

不同清理方式下人工幼林地的水土流失规律

李华^{1,2}, 卢立华^{1,2}, 郑路^{1,2}, 李朝英¹,
明安刚^{1,2}, 张继辉^{1,2}, 刘士玲^{1,2}, 舒韦维^{1,2}

(1.中国林业科学研究院 热带林业试验中心, 广西 凭祥 532600;

2.广西友谊关森林生态系统国家定位观测研究站, 广西 凭祥 532600)

摘要: [目的] 研究不同清理方式下人工幼林地的水土流失规律, 为人工林科学经营和生态管理提供科学依据。[方法] 在广西壮族自治区南部马尾松采伐迹地人工更新的林地上, 基于 2018—2020 年野外径流小区定位观测数据, 对比研究了炼山和不炼山两种林地清理方式下的水土流失规律。[结果] ① 林地清理方式对水土流失的影响随炼山后林地恢复年限的增加急剧减小, 但炼山后的前 2 a, 无论是按年、月统计的水土流失量, 还是按场次降雨量统计的水土流失量, 炼山均显著高于不炼山 ($p < 0.05$)。② 炼山降低了发生地表径流的最小降雨量。且随次降雨量的增加, 炼山区域水土流失量的增加幅度明显大于不炼山区域。[结论] 在广西南部皆伐林地, 炼山后的前 2 a 是水土流失发生的主要时期, 也是防治水土流失的关键时期。

关键词: 广西南部; 降雨特征; 马尾松皆伐迹地; 炼山; 不炼山; 水土流失

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2022)02-0008-08

中图分类号: S157.1

文献参数: 李华, 卢立华, 郑路, 等. 不同清理方式下人工幼林地的水土流失规律[J]. 水土保持通报, 2022, 42(2): 8-15. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2022.02.002; Li Hua, Lu Lihua, Zheng Lu, et al. Soil erosion law of young plantations under different forest ground clearing methods [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(2): 8-15.

Soil Erosion Law of Young Plantations Under Different Forest Ground Clearing Methods

Li Hua^{1,2}, Lu Lihua^{1,2}, Zheng Lu^{1,2}, Li Chaoying¹,
Ming Angang^{1,2}, Zhang Jihui^{1,2}, Liu Shiling^{1,2}, Shu Weiwei^{1,2}

(1. *Experimental Center of Tropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Pingxiang, Guangxi* 532600, China; 2. *Guangxi Youyiguan Forest Ecosystem Research Station, Pingxiang, Guangxi* 532600, China)

Abstract: [Objective] In order to provide a theoretical guidance for the ecological management of plantations, the soil erosion law of young plantations under different forest ground clearing methods were investigated. [Methods] Based on the observation data of runoff plot from 2018 to 2020, the soil erosion laws between two forest ground clearing methods (control burning and no burning) in a clear-cutting site of 30-year-old *Pinus massoniana* plantation in Southern Guangxi Zhuang Autonomous Region were compared. [Results] ① The impacts of forest ground clearing method on the soil erosion decreased sharply with the increase of forest land restoration after burning. In the first two years after control burning, the amount of soil erosion was significantly higher in the control burning plots than in the no burning plots ($p < 0.05$). ② Control burning reduced the minimum rainfall for surface runoff, and with the increase of rainfall amount, the soil erosion at burning plots was significantly greater than that at the no burning plots. [Conclusion] In the clear-cutting site of Southern Guangxi Zhuang Autonomous Region, the soil erosion was mainly occurred in the first two years after control burning, thus it is crucial to prevent soil erosion during this period.

收稿日期: 2021-08-20

修回日期: 2021-11-15

资助项目: 广西创新驱动发展专项“广西主要用材林高效培育与利用—杉木人工林生态功能监测与增效研究”(桂 AA17204087-8); 中国林业科学研究院热带林业试验中心科学基金项目“割灌—块状抚育对人工幼林水土流失的抑制机理”(RL-2015-05)

第一作者: 李华(1978—), 女(汉族), 陕西省蒲城县人, 博士, 工程师, 主要从事森林土壤和生态水文方面的研究。Email: 710842076@qq.com。

通讯作者: 卢立华(1963—), 男(汉族), 广西壮族自治区玉林市人, 硕士, 研究员, 主要从事森林土壤、人工林培育和生态功能方面的研究。Email: 07718526136@sina.com。

Keywords: Southern Guangxi Zhuang Autonomous Region; rainfall characteristics; clear-cutting site of *Pinus massoniana*; control burning; no burning; soil erosion

炼山是指在人为控制下在指定地点进行安全用火,来清理造林地地上采伐剩余物和地被物,是人工造林的第一道工序,在中国已应用千余年。但 20 世纪 80—90 年代,在福建省尤溪县(东经 117.8°—118.6°,北纬 25.8°—26.4°)通过径流小区定位观测法对炼山和不炼山林地水土流失的研究^[1-2]表明,炼山能引起严重的水土肥流失,并在此试验的基础上,其团队详细分析了炼山对杉木人工林地力的影响^[3],综述了炼山对土壤有机质及养分烧失的影响,对林地水土流失、土壤肥力、杉木生长及林下植被等方面的影响^[4-5]。之后对炼山的研究多集中在土壤养分或地力方面^[6-10],也有对 CO₂ 排放^[11]、土壤碳等^[12]方面的研究,但鲜有水土流失方面的报道。然而水土流失量受降雨特征、母岩,地形、植被等自然因素的影响^[13],因此不同地区、炼山对林地水土流失影响的程度可能不同。

广西壮族自治区水热条件优越,人工林面积高达 8.53×10⁶ hm²^[14],约占全国人工林面积的 10%,稳居全国之首^[15],其中速生丰产用材林是广西地区的优势资源和优势产业,其种植面积在南方速丰林发展重点省区也名列之首^[16]。当地依然广泛使用炼山来清理林地,而炼山对当地水土流失的影响有多大?目前还不清楚,仅有不同植被类型和植被恢复过程等方面水土流失的报道^[17-19]。本研究立足于人工林生产一线,在马尾松林皆伐后,通过对比炼山和不炼山在当地自然降雨情况下,人工林常规经营时人工幼林地的水土流失规律,以期为当地人工林的科学经营和生态管理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

研究地点位于广西友谊关森林生态系统国家定位观测研究站热林中心站点,地理位置为 106°48′12″E, 22°05′00″N,属亚热带季风气候。有明显的干季和湿季,年均气温 21.0℃,≥10℃积温 7 600℃,年均降水量 1 400 mm,多集中在 4—9 月。

研究区为低山丘陵地貌,坡度 25°~30°,海拔 240~260 m,土壤为赤红壤,土层厚度大于 100 cm。试验样地面积 6.5 hm²,皆伐前为 30 a 生马尾松纯林,林分郁闭度为 0.7,平均树高 14.9 m,平均胸径 24.8 cm,密度为 447 株/hm²。伐前林下植被主要有玉叶金花(*Mussaenda pubescens*)、酸藤子(*Embelia laeta*)、粗叶榕(*Ficus hirta*)、五节芒(*Miscanthus floridulus*)、蔓生莠竹(*Microstegium fasciculatum*)、铁

芒萁(*Dicranopteris linearis*)、东方乌毛蕨(*Blechnum orientale*)等。皆伐后林地地被物和地上采伐剩余物生物量为 25.63 t/hm²。

0—50 cm 土层,土壤容重 1.20 g/cm³,总孔隙度 52.75%,毛管孔隙度 46.69%,非毛管孔隙度 6.06%。土壤 pH 值为 4.18,有机质含量 17.99 g/kg,全氮含量 1.35 g/kg,全磷含量 0.21 g/kg,全钾含量 13.54 g/kg,碱解氮含量 97.63 mg/kg,有效磷含量 0.74 mg/kg,速效钾含量 45.92 mg/kg。

按穴状整地,造林密度 3 000 株/hm²,炼山时间 2017 年 12 月初,炼山后 5 d 建简易坡面径流场,造林时间 2018 年 1 月。炼山与不炼山的林地抚育以及其他管理方法一致。

1.2 降雨量的观测和径流小区的设置

在与所有样地直线距离不超过 1 km 的空旷地,距地面 1 m 处安装自记翻斗雨量仪(TE525 MM, Campbell, USA,分辨率 0.2 mm)进行观测,使用 UA UA-003-64(型号:Campbell, USA)传感仪实时记录数据。以雨量仪为中心,在半径为 1 m 的范围内定期除草,确保植被高度不超过 1 m。本试验于 2018—2020 年采用炼山和不炼山对比观测法。在马尾松皆伐林地,分别在炼山和不炼山区域,按该区域的平均坡度等综合状况,选择坡向、海拔和坡度接近的直线形地段,设置 6 个径流小区,径流小区基本情况详见表 1。径流小区由隔离边墙、径流区、集水区、引水管、接水桶等部分组成,所用材料和方法见李华等^[20]。径流区的水平投影面积为 5 m×20 m,集水区带盖(确保地表径流量仅来自径流区),接水桶为直径 0.84 m,高 1 m 的带盖圆柱形桶,桶底部开有排水孔。

1.3 地表径流量和泥沙流失量的观测

在每次降雨后,于次日 8:00,如有径流,用钢尺测量各径流小区接水桶中的径流水位,用以计算 1 次降雨过程的地表径流量。在测完径流水位后,将接水桶中的浑水搅拌均匀,用取样勺分不同深度取水样约 1 000 ml 装入取样瓶中,之后打开阀门,将接水桶中的浑水排出,关好阀门、盖上桶盖取样结束。打开集水区盖,收集沉淀在集水区的泥沙,最后将装有水样的取样瓶和收集到的泥沙带回室内,经沉淀、烘干算出泥沙量。

1.4 数据处理及分析方法

采用 Microsoft Excel 2007 软件进行数据处理和图表绘制,运用 SPSS 19.0 软件进行方差分析(ANOVA)和回归分析,多重比较采用 LSD 法。

表 1 试验径流小区基本信息

小区编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
林地清理方式	炼山	炼山	炼山	炼山	炼山	炼山	不炼山	不炼山	不炼山	不炼山	不炼山	不炼山
坡度	27°	25°	25°	25°	25°	26°	26°	25°	26°	25°	25°	27°
坡向	东南	东南	东南	东南	东北	东北	东北	东北	东北	东北	东北	东北
坡位	上	上	上	上	上	上	上	上	上	上	上	上

2 结果与分析

2.1 大气降雨特征

基于 2018—2020 年降雨观测数据,按降雨间隔时间不超过 6 h 划分为 1 场降雨事件,其降雨场次、降雨量等降雨特征详见表 2。由表 2 可知,这 3 a 降雨场次介于 164~178 场,各降雨量级的年降雨场次由多到少的排序均为:小雨($P \leq 5$ mm)、中雨($10 \text{ mm} < P \leq 25$ mm)、小到中雨($5 \text{ mm} < P \leq 10$ mm)、大雨($25 \text{ mm} < P \leq 50$ mm)、暴雨($P > 50$ mm)。其中小雨的年降雨场次远高于其他降雨量级的,其介于 101~119 场,占年降雨场次的 59.8%~72.6%;中雨的年降雨场次介于 22~28 场,占年降雨场次的 13.4%~16.6%;大雨的年降雨场次介于 8~12 场,

占年降雨场次的 4.5%~7.1%;暴雨的年降雨场次最少,每年仅 2~3 场,仅占年降雨场次的 1.2%~1.8%。观测期间年降雨量介于 1036~1 327 mm,各降雨量级的年降雨量均是中雨最大,介于 357.4~439.2 mm,占年降雨量的 33.1%~36.3%;其次为大雨,其年降雨量介于 237.4~400.6 mm,占年降雨量的 19.8%~30.2%;暴雨的年降雨量介于小雨和小到中雨之间,其介于 135.6~181.8 mm,占年降雨量的 12.0%~15.1%;而小雨和小到中雨的年降雨量的排序因年际的不同而异,总的来看小雨的年降雨量介于 149.4~189.6 mm,占年降雨量的 11.5%~18.3%。另外,由表 4 可知,月降雨量大于 100 mm 的月份主要集中在每年的 6—9 月,其中大雨、暴雨分布频率也较高。

表 2 试验区 2018—2020 年大气降雨特征

年份	统计项目	降雨量级					合计
		小雨 (≤ 5 mm)	小~中雨 (5~10 mm)	中雨 (11~25 mm)	大雨 (26~50 mm)	暴雨 (> 50 mm)	
2018	降雨场次/场	101	25	28	12	3	169
	降雨量/mm	152.6	175.4	439.2	400.6	159.6	1 327.4
	降雨场次比例/%	59.8	14.8	16.6	7.1	1.8	100
	降雨量比例/%	11.5	13.2	33.1	30.2	12.0	100
2019	降雨场次/场	115	25	27	8	3	178
	降雨量/mm	149.4	196.8	435.4	237.4	181.8	1 200.8
	降雨场次百分比/%	64.6	14.0	15.2	4.5	1.7	100
	降雨量比例/%	12.4	16.4	36.3	19.8	15.1	100
2020	降雨场次/场	119	13	22	8	2	164
	降雨量/mm	189.6	91.6	357.4	261.8	135.6	1 036.0
	降雨场次比例/%	72.6	7.9	13.4	4.9	1.2	100
	降雨量比例/%	18.3	8.8	34.5	25.3	13.1	100

2.2 人工幼林地水土流失的年际变化

人工林皆伐后,不同的林地清理方式对水土流失的影响很大。

由表 3 可知,2018—2020 年总的径流量和泥沙流失量炼山的分别高达 2 955 m^3/hm^2 和 22.8 t/hm^2 ,不炼山的仅分别为 1 044 m^3/hm^2 和 1.8 t/hm^2 ,炼山的径流量和泥沙流失量分别是不炼山的 2.8 和 12.4 倍。从各年际来看,炼山处理的水土流失量均明显高于不炼山的,其中前两年差异达显著水平($p < 0.05$)。第 1 a,炼山径流量和泥沙流失量分别高达 1 984 m^3/hm^2

和 20.7 t/hm^2 ,不炼山的仅分别为 566 m^3/hm^2 和 1.3 t/hm^2 ,炼山的径流量和泥沙流失量分别是不炼山的 3.5 和 15.8 倍。第 2 a,炼山的径流量和泥沙流失量分别为 744 m^3/hm^2 和 1.8 t/hm^2 ,不炼山的仅分别为 333 m^3/hm^2 和 0.4 t/hm^2 ,炼山的径流量和泥沙流失量分别是不炼山的 2.2 和 4.5 倍;第 3 a,炼山的水土流失量依然分别是不炼山的 1.6 和 2.0 倍。可见炼山后随林地恢复时间的增加,不仅林地水土流失量急剧减小,而且林地清理方式对水土流失的影响也急剧减小。

表 3 人工幼林地水土流失的年际变化

项目	处理	2018年(第1a)	2019年(第2a)	2020年(第3a)	合计
径流量/($\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$)	炼山	1 984±652 ^a	744±309 ^a	228±84 ^a	2 955±980 ^a
	不炼山	566±173 ^b	333±156 ^b	146±91 ^a	1 044±372 ^b
泥沙流失量/($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$)	炼山	20.7±14.4 ^a	1.8±1.1 ^a	0.2±0.1 ^a	22.8±15.5 ^a
	不炼山	1.3±0.5 ^b	0.4±0.1 ^b	0.1±0.1 ^a	1.8±0.7 ^b
径流系数/%	炼山	14.9±5.2 ^a	6.2±2.5 ^a	2.2±0.7 ^a	8.3±2.8 ^a
	不炼山	4.3±1.4 ^b	2.8±1.3 ^b	1.4±0.8 ^a	2.9±1.1 ^b

注:表中数值为平均值±标准差,同列不同小写字母表示差异显著($p < 0.05$)

2.3 人工幼林地水土流失的月变化

由表 4 可知,在观测的这 3 a 间月降雨量和月水土流失量变化均较大。如有的月份降雨量和水土流失量都很少,甚至无径流产生,而有的月份降雨量和水土流失量均较高。总的来看,林地水土流失主要集中在雨季,其中大雨、暴雨分布频率较高的 6—9 月也是水土流失主要发生的月份。在有径流产生的月份,林地清理方式对月水土流失影响显著($p < 0.05$) (表 4)。第 1 a,除 2 月无径流外,其他月份炼山处理的水土流失量均显著高于不炼山的($p < 0.05$)。其中 6—9 月炼山处理的月径流量分别高达 345, 108, 1 161 和 60 m^3/hm^2 ,分别是不炼山的 3.8, 5.2, 3.2 和 1.7 倍;炼山处理的月泥沙流失量分别高达 3 064, 1 314, 12 110 和 808 kg/hm^2 ,分别是不炼山的 15.5, 12.3, 15.4 和 18.4 倍。而 11 和 12 月无论炼山与否,月水土流失量均很小,但炼山的径流量分别是不炼山的 9.4 和 8.5 倍,炼山的泥沙流失量分别是不炼山的 52.0 和 42.0 倍。第 2 a 在有径流产生的月份中,除 5 月的径流量外,其他月份的水土流失量炼山处理均显著高于不炼山处理的($p < 0.05$)。其中 6—9 月炼山处理的月径流量分别为 82, 72, 260 和 67 m^3/hm^2 ,分别是不炼山的 1.7, 1.7, 2.0 和 2.9 倍;炼山处理的月泥沙流失量分别为 230, 240, 703 和 169 kg/hm^2 ,分别是不炼山的 4.9, 3.5, 2.9 和 3.5 倍。而 2 月和 4 月的月水土流失量均很小,但炼山的径流量分别是不炼山的 5.6 和 4.8 倍,炼山的泥沙流失量分别是不炼山的 11.5 和 21.3 倍。第 3 a 炼山依然显著增加了 4, 8, 9 月的径流量, 4—6 月和 8 月的泥沙流失量。可见,林地清理方式对月水土流失的影响主要发生在前两年,且产生的径流量越小(无径流产生的除外),炼山与不炼山水土流失的差异就越大。

2.4 降雨量对水土流失的影响

观测期间,第 1 a 次降雨量为 50.6 mm 时水土流失量达最大,炼山和不炼山处理的径流深分别为 31.5 和

10.0 mm,泥沙流失量分别为 3 757 和 189 kg/hm^2 ;炼山和不炼山处理产生地表径流的最小降雨量分别为 7.2 和 10.0 mm。第 2 a 次降雨量为 72.0 mm 时水土流失量达最大,炼山和不炼山处理的径流深分别为 17.8 和 6.8 mm,泥沙流失量分别为 335 和 80.3 kg/hm^2 ;炼山和不炼山处理产生地表径流的最小降雨量分别为 9.2 和 11.6 mm。第 3 a 次降雨量为 76.2 mm 时水土流失量最大,其炼山和不炼山处理的径流深分别为 5.3 和 4.6 mm,泥沙流失量分别为 74 和 35 kg/hm^2 ;炼山和不炼山处理产生地表径流的最小降雨量分别为 11.0 和 14.2 mm。可见,只有当次降雨超过一定量后才有可能产生地表径流,且炼山处理产生径流的最小降雨量较不炼山的小;同一场暴雨,炼山处理产生的径流深和泥沙流失量远高于不炼山处理的,尤其是前两年。

以次降雨量为自变量(x),分别以径流深和泥沙流失量为因变量(y),采用数学模型拟合,多项式模型拟合的相关系数和 F 值均最大,其拟合情况如图 1—2 所示。炼山和不炼山处理的地表径流深和泥沙流失量与次降雨量均存在极显著的二次曲线关系($p < 0.01$)。说明在当地、人工林皆伐后人工更新林地前 3 a 的地表径流量和泥沙流失量可通过次降雨量来预测。由图 1—2 拟合曲线可以看出,各处理的径流深和泥沙流失量均随次降雨量的增加而增加,炼山处理的径流深曲线和泥沙流失量曲线的瞬时斜率较不炼山的大,且随次降雨量的增加,炼山处理斜率增加幅度较不炼山的大。但这两种林地清理方式对水土流失的影响随炼山后林地恢复时间的增加而持续减小。可见,在炼山后的前两年,炼山处理的水土流失量之所以远高于不炼山处理,这是因为炼山处理不仅能降低产生地表径流的最小降雨量,而且当次降雨量高于产生地表径流的量后,随次降雨量的增加,其水土流失量的斜率增加快,其水土流失量的增加幅度就大。

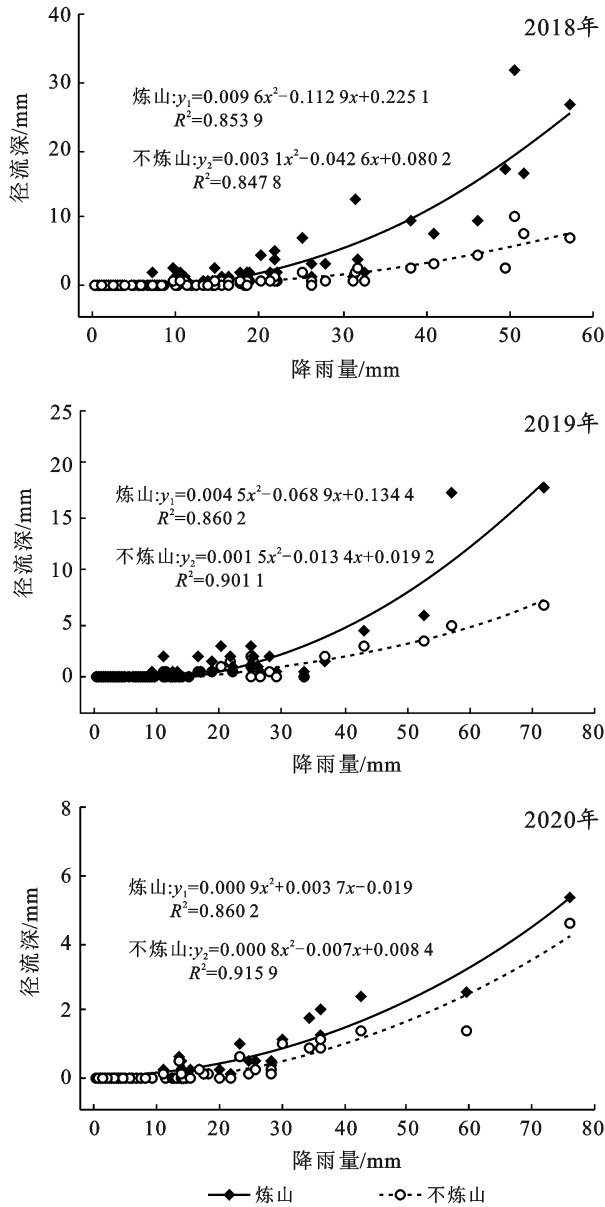


图 1 不同清理方式下人工幼林地降雨量与径流深的关系

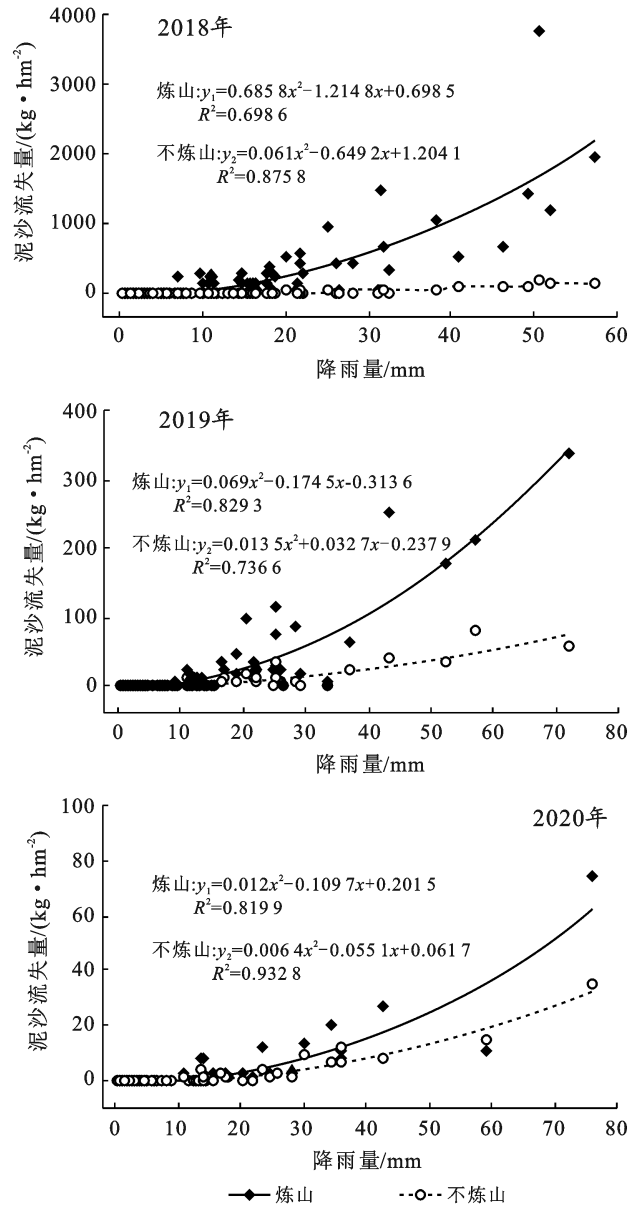


图 2 不同清理方式下人工幼林地降雨量与泥沙流失量的关系

3 讨论

3.1 降雨与水土流失

降雨是水土流失形成的动力因子,降雨量是影响产流的主要降雨因子^[21];吴洁玲等^[22]将日降雨量为 12.0 mm 的降雨作为侵蚀性降雨量的标准;通常高强度,大雨量的降雨类型易引起土壤侵蚀^[23-24],特别是暴雨及大暴雨是构成强大侵蚀的主导动力,往往 1 次高强降雨是决定水土流失总量的决定性因素^[25]。从观测 3 a 的数据来看,每年当地发生暴雨的次数为 2~3 次,在有暴雨发生的月份,其水土流失量远高于同年其他月份,在全年水土流失总量中占主导作用(表 4)。如 2018 年的 8 月(发生 2 次暴雨)水土流失量占全年总流失量的 58.5%(不炼山处理的比例

更高);与月降雨量接近的 7 月相比,6 月(1 次暴雨)径流量和泥沙流失量分别是 7 月的 3.3~4.5 倍和 1.9~2.3 倍,分别占全年总流失量的 16.3%~17.4% 和 14.8%~15.1%。2019 年和 2020 年水土流失量也主要发生在有暴雨的月份。

因土壤及地上采伐剩余物、凋落物、灌草等能吸收或截留降雨,因此,并不是所有的降雨都会产生地表径流。本试验观测到形成地表径流的最小降雨量是 7.2 mm,即小于 7.2 mm 的降雨量未能产生地表径流,且形成地表径流的最小降雨量随炼山后林地恢复时间的增加而持续增加。其值较周国逸等^[26]直接观测到马占相思人工林地表产流的数值大。对比发现,两个地区的降雨特征差别较大。与他们试验地区相比,本地区年降水量较少(减少了约 400 mm),其中远

远降低了暴雨年降水量和年降雨场次(仅占年降雨量的 12.0%~15.1%,占年降雨场次的 1.2%~1.8%),年降水量主要由中雨(占年降雨量的 33.1%~36.3%)和大雨(占年降雨量的 19.8%~30.2%)带来,而小雨和小到中雨的降雨场次占年降雨场次的 75%~80%,降雨量占年降雨量的 24.7%~28.8%,说明本地区

降雨比较温和,有利于土壤入渗。另外,对比坡面径流场发现,马占相思人工林是将地表径流收集到人工明渠中,再导入三角堰用自记水位计记录水量,所以测定的水量为坡面径流量和人工明渠中的降雨量;而本试验的集水槽上有盖,收集到的就是坡面径流量。

表 4 试验区水土流失的月变化

年份	项目	处理	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
2018年	降雨量/mm		49.0	17.4	82.2	68.0	65.2	170.8	196.6	396.0	130.4	54.4	31.2	66.2
	径流量/ ($m^3 \cdot hm^{-2}$)	炼山	21±0 ^a	0	171±23 ^a	21±5 ^a	60±26 ^a	345±116 ^a	108±30 ^a	1 161±482 ^a	60±14 ^a	18±10 ^a	11±6 ^a	7±4 ^a
		不炼山	3±0 ^b	0	27±5 ^b	3±2 ^b	21±20 ^b	92±68 ^b	21±20 ^b	358±164 ^b	35±26 ^b	3±4 ^b	1±1 ^b	1±1 ^b
	泥沙流失量/ ($kg \cdot hm^{-2}$)	炼山	548±14 ^a	0	1 408±68 ^a	357±56 ^a	922±88 ^a	3 064±699 ^a	1 316±147 ^a	12 110±1 196 ^a	808±130 ^a	89±84 ^a	52±57 ^a	42±54 ^a
		不炼山	19±3 ^b	0	81±34 ^b	14±6 ^b	54±28 ^b	198±98 ^b	107±68 ^b	786±314 ^b	44±24 ^b	5±6 ^b	1±2 ^b	1±2 ^b
	径流系数/%	炼山	4.4±0.0 ^a	0	20.8±2.8 ^a	3.1±0.7 ^a	9.3±4.0 ^a	20.2±6.8 ^a	5.5±1.5 ^a	29.3±12.2 ^a	4.6±1.1 ^a	3.3±1.9 ^a	3.6±2.1 ^a	1.0±0.6 ^a
不炼山		0.7±0.0 ^b	0	3.3±0.6 ^b	0.5±0.3 ^b	3.2±3.1 ^b	5.4±4.0 ^b	1.0±1.0 ^b	9.0±4.1 ^b	2.7±2.0 ^b	0.6±0.9 ^b	0.4±0.3 ^b	0.1±0.0 ^b	
2019年	降雨量/mm		52.2	44.2	58.6	71.0	107.0	154.0	196.2	289.6	108.6	90.6	18.2	10.6
	径流量/ ($m^3 \cdot hm^{-2}$)	炼山	0	14±5 ^a	0	17±9 ^a	44±16 ^a	82±32 ^a	72±19 ^a	260±78 ^a	67±24 ^a	189±85 ^a	0	0
		不炼山	0	3±4 ^b	0	4±4 ^b	35±14 ^a	48±39 ^b	42±25 ^b	127±38 ^b	23±15 ^b	52±32 ^b	0	0
	泥沙流失量/ ($kg \cdot hm^{-2}$)	炼山	0	46±17 ^a	0	85±76 ^a	257±266 ^a	230±114 ^a	240±81 ^a	703±312 ^a	169±61 ^a	233±134 ^a	0	0
		不炼山	0	4±3 ^b	0	4±3 ^b	38±20 ^b	47±21 ^b	68±40 ^b	240±112 ^b	48±35 ^b	89±50 ^b	0	0
	径流系数/%	炼山	0	3.1±1.2 ^a	0	2.4±1.2 ^a	4.1±1.5 ^a	5.3±2.0 ^a	3.6±1.0 ^a	9.0±2.7 ^a	6.2±2.2 ^a	20.9±9.4 ^a	0	0
不炼山		0	0.6±1.0 ^b	0	0.5±0.6 ^b	3.3±1.3 ^a	3.1±2.5 ^b	2.1±1.3 ^b	4.4±1.3 ^b	2.1±1.4 ^b	5.7±3.6 ^b	0	0	
2020年	降雨量/mm		44.4	59.8	113.6	91.4	128.4	48.0	122.2	166.8	95.8	143.6	8.4	13.6
	径流量/ ($m^3 \cdot hm^{-2}$)	炼山	2±1 ^a	2±1 ^a	18±8 ^a	6±2 ^a	59±18 ^a	5±2 ^a	18±10 ^a	57±14 ^a	10±3 ^a	51±19 ^a	0	0
		不炼山	0±0 ^a	0±0 ^a	13±5 ^a	1±0 ^b	51±29 ^a	1±3 ^a	16±12 ^a	32±21 ^b	2±2 ^b	28±20 ^a	0	0
	泥沙流失量/ ($kg \cdot hm^{-2}$)	炼山	1±1 ^a	2±3 ^a	15±11 ^a	6±3 ^a	82±102 ^a	8±4 ^a	22±20 ^a	64±44 ^a	7±9 ^a	21±17 ^a	0	0
		不炼山	0±0 ^a	0±0 ^a	9±11 ^a	1±1 ^b	39±40 ^b	1±2 ^b	14±15 ^a	21±10 ^b	2±2 ^a	29±25 ^a	0	0
	径流系数/%	炼山	0.4±0.3 ^a	0.4±0.2 ^a	1.5±0.7 ^a	0.6±0.2 ^a	4.6±1.4 ^a	1.0±0.5 ^a	1.5±0.9 ^a	3.4±0.8 ^a	1.0±0.4 ^a	3.6±1.4 ^a	0	0
不炼山		0.1±0.2 ^a	0.0±0.1 ^a	1.2±0.5 ^a	0.1±0.1 ^b	3.9±2.2 ^a	0.3±0.7 ^a	1.3±1.0 ^a	1.9±1.3 ^b	0.2±0.2 ^b	2.0±1.4 ^a	0	0	

注:同列不同小写字母表示各处理间差异显著($p < 0.05$)

3.2 林地清理方式与人工幼林地水土流失

炼山与不炼山林地的最大区别在于炼山的林地地表缺乏采伐剩余物和地被物等的覆盖,其地表是裸露的,而地表覆盖能显著降低径流和土壤流失量^[27]。无论是土壤初始含水率的高低^[28],还是不同降雨等级^[29],秸秆覆盖均具有较好的水土保持效果;并随覆盖量的增加,产流、产沙总量逐渐减小,在喀斯特地区 6 000 kg/hm² 左右的覆盖量就有较好的水土保持效果^[29]。对秸秆覆盖的产流产沙过程分析认为:地表覆盖后不仅可以有效的削弱雨滴的溅蚀,利于保持土壤透水空隙通透,便于水分下渗,而且也能增加地表的糙度,减缓坡面流速,可使雨水有更多的机会下渗,延缓径流的起流时间^[28,30-31]。与炼山林地相比,不炼山林地因有地表覆盖物〔马尾松纯林皆伐后,仅地表残留的采伐剩余物(叶、枝和皮)的生物量就高达

23.63 t/hm²^[32]],其同样能截持雨水,避免雨滴直接溅蚀土壤,避免表层土壤空隙被堵塞,增加林地地表粗糙度,能推迟产流和径流峰的开始时间,减少洪峰流量^[1]。炼山不仅使林地土壤裸露,而且在火烧地被物和地上采伐剩余物的同时,烧掉了土壤动物的部分食物,灼烧了土壤,使表层的土壤结构、微生物、土壤动物、速效养分等有所变化,也间接地影响了土壤容重、非毛管孔隙度、总孔隙度等^[5],会对土壤的入渗特性产生一定影响,从而影响了到达土壤表层的水分的入渗。

本试验结果也显示,前两年水土流失量、炼山与不炼山差异显著($p < 0.05$)。第 1 a 径流量和泥沙流失量、炼山分别是不炼山的 3.5 和 15.8 倍,第 2 a 分别是 2.2 和 4.5 倍。这个数值较马祥庆等^[2]对不同林地清理方式下、杉木幼林地水土流失的值低得多。对比分

析后发现,本试验条件下、炼山处理的水土流失量较其降低了,而不炼山处理的水土流失量则较其增加了,尤其在第 1 a。这可能与降雨特性,以及采伐树种不同,引起地被物和采伐剩余物的数量和质量不同有关。

在有径流产生的月份,炼山处理的水土流失量显著高于不炼山($p < 0.05$),但随林地恢复时间的增加,有显著差异的月份逐渐减少。如第 1 a 除 2 月没有径流产生外,其他月份炼山处理与不炼山处理均差异显著($p < 0.05$),其径流量介于 1.7~9.4 倍,泥沙流失量介于 12.3~52.0 倍;第 2 a 2,4,6—10 月炼山处理的水土流失量也显著高于不炼山的($p < 0.05$),其径流量介于 1.7~5.6 倍,泥沙流失量介于 2.6~21.3 倍。本试验还发现,当有径流产生时,径流量小的月份(多出现在干季),炼山与不炼山水土流失的差异很大。如第 1 a 的 11 和 12 月,炼山径流量分别是不炼山的 9.4 和 8.5 倍,炼山泥沙流失量分别是不炼山的 52.0 和 42.0 倍。这可能与干态土壤在无覆盖时,产流快、随后产沙速率迅速增大有关^[28]。

在观测的这 3 a,产生地表径流的最小降雨量、炼山均低于不炼山的,也就是说当降雨量较小或土壤和地表覆盖物(采伐剩余物和地被物)较干燥时,不炼山不易产生径流;当降雨量足够大、有水土流失时,径流深和泥沙流失量、炼山处理均高于不炼山的,尤其是前两年。以次降雨量为自变量,分别以径流深和泥沙流失量为因变量,采用数学模型拟合,次降雨量与径流深(泥沙流失量)存在极显著的二次曲线关系($p < 0.01$)。进一步对曲线分析发现,当有径流(泥沙流失量)产生时,炼山处理曲线的瞬时斜率较不炼山的大,且随次降雨量的增加,斜率增加幅度大。可见,前两年,炼山处理的水土流失量之所以远高于不炼山处理,是因为与不炼山相比,炼山处理不仅能降低产生地表径流的最小降雨量,而且当次降雨量高于产生地表径流的量后,水土流失量的瞬时斜率大,且随次降雨量的增加,水土流失量的增加幅度大。总的来看,炼山后、随林地恢复时间的延长,林地水土流失量急剧减小,如:观测的这 3 a 径流量分别为 1984,744 和 228 m^3/hm^2 ,泥沙流失量分别为 20.7,1.8 和 0.2 t/hm^2 ;其与不炼山林地水土流失量的差距也急剧缩小。但本试验目前仅连续观测了 3 a,林地也尚未完全郁闭,之后随时间的推移,炼山林地水土流失量能否持续减小,林地清理方式对水土流失的影响会持续多久等问题还未可知。故本文的研究结果仅是阶段性的,试验还将继续观测,以便获得更完备的信息,得出更多结论,为林地科学管理提供有价值的参考。另外,本试

验的径流小区都设在林地的上坡位,坡度主要集中在 25°和 26°,涉及到东南和东北两个坡向。

4 结论

炼山后的前两年,人工幼林地水土流失量均表现为炼山显著高于不炼山($p < 0.05$)。炼山后第 1 a,炼山的年径流量和年泥沙流失量分别是不炼山的 3.5 倍和 15.8 倍;在有水土流失的月份,炼山的月径流量和月泥沙流失量分别是不炼山的 1.7~9.4 倍和 12.3~52.0 倍。炼山后第 2 a 年径流量和年泥沙流失量分别是不炼山的 2.2 倍和 4.5 倍,炼山的月径流量和月泥沙流失量分别是不炼山的 1.7~5.6 倍和 2.6~21.3 倍。第 3 a 炼山依然能显著增加个别月份的水土流失量。

在观测的 3 a 中,产生地表径流的最小降雨量、炼山均低于不炼山的,而有径流产生的同场降雨,炼山的水土流失量均高于不炼山,且随次降雨量的增加,炼山水土流失量的增加幅度大。

[参 考 文 献]

- [1] 俞新妥,杨玉盛,何智英,等.炼山对杉木人工林生态系统的影响(I):炼山初期林地水土流失的初步研究[J].福建林学院学报,1989,9(3):238-255.
- [2] 马祥庆,俞新妥,何智英,等.不同林地清理方式对杉木幼林生态系统水土流失的影响[J].自然资源学报,1996,11(1):33-40.
- [3] 马祥庆,何智英,俞新妥.不同林地清理方式对杉木人工林地力的影响[J].林业科学,1995,31(6):485-490.
- [4] 杨玉盛,李荫森,杨学震.论杉木营林制度与水土保持[J].福建水土保持,1993(4):3-6,9.
- [5] 林开敏,俞新妥,何智英.炼山的生态影响及其防治对策[J].福建水土保持,1994(2):3-7.
- [6] 杨尚东,吴俊,谭宏伟,等.红壤区桉树人工林炼山后土壤肥力变化及其生态评价[J].生态学报,2013,33(24):7788-7797.
- [7] 薛立,向文静,何跃君,等.不同林地清理方式对杉木林土壤肥力的影响[J].应用生态学报,2005,16(8):1417-1421.
- [8] 陈礼清,罗承德,宫渊波,等.炼山对巨桉人工幼林土壤酶活性和有效养分的影响[J].东北林业大学学报,2014,42(3):89-92,102.
- [9] 凌威,王新杰,刘乐,等.皆伐与不同迹地清理方式对杉木土壤化学性质的影响[J].东北林业大学学报,2016,44(4):48-53.
- [10] Yang Yusheng, Guo Jianfen, Chen Guangshui, et al. Effect of slash burning on nutrient removal and soil fertility in Chinese fir and evergreen broadleaved forests of Mid-Subtropical China [J]. Pedosphere, 2003,

- 13(1):87-96.
- [11] Guo Jianfen, Chen Guangshui, Xie Jinsheng, et al. Clear-cutting and slash burning effects on soil CO₂ efflux partitioning in Chinese fir and evergreen broad-leaved forests in subtropical China [J]. *Soil Use and Management*, 2016, 32(2):220-229.
- [12] Wang Yuzhe, Liu Xian, Yan Qian, et al. Impacts of slash burning on soil carbon pools vary with slope position in a pine plantation in subtropical China [J]. *Catena*, 2019, 183:104212.
- [13] 袁仁茂, 杨晓燕, 李树德. 水土流失的多因素分析及其防治措施[J]. *水土保持研究*, 1999, 6(4):80-85.
- [14] 袁琳, 张雷, 吴咏臻. 广西人工林面积居全国榜首[M]. *广西日报*, 20191007(2).
- [15] 张雷, 伍建波. 广西林业产值突破 5000 亿元[J]. *广西林业*, 2018(1):6.
- [16] 卢祖俊, 周国福. 广西速生丰产林发展的现状分析[J]. *广西林业科学*, 2006, 35(3):171-173.
- [17] 黄承标, 韦炳二, 黎洁娟. 广西不同植被类型地表径流的研究[J]. *林业科学*, 1991, 27(5):490-497.
- [18] 黄承标, 刘运华, 秦武明, 等. 3 种植被恢复过程中水土流失规律的研究[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2010, 34(2):59-63.
- [19] 韦中绵, 黄承标, 何诗雄, 等. 桉树纯林和桉-珍混交林水土流失规律的分析[J]. *广西林业科学*, 2016, 45(4):404-408.
- [20] 李华, 卢立华, 郑路, 等. 一种简易径流场(实用新型专利): 中国, ZL201822258483.1 [P]. 2018-12-29.
- [21] 张嘉懿, 汪军红, 程先富, 等. 降雨对江江河小流域不同农作物措施坡面产流产沙的影响[J]. *水土保持学报*, 2021, 35(2):8-14.
- [22] 吴洁玲, 查轩, 陈世发, 等. 1951—2018 年韶关不同量级降雨侵蚀力变化[J]. *水土保持学报*, 2021, 35(4):21-26.
- [23] Liu Yaojun, Yang Jie, Hu Jianmin, et al. Characteristics of the surface-subsurface flow generation and sediment yield to the rainfall regime and land-cover by long-term insitu observation in the red soil region, Southern China [J]. *Journal of Hydrology*, 2016, 539:457-467.
- [24] Tao Peng, Wang Shijie. Effects of land use, land cover and rainfall regimes on the surface runoff and soil loss on karst slopes in Southwest China-Sciedirect [J]. *Catena*, 2012, 90(1):53-62.
- [25] 张泽铭, 张楠, 刘强, 等. 暴雨对水土流失的影响及防治措施[J]. *河北农业科学*, 2010, 14(2):79-82.
- [26] 周国逸, 闫俊华, 申卫军, 等. 马占相思人工林和果园地表径流规律的对比研究[J]. *植物生态学报*, 2000, 24(4):451-458.
- [27] Wischmeier W H. Relation of field-plot runoff to management and physical factors [J]. *Soil Science Society of American Journal*, 1966, 30(2):272-277.
- [28] 刘柳松, 任红艳, 史学正, 等. 秸秆覆盖对不同初始含水率土壤产沙过程的影响[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(1):108-112.
- [29] 盘礼东, 李瑞, 黎庆贵, 等. 黔西喀斯特区秸秆覆盖对坡耕地产流产沙特征的响应[J]. *水土保持学报*, 2021, 35(1):9-16.
- [30] 车明轩, 宫渊波, Muhammad N K, 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):131-142.
- [31] 唐涛, 郝明德, 单凤霞. 人工降雨条件下秸秆覆盖减少水土流失的效应研究[J]. *水土保持研究*, 2008, 15(1):9-11, 40.
- [32] 李华, 郑路, 李朝英, 等. 马尾松人工林采伐剩余物生物量及养分贮量[J]. *生态学杂志*, 2018, 37(3):854-860.