

地面覆盖条件下雨强和坡度对红黏土坡面侵蚀过程的影响

常松涛^{1,2}, 查轩^{1,2}, 黄少燕^{1,2}, 姚冲^{1,2}, 张婧^{1,2}, 王玉婷^{1,2}, 孙丽丽^{1,2}

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

摘要:为揭示地面覆盖条件下第四纪红黏土坡面在不同雨强和坡度时的侵蚀变化规律,选取3个降雨强度(1.0,1.5,2.0 mm/min)和3个坡度(10°,15°,20°),通过人工模拟降雨试验,分析坡面产流、产沙、入渗特征,并以15°为例计算覆盖坡面的减流减沙效益。结果表明:(1)坡面产流时间随雨强和坡度增加而提前,覆盖对产流时间有明显的滞后作用,雨强的增加会削弱覆盖延缓产流的作用;坡面径流率呈现前期增长,后期趋于稳定的变化特征;(2)当坡度一定,雨强从1.0 mm/min增加至2.0 mm/min,累积侵蚀量增加1.89~2.96倍;雨强一定,坡度从10°增加至20°,累积侵蚀量增加1.91~3.45倍;(3)坡面初始入渗率和入渗总量随坡度的增加而减小,而雨强的增大会增加坡面初始入渗率,减少入渗总量;(4)15°条件下覆盖坡面的径流量和泥沙量较裸坡平均减少50.26%和95.31%,松针覆盖的水土保持效益显著,且减沙效应大于减流效应;(5)坡度对覆盖坡面累积产流量和累积产沙量的影响程度大于雨强,不同雨强、坡度下累积径流量与累积产沙量呈现幂函数关系($R^2 > 0.97$)。研究结果可为南方红壤丘陵区林下水土流失治理与生态恢复提供参考。

关键词:坡度;地面覆盖;坡面侵蚀;红黏土

中图分类号:S157.1

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2019)06-0079-07

DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2019.06.011

Influence of Rainfall Intensity and Slope on Red Clay Slope Erosion Under Mulching Conditions

CHANG Songtao^{1,2}, ZHA Xuan^{1,2}, HUANG Shaoyan^{1,2},

YAO Chong^{1,2}, ZHANG Jing^{1,2}, WANG Yuting^{1,2}, SUN Lili^{1,2}

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

2.Key Laboratory of Humid Sub-tropical Process, Ministry of Education, Fujian Normal University, Fuzhou 350007)

Abstract: In order to reveal the erosion variation law of the Quaternary red clay slope under different rainfall intensities and slope gradients in mulching conditions, three representative rainfall intensities (1.0, 1.5, 2.0 mm/min) and three typical slope gradients (10°, 15°, 20°) in red soil hilly area southern China were selected. The characteristics of runoff, sediment yield and infiltration were analyzed by artificial simulation rainfall experiment. Moreover, taking 15° as an example to calculate the effect of reducing the flow and sediment on the slope. The results showed that: (1) The time producing runoff was advanced with the increase of rainfall intensities and slope gradients. The mulching had obvious hysteresis effect on the runoff yield time. However, the increase of rainfall intensities would weaken the effect of mulching on delaying runoff production. The runoff rate increased in the early stage and become stable in the later stage. (2) At the same slope gradient, the rainfall intensities increased from 1.0 mm/min to 2.0 mm/min, and the total amount of sediment yield increased by 1.89~2.96 times. When the rainfall intensity was constant, and the slope gradients increased from 10° to 20°, the total amount of sediment yield increased by 1.91~3.45 times. (3) The initial infiltration rate and the cumulative infiltration of soil decreased with the increase of slope gradients. While the increase of rainfall intensities increased the initial infiltration rates of mulched slope and reduce the cumulative infiltration. (4) Under the condition of 15°, the runoff and sediment volumes of the mulched slope decreased

收稿日期:2019-04-22

资助项目:国家重点研发计划项目(2017YFC0505400);国家科技支撑计划项目(2014BAD15B02);福建师范大学地理科学学院研究生科研创新基金项目

第一作者:常松涛(1994—),男,硕士研究生,主要从事侵蚀过程与生态调控研究。E-mail:stchang0371@foxmail.com

通信作者:查轩(1961—),男,研究员,博士生导师,主要从事水土保持与生态恢复研究。E-mail:xzha@fjnu.edu.cn

by 50.26% and 95.31% respectively, and the soil and water conservation effect of pine needle mulching was significant. In addition, the sand reduction effect was greater than the flow reduction effect. (5) The influence of slope gradients on the cumulative runoff and sediment yield of mulched slope was greater than that of rainfall intensities. There was a power function relationship ($R^2 > 0.97$) between the cumulative runoff and sediment yield under different rainfall intensities and slope gradients. These results could provide reference for soil erosion control and ecological restoration in the red soil hilly region of southern China.

Keywords: slope gradient; surface mulching; slope erosion; quaternary red clay

水土流失是全球性生态环境灾害,往往受到气候、地形、土壤、植被和人类活动等因素的叠加影响^[1-2]。我国南方红壤丘陵区地处亚热带季风气候带,低山丘陵交错,红壤可蚀性高,人类活动频繁,是我国水土流失范围最广、严重程度仅次于黄土高原的地区^[3]。

作为水土流失的基本单元,坡面主要受降雨和坡度等因素的影响^[4]。降雨是坡面产流产沙最主要的驱动因子,其强度显著影响坡面产流量和产沙量^[5];坡度对坡面侵蚀过程的发展也起着重要作用,其大小在一定程度上决定着径流侵蚀与运移能力^[6]。开展坡面产流产沙对雨强和坡度的响应研究,对掌握坡面侵蚀规律、防治土壤侵蚀具有重要意义。李桂芳等^[7]模拟降雨试验研究表明,雨强从 50 mm/h 增加到 100 mm/h,黑土坡面侵蚀量增加 4.2 倍;坡度从 5°增加至 10°,黑土坡面侵蚀量增加 0.4 倍;许海超等^[8]通过分析燕山土石山区野外定位观测资料,发现土壤侵蚀模数与坡度构成指数函数关系 ($R^2 > 0.66$),并存在临界坡度 20.42°,超过后土壤侵蚀模数大幅上升;王栋栋等^[9]的研究结果发现,黄土坡面径流含沙量随雨强、坡度的增加而上升,同时分别符合幂函数模型 ($R^2 > 0.5$) 和指数函数模型 ($R^2 > 0.8$);王玉宽等^[10]研究表明,紫色土降雨侵蚀率与降雨强度呈线性相关关系,与坡度符合二次抛物线关系;车明轩等^[11]通过室内人工降雨试验,发现坡度对紫色土坡面侵蚀的贡献率在覆盖条件下随雨强的增加而减小;王丽园等^[12]研究表明,坡度对红壤坡面径流量的贡献率在 60% 以上,对坡面产沙量贡献率保持在 30% 左右。

以往雨强和坡度对坡面侵蚀过程影响研究^[13-14]往往针对裸坡进行,松针作为南方红壤丘陵区马尾松 (*Pinus massoniana*) 林地常见的地被物,可以显著改变地表粗糙度,增强土壤抗蚀性,减少坡面径流量和泥沙流失量^[15-16]。同时覆盖下的坡面侵蚀过程对坡度和雨强的响应可能不同于裸坡,对覆盖下的红黏土坡面侵蚀过程研究有待开展。基于此,本研究以马尾松松针覆盖下的第四纪红黏土为研究对象,借助人工模拟降雨试验,分析其不同雨强和坡度下的产流产沙过程及入渗特征,揭示侵蚀过程机理,并分析 15°

覆盖坡面的减流减沙效益,旨在进一步揭示雨强和坡度对覆盖条件下的红黏土坡面侵蚀过程的影响规律,以为南方红壤丘陵区林下水土流失防治提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

模拟降雨设备使用 BX-1 型侧喷式野外降雨器,降雨强度变化范围 20~200 mm/h,降雨高度 6 m,降雨均匀度系数超过 80%,满足试验要求。供试土壤为福建省三明市清流县灵地镇 (25°55'N, 116°50'E) 的第四纪红黏土,其土壤 2~0.05, 0.05~0.002, <0.002 mm 颗粒含量分别为 10.29%, 42.35%, 47.36%。全氮含量 0.19 g/kg, 全磷含量 0.25 g/kg, 全钾含量 24.67 g/kg。将野外采集的土壤自然风干后,过 10 mm 筛,去除石砾、枯落物等杂质,混合均匀后以备使用。试验采用自行设计的可移动钢槽作为径流小区,长 1.50 m,宽 0.50 m,深 0.35 m,钢槽下部有向外凸出的“V”形出水口。钢槽底部分布 3 排排水孔,每排均匀钻取 3 个直径 1 cm 的排水孔,以确保试验过程中排水良好。试验前先在钢槽底部装填 5 cm 细沙,采用分层填土法,将试验土壤红黏土均匀铺层,每层 5 cm 厚,边填土边压实,注意保持坡面容重与野外条件下一致。每层铺好后,用木板将坡面刮平打毛,防止土层间发生移动。

1.2 试验方法

根据研究区降雨观测数据和坡地地形调查资料,结合已有研究^[17],试验设计雨强 1.0, 1.5, 2.0 mm/min,坡度 10°, 15°, 20°。松针覆盖量参照天然马尾松林地松针蓄积量,设计覆盖量 325 g/m²,小区面积 0.75 m²,小区实际覆盖松针 244 g。在 15°条件下设置裸坡对照,以评估松针覆盖的水土保持效益。模拟降雨试验于 2018 年 8 月 16 日至 9 月 24 日进行。每场试验降雨量 50 mm,重复 2 次,分析计算试验数据的平均值。试验前 1 天用 0.5 mm/min 雨强进行预降雨,至产流状态后停止并覆盖薄膜,静置 24 h,以使降雨试验时各土槽内的土壤含水率基本保持一致。正式降雨前用全覆盖法将野外收集的松针均匀铺撒

在坡面。开始降雨时计时,记录各坡面产流时间,产流后每隔 3 min 收集 1 次产流样品。降雨结束后测定径流量和泥沙量。

1.3 数据分析与处理方法

坡面土壤入渗率公式^[18]为:

$$f(t)=R\cos\alpha-\frac{10V}{tS}\tag{1}$$

式中: $f(t)$ 为坡面平均入渗率(mm/min); R 为雨强(mm/min); α 为地表坡度(°); V 为 t 时段内收集的径流量(mL); t 为取样间隔时间(min); S 为坡面受雨面积(cm²)。以产流前 3 min 的平均入渗率作为坡面土壤初始入渗率^[19]。根据水量平衡原理计算坡面土壤累积入渗量^[20]。根据《水土保持综合治理效益计算方法(GB/T 15774—2008)》^[21]计算 15°条件下松针覆盖的减流效益和减沙效益:

$$\eta_w=\frac{W_0-W_f}{W_0}\times100\%\tag{2}$$
$$\eta_s=\frac{S_0-S_f}{S_0}\times100\%\tag{3}$$

式中: η_w 、 η_s 分别为减流效益和减沙效益(%); W_0 、 W_f 分别为裸地坡面和覆盖坡面的径流量(mL); S_0 、 S_f 分别为裸地坡面和覆盖坡面的产沙量(g)。

2 结果与分析

2.1 坡面产流产沙特征

2.1.1 初始产流时间 由表 1 可知,坡面的初始产流时间随雨强、坡度的增加而减小。其中,1.5 mm/min 雨强下坡面产流时间比 1.0 mm/min 平均提前了 1.19 min,2.0 mm/min 雨强下坡面初始产流时间比 1.5 mm/min 平均提前了 1.90 min,表明雨强越大,坡面从降雨到产流所需要的时间越短。同时坡度的增加,也会缩短初始产流时间,15°坡面初始产流时间比 10°平均缩短了 1.98 min,20°坡面初始产流时间比 15°平均缩短了 1.66 min。

表 1 不同坡度、雨强下坡面初始产流时间		单位:min		
坡度/ (°)	覆盖 方式	1.0 mm/min	1.5 mm/min	2.0 mm/min
10	覆盖	9.28	8.07	6.98
	裸露	7.89	6.50	4.01
15	覆盖	5.36	4.24	1.36
	裸露	5.83	4.85	2.74

与 15°裸坡相比,松针覆盖下的 15°坡面在 1.0, 1.5,2.0 mm/min 初始产流时间分别延缓了 2.53, 2.26,1.65 min。表明松针对初始产流时间有显著的滞后作用,且雨强越小,覆盖延缓坡面产流的作用越明显。

这是因为松针可以增大地表粗糙度,机械阻挡并分散水流,减缓径流流速^[22],促进下渗^[23],增加径流流出时间,雨强的增加则会削弱松针延缓产流作用。

2.1.2 产流特征 覆盖条件下,坡面径流是坡面侵蚀的主要动力^[24],因此研究坡面径流变化规律,对于了解坡面侵蚀过程至关重要。从图 1 可以看出,坡面径流率是一个动态变化过程,总体表现为前期增长,后期趋于稳定的趋势。在坡面产流初期阶段,降水不断被松针吸收并渗入土壤,随着降雨持续,表层土壤含水量逐渐增加,土壤入渗逐渐减少,径流率不断上升。当松针和表层土壤含水量逐渐达到饱和状态,降水主要转化为坡面径流,径流率呈现稳定状态。这也说明了产流特征与降雨和下垫面关系密切^[25]。

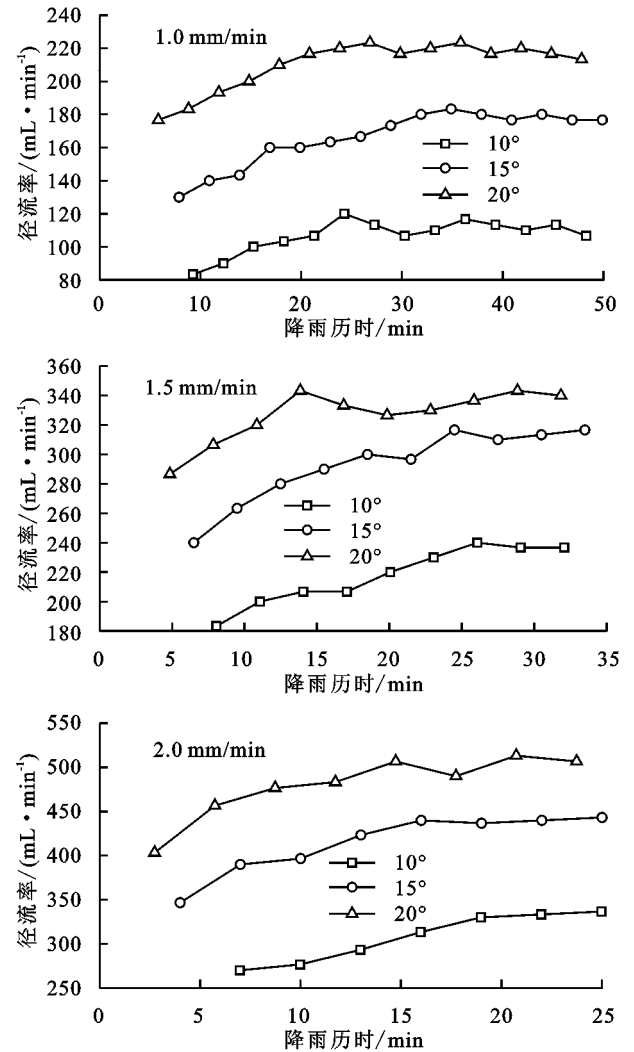


图 1 坡面径流率随降雨历时变化特征

径流率在相同雨强条件下,随坡度增加而呈上升趋势。其中,15°坡面径流率较 10°在 1.0,1.5,2.0 mm/min 平均增长了 55.63%,34.39%,33.02%,20°坡面径流率较 10°在 1.0,1.5,2.0 mm/min 平均增长了 96.87%,50.00%,48.94%。当雨强、覆盖量处于一致条件下,坡度增加,坡面径流沿重力方向移动的

分力增大,汇水速度加快,径流率较高,而不同坡度的流速影响着松针吸水和土壤下渗速率,使不同坡度增幅存在差异。

同一坡度条件下,径流率随雨强增加而上升,且增幅随雨强增大而减小。其中,10°坡面径流率在 2.0,1.5 mm/min 较 1.0 mm/min 平均增加 2.88,2.04倍;15°坡面径流率在 2.0,1.5 mm/min 较 1.0 mm/min 平均增加 2.50,1.76 倍;20°坡面径流率在 2.0,1.5 mm/min 较 1.0 mm/min 平均增加 2.28,1.56倍。这是因为径流大小与坡面受雨量的多少密切相关,雨强变大,使得雨滴增大,动能增强,下落速度加快,单位时间内坡面承雨量增加,松针和土壤吸水速度加快,使得径流率上升。

2.1.3 产沙特征 土壤侵蚀率为单位时间单位面积上被径流剥离输移的泥沙量,是建立土壤侵蚀模型需要考虑的重要因子^[26]。图 2 为坡面侵蚀率在不同雨强和坡度随降雨历时的变化特征。随着雨强和坡度的增加,坡面的土壤侵蚀率到达峰值的时间不断缩短,侵蚀率峰值和稳定后的侵蚀率也随雨强和坡度的增加而增大,但侵蚀率总体处于低值水平。其中,雨强 1.0 mm/min 条件下,10°坡面的侵蚀率在降雨后的第 24 min 达到峰值,15°坡面第 18 min 达到峰值,20°坡面第 15 min 达到峰值;雨强 1.5 mm/min 条件下,10°坡面在第 17 min 达到坡面侵蚀速率峰值,15°坡面在第 12 min 达到峰值;雨强 2.0 mm/min 条件下,10°坡面在第 10 min 便达到侵蚀率峰值。同时,随着降雨时间的增加,坡面侵蚀率逐渐趋于平稳,侵蚀强度减弱。由于松针覆盖使得降雨溅蚀能力大大减弱,侵蚀主要依靠水流搬运作用。在 1.0,1.5 mm/min 雨强下的 10°,15°坡面,前期水流搬运能力有限,随着持续降雨,径流搬运能力不断增强,侵蚀率达到顶峰,之后径流汇集逐渐稳定,侵蚀率也趋于稳定。

从图 3 可以看出,各坡面产流初期,产沙量差异较小。随着降雨持续,坡面产沙量不断增加,同一雨强条件下,累积产沙量随坡度增大而增加,坡度愈大增幅愈快。坡度的增大,不仅使得坡面径流流速加快,径流挟沙能力增强,也使土壤稳定性降低,抗蚀能力减弱。雨强的增大,单位面积承雨量增加,坡面蓄满产流速度变快,径流量较大,增强了径流对土壤的扰动分离与挟运能力,使得坡面产沙量增加。

在 1.0 mm/min 雨强下,15°,20°坡面的累积产沙量是 10°时的 2.27,3.45 倍;1.5 mm/min 雨强下,15°,20°坡面的累积产沙量是 10°时的 1.91,2.50 倍;2.0 mm/min 雨强下,15°,20°坡面的累积产沙量是 10°时的 1.45,1.91 倍。表明在小雨强(1.0 mm/min)下,不同坡度坡面间产沙量差异较大,雨强增加,会缩

小不同坡度坡面间产沙量差异。说明雨强增加可掩盖坡度在增大侵蚀中的作用。这也与紫色土^[11]、花岗岩红壤^[12]中发现坡度对坡面侵蚀的贡献率随雨强增加而减小的结果相一致。

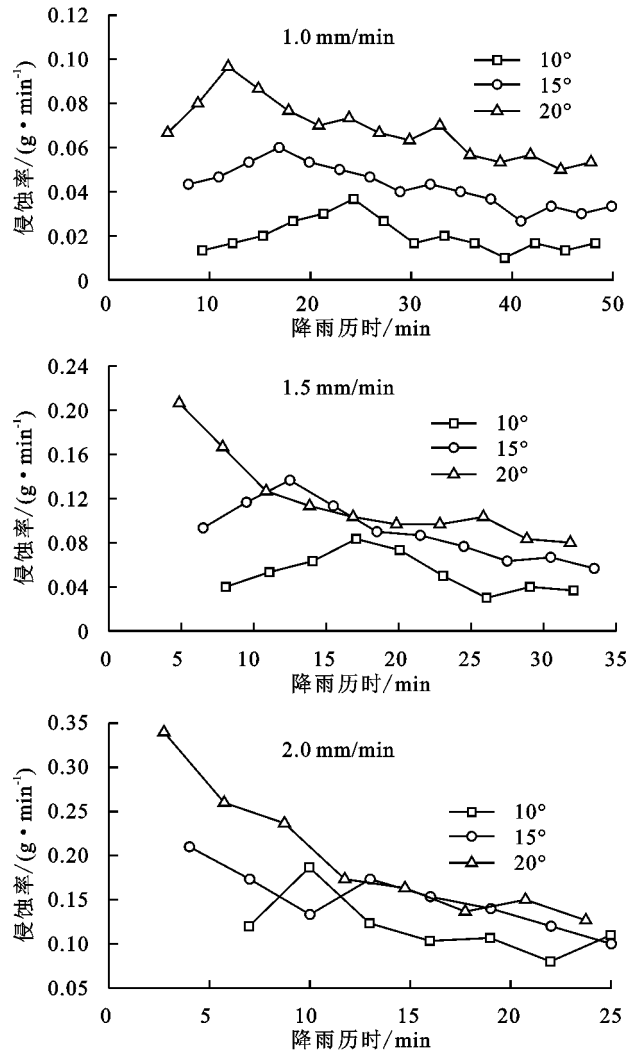


图 2 坡面侵蚀率随降雨历时变化特征

2.2 坡面入渗特征

土壤的渗透性能是反映土壤抗蚀能力的重要因子之一^[27],不同的降雨和坡面条件,土壤的入渗特征有所差异。为研究覆盖坡面入渗特征对雨强和坡度变化的响应,计算了各坡面初始入渗率和入渗总量。由图 4 可知,初始入渗率和入渗总量大小总体表现出随坡度增加而减小的规律。坡度的增加,一方面会减少小区垂直投影面积,即减小了坡面承雨面积;另一方面会增大水流沿坡面方向的力,相应地减小了垂直坡面的压力,减少土壤入渗。其中,10°在 1.0,1.5,2.0 mm/min 雨强下的入渗总量为 32.45,30.34,28.77 mm;15°在 1.0,1.5,2.0 mm/min 雨强下的入渗总量为 30.34,28.03,26.42 mm;20°在 1.0,1.5,2.0 mm/min 雨强下的入渗总量为 28.77,24.94,23.73 mm。

各坡面入渗量占降雨量比重在 47.46%以上,这是因为松针覆盖不仅可以有效减少雨滴溅蚀导致的土壤

孔隙被堵塞情况,保持土壤通透,便于雨水下渗,也可以通过提高地面糙率,减缓流速,使径流下渗机会增多。

2.3 减流减沙效益

表 2 为覆盖坡面在坡度 15°下 1.0,1.5,2.0 mm/min 雨强时的水土保持效益状况。从表 2 可以看出,松针覆盖坡面的减流效益和减沙效益随雨强的增加呈现减小趋势,且减流效益减少幅度较减沙效益明显,其中,雨强从 1.0 mm/min 增加至 2.0 mm/min,减流效益从 65.13%减少至 40.66%,减沙效益从 96.98%下降至 94.05%。在雨强增加,使其减流效益减弱的情况下,松针覆盖仍具有强大的拦沙效应,这是因为覆盖减少坡面产沙主要是通过有效避免雨滴直接打击地表,防止击溅侵蚀实现的。在雨强 1.0 mm/min 条件下,覆盖坡面减流效益大于 65%,减沙效益大于 96%,可以看出覆盖在小雨强时的保持水土作用较为明显。随着雨强的增大,松针覆盖调节径流作用相对下降,覆盖减流效益降低。当雨强增加至 2.0 mm/min,减流效益减少了 24.47%,下降至 40.66%,表明覆盖调节径流,增加入渗的作用减弱,但仍可有效调节随雨强增大而增加的坡面径流。覆盖的减沙效益虽然也随雨强增大而下降,但从雨强 1.0 mm/min 增加至 2.0 mm/min,减沙效益仅减少 2.93%。覆盖坡面的减沙效益明显高于减流效益,说明松针拦截泥沙能力强于其减少径流的能力,松针的水土保持效果更多体现在减弱径流挟沙力和直接拦沙的水沙调控特征。

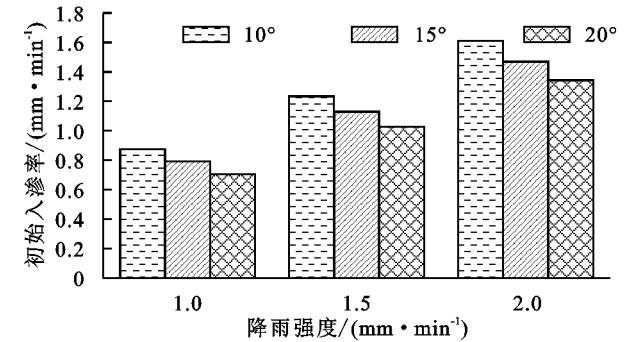


图 4 坡面入渗变化特征

Miyata 等^[28]通过日本扁柏林地的研究,发现裸地坡面的土壤侵蚀模数是保留枯落物坡面的 3.7 倍;吴长文等^[29]基于华北土石山区人工刺槐林野外模拟降雨研究,发现搂去枯落物将使坡面最大径流流量增加 58%,土壤侵蚀量增加 12.95 倍;何玉广等^[30]通过野外模拟降雨试验对北京山区人工侧柏林地进行了研究,发现枯落物覆盖坡面土壤侵蚀模数较裸地坡面下降了 90.6%;Seitz 等^[31]通过分析我国红壤区 7 个树种枯落物对坡面土壤侵蚀的影响,发现不同树种坡面间侵蚀率存在显著差异,但枯落物覆盖坡面土壤侵

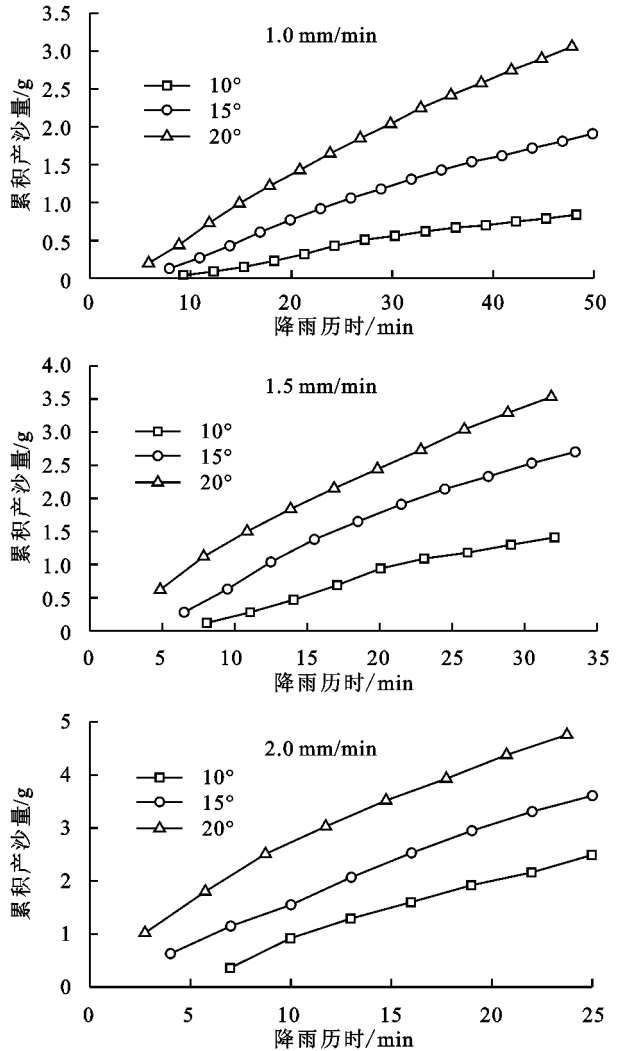
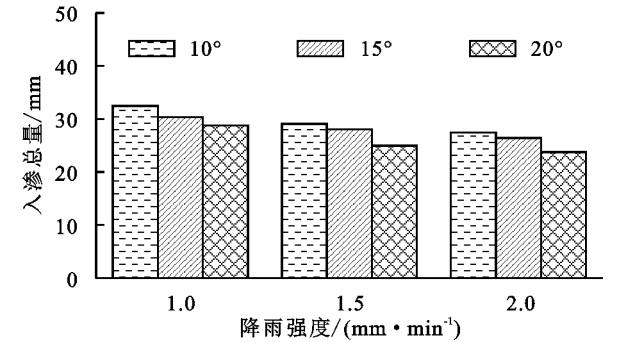


图 3 坡面累积产沙量随降雨历时变化特征



蚀量较裸地坡面减少了 82%。松针等枯落物主要是通过截持降雨以及滞缓地表径流,增加入渗量,进而减少坡面径流量。枯落物覆盖在坡面,可避免雨滴击溅侵蚀,降低水流紊动性^[10],并减小径流动能,减弱径流冲刷能力,导致坡面侵蚀产沙的减少。因此要减少山区群众搂拾松针的现象,保护松针等地表枯落物,利用自然之力减轻水土流失。

2.4 相关性分析

对雨强、坡度与产流时间、径流率、入渗系数、侵蚀率、累积径流量、累积产沙量进行相关性分析(表 3)。结

果表明,雨强与径流率、侵蚀率、入渗系数、累积产沙量呈极显著正相关关系,与产流时间呈现极显著负相关关系($p<0.01$)。坡度与径流率、侵蚀率、累积径流量、累积产沙量呈现极显著正相关关系($p<0.01$),与产流时间、入渗系数呈现负相关关系($p<0.05$)。

进一步对不同雨强、坡度下的累积产沙量和累积径流量关系进行分析,发现二者存在显著的幂函数关系,表达式为 $Y=aX^b$ 。其中: X 为累积径流量(L); Y 为累积产沙量(g); a 、 b 为系数;决定系数 R^2 在0.97以上。呈现出随降雨强度和坡度的增大其增加速率逐渐变大的趋势(表4),即坡度一定,雨强越大,坡面累

表 3 雨强、坡度与坡面侵蚀过程相关系数

因子	产流时间	径流率	侵蚀率	累积径流量	累积产沙量	入渗系数
降雨强度	-0.479 **	0.871 **	0.747 **	0.212 *	0.444 **	0.935 **
坡度	-0.770	0.446 **	0.426 **	0.371 **	0.534 **	-0.319 **

注: * 表示 $p<0.05$; * * 表示 $p<0.01$ 。

表 4 不同雨强、坡度下坡面累积径流量与累积产沙量关系

降雨强度/ (mm · min ⁻¹)	坡度/ (°)	拟合方程	R^2
1.0	10	$Y=0.1938X^{1.0734}$	0.9881
	15	$Y=0.3440X^{0.9008}$	0.9909
	20	$Y=0.4214X^{0.9143}$	0.9896
1.5	10	$Y=0.2474X^{1.0624}$	0.9860
	15	$Y=0.4318X^{0.8945}$	0.9844
	20	$Y=0.7183X^{0.7032}$	0.9984
2.0	10	$Y=0.5077X^{0.8929}$	0.9732
	15	$Y=0.6125X^{0.7827}$	0.9991
	20	$Y=0.9321X^{0.6793}$	0.9968

注: X 为累积径流量(L); Y 为累积产沙量(g)。

3 结 论

(1)各坡面产流时间随雨强和坡度的增加而逐渐提前。径流率随降雨历时增加表现为2个阶段:降雨前期径流率上升阶段,后期径流率趋于稳定阶段。坡面侵蚀率和累积产沙量随雨强和坡度的增大而增加,雨强的增加会在一定程度上掩盖坡度增大侵蚀的作用。

(2)初始入渗率和入渗总量大小总体表现出随坡度增加而减小的规律,而雨强的增大会使坡面初始入渗率增加,入渗总量降低。

(3)坡度15°覆盖坡面在1.0,1.5,2.0 mm/min时的减流效益为94.05%,94.89%,96.98%,减沙效益为40.66%,45.00%,65.13%,松针覆盖的减流减沙效益显著,且减沙效益优于减流效益。

(4)雨强、坡度和径流率、入渗系数、侵蚀率、累积产沙量呈极显著相关关系($p<0.01$)。不同雨强、坡度条件下覆盖坡面累积径流量与累积产沙量符合幂函数模型,且 $R^2>0.97$ 。

积产沙量随累积径流量的增加而增加;雨强一定,坡度越大,坡面累积产沙量也随累积径流量的增加而增加。根据幂函数模型可得知累积径流量越大,累积产沙量越大,径流侵蚀过程中的产沙是由径流的挟带产生的。因此,覆盖也能通过减流促进减沙。

表 2 坡度 15°下覆盖坡面较裸露坡面减流减沙效益

降雨强度/ (mm · min ⁻¹)	减流效益/%	减沙效益/%
1.0	65.13	96.98
1.5	45.00	94.89
2.0	40.66	94.05

参考文献:

[1] Mullan D. Soil erosion under the impacts of future climate change: Assessing the statistical significance of future changes and the potential on-site and off-site problems[J].Catena,2013,109(10):234-246.

[2] 李秀霞,倪晋仁.土壤侵蚀及其影响因素空间相关性分析[J].地理科学进展,2009,28(2):161-166.

[3] 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.

[4] 史志华,宋长青.土壤水蚀过程研究回顾[J].水土保持学报,2016,30(5):1-10.

[5] Nearing M A. Soil erosion by surface water flow on a stony, semiarid hillslope[J].Earth Surface Processes and Landforms,2015,24(8):677-686.

[6] Shen H O, Zheng F L, Wen L L, et al. Impacts of rainfall intensity and slope gradient on rill erosion processes at loessial hillslope[J].Soil and Tillage Research,2016,155:429-436.

[7] 李桂芳,郑粉莉,卢嘉,等.降雨和地形因子对黑土坡面土壤侵蚀过程的影响[J].农业机械学报,2015,46(4):147-154.

[8] 许海超,李子君,林锦阔,等.燕山土石山区降雨和下垫面条件对坡面侵蚀产沙的影响[J].山地学报,2016,34(1):46-53.

[9] 王栋栋,王占礼,张庆玮,等.草地植被覆盖度坡度及雨强对坡面径流含沙量影响试验研究[J].农业工程学报,2017,33(15):119-125.

[10] 王玉宽,王勇强,傅斌,等.紫色土坡面降雨侵蚀试验研究[J].山地学报,2006,24(5):597-600.

[11] 车明轩,宫渊波, Khan M N,等.不同雨强、坡度对秸秆覆盖保持水土效果的影响[J].水土保持学报,2016,30(2):131-135.

[12] 王丽园,查轩,黄少燕,等.不同雨强条件下坡度对红壤坡面侵蚀的影响[J].水土保持学报,2017,31(5):40-44.

[13] Smets T, Poesen J, Bhattacharyya R, et al. Evaluation of biological geotextiles for reducing runoff and soil loss under various environmental conditions using laboratory and field plot data[J].Land Degradation and Development,2011,22(5):480-494.

[14] 张祯尧,孙佳美,余新晓,等.栓皮栎林下枯落物减流减沙效应研究[J].水土保持学报,2016,30(3):55-58.

[15] Yan Y J, Dai Q H, Yuan Y F, et al. Effects of rainfall intensity on runoff and sediment yields on bare slopes in a karst area, SW China[J].Geoderma,2018,330:30-40.

[16] 邓龙洲,张丽萍,范晓娟,等.不同雨强和坡度下侵蚀性风化花岗岩母质坡地产生流沙特征[J].农业工程学报,2018,34(17):143-150.

[17] 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.

[18] 何子森,肖培青,郝仕龙,等.黄丘区野外草被坡面土壤入渗参数变化规律与模拟研究[J].水土保持学报,2018,32(2):74-79.

[19] 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.

[20] 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.

[21] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,国家标准化管理委员会.GB/T 15774—2008 水土保持综合治理效益计算方法[S].北京:中国标准出版社,2009.

[22] 汪有科,吴钦孝,赵鸿雁,等.林地枯落物抗冲机理研究[J].水土保持学报,1993,7(1):75-80.

[23] Wang L H, Dalabay N, Lu P, et al. Effects of tillage practices and slope on runoff and erosion of soil from the Loess Plateau, China, subjected to simulated rainfall[J].Soil and Tillage Research, 2017, 166:147-156.

[24] 李忠武,陆银梅,聂小东,等.基于坡面径流输沙模型的湘中红壤丘陵区土壤有机碳流失模拟研究[J].湖南大学学报(自然科学版),2015,42(12):115-124.

[25] 段剑,刘窑军,汤崇军,等.不同下垫面红壤坡地壤中流对自然降雨的响应[J].水利学报,2017,48(8):977-985.

[26] 王仁新,何丙辉,李天阳,等.汶川震区滑坡堆积体坡面土壤侵蚀率及水动力学参数研究[J].土壤学报,2016,53(2):375-387.

[27] 史倩华,李垚林,王文龙,等.不同植被措施对露天煤矿排土场边坡径流产沙影响[J].草地学报,2016,24(6):1263-1271.

[28] Miyata S, Kosugi K, Gomi T, et al. Effects of forest floor coverage on overland flow and soil erosion on hill-slopes in Japanese cypress plantation forests[J].Water Resources Research,2009,45(6):192-200.

[29] 吴长文,王礼先.水土保持林中枯落物的作用[J].中国水土保持,1993(4):28-30.

[30] 何玉广,信忠保,余新晓,等.模拟降雨条件下侧柏林地枯落物对坡面产流产沙的影响[J].水土保持学报,2017,31(3):27-32.

[31] Seitz S, Goebes P, Zumstein P, et al. The influence of leaf litter diversity and soil fauna on initial soil erosion in subtropical forests[J].Earth Surface Processes and Landforms,2014,40(11):1439-1447.

(上接第 78 页)

[23] 张复兴.介绍法定计量单位常识和工厂常用的六个计量单位换算关系[J].建筑机械,1988(8):40-47.

[24] 钱宁.高含沙水流运动[M].北京:清华大学出版社,1989:96-101.

[25] 王平,侯素珍,张原锋,等.黄河上游孔兑高含沙洪水特点与冲淤特性[J].泥沙研究,2013(1):67-73.

[26] 陈娟,陈林,宋乃平,等.荒漠草原不同土壤类型水分入渗特征[J].水土保持学报,2018,32(4):18-23.

[27] 赵景波,陈颖,曹军骥,等.青海湖西北部土壤入渗规律研究[J].陕西师范大学学报(自然科学版),2011,39(3):90-96.

[28] Ta W Q, Wang H B, Jia X P. Aeolian process-induced hyper-concentrated flow in a desert watershed[J].Journal of Hydrology,2014,511:220-228.

[29] 席多龙,张百祖,张昌顺.敦煌西土沟流域水资源演变规律浅析[J].甘肃农业,2016(15):30-31.

[30] 郑策,卢玉东,郭建青,等.贺兰山西麓绿洲土壤水分入渗特性[J].水土保持通报,2017,37(5):146-151.

[31] 姚淑霞,赵传成,张铜会.科尔沁不同沙地土壤饱和和导水率比较研究[J].土壤学报,2013,50(3):469-477.