

昆明地区 15 种常见木本植物活枝的燃烧性*

李世友^{1,2} 昌尼娜² 管晓媛² 王秋华² 舒立福^{1**}

(¹ 中国林科院森林生态环境与保护研究所, 国家林业局森林保护学重点实验室, 北京 100091; ² 西南林业大学土木工程学院, 昆明 650224)

摘要 为分析比较不同植物活枝的燃烧性, 在森林防火戒严期内, 对昆明地区 15 种常见木本植物中小径级的活枝进行了热辐射引燃试验, 对小径级的活枝进行了氧指数试验。在测定样品直径、含水率、引燃时间、有焰燃烧时间、试验过程中烟气温度和质量损失变化过程等基础上, 提出并计算了表征活枝燃烧性能的综合燃烧特性参数 S , 根据该参数对 15 种植物中小径级活枝的燃烧性能进行了排序。结果表明, 15 种植物小径级的活枝均具有较强的阻燃性, 燃烧性能顺序为: 云南松 < 野八角 < 华山松 < 滇青冈 < 地盘松 < 云南樟 < 厚皮香 < 大白花杜鹃 < 炮状花杜鹃 < 云南含笑 < 小白花杜鹃 < 南烛 < 光叶石栎 < 元江栲 < 云南野山茶。根据氧指数及试验现象将 15 种植物的小径级活枝分为 3 类, 其中难燃类 4 种 (大白花杜鹃、野八角、厚皮香、南烛)、可燃类 7 种 (云南含笑、云南松、地盘松、华山松、滇青冈、云南樟、云南野山茶)、较易燃类 4 种 (小白花杜鹃、炮状花杜鹃、光叶石栎、元江栲)。分析了造成 2 种试验结果差异的主要原因。

关键词 活枝; 综合燃烧特性参数; 氧指数

中图分类号 S762.3 **文献标识码** A **文章编号** 1000-4890(2012)2-0276-06

Combustion characteristics of live branches of 15 common woody plant species in Kunming, Yunnan Province. LI Shi-you^{1,2}, CHANG Ni-na², GUAN Xiao-yuan², WANG Qiu-hua², SHU Li-fu^{1**} (¹ *The Research Institute of Forest Ecology, Environment and Protection, Chinese Academy of Forestry, Key Laboratory of Forest Protection of State Forestry Administration, Beijing 100091, China*; ² *College of Civil Engineering, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China*). *Chinese Journal of Ecology*, 2012, **31**(2): 276–281.

Abstract: To understand the live branches combustion characteristics of 15 common native woody plant species in Kunming, a thermal radiation ignition experiment with small and medium sizes branches and an oxygen index experiment with small size branches were conducted during peak forest-fire season. Based on the analysis of the sample's diameter, moisture content, time to ignition, quenching time of flaming combustion, smoking temperature, and weight loss, an integrated combustion parameter (S) reflecting the combustion characteristics was proposed. According to the calculated S , the combustion order of the test tree species was *Pinus yunnanensis* < *Illicium simonsii* < *Pinus armandii* < *Cyclobalanopsis glaucoides* < *Pinus yunnanensis* var. *pygmaea* < *Cinnamomum glanduliferum* < *Ternstroemia gymnanthera* < *Rhododendron decorum* < *Rhododendron spinuliferum* < *Michelia yunnanensis* < *Rhododendron siderophyllum* < *Lyonia ovalifolia* < *Lithocarpus mairei* < *Castanopsis orthacantha* < *Camellia pitardii*. The oxygen index experiment indicated that the small size live branches of the 15 tree species all had obvious flame-retardant characteristics, of which, 4 (*R. decorum*, *I. simonsii*, *T. gymnanthera*, and *L. ovalifolia*) were difficultly inflammable, 7 (*M. yunnanensis*, *P. yunnanensis*, *P. yunnanensis* var. *pygmaea*, *P. armandii*, *C. glaucoides*, *C. glanduliferum*, and *C. pitardii*) were combustible, and 4 (*R. siderophyllum*, *R. spinuliferum*, *L. mairei*, and *C. orthacantha*) were inflammable. The reasons for the difference between the classifications derived by the two experiments were analyzed.

Key words: live branches; general combustion parameter; oxygen index.

* 国家自然科学基金面上项目(31070587)、国家科技支撑计划课题(2011BAD32B05)资助。

** 通讯作者 E-mail: shulf@caf.ac.cn

收稿日期: 2011-08-25 接受日期: 2011-11-09

由于特殊的地形地势、气候、森林类型及生产生活用火的多样性和复杂性,昆明是云南和全国森林火灾多发区、重灾区。笔者在昆明地区多个火烧迹地调研发现,在不同的立地条件下,活枝在树冠火中的表现有很大的差别。有的枝被严重烧损,多发生在迎风坡的密林中,一般伴随有树干或枝条的片面燃烧现象,而多数情况下枝只是表面烧黑或炭化,内部的木质部较好地保存下来。对森林可燃物燃烧性相关研究有直接燃烧试验法 (Burrows, 2001; Engstrom *et al.*, 2004; Sun *et al.*, 2006; Dibble *et al.*, 2007; 李世友等, 2008d)、基于理化性质的间接法 (Hogenbirk *et al.*, 1995; 张家来等, 2000; Dimitrakopoulos *et al.*, 2001; 肖金香等, 2002; 李世友等, 2006a, 2006b) 和直接法、间接法相结合的方法 (陈存及等, 1995; 高国平等, 1995; 徐六一等, 2005)。氧指数法是直接燃烧试验法中的一种,常用于阻燃板材、PVC 套管、布料等装修装饰材料研究和开发,但很少被用于森林可燃物研究,仅见李世友等 (2007) 将其用于研究树皮的阻燃性。本研究拟在前期带叶小枝燃烧试验 (李世友等, 2008a, 2008b, 2008c, 2008e, 2008f; 2009a, 2009b, 2009c) 的基础上,通过直接燃烧试验和氧指数试验,为正确认识活枝的燃烧性及在真实火烧中的表现和作用奠定基础。

1 材料与方法

1.1 样品采集

研究对象确定为昆明地区常见的 15 种木本植物,即:1) 大白花杜鹃 (*Rhododendron decorum*)、2) 小白花杜鹃 (*Rhododendron siderophyllum*)、3) 野八角 (*Illicium simonsii*)、4) 厚皮香 (*Ternstroemia gymnanther*)、5) 云南含笑 (*Michelia yunnanensis*)、6) 云南松 (*Pinus yunnanensis*)、7) 地盘松 (*Pinus yunnanensis* var. *pygmaea*)、8) 华山松 (*Pinus armandii*)、9) 南烛 (*Lyonia ovalifolia*)、10) 滇青冈 (*Cyclobalanopsis glaucoides*)、11) 炮状花杜鹃 (*Rhododendron spinuliferum*)、12) 光叶石栎 (*Lithocarpus mairei*)、13) 元江栲 (*Castanopsis orthacantha*)、14) 云南樟 (*Cinnamomum glanduliferum*)、15) 云南野山茶 (*Camellia pitardii*)。顺序下同。

采样时间为昆明地区防火戒严期的晴天。采样地选择在昆明安宁市 2006 年“3·29”森林火灾火烧迹地附近未过火林地,采集地海拔高度为 2400 m。由于幼林、幼树容易着火和受灾,故仅在幼树上

采样。采集多株植物 1.5 m 左右的带叶枝条带回实验室,由于大体积的枝难燃,故取中、小枝为试验样品。当年生长的新枝含水率高,不易燃烧,且大部分植物没有长新枝或仅生长很少的新枝,新枝的理化性质和燃烧性呈动态变化,故仅选择老的小枝为研究对象。由于不同直径的枝燃烧性差别较大,故根据枝直径分为中小、小 2 个径级分别进行热辐射引燃试验和氧指数测定试验。燃烧试验和氧指数测定试验的枝段长度分别为 20 和 15 cm。试验样品准备好后,用游标卡尺对每根样品枝分别在两端及中间部位测定直径,取所有数据的平均值为该种枝的直径。随机抽取各径级部分枝进行含水率测定。

1.2 研究方法

1.2.1 含水率的测定方法 采用 105 ℃ 烘干恒重法,取相对含水率。

1.2.2 燃烧试验方法 由于中小直径的活枝在氧指数测定仪中顶端点情况下,在氧浓度达 100% 时不燃,不能测定氧指数,而小直径的活枝在高温炉中燃烧性差异相对较小,故分别对中小、小直径的活枝进行引燃试验和氧指数试验。引燃试验装置如图 1 所示。辐射源面积为 40 cm×55 cm,由 18 根硅炭棒和耐火砖构成,每两根硅炭棒之间的距离为 1 cm,在中间两根硅炭棒之间的上方 1 cm 处放置 1 根热电偶,用于测定辐射源的温度,通过计算机软件和电源控制柜控制输入到辐射源的电流强度。在辐射源正上方 57 cm 处的集烟罩锥形出口的正中间位置和烟道 48 cm 处的中心点各放置 1 根热电偶。燃烧盘

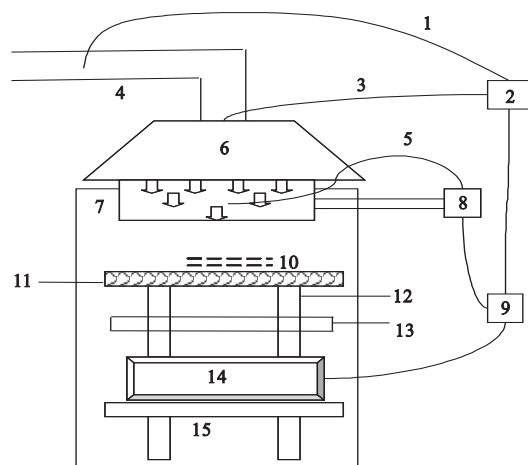


图 1 燃烧试验装置示意图

Fig. 1 Scheme of experimental setup

1、3、5—热电偶;2—数据采集模块;4—烟道;6—集烟罩;7—辐射源;8—电源控制柜;9—计算机;10—样品;11—托盘;12、15—支架;13—隔热层;14—天平。

的上下两面均为铁丝网,中间为 4 cm 厚的石棉,通过支架将燃烧盘与辐射源的距离调节为 20 cm。燃烧盘下方用石棉作隔热层以保护下方的天平。天平的技术参数为 30 kg/0.1 g。试验时,先在小功率条件下将辐射源的温度升高到 400 ℃,然后开启排风扇的电源,用 20 kW 的输出功率快速升温至 600 ℃,放入样品。每秒钟采集 1 次质量和温度数据,并以 Excel 文件的形式存储到计算机硬盘中。当样品被引燃后,立即关闭辐射源的电源,记录有焰燃烧时间,有焰燃烧熄灭一段时间后停止数据采集。

1.2.3 氧指数 OI 的测定方法 所用的仪器为 JF-3 型氧指数仪。试验时中 O₂、N₂ 的总流量控制在 10 L·min⁻¹,点火气体为丙烷气,点火时点火器提供的火源的火焰长度为 10~15 mm,从上端点火,根据氧、氮混合气体中氧的体积百分比浓度计算氧指数。每种样品重复试验 3~5 次,取平均值为该样品的氧指数。

1.2.4 燃烧性分析方法 为综合评价枝的燃烧特性,在前期带叶小枝燃烧特性参数计算方法(李世友等,2008a,2008b,2008c,2008e,2008f;2009a,2009b,2009c)的基础上,参照热重分析方面的燃烧特性参数定义和计算方法(聂其红等,2001;闵凡飞等,2004),引入引燃时间、有焰燃烧熄灭时间、有焰燃烧阶段最大质量损失速率和平均质量损失速率 4 个重要燃烧特性参数,提出枝的综合燃烧特性参数 S,即:

$$S=10^8\times(V_{\max}\times V_{\text{mean}})/(T_i^2\times T_h)$$

表 1 中小径级枝的物理性质和燃烧特性参数

Table 1 Physical properties and general combustion parameters of samples

序号	直径 (cm)	相对含水率 (%)	样品质量 (g)	引燃时间 <i>T_i</i> (s)	熄灭时间 <i>T_h</i> (s)	最大速率 <i>V_{max}</i> (%·s ⁻¹)	平均速率 <i>V_{mean}</i> (%·s ⁻¹)	综合燃烧特性 参数 <i>S</i>	排序
1	0.646	46.01	281.4	152	423	1.42	0.23	3.341	8
2	0.678	49.74	292.5	116	397	1.37	0.23	5.898	5
3	0.652	59.76	256.2	284	504	1.48	0.17	0.618	14
4	0.648	55.30	271.8	213	360	1.55	0.29	2.752	9
5	0.529	48.48	260.1	170	354	1.19	0.29	3.373	6
6	1.045	54.07	385.7	316	543	1.11	0.19	0.389	15
7	0.708	51.87	272.5	144	482	1.28	0.18	2.305	11
8	0.728	54.17	292.2	271	425	1.47	0.22	1.036	13
9	0.826	51.88	257.1	164	339	1.87	0.29	5.947	4
10	0.666	46.58	288.8	235	387	1.39	0.29	1.886	12
11	0.584	47.18	277.3	140	414	1.19	0.23	3.373	7
12	0.631	41.18	271.4	178	298	1.51	0.39	6.237	3
13	0.504	44.31	265.4	150	300	1.77	0.32	8.391	2
14	0.757	44.32	303.6	173	405	1.25	0.24	2.475	10
15	0.688	44.71	271.2	110	347	1.59	0.28	10.603	1

式中:*V_{max}*、*V_{mean}* 分别为样品在有焰燃烧阶段的最大质量损失速率和平均质量损失速率,单位均为%·s⁻¹。质量的单位取“%”,是由于每次试验的样品质量不可能完全相等,故取更具有可比性的相对质量,即相对于初始质量的百分比;*T_i*为引燃时间,即加热到有焰燃烧所需的时间,温升曲线上温度开始快速升高、质量曲线上质量开始快速下降时刻所对应的时间(s);*T_h*为有焰燃烧熄灭时间(s)。*S* 越大,枝的燃烧特性越好。

2 结果与分析

2.1 测定和试验结果

样品的物理性质和燃烧特性参数见表 1。图 2 中的温度是指 2 根热电偶的平均温度。由于放入样品时烟气温度略有差别,在绘制图 2 曲线时,各时刻的温度均减去了放入样品时的烟气温度,即曲线上各点温度是试验过程中相对于样品放入时刻烟气的净变化。图 2 温度曲线上左、右 2 条向上突出小线段分别表示引燃时刻和有焰燃烧熄灭时刻。

从图 2 可以看出,15 种植物中小径级枝试验过程中的质量下降曲线、烟气温度变化曲线差别较大,各曲线与对应的质量、温度数据相结合,可以确定引燃时间、有焰燃烧熄灭时间、有焰燃烧阶段最大质量损失速率和平均质量损失速率 4 个重要燃烧特性参数。

2.2 燃烧性比较

样品的物理性质和燃烧特性参数见表 1,氧指数测定结果及试验现象见表 2。

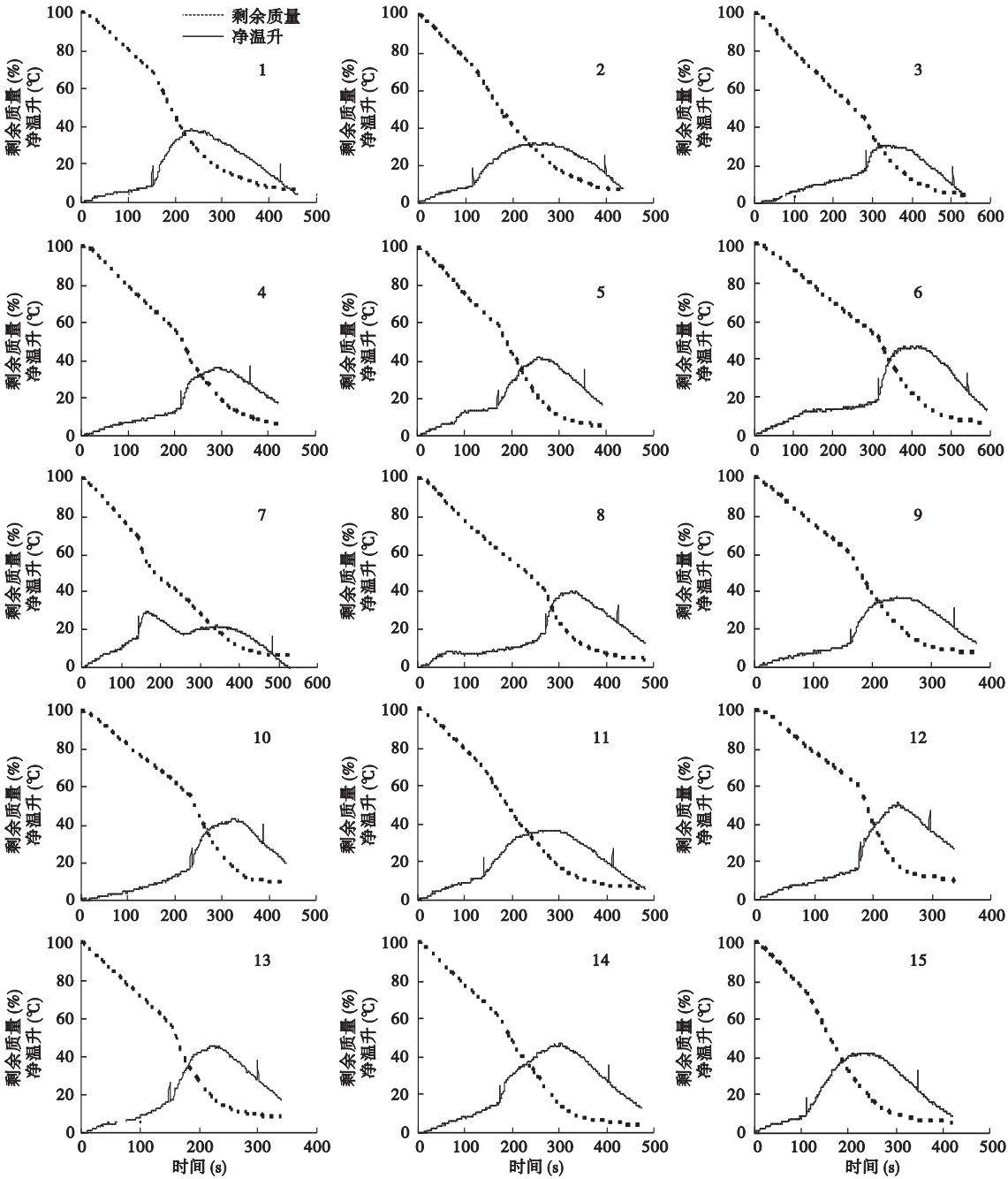


图 2 试验过程中样品质量和烟气温度变化
Fig. 2 Mass and smoke temperature curves in experimental course

从表 1 可以看出,由于物候及自身理化性质的不同,不同种植物中小径级活枝的燃烧性不同。根据 15 种植物中小径级活枝的综合燃烧特性参数进行排序为:云南松(0.389)<野八角(0.618)<华山松(1.036)<滇青冈(1.886)<地盘松(2.305)<云南樟(2.475)<厚皮香(2.752)<大白花杜鹃(3.341)<炮状花杜鹃(3.373)<云南含笑(3.373)<小白花杜鹃(5.898)<南烛(5.947)<光叶石栎(6.237)<元江栲

(8.391)<云南野山茶(10.603)。

氧指数是评定材料燃烧性能的重要指标,氧指数越大,材料越难以燃烧。从表 2 可以看出,15 种植物小径级活枝的氧指数最小为 66.3,远大于空气中的氧浓度,也大于阻燃塑料、布料等室内装修装饰材料的氧指数判定标准,表明这 15 种活枝均具有较强的阻燃性。对于 15 种小径级的活枝,根据氧指数和试验现象可分为 3 类,即难燃类:大白花杜鹃、野

表 2 小径级枝的氧指数及试验现象
Table 2 Oxygen index and experimental phenomena of samples

序号	直径 (cm)	相对含 水率 (%)	氧指数 (%)	试验现象
1	0.46	52.82	—	在纯氧中不燃
2	0.31	51.65	66.3	能蔓延
3	0.43	62.20	—	在纯氧中不燃
4	0.44	56.68	—	在纯氧中不燃
5	0.37	57.14	—	在纯氧中不稳定燃烧 25 s、 蔓延 20 mm 后熄灭
6	0.62	55.50	95.5	能蔓延
7	0.58	52.59	92.1	能蔓延
8	0.39	59.24	96.2	能蔓延
9	0.49	54.74	—	在纯氧中不燃
10	0.36	48.49	93.1	能蔓延
11	0.31	46.75	—	能蔓延,表皮燃烧较木质部 快,无法准确测定氧指数
12	0.32	48.19	67.3	能蔓延
13	0.31	45.21	67.8	能蔓延
14	0.43	47.33	—	在纯氧中表皮燃烧 39 s、蔓 延 10 mm 后熄灭
15	0.37	57.64	—	在纯氧中表皮燃烧 41 s、蔓 延 50 mm 后熄灭

八角、厚皮香、南烛;可燃类:云南含笑、云南松、地盘松、华山松、滇青冈、云南樟、云南野山茶;较易燃类:小白花杜鹃、炮状花杜鹃、光叶石栎、元江栲。

从表 1、表 2 可以看出,样品的含水率和直径对燃烧性影响较大,总体变化趋势是,随枝的含水率和直径的增加,燃烧性下降。如,在 15 种植物中,阴性植物野八角 2 种径级枝的含水率均为最大,2 种研究试验结果均为难燃的;而直径最小的元江栲,2 种研究试验结果均为相对易燃的。

从表 1、表 2 可以看出,2 种试验方法得出的燃烧性排序并不一致。造成这种结果的原因,除 2 种径级条件下 15 种植物活枝直径和含水率大小顺序不完全一致外,枝的其他理化性质差异也是重要的原因。如,云南松中小径级的枝在辐射引燃试验条件下是最难燃的,而小径级枝的氧指数试验结果为燃烧性居中,这是由于云南松枝条富含油脂且向两端渗出,在氧指数试验高氧浓度环境的端头点火情况下,相对于其他油脂含量低的大白花杜鹃、南烛等阔叶树种容易被引燃。

3 结 论

在测定样品的物理性质和辐射引燃试验、氧指数试验的基础上,提出并计算了昆明地区常见的 15 种木本植物的综合燃烧特性参数,根据该参数对 15 种常见木本植物中小径级活枝的燃烧性进行了综合

排序。氧指数试验结果表明,15 种植物小径级活枝均具有较强的阻燃性,根据氧指数将 15 种植物的小径级活枝分为难燃类(大白花杜鹃、野八角、厚皮香、南烛)、可燃类(云南含笑、云南松、地盘松、华山松、滇青冈、云南樟、云南野山茶)、较易燃类(小白花杜鹃、炮状花杜鹃、光叶石栎、元江栲)。含水率、直径、油脂含量等理化性质是造成两种试验条件下燃烧性差异的主要原因。

与间接的理化性质法和其他直接的燃烧试验法相比,利用氧指数法比较植物枝的燃烧性具有试验过程简便、结果直观的优点。但要保证试验的可重复性,就必须制备具有代表性的试件。野八角、云南樟、厚皮香等植物的小枝通直、表皮光滑,试件制备相对容易,而对于云南松、地盘松等叶痕明显的物种或云南含笑等分枝较多的小枝,由于叶痕、枝叉对试验过程有一定的影响,则要求试验重复次数较多才能取得更加可靠的试验结果,这也是利用氧指数法研究植物活枝燃烧性的不足。此外,试件的直径对氧指数影响很大,不同物种枝的直径相差较大,而同一物种枝的直径受立地条件等多种因素的影响,如何确定各物种的平均直径是一个需要继续探讨的问题。以上氧指数数据及其分类是在特定取样条件下的结果,其代表性需要进一步的验证。

参考文献

陈存及,何宗明,陈东华,等. 1995. 37 种针阔树种抗火性能及其综合评价的研究. 林业科学, 31(2): 135-143.
高国平,迟功德,周绍林,等. 1995. 辽宁省主要造林树种抗火性能测定及其抗火树种的筛选. 沈阳农业大学学报, 26(2): 177-182.
李世友,陈宏刚,罗文彪,等. 2008a. 昆明地区主要造林树种鲜枝叶的燃烧性研究. 西北林学院学报, 23(5): 148-151.
李世友,李小宁,李生红,等. 2007. 3 种针叶树种树皮的阻燃性研究. 浙江林学院学报, 24(2): 192-197.
李世友,李小宁,罗文彪,等. 2008b. 20 种园林绿化树种活枝叶的燃烧性研究. 安徽农业大学学报, 35(4): 490-493.
李世友,罗文彪,舒清态,等. 2009a. 昆明地区 25 种木本植物的燃烧性及防火树种筛选. 浙江林学院学报, 26(3): 351-357.
李世友,马爱丽,王少名,等. 2009b. 14 种常绿木本植物活枝叶在防火期的易燃性比较. 生态学杂志, 28(4): 601-606.
李世友,马长乐,罗文彪,等. 2008c. 昆明地区 35 种森林木本植物的燃烧性排序与分类. 生态学杂志, 27(6): 867-873.

- 李世友, 马长乐, 袁俊杰, 等. 2008d. 昆明地区 4 种外来植物对火的生态适应对策. 江西农业大学学报, **30**(2): 268–274.
- 李世友, 马瑞杰, 罗文彪, 等. 2008e. 4 种杨梅的燃烧性及应用. 华中农业大学学报, **27**(6): 792–796.
- 李世友, 王秋华, 李本飞, 等. 2006a. 滇中 10 种木本植物鲜叶和鲜枝易燃性比较. 西南林学院学报, **26**(1): 56–58.
- 李世友, 王秋华, 张尚书, 等. 2006b. 滇东北中高海拔地区防火树种筛选. 西南林学院学报, **26**(3): 55–58.
- 李世友, 王少名, 年有春, 等. 2008f. 落叶灌木南烛在防火戒严期的燃烧性动态. 江西农业大学学报, **30**(5): 845–849.
- 李世友, 张桥蓉, 马爱丽, 等. 2009c. 6 种针叶树活枝叶在森林防火戒严期的燃烧性比较. 安徽农业大学学报, **36**(2): 178–183.
- 闵凡飞, 张明旭, 范肖南, 等. 2004. 选煤厂煤泥浆燃烧特性的研究. 煤炭学报, **29**(2): 216–221.
- 聂其红, 孙绍增, 李争起, 等. 2001. 褐煤混煤燃烧特性的热重分析法研究. 燃烧科学与技术, **7**(1): 72–76.
- 肖金香, 胡松竹, 袁平成, 等. 2002. 庐山旅游区森林防火技术体系研究. 中国生态农业学报, **10**(1): 79–81.
- 徐六一, 罗 宁, 刘桂华, 等. 2005. 安徽省防火树种的选择及评价研究. 安徽农业大学学报, **32**(3): 349–353.
- 张家来, 曾祥福, 刘学全, 等. 2000. 湖北森林防火树种选择的研究. 华中农业大学学报, **19**(1): 84–90.
- Burrows ND. 2001. Flame residence times and rates of weight loss of eucalypt forest fuel particles. *International Journal of Wildland Fire*, **10**: 137–143.
- Dibble AC, White RH, Lebow PK. 2007. Combustion characteristics of north-eastern USA vegetation tested in the cone calorimeter: Invasive versus non-invasive plants. *International Journal of Wildland Fire*, **16**: 426–443.
- Dimitrakopoulos AP, Panov PI. 2001. Pyric properties of some dominant Mediterranean vegetation species. *International Journal of Wildland Fire*, **10**: 23–27.
- Engstrom JD, Butler JK, Smith SG, *et al.* 2004. Ignition behavior of live California Chaparral leaves. *Combustion Science and Technology*, **176**: 1577–1591.
- Hogenbirk JC, Sarrazin-Delay CL. 1995. Using fuel characteristics to estimate plant ignitability for fire hazard reduction. *Water, Soil, and Air Pollution*, **82**: 161–170.
- Sun L, Zhou X, Mahalingam S, *et al.* 2006. Comparison of burning characteristics of live and dead chaparral fuels. *Combustion and Flame*, **144**: 349–359.
-
- 作者简介** 李世友,男,1971 年生,博士研究生,副教授。主要从事森林防火教学和科研工作,发表论文 60 余篇。
E-mail: lsy0703@163.com
- 责任编辑** 王 伟
-