

滇中地区 11 种森林木本植物活叶片抗火性能

李世友^{1,2} 赵家刚² 张雨瑶² 周劲峰²
李路良² 王秋华² 舒立福¹

1. 中国林业科学研究院森林生态环境与保护研究所, 北京 100091; 2. 西南林业大学土木工程学院, 昆明 650224

摘要 为比较不同森林植物活叶片的抗火性能, 在防火戒严期内对滇中地区 11 种主要森林木本植物的活叶片进行了高氧条件下的燃烧试验, 测定和计算了各种植物活叶片的含水率、单位面积质量、燃烧线速率、燃烧面积速率、燃烧质量损失速率、叶脉损毁程度、面积损毁程度、质量损毁程度等共 14 个因子, 运用因子分析方法对 11 种植物的抗火性能进行排序, 结果表明: 11 种活叶片的抗火性能可分为 4 类, 其中抗火性极差的 1 种, 抗火性差的 4 种, 抗火性中等的 3 种, 抗火性强的 3 种。

关键词 抗火性; 森林植物; 活叶片; 滇中地区

中图分类号 S 762.3 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2015)05-0025-06

滇中地处亚热带常绿阔叶林带, 在森林树种组成中, 常绿阔叶木本植物占有较大的比例。由于干湿季节分明, 旱季时间长、降雨量少, 滇中地区是全国和云南省森林火灾多发区和重灾区。森林火灾发生时, 常绿阔叶树仍能发生燃烧, 如 2006 年安宁“3·29”森林火灾过火林地绝大部分为常绿阔叶林, 这些常绿阔叶树仍然发生了树冠火。对于滇中地区阔叶树的燃烧性, 刘爱荣等^[1]、谢玉敏等^[2]、王革等^[3]、李世友等^[4-5]均做过一些研究, 研究方法有基于可燃物理化性质的实验测试法、直接燃烧法, 这些方法也是国内外同类研究的常用方法, 但不同方法得出的结论不完全一致。国内外对森林可燃物的燃烧性和抗火性进行了大量研究^[6-10], 研究方法有直接火烧法、模拟火场试验、实验测试法等。不少研究者将叶、小枝的燃点作为评价树木抗火性的一个重要指标, 笔者在试验时发现, 可燃物的质量、密实度、含水率、粉末粒径等因素均影响着燃点大小, 而要将不同种类可燃物控制在质量、密实度两者均相同或相近的情况下进行试验是不可能的。此外, 在进行直接燃烧试验时, 在总质量相近的情况下, 叶和小枝的质量比例不同, 引燃时间、燃烧时间、火强度等燃烧行为有一定的差别, 而且在室内试验条件下, 带叶

活枝的搭配密实度、方向等物理性质难以与真实火灾条件下相同。可燃物性质的多样性、试验条件控制的复杂性决定了试验过程的可重复性差。在滇中地区树冠火灾中, 活叶是燃烧的主体, 研究活叶抗火性是评价植物抗火性的基础。活叶在树冠火高温条件下易燃, 而要在室内设计出易测量、可重复的接近真实火灾条件下的高温场是很困难的。在燃烧条件方面, 高温和高氧均为助燃条件, 故本研究用高氧条件代替高温条件, 用氧指数测定仪提供高氧浓度、供氧速度稳定的试验条件。用氧指数测定仪提供高氧助燃条件的试验方法广泛应用于阻燃 PVC 导管^[11]、木材^[12]、织物^[13-15]等室内装修装饰材料的阻燃性评价方面, 在植物抗火性方面的应用较少, 国内仅见李世友将其用于植物活枝燃烧性^[6]、树皮阻燃性^[16]评价方面。

1 材料与方法

1.1 样品采集

研究对象确定为滇中地区常见叶形较大的 11 种常绿森林木本植物, 即: 1. 大白花杜鹃 (*Rhododendron decorum*); 2. 光叶石栎 (*Lithocarpus mairei*); 3. 厚皮香 (*Ternstroemia gymnanthera*);

收稿日期: 2015-01-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(31260180); 云南省重点学科项目(XKZ200905)

李世友, 博士, 副教授. 研究方向: 林火管理. E-mail: lsy0703@163.com

通信作者: 舒立福, 博士, 研究员. 研究方向: 林火管理. E-mail: slfhxk@126.com

4. 炮仗花杜鹃 (*Rhododendron spinuliferum*); 5. 水红木 (*Viburnum cylindricum*); 6. 小白花杜鹃 (*Rhododendron siderophyllum*); 7. 野八角 (*Illicium simonsii*); 8. 元江栲 (*Castanopsis orthacantha*); 9. 云南含笑 (*Michelia yunnanensis*); 10. 云南野山茶 (*Camellia pitardii*); 11. 云南樟 (*Cinnamomum glanduliferum*)。采样时间为滇中地区防火戒严期的晴天(2013-04-15)。采样地选择 2006 年滇中安宁市“3·29”火灾火烧迹地附近未过火林分。采集 1.5 m 左右的带叶枝条立即带回实验室进行相关试验,由于老叶易燃,故选择老叶为抗火性试验对象。

1.2 研究方法

1) 含水率(M)的测定。采用 105 °C 烘干恒质量法。

2) 叶片单位面积质量(P_a)的测定和计算方法。单位面积质量由叶片质量除以面积得出,其中面积由自行开发的“不规则多边形面积计算方法”计算得出,该计算方法已用于计算高温后植物韧皮部的死亡率^[17-18]。试验前、后叶片面积计算均用此方法。

3) 抗火性试验方法。叶片抗火性试验所需的高氧条件由氧指数测定仪提供。试验时,浓度为 100% 的 O_2 流速为 10 L/min。采用叶尖在上、叶柄在下的方式将叶片竖直放在试件夹上。点火时,点火器中丙烷提供的火源的火焰长度为 10~15 mm,从上端点火,用秒表测定从点火至有焰燃烧熄灭的时间。试验前测定叶片的叶脉长度、质量并勾绘叶片的外形轮廓,试验后测定叶片残余部分的叶脉长度、质量并勾绘外形轮廓。勾绘试验前后叶片的外形轮廓用于计算叶片的面积。重复试验 6~12 次。

4) 燃烧速率计算方法。根据抗火试验前后叶脉长度、叶片面积、叶片质量计算绝对燃烧速率和相对燃烧速率,其中绝对燃烧速率分为绝对线速率、绝对面积损失速率、绝对质量损失速率 3 个指标。相对燃烧速率分为相对线速率、相对面积损失速率、相对质量损失速率 3 个指标,分别代表单位时间内损毁的叶脉长度、叶片面积、叶片质量的百分比,计算方法如下:

$$\text{绝对线速率 } V_1 = \frac{\text{试验前叶脉长度} - \text{试验后叶脉长度}}{\text{燃烧时间}};$$

$$\text{绝对面积损失速率 } V_2 = \frac{\text{试验前叶片面积} - \text{试验后叶片面积}}{\text{燃烧时间}};$$

$$\text{绝对质量损失速率 } V_3 = \frac{\text{燃烧前叶片质量} - \text{燃烧后叶片质量}}{\text{燃烧时间}};$$

$$\text{相对线速率 } V_4 = \frac{\text{叶脉损毁长度} / \text{试验前叶脉长度}}{\text{燃烧时间}} \times 100\%;$$

$$\text{相对面积损失速率 } V_5 = \frac{\text{叶片损毁面积} / \text{试验前叶片面积}}{\text{燃烧时间}} \times 100\%;$$

$$\text{相对质量损失速率 } V_6 = \frac{\text{叶片损毁质量} / \text{试验前叶片质量}}{\text{燃烧时间}} \times 100\%。$$

5) 损毁程度测定。燃烧速率表征燃烧过程的快慢,而损毁程度代表燃烧对叶片造成的受损结果。损毁程度同样可以分为绝对损毁程度和相对损毁程度,其中绝对损毁程度又分为绝对损毁长度、绝对损毁面积、绝对损毁质量 3 个指标,相对损毁程度又分为相对损毁长度、相对损毁面积、相对损毁质量 3 个指标,分别表征抗火性试验造成叶脉长度、叶片面积和质量的损毁比率,计算方法如下:

$$\begin{aligned} \text{绝对损毁长度 } S_1 &= \text{试验前叶脉长度} - \text{试验后叶脉长度}; \\ \text{绝对损毁面积 } S_2 &= \text{试验前叶脉面积} - \text{试验后叶脉面积}; \\ \text{绝对损毁质量 } S_3 &= \text{试验前叶脉质量} - \text{试验后叶脉质量}; \\ \text{相对损毁长度 } S_4 &= \frac{\text{试验前叶脉长度} - \text{试验后叶脉长度}}{\text{试验前叶脉长度}} \times 100\%; \end{aligned}$$

$$\text{相对损毁面积 } S_5 = \frac{\text{试验前叶片面积} - \text{试验后叶片面积}}{\text{试验前叶片面积}} \times 100\%;$$

$$\text{相对损毁质量 } S_6 = \frac{\text{试验前叶片质量} - \text{试验后叶片质量}}{\text{试验前叶片质量}} \times 100\%。$$

2 结果与分析

2.1 测定和计算结果

11 种森林植物活叶片的平均含水率(M)、单位面积质量(P_a)、燃烧速率、损毁程度见表 1。从表 1 可以看出,11 种叶片的含水率、单位面积质量、燃烧速率相差较大,8 种被完全烧毁的叶片均具有单位面积质量较小的特征。含水率最大、单位面积质量较大的野八角具有燃烧速率最小、损毁程度最轻的特征;含水率最小、单位面积质量最大的云南野山茶具有燃烧速率较小、损毁程度较轻的特征;而含水率较小、单位面积质量最小的元江栲损毁程度最轻。

表 1 11 种植物叶片的燃烧速率及损毁程度

Table 1 Burning rate and damage extent of live leaves of 11 woody species

样品 Samples	M/%	P _a / (g/m ²)	燃烧速率 Burning rate						损毁程度 Damage extent					
			绝对速率 Absolute			相对速率 Relative			绝对损毁程度 Absolute			相对损毁程度 Relative		
			V ₁ / (cm/s)	V ₂ / (cm ² /s)	V ₃ / (g/s)	V ₄ / (%/s)	V ₅ / (%/s)	V ₆ / (%/s)	S ₁ /cm	S ₂ /cm ²	S ₃ /g	S ₄ /%	S ₅ /%	S ₆ /%
1	51.02	315	0.171	0.499	0.016	1.08	1.08	1.08	16.1	48.00	1.512	100.00	100.00	100.00
2	43.96	288	0.182	0.299	0.009	1.80	1.80	1.80	10.2	16.87	0.487	100.00	100.00	100.00
3	60.46	322	0.184	0.593	0.019	2.03	2.03	2.03	8.9	28.88	0.924	100.00	100.00	100.00
4	42.19	207	0.751	1.488	0.029	10.48	10.48	10.48	7.3	14.32	0.292	100.00	100.00	100.00
5	53.75	303	0.124	0.296	0.009	1.18	1.18	1.18	10.7	25.75	0.787	100.00	100.00	100.00
6	56.78	360	0.151	0.238	0.009	2.40	2.40	2.40	6.3	10.12	0.370	100.00	100.00	100.00
7	61.82	920	0.068	0.056	0.004	0.82	0.87	0.60	1.5	1.87	0.093	17.33	13.33	15.45
8	42.36	205	0.094	1.066	0.004	1.12	4.32	0.73	3.7	23.71	0.165	41.47	100.00	35.83
9	53.77	253	0.220	0.441	0.011	3.98	3.98	3.98	5.5	11.30	0.287	100.00	100.00	100.00
10	36.32	990	0.073	0.130	0.005	0.82	0.82	0.60	5.9	13.32	0.448	60.97	59.67	55.13
11	49.37	218	0.204	1.017	0.023	1.70	1.70	1.70	11.9	59.05	1.292	100.00	100.00	100.00

可见,叶片燃烧速率、损毁程度与其平均含水率、单位面积质量有关,但也与叶片的其他理化性质有关。

2.2 抗火性比较

由于不同种植物活叶片的形状、面积、厚度、质量、含水率等理化性质不同,同一叶片不同部位的厚度也不相同,造成不同叶片的绝对燃烧速率相差较

大,同一叶片不同部位的燃烧速率也不相同。而相近的燃烧速率对不同叶片造成的后果即损毁程度也不相同,对小而薄的叶片造成损毁程度大于大而厚的叶片。为综合比较不同植物活叶片的抗火性能,运用统计软件 SPSS 对 12 个变量进行因子分析。分析过程中得到的相关矩阵如表 2 所示。

表 2 相关矩阵

Table 2 Standardized matrix of fire resistance parameters of samples

变量 Variable	V ₁	V ₂	V ₃	V ₄	V ₅	V ₆	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	S ₅	S ₆
V ₁	1.000	0.728	0.795	0.975	0.906	0.977	0.096	-0.038	-0.083	0.399	0.321	0.404
V ₂	0.728	1.000	0.715	0.664	0.789	0.653	0.121	0.373	0.085	0.211	0.486	0.204
V ₃	0.795	0.715	1.000	0.690	0.568	0.708	0.485	0.485	0.460	0.614	0.459	0.623
V ₄	0.975	0.664	0.690	1.000	0.941	0.999	-0.077	-0.211	-0.257	0.341	0.274	0.346
V ₅	0.906	0.789	0.568	0.941	1.000	0.928	-0.199	-0.208	-0.366	0.174	0.316	0.172
V ₆	0.977	0.653	0.708	0.999	0.928	1.000	-0.045	-0.194	-0.228	0.377	0.292	0.383
S ₁	0.096	0.121	0.485	-0.077	-0.199	-0.045	1.000	0.790	0.914	0.714	0.570	0.713
S ₂	-0.038	0.373	0.485	-0.211	-0.208	-0.194	0.790	1.000	0.903	0.411	0.470	0.406
S ₃	-0.083	0.085	0.460	-0.257	-0.366	-0.228	0.914	0.903	1.000	0.535	0.392	0.536
S ₄	0.399	0.211	0.614	0.341	0.174	0.377	0.714	0.411	0.535	1.000	0.809	0.999
S ₅	0.321	0.486	0.459	0.274	0.316	0.292	0.570	0.470	0.392	0.809	1.000	0.793
S ₆	0.404	0.204	0.623	0.346	0.172	0.383	0.713	0.406	0.536	0.999	0.793	1.000

表 3 主成分分析结果

Table 3 The eigenvalues and contribution ratio for principal component analysis

变量 Variable	原始特征值 Initial eigenvalues			提取的因子累积荷量 Extraction sums of squared loadings			旋转的因子累积荷量 Rotation sums of squared loadings		
	特征值 Eigenvalues	贡献率/% Contribution rate	累计贡献率/% Cumulative	特征值 Eigenvalues	贡献率/% Contribution rate	累计贡献率/% Cumulative	特征值 Eigenvalues	贡献率/% Contribution rate	累计贡献率/% Cumulative
V ₁	6.003	50.026	50.026	6.003	50.026	50.026	5.048	42.071	42.071
V ₂	4.018	33.483	83.509	4.018	33.483	83.509	3.241	27.011	69.082
V ₃	1.145	9.539	93.048	1.145	9.539	93.048	2.876	23.965	93.048
V ₄	0.640	5.330	98.378						
V ₅	0.151	1.255	99.633						
V ₆	0.023	0.192	99.824						
S ₁	0.019	0.159	99.983						
S ₂	0.001	0.012	99.995						
S ₃	0.000	0.003	99.999						
S ₄	0.000	0.001	100.000						
S ₅	0.000	0.000	100.000						
S ₆	0.000	0.000	100.000						

表 4 主成分矩阵

Table 4 The matrix for principal component analysis

评价指标 Evaluation	主成分 Principal component		
	1	2	3
V_1	0.861	-0.461	0.049
V_2	0.752	-0.246	0.515
V_3	0.910	0.064	0.240
V_4	0.790	-0.594	-0.063
V_5	0.714	-0.670	0.081
V_6	0.807	-0.564	-0.085
S_1	0.485	0.815	0.021
S_2	0.366	0.772	0.501
S_3	0.322	0.883	0.252
S_4	0.748	0.469	-0.462
S_5	0.701	0.379	-0.243
S_6	0.748	0.465	-0.463

从表 2 中可以看出,多数因子之间的相关性较高(超过 0.3),因此,可以进行因子分析。首先进行主成分分析,结果如表 3、表 4 所示。

从表 3 可以看出 SPSS 共提取了 12 个综合因子,与原始因子一样多,从表 4 可以看出 SPSS 自动提取了 3 个综合因子为主因子(主成分)。从表 3 可以看出,这 3 个综合因子的方差贡献率达到了 93.048%,丢失的信息较少,因此,提取的主成分是合理的。

为便于解释主成分的意义,在分析过程中采用了 SPSS 中具有 Kaiser 标准化的正交旋转法,旋转后因子负载重新进行分配,使公因子负载系数向更大或更小方向变化旋转在 6 次迭代后收敛。结果如表 5 所示。

表 5 旋转主成分矩阵

Table 5 The rotation matrix for principal component analysis

评价指标 Evaluation	主成分 Principal component		
	F_1	F_2	F_3
V_5	0.962	0.036	-0.200
V_1	0.949	0.235	-0.037
V_4	0.941	0.213	-0.223
V_6	0.932	0.251	-0.213
V_2	0.857	-0.052	0.393
V_3	0.733	0.368	0.465
S_4	0.200	0.951	0.221
S_6	0.202	0.950	0.218
S_5	0.270	0.732	0.295
S_2	-0.031	0.206	0.968
S_3	-0.191	0.405	0.864
S_1	-0.083	0.625	0.709

主成分 F_1 在相对面积损失速率 V_5 、绝对线性速率 V_1 、相对线性速率 V_4 、相对质量损失速率 V_6 、绝对面积损失速率 V_2 、绝对质量损失速率 V_3 上的载荷较大,体现了抗火性能 x_1 ,可把主成分 1 命名为 y_1 。主成分 F_2 在相对损毁速度 S_4 、相对损毁质量 S_6 、相对损毁面积 S_5 上的载荷较大,体现了抗火性能 x_2 ,可把主成分 2 命名为 y_2 。主成分 F_3 在绝对损毁面积 S_2 、绝对损毁质量 S_3 、绝对损毁速度 S_1 上的载荷较大,体现了抗火性能 x_3 ,可把主成分 3 命名为 y_3 。

根据表 3,利用 SPSS 计算出 3 个主成分的得分 y_1 、 y_2 、 y_3 及综合得分 y , $y = 0.50026y_1 + 0.33483y_2 + 0.09539y_3$ 。最后进行排序,结果如表 6 所示。

表 6 11 种植物活叶得分表

Table 6 The grading values of live leaves of 11 woody species

样品 Samples	F_1	F_2	F_3	y_1	y_2	y_3	综合评分 Composite score	综合排名 Orders
1	-0.453 17	0.483 00	1.572 17	-1.11	0.97	1.68	0.08	5
2	-0.501 65	0.868 11	-0.533 04	-1.23	1.74	-0.57	-0.01	6
3	-0.077 02	0.438 78	0.428 42	-0.19	0.88	0.46	0.15	4
4	2.827 62	0.107 98	-0.358 34	6.93	0.22	-0.38	1.42	1
5	-0.681 28	0.765 20	-0.026 82	-1.67	1.53	-0.03	-0.09	8
6	-0.414 75	0.875 54	-1.041 76	-1.02	1.76	-1.11	-0.01	7
7	-0.524 73	-2.062 81	-0.734 82	-1.29	-4.13	-0.79	-1.02	11
8	0.208 22	-1.518 07	0.210 74	0.51	-3.04	0.23	-0.38	9
9	0.127 94	0.733 15	-1.057 10	0.31	1.47	-1.13	0.21	3
10	-0.724 49	-0.591 31	-0.445 82	-1.78	-1.19	-0.48	-0.60	10
11	0.213 33	-0.099 56	1.986 36	0.52	-0.20	2.13	0.26	2

从综合得分结合各叶片的理化特征分析,炮仗花杜鹃含水率低、叶面积相对较小,燃烧速率大、损毁严重,综合得分最大,为抗火性最差类。云南樟、云南含笑、厚皮香及大白花杜鹃的得分较接近,为抗火性差类。光叶石栎、小白花杜鹃及水红木的得分较近,为抗火性中等类;元江栲、云南野山茶及野八角的得分较接近,为抗火性强类。

3 讨论

在滇中地区春季防火期,常绿阔叶植物要经历部分落叶、萌芽到新枝叶不断生长的变化过程,同一株植物上同时有落叶、新枝叶生长、开花、结果等现象,活枝叶的燃烧性随时间呈动态变化^[5]。而老活叶载量大、较新叶含水率低,是树冠火燃烧的主要可燃物,叶片面积、厚度、质量、含水率等理化性质在防火期相对稳定,燃烧性也相对稳定。在采样位置相同的情况下,不同植物带叶活枝的燃烧性排序^[5,19]有较大差别,这主要是由于常绿阔叶植物带叶活枝的燃烧性除受老活叶影响外,还受新叶和枝的数量及理化性质等多种因素影响,而新叶和枝的数量及理化性质与气候、采样时间等因素有关。气候影响植物的生长及化学成份,从而对植物的燃烧性和抗火性产生影响。连续4年干旱对滇中地区植物的生长发育影响很大,不同植物对干旱有不同的响应和适应方式,本研究抗火性排序和分类是在此背景下得出的,其他降水条件下是否如此仍需进一步验证。

与可燃物直接燃烧试验方法和基于可燃物理化性质的间接研究方法相比,氧指数法具有试验可重复性强、试验数据容易采集的优点。由于叶片在试验前并没有受到破坏,不同植物的试验数据差别主要来自于叶片自身,试验结果能很好地反映叶片自身的抗火特性。作为一种成熟的试验手段,氧指数法常用于评价织物、木材、PVC导管等室内装修装饰材料的阻燃性。与叶片不同的是,这些材料具有外形比较规则的特点。与这些可燃物类似的是,活叶片也是面状可燃物。本研究提出了用燃烧速度、损毁程度两大类共12个分指标来评价活叶片抗火性的研究方法,是一种新方法的尝试。

从叶片的表现来看,野八角、元江栲、云南野山茶3种植物活叶片在纯氧条件下不能燃烬,燃烧速率也不快,从这个角度上讲,活叶有较强的抗火性。但在2006年“3·29”森林火灾中,位于采样地附近的这3种活叶在高强度火焰作用下,在氧浓度等于

或小于21%的气氛下能够被引燃,而且有时燃烧、蔓延速率很快。在高氧条件下能够较好地区分不同植物叶的抗火性差异,进而可以对不同的叶进行抗火性排序和分类,为开展生物防火提供依据,但其燃烧行为与真实森林火灾中有一定的差别。高氧气氛条件下的抗火试验是很容易实现的,而高强度火作用下的抗火性试验在实验室较难以实现,在实验室模拟接近真实条件下的森林燃烧也有一定难度,如何根据活叶片在高氧条件下的燃烧表现推断其在真实火灾中的燃烧行为是下一步需要继续研究的课题。

参 考 文 献

- [1] 刘爱荣,吴德友,李立俊,等.早冬瓜 *Alnus nepalensis* 天然林阻火功能的初步研究[J].森林防火,1996(1):11-12,34.
- [2] 谢玉敏,李军伟.树种燃烧性的研究[J].森林防火,1999(3):38-39.
- [3] 王革,柯玉鹏.昆明地区防火林带设计树种选择[J].林业调查规划,2006,31(1):109-112.
- [4] 李世友,马爱丽,王少名,等.14种常绿木本植物活枝叶在防火期的易燃性比较[J].生态学杂志,2009,28(4):601-606.
- [5] 李世友,昌尼娜,管晓媛,等.昆明地区15种常见木本植物活枝的燃烧性[J].生态学杂志,2012,31(2):276-281.
- [6] 单延龙,刘乃安,杜建华.大兴安岭主要树种抗火性的分析与排序[J].东北林业大学学报,2005,33(6):19-22.
- [7] BURROWS N D. Flame residence times and rates of weight loss of eucalypt forest fuel particles[J]. International Journal of Wildland Fire, 2001, 10(2):137-143.
- [8] ENGSTROM J D, BUTLER J K, SMITH S G, et al. Ignition behavior of live California Chaparral leaves[J]. Combustion Science and Technology, 2004, 176(9):1577-1591.
- [9] DIBBLE A C, WHITE R H, LEBOW P K. Combustion characteristics of north-eastern USA vegetation tested in the cone calorimeter: invasive versus non-invasive plants [J]. International Journal of Wildland Fire, 2007, 16(4):426-443.
- [10] SUN L, ZHOU X, MAHALINGAM S, et al. Comparison of burning characteristics of live and dead chaparral fuels [J]. Combustion and Flame, 2006, 144(1):349-359.
- [11] 崔飞,罗静,蔡喜来,等.阻燃PVC电工套管氧指数测定中的影响因素分析[J].中国安全生产科学技术,2009,5(2):56-60.
- [12] 吴玉章,华毓坤.木材结构特性对氧指数的影响[J].木材工业,1999,13(6):10-12.
- [13] 尤飞,胡源,宋磊.西藏古建筑中装饰织物的燃烧特性研究[J].中国科学技术大学学报,2007,37(3):284-289.
- [14] 王永祝,陈现景,于广和.窗帘幕布类产品阻燃性能质量探析[J].武警学院学报,2011,27(8):16-17.
- [15] 卢士艳,沈兰萍.窗帘织物阻燃性能实验研究[J].中原工学院学报,2011,22(1):48-52.
- [16] 李世友,李小宁,李生红,等.3种针叶树种树皮的阻燃性研究[J].浙江林学院学报,2007,24(2):192-197.

- [17] 李世友,马爱丽,朱丽,等.华山松树干耐火性初步研究[J].西北林学院学报,2009,24(2):105-108.
- [18] 李世友,胡小龙,马爱丽,等.中等径级藏柏树干的耐火性研究[J].福建林学院学报,2009,29(1):65-68.
- [19] 李世友,马长乐,罗文彪,等.昆明地区35种森林木本植物的燃烧性排序与分类[J].生态学杂志,2008,27(6):867-873.

Fire resistance of live leaves of 11 woody species in Central Yunnan Province

LI Shi-you^{1,2} ZHAO Jia-gang² ZHANG Yu-yao² ZHOU Jin-feng²
LI Lu-liang² WANG Qiu-hua² SHU Li-fu¹

1. *Research Institute of Forest Ecology, Environment and Protection, the Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China;*

2. *College of Civil Engineering, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China*

Abstract To compare fire resistance difference of plant species, combustion experimentations of live leaves from 11 common native woody plant species in Central Yunnan Province were conducted with an oxygen index measuring instrument under high oxygen concentration during the peak forest fire season. Moisture content, mass per unit area, burning rate, damage extent of the live leaves were measured and calculated. The combustibility orders and classification were put forward based on factor analysis. The results showed that the live leaves of 11 species were divided into four categories including very inflammable species (one kind), inflammable species (four kinds), combustible species (three kinds) and hardly inflammable species (three kinds).

Key words fire resistance; forest plant species; live leaves; Central Yunnan Province

(责任编辑:张志钰)