

# 湘北红壤低山丘陵区典型水土流失治理模式径流泥沙效应

宋江平<sup>1,2</sup>, 李忠武<sup>1,2,3</sup>, 刘春<sup>1,2</sup>, 王丹阳<sup>1,2</sup>,

陈佳<sup>3</sup>, 彭浩<sup>1,2</sup>, 肖海兵<sup>3</sup>, 郭俊军<sup>4</sup>

(1. 湖南大学环境科学与工程学院, 长沙 410082; 2. 湖南大学环境生物与控制教育部重点实验室, 长沙 410082;  
3. 中国科学院水利部水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室,  
陕西 杨凌 712100; 4. 湖南省水土保持监测总站, 长沙 410007)

**摘要:** 探明径流小区尺度下不同水土流失治理模式的径流泥沙效应, 对于大尺度水土流失治理具有重要意义。通过野外标准径流小区自然降雨试验探究了湘北红壤低山丘陵地带 3 种典型水土流失治理模式(S1 模式: 坡改梯+经果林, S2 模式: 等高沟垄+农作物, S3 模式: 平整撂荒坡面+草本)径流泥沙效应。结果表明: 3 种治理模式在次降雨诱导下平均径流量为  $S3(1.84 \text{ m}^3) > S1(1.03 \text{ m}^3) > S2(0.78 \text{ m}^3)$ , 平均泥沙流失量为  $S3(1.191 \text{ t/hm}^2) > S1(0.411 \text{ t/hm}^2) > S2(0.311 \text{ t/hm}^2)$ ; 3 种治理模式在 A、B、C 雨型诱导下(K-均值聚类)累积径流量均为  $S3(33.19, 15.25, 14.13 \text{ m}^3) > S1(19.40, 9.06, 6.48 \text{ m}^3) > S2(16.60, 5.89, 4.15 \text{ m}^3)$ , 累积泥沙流失量也表现出了相同规律, 即  $S3(14.474, 10.863, 15.153 \text{ t/hm}^2) > S1(7.521, 2.695, 3.766 \text{ t/hm}^2) > S2(6.149, 1.685, 2.741 \text{ t/hm}^2)$ ; 不同治理模式泥沙流失对径流响应特征均呈极显著正相关( $P < 0.01, r > 0$ ), 相关系数( $r$ )分别为 0.853, 0.920, 0.677, 其中, S1、S2 和 S3 模式泥沙流失量与径流量线性回归斜率( $k$ )分别为 0.356, 0.420, 0.493, 表明 S3 模式泥沙流失对径流的响应最明显, S2 模式次之, S1 模式泥沙流失对径流响应程度较小。因此, 3 种典型模式在控制水土流失方面具有明显不同的效果。

**关键词:** 治理模式; 径流; 泥沙; 径流小区; 降雨

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2018)01-0032-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2018.01.006

## Effects of Typical Soil and Water Loss Control Patterns on Runoff and Sediment of Red Soil in Low Hilly Areas from the Northern Hunan Province

SONG Jiangping<sup>1,2</sup>, LI Zhongwu<sup>1,2,3</sup>, LIU Chun<sup>1,2</sup>, WANG Danyang<sup>1,2</sup>,

CHEN Jia<sup>3</sup>, PENG Hao<sup>1,2</sup>, XIAO Haibing<sup>3</sup>, GUO Junjun<sup>4</sup>

(1. College of Environmental Science and Engineering, Hunan University, Changsha 410082; 2. Key Laboratory of Environmental Biology and Pollution Control (Hunan University), Ministry of Education, Changsha 410082; 3. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, CAS and MWR, Yangling, Shaanxi 712100; 4. Soil and Water Conservation Monitoring Station of Hunan Province, Changsha 410007)

**Abstract:** Clarifying the runoff and sediment in runoff plot under different soil and water loss control patterns plays an important role for large-scale soil and water loss. In this study, the runoff and sediment of red soil under three typical soil and water loss control patterns (S1 pattern: Slope change ladder + Fruit trees, S2 pattern: Contour trench and ridge + Crops, S3 pattern: Flat waste land slope + Herbs) were investigated through the field standard runoff areas under natural rainfall experiment in low hilly areas. The results showed that the average runoff volume under three control patterns was  $S3(1.84 \text{ m}^3) > S1(1.03 \text{ m}^3) > S2(0.78 \text{ m}^3)$ , and the average sediment yield was  $S3(1.191 \text{ t/hm}^2) > S1(0.411 \text{ t/hm}^2) > S2(0.311 \text{ t/hm}^2)$ . The cumulative runoff under the three control patterns was  $S3(33.19, 15.25, 14.13 \text{ m}^3) > S1(19.40, 9.06, 6.48 \text{ m}^3) > S2(16.60, 5.89, 4.15 \text{ m}^3)$  in the A, B, and C rainfall types (K-means clustering). The cumulative sediment also showed the similar trend that was  $S3(14.474, 10.863, 15.153 \text{ t/hm}^2) > S1(7.521, 2.695, 3.766 \text{ t/hm}^2) > S2(6.149, 1.685, 2.741 \text{ t/hm}^2)$ . Different control patterns maintained a significant positive correlation between sediment yield had significant positive correlations with runoff volume under the tree control patterns ( $P < 0.01, r > 0$ ). The correlation coefficient ( $r$ ) was 0.853,

收稿日期: 2017-09-05

资助项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0505401); 湖南省水利科技项目(湘水科计[2016]194-38)

第一作者: 宋江平(1991—), 男, 硕士研究生, 主要从事水土保持与生态环境研究。E-mail: songjiang@hnu.edu.cn

通信作者: 李忠武(1972—), 男, 博士, 教授, 主要从事水土保持与生态环境研究。E-mail: lizw@hnu.edu.cn

0.920, and 0.677, respectively. Furthermore, the linear regression slope ( $k$ ) of sediment yield and runoff volume was 0.356, 0.420 and 0.493, respectively under S1, S2, and S3 patterns, indicating the response degree of sediment to runoff in different control patterns was  $S3 > S2 > S1$  pattern. Thus, three typical patterns have significantly different effects for controlling soil and water loss.

**Keywords:** control pattern; runoff; sediment; runoff plot; rainfall

水蚀不仅造成地表土壤迁移再分布<sup>[1-2]</sup>,而且导致了土壤中碳<sup>[3-4]</sup>、氮和磷<sup>[5]</sup>等营养元素大量流失,这也进一步使得可利用土地面积减少和土地生产力降低<sup>[6-7]</sup>,加速河流湖泊水体富营养化<sup>[5]</sup>以及水库淤积和河床升高,严重影响了河流水库防洪蓄洪功能<sup>[8]</sup>。因此,控制好水土流失对于坡耕地保护和生态环境建设具有重要意义。探明不同区域的水土流失机制并选用最优治理模式是进行水土保持预防和治理的源头问题。由于实施水土保持模式的差异会对水土流失治理效益产生显著影响,因此,研究径流和泥沙流失对不同模式的响应机制对于水土流失预防及治理具有重要的指导意义。有研究指出,横坡耕种侵蚀量仅为顺坡耕种的1/6<sup>[9]</sup>,麦冬单行处理小区土壤流失量可达到麦冬双行小区的1.85倍<sup>[10]</sup>,且条沟与草本组合模式和小穴与灌草组合模式可分别减流70.24%和59.07%<sup>[11]</sup>。也有研究进一步指出,裸坡地径流系数可达地下沟与水平台地果园的10.49倍<sup>[12]</sup>,且不撩壕梯面与每年种植2茬农作物的耕地年均径流量和泥沙流失量分别是撩壕梯面条植油菜的2.30,7.69倍<sup>[13]</sup>。紫色土起垄坡地紫花苜蓿与青蒿间作模式和连翘与紫苏间作模式水土保持效果优于玉米与红苕套作模式<sup>[14]</sup>。特别地,坡面径流小区每隔5m设置一高30cm,宽60cm的等高土埂可减流70.20%,减沙95.04%<sup>[15]</sup>。此外,实施植物柑橘与阔叶雀稗搭配模式可减流超过90%<sup>[16]</sup>,且经果林垄作粮食模式径流量和泥沙量与顺坡平作粮食作物模式相比,径流量可减少39.88%~72.28%,而泥沙流失量能减少62.94%~82.00%<sup>[17]</sup>。由上述研究结果可见,尽管以往的研究探究了不同模式径流泥沙效应,但是由于我国各地域自然环境差异较大,不同生态区的植被类型、耕地种植指数、土壤整地方式以及影响水土流失的主次因子不一致,同一种模式径流泥沙效应在不同的区域可能会存在较大差异。因此,有必要在不同的生态区进一步细化水土保持模式的探究,为区域水土流失预防和治理提供精准治理模式。

湘北红壤低山丘陵地带包括岳阳、常德和益阳等地,面积约6万km<sup>2</sup>,属亚热带季风湿润气候区,物种资源丰富,为湖南省粮食主产区之一。该区域地处长江经济带重要节点,在湖南省经济社会发展和对外开放格局中区位优势明显,战略地位重要。但由于该区域人口众

多,土地利用化程度高,且年均降水量大,降水频次高和部分区域植被稀少,湘北红壤低山丘陵地带已成为湖南省水土流失极易发生区域之一。因此,结合湘北红壤低山丘陵地带的地质地貌、气象、土壤类型、土地利用结构、植被类型以及土壤耕作制等特征,探究出适宜该区域的水土流失治理模式不仅对于当地生态效益、社会效益、经济效益以及蓄水保土效益的凸显具有重要意义,也可作为当地水土保持部门水土流失预防、监测及规划方案的制定提供理论参考,为长江经济带生态环境保护发挥重要的作用。基于此,本研究以湘北红壤低山丘陵地带典型水土保持监测站——仙安标准径流场作为研究对象,选用不同水土保持措施组合的标准径流小区,分析了不同水土流失治理模式的水土保持效应,以期为该区域坡改梯建设、土地利用结构优化、景观功能要素提升以及水土流失预防与治理提供最优模式,也为该区域的退化生态修复提供科学数据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于湖南省岳阳县仙安小流域,流域面积16.5km<sup>2</sup>,东接西冲,西抵游港河,南至沙港河,北至岳阳县和临湘市行政界线,东西距离4.05km,南北距离6.54km。该流域在湘北红壤低山丘陵地带区位优势明显,属于长江流域洞庭湖水系新墙河上游的沙港河一级支流、典型低山丘陵岗地和强度水土流失地区,在湘北红壤低山丘陵地带具有较强典型代表性。此外,流域地貌类型属于红砂岩丘陵镶嵌地貌,坡度多在5°~15°;土壤以第四纪红壤为主,质地黏重且以壤土为主,pH呈酸性,不同坡面的土壤易受水力侵蚀影响,在岳阳、常德等地分布广泛,是湘北低山丘陵区典型土壤类型;气候类型属亚热带季风湿润气候,四季分明,夏季高温多雨,冬季温和湿润,多年平均气温17℃,平均相对湿度79%,平均风速2.0~2.7m/s,降雨多集中在4—9月,且暴雨频次高,多年平均降雨量1295.4mm;植被类型属于常绿阔叶林,冠层叶片茂密,地表层灌木和杂草茂盛,种类繁多。

### 1.2 试验径流小区

不同治理模式供试径流小区坡面坡度为15°,位于流域中坡位,小区垂直投影长和宽分别为20,5m,边埂采用浆砌红砖围成,高出地面20cm,插入地面

30 cm,左右两侧和上方分别设置排水沟和截流沟,底部设置集流槽,集流槽采用现浇砼,表面抹光,集流槽上缘与小区坡面底边土壤高度一致,槽底向下方和向中间倾斜,集流槽的下方设置一级分流桶,分流桶直径 0.8 m,高度 0.9 m,沿分流桶高度 0.7 m 处均匀布置分流孔 11 个,其中,1 个分流孔直接延伸到分流桶下方的集流桶内,用于强降雨期间收集分流桶分流出的径流和泥沙量。

### 1.3 水土流失治理模式

本研究在 5 号小区设置水土流失治理模式为坡改梯+经果林(柿树)(S1 模式)。由于湘北红壤低山丘陵地带大量坡耕地现已经改为梯土种植,设置坡改梯符合当地的土壤耕作制,且梯土种植可以达到保土、保水以及保肥目的。柿树适宜该区域的气候、土壤和水文等生态环境条件,生长速度较快,抗逆性强,水土保持效果较好,且柿树属于经济树种,栽植柿树可以兼顾生态和经济效益协同发展,改善当地环境,促进群众增收。6 号小区设置水土流失治理模式为横坡沟垄+农作物(油菜与红薯)(S2 模式)。在次降雨期间横坡沟垄具有减流减沙效应,且有利于减少农业活动中施用的化肥流失量,减少面源污染。此外,布局作物选择油菜与红薯是由于两种作物均属于典型乡土作物,在湘北红壤低山丘陵地带选择油菜与红薯具有典型代表性,符合当地作物布局习惯,易于推广和使用。采取在不同季节栽种油菜与红薯可优化耕地资源利用,提高耕地的种植指数和复种指数,充分利用光、热、水和土等资源。7 号小区设置水土流失治理模式为平整撂荒坡面+草本(少量丝毛草)(S3 模式)。设置平整撂荒坡面主要是探究自然恢复过程中的水土流失状况,并将其与实施水土保持措施区域的水土流失状况进行对比研究。近年来,湘北地带部分区域内废弃土地和无植被覆盖的坡面自然修复现象时有发生,设置撂荒坡面符合此类土地利用的生态特征。由于在雨季期间撂荒地生长杂草,所以本研究在撂荒小区坡面上布局少量当地较常见丝毛草,进一步探究撂荒与丝毛草组合模式下径流泥沙效应。

### 1.4 样品采集与室内处理

每次产流降雨结束后,立即对分流桶内水深进行测量,测 3 次重复,若次降雨雨量较大,集流桶内有水样,则集流桶水深测量方法与分流桶相同,待水深测量完后,用搅拌棒将分流桶内的水沙充分搅拌,取样瓶取两份 1 000 mL 浑水样,若集流桶内有水样,浑水样品取样方法与分流桶相同。完成野外所有样品采集后,将其带回实验室立即进行室内处理,分流桶和集流桶内径流量通过平均水深乘以桶底面积获得。浑水样首先通过静置过滤,然后在 102 ℃ 条件下烘干

称重,测定含沙率,径流量与含沙率的乘积即为泥沙流失量。本研究径流泥沙数据收集于 2015 年 2—8 月和 2016 年 1—9 月,降雨数据直接来源于距离径流场约 300 m 的小型气象站。

### 1.5 数据分析

利用 Excel 进行数据计算,利用 Origin 8.0 制图,利用 IBM SPSS 20.0 进行数理统计。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同水土流失治理模式对次降雨径流泥沙响应

由图 1 可知,相同次降雨诱导下 S3 模式径流量和泥沙流失量高于 S1 与 S2 模式,且 S1 模式径流量和泥沙流失量高于 S2 模式,表明不同治理模式的水土保持效果为  $S2 > S1 > S3$ 。其中,S3 模式径流量和泥沙流失量与 S1 和 S2 模式相比差异较大,这种差异主要是由于其坡面无水土保持拦截措施和植被盖度低,而 S1 与 S2 模式坡面有水土保持措施和植被覆盖度高。S3 模式坡面无水土保持拦截措施易使次降雨形成较多径流和侵蚀产生泥沙,且径流和泥沙在坡面蓄积量较少。植被盖度低使地表土壤长期受到外营力作用,次降雨初期表层土壤易形成结皮阻止降雨下渗<sup>[18]</sup>,形成较多地表径流,且植被盖度低的地表土壤易受溅蚀和径流侵蚀影响,造成坡面泥沙大量流失。然而,S1 与 S2 模式坡面水土保持措施横坡沟垄和坡改梯能有效拦截上中坡位形成的地表径流和侵蚀产生泥沙量,且其坡面较高的植被盖度能在次降雨期间拦截部分降雨量并减小雨滴落到地表的速度,有效减少地表径流量,削减雨滴溅蚀能力。因此,相同次降雨诱导下 S3 模式径流量与泥沙流失量明显高于 S1 与 S2 模式。此外,S2 模式水土保持效果优于 S1 模式主要是两种模式的水土保持措施、植被盖度以及土壤孔隙度等方面因素差异导致的。一方面,S2 模式中横坡沟垄的沟较宽较深,对径流泥沙拦截效果较好,而 S1 模式中坡改梯的梯面相对较平坦,对径流和泥沙拦截效果次于沟垄措施;另一方面,S2 模式中布局作物红薯与油菜在生长季节覆盖了大部分垄面,能有效拦截部分降雨量和降低雨滴的速度。S2 模式中长期翻耕和深松耕等整地措施使土壤疏松多孔,降雨时下渗量较多,地表径流量相对减小。而 S1 模式下的柿树植被盖度相对较低,降雨拦截能力低于油菜与红薯拦截能力,坡面径流量和侵蚀泥沙量相对较多,所以 S2 模式水土保持效果优于 S1 模式。以上研究结果揭示,在湘北红壤低山丘陵地带坡面实施合理的水土保持措施、增加地表植被盖度及合理的整地方式可以有效降低水土流失强度。一些学者在其他地带研究的结果也指出,随着植被盖度的增加,坡面径流系数和土壤侵蚀模数减小<sup>[19]</sup>,且随着水土保持措施实施,坡面径流泥沙量明显减

少<sup>[20]</sup>。

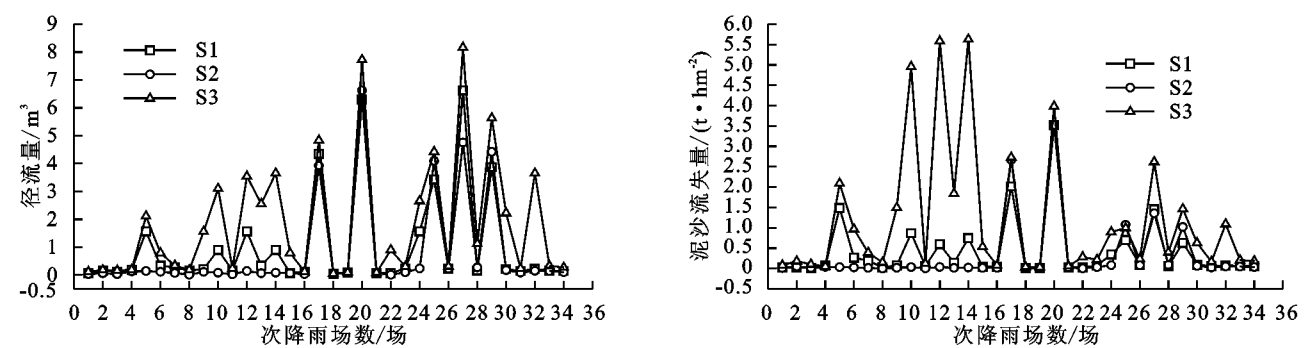


图 1 次降雨诱导下不同水土流失治理模式径流泥沙响应

2.2 不同水土流失治理模式对降雨类型累积径流泥沙响应

为了进一步阐明不同治理模式的水土保持效应,本研究从不同雨型视角下对不同水土流失治理模式的累积径流量与泥沙流失量进行了探究。本文依托平均雨强、降雨量和降雨历时 3 个特征变量,利用 K-均值聚类方法对雨型进行划分<sup>[21-23]</sup>。结果显示,34 场侵蚀性降雨被分成 A、B、C 类(表 1)。其中,A 类降雨包含 11 场降雨、累积雨量 669.9 mm、平均雨强 2.51 mm/h、平均降雨量 60.9 mm;B 类降雨包含 19 场降雨、累积雨量 645.7 mm、平均雨强 3.85 mm/h、平均降雨量 34.0 mm;C 类降雨包含 4 场降雨、累积雨量 419.5 mm、平均雨强 2.04 mm/h、平均降雨量 104.9 mm。基于聚类结果,A 类降雨是由雨强、历时和雨量均较适中的一类降雨组成,B 类降雨是由雨强较大、历时较短和降雨量较小的一类降雨组成,C 类降雨是由雨强较小、历时较长和降雨量较大的一类降雨组成。

表 1 不同类型降雨变量统计特征

降雨类型	特征值	平均值	标准差	变异系数	总和	频次
A	降雨量	60.9	36.54	0.60	669.9	11
	历时	1465	278.50	0.19	16115	
	雨强	2.51	1.44	0.57		
B	降雨量	34.0	31.85	0.94	645.7	19
	历时	568	203.86	0.36	10793	
	雨强	3.85	3.13	0.81		
C	降雨量	104.9	29.68	0.28	419.5	4
	历时	3141	356.31	0.11	12565	
	雨强	2.04	0.62	0.30		

注:降雨量单位为 mm;降雨历时单位为 min;雨强单位为 mm/h。

依据 K-均值聚类结果,降雨类型诱导下不同水土流失治理模式累积径流泥沙效应如图 2 所示。由图 2 可知,不同治理模式在 A 类雨型诱导下累积径流量与泥沙流失量均为 S3>S1>S2。其中,A 类降雨诱导下 S3 模式形成径流量分别是 S1 和 S2 模式的 1.71、2.0 倍,S1 模式形成的径流量是 S2 模式的 1.17 倍,而泥沙流失量 S3 模式分别是 S1 和 S2 模式的 1.92、2.35 倍,S1 模式是 S2 模式的 1.22 倍。可见,A 雨型诱导下 3 种治理模式累积径流泥沙效应与次降雨诱导下径流泥沙效应具有

相同的规律。同样,B 类降雨诱导下不同治理模式累积径流泥沙效应与 A 类降雨表现出了相同的规律,均为 S3>S1>S2。其中,B 类降雨诱导下 S3 模式形成的径流量分别是 S1 和 S2 模式的 1.68、2.59 倍,S1 模式形成的径流量是 S2 模式的 1.54 倍,而 S3 模式泥沙流失量分别是 S1 和 S2 模式的 4.03、6.45 倍,S1 模式泥沙流失量是 S2 模式的 1.6 倍。进一步地,C 类降雨诱导下不同治理模式累积径流泥沙效应与 A 和 B 类降雨诱导下径流泥沙效应相同,均为 S3>S1>S2,表明不管雨型如何变化,不同治理模式的累积径流泥沙效应规律相同。A 类降雨是诱导不同治理模式产流产沙的主要雨型,其在 S1、S2 和 S3 模式中形成的径流量分别占各自模式总径流量的 55%、62.3%、53.04%,侵蚀产生的泥沙流失量分别占各自模式总泥沙流失量的 53.8%、58.1%、35.7%,表明引起湘北红壤低山丘陵地带水土流失的主要雨型为 A 雨型。但是,S3 模式在 C 类降雨诱导下累积泥沙流失量与 A 类降雨诱导下累积泥沙流失量相差不大,这是由于 C 类降雨的历时较长导致的。尽管 C 类降雨的平均雨强较小,但 S3 模式地表无水土保持拦截措施,且植被覆盖度低,长历时的降雨也能对其造成较为严重的土壤侵蚀。此外,就 B 类与 C 类降雨而言,S1 和 S2 模式径流量与 S3 模式径流量差异较小,但是泥沙流失量差异较大,表明 S3 模式坡面泥沙流失对径流的响应程度高于 S1 和 S2 模式。C 类降雨诱导下累积径流量最小,而 B 类降雨诱导下累积泥沙流失量最小,最小累积径流量未导致最小累积泥沙流失量出现,这表明径流不是影响泥沙流失的唯一因素,坡面泥沙流失还受其他因素的影响,例如溅蚀<sup>[24]</sup>等。B 类降雨诱导下不同治理模式累积泥沙流失量低于 C 类降雨诱导下累积泥沙流失量,这可能与降雨历时相关。尽管 C 类降雨较 B 类降雨的频次低,平均雨强小,但是其长历时降雨对地表土壤产生较强的侵蚀。另外,在 B 类和 C 类降雨诱导下 S3 模式径流量和泥沙流失量明显高于 S1 和 S2 模式,表明 B 类和 C 类降雨也是引起 S3 模式水土流失的主要雨型,所以在湘北红壤低山丘陵地带植被覆盖度低和无水土保持措施坡面预防及治理水土流失过程要统筹

兼顾 B 类和 C 类降雨的雨型特点,使实施的水土保

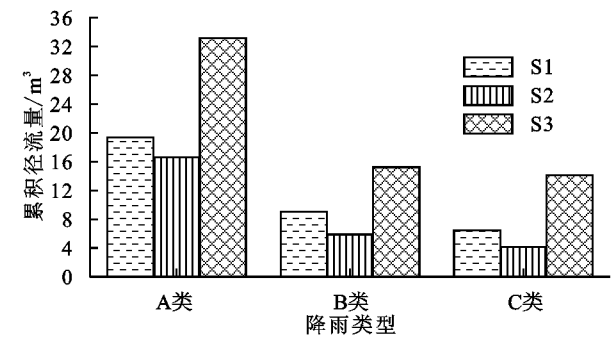
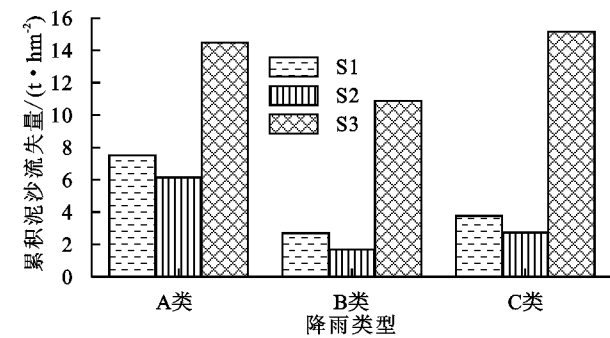


图 2 降雨类型诱导下不同水土流失治理模式累积径流泥沙效应

2.3 不同水土流失治理模式泥沙流失对径流响应

径流是剥离和搬运地表土壤的外营力,探明不同水土流失治理模式泥沙流失对径流的响应特征对于认识各治理模式下的径流泥沙效应具有重要的科学意义。次降雨诱导下不同治理模式径流量与泥沙流失量相关系数如表 2 所示。由表 2 可知,S1、S2 和 S3 模式泥沙流失对径流的响应特征均呈极显著正相关关系( $r>0,P<0.01$ ),相关系数  $r$  分别为 0.853, 0.920, 0.677。可见,尽管不同治理模式下泥沙流失对径流的响应特征均呈极显著正相关,但不同治理模式泥沙流失对径流的响应程度存在明显差异。为了进一步探明次降雨诱导下不同治理模式泥沙流失随径流变化规律,利用 SPSS 软件对不同治理模式径流量与泥沙流失量进行了一元线性回归分析。由于研究中所涉及的变量较少(仅径流量和泥沙流失量),仅斜率( $k$ )通过统计检验( $P<0.05$ ),线性回归方程截距( $a$ )均未通过统计检验( $P>0.05$ )(表 3)。不同治理模式径流量与泥沙流失量关系如方程(1)~(3)所示。从回归方程来看,不同治理模式  $k$  均大于 0,表明在次降雨诱导下不同治理模式泥沙流失量均随着径流量增加而增加。从  $k$  大小来看,S3 模式  $k$  最大,S1 模式  $k$  最小,S2 模式  $k$  介于两者之间,表明不同治理模式下泥沙流失对坡面径流响应程度为  $S3>S2>$

持措施及模式能有效防止坡面水土流失。



S1。即在相同径流量诱导下,S3 模式泥沙流失量最大,S2 模式泥沙流失量次之,S1 模式泥沙流失量最小。S3 模式坡面泥沙流失受径流影响程度大于 S1 和 S2 模式是由于 S3 模式坡面未水土保持措施且植被覆盖度低导致的。由于 S3 模式坡面无水土保持拦截措施,径流侵蚀产生的泥沙在坡面沉积量较少,大部分泥沙随径流迁移到分流桶。此外,径流从上坡位迁移到下坡位过程中流速较快,对地表土壤剥离和搬运能力较强。S3 模式植被覆盖度低,地表土壤长期受外营力侵蚀影响,次降雨期间表层土壤易于剥离和搬运,而 S1 与 S2 模式坡面有水土保持措施拦截,径流侵蚀产生的大量泥沙会沉积在垄沟底与梯面上,且径流由于受到坡面水土保持措施拦截在迁移过程中流速相对较小,其对地表土壤剥离和搬运能力也随之降低,所以相同径流诱导下 S3 模式泥沙流失量高于 S1 和 S2 模式。因此,湘北红壤低山丘陵地带坡面水土流失预防治理过程要切实注意降雨形成径流在不同措施中的减沙效应。

表 2 不同模式径流量与泥沙流失量皮尔逊相关系数矩阵

变量	S1 模式		S2 模式		S3 模式	
	径流	泥沙	径流	泥沙	径流	泥沙
径流	1	0.853 **	1	0.920 **	1	0.677 **
泥沙		1		1		1

注: \*\* 表示在 0.01 水平上显著相关。

表 3 不同模式径流量与泥沙流失量一元回归方程参数

参数	S1 模式			S2 模式			S3 模式		
	系数	$t$	$P$	系数	$t$	$P$	系数	$t$	$P$
截距( $a$ )	0.046	0.589	0.560	-0.018	-0.305	0.763	0.284	1.047	0.303
斜率( $k$ )	0.356	9.246	0.000	0.420	13.137	0.000	0.493	5.206	0.000

林地: $S_f=0.356\times Q_f$   $R^2=0.719$   $P<0.01$  (1)  
农地: $S_c=0.420\times Q_c$   $R^2=0.842$   $P<0.01$  (2)  
撂荒地: $S_a=0.493\times Q_a$   $R^2=0.442$   $P<0.01$  (3)  
式中: $S_f$  为 S1 模式泥沙流失量( $t/hm^2$ ); $Q_f$  为 S1 模式径流量( $m^3$ ); $S_c$  为 S2 模式泥沙流失量( $t/hm^2$ ); $Q_c$  为 S2 模式径流量( $m^3$ ); $S_a$  为 S3 模式泥沙流失量

( $t/hm^2$ ); $Q_a$  为 S3 模式径流量( $m^3$ )。

3 讨论

坡面水土流失与降雨<sup>[25-26]</sup>、水土保持模式<sup>[27]</sup>和土壤耕作方式<sup>[28]</sup>等因素有关。本文通过径流小区探究了湘北红壤低山丘陵地带 3 种典型水土流失治理模式径流泥沙效应。结果表明,实施 S2 模式坡面农耕小区产流产沙量较少,说明了 S2 模式水土保持效果较好。然而,王飞等<sup>[13]</sup>在红壤区的研究指出,坡面

农耕小区土壤流失量较大,这与本文的研究结果存在一定的差异,这主要是坡面整地措施差异导致的。本研究在农耕小区坡面实施的整地措施为横坡沟垄,且垄沟较深较宽,而王飞等<sup>[13]</sup>的研究在农耕小区坡面的整地措施为梯土不撩壕,横坡沟垄整地措施水土保持效果通常情况下优于梯土不撩壕措施;杨帅等<sup>[29]</sup>在都江堰一带的黄壤区域坡耕地研究也指出,横坡起垄是防止水土流失的较好整地措施。此外,S3模式撂荒径流小区产流产沙量较大,明显高于S1与S2模式坡面径流小区产流产沙量,说明了S3模式水土保持效果较差。江森华等<sup>[30]</sup>在闽江上游研究也得出了水平梯田与柑橘模式坡面产流产沙量明显低于撂荒处理措施小区,与本研究的結果较一致。但是,姜娜等<sup>[31]</sup>在撂荒坡面研究得出的产流产沙量并没有达到最大,这主要是因为其撂荒小区与其他措施小区相比坡度较小,且撂荒坡面植被覆盖度相对较高<sup>[31]</sup>。在S1与S2模式控制的坡面水土流失过程中,尽管S2模式总体水土保持效果优于S1模式,但在部分次降雨中S2模式中径流量和泥沙流失量大于S1模式(图1)。这一现象可能与土壤耕作有关,当S2模式中刚进行农耕活动后的土壤遇到降雨事件时,由于土壤疏松,易受到降雨和径流侵蚀影响,且中下坡位集流槽与第1垄之间坡面无水土保持拦截措施,导致第1垄顶面形成的径流携带泥沙大量迁移到分流桶。而未进行整地活动的S1模式中坡面土壤较紧实,对降雨和径流侵蚀抵抗力较强,加之林下枯枝落叶对径流和泥沙的拦截作用,减少了径流和泥沙流失量。此外,由不同治理模式泥沙流失与径流的相关系数 $r$ 可知,S3模式 $r$ 较S1和S2模式 $r$ 小,表明S3模式泥沙流失受溅蚀影响较S1和S2模式大,这是因为S1与S2模式地表植被覆盖度较高,能拦截部分雨量,并延长雨滴降落到地表的时间,有效降低对地表土壤溅蚀能力。而S3模式地表植被覆盖度低,大部分降雨可以直接降落到裸露的地表,对地表土壤产生强烈的侵蚀,则坡面由溅蚀引起泥沙流失量相对较多,所以出现了S3模式 $r$ 小于S1与S2模式的情况。室内模拟降雨指出<sup>[24]</sup>,当降雨能量达到 $15\text{ J}/(\text{m}^2 \cdot \text{mm})$ 时,坡面总的溅蚀量可达 $1\,787.72\text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ,因此,湘北红壤低山丘陵地带水土流失治理不仅要防止径流对坡面土壤的冲刷作用,也要极其重视降雨的溅蚀作用,因为溅蚀是导致土壤流失的第1外营力,降雨降落到地表后溅蚀随即发生。另外,由S2模式水土保持效果优于S1与S3模式结果可知,虽然平时农耕活动对地表层土壤扰动比较大,但是只要对农耕地实施

合理的水土保持措施并布局适宜作物结构,坡面水土流失也能得到有效控制。基于这个结果,湘北红壤低山丘陵地带水土流失区农作物种植需要,配套合理的水土保持措施,改变耕作方式和作物配置模式,选择最优种植模式,做到既促进粮食的高产稳产,又防止水土流失,使农业生态系统健康有序循环发展。另外,对S1与S3模式径流泥沙效应结果分析可知,实施合理水土保持措施、增加植被覆盖度和减小平整撂荒坡面的面积利于降低水土流失强度,所以湘北红壤低山丘陵地带水土流失规划和治理需要大量减少撂荒地面积,大力实施绿化工程,增加地表植被覆盖度,特别是在生态环境适宜的区域做到“宜林则林”“宜农则农”“因地制宜”“合理规划”。绿化工程的实施过程中需要加大土壤整地力度,平整坡面应改为梯面和鱼鳞坑等水土保持措施,以便进一步减少水土流失量,增强坡面拦蓄能力。然而,在湘北红壤低山丘陵地带各个区域无论实施水土保持措施为农业措施、林草措施、还是工程措施,一定要兼顾流域完整性,所有措施及模式实施的过程要以小流域为单元进行统一规划和布局<sup>[32]</sup>,并充分结合“山”“水”“田”“路”等景观要素,使水土保持措施不仅具有蓄水保土效应,而且也具有景观美效应,进一步把水土保持措施同生态旅游业的发展结合起来,促进当地经济发展。

## 4 结论

本研究基于野外标准径流小区探究了湘北红壤低山丘陵地带3种典型水土流失治理模式径流泥沙效应。研究表明,不同治理模式径流量和泥沙流失量均为 $S3>S1>S2$ ,表明S2模式水土保持效果最好,S1模式次之,S3模式较差。因此,在湘北红壤低山丘陵地带坡面不同的土地利用类型区需要实施合理的地表处理措施,如沟垄和坡改梯等,且实施的地表处理措施应与植物措施合理搭配,注重各措施之间的减流减沙效应。在水土保持规划及治理过程中,需要减少坡面撂荒地面积,增加植被盖度。此外,S1、S2和S3模式泥沙流失对径流的响应特征均呈极显著正相关( $P<0.01, r>0$ ),且径流与泥沙流失线性回归斜率 $k$ 分别为 $0.356, 0.420, 0.493$ ,表明不同治理模式泥沙流失对径流响应程度依次为 $S3>S2>S1$ ,即相同径流在S3模式中对泥沙流失贡献最大,在S2模式中贡献次之,在S1模式中贡献最小。进一步地,由于不同治理模式均对A类降雨诱导下径流泥沙响应明显,而仅S3模式对B类和C类降雨诱导下径流泥沙响应明显,所以湘北红壤低山丘陵地带实施的水土保持模式技术参数应主要按照A雨型标准

设计,以便充分凸显不同水土流失治理模式生态、经济和社会综合效益。

#### 参考文献:

- [1] Li Z W, Liu C, Dong Y T, et al. Response of soil organic carbon and nitrogen stocks to soil erosion and land use types in the Loess hilly-gully region of China [J]. *Soil and Tillage Research*, 2017, 166 (2): 1-9.
- [2] 刘宝元,阎百兴,沈波,等.东北黑土区农地水土流失现状与综合治理对策[J].*中国水土保持科学*,2008,6(1): 1-8.
- [3] Quinton J N, Govers G, Van Oost K, et al. The impact of agricultural soil erosion on biogeochemical cycling [J]. *Nature Geoscience*, 2010, 3(5): 311-314.
- [4] Van Oost K, Quine T, Govers G, et al. The impact of agricultural soil erosion on the global carbon cycle [J]. *Science*, 2007, 318(5850): 626-629.
- [5] 湛芸,何丙辉,赵秀兰,等.小江流域农地水土流失对水体富营养化的影响[J].*水土保持学报*,2010,24(4):32-43.
- [6] 张乐涛,李占斌,王贺,等.流域系统径流侵蚀链内泥沙输移的空间尺度效应[J].*农业工程学报*,2016,32(13): 87-94.
- [7] 苏志珠,朱东红,马义娟.晋西沿黄地区水土流失危害及防治对策研究[J].*水土保持通报*,2003,23(4):55-60.
- [8] 陈文贵.南北盘江地区水土流失危害与防治对策[J].*水土保持研究*,2000,7(3):101-103.
- [9] 水建国,柴锡周,张如良.红壤坡地不同生态模式水土流失规律的研究[J].*水土保持学报*,2001,15(2):33-36.
- [10] 张沛,严力蛟,樊吉,等.不同草篱种植模式对土壤侵蚀的控制效应[J].*生态与农村环境学报*,2011,27(3):29-34.
- [11] 梁娟珠.南方红壤区不同植被措施坡面的水土流失特征[J].*水土保持研究*,2015,22(4):95-99.
- [12] 汪邦稳,肖胜生,张光辉,等.南方红壤区不同利用土地产流产沙特征试验研究[J].*农业工程学报*,2012,28(2):239-243.
- [13] 王飞,陈安磊,彭英湘,等.不同土地利用方式对红壤坡地水土流失的影响[J].*水土保持学报*,2013,27(1):22-26.
- [14] 杨红薇,张建强,唐家良,等.紫色土坡地不同种植模式下水土和养分流失动态特征[J].*中国生态农业学报*, 2008,16(3):615-619.
- [15] 袁东海,王兆骞,陈欣,等.不同农作措施红壤坡耕地水土流失特征的研究[J].*水土保持学报*,2001,15(4):66-69.
- [16] 谢颂华,郑海金,杨洁,等.南方丘陵区水土保持植物措施减流效应研究[J].*水土保持学报*,2010,24(3):35-38.
- [17] 刘坤,陈治谏,廖晓勇.三峡库区紫色土坡地不同耕作措施的水土保持效应研究[J].*水土保持研究*,2008,15(1):17-19.
- [18] 陈洪松,邵明安,张兴昌,等.野外模拟降雨条件下坡面降雨入渗、产流试验研究[J].*水土保持学报*,2005,19(2):5-8.
- [19] 朱连奇,许叔明,陈沛云.山区土地利用/覆被变化对土壤侵蚀的影响[J].*地理研究*,2003,22(4):432-438.
- [20] 和继军,蔡强国,路炳军,等.密云水库上游石匣小流域水土流失综合治理措施研究[J].*自然资源学报*,2008, 23(3):375-382.
- [21] Wei W, Chen L, Fu B, et al. The effect of land uses and rainfall regimes on runoff and soil erosion in the semi-arid loess hilly area, China [J]. *Journal of Hydrology*, 2007, 335(3): 247-258.
- [22] 晏清洪,原翠萍,雷廷武,等.降雨类型和水土保持对黄土区小流域水土流失的影响[J].*农业机械学报*,2014, 45(2):169-175.
- [23] 秦伟,左长清,晏清洪,等.红壤裸露坡地次降雨土壤侵蚀规律[J].*农业工程学报*,2015,31(2):124-132.
- [24] 胡伟,郑粉莉,边锋.降雨能量对东北典型黑土区土壤溅蚀的影响[J].*生态学报*,2016,36(15):4708-4717.
- [25] Mohamadi M A, Kaviani A. Effects of rainfall patterns on runoff and soil erosion in field plots [J]. *International Soil and Water Conservation Research*, 2015, 3(4): 273-281.
- [26] Liu C, Li Z W, Dong Y T, et al. Response of sedimentary organic matter source to rainfall events using stable carbon and nitrogen isotopes in a typical loess hilly-gully catchment of China [J]. *Journal of Hydrology*, 2017, 552: 376-386.
- [27] 袁敏,文石林,秦琳,等.湘南红壤丘陵区不同生态模式水土流失特征[J].*水土保持学报*,2012,26(6):21-26.
- [28] 陆银梅,李忠武,聂小东,等.红壤缓坡地径流与土壤可蚀性对土壤有机碳流失影响[J].*农业工程学报*,2015, 31(19):135-141.
- [29] 杨帅,尹忠,郑子成,等.四川黄壤区玉米季坡耕地自然降雨及其侵蚀产沙特征分析[J].*水土保持学报*,2016, 30(4):7-12.
- [30] 江森华,谢锦升,王维明,等.闽北不同土地利用方式与不同降雨强度对水土流失的影响[J].*中国水土保持科学*,2012,10(4):84-89.
- [31] 姜娜,邵明安.黄土高原小流域不同坡地利用方式的水土流失特征[J].*农业工程学报*,2011,27(6):36-41.
- [32] 余新晓.小流域综合治理的几个理论问题探讨[J].*中国水土保持科学*,2012,10(4):22-29.