

文章编号: 1000-5692(2007)02-0192-06

3种针叶树种树皮的阻燃性研究

李世友, 李小宁, 李生红, 金贵军, 周全, 胡小龙, 王秋华

(西南林学院 保护生物学学院, 云南 昆明 650224)

摘要: 在火烧迹地调查的基础上, 分析了滇中云南油杉 *Keteleeria evelyniana*, 华山松 *Pinus amandii*, 云南松 *Pinus yunnanensis* 等3种树种在不同林火行为下的耐火性差异, 确定了从树皮的阻燃性角度分析林木耐火性的研究方法。对3种树种的树皮的结构进行了调查, 对树皮的平均厚度、含水率、导热系数、氧指数和热辐射作用下的质量损失过程和树皮内表面温度变化过程6个阻燃性相关因子进行了测定和分析。结果表明: ①云南油杉树皮内皮层结构完整不开裂, 外皮层疏松, 平均厚度是云南松和华山松树皮的1.38和3.07倍, 导热系数为云南松树皮和华山松树皮的67.66%和54.85%, 氧指数是云南松和华山松树皮的1.25和1.33倍。在热辐射作用下, 云南油杉树皮内表面升温速率低, 热分解缓慢, 阻燃性最强, 云南松树皮的阻燃性次之, 华山松树皮的阻燃性最差。②树皮阻燃性的不同造成了云南油杉、云南松和华山松树种间耐火性差异。根据3种树种树皮的阻燃性和林木耐火性差异提出了相应的森林消防措施。图3表3参11

关键词: 森林保护学; 树皮结构; 导热系数; 氧指数; 阻燃性

中图分类号: S762.3 **文献标志码:** A

1 云南昆明2块森林火灾火烧迹地调查

调查云南昆明西山区海口镇海丰村的森林火灾火烧迹地后发现, 林地上胸径20 cm左右的云南松 *Pinus yunnanensis* 只有少量死亡, 而与它们混交的华山松 *Pinus amandii* 死亡率接近100%。特别是位于平坦山脊上胸径在30 cm以上的高大华山松死亡率达23.68%。这些大树的烧黑高度均在1 m以下, 枝下高在5 m以上, 树冠下稀疏分布的杂草高度不超过40 cm, 与它们混交的胸径较小的云南松, 枝下高较低, 有的甚至发生了树冠火, 却没有死亡。尤其值得一提的是, 着火时, 山脊上的弱地表火在风的作用下, 蔓延速度快, 林下杂草燃烧释放出来的热量在风的作用下向水平方向大量扩散, 减轻了热气流在垂直方向上对枝和叶的作用, 难以对10多米高处的华山松枝和叶造成致命伤害, 树木的死亡不应该是由于枝和叶的死亡引起的。调查昆明安宁“三二九”重大森林火灾火烧迹地后发现, 坡地上胸径在15 cm以上的云南油杉 *Keteleeria evelyniana* 发生过高强度树冠火, 叶被烧掉, 枝被烧焦, 林木却没有死亡。进一步测定这3个树种枝和叶的含水率、粗脂肪、灰分、热值和着火点温度后发现, 这些理化指标在各树种间相差不大, 不能解释云南油杉小树在高强度树冠火作用下死亡率低于华山松大

收稿日期: 2006-06-22; 修回日期: 2006-10-16

基金项目: 云南省自然科学基金资助项目(2003C0021Q); 云南省昆明市科技局重点资助项目(06H114135)

作者简介: 李世友, 讲师, 硕士, 从事森林防火研究。E-mail: lsy0703@163.com

树在弱地表火短时间作用下的死亡率高这一现象。由此可见, 树种间耐火性差异不是由枝、叶的燃烧性不同引起的。在火烧迹地上, 3 种树种的树干基部树皮均受到了火焰的直接作用, 树木是否能够存活应该与树皮有关。如位于海丰村火烧迹地山脊上在火烧中存活下来的 1 株华山松, 胸径为 31.4 cm, 枝下高为 3.8 m, 林木片面燃烧高度达 0.68 m, 受火直接作用的树皮表面略变黑, 剥开这部分树皮后发现其内部韧皮部和木质部表面已变成黑褐色, 说明这部分韧皮部和形成层已死亡, 死亡范围正好与树皮外表面变黑的范围相同, 从中可以推测树皮与华山松树干的受害程度有关。林火对树干的伤害首先是对韧皮部和形成层的伤害, 伤害的程度取决于火的强度、火烧持续时间、树皮的厚度和热传导性等。树皮抗火性主要由树皮的厚度、密度、含水率、细胞结构、开裂和脱落方式等因素决定^[1]。在国内, 有人对树皮的燃烧性进行过相关研究^[2-10]。

2 材料与方 法

2.1 树皮采集

试验用云南油杉、云南松和华山松 3 种树种树皮, 于 2006 年 5 月采集于西南林学院树木园。选择生长良好, 树干截面为圆形, 树皮在各面上的分布相对均匀, 胸径为 (20 ± 0.8) cm 的树木为采样木, 从开裂程度、开裂方式、密度和颜色等方面记录树皮的结构特征, 从离地 1.3 m 处的树干向下用锯子锯开一块宽 10 cm, 高 20 cm 的树皮, 用一字起撬开并取下树皮。用钢尺从树皮的 4 边测量最厚处的厚度, 取 4 个数据的平均值为该株林木树皮的厚度, 取多株林木树皮厚度的平均值为该树种树皮的厚度。树皮的结构特征见表 1。

表 1 树皮的结构特征

Table 1 Wood bark structure

树皮名称	采样株数	平均厚度/cm	树皮结构描述
云南油杉树皮	8	2.15	不易脱落, 从颜色上明显地看出树皮由外皮和内皮 2 层组成, 2 层间结合比较紧密。外皮层不规则块状分布, 表面暗灰色间有灰白色, 疏松, 开裂深, 朽木状。内皮层为肉红色, 密度较大, 结构完整不开裂, 平均厚度为 0.87 cm。
云南松树皮	10	1.56	表面褐灰色, 分层较明显, 密度中等, 纵裂深, 不规则多层鳞片状脱落。纵裂的树皮周边撬起并露出薄的浅红褐色内皮层外表面。
华山松树皮	8	0.70	表面深灰色, 分层不明显, 密度大, 开裂成方形或长方形小块状固着于树干上, 不易被取下。

2.2 实验方法

2.2.1 树皮含水率的测定 采用 90 °C 烘干恒量法。计算公式为:

$$\text{相对含水率}(\%) = \frac{\text{样品鲜质量} - \text{样品绝干质量}}{\text{样品鲜质量}} \times 100.$$

2.2.2 树皮导热系数的测定 将树皮用植物粉碎机粉碎, 烘干后用 YQF-1 型导热系数测定仪测定树皮的导热系数。导热系数计算公式为:

$$\lambda = \frac{UI \left(\frac{I}{D_1} - \frac{I}{D_2} \right)}{2\pi (T_1 - T_2)}.$$

其中: U 为加热电压, I 为加热电流, D_1 为小球直径(80 mm), D_2 为大球直径(160 mm), T_1 为小球平均温度, T_2 为大球平均温度。

2.2.3 氧指数的测定 氧指数是指一定尺寸试材在氧-氮混合气体中, 并在规定条件下呈蜡状有焰燃烧所需的最小氧浓度^[11]。实验仪器为 HC-2 型氧指数仪, 实验材料为风干树皮。由于在小尺度上, 树

皮在各方向上分布不均匀, 为保证试样具有代表性, 测定氧指数用的试样尺寸较大, 宽度为 5 cm, 长度为 7~10 cm, 在厚度上不对树皮做任何处理, 即厚度为树皮的实际厚度。由于云南油杉树皮有分层现象, 外皮层疏松且开裂处薄, 不易将内外层树皮从物理上分开, 而着火时受害的首先是外皮层, 树皮的阻燃性主要取决于外皮层。所以, 点火时, 将点火器火焰靠近外皮层一侧进行点火。试验时, 氧指数仪中氧气和氮气的总流量控制在 $10 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ 。点火气体为丁烷气, 点火时点火器火焰长度为 10~15 mm, 读取试样有焰燃烧时间在 $(180 \pm 20) \text{ s}$ 时氧气和氮气的体积流量。氧指数按下式计算:

$$\text{氧指数}(I_o) = \frac{q_{\text{氧}}}{q_{\text{氧}} + q_{\text{氮}}} \times 100.$$

其中: $q_{\text{氧}}$ 为测定浓度下氧气的体积流量, $\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$; $q_{\text{氮}}$ 为测定浓度下氮气的体积流量, $\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$ 。

每种树种树皮重复测定 5 次氧指数, 取 5 次的平均值为该种树皮的氧指数。

2.2.4 热辐射作用下树皮质量损失过程和内表面温度的测定方法 试验装置如图 1 所示。树皮从树干上取下并在实验室放置 24 h 后进行试验。试验树皮长和宽均为 7 cm, 在厚度上不对树皮做任何处理。辐射源与树皮的距离为 5 cm。试验前用铅笔在树皮内表面中部最厚处周围画 1 cm \times 1 cm 矩形。试验时, 电炉的正面朝下, 每次正式试验前打开电炉电源开关通电 5 min 后再放支架和树皮试样, 树皮外表皮朝上。试验开始后, 一人用秒表计时并每隔 20 s 发出一次读数指令, 一人读取天平上的失重量, 一人用 Raytek ST80 红外测温仪测量树皮内表面矩形内的温度, 并读取最低温度(该仪器具有自动记忆最低温的功能), 一人记录数据, 试验重复 5 次。云南油杉和云南松受热辐射作用时间为 10 min, 由于华山松树皮发生了有焰燃烧, 结构被完全破坏, 6 min 后停止温度读数, 但继续记录其质量损失过程。树皮在某一时刻的温度取 5 次试验温度的平均值。质量剩余率按下式计算:

$$\text{质量剩余量}(\%) = \left(1 - \frac{\sum \text{试样质量损失}}{\sum \text{试验前试样质量}}\right) \times 100.$$

3 结果与分析

3.1 调查与实验结果

试验结果见表 1~2, 图 2~3。

3.2 分析

从调查和试验结果可以看出, 在 3 种树皮中, 云南油杉树皮与云南松树皮和华山松树皮含水率相近, 水分对树皮的阻燃作用相差不大。云南油杉树皮最厚, 是云南松树皮和华山松树皮的 1.38 和 3.07 倍, 导热系数最小, 为云南松树皮和华山松树皮的 67.66% 和 54.85%, 在热辐射作用下, 热量难以从树皮外表面传递到内表面, 所以, 内表面升温速率最低, 树皮对树干活组织的保护作用最强。特别是云南油杉外皮层非常疏松, 主要成分为木质素, 热分解所需的能量高, 分解缓慢, 木炭生成率高, 生成的木炭不易被氧化, 即使在氧体积分数达 45% 的情况下仍不能完全灰化。难燃的木炭疏松多孔、导热性差, 其隔热和隔氧性对内皮层具有很好的保护作用。华山松树皮平均厚度仅为云南油杉和云南松树皮的 32.56% 和 44.87%, 导热系数是云南油杉和云南松树皮的 1.82 和 1.23 倍, 在热辐射作用下, 热量很容易从树皮外表面传递到内表面, 树干基部四周的韧皮部和形成层都容易受到高温伤害, 所以树木容易死亡。云南松树皮虽然纵裂深, 裂口处树皮薄, 容易受到高温伤害, 但由于裂口在树干

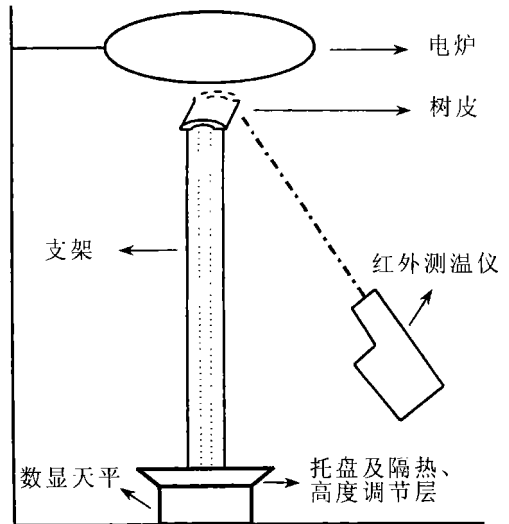


图 1 试验装置示意图

Figure 1 Scheme of experimental setup

表 2 树皮的阻燃性相关因子表

Table 2 Flame retardancy factors of wood bark

树皮名称	相对含水率/%	导热系数/ (W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	氧指数试验	
			氧指数	实验现象
云南油杉树皮	21.27 (其中 中外皮层 10.01)	0.0113	41.4	外皮层易被点燃并快速向下蔓延, 火焰到达树皮下部后在厚外皮层处进行缓慢的有焰燃烧, 生成的木炭进行微弱的无焰燃烧并生成少量灰。(木炭在氧浓度达 45% 的情况下仍不能完全灰化), 试验结束后外皮层的内层仍有部分未被炭化。内皮层没有被点着, 平均质量损失率为 19.56%。
云南松树皮	10.90	0.0167	33.2	外表面不易被点燃, 火焰沿内表面向下缓慢蔓延, 火焰到达底部后向上蔓延并很快熄灭, 树皮内外表面变成炭黑色, 内表面较外表面烧毁严重, 生成的木炭局部进行微弱的无焰燃烧并生成少量的白灰, 平均质量损失率为 40.28%。
华山松树皮	11.53	0.0206	31.2	难点燃, 树皮薄处比厚处易被点燃, 向下缓慢燃烧, 火焰高度一直较低, 侧面火蔓延速度相对较快, 外表面较内表面烧毁严重, 平均炭化高度为 0.82 cm, 生成的木炭进行比较强烈的无焰燃烧。

表 3 树皮在热辐射作用下的热解和燃烧现象

Table 3 Pyrolyzing and burning characteristics of wood bark under external heat radiating

树皮名称	热解和燃烧现象
云南油杉树皮	没有发生有焰燃烧, 外皮层的表层炭化, 生成的木炭疏松, 用镊子在炭化层上轻轻抖动时木炭成粉末和小颗粒状飘散, 外皮层的内层和内皮层颜色没有变化。
云南松树皮	没有发生有焰燃烧, 受电炉热辐射作用的树皮外表层炭化, 局部灰化为灰白色, 生成的木炭呈块状、疏松, 内表面局部变为深褐色或炭黑色。
华山松树皮	在电炉热辐射作用 3~4 min 后开始出现有焰燃烧, 持续约 3 min。有焰燃烧后试样结构完全破坏, 生成的木炭呈块状, 与试验前树皮形状相近, 部分木炭在支架上进行无焰燃烧并产生少量灰白色的灰。

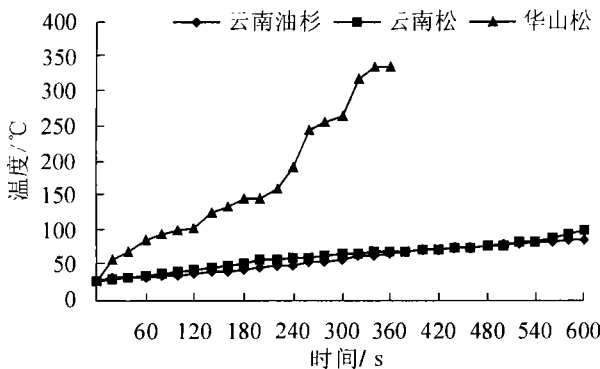


图 2 热辐射作用下树皮内表面温度变化曲线

Figure 2 Inner surface temperature curves of wood bark under external heat radiating

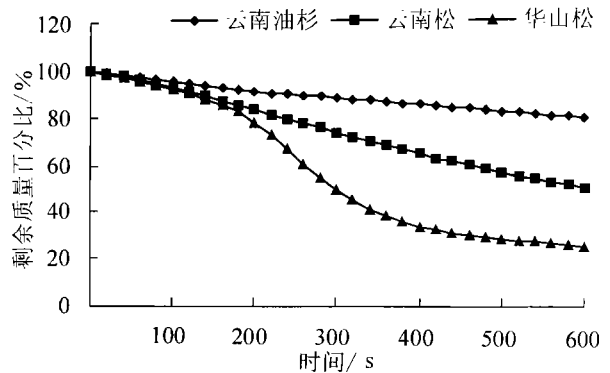


图 3 热辐射作用下树皮质量损失过程曲线

Figure 3 Mass losing curves of wood bark under external heat radiating

水平方向不连续, 且裂口两侧分布有多层鳞片状树皮, 这些树皮的密度小, 防火期含水率低, 导热系数小, 这种树皮对其内部的韧皮部和形成层有很好的保护作用。从图 2 温度变化曲线上看, 云南油杉与云南松树皮内表面温度始终相差不大, 但在实际火场中云南松的死亡率却大于云南油杉的死亡率。

这主要是由于曲线上的温度是有厚树皮保护部位的内表面的温度,是低温而不是高温。2种树皮的高温部位应该出现树皮最薄处,即裂口处,云南松树皮纵向裂口处较云南油杉薄,且裂口两侧的云南松树皮周边翘起,浅红褐色薄的内皮层暴露于空气中,火焰和热空气容易对裂口处和树皮翘起部位内部的韧皮部和形成层造成高温伤害,而云南油杉裂口处的内皮层和外皮层厚度之和远大于云南松裂口处树皮和翘起部位内皮层厚度,对内部的韧皮部和形成层有很好的保护作用。试验中云南油杉树皮外皮层的内层和内皮层颜色没有变化,而云南松树皮内表面局部变为深褐色或炭黑色正好证明了这一点。树皮的这种结构不同造成了2种树种的死亡率差异。

氧指数能够反映材料的着火性能和火灾扑救的难易,氧指数高,说明材料阻燃性强。从实验结果看,3种树皮均有一定的阻燃性,云南油杉树皮氧指数最高,分别是云南松树皮和华山松树皮氧指数的1.25和1.33倍,阻燃性最强,云南松树皮的阻燃性次之,华山松树皮的阻燃性最差。

从图3热质量损失曲线可以看出,云南油杉树皮失水和热分解速率一直很低,保持原状的性能最强,所以阻燃性最强。而华山松树皮热质量损失最快,特别是3.0~6.5 min由于有焰燃烧质量损失明显加快,阻燃性最弱。云南松树皮的阻燃性居中。云南油杉、云南松和华山松树皮阻燃性由强到弱的顺序与3种树种在火烧迹地上死亡率由小到大的顺序相同,说明树皮阻燃性的不同造成了3种树种耐火性的差异。

3.3 树皮的阻燃性在森林消防方面的应用

在3种树种中,云南油杉树皮的阻燃性最强,林木具有极强的耐火性,而且其针叶较短,落叶层密度大,地表枯落物层难以形成高强度的地表火,在进行森林防火时一般不必对云南油杉纯林采取特别措施。在灭火过程中,对正在开设的隔离带上的云南油杉不必伐倒,可以采取修枝的办法减少部分枝叶,这样可以避免因林地裸露增加火后植被恢复的难度,或火后裸地上阳性杂草的入侵使隔火带在下次着火时成为载火带。

云南松树皮具有较强的阻燃性,林木具有一定的耐火性。为了避免云南松林发生高强度树冠火,可以采用计划烧除方法减少地表可燃物载量,也可采用抚育的方法增加林木的枝下高,以破坏垂直方向上的可燃物连续性。

在3种树种中,华山松树皮的阻燃性和林木耐火性最差。在进行森林防火时,不仅要采用抚育等方法减少林内可燃物的载量,破坏垂直方向上可燃物连续性,避免华山松林发生树冠火,还要注意清理树干周围的可燃物,以减轻着火时火焰对树干的高温伤害。

4 结论与建议

云南油杉树皮内皮层结构完整不开裂,外皮层疏松,平均厚度是云南松和华山松树皮1.38和3.07倍,导热系数为云南松树皮和华山松树皮的67.66%和54.85%,氧指数是云南松和华山松树皮的1.25和1.33倍,在热辐射作用下,内表面升温速率低,树皮热分解缓慢,阻燃性最强,云南松树皮的阻燃性次之,华山松树皮的阻燃性最差。

树皮阻燃性的不同造成了云南油杉、云南松和华山松树种间耐火性的差异。

在进行森林防火时,一般不必对云南油杉纯林采取特别措施。为了避免云南松林发生高强度树冠火,可以采用计划烧除方法减少地表可燃物载量,也可采用抚育的方法破坏垂直方向上的可燃物连续性。而对华山松林,不仅要采用抚育等方法,避免发生树冠火,还要注意清理树干周围的可燃物,以减轻着火时火焰对树干的高温伤害。

参考文献:

- [1] 姚树人,文定元.森林消防管理学[M].北京:中国林业出版社,2002:114-117.
- [2] 赵广播,朱群益,员小银,等.用热分析技术研究树皮的热解动力学参数[J].燃烧科学与技术,1999,5(4):356-362.
- [3] 赵广播,朱群益,员小银,等.采用热分析技术研究树皮的最终挥发分产量[J].节能,1998(3):1-3.

- [4] 胡淑宜. 树皮的热分析法研究[J]. 中国造纸学报, 1999, 14 (增刊): 97—101.
- [5] 单延龙, 李华, 其其格. 黑龙江大兴安岭主要树种燃烧性及理化性质的实验分析[J]. 火灾科学, 2003, 12 (2): 74—78.
- [6] 单延龙. 大兴安岭森林可燃物的研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2003.
- [7] 李林. 森林可燃物含水率及失水效率的研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2004.
- [8] 田晓瑞. 防火林带阻火机理研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2000.
- [9] 张家来, 曾祥福, 刘学全, 等. 湖北森林防火树种选择的研究[J]. 华中农业大学学报, 2000, 19 (1): 84—90.
- [10] 舒立福, 田晓瑞, 李红, 等. 我国亚热带若干树种的抗火性研究[J]. 火灾科学, 2000, 9 (2): 1—7.
- [11] 张文标, 陆肖宝, 柳献义, 等. 阻燃胶合板研究的现状和对策[J]. 浙江林学院学报, 2000, 17 (2): 208—214.

Flame retardancy of wood bark from *Keteleeria evelyniana*, *Pinus yunnanensis* and *Pinus armandii* in Yunnan Province

LI Shi-you, LI Xiao-ning, LI Sheng-hong, JIN Gui-jun, ZHOU Quan, HU Xiao-long, WANG Qiu-hua
(School of Conservation Biology, Southwest Forestry College, Kunming 650224, Yunnan, China)

Abstract: In central Yunnan Province, from previously burned stands of *Keteleeria evelyniana*, *Pinus yunnanensis*, and *Pinus armandii* having different forest fire behavior, wood bark structure was analyzed to determine flame retardancy factors, such as average thickness, moisture content, heat conduction coefficient, oxygen index, thermal weight loss, and inner surface temperature of the wood bark during external heat radiation. Results showed that the flame retardancy was: *K. evelyniana* > *P. yunnanensis* > *P. armandii*. Flame retardancy of the wood bark was the main cause of fire resistance differences among the three coniferous species. This was due to: 1) the integrated internal bark layer and loose external bark layer of *K. evelyniana*, 2) an average thickness of wood bark in *K. evelyniana* that was 1.38 times greater than *P. yunnanensis* and 3.07 times greater than *P. armandii*, 3) a heat conduction coefficient of the wood bark in *K. evelyniana* that was 67.66% greater than *P. yunnanensis* and 54.85% greater than *P. armandii*, and 4) an oxygen index of the wood bark in *K. evelyniana* that was 1.4 times greater than *P. yunnanensis* and 1.6 times greater than *P. armandii*. Accordingly fire protection measures for the three species were put forward based on flame retardancy of the wood bark and fire resistance of the coniferous trees. Special measures needn't be done for *Keteleeria evelyniana*, removing surface litters and cultivation measures should be adopted for *P. yunnanensis* and *P. armandii*, cleaning combustibles around the bark especially should be done for *P. armandii*. [Ch, 3 fig, 3 tab, 11 ref.]

Key words: forest protection; wood bark structure; heat conduction coefficient; oxygen index; flame retardancy