

暴雨条件下典型红壤区不同恢复方式侵蚀过程与特征分析

姚冲^{1,3}, 黄少燕^{1,2,3}, 查轩^{1,2,3}, 李守中^{1,2,3},
陈世发^{1,3}, 白永会^{1,3}, 张婧^{1,3}, 常松涛^{1,3}, 毛兰花^{1,3}

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

摘要: 采用空间替代时间的方法, 探究暴雨条件下典型红壤区不同恢复方式侵蚀过程与特征。选取不同恢复年限的低效林改造(R1)、乔灌木结构(R2)、自然恢复(R3)和对照(DZ)样地, 设计 1.5 mm/min 雨强, 进行野外模拟降雨试验, 分析坡面初始产流时间、径流率、侵蚀率、累积产沙量、入渗率等特征。结果表明: (1) 3 种恢复方式初始产流时间表现为 $R2 > R1 > R3$, 且 R1、R2 样地初始产流时间随治理年限的增加而延长; (2) 3 种恢复方式径流率、侵蚀率、累积产沙量均表现出 $R3 > R1 > R2$, 且 R1、R2 样地径流率、侵蚀率、累积产沙量随治理年限增加呈下降趋势; (3) 同一恢复年限, 3 种恢复方式初始入渗率、累积入渗量、减流减沙效益均表现出 $R2 > R1 > R3$; (4) 3 种恢复方式, 恢复年限对侵蚀过程的影响表现为 $R1 > R2 > R3$; 累积产沙量与累积产流量成幂函数关系。研究结果为揭示典型红壤区不同治理方式的侵蚀过程研究提供参考, 为典型红壤区水土流失治理提供科学依据。

关键词: 典型红壤区; 产流产沙; 恢复年限; 入渗率

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2018)05-0058-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2018.05.010

Processes and Characteristics of Erosion of Different Vegetation Restoration Under Simulated Rainstorm Condition in a Typical Red Soil in China

YAO Chong^{1,3}, HUANG Shaoyan^{1,2,3}, ZHA Xuan^{1,2,3}, LI Shouzhong^{1,2,3}, CHEN Shifa^{1,3},

BAI Yonghui^{1,3}, ZHANG Jing^{1,3}, CHANG Songtao^{1,3}, MAO Lanhua^{1,3}

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

2. Institute of Geography, Fujian Normal University, Fuzhou 350007; 3. Key Laboratory of Humid Sub-tropical Eco-geographical Process, Ministry of Education, Fuzhou 350007)

Abstract: By the methods of space instead of time, the erosion process and characteristics of different vegetation method under simulated rainstorm condition in typical red soil region were explored. In the experiment, 1.5 mm/min rainfall intensity was designed. The reconstruction of inefficient forests (R1), the shrub-grass structure(R2), the natural restoration(R3), with different recovery years were selected, and the control plots(DZ) was selected field simulated rainfall experiments were carried out to analyze the characteristics of initial runoff time, runoff rate, erosion rate, cumulative yield discharge and infiltration rate. The results showed that: (1) The order of the initial runoff production time of the three recovery models was $R2 > R1 > R3$, which was prolonged with the increase of the governance years; (2) The runoff rate, erosion rate and cumulative sediment yield of the three restoration models all showed $R3 > R1 > R2$, and the runoff rate, erosion rate and cumulative sediment yield of R1 and R2 showed decreasing trends with the increase of treatment years; (3) Within the same recovery period, the initial infiltration rate, cumulative infiltration rate, and runoff and sediment reduction benefits of the three restoration plots all showed $R2 > R1 > R3$; (4) The effects of the three restoration methods and the recovery years on the erosion process were shown as $R1 > R2 > R3$. The relationship between cumulative sediment yield and cumulative runoff was a power function. The results provide references for revealing erosion processes under different governance methods and scientific basis for soil erosion control in typical red soil regions.

收稿日期: 2018-04-18

资助项目: 国家重点研发计划项目“南方红壤低山丘陵区水土流失综合治理”(2017YFC05054); 国家科技支撑计划项目“强度侵蚀区退化生态系统修复关键技术的集成与示范”(2014BAD15B02)

第一作者: 姚冲(1991—), 男, 河南驻马店人, 硕士研究生, 主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail: cyaoxm@163.com

通信作者: 黄少燕(1960—), 女, 福建泉州人, 高级工程师, 主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail: xzha@fjnu.edu.cn

Keywords: red soil area; runoff and sediment yield; restoration period; infiltration rate

南方红壤区水土流失规模和强度仅次于黄土高原水土流失区,严重制约了该区域社会经济的发展和生态环境的建设^[1-2],如何修复和改善典型红壤区生态环境,减轻水土流失一直受到社会各界的广泛关注。合理的森林恢复方式能够改善土壤理化性状^[3-5],提高生态系统服务功能^[6],进而达到减轻水土流失、改善生态环境的目的。林下植被是森林生态系统的重要组成部分,在提高森林生态环境效益、维持森林生态系统稳定、防止水土流失、促进养分循环等方面发挥着重要作用^[7-10]。李桂静等^[11]对南方红壤区林地施肥改良、封育、人工补植研究表明,3种控制措施的年均减流率分别为47.9%,47.5%,44.2%,年均减沙率分别为71.4%,67.8%,62.3%。潘萍等^[12]研究表明,降雨量、降雨强度对宜林荒山荒地土壤侵蚀量的影响程度最大,对针阔混交林的影响最小。于国强等^[13]研究表明,林地具有蓄水减沙的水土保持功能,草地具有直接拦沙的水土保持功效。近年来诸多学者^[14-15]从植被盖度、结构的减流减沙进行研究较多。中国南方许多森林植被覆盖率较高的林区一直发生不同程度的水土流失,经常是“远看青山在,近看水土流”,存在严重的空中绿化现象。基于此,本文从南方红壤区林下水土流失问题出发,结合研究区地形和降雨特征,针对不同恢复年限的低效林改造、乔灌木结构、自然恢复3种恢复方式在野外自然条件下开展模拟暴雨降雨试验,分析不同植被恢复方式的侵蚀过程与特征,计算不同治理方式的减流减沙效益,为治理南方红壤区水土流失提供技术示范。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

长汀县位于北纬25°18′—26°02′,东经116°00′—116°39′,隶属福建省龙岩市,位于武夷山南麓,典型丘陵地貌,主要土壤类型为花岗岩红壤,属于亚热带季风气候区,地带性植被类型为亚热带常绿阔叶林,多年平均降水量1711.2 mm。

1.2 人工模拟降雨

人工降雨试验设备为移动式模拟装置,采用7,8号针头组合,针头高5 cm,降雨均匀度大于0.85,满足试验降雨条件。以国家气象局颁布的“降雨强度等级划分标准”中的24 h雨量值范围为分类的参考依据,去除过度的等级,定义日降雨量在0.1~10 mm为小雨日,10~25 mm为中雨日,25~50 mm为大雨日,50 mm以上为暴雨日^[16]。为探究典型红壤区不同植被恢复方式的暴雨产流产沙特征,设计雨强为1.5 mm/min,降雨历时35~50 min,产流时间为33

min,降雨量大于50 mm。试验开展时间2017年9月18日至10月12日。

1.3 试验设计

以长汀县河田镇为研究区,选择3种常见的植被恢复方式,低效林改造(R1)植被主要以适宜的乡土物种马尾松(*Pinus massoniana*)、枫香(*Liquidambar formosana*)、木荷(*Schima superba*)、胡枝子(*Lespedeza bicolor*)、芒萁(*Dicranopteris dichotoma*)为主;乔灌木混交(R2)主要是马尾松、木荷、枫香、胡枝子、黄栀子(*Gardenia sootepensis*)、宽叶雀稗(*Paspalum wettsteini*)、百喜草(*Paspalum notatum*)、芒萁等;自然恢复(R3)主要以马尾松、芒萁为主,选取未治理的严重侵蚀退化地作为对照样地(DZ),每种恢复方式选取4个恢复年限,2010,2012,2014,2016年治理样地,样地具体情况见表1。由于移动式模拟降雨装置和野外降雨条件的限制,在每块样地选取能够反映3种治理措施效果的典型区块,设置投影面积为1.0 m×0.5 m径流小区,坡度为18°~20°。样地土壤厚度均在2 m以上,用25 cm宽的薄钢板埋入地下15 cm,出露10 cm,作为降雨小区的边框,钢板内侧夯实疏松土壤,防止径流沿钢板快速下渗,每次降雨前1天,用0.5 mm/min雨强降雨至坡面产流,并在降雨小区表面覆盖薄膜防止水分蒸发,保证每个小区土壤前期含水量一致,第2天进行降雨。

1.4 样品收集与分析

降雨开始后计时,记录各坡面初始产流时间,坡面产流后开始收集径流泥沙样品,产流后每隔3 min采集1次径流样。降雨试验结束后,样品静置24 h,用量筒测量径流量,侵蚀泥沙过筛,并冲入铝盒,放入105℃的烘箱烘干24 h,称重。

1.5 指标选取与数据处理

坡面土壤入渗率计算公式^[17]为:

$$f = (It \cos \theta - 10R/S)/t \quad (1)$$

式中: f 为坡面平均入渗率(mm/min); I 为降雨强度(mm/min); θ 为地表坡度(°); t 为取样间隔时间(min); R 为时间 t 内产生的径流量(mL); S 为坡面受雨面积(cm²)。初始入渗率反映降雨初期土壤水分的瞬时入渗率,本文采用产流前3 min的平均入渗率反映土壤初始入渗率^[18];坡面土壤累积入渗量根据水量平衡原理进行推算。减流减沙效益计算公式^[19]为:

$$\text{减流率}(\%) = \frac{(w_o - w_{si})}{w_o} \times 100\% \quad (2)$$

$$\text{减沙率}(\%) = \frac{(G_o - G_{si})}{G_o} \times 100\% \quad (3)$$

式中: w_o 、 w_{si} 分别为对照小区与各水土保持措施小区

的径流量(L); G_0 、 G_s 分别为对照小区与各水土保持措施小区的泥沙量(g)。

采用 Excel 2007 和 SPSS 19.0 软件进行数据整理与分析,利用 Origin 8.5 软件制图。

表 1 不同治理方式样地概况

恢复方式	样地编号	治理年份	恢复年限/a	小区投影面积/m ²	坡度/(°)	地点	盖度/%
低效林改造	R1-1	2016	1	0.5	19	河田车寮上坑	48
	R1-3	2014	3	0.5	18	河田伯湖涂屋	64
	R1-5	2012	5	0.5	20	河田下黄坑	85
	R1-7	2010	7	0.5	19	三洲牌楼下	89
乔灌草结构	R2-1	2016	1	0.5	19	河田中坊	65
	R2-3	2014	3	0.5	18	河田窑下河西	72
	R2-5	2012	5	0.5	19	河田罗屋喂	86
	R2-7	2010	7	0.5	19	三洲石官凹	92
自然恢复	R3-1	2016	1	0.5	20	河田芦竹苗屋山	30
	R3-3	2014	3	0.5	18	河田伯湖涂屋	35
	R3-5	2012	5	0.5	20	河田下黄坑	36
	R3-7	2010	7	0.5	19	三洲石官凹	32
对照样地	DZ			0.5	20	河田罗地	20

2 结果与分析

2.1 不同恢复方式坡面产流、产沙特征

2.1.1 初始产流时间 初始产流时间是指降雨开始到薄层径流汇集到小区出口所需要的时间,表示小区内植被截留降雨、延缓径流和土壤保水的能力。由表 2 可知,1.5 mm/min 模拟降雨条件下 R1、R2、R3 样地的初始产流时间均大于 DZ 样地,平均初始产流时间表现为 R2>R1>R3。R1、R2、R3 样地平均初始产流时间分别为 DZ 样地的 2.81、3.22、2.05 倍。R1、R2 样地在治理 1~7 年后,初始产流时间变化明显,随治理年限增加初始产流时间明显延长;而 R3 样地治理 1、3、5、7 年后初始产流时间变化不明显。模拟降雨试验中坡面初始产流时间影响主要受地表覆盖、降雨强度、坡度等因子影响,该试验为暴雨条件下进行的模拟降雨,试验样地坡度基本一致,径流重力沿坡面的水平分力对初始产流时间影响较小^[20],3 种植被恢复方式降雨强度一致,地表植被则能截留降雨影响土壤入渗,进而影响初始产流时间。R1、R2 样地恢复早期地表植被覆盖度低,初始产流时间较短;随着恢复年限的增加,地表植被覆盖度增加,截留降水能力增强,增加土壤入渗率^[21],有效延缓小区初始产流时间;R3 样地地表植被覆盖率低,少量松针枯落物覆盖,1~7 年恢复年限内,地上植被群落结构并未得到有效改善,初始产流时间变化不明显。

表 2 不同恢复方式初始产流时间

恢复年限/a	初始产流时间/min			
	R1	R2	R3	DZ
1	2.45	3.33	2.10	1.20
3	3.03	3.67	2.58	
5	3.80	4.12	2.50	
7	4.20	4.33	2.67	

2.1.2 不同恢复阶段坡面产流特征 由图 1 可知,R1 样地坡面径流率随着治理年限的增加而逐渐减小,样地恢复 7 年后,平均径流率为 210.30 mL/min,在 1、3、5、7 年恢复年限的平均径流率之比分别为 1.75:1.41:1.26:1.0,R1 样地不同恢复阶段,产流初期(6~9 min)径流率随产流时间的增加而增加,随后波动变化,径流率在 50 mm 的产流降雨内并未达到稳定状态。R2 样地治理 1、3、5、7 年后的平均径流率分别为 177.42、160.76、188.03、109.70 mL/min,R2 样地在恢复 1~5 年径流率变化不明显,恢复 7 年后,径流率明显下降,并且 R2 样地径流率产流时间的增加波动变化,在 50 mm 的产流降雨内也未达到稳定状态。R3 样地恢复 1 年后的平均径流率为 463.48 mL/min,在 1、3、5、7 年恢复年限的平均径流率之比分别为 1.22:1.0:1.03:1.07,随着恢复年限的增加,径流率变化不明显,平均径流率变化较小,R3 样地不同恢复年限的径流率在产流初期(6~9 min)随产流时间的增加而增加,随着产流时间的延长,产流后期(降雨结束前 10 min)径流率波动变化均在 30~50 mL/min 内,径流率变化在 50 mm 产流降雨内达到稳定状态。总体上,径流率大小表现为 R3>R1>R2,R1、R2 径流率的变化过程比 R3 更为复杂,R1、R2 样地径流率变化出现多峰多谷的现象,主要是因为 R1、R2 的地表覆盖更为丰富,地表植被截留降雨,部分截留降雨在产流后期直接转化为径流,径流率变化在 50 mm 产流降雨内并未达到稳定状态。

2.1.3 不同恢复阶段坡面产沙特征 由图 2 可知,R1 样地侵蚀率的变化随产流时间的变化不明显,治理 1、3、5、7 年后的平均侵蚀率分别为 0.92、0.36、0.06、0.02 g/min,治理 7 年时间内,治理效果显著。

R2 样地治理 1,3,5,7 年后的平均侵蚀率分别为 0.38,0.26,0.07,0.02 g/min。R1、R2 样地在 1~7 年的治理时间内平均侵蚀率的变化特征表现为随治理时间的增加,侵蚀率逐年下降。R3 样地侵蚀率变化更为复杂,侵蚀率随产流时间的变化表现出多峰度多谷的现象,治理 1,3,5,7 年后的平均侵蚀率分别为 1.37,1.08,1.10,1.19 g/min,R3 样地随着恢复年限的增加,侵蚀现象并未得到有效改善,R3 样地侵蚀率的变化说明典型红壤区自然恢复能力脆弱,严重侵蚀退化地生态系统的自我修复能力较低。总体上,3 种恢复样地侵蚀率大小表现为 $R3 > R1 > R2$,R3 样地侵蚀率随产流时间的变化较 R1、R2 样地更为复杂,主要是因为 R3 样地严重退化,地表植被稀疏,且试验雨强为暴雨条件下,降雨很快转化为径流,坡面很快出现相对分散的浅层片流或漫流,带走表面表层土粒和溶解的物质,造成地表微地形起伏,造成薄层水流的差异性侵蚀,形成多股细状水流,导致侵蚀率随产流时间出现多峰多谷的现象。

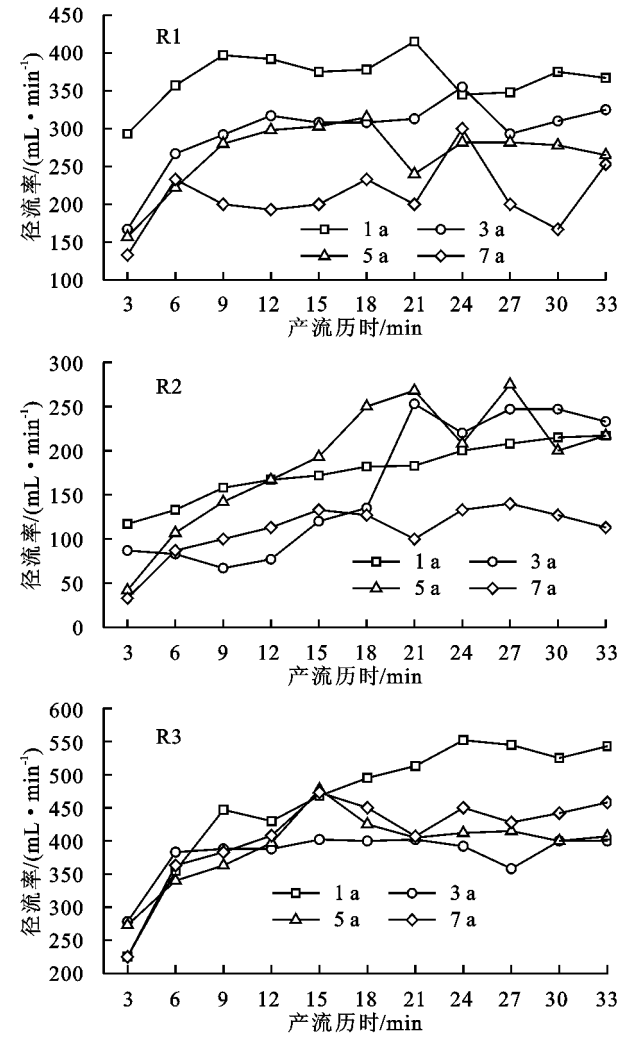


图 1 不同植被恢复阶段径流率变化特征

由图 3 可知,R1、R2 样地随着恢复年限的增加,累积产沙量逐年减少,R3 样地随着治理年限的变化,

累积产沙量无明显变化。其中 R1 样地,治理 1 年后坡面累积产沙量为 30.20 g,治理 3,5,7 年后的累积产沙量分别为治理 1 年后的 38.91%,6.89%,2.72%,说明 R1 样地治理效果显著。R2 样地,治理 1 年后,坡面累积产沙量为 12.63 g,治理 3,5,7 年后的累积产沙量分别为治理 1 年后 68.09%,18.92%,5.78%。R3 样地,治理 1 年后,坡面累积产沙量为 45.16 g,治理 3,5,7 年后的累积产沙量分别为治理 1 年后的 78.83%,80.16%,87.05%,说明 R3 样地治理效果并不明显。总体上,3 种治理样地累积产沙量表现为 $R3 > R1 > R2$ 。

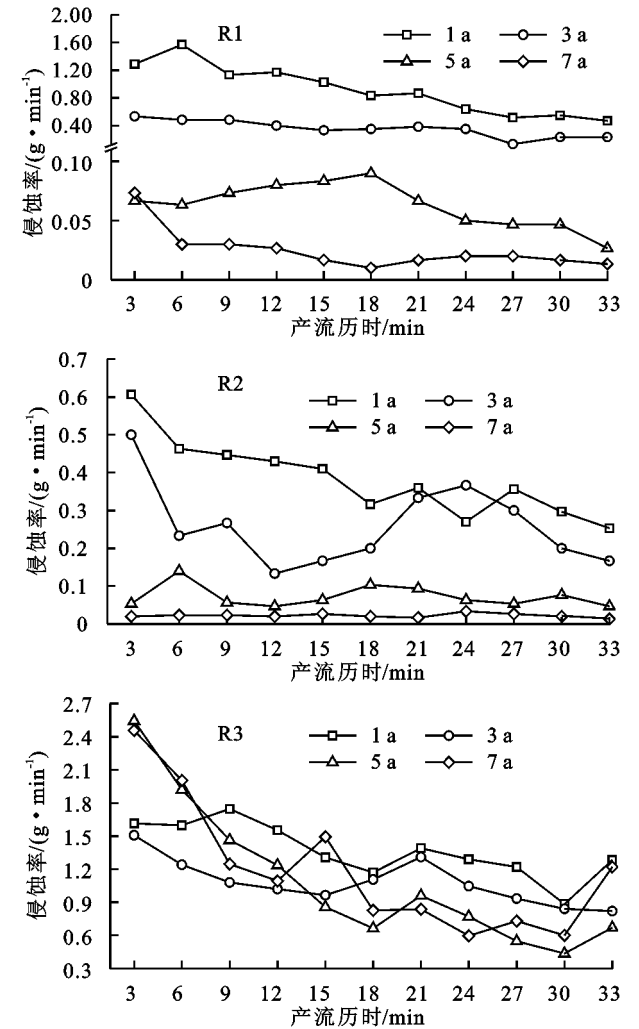


图 2 不同植被恢复阶段侵蚀率变化特征

R1、R2 样地在 1~7 年恢复年限内,径流率、侵蚀率都逐年下降;而 R3 样地径流率、侵蚀率随治理年限的增加变化不明显。说明典型红壤区 R1、R2 恢复方式在减流减沙方面有显著效果,由于典型红壤区的生态环境的自我修复能力有限,R3 恢复效果不显著,需要辅助人工手段,提升红壤区水土保持能力和生态功能。

2.2 不同恢复阶段坡面入渗特征分析

入渗是指水分进入土壤形成土壤水的过程,是地表水—土壤水—地下水相互转化的一个重要环节。

土壤入渗率和入渗量是反映土壤入渗的重要指标。由图 4 可知,总体上初始入渗率、累积入渗量均表现为 $R2>R1>R3$ 。其中 R1、R2 样地初始入渗率随治理年限的增加而逐年上升,R3 样地随治理年限的变化呈波动变化。R1、R2 样地土壤初始入渗率随着治理年限的增加而上升;R3 样地初始入渗率随治理年限的增加无明显变化。R1 样地治理 1,3,5,7 年后土壤累积入渗量分别为 23.87,28.50,30.04,33.68 mm,随着治理年限的增加,累积入渗量逐年增加;R2 样地治理 1~5 年后累积入渗量无明显增加趋势,治理 7 年后累积入渗量有所提高;R3 样地随治理年限的增加,土壤累积入渗量表现出先上升后下降的趋势。

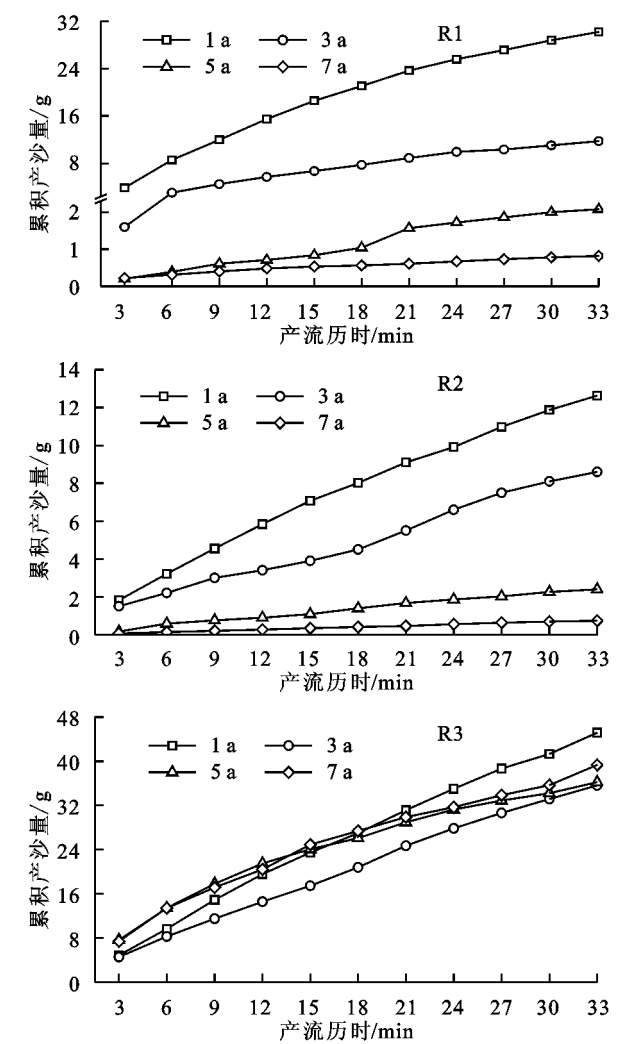


图 3 不同植被恢复阶段累积产沙量变化特征

2.3 不同恢复阶段减流减沙效益分析

R1、R2 恢复方式可以改变林分结构、地表覆盖、土壤理化性质,进而影响截留降雨,有效减少雨滴直接打击土壤表面的动能,提高样地涵养水源能力,起到减流减沙的效果。其中,DZ 样地的累积径流量为 20.92 L,累积产沙量为 60.23 g,根据公式(2)、公式(3),计算不同恢复样地的减流减沙效益。由表 3 可

知,总体上,R1、R2 样地不同恢复年限内,减沙效益均大于减流效益;R3 样地,减流效益与减沙效益基本持平。其中 R1、R2 样地减流减沙效益均随着恢复年限的增加而逐年上升;R3 样地随着恢复年限的增加,减流减沙效益无明显有效改善,在恢复 3~7 年时间内,减流减沙效益随着恢复年限的增加而逐年下降,说明典型红壤区自我修复能力低,需要人为增加地表覆盖,改变严重侵蚀地区林分结构,进而提高红壤侵蚀区土壤涵养水源能力,减轻水土流失。

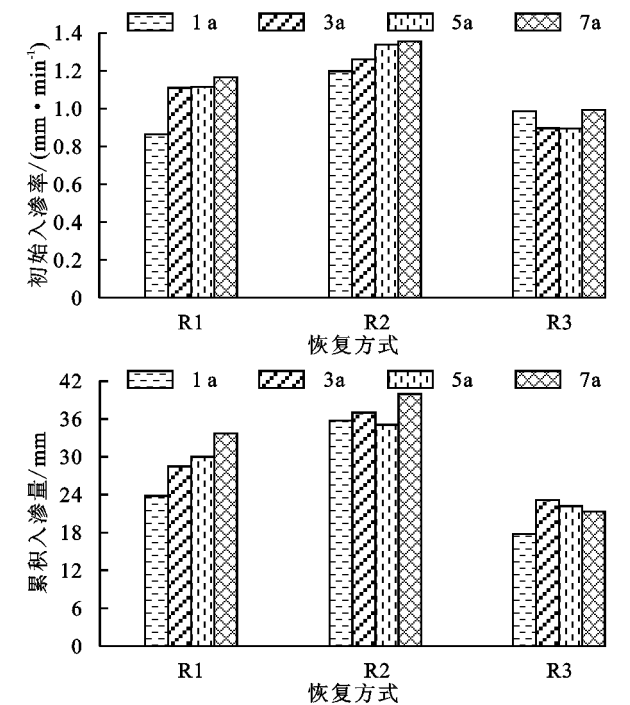


图 4 不同植被恢复阶段土壤入渗变化特征

表 3 不同恢复阶段减流减沙效益对比

恢复 年限/a	减流效益/%			减沙效益/%		
	R1	R2	R3	R1	R2	R3
1	42.04	72.01	26.89	49.86	79.03	25.02
3	53.32	74.64	39.89	80.49	85.72	40.89
5	58.10	70.34	38.12	96.55	96.03	39.90
7	66.83	82.70	35.64	98.64	98.79	34.73

2.4 不同恢复阶段坡面侵蚀过程相关分析

为了综合分析典型红壤区不同恢复方式的恢复年限对侵蚀过程的影响,对恢复年限与产流时间、径流率、累积径流量、侵蚀率、累积产沙量、入渗系数进行相关分析(表 4)。其中 R1 样地初始产流时间、径流率、侵蚀率、累积产沙量、入渗系数与恢复年限呈极显著相关关系,累积径流量与恢复年限显著相关。R2 样地初始产流时间、侵蚀率、累积产沙量与恢复年限极显著相关,径流率、入渗系数与恢复年限显著相关。R3 样地侵蚀过程中各指标与恢复年限不相关。其中恢复年限对 R1 恢复方式影响最大,R2 次之,R3 最小。

表 4 恢复年限与侵蚀过程的相关系数

恢复方式	产流时间	径流率	累积径流量	侵蚀率	累积产沙量	入渗系数
R1	0.994**	−0.803**	−0.336*	−0.831**	−0.800**	0.797**
R2	0.991**	−0.315*	−0.174	−0.876**	−0.795**	0.308*
R3	0.837	−0.239	−0.052	−0.124	0.015	0.240

注: * 表示 $P<0.05$; ** 表示 $P<0.01$ 。

为进一步分析 3 种恢复方式不同复年限产流与产沙的关系,将累积产沙量与累积径流量进行函数拟合(表 5),结果表明,累积产沙量与累积径流量成幂函数关系,表达式为 $Y=aX^b$ 。式中: Y 表示累积产沙量(g), X 表示累积径流量(L); a 为产沙基数系数,与恢复方式有关; b 产沙速率系数,与入渗有关。相关系数均大于 0.97,与张军等^[22]研究结果一致。

表 5 不同恢复阶段累积产沙量和累积径流量模型

恢复方式	恢复年限/ a	拟合方程	R^2
R1	1	$Y=4.7810X^{0.7692}$	0.9910
	3	$Y=2.5958X^{0.6774}$	0.9988
	5	$Y=0.3432X^{0.8214}$	0.9775
	7	$Y=0.3189X^{0.4698}$	0.9909
R2	1	$Y=3.9017X^{0.6874}$	0.9980
	3	$Y=3.3732X^{0.576}$	0.9957
	5	$Y=0.7459X^{0.6462}$	0.9797
	7	$Y=0.2797X^{0.7084}$	0.9944
R3	1	$Y=6.5552X^{0.7139}$	0.9992
	3	$Y=4.8969X^{0.7752}$	0.9966
	5	$Y=9.2818X^{0.5445}$	0.9906
	7	$Y=9.4700X^{0.5439}$	0.9977

注: Y 为累积产沙量(g); X 为累积径流量(L)。

3 结论

(1)R1、R2、R3 样地 1~7 年恢复年限内平均初始产流时间为 3.37,3.86,2.46 min,DZ 样地初始产流时间为 1.20 min,表现为 $R2>R1>R3>DZ$ 。3 种恢复样地相同恢复年限内径流率、侵蚀率、累积产沙量均表现出 $R3>R1>R2$;R1、R2 样地在 1~7 年恢复时间内,径流率、侵蚀率、累积产沙量随着治理年限的增加总体上呈下降趋势;R3 样地径流率、侵蚀率、累积产沙量均随着治理年限的增加而无明显变化。

(2)R1、R2、R3 样地初始入渗率、累积入渗量均表现出 $R2>R1>R3$;其中 R1 样地坡面累积入渗量随恢复年限的增加有显著提高;R2 样地累积入渗量 1~5 年恢复年限内无明显变化,恢复 7 年后,累积入渗量有所提高;R3 样地累积入渗量 3~7 年恢复年限内逐渐下降。

(3)R1、R2 恢复方式减流减沙效益随恢复年限的增加效果明显,R3 恢复方式随恢复年限的变化减流减沙效果不明显;其中 R1、R2 恢复方式减沙效益均大于减沙效益;R3 恢复方式,减流效益与减沙效益基本持平。

(4)3 种恢复方式,恢复年限对侵蚀过程的影响表现为 $R1>R2>R3$;累积产沙量与累积径流量成幂函数关系。

参考文献:

[1] 查轩,黄少燕,陈世发.退化红壤地土壤侵蚀与坡度坡向的关系:基于 GIS 的研究[J].自然灾害学报,2010,19(2):32-39.

[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] Zhang K, Dang H, Tan S, et al. Vegetation community and soil characteristics of abandoned agricultural land and pine plantation in the Qinling Mountains, China [J]. Forest Ecology & Management, 2010, 259(10): 2036-2047.

[4] 王芸,欧阳志云,郑华,等.不同森林恢复方式对我国南方红壤区土壤质量的影响[J].应用生态学报,2013,24(5):1335-1340.

[5] 陈小梅,闫俊华,林媚珍,等.南亚热带森林植被恢复演替中土壤有机碳组分及其稳定性[J].地球科学进展,2016,31(1):86-93.

[6] Benayas J M R, Bullock J M. Enhancement of biodiversity and ecosystem services by ecological restoration: A meta-analysis [J]. Science, 2009, 325 (5944): 1121-1124.

[7] 查轩,黄少燕,林金堂.林地针叶化对土壤微生物特征影响研究[J].水土保持学报,2003,17(4):18-21.

[8] Carr C A, Krueger W C. Understory vegetation and ponderosa pine abundance in eastern Oregon [J]. Rangeland Ecology & Management, 2011, 64(5): 533-542.

[9] 秦富仓,余新晓,张满良,等.小流域林草植被控制土壤侵蚀机理研究[J].应用生态学报,2005,16(9):1618-1622.

[10] 林贵刚,赵琼,赵蕾,等.林下植被去除与氮添加对樟子松人工林土壤化学和生物学性质的影响[J].应用生态学报,2012,23(5):1188-1194.

[11] 李桂静,崔明,周金星,等.南方红壤区林下土壤侵蚀控制措施水土保持效益研究[J].水土保持学报,2014,28(5):1-5.

[12] 潘萍,宁金魁,欧阳勋志,等.上备田河小流域不同林分类型固土保水能力[J].江西农业大学学报,2017,39(3):509-515.

[13] 于国强,李占斌,裴亮,等.不同植被类型下坡面径流侵蚀产沙差异性[J].水土保持学报,2012,26(1):1-5,11.

- 2015, 35(4):1125-1135.
- [3] 项大力, 杨学云, 孙本华, 等. 灌溉水平对壤土磷素淋失的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(1):112-117.
- [4] 徐红娇, 包立, 张乃明, 等. 滇池流域不同利用方式红壤渗滤液的磷素形态变化[J]. 水土保持学报, 2015, 29(3):267-271.
- [5] 彭世彰, 黄万勇, 杨士红, 等. 田间渗漏强度对稻田磷素淋溶损失的影响[J]. 节水灌溉, 2013(9):36-39.
- [6] 康日峰, 任意, 吴会军, 等. 26 年来东北黑土区土壤养分演变特征[J]. 中国农业科学, 2016, 49(11):2113-2125.
- [7] 黄国勤, 赵其国. 红壤生态学[J]. 生态学报, 2014, 34(18):5173-5181.
- [8] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000:65-67.
- [9] 邱亚群, 甘国娟, 刘伟, 等. 湖南典型土壤磷素剖面分布特征及其流失风险[J]. 中国农学通报, 2012, 28(8):223-227.
- [10] 黄昌勇. 土壤学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000:202-203.
- [11] 刘颖, 魏丹, 李玉影, 等. 黑龙江省主要类型土壤剖面养分分布研究[J]. 黑龙江农业科学, 2015(11):31-35.
- [12] 黄绍敏, 郭斗斗, 张水清. 长期施用有机肥和过磷酸钙对潮土有效磷积累与淋溶的影响[J]. 应用生态学报, 2011, 22(1):93-98.
- [13] 樊红柱, 陈庆瑞, 秦鱼生, 等. 长期施肥紫色水稻土磷素累积与迁移特征[J]. 中国农业科学, 2016, 49(8):1520-1529.
- [14] Shafqat M N, Pierzynski G M. The effect of various sources and dose of phosphorus on residual soil test phosphorus in different soils [J]. Catena, 2013, 105: 21-28.
- [15] 秦鱼生, 涂仕华, 孙锡发, 等. 长期定位施肥对碱性紫色土磷素迁移与累积的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2008, 14(5):880-885.
- [16] 李学平, 孙燕, 石孝均. 紫色土稻田磷素淋失特征及其对地下水的影响[J]. 环境科学学报, 2010, 28(9):1832-1838.
- [17] 陆欣欣, 岳玉波, 赵峥, 等. 不同施肥处理稻田系统磷素输移特征研究[J]. 中国生态农业学报, 2014, 22(4):394-400.
- [18] 吴家森, 陈闻, 姜培坤, 等. 不同施肥对雷竹林土壤氮、磷渗漏流失的影响[J]. 水土保持学报, 2012, 26(2):33-37.
- [19] 王荣萍, 丁效东, 廖新荣, 等. 华南地区蔬菜地不同质地土壤磷素淋失临界值研究[J]. 中国农学通报, 2014, 30(19):246-250.
- [20] 周全来, 赵牧秋, 鲁彩艳, 等. 施磷对稻田土壤及田面水磷浓度影响的模拟[J]. 应用生态学报, 2006, 17(10):1845-1848.
- (上接第 63 页)
- [14] 张锐波, 张丽萍, 钱婧, 等. 雨强和植被覆盖度对坡地侵蚀产沙影响强度研究[J]. 自然灾害学报, 2017, 26(5):206-212.
- [15] 李盼盼, 王兵, 刘国彬, 等. 茵陈蒿群落垂直结构对坡面产流产沙过程的影响[J]. 水土保持学报, 2017, 31(2):40-44.
- [16] 徐新创, 张学珍, 戴尔阜, 等. 1961—2010 年中国降水强度变化趋势及其对降水量影响分析[J]. 地理研究, 2014, 33(7):1335-1347.
- [17] 张向炎, 史学正, 于东升, 等. 前期土壤含水量对红壤坡面产流产沙特性的影响[J]. 水科学进展, 2010, 21(1):23-29.
- [18] 吴佳, 王林华, 李占斌, 等. 黄土高原主要秋作物坡地降雨入渗特征参数研究[J]. 水土保持学报, 2014, 28(6):115-119.
- [19] General administration of quality supervision, inspection and quarantine of China. GB/T 15774—2008 calculation method of benefit in soil and water conservation [S]. Beijing: China Standards Press, 2008.
- [20] 冯秀, 查轩, 黄少燕. 人工模拟降雨条件下花岗岩红壤坡面侵蚀过程与特征分析[J]. 中国水土保持科学, 2014, 12(1):19-23.
- [21] 高婵婵, 赵传燕, 王超, 等. 黑河上游天老池流域不同植被下土壤理化性质和入渗特征[J]. 水土保持学报, 2016, 30(1):117-121, 126.
- [22] 张军, 李占斌, 李鹏, 等. 移动降雨条件下坡面产流产沙过程试验研究[J]. 水土保持学报, 2017, 31(1):1-4, 11.