

施用保水剂对花岗岩红壤坡面侵蚀过程的影响

陈诗婷^{1,2}, 查瑞波^{1,3}, 毛兰花^{1,2}, 姜兴雪^{1,2}, 康佩佩^{1,2}

(1.福建师范大学地理科学学院,福州 350007;2.福建省亚热带资源与环境重点实验室,
福州 350007;3.福建师范大学旅游学院,福州 350007)

摘要: 南方花岗岩普遍存在红壤颗粒粗、物理特性差、保水保肥能力弱、水土流失严重等问题。为了探讨施用保水剂对花岗岩红壤坡面防治水土流失的作用,通过模拟降雨试验和室内分析试验,研究层施(K1)、沟施(K2)、混施(K3)保水剂和不施保水剂(CT)条件下坡面的侵蚀过程。结果表明:3种保水剂施用方式下,花岗岩红壤坡面初始产流时间较对照坡面延长 1.09~1.61 倍。坡面入渗率、含水量分别表现为 $K2 > K3 > K1 > CT$ 和 $K3 > K1 > K2 > CT$;在不同处理方式下,坡面减流率表现为 $K3 > K2 > K1$,减沙率表现为 $K2 > K3 > K1$ 。与对照坡面相比,混施保水剂处理下坡面累积产流量减少 59%,累积产沙量减少 66%,保水剂发挥了较好的减流减沙作用;不同保水剂处理方式下,花岗岩红壤坡面累积产流量和产沙量构成幂函数模型,相关系数 > 0.990 。研究结果为花岗岩红壤坡面土壤侵蚀防控提供理论依据和实践参考。

关键词: 保水剂;花岗岩红壤;模拟降雨;土壤侵蚀

中图分类号:S157.1

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2021)05-0044-06

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2021.05.007

Effects of SAP Application on Slope Erosion Process of Granite Red Soil

CHEN Shiting^{1,2}, ZHA Ruibo^{1,3}, MAO Lanhua^{1,2}, JIANG Xingxue^{1,2}, KANG Peipei^{1,2}

(1.College of Geographical Sciences, Fujian Normal University, Fuzhou 350007; 2.Subtropical Fujian Province Key Laboratory of Resources and Environment, Fuzhou 350007;3.College of Tourism Fujian Normal University, Fuzhou 350007)

Abstract: This research was based on the ecological problems of granite red soil in South China, such as the coarse texture, poor physical properties, serious soil erosion and so on. In order to reveal the effects of SAP application on slope erosion of granite red soil, a simulated rainstorm experiment was conducted. SAP was applied with three methods: layering (K1), furrowing (K2), mixing (K3) application. The results showed that: (1) Under the application of SAP, the initial runoff production time of granite red soil slope was 1.09~1.61 times longer than that of the control. The orders of infiltration rate and the water contents were $K2 > K3 > K1 > CT$ and $K3 > K1 > K2 > CT$ respectively. (2) The order of flow reduction rate was $K3 > K2 > K1$, and the sediment reduction rate was shown as follow $K2 > K3 > K1$. Compared with the control slope, the cumulative runoff and sediment yield in mixing treatments decreased by 59% and 66%. The mixing treatments achieved the better benefits of soil and water conservation in this research. (3) Under the different treatments, the cumulative runoff and sediment yield formed a power function model on the granite slope of red soil, and the correlation coefficients were all greater than 0.990. The findings provided theoretical basis and practical references for the study on the granite slope of red soil.

Keywords: super absorbent polymers (SAP); red soil derived from granite; simulated rainstorm; soil erosion

红壤区是我国水土流失严重的区域之一,其花岗岩发育的红壤受土质、气候和地形等因素的影响极易发生土壤侵蚀。严重的水土流失使得土层变薄,养分大量流失,土壤理化特性差,造成土地生产力低下。部分植被覆盖度高的地区出现较为严重的林下水土

流失,形成一片“远看青山在,近看水土流”的景象^[1]。严重制约了社会经济的发展和生态环境的建设。

目前,花岗岩红壤坡面侵蚀研究主要集中于坡面植被恢复下的土壤理化特征变化^[2]、产流产沙过程^[3]、土壤微生物学性质^[4]等方面。保水剂(super

收稿日期:2021-03-13

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“福建红壤区生态修复和持续经营关键技术集成和示范”(2014BAD15B02)

第一作者:陈诗婷(1997—),女,硕士研究生,主要从事水土保持与生态恢复研究。E-mail:cst.chen@qq.com

通信作者:查瑞波(1989—),男,副教授,硕士生导师,主要从事水土保持与生态旅游研究。E-mail:xzha@fjnu.edu.cn

absorbent polymers, SAP)作为一种吸水释水功能较强的土壤结构改良剂对水土流失灾害有一定的缓解作用^[5]。从涵养水土方面看,葛磊等^[6]认为,保水剂在 0~10 cm 施用下可增强抑制土壤蒸发的能力,促进玉米的生长发育。史文娟等^[7]研究发现,施用保水剂后坡面累积入渗量、入渗率和湿润锋分别减少 57.95%,53.89%,59.58%。在改善土壤结构方面,Asghari 等^[8]研究表明,保水剂的施用显著减少土壤大孔隙(>75 μm)数量,增加微孔隙(<30 μm)数量,差异呈极显著($P<0.05$)。保水剂的施用也与坡面侵蚀过程存在关系,随着保水剂施用量的增大,坡面产流效果越明显,减沙率也呈不断增大的趋势^[9]。李虎军等^[10]研究认为,将保水剂施用于黄土坡耕地均可明显减少泥沙侵蚀量,泥沙流失量分别减少 34.8%,22.5%,7.9%,且在使用改良剂的径流中后期,减少土壤侵蚀的效果更优。以往的研究主要集中在干旱半干旱地区,而对南方花岗岩红壤严重侵蚀退化地施用保水剂的研究较为薄弱,并且对保水剂施用在产流产沙过程、水分入渗过程及减流减沙效益上的关注也不多。

基于此,本研究针对南方花岗岩红壤颗粒粗(>1.0 mm 的颗粒含量为 46.13%)、物理特性差、保水保肥能力弱、水土流失严重等问题,结合研究区的地形和降雨条件,开展花岗岩红壤坡面采用层施、沟施、混施保水剂处理方式的模拟降雨试验,揭示不同施用保水剂方式下花岗岩红壤坡面的侵蚀过程,分析其减流减沙效益,为花岗岩红壤坡面水土流失治理提供科学依据和实践参考。

1 材料与方法

1.1 供试材料

1.1.1 供试土壤 本试验花岗岩红壤采自典型红壤侵蚀退化地福建省长汀县,土壤容重为 1.3 g/cm³。供试土壤容重与原状土相等,经测定土壤粒径>2.0 mm 的颗粒含量为 24.10%,1.0~2.0 mm 的颗粒含量为 22.03%,0.5~1.0 mm 的颗粒含量为 19.65%,0.25~0.5 mm 的颗粒含量为 16.85%,<0.25 mm 的颗粒含量为 17.37%。

1.1.2 保水剂 选用北京汉力森公司沃特土壤保水剂,粒径为 1 mm,白色粉末状,吸水率为 255.82 倍。参照李永胜等^[11]的研究结果,设定保水剂施用比例为试验土壤风干重的 0.05%。

1.1.3 模拟降雨装置 试验采用的降雨设备为侧喷式模拟降雨器,有效降雨均匀度在 85%以上,有效降雨高度设置为 6 m,满足本试验所需的降雨条件。以中国气象局^[12]颁布的降水强度等级划分标准为参考依据,定义日降雨量<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。结合

长汀县的降雨特点,本次试验降雨强度设置为 2.0 mm/min,降雨历时 45~90 min,场降雨量 120 mm。

1.1.4 试验土槽 试验采用自主设计的可移动钢槽,规格为长 1.5 m,宽 0.5 m,深 0.35 m。根据研究区地形特点,装置坡度为 15°。可移动钢槽下部连接“V”形集水口,钢槽底部钻取 6×3 个孔径为 1 cm 的排水孔,图 1 为试验装置示意。

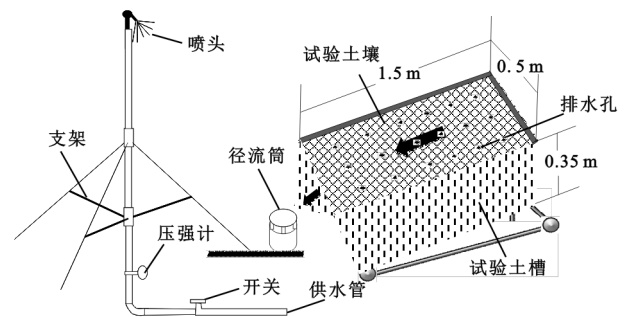


图 1 试验装置示意

1.2 试验设计

试验地位于福建师范大学地理科学学院试验场(26°04'N,119°30'E),试验场周围无遮挡,符合试验要求。填土前,试验土槽最底部装填 2 cm 厚的天然细沙,其上方铺设透水纱布,保障试验期间钢槽的排水状况良好。填土时均匀铺层,每层 3 cm 厚,边填土边压实,刮平土层表面,尽量保证与自然土壤条件的一致性。同时注意控制填土密度保持在 1.24~1.26 g/cm³。

本试验设置 4 个处理方式,分别为:(1)未添加保水剂(对照 CT);(2)层施保水剂,对深度为 5 cm 的土层施用保水剂均匀播撒(K1 处理);(3)沟施保水剂,按照“品”字形模式于土壤中开沟(深 5 cm,宽 8 cm)施用保水剂(K2 处理);(4)混施保水剂,将土壤与保水剂混匀后填充试验土槽,施用保水剂土层厚度为 5 cm,表层再覆盖 3 cm 厚的原状土(K3 处理)。

降雨试验开展于 2019 年 9 月 18 日至 10 月 15 日。每场正式降雨试验前 1 天需用 0.5 mm/min 降雨强度对各小区进行预降雨至坡面产流,结束后用塑料薄膜覆盖坡面静置 24 h,确保降雨试验前下垫面土壤含水量基本一致。降雨试验过程中,需记录初始产流时间,每隔 3 min 收集 1 次径流泥沙样品,收集样品的时间为 1 min。试验结束后将样品静置 24 h,用量筒测定径流量后,将底层泥沙过筛后冲入铝盒,置于 105 °C 的烘箱中 24 h 后进行称重。

1.3 指标测定与数据处理

(1)试验采用烘干法进行土壤含水量的测定,采用环刀法进行土壤入渗率的测定,测定方法参考刘目兴等^[13]的方法。

(2)径流强度^[14]、土壤入渗率^[15]计算公式为:

$$H = \frac{M_a - M_e}{\rho T} \quad (1)$$

$$I_r=\frac{H}{1000bL}$$

(2)

式中: H 为径流率(mL/min); M_a 为取样径流泥沙总质量(g); M_e 为取样泥沙干重(g); ρ 为水密度($1.00\text{ g}/\text{m}^3$); T 为取样间隔时间(min); I_r 为径流强度(mm/min); b 为水面宽度(m); L 为坡长(m)。

$$f=\frac{IT\cos\theta-\frac{10N}{S}}{T}$$

(3)

式中: f 为坡面土壤入渗率(mm/min); I 为降雨强度(mm/min); θ 为地表坡度($^\circ$); T 为取样间隔时间(min); N 为时间 T 内产生的径流量(mL); S 为坡面受雨面积(m^2)。

(3)减流减沙效益根据《水土保持综合治理效益计算方法(GB/T 15774—2008)》^[16] 进行计算,计算公式为:

$$f_r=\frac{(L_d-L_c)}{L_d}\times100\%$$

(4)

$$f_s=\frac{(S_d-S_c)}{S_d}\times100\%$$

(5)

式中: f_r 、 f_s 分别为各施用保水剂小区的减流率(%)和减沙率(%); L_d 、 L_c 分别为对照小区与各施用保水剂小区的径流量(L); S_d 、 S_c 分别为对照小区与各施用保水剂小区的泥沙量(g)。

2 结果与分析

2.1 不同处理方式下坡面初始产流情况

由表 1 可知,2.0 mm/min 的雨强条件下,坡面初始产流时间表现为 $K2>K3>CT>K1$ 。施用保水剂后,坡面初始产流时间相较于对照坡面分别延长 1.09($K1$),1.61($K2$),1.57 倍($K3$)。说明保水剂对坡面均具有延缓初始产流的作用,且在沟施和混施保水剂处理下表现的效果更加明显。由于在保水剂施用后土壤的吸水能力提升,贮水量增大,故初始产流时间较为延缓。不同处理方式下,产流量的峰值较对照坡面均有不同程度的减小, $K3$ 的产流量峰值最低且峰值出现时间最短,对照坡面的产流峰值是混施处理坡面的 2.45 倍。说明保水剂可有效改善土壤结构,增强土壤吸持水分的能力,致使不同处理方式下产流峰值出现时间较 CT 均有不同程度的提前。

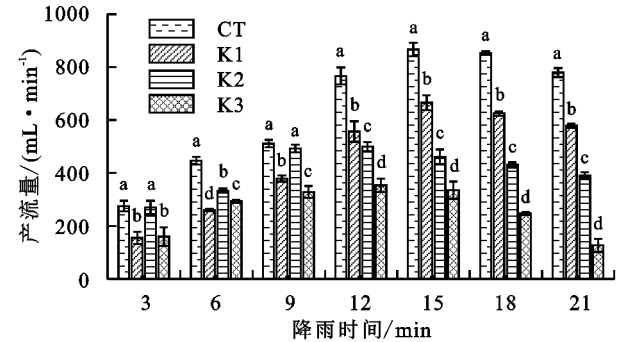
表 1 不同处理方式坡面产流特征

处理	初始产流 时间/min	产流量峰值/ ($\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$)	峰值出现 时间/min
CT	20.95	866.67	18
K1	16.42	666.00	15
K2	33.80	500.00	12
K3	32.25	353.33	12

2.2 不同处理方式下坡面产流变化过程

不同处理方式下的坡面产流初期流量均处于较低水平,并且随着降雨时间的延长,产流量逐渐上升,达到峰值之后流量呈缓慢下降并趋于稳定状态(图 2)。CT、 $K1$ 、 $K2$ 、 $K3$ 、的平均产流量之比为 2.44 : 1.75 : 1.56 : 1.00。其原因是降雨初期,壤中流不断增多,施用保水剂坡面的土壤水分利用潜力增大,使得土壤含水量提升。随着降雨时间延长,雨滴的击打使得土壤颗粒逐渐被分散、压实,促进地表结皮的形成^[17]。同时在保水剂颗粒吸水膨胀的过程中土壤的入渗功能受阻,使得部分雨水形成地表径流。在降雨中后期地表结皮形成,地表径流量也逐渐稳定。

随着降雨时间的延长,各坡面累积产流量也不断增大(图 3)。4 个坡面累积产流量表现为 $CT>K1>K2>K3$,对照坡面的累积产流量最大, $K3$ 坡面相对较低, $K3$ 、 $K2$ 、 $K1$ 坡面累积产流量与对照坡面相比分别减少 59%,36%,28%。试验结果表明,2.0 mm/min 的雨强条件下,混施处理对降低坡面产流的效果最为显著。



注:图柱上方不同小写字母表示相同降雨时间不同处理间差异显著($P<0.05$)。下同。

图 2 不同处理方式坡面产流量的变化过程

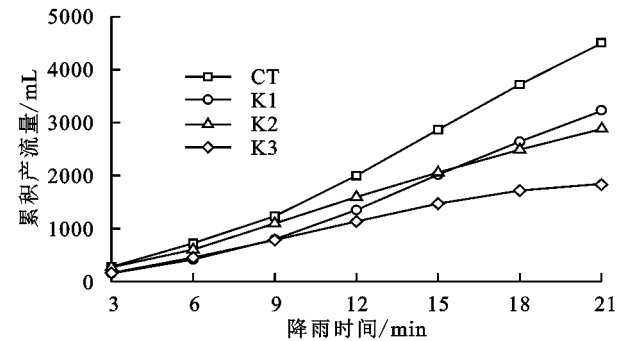


图 3 不同处理方式坡面累积产流量的变化过程

2.3 不同处理方式下坡面产沙变化过程

坡面产沙量的变化随着降雨时间的延长呈现出先上升再波动下降的状态,对照坡面的产沙量波动幅度最大(图 4)。不同处理方式坡面产沙出现峰值的时间均早于对照坡面,施用保水剂坡面产沙峰值出现时间均为 6 min,产沙量峰值分别为 0.20,0.12,0.20

g,对照坡面为 12 min,产沙量峰值为 0.37 g。说明保水剂施用后使产沙峰值逐渐提前,且产沙量峰值明显减小,其中沟施处理下的坡面产沙峰值最小。原因是降雨初期在雨滴击打作用和径流冲刷作用下,坡面部分土壤颗粒容易被径流携带形成侵蚀泥沙。随着降雨时间的延长,保水剂不断促进土壤交织缠绕,加上坡面土壤被水流润湿逐渐形成结构性结皮,使土壤颗粒不易被带走,导致土壤侵蚀率达到峰值之后便出现下降的现象。在产沙过程中,由于细沟侵蚀的出现导致沟壁受重力作用发生坍塌,故产沙量会随着降雨历时的延长出现波动变化^[17]。

随着降雨时间的延长,各坡面累积产沙量不断增大(图 5)。4 个坡面累积产沙量表现为 CT>K1>K3>K2,对照坡面的累积产沙量最大,沟施处理坡面相对较低,K2、K3、K1 坡面与对照坡面相比累积产沙量分别减少 73%,66%,57%,这说明,施用保水剂能够有效地减少坡面产沙,拦蓄水土。试验结果表明,2.0 mm/min 的雨强条件下,沟施处理对减少坡面产沙的作用最明显。

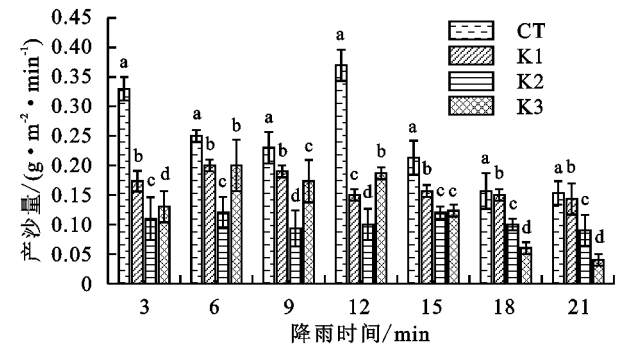


图 4 不同处理方式坡面产沙量的变化过程

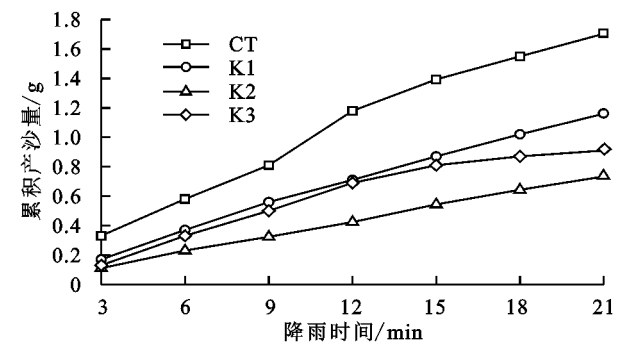


图 5 不同处理方式坡面累积产沙量的变化过程

2.4 不同处理方式下坡面土壤入渗和含水量特征

总体上坡面土壤入渗率表现为 K2>K3>K1>CT,其中对照坡面的入渗率随降雨时间的增加而逐渐下降,K1、K2、K3 坡面的土壤入渗率均随降雨时间的增加呈先下降后上升再下降的趋势(图 6)。对照坡面的土壤入渗率约为 0.2~0.9 mm/min,不同处理方式下的坡面土壤入渗率约为 0.5~0.9 mm/min。并且施用保水剂之后土壤入渗率随降雨时间的延长而不断降低,降雨持续到 12 min 后入渗率下降速率

呈逐渐减缓并趋于稳定。结果表明,保水剂可明显增加土壤的入渗率,减少坡面产流,起到蓄水保土的作用。在 2.0 mm/min 的雨强条件下,沟施保水剂的处理方式能够显著增加坡面土壤的入渗率。

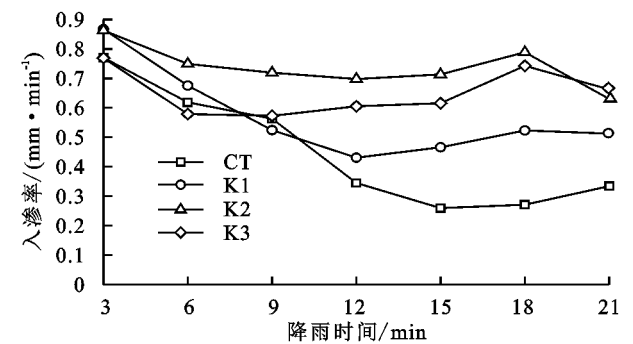


图 6 不同处理方式坡面入渗率的变化过程

与对照坡面相比较,不同处理方式均增加坡面土壤含水量。由表 2 可知,层施、沟施、混施处理下的土壤含水量均值分别为 43.99%,32.81%,44.68%,明显高于对照坡面(23.43%)。试验结果表明,保水剂施用下的坡面含水量显著增加,其中混施处理对坡面土壤含水量的影响效果最显著。

表 2 不同处理方式坡面土壤含水量

单位:%

降雨场次	CT	K1	K2	K3
1	23.41	43.50	32.22	44.94
2	22.91	44.13	33.12	44.32
3	23.99	44.35	33.08	44.78

2.5 不同处理方式下坡面减流减沙效益分析

不同处理方式下,施用保水剂后均可增大土壤团聚体粒径,改善土壤结构,增强土壤水分吸收能力,进而缓解雨滴击打溅蚀的影响,提升坡面涵养水源的能力,发挥减流减沙的效益^[18]。其中,CT 坡面的累积产流量为 4 500 mL,累积产沙量为 8.55 g。根据公式(4)和公式(5),计算不同处理方式下坡面减流减沙效益。各处理方式坡面减流率大小排序为 K3>K2>K1,减沙率大小排序为 K2>K3>K1,不同处理方式减流率较减沙率差异更为显著(图 7)。总体上,3 种处理方式减沙效益均大于减流效益,混施处理下减流效益与减沙效益差异最小。结果表明,2.0 mm/min 雨强条件下混施保水剂减流减沙作用最为明显。

2.6 不同处理方式坡面产流产沙过程相关分析

对坡面产流量、产沙量与各测定指标进行 Pearson 相关性分析。由表 3 可知,坡面产流量与径流强度、坡面土壤入渗率呈极显著相关关系($P<0.01$),即随着产流的不断增加,径流强度呈增加趋势,土壤入渗率呈下降趋势。同时坡面产沙量与产流量、土壤入渗率均无显著的相关关系($P>0.05$),而与径流强度呈显著的正相关关系($P<0.05$)。降雨历时与坡

面产流量、坡面产沙量和土壤入渗率之间均存在较为密切的关系($P<0.05$),即随着降雨时间的延长,坡面产流量呈增加趋势,坡面产沙量和土壤入渗率呈下降的趋势。

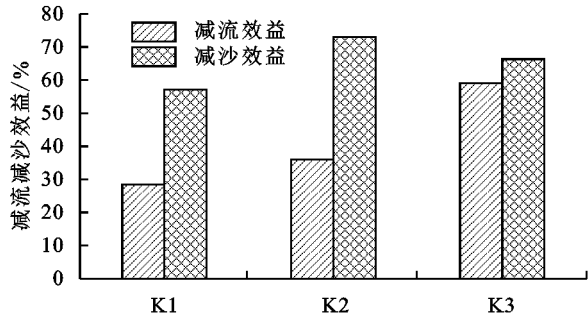


图 7 不同处理方式坡面减流减沙效益

表 3 不同处理方式坡面产流产沙特征的相关系数

测定指标	产流量	径流强度	产沙量	入渗率	降雨历时
产流量	1.000				
径流强度	0.956 **	1.000			
产沙量	0.282	0.445 *	1.000		
入渗率	-0.843 **	-0.793 **	-0.340	1.000	
降雨历时	0.466 *	0.361	-0.406 *	-0.469 *	1.000

注: * 表示 $P<0.05$; ** 表示 $P<0.01$ 。

为进一步分析坡面产流与产沙之间的关系,将坡面累积产流量与累积产沙量进行函数拟合,分析结果(表 4)表明,两者之间的关系满足幂函数 $Y=AX^B$ (式中: Y 为累积产沙量(g); X 为累积产流量(mL),并且相关系数均在 0.990 以上)。说明保水剂的施用对坡面累积产流量和累积产沙量的影响均较为显著。由拟合方程可知,累积产流量越大,累积产沙量越大。在 2.0 mm/min 雨强条件下,坡面累积产流量和累积产沙量拟合的幂函数大小排序为 CT>K1>K3>K2。

表 4 不同处理方式坡面累积产流量和累积产沙量的幂函数模型

处理	拟合方程	R^2
CT	$Y=0.0114X^{0.6003}$	0.998
K1	$Y=0.0086X^{0.6107}$	0.995
K2	$Y=0.0015X^{0.7744}$	0.997
K3	$Y=0.0024X^{0.7976}$	0.998

3 讨论

3.1 不同处理方式下保水剂的作用机理

保水剂可以吸附比自身质量更高的水分含量,改善土壤结构,进而影响坡面土壤侵蚀过程。本研究结果表明,施加保水剂后,坡面初始产流时间较对照坡面明显延长,土壤入渗率和含水量明显提升。这一现象与保水剂的吸水性、保水性、有效持续性等功能有密切关系。降雨期间,保水剂颗粒可进行反复吸水释水,水凝胶作用也使得团粒结构改善,部分上层保水剂颗粒可抑制表土结皮的形成,致使土壤入渗和保水

能力提升。随着降雨时间的延长,水凝胶逐渐堵塞土壤孔隙,水分下渗通道受到阻碍,致使土壤入渗率随降雨时间的延长而不断降低。付晨星^[19]通过野外降雨试验研究表明,在低强度降雨条件下,保水剂能延缓土壤结皮的形成,提升土壤保水持水的能力。并且在混施保水剂处理下土壤含水量最大,在层施保水剂处理下土壤入渗率最大。

本研究分别运用层施、沟施、混施保水剂作用于花岗岩红壤坡面。层施保水剂以面状效果作用于土壤,在流水作用下对施用层及下层土壤贡献较大,致使上层土壤保水性能较差。沟施保水剂施用点位较多,范围较大,土壤中的保水剂颗粒吸持水分后随时间缓慢释放。上层保水剂颗粒与土壤胶结于地表,直接与大气相通,促进土壤水分的蒸发。并且这一部分保水剂颗粒与土壤的胶结作用也减少了地表泥沙的流失,故沟施保水剂对抑制坡面产沙的效果较明显。混施保水剂后,保水剂与土壤的接触面更大,土壤团聚体大多处于胶结状态,水分下渗通道易堵塞,产流减少。并且施用层与地表之间有土层间隔,导致与大气之间的交换较弱。因而混施保水剂对减少坡面产流的影响较显著,坡面土壤含水量较高。李希^[20]在大田试验中得出保水剂不同的施用方式均能显著提高土壤的含水量(>70%),提升土壤团聚体的形成,对作物的生产发育也具有促进作用,与本研究试验结果一致。

3.2 不同环境条件下保水剂的作用效果

保水剂的施用效果受到降雨强度、土质、坡度等因素的影响存在一定的差异性。本研究表明,模拟试验条件下,花岗岩红壤坡面产流产沙均明显减少,并随降雨历时的延长呈现出先逐渐上升,后缓慢下降并趋于平稳的趋势。保水剂施用下的坡面土壤入渗率和含水量增加,与对照坡面相比差异显著。不同处理方式下保水剂对坡面产流产沙的控制效应不同,混施保水剂处理作用效果最明显。

在不同的环境条件下,由于受到空间异质性及人为条件等因素的影响,保水剂施用效果存在差异。在不同降雨强度条件下,刘川等^[21]研究表明,保水剂施用下红壤坡面产流、产沙量均降低,初始产流时间延长,且在 1.0 mm/min 雨强下,混合施用保水剂效果较显著,1.5 mm/min 雨强下,层施保水剂效果较显著。

在不同土质条件下,本研究试验结果表明,保水剂施用后坡面减沙效益普遍好于减流效益,常松果等^[22]研究表明,保水剂施用于紫色土坡面其减沙效果不明显,减流效果显著($P<0.01$)。一方面是土壤基质不同,本研究采用花岗岩红壤土,与紫色土相比,容重较小,土壤孔隙度较大,土壤含水量较高;另一方面是保水剂施用层次不同,本研究在土壤表层以下 5

cm 施用保水剂,常松果等^[22]采用均匀喷施于土壤表面的方式,故保水剂施用后与土壤的胶结程度不同,施用效果不同,导致出现不同的试验结果。

在不同坡度条件下,陈月娥^[23]研究表明,在 10°, 15°,20°,30°坡度条件下,施用保水剂后坡面累积产流量和累积产沙量利用幂函数进行拟合,相关系数均达到 0.960 以上,且在坡度为 15°时,相关系数 R^2 达到 0.990。本研究表明,在保水剂施用条件下,花岗岩红壤坡面累积产流量与累积产沙量之间存在显著相关,相关系数均大于 0.990。上述结果说明,无论何种保水剂施用方式,对累积产流量和累积产沙量的影响均为显著。

除上述影响因素外,室内模拟试验与野外自然环境条件下其作用效果还存在着差异,覃超等^[24]研究表明,在天然降雨条件下,施用保水剂均可有效减少产流、产沙量,但在短历时低强度降雨(18 min,0.6 mm/min)和长历时低强度降雨(45 min,0.7 mm/min)下施用保水剂较短历时高强度降雨(15 min,1.3 mm/min)减流减沙效果更加明显。郝冬宁等^[25]研究天然降雨条件下层施保水剂对棕壤坡面的影响表明,坡面土壤含水量与降雨量的变化趋势基本一致,相较于对照坡面其土壤含水量明显提升,各土层土壤密度均较小,有利于土壤中水分的贮存,从而促进作物的生长。

综上,层施、沟施、混施保水剂 3 种处理方式均在一定程度上减少花岗岩红壤坡面径流泥沙流失,改善坡面侵蚀状况。试验过程中应注意要依据不同土壤基质、坡度等因素选择不同施用比例的保水剂,这可以有效减少地表径流泥沙流失,并且提高保水剂的利用效率。

4 结论

在层施、沟施、混施保水剂 3 种处理方式下,坡面初始产流时间明显延缓,坡面土壤入渗率及含水量较对照坡面显著升高。施用保水剂能够有效改善坡面土壤结构,提升土壤抗蚀强度。

坡面产流量和产沙量均随着降雨时间的延长呈现出逐渐增加而后缓慢下降并趋于稳定的趋势。同时,各坡面累积产流量和累积产沙量较对照坡面分别减少 28%~59%,57%~73%,表明保水剂利用自身吸水保土的特性,在土壤侵蚀过程中可有效减少坡面产流、产沙量,起到拦蓄水土的作用。

不同处理方式下保水剂施用效果不同,其中混施处理下坡面侵蚀强度较小。该处理方式下保水剂与土壤接触面较大,保水剂颗粒逐渐吸水膨胀,土壤团粒胶结,能够较好地发挥保持水土的效果。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] Chen X A, Liang Z W, Zhang Z Y, et al. Effects of soil and water conservation measures on runoff and sediment yield in red soil slope farmland under natural rainfall[J]. Sustainability, 2020, 12(8):e3417.
- [3] Schillem S, Schneider B U, Zeihser U, et al. Effect of N-modified lignite granulates and composted biochar on plant growth, nitrogen and water use efficiency of spring wheat[J]. Archives of Agronomy and Soil Science, 2019, 65(13):1913-1925.
- [4] Zhang S Y, Zhuo M, Xie Z, et al. Effects of near soil surface components on soil erosion on steep granite red soil colluvial deposits[J]. Geoderma, 2020, 365(3):114-203.
- [5] Luo M T, Li H L, Huang C, et al. Cellulose-Based absorbent production from bacterial cellulose and acrylic acid: Synthesis and performance[J]. Polymers, 2018, 10(7):e702.
- [6] 葛磊,张海欧.复合保水剂保水性能及其与对玉米生长的影响[J].农业科学,2020,10(5):7.
- [7] 史文娟,梁嘉平,陶汪海,等.添加 γ -聚谷氨酸减少土壤水分深层渗漏提高持水能力[J].农业工程学报,2015,31(23):94-100.
- [8] Asghari S, Neyshabouri M R, Abbasi F, et al. The effects of four organic soil conditioners on aggregate stability, pore size distribution, and respiration activity in a sandy loam soil[J]. Turkish Journal of Agriculture and Forestry, 2014, 33(1):47-55.
- [9] 宋月君,黄炎和,杨洁,等.南方典型土壤坡面产流产沙过程对 PAM 的响应[J].农业机械学报,2017,48(8):279-287.
- [10] 李虎军,王全九,陶汪海,等.不同改良剂对黄土坡耕豆地水土及氮磷流失的影响[J].中国水土保持科学,2017,15(6):117-125.
- [11] 李永胜,苟春林,杜建军,等.保水剂与磷肥的相互影响及节水保肥效果[J].水土保持研究,2014,21(6):67-71.
- [12] 孔锋,方建,吕丽莉,等.1961—2015 年中国不同强度降雨的变化趋势和波动特征[J].热带地理,2017,37(4):473-483.
- [13] 刘目兴,吴丹,崔文虎.长江三峡山地不同垂直带土壤入渗研究[J].水土保持学报,2015,29(3):56-61.
- [14] 韩同春,苏钦钰,张宇.双层结构边坡降雨入渗与坡面径流耦合分析[J].工程科学与技术,2020,52(6):145-152.
- [15] 姚冲,黄少燕,查轩,等.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[J].水土保持学报,2018,32(5):58-63,70.

- ring of rainfall infiltration in a loess slope and analysis of failure mechanism of rainfall-induced landslides[J]. *Engineering Geology*, 2009, 105(1/2): 134-150.
- [9] 陈伟, 骆亚生, 武彩萍. 人工降雨作用下黄土边坡的室内模型试验研究[J]. *中国农村水利水电*, 2013(5): 100-104.
- [10] Wei W B, Cheng Y M, Li L. Three-dimensional slope failure analysis by the strength reduction and limit equilibrium methods [J]. *Computers and Geotechnics*, 2009, 36(1/2): 70-80.
- [11] Cheng Y M, Lansiaara T, Wei W B. Two-dimensional slope stability analysis by limit equilibrium and strength reduction methods [J]. *Computers and Geotechnics*, 2007, 34(3): 137-150.
- [12] Huang M S, Jia C Q. Strength reduction FEM in stability analysis of soil slopes subjected to transient unsaturated seepage [J]. *Computers and Geotechnics*, 2009, 36(1/2): 93-101.
- [13] Martin G R, Chen C Y. Response of piles due to lateral slope movement[J]. *Computers and Structures*, 2005, 83(8/9): 588-598.
- [14] Li Z H, Jiang Y J, Tao Z G, et al. Monitoring prediction of a rockslide in an open-pit mine and numerical analysis using a material instability criterion[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2019, 78(3): 2041-2053.
- [15] Lin H, Cao P, Gong F Q, et al. Directly searching method for slip plane and its influential factors based on critical state of slope [J]. *Journal of Central South University of Technology*, 2009, 16(1): 131-135.
- [16] 裴向军, 袁广, 张晓超, 等. 坡脚开挖诱发滑坡机理: 以沙井驿滑坡为例[J]. *山地学报*, 2017, 35(2): 195-202.
- [17] Jian W X, Xu Q, Yang H F, et al. Mechanism and failure process of Qianjiangping landslide in the Three Gorges Reservoir, China [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2014, 72(8): 2999-3013.
- [18] 滕宏泉, 范立民, 向茂西, 等. 陕北黄土梁峁沟壑区地质灾害与降雨关系浅析: 以陕北延安地区 2013 年强降雨引发地质灾害为例[J]. *地下水*, 2016, 38(1): 155-157.
- [19] 林杭, 曹平. 边坡稳定性强度折减数值分析方法与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2016.
- [20] 张文彤. SPSS 统计分析高级教程[M]. 北京: 高等教育出版社, 2004.
- [21] 李云雁. 试验设计与数据处理[M]. 北京: 化学工业出版社, 2008.
- [22] 程宏浩. 基于近景图像识别的滑坡裂缝监测技术研究[D]. 杭州: 杭州电子科技大学; 2020.
- [23] 陈菲, 王塞, 高云建, 等. 白格滑坡裂缝区演变过程及其发展趋势分析[J]. *工程科学与技术*, 2020, 52(5): 71-78.
- (上接第 49 页)
- [16] 李宗杰, 宋玲玲, 田青, 等. 陇南土石山区水土保持综合治理效益分析[J]. *干旱区资源与环境*, 2016, 30(10): 132-137.
- [17] Li C J, Pan C Z. Overland runoff erosion dynamics on steep slopes with forages under field simulated rainfall and inflow [J]. *Hydrological Processes*, 2020, 34(8): 1794-1809.
- [18] 马征, 董晓霞, 张柏松. 不同保水剂对土壤团聚体组成及微生物量碳、氮的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2018, 277(5): 122-128.
- [19] 付晨星. PAM 和 SAP 交并施用对旱区坡耕地土壤水力特性和水肥流失的研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2018.
- [20] 李希. 2 种新型保水剂对土壤—作物系统的影响[D]. 北京: 中国科学院大学, 2013.
- [21] 刘川, 查轩, 黄少燕, 等. 保水剂施用方式对花岗岩红壤坡面水土保持的影响[J]. *水土保持学报*, 2017, 31(6): 110-115.
- [22] 常松果, 胡雪琴, 史东梅, 等. 不同土壤管理措施下坡耕地产流产沙和氮磷流失特征[J]. *水土保持学报*, 2016, 30(5): 34-40.
- [23] 陈月娥. 榆林风沙区坡面径流冲刷侵蚀水沙变化规律试验研究[D]. 郑州: 华北水利水电学院, 2012.
- [24] 覃超, 郑粉莉, 刘沛峰, 等. 玉米秸秆汁土壤改良剂对黄绵土抗侵蚀能力的影响[J]. *土壤学报*, 2017, 54(2): 367-378.
- [25] 郝冬宁, 郭成久, 冯洋, 等. 锯末和保水剂对坡面棕壤土含水量的影响研究[J]. *中国农村水利水电*, 2014(9): 12-15, 22.