

DOI:10.12171/j.1000-1522.20180378

云南省建水县防火树种筛选研究

顾汪明^{1,2} 卢泽洋³ 黄春良⁴ 李逸凡^{1,2} 关颖慧^{1,2}

(1. 北京林业大学水土保持学院, 云南建水荒漠生态系统国家定位观测研究站, 北京 100083; 2. 北京林业大学水土保持国家林业局重点实验室, 北京 100083; 3. 国家林业和草原局调查规划设计院, 北京 100714; 4. 建水县林业技术推广所, 云南 建水 654300)

摘要:【目的】根据云南省建水县森林火灾和造林树种组成的特点, 选取当地 18 种主要造林树种作为研究对象, 旨在筛选出适宜建水县林业发展的防火树种, 以期为该区森林火灾预防提供一定的理论依据。【方法】以含水率、粗脂肪、灰分等树种的理化性质和燃烧性能, 树冠浓密稀疏、叶质地厚薄、树皮厚度等树种的生物学、生态学特性, 自然更新能力、种苗来源、造林技术等树种的造林学特性共 16 项指标作为评价因子, 采用典型采样、选点调查、实验测定、层次分析等方法对 18 种树种的防火性能进行综合评判。【结果】按照防火性能综合评价结果, 通过聚类分析可以将树种分为 4 类。I 类(最优防火树种): 火力楠、黄连木、油茶、短萼海桐, 是营造防火林带的首选树种; II 类(较优防火树种): 厚皮香、石楠、女贞、滇青冈、山矾, 可作为防火树种营造生物防火林带; III 类(一般防火树种): 红叶乌桕、麻栎、栓皮栎、清香木, 难以作为防火树种大量种植, 但可用于营林防火; IV 类(非防火树种): 云南松、白枪杆、蓝桉、马尾松、侧柏, 防火性能差, 不宜作为防火树种, 应予保护。【结论】针对目前建水县林分结构单一、纯林面积大的林分组成特点, 建议未来可以 I 类和 II 类防火树种为主营建生物防火林带, 以达到阻隔林火蔓延的目的; III 类树种的防火性能一般, 实地可根据立地条件和地域特征与 I 类和 II 类防火树种搭配栽植。

关键词: 乡土树种; 防火性能; 层次分析法; 建水县

中图分类号: S762 文献标志码: A 文章编号: 1000-1522-(2020)02-0001-11

引文格式: 顾汪明, 卢泽洋, 黄春良, 等. 云南省建水县防火树种筛选研究 [J]. 北京林业大学学报, 2020, 42(2):1-11. Gu Wangming, Lu Zeyang, Huang Chunliang, et al. Screening study of fire resistant tree species in Jianshui County, Yunnan Province of southwestern China [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2020, 42(2): 1-11.

Screening study of fire resistant tree species in Jianshui County, Yunnan Province of southwestern China

Gu Wangming^{1,2} Lu Zeyang³ Huang Chunliang⁴ Li Yifan^{1,2} Guan Yinghui^{1,2}

(1. Jianshui Research Station, School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;

2. Key Laboratory of State Forestry Administration on Soil and Water Conservation,
Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;

3. Academy of Forestry Inventory and Planning, National Forestry and Grassland Administration, Beijing 100714, China;

4. Forestry Technology Extension Institute of Jianshui County, Jianshui 654300, Yunnan, China)

Abstract: [Objective] According to the characteristics of forest fires and afforestation species in Jianshui County, Yunnan Province of southwestern China, 18 major afforestation species were selected as research objects, aiming to screen out fire resistant tree species suitable for forestry development in Jianshui County, and in order to provide a certain theoretical basis for forest fire prevention in this area. [Method] Using 16 indicators (the physicochemical properties and combustion properties of tree species such as water content, crude fat and ash, the biological and ecological characteristics of tree species such as thick and thin canopy,

收稿日期: 2018-11-21 修回日期: 2019-04-15

基金项目: 国家重点研发计划课题(2016YFC0502500、2016YFC0502504)。

第一作者: 顾汪明。主要研究方向: 土壤侵蚀与植被修复。Email: guwangming123@sina.com 地址: 100083 北京市海淀区清华东路 35 号北京林业大学水土保持学院。

责任作者: 关颖慧, 博士, 讲师。主要研究方向: 气候变化与植被恢复。Email: gyhdem@bjfu.edu.cn 地址: 同上。

本刊网址: <http://j.bjfu.edu.cn>; <http://journal.bjfu.edu.cn>

leaf thickness and bark thickness, and the natural regeneration ability of tree species, seedling source and afforestation) as evaluation factors, and the fire performance of 18 species was comprehensively evaluated by typical sampling, point selection survey, experimental measurement and analytic hierarchy analysis. [Result] According to the assessment results, the tree species were divided into four categories, category I (optimal fire- resistance trees): *Michelia macclurei*, *Pistacia chinensis*, *Camellia oleifera*, *Pittosporum brevicalyx* are the preferred species for fire-resistant forest belts; category II (secondary fire resistant trees): *Ternstroemia gymnanthera*, *Photinia serrulata*, *Ligustrum lucidum*, *Cyclobalanopsis glauca*, *Symplocos sumuntia*, which can be used as a fire-resistant tree species to create a biological fire-fighting forest belt; category III (ordinary fire resistant trees): *Quercus acutissima*, *Quercus variabilis*, *Pistacia weinmannifolia*, *Sapium discolor*, which are difficult to plant as a fire tree species, but can be used for forest fire prevention; Category IV (non fire resistant trees): *Pinus yunnanensis*, *Fraxinus malacophylla*, *Eucalyptus globulus*, *Pinus massoniana*, *Platycladus orientalis*, have poor fire performance and should not be used as fire tree species and should be protected. [Conclusion] In view of the current characteristics of forest stand structure with single forest structure and large forest area in Jianshui County, it is suggested that category I and category II fire tree species can be built as the main bio-fire forest belt in the future to achieve the purpose of blocking the spread of forest fires; the fire performance of the category III tree species is general, and the field can be planted in combination with category I and category II fire tree species according to site conditions and regional characteristics.

Key words: native tree species; fire prevention performance; analytic hierarchy process; Jianshui County

森林是地球之肺,是地球上集基因、碳贮、蓄水、能源为一体的最大陆地生态系统,能调节整个地球的生态平衡^[1]。在诸多危害森林的因素中,森林火灾的破坏性最大^[2]。据统计,2000—2014年中国共发生森林火灾119 169次,年均7 945次,受害森林面积累计达到150万 hm^2 ,累计经济损失809.29亿元,年均经济损失达53.95亿元,森林火灾受害率远高于世界平均水平^[3-4]。

目前,许多国家都很重视森林防火工作,同时将生物防火林带作为森林火灾管理的重点措施^[5]。所谓“生物防火”是指利用树种防火性能的差异,选择防火性能强的树种营造生物防火隔离带,或选择防火性能强的树种营造混交林,从而提高林分防火性,减少森林火灾造成的损失^[6]。生物防火林带能有效阻隔或抑制林火的发展和蔓延,可以有效保护森林资源与人民生命财产安全,同时起到增加森林生态系统的复杂性和生物多样性的作用^[7]。而如何选择适宜的防火树种营造生物防火林带,以最大限度地发挥其防火和防火功能是生物防火研究工作的重中之重。国外对这方面的研究较早,特别是美国、欧洲、南亚的一些国家从20世纪50年代开始就进行了研究。在60年代,Anderson^[8]、Preussner^[9]等学者提出通过火烧迹地调查、目测判断和点火试验,结合植物含水率等因素来筛选防火植物的方法。Saharjo等^[10]进一步总结了防火树种应该具备树冠浓密、林下枝高、生长快等特性。随后,陈存及等学者提出燃点、

发热量、挥发性油类、灰分等树种的理化性质及燃烧特性会直接影响树种的防火性能^[6,11-14]。随着研究的不断深入,田晓瑞^[15]等认为防火树种不但要求有较强的防火能力,还要求具备适宜的生物学、生态学特性和造林学特性。为了能够更准确地筛选防火树种,本研究从树种的理化性质及燃烧特性、生物学及生态学特性、造林学特性3方面构建评价体系来综合评价树种的防火性能。

建水县隶属于云南省红河州,全县境内岩溶面积净占70%,土层薄、持水能力差、渗漏严重,是云南省石漠化面积最大、治理最困难、问题最严峻的县之一。该区混交林少,纯林面积大,面积为13.96万 hm^2 ,占全省有林地面积的63.7%。其中,以针叶林为主要优势树种的林地面积为10.15万 hm^2 ,这些针叶纯林均由易燃树种组成,约占74%。由于易燃树种占优势的林分面积大、范围广,加之该区蒸发量大、地表温度高、干旱频发,全县森林火灾发生频繁,火灾损失严重,国务院已将建水县列为云南省境内的I级森林火险县。

综合考虑到建水县石漠化现象严重、土层瘠薄、火灾发生频繁、灾后植被恢复困难且造林难度大等特点,本研究通过典型采样、选点调查、实验测定、专家打分和层次分析等方法,对当地主要树种的理化性质及燃烧特性,生物学、生态学特性和造林学特性进行了综合评价,最终筛选出适宜建水县林业发展的防火树种,旨在为该区森林防火提供一定的理论

依据。

1 材料与方法

1.1 实验材料

云南省建水县森林火灾主要发生在 2—5 月中旬, 每年 11 月至翌年 5 月雨季前为森林防火期^[2]。因此, 在 2017 年 4 月份于云南省建水县石漠化综合治理区选取女贞 (*Ligustrum lucidum*)、栓皮栎 (*Quercus variabilis*)、滇青冈 (*Cyclobalanopsis glaucooides*)、石楠 (*Photinia serrulata*)、麻栎 (*Quercus acutissima*)、厚皮香 (*Ternstroemia gymnanthera*)、短萼海桐 (*Pittosporum brevicalyx*)、侧柏 (*Platycladus orientalis*)、油茶 (*Camellia oleifera*)、火力楠 (*Michelia macclurei*)、蓝桉 (*Eucalyptus globulus*)、云南松 (*Pinus yunnanensis*)、马尾松 (*Pinus massoniana*)、白枪杆 (*Fraxinus malacophylla*)、红叶乌桕 (*Euphorbia cotinifolia*)、清香木 (*Pistacia weinmannifolia*)、黄连木 (*Pistacia chinensis*)、山矾 (*Symplocos sumuntia*) 共 18 种造林树种作为研究对象。这些树种均为当地主要造林树种, 造林面积占建水县有林地面积的 75% 以上。每个树种选取 2~3 株生长良好、立地条件相同的树木作为采样植株, 按叶、枝、皮 3 个部位分别取样, 样品采集质量为 500 g。树叶样品需要采集上、中、下 3 个冠层的新叶片和老叶片, 树枝样品需要采集不同方位的新老和粗细枝条, 树皮样品则需要分别在树干上、中、下 3 个部位取样, 均按质量比例将样品混合均匀后装入牛皮纸信封中。一部分鲜样用于含水率的测定, 剩余样品烘干至恒质量, 粉碎后装入塑料袋密封备用。

1.2 研究方法

1.2.1 理化性质及燃烧性能测定方法

众多的研究表明, 含水率、粗脂肪、灰分、热值、燃点等理化性质及燃烧性能是造成树种在抗火、耐火及防火性能上存在差别的原因之一^[11-15], 因此, 本研究主要选择含水率、燃点、热值、灰分和粗脂肪共 5 项理化性质及燃烧性能指标进行测定, 含水率的测定采用烘干法 (105 °C 杀青 30 min, 85 °C 烘干 12 h), 热值采用全自动微机氧弹式热量计^[16]测定, 燃点采用 XTRD-5 型燃点测试仪^[17]测定; 粗脂肪含量利用索氏抽提^[18]的基本原理测定, 粗灰分采用干灰化法^[13,19]测定, 每项指标测 3 次重复。

1.2.2 生物学、生态学特性和造林学特性调查

采样的同时调查并记录 18 个树种的树冠疏密度、叶质地厚薄、树皮厚度、生长快慢、环境适应性、萌芽力、自然整枝力共 7 个生物学、生态学特性指标以及自然更新能力、种苗来源、造林技术、经济价值

共 4 个造林学特性, 最后则通过专家打分法^[15]将其定量化。

树冠疏密度、叶质地厚薄、树皮厚度、生长快慢影响树种的抗火性, 萌芽力影响灾后恢复能力, 自然整枝力促进火烧, 环境适应性代表火干扰迹地的定居能力, 这些树种的生物学及生态学特性和理化性质及燃烧性能会共同影响树种的防火性能。同时考虑树种的存活率、造林成本以及树种可能带来的经济价值, 在防火树种选择中把造林学特性也作为重要指标之一。这些指标虽无防火意义, 但具有实际的物理意义, 存活率高 (自然更新能力强)、造林成本低且经济价值高的防火树种更有利于建设防火林带。

1.2.3 防火性能的综合评价

本研究主要选择理化性质及燃烧性能测定指标, 同时考虑树种的生物学、生态学特性以及造林学特性共 16 个评价指标, 通过层次分析法来综合衡量树种的防火性能, 具体分析步骤^[20]如下:

(1) 分析研究问题的因果关系, 划分为不同层次要素, 分层次建立评价指标体系。

(2) 两两比较各要素间的重要性, 横向和纵向比较之后列出判断矩阵, 运用和积法求权重向量。

将得到的每层的判断矩阵参照公式 (1), 分别求得横向数值和列向数值。

$$w_i = \sum_{j=1}^n \frac{a_{ij}}{n} \quad (1)$$

将所得的数值分别进行归一化处理, 得到各层的权重向量 $w = [w_{i1}, w_{i2}, w_{i3}, \dots, w_{in}]^T$, $i = 1, 2, 3, \dots, n$ 。

(3) 进行标准化处理, 得到每一层的权重系数。

(4) 进行一致性检验, 判断合权重系数是否正确。应用公式 (2,3,4) 计算得到最大特征值 (λ_{\max})、一致性指标 (CI) 和一致性比 (CR)。基本步骤如下所述:

$$\lambda_{\max} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(Aw)_i}{w_i}, \quad i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (2)$$

$$CI = \frac{\lambda_{\max}(A) - n}{n - 1} \quad (3)$$

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (4)$$

式中: A 表示所求判断矩阵; w 表示权重向量。

CI 值越小, 表示判断的各因素之间相互重要性越准确, 计算的最终结果也越高。但 CI 值会受到思维判断不一致性的干扰, 导致判断结果偏差较大。为了消除 CI 值误差, 研究中应用 RI 和 CR 修正。RI 指标会随着研究问题所确定的判断矩阵的阶数而改变, 其具体变化标准如表 1。当 $CR \leq 0.1$, 矩阵判

表1 平均随机一致性指标(RI)的取值

Tab. 1 Values of average random consistency index RI

阶数 Order	RI
1	0
2	0
3	0.58
4	0.9
5	1.12
6	1.24
7	1.32
8	1.41
9	1.45
10	1.49
11	1.51
12	1.48

断合理, 检验结果准确, 计算得到的权重系数正确。当 $CR > 0.1$ 时, 须重新判断各因子相互重要性, 调整矩阵, 按以上步骤重新计算直至符合所有判断规则。

(5) 将实际数值进行标准化, 与权重系数相乘计算得到综合评价价值。

2 结果与分析

2.1 权重系数计算

层次分析法^[15]是目前防火树种筛选中比较常用的方法。本研究是从理化性质及燃烧性能, 生物学、生态学特性以及造林学特性3方面进行分层, 全面评判各树种的防火性能, 各因子层次分析结果见图1。

根据专家打分, 首先确立理化性质及燃烧性能, 生物学、生态学特性, 造林学特性和下属因子两两之间的相互重要性, 分别对每一层次评价指标之间的

相对重要性进行1~9的数字定量化表示, 以建立判断矩阵。两因素比较结果的确定方法为: 1、3、5、7、9分别表示因素等同、稍重要、较重要、明显重要和绝对重要, 1、2、4、6表示为上述判断的中间等级。各层指标的判断矩阵详见表2~5。

建立不同指标层的判断矩阵后, 求得权重向量, 对得到的每层的判断矩阵和各层的权重向量进行一致性检验, 即可得到各指标的权重值, 具体结果详见表6。

2.2 理化性质及燃烧性能综合评价

对建水县18个树种各部分理化性质及燃烧性能指标进行室内实验测定, 由于树叶、树枝和树皮的理化性质和燃烧性能的不同, 经过查阅文献及专家打分后^[21], 确定树叶、树枝和树皮的权重比是5:3:2, 进行加权后得到18个树种的理化性质指标测定值, 结果如表7所示。

结果表明, 油茶、火力楠、黄连木、短萼海桐, 含水率较高, 均大于52%。而马尾松、白枪杆、蓝桉、栓皮栎、侧柏、麻栎、山矾、云南松、清香木的含水率在42%~48%之间, 说明这些树种遇火燃烧后, 体内水分蒸发散失快, 在较短时间内水分会完全蒸发, 树种会立即进入燃烧阶段, 不利于森林防火。山矾、厚皮香、黄连木、火力楠、油茶的燃点都在250~270℃之间, 较不易燃; 而侧柏、云南松、麻栎、蓝桉、白枪杆、马尾松的燃点均低于230℃, 燃点较低, 在火灾发生时, 会最先燃烧, 应该重点隔离管理。火力楠、黄连木、油茶的热值相对较小, 说明在同等情况下完全燃烧时这些树种放出的热量较少, 即对林火助燃性较小, 而侧柏、蓝桉、清香木、马尾松的热值较高, 助燃性较强。灰分具有抑制焦油产生(焦油成分助燃)和增加木炭生成(木炭结构不燃)的功能, 灰分含

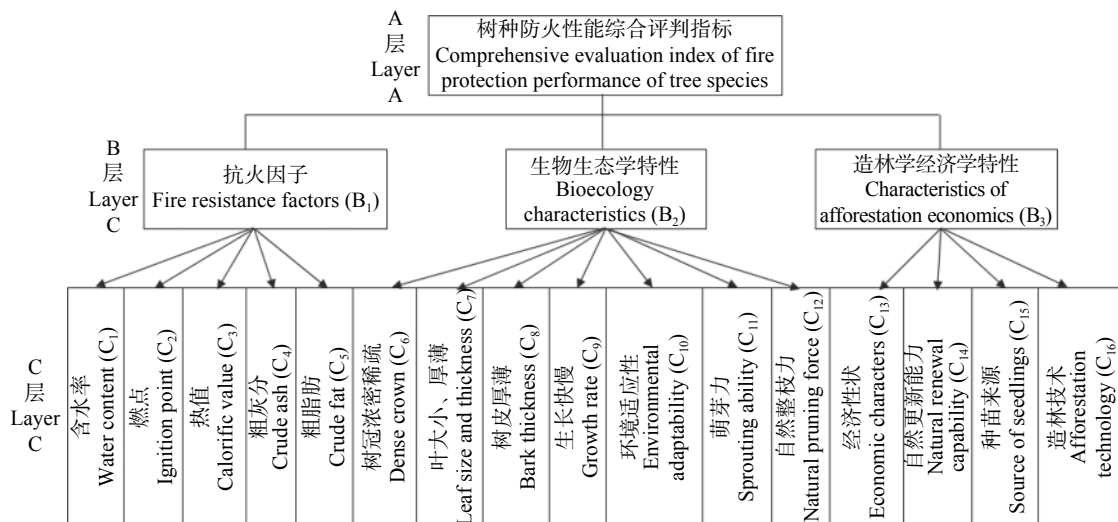


图1 树种防火性能综合评判指标体系

Fig. 1 Comprehensive evaluation index system for fire resistance of tree species

表 2 B 层指标的判断矩阵

Tab. 2 Distinguishing matrix of B layer

A层 Layer A	B ₁ 抗火因子 Fire resistant factor	B ₂ 生物生态学特性 Bioecology characteristics	B ₃ 造林经济学特性 Characteristics of afforestation economics
B ₁ 抗火因子 Fire resistance Factor	1	5	7
B ₂ 生物生态学特性 Bioecology characteristics	1/5	1	3
B ₃ 造林经济学特性 Characteristics of afforestation economics	1/7	1/3	1

表 3 树种燃烧特性的判断矩阵

Tab. 3 Distinguishing matrix of combustibility

B ₁ 抗火因子 Fire resistance factor	C ₁ 含水率 Water content	C ₂ 燃点 Ignition point	C ₃ 热值 Calorific value	C ₄ 粗灰分 Crude ash	C ₅ 粗脂肪 Crude fat
C ₁ 含水率 Water content	1	2	3	9	5
C ₂ 燃点 Ignition point	1/2	1	2	8	3
C ₃ 热值 Calorific value	1/3	1/2	1	2	1
C ₄ 粗灰分 Crude ash	1/9	1/8	1/2	1	1/4
C ₅ 粗脂肪 Crude fat	1/5	1/3	1	4	1

表 4 树种生物生态学特性的判断矩阵

Tab. 4 Distinguishing matrix of biological and ecological characteristics of diverse tree species

B ₂ 生物生态学特性 Bioecology characteristics	C ₆ 树冠疏密度 Density of crown cover	C ₇ 叶大小厚薄 Leaf size and thickness	C ₈ 树皮厚薄 Bark thickness	C ₉ 生长快慢 Growth rate	C ₁₀ 环境适应性 Environmental adaptability	C ₁₁ 萌芽力 Sprouting ability	C ₁₂ 自然整枝力 Natural pruning force
C ₆ 树冠浓密稀疏 Dense and sparse crown	1	2	2	3	1/3	3	1/2
C ₇ 叶大小、厚薄 Leaf size and thickness	1/2	1	2	2	1/6	1/2	1/3
C ₈ 树皮厚薄 Bark thickness	1/2	1/2	1	1/2	1/5	2	1/5
C ₉ 生长快慢 Growth rate	1/3	1/2	2	1	1/2	2	1/2
C ₁₀ 环境适应性 Environmental adaptability	3	6	5	2	1	5	2
C ₁₁ 萌芽力 Sprouting ability	1/3	2	1/2	1/2	1/5	1	1/5
C ₁₂ 自然整枝力 Natural pruning force	2	3	5	2	1/2	5	1

表 5 造林学特性的判断矩阵

Tab. 5 Distinguishing matrix of silvicultural characteristics of diverse tree species

B ₃ 造林经济学特性 Characteristics of afforestation Economics	C ₁₃ 经济性状 Economic Characters	C ₁₄ 自然更新能力 Natural renewal capability	C ₁₅ 种苗来源 Source of seedlings	C ₁₆ 造林技术 Afforestation Technology
C ₁₃ 经济性状 Economic Characters	1	2	1/2	1/3
C ₁₄ 自然更新能力 Natural renewal capability	1/2	1	1/3	1/3
C ₁₅ 种苗来源 Source of seedlings	2	3	1	2
C ₁₆ 造林技术 Afforestation Technology	3	3	1/2	1

量越高，对森林火灾的抑制和阻隔能力就越强。山
 巩、油茶、黄连木、侧柏、火力楠灰分含量均高于 6%，
 可以有效地阻隔并抑制森林火灾的蔓延。粗脂肪的
 组成成分大多都属于助燃成分，遇火极易燃烧，含量
 越低，树种越不易被点燃。油茶、黄连木、滇青冈的
 粗脂肪含量均低于 3%，而侧柏的粗脂肪含量最高，

为 11.028%，说明侧柏的易燃性高于油茶、黄连木、
 滇青冈。

单一指标的比较无法准确判断树种的防火性能，
 综合考虑含水率、粗脂肪、灰分、热值、燃点等 5
 项指标，将指标测定值进行归一化处理，与相对应
 的权重系数相乘求和即为该树种的理化性质及燃烧

表6 树种防火性能综合评判各指标权重

Tab. 6 Comprehensive evaluation index weight of fire resistance of tree species

A 层 Layer A	B 层指标 Layer B index	权重 Weight	C 层指标 Layer C index	权重 Weight	总权重 Total weight
A 树种防火性能综合评判指标 Comprehensive evaluation index of fire protection performance of tree species	B ₁ 抗火因子 Fire resistance factor	0.696 1	C ₁ 含水率 Water content	0.417 1	0.290 2
			C ₂ 燃点 Ignition point	0.303 2	0.210 9
			C ₃ 热值 Calorific value	0.101 3	0.070 3
			C ₄ 粗灰分 Crude ash	0.042 4	0.029 2
			C ₅ 粗脂肪 Crude fat	0.137 2	0.095 4
			C ₆ 树冠浓密稀疏 Dense and sparse crown	0.153 0	0.034 4
	B ₂ 生物生态学特性 Bioecology characteristics	0.225 2	C ₇ 叶大小、厚薄 Leaf size and thickness	0.084 3	0.018 9
			C ₈ 树皮厚薄 Bark thickness	0.064 1	0.014 4
			C ₉ 生长快慢 Growth rate	0.088 0	0.019 8
			C ₁₀ 环境适应性 Environmental adaptability	0.311 4	0.070 0
			C ₁₁ 萌芽力 Sprouting ability	0.061 4	0.013 7
			C ₁₂ 自然整枝力 Natural pruning force	0.239 3	0.053 8
	B ₃ 造林学经济学特性 Characteristics of afforestation economics	0.079 4	C ₁₃ 经济性状 Economic characters	0.178 2	0.014 1
			C ₁₄ 自然更新能力 Natural renewal capability	0.101 4	0.008 0
			C ₁₅ 种苗来源 Source of seedlings	0.372 3	0.029 4
			C ₁₆ 造林技术 Afforestation technology	0.349 1	0.027 6

表7 理化性质及燃烧性能指标测定值

Tab. 7 Physicochemical properties and combustion performance indicators

树种 Tree species	C ₁ 含水率 Water content/%	C ₂ 燃点 Ignition point/°C	C ₃ 热值 Calorific value/(KJ·kg ⁻¹)	C ₄ 粗灰分 Crude ash/%	C ₅ 粗脂肪 Crude fat/%
女贞 <i>Ligustrum lucidum</i>	51.56	242.10	20 416.10	5.28	3.29
栓皮栎 <i>Quercus variabilis</i>	45.46	231.40	22 267.20	5.49	3.96
滇青冈 <i>Cyclobalanopsis glaucooides</i>	49.69	241.10	22 095.40	5.02	2.97
石楠 <i>Photinia serrulata</i>	52.35	242.80	20 752.20	5.57	3.77
麻栎 <i>Quercus acutissima</i>	46.49	223.50	22 259.40	4.11	3.77
厚皮香 <i>Ternstroemia gymnanthera</i>	50.86	252.80	20 304.80	5.40	3.57
短萼海桐 <i>Pittosporum brevicalyx</i>	55.58	245.10	20 731.40	5.91	3.42
侧柏 <i>Platycladus orientalis</i>	45.60	222.50	22 919.20	6.12	11.03
油茶 <i>Camellia oleifera</i>	52.99	260.70	19 066.30	6.92	2.26
火力楠 <i>Michelia macclurei</i>	53.41	255.90	18 634.80	6.10	3.52
蓝桉 <i>Eucalyptus globulus</i>	44.50	224.60	23 428.40	2.67	5.71
云南松 <i>Pinus yunnanensis</i>	47.12	222.70	21 624.60	2.74	5.56
马尾松 <i>Pinus massoniana</i>	43.55	228.30	25 056.20	2.92	5.24
白枪杆 <i>Fraxinus malacophylla</i>	43.96	225.80	20 856.40	4.65	5.35
红叶乌柏 <i>Euphorbia cotinifolia</i>	50.34	232.10	21 623.20	5.23	4.58
清香木 <i>Pistacia weinmannifolia</i>	47.57	230.10	24 246.20	4.87	3.47
黄连木 <i>Pistacia chinensis</i>	53.14	255.30	19 034.40	6.69	2.63
山矾 <i>Symplocos sumuntia</i>	46.92	252.60	21 152.10	9.83	3.21

性能综合评价值 U_1 , 结果见表 8, 并进行聚类分析。结果表明, 单从理化性质及燃烧性能方面来看, 油茶、火力楠、黄连木、短萼海桐综合评价值较高, 均高

于 0.55, 属于抗火性相对较好的造林树种。而白枪杆、蓝桉、马尾松、侧柏等树种的综合评价值较低, 均低于 0.2 以下, 说明此类树种抗火性差, 不适合作为

表 8 理化性质及燃烧性能综合评价

Tab. 8 Comprehensive evaluation of physicochemical properties and combustion performance

树种 Tree species	C ₁ 含水率 Water content/%	C ₂ 燃点 Ignition point/°C	C ₃ 热值 Calorific value/(KJ·kg ⁻¹)	C ₄ 粗灰分 Crude ash/%	C ₅ 粗脂肪 Crude fat/%	综合评价价值 Comprehensive evaluation value (U ₁)
	权重系数 weight coefficient (λ_i)					
	0.290 2	0.210 9	0.070 3	0.029 2	0.095 4	
油茶 <i>Camellia oleifera</i>	0.806 3	1.000 0	0.939 6	0.633 9	1.000 0	0.624 9
火力楠 <i>Michelia macclurei</i>	0.837 6	0.886 9	1.000 0	0.531 4	0.871 9	0.599 1
黄连木 <i>Pistacia chinensis</i>	0.817 4	0.872 8	0.944 0	0.605 0	0.962 0	0.597 1
短萼海桐 <i>Pittosporum brevicalyx</i>	1.000 0	0.630 1	0.706 1	0.507 5	0.880 9	0.571 6
厚皮香 <i>Ternstroemia gymnanthera</i>	0.647 0	0.813 9	0.765 9	0.443 7	0.865 6	0.508 8
石楠 <i>Photinia serrulata</i>	0.758 5	0.578 3	0.703 2	0.464 9	0.844 9	0.485 7
女贞 <i>Ligustrum lucidum</i>	0.699 3	0.559 4	0.750 3	0.428 5	0.893 9	0.471 5
山矾 <i>Symplocos sumuntia</i>	0.351 9	0.809 2	0.647 2	1.000 0	0.903 0	0.433 6
滇青冈 <i>Cyclobalanopsis glaucooides</i>	0.559 2	0.538 2	0.515 0	0.395 7	0.927 0	0.412 2
红叶乌桕 <i>Euphorbia cotinifolia</i>	0.607 8	0.326 2	0.581 1	0.422 6	0.762 1	0.371 1
清香木 <i>Pistacia weinmannifolia</i>	0.400 7	0.279 1	0.213 5	0.377 1	0.876 1	0.284 7
栓皮栎 <i>Quercus variabilis</i>	0.242 8	0.309 7	0.490 9	0.454 9	0.825 8	0.262 4
麻栎 <i>Quercus acutissima</i>	0.320 2	0.123 6	0.492 0	0.281 6	0.844 7	0.242 4
云南松 <i>Pinus yunnanensis</i>	0.358 1	0.104 7	0.580 9	0.108 8	0.661 1	0.233 1
白枪杆 <i>Fraxinus malacophylla</i>	0.130 7	0.177 7	0.688 6	0.349 3	0.683 0	0.199 2
蓝桉 <i>Eucalyptus globulus</i>	0.171 1	0.149 5	0.328 1	0.100 0	0.646 1	0.168 8
马尾松 <i>Pinus massoniana</i>	0.100 0	0.236 6	0.100 0	0.131 7	0.694 6	0.156 1
侧柏 <i>Platycladus orientalis</i>	0.253 6	0.100 0	0.399 5	0.533 5	0.100 0	0.147 9

防火树种。

2.3 生物学、生态学特性和造林学特性综合评价

生物学、生态学特性指标以及造林学特性指标通过专家打分法^[13]将其定量化。打分采用 3 分制, 1-3 分别代表为易燃、比较易燃和难燃以及经济性状低、经济性状中等和经济性状好。打分对象为云南省林业科学院、建水县林业局、建水县林业技术推广所和云南建水荒漠生态系统国家定位观测研究站中较为熟悉当地植被生长特性的相关人员, 共发出 25 份调查问卷, 收回 20 份, 均为有效调查问卷。将各树种打分结果采用一维比较法进行归一化处理, 并与相对应的权重系数相乘求和即为该树种的生物学、生态学和造林学特性的综合评价价值 U_2 和 U_3 。计算结果见表 9 和表 10。

18 种造林树种的生物学、生态学特性综合评价

值 U_2 都在 0.1 ~ 0.3 之间, 聚类分析结果表明, 滇青冈、火力楠、短萼海桐、麻栎、黄连木、栓皮栎、女贞、厚皮香 8 种树种评价价值均高于 0.15, 属于生物学、生态学特性优良的树种, 而其余树种的综合评价价值 U_2 较低。

18 种造林树种的造林学特性综合评价价值 U_3 都在 0.02 ~ 0.06 之间, 聚类分析结果表明, 其中麻栎、火力楠、石楠、侧柏 4 种树种评价价值高于 0.04, 属于造林学特性优良的树种, 而其余树种的综合评价价值较低。

2.4 抗火性能综合评价

将树种的理化性质及燃烧性能综合评价价值 U_1 , 生物学、生态学特性综合评价价值 U_2 与造林学特性综合评价价值 U_3 加权得到树种的抗火性能综合评价价值 U , 对 U 进行聚类分析, 结果见图 2。

表 9 生物学、生态学特性综合评价

Tab. 9 Comprehensive evaluation values of biological and ecological characteristics

树种 Tree species	C ₆ 树冠浓密 Dense crown	C ₇ 叶大小厚薄 Leaf size and thickness	C ₈ 树皮厚薄 Bark thickness	C ₉ 生长快慢 Growth rate	C ₁₀ 环境适应性 Environmental adaptability	C ₁₁ 萌芽力 Sprouting ability	C ₁₂ 自然整枝力 Natural pruning force	综合评价价值 Comprehensive evaluation value (U ₂)
	权重系数 Weight coefficient (λ_i)							
	0.034 4	0.018 9	0.014 4	0.019 8	0.070 0	0.013 7	0.053 8	
滇青冈 <i>Cyclobalanopsis glaucooides</i>	1.000 0	0.550 0	0.550 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	0.210 0
火力楠 <i>Michelia macclurei</i>	1.000 0	0.550 0	0.550 0	1.000 0	0.550 0	1.000 0	1.000 0	0.178 5
短萼海桐 <i>Pittosporum brevicalyx</i>	1.000 0	0.550 0	0.550 0	0.550 0	1.000 0	0.550 0	0.550 0	0.170 7
麻栎 <i>Quercus acutissima</i>	0.550 0	0.550 0	0.550 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	0.550 0	0.170 3
黄连木 <i>Pistacia chinensis</i>	1.000 0	0.100 0	0.550 0	0.550 0	1.000 0	1.000 0	0.550 0	0.168 4
栓皮栎 <i>Quercus variabilis</i>	0.550 0	0.550 0	1.000 0	0.550 0	1.000 0	1.000 0	0.550 0	0.167 9
女贞 <i>Ligustrum lucidum</i>	1.000 0	1.000 0	0.550 0	1.000 0	0.550 0	1.000 0	0.550 0	0.162 8
厚皮香 <i>Ternstroemia gymnanthera</i>	0.550 0	1.000 0	1.000 0	0.550 0	0.550 0	0.100 0	1.000 0	0.156 8
石楠 <i>Photinia serrulata</i>	1.000 0	0.550 0	0.550 0	0.550 0	0.550 0	1.000 0	0.550 0	0.145 4
清香木 <i>Pistacia weinmannifolia</i>	0.550 0	0.100 0	0.550 0	0.100 0	0.550 0	1.000 0	1.000 0	0.136 7
云南松 <i>Pinus yunnanensis</i>	0.550 0	0.100 0	0.100 0	0.550 0	0.550 0	0.550 0	1.000 0	0.133 0
马尾松 <i>Pinus massoniana</i>	0.100 0	0.100 0	0.100 0	1.000 0	0.550 0	1.000 0	1.000 0	0.132 6
蓝桉 <i>Eucalyptus globulus</i>	0.550 0	0.550 0	0.100 0	1.000 0	0.550 0	1.000 0	0.550 0	0.132 3
山矾 <i>Symplocos sumuntia</i>	1.000 0	0.550 0	0.100 0	0.550 0	0.100 0	1.000 0	1.000 0	0.131 6
油茶 <i>Camellia oleifera</i>	0.550 0	0.550 0	0.550 0	0.550 0	0.550 0	1.000 0	0.550 0	0.129 9
白枪杆 <i>Fraxinus malacophylla</i>	0.550 0	0.550 0	0.100 0	0.550 0	0.550 0	0.550 0	0.550 0	0.117 3
侧柏 <i>Platycladus orientalis</i>	0.550 0	0.100 0	0.100 0	0.100 0	0.550 0	1.000 0	0.550 0	0.106 0
红叶乌桕 <i>Euphorbia cotinifolia</i>	0.550 0	0.550 0	0.550 0	0.100 0	0.550 0	0.550 0	0.100 0	0.090 6

根据聚类分析图,可将树种分成 4 大类。I 类: 最优防火树种,分别为火力楠、黄连木、油茶、短萼海桐,该类树种在理化性质及燃烧性能、生物学、生态学及造林适应性上均贡献突出,综合得分值在 0.7 以

上,且含水量较大、燃点高,普遍耐干旱瘠薄,萌芽力高,适应性强,在严峻环境下也能生长,可作为未来当地的主要防火树种。其中,火力楠是南亚热带常绿阔叶树种,尤其适宜在酸性土壤中生长。李振问

表 10 造林学特性综合评价

Tab. 10 Comprehensive evaluation of afforestation characteristics

树种 Tree species	C ₁₃ 经济性状 Economic characters	C ₁₄ 自然更新能力 Natural renewal capability	C ₁₅ 种苗来源 Source of seedlings	C ₁₆ 造林技术 Afforestation technology	综合评价价值 Comprehensive evaluation value (U ₃)
	权重系数 Weight coefficient (λ _i)				
	0.014 1	0.008 0	0.029 4	0.027 6	
麻栎 <i>Quercus acutissima</i>	0.100 0	0.100 0	1.000 0	1.000 0	0.059 2
火力楠 <i>Michelia macclurei</i>	0.100 0	0.100 0	1.000 0	1.000 0	0.059 2
石楠 <i>Photinia serrulata</i>	0.100 0	0.100 0	0.550 0	1.000 0	0.046 0
侧柏 <i>Platycladus orientalis</i>	0.100 0	0.100 0	0.550 0	1.000 0	0.046 0
栓皮栎 <i>Quercus variabilis</i>	0.100 0	0.100 0	1.000 0	0.100 0	0.034 4
短萼海桐 <i>Pittosporum brevicalyx</i>	0.100 0	0.100 0	1.000 0	0.100 0	0.034 4
女贞 <i>Ligustrum lucidum</i>	1.000 0	0.100 0	0.550 0	0.100 0	0.033 8
滇青冈 <i>Cyclobalanopsis glaucooides</i>	1.000 0	0.100 0	0.550 0	0.100 0	0.033 8
油茶 <i>Camellia oleifera</i>	1.000 0	0.100 0	0.550 0	0.100 0	0.033 8
蓝桉 <i>Eucalyptus globulus</i>	1.000 0	0.100 0	0.550 0	0.100 0	0.033 8
白枪杆 <i>Fraxinus malacophylla</i>	1.000 0	0.100 0	0.550 0	0.100 0	0.033 8
黄连木 <i>Pistacia chinensis</i>	1.000 0	0.100 0	0.550 0	0.100 0	0.033 8
云南松 <i>Pinus yunnanensis</i>	0.100 0	1.000 0	0.550 0	0.100 0	0.028 3
厚皮香 <i>Ternstroemia gymnanthera</i>	0.100 0	0.100 0	0.550 0	0.100 0	0.021 1
红叶乌桕 <i>Euphorbia cotinifolia</i>	0.100 0	0.100 0	0.550 0	0.100 0	0.021 1
清香木 <i>Pistacia weinmannifolia</i>	0.100 0	0.100 0	0.550 0	0.100 0	0.021 1
山矾 <i>Symplocos sumuntia</i>	0.100 0	0.100 0	0.550 0	0.100 0	0.021 1
马尾松 <i>Pinus massoniana</i>	1.000 0	0.100 0	1.000 0	0.100 0	0.020 6

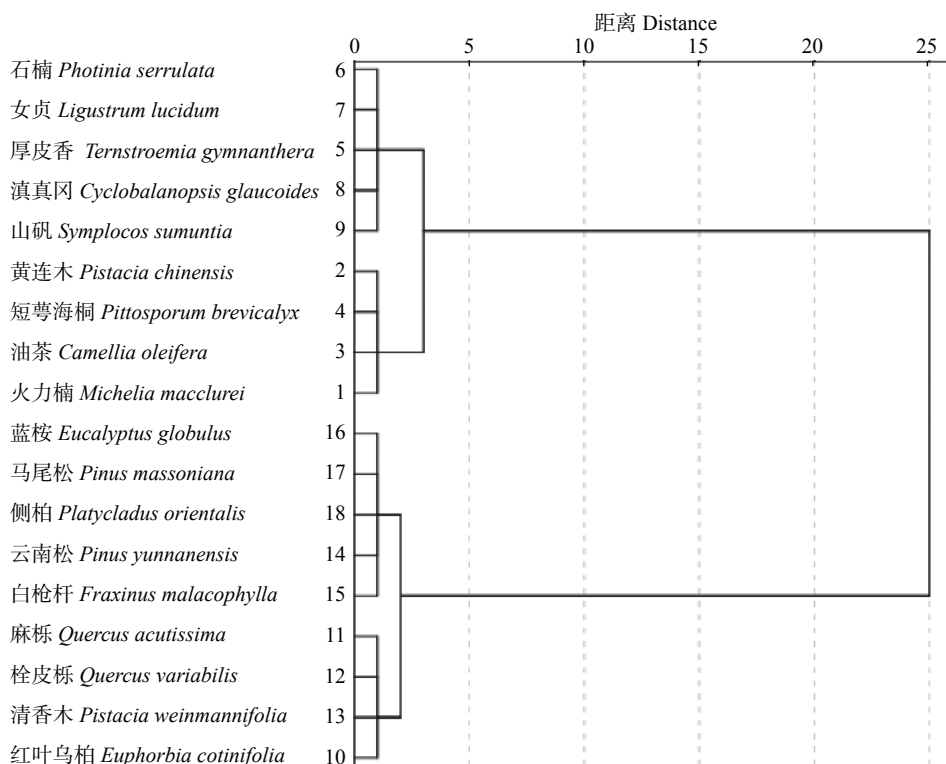


图 2 防火树种聚类分析图

Fig. 2 Cluster analysis graph of fire-proof tree species

等学者在福建省尤溪县进行了模拟火烧试验,发现火力楠防火林带能有效地阻隔地表火和树冠火蔓延^[22]。油茶主要生长在南方亚热带地区的高山及丘陵地带,作为防火树种在陕西、云南、江西等地均有种植,油茶不仅防火效果较强,而且具有良好的经济价值^[19,23-24]。短萼海桐是喀斯特原生林的亚优势树种之一^[25],与此同时也是优良的景观树种。黄连木为落叶乔木,多分布在我国西南地区^[26],同时也是建水县的乡土树种,经济价值高,又兼备防火作用。

II类:较优防火树种,分别为厚皮香、石楠、女贞、滇青冈、山矾,其综合得分值在0.5~0.7之间,该类树种粗脂肪与灰分含量均较低,易燃性较弱,具有良好的阻燃性能。厚皮香皮厚难燃,且树冠结构紧密,耐庇荫,林下湿度大,能有效降低林木燃烧性。石楠分布较广,能耐瘠薄土壤,具有防火和美观的双重作用。女贞属亚热带树种,适应范围广,栽植方式多样,生长较快,2~3年即可成形。滇青冈是常绿树种,适生于石灰岩土壤中,也是常见的防火造林树种。

III类:一般防火树种,包括红叶乌桕、麻栎、栓皮栎、清香木。其抗火性综合评价价值在0.4~0.5之间,这类树种防火性能一般,但观赏价值和经济价值普遍较高。

IV类:较差防火树种,包括侧柏、马尾松、蓝桉、白枪杆、云南松。这类树种热值和灰分含量均较高,助燃性较强,对森林火灾的抑制和阻隔能力也较弱,生态效益一般,抗火性最弱,与梁瀛等^[27-28]的研究结果相同。

3 结论与讨论

本文通过典型采样、选点调查、实验测定、层次分析和专家打分等方法,对云南省建水县18种当地主要造林树种进行了防火性能的筛选研究,结果将18种树种按防火性能强弱分为四类:I类(最优防火树种):火力楠、黄连木、油茶、短萼海桐;II类(较优防火树种):厚皮香、石楠、女贞、滇青冈、山矾;III类(一般防火树种):红叶乌桕、麻栎、栓皮栎、清香木;IV类(非防火树种):云南松、白枪杆、蓝桉、马尾松、侧柏。

建水县地带性植被为亚热带常绿阔叶林,但由于人为干扰强烈,区内已无原生植被分布,现有植被均为人工植被,林分结构单一,纯林面积大,且主要由云南松、马尾松、清香木等可燃、易燃树种组成。考虑到I类树种的防火性能最好,且大部分树种耐瘠薄、耐旱,适应性和萌芽力均比较强,在当地易于成活,未来营造生物防火隔离带应优先考虑。II类树种的防火性能较好,也可作为防火树种营造生物防火林带。重点可在山脊、田林交界、林地边缘等地

区通过营林、造林和补植等措施构建以I类和II类防火树种为主的防火林带,且实际作业时需要根据当地的地形、地貌、火险等级等因素来确定合理的种植密度。在森林抚育作业中也应尽可能保留I类和II类树种,这样既能发挥生物防火的功能,又能降低生物防火的成本。III类树种的防火性能一般,难以作为防火树种大量种植,但该类树种的观赏价值普遍较高,可用于营林防火,根据立地条件和地域特征搭配种植III类树种,构建具有防火功能、生态功能和经济价值于一体的防火林带,以提高生态系统的稳定性和抗火能力,最终达到减少和控制森林火灾的目的。IV类树种均属于易燃树种,防火性能差,不宜作为防火树种,应予以保护。未来应对以易燃树种为主的现有人工林的林分组成和结构进行调整,混交种植I类和II类防火树种,以降低林分的易燃性,提高林分抗火性。

参 考 文 献

- [1] 罗菊春. 大兴安岭森林火灾对森林生态系统的影响[J]. 北京林业大学学报, 2002, 24(5/6): 101-107.
Luo J C. Influence of forest fire disaster on forest ecosystem in Great Xing'anling[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2002, 24(5/6): 101-107.
- [2] 陈锋, 林向东, 牛树奎, 等. 气候变化对云南省森林火灾的影响[J]. 北京林业大学学报, 2012, 34(6): 7-15.
Chen F, Lin X D, Niu S K, et al. Influence of climate change on forest fire in Yunnan Province, southwestern China[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2012, 34(6): 7-15.
- [3] 吴柳萍, 何东进, 洪伟, 等. 基于改进突变级数法的中国森林火灾评价[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2017, 45(8): 95-102, 111.
Wu L P, He D J, Hong W, et al. Assessment of forest fires in China based on improved catastrophe progression method[J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2017, 45(8): 95-102, 111.
- [4] 苏立娟, 何友均, 陈绍志. 1950—2010年中国森林火灾时空特征及风险分析[J]. 林业科学, 2015, 51(1): 88-96.
Su L J, He Y J, Chen S Z. Temporal and spatial characteristics and risk analysis of forest fires in China from 1950 to 2010[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2015, 51(1): 88-96.
- [5] 田晓瑞, 代玄, 王明玉, 等. 多气候情景下中国森林火灾风险评估[J]. 应用生态学报, 2016, 27(3): 769-776.
Tian X R, Dai X, Wang M Y, et al. Forest fire risk assessment for China under different climate scenarios[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, 27(3): 769-776.
- [6] 陈存及, 何宗明, 陈东华, 等. 37种针阔树种抗火性能及其综合评价的研究[J]. 林业科学, 1995, 31(2): 135-143.
Chen C J, He Z M, Chen D H, et al. Studies on fire-resistance of 37 species of coniferous and broadleaf trees and its appraisal[J]. Scientia Silvae Sinicae, 1995, 31(2): 135-143.
- [7] 舒立福, 田晓瑞, 李惠凯. 防火林带研究进展[J]. 林业科学, 1999, 35(4): 81-86.

- Shu L F, Tian X R, Li H K. The development of fire-resistance forest belts research[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 1999, 35(4): 81–86.
- [8] Anderson H E. Forest fuel ignitibility[J]. *Fire Technology*, 1970, 6(4): 312–319.
- [9] Preussner K, Kilius G. Revegetation and silvicultural handling of open-cast mined sites in the Cottbus Region[J]. *Sozialistische Forstwirtschaft*, 1983, 33(8): 242–245.
- [10] Ferreira A, Alegre S P, Coelho C O, et al. Strategies to prevent forest fires and techniques to reverse degradation processes in burned areas[J]. *Catena*, 2015, 128: 224–237.
- [11] 何雨琴, 徐虹, 程晋昕. 云南省林火时空分布特征分析[J]. *中南林业科技大学学报*, 2017, 37(5): 36–41.
- He Y Q, Xu H, Cheng J X. Analysis of temporal and spatial distribution of forest fire in Yunnan Province[J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2017, 37(5): 36–41.
- [12] Wilgen B W V, Higgins K B, Bellstedt D U. The role of vegetation structure and fuel chemistry in excluding fire from forest patches in the fire-prone fynbos shrublands of South Africa[J]. *Journal of Ecology*, 1990, 78(1): 210–222.
- [13] Williams P R, Congdon R A, Grice A C, et al. Effect of fire regime on plant abundance in a tropical eucalypt savanna of north eastern Australia[J]. *Austral Ecology*, 2010, 28(3): 327–338.
- [14] Schwilk D W, Keeley J E, Knapp E E, et al. The national fire and fire surrogate study: effects of fuel reduction methods on forest vegetation structure and fuels[J]. *Ecological Applications: a Publication of the Ecological Society of America*, 2009, 19(2): 285–304.
- [15] 田晓瑞, 舒立福, 乔启宇, 等. 南方林区防火树种的筛选研究[J]. *北京林业大学学报*, 2001, 23(5): 43–47.
- Tian X R, Shu L F, Qiao Q Y, et al. Research on fire-resistance tree species in south China[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2001, 23(5): 43–47.
- [16] 邓光瑞, 胡海清. 大兴安岭主要乔木灰分含量的试验分析[J]. *东北林业大学学报*, 2006, 34(3): 16–18.
- Deng G R, Hu H Q. Ash contents of main arbor species in Daxing'an Mountains[J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2006, 34(3): 16–18.
- [17] O'Connor T G, Uys R G, Mills A J. Ecological effects of fire-breaks in the montane grasslands of the southern Drakenberg, South Africa[J/OL]. *African Journal of Range & Forage Science*, 2004, 21(1): 1–9[2018-03-23]. <https://doi.org/10.2989/10220110409485828>.
- [18] 李修鹏, 杨晓东, 余树全, 等. 基于功能性状的常绿阔叶植物防火性能评价[J]. *生态学报*, 2013, 33(20): 6604–6613.
- Li X P, Yang X D, Yu S Q, et al. Functional trait-based evaluation of plant fireproofing capability for subtropical evergreen broad-leaved woody plants[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(20): 6604–6613.
- [19] 李艳芹, 胡海清, 冯仲科. 帽儿山地区几种乔木树种燃烧性研究[J]. *北京林业大学学报*, 2010, 32(4): 22–25.
- Li Y Q, Hu H Q, Feng Z K. Flammability of several tree species in the Maoer Mountain area, northeastern China[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2010, 32(4): 22–25.
- [20] 汪浩, 马达. 层次分析标度评价与新标度方法[J]. *系统工程理论与实践*, 1993(5): 24–26.
- Wang H, Ma D. Scale evaluation and new scale methods[J]. *System Engineering Theory and Practice*, 1993(5): 24–26.
- [21] 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.
- Shan Y L, Liu N A, Du J H. Analysis and ordination of fire resistance for the principal species in Daxing'an Mountain[J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2005, 33(6): 19–22.
- [22] 李振问. 火力楠林带的防火效果研究[J]. *厦门大学学报(自然科学版)*, 2002, 41(5): 596–599.
- Li Z W. Studies on the effect of fire prevention of biological network of *Michelia macclurei*[J]. *Journal of Xiamen University (Natural Science)*, 2002, 41(5): 596–599.
- [23] 薄颖生, 韩恩贤, 韩刚, 等. 陕西省生物防火林带树种选择研究[J]. *西北林学院学报*, 1997, 12(4): 26–32, 49.
- Bo Y S, Han E X, Han G, et al. A study on tree species selection for the fire protection forest belt in Shaanxi Province[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 1997, 12(4): 26–32, 49.
- [24] 何方, 何柏. 油茶栽培分布与立地分类的研究[J]. *林业科学*, 2002, 38(5): 64–72.
- He F, He B. Cultural distribution and site classification for *Cannellia oleife*[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2002, 38(5): 64–72.
- [25] 刘延惠, 舒德远, 崔迎春, 等. 茂兰喀斯特森林亚优势种短萼海桐树干液流特征及其环境因子响应[J]. *水土保持学报*, 2016, 30(5): 205–211, 217.
- Liu Y H, Shu D Y, Cui Y C, et al. The characteristics of sap flow of *Pittosporum brevicalyx* as subdominant tree species in Maolan kars[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2016, 30(5): 205–211, 217.
- [26] 贾利强, 李吉跃, 郎南军, 等. 水分胁迫对黄连木、清香木幼苗的影响[J]. *北京林业大学学报*, 2003, 25(3): 55–59.
- Jia L Q, Li J Y, Lang N J, et al. Effects of water stress on photosynthetic pigment and chlorophyll fluorescence and the survival rate[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2003, 25(3): 55–59.
- [27] 梁瀛, 张思玉, 努尔古丽, 等. 天山中部林区主要树种理化性质及燃烧性分析[J]. *林业科学*, 2011, 47(12): 101–105.
- Liang Y, Zhang S Y, Nuerguli, et al. Physical and chemical properties and combustibility of main wood species in the central part of Tianshan Mountains[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2011, 47(12): 101–105.
- [28] 祝必琴, 黄淑娥, 田俊, 等. 亚热带季风区不同林型可燃物理化性质及燃烧性研究[J]. *江西农业大学学报*, 2011, 33(6): 1149–1154.
- Zhu B Q, Huang S E, Tian J, et al. A study on the physical-chemical properties and flammability of different forest types in semi-tropical monsoon area[J]. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 2011, 33(6): 1149–1154.

(责任编辑 范娟
责任编辑 余新晓)