

红砂岩侵蚀区典型水土流失治理模式减流减沙效应

段 剑, 王凌云, 肖胜生

(江西省水土保持科学研究院 江西省土壤侵蚀与防治重点实验室, 江西 南昌 330029)

摘 要: 阐明小区尺度下不同水土流失治理模式的减流减沙效应, 可为大尺度上的水土流失治理提供科学依据。以红砂岩侵蚀劣地为研究对象, 采用野外径流小区长期定位试验的方法, 分析自然降雨下典型水土流失治理模式的减流减沙效应及其对降雨要素、降雨雨型的响应规律。结果表明: 试验观测期间, 裸露地表径流系数为 0.66, 土壤侵蚀量为 0.07 t/hm^2 , 生态或经济开发治理后减流减沙效应均能达 90% 以上。地表裸露坡面产流产沙受降雨量、雨强影响显著, 生态恢复模式降低了降雨要素对坡面产流产沙过程的影响, 经济开发模式受降雨量影响显著。大雨强、短历时的降雨雨型是坡面产流产沙的主要雨型, 对裸露坡面产流产沙的贡献将近 50%, 生态或经济开发治理后该雨型对产流产沙的贡献明显提高, 增幅以经济开发模式大于生态恢复模式。因此, 生态恢复和经济开发均是治理红砂岩水土流失的有效途径, 应将生态恢复和经济开发治理相结合, 使水土流失治理模式不仅具有水土保持功能, 同时提升生态服务价值, 促进当地的经济的发展。

关键词: 水土流失; 治理模式; 径流; 侵蚀; 径流小区; 减流减沙效应; 红砂岩

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2018)06-0227-07

Runoff and sediment control effects of typical soil and water conservation patterns in red sandstone erosion region

DUAN Jian, WANG Lingyun, XIAO Shengsheng

(Jiangxi Provincial Institute of Soil and Water Conservation, Jiangxi Provincial Key Laboratory of Soil Erosion and Prevention, Nanchang 330029, China)

Abstract: Understanding the runoff and sediment characteristics of different soil and water loss control patterns in small scale can provide science evidence for soil and water conservation in large scale. The runoff and sediment of red sandstone soil under typical soil and water conservation patterns in runoff plots were analyzed through in-situ natural rainfall observation. The runoff and sediment control effects and responses to rainfall elements and types were studied. The results showed that the runoff coefficient and soil erosion amount of bare land were 0.66 and 0.07 t/hm^2 respectively during the field experiments. The ecological restoration and economic development modes led to more than 90% decrease in runoff and sediment. For bare land plot, the surface runoff and sediment amount had a significant positive relationship with rainfall depth and intensity, and with rainfall depth for economic development modes. Rainfall events with high intensities and short durations generated the highest surface runoff and soil erosion. The rainfall pattern contributed 50% to the total surface runoff and soil erosion for bare land, and the contribution rate significantly increase under ecological restoration and economic development modes. The growth of the economic development was greater than ecological restoration. Therefore, ecological restoration and economic development can be effective way to control soil erosion and water loss. Combination of the two aspect can improve ecosystem function and boost the local economic development.

Key words: soil and water loss; governance pattern; runoff; soil erosion; runoff plot; runoff and sediment control effect; red sandstone

收稿日期: 2018-06-15; 修回日期: 2018-09-06

基金项目: 江西省水利科技项目(KT201519、KT201417); 国家自然科学基金项目(41501026)

作者简介: 段 剑(1988-), 男, 江西永新人, 博士, 主要从事水土保持与植被恢复等方面的研究。

1 研究背景

水土流失是我国重要的环境问题^[1],不仅造成土壤地力下降,而且导致水体污染、河道淤积、河床抬升,加速侵蚀区生态系统功能失调^[2-3]。红砂岩是指侏罗纪到新近纪的陆相沉积岩系,岩性主要为泥岩、砂岩、泥质砂岩、砂质泥岩、粉砂岩等。在我国,红砂岩分布在长江以南地区,总面积约 $82.6 \times 10^4 \text{ km}^2$,约占全国陆地总面积的 8.6%,主要分布在华东、中南以及西南各省区^[4]。在长期地质作用的基础上,由于不合理的开发和利用导致植被破坏严重,致使红砂岩母质地区长期以来遭受到强烈的土壤侵蚀,土壤质量严重退化。在红砂岩严重侵蚀区,表土基本流失殆尽,地表呈现荒漠化景观,生态环境恶化,土地资源利用率极低,成为水土流失治理迫切需要解决的问题^[5]。探明红砂岩侵蚀劣地的水土流失演变规律,采用最佳的治理模式是防治水土流失的关键问题。

目前对于侵蚀劣地的水土流失治理模式主要有生态恢复和经济开发治理模式,实施不同水土流失治理模式的水土保持效益各有差异^[6-8],如汪邦稳等(2012)^[8]和王飞等(2013)^[9]研究发现不同土地利用类型下径流泥沙流失差异明显;梁娟珠(2015)^[10]研究表明不同植被措施下坡面产流产沙分异规律明显,草本模式与灌草组合模式分别减流 70.24% 和 59.07%;谢颂华等(2010)^[11]研究发现与裸露对照相比较,柑橘与阔叶雀稗模式减流效应达 90% 以上,相比较顺坡平作模式,减流效应为 39.9% ~ 72.3%,减沙效应为 62.9% ~ 82.0%^[12]。以上研究主要集中在花岗岩、第四纪红壤侵蚀区,且更多是基于人工模拟降雨、少场次自然降雨观测手段的结果,对于红砂岩侵蚀区的水土流失治理模式关注较少。同时降雨雨型是影响坡面产流产沙过程的重要因素^[13-16],对不同治理模式下径流侵蚀特征对降雨雨型的响应规律也值得深入分析。研究径流和泥沙流失对不同治理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^[6, 17-18]。

鉴于此,本文结合红砂岩侵蚀区地形地貌、气候、土壤、植被类型等因素,采用野外径流小区长期定位试验的手段,对该区自然降雨下典型水土流失治理模式的减流减沙效应进行评价,探明适宜红砂岩侵蚀区的高效水土流失治理模式,研究结果可为当地水土流失治理工作提供参考依据,也对生态鄱阳湖流域建设具有重要意义。

2 材料与方法

2.1 研究区概况

试验地位于江西省宁都县水土保持科技示范园内($116^{\circ}02'40'' \sim 116^{\circ}02'55''\text{E}$, $26^{\circ}37'03'' \sim 26^{\circ}37'34''\text{N}$),园区位于赣江(鄱阳湖水系五大河流之一)的一级支流梅江流域中下游。属亚热带湿润季风气候区,具有气候温和、光照充足、雨量充沛、四季分明、无霜期长等特点。多年平均气温为 18.3°C ,最高气温 38.4°C ,最低气温 -6.2°C ,多年平均降水量 1 691 mm,年内分配不均,集中在 4-6 月,占全年降水量的 48%,多以暴雨形式出现,无霜期 279 d。土壤主要为红砂岩发育而来的红壤,风化颗粒较粗,对土壤的溶解和侵蚀能力大,加之降水量大集中、冲刷力大,在植被破坏区易发生严重的水土流失。地貌类型主要为低山丘陵,最高海拔为 253 m,最低海拔为 220 m。地带性植被为亚热带常绿阔叶林,由于长期不合理的采伐利用,使原生植被不断减少,现有植被主要为针叶林、荒草等。

2.2 试验设计及方法

在研究区内,选择立地条件较为一致(坡度为 8° 、朝向西偏北 11°)的开阔坡面,设置 5 个 $5 \text{ m} \times 20 \text{ m}$ 的标准径流小区。为防止周围对小区的水文干扰,小区四周采用浆砌砖围成,高出地面 20 cm,埋入地面 30 cm,上方和左右两侧设置截排水沟,小区底部设置集流槽,将径流导入径流池,采用五孔分流法,收集次降雨过程中地表径流和泥沙量。径流小区于 2011 年建成,在小区周围设置自计雨量筒记录降水数据。

试验小区具体设计详见表 1。2 号和 3 号试验小区为生态恢复治理模式,其中 2 号小区为针阔混交模式(枫香+湿地松),3 号小区为乔灌草植被恢复模式(枫香、木荷+胡枝子+八月草、百喜草、雀稗),设置水平竹节沟(沟底宽 0.4 m,沟深 0.5 m,沟面宽度 0.6 m),均为当地典型的生态恢复治理模式。4 号和 5 号试验小区为经济开发治理模式,为坡改梯+经果林(蜜桔和脐橙),由于红砂岩低山丘陵地大量经果林均为梯田种植,设置坡改梯符合当地的种植习惯,且能达到保水保土保肥的目的。蜜桔和脐橙为赣南的特色经济林果,适宜当地的气候土壤水文条件,栽植蜜桔和脐橙能兼顾生态和经济效益。1 号小区设置为地表裸露,作为对照,定期清除杂草,将其与实施水土保持措施的水土流失状况进行对比研究。

表 1 试验小区设计

小区序号	治理模式	植被结构	植物措施	工程措施
1	地表裸露	定期清理杂草	无	无
2	生态恢复模式 1	针阔混交	枫香 + 湿地松	无
3	生态恢复模式 2	乔灌木	枫香、木荷 + 胡枝子 + 八月草、百喜草、雀稗	水平竹节沟
4	经济开发模式 1	成年蜜桔	梯壁植草	水平梯田
5	经济开发模式 2	幼龄脐橙	无	反坡梯田

每次降雨结束后,对小区径流池内的水深进行测量,若泥沙含量较高,静置半小时后,将卷尺插入池内,以卷尺轻轻触碰到池底泥沙时的高度为水体深度,多次多点测量取平均值。水深测量完后,将池内泥水搅浑,每个径流池分别取 500 mL 的泥沙水样。静置 6 h,倒去上层清水后(注意不能倒出泥沙),将泥沙全部倒入铝盒中,放入烘箱 105℃ 条件下烘干并称重,测定计算泥沙流失量。

2.3 数据处理与分析

本文降雨径流泥沙数据的观测时间为 2016 年 4 月 26 日至 2017 年 6 月 28 日,采用 SPSS 17.0 进行统计分析,采用 Excel 进行图表绘制。

3 结果与分析

3.1 降雨特征

对试验观测期间自然降雨-产流资料进行分析,发现产生地表径流的自然降雨共 32 场,对观测期间降雨的降雨量、降雨历时、雨强、场次数进行统计(见表 2),其平均降雨量、平均历时、平均雨强分别为 71.78 mm、38.86 h、3.67 mm/h,对应的变异系数为 0.71、0.79、1.49。

3.2 减流减沙效应

对试验观测期间次降雨条件下不同治理模式径流泥沙统计分析(图 1),发现 4 种典型治理模式的地表径流系数均小于 0.23,次降雨间变异系数 0.72~1.26,地表裸露下地表径流系数为 0.20~0.89,变异系数为 0.34;4 种典型治理模式的泥沙流失量为 0.00~0.03 t/hm²,变异系数为 1.03,地表裸露的泥沙流失量为 0.00~0.31 t/hm²,变异系数为 2.19~4.33。说明不同治理模式能有效降低降雨对地表

径流产流和土壤侵蚀量的影响。

对观测期间次降雨径流泥沙均值化后(图 2),可知地表裸露的地表径流系数为 0.66,总地表径流量为 159.58 m³,泥沙流失量为 23.57 kg;生态恢复模式地表径流系数为 0.03、0.04,总地表径流量为 10.48、10.28 m³,泥沙流失量为 0.18、0.60 kg;经济开发模式地表径流系数 0.04、0.05,总地表径流量为 14.26、15.19 m³,泥沙流失量为 1.32、0.9 kg。因此,生态恢复治理与经济开发治理模式的减流减沙效应均能达 90% 以上。

3.3 坡面径流泥沙对降雨要素的响应

分析不同治理模式地表径流泥沙与降雨特征相关性(表 3),发现地表裸露的地表径流泥沙与降雨量、雨强呈显著正相关关系($P < 0.05$,下同),相关系数为 0.363~0.492,与降雨历时呈负相关关系,无显著性差异。采取生态恢复治理模式后地表径流泥沙与降雨量、雨强、降雨历时均无显著相关性;经济开发治理模式的地表径流泥沙与降雨量呈正显著相关关系,相关系数为 0.374~0.687,与降雨强度、降雨历时无显著相关性。说明地表裸露条件下红砂岩侵蚀坡面产流产沙受降雨量、雨强影响显著,生态恢复治理后降低了降雨要素对坡面产流产沙过程的影响,而经济开发模式主要受降雨量影响显著。

径流是坡面泥沙拨离搬运的主要外营力,进一步分析不同治理模式与泥沙流失量的相关性(表 4),发现次降雨条件下不同治理模式泥沙流失量对地表径流量的响应均呈极显著正相关关系($P < 0.01$),相关系数分别为 0.598、0.723、0.455、0.485、0.767。因此,不同治理模式泥沙流失量对地表径流量的响应呈正相关,但响应程度呈现不同的差异。

表 2 试验观测期间自然降雨特征

降雨要素	平均值	标准差	变异系数	总和	场次数
降雨量/mm	71.78	50.99	0.71	2297	32
雨强/(mm·h ⁻¹)	3.67	5.46	1.49		
降雨历时/h	38.86	27.09	0.79	1243.5	

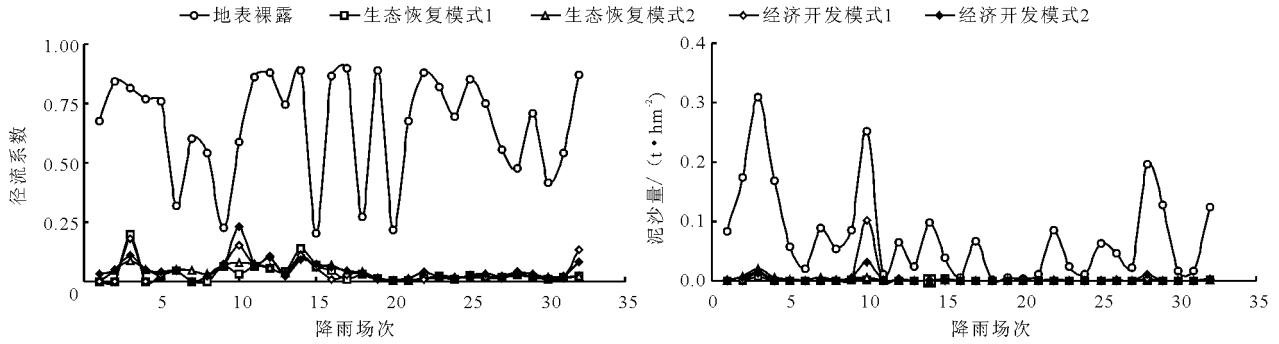


图1 次降雨下不同治理模式径流泥沙特征

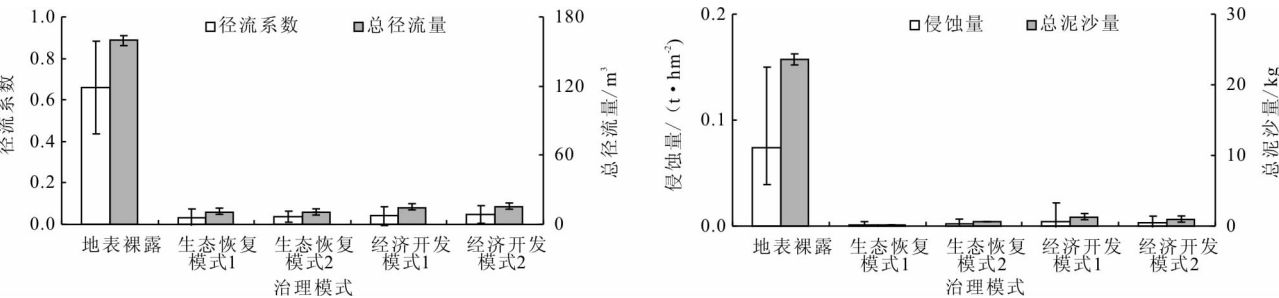


图2 不同治理模式径流泥沙特征平均值

表3 不同治理模式径流泥沙与降雨特征的相关性

项目	治理模式	降雨量		雨强		降雨历时	
		相关系数	判定系数	相关系数	判定系数	相关系数	判定系数
径流系数	地表裸露	0.492 *	0.013	0.423 *	0.016	-0.301	0.095
	生态恢复模式1	0.166	0.365	-0.169	0.355	0.138	0.451
	生态恢复模式2	0.348	0.051	0.025	0.893	0.037	0.841
	经济开发模式1	0.687 **	0.000	-0.176	0.334	0.300	0.095
	经济开发模式2	0.562 **	0.000	0.065	0.722	0.077	0.676
泥沙量	地表裸露	0.375 *	0.034	0.363 *	0.041	-0.105	0.568
	生态恢复模式1	0.312	0.082	-0.032	0.861	0.176	0.335
	生态恢复模式2	0.236	0.194	0.354 *	0.047	-0.051	0.782
	经济开发模式1	0.374 *	0.035	0.027	0.885	-0.025	0.891
	经济开发模式2	0.492 **	0.004	0.016	0.930	0.078	0.671

注：* 表示在 0.05 水平上显著，** 表示在 0.01 水平上极显著，下同。

表4 不同治理模式径流量与泥沙流失量皮尔逊相关系数矩阵

变量	地表裸露		生态恢复模式1		生态恢复模式2		经济开发模式1		经济开发模式2	
	径流	泥沙	径流	泥沙	径流	泥沙	径流	泥沙	径流	泥沙
径流	1	0.598 **	1	0.723 **	1	0.455 **	1	0.485 **	1	0.767 **
泥沙		1		1		1		1		1

3.4 径流泥沙对降雨雨型的响应

为进一步探讨不同治理模式的水土保持效应，从不同降雨雨型的角度，分析典型治理模式的减流减沙效应。以降雨量、雨强、降雨历时 3 个降雨要素

为基础，采用 K - 均值聚类的方法对试验观测期间 32 场有效降雨场次(表 2)进行降雨雨型划分，共划分为雨型 I、II、III 三大类(表 5)。其中雨型 I 的降雨特征为降雨量、雨强、降雨历时大小适中，雨型 II

的降雨特征是长历时、小雨强、大降雨量,雨型Ⅲ的降雨特征为雨强大、历时短、降雨量相对较小。

对不同降雨雨型的地表径流量与侵蚀特征进行分析(图 3),发现地表裸露的平均地表径流量、侵蚀量均以雨型Ⅲ最大,分别为 8.82 m³、1.62 t·hm⁻²;4 种治理模式的平均地表径流量、侵蚀量仍以雨型Ⅲ最大,平均地表径流量分别为 1.35、1.09、1.98、1.86 m³,平均侵蚀量分别为 0.03、0.07、0.24、0.11 t/hm²。说明大雨强、短历时的降雨雨型(雨型Ⅲ)是坡面产流产沙的主要雨型。进一步对不同降雨雨型的累积径

流量与侵蚀量分析(图 3),发现地表裸露下雨型Ⅲ的累积径流量、累积侵蚀量分别为 77.05 m³、11.33 t·hm⁻²,分别占总径流量、侵蚀量的 48.28%、48.08%;生态恢复治理模式雨型Ⅲ的累积径流量为 5.44 m³、6.74 m³、占总径流量的 52.91%、64.31%,累积侵蚀量为 0.15 t·hm⁻²、0.33 t·hm⁻²,占总侵蚀量的 86.81%、55.50%;经济开发治理模式雨型Ⅲ的累积径流量为 9.31 m³、9.92 m³,占总径流量的 61.26%、69.58%,累积侵蚀量为 0.90 t/hm²、1.32 t/hm²,占总侵蚀量的 62.79%、91.84%。

表 5 不同降雨雨型统计特征值

降雨雨型	特征值	平均值	标准差	变异系数	总和	场次数
雨型Ⅰ	雨量/mm	78.8	12.9	0.38	512.9	15
	历时/h	64.5	12.2	0.83	220.5	
	雨强/(mm·h ⁻¹)	2.87	3.49	0.61		
雨型Ⅱ	雨量/mm	167.8	28.4	0.36	945.3	12
	历时/h	58.4	13.2	0.23	700.5	
	雨强/(mm·h ⁻¹)	1.48	0.79	0.53		
雨型Ⅲ	雨量/mm	34.2	19.7	0.12	838.8	5
	历时/h	14.7	23.0	0.36	322.5	
	雨强/(mm·h ⁻¹)	5.70	1.03	0.36		

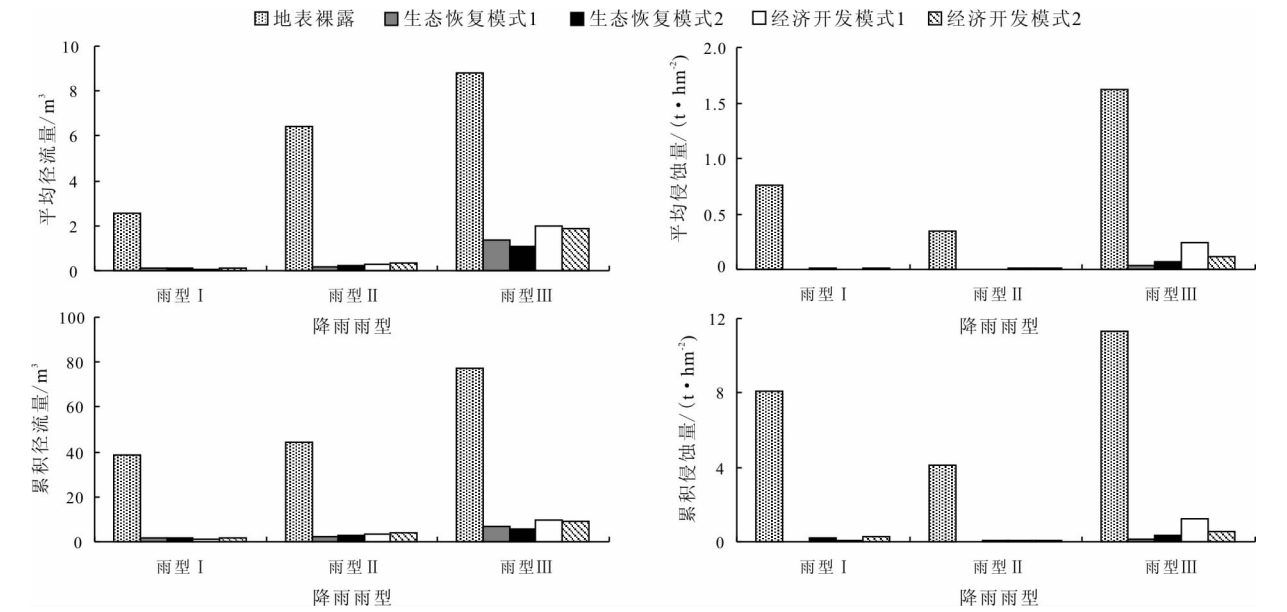


图 3 不同降雨雨型下典型治理模式径流泥沙特征

4 讨 论

坡面水土流失与降雨^[19-20]、土壤^[21-22]、水土流失治理模式^[6, 23-24]和土壤整地方式^[25-26]等因素有关。以往针对南方红壤的侵蚀规律及防治技术模式研究更多集中在花岗岩母质、第四纪风化物红壤

上^[27-28],而红砂岩作为红壤发育的主要母质,对其水土流失规律及防治模式探讨较少。本文通过标准径流小区探究了红砂岩侵蚀区 5 种典型水土流失治理模式径流泥沙效应,发现红砂岩裸露地表径流系数为 0.66,土壤侵蚀量为 0.07 t/hm²,采取生态恢复与经济开发模式治理 5 年后减流减沙效应均能达

90% 以上。从长时间序列看,采取相应的水土保持措施后,生态治理模式和经济开发模式均能有效控制水土流失,且两者间无明显差异。

观测期间筛选 3 场降雨量大的次降雨事件,分析不同治理模式的径流侵蚀特征(表 6),发现经济开发模式的地表径流量要大于生态恢复模式,侵蚀量无显著差异。说明生态恢复模式的水源涵养(截流)功能要大于经济开发模式,这是由于生态恢复

模式具有更好的垂直植被结构^[29],如乔木层、灌草层、枯枝落叶层、根系层等。从短时间序列看,对于经济开发治理模式,更应注重经济果林开发初期的水土流失问题,需配套相应的水土保持措施,如“前埂后沟+反坡台地+梯壁植草”,并控制人为因素造成的破坏,能有效遏制水土流失。在经济果林园开发 5 年后,水土保持措施的减流减沙效应能达到 90% 以上。

表 6 次降雨条件下不同治理模式径流侵蚀特征

降雨时间	降雨量/ mm	降雨 历时/h	雨强/ (mm·h ⁻¹)	治理模式	径流系数	侵蚀量/ (t·hm ⁻²)
2016-05-09	176.4	65.0	2.71	地表裸露	0.88	0.31
				生态恢复模式 1	0.11	0.01
				生态恢复模式 2	0.09	0.02
				经济开发模式 1	0.18	0.01
				经济开发模式 2	0.20	0.01
2016-06-27	148.6	32.5	4.57	地表裸露	0.81	0.25
				生态恢复模式 1	0.03	0.00
				生态恢复模式 2	0.08	0.01
				经济开发模式 1	0.15	0.10
				经济开发模式 2	0.23	0.03
2016-07-18	120.0	45.5	2.64	地表裸露	0.59	0.07
				生态恢复模式 1	0.06	0.00
				生态恢复模式 2	0.06	0.00
				经济开发模式 1	0.10	0.00
				经济开发模式 2	0.11	0.00

因此,生态恢复和经济开发均是有效红砂岩治理的有效途径。考虑到经济成本和治理目的功能等因素,应针对不同侵蚀强度的红砂岩,选择相适应的治理技术,优化治理模式及布局等,做到因地制宜、合理规划、统一布局。对红砂岩侵蚀劣地的综合治理工程的实施过程中,需要注重从以往综合治理到生态调控,以提升生态功能为主^[30],充分发挥水土保持措施的生态服务价值。对于红砂岩低山丘陵侵蚀区的恢复治理,治理措施及治理模式要以小流域为治理单元进行规划布局,充分结合“山水林田湖草”等治理理念,使水土流失治理模式不仅具有水土保持功能,同时提升生态服务功能,将生态恢复和经济治理相结合,促进当地的经济发展。

5 结 论

本文以红砂岩侵蚀劣地为研究对象,采用径流小区观测等方法,分析自然降雨条件下典型水土流

失治理模式的减流减沙效应及其对降雨要素、降雨雨型的响应规律,得出以下结论:

- (1) 试验观测期间,红砂岩裸露地表径流系数为 0.66,土壤侵蚀量为 0.07 t/hm²,采取生态恢复与经济开发模式治理 5 年后减流减沙效应均能达到 90% 以上。
- (2) 地表裸露坡面产流产沙受降雨量、雨强影响显著,生态恢复治理模式降低了降雨要素对坡面产流产沙过程的影响,而经济开发模式主要受降雨量影响显著。
- (3) 大雨强、短历时的降雨雨型(雨型Ⅲ)是坡面产流产沙的主要雨型,地表裸露的累积径流量与侵蚀量分别占总径流量、侵蚀量的 48.28%、48.08%;生态恢复治理模式累积径流量占比提高至 52.91%~64.31%,累积侵蚀量占比提高至 55.50%~86.81%;经济开发治理模式累积径流量占比提高至 61.26%~69.58%,累积侵蚀量占比提高至

62.79%~91.84%。

因此,在红砂岩侵蚀区进行水土流失治理时,相关技术参数应根据降雨雨型Ⅲ标准进行设计,对发挥水土流失治理模式生态、经济和社会综合效益具有重要意义。

参考文献:

- [1] 李 锐,上官周平,刘宝元,等.近60年我国土壤侵蚀科学研究进展[J].中国水土保持科学,2009,7(5):1-6.
- [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] 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):32-34+43.
- [4] 张年胜.红砂岩边坡稳定性分析及治理研究[D].长沙:长沙理工大学,2012.
- [5] 唐翔宇,杨 浩,赵其国,等.红砂岩母质红壤侵蚀作用的¹³⁷Cs法初步研究[J].水土保持研究,2002,9(1):121-125.
- [6] 宋江平,李忠武,刘 春,等.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[J].水土保持学报,2018,32(1):32-38.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] LIU Yaojun, HU Jianmin, WANG Tianwei, et al. Effects of vegetation cover and road-concentrated flow on fillslope erosion in rainfall and scouring simulation tests in the Three Gorges Reservoir Area, China [J]. Catena, 2016, 136:108-117.
- [14] FANG Nufang, SHI Zhihua, LI Lu, et al. The effects of rainfall regimes and land use changes on runoff and soil loss in a small mountainous watershed [J]. Catena, 2012, 99:1-8.
- [15] PENG Tao, WANG Shijie. Effects of land use, land cover and rainfall regimes on the surface runoff and soil loss on karst slopes in southwest China [J]. Catena, 2012, 90:53-62.
- [16] DUAN Jian, YANG Jie, TANG Chongjun, et al. Effects of rainfall patterns and land cover on the subsurface flow generation of sloping Ferralsols in southern China [J]. Plos One, 2017, 12(8):e0182706.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] LIU Chun, LI Zhongwu, DONG Yuting, 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.
- [20] 罗雅雪,张思琪,颜 红,等.亚喀斯特林地野外模拟降雨条件下地表径流特征[J].水资源与水工程学报,2018,29(1):117-121.
- [21] 陈一兵.不同土壤抗蚀性能研究[J].水土保持通报,1995(1):14-18.
- [22] 陈俊杰,孙莉英,蔡崇法,等.不同土壤坡面细沟侵蚀差异与其影响因素[J].土壤学报,2013,50(2):281-288.
- [23] 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.
- [24] 宋月君,廖凯涛,杨 洁,等.塘背河小流域植被覆盖时空动态变化及水保驱动分析[J].水资源与水工程学报,2017,28(5):24-31.
- [25] 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.
- [26] 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.
- [27] 胡建民,宋月君,杨 洁,等.南方红壤区马尾松林下水土流失与降雨量关系研究[J].水资源与水工程学报,2013,24(6):82-87+91.
- [28] 王昭艳,左长清,杨 洁,等.第四纪红壤侵蚀区优良水土保持草本植物的选择与评价[J].草业科学,2008,25(5):87-91.
- [29] LIU Jianbo, GAO Guangyao, WANG Shuai, et al. The effects of vegetation on runoff and soil loss: Multidimensional structure analysis and scale characteristics [J]. Journal of Geographical Sciences, 2018, 28(1):59-78.
- [30] 史志华,王 玲,刘前进,等.土壤侵蚀:从综合治理到生态调控[J].中国科学院院刊,2018,33(2):198-205.