

模拟降雨条件下植被调控坡面水沙输出过程研究^①

侯沛轩, 孙佳美, 余新晓*, 李瀚之

(北京林业大学水土保持与荒漠化防治教育部重点实验室, 北京 100083)

摘要: 为研究不同植被覆盖对坡面水沙输出过程调控效应, 本文通过人工模拟降雨试验的方法, 对 3 种典型的乔木灌木草本植被即构树、荆条和黑麦草, 在坡度 10°、降雨强度 30 mm/h 和坡度 20°、降雨强度 30 mm/h 条件下的水沙输出的过程进行了试验研究, 并对结果进行了综合分析。研究表明: 3 种植被整个产流过程的径流量均呈现先上升后逐渐稳定的趋势, 产沙量呈先上升后下降, 再逐渐保持稳定的趋势; 构树、荆条和黑麦草均对坡面产流产沙过程有良好的调控能力, 能够减少径流量和产沙量, 其中黑麦草对产流和产沙均表现出较强的调控力, 其次是构树, 荆条最差。在对坡面径流流速的调控方面, 流速整体呈现先增加后稳定的趋势, 三者对径流流速的调控能力: 黑麦草>荆条>构树。

关键词: 模拟降雨; 植被; 坡面; 径流; 泥沙

中图分类号: S152.7.2

降雨过程中产生的径流以及其引起的侵蚀产沙, 是当前我国乃至世界面临的严重环境问题之一^[1]。影响坡面土壤侵蚀的因素很多^[2-3], 其中地表覆被条件是影响坡面乃至流域水沙输出的重要因素之一^[4-5], 不同植被均具有一定的水土保持功效^[6], 植被的地上部分可以拦蓄地表径流^[7-8], 其地下部分可以改善土壤的理化特性, 从而增加土壤的入渗能力^[9-11], 进而达到保持水土的效果。

不同植被条件对坡面水沙输出的调控能力有所不同, 国内外学者对不同植被调控坡面水沙输出过程进行了大量的研究, 主要集中在对单一植被的坡面水沙输出的过程研究^[12-15], 而相同条件下对比不同植被的调控能力的研究较少, 但探讨不同类型植被对坡面水沙输出的调控作用, 对正确地评价植被的减蚀作用^[16]以及水土保持措施的配置优化有着重要意义。人工模拟降雨试验的优点在于试验条件较稳定、易控制^[17-18]。本研究以构树、荆条、黑麦草为代表的乔木、灌木、草类为例, 采用人工模拟降雨的试验方法对上述植被对坡面水沙输出过程进行了研究, 对其产流产沙以及流速^[19]进行系统的对比分析。

1 材料与方法

1.1 试验装置

模拟降雨试验于 2014 年 6—8 月在北京林业大学鹫峰降雨大厅进行。降雨大厅试验装置主要由降雨系统和变坡土槽构成, 总控制降雨面积为 256 m², 共分为 4 个 8 m × 8 m 的降雨区。雨滴模拟喷头采用不锈钢材质的旋转下喷式喷头, 通过 4 种不同规格的喷头叠加模拟自然降雨, 其有效降雨高度为 12 m, 降雨均匀度 >85%, 可模拟 10 ~ 300 mm/h 降雨强度, 相对误差小于 1%, 可同时降雨, 也可分别降雨。试验选取的变坡土槽规格为: 长 2 m, 宽 0.5 m, 深 0.3 m。土槽底部钻有透水孔, 保证试验土槽内不存在积水, 同时尾部设有 V 形集流口, 用于收集坡面径流和泥沙。

1.2 试验材料

试验中选取的乔木、灌木及草类植被分别为构树、荆条和黑麦草。其中构树和荆条均选取在自然状态下生长 3~5 个月的具有一定基底直径、高度和冠幅的植株移植至室内进行试验, 如表 1 所示; 而黑麦草则根据其实际生长状态, 大约在种植两个月后进行试验。

基金项目: 国家自然科学基金项目(41430747)和国家林业局林业公益性行业科研专项(20130430104)资助。

* 通讯作者(yuxinxiao11@126.com)

作者简介: 侯沛轩(1991—), 男, 河北石家庄人, 硕士研究生, 主要从事水土保持研究。E-mail: hpx9186@sina.com

表 1 树种选择
Table 1 Selection of tree species

树种	编号	基径 (cm)	树高 (m)	冠幅 (m)
构树	BP1	2.54	1.68	0.8 × 0.7
	BP2	2.71	1.67	0.7 × 0.6
荆条	VN1	1.31	1.83	1.1 × 1.2
	VN2	1.35	1.79	1.2 × 0.9

表 2 试验用土机械组成
Table 2 Particle size composition of soil sample

粒径(mm)	>0.900	0.500~0.900	0.180~0.500	0.100~0.180	0.075~0.100	<0.075
百分比(%)	12.61	24.22	27.30	18.36	14.00	3.52

填土,共分3层,每层10 cm;装土时应注意保持土面平整,在填装每层土之前,应先抓毛下层土壤,防止土的滑移,导致土壤分层。同时为保证试验时土壤起始含水量相同,先对坡面土壤进行预降雨,待土壤含水量达到饱和即坡面刚开始产流时停止降雨,用塑料布盖住24 h后用于降雨试验。

试验降雨强度为30 mm/h,坡度为10°和20°,3种植被盖度均为100%。计时随降雨开始同步进行,首先记录开始产流的时间,待产流后继续保持降雨60 min。由于降雨初期的径流泥沙变化量较大,所以在产流后的前10 min内每2 min取一个径流样;之后径流逐渐稳定,每5 min取一个样。收集的样品,先测量径流体积,再采用烘干法测量其携带的泥沙量,并对泥沙进行粒径分析,研究坡面产沙特征。

降雨过程中在坡面产流后,采用染色剂法在测量过程中每10 min测一次流速,测取位置选取距离坡底30~130 cm处,测取区间长度设定为1 m。在坡

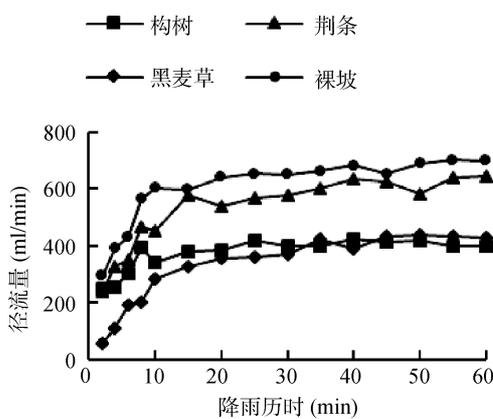


图 1 坡度 10°、降雨强度 30 mm/h 径流量变化曲线
Fig. 1 Curves of runoff changes of Slope 10°, rainfall intensity 30 mm/h

两种坡度下的径流量整体都呈现一个先增加后趋于稳定的趋势,产流初期径流量变化较大。相比裸

试验用土为褐土,取自北京市昌平区,属于典型的华北土石山区土壤。填土前过10 mm筛,除去石块、植物根系等杂物,试验前对土壤粒径组成进行分析,其颗粒组成如表2所示。

1.3 试验方法

土壤装槽密度为1.34 g/cm³,按此密度进行分层

土表面每隔0.1 m平行测量5个流速数据,再取其平均值乘以修正系数0.75作为径流平均流速^[20]。

2 结果与分析

2.1 不同植被覆盖对坡面产流的影响

坡面径流产生的先决条件为降雨强度大于土壤入渗能力。在降雨初期,土壤含水量较少,入渗能力较强,难以产生坡面径流;随着降雨历时的增加,土壤含水量提高,入渗能力下降,当入渗能力小于降雨强度时,坡面开始产流。随着降雨的进行,土壤含水量达到饱和,入渗能力基本不再变化,从而形成较稳定的坡面径流。植被对降雨的截留作用以及对土壤入渗能力的改良会影响坡面的产流过程。

图1和图2分别为试验条件为坡度10°、降雨强度30 mm/h和坡度20°、降雨强度30 mm/h不同植被覆盖的坡面径流量随径流产生后降雨历时变化的曲线图(采用配对T检验,不同植被覆盖坡面差异显著, $\alpha = 0.05$)。

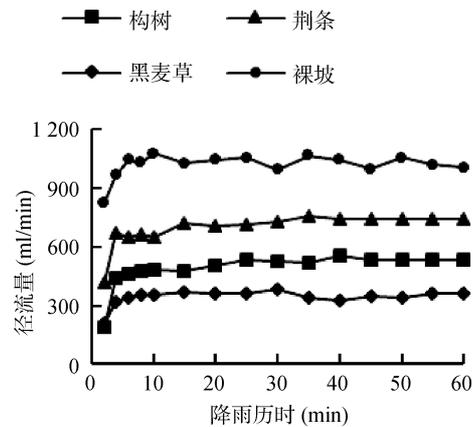


图 2 坡度 20°、降雨强度 30 mm/h 径流量变化曲线
Fig. 2 Curves of runoff changes of Slope 20°, rainfall intensity 30 mm/h

地,有植被覆盖的坡面径流量有明显的下降,在坡度10°、降雨强度30 mm/h的条件下,径流量在产流后

20 min 左右基本稳定,当坡度上升到 20° 时,稳定时间缩短为 10 min ;随着坡度的增加,径流稳定时间减少,径流量有一定程度的增加。

在图 1 和图 2 中黑麦草覆盖的坡面产流达到稳定时的径流量均最小,而后依次为构树、荆条和裸地。在坡度 10°、降雨强度 30 mm/h 的条件下,黑麦草覆盖的坡面稳定径流量约为 400 ml/min,相比裸地,径流量减少了 38.46%;构树与其基本相同,荆条覆盖的坡面稳定径流量约为 600 ml/min,相比裸地减少了 7.7%。在坡度 20°、降雨强度 30 mm/h 的条件下,黑麦草覆盖的坡面稳定径流量约为 300 ml/min,相比裸地减少了 71.43%;构树覆盖的坡面稳定径流量约为 500 ml/min,相比裸地减少了 52.38%;荆条覆盖的坡面稳定径流量为

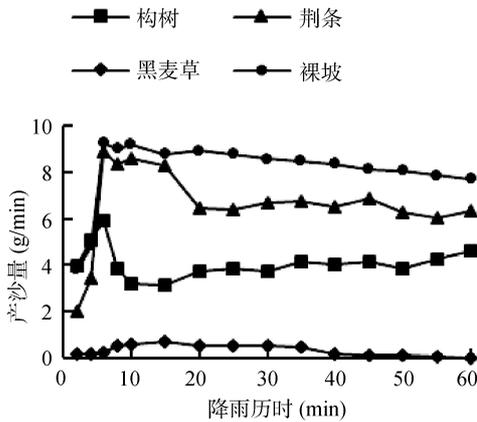


图 3 坡度 10°、降雨强度 30 mm/h 产沙量变化曲线
Fig. 3 Curves of sediment yield changes of Slope 10°, rainfall intensity 30 mm/h

从两图中均可看出黑麦草覆盖的坡面产沙量最少,构树覆盖的坡面产沙量略低于荆条覆盖的坡面。黑麦草覆盖的坡面产沙量较稳定,坡度 10° 时产沙量一直保持在 0.5 g/min 以下,稳定时约为 0.25 g/min ;坡度为 20° 的条件下,最高产沙量为 2.5 g/min ,稳定后保持在 1 g/min 左右,随坡度升高,稳定时产沙量增加了一倍。试验条件为坡度 10°、降雨强度 30 mm/h 的构树覆盖坡面稳定产沙量在 4.0 g/min 左右;坡度 20° 时,稳定产沙量为 8 g/min 左右。荆条在两个试验条件下的稳定产沙量分别为 6.5 g/min 和 9.5 g/min。随坡度的增加,坡面径流动力增加,对泥沙的冲击作用变大,导致产沙量的增加。

图 3 中,相比裸地,黑麦草覆盖的坡面稳定产沙量减少了 97.06%,构树覆盖的坡面稳定产沙量减少了 52.94%,荆条覆盖坡面的稳定产沙量减少了 23.53%。当坡度升至 20° 时,黑麦草覆盖的坡面稳

700 ml/min,相比裸地减少了 33.33%。可见黑麦草对于降雨坡面径流的调控能力较好,构树次之,荆条较差。

2.2 不同植被覆盖对坡面产沙的影响

坡面产沙过程与产流过程相关,但存在一定差异。降雨初期,坡面表层土壤颗粒比较松散,抗蚀性差,易受雨滴击溅和径流冲刷,随着降雨历时的增加,地表松散土粒逐渐减少,表层结皮开始形成,土壤入渗趋于稳定,降雨和径流对坡面土壤侵蚀减弱,坡面产沙量减小,逐渐达到稳定状态。

图 3、图 4 分别为坡度 10°、降雨强度 30 mm/h 和坡度 20°、降雨强度 30 mm/h 不同植被覆盖的坡面产沙量曲线图(采用配对 T 检验,不同植被覆盖坡面差异显著, $\alpha = 0.05$)。

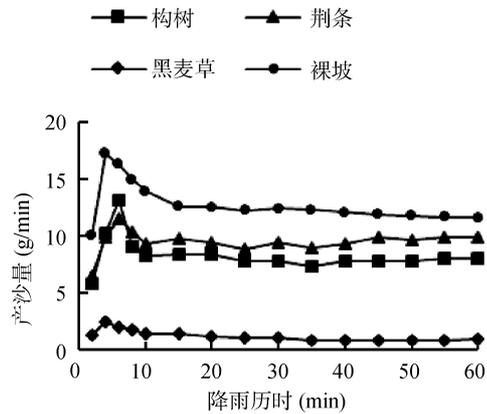


图 4 坡度 20°、降雨强度 30 mm/h 产沙量变化曲线
Fig. 4 Curves of sediment yield changes of Slope 20°, rainfall intensity 30 mm/h

定产沙量相比裸地减少了 92%,构树覆盖的坡面稳定产沙量相比裸地减少了 0.36%,荆条覆盖坡面的稳定产沙量减少了 24%。可以看出对于降雨坡面产沙,黑麦草有较好的调控能力。

2.3 不同植被类型对坡面流速的影响

图 5、图 6 分别为坡度 10°、降雨强度 30 mm/h 和坡度 20°、降雨强度 30 mm/h 不同植被覆盖的径流流速随降雨历时变化的曲线图(采用配对 T 检验,不同植被覆盖坡面差异显著, $\alpha = 0.05$)。从中可以看出,两种试验条件下的坡面径流流速随时间的变化较为一致:产流初期,坡面径流平均流速随降雨历时的增加而增加,之后逐渐稳定。

图 5 中,黑麦草覆盖的坡面径流流速最低,稳定时径流流速约为 0.035 m/s,荆条和构树覆盖的坡面径流稳定流速分别为 0.060 m/s 和 0.070 m/s。相比裸地径流流速 0.080 m/s,黑麦草、荆条和构树径流流速分别降低了 56.25%、25% 和 12.5%。

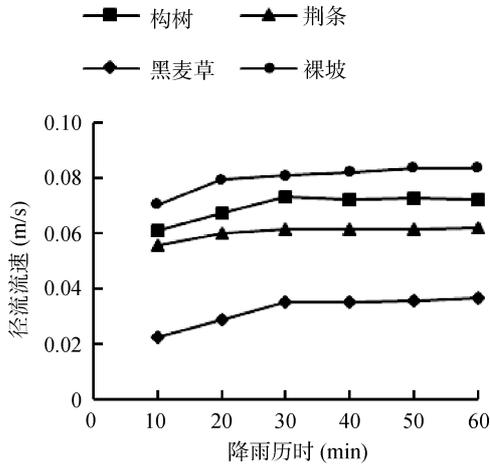


图 5 坡度 10°、降雨强度 30 mm/h 径流流速变化曲线
Fig. 5 Curves of runoff velocity changes of slope 10°, rainfall intensity 30 mm/h

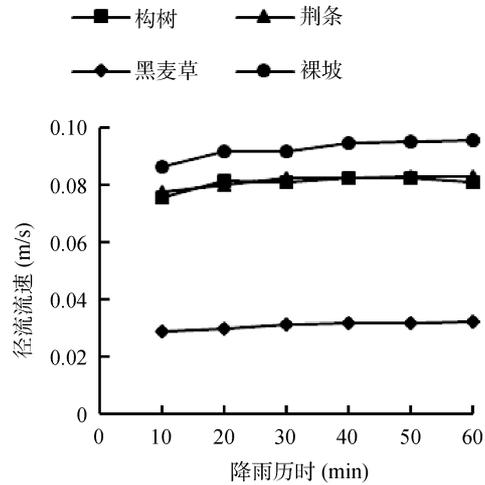


图 6 坡度 20°、降雨强度 30 mm/h 径流流速变化曲线
Fig. 6 Curves of runoff velocity changes of slope 20°, rainfall intensity 30 mm/h

当坡度提升至 20°(图 6), 曲线变平缓, 达到稳定流速的时间缩短, 流速相对有少许增加; 整体趋势仍是黑麦草覆盖的坡面径流流速最低, 约为 0.03 m/s, 荆条和构树径流流速大致相同, 约为 0.08 m/s。相比裸地, 黑麦草覆盖的坡面径流流速减少了 66.67%, 荆条以及构树覆盖的坡面径流流速减少了 11.11%。

通过以上试验数据可见对于降雨坡面水沙输出的调控能力上, 黑麦草相比构树和荆条较强, 这是由于林地植被主要是通过冠层对降雨的拦截作用以及根系削弱侵蚀动力、增加土壤入渗的方式来进行水沙调控; 而草地植被主要通过地表植被冠层直接拦截径流泥沙以实现水沙调控, 流速的数据分析结果同样证明了这点。

3 结论

1) 在对坡面降雨径流的调控上, 构树、荆条和黑麦草均有良好的调控能力, 在一定程度上减少了产流量; 三者当中, 黑麦草的调控能力最强, 其次是构树, 荆条最差。

2) 在对坡面降雨产沙的调控上, 构树、荆条和黑麦草表现出了同产流相同的趋势, 其产沙调控能力: 黑麦草>构树>荆条。

3) 在坡面径流流速方面, 黑麦草覆盖坡面的径流流速最小, 荆条小于构树, 三者对径流流速的调控能力: 黑麦草>荆条>构树。

参考文献:

[1] 王占礼, 靳雪艳, 马春艳, 等. 黄土坡面降雨产流产沙过程及其响应关系研究[J]. 水土保持学报, 2008, 22(2): 24-28

[2] 赖奕卡. 坡面土壤侵蚀影响因子研究进展[J]. 亚热带水土保持, 2008, 20(1): 12-16

[3] 王占礼. 中国土壤侵蚀影响因素及其危害分析[J]. 农业工程学报, 2000, 16(4): 14-16

[4] 朱智勇, 解建仓, 李占斌, 等. 坡面径流侵蚀产沙机理试验研究[J]. 水土保持学报, 2011, 25(5): 1-7

[5] 乔光建, 成淑敏. 流域植被对径流调节作用的实验研究[J]. 水文, 2011, 31(4): 50-54

[6] 马金平. 植被保持水土效益研究综述[J]. 山西水土保持科技, 2005(1): 13-15

[7] 时忠杰, 张宁南, 何常清, 等. 桉树人工林冠层、凋落物及土壤水文生态效应[J]. 生态学报, 2010, 30(7): 1 932-1 939

[8] 朱冰冰, 李占斌, 李鹏, 等. 草本植被覆盖对坡面降雨径流侵蚀影响的试验研究[J]. 土壤学报, 2010, 47(3): 401-407

[9] 孙佳美, 余新晓, 樊登星. 模拟降雨条件下黑麦草对土壤水分入渗的影响[J]. 土壤, 2014, 46(6): 1 115-1 120

[10] 李奕, 满秀玲, 蔡体久, 等. 大兴安岭山地樟子松天然林土壤水物理性质及水源涵养功能研究[J]. 水土保持学报, 2011, 25(2): 87-91

[11] 袁久芹, 梁音, 曹龙熹, 等. 红壤坡耕地不同植物篱配置模式减流减沙效益对比[J]. 土壤, 2015, 47(2): 400-407

[12] 孙佳美, 樊登星, 梁洪儒, 等. 黑麦草调控坡面水沙输出过程研究[J]. 水土保持学报, 2014, 28(2): 36-39

[13] 余新晓, 张晓明, 武思宏, 等. 黄土区林草植被与降水对坡面径流和侵蚀产沙的影响[J]. 山地学报, 2006, 24(1): 19-26

[14] 张晓明, 余新晓, 武思宏, 等. 黄土区森林植被对坡面径流和侵蚀产沙的影响[J]. 应用生态学报, 2005, 16: 1 613-1 617

[15] 赵海滨, 曹京京, 姚文艺, 等. 黄土坡面径流输沙过程试验研究[J]. 水土保持研究, 2014, 21(1): 90-94

[16] 肖培青, 姚文艺, 张海峰. 黄土高原植被固土减蚀作用研究进展[J]. 水土保持研究, 2012, 19(6): 282-286

[17] 赵玉丽, 牛健植. 人工模拟降雨试验降雨特性及问题分析[J]. 水土保持研究, 2012, 19(4): 278-283

- [18] 刘和平, 符素华, 王秀颖, 等. 坡度对降雨溅蚀影响的研究[J]. 土壤学报, 2011, 48(3): 479-486
- [19] 徐卫刚, 张化永, 王中玉, 等. 植被对河道水流影响的研究进展[J]. 应用生态学报, 2013, 24(1): 251-259
- [20] 吴淑芳, 吴普特, 原立峰. 坡面径流调控薄层水流水力学特性试验[J]. 农业工程学报, 2010, 26(3): 14-19

Study on Runoff and Erosion Process of Vegetation Slope Under Simulated Rainfall Conditions

HOU Peixuan, SUN Jiamei, YU Xinxiao*, LI Hanzhi

(Key Laboratory of Soil and Water Conservation and Deserti Fication Combating of Ministry of Education, Beijing Forest University, Beijing 100083, China)

Abstract: In this paper, the process of water and sediment output in the slope 10° and slope 20° with rainfall intensity 30 mm/h under three kinds vegetation of trees, shrubs and herb (*Broussonetia papyrifera*, *Vitex negundo*, ryegrass) were studied through artificial rainfall simulation experiment. The results showed that the runoffs of runoff processes under all three vegetation covers were increased first and then trended to be stable, while the sediment yields were increased first, decreased secondly and then trended to be stabled, which showed *Broussonetia papyrifera*, *Vitex negundo* and ryegrass all had good regulation and control ability in runoff and sediment process. In reducing the runoff and sediment yield, ryegrass had best effect, followed by *Broussonetia papyrifera* and *Vitex negundo*. In the regulation of runoff flow velocity, the overall flow rate increased first and then trended stable, and the ability in regulating the runoff rate was in order of ryegrass>*Vitex negundo*>*Broussonetia papyrifera*.

Key words: Simulated rainfall; Vegetation; Slope; Runoff; Sediment