工降雨装置。该降雨系统由模拟降雨器, 供水系统, 水箱组成; 模拟降雨器设有 3 组下喷摇摆式喷头(喷嘴可更换 3 个型号), 分自动、手动两种控制模式, 以此调节雨量大小; 其有效降雨面积 1 m×3 m, 降雨高度 2.4 m, 可控制降雨强度 20~170 mm/h, 降雨均匀系数大于 0.8, 模拟降雨近似天然降雨<sup>[8]</sup>。

## 1.3 试验布设

综合考虑研究区植被、耕作方式、地形及降雨设备(交通便利、水源供给、便于操作)等因素, 另需具代表性, 试验选取几个典型地块布设径流小区(表 1)。试验小区的布设是通过 3 块钢板(宽 15 cm, 厚 2 mm)平行插入土中围建而成, 规格均为 3 m×1 m, 留出露地高度约 5.5 cm; 小区底部设铁制漏斗形水沙集流槽, 同样平行插入坡面, 用以汇集坡面径流泥沙。

表 1 径流小区特征描述

小区编号	土地利用类型	盖度/%	容重/(g·cm <sup>-3</sup> )	含水量/%	坡度/(°)
P <sub>1</sub>	裸地	—	1.34	20.1	10
P <sub>2</sub>	红薯地	100	1.14	24.2	7
P <sub>3</sub>	裸地	—	1.32	29.6	29

## 1.4 指标测定

(1) 雨前表土采集。降雨试验前, 在小区附近用环刀取样, 以测定土壤容重及水分指标; 另采集一定土样带回实验室, 用于降雨前表层土壤的理化性质分析。

(2) 雨强率定。每次降雨前用彩条布盖住小区, 其上均匀布置 4 个雨量筒, 降雨 5 min, 测定降雨量, 以此计算降雨强度及均匀度; 均匀度误差在 5%~10% 以内可进行试验, 以 4 个点的平均值作为试验雨强; 若误差太大, 需调整降雨器的喷头, 重新率定。根据多次率定结果, 本研究采用低(0.65 mm/min)、中(1.15 mm/min)、高(1.65 mm/min) 3 个雨强进行模拟试验。

(3) 降雨侵蚀过程观测。降雨开始后即计时, 记录开始产流时间; 根据产流强度确定取样频次, 用塑料桶收集全部径流泥沙过程样。

(4) 产流产沙量: 降雨结束后记录降雨历时及结束产流时间; 测定桶内径流量, 搅动均匀, 用小瓶子收集 100 ml 混合样, 带回实验室用以测定含沙量, 进一步计算产流产沙量。

忽略雨期蒸发和植被截留, 各取样时段内的土壤入渗速率计算公式为:

$$i = I \cos \theta - \frac{\sum R_i}{At} \quad (1)$$

式中:  $R_i$ ——第  $i$  次取样的产流量(ml);  $I$ ——降雨强度(mm/min);  $i$ ——土壤入渗速率(mm/min);  $t$ ——产流时间(min);  $A$ ——坡面面积(m<sup>2</sup>);  $\theta$ ——地表坡度。

## 2 结果与分析

### 2.1 坡面小区平均产流、产沙特征描述

2.1.1 初始产流时间 图 1 显示了各个小区在 3 个雨强下的初始产流时间。分析图 1 可知, 各小区平均开始产流时间表现为:  $P_1 > P_3 > P_2$ 。雨强、坡度、植被、土壤性质等因素均能影响坡面产流时间, 红薯地  $P_2$  为农用地(表 1), 长期经营管理, 土壤疏松, 利于水分入渗; 且覆盖度很高, 增强其截留降雨; 坡度也很小, 这些作用均能延迟地表径流的产生, 导致其初始产流时间值明显低于  $P_1$  和  $P_3$ 。此外, 随着降雨强度的增大, 各小区开始产流时间均降低, 以红薯地小区  $P_2$  变化最为明显, 其在小雨强 0.65 mm/min 下无径流产生, 在大雨强 1.65 mm/min 下为 1.42 min; 其次为  $P_1$  小区, 变幅约为 8.35 min (由小雨强的 9.5 min 降低到大雨强的 1.15 min)。  $P_1$  和  $P_3$  均为裸地(表 1), 容重接近, 而土壤含水量和坡度  $P_3$  明显大于  $P_1$ , 分析结果显示不同雨强下  $P_1$  小区开始产流时间为  $P_3$  小区的 1.25~2.14 倍(图 1), 因此, 后续研究可围绕多坡度和多前期含水量梯度展开, 深入探索含水量、坡度及可能的交互作用对坡面产流的影响, 分析其作用效果及贡献大小。

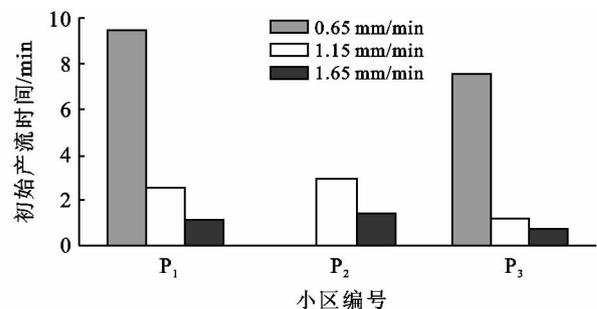


图 1 不同雨强条件下各小区坡面初始产流时间

2.1.2 小区产流产沙率 径流小区的产流产沙参数值整体表现为随着雨强的增大而增大(表 2)。红薯地  $P_2$  在小雨强 0.65 mm/min 下不产流,其在中、大雨强下的产流率、径流系数、产沙率均低于裸地  $P_1$  和  $P_3$ ,表现出较强的减流减沙效益,尤其是产流率和径流系数较裸地低一个数量级,同样因其土壤疏松、高覆盖、缓坡所致,与前文分析一致。尽管红薯地  $P_2$  小雨强下无径流产生,但大雨强下的径流含沙量却很大,分别为 25.4 和 26.0 kg/m<sup>3</sup>,平均含沙量约为  $P_1$

的 2.8 倍,为  $P_3$  的 1.3 倍。此外,红薯地  $P_2$  平均入渗率也较高,为 0.627~1.577 mm/min,而裸地  $P_1$  和  $P_3$  平均入渗率分别介于 0.533~0.746 mm/min 和 0.294~0.366 mm/min 之间。同样, $P_3$  由于含水量、坡度较  $P_1$  大,导致其同等条件下的产流产沙率、径流系数及含沙量均高于  $P_1$ ;从另一方面看,因其坡度大,有效承雨面积变小,相应接受的降雨供给量减小,加之土壤前期含水量较大,所能容纳的水量变小,致使其土壤入渗率较  $P_1$  小(表 2)。

表 2 研究区不同小区坡面产流产沙参数值

小区编号	雨强/ (mm·min <sup>-1</sup> )	产流率/ (mm·min <sup>-1</sup> )	径流系数	产沙率/ (g·m <sup>-2</sup> ·min <sup>-1</sup> )	含沙量/ (kg·m <sup>-3</sup> )	入渗率/ (mm·min <sup>-1</sup> )
$P_1$	0.65	0.107	0.127	0.772	7.2	0.533
	1.15	0.394	0.334	3.032	8.1	0.694
	1.65	0.695	0.546	7.995	12.2	0.746
$P_2$	0.65	—	—	—	—	0.627
	1.15	0.026	0.024	0.671	25.4	1.036
	1.65	0.060	0.036	1.533	26.0	1.577
$P_3$	0.65	0.334	0.600	6.261	18.8	0.294
	1.15	0.693	0.657	13.281	19.2	0.231
	1.65	0.976	0.649	19.344	19.8	0.366

2.2 坡面产流产沙过程

地表径流是坡面侵蚀(细沟间侵蚀、细沟侵蚀)的主要驱动力,坡面产流过程是降水、截留、填凹、蒸发、入渗等过程与下垫面条件综合作用的结果。由于各个小区坡面产流产沙过程在不同雨强下相似,且  $P_2$  小区小雨强(0.65 mm/min)无径流产生,本研究以中雨强 1.15 mm/min 为例,对坡面土壤入渗、产流产沙过程进行分析。

2.2.1 坡面土壤入渗过程 从图 2 可以看出,红薯地  $P_2$  坡面土壤的入渗率明显高于裸地  $P_1$  和  $P_3$ ,说明红薯地坡面对降雨具有明显的拦蓄作用。这主要是因为红薯地作物对降雨动能削减(完全覆盖)从而使

坡面土壤不易形成结皮、作物根系对土壤构型的改善以及较好的经营管理增强了土壤的入渗性能造成的。不同小区初始和稳定入渗率均表现为: $P_2 > P_1 > P_3$ 。对不同坡面的土壤入渗过程进行拟合,发现采用幂函数模型进行拟合的效果最佳,决定系数  $R^2$  都在 0.9 以上(表 3)。分析表明,与有植被或作物覆盖的小区相比,裸地小区土壤结构较差,并且由于缺少植被地上部分的保护作用,降雨雨滴直接打击地表,溅散的土壤颗粒可能会堵塞土壤空隙,进而导致坡面土壤初始及平均入渗速率都较低;此外,由于裸地坡面产流强度较大,径流不断冲刷地表,使其达到稳定入渗的时间也较长。

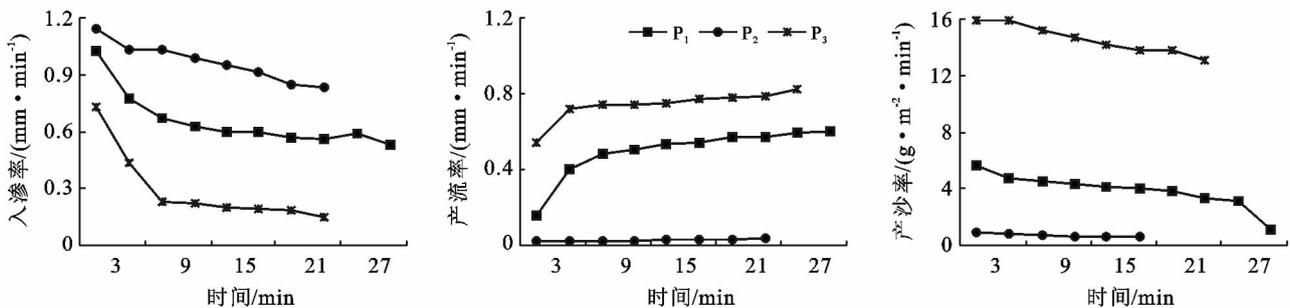


图 2 不同坡面产流产沙及土壤入渗过程

2.2.2 坡面产流产沙过程 与土壤入渗过程相反,不同小区坡面产流率大小表现为: $P_3 > P_1 > P_2$ ,且变化过程一致,均表现为产流初期很低,随着降雨的持续,土壤逐渐饱和,水分入渗趋于稳定,产流随之趋于稳定。降雨初始阶段的坡面侵蚀产沙贡献主要来自于雨滴的击溅作用,坡面产流后裸地坡面  $P_3$  的产沙率达  $15.86 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{min})$ ,分别是  $P_1$  和  $P_2$  的 2.8 和

18.5 倍;随着产流时间的延续,径流水深增大,雨滴动能直接打击分散土粒作用减小,从而侵蚀产沙率减小,但整个产流过程中裸地  $P_3$  的产沙率都最高,裸地  $P_1$  次之,红薯地  $P_2$  产流产沙过程线远低于  $P_3$  和  $P_2$ ,呈现较强的减流减沙作用。对不同小区坡面产流产沙过程进行拟合,发现产流过程符合正的幂函数关系,而产沙过程符合负的幂函数关系(表 3)。

表 3 不同坡面土壤入渗率  $i$ ,产流率  $R_r$ ,产沙率  $E_r$  与时间  $t$  之间的回归分析

拟合参数	$P_1$ 小区	$P_2$ 小区	$P_3$ 小区
入渗率/ $(\text{mm} \cdot \text{min}^{-1})$	$i=1.243t^{-0.252}, R^2=0.926^{**}$	$i=1.356t^{-0.142}, R^2=0.915^{**}$	$i=1.465t^{-0.725}, R^2=0.938^{**}$
产流率/ $(\text{mm} \cdot \text{min}^{-1})$	$R_r=0.124t^{0.508}, R^2=0.802^{**}$	$R_r=0.016t^{0.199}, R^2=0.843^{**}$	$R_r=0.503t^{0.151}, R^2=0.813^{**}$
产沙率/ $(\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{min}^{-1})$	$E_r=10.651t^{-0.416}, R^2=0.464^*$	$E_r=1.168t^{-0.237}, R^2=0.919^{**}$	$E_r=18.156t^{-0.091}, R^2=0.878^{**}$

注: \* 表示拟合关系达显著水平( $P < 0.05$ ), \*\* 表示拟合关系达极显著水平( $P < 0.01$ )。

### 2.3 产流产沙的关系分析

作为土壤可蚀性的一个指标,通常认为产流产沙关系在净分离条件下是线性的,在沉积条件下是二次回归式<sup>[9]</sup>。分析结果显示,试验条件下产流率( $R_r$ )与侵蚀产沙率( $E_r$ )之间呈极显著线性关系(图 3)。其中, $E_r=16.886R_r, R^2=0.875^{**}$ ,这与以往很多研究结果相一致<sup>[9-11]</sup>。

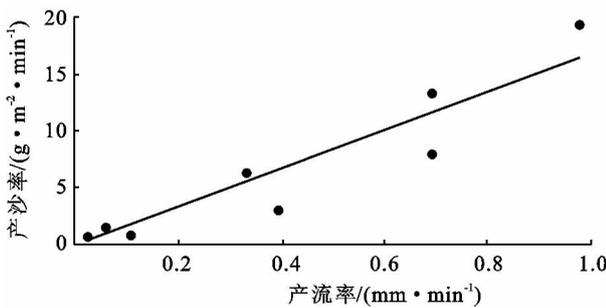


图 3 试验条件下产流率与产沙率的关系

## 3 结论

在试验条件下,与裸地坡面小区相比,红薯地坡面具有显著的减流减沙效应,其小雨强下无径流产生,中、高雨强下的产流率、径流系数较裸地低一个数量级;但径流含沙量较高,约为裸地的 1.3 和 2.8 倍,并且土壤入渗率较高。不同坡面产流产沙过程、土壤入渗过程均符合幂函数形式,产流、产沙率之间呈线性关系。

### [ 参 考 文 献 ]

[1] 许文盛,尤伟,李亚龙,等. 紫鹊界梯田原生态自流灌溉

的环境因素探析[J]. 长江科学院院报,2011,28(10):69-74.

[2] 段兴凤,宋维峰,曾洵,等. 湖南紫鹊界梯田区森林土壤涵养水源功能初步研究[J]. 水土保持研究,2011,18(1):157-160.

[3] 徐义军,李桂元. 紫鹊界原生态自流灌溉系统形成机理初探[J]. 湖南水利水电,2012(4):19-20.

[4] 许志方,聂芳容,张硕辅,等. 湖南紫鹊界梯田自流灌溉体系[J]. 中国农村水利水电,2006(4):73-74.

[5] 秦仁秋. 紫鹊界梯田保水机理解析[J]. 湖南水利水电,2005(3):47-48.

[6] 甘德欣,龙岳林,黄璜,等. 山地梯田景观的灾害防御机制与效益分析:以紫鹊界梯田为例[J]. 自然灾害学报,2006,15(6):6-8.

[7] 段兴凤,宋维峰,李英俊,等. 湖南紫鹊界、云南元阳及广西龙脊古梯田研究进展[J]. 亚热带水土保持,2011,23(1):31-35.

[8] 师哲,赵健,张平仓. 可移动水土流失实验室系统的原理及特点[J]. 水土保持通报,2010,30(2):206-211.

[9] Huang C H, Bradford J M. Analyses of slope and runoff factors based on the WEPP erosion model[J]. Soil Science Society of America Journal, 1993, 57(5):1176-1183.

[10] Flanagan D C, Chaudhari K, Norton L D. Polyacrylamide soil amendment effects on runoff and sediment yield on steep slopes(Part D): Simulated rainfall conditions [J]. Transactions of the ASAE, 2002, 45(5):1327-1337.

[11] Benik S R, Wilson B N, Biesboer D D, et al. Performance of erosion control products on a highway embankment [J]. Transactions of the ASAE, 2003, 46(4):1113-1119.