不同处理下油松枯落物减流减沙效应试验研究

刘京晶，马 岚，薛孟君，黎俊佑，孙占薇，张金阁，燕 琳

（北京林业大学水土保持学院，北京 100083）

摘要：森林枯落物对坡面土壤侵蚀过程发挥着重要的调控作用，但其控制效应仍待明确。采用室内大型土槽及人工模拟降雨试验探讨油松枯落物的不同铺设方式对坡面产流产沙的影响，试验在 4 种雨强（30，60，90，120 mm/h）和油松枯落物的 3 种铺设方式（裸坡对照、枯落物直接铺设和枯落物隔网铺设）下进行，设置枯落物隔网铺设方式来研究枯落物降低雨滴动能减少击溅侵蚀作用，设置枯落物直接铺设方式来研究枯落物增大地表粗糙率阻滞拦截作用。结果表明：（1）枯落物存在使坡面初始产流时间延长 2.3～5.5 倍，且枯落物隔网铺设较直接铺设初始产流时间更长。（2）2 种枯落物覆盖坡面与裸土坡面相比，枯落物减小坡面径流流速 47.9%～62.3%，雨强越小，枯落物减弱径流流速作用越明显。（3）枯落物显著增加入渗并减小径流，在雨强较小时作用更加明显。（4）枯落物可减少径流泥沙 75%以上，直接铺设减沙更加明显，这主要是由于枯落物增大地表糙度减小流速。研究结果为植被坡面土壤侵蚀模型建立提供一定理论基础，为面向水土流失防控的植被构建提供一定科学依据。

关键词：油松枯落物；径流泥沙；击溅侵蚀；阻滞拦截；人工模拟降雨

中图分类号：S714.7 **文献标识码**：A **文章编号**：1009-2242(2019)04-0126-07

DOI：10.13870/j.cnki.stbcxb.2019.04.018

Effect of Runoff and Sediment Reduction of Different Treatment by Litter of *Pinus tabulaeformis*

LIU Jingjing, MA Lan, XUE Mengjun, LI Junyou, SUN Zhanwei, ZHANG Jingge, YAN Lin

(*School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing* 100083)

Abstract: Forest litter plays an important role in controlling soil erosion on slopes, but its control mechanism remains to be clarified. In this study, the effects of different litter cover on runoff and sediment yield on slopes were investigated by laboratory large-scale soil trough and artificial simulated rainfall test. The experiment was conducted under four rainfall intensities (30, 60, 90, 120 mm/h) and three litter mulching treatments (bare slope control, direct laying of litter and net laying of litter). Setting up the net laying of litter, which is in order to study on litter reducing splash erosion with reducing kinetic energy of raindrops. Setting up the direct laying of litter, which is in order to study on blocking interception of litter increasing ground roughness. The results indicated that: (1) The initial runoff generation time of slopes was prolonged by 2.3～5.5 times with the existence of litter, and the net laying of litter was longer than that of direct laying.(2)Compared with bare soil slope, litter decreased the runoff velocity by 47.9%～62.3%, and the smaller the rainfall intensity, the more obvious the effect of litter on reducing the runoff velocity. (3) Litter significantly increases infiltration and decreases runoff, and the effect is more obvious when rainfall intensity is small. (4) litter can reduce runoff and sediment by more than 75%, and direct laying is more obvious, mainly because litter increases surface roughness and reduces flow velocity. This study provides a theoretical basis for the establishment of soil erosion model on vegetation slope, and provides a scientific basis for the construction of vegetation for soil erosion prevention and control.

Keywords: litter of *Pinus tabulaeformis*; runoff and sediment; splash erosion; blocking and intercepting; artificial simulated rainfall

收稿日期：2019-01-17

资助项目：国家自然科学基金项目(51779004)

第一作者：刘京晶(1994—)，女，在读硕士研究生，主要从事坡面水文与土壤侵蚀研究。E-mail：liujingjing0506@163.com

通信作者：马岚(1981—)，女，副教授，硕士生导师，主要从事坡面水文与水土保持研究。E-mail：mlpcz@sina.com

土壤侵蚀是当今世界上最重要的环境问题之一,其中由于雨滴击溅和坡面径流引起的坡面土壤侵蚀问题尤为严重[1]。林地枯落物的存在,对土壤侵蚀过程发挥着重要的调控作用[2],其可以截持降雨、防止土壤溅蚀、延缓地表径流、抑制土壤水分蒸发、增强土壤抗冲刷性能、拦截泥沙,进而控制水土流失。早在 1934 年,Lowdermilk 等[3]提出森林枯落物保护土壤的重要性,认为地面枯落物的存在是减少土壤侵蚀的重要因素。

为研究枯落物在坡面侵蚀中所起的作用,国内外学者进行了大量研究[4],这些研究主要集中在枯落物分解对土壤性质的改变[5]、枯落物的持水性能及对下渗的影响[6]、枯落物的水文效应及其对产流产沙的影响[7-8],大量的科学研究使人们对枯落物的坡面水文效应和水土保持功效有了普遍的认可和较全面的认识,侯贵荣等[9]通过在油松、刺槐及油松×刺槐 3 种枯落物覆盖林地进行土壤入渗研究表明,3 种林分土壤的初渗速率相差较大,在 1.59～3.8 mm/min 间变动;陈继东等[10]研究 9 种典型林分类型的枯落物持水能力在 11.95～61.18 t/hm^2。着眼于坡面径流泥沙,众多学者在不同的试验条件下进行研究,或将枯落物覆盖坡面与裸土坡面进行对比分析,得出枯落物的减流减沙效益[11],或以枯落物种类、覆盖量等作为控制因子,研究不同处理下的坡面径流泥沙量,用以指导林分配置[12]。已有研究[13]表明,枯落物有减小流量的作用,这主要是由于枯落物盖度与结皮盖度密切相关,枯落物的存在增大了土壤入渗,减小了地表径流量,并且降雨强度越小,这种效应越明显,且在 30～90 mm/h 雨强下,枯落物能够减沙 64%～84%;不同坡面下产流产沙率随着枯落物生物量的增加而减少,且与枯落物的生物量呈指数关系变化。然而,已有的研究对于枯落物对坡面径流侵蚀的调控机制探讨较少,仍有待加强。

枯落物的存在首先削弱了雨滴下降的打击力,能够减少土壤分散,其次提高土壤表面粗糙度,减缓径流速度,从而减弱径流的挟沙能力。而坡面土壤侵蚀是由雨滴击溅和径流冲刷所引起的,可见枯落物的存在作用于整个坡面侵蚀过程,对不同作用分别进行探究,从而定量揭示枯落物的减流减沙效应,对植被坡面侵蚀模型建立和水土流失防控,均显得尤为重要。鉴于此,本研究采用人工模拟降雨试验,应用 10 m×1.5 m×0.6 m 大型自制土槽,在室内较大尺度上更好的模拟野外枯落物存在环境,使研究结果更具代表性和说服力。设置裸坡与 2 种枯落物不同铺设覆盖方式,对其产流产沙特征进行对比,在不同雨强下分析枯落物对土壤侵蚀过程的影响,以期为植被坡面土壤侵蚀模型建立及水土流失防控提供一定理论基础和科学依据。

1　材料与方法

1.1　试验装置与材料

试验于 2017 年 6—8 月在北京市鹫峰实验林场的首都圈森林生态系统国家定位观测研究站人工模拟降雨大厅进行,采用西安清远测控技术有限公司研发的 QYJY-503T 型模拟降雨系统,试验系统包括人工降雨系统、坡地试验系统、试验控制系统、供水系统 4 部分。模拟降雨大厅有效降雨高度 12 m,可使雨滴终点速度接近自然降雨。降雨均匀度＞85%,降雨强度范围为 10～300 mm/h。试验土槽为大型变坡钢槽,长 10 m,宽 3 m(本研究仅用其 1/2 宽度,即 1.5 m),深 0.6 m,在室内较大尺度上更好模拟枯落物野外存在环境。试验采用常见树种油松的枯落物及就近采集的华北土石山区典型土壤石灰岩母质发育的褐土,土壤机械组成占比为黏粒(0～2 μm)9.49%,细粉粒(2～20 μm)57.20%,粗粉粒(20～50 μm)24.78%,砂粒(＞50 μm)8.56%。

1.2　试验设计与测定

枯落物对坡面侵蚀的调控作用主要体现在 2 个方面:一是降低雨滴下落动能从而减少击溅侵蚀;二是阻滞拦截径流泥沙。为了将这 2 个方面作用分别考虑,从而详细准确地揭示枯落物的减流减沙效应,设计将枯落物均匀铺设在尼龙丝隔网上,将隔网悬挂在坡面之上,使之与坡面间留有 5 cm 间隔(以下简称隔铺)覆盖方式,将其与自然状态下的枯落物覆盖方式,即将其直接铺设覆盖在坡面,使枯落物与坡面直接接触(以下简称直铺),与裸坡 2 种处理分别做对比分析。通过隔铺与裸坡相比较,研究枯落物降低雨滴动能减少击溅侵蚀作用;通过隔铺与直铺相比较,研究枯落物增大地表粗糙度对径流泥沙阻滞拦截作用;而直铺与裸坡之间的对比,反映了不同作用的综合效应。通过对油松林的实地调查与文献[14-15]查阅,试验中将枯落物覆盖量设为 300 g/m^2。根据野外实际地形,并考虑到试验条件,将坡度设置为 9°。近年来,在华北地区以短历时、高强度为主的降雨多次出现,如 2011 年 6 月 23 日和 2012 年 7 月 21 日的暴雨事件,北京地区最大降雨强度分别达到 128,100 mm/h[16],因此本试验将雨强设置为 30,60,90,120 mm/h 4 种。前人[17]研究发现,在 90 mm/h 雨强下降雨 60 min,坡面细沟状态已基本达到稳定,本研究考虑在降雨量相同的 4 种雨强下讨论枯落物减流减沙效应及机制,故 30,60,90,120 mm/h 4 种雨强下降雨时间分别为 180,90,60,45 min。

试验前将从野外取的土壤与枯落物自然风干,将土壤过 10 mm 筛,剔除石块、草根等杂质,填土前在钢槽底部填 10 cm 厚细沙,以保证坡面透水状况接近

自然坡面。控制土壤容重为 1.29 g/cm^3，计算填土量，将风干后土壤进行分层填装并压实，每层填土 10 cm，共 4 层，填土时保证土面平整，每层填装完压实并将表面刮毛，制造一定粗糙度，防止土层间相互滑动。填土完成后将枯落物直接或隔网铺设覆盖至坡面。降雨前测量土壤初始含水率，待初始含水率范围为 12%～15%时进行降雨试验。降雨过程中，由于初始产流时产流量与产沙量均不稳定，因此前 20 min 用塑料桶每隔 1 min 在土槽出口处接 1 组径流样，待产流稳定后，每隔 4 min 接 1 组径流样。同时用染色剂示踪法测量坡面流速，此方法所测流速为表面流速，参考米宏星等[18]、王龙生等[19]在相似试验条件下的研究，将所测流速乘以 0.75，以得到较为理想的平均流速。试验所接径流样，测量其体积，用烘干法测定泥沙量。

试验结束后，整理坡面覆盖枯落物，将表层 20 cm 湿土取出晾晒，待钢槽内剩余 20 cm 湿土充分干燥后，再重新回填表层 20 cm 干土进行下一场降雨。由此 1 场降雨周期为 10 天左右，考虑次降雨工作量太大，故本研究不设置重复试验，本研究需在裸坡与 2 种不同枯落物铺设覆盖方式的坡面上，分别进行 4 种雨强降雨，降雨试验共 12 场。

2 结果与分析

2.1 3 种坡面径流入渗及泥沙特征的比较

不同降雨条件下 3 种坡面有关土壤侵蚀特征测定结果见表 1。3 种坡面初始产流时间(从开始降雨至开始产流之间的时间)均随雨强的增大而减小，在裸坡、枯落物直铺、枯落物隔铺覆盖方式下，120 mm/h 比 30 mm/h 雨强下产流时间分别缩短 85%，85%，92%。相同雨强条件下，裸坡产流时间最短，隔铺产流时间最长。在 4 种雨强下，直铺比裸坡的产流时间延长 1.9～2.5倍，隔铺比裸坡产流时间延长 2.3～5.5 倍，而隔铺比直铺产流延长 0.1～1.1 倍，随着降雨强度的增加，3 种不同坡面上的产流时间差距逐渐减小。

3 种坡面土壤下渗量占降雨量百分比随着雨强的增大呈现减小趋势，30 mm/h 雨强下，隔铺土壤下渗量占降雨量百分比高达 85.15%。相同雨强下，隔铺土壤下渗量所占百分比最大，裸坡最小；60 mm/h 雨强下，隔铺土壤下渗量所占降雨量百分比高达裸坡的 2.9 倍。径流强度、泥沙浓度、产沙量均随雨强的增大而增大。在裸坡、直铺、隔铺 3 种坡面上，120 mm/h 径流强度分别是 30 mm/h 雨强下的 4.44，4.46，5.99 倍。相同雨强下径流强度与径流系数均表现为裸坡远大于其他 2 种坡面。

表 1 不同坡面径流入渗及泥沙特征的比较

坡面类型	降雨强度/(mm·h^{-1})	产流时间/min	径流强度/(mm·h^{-1})	径流系数/%	土壤入渗/%	泥沙浓度/(g·L^{-1})	产沙量/kg
裸坡	30	17.6	21.69	41	59	24.9	15.6
	60	7.3	45.40	72	28	34.7	22.0
	90	3.5	69.20	74	26	52.6	23.9
	120	2.6	96.38	66	34	171.3	86.9
直铺	30	52.9	15.73	60	40	9.3	3.8
	60	25.4	33.69	42	58	6.2	8.3
	90	10.7	66.21	50	50	28.6	21.2
	120	7.8	70.25	54	46	32.1	21.9
隔铺	30	113.5	11.35	15	85	10.0	2.5
	60	44.9	23.04	19	81	6.8	10.0
	90	16.5	59.65	39	61	50.8	25.4
	120	8.7	68.33	49	51	114.5	66.9

2.2 3 种坡面径流过程的比较

在相同雨强下，裸坡径流流速远大于其他 2 种枯落物覆盖坡面(图 1)，裸坡流速变化范围为 0.09～0.12 m/s，隔铺流速变化范围为 0.05～0.10 m/s，直铺流速变化范围为 0.03～0.06 m/s，直铺方式下流速最低且变化平稳，隔铺下径流流速处于裸坡与直铺之间，且随降雨历时增加呈逐渐上升趋势。

在相同坡面上，坡面径流平均流速随雨强增大而增加。在由小到大 4 种雨强下，隔铺相较于裸坡径流流速分别减少 43.0%，41.0%，7.8%，17.2%，直铺较隔铺流速分别减少 26.8%，36.1%，44.1%，37.2%。总体上，随着雨强增大有枯落物覆盖的坡面流速较裸坡流速差距越来越小。

不同的降雨条件下，坡面径流强度随降雨历时与降雨强度的增加而增加(图 2)。在相同降雨强度下，坡面径流强度均表现出裸坡远大于 2 种枯落物覆盖坡面，隔铺下径流强度相对最低，减流效果相对显著；在 30～120 mm/h 4 种雨强下，枯落物的减流效应逐渐减弱，隔铺比

裸坡径流强度分别减少 89.3%,86.9%,46.9%,19.9%。而直铺下径流强度较隔铺增加 4.03,2.24,1.27,1.0 倍。在由小到大 4 种雨强下,3 种坡面径流强度变化波动逐渐增大,差距逐渐减小。在 30 mm/h 雨强条件下,3 种坡面均在产流 5～10 min 时径流强度骤然上升,随后平稳小幅上升。在 120 mm/h 雨强下,裸坡径流强度表现出多峰多谷大幅波动,2 种枯落物铺设覆盖方式下的径流强度均呈现波动上升趋势。

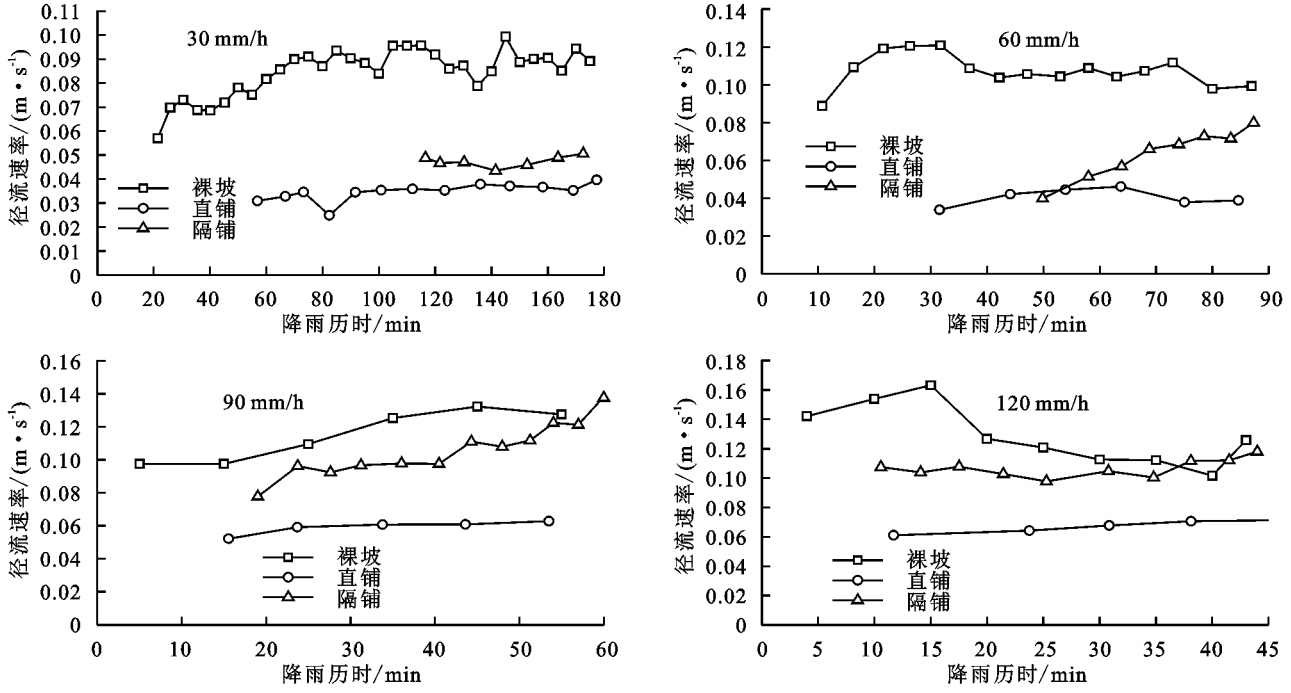


图 1　不同雨强不同坡面径流流速

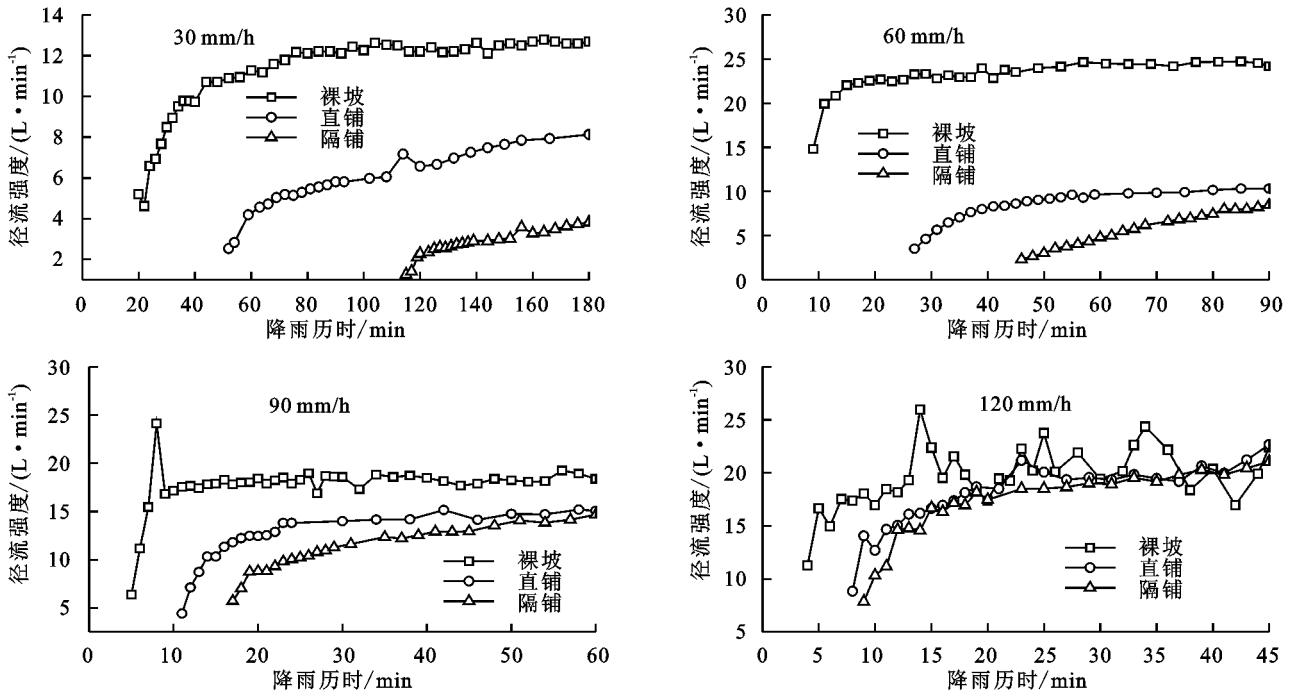


图 2　不同坡面径流强度

2.3　3 种坡面产沙过程的比较

4 种雨强下,裸坡侵蚀产沙量均大于 2 种枯落物覆盖坡面产沙量(图 3)。裸坡坡面在 30 mm/h 雨强下,侵蚀产沙量波动上升后保持平稳波动;60,90 mm/h 雨强下在产流 10 min 内大幅上升,随后侵蚀产沙量逐渐减少;在 120 mm/h 雨强下,裸坡坡面侵蚀产沙量呈现大幅无规律变化趋势。在直铺下,除在 30 mm/h 雨强条件下,侵蚀产沙量随降雨历时有明显增加外,其他雨强条件下均表现较平稳,直铺均表现出良好的减沙效果,相对裸坡泥沙减少率最高可达 75.5%。但隔铺下,侵蚀产沙量随时间变化波动较大,隔铺在减少泥沙方面表现较弱,相对裸坡减沙效果为 23%～38%。

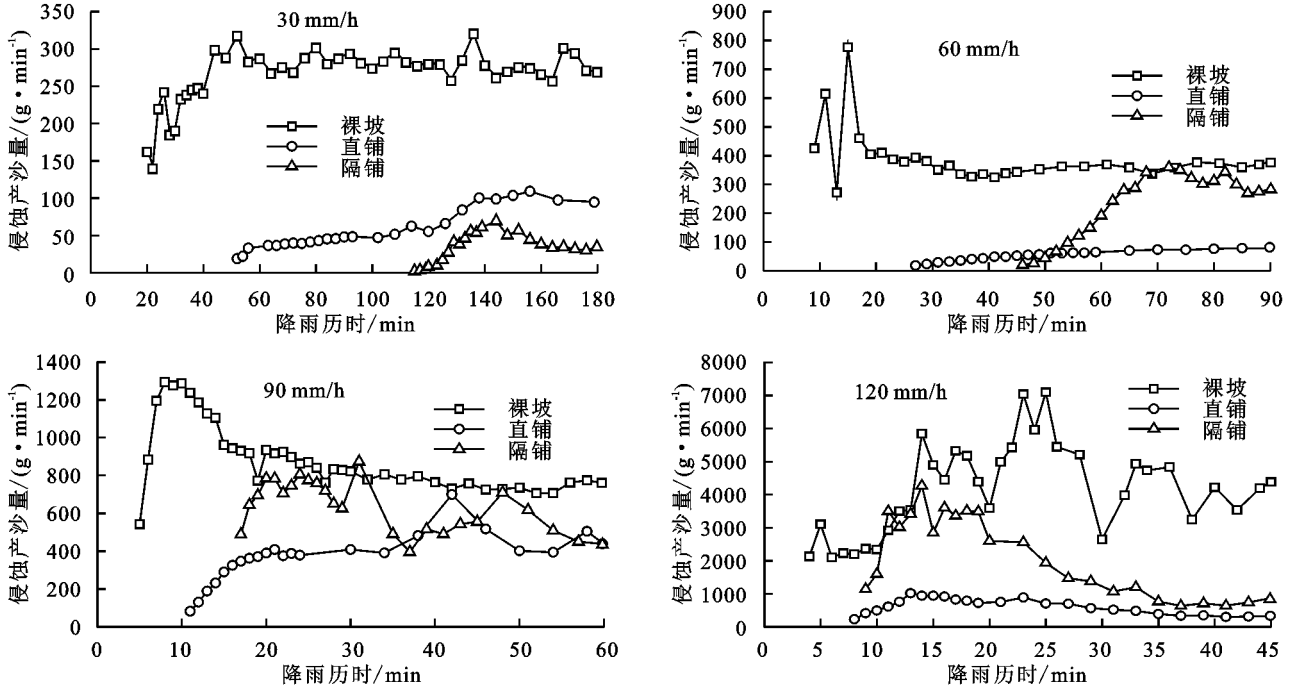


图 3 不同坡面侵蚀产沙过程

3 讨 论

3.1 3 种坡面径流入渗及泥沙特征的比较

3 种坡面产流时间存在差异,铺设枯落物的坡面相较裸坡产流时间长,一方面是由于枯落物具有一定持水性,待其持水达到一定程度后雨水才会下渗到达土壤表面;另一方面由于枯落物的拦截大大减弱了雨滴下落动能,减少击溅侵蚀,雨滴下落溅起细小颗粒减少,降低土壤孔隙的堵塞,使土壤入渗相比裸坡更大,从而初始产流时间较裸坡长,这与张祯尧等[20]研究结果一致。随着降雨强度的增大,单位时间坡面承雨量增大,枯落物表现出来的减小雨滴动能的作用减弱,故裸坡与 2 种铺设枯落物的情况下产流时间差距逐渐缩短。枯落物覆盖坡面土壤入渗量占降雨量百分比均大于裸坡,由此可见,枯落物可增强土壤入渗,与庞梦丽等[21]研究结果一致。

在相同降雨强度下,隔铺的泥沙浓度相对直铺最高可达其 3.6 倍,产沙量可达其 3.1 倍。隔铺下,枯落物虽减弱雨滴下落动能,但其并未与坡面直接接触,雨滴透过隔网层转化为坡面径流携带大量泥沙流失。直铺下,由于枯落物与坡面土壤直接接触,对径流泥沙阻滞拦截效果显著[12-13],其泥沙浓度与产沙量均为 3 种坡面下最低。

3.2 坡面径流过程

在相同雨强下,裸坡径流流速远大于其他 2 种枯落物覆盖坡面。直铺径流流速低于隔铺,是因为直铺下,枯落物与坡面土壤直接接触,增大了地表粗糙度,地表形态阻力增加,阻延径流流动,流速较隔铺有明显减小。陈奇伯[22]在森林枯落物阻滞地表径流和影响砂粒水力起动条件研究中发现雨滴下落会对坡面产生打击力,该力沿坡面方向的分力会使坡面径流流速增大,在隔铺下,由于雨滴对坡面的打击力减弱,相应该力沿坡面方向的分项力减弱,加之径流强度小,从而流速减小,由此隔铺流速较裸坡小。孙佳美等[23]在模拟降雨下枯落物调控坡面产流产沙过程中发现枯落物对于径流流速的减小,小雨强下其减小雨滴打击力起主导作用,而大雨强下阻滞起主导作用。在相同坡面上,坡面径流平均流速随雨强增大而增加,隔铺下虽缓冲雨滴下落,减弱雨滴对坡面径流扰动,径流流速在小雨强下减小相对明显,但在大雨强下减小不甚明显,这与孙佳美等[23]研究结果一致。

不同的降雨条件下,坡面径流强度随降雨历时与降雨强度的增加而增加,这可能是由于隔铺枯落物与地表隔开,很好的减弱了由雨滴引起的击溅侵蚀,减少土壤结皮,增大土壤入渗,从而延缓径流产生。由于枯落物与地表隔开但并不能最终改变坡面产流过程,因而随着降雨历时的增加坡面径流强度逐渐增大。而在裸坡上,雨滴直接击打地表,击溅侵蚀使裸坡土壤孔隙淤积堵塞,在径流流动过程中,使土壤结皮,由此裸坡入渗量相对较小,径流较大。在由小到大 4 种雨强下,3 种坡面下径流强度变化波动逐渐增大,差距逐渐减小。从 3 种坡面的对比分析可见,枯落物减少径流主要是由于其拦截降雨减弱击溅侵蚀从而减少土壤结皮增加土壤入渗的作用,这与米宏星等[18]的研究结果一致。孙佳美等[13]在对构树林下枯落物对坡面流水动力学特性影响的研究下发现随着雨强的增大,雨滴动能大幅增加,对于裸坡径流强

度扰动相对较大,表现出大幅波动,而枯落物表现出的降低雨滴动能减少击溅侵蚀的作用随着雨强的增大而逐渐减小,可以说明枯落物在大雨强条件下减流作用的局限性。

3.3　坡面产沙过程

4 种雨强下,裸坡侵蚀产沙率均大于 2 种枯落物覆盖坡面产沙率且变化较大。这可能是由于对于裸坡来说,在小雨强下,雨滴下落动能较小,对坡面击溅侵蚀作用较小,土壤表面被破坏程度减轻,不易形成结皮,利于降雨入渗[24]。Lowdermilk 等[3]对森林枯落物对地表径流及土壤侵蚀的研究中发现产沙主要来自径流冲刷,侵蚀产沙率随径流强度而变化。随着雨强增大,击溅侵蚀作用加大,故初始产沙时侵蚀产沙量大,而随着降雨历时增加,坡面表层泥沙逐渐被带走,形成土壤结皮,径流挟沙量逐渐减少[25]。在 120 mm/h 大雨强下,雨滴直击地表,对坡面表层土壤产生强烈冲击,初始产流时表层松散泥沙即随径流流失,随着降雨进行,在雨滴强烈击打和径流冲刷下,坡面产生细沟,细沟内泥沙亦随径流流失,坡面细沟产生时间不等大小不一,故侵蚀产沙量随着降雨历时的延长呈现出无规律大幅波动,这与薛孟君等[26]研究结果一致。

在不同枯落物铺设方式下,侵蚀产沙量随时间变化不同。这可能是由于地表枯落物的存在增大了地表粗糙度,一方面减小了流速,从而减弱了径流挟沙能力;另一方面其对泥沙有拦截作用,导致产沙量保持相对较低的水平,且在地表有枯落物存在时,侵蚀产沙形式主要以径流携带细颗粒流失,难以带走大量泥沙,故直铺侵蚀产沙量随时间变化波动较小,这与何玉广等[27]的研究结果一致。隔铺侵蚀产沙量随着降雨历时有明显波动是由于在降雨初期,表层土壤较松散,易受径流冲刷,雨滴透过隔网形成径流将坡面松散土粒带走。故开始阶段随着降雨历时的增加侵蚀产沙率增加,随着降雨历时的延长,地表松散土粒减少,随之侵蚀产沙量逐渐下降。

直铺与隔铺相比较,在枯落物的拦截作用下,直铺产沙率可较隔铺减少高达 65%。田培等[28]曾指出坡面侵蚀产沙与细沟形成具有密切关系,通过试验后清除坡面枯落物可发现隔铺下细沟数远多于直铺下细沟数,这可能是由于枯落物直接覆盖在坡面时,其对径流泥沙有良好的拦截效果,而隔铺下,随着雨强增大枯落物减弱雨滴动能作用减小,坡面侵蚀加剧,侵蚀产沙率增大。本研究发现,隔铺相对于裸坡由于降低雨滴动能减弱击溅侵蚀作用可使侵蚀量减少 23%～38%;郑粉莉[24]通过在径流小区覆盖纱网消除雨滴动能试验,发现减弱雨滴动能可使侵蚀量减少 37.9%,与本试验研究结果一致。

前人在室内条件下对枯落物的研究,多采用长 5 m 以下的自制土槽;张祯尧等[20]在规格为 2 m×1 m×0.5 m 土槽上进行了栓皮栎枯落物减流减沙效应研究;孙佳美等[23]在规格为 2 m×0.5 m×0.3 m 土槽上研究模拟降雨下枯落物调控坡面产流产沙过程及特征研究,但鲜有研究在长度 5 m 以上大型土槽上实施。由此可见,以往试验模拟枯落物存在环境存在一定的局限性。本研究应用 10 m×1.5 m×0.6 m 大型自制土槽,可在室内较大尺度上更好的模拟野外枯落物存在环境,使研究结果更具代表性和说服力。本研究采用裸坡与 2 种枯落物不同铺设覆盖方式,对其产流产沙特征进行对比,在不同雨强下分析枯落物对土壤侵蚀过程的影响,虽由于试验条件不同,试验数据与常玉等[12]研究结果有所差异,但结果都揭示枯落物具有良好的减流减沙作用效应,而不同类型枯落物的减流减沙效应是否相一致,还有待于进一步研究。

4　结 论

(1)在降雨过程中,枯落物的存在可有效延长坡面初始产流时间,增加降雨入渗,减小径流流速。对于径流流速的减弱,枯落物的阻滞作用优于其减小雨滴动能作用,且雨强越小,这种作用越明显。

(2)枯落物的减弱雨滴动能、减小击溅侵蚀作用,可有效的减少径流。但随着雨强增大,枯落物减流作用逐渐减弱。

(3)枯落物增加地表粗糙度引起的拦截作用,可有效减少侵蚀泥沙的产生,但由其减少击溅侵蚀作用而减少泥沙的效果不甚明显。枯落物在小雨强下可起到显著的减流减沙作用,但随着雨强的增大,这种作用逐渐减弱。

参考文献:

[1]　张颖,牛健植,谢宝元,等.森林植被对坡面土壤水蚀作用的动力学机理[J].生态学报,2008,28(10):5084-5094.

[2]　曹建生,张万军,刘昌明,等.石子和秸秆覆盖条件下降雨水量转化特征试验研究[J].水利学报,2007,38(3):378-382.

[3]　Lowdermilk W C, Rowe P B. Still further studies on absorption of rainfall in its relations to surficial runoff and erosion[J]. Eos, Transactions, American Geophysical Union,1934,15(2):509-515.

[4]　张峰,彭祚登,安永兴,等.北京西山主要造林树种林下枯落物的持水特性[J].林业科学,2010,46(10):6-14.

[5]　Miller J H, Allen H L, Zutter B R, et al. Soil and pine foliage nutrient responses 15 years after competing vegetation control and their correlation with growth for 13 loblolly pine plantations in the southern United States [J]. Canadian Journal of Forest Research,2006,36(10):

2412-2425.

[6] Anderson C J, Lockaby B G. Research gaps related to forest management and stream sediment in the United States[J]. Environmental Management, 2011, 47(2): 303-313.

[7] Yoshinobu S, Tomo'Omi K, Atsushi K, et al. Experimental analysis of moisture dynamics of litter layers: The effects of rainfall conditions and leaf shapes[J]. Hydrological Processes, 2016, 18(16): 3007-3018.

[8] Nagashima K, Yoshida S, Hosaka T. Patterns and factors in early-stage vegetation recovery at abandoned plantation clearcut sites in Oita, Japan: Possible indicators for evaluating vegetation status[J]. Journal of Forest Research, 2009, 14(3): 135-146.

[9] 侯贵荣,毕华兴,魏曦,等.黄土残塬沟壑区 3 种林地枯落物和土壤水源涵养功[J].水土保持学报,2018,32(2):357-363.

[10] 陈继东,周长亮,李惠丽.接坝地区 9 种典型林分类型枯落物层和土壤层水文效应[J].水土保持研究,2017,24(6):216-221.

[11] 沈振乾,秦天玲,聂汉江,等.森林枯落物对流域水文过程调节机理研究进展[J].世界林业研究,2019(1):36-41.

[12] 常玉,余新晓,陈丽华,等.模拟降雨条件下林下枯落物层减流减沙效应[J].北京林业大学学报,2014,36(3):69-74.

[13] 孙佳美,李瀚之,赵阳,等.枸树林下枯落物对坡面流水动力学特性的影响[J].水土保持学报,2015,29(3):102-105.

[14] 齐记,史宇,余新晓,等.北京山区主要树种枯落物水文功能特征研究[J].水土保持研究,2011,18(3):73-77.

[15] 张峰,彭祚登,安永兴,等.北京西山主要造林树种林下枯落物的持水特性[J].林业科学,2010,46(10):6-14.

[16] 孙继松,雷蕾,于波,等.近 10 年北京地区极端暴雨事件的基本特征[J].气象学报,2015,73(4):609-623.

[17] 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.

[18] 米宏星,陈晓燕,赵宇,等.黄土坡面细沟径流流速的试验研究[J].水土保持学报,2015,29(1):66-69.

[19] 王龙生,蔡强国,蔡崇法,等.黄土坡面细沟形态变化及其与流速之间的关系[J].农业工程学报,2014,30(11):110-117.

[20] 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.

[21] 庞梦丽,朱辰光,翟博超,等.河北省太行山区 3 种人工水土保持林枯落物及土壤水文效应[J].水土保持通报,2017, 37(1):51-56.

[22] 陈奇伯.森林枯落物阻滞地表径流和影响砂粒水力起动条件研究[J].人民黄河, 1996(5):37-39, 62.

[23] 孙佳美,余新晓,李瀚之,等.模拟降雨下枯落物调控坡面产流产沙过程及特征研究[J].水利学报,2017,48(3):341-350.

[24] 郑粉莉.坡面降雨侵蚀和径流侵蚀研究[J].水土保持通报,1998,18(6):17-21.

[25] 谢申琦,高丽倩,赵允格,等.模拟降雨条件下生物结皮坡面产流产沙对雨强的响应[J].应用生态学报,2019,30(2):391-397.

[26] 薛孟君,马岚,张栋,等.雨强对华北土石山区坡面侵蚀及其颗粒富集过程的影响[J].水土保持学报,2017,31(4):11-17.

[27] 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.

[28] 田培,潘成忠,许新宜,等.坡面流速及侵蚀产沙空间变异性试验[J].水科学进展,2015,26(2):178-186.

(上接第 86 页)

[9] 马小玲,张宽地,杨帆,等.坡面细沟侵蚀断面形态发育影响因素分析及动力特性试验[J].农业工程学报,2017,33(4):217-224.

[10] 李响,邓青春,张斌,等.元谋干热河谷微流域细沟形态特征及控制因素[J].中国水土保持科学,2015,13(5):24-30.

[11] 郝好鑫,郭忠录,李朝霞,等.红壤坡面细沟横断面形态及水动力学特性研究[J].长江流域资源与环境,2018,27(2):363-370.

[12] 沈海鸥,郑粉莉,温磊磊,等.降雨强度和坡度对细沟形态特征的综合影响[J].农业机械学报,2015,46(7):162-170.

[13] 蒋芳市,陈培济,黄炎和,等.集中水流下土石混合崩积体坡面侵蚀水动力特征试验研究[J].水土保持学报,2017,31(6):8-14.

[14] 陈俊杰,孙莉英,刘俊体,等.坡度对坡面细沟侵蚀的影响:基于三维激光扫描技术[J].中国水土保持科学,2013,11(3):1-5.

[15] 吴永红,王愿昌,刘斌,等.黄土坡面的土壤侵蚀波动性[J].中国水土保持科学,2005,3(2):28-31.

[16] 李君兰,蔡强国,孙莉英,等.坡面水流速度与坡面含砂量的关系[J].农业工程学报,2011,27(3):73-78.

[17] 王小燕,王天巍,蔡崇法,等.含碎石紫色土坡面降雨入渗和产流产沙过程[J].水科学进展,2014,25(2):189-195.

[18] 王雪松,谢永生,陈曦,等.模拟降雨条件下工程堆积体产流产沙特征研究[J].泥沙研究,2015(4):74-80.

[19] 蒋芳市,黄炎和,林金石,等.多场次降雨对崩岗崩积体细沟侵蚀的影响[J].中国水土保持科学,2014,12(6):1-7.