

doi:10. 3969/j. issn. 1671-3168. 2023. 04. 029

模拟酸雨对广西 4 个树种苗木叶绿素含量的影响

周顺福, 李春叶

(云南省林业调查规划院大理分院, 云南 大理 671000)

摘要:分析不同 pH 值及处理方式的酸雨对广西地区速生及珍贵树种幼苗叶绿素含量的影响, 为此类树种对酸雨的耐受性方面研究提供理论依据。通过采用盆栽试验, 设置 4 个水平 (pH4.0、3.0、5.0、5.6), 1 个对照 (pH6.0) 总共 5 种处理方式, 测定叶片叶绿素含量变化情况。结果表明, 不同 pH 的酸雨处理下, 巨尾桉 9 号、格木、降香黄檀、土沉香的叶绿素 a、叶绿素 b、叶绿素总含量及叶绿素 a/b 的变化规律不同, 且同一 pH 值的酸雨对 4 个树种叶绿素 a/b 的影响也不相同; 随着酸雨 pH 值的减小, 各树种的叶绿素 a/b 总体上均表现出先降低后升高趋势。

关键词:模拟酸雨; 巨尾桉 9 号; 格木; 降香黄檀; 土沉香; 苗木; 叶绿素含量

中图分类号: S723.13; X517; Q945.11 文献标识码: A 文章编号: 1671-3168(2023)04-0177-05

引文格式: 周顺福, 李春叶. 模拟酸雨对广西 4 个树种苗木叶绿素含量的影响[J]. 林业调查规划, 2023, 48(4): 177-181.

doi:10. 3969/j. issn. 1671-3168. 2023. 04. 029

ZHOU Shunfu, LI Chunye. Effects of Simulated Acid Rain on Chlorophyll Content of Four Species Seedlings in Guangxi [J]. Forest Inventory and Planning, 2023, 48(4): 177-181. doi:10. 3969/j. issn. 1671-3168. 2023. 04. 029

Effects of Simulated Acid Rain on Chlorophyll Content of Four Species Seedlings in Guangxi

ZHOU Shunfu, LI Chunye

(Dali Branch, Yunnan Institute of Forest Inventory and Planning, Dali, Yunnan 671000, China)

Abstract: This paper analyzed the effect of simulated acid rain with different pH values and different treatments on chlorophyll content of four fast-growing and precious tree species in Guangxi, to provide theory basis for acid tolerance assessment in such kind of trees. By pot experiment method, four pH treatment levels (pH4.0, pH3.0, pH5.0, pH5.6) and one control (pH6.0) with five different treatments were adopted, and the chlorophyll content were determined in the whole process. The results showed that under different acid rain, the content of chlorophyll a, chlorophyll b, total chlorophyll and chlorophyll a/b of *E. grandis* × *E. urophylla* No. 9, *Erythrophloeum fordii* Oliv, *Dalbergia odorifera* T. Chen and *Aquilaria sinensis* (Lour.) Gilg showed significant difference, and the chlorophyll a/b was different under same acid rain in four species; under simulated rain, with the decrease of pH in acid rain, the chlorophyll a/b showed the trend of initial decrease and then increase, further more, different pH acid rain significantly affected the different chlorophyll index.

收稿日期: 2022-03-08.

基金项目: 广西自然科学基金项目 (2015GXNSFAA139081).

第一作者: 周顺福 (1989-), 男, 云南会泽人, 硕士, 工程师. 主要从事林业调查规划工作. Email: 770216795@qq.com

责任作者: 李春叶 (1989-), 女, 云南巍山人, 硕士, 工程师. 主要从事林业调查规划工作. Email: 553876350@qq.com

Key words: simulated acid rain; *E. grandis* × *E. urophylla* No. 9; *Erythrophleum fordii* Oliv; *Dalbergia odorifera* T. Chen; *Aquilaria sinensis* (Lour.) Gilg; seedling; chlorophyll content

酸雨与全球气候变暖、臭氧层破坏被称为世界三大生态环境灾难,主要表现在对生态系统(土壤、水体、植物等)的危害,而且会对各种建筑物造成破坏,严重威胁着人类的身体健康^[1]。酸雨对植物的伤害有两种,一是直接危害植物叶子,一是通过酸化土壤对植物造成间接伤害。广西地处华南,且山地和盆地较多,纬度较低,属亚热带湿润气候,受气候、逆层流等影响较大,大气污染物扩散能力较差,导致酸雨灾害严重。广西的 11 个地市、33 个县(市)已被列入酸雨控制区^[2]。

广林巨尾桉 9 号(*E. grandis* × *E. urophylla* No. 9)由于生长迅速、树干通直、枝下高较高等优点被广西林木良种委员会审定林木良种,在广西区及其周围地区普遍种植^[3]。广西是中国主要桉树引种推广区,也是中国主要木材战略贮备基地。桉树有着药用、经济等多种价值。格木(*Erythrophleum fordii* Oliv)为珍贵的硬材树种,其木材坚硬,结构均匀,是优良的建筑及家具用材^[4];降香黄檀(*Dalbergia odorifera* T. Chen),俗称“黄花梨”,其木材坚硬、纹理美观,是制作古典家具的上乘材料,国家二级重点保护野生植物,濒危树种,与紫檀木、鸡翅木、铁梨木并称中国古代四大名木^[5]。土沉香(*Aquilaria sinensis* (Lour.) Gilg)是我国特有的生产高品质香料及国药沉香的植物,国家二级重点保护野生植物^[6]。

酸雨对植物生长生理的研究已有不少,但有关酸雨对桉树、格木、降香黄檀、土沉香等树种幼苗生理活性尤其是叶绿素含量方面研究仍很少见。广西是大面积种植桉树的省份之一,随着桉树发展趋于饱和,近年来降香黄檀、格木、土沉香等珍贵树种也不断发展,但目前对这 4 个树种在酸雨适应方面的研究仍较少,其适应酸雨的机理还不清楚。本试验以巨尾桉广林 9 号、格木、降香黄檀、土沉香苗木为试验材料,采用不同酸度的酸雨喷淋,模拟研究其在酸雨作用下的生理反应机制,探讨酸性条件下树木的叶绿素变化规律,为此类树种对酸雨的耐受性研究提供参考,也为广西的重要用材树种和珍贵树种的栽培、推广、引种和保护提供一定的理论依据,并与其他林木耐酸性研究提供借鉴,为解决森林酸雨危害问题提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验地点和材料

试验地位于广西南宁市广西大学林学院苗圃(22°51'20"N, 108°17'14"E)。该地区属亚热带季风气候,年均气温 21.6℃,极端最高气温 40℃, ≥10℃ 年积温 7 200℃,年均降水量 1 304.2 mm,平均相对湿度为 79%,降雨多集中在 5—9 月。

试验树种:巨尾桉 9 号、格木、降香黄檀、土沉香。

试验苗木:巨尾桉 9 号为 3 月生组培苗,其他均为 2 年生实生苗。苗木 2015 年 2 月初移栽到高 10 cm、直径 8 cm 的塑料盆中,每盆装土,用黄心土和河沙按 1:1 混合而成的土壤(pH4.90)进行栽培。在初期进行抚育缓苗,期间用普通自来水喷施。

1.2 实验测定项目和方法

1.2.1 试验设计

模拟酸雨的配制按照广西酸雨化学成分 SO_4^{2-} 和 NO_3^- 离子浓度为 7:1,用 95%~98% 的浓硫酸和 65%~68% 的浓硝酸按体积比 4.8:1 配置酸雨母液。试验设 4 个水平(pH4.0、3.0、5.0、5.6),一个对照(pH6.0),每组 12 个重复,共计需 240 盆(5 个水平,4 种树种,每个水平每种树种 12 株)。试验于 2015 年 3 月 10 日至 4 月 20 日进行。模拟酸雨的喷洒采用喷雾法,用喷雾器喷洒不同水平值的模拟酸雨。喷洒频率为每隔 7 d 喷 1 次,共 4 次。每次均喷至叶片滴液为度。喷淋时间一般在下午 4:00—6:00。试验结束后测定相关指标。

1.2.2 叶绿素含量的测定

采用熊庆娥等^[7]的方法进行叶绿素含量测定:将新鲜叶片洗净擦干后去除中脉,称取 0.2 g,剪碎,放入 50 mL 的具塞试管中,加入乙醇—丙酮混合液(等体积混合)20 mL。采用电位法测定土壤 pH 值:使叶片完全浸入液体,盖上试管塞,放置暗处 24 h,期间进行多次摇动;当叶片完全变成白色时进行比色;以丙酮—乙醇混合液作空白对照;在波长 665、649 nm 下测定其吸光度。结果计算:分别按公式(1)、(2)计算叶绿素 a、b 的浓度(mg/L),两者相加即得叶绿素总浓度。

$$\text{叶绿素 a 浓度: } C_a = 13.95 A_{665} - 6.88 A_{649} \quad (1)$$

$$\text{叶绿素 b 浓度: } C_b = 24.96 A_{649} - 7.32 A_{665} \quad (2)$$

$$\text{叶绿素总浓度: } C_{a+b} = C_a + C_b \quad (3)$$

求得色素的浓度后,再按下式计算组织中单位鲜重的各色素的含量:

叶绿素含量(mg/g)=
$$\frac{C(\text{mg/L}) \times \text{提取液总量}(\text{L}) \times \text{稀释倍数}}{\text{样品鲜重}(\text{g})} \quad (4)$$

色素浓度 $C=D \times 1000/34.5$ (5)

1.3 数据分析

对试验数据采用 Excel、SPSS 21.0 等软件进行统计分析,方差分析及多重比较采用 Duncan 新复极差法。

2 结果与分析

2.1 叶绿素 a 含量

在不同 pH 值的酸雨处理下,4 个树种苗木叶片中叶绿素 a 含量的变化规律不尽相同。巨尾桉 9 号苗木叶绿素 a 含量的大小顺序为 pH3.0 > pH5.6 > pH5.0 > pH4.0, 格木为 pH4.0 > pH5.0 > pH5.6 > pH3.0, 降香黄檀为 pH5.0 > pH4.0 > pH5.6 > pH3.0, 土沉香为 pH5.6 > pH4.0 > pH5.0 > pH3.0。

pH3.0 时,巨尾桉 9 号叶绿素 a 含量最大,为 6.43 mg/g FW,显著大于对照及 pH4.0 时的叶绿素 a 含量;pH4.0 时,格木叶绿素 a 含量最大,为 5.63 mg/g FW,显著大于对照及其他处理下的叶绿素 a 含量;pH5.0 时,降香黄檀叶绿素 a 含量最大,与对照及 pH4.0、5.0、5.6 间差异不显著,但显著大于 pH3.0 时的叶绿素 a 含量;土沉香各酸雨 pH 值下的叶绿素 a 含量均较对照小,pH5.6 酸雨处理下的叶绿素 a 含量与对照间差异不显著,其他 pH 值酸雨处理下的叶绿素 a 含量均显著小于对照(表 1)。

表 1 模拟酸雨对 4 个树种苗木叶绿素 a 含量的影响

Tab.1 Effect of simulated acid rain on the content of chlorophyll a of four tree species seedling

mg/g FW				
处理	巨尾桉 9 号	格木	降香黄檀	土沉香
pH3.0	6.43±0.34a	4.91±0.07c	5.29±0.03b	5.48±0.16b
pH4.0	5.65±0.18b	5.63±0.09a	5.50±0.07ab	5.64±0.30b
pH5.0	6.13±0.11a	5.36±0.13b	5.63±0.12a	5.64±0.10b
pH5.6	6.18±0.09a	5.25±0.16b	5.42±0.01ab	6.64±0.23a
CK	4.82±0.05c	5.48±0.07c	5.42±0.22ab	6.82±0.18a

2.2 叶绿素 b 含量

在不同 pH 的酸雨处理下,4 个树种苗木叶片中

叶绿素 b 含量的变化规律不尽相同。巨尾桉 9 号叶绿素 b 含量的大小顺序为 pH5.0 > pH3.0 > pH4.0 > pH5.6, 格木为 pH5.0 > pH4.0 > pH5.6 > pH3.0, 降香黄檀为 pH5.6 > pH4.0 > pH5.0 > pH3.0, 土沉香为 pH5.6 > pH4.0 > pH5.0 > pH3.0。pH5.0 时,巨尾桉 9 号和格木叶绿素 b 含量均达到最大,分别为 2.97、2.58 mg/g FW,且均显著大于对照及其他处理下的叶绿素 b 含量;pH5.6 时,降香黄檀和土沉香叶绿素 b 含量最大,分别为 2.65、2.76 mg/g FW,且均显著大于对照组叶绿素 b 含量(表 2)。

表 2 模拟酸雨对 4 个树种苗木叶绿素 b 含量的影响

Tab.2 Effect of simulated acid rain on the content of chlorophyll b of four tree species seedling

mg/g FW				
处理	巨尾桉 9 号	格木	降香黄檀	土沉香
pH3.0	2.72±0.17b	2.36±0.04bc	2.23±0.07c	2.43±0.26b
pH4.0	2.62±0.14b	2.51±0.10ab	2.58±0.04ab	2.72±0.10ab
pH5.0	2.97±0.13a	2.58±0.07a	2.54±0.06b	2.52±0.11ab
pH5.6	2.60±0.05b	2.40±0.06bc	2.65±0.05a	2.76±0.13a
CK	2.31±0.02c	2.34±0.14c	2.53±0.06b	2.41±0.15b

2.3 叶绿素总含量

在不同 pH 的酸雨处理下,4 个树种苗木叶片中叶绿素总含量的变化规律不尽相同。巨尾桉 9 号叶绿素总含量的大小顺序为 pH3.0 > pH5.0 > pH5.6 > pH4.0, 格木为 pH4.0 > pH5.0 > pH5.6 > pH3.0, 降香黄檀为 pH5.0 > pH4.0 > pH5.6 > pH3.0, 土沉香为 pH5.6 > pH4.0 > pH5.0 > pH3.0(表 3)。

表 3 模拟酸雨对 4 个树种苗木叶绿素总含量的影响

Tab.3 Effect of simulated acid rain on the content of total chlorophyll of four tree species seedling

mg/g FW				
处理	巨尾桉 9 号	格木	降香黄檀	土沉香
pH3.0	9.15±0.51a	7.27±0.11c	7.52±0.05b	7.91±0.40b
pH4.0	8.27±0.29b	8.14±0.08a	8.08±0.10a	8.37±3.95b
pH5.0	9.09±0.18a	7.94±0.20ab	8.18±0.17a	8.16±0.10b
pH5.6	8.79±0.14ab	7.65±0.21b	8.07±0.05a	9.40±0.32a
CK	7.12±0.06c	7.18±0.20c	7.95±0.21a	9.24±0.31a

pH3.0 时,巨尾桉 9 号叶绿素总含量最大,为 9.15 mg/g FW,显著大于对照组叶绿素总含量;随着

模拟酸雨 pH 值的减小,格木叶绿素总含量逐渐增大;当 pH4.0 时,其叶绿素总含量达到最大,为 8.14 mg/g FW,显著大于对照,且之后随着模拟酸雨 pH 值的减小,其叶绿素总含量迅速下降。随着模拟酸雨 pH 值的减小,降香黄檀叶绿素总含量也呈先上升后下降趋势,在 pH5.0 时,其叶绿素总含量达到最大,为 8.18 mg/g FW,与对照间差异不显著;当 pH5.6 时,土沉香叶绿素总含量最大,为 9.40 mg/g FW,与对照间差异不显著,但显著大于其他酸雨酸度。

2.4 叶绿素 a/b

在不同 pH 值的酸雨处理下,4 个树种苗木叶片中叶绿素 a/b 的变化规律不尽相同。巨尾桉 9 号叶绿素 a/b 的大小顺序为 pH5.6 > pH3.0 > pH4.0 > pH5.0,格木为 pH4.0 > pH5.6 > pH3.0 > pH5.0,降香黄檀为 pH3.0 > pH5.0 > pH4.0 > pH5.6,土沉香为 pH5.6 > pH3.0 > pH5.0 > pH4.0 (表 4)。

表 4 模拟酸雨对 4 个树种苗木叶绿素 a/b 的影响
Tab. 4 Effect of simulated acid rain on the chlorophyll a/b of four tree species seedling

处理	巨尾桉 9 号	格木	降香黄檀	土沉香
pH3.0	2.37± 0.02Aa	2.09± 0.01Bb	2.36± 0.08Aa	2.26± 0.19ABbc
pH4.0	2.16± 0.08ABb	2.24± 0.12Aa	2.13± 0.02ABbc	2.07± 0.04Bc
pH5.0	2.07± 0.10BCb	2.08± 0.01BCb	2.22± 0.01ABb	2.24± 0.13Abc
pH5.6	2.38± 0.02Aa	2.19± 0.06Bab	2.04± 0.03Cc	2.41± 0.10Ab
CK	2.09± 0.01Bb	2.07± 0.09Bb	2.14± 0.12Bbc	2.83± 0.12Aa

同一 pH 值的酸雨对 4 个树种叶绿素 a/b 的影响也不尽相同。pH3.0 酸雨处理下各树种叶绿素 a/b 的大小顺序为巨尾桉 9 号 > 降香黄檀 > 土沉香 > 格木; pH4.0 处理下格木 > 巨尾桉 9 号 > 降香黄檀 > 土沉香; pH5.0 处理下格木 > 降香黄檀 > 土沉香 > 巨尾桉 9 号; pH5.6 处理下土沉香 > 巨尾桉 9 号 > 格木 > 降香黄檀。

pH5.6 时,巨尾桉 9 号叶绿素 a/b 最大,为 2.38,显著大于对照组叶绿素 a/b; pH4.0 时,格木叶绿素 a/b 显著大于对照,为 2.24; 降香黄檀叶绿素 a/b 在模拟酸雨 pH3.0 时达到最大,为 2.36,显著大于对照及其他处理组;模拟酸雨各处理浓度下,土沉香的

叶绿素 a/b 均显著小于对照。模拟酸雨处理下,随着酸雨 pH 值的减小,各树种的叶绿素 a/b 总体上均表现出先降低后升高趋势。

3 结论与讨论

3.1 结论

不同 pH 的酸雨处理下,4 个树种苗木中叶绿素 a、叶绿素 b、叶绿素总含量及叶绿素 a/b 的变化规律不同,且同一 pH 值的酸雨对 4 个树种叶绿素 a/b 的影响也不相同。

模拟酸雨 pH3.0 时,巨尾桉 9 号叶绿素 a 含量、叶绿素总含量显著大于对照; pH5.0 时,其叶绿素 b 含量最大,显著大于对照及其他处理; pH5.6 时,其叶绿素 a/b 最大,且显著大于对照。模拟酸雨 pH4.0 时,格木叶绿素 a 含量、叶绿素总含量、叶绿素 a/b 显著大于对照; pH5.0 时,其叶绿素 b 含量最大,显著大于对照及其他处理。模拟酸雨 pH5.0 时,降香黄檀叶绿素 a、叶绿素总含量略大于对照及其他处理下的叶绿素 a 含量; pH5.6 时,其叶绿素 b 含量显著大于对照; pH3.0 时,其叶绿素 a/b 显著大于对照及其他处理组。模拟酸雨不同 pH 处理下,土沉香叶绿素 a 含量、叶绿素 a/b 均较对照小; pH5.6 时,其叶绿素 b、叶绿素总含量达到最大。模拟酸雨处理下,随着酸雨 pH 值的减小,各树种的叶绿素 a/b 总体上均表现出先降低后升高趋势。

3.2 讨论

叶绿素在植物叶片光能的吸收、传递及光化学反应等方面起着相当重要的作用。有研究表明,在低 pH 值酸雨处理下,模拟酸雨处理会阻碍树木苗木叶绿素的合成,严重时还会使原有叶绿素发生降解^[8]。杜仲叶叶绿素含量和叶绿素 a/b 值随酸雨 pH 值降低而降低,且呈显著正相关关系^[9];而模拟酸雨对 9 种草本观赏植物叶片叶绿素含量研究的结果与其相反。结果显示,酸雨强度与植物叶绿素含量呈负相关,且随着酸雨胁迫次数的增加,叶片叶绿素含量降低^[10]; 6 种园林树木在酸雨 pH 值小于 3.5 时,苗木叶片叶绿素含量降低,而轻度酸雨 (pH5.0) 下苗木均未受到伤害^[11]。本试验中,随着酸雨 pH 值的减小,巨尾桉 9 号、格木、降香黄檀、土沉香等 4 个树种苗木叶片中,叶绿素 a/b 总体上均表现出先降低后升高趋势。不同 pH 值的酸雨对不同树种叶绿素各指标的影响不同,4 个树种苗木叶片中叶绿素总含量显著大于对照的点分别在 pH3.0、4.0、

5.0、5.6。在不同 pH 值模拟酸雨处理下,树木叶绿素总含量增加可能是因为在树木体内更新周期加快,且酸雨中的 NO_3^- 可被树木吸收利用^[8],而树木叶绿素含量的增加能使植株捕获光能的能力增加^[12],促进植株生长,这与模拟酸雨对树木生长的影响结果相一致。

参考文献:

- [1] RIOFRIO-DILLON G, BERTRAND R, GEGOUT J. Toward a recovery time: Forest herbs insight related to anthropogenic acidification[J]. *Global Change Biology*, 2012, 18(11): 3383-3394.
- [2] 覃东才. 广西酸雨污染及变化趋势[J]. *中小企业科技*, 2007(10): 274-275.
- [3] 王鹏良, 姜福星, 蔡玲, 等. 广林巨尾桉9号遗传转化体系的建立[J]. *林业科技开发*, 2013(3): 76-80.
- [4] 赵志刚. 珍稀濒危树种格木保护生物学研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2011.
- [5] 贾瑞丰. 降香黄檀人工促进心材形成的研究[D]. 北

京: 中国林业科学研究院, 2014.

- [6] 马华明. 土沉香(*Aquilaria sinensis* (Lour.) Gilg) 结香机制的研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2013.
- [7] 熊庆娥. 植物生理学实验教程[M]. 成都: 四川科学技术出版社, 2003.
- [8] 黄辉, 黄朝法. 酸雨对植物生理生态特性的影响研究进展[J]. *林业勘察设计*, 2008(1): 46-49.
- [9] 齐泽民, 钟章成. 模拟酸雨对杜仲光合生理及生长的影响[J]. *西南师范大学学报(自然科学版)*, 2006(2): 151-156.
- [10] 张光生, 刘英, 周青. 9种草本观赏植物叶绿素含量和细胞膜透性对酸雨胁迫的响应[J]. *生态与农村环境学报*, 2006(4): 83-87.
- [11] 李志国, 姜卫兵, 翁忙玲, 等. 常绿阔叶园林6树种(品种)对模拟酸雨的生理响应及敏感性[J]. *园艺学报*, 2011(3): 512-518.
- [12] 杨柳青, 廖飞勇, 赵坤, 等. 水分胁迫对加拿大一枝黄花光合和荧光参数的影响[J]. *北方园艺*, 2011(23): 12-14.

责任编辑: 刘平书

(上接第104页)

- [4] 赵建民, 孙宗芹. 善洲林场红色旅游文本英译研究[J]. *保山学院学报*, 2018, 37(6): 71-75.
- [5] 云南省杨善洲精神教育基地管理委员会(善洲林场). 守护精神家园 传承时代力量[J]. *中国生态文明*, 2019(3): 31-32.
- [6] 王可丽, 江灏, 赵红岩. 西风带与季风对中国西北地区的水汽输送[J]. *水科学进展*, 2005(3): 432-438.
- [7] 杨建平, 丁永建, 陈仁升, 等. 亚洲季风与中国干湿、农牧气候界线之关系[J]. *地理科学*, 2005(4): 59-65.
- [8] 卞福久, 王瑞元. 云南热区农业气候资源特征及分布[J]. *热带地理*, 1991(3): 270-277.
- [9] 赵凤君, 舒立福. 气候异常对森林火灾发生的影响研究[J]. *森林防火*, 2007(1): 21-23.
- [10] 闫想想, 王秋华, 李彩松, 等. 昆明重大森林火灾火烧迹地可燃物研究[J]. *西南林业大学学报(自然科学)*, 2019, 39(5): 157-164.
- [11] 李文华, 李芬, 李世东, 等. 森林生态效益补偿的研究现状与展望[J]. *自然资源学报*, 2006(5): 677-688.
- [12] 王秋华, 徐伟恒, 李伟, 等. 滇中地区地盘松林地表凋落物的潜在能量研究[J]. *林业调查规划*, 2014, 39(6): 16-20.
- [13] 吴明山, 周汝良, 张明莎, 等. 林分尺度上的森林火灾风险动态评估[J]. *林业资源管理*, 2020(2): 126-134.
- [14] 赵中华. 基于林分状态特征的森林自然度评价研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2009.
- [15] 王德祥, 张景群, 朱德兰, 等. 几种林分类型火线状况的研究[J]. *西北林学院学报*, 1996, 2(49): 26.
- [16] 肖化顺, 曾思齐, 谢绍锋, 等. 森林可燃物管理研究进展[J]. *世界林业研究*, 2009, 22(1): 48-53.
- [17] 王秋华, 单保君, 龚家平, 等. 滇中地区云南松纯林计划烧除研究[J]. *江西农业大学学报*, 2018, 40(2): 235-240.
- [18] 赵凤君, 王明玉, 舒立福. 森林火灾中的树冠火研究[J]. *世界林业研究*, 2010, 23(1): 39-43.
- [19] 李世友, 刘会龙, 张凯, 等. 预防华山松树冠火的最低修枝高度探讨[J]. *华中农业大学学报*, 2009, 28(3): 361-364.
- [20] 闫想想, 王秋华, 缪秀丽, 等. 昆明西山林场5种可燃物的火行为研究[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2021, 45(1): 197-204.
- [21] 王秋华, 李晓娜, 叶彪, 等. 华山松纯林地表可燃物的潜在燃烧火行为研究[J]. *林业工程学报*, 2019, 4(6): 151-157.
- [22] 李永宁, 张宾兰, 秦淑英, 等. 郁闭度及其测定方法研究与应用[J]. *世界林业研究*, 2008(1): 40-46.
- [23] 金琳, 刘晓东, 张永福. 森林可燃物调控技术方法研究进展[J]. *林业科学*, 2012, 48(2): 155-161.

责任编辑: 陈旭