

DOI: 10.5846/stxb201301030010

李修鹏 杨晓东 余树全 阎恩荣 章建红. 基于功能性状的常绿阔叶植物防火性能评价. 生态学报 2013, 33(20): 6604–6613.

Li X P, Yang X D, Yu S Q, Yan E R, Zhang J H. Functional trait-based evaluation of plant fireproofing capability for subtropical evergreen broad-leaved woody plants. Acta Ecologica Sinica 2013, 33(20): 6604–6613.

基于功能性状的常绿阔叶植物防火性能评价

李修鹏¹ 杨晓东^{2,3} 余树全⁴ 阎恩荣^{2,3,*} 章建红⁵

(1. 浙江省宁波市林特科技推广中心, 宁波 315012; 2. 华东师范大学, 上海 200062;

3. 浙江天童森林生态系统国家野外科学观测研究站, 宁波 315114; 4. 浙江农林大学 临安 311300;

5. 浙江省宁波市农业科学研究院, 宁波 315040)

摘要: 植物功能性状不仅便于评价植物的防火性能, 也有利于筛选防火植物。以宁波地区的 29 个常绿木本植物为对象, 在测定植物比叶面积、叶干物质含量、叶片含水量、枝条干物质含量和树皮厚度 5 个功能性状, 以及鲜叶的 7 个防火性能指标的基础上, 通过因子分析将防火性能指标划分为抗燃性 f_a (包含抗火性因子 f_1 和燃烧速度因子 f_2 2 个公因子) 与燃烧性 f_b 2 个防火因子, 然后利用 Pearson 相关分析和偏相关分析建立了 5 个功能性状与各个防火因子的相关性, 并对 29 个物种的防火性能进行评价。结果表明: 1) 比叶面积和树皮厚度与抗火性因子 f_1 , 枝条干物质含量、树皮厚度和当年生叶片含水量与燃烧速度因子 f_2 , 比叶面积与抗燃性因子 f_a , 叶片干物质含量、比叶面积和当年生叶片含水量与燃烧性因子 f_b 间存在显著的相关关系; 2) 偏相关简化植物防火性状后, 比叶面积和叶干物质含量分别对抗燃性因子 f_a 与燃烧性因子 f_b 的指示性最好; 3) 分别基于功能性状和燃烧试验的物种抗燃性排序相似度为 0.80。研究证明, 基于简易观测的植物功能性状可较好地反映树种的抗火性和燃烧性, 可作为植物防火性能有效的评价方法。

关键词: 功能性状; 防火性能; 抗燃性; 燃烧性; 常绿植物

Functional trait-based evaluation of plant fireproofing capability for subtropical evergreen broad-leaved woody plants

LI Xiupeng¹, YANG Xiaodong^{2,3}, YU Shuquan⁴, YAN Enrong^{2,3,*}, ZHANG Jianhong⁵

1 Ningbo Technology Extension Center for Forestry and Specialty Forest Products, Ningbo 315012, China

2 East China Normal University, Shanghai 200062, China

3 Tiantong National Station of Forest Ecosystem, Chinese National Ecosystem Observation and Research Network, Ningbo 315114, China

4 Zhejiang Agriculture and Forestry University, Lin'an 311300, China

5 Ningbo Academy of Agricultural Science, Ningbo 315040, China

Abstract: Functional trait-based approach is convenient for evaluating plant fireproofing capability, and is also vital for selecting fireproofing plant species. In the present study, five plant functional traits, including specific leaf area (SLA), leaf dry matter content (LDMC), current year leaf water content (CYLWC), branch dry matter content (BDMC) and bark thickness (BT), and seven indices of fireproofing capability in fresh leaf materials were measured for 29 evergreen broad-leaved plants in Ningbo. Seven indices of fireproofing capability were grouped into two factors involving burning resistance (f_a) (including burning resistance factor f_1 and burning velocity factor f_2) and combustibility (f_b), and then related to each of five plant functional traits. Finally, the fireproofing capability was assessed. The results showed: 1) burning resistance factor f_1 was significantly correlated with SLA and BT, burning velocity factor f_2 was significantly correlated with

基金项目: 宁波市重大(重点)择优委托项目(2007C110032, 2012C10027); 浙江省科技厅重大项目(2006C12060)

收稿日期: 2013-01-03; 修订日期: 2013-04-18

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: eryan@des.ecnu.edu.cn

<http://www.ecologica.cn>

BDMC, BT and CYLWC, burning resistance factor f_a was significantly correlated with SLA, and combustibility factor f_b was significantly correlated with LDMC, SLA and CYLWC. 2) SLA and LDMC were effective indices indicating f_a and f_b , as functional traits being simplified by partial correlation. 3) Similarity index was 0.8 for plants' fireproofing rank between trait-based and burning experiment-based assessments. In conclusion, easily measurable plant functional traits are useful approach to surrogate and to assess plant fireproofing and combustibility.

Key Words: plant functional trait; fireproofing capability; burning resistance; combustibility; evergreen plants

森林火灾影响森林结构和空间格局^[1-3], 并对森林多样性维持^[4]、土壤碳库循环^[5]、干扰因子波动^[6]等具有十分重要的作用。目前, 针对森林火灾主要有人工预防排查和建立防火林等方面的措施。而在防火林建设中, 筛选和栽植抗火性能较强的植物是森林防火的关键。

对于防火植物选择, 早在 20 世纪 60 年代, Anderson^[7]、Alexandrian^[8] 和 Preussner^[9] 等人提出可通过火烧迹地调查、目测判断和点火试验, 结合植物含水率等少数因子的方法来比较筛选植物, 并提出赤杨(*Alnus japonica*)、欧洲夹竹桃(*Nerium oleander*)、雪松(*Cedrus deodala*)、圣栎(*Quercus ilex*) 和赤栎(*Quercus rubra*) 等可作为欧洲防火线森林的主要树种。我国在《全国生物防火林带工程建设规划》框架下, 结合野外调查, 许多学者利用综合评价指标法、AID 法、层次分析法等也筛选出小青杨(*Populus pseudosimonii*)、色赤杨(*Alnus sibirica*)、春榆(*Ulmus japonica*)、紫椴(*Tilia amurensis*)、木荷(*Schima superba*)、高山栲(*Castanopsis delavayi*)、苦槠(*Castanopsis sclerophylla*)、油茶(*Camellia oleifera*) 和冬青(*Ammopiptanthus mongolicus*) 等可作为常见防火树种^[10-15]。但是, 此类筛选结果常与物种真实抗火性能差距较大, 结果关联度小^[16]。虽然用锥形量热仪法可模拟真实燃烧环境筛选优良抗火物种^[17-18], 但指标测定和分析过程繁琐, 不便在生产实践中推广应用。

植物功能性状是影响生态系统过程或物种适应环境变化的结构性和功能性特征, 如叶片特征^[19-20]、干材和构型特征等^[21]。它们可直接或间接解释环境影响, 反映植物在抗火等方面的效能^[22-24]。本研究依据性状在抗环境干扰方面的指示作用, 针对植物防火性能评价研究的不足, 在借助锥形量热仪测定植物真实防火性能基础上, 基于性状指标(叶片含水量、干物质含量、比叶面积和树皮厚度等)评价了常绿阔叶植物的防火性能, 以期防火树种选择提供一种简单、便于推广的方法。

1 材料与方法

1.1 试验植物及野外取样

在浙江宁波天童(29°48'N; 121°47'E)及周边地区选择香樟(*Cinnamomum camphora*)、木荷、青冈(*Cyclobalanopsis glauca*)、杨梅(*Myrica rubra*)、苦槠、冬青、檫木(*Loropetalum chinense*)、蚊母树(*Distylium racemosum*)和隔药铃(*Eurya muricata*)等 29 个常绿乔灌木作为试验对象(表 1)。由于森林火灾大多为地表火, 林火的燃烧蔓延主要是通过林木枝叶燃烧, 所以主要选择枝叶的燃烧性作为评价树种防火性能的依据^[25]。在 3—4 月(浙江省森林重点防火期)的晴天, 选择以上每个种类的健康植株 3—8 株, 现场测定树皮厚度(各物种树皮厚度用所有同种测量株的平均值表示), 并用生长锥收集树芯后, 每株从冠层 4 周及顶端依次选取 5 枝生长旺盛的健康枝条, 使用高枝剪将其剪下, 在现场选择完好的 30—50 片叶片及 5—10 段枝条装入自封袋中, 带回实验室进行防火性能与功能性状测定。

1.2 功能性状测定

待采集的叶片和枝条带回实验室后, 于 24h 内从自封袋中随机地抽取 20 片叶片和 5 段枝, 分别测定其湿重, 剩余叶片和枝条继续于自封袋密封并放置于 0—4℃ 冰箱中保存。待湿重测定后, 对测湿重叶片用 LI-3050C 型叶面积仪测定叶面积, 之后将叶片和枝条置于 80℃ 的烘箱中 48 h, 烘干至恒量后测定它们的干重^[26]。测量结束后, 用 20 片叶片的平均面积值表示物种叶面积, 用 5 段枝条的平均值表示物种枝条的干湿重。并依据公式(1—3)计算叶片的比叶面积, 叶片和枝条的干物质含量。

$$\text{比叶面积}(\text{mm}^2/\text{mg}) = \frac{\text{叶片面积}}{\text{叶干重}} \quad (1)$$

$$\text{叶干物质量}(\%) = \frac{\text{叶干重}}{\text{叶湿重}} \times 100\% \quad (2)$$

$$\text{枝干物质量}(\%) = \frac{\text{枝干重}}{\text{枝湿重}} \times 100\% \quad (3)$$

表 1 参试常绿植物名录及防火性能

Table 1 Species list and fire prevention ability for evergreen woody plant in the experiment

序号 Species code	物种 Species	科名 Family	生活型 Life form	抗燃性因子 Incombustibility factor			燃烧性因子 Flammability factor
				f_1	f_2	f_a	f_b
1	披针叶茴香 <i>Illicium lanceolatum</i>	八角科	灌木或小乔木	182.20	171.75	178.06	8.40
2	大叶冬青 <i>Ilex latifolia</i>	冬青科	乔木	69.75	179.12	113.04	31.59
3	冬青 <i>Ilex hinensis</i>	冬青科	乔木	131.35	199.74	158.42	8.73
4	马银花 <i>Rhododendron ovatum</i>	杜鹃花科	灌木	187.33	115.51	158.90	9.10
5	檫木 <i>Loropetalum chinense</i>	金缕梅科	灌木	230.53	116.08	185.22	12.16
6	蚊母树 <i>Distylium racemosum</i>	金缕梅科	小乔木	310.56	235.45	280.83	8.95
7	赤皮青冈 <i>Cyclobalanopsis gilva</i>	壳斗科	乔木	97.46	173.95	127.74	13.98
8	苦槠 <i>Castanopsis sclerophylla</i>	壳斗科	乔木	81.19	183.35	121.63	13.85
9	青冈 <i>Cyclobalanopsis glauca</i>	壳斗科	乔木	197.10	106.49	161.23	11.41
10	青栲 <i>Cyclobalanopsis gracilis</i>	壳斗科	乔木	84.00	187.44	124.95	18.05
11	石栎 <i>Lithocarpus glaber</i>	壳斗科	乔木	129.62	193.77	155.02	15.54
12	栀子 <i>Gardenia jasminoides</i>	茜草科	灌木	83.64	172.70	118.89	8.44
13	光叶石楠 <i>Photinia glabra</i>	蔷薇科	灌木或小乔木	94.04	203.13	137.22	17.33
14	石楠 <i>Photinia serrulata</i>	蔷薇科	乔木	135.44	191.52	157.64	8.28
15	石斑木 <i>Raphiolepis indica</i>	蔷薇科	灌木	127.93	150.67	136.93	23.29
16	隔药柃 <i>Eurya muricata</i>	山茶科	灌木	132.81	143.03	136.86	19.27
17	木荷 <i>Schima superba</i>	山茶科	乔木	107.19	187.53	138.99	19.89
18	细枝柃 <i>Eurya loquaiana</i>	山茶科	灌木	362.65	191.39	294.86	6.01
19	油茶 <i>Camellia oleifera</i>	山茶科	灌木或小乔木	73.27	170.66	111.82	13.29
20	老鼠矢 <i>Symplocos stellaris</i>	山矾科	灌木或小乔木	135.00	150.78	141.24	10.11
21	山矾 <i>Symplocos sumuntia</i>	山矾科	灌木或小乔木	187.46	115.09	158.81	9.05
22	四川山矾 <i>Symplocos setchuensis</i>	山矾科	灌木或小乔木	111.45	207.13	149.33	14.45
23	赤楠 <i>Syzygium buxifolium</i>	桃金娘科	灌木	151.72	148.30	150.36	13.11
24	杨梅 <i>Myrica rubra</i>	杨梅科	乔木	171.67	154.38	164.82	9.29
25	红楠 <i>Machilus thunbergii</i>	樟科	乔木	68.38	195.42	118.67	20.68
26	华东楠 <i>MaChilus leptophylla</i>	樟科	乔木	143.73	218.54	173.35	10.63
27	香樟 <i>Cinnamomum camphora</i>	樟科	乔木	137.52	221.37	170.72	7.14
28	浙江樟 <i>Cinnamomum chekiangense</i>	樟科	乔木	127.59	218.50	163.58	15.04
29	紫楠 <i>Phoebe sheareri</i>	樟科	乔木	135.22	195.66	159.14	11.53

1.3 防火性能测定

取出冷藏的叶片和枝条,依据代谢理论中枝叶生物量的比例关系(引自本实验室郭明硕士毕业论文中对栲树等常绿植物枝叶生物量比例的研究结果)^[27],裁剪称量 10g(叶片 2.5g,枝条 7.5g),用铝箔包住,均匀放入边长为 100mm 的正方形托盘中,叶片和枝条在托盘中的累积厚度不超过 50mm。后用锥形量热仪(ISO5660-1)进行燃烧试验,辐射强度采用 40kW/m²,温度采用 664—670℃左右。试验过程共记录 7 个指标,其中,用着火感应时间、燃烧时间和热释放速率峰值时间 3 指标代表植物抗燃性,用热释放速率、有效燃烧热、热释放总量和热释放速率峰值 4 个指标反映其燃烧性^[28]。每个物种重复测定 4 次,后取平均。

1.4 数据分析

1.4.1 燃烧指标降维及特征因子与功能性状的相关性检验

对燃烧试验记录的 7 个抗燃性、燃烧性指标,采用因子分析、综合降维,拟提出能反映物种抗燃性、燃烧性的综合指标,且该指标能最大程度反映记录的 7 个原始指标。然后,依据综合因子指标,结合 29 个物种的 6 个植物功能性状的相关值,用 Pearson 系数和偏相关系数进行相关分析,拟排除功能性状间对植物防火性能的影响,挑选最能反映植物抗火性能的功能性状。

1.4.2 植物防火性能判断

依据植物的抗燃性、燃烧性及观测性状和植物防火性的正负向表达趋势,对于能够表征植物正向抗火性能的指标,采用公式(4)进行正向的标准化;而对于与植物防火呈现负向关系的因子,采用公式(5)进行标准化:

$$x_j = \frac{x_{\max} - x_i}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (4)$$

$$x_j = \frac{x_{\min} - x_i}{x_{\min} - x_{\max}} \quad (5)$$

式中 x_i 表示原始数据值, x_j 表示数据标准化后值, x_{\max} 和 x_{\min} 分别表示原始数据组列的最大及最小值。

待标准化后,利用公式(6)从燃烧性能和功能性状两方面分别计算各物种的综合评价。其中 n 为评价指标个数, λ_j 代表 j 指标所占的权重, U_{ij} 表示 i 物种的 j 指标值, w_i 表示 i 物种的防火性能评价。然后,按照燃烧性和功能性状两套体系对物种防火性能综合值从小到大排序:

$$w_i = \sum_{j=1}^n \lambda_j U_{ij} \quad (6)$$

通常燃烧实验能够反映植物的防火性能,因此,其排序结果代表着物种实际的防火性能。为了反映植物功能性状对防火性能的表征程度,本研究采用基于性状的排序位置和基于燃烧试验的排序位置的差值表示两套体系的相似程度。当基于性状的某一物种排序位置与实际位置较近时,几何差值越小,但其值不会超过参与排序物种数 ($\leq n$); 而当物种的性状排序位置与实际排序位置性相同时,几何差值 = 0:

$$\text{几何差值} = \sum_{i=1}^n |x_{ij} - x_{it}| \quad (7)$$

在随机条件下,几何差值越大,说明基于性状的排序和基于燃烧试验的排序位置差异越大。当两套排序结果极端不相似时,即:每个物种在两套排序体系中的排位差异最大,这时,体系的差异是所有物种极端不相似情况下的求和绝对差值:

$$\sum_{i=1}^n n = n \times n \quad (8)$$

而当两体系极端相似时,其所有物种在两个体系中的排序位置相同,故求和绝对差值等于 0。在这种理念下,可以采用两体系的实际求和绝对差与所有物种在极端不相似条件下的差值比值,来反映基于性状和基于燃烧试验的排序位置的相似程度,以检验性状对植物防火性能的指示性:

$$\text{相似度} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n |x_{ij} - x_{it}|}{\sum_{i=1}^n n} \quad (9)$$

式中 n 为参与排序物种数, x_{ij} 、 x_{it} 分别表示 i 物种在功能性状指标 j 和燃烧指标 t 体系下的排序位置。当所有物种的性状排序和燃烧试验排序差异最大时,两体系的相似度为 0,而当所有物种位置都相同时,相似度等于 1。

2 结果与分析

2.1 抗燃性及燃烧性因子

通过因子分析, 29 个物种的着火感应时间、燃烧时间和热释放速率峰值时间可以归属成两个相互独立的公因子, 累积方差贡献率为 85.11% (表 2), 且经多次最大化正交旋转后, 各因子中的载荷值趋向于两极分化。第 1 公因子 f_1 对着火感应和热释放速率峰值时间有较大的载荷系数, 可以解释为“抗火性”因子; 第 2 公因子 f_2 对燃烧时间有较大的载荷系数, 可以解释为植物的“燃烧速度”因子。将公共因子表示为变量的线性组合, 可以得到评级对象在各个公共因子的得分 (表 3)。以各公共因子的方差贡献率占公共因子总方差贡献率的比重作为权重进行加权汇总, 可以建立因子综合得分函数 ($f_1 = 0.56x_1 + 0.60x_2 + 0.11x_3$; $f_2 = -0.01x_1 + 0.12x_2 + 1.01x_3$)。再将原始变量的标准化值代入得分模型, 把 f_1 和 f_2 代入 $f_a = (51.42f_1 + 33.69f_2) / 85.11$ (即以旋转后各公共因子的贡献率占两个因子总体方差贡献率的比重作为权重, 进行加权汇总), 得到各物种抗燃性的综合得分 (表 1)。

表 2 抗燃性因子提取后的总方差分解

Table 2 Variance decomposition following extracting incombustibility factors

公共因子 Common factor	特征根 Characteristic roots	方差贡献率 Variance	累计贡献率 Cumulative variance
1	1.54	51.41	51.42
2	1.01	33.69	85.11

表 3 植物抗燃性公共因子矩阵

Table 3 Common factors matrix and factor' score for plants incombustibility

变量 Variable	公共因子 Common factor		各因子得分信息 Factor score	
	1	2	1	2
着火感应时间 Fire induction time	0.89	-0.04	0.56	-0.01
热释放速率峰值时间 Peak heat releasing rate time	0.86	-0.15	0.60	0.12
燃烧时间 Combustion time	-0.10	0.99	0.11	1.01

同样, 经因子分析, 热释放速率、有效燃烧热、热释放总量和热释放速率峰值 4 个指标可归结为 1 个描述植物燃烧性的公共因子 f_b , 累计方差贡献率为 86.73。以各公因子的方差贡献率占公共因子总方差贡献率的比重作为权重加权汇总 (表 4), 建立 $f_b = 0.28x_1 + 0.26x_2 + 0.28x_3 + 0.25x_4$ 的得分模型, 再代入标准化的原始变量后, 得到各物种燃烧性的综合得分 (表 1)。

表 4 植物燃烧性公共因子矩阵

Table 4 Common factors matrix and factor' score for plants flammability

变量 Variable	公共因子 Common factor	各因子得分信息 Factor score
热释放速率 Heat release rate	0.98	0.28
有效燃烧热 Effective heat of combustion	0.97	0.26
热释放总量 Total heat release	0.89	0.28
热释放速率峰值 Peak heat release rate	0.88	0.25

2.2 防火性能与功能性状的相关性

为分析功能性状对植物抗火性的指示作用, 在对 29 个树种的 5 个功能性状与锥形量热仪实际测定抗燃性指标所模拟的抗火性因子 f_1 、燃烧速度因子 f_2 、抗燃性综合因子 f_a , 以及燃烧性因子 f_b 的 Pearson 相关分析发现 (表 5), 抗火性因子 f_1 与比叶面积和树皮厚度间存在相关关系。燃烧速度因子 f_2 与枝条干物质含量、树皮厚度和当年生叶片含水量间也存在相关关系 ($P < 0.1$)。而叠加 f_1 和 f_2 得到的抗燃性综合因子 f_a 与比叶面积正相关。抗火性因子 f_1 与枝条和树干性状间不存在显著相关性, 但是与树皮厚度间显著负相关。燃烧速度因

子 f_2 还与枝条的含水量显著负相关, 与枝条干物质质量显著正相关。

野外实际中, 简易地判断并筛选植物的防火信息量, 寻求更少观测性状指标是必须的。在前述各性状对抗火性因子 f_1 、燃烧速度因子 f_2 、抗燃性因子 f_a 、燃烧性因子 f_b 的 Pearson 相关分析中, 相对于其他性状, 仅比叶面积和抗燃性因子 f_a 最显著相关, 能最好地反映植物的抗燃性; 而对于植物的燃烧性因子 f_b , 叶片干物质含量、比叶面积和当年生叶含水量 3 个性状都与 f_b 显著相关, 同时, 比叶面积和叶片干物质含量的 Pearson 相关系数为 -0.56^{***} ($P < 0.01$), 而他们在反映燃烧性上的相关值分别为 0.49^{***} ($P < 0.01$) 和 -0.58^{***} ($P < 0.01$), 即在反映植物燃烧性上信息存在冗余。为此, 有必要把某一性状或几个性状定为控制因子, 去除观测性状间的相互影响。本研究采取偏相关分析重新计算了植物抗火性、燃烧速度和燃烧性与在 Pearson 相关中显著相关的因子变量的偏相关系数, 结果见表 6。

表 5 29 种植物的 5 个功能性状与防火因子间的 Pearson 相关系数

Table 5 Pearson correlation coefficients between functional traits and fire prevention factors for 29 species

	f_1	f_2	f_a	f_b	LDMC	SLA	BDMC	BT	CYLWC
f_1	1								
f_2	-0.12	1							
f_a	0.95 ^{***}	0.21	1						
f_b	-0.54 ^{***}	0.02	-0.52 ^{***}	1					
LDMC	-0.11	-0.13	-0.15	0.49 ^{***}	1				
SLA	0.30 [*]	0.01	0.30 [*]	-0.58 ^{***}	-0.56 ^{***}	1			
BDMC	0.07	0.32 [*]	-0.04	0.16	0.63 ^{***}	-0.45 ^{**}	1		
BT	-0.23 [*]	0.28 [*]	-0.14	0.12	-0.15	0.13	-0.15	1	
CYLWC	-0.08	-0.29 [*]	0.02	-0.29 [*]	-0.58 [*]	0.40 [*]	-0.66 ^{***}	0.7 [*]	1

* ** * $P < 0.01$, * * $P < 0.05$, * $P < 0.1$; SLA: 比叶面积 Specific leaf area, BT: 树皮厚度 Bark thickness, LDMC: 叶片干物质含量 Leaf dry matter content, CYLWC: 当年生叶片含水量 Current year leaf water content, BDMC: 枝干物质含量 Branch dry matter content

表 6 Pearson 相关系数中冗余信息的偏相关系数

Table 6 Partial correlation coefficients among redundant information of Pearson correlation coefficients

	性状 Functional traits	控制变量 Control variable	偏相关系数 Partial correlation coefficients	P
f_1	SLA	BT	0.34	0.07
	BT	SLA	-0.29	0.14
f_2	BDMC	BT, CYLWC	-0.30	0.14
	BT	BDMC, CYLWC	0.33	0.11
	CYLWC	BDMC, BT	-0.14	0.52
f_b	LDMC	SLA, CYLWC	0.33	0.10
	SLA	LDMC, CYLWC	-0.32	0.12
	CYLWC	LDMC, SLA	0.24	0.24

SLA: 比叶面积 Specific leaf area; BT: 树皮厚度 Bark thickness; LDMC: 叶片干物质含量 Leaf dry matter content; CYLWC: 当年生叶片含水量 Current year leaf water content; BDMC: 枝干物质含量 Branch dry matter content

从表 6 可以看出, 抗火性因子 f_1 在树皮厚度作为控制变量的情况下, 与比叶面积的相关系数值为 0.34, 绝对值高于以比叶面积作为控制变量的 -0.29。同时, 在枝条干物质含量和当年生叶片含水量作为控制变量时, f_2 和树皮厚度的相关值最高, 为 0.33。而当比叶面积和叶片含水量作为控制变量时, 叶片干物质含量和 f_b 的相关值为 0.33, 是性状和燃烧性偏相关的最大值。这与 Pearson 相关系数相比, 对 f_1 影响最大的比叶面积未发生变化, 而去除不同性状间的影响外, 和 f_2 相关值最高的枝条干物质含量变化为树皮厚度。同时, 对于 f_b , 也由 Pearson 相关值最高的比叶面积变化为叶片干物质含量。因此, 在去除观测性状间的影响后, 可以看出, 比叶面积良好地指示抗火因子 f_1 和抗燃性综合因子 f_a , 而叶片干物质含量分别对燃烧速度因子 f_2 和燃烧性因子 f_b

的指示性最好。

2.3 植物防火性能

因子分析过程中, 抗火性是植物着火感应时间、燃烧时间和热释放速率峰值时间的综合值, 因此抗火性值越高, 则植物的防火性能越好。对于反映植物热释放速率、有效燃烧热、热释放总量和热释放速率峰值 4 个燃烧性指标的燃烧性, 其值越大, 植物的抗火性能越差。同样, 根据相关分析的结果(表 5, 表 6), 比叶面积可指示物种的抗火性, 而叶片干物质含量可表征植物的燃烧性, 故植物的比叶面积和抗火性间呈现正向一致关系, 而叶片干物质含量值越高, 则植物的防火性能越低。因此, 对抗火性因子 f_a 及比叶面积, 采用正向标准化。而对于燃烧性因子 f_b 及叶片干物质含量, 进行负向标准化。

数据标准化后, 根据燃烧实验和观测性状值对植物防火性的重要性, 假设抗火性和燃烧性对植物防火性能的贡献相同(等于 0.5), 比叶面积和叶片干物质含量对植物抗火性及燃烧性因子的指示性能相同, 将权重各设定为 0.5。根据公式(6)的计算结果, 物种防火性能综合排序如表 7 所示。

基于植物燃烧实验的抗火性和燃烧性综合防火值和基于比叶面积和叶片干物质含量计算得到的防火值存在差异。但是, 结合公式 7 和公式 8, 用实际求和绝对差除以所有物种在极端不相似条件下的差值可知, 基于性状排序和基于燃烧试验排序的相似度等于 0.80, 说明用性状得到的植物防火性能评价和实际燃烧试验的结果相差不大, 用简易测量的植物性状可以表征植物的防火性能。本研究中, 那些具有较大种内性状变异的物种, 如: 蚊母树、青栲 (*Cyclobalanopsis gracilis*)、冬青和栀子 (*Gardenia jasminoides*) 等, 可能由于采样数太少, 一定程度上导致了 2 个排序结果存在一些差异。

表 7 基于燃烧试验和基于功能性状的植物防火性能排序

Table 7 Species order for fire prevention ability based on each of burning experiment and functional traits

序号 Species code	物种 Species	燃烧的防火综合值 Burning value of fire prevention	性状的防火综合值 Triats value of fire prevention	燃烧试验排序 Burning based-order	性状排序 Functional traits based-order	绝对几何差值 Absolute differences
1	披针叶茴香	0.37	0.37	4	6	2
2	大叶冬青	1.00	1.00	29	29	0
3	冬青	0.43	0.79	9	26	17
4	马银花	0.43	0.55	11	13	2
5	欆木	0.42	0.52	7	9	2
6	蚊母树	0.10	0.78	2	25	23
7	赤皮青冈	0.61	0.53	20	11	9
8	苦槠	0.63	0.74	21	21	0
9	青冈	0.47	0.68	12	18	6
10	青栲	0.70	0.53	26	12	14
11	石栎	0.57	0.78	19	24	5
12	栀子	0.53	0.25	15	3	12
13	光叶石楠	0.65	0.77	23	23	0
14	石楠	0.42	0.45	5	7	2
15	石斑木	0.77	0.82	28	28	0
16	隔药柃	0.69	0.68	24	17	7
17	木荷	0.70	0.70	25	19	6
18	细枝柃	0.00	0.28	1	4	3
19	油茶	0.64	0.68	22	16	6
20	老鼠矢	0.50	0.66	14	15	1
21	山矾	0.43	0.47	10	8	2
22	四川山矾	0.56	0.71	18	20	2
23	赤楠	0.53	0.80	16	27	11
24	杨梅	0.42	0.53	6	10	4
25	红楠	0.77	0.65	27	14	13
26	华东楠	0.42	0.06	8	1	7
27	香樟	0.36	0.37	3	5	2
28	浙江樟	0.54	0.74	17	22	5
29	紫楠	0.48	0.20	13	2	11

4 讨论

植物功能性状是植物长期适应环境过程中形成的一系列特征,它在一定程度上能反映植物对环境的抗逆性。本研究用锥形量热仪测量了 29 个植物种类的防火性能,并根据因子分析将 7 个指标分别划分为抗火性和燃烧性 2 个独立因子,实际评价其防火性能。认为大叶冬青(*Ilex latifolia*)、石斑木(*Raphiolepis indica*)、红楠(*Machilus thunbergii*)、青栲、木荷、隔药铃和光叶石楠(*Photinia glabra*) 等的防火性能最好。在周子贵^[29]、赵明水^[30]和吴道圣等^[31]的研究中,他们选取植物叶片与枝条的含水量、易燃干燥度时间、粗灰分含量和炭化灰化时间等理化性质,用多目标植物防火性能综合评定方法,筛选出杨桐(*Adinandra millettii*)、木荷、油茶、杨梅、青冈和苦槠等抗火性能较强的树种,这也与本研究结果一致。

本研究,植物抗火性因子 f_1 与树皮厚度间存在负相关关系,即树皮越薄,植物抗火性能越强,这个结果与前人认为“树皮越厚,植物抗火性能越好”的结论正好相反^[14,32]。且在燃烧速度因子 f_2 与树皮厚度的分析中,两者正相关,说明树皮越厚,植物的燃烧速度越快,更容易燃烧,植物的防火性能越差。这可能是由于相对于对植物燃烧贡献较多的干材部分,树皮的燃点相对较低所致。另外,燃烧速度因子 f_2 与枝条的含水量显著负相关,与枝条干物质质量显著正相关,这反映了树种易燃性的特征,即枝条水分越大,其越不易燃烧,相反,干物质越多,则燃烧速度也越高。

但对于常规认为最能影响植物防火性能的叶片含水量,虽然在当年生叶片含水量的 Pearson 相关中,它和燃烧速度因子 f_2 和燃烧性因子 f_b 显著性相关,但在偏相关后,其值明显降低,分别为-0.14 和 0.24,远小于 Pearson 相关系数显著的值-0.29,说明虽然叶片含水量能阻滞林火的蔓延速率^[33],但不同树种间的叶片含水量高低不能衡量树种的抗燃性,抗燃性是树种所含物质的综合表现^[31]。

从树种功能性状与防火性能指标的 Pearson 相关分析结果可知,比叶面积、树皮厚度、枝条干物质含量、当年生叶片含水量、叶片干物质含量分别与抗火性因子 f_1 、燃烧速度因子 f_2 、抗燃性综合因子 f_a 和燃烧性因子 f_b 间存在显著的相关关系,说明采用简易的观测性状能反映树种的抗火性能和燃烧性。当进一步控制不同的性状变量,运用偏相关分析后发现,除各观测性状间对植物防火性能评价的影响,6 个观测性状可直接简化成比叶面积和当年生叶片干物质含量 2 个指标,分别作为植物抗燃性及燃烧性因子的反映指标,即:用简便和易于野外操作的植物功能性状完全可以指示植物的防火性能。

对燃烧和性状数据的归一化处理后,依权重排序基于性状指示的 29 个物种的防火性能,同时比较其与燃烧实验获得所有物种的排序位置,结果发现两者的相似程度达到 0.80,更进一步证明了基于简易测定的植物性状评价结果基本上可以反映物种实际的防火性能。这相对于传统评价植物防火性能的火烧迹地调查、目测判断、点火试验结合植物含水率和含脂量等少数因子的评级方法较为简易,且与物种实际防火性能的联系较为紧密,反映了植物的环境抗逆性,一定程度上克服了利用材料燃烧测试方法与实际表现差距较大,试验结果关联度小的缺点。虽然用锥形量热仪法可模拟真实的燃烧环境,通过测定评定材料燃烧性的一些主要指标如热释放速率、着火感应时间、烟气成分和失重分析等来表征材料的燃烧性能,从而筛选物种^[17-18],但这些指标的测定和分析往往比较繁琐,不便于在基层的生产实践中推广应用。而植物功能性状(如比叶面积和叶片干物质含量等)较易测定,对专业的知识要求不高,便于在基层的生产实践推广运用。

References:

- [1] Fan Z F, Xu H C, Yu R Y. A study on the species group age structure of *Larix gmelini* population and its relation to disturbance on the north Daxinganling mountains. *Scientia Silvae Sinicae*, 1992, 28(1): 2-11.
- [2] Gabrey S W, Afton A D, Wilson B C. Effects of winter burning and structural marsh management on vegetation and winter bird abundance in the Gulf Coast Chenier Plain, USA. *Wetlands*, 1999, 19(3): 594-606.
- [3] Xu H C, Fan Z F, Wang S. A study in spatial patterns of trees in virgin *Larix gmelini* forest. *Acta Ecologica Sinica*, 1994, 14(2): 155-160.
- [4] Qiu Y, Li Z D, Zhang Y Y, Xu H C, Yu R Y. The effects of fire disturbance on the biodiversity of understory plant in virgin forest, northern region of Daxinganling Mountains, China. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(9): 2863-2869.

- [5] Zhou W C , Mu C C , Liu X , Gu H. Effects of fire disturbance on litter mass and soil carbon storage of *Betula platyphylla* and *Larix gmelinii-Carex schmidtii swamps* in the Xiaoxing'an Mountains of Northeast China. *Acta Ecologica Sinica* , 2012 , 32(20) : 6387-6395.
- [6] Chen H W , Hu Y M , Chang Y , Bu R C , Li Y H , Liu M. Interaction between pest and fire disturbances in Huzhong area of Great Xing'an Mountains: Long-term simulation. *Chinese Journal of Applied Ecology* , 2011 , 22(3) : 585-592.
- [7] Anderson H E. Forest fuel ignitibility. *Fire Technology* , 1970 , 6(4) : 312-319.
- [8] Alexandrian D. Preliminary results of a fertilizer trial in the DFCL (forest fire defence) plots in the forest of Fontfroide (Aude) . *Revue Forestière Française* , 1979 , 31(6) : 482-490.
- [9] Preussner K , Kilius G. Revegetation and silvicultural handling of open-cast mined sites in the Cottbus region. *Sozialistische Forstwirtschaft* , 1983 , 33(8) : 242-245.
- [10] Gao Y P , Chi G D , Zhou S L , Ma C L , Li B H , Wang Z X. Studies on fire-resistant properties and selection of fire-resistant afforesting tree species in Liaoning Province. *Journal of Shenyang Agricultural University* , 1995 , 26(2) : 177-182.
- [11] Chen C J. Study on the application of biological fire-prevention in South China Forest Areas. *Journal of Fujian College of Forestry* , 1994 , 14(2) : 146-151
- [12] Chen C J , He Z M , Chen D H , Huang Y L , Xie J S. Studies on the fire-resistance of 37 species of coniferous and broadleaf trees and its appraisal. *Scientia Silvae Sinicae* , 1995 , 31(2) : 135-143.
- [13] Tian X R , Shu L F , Yan H P , Wang T Z. Selecting fire-resistance tree species in Northern China. *Fire Safety Science* , 2002 , 11(1) : 44-49.
- [14] Shan Y L , Tao H W , Zhao L , Chi W , Hu W , Miao Y. Ordination of fire resistances of bark of main species in Korean Pine broad-leaved forests in Changbai Mountains. *Journal of Northeast Forestry University* , 2011 , 39(12) : 49-50 , 89-89.
- [15] Guo G P , Qu Y , Yuan H. Afforestation with *Alnus tinctoria* build fire prevention forest belt. *Chinese Journal of Applied Ecology* , 1996 , 7(S1) : 16-18.
- [16] Tian X R , He Q T , Shu L F. Application of cone calorimeter for the assessment of the fire resistance of tree species. *Journal of Beijing Forestry University* , 2001 , 23(1) : 48-51.
- [17] Gilman J W , Ritchie S J , Kashiwagi T , Lomakin S M. Fire-retardant additives for Polymeric Materials I. Char Formation from Silica Gel-Potassium Carbonate. *Fire and Materials* , 1997 , 21(1) : 23-32.
- [18] Hshieh F Y , Beeson H D. Flammability testing of flame-retarded epoxy composites and phenolic composites. *Fire and Materials* , 1997 , 21(1) : 41-49.
- [19] Vendramini F , Díaz S , Gurvich D E , Wilson P J , Thompson K , Hodgson J G. Leaf traits as indicators of resource-use strategy in floras with succulent species. *New Phytologist* , 2002 , 154(1) : 147-157.
- [20] Li H W , Wang X A , Guo H , Wang S X , Xia F. Leaf functional traits of different forest communities in Ziwuling Mountains of Loess Plateau. *Chinese Journal of Ecology* , 2012 , 31(3) : 544-550.
- [21] Poorter L , Bongers F , Sterck F J , Wöll H. Architecture of 53 rain forest tree species differing in adult stature and shade tolerance. *Ecology* , 2003 , 84(3) : 602-608.
- [22] Meziane D , Shipley B. Interacting determinants of specific leaf area in 22 herbaceous species: effects of irradiance and nutrient availability. *Plant , Cell and Environments* , 1999 , 22(5) : 447-459.
- [23] Reich P , Wright J , Cavender-Bares J , Craine J M , Oleksyn J , Westoby M , Walters M B. The evolution of plant functional variation: traits , spectra , and strategies. *International Journal of Plant Sciences* , 2003 , 164(S3) : S143-S164.
- [24] Wright I J , Reich P B , Westoby M , Ackerly D D , Baruch Z , Bongers F , Cavender-Bares J , Chapin T , Cornelissen J H , Diemer M , Flexas J , Garnier E , Groom P K , Gulias J , Hikosaka K , Lamont B B , Lee T , Lee W , Lusk C , Midgley J J , Navas M L , Niinemets Ü , Oleksyn J , Osada N , Poorter H , Poot P , Prior L , Pyankov V I , Roumet C , Thomas S C , Tjoelker M G , Veneklaas E J , Villar R. The worldwide leaf economics spectrum. *Nature* , 2004 , 428(6985) : 821-827.
- [25] Forest Fire Prevention Office of the State Forestry Administration. The Construction of Fuelbreak in China. Beijing: China Forestry Publishing , 2003.
- [26] Yan E R , Zhong Q , Zhou W , Guo M , Wang L H , Yuan S J. Mechanical damage in relation to tree characteristics after a catastrophic freeze in Tiantong Region , Zhejiang Province. *Journal of Zhejiang Forestry College* , 2010 , 27(3) : 360-366.
- [27] Guo M. Scaling Relationship of Twig Size to Leaf Size Across Hierarchical Branches for Woody Plants in an Evergreen Broad-Leaved Forest in Tiantong Region , Zhejiang Province [D]. Shanghai: East China Normal University , 2011.
- [28] Tian X R , Shu L F , Qiao Q J , He Q T , Li H. Research on fire-resistance tree species in South China. *Journal of Beijing Forestry University* , 2001 , 9(5) : 43-47.
- [29] Zhou Z G , Luo F Y , Zhou X C , Zheng L W , Liu W H , Wang G S , Fu J X , Zhou Z H , Xu Y S , Yang Y P. Study on fire resistance of 23 tree

species. *Journal of Zhejiang Forestry Science and Technology*, 1996, 6(2): 16–23.

- [30] Zhao M S, Zhou Z H, Cheng X Y, Yang F C. Function of water retention and soil-improvement of *Schima superba* fire forest belts in National Nature Reserve of Mount Tianmu. *Journal of Zhejiang Forestry College*, 2000, 17(1): 42–45.
- [31] Wu D S, Zhang X M, Lu G Y. Study on moisture content and fire resistance of some fire protection tree species. *Journal of Zhejiang Forestry Science and Technology*, 2001, 21(5): 23–26.
- [32] Pinard M A, Huffman J. Fire resistance and bark properties of trees in a seasonally dry forest in eastern Bolivia. *Journal of Tropical Ecology*, 1997, 13(5): 727–740.
- [33] Jin S, Liu B F, Di X Y, Chu T F, Zhang J L. Fire behavior of Mongolian Oak leaves fuel-bed under no-wind and zero-slope conditions. I. Factors affecting fire spread rate and modeling. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012, 23(1): 51–59.

参考文献:

- [1] 范兆飞, 徐化成, 于汝元. 大兴安岭北部兴安落叶松种群年龄结构及其与自然干扰关系的研究. *林业科学*, 1992, 28(1): 2–11.
- [3] 徐化成, 范兆飞, 王胜. 兴安落叶松原始林林木空间格局的研究. *生态学报*, 1994, 14(2): 155–160.
- [4] 邱扬, 李湛东, 张玉钧, 徐化成, 于汝元. 火干扰对大兴安岭北部原始林下层植物多样性的影响. *生态学报*, 2006, 26(9): 2863–2869.
- [5] 周文昌, 牟长城, 刘夏, 顾韩. 火干扰对小兴安岭白桦沼泽和落叶松-苔草沼泽凋落物和土壤碳储量的影响. *生态学报*, 2012, 32(20): 6387–6395.
- [6] 陈宏伟, 胡远满, 常禹, 布仁仓, 李月辉, 刘淼. 大兴安岭呼中林区虫害与火干扰交互作用的长期模拟. *应用生态学报*, 2011, 22(3): 585–592.
- [10] 高圆平, 迟功德, 周绍林, 马春林, 李本和, 王子祥. 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*, 1995, 26(2): 177–182.
- [11] 陈存及. 南方林区生物防火的应用研究. *福建林学院学报*, 1994, 14(2): 146–151.
- [12] 陈存及, 何宗明, 陈东华, 黄勇来, 谢晋生. 37种针阔树种抗火性能及其综合评价的研究. *林业科学*, 1995, 31(2): 135–143.
- [13] 田晓瑞, 舒立福, 阎海平, 王铁柱. 华北地区防火树种筛选. *火灾科学*, 2002, 11(1): 44–49.
- [14] 单延龙, 陶洪伟, 赵丽, 池伟, 胡威, 苗野. 长白山红松阔叶林主要树种树皮抗火性的分析与排序. *东北林业大学学报*, 2011, 39(12): 49–50, 89–89.
- [15] 高国平, 曲艺, 苑辉. 应用色赤杨营造防火林带试验研究. *应用生态学报*, 1996, 7(S1): 16–18.
- [16] 田晓瑞, 贺庆棠, 舒立福. 利用锥形量热仪分析树种阻火性能. *北京林业大学学报*, 2001, 23(1): 48–51.
- [20] 李宏伟, 王孝安, 郭华, 王世雄, 夏菲. 黄土高原子午岭不同森林群落叶功能性状. *生态学杂志*, 2012, 31(3): 544–550.
- [25] 国家林业局森林防火办公室. 中国生物防火林带建设. 北京: 中国林业出版社, 2003.
- [26] 阎恩荣, 钟强, 周武, 郭明, 王良衍, 袁世杰. 浙江天童雨雪冰冻灾后林木机械受损与相关功能性状的关联. *浙江林学院学报*, 2010, 27(3): 360–366.
- [27] 郭明. 浙江天童常绿阔叶林木本植物枝叶比例的尺度推移 [D]. 上海: 华东师范大学, 2011.
- [28] 田晓瑞, 舒立福, 乔启宇, 贺庆棠, 李红. 南方林区防火树种的筛选研究. *北京林业大学学报*, 2001, 9(5): 43–47.
- [29] 周子贵, 罗福裕, 周雪长, 郑林水, 刘文浩, 王根寿, 傅金贤, 周肇恒, 徐应善, 杨幼平. 杨桐等23个乔灌木树种抗火性能的研究. *浙江林业科技*, 1996, 6(2): 16–23.
- [30] 赵明水, 周忠辉, 程晓渊, 杨逢春. 天目山自然保护区木荷防火林保水改土功能. *浙江林学院学报*, 2000, 17(1): 42–45.
- [31] 吴道圣, 张新民, 卢国耀. 几个抗林火树种含水量和抗燃性的研究. *浙江林业科技*, 2001, 21(5): 23–26.
- [33] 金森, 刘礴霏, 邱雪颖, 褚腾飞, 张吉利. 平地无风条件下蒙古栎阔叶床层的火行为 I. 蔓延速率影响因子与预测模型. *应用生态学报*, 2012, 23(1): 51–59.