

不同自然降雨等级下不同郁闭度马尾松林的水土流失特征

李宗勋¹, 李启艳¹, 侯晓龙^{1,2,3}, 黄智军¹, 刘青¹, 陈顺钰¹, 赵雅曼¹

(1.福建农林大学林学院,福州 350002;2.南方红壤区水土保持国家林业和草原局重点实验室,
福州 350002;3.海峡两岸红壤区水土保持协同创新中心,福州 350002)

摘要:为揭示南方红壤侵蚀区不同郁闭度马尾松林水土流失的规律,以长汀红壤侵蚀区不同郁闭度(0.2, 0.4, 0.6, 0.8)马尾松林为研究对象,采用标准径流小区观测的方法,利用在 2015 年观测的 37 场自然降雨事件构成一个降雨梯度,分析不同郁闭度马尾松林水土流失随降雨等级的变化规律,以及产流产沙量与降雨因子之间的相关性。结果表明:(1)不同郁闭度马尾松林产流产沙量均随降雨等级的增加呈逐渐增大的趋势,且暴雨下增加更为明显;(2)在中雨、大雨和暴雨 3 种降雨等级下,郁闭度 0.2 和 0.8 马尾松林产流产沙量均高于郁闭度 0.4 和 0.6,且郁闭度 0.4 和 0.6 马尾松林产流产沙量随降雨等级增加变化较小;(3)在自然降雨梯度下,不同郁闭度马尾松林产流产沙与降雨量和降雨侵蚀力显著相关($P < 0.05$);(4)逐步回归分析发现,不同郁闭度马尾松林产流回归方程的主要变量是降雨量和最大 30 min 雨强,而产沙回归方程的主要变量是降雨量和降雨侵蚀力。综上,马尾松林郁闭度过高或过低不利于水土保持,长汀红壤侵蚀区郁闭度 0.6 马尾松林防治水土流失效果最佳。

关键词:红壤侵蚀区;马尾松林;郁闭度;自然降雨梯度;水土流失规律

中图分类号:S157.1

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2020)01-0027-07

DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2020.01.004

Characteristics of Soil and Water Loss Under Different Natural Rainfall Grades of *Pinus Massoniana* Forest with Different Canopy Density

LI Zongxun¹, LI Qiyun¹, HOU Xiaolong^{1,2,3}, HUANG Zhijun¹,

LIU Qing¹, CHEN Shunyu¹, ZHAO Yaman¹

(1.College of Forestry, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002; 2.Key Laboratory of State Forestry and Grassland Administration for Soil and Water Conservation in Red Soil Region of South China, Fuzhou 350002; 3.Collaborative Innovation Center for Soil and Water Conservation in the Red Soil Region on Both Sides of the Taiwan Straits, Fuzhou 350002)

Abstract: In order to reveal the law of soil erosion of different canopy density *Pinus massoniana* forests in the red soil erosion area of southern China, the standard runoff plot observation method was adopted in different canopy density (0.2, 0.4, 0.6, and 0.8) *Pinus massoniana* forest in the Changting of Fujian Province. A rainfall gradient was constructed to analyze the variation of soil erosion with the rainfall level of different canopy density *Pinus massoniana* forests based on the 37 natural rainfall events observed in 2015. The correlation between runoff and sediment yield and rainfall factors was conducted. The results showed that: (1) The runoff and sediment yield of different canopy density *Pinus massoniana* forests increased gradually with the increase of rainfall grade, and the increase was more obvious under rainstorm condition. (2) Under three rainfall grades such as moderate rain, heavy rain, and rainstorm, the runoff and sediment yield of *Pinus massoniana* forests with the canopy density of 0.2 and 0.8 were higher than that with the canopy density of 0.4 and 0.6. The runoff and sediment yield of *Pinus massoniana* forests with the canopy density of 0.4 and 0.6 showed less variation with the increase of rainfall grades. (3) The runoff and sediment yield of different canopy density *Pinus massoniana* forests were significantly correlated with rainfall and rainfall erosivity ($P < 0.05$) under the natural rainfall gradient. (4) The stepwise regression analysis showed that the main variables of the regression equation of the runoff of *Pinus massoniana* forests with different canopy density are rainfall

收稿日期:2019-07-18

资助项目:福建省科技厅重点项目(2017Y0001);福建省环保科技计划项目(2018R012);福建农林大学科技创新专项基金项目(CXZX2018126;CXZX2018137)

第一作者:李宗勋(1994—),男,在读硕士研究生,主要从事森林理水与保土功能研究。E-mail:1094994698@qq.com

通信作者:侯晓龙(1981—),男,硕士生导师,主要从事生态修复研究。E-mail:xl.hou@fafu.edu.cn

and the maximum 30 min rain intensity, while of the sediment yield regression equation are rainfall and rainfall erosivity. In summary, the higher or lower degree of canopy pine forest is not conducive to soil and water conservation, and the most effective canopy closure degree of Changting red soil erosion is 0.6 to control the soil and water erosion of *Pinus massoniana* forests.

Keywords: red soil erosion area; *Pinus massoniana* forest; canopy density; natural rainfall gradient; law of water and soil loss

水土流失是全球普遍存在的环境问题,是人类面临的限制全球经济社会可持续发展的重要环境问题,亦是中國主要环境问题之一。长汀县是我国南方红壤典型代表,水土流失具有典型性、严重性与治理的长期性的特点,水土流失已成为制约当地社会发展的主要因素之一^[1-2]。近 30 年,长汀县水土流失治理一直受到各级政府的高度重视,采取了多种举措开展治理,其中,大面积飞播马尾松(*Pinus massoniana* Lamb)造林在早期取得显著成效,长汀县水土流失现象得到明显控制,但形成的红壤侵蚀初步治理区的马尾松纯林存在林下植被单一、林下空间结构简单的问题仍较严重,如何控制马尾松林下水土流失仍然是一个急需解决的突出问题。

目前,针对马尾松林下水土流失的研究主要集中在马尾松林下植被恢复、土壤理化特性变化等方面的研究^[3-5]。水土流失与降雨因子密切相关,水土流失也随降雨的变化有一定的规律性。不少学者在水土流失与降雨因子之间的关系方面开展了研究,何杨洋等^[6]对北京密云水库开展了次降雨坡面产流产沙特征研究,其采用野外人工降雨方式阐明了在不同土地利用和不同坡度条件下,降雨量和降雨强度与产流、产沙的关系;卜建霞等^[7]研究福建省长汀县不同土地利用方式降雨产流产沙特征发现,降雨量和最大 30 min 雨强是与产流产沙相关性相对较强的 2 个降雨因子。但目前针对降雨因子对于水土流失规律的相关研究多集中于人工降雨条件,付兴涛等^[8]采用人工模拟降雨的方法研究了不同雨强下坡长对红壤侵蚀的影响,结果表明雨强和坡长与坡面产沙均呈正相关关系,雨强对产沙影响较坡长大;王丽园等^[9]利用人工模拟降雨法研究了不同雨强条件下坡度对坡面侵蚀的影响,其发现坡度对径流和产沙的贡献率有差异。采用人工模拟降雨开展水土流失规律研究,在选择影响水土流失的降雨因子、地形因子等具有局限性,且模拟降雨往往无法还原出真实降雨情境下的降雨强度、雨滴大小和雨滴下降的速度^[10],难以刻画出降雨量增加背景下的降雨动能和降雨侵蚀力。目前,关于长汀县不同郁闭度马尾松林对水土流失影响的研究较少,特别是自然降雨情境下原位观测坡面产流和产沙变化过程的研究还鲜见报道,而这恰恰能够更

好地反演自然降雨条件下不同郁闭度马尾松林水土流失规律,揭示长汀红壤侵蚀区不同郁闭度马尾松林水土流失的特征及规律。

鉴于此,在南方红壤侵蚀区典型代表的长汀县河田镇,选择不同郁闭度马尾松林建立标准小区(20 m×5 m),观测每场降雨事件的产流产沙量,且选取小雨、中雨、大雨及暴雨的自然降雨事件,分析自然降雨梯度下不同郁闭度马尾松林水土流失规律,揭示影响不同郁闭度马尾松林水土流失的主要降雨驱动因子,以期今后在马尾松林水土流失治理和生态功能精准提升提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于福建长汀县河田镇,地理位置东经 116°00′45″—116°39′20″,北纬 25°18′40″—26°02′05″,地处武夷山南麓。山地丘陵占 71.11%以上,坡度较陡,沟谷纵横;地势北高南低,周围高,中间低;地形破碎,岭谷相间;山中有丘,丘内有山,平地狭,盆谷相间。地处中亚热带季风气候区,高温多雨,干湿季节明显。2015 年总降水量 1 416.5 mm,最大次降雨量 79 mm,年平均气温 18.3℃,降雨多集中在 5—7 月,雨量丰富,多以大雨暴雨出现。土壤为山地丘陵红壤,富铝化作物显著,酸性反应强,pH 4.5~5.5,土层较深厚,多数在 1.0 m 左右,土色棕红或浅红色,质地黏重,透性差,有机质含量少,有效磷、速效钾普遍缺乏。长汀县水土流失经过长期的治理,形成了大面积以马尾松纯林为主的初步治理区,林下植被主要以芒萁(*Dicranopteris dichotoma* (Thunb.) Berhn)为主。

1.2 试验方法

1.2.1 样地设计 根据长汀县红壤强度侵蚀初步治理区的自然条件,选择土壤和植被情况基本一致的马尾松林,建立相同坡向(西南)、坡度(21°)的径流小区,每个标准径流小区水平投影面积为 100 m²,即 5 m(顺坡沿等高线方向)×20 m(顺坡面的水平投影)。小区边界由水泥预制板围成,上方及两侧设截水沟及排水沟。其下端设集水槽,承接小区产流、产沙。集水槽下设集流池,池内设置 1 m 的固定水位尺,设 1,2 级径流池。2012 年在原有林分郁闭度上进行间伐,形成 4 种不同郁闭度(0.2,0.4,0.6,0.8)马

尾松林试验区,每个郁闭度各 3 个小区。在 2013 年 2 月建设标准径流小区,开展水土流失的监测试验。2013 年进行植被调查,林下植被主要以芒萁为主,且由于径流小区建设,原始植被因人为破坏较为严重,

而本文选取 2015 年试验数据,避免了人为因素对试验的影响,林下植被调查见表 1。郁闭度 0.4 和 0.6 马尾松林的林下植物种类和数量较郁闭度 0.2 和 0.8 多,芒萁覆盖度无差异。

表 1 2015 年灌草层调查

调查对象	物种	科	属	株数/株			
				郁闭度 0.2	郁闭度 0.4	郁闭度 0.6	郁闭度 0.8
乔灌层	黄端木	山茶科 <i>Theaceae</i>	杨桐属 <i>Adinandra</i>	1	5	7	2
	赤楠	桃金娘科 <i>Myrtaceae</i>	蒲桃属 <i>Syzygium</i>	1	4	5	2
	黄栀子	茜草科 <i>Rubiaceae</i>	栀子属 <i>Gardenia</i>	1	2	3	—
	野漆	漆树科 <i>Anacardiaceae</i>	漆属 <i>Toxicodendron</i>	—	1	3	1
草本层	五节芒	禾本科 <i>Gramineae</i>	芒属 <i>Miscanthus</i>	—	4	2	—
	芒萁	里白科 <i>Gleicheniaceae</i>	芒萁属 <i>Dicranopteris</i>	90	94	96	97

注:由于芒萁无法测定株数,故以覆盖度表示(%) ;—表示无。

1.2.2 测定方法 降雨特征测定:利用径流小区附近的长汀县河田水保站内全自动气象观测站的气象观测数据,获取降雨量、降雨历时等降雨特征,计算每次降雨过程的其他降雨特征。降雨侵蚀力^[11]的计算为:

第 1 步,单位降雨动能的计算:

$$e=0.11897+0.0873\lg I$$

式中: e 为单位降雨动能(MJ/($\text{hm}^2\cdot\text{mm}$)); I 为某时段的降雨强度(mm/h)

第 2 步,次降雨总动能的计算:

$$E=\sum e\cdot P$$

式中: E 为次降雨的总动能(MJ/ hm^2); P 为对应某时段的降雨量(mm)

第 3 步,计算降雨侵蚀力指标:

$$R=E\cdot I_{30}$$

式中: R 为降雨侵蚀力(MJ $\cdot$ mm/($\text{hm}^2\cdot\text{h}$)); I_{30} 为最大 30 min 雨强(mm/h)

径流量测定:每次降雨后,记录集流池内的水位尺读数,然后根据集流池面积计算出每场降雨的各小区的径流量。

泥沙流失量的测定:每次降雨后,将径流池内的水搅拌均匀,取 3 个 1 000 mL 的混匀水样带回实验室,烘干测定所取水样中的泥沙含量。

1.2.3 数据分析 根据观测资料数据,在 Origin 9.0 软件上制图,利用 SPSS 21.0 软件对 4 种郁闭度马尾松林的产流产沙量与降雨特征进行 Pearson 相关分析(显著性水平为 $P=0.05$)。以产流产沙量作为因变量,以降雨量、降雨历时、降雨强度、 I_{30} 以及降雨侵蚀力作为自变量,采用逐步回归分析模拟了产流产沙与降雨因子之间的关系。

2 结果与分析

2.1 不同郁闭度马尾松林降雨事件选择

不同郁闭度马尾松林降雨因子数据采集于试验

点全自动气象观测站,以 6 h 为最小降雨间歇划分次降雨事件^[12-13],并参考降雨量等级划分国家标准(GB/T 28592—2012)^[14],依据次降雨量将降雨事件划分为小雨、中雨、大雨、暴雨和大暴雨。选取 2015 年期间的小雨、中雨、大雨和暴雨事件,共观测到降雨事件 37 场,其中小雨 1 场(其产流产沙极少,且只有 1 场降雨,文中不做分析),中雨 16 场,大雨 14 场,暴雨 6 场,以此构成 1 个自然条件下降雨等级增加的梯度,选取的降雨事件见表 2。

2.2 不同郁闭度马尾松林径流量随降雨等级增大的变化规律

由图 1 可知,随着降雨等级的增大,不同郁闭度马尾松林产流量均呈增加趋势,而郁闭度 0.2 和 0.8 马尾松林产流量增幅较大。郁闭度 0.2 和 0.8 马尾松林的产流量均明显大于郁闭度 0.4 和 0.6;在中雨情况下,郁闭度 0.2 马尾松林产流量明显大于其他 3 种郁闭度;在大雨、暴雨情况下,郁闭度 0.2 和 0.8 的马尾松林产流量明显大于郁闭度 0.4 和 0.6。说明郁闭度 0.4 和 0.6 马尾松林减少径流效果较好。

2.3 不同郁闭度马尾松林产沙量随降雨等级增大的变化规律

由图 2 可知,随着降雨等级的增大,4 种郁闭度马尾松林产沙量均呈增加趋势。其中郁闭度 0.2 马尾松林从 1.214 t/ km^2 (小雨)增加到 17.870 t/ km^2 (暴雨),增加了 13.72 倍;郁闭度 0.4 马尾松林从 1.014 t/ km^2 增加到 11.327 t/ km^2 ,增加了 10.31 倍;郁闭度 0.6 马尾松林从 1.069 t/ km^2 增加到 10.365 t/ km^2 ,增加了 8.70 倍;郁闭度 0.8 马尾松林从 1.103 t/ km^2 增加到 16.652 t/ km^2 ,增加了 14.10 倍。由此可见,不同郁闭度马尾松林产沙量随着降雨等级增大而迅速增加,但郁闭度 0.2 和 0.8 马尾松林增幅大于郁闭度 0.4 和 0.6,其中郁闭度 0.6 马尾松产沙量最少。

表 2 观测期间降雨事件

降雨时间 (年-月-日)	降雨序列	降雨量/ mm	降雨历时/ h	降雨强度/ (mm·h ⁻¹)	<i>I</i> ₃₀ / (mm·h ⁻¹)	降雨侵蚀力/ (MJ·mm·hm ⁻² ·h ⁻¹)	降雨类型
2015-07-05	1	4.5	1.6	2.8	4.03	3.01	小雨
2015-09-06	2	8.0	3.3	2.5	9.06	15.29	中雨
2015-10-08	3	8.0	2.8	2.9	7.05	11.50	中雨
2015-04-07	4	11.0	9.3	1.2	6.04	12.27	中雨
2015-07-23	5	11.0	6.1	1.8	16.11	41.25	中雨
2015-07-02	6	14.0	1.9	7.3	18.13	60.19	中雨
2015-08-16	7	14.0	7.3	1.9	11.80	30.79	中雨
2015-02-15	8	14.5	4.3	3.3	8.06	21.86	中雨
2015-04-09	9	14.5	16.3	0.9	7.05	18.05	中雨
2015-04-28	10	14.5	3.2	4.6	11.08	33.08	中雨
2015-11-10	11	14.5	1.4	10.2	24.17	88.02	中雨
2015-03-10	12	15.0	27.6	0.5	4.03	10.40	中雨
2015-11-12	13	15.0	12.8	1.2	10.07	27.13	中雨
2015-02-18	14	17.0	13.2	1.3	6.04	15.21	中雨
2015-06-05	15	21.0	15.3	1.4	9.06	35.28	中雨
2015-08-13	16	21.5	13.7	1.6	31.22	166.08	中雨
2015-12-14	17	23.5	19.9	1.2	5.04	19.65	中雨
2015-05-04	18	15.0	2.8	5.4	18.13	45.70	大雨
2015-10-31	19	15.5	9.1	1.7	5.04	12.96	大雨
2015-06-10	20	17.0	0.8	22.7	33.23	158.29	大雨
2015-08-10	21	17.5	6.0	2.9	9.06	32.17	大雨
2015-05-31	22	19.0	4.5	4.2	21.15	104.33	大雨
2015-02-21	23	20.0	8.0	2.5	21.15	91.55	大雨
2015-05-08	24	20.5	7.4	2.8	9.06	36.95	大雨
2015-06-22	25	25.0	6.0	4.2	27.19	166.40	大雨
2015-08-17	26	25.5	4.8	5.4	19.13	113.63	大雨
2015-06-12	27	25.5	4.5	5.7	37.26	247.46	大雨
2015-08-09	28	28.5	23.8	1.2	8.06	39.77	大雨
2015-03-23	29	30.5	13.3	2.3	12.08	70.55	大雨
2015-11-14	30	33.5	26.8	1.2	10.07	61.06	大雨
2015-12-06	31	43.0	14.3	3.0	9.06	67.95	大雨
2015-09-02	32	34.5	9.9	3.5	16.11	117.91	暴雨
2015-05-19	33	37.0	6.6	5.6	21.15	182.91	暴雨
2015-05-20	34	46.5	5.4	8.6	59.41	750.18	暴雨
2015-09-30	35	56.5	25.9	2.2	11.08	109.04	暴雨
2015-12-10	36	57.0	30.5	1.9	13.09	132.89	暴雨
2015-09-20	37	79.0	22.8	3.5	51.36	995.65	暴雨

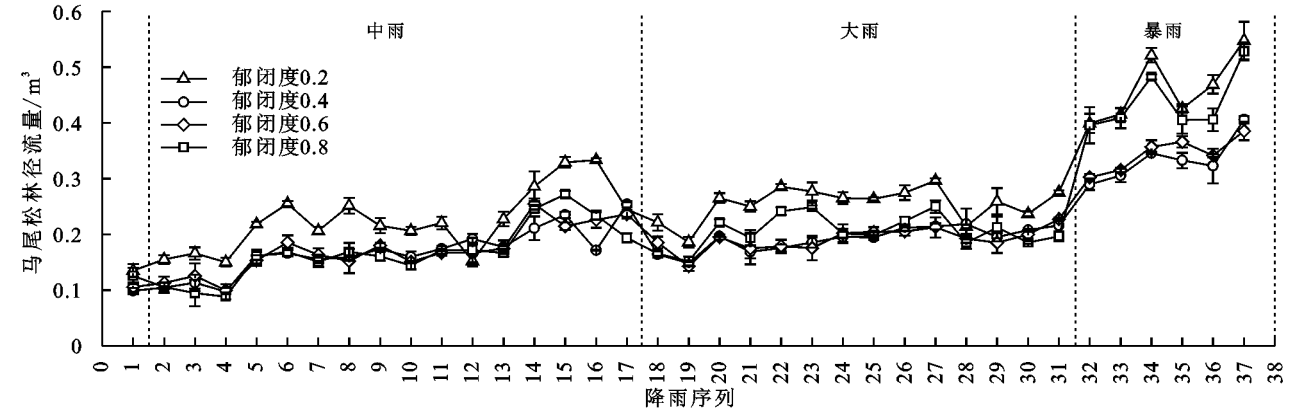


图 1 4 种郁闭度马尾松林径流量

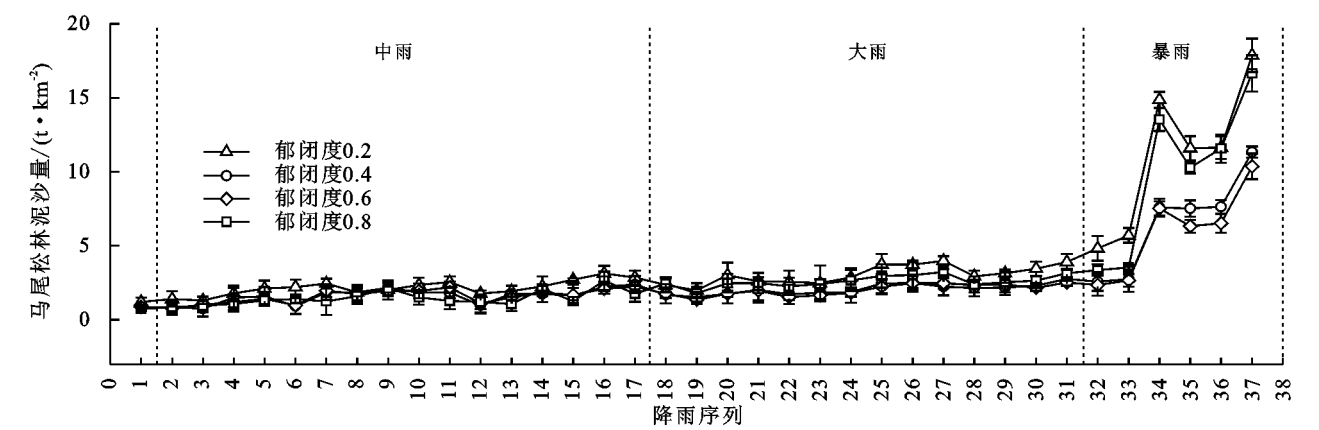


图2 4种郁闭度马尾松林泥沙流失量

2.4 不同郁闭度马尾松林产流产沙量与降雨因子的相关分析

2.4.1 不同郁闭度马尾松林产流量与降雨因子的相关性 由表3可知,在中雨情况下,不同郁闭度马尾松林产流量与降雨量均呈极显著正相关,且郁闭度0.4和0.6马尾松林产流量与降雨量的相关系数较高,同时郁闭度0.2马尾松林产流量与降雨侵蚀力亦呈显著正相关;在大雨情况下,郁闭度0.2和0.8马尾松林产流量与降雨侵蚀力呈极显著正相关,而郁闭度0.4和0.6马尾松林产流量与降雨量呈极显著正相关,同时郁闭度0.2马尾松林产流量与 I_{30} 呈显著正相关,郁闭度0.8马尾松林产流量与 I_{30} 呈极显著正相关;在暴雨情况下,郁闭度0.2和0.8马尾松林产流量与降雨侵蚀力呈极显著正相关,与 I_{30} 呈显著正相关,郁闭度0.4和0.6马尾松林产流量与降雨量呈显著正相关,同时郁闭度0.4马尾松林产流量与降雨侵蚀力呈显著正相关。在不同降雨等级下,4种郁闭度马尾松林产流量与降雨强度和降雨历时相关性均较弱。

表3 产流量与降雨因子的相关性分析

降雨等级	降雨特征	郁闭度0.2	郁闭度0.4	郁闭度0.6	郁闭度0.8
中雨	降雨量	0.763**	0.865**	0.858**	0.831**
	降雨历时	0.126	0.597*	0.486	0.441
	降雨强度	0.012	-0.133	-0.134	-0.111
	I_{30}	0.451	-0.050	0.175	0.247
	降雨侵蚀力	0.569*	0.084	0.332	0.391
大雨	降雨量	0.233	0.744**	0.675**	0.039
	降雨历时	-0.373	0.420	0.110	-0.339
	降雨强度	0.234	0.065	0.145	0.264
	I_{30}	0.608*	0.212	0.319	0.664**
	降雨侵蚀力	0.682**	0.421	0.482	0.688**
暴雨	降雨量	0.740	0.912*	0.891*	0.686
	降雨历时	0.157	0.334	0.494	-0.039
	降雨强度	0.308	0.039	-0.050	0.382
	I_{30}	0.850*	0.692	0.523	0.913*
	降雨侵蚀力	0.920**	0.874*	0.679	0.996**

2.4.2 不同郁闭度马尾松林产沙量与降雨因子的相关性 由表4可知,在中雨情况下,4种郁闭度马尾松林产沙量与降雨量均呈极显著正相关,同时郁闭度0.2马尾松林产沙量与降雨侵蚀力呈极显著正相关,与 I_{30} 呈显著正相关;在大雨情况下,郁闭度0.2,0.4,0.6马尾松林产沙量与降雨量呈极显著正相关,郁闭度0.8马尾松林产沙量与降雨量呈显著正相关,同时郁闭度0.2和0.8马尾松林产沙量与降雨侵蚀力亦呈显著正相关;在暴雨情况下,郁闭度0.2,0.6,0.8马尾松林产沙量与降雨量呈显著正相关,郁闭度0.4马尾松林产沙量与降雨量呈极显著正相关;在不同降雨等级下,郁闭度0.2和0.8马尾松林产沙量与降雨侵蚀力和 I_{30} 的相关系数较郁闭度0.4和0.6高,而与降雨量的相关系数则相反。4种郁闭度马尾松林产沙量与降雨强度和降雨历时相关性较弱。

表4 产沙量与降雨因子的相关性分析

降雨等级	降雨特征	郁闭度0.2	郁闭度0.4	郁闭度0.6	郁闭度0.8
中雨	降雨量	0.861**	0.693**	0.693**	0.636**
	降雨历时	0.172	0.106	0.027	0.215
	降雨强度	0.197	0.157	0.391	-0.139
	I_{30}	0.567*	0.324	0.420	0.360
	降雨侵蚀力	0.677**	0.427	0.490	0.530*
大雨	降雨量	0.728**	0.859**	0.779**	0.592*
	降雨历时	0.160	0.370	0.358	-0.045
	降雨强度	0.117	-0.165	-0.087	0.105
	I_{30}	0.392	0.026	0.112	0.437
	降雨侵蚀力	0.638*	0.295	0.364	0.622*
暴雨	降雨量	0.861*	0.947**	0.916*	0.869*
	降雨历时	0.391	0.587	0.474	0.465
	降雨强度	0.102	-0.137	-0.009	0.034
	I_{30}	0.694	0.522	0.633	0.637
	降雨侵蚀力	0.810	0.702	0.786	0.759

2.5 不同郁闭度马尾松林产流产沙量与降雨因子的逐步回归分析

由表5可知,在进行逐步回归分析时,由于降雨历时、降雨强度以及降雨侵蚀力 T 检验的概率值都大于0.05,故不能引进该线性回归模型。4种郁闭度马尾松林回归方

注: *表示 $P<0.05$; **表示 $P<0.01$ 。下同。

程的调整 R^2 均在 0.796 以上,回归 $\text{Sig}=0^b<0.05$,说明产流量与降雨量和 I_{30} 的回归拟合较为理想。采用标准化系数分析,郁闭度 0.2 和 0.8 马尾松林产流量主要受降雨量和 I_{30} 的双重影响,其中降雨量对于产流量的影响大于 I_{30} ;对于郁闭度 0.4 和 0.6 马尾松林而

言,降雨量是影响其产流量的主要降雨因子。4 种郁闭度马尾松林产流量回归拟合过程中,经过自检剔除了降雨历时、降雨强度和降雨侵蚀力,表明降雨因子之间存在自相关性或产流量与降雨历时、降雨强度和降雨侵蚀力并无直接的线性关系。

表 5 产流量与降雨因子的回归方程

处理	标准化回归方程	R^2	调整 R^2	Sig	容差	VIF
郁闭度 0.2	$r=0.717P+0.31I$	0.827	0.817	$P(\text{Sig})=0, I(\text{Sig})=0.001$	$P(\text{容})=I(\text{容})=0.761$	$P(V)=I(V)=1.314$
郁闭度 0.4	$r=0.916P$	0.838	0.834	$P(\text{Sig})=0$	$P(\text{容})=1$	$P(V)=1$
郁闭度 0.6	$r=0.895P$	0.802	0.796	$P(\text{Sig})=0$	$P(\text{容})=1$	$P(V)=1$
郁闭度 0.8	$r=0.736P+0.268I$	0.807	0.796	$P(\text{Sig})=0, I(\text{Sig})=0.004$	$P(\text{容})=I(\text{容})=0.761$	$P(V)=I(V)=1.314$

注: r 为径流量(m^3); P 为降雨量(mm); I 为 I_{30} (mm/h)。下同。
由表 6 可知,4 种郁闭度马尾松林产沙量与降雨因子进行逐步回归分析经自检后,该回归模型剔除了降雨历时、降雨强度以及 I_{30} ,选取降雨量和降雨侵蚀力与 4 种郁闭度马尾松林产沙量进行回归拟合,其

拟合调整 R^2 均在 0.880 以上,回归 $\text{Sig}=0^b<0.05$,表明其回归拟合结果较为理想。

从标准化系数来看,4 种郁闭度马尾松林产沙回归方程相似。

表 6 产沙量与降雨因子的回归方程

处理	标准化回归方程	R^2	调整 R^2	Sig	容差	VIF
郁闭度 0.2	$N=0.613P+0.416E$	0.916	0.911	$P(\text{Sig})=0, E(\text{Sig})=0$	$P(\text{容})=E(\text{容})=0.486$	$P(V)=E(V)=2.059$
郁闭度 0.4	$N=0.691P+0.315E$	0.889	0.882	$P(\text{Sig})=0, E(\text{Sig})=0.001$	$P(\text{容})=E(\text{容})=0.486$	$P(V)=E(V)=2.059$
郁闭度 0.6	$N=0.622P+0.403E$	0.908	0.902	$P(\text{Sig})=0, E(\text{Sig})=0$	$P(\text{容})=E(\text{容})=0.486$	$P(V)=E(V)=2.059$
郁闭度 0.8	$N=0.601P+0.412E$	0.887	0.880	$P(\text{Sig})=0, E(\text{Sig})=0$	$P(\text{容})=E(\text{容})=0.486$	$P(V)=E(V)=2.059$

注: N 为泥沙流失量(t/km^2); E 为降雨侵蚀力($\text{MJ}\cdot\text{mm}/(\text{hm}^2\cdot\text{h})$)。

3 讨论

3.1 马尾松林水土流失随郁闭度的变化规律研究

本文基于自然降雨梯度下研究 4 种郁闭度马尾松林水土流失特征,结果表明,4 种郁闭度马尾松林产流产沙量随降雨等级增加而增加,其中产沙量随降雨等级呈指数增长趋势,这与张海涛等^[15]研究次降雨对四川省宜宾市高县马尾松低效林改造产流产沙影响的结果一致。本研究发现,在自然降雨梯度下,郁闭度 0.2 和 0.8 马尾松林产流产沙量均高于郁闭度 0.4 和 0.6,尤其是在大雨、暴雨情况下尤为显著,其可能原因是马尾松林在不同郁闭度条件下,林内微环境产生差异,郁闭度 0.4 和 0.6 马尾松林形成了良好的林内空间结构,有较好的植被覆盖,而郁闭度 0.2 马尾松林裸露斑块较大,降雨对地表直接冲刷,而郁闭度 0.8 林分过于郁闭,林下植被恢复较慢或者退化,直接或间接导致水土流失加剧。对径流小区进行植被调查表明郁闭度 0.4 和 0.6 马尾松林林下植物种类和数量较郁闭度 0.2 和 0.8 多。宋小帅等^[16]研究山西太岳山不同郁闭度油松人工林枯落物及土壤水文效应时发现,郁闭度为 0.6 的林分土壤物理结构理想,蓄水容量大,有利于降雨下渗,抑制水土流失效果较好,这与本文研究结果一致。宋小艳等^[17]和崔宁洁等^[18]研究马尾松林林窗对林下植被及土壤结构的影响时发现,马尾松林林窗的大小或多少影响林下植

被恢复和改变土壤结构,其中存在着最适宜的林窗面积。本研究也发现,马尾松林水土流失与林分郁闭度不呈正相关,原因可能是郁闭度 0.4 和 0.6 马尾松林为林下提供更适宜的光照、温度和水分,有助于林下植被生长及土壤改良。本研究表明,林分郁闭度过低或者过高均增加水土流失,适宜的郁闭度有助于林下植被恢复,增强水土流失防治效果,郁闭度 0.4 和 0.6 对水土流失的防治效果较好。

3.2 马尾松林水土流失与降雨因子的相关性分析

本文研究水土流失与降雨因子的相关性结果表明,4 种郁闭度马尾松林产流量与降雨量、降雨历时、 I_{30} 、降雨侵蚀力均呈正相关性,与降雨强度呈现较弱的相关性,其中与降雨量和降雨侵蚀力相关性系数最高,逐步回归分析结果显示,降雨量、 I_{30} 和降雨侵蚀力与马尾松林产流产沙有直接线性关系。在不同降雨等级下,郁闭度 0.2 和 0.8 马尾松林产流与降雨侵蚀力相关系数均高于郁闭度 0.4 和 0.6,且均达到了显著正相关。郁闭度 0.4 和 0.6 马尾松林产流与降雨量的相关性系数最高,在不同降雨等级下均达到显著正相关,艾宁等^[19]研究陕北黄土高原不同植被类型降雨对坡面产流产沙时表明,不同植被类型产流量与降雨量呈显著正相关,与本研究结果一致。

4 种郁闭度马尾松林产沙规律与产流规律相似。在中雨和大雨情况下,郁闭度 0.2 和 0.8 马尾松林

产沙量与降雨侵蚀力和降雨量相关系数最高,均呈显著正相关,可能是由于其林下植被较为简单,使得土壤颗粒受到降雨的击溅而被搬运^[20]。朱燕琴等^[21]研究不同植被类型次降雨产流产沙特征时发现,产沙量与降雨侵蚀力呈正相关变化关系,其研究结果与本研究结果一致。郁闭度 0.4 和 0.6 马尾松林地表产沙与降雨量相关系数最高,均达到显著正相关,其产沙是由于蓄满产流。许多学者^[22-24]研究表明,降雨强度与水土流失具有很强的相关性,而本研究发现,不同郁闭度马尾松林产流产沙与降雨强度的相关系数较小,而与 I_{30} 的相关系数较大,可能原因有 3 种:(1)大部分研究采用室内人工模拟降雨,其降雨模式是均匀形式,而自然降雨则是不规则的“波浪式”形式;(2)室内环境和复杂的野外环境本身具有较大差异,室内模拟试验一般采用植被覆盖度,而本文仅就林冠郁闭度进行讨论;(3)本文采用“以 6 h 为最小降雨间歇”划分降雨等级,增加了次降雨的降雨历时,最终直接或间接导致了两者的降雨强度具有差异性。这亦说明模拟降雨往往无法还原出真实降雨情境下的降雨强度。

采用逐步回归分析发现,在产流方面,郁闭度 0.2 和 0.8 的产流回归方程主要变量是降雨量和 I_{30} ,表明在该郁闭度下降雨量和 I_{30} 对地表径流产生了直接影响,且郁闭度 0.2 和 0.8 的产流回归方程较相近,两者的产流机制一致。而郁闭度 0.4 和 0.6 产流回归方程主要变量是降雨量,表明降雨历时、降雨强度、 I_{30} 以及降雨侵蚀力与其线性关系较弱,又或者与降雨量存在自相关性,林锦阔等^[25]研究降雨因子对沂蒙山区不同土地利用方式径流小区产流产沙的影响时发现,降雨历时、降雨强度和 I_{30} 与各小区产流产沙的相关性不显著,与本研究结果一致。其可能原因是 0.4 和 0.6 郁闭度条件下林下植被恢复较好,起到了削减降雨动能、降低地表径流流速以及延长雨水入渗时间的作用^[26],其产流机制为蓄满产流^[27]。在产沙方面,4 种郁闭度马尾松林产沙回归方程的主要变量均为降雨量和降雨侵蚀力,表明降雨量和降雨侵蚀力对马尾松林产沙量产生了主要影响,寇馨月等^[28]研究红壤区小流域次降雨产流产沙时表明,降雨量、 I_{30} 和降雨侵蚀力对产沙模数产生了主要影响,与本研究结果一致。综上,不同郁闭度马尾松林的产流与产沙的主要降雨驱动因子具有差异性,主要因子是降雨量、 I_{30} 和降雨侵蚀力。

4 结论

(1)不同郁闭度马尾松林产流产沙量均随着降雨等级增加而增加,但产流产沙量存在明显差异。

(2)马尾松林郁闭度过高或者过低均不利于水土

保持,长汀红壤侵蚀区郁闭度 0.6 马尾松林防治水土流失效果最佳。

(3)自然降雨梯度下,郁闭度 0.2 和 0.8 马尾松林产流产沙量与降雨侵蚀力显著相关,而郁闭度 0.4 和 0.6 马尾松林则与降雨量显著相关。

(4)郁闭度 0.2 和 0.8 马尾松林产流回归方程主要变量是降雨量和 I_{30} ,而郁闭度 0.4 和 0.6 主要变量则是降雨量;不同郁闭度马尾松林产沙回归方程主要变量均为降雨量和降雨侵蚀力。

参考文献:

- [1] 张灿,徐涵秋,张好,等.南方红壤典型水土流失区植被覆盖度变化及其生态效应评估:以福建省长汀县为例[J].自然资源学报,2015,30(6):917-928.
- [2] 徐义保,查轩,黄少燕.南方红壤丘陵区马尾松林地水土流失研究进展[J].亚热带水土保持,2011,23(4):40-43.
- [3] 赵芳,欧阳勋志.飞播马尾松林林下植被盖度与环境因子的关系[J].应用生态学报,2015,26(4):1071-1076.
- [4] 曾敏,吕茂奎,陈坦,等.红壤侵蚀退化土壤对不同来源可溶性有机碳的吸附特征[J].水土保持学报,2018,32(2):191-197,222.
- [5] 雷蕾,肖文发,曾立雄,等.马尾松林土壤微生物群落结构对不同营林处理的响应[J].生态学报,2018,38(16):5846-5856.
- [6] 何杨洋,王晓燕,段淑怀.密云水库上游流域次降雨坡面产流产沙特征[J].农业工程学报,2015,31(24):134-141.
- [7] 卜建霞,叶功富,尤龙辉,等.福建省长汀县不同土地利用方式降雨产流产沙特征[J].水土保持研究,2017,24(4):1-5.
- [8] 付兴涛,张丽萍.坡长对红壤侵蚀影响人工降雨模拟研究[J].应用基础与工程科学学报,2015,23(3):474-483.
- [9] 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.
- [10] Comino J R, Iserloh T, Lassu T, et al. Quantitative comparison of initial soil erosion processes and runoff generation in Spanish and German vineyards [J]. Science of the Total Environment,2016,565:1165-1174.
- [11] 章文波,谢云,刘宝元.利用日雨量计算降雨侵蚀力的方法研究[J].地理科学,2002,22(6):705-711.
- [12] 王文婷,殷水清,袁莹莹.场次降水与日降水差异对比[J].北京师范大学学报(自然科学版),2018,54(2):224-231.
- [13] 殷水清,王杨,谢云,等.中国降雨过程时程分型特征[J].水科学进展,2014,25(5):617-624.
- [14] 国家气象中心.GB/T 28592—2012 降水量等级[S].北京:中国标准出版社,2012.
- [15] 张海涛,宫渊波,付万权,等.次降雨对马尾松低效林改造初期坡面产流产沙的影响[J].水土保持学报,2017,31(3):51-55.

- (5):229-234.
- [14] 卞艳丽,曹惠提,张会敏,等.泥沙级配对浑水灌溉下土壤水分增长过程的影响分析[J].节水灌溉,2016(7):23-30,35.
- [15] 罗榕婷,张光辉,沈瑞昌,等.染色法测量坡面流流速的最佳测流区长度研[J].水文,2010,30(3):5-9.
- [16] 吴凤至.坡面侵蚀过程中泥沙颗粒特性研究[D].武汉:华中农业大学,2012.
- [17] Michael C S, Timothy P B. Particle size characteristics of suspended sediment in hillslope runoff and stream flow[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 1997,22(8):705-719.
- [18] 王玲.陡坡地水蚀过程与泥沙搬运机制[D].陕西 杨凌:中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心,2016.
- [19] Martínez-Mena M, Castillo V, Albaladejo J, et al. Relations between interrill erosion processes and sediment particle size distribution in a semiarid Mediterranean area of SE of Spain[J]. Geomorphology, 2002,45(3):261-275.
- [20] Asadi H, Moussavi A, Ghadiri H, et al. Flow-driven soil erosion processes and the size selectivity of sediment[J]. Journal of Hydrology (Amsterdam), 2011, 406(1/2):73-81.
- [21] 王剑.降雨驱动下侵蚀泥沙颗粒分选特征及搬运机制[D].武汉:华中农业大学,2015.
- [22] 李德利,王瑄,邱野.天然降雨条件下裸坡、植被坡的产流产沙过程分析[J].安徽农业科学,2011,39(35):21971-21974.
- [23] 陈秀玲,李志忠,靳建辉,等.中国南方第四纪红土研究进展[J].福建师范大学学报(自然科学版),2009,25(5):118-124.
- [24] 韩鹏,倪晋仁,王兴奎.黄土坡面细沟发育过程中的重力侵蚀实验研究[J].水利学报,2003(1):51-56,61.
- [25] 张乐涛,高照良,李永红,等.模拟径流条件下工程堆积体陡坡土壤侵蚀过程[J].农业工程学报,2013,29(8):145-153.
- [26] Young R A. Characteristics of eroded sediment[J]. Transactions of the ASAE, 1980,23(5):1139-1142,1146.
- [27] 吴发启,张洪江.土壤侵蚀学[M].北京:科学出版社,2012:209-239.
- [28] 赵红梅.采矿塌陷条件下包气带土壤水分布与动态变化特征研究[D].北京:中国地质科学院,2006.
- [29] 丁文斌,李叶鑫,史东梅,等.2种工程堆积体边坡模拟径流侵蚀对比研究[J].土壤学报,2017,54(3):558-569.
- (上接第 33 页)
- [16] 宋小帅,康峰峰,韩海荣,等.太岳山不同郁闭度油松人工林枯落物及土壤水文效应[J].水土保持通报,2014,34(3):102-108.
- [17] 宋小艳,张丹桔,张健,等.马尾松人工林林窗对土壤团聚体及有机碳分布的影响[J].应用生态学报,2014,25(11):3083-3090.
- [18] 崔宁洁,张丹桔,刘洋,等.马尾松人工林不同大小林窗植物多样性及其季节动态[J].植物生态学报,2014,38(5):477-490.
- [19] 艾宁,魏天兴,朱清科.陕北黄土高原不同植被类型下降雨对坡面径流侵蚀产沙的影响[J].水土保持学报,2013,27(2):26-30,35.
- [20] 吴发启,范文波.土壤结皮与降雨溅蚀的关系研究[J].水土保持学报,2001,15(3):1-3.
- [21] 朱燕琴,赵志斌,齐广平,等.黄土丘陵沟壑区不同植被类型次降雨产流产沙特征[J].草地学报,2019,27(1):28-34.
- [22] 常松涛,黄少燕,查轩,等.雨强和植被覆盖度对红壤坡面产流产沙的影响[J].水土保持学报,2019,33(3):58-63.
- [23] Wu L, Peng M L, Qiao S S, et al. Effects of rainfall intensity and slope gradient on runoff and sediment yield characteristics of bare loess soil [J]. Environmental Science & Pollution Research,2018,25(4):3480-3487.
- [24] 甘艺贤,戴全厚,伏文兵,等.基于模拟降雨试验的喀斯特坡耕地土壤侵蚀特征[J].应用生态学报,2016,27(9):2754-2760.
- [25] 林锦阔,李子君,许海超,等.降雨因子对沂蒙山区不同土地利用方式径流小区产流产沙的影响[J].水土保持通报,2016,36(5):7-12,19.
- [26] Dijk A I J M V, Gash J H, Gorsel E V, et al. Rainfall interception and the coupled surface water and energy balance [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2015,214/215:402-415.
- [27] Huang Z G, Ouyang Z Y, Li F R, et al. Response of runoff and soil loss to reforestation and rainfall type in red soil region of southern China [J]. Journal of Environmental Sciences,2010,22:1765-1773.
- [28] 寇馨月,姜学兵,黄俊,等.红壤区小流域次降雨产流产沙因素分析及模型构建[J].水土保持通报,2017,37(6):34-42.