

DOI:10.13275/j.cnki.lykxyj.2021.005.013

西宁周边山地主要造林树种防火性能评价

李海佳^{1,2,3}, 郑淑霞^{1,2*}, 单笑笑^{1,2}, 马玉林^{1,2}, 宋 铮^{1,2}, 任 飞³

(1. 青海省农林科学院, 青海 西宁 810016; 2. 青海高原林木遗传育种重点实验室, 青海 西宁 810016;
3. 青海大学省部共建三江源生态和高原农牧业国家重点实验室, 青海 西宁 810016)

摘要: [目的] 通过对青海地区常见树种的理化性质和燃烧特性的研究, 综合评价当地主要造林树种的防火性能, 为该地的防火树种筛选提供一定的理论依据。[方法] 选取常见 10 个树种的树叶、树皮、树枝进行理化性质测定(含水率、燃点、热值)和燃烧试验(燃烧时间、火烧强度), 通过因子分析将 10 个树种的防火性能指标划分为抗燃性因子 f_a 与燃烧性因子 f_b (包含燃烧表征因子 f_{b1} 和内在燃烧因子 f_{b2}) 2 个防火因子, 利用 Pearson 相关分析和偏相关分析建立了理化性质指标与防火因子之间的联系, 通过综合分析, 最后对 10 个树种的防火性能进行了排序。[结果] (1) 燃烧表征因子 f_{b2} 与树叶含水率、树皮燃点和树枝燃点, 抗燃性因子 f_a 与燃烧表征因子 f_{b2} 和树叶热值存在显著的负相关关系; (2) 偏相关分析后得出, 树叶含水率对燃烧表征因子 f_{b2} , 燃烧表征因子 f_{b2} 对 f_a 抗燃性因子有很好的反指作用; (3) 分别基于燃烧试验和防火性能综合值的树种防火性能排序相似度为 0.64。[结论] 建立了所测 10 个树种的综合抗火性评价模型, 得出了基于不同权重体系下的防火性能的排序(四翅滨藜 > 山杏 > 黄刺玫 > 柠条 > 紫丁香 > 沙枣 > 沙棘 > 榆叶梅 > 砂地柏 > 青海云杉), 该结果对西宁及周边区域的树种栽植时防火性能参考具有实际应用和推广意义。

关键词: 理化性质; 防火性能; 抗燃性; 燃烧性; 山地造林树种

中图分类号: S762

文献标志码: A

文章编号: 1001-1498(2021)05-0111-08

森林火灾不仅影响森林生态系统的动态平衡, 而且对森林空间格局和结构^[1-3]、森林生物多样性维持^[4]、土壤碳循环^[5]等产生显著的影响^[6]。开展生物防火是林区林火管理的发展方向, 已经受到森林防火专家和有关部门的高度重视^[7]。国家林业和草原局森林防火办公室的相关资料表明, 树种的燃烧主要与燃点、热值、含水率、灰分含量及抽提物含量关系较大^[8-9]。可燃物的种类不同, 其燃烧性也存在着很大差异^[10], 可以通过树种的燃烧性研究, 判断其防火性能。

近年来, 国内外很多专家学者针对树种的燃烧特性进行了许多研究, 并取得了一定的研究进展^[11-15], 在评价防火性能时用到的方法有加权赋值法、

AID 法、层次分析法、多元回归分析法、主成分分析法、灰色综合评判法和典型相关性分析等。目前, 青海省在树种防火特性和防火性能评价方面的研究还未见报道。本研究在前人研究的基础上, 对青海西宁周边高寒山地树种进行理化性质和树种燃烧性的试验研究, 探讨树种燃烧性差异, 为该地区防火树种的选择与降低森林火灾隐患提供科学依据。

1 研究区与研究方法

1.1 研究区概况

西宁周边山地统属祁连山系, 地理位置为 36°31'~37°28' N; 100°52'~101°54' E, 海拔 2 170~

收稿日期: 2020-09-30 修回日期: 2020-12-08

基金项目: 青海省成果转化和推广计划项目(2016-NK-149); 青海省科技厅项目(2018-ZJ-967Q); 国家自然科学基金(31901171)

作者简介: 李海佳主要从事生物防火技术及枯落物分解微生物作用机理方面研究, E-mail: 1501848507@qq.com

* 通讯作者: 郑淑霞, 副研究员, 主要从事寒旱区引种育种及营造人工林, E-mail: 649104591@qq.com

2 850 m^[16], 属高原大陆性气候, 日照强烈, 年日照时数在 2 500 h 以上, 冬季寒冷且漫长, 春季大风和沙暴很多, 年均温度 6℃。雨量较少, 降雨主要集中在 5 月下旬至 9 月下旬, 年降水量 367.5 mm, 总体的气候特征为: 气压低, 日照时间长, 太阳辐射大, 昼夜温差大, 冰冻期长, 无霜期短, 降水

少, 蒸发量大, 气候恶劣, 树木生长缓慢, 枯落物难分解, 是森林火灾的易发区^[17]。样品采集地分别位于西宁北山的蔡家沟、双苏堡、中庄等山地人工林林区, 能够代表西宁周边山地林区的 10 个常见主要造林树种且采集到所需的试验样本(见表 1)。

表 1 参试树种基本信息

Table 1 The basic information of tree species

序号 Species code	树种 Species	生活型 Life form	抗燃性因子	燃烧性因子	
			Incombustibility factor	Flammability factor	
			f _a	f _{b1}	f _{b2}
1	青海云杉 <i>Picea crassifolia</i>	乔木	166.42	90.71	20.34
2	砂地柏 <i>Sabina vulgaris</i>	灌木	164.46	63.44	22.8
3	沙枣 <i>Elaeagnus angustifolia</i>	乔木或小乔木	185.29	92.38	19.16
4	山杏 <i>Armeniaca sibirica</i>	灌木或小乔木	176.38	55.79	18.56
5	榆叶梅 <i>Amygdalus triloba</i>	灌木或小乔木	167.65	96.73	19.48
6	黄刺玫 <i>Rosa xanthina</i>	灌木	176.09	68.39	19.03
7	紫丁香 <i>Syringa oblata</i>	灌木或小乔木	170.24	84.8	18.13
8	沙棘 <i>Hippophaerha mnoides</i>	灌木或小乔木	169.1	92.67	20.03
9	柠条 <i>Caragana korshinskii</i>	灌木	179.46	88.17	17.76
10	四翅滨藜 <i>Atriplex canescens</i>	灌木	183.24	51.51	17.45

1.2 样品采集

于 2019 年 8 月进行样品采集, 第一次降水 3 天之后的晴天中午 14 点左右, 此时可燃物的含水率为全天最低^[18]。采集母树位于山地半阴坡, 中幼林。利用枝剪和高枝剪, 采集树冠四周的功能叶片, 并去除病叶和残叶, 阔叶树种采集当年生的新鲜叶片, 针叶树种则按照比例采集往年生叶和当年生叶; 树枝取样于母树四周的侧枝, 按 1 年生枝和多年生枝的占比, 决定枝条采样的比例, 枝条按直径 0.3~2.5 cm, 剪成 5 m 左右枝段; 树皮在离地面 1.5 m 以下的侧枝选取, 现场剥取然后将样品进行编号, 初步整理后装入塑封袋, 带回实验室烘干备用。各样品分别采集鲜质量 2 000 g。

1.3 研究方法

1.3.1 样品理化性质指标测定

(1) 含水率

采用 105℃+2℃ 烘干恒质量法, 具体步骤参照 GB/T 2677.2—2001 造纸原料水分的测定方法^[19]。重复 3 次, 取其算术平均值作为测定结果。计算出树叶、树皮、树枝的含水率。

(2) 热值

将粉碎的样品过 60 目筛网, 采用粉末压片机压成药片状并切成 2~4 mm 小块备用。利用千分之一精确度的天平, 称取待测样品 1 g (精确至 0.000 1 g), 用材料燃烧热值测试仪 (苏州泰思泰克检测仪器科技有限公司) 进行测定。重复 3 次, 取算术平均值为样品热值。

(3) 燃点

首先将粉碎的样品过 60 目筛, 避免因研磨不完全造成燃烧的差异。其次, 将样品等量分为 3 组, 每组随机利用电子天平称量 1 g, 编号后作为测定的样品。采用 DW-2 点着温度测定仪, 采取逐步加温的方法, 在每个预定的温度依次对 3 个样品进行燃烧性能的测试, 当 3 个样品中至少有 2 个出现 5 s 及以上的火焰时, 认为样品能够在该温度下燃烧, 该温度即为样品的燃点; 反之, 则以 10℃ 为梯度逐渐升高温度, 直至出现前面所述的燃烧条件为止。

1.3.2 燃烧性测定 首先将样品烘至恒质量, 取 5 g 样品放在边长为 100 mm, 孔隙为 2 mm × 2 mm

的网格铁片的自制的燃烧床上, 然后将其放置在最高功率为 1 000 W 的实验电炉上, 测定时先将铁网片用电炉调至最高功率加热至稳定的温度, 直至铁网片发红起放入试样样品在铁网片的中间位置, 自放入样品时开始用秒表计时, 观测火焰高度和燃烧时间, 重复 3~5 次, 最终确定火烧强度。

1.4 数据处理

1.4.1 燃烧指标降维及特征因子和树种理化特性相关性检验 对 10 个参试树种的 15 个抗燃性、燃烧性指标, 进行因子分析、综合降维处理, 提出能反映树种抗燃性、燃烧性的综合性指标, 且该指标的赋分具有较好的合理性。结合因子分析的赋分值, 依据树种的理化性质, 采用 Pearson 指数和偏相关分析进行处理, 拟找出最能反应植物防火性的理化性质。

1.4.2 树种防火性能 基于因子分析最大方差法标准赋分法赋分后, 利用公式 (1) 从各个树种的抗燃性和燃烧性两方面计算植物的综合防火性能。

$$W = \lambda U \quad (1)$$

式中, W 为综合得分矩阵, λ 为各因子得分的权重系数矩阵, U 为各因子得分矩阵。

通常来说燃烧试验最能直观的反应树种的防火性能, 因此, 其排序结果代表着物种的表征防火性能。而实际试验中, 由于人为测量燃烧试验中带来的不可避免的误差, 以及森林火灾中错综复杂的实际情况, 树种自身的理化性质也对其防火性带来很大影响。本试验采取基于燃烧试验和基于综合值的两种排名。为了量化树种基于自身的理化性质的综合值排序位置与基于燃烧性试验的排序位置的差异, 采用欧氏距离空间, 用公式 (2) 计算出量化差值 Δ 。

$$\Delta = \sum_{i=1}^n |x_i - x_j| \quad (2)$$

式中, x_i 代表树种基于自身的理化性质的综合值排序, x_j 代表树种基于燃烧性试验的排序。

在随机的情况下, 量化差值越大, 说明两种排序位置差异越大, 当两种排序的结果差异极端不相似时, 同一物种在两种排序体系下的排序差异最大, 这时的排序差异是所有物种极端不相似情况下的求和的绝对差值。

$$\sum_{i=1}^n n = n \times n \quad (3)$$

为更加清晰的判断两体系的相似程度, 采用两体系实际的绝对差值之和与总体的比值 S 来检对树

种防火性能的指示性。当基于自身理化性质的综合值排序和基于燃烧性试验排序一致时, 两个体系的相似度比值为 0, 而当所有树种位置都相同时, 相似度比值为 1。

$$S = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n |x_i - x_j|}{\sum_{i=1}^n n} \quad (4)$$

式中, n 为参与排序的树种的个数, S 则为相似度。

2 结果与分析

2.1 抗燃性因子

树种在抗燃性、耐火性及防火性能存在差异是由于树种的理化性质和燃烧性不同^[20], 通过因子分析, 将 10 个树种各个部位 (树枝、树皮和树叶) 的燃点和含水率可以归成两个互相独立的公因子, 在满足 KMO 和巴特利特检验的要求的前提下, 累积方差贡献率 79.97% (见表 2), 经过超过 25 次的正交旋转后, 各因子的载荷值趋向于两极分化 (见表 3), 第一公因子对各个部位的燃点和树叶的含水率具有较大的载荷系数, 可解释为抗火性因子; 第二公因子对各个部位的含水率具有较大的载荷系数, 可解释为含水率因子; 由分析结果建立因子分析的标准得分系数矩阵 (见表 3), 以各因子方差贡献率占公共因子方差贡献率的比重进行加权汇总, 建立得分函数:

$$f_1 = 0.149x_1 - 0.120x_2 - 0.003x_3 + 0.296x_4 + 0.321x_5 + 0.331x_6;$$

$$f_2 = 0.264x_1 + 0.555x_2 + 0.447x_3 + 0.006x_4 - 0.064x_5 - 0.081x_6;$$

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/%	累积贡献率 Cumulative variance/%
1	3.156	52.598	52.598
2	1.642	27.372	79.97

再以旋转后的各公共因子的贡献率作为权重, 把 f_1 和 f_2 代入 f_a , 得

$f_a = (52.598f_1 + 27.372f_2)/79.97$, 得到抗燃性因子 f_a 的综合得分 (表 3)。

2.2 评价指标权重

2.2.1 燃烧表征因子 由因子分析, 将树叶, 树枝和树皮的燃烧时间和燃烧强度归为 2 个用来描述植

表3 树种抗燃性公因子矩阵

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

变量 Variable	公共因子 Common factor		各因子得分信息 Factor score	
	1	2	1	2
树枝燃点 Branch ignition point	0.979	-0.014	0.331	-0.081
树皮燃点 Bark ignition point	0.955	0.013	0.321	-0.064
树叶燃点 Leaves ignition point	0.906	0.124	0.296	0.006
树叶含水率 Leaf moisture content	0.556	0.519	0.149	0.264
树皮含水率 bark moisture content	-0.151	0.925	-0.120	0.555
树枝含水率 branches moisture content	0.162	0.780	-0.003	0.447

物燃烧实验中的植物燃烧现象的公因子, 两公因子累积方差贡献率为 79.739% (表 4), 建立公因子赋分函数, 建立树种燃烧表征公因子矩阵 (表 5)。

$$f_3 = 0.273x_1 + 0.367x_2 + 0.356x_3 + 0.268x_4 - 0.130x_5 - 0.080x_6$$

$$f_4 = 0.015x_1 + 0.139x_2 + 0.224x_3 + 0.673x_4 + 0.287x_5 + 0.301x_6$$

$$f_{b1} = (60.102f_3 + 19.367f_4) / 79.739$$

表4 燃烧表征因子提取后的总方差分解

Table 4 Variance decomposition following extracting flammability factors

公共因子 Common factor	特征根 Characteristic roots	方差贡献率 Variance/%	累积贡献率 Cumulative variance/%
1	3.606	60.102	60.102
2	1.178	19.637	79.739

表5 树种燃烧表征公因子矩阵

Table 5 Common factors matrix and extrinsic factor of tree species combustion

变量 Variable	公共因子 Common factor		各因子得分信息 Factor score	
	1	2	1	2
树皮燃烧时间 Bark burning time	0.934	-0.141	0.367	0.139
树枝燃烧时间 Branch burning time	0.811	0.026	0.356	0.224
树叶燃烧时间 Leaf burning time	0.791	-0.268	-0.273	0.015
树皮火烧强度 Bark burning intensity	-0.691	0.665	-0.130	0.287
树叶火烧强度 Leaf burning intensity	0.065	0.945	0.268	0.673
树枝火烧强度 Branch burning intensity	-0.560	0.637	-0.080	0.301

2.2.2 内在燃烧性因子 经因子分析, 将树叶, 树枝和树皮的热值归为一个描述的公因子 f_{b2} , 将得分系数标准化后 (表 6), 得到系数 0.33, 0.35, 0.32, 再代入原始数据进行计算 ($f_{b2} = 0.33x_1 + 0.35x_2 + 0.32x_3$), 得到燃烧内在因子 f_{b2} 。

表6 树种内在燃烧因子矩阵

Table 6 Common factors matrix and internal factor of tree species combustion

变量 Variable	公共因子 Common factor	各因子得分信息 Factor score
树皮热值 Bark calorific value/ ($\text{kJ}\cdot\text{g}^{-1}$)	0.380	0.33
树叶热值 Leaves calorific value/ ($\text{kJ}\cdot\text{g}^{-1}$)	0.409	0.35
树枝热值 Branch calorific value/ ($\text{kJ}\cdot\text{g}^{-1}$)	0.367	0.32

2.3 理化性质与防火特性的相关性

为进一步分析树种的理化性质对树种的抗火性的指示作用, 对 10 个树种的 9 个理化性质指标以及根据实际测定的指标所模拟的抗燃性因子 f_a , 燃烧表征因子 f_{b1} 和燃烧内在因子 f_{b2} 进行 Pearson 相关分析 (表 7), 可以看出内在燃烧因子 f_{b2} 与树叶含水率、树枝燃点和树皮燃点间存在显著的负相关关系 ($P < 0.05$), 而燃烧表征因子 f_{b1} (燃烧强度, 燃烧时间) 不与任何理化性质 (含水率、热值、燃点) 以及其他因子有显著的相关性, 表明其是一个由许多因素共同决定的因子。抗燃性因子 f_a (含水率, 燃点) 与树叶热值和燃烧内在因子 f_{b2} 是显著负相关的 ($P < 0.05$)。值得注意的是, 抗燃性因子 f_a 只与树皮含水率和树枝含水率呈弱相

表 7 10 个树种的 9 个理化性质指标与防火因子间的 Pearson 相关系数

Table 7 Pearson correlation coefficients between physicochemical properties and fire prevention factors for 10 tree species

项目 Items	LMC	LAV	LIP	BMC1	BAV1	BIP1	BMC2	BAV2	BIP2	f_{b2}	f_{b1}	f_a
LMC	1											
LAV	-0.585	1										
LIP	0.535	-0.384	1									
BMC1	0.388	0.017	0.034	1								
BAV1	-0.693*	0.703*	-0.350	-0.105	1							
BIP1	0.456	-0.711*	0.786**	-0.128	-0.506	1						
BMC2	0.227	-0.043	0.174	0.548	0.087	0.226	1					
BAV2	-0.568	0.649*	-0.479	-0.021	0.496	-0.570	-0.009	1				
BIP2	0.450	-0.690*	0.853**	-0.170	-0.487	0.961**	0.221	-0.576	1			
f_{b2}	-0.706*	0.935**	-0.454	-0.038	0.860**	-0.698*	0.009	0.784**	-0.682*	1		
f_{b1}	-0.388	0.154	-0.298	-0.137	-0.024	0.022	-0.252	0.049	-0.146	0.080	1	
f_a	0.715*	-0.656*	0.888**	0.189	-0.552	0.901**	0.408	-0.600	0.909**	-0.697*	-0.245	1

注: *. 在置信度 (双侧) 为 0.05 时, 相关性是显著的。**. 在置信度 (双侧) 为 0.01 时, 相关性是显著的; LMC: 树叶含水率Leaves moisture content; LAV: 树叶热值Leaves calorific value; LIP: 树叶燃点Leaves ignition; BMC1: 树皮含水率Bark moisture content; BAV1: 树皮热值 Bark calorific value; BIP1: 树皮燃点Bark ignition; BMC2: 树枝含水率Branch moisture content; BAV2: 树枝热值 Branch calorific value; BIP2: 树枝燃点Branch ignition.

关的关系。

实际试验中, 为了有效的筛选树种的防火指标, 同时尽可能减少理化性质指标的测定。在前述的相关分析中, 燃烧表征因子 f_{b2} 和树叶含水率, 树皮燃点以及树枝燃点呈显著的负相关关系, 能最好的反映燃烧表征因子 f_{b2} ; 而抗燃性因子 f_a 又和由树种的树叶、树皮、树枝的热值所组成的燃烧表征因子 f_{b2} 以及其中的树叶热值有显著的负相关关系, 为研究这些理化性质指标与因子在反映树种燃烧特性上的冗余, 采用控制变量的偏相关分析方法 (表 8)。

表 8 Pearson 相关系数中冗余信息的偏相关系数

Table 8 Partial correlation coefficients among redundant information of Pearson correlation coefficients

项目 Items	理化性质指标 Functional traits	控制变量 Control variable	偏相关系数 Partial correlation coefficients	P
f_{b2}	LMC	BIP1、BIP2	-0.608	0.110
	BIP1	LMC、BIP2	-0.194	0.645
	BIP2	LMC、BIP1	-0.033	0.938
f_a	LAV	f_{b2}	-0.019	0.961
	f_{b2}	LAV	-0.311	0.416

注: LMC: 树叶含水率Leaves moisture content; LAV: 树叶热值Leaves calorific value; BIP1: 树叶燃点Leaves ignition; BIP2: 树枝燃点Branch ignition.

从表 8 可以看出, 当控制变量为树皮燃点和树枝燃点时, 树叶含水率和燃烧表征因子 f_{b2} 相关度为 -0.608, 显著高于其他因子, 表明树叶含水率对燃烧表征因子 f_{b2} 的反向指示性最好。在控制树叶热值作为控制变量后, 抗燃性因子 f_a 与燃烧表征因子 f_{b2} 具有较高的偏相关性, 为 -0.311, 表明理化因子相互间的制约很明显, 而燃烧表征因子 f_{b2} 对单一理化性质的偏相关性较小。

2.4 树种防火性能

因子分析过程中, 树种的防火性能是树种含水率、燃点、热值、燃烧强度和燃烧时间等因素共同决定的, 因此在评价体系中防火性能综合值越高, 则该树种的防火性能越好。而在实际试验中, 燃烧试验中的燃烧时间和燃烧强度最能直接反映出树种的抗火性能, 燃烧试验综合值越高代表该树种抗火性能越差。对于反映树种抗火性的燃点及含水率 2 个理化指标, 其值越大, 树种的抗火性能越强。同理, 根据相关分析的结果 (表 7, 表 8), 燃烧时间和燃烧强度可表征树种的燃烧性能, 而热值可指示树种的燃烧性。因此, 对抗燃性因子 f_a 及树叶含水率进行正向标准化, 将 f_{b1} 表征燃烧因子及 f_{b2} 内在燃烧因子进行负向标准化。

数据标准化后, 根据燃烧试验和理化指标对树种防火性能的重要程度, 假设燃烧性和抗火性对树

种防火性能的贡献相同（等于 0.5）^[12]，得出树种的防火综合值排名。燃烧时间和燃烧强度对树种防火性的指示性能相同，将权重各设为 0.5，根据

公式（2）的计算结果，物种的分别基于燃烧试验和基于综合值的树种防火性能综合值排序如表 9 所示。

表 9 分别基于燃烧试验和基于综合值的树种防火性能综合值排序

Table 9 Species order for fire prevention ability based on each of burning experiment and physicochemical properties

树种 Species	燃烧试验综合值 Burning value of fire prevention	防火性能综合值 Comprehensive value of fire prevention	燃烧试验排序 Burning based-order	综合值排序 Comprehensive value sorting	绝对几何差值 Absolute differences
紫丁香 <i>Syringa oblata</i>	84.8	95.86	6	6	0
砂地柏 <i>Sabina vulgaris</i>	63.44	126.98	8	2	6
榆叶梅 <i>Amygdalus triloba</i>	96.73	123.88	1	3	2
山杏 <i>Armeniaca sibirica</i>	55.79	65.01	9	9	0
青海云杉 <i>Picea crassifolia</i>	90.71	127.69	4	1	3
四翅滨藜 <i>Atriplex canescens</i>	51.51	42.77	10	10	0
柠条 <i>Caragana korshinskii</i>	88.17	86.31	5	7	2
黄刺玫 <i>Rosa xanthina</i>	68.39	82.6	7	8	1
沙枣 <i>Elaeagnus angustifolia</i>	92.38	98.69	3	5	2
沙棘 <i>Hippophaerha mnoides</i>	92.67	123.87	2	4	2

本试验中基于燃烧试验和基于综合值的两种排名存在差异，为了量化树种的两种排序位置的差异，结合公式（3）和公式（4），得出两体系实际的绝对差值之和与总体的比值 S ，即相似度达到了 64%，说明两种排序间存在一定的差异。研究结果中，除了砂地柏和青海云杉，其余树种的差值在 0~2 之间，其原因可能是燃烧试验中树种取样不均匀造成的，从而导致了两种排序在位置上的差异。

3 讨论

树种自身的理化特性及抗燃性能够在一定程度上反映出树种的防火特性。本研究对西宁周边山地的 10 种主要造林树种进行理化性质测定和燃烧试验。认为四翅滨藜是其中防火性能最好的树种、山杏、黄刺玫次之，且所用评价方法体系与李修鹏^[12]、骆文坚^[21]等在评价树种防火性能一致。

本研究中燃烧内在因子 f_{b2} 和树叶含水率存在显著的负相关关系，说明树叶的含水率越低，其越不容易燃烧。这与李修鹏等^[12]研究结果一致。而燃烧表征因子 f_{b1} 不与任何理化性质以及其他因子存在显著的相关性，表明其是一个由众多因素共同决定的因子。在偏相关分析后，树枝燃点和树皮燃点的相关值明显下降，分别为 -0.194 和 -0.033，远

小于树叶含水率的相关系数，说明树种的燃点的高低会影响树种的燃烧性能，但燃点不能衡量树种的燃烧性，燃烧性是树种所含物质的综合体现^[22-23]。

对 10 个树种依权重进行防火性能排序时，采用了分别基于燃烧试验和基于综合值的树种防火性能的两种排序结果，发现两种排序的结果的相似度达到了 64%，说明本研究所测的理化性质指标和燃烧试验均能够反映树种实际的防火性能。比起传统的火烧迹地调查、点火试验、目测判断等的方法所得结果更加准确^[24-25]。但考虑到实际的情况，树种的防火性能跟树种所构成的林分类型、林下地表可燃物生长状态^[13]、林分郁闭程度以及树种自身的生态学特性，如：树冠结构、树皮厚度、叶片特征^[26-27]、干材和构型特征等^[28]均有一定的关联性。它们通过直接或间接地解释环境因子的影响，从而反映出树种的防火性能^[29-31]。本研究中对于树种自身特征在实际环境的抗干扰的指示方面的研究，通过较为常规的实验室手段对树种的自身的防火性能做出理论上的评价，以期为西宁周边地区栽植防火树种提供一种可靠的理论支撑且便于在实际中推广。

4 结论

本研究采用实验室的分析手法，建立了所测

10个树种的综合抗火性评价模型, 得出了10种供试树种的基于不同权重体系下的防火性能的排序(四翅滨藜 > 山杏 > 黄刺玫 > 柠条 > 紫丁香 > 沙枣 > 沙棘 > 榆叶梅 > 砂地柏 > 青海云杉), 本实验结果对西宁及周边区域的树种栽植时防火性能参考具有实际应用和推广意义。

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[J]. 林业科学, 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[J]. Wetlands, 1999, 19(3): 594-606.
- [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[J]. 生态学报, 1994, 14(2): 155-160.
- [4] 邱 扬, 李湛东, 张玉钧, 等. 火干扰对大兴安岭北部原始林下层植物多样性的影响[J]. 生态学报, 2006, 26(9): 2863-2869.
- [5] 周文昌, 牟长城, 刘 夏, 等. 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[J]. 生态学报, 2012, 32(20): 6387-6395.
- [6] 李剑泉, 刘世荣, 李智勇, 等. 全球变暖背景下的森林火灾防控策略探讨[J]. 现代农业科技, 2009, (20): 243-246.
- [7] 孙永明, 魏 立, 刘随存, 等. 生物防火林带有效宽度和结构研究[J]. 西北林学院学报, 2013, 28(5): 139-142.
- [8] 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, (4): 26-32.
- [9] 李 华, 杜 军, 田晓瑞. 黑龙江大兴安岭林区森林草类可燃物潜在能量研究[J]. 火灾科学, 2002, (1): 49-51.
- [10] 胡海清, 鞠 琳. 小兴安岭8个阔叶树种的燃烧性能[J]. 林业科学, 2008, 44(5): 90-95.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 王海晖. 生物防火林带技术的科学基础和发展前景[J]. 林业科学研究, 2015, 28(5): 731-738.
- [14] 高国平, 王忠友, 周志权. 辽东柞木林抗火机理的研究[J]. 林业科学研究, 1998, 11(5): 3-5.
- [15] 张 萍, 周志春, 金国庆, 等. 木荷种源鲜叶抑燃和助燃性化学组分的差异[J]. 林业科学研究, 2005, 18(1): 80-83.
- [16] 郑淑霞, 马玉林, 王占林. 西宁周边山地主要人工林群落土壤团粒分形特征与土壤养分及抗蚀性分析[J]. 东北林业大学学报, 2013, 41(4): 87-90.
- [17] 何永晴, 李凤霞. 近47年环青海湖地区气候变化特征分析[J]. 安徽农业科学, 2011, 39(16): 9902-9904.
- [18] 解国磊, 丁新景, 敬如岩, 等. 春季降雨对鲁东低山丘陵区主要森林类型地表可燃物含水率的影响[J]. 西北林学院学报, 2016, 31(5): 171-177.
- [19] 中国制浆造纸研究院, 四川省造纸产品质量监督检验中心, 国家纸张质量监督检验中心. 造纸原料水分的测定[S]. 2011.
- [20] 金 森, 周 勇. 昆明典型地表死可燃物含水率预测模型的研究[J]. 中南林业科技大学学报, 2014, 34(12): 7-15.
- [21] 骆文坚, 周志春, 冯建民. 浙江省优良生物防火树种的选择和应用[J]. 浙江林业科技, 2006, (3): 54-58.
- [22] 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[J]. 浙江林业科技, 2001, (5): 24-27.
- [23] 张运林, 宋 红, 胡海清. 云南3种乔木防火期内含水率变化及预测模型[J]. 西北林学院学报, 2019, 34(1): 157-162.
- [24] Gilman J W, Ritchie S J, Kashiwagi T, et al. Fire - retardant additives for polymeric materials—I. Char formation from silica gel-potassium carbonate[J]. Fire and Materials, 1997, 21(1): 23-32.
- [25] Hshieh F Y, Beeson H D. Flammability testing of flame - retarded epoxy composites and phenolic composites[J]. Fire and Materials, 1997, 21(1): 41-49.
- [26] Vendramini F, Diaz S, Gurvich D E, et al. Leaf traits as indicators of resource-use strategy in floras with succulent species[J]. New Phytologist, 2002, 154(1): 147-157.
- [27] 李宏伟, 王孝安, 郭 华, 等. 黄土高原子午岭不同森林群落叶功能性状[J]. 生态学杂志, 2012, 31(3): 544-550.
- [28] Poorter L, Bongers F, Sterck F J, et al. Architecture of 53 rain forest tree species differing in adult stature and shade tolerance[J]. Ecology, 2003, 84(3): 602-608.
- [29] Meziane D, Shipley B. Interacting determinants of specific leaf area in 22 herbaceous species: effects of irradiance and nutrient availability[J]. Plant, Cell & Environment, 1999, 22(5): 447-459.
- [30] Wright I J, Reich P B, Westoby M, et al. The worldwide leaf economics spectrum[J]. Nature, 2004, 428(6985): 821-827.
- [31] Reich P B, Wright I J, Cavender-Bares J, et al. The evolution of plant functional variation: traits, spectra, and strategies[J]. International Journal of Plant Sciences, 2003, 164(S3): S143-S164.

Fire Performance Evaluation of Ten Main Afforestation Species in Mountainous Areas Around Xining, Qinghai Province

LI Hai-jia^{1,2,3}, ZHENG Shu-xia^{1,2}, SHAN Xiao-xiao^{1,2}, MA Yu-lin^{1,2}, SONG Zheng^{1,2}, REN Fei³

(1. Qinghai Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Qinghai University, Xining 810016, Qinghai, China; 2. Qinghai Plateau Key Laboratory of Tree Genetics and Breeding, Xining 810016, Qinghai, China; 3. State Key Laboratory of Plateau Ecology and Agriculture, Qinghai University, Xining 810016, Qinghai, China)

Abstract: [Objective] To study the physicochemical properties and combustion characteristics of common tree species in Qinghai, and to evaluate the fire resistance of local tree species, so as to provide references for the selection of fire-resistant tree species in Qinghai. [Method] The fire-resistance indexes of 10 tree species were divided into fire-resistance factor f_a and combustion performance factor f_b (including the extrinsic factor f_{b1} and the intrinsic factor f_{b2}) by factor analysis. Through Pearson correlation analysis and partial correlation analysis, the relationship between the 9 physicochemical properties of the 10 tree species and the fire prevention factors was obtained. Finally, the fire-resistant performance of the 10 tree species was ranked by comprehensive analysis. [Result] (1) There was a significant negative correlation between f_{b2} and the moisture content of leaves, between the burning point of bark and branches, and between f_a , f_{b2} and the calorific value of leaves. (2) The results of partial correlation analysis showed that the moisture content of leaves had a significant negative correlation with f_{b2} , and the f_{b2} had a significant negative correlation with f_a . (3) The ranking similarity of fire performance of tree species based on the comprehensive values of combustion test and fire performance was 64%. [Conclusion] The comprehensive fire-resistance evaluation model of the 10 tree species is established, and the order of fire-resistance is obtained based on different weight systems as *Atriplex canescens* > *Armeniaca sibirica* > *Rosa xanthina* > *Caragana korshinskii* > *Syringa oblata* Lindl. > *Elaeagnus angustifolia* > *Hippophaerha mnoides* > *Amygdalus triloba* > *Sabina vulgaris* > *Picea crassifolia*. The results are of practical application and popularization to the fire-resistance of tree species in Xining and its surrounding areas.

Keywords: physicochemical properties; fire-protection performance; fire-resistant capability; combustibility; species suitable for mountain area afforestation

(责任编辑: 彭南轩)