暴雨下川东黄壤区不同径流路径调控措施对坡面侵蚀特征的影响

李 菲[1,2]，查同刚[1,2]，尹 婧[3]，张恒硕[1,2]，何 欢[1,2]

(1.北京林业大学水土保持学院，北京 100083；2.北京市水土保持工程技术研究中心(北京林业大学)，北京 100083；3.中国水利水电科学研究院 流域水循环模拟与调控国家重点实验室，北京 100038)

摘要：为研究川东区不同径流路径调控措施对黄壤坡面侵蚀特征的影响，设置 3 种坡度(25°，30°，35°)的稀疏型菱形网格(R1)、密集型菱形网格(R2)和对照(R0)的裸坡坡面，基于人工模拟降雨试验，对比分析 3 种降雨强度(60，90，120 mm/h)下坡面的侵蚀过程与特征。结果表明：(1)相同坡度下，2 种处理和对照组坡面在 60，90 mm/h 的雨强下初始产流耗时表现为 R0＜R1＜R2，当雨强增大到 120 mm/h 时，初始产流耗时表现为 R0＜R2＜R1。(2)产流过程中产流量均呈现出先迅速增加后趋于稳定的变化规律，产沙速率随产流时间的增加而减小。(3)在坡度较小(25°)或雨强较小(60 mm/h)时，坡面的平均产流和产沙速率均表现为 R0＞R1＞R2，当坡度增大至 35°和雨强增大至 120 mm/h 时，R1、R2 坡面的产流产沙速率逐渐接近甚至有稍微超过 R0 坡面的趋势。(4)与产流产沙过程相对应，R1、R2 坡面在不同坡度和降雨强度组合中，通常减沙效益大于减流效益，累积产沙量与累积径流量均成幂函数关系。研究结果可为揭示川东黄壤区坡面的侵蚀过程研究提供参考，为该区域的水土流失治理提供科学依据。

关键词：模拟降雨；暴雨；产流产沙；径流路径调控措施

中图分类号：S157.1 **文献标识码**：A **文章编号**：1009-2242(2021)01-0138-07

DOI：10.13870/j.cnki.stbcxb.2021.01.020

Influence of Different Runoff Path Regulation Measures on Slope Erosion Characteristics Under Rainstorm in the Yellow Soil Area of East Sichuan

LI Fei[1,2], ZHA Tonggang[1,2], YIN Jing[3], ZHANG Hengshuo[1,2], HE Huan[1,2]

(1.*School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing* 100083; 2.*Beijing Engineering Technology Research Center of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing* 100083; 3.*State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing* 100038)

Abstract: In order to study the influence of different runoff path regulation measures on the erosion characteristics of yellow soil slope in the east of Sichuan Province, three kinds of bare slope (25°, 30° and 35°, respectively) with sparse diamond grid (R1), dense diamond grid (R2) and contrast (R0) were set up. Based on the simulated rainstorm experiment, the erosion process and characteristics of slope surface under three rainfall intensities (60, 90 and 120 mm/h) were compared and analyzed. The results showed that: (1) On the slopes with the same gradient, under the rainfall intensities of 60 mm/h and 90 mm/h, the initial runoff production time followed the order of R0 < R1 < R2, when the rainfall intensity increased to 120 mm/h, the initial runoff production time was R0 < R2 < R1. (2) The runoff increased rapidly at first and then tended to be stable during the process of runoff production, the sediment yield rate decreased with the increasing of runoff time. (3) When the slope gradient was small (25°) or the rainfall intensity was small (60 mm/h), the average runoff and sediment yield rates followed the order of R0 > R1 > R2. When the slope gradient increased to 35 ° and the rainfall intensity increased to 120 mm/h, the runoff and sediment yield rates of R1 and R2 gradually approached or even slightly exceed that of R0 slope. (4) Corresponding to the process of runoff and sediment yield, under the different slope and rainfall intensity combinations, the benefit of sedi-

收稿日期：2020-08-08

资助项目：国家重点研发计划项目(2017YFC0505602)

第一作者：李菲(1996－)，女，在读硕士研究生，主要从事水土保持生态修复研究。E-mail：lifei_96@126.com

通信作者：查同刚(1972－)，男，博士，副教授，主要从事土壤退化与生态恢复研究。E-mail：zhtg73@bjfu.edu.cn

ment reduction was generally greater than that of runoff reduction on R1 and R2 slope, and the relationship between cumulative sediment yield and cumulative runoff could be expressed in power function. The results could provide reference for revealing the slope erosion process in the yellow soil area of East Sichuan, and provide scientific basis for the control of soil and water loss in this area.

Keywords: simulated rainfall; rainstorm; runoff and sediment production; runoff path regulation measures

川东地区地处长江上游,地质条件复杂,其特殊的地理位置和环流条件使得该区高温和暴雨等极端气候事件高发[1],大强度的极端气候事件易于造成严重的水土流失甚至诱发山洪、泥石流等地质灾害,严重危及川东地区人民的生命安全、社会经济的发展和生态环境的建设[2],如何修复和改善该区域的生态环境,减少水土流失一直受到社会各界的广泛关注[3]。在当前的生态环境建设中,工程整地措施与植被恢复是防治水土流失的有效举措。通过采取多种工程整地措施,改变原始坡面的自然特征,减少流域的水土流失,有效提高植被的存活率及其覆盖度,从而成为治理水土流失的有效途径[4-5]。在以往的研究中,多强调土壤作用,尤其以土壤侵蚀与产沙量作为主要目标,对于如何去控制和消除产生水土流失的动力,从而主动利用坡面降雨径流的研究也相对薄弱。赵西宁等[6]提出通过降雨径流调控,切断坡面降雨径流线,消除产生水土流失的动能,实现有效降雨资源化,同步缓解黄土高原区水土流失与干旱缺水并存的矛盾。基于此,本文从川东黄壤区水土流失问题出发,结合研究区地形和降雨特征,采用人工模拟降雨的试验方法,探讨稀疏型和密集型菱形网格 2 种径流路径调控措施下坡面的土壤侵蚀过程与特征,以期为治理川东黄壤区水土流失和防治泥石流灾害提供科学参考和技术示范。

1　材料与方法

1.1　研究区概况

研究区位于四川省华蓥市(30°23′N,106°46′E),地处四川盆地东部、华蓥山中段西麓。西部是典型的丘陵地貌,多紫色土,是主要的农耕区;东部山区喀斯特地貌突出,石灰岩广布,主要土壤为黄壤[7]。该区属亚热带湿润季风气候区,多年平均气温 17.2 ℃,多年平均降水量 1 087.84 mm[8],暴雨集中在夏秋季,易形成洪涝,甚至造成山体滑坡和泥石流等灾害。地带性植被以中亚热带常绿针叶林为主,其次是竹林和阔叶林,常见树种有马尾松(*Pinus massoniana* Lamb.)、杉木(*Cunninghamia lanceolata*)、侧柏(*Platycladus orientalis*)、湿地松(*Pinus elliottii*)、柳杉(*Cryptomeria fortunei* Hooibrenk ex Otto et Dietr)等。

1.2　试验方法

1.2.1　试验设备　试验于 2019 年 10 月 8—22 日在重庆缙云山国家定位观测研究站的人工模拟降雨试验场进行。设备主要由 BX−1 型侧喷式降雨机和可控坡度、水文条件的土壤实验槽组成,其中变坡钢槽规格为长 2.0 m,宽 0.5 m,深 0.4 m,土槽一侧有向外延伸的“V”形出水口,下部有排水孔。降雨高度 6 m,降雨设备的有效面积为 6.5 m×6.5 m,降雨前在坡面上布置 8 个简易雨量筒率定实际降雨强度,控制设定雨强与实际雨强误差不超过 5%。

1.2.2　试验材料　试验用土于 2019 年 10 月取自四川省华蓥市禄市镇(30°26′27.97″N,106°50′21.56″E)的研究区内,马尾松人工林是该地分布较广的典型林分之一。王燕等[9]研究发现,马尾松人工林土壤容重随林龄增长先增加后减小,林龄对土壤肥力和抗蚀能力也有影响,不同林龄土壤表现的水土保持功能不同。故选取同一林龄、林分密度无明显差异的马尾松林下的黄壤土作为试验土壤,取表层 20 cm 土壤(表 1)。将供试土壤过 4 mm 孔筛网除去砂浆、碎石块、植物根茬等杂质,尽量恢复土层结构。在土槽最下部铺填 5 cm 厚的天然沙,再将混合好的土按每层 10 cm 装入土槽中,边填充、边压实,填装下一层土前抓毛下层土壤表面,以防土层之间出现分层现象;填料结束后,将坡面整平以保证每次试验的边界条件基本一致,控制土壤含水量在 30%和容重在 1.25 g/cm^3(马尾松林样地测量结果的平均值)左右。

表 1　试验土壤基本特征

土层	容重/	最大持水量/	总孔	粒级组成/%					
深度/cm	(g·cm^{-3})	(g·kg^{-1})	隙度/%	>5 mm	5～2 mm	2～1 mm	1～0.5 mm	0.5～0.25 mm	<0.25 mm
0−20	1.25	386.2	37.5	14.71	14.51	12.83	22.82	16.91	18.24

1.2.3　试验设计　基于对研究区的野外调查结果,整体坡度>20°,考虑部分地段 25°以上土地开垦易造成水土流失等因素,故试验设置了易发生泥石流灾害的 3 种坡度(25°,30°,35°);选取该区域降雨数据,并结合短时暴雨计算方法,设置 3 种降雨强度(60,90,120 mm/h),在降雨量相同的情况下,降雨历时分别为 60,40,30 min;考虑微地形改造对土壤侵蚀的影响,受张利超等[10]对降雨侵蚀过程中南方红壤区坡耕地地表汇流网络

特征的启发，在裸坡上布设疏密不同的菱形网格来改变径流路径(图 1)，分别记为 R1(稀疏型菱形网格)、R2(密集型菱形网格)，网格用直径 5 mm 的树枝划出，深度约 3 mm，清理干净多出的土壤并把网格周围压平整，保持土壤原有的紧实度。设置一无措施的空白对照组(R0)，进行交叉试验，共 27 个处理。每个处理重复 2 次，共 54 场降雨。

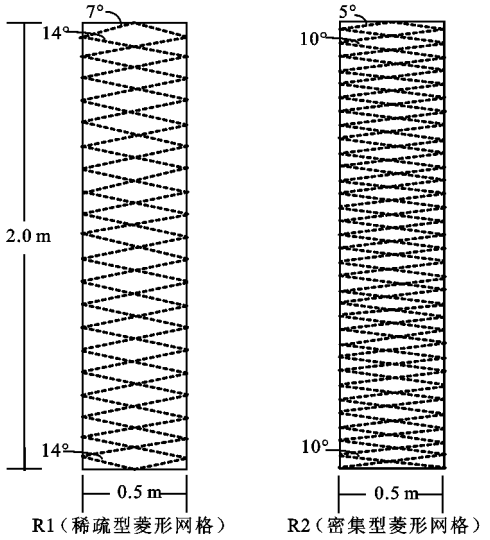


图 1 土壤试验槽中 2 种径流路径调控措施布设平面示意

1.3 样品收集与分析

降雨开始后用秒表计时，记录初始产流时间。在钢槽的出水口放置 30 L 的水桶收集径流泥沙，降雨试验过程中每隔 5 min 采集径流泥沙样品 200 mL。每次模拟降雨的总径流泥沙量为收集的径流泥沙量与动态取样的径流泥沙量之和。降雨试验结束后，将所有采集样品带回实验室，放入 105 ℃的烘箱烘干至恒重，用电子天平(精度 0.001)称重，采用置换法计算各时段产沙量和总产沙量。

1.4 数据处理与分析

所有数据采用 Excel 2019 和 SPSS 25.0 软件进行数据分析，采用单因素方差分析(One-Way ANOVA)和最小显著差异法(LSD)比较不同数据组间的差异性，采用 Origin 软件作图。

R1、R2 的径流路径调控措施可以改变坡面土壤的起伏层次、增大表面积，进而影响降雨入渗，形成的细小网格有效减少径流直接至上而下冲刷土壤表面的动能，提高坡体涵养水源能力，起到减流减沙的效果[3]。减流减沙效益计算公式为：

$$减流效益(\%)=\frac{(W_0-W_i)}{W_0}\times 100\% \quad (1)$$

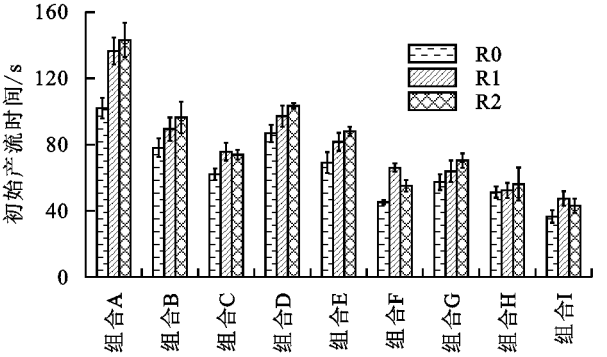
$$减沙效益(\%)=\frac{(S_0-S_i)}{S_0}\times 100\% \quad (2)$$

式中：W_0、W_i 分别为对照组与各径流路径调控措施坡面的产流量(mL)；S_0、S_i 分别为对照组与各径流路径调控措施坡面的产沙量(g)。

2 结果与分析

2.1 初始产流耗时

在降雨初期，表层土壤的孔隙逐渐被雨水填充，所以从降雨开始至径流产生有一个明显的滞后时间，即初始产流时间[11]。从图 2 可以看出，在相同的径流路径调控措施下，随着降雨强度或者坡度的增大，坡面的初始产流时间都会明显缩短。在降雨初期，坡面土壤的含水率较低，土壤孔隙快速吸水，较小的降雨强度条件下，土壤水分达到饱和的时间较长，而大降雨强度使表面土壤快速吸湿、充填饱和，多余降雨迅速形成径流；在降雨强度一定时，当坡度增大，雨水向下的自重分力增大，雨水流速相应增大，雨水来不及下渗导致形成的径流增多，坡面更容易产流，即随着降雨强度、坡度的增加，土壤入渗率降低，坡面产流增加[12]。



注：A 为 25°坡度、60 mm/h 雨强；B 为 25°坡度、90 mm/h 雨强；C 为 25°坡度、120 mm/h 雨强；D 为 30°坡度、60 mm/h 雨强；E 为 30°坡度、90 mm/h 雨强；F 为 30°坡度、120 mm/h 雨强；G 为 35°坡度、60 mm/h 雨强；H 为 35°坡度、90 mm/h 雨强；I 为 35°坡度、120 mm/h 雨强。下同。

图 2 不同坡度、雨强组合下 3 种坡面的初始产流耗时

在坡度一定、降雨强度为 60，90 mm/h(即组合 A、B、D、E、G 和 H)时，坡面在 3 种径流路径调控措施处理下，产流时间均表现为 R0＜R1＜R2，而当降雨强度增大到 120 mm/h(即组合 C、F 和 I)时，产流时间表现为 R0＜R2＜R1，且这种变化幅度随降雨强度的增大而变小，这种变化可能是因为径流路径调控措施一定程度上增加了坡面粗糙度，即增加了坡面径流运动阻力，延缓了局部径流流速，导致产流时间略有延迟；当降雨强度逐渐增大达到 120 mm/h 时，由于雨滴过于密集、溅蚀十分剧烈，雨滴连续打击坡面而使坡面产生凹凸不平且分布不均匀的土坑，所设计的径流路径部分重合，所以 R2 延缓产流时间的效果没有 R1 好。比较 C(25°坡度、120 mm/h 雨强)、E(30°坡度、90 mm/h 雨强)和 G(35°坡度、60 mm/h 雨强)3 组的产流时间，可以发现并非绝对的是坡度越大或者降雨强度越大，初始产流耗时越小；综合坡度与降雨强度的影响，初始产流时间 E 组＞C 组＞G 组，但

组间并无显著差异($p>0.05$),反而是组内因为受径流路径调控措施的影响差异性显著($p<0.05$)。上述结果表明,降雨强度、坡度与径流路径调控对初始产流耗时均有重要影响,然而随着雨强增大,坡度与径流路径调控措施对初始产流耗时的影响程度降低。

2.2　不同径流路径调控措施对坡面产流的影响

地表径流产流机制主要分为超渗产流和蓄满产流 2 种类型,但这 2 种类型并不是截然分开的。一场降雨中,当降雨强度超过入渗强度时,会形成超渗产流,而当入渗量不断累积至田间持水量时,又会转化成蓄满产流[11]。图 3 为不同坡度和降雨强度组合下,对照组(R0)和 2 种径流路径调控措施(R1、R2)坡面产流量随产流历时的变化过程。由图 3 可知,在暴雨条件下,不同组合下的产流量随产流历时的增加呈现出 2 个不同阶段:先是产流初期的 0～10(或 15) min,产流量呈现出迅速增加的趋势,随后产流波动变化逐渐达到一个相对稳定的状态。分析上述变化趋势产生原因可能是:试验为暴雨条件下进行的模拟降雨,坡面土壤初始含水率较高,其表层部分逐渐被雨水填充,土壤入渗速率递减,当降雨量大于土壤的入渗量时,坡面开始出现超渗产流,产流增加量较大;试验时堵塞土槽下部出水口以排除壤中流对产流的影响,所以随着降雨的持续进行,坡面表层的含水量逐渐达到饱和,贮存在上层内的降水由于受到重力作用开始由坡面表层向深层迁移,逐渐使深层土壤的含水量增大,进而坡面产流速率在一定范围内出现波动[13],直至雨水充满土壤孔隙时,产流量趋于定值,出现“上凸”型产流过程。

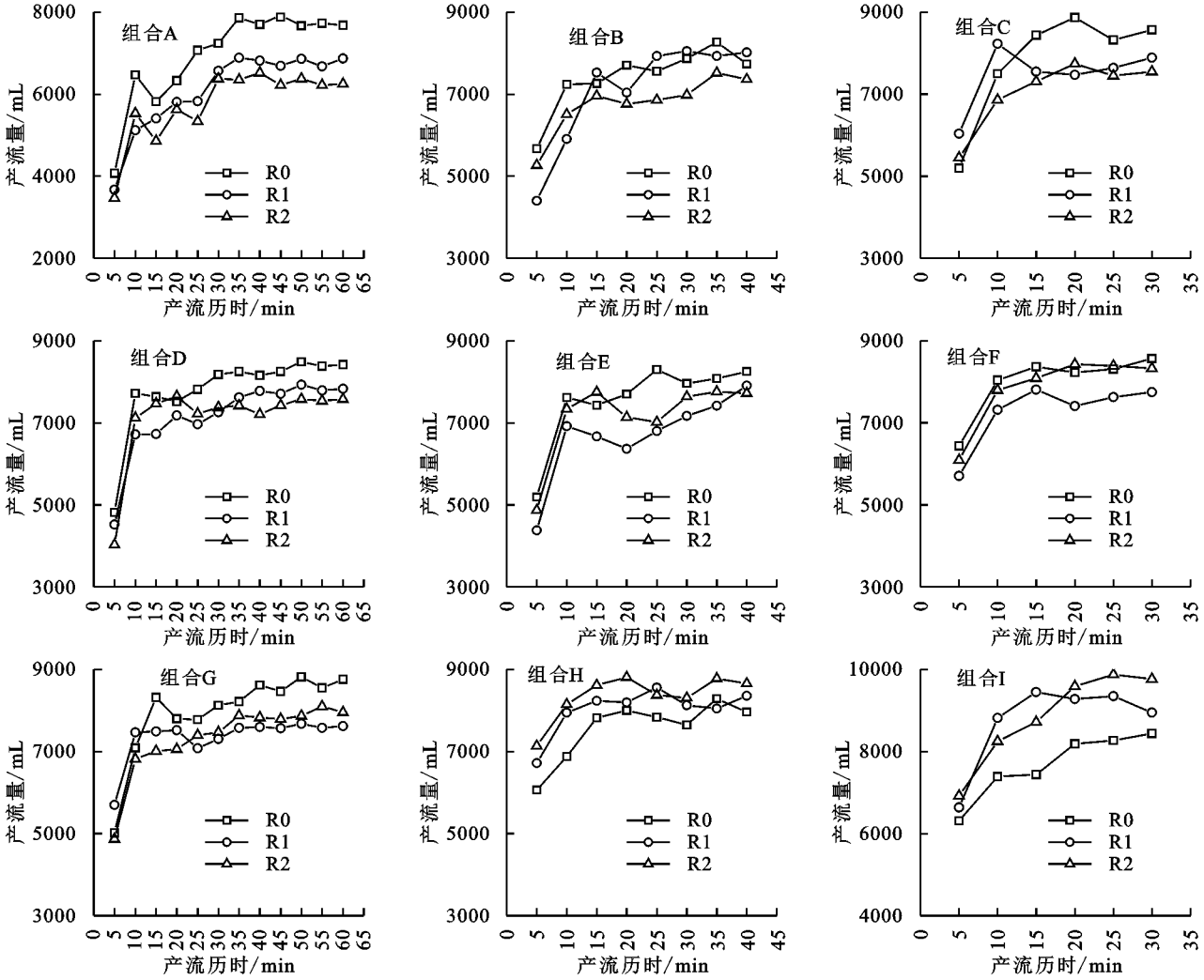


图 3　不同径流路径调控措施下坡面产流量随产流历时变化特征

在组合 A 中 R0、R1、R2 坡面的平均产流速率分别为 1 392.67,1 220.33,1 152.50 mL/min,与无措施的 R0 相比减小幅度依次为 12.37%和 17.25%,这表明实行了坡面径流调控措施后,地表粗糙度增大,径流沿着所设计的路径流出,细小的网格延长了径流路径,有利于降水的充分入渗,一定程度上减小了产流量;同样的,在组合 B、C、D、G 中 R0、R1、R2 坡面的平均产流速率也表现为 R0>R1>R2。当降雨强度固定为 60 mm/h(组合 A、D、G)时,随着坡度的增加坡面的平均产流速率增大,同时平均产流速率随调控措施的加强而减小的变化趋势也逐渐变小,在图 3 中就表现为 3 条曲线越来越接近,通过方差分析知道组合 A 中 3 种坡面的产

流速率差异达到显著水平($p<0.05$),而组合 D 与 G 中这种差异性逐渐降低。这表明随着坡度的增大,径流路径调控措施对产流过程的影响程度逐渐降低。这种影响降低的情况也存在降雨强度增大的过程中,当坡度固定为 25°时,比较组合 A、B 与 C 发现,坡面的产流速率差异也逐渐不再明显。值得注意的是,在组合 E 与 F 中坡面的平均产流速率表现为 R0>R2>R1,组合 H 与 I 中坡面的平均产流速率则表现为 R2>R1>R0。这种转变可能在于坡度相对较小时,受人为调控措施的干预,有效地增加土壤入渗量,使其径流冲刷能力弱,此时降雨强度是影响产流过程的主要因子,其对产流过程的类型、产流时间、产流量的增长速度以及累积产流量均有较大贡献[11]。当坡度逐渐增大时,受重力沿较陡坡面水平分力的影响,地表径流流速增加,径流对坡面的冲刷能力增强,产流量增加;在较大雨强下雨滴连续打击坡面,使填充在土壤孔隙中的土粒被冲开破坏了原本的径流路径,产生多条分布不均的细沟,部分细沟距离较近进一步形成了浅沟,使得坡面产流量增加。

2.3 不同径流路径调控措施对坡面产沙的影响

由图 4 可知,在组合 A(25°坡度、60 mm/h 雨强)中,坡面的平均产沙速率整体上随着降雨历时的增加而逐渐减小,在实行了调控措施 R2 后的平均产沙速率为 37.81 g/min,R0、R1、R2 坡面的平均产沙速率之比为 1.35∶1.15∶1.06,表现出了调控措施的减沙效果;在组合 G(35°坡度、60 mm/h 雨强)中,产沙速率的变化更为复杂,随产流历时常表现出多峰谷的现象,R0、R1、R2 坡面的平均产沙速率分别为 39.44,32.61,20.54 g/min,较 R0 坡面平均产沙速率分别减少了 17.3%和 47.9%,减沙效果显著;这种减沙效果也体现在组合 B、D、E 中。随着降雨强度和坡度的增大,在组合 H((35°坡度、90 mm/h 雨强))中,5~15 min 里产沙速率快速减小,且 3 种坡面的产沙速率在降雨后期已经较为接近,降雨产生的侵蚀现象并未得到有效改善;在组合 C、F、I 中,3 种组合的降雨强度都达到了 120 mm/h,R1 和 R2 坡面的产沙速率隐隐有超过 R0 坡面产沙速率的趋势,说明大雨强下径流路径调控措施的坡面减沙能力较弱。

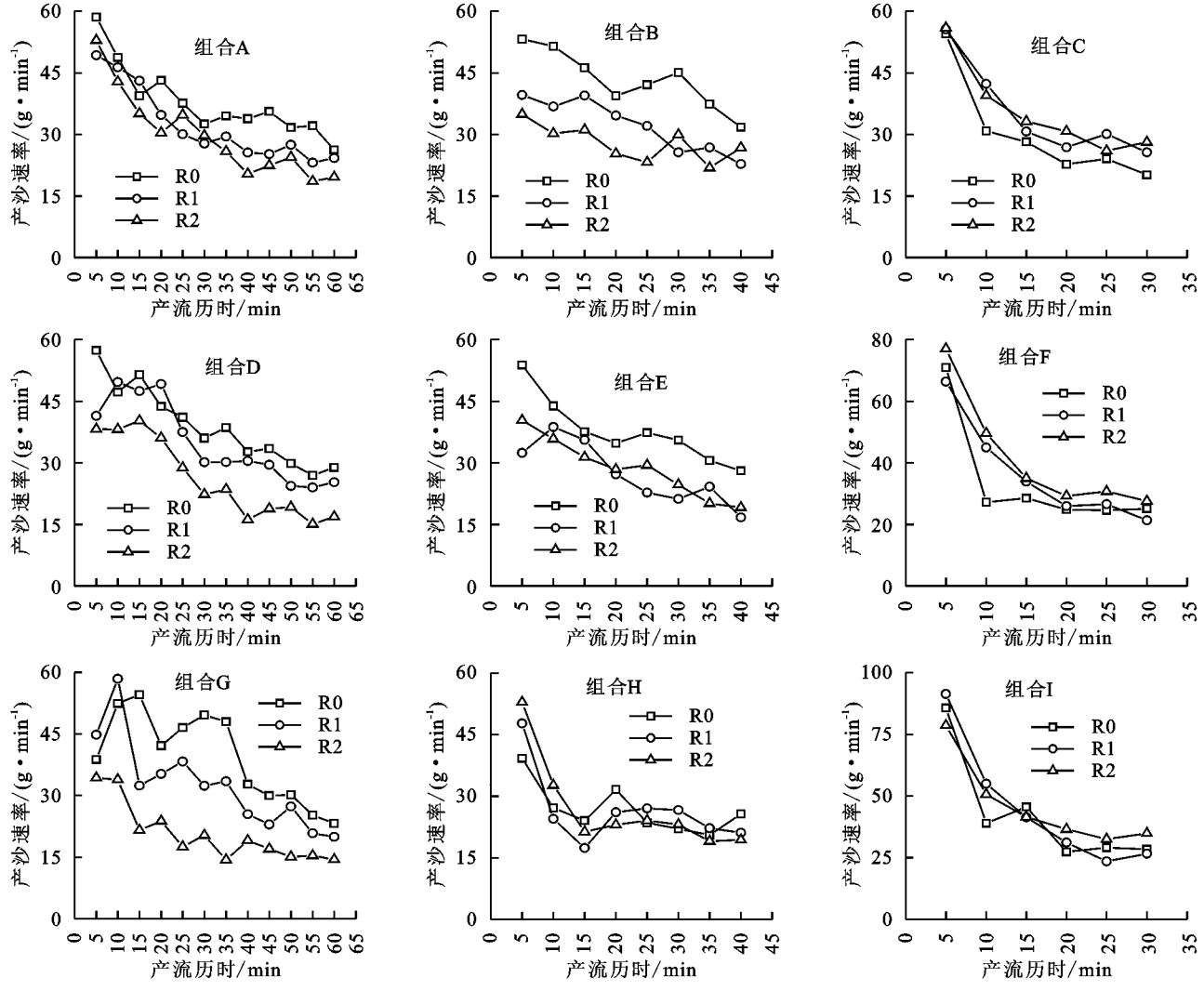


图 4 不同径流路径调控措施下坡面产沙速率随产流历时变化特征

总体上,3 种径流路径调控措施下产沙速率大小表现为 R0>R1>R2,产沙速率随产流时间的增加而减小,在暴雨条件下,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,带走坡面表层土粒和溶解的物质,而径流路径调控措施有效造成地表微地形起伏,形成多股细状水流[3],导致侵蚀的差异性,故产沙速率随产流时间出现多峰多谷的现象。径流路径调控措施虽然一定程度上能延迟径流的产生,增加降雨入渗,减少产流量,但当坡度较陡、降雨强度增大时,径流的动能增大,径流较深,其携沙能力与携沙量不能有效减小,也会使得这种减沙效益降低。

2.4　不同径流路径调控措施的减流减沙效益

以 R0 坡面作为对照组,根据公式(1)和公式(2),计算 R1、R2 坡面的减流减沙效益(表 2)。由表 2 可知,总体上,R1、R2 坡面在不同坡度和降雨强度组合中,减沙效益大于减流效益,且这种效益表现为 R2>R1;但当坡度逐渐增加到 35°或者降雨强度逐渐增大到 120 mm/h 时,有时减流效益与减沙效益会出现负增长,这是因为在大雨强下降雨很快转化为径流,在较陡坡面的重力作用下,坡面径流的流速增大动能增加,产流过程中裹挟坡面表层土粒和溶解的物质可能破坏了原有的径流路径,部分细沟距离较近反而进一步形成了浅沟,产流量增大,其携沙能力与携沙量增加,即表现为减流减沙效益与对照组坡面相比无明显有效改善。此时我们需要考虑其他措施来增加地表覆盖度,比如改变严重侵蚀地区的林分结构以提高其自我修复能力,进而提高黄壤侵蚀区土壤涵养水源能力,减轻水土流失,减少地质灾害。

表 2　不同径流路径调控措施减流减沙效益对比

降雨强度/(mm·h^{-1})	坡度/(°)	减流效益/%		减沙效益/%	
		R1	R2	R1	R2
60	25	12.37	17.25	14.89	21.34
	30	8.13	8.56	10.29	33.80
	35	7.72	7.87	17.30	47.92
90	25	2.20	4.13	25.65	35.56
	30	10.35	3.99	27.44	23.97
	35	−4.88	−5.79	0.54	−0.77
120	25	3.62	8.71	−4.07	−5.37
	30	11.42	1.96	−3.93	−8.86
	35	−5.01	−7.40	−5.48	−7.77

为进一步分析 2 种调控措施下产流与产沙的关系,将累积产沙量与累积径流量进行函数拟合,从表 3 可以看到,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 为累积产沙量(kg);X 为累积径流量(L)。所有拟合方程的相关系数均大于 0.98,表明产沙量与径流量有很好的相关性。结合汤珊珊等[14]研究以及坡面径流产沙的实际物理意义,系数 a 通常被定义为产沙基数系数,与雨强、坡度和径流路径调控措施有关。在相同雨强下,当坡度为 25°或 30°时,a(R1)<a(R2),当坡度增至 35°时,a(R1)>a(R2);在相同径流路径调控措施下,当雨强为 60,90 mm/h 时,a 值随坡度增大而减小,当雨强为 120 mm/h 时,a 值随坡度增大而增大。定义系数 b 为产沙速率系数,与入渗有关,入渗率越小则 b 值越小,产沙量越大。

表 3　R1、R2 坡面累积产沙量与累积径流量拟合模型

调控措施	降雨强度/(mm·h^{-1})	坡度/(°)	拟合方程	R^2
R1	60	25	$Y=0.1098X^{0.6734}$	0.9967
		30	$Y=0.0700X^{0.7784}$	0.9933
		35	$Y=0.0637X^{0.7764}$	0.9945
	90	25	$Y=0.0681X^{0.7369}$	0.9987
		30	$Y=0.0618X^{0.7676}$	0.9953
		35	$Y=0.0597X^{0.6805}$	0.9815
	120	25	$Y=0.0836X^{0.6644}$	0.9996
		30	$Y=0.1191X^{0.5937}$	0.9994
		35	$Y=0.1741X^{0.5183}$	0.9984
R2	60	25	$Y=0.1198X^{0.6427}$	0.9988
		30	$Y=0.0758X^{0.6885}$	0.9957
		35	$Y=0.0628X^{0.6681}$	0.9981
	90	25	$Y=0.0742X^{0.635}$	0.9952
		30	$Y=0.0643X^{0.716}$	0.9991
		35	$Y=0.0467X^{0.7921}$	0.9997
	120	25	$Y=0.0931X^{0.6493}$	0.9999
		30	$Y=0.1391X^{0.5685}$	0.9991
		35	$Y=0.1222X^{0.609}$	0.9996

3　讨　论

由结果分析可知,降雨强度越大土壤趋于稳定入渗速率的时间越短,达到相对稳定产流所需的时间变短,初始产流耗时在 60 mm/h 和 90 mm/h 的雨强下表现为 R0<R1<R2,而当雨强增大到 120 mm/h 时表现为 R0<R2<R1。在坡度较小(25°)或雨强较小(60 mm/h)时,坡面径流路径调控措施对坡面产流产沙速率的影响较大,产流与产沙表现出一定的同步性,平均产流速率和产沙速率都表现为 R0>R1>R2;但当坡度增至 35°和雨强增至 120 mm/h 时,径流路径调控措施的效果减弱,R1、R2 坡面的产流产沙速率逐渐接近甚至超过 R0 坡面,降雨产生的土壤侵蚀现象并未得到有效改善。由此可知,调控径流路径可以作为改变地表粗糙度的一种措施,而坡度对坡面水沙的影响在一定程度上与其地表糙度存在一定关系[15],因此在考虑暴雨条件下不同径流路径调控措施对坡面径流产沙作用的过程时,可以考虑把地表糙度与坡度相结合,视为触发径流的边界条件,重点探讨雨强在这个过程中的影响和作用。

4　结　论

(1)与无措施的裸坡坡面(R0)相比,实行了径流路径调控措施的稀疏型菱形网格坡面(R1)、密集型菱形网格坡面(R2)的初始产流耗时明显增长,60,90 mm/h 的

降雨强度下初始产流耗时表现为 R0<R1<R2,而当降雨强度增大到 120 mm/h 时,产流时间表现为 R0<R2<R1,且这种变化幅度随降雨强度的增大而变小。

(2)2 种处理和对照组坡面产流过程都呈现出先迅速增加后趋于稳定的变化规律。在坡度较小(25°)或雨强较小(60 mm/h)时,坡面的平均产流速率表现为 R0>R1>R2;但当坡度增至 35°和雨强增至 120 mm/h 时,R1、R2 坡面的产流速率逐渐接近甚至超过 R0 坡面。

(3)2 种处理和对照组坡面的产沙速率随产流时间的增加而减小,平均产沙速率大小表现为 R0>R1>R2;当降雨强度达到 120 mm/h 时,径流路径调控措施的效果减弱,降雨产生的土壤侵蚀现象并未得到有效改善。

(4)与产流产沙过程对应,R1、R2 坡面在不同坡度和降雨强度组合中,通常减沙效益大于减流效益,且这种效益表现为 R2>R1,这种效益随雨强的增大而减小;累积产沙量与累积径流量成幂函数关系。

参考文献:

[1] 杜华明,董廷旭.川东盆地高温、暴雨特征及对气候变化的响应[J].水土保持研究,2016,23(5):147-151.

[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] 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.

[4] 卫伟,余韵,贾福岩,等.微地形改造的生态环境效应研究进展[J].生态学报,2013,33(20):6462-6469.

[5] 秦伟,曹文洪,郭乾坤,等.植被格局对侵蚀产沙影响的研究评述[J].生态学报,2017,37(14):4905-4912.

[6] 赵西宁,吴普特,冯浩,等.降雨径流调控利用与流域保水减沙效应研究[J].自然灾害学报,2014,23(4):46-53.

[7] 王明超,王珊,刘颖,等.四川华蓥市旅游生态环境问题与可持续发展探讨[J].时代经贸,2012(16):163-164.

[8] 李彩霞.华蓥市矿山地质环境评价及防治措施研究[D].北京:中国地质大学,2012.

[9] 王燕,宫渊波,尹艳杰,等.不同林龄马尾松人工林土壤水土保持功能[J].水土保持学报,2013,27(5):23-27,31.

[10] 张利超,刘窑军,李朝霞,等.降雨侵蚀过程中红壤坡耕地地表汇流网络特征[J].水土保持研究,2019,26(1):53-60.

[11] 车明轩,宫渊波,穆罕默德·纳伊姆·汉,等.人工模拟降雨条件下不同雨强、坡度对紫色土坡面产流的影响[J].水土保持通报,2016,36(4):164-168.

[12] 孙狂飙,袁超,周峙,等.人工模拟降雨条件下坡面侵蚀特性的模型试验研究[J].安全与环境工程,2019,26(3):62-69.

[13] 汤珊珊.覆沙坡面水蚀产沙动力过程与微地貌变化的响应研究[D].西安:西安理工大学,2018.

[14] 汤珊珊,李占斌,李聪,等.模拟降雨条件下覆沙坡面产流产沙过程研究[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2016,44(5):139-146.

[15] 王添,任宗萍,李鹏,等.模拟降雨条件下坡度与地表糙度对径流产沙的影响[J].水土保持学报,2016,30(6):1-6.

(上接第 137 页)

[21] 李新荣,张志山,黄磊,等.我国沙区人工植被系统生态—水文过程和互馈机理研究评述[J].科学通报,2013,58(5):397-410.

[22] Greene R, Chartres C J, Hodgkinson K C. The effects of fire on the soil in a degraded semi-arid woodland. I. Cryptogam cover and physical and micromorphological properties [J].Soil Research,1990,28(5):755-777.

[23] Zhao Y G, Xu M X. Runoff and soil loss from revegetated grasslands in the hilly Loess Plateau region, China: Influence of biocrust patches and plant canopies [J].Journal of Hydrologic Engineering,2013,18(4):387-393.

[24] 刘俊娥,王占礼,袁殷,等.黄土坡面薄层流产流过程试验研究[J].干旱地区农业研究,2010,28(5):223-227.

[25] 杨凯,赵军,赵允格,等.生物结皮坡面不同降雨历时的产流特征[J].农业工程学报,2019,35(23):135-141.

[26] 孙福海,肖波,姚小萌,等.黄土高原生物结皮斥水性及其沿降水梯度的变化特征[J].农业机械学报,2020,51(7):1-13.

[27] 陈丽萍,陈青,赵辉,等.贺兰山东麓生物土壤结皮早期发育过程中微生物群落演替研究[J].生态学报,2020,40(9):3105-3114.

[28] Loope W L, Gifford G F. Influence of a soil microfloral crust on select properties of soils under pinyon-juniper in southeastern Utah [J]. Journal of Soil and Water Conservation,1972,27(4):164-167.

[29] 王浩,张光辉,刘法,等.黄土丘陵区生物结皮对土壤入渗的影响[J].水土保持学报,2015,29(5):117-123.

[30] 陈瑶,张科利,罗利芳,等.黄土坡耕地弃耕后土壤入渗变化规律及影响因素[J].泥沙研究,2005(5):44-50.

[31] 许明祥,刘国彬,温仲明,等.黄土丘陵区小流域土壤特性时空动态变化研究[J].水土保持通报,2000,20(1):20-23.

[32] 范彩霞,王少丽,路明,等.SCS 模型在大红门流域径流量计算中的应用[J].人民珠江,2019,40(11):16-20.

[33] 高丽倩,赵允格,秦宁强,等.黄土丘陵区生物结皮对土壤可蚀性的影响[J].应用生态学报,2013,24(1):105-112.

[34] 张鑫,张青峰,周阳阳,等.不同坡度黄土微地形条件下 SCS—CN 模型参数研究[J].水土保持研究,2019,26(2):74-77.

[35] 王英,黄明斌.径流曲线法在黄土区小流域地表径流预测中的初步应用[J].中国水土保持科学,2008,6(6):87-91.