

模拟降雨条件下侧柏林地枯落物对坡面产流产沙的影响

何玉广¹, 信忠保^{1,2}, 余新晓^{1,3}, 樊登星^{1,2}

(1. 北京林业大学水土保持学院, 北京 100083; 2. 北京林业大学, 北京市水土保持工程技术研究中心, 北京 100083;
3. 北京林果业生态环境功能提升协同创新中心, 北京 100080)

摘要: 以北京山区人工侧柏林地坡面为研究对象, 基于2个2 m×5 m径流小区, 设枯落物覆盖自然坡面与裸露坡面2种处理、大小2种雨强(126, 70 mm/h), 通过对比分析2种处理下坡面产流产沙过程, 揭示林下枯落层覆盖对北京山区坡面产流产沙的影响。结果表明: (1) 与裸坡相比, 枯落物覆盖自然坡面产流产沙分别减少了67.0%和90.6%, 其中, 减沙效益大于减水效益。(2) 无论是枯落物覆盖自然坡面还是裸坡, 坡面产流过程均表现为先增大后趋于稳定的变化规律, 但枯落物覆盖坡面产流趋于稳定的时间较裸坡有所提前。(3) 枯落物覆盖坡面70, 126 mm/h降雨平均产沙速率分别为2.8, 80.8 g/min, 裸坡分别为51.4, 872.7 g/min, 枯落物覆盖坡面产沙率显著小于裸坡($p < 0.05$)。当地表有枯落物覆盖时, 产沙速率与含沙量随产流历时均波动变化不大, 坡面产沙是一个基本稳定的过程; 于裸坡而言, 产沙速率与含沙量在小雨强条件下呈现先增加后趋于稳定的变化规律, 而大雨强条件下, 两者随产流历时先急剧增加后波动降低。(4) 枯落物覆盖坡面产沙量与产流量为线性关系, 而裸坡产沙量随产流量的增加呈幂函数急剧上升。研究结果可为评价北京山区人工林恢复水土保持效益提供理论依据, 同时增进了对北京山区林地坡面产流产沙机制的认识。

关键词: 北京山区; 林地坡面; 枯落层; 人工降雨; 径流; 侵蚀

中图分类号: S715.3

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2017)03-0027-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2017.03.005

Influence of Litter Layer of *Platycladus orientalis* Forests on Runoff and Sediment Yield of the Slope Under Simulated Rainfall

HE Yuguang¹, XIN Zhongbao^{1,2}, YU Xinxiao^{1,3}, FAN Dengxing^{1,2}

(1. College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083;

2. Beijing Engineering Research Center of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083;

3. Beijing Collaborative Innovation Center for Eco-environmental Improvement with Forestry and Fruit trees, Beijing 100080)

Abstract: Based on simulated field rainfall experiment in the Beijing Mountain Area, this paper tried to analyze and evaluate the effects of the litter layer under artificial *Platycladus orientalis* forests on the runoff and sediment yield of the slope by comparing two kinds of treatment conditions (slope surface with litter coverage, and bare slope) under two rainfall intensities (126 mm/h, and 70 mm/h). The results showed that: (1) Compared with the bare slope, the runoff and sediment yield of the slope with litter coverage was significantly reduced by 67.0% and 90.6%, respectively. The benefit of litter layer on reducing the sediment was greater than that on reducing the water. (2) The runoff rate increased initially and then tended to be stable during the slope runoff process on the two types of slopes. Compared to the bare slope, the time for the runoff rate to be stable was shorter on the slope with litter coverage. (3) The average sediment transport rate under 70 mm/h and 126 mm/h rainfall intensity on the slope with litter coverage was 2.8 g/min and 80.8 g/min, respectively, which was significantly less than that on the bare slope with the value of 51.4 g/min and 872.7 g/min under 70 mm/h and 126 mm/h rainfall intensity, respectively. For the slope with litter coverage, sediment transport rate and sediment concentration did not significantly change with runoff

收稿日期: 2016-12-29

资助项目: 国家科技支撑计划项目“华北土石山区防护林体系定向调控技术研究与示范”(2015BAD07B0302); 国家自然科学基金项目(41501292); 科技创新服务能力建设—协同创新中心—林果业生态环境功能提升协同创新中心项目(PXM2017_014207_000043)

第一作者: 何玉广(1991—), 男, 湖南衡阳人, 硕士研究生, 主要从事土壤侵蚀研究。E-mail: heyuguang421@126.com

通信作者: 信忠保(1978—), 男, 山东临沂人, 副教授, 主要从事生态水文学研究。E-mail: xinzhongbao@126.com

duration, and the slope sediment transportation was a relatively stable process. For the bare slope, the sediment transport rate and sediment concentration increased initially and then tended to be stable under 70 mm/h rainfall intensity, while this change sharply increased initially and then decreased fluctuantly under 126 mm/h rainfall intensity. (4) There was a linear relationship between sediment and runoff yield on the slope with litter coverage, while the relationship was an exponent power function on the bare slope. Finally, this study can provide a theoretical basis for evaluating the benefit of plantation restoration in Beijing mountain area on soil and water conservation, and also improve the understanding of the process mechanism of runoff and sediment transportation on the slope of the forest.

Keywords: Beijing mountain area; woodland slope; litter layer; artificially simulated rainfall; runoff; erosion

林地枯落物具有良好的蓄水保土效益^[1-2],是影响坡面产流产沙过程的重要因素,相关研究对于防止水土流失、保持地区良好生态环境具有重要理论意义和现实意义^[3-4]。地表枯落物能够避免降雨直接击打地表、消耗水滴或水流动能^[5],从而减小坡面径流量与泥沙量。枯落物不仅对土壤理化性质具有直接影响^[6],而且枯落物大小、形状、分解速率以及持水能力对地表径流的产生及迁移具有重要影响^[7],进而影响坡面产流产沙过程。此外,不同枯落物类型以及不同枯落物生物量对坡面土壤侵蚀的影响也存在差异^[8]。Benkobi 等^[9]认为当枯落物覆盖度达到 100% 时,可减少泥沙侵蚀量约 87%。张祯尧等^[10]认为栓皮栎林枯落物覆盖可减小总产流量 6.60%~28.17%,减少总产沙量 11.08%~65.08%。孙佳美等^[11]基于室内模拟降雨研究了不同覆被减流减沙效益,认为栓皮栎林枯落物减流减沙效益优于黑麦草和砾石,平均减流效益 46.1%,减沙效益达 98.8%。总体而言,当前关于枯落物对坡面水沙输出过程的调控研究多基于室内模拟降雨条件下开展^[12],并不能如实反映野外条件下林地枯落物覆盖对径流产沙的影响特征。北京山区经过近 60 年的人工林建设,生态环境改善显著,

森林及林下枯落物覆盖发挥了涵养水源、水土防护等重要生态功能^[13]。然而,北京山区人工林生态恢复效益仍缺乏系统性评价。因此,本研究以北京山区人工侧柏林地坡面为研究对象,通过开展野外模拟降雨试验,对比分析枯落层覆盖坡面与裸露坡面产流产沙过程,探讨林地枯落物覆盖对坡面降雨侵蚀过程的影响,为评价北京山区人工侧柏林植被恢复水土保持效益提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于北京西山北京林业大学实验林场。该林场属于暖温带半湿润季风大陆性气候,年均气温为 11.6℃,最高气温 41.6℃,最低气温 -19.6℃,多年平均降雨量约为 630 mm,年均蒸发量 1 900 mm。林场内山地高差大,海拔高度在 100~1 153 m 之间,以 16°~35°坡面为主,森林覆盖率达 96.4%,主要以天然次生林和人工林为主。其中,人工林主要有侧柏、油松、栓皮栎、落叶松和刺槐等。研究区土壤类型主要为淋溶褐土,土层瘠薄,砾石含量较高,粒径大于 2 mm 的石砾含量平均超过 50%,最高可达 85%^[14]。本研究选择样地为人工侧柏林地坡面,试验样地内无其他树种(表 1)。

表 1 样地基本概况

小区 编号	坡长/ m	小区 坡度/(°)	土壤容重/ (g·cm ⁻³)	土壤 孔隙度/%	林分密度/ (株·hm ⁻²)	郁闭度
1 号	5	23	1.31	50.5	2400	0.67
2 号	5	27	1.27	52.1	3000	0.71

1.2 试验方法

1.2.1 径流小区布设 选取人工侧柏林地坡度相近的坡面修建 2 个 2 m×5 m 径流小区,坡度在 23°~27°之间,小区四周用 PVC 板圈围,埋入地表以下 30 cm,出露 15 cm,保持径流小区内部枯枝落叶覆盖原貌不变,2 个小区枯落物覆盖度均在 90% 以上。径流小区于 2014 年 8—9 月修建完成。修建完成的径流小区经过 1 a 沉淀之后,于 2015 年 7—9 月完成野外人工模拟降雨试验。林下枯落物相关特性调查在模拟降雨之前完成,在坡面选取 3 个 30 cm×30 cm 小样方,收集林下枯枝落叶。为

防止破坏径流小区内部枯枝落叶覆盖原貌,所选样方均在小区四周濒临区域。采集枯落物在 60℃ 下烘干计算其单位面积枯落物生物量。采用室内浸泡法测定林下枯落物最大持水率,即将烘干后的枯落物置于水中浸泡 24 h^[15],取出后静置 5 min 左右,待枯落物不再滴水时称重(表 2)。计算公式为:

$$R_{\max} = \frac{M_{24} - M}{M} \times 100\%$$

式中: $R_{\max}$ 为最大持水率(%); M_{24} 为浸泡 24 h 枯落物重(g); M 为枯落物烘干重(g)。

表 2 林地枯落物相关特性

小区编号	坡度/(°)	枯落物平均	单位面积枯落物	枯落物	单位面积枯落物最大
		厚度/cm	生物量/(g·m ⁻²)	最大持水率/%	持水量/(g·m ⁻²)
1	23	1.9	4114.0	60.1	2475.9
2	27	2.0	3422.7	58.3	2188.5

1.2.1 人工降雨设备 野外人工降雨设备为北京师范大学与北京交通大学共同研制的槽式下喷人工模拟降雨机,采用美国制造的 Veejet 80150 型降雨喷头,单台降雨机为 3 个喷头,单喷头降雨覆盖面积 $2\text{ m}\times2.7\text{ m}=5.4\text{ m}^2$,降雨高度 2.5 m(表 3)。野外模拟降雨开始之前,在平地上对降雨机降雨均匀性进行率定,率定用集雨瓶 45 个,计算得降雨均匀系数为 0.84,符合降雨试验要求。

表 3 降雨机可选降雨强度 单位:mm/h

强度档	单次摆动	双次摆动
1	0	0
2	20	29
3	30	60
4	44	92
5	70	126
6	77	152

1.2.3 野外模拟降雨 本研究选择暴雨及以上级别雨强进行模拟降雨,北京地区有记录最大雨强为 122 mm/h^[16]。因此,本研究设计 2 种雨强模拟北京山区大暴雨及暴雨降雨特征,结合降雨机可选降雨强度,实际降雨时采用 5—双次摆动(126 mm/h)模拟大雨强降雨,5—单次摆动(70 mm/h)模拟小雨强降雨。相同雨强重复降雨 2 次。考虑到野外降雨情形下林内树木、地形等因素会影响降雨机的架设,从而导致实际降雨强度与设定雨强不同。因此,降雨过程中,坡面布置 12 个简易雨量筒率定实际降雨强度,控制同一小区相同设定雨强 2 次降雨的实际雨强误差不超过 5%。本试验基于野外 2 个 5 m 坡长径流小区开展人工模拟降雨,2 个小区为重复设置,分别单独进行降雨,同一径流小区先保留枯落物覆盖进行降雨,之后将枯落物完全剥离,再进行降雨。大小雨强降雨交叉进行,按先大雨强后小雨强的顺序降雨。本试验共完成降雨 16 场次。

降雨开始后,用秒表记录初始产流时间。产流后前 10 min 以 2 min 为间隔采集径流泥沙样 250 mL,之后以 5 min 为间隔采样至 45 min。降雨完成后将所有径流泥沙充分混合均匀后采集 3 个 1 L 泥水样,采用置换法计算总产沙量。所有采集样品带回实验室后在 60 ℃下烘干至恒重,并称重。

1.3 数据处理方法

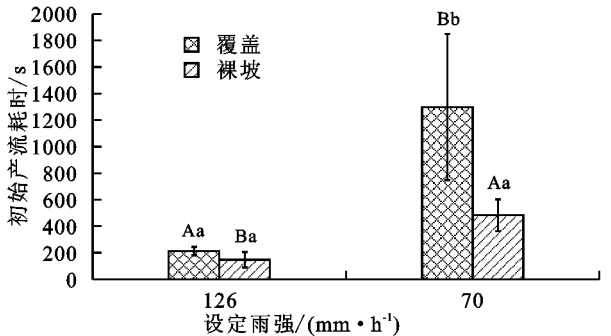
所有数据采用 Excel 2016 和 SPSS 19.0 软件进行数据分析。采用单因素方差分析(One-Way ANO-

VA)和最小显著差异法(LSD)比较不同数据组间的差异性,采用 Pearson 系数分析因素间相关性。

2 结果与分析

2.1 林下枯落物减流减沙效益

2.1.1 初始产流耗时 当雨强为 70 mm/h,枯落物覆盖坡面与裸坡初始产流耗时分别为 1 297.8,482.5 s,枯落物覆盖坡面较裸坡开始产流所需时间增加了 62.8%($p<0.05$)。当雨强为 126 mm/h,枯落物覆盖坡面与裸坡初始产流耗时分别为 212.8,147.0 s,覆盖坡面较裸坡初始产流耗时延迟了 65.8 s,但两者并无显著差异($p>0.05$)。无论是枯落物覆盖自然坡面还是裸坡,相同处理不同雨强的初始产流耗时差异均达显著水平($p<0.05$)(图 1)。上述结果表明,枯落物覆盖与降雨强度对初始产流耗时均有重要影响,然而,随着雨强增大,枯落物覆盖对初始产流耗时的影响程度降低。



注:不同小写字母表示覆盖与裸坡初始产流耗时差异显著($p<0.05$);不同大写字母表示不同雨强初始产流耗时差异显著($p<0.05$)。

图 1 枯落物覆盖对初始产流耗时的影响

2.1.2 径流深 当设定雨强为 70 mm/h,枯落物覆盖自然坡面与裸坡次降雨平均径流深分别为 2.4, 9.2 mm,两者差异显著($p<0.05$),枯落物覆盖坡面径流深较裸坡减少了 75.0%。当雨强为 126 mm/h,枯落层覆盖坡面与裸坡径流深分别为 14.2, 34.8 mm,两者差异亦显著($p<0.05$),前者与后者相比减少了 58.9%。总体而言,与裸坡相比,枯落物覆盖自然坡面径流深平均减少了 67.0%(表 4)。上述结果表明,林下枯落物能显著减小坡面径流输出量,且小雨强减流效益优于大雨强。

2.1.3 土壤侵蚀模数 由表 4 可知,当雨强为 70 mm/h,枯落物覆盖自然坡面与裸坡土壤侵蚀模数分别为 13.3,210.2 t/km²,前者较后者减少了 93.4%

($p<0.05$);当雨强增加为 126 mm/h,枯落物覆盖自然坡面与裸坡侵蚀模数分别为 344.8,3757.8 t/km²,枯落物覆盖坡面较裸坡减小了 87.8% ($p<0.05$),且与小雨强相比,2 种处理坡面土壤侵蚀模数均有显著增加($p<0.05$)。总体而言,次降雨枯落物

覆盖自然坡面土壤侵蚀模数较裸坡平均减少了 90.6% ($p<0.05$)。结果表明,林下枯落物的存在能显著降低坡面土壤侵蚀模数,枯落物覆盖坡面与裸露坡面土壤侵蚀模数相差一个数量级。此外,随着降雨强度增加,土壤侵蚀模数亦有明显增加。

表 4 次降雨径流深与土壤侵蚀模数

小区 编号	设定雨强/ (mm·h ⁻¹)	径流深/mm			土壤侵蚀模数/(t·km ⁻²)		
		裸坡	覆盖	减少率/%	裸坡	覆盖	减少率/%
1 号	126	23.46	11.35	51.6	1372.6	209.9	84.7
	70	8.09	1.27	84.3	125.7	4.5	96.4
	126	35.33	16.41	53.6	2231.9	482.3	78.4
	70	9.95	3.93	60.5	195.4	25.3	87.1
2 号	126	34.54	8.64	75.0	5630.2	83.0	98.5
	70	8.08	1.44	82.2	293.9	4.1	98.6
	126	45.87	20.35	55.6	5796.3	604.0	89.6
	70	10.64	2.87	73.0	225.7	19.2	91.5
平均值	70	9.2±1.3aA	2.4±1.3bA	75.0±10.8A	210.2±69.8aA	13.3±10.7bA	93.4±5.2A
	126	34.8±9.2aB	14.2±5.2bB	58.9±10.8A	3757.8±2286.1aB	344.8±240.0bB	87.8±8.5A
总体				67.0±13.2		90.6±7.2	

注:不同小写字母表示覆盖与裸坡间差异显著($p<0.05$);不同大写字母表示不同雨强间差异显著($p<0.05$)。

2.2 坡面产流过程

由图 2 可知,当雨强设定为 70 mm/h,裸坡径流量在前 8 min 迅速增加,之后缓慢增加,在 25 min 左右达到稳定状态,约为 2.37 L/min。枯落物覆盖坡面径流流量随产流历时增加较为缓和,产流后 20 min 输出流量即趋于稳定,达到稳定状态的时间较裸坡有所提前,稳定值约为 0.66 L/min,稳定流量较裸坡减小了 72.1%。

由图 2 可知,当雨强增加为 126 mm/h 时,2 种处理坡面径流流量随产流历时变化规律均表现为先增大后趋于稳定。裸坡达到稳定流量约为 8.02 L/min,显著大于枯落物覆盖坡面的稳定输出流量 3.29 L/min($p<0.05$)。相比于裸坡,枯落物覆盖坡面稳定流量减小了 54.8%。此外,当地表有枯落物覆盖时,坡面产流后 8 min 左右径流流量即达稳定状态,而裸坡输出流量在 15 min 左右才趋于稳定,达到稳定的时间较枯落物覆盖坡面有所滞后。

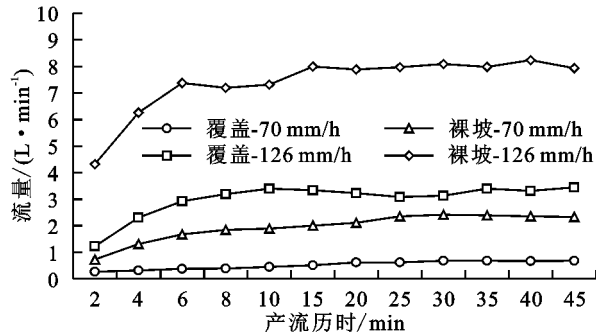


图 2 坡面径流流量随产流历时变化规律

综上所述,无论雨强大小,枯落物覆盖自然坡面与裸坡产流过程均呈现先增大后趋于稳定的变化规律,但枯落物覆盖坡面自产流开始达到稳定的时间较裸坡

有所提前。其中,小雨强时(70 mm/h)提前约 5 min,达到稳定状态所需时间减少了 20%;大雨强时(126 mm/h)提前了约 7 min,所需时间减少了 46.7%。

2.3 坡面产沙过程

由图 3 可知,当雨强为 70 mm/h,枯落物覆盖坡面平均产沙速率为 2.8 g/min,裸坡为 51.4 g/min,与裸坡相比,枯落物覆盖坡面产沙速率减少了 94.6%。裸坡产沙速率随产流历时变化规律表现为先增加,25 min 后基本趋于稳定,约为 63.2 g/min。枯落物覆盖坡面产流后前 20 min 产沙速率基本保持稳定,之后有所增加,25 min 后再次呈稳定趋势,维持在 4.43 g/min 左右。枯落物覆盖自然坡面含沙量随产流历时基本保持稳定,约为 5.5 kg/m³;裸坡则呈波动增加趋势,但变化幅度不大,变化范围在 25~30 kg/m³ 之间。

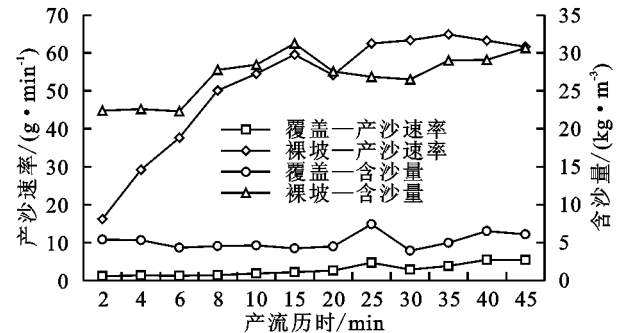


图 3 小雨强条件下(70 mm/h)产沙速率与含沙量随产流历时变化规律

由图 4 可知,当雨强为 126 mm/h,枯落物覆盖坡面平均产沙速率为 80.8 g/min,裸坡为 872.7 g/min,后者显著大于前者($p<0.05$)。枯落物覆盖坡面产沙速率随产流历时变化规律表现为先增加后降低,30 min 后趋于平稳,约为 92.4 g/min,且相比裸

坡,枯落物覆盖坡面产沙速率始终维持在较低水平。裸坡产沙速率在产流初期急剧增加,最高达 $1\,169.3\text{ g/min}$,之后波动降低,25 min 后基本趋于稳定。含沙量变化规律与产沙速率基本类似。其中,枯落物覆盖坡面含沙量随产流历时变化始终保持稳定,约为 24.8 kg/m^3 ;而裸坡含沙量在产流开始后前 4 min 急剧增加,最高达 162.3 kg/m^3 ,之后波动降低,在产流后 15~25 min 之间出现骤降,从 140.5 kg/m^3 快速减少为 88.3 kg/m^3 ,25 min 后,含沙量基本趋于稳定,维持在 86.6 kg/m^3 左右。

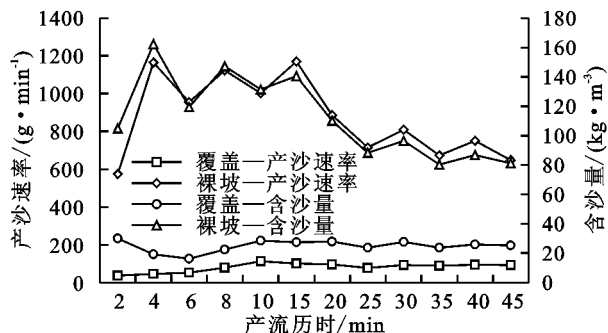


图4 大雨强条件下(126 mm/h)产沙速率与含沙量随产流历时变化规律

2.4 产沙量与径流量的关系

由图5可知,无论是枯落物覆盖自然坡面还是裸坡,产沙量与产流量相关性均达显著水平($p<0.05$),枯落物覆盖坡面产沙量与产流量呈线性函数关系,而裸坡产沙量随产流量增加呈幂函数迅速增加。根据拟合方程实际物理意义可知,枯落物覆盖自然坡面拟合得线性方程斜率是一个稳定值,表明其径流输沙过程基本保持稳定,且径流携沙能力较弱。而对于裸坡,其斜率随产流量增加而增加,表明裸坡产流量越大,其径流含沙量越高,亦即裸坡侵蚀产沙过程较枯落物覆盖坡面要强烈的多。

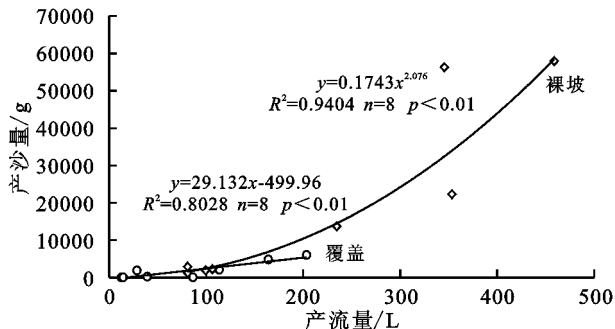


图5 产沙量与产流量的关系

3 讨论

3.1 枯落物减流减沙效益

林下枯落物覆盖能避免降雨直接击打地表,截留前期降水,增加降雨入渗^[17],从而对坡面产流产沙具有重要影响。一般而言,林下枯落物的存在能够减小坡面径流输出量,从而降低径流系数^[18]。此外,枯落物覆盖坡

面径流携沙量与携沙能力均较裸坡明显减小^[5]。本研究表明,枯落物覆盖自然坡面产流量和产沙量较裸坡分别减少了 67.0%,90.6%,且裸坡平均产沙速率是枯落物覆盖坡面的 14.5 倍,枯落物减水减沙效益显著。郭汉清等^[19]研究表明,油松、华北落叶松和辽东栎林地枯落物覆盖坡面产流量较撂荒地分别减小了 19%,14%,30%,产沙量分别减少了 77.0%,72.8%,78.6%。常玉等^[20]研究表明,坡面产流产沙量随枯落物单位面积生物量增加而减小,枯落物生物量达到 200 g 后,坡面总产沙量较裸坡可减少 92% 以上。Miyata 等^[21]基于日本扁柏林地研究表明,裸露坡面年均土壤侵蚀模数是枯落物覆盖坡面的 3.7 倍。本研究所得结论与前人基本类似。地表枯落物的存在明显减小了坡面产沙速率,其原因主要是枯落物的存在增加了坡面糙率,减小了径流流速,从而降低了坡面径流携沙能力^[22]。Sun 等^[23]基于室内人工模拟降雨试验表明,裸坡平均产沙速率为 21.594 g/min ,坡面栽植灌木荆条与构树平均产沙速率分别为 $16.782, 11.264\text{ g/min}$,2 种栽植灌木坡面同时有林枯落物存在时产沙速率分别减小为 $4.220, 2.873\text{ g/min}$,枯落物减小产沙速率效应明显。本研究所得结论与之类似。Seitz 等^[24]基于中国南方红壤地区研究了枫香树、楠树、枹树、木荷树、甜槠、锥栗、青冈栎等 7 种不同树种类型枯落物对坡面土壤侵蚀的影响,认为不同树种枯落物坡面土壤侵蚀速率存在显著差异,总体而言,裸坡平均产沙速率是枯落物覆盖坡面的 1.8 倍。本文所得结论大于 Seitz 等^[24]所得结论,其原因跟林地枯落物类型不同有关。不同林地枯落物因其形状、大小及分解速率等特性均存在差异,导致其对坡面产流产沙的影响亦有所不同。有待进一步研究不同林地枯落物对坡面产流产沙的影响,并进一步量化枯落物厚度或枯落物生物量与坡面产流量、产沙量的关系。

3.2 径流产沙过程

研究表明,不论雨强大小及地表有无枯落物覆盖,坡面径流输出过程均表现为先增加后趋于稳定的变化规律,所得结论与前人类似^[10-11]。然而,本研究表明枯落物覆盖坡面输出流量达到稳定的时间较裸坡有所提前。其原因主要是林下枯落物的存在使坡面开始产流所需时间较裸坡显著延长,其产流时枯落物层与土壤层已吸持的水分要高于裸坡。因此,枯落物覆盖坡面产流后土壤达到稳定入渗速率所需时间短于裸坡,亦即输出流量趋于稳定状态的时间较裸坡提前。

总体而言,与裸坡相比,枯落物覆盖坡面产流产沙逐步缓慢增加,达到稳定径流产沙状态需要时间较短,径流含沙量随产流历时始终保持稳定,且产沙速率显著小于裸坡。因此,枯落物覆盖自然坡面泥沙侵蚀是

一个基本稳定的过程。究其原因主要是地表有枯落物存在时,泥沙侵蚀主要以细颗粒随径流流失为主^[25],难以带走大量泥沙。因此,含沙量随产流历时没有大幅度的变化,产沙速率也较小。于裸坡而言,大雨强条件下,泥沙侵蚀过程可概括为两个阶段,即泥沙侵蚀急剧增加阶段和波动降低阶段;小雨强条件下,可划分为侵蚀强度增长阶段和稳定阶段。值得注意的是,本试验中同一小区连续进行降雨会导致后续降雨泥沙侵蚀量的增加。这是因为前期降雨在坡面已形成侵蚀细沟,重复降雨时坡面产生的径流沿沟侵蚀,带走大量泥沙,因此后续降雨表现为在产流初期泥沙侵蚀强度急剧增加,大雨强尤为明显,之后由于可侵蚀泥沙量的减少,泥沙侵蚀强度呈波动下降趋势。关于侵蚀产沙过程不同研究者所得结论不尽相同,一般划分为 2 个阶段^[26]、3 个阶段^[27]或 5 个阶段^[28],结论不同的原因可能与土壤类型、地被覆盖等因素不同有关。

4 结 论

(1)与裸坡相比,枯落层覆盖坡面产流产沙分别减少了 67.0%,90.6%,林下枯落层具有良好的减水减沙效益。

(2)2 种处理坡面产流过程呈先增加后趋于稳定的变化规律;枯落物覆盖自然坡面产沙速率与含沙量随产流历时变化幅度不大,且相比于裸坡始终维持在较低水平,是一个基本稳定的输出过程。于裸坡而言,雨强较小时,呈先增加后趋于稳定的变化规律,而大雨强条件下,侵蚀产沙过程表现为先急剧增加后波动降低的规律。

(3)裸坡产沙量随产流量的增加呈幂函数急剧增加,而枯落物覆盖坡面产沙量与产流量为线性关系。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 刘芝芹,郎南军,彭明俊,等. 云南高原金沙江流域森林枯落物层和土壤层水文效应研究[J]. 水土保持学报,2013,27(3):165-173.
- [3] Cao L X, Liang Y, Wang Y, et al. Runoff and soil loss from *Pinus massoniana* forest in southern China after simulated rainfall[J]. Catena, 2015, 129(6):1-8.
- [4] 于国强,李占斌,李鹏,等. 野外模拟降雨条件下径流侵蚀产沙试验研究[J]. 水土保持学报,2009,23(4):10-14.
- [5] 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):1-10.
- [6] Kooijman A M, Cammeraat E. Biological control of beech and hornbeam affects species richness via changes in the organic layer, pH and soil moisture characteristics [J]. Functional Ecology, 2010, 24(2): 469-477.
- [7] Purahong W, Kapturska D, Pecyna M J, et al. Influence of different forest system management practices on leaf litter decomposition rates, nutrient dynamics and the activity of ligninolytic enzymes: a case study from central European forests[J]. PLoS ONE, 2014, 344(4): 75-85.
- [8] Martin C, Mandy P, Alewell C, et al. Interrill erosion at disturbed alpine sites: Effects of plant functional diversity and vegetation cover [J]. Basic and Applied Ecology, 2010, 11(7): 619-626.
- [9] Benkobi L, Trlica M J, Smith J L, et al. Soil loss as affected by different combinations of surface litter and rock [J]. Journal of Environmental Quality, 1993, 22(4): 657-661.
- [10] 张桢尧,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):55-64.
- [11] 孙佳美,余新晓,梁洪儒,等. 模拟降雨条件下不同覆被减流减沙效益与侵蚀影响因子[J]. 水土保持通报,2015,35(2):46-51.
- [12] Liu Y J, Yang J, Hu J M, et al. Characteristics of the surface-subsurface flow generation and sediment yield to the rainfall regime and land-cover by long-term in-situ observation in the red soil region, Southern China [J]. Journal of Hydrology, 2016, 539(8): 457-467.
- [13] 徐娟. 北京山区典型森林枯落物层生态功能研究[D]. 北京:北京林业大学,2010.
- [14] 樊登星. 北京山区坡面土壤侵蚀响应特征及模型模拟研究[D]. 北京:北京林业大学,2014.
- [15] 程金花,张洪江,张东升,等. 贡嘎山冷杉纯林地被物及土壤持水特性[J]. 北京林业大学学报,2002,24(3):45-49.
- [16] 李裕宏. 1959 年北京城大水回顾[J]. 北京水务,1999(4):21-23.
- [17] 何常清,于彭涛,管伟,等. 华北落叶松枯落物覆盖对地表径流的拦阻效应[J]. 林业科学研究,2006,19(5): 595-599.
- [18] 莫非,于澎涛,王彦辉,等. 六盘山华北落叶松林和红桦林枯落物持水特征及其截持降雨过程[J]. 生态学报,2009,29(6):2868-2876.
- [19] 郭汉清,韩有志,白秀梅. 不同林分枯落物水文效应和地表糙率系数研究[J]. 水土保持学报,2010,24(2): 179-183.
- [20] 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.
- [21] Miyata S, Kosugi K, Gomi T, et al. Effects of forest floor coverage on overland flow and soil erosion on hillslopes in Japanese cypress plantation forests[J]. Water Resources Research, 2009, 45(6): 1-17.
- [22] 孙佳美,李瀚之,赵阳,等. 构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.