

# 基于锥热分析的北京地区6种乔、灌木树种燃烧性\*

杜秋洋 白夜 程新

(中国消防救援学院/森林草原火灾风险防控应急管理部重点实验室, 北京 102202)

**摘要** 为比较不同树种抗火性能力强弱, 研究通过锥形量热仪测定北京地区6种常见乔、灌木树种(杨树 *Populus przewalskii*、油松 *Pinus tabulaeformis*、侧柏 *Platycladus orientalis*、国槐 *Styphnolobium japonicum*、沙地柏 *Juniperus sabina*、紫丁香 *Syringa oblata*) 在冬春防火季(3月)的燃烧性, 利用 Excel 2007、SPSS 18.0 和 Origin 2018 等软件, 结合熵权法对影响树种燃烧性的理化性质指标进行分析, 并对各树种燃烧性进行综合评价。结果表明, (1) 树种燃烧相关性由强到弱的指标依次为生烟速率、CO<sub>2</sub> 生成速率、质量损失速率、热释放速率、有效燃烧热、O<sub>2</sub> 消耗速率、CO 生成速率; (2) 与燃烧特性强相关的因素有生烟速率、CO<sub>2</sub> 生成速率、质量损失速率, 在树种选择时优先考虑这3个影响因素; (3) 北京地区6种常见乔、灌木树种的燃烧性由强到弱依次为沙地柏、油松、杨树、国槐、侧柏、紫丁香。在防火树种筛选中可优先选择紫丁香、侧柏, 燃烧性较强的树种为沙地柏和油松。

**关键词** 熵权法; 锥形量热; 燃烧性; 防火树种

**中图分类号**: S762 **文献标志码**: A **文章编号**: 2096-2053 (2025) 02-0116-06

**DOI**: 10.20221/j.cnki.2096-2053.202502016

## Combustibility of Six Tree and Shrubs Species in Beijing Based on Cone Calorimetry Analysis

DU Qiuyang BAI Ye CHENG Xin

(China Fire and Rescue Institute/Key Laboratory of Forest and Grassland Fire Risk Prevention and Emergency Management  
Department, Beijing 102202, China)

**Abstract** To evaluate the fire resistance of different tree species, the flammability of six common tree and shrub species (*Populus przewalskii*, *Pinus tabulaeformis*, *Platycladus orientalis*, *Styphnolobium japonicum*, *Juniperus sabina*, and *Syringa oblata*) during the winter-spring fire-season (March) in Beijing was determined by cone calorimeter. Using Excel 2007, SPSS 18.0, Origin 2018 and other software, combined with the entropy weight method, the physical and chemical properties affecting the flammability of tree species were analyzed, and the flammability of each tree species was comprehensively evaluated. The results showed that: (1) The indexes of tree species combustion correlation from strong to weak were smoke production rate, CO<sub>2</sub> production rate, mass loss rate, heat release rate, effective heat of combustion, O<sub>2</sub> consumption rate, and CO production rate. (2) Smoke production rate, CO<sub>2</sub> production rate, and mass loss rate were strongly related to the combustion characteristics, and these three factors should be given priority in tree species selection. (3) The flammability of six common tree and shrub species in Beijing from strong to weak was *J. sabina*,

\* 基金项目: 中国消防救援学院科研项目 (XFKYB202413)。

第一作者: 杜秋洋 (1991—), 男, 讲师, 主要从事森林防灭火研究。E-mail: 986200300@qq.com

*P. tabulaeformis*, *P. przewalskii*, *S. japonicum*, *P. orientalis*, and *S. oblata*. In the screening of fire-resistant tree species, *S. oblata* and *P. orientalis* can be preferentially selected, and the tree species with strong flammability are *J. sabina* and *P. tabulaeformis*.

**Key words** entropy eightmethod; cone calorimetry; flammability; fireproof tree species

森林火灾对生态环境和经济造成的巨大破坏, 以及对人们生命和财产的威胁, 使得研究树种的燃烧性成为一项重要的课题。树种的燃烧性是指在充分燃烧条件下, 树木的蔓延和燃烧程度, 它反映了树种的理化性质和生态学特性<sup>[1]</sup>。前人在树种燃烧性研究中, 主要集中在生态学和生物学指标上, 缺乏点烧试验, 因而难以反映真实火场环境。同时, 研究大多利用较少数量的指标评价树种的燃烧性, 缺乏全面性<sup>[2-3]</sup>。锥形量热仪热分析方法能够模拟更真实的火灾条件下的真实反映, 实验结果与实际火灾一致性较高, 因此, 本研究采取锥热分析法, 聚焦于北京地区 6 种常见树种包括杨树 *Populus przewalskii*、油松 *Pinus tabulaeformis*、沙地柏 *Juniperus sabina*、侧柏 *Platycladus orientalis*、国槐 *Styphnolobium japonicum* 和紫丁香 *Syringa oblata*, 运用熵权法评价这些树种的抗火性, 为北京地区防火林带建设及防火树种筛选提供参考。

## 1 材料与方 法

### 1.1 材料来源及处理

2024 年 3 月 (北京市森林防火期内) 在北京林业大学实验林场、北京市西山林场以及北京市九龙山林场上采样, 选定生长良好的 4~5 株成熟林杨树、油松、沙地柏、侧柏、国槐、紫丁香, 其中杨树、国槐为乔木阔叶树种, 油松、侧柏为乔木针叶树种, 沙地柏、紫丁香为灌木。采集不同方位 (东、南、西、北) 的最外围的 1 a 生枝条。在实验过程中, 为确保样品的新鲜度, 所有试验样品均采集自当天的小枝, 并在处理后用密封袋密封保存。在 105 °C 条件下烘干 48 h 以上, 研磨至粉末通过 40 目孔筛, 共 18 个实验样品以备锥热实验。

### 1.2 研究方法

1.2.1 锥形量热法 锥形量热仪是一种用于测量材料燃烧时热释放速率的仪器, 其原理是通过氧消耗来测量热释放速率等燃烧参数。本实验采用锥形量热仪 (Ttech-GBT16172) 在 50 kW · m<sup>-2</sup>

工况条件下进行测试。测试的指标有热释放速率 (Heat release rate, HRR)、生烟速率 (Smoke production rate, SPR)、有效燃烧热 (Effective heat of combustion, EHC)、质量损失速率 (Mass loss rate, MLR)、燃烧产生烟气成分等。

1.2.2 熵权法 熵权法是利用信息熵计算出各个指标的权重, 为多指标的综合评价提供依据<sup>[4]</sup>。

(1) 首先, 进行数据标准化, 对各个指标进行无量纲化处理。假设有  $m$  个指标, 每个指标有  $n$  个样本, 形成原始数据矩阵  $X = (x_{ij})_{n \times m}$ :

假设对各指标数据标准化后的值为  $Y_1, Y_2, \dots, Y_{ij}$  则

$$Y_{ij} = \frac{X_{ij} - \min(X_i)}{\max(X_i) - \min(X_i)} \quad (\text{正向指标})$$

$$Y_{ij} = \frac{\min(X_i) - X_{ij}}{\max(X_i) - \min(X_i)} \quad (\text{负向指标})$$

式中  $i = 1, 2, 3, \dots, m; j = 1, 2, 3, \dots, n$ ,  $\max(X_i)$  为第  $i$  个指标最大值,  $\min(X_i)$  第  $i$  个指标最小值。

(2) 求第  $i$  项指标下第  $j$  个样本占该指标的比重, 公式如下:

$$P_{ij} = \frac{Y_{ij}}{\sum_{i=1}^n Y_{ij}}$$

式中,  $i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m$ 。

(3) 根据信息论中信息熵的定义, 计算第  $i$  项指标的信息熵为:

$$E_i = -k \sum_{j=1}^m P_{ij} \times \ln P_{ij}, \quad i = 1, 2, \dots, n$$

$$\text{式中, } k = \frac{1}{\ln n}。$$

(4) 计算第  $i$  项指标权重:

$$w_i = \frac{1 - E_i}{n - \sum E_i}, \quad i = 1, 2, 3, \dots, y$$

式中:  $H_i$  为信息熵值;  $n$  为样本个数。

(5) 计算第  $i$  项指标综合评分:

$$S_i = \sum_{j=1}^n w_i * Y_{ij}$$

1.2.3 统计分析 采用 Excel 2007 输入以上公式和燃烧实验结果进行综合得分计算,利用 Origin 2018 软件作图分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 6种树木燃烧热释放速率的差异

热释放速率是单位时间内材料燃烧放出的热量,它是表征材料燃烧性的最重要指标<sup>[12]</sup>。热释放速率的大小反映了材料在燃烧过程中释放的热量,热释放速率越大说明材料燃烧时放热量越大,也就意味着燃烧过程更加剧烈,形成的火灾危害性也就越大。北京地区6种树木的燃烧热释放速率曲线如图1所示,平均热释放速率结果为杨树  $66.45 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$ 、油松  $69.25 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$ 、沙地柏  $79.36 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$ 、侧柏  $48.17 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$ 、国槐  $53.19 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$ 、紫丁香  $51.23 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$ 。由此可以得出6种树木燃烧热释放速率的排序由大到小依次为沙地柏、油松、杨树、国槐、紫丁香、侧柏。综上所述,在6种树木中,沙地柏具有较高的热释放速率,侧柏具有较低的热释放速率。

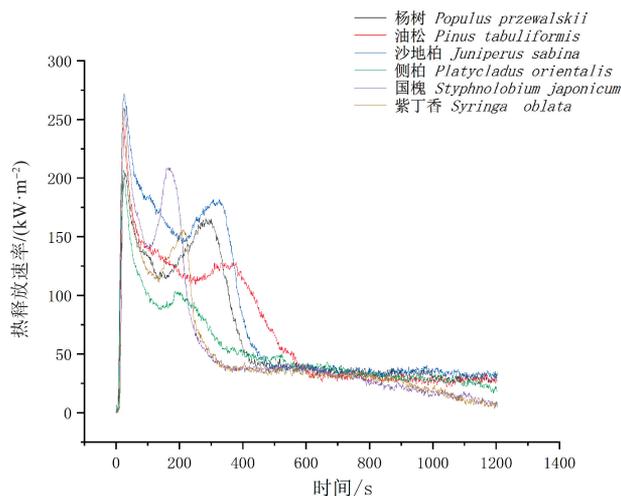


图1 6种树木燃烧热释放速率

Figure 1 Heat release rate of six tree species during combustion

### 2.2 6种树木燃烧生烟速率的差异

生烟速率是指在燃烧过程中产生的烟雾相对于质量损失速率的比例,即消光面积与质量损失速率之比。烟生成速率的大小反映了燃烧过程中产生的烟雾量。如果烟生成速率较大,那么燃烧过程中产生的烟雾就相对较多,对后续的救援工作会产生不利影响。大量的烟雾会影响救援人员的视线,阻碍其进行有效的救援行动,甚至会导致更多的人员伤

亡。北京地区6种树木的生烟速率曲线如图2所示,平均生烟速率结果为杨树  $0.0022 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ 、油松  $0.0049 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ 、沙地柏  $0.0050 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ 、侧柏  $0.0002 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ 、国槐  $0.0028 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ 、紫丁香  $0.0004 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ 。由此可以得出,6种树木燃烧生烟速率的排序为沙地柏、油松、紫丁香、国槐、杨树、侧柏。综上所述,在6种树木中,沙地柏具有较高的生烟速率,侧柏具有较低的生烟速率,与热释放速率相一致。

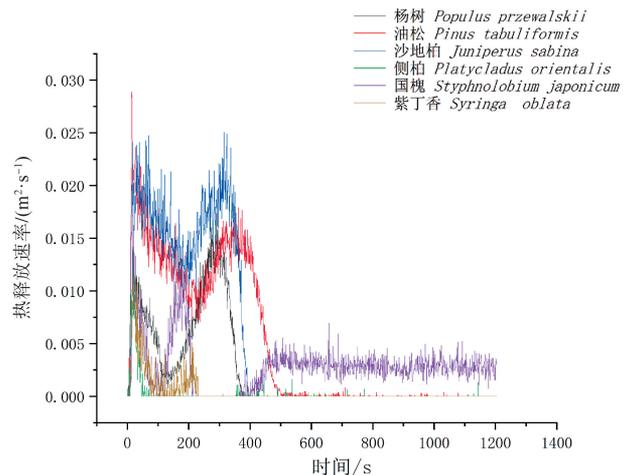


图2 6种树木燃烧生烟速率

Figure 2 Smoke generation rate of six tree species during combustion

### 2.3 6种树木有效燃烧热的差异

有效燃烧热是指在某一时刻热释放速率与质量损失速率之比,它主要反映了挥发性气体在气相火焰中的燃烧程度。有效燃烧热的大小反映了燃烧过程中挥发性气体的燃烧程度,对于分析阻燃机理和燃烧特性具有重要帮助。有效燃烧热较大表示材料燃烧时所释放的热量相对较多,说明燃烧过程更加充分和剧烈。如果材料的有效燃烧热较大,那么其燃烧过程将更加剧烈,释放的热量也更多,这可能导致火势蔓延更快,造成更严重的火灾危害。北京地区6种树木的有效燃烧热曲线如图3所示,实验结果为杨树  $28548.19 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、油松  $29605.12 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、沙地柏  $33269.50 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、侧柏  $31532.81 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、国槐  $27352.12 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、紫丁香  $26127.81 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。由此可以得出6种树木有效燃烧热的大小排序为沙地柏、侧柏、油松、杨树、国槐、紫丁香。综上所述,在本次研究的6种树木中,沙地柏有效燃烧热最高,紫丁香最低。

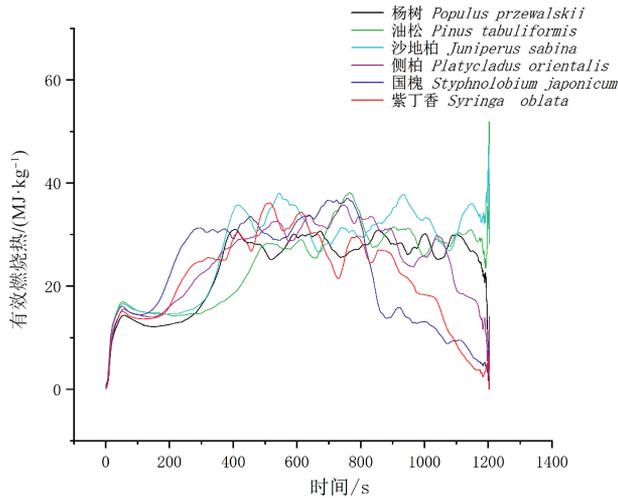


图 3 6 种树木有效燃烧热

Figure 3 Effective combustion heat of six tree species

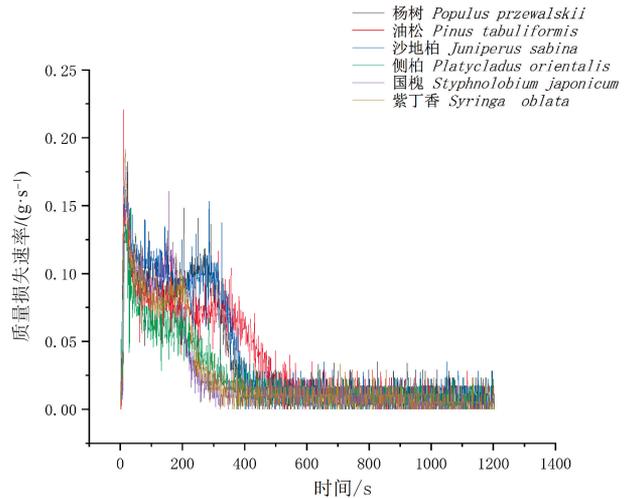


图 4 6 种树木燃烧质量损失率

Figure 4 Mass loss rate of six tree species during combustion

## 2.4 6 种树木质量损失速率的差异

质量损失速率指的是燃烧样品在燃烧过程中质量随时间的变化率，它主要反映了材料在一定火强度下的热裂解、挥发以及燃烧程度。质量损失速率的大小直接反映了材料的燃烧程度，也就是燃烧的充分程度。简单来说，如果质量损失速率越大，那么在相同的燃烧条件下，其燃烧过程就会更加充分和剧烈。北京地区 6 种树木的质量损失率曲线如图 4 所示，结果为杨树  $0.0357 \text{ g} \cdot \text{s}^{-1}$ 、油松  $0.0353 \text{ g} \cdot \text{s}^{-1}$ 、沙地柏  $0.0381 \text{ g} \cdot \text{s}^{-1}$ 、侧柏  $0.0211 \text{ g} \cdot \text{s}^{-1}$ 、国槐  $0.0239 \text{ g} \cdot \text{s}^{-1}$ 、紫丁香  $0.0251 \text{ g} \cdot \text{s}^{-1}$ 。由此可以得出 6 种树木质量损失率的大小排序为沙地柏、杨树、油松、紫丁香、国槐、侧柏。综上所述，在本次研究的 6 种树木中，沙地柏具有较高的质量损失率，侧柏具有较低的质量损失率。

## 2.5 6 种树木燃烧气体的差异

**2.5.1 CO 生成速率** CO 是燃烧不充分的表征，CO 释放的越多证明该树种在燃烧时并不能充分燃烧，该树种燃烧特性较差，抗火性较好。北京地区 6 种树木的 CO 生成速率曲线如图 5 所示，结果为杨树  $0.0122\%$ 、油松  $0.0153\%$ 、沙地柏  $0.0256\%$ 、侧柏  $0.0205\%$ 、国槐  $0.0161\%$ 、紫丁香  $0.0193\%$ 。由此可以得出 6 种树木 CO 释放速率的大小排序为沙地柏、侧柏、紫丁香、国槐、油松、杨树。综上所述，在 6 种树木中，沙地柏释放较多一氧化碳，杨树释放相对较少。

**2.5.2 CO<sub>2</sub> 生成速率** CO<sub>2</sub> 的排放已经成为全球

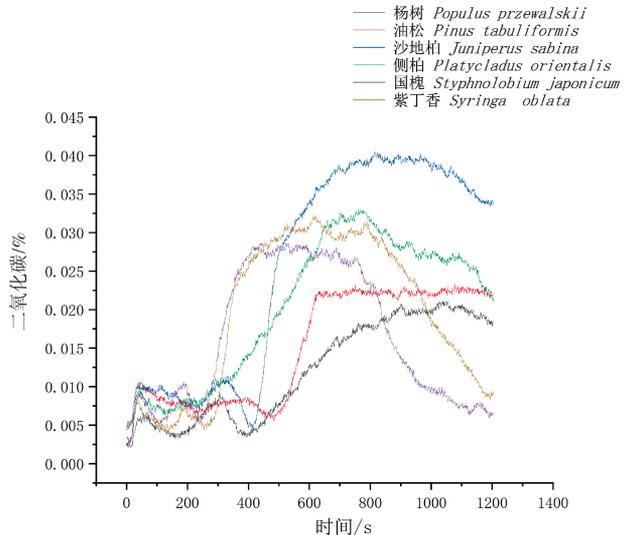


图 5 6 种树木燃烧 CO 生成速率

Figure 5 CO production rate of six tree species during combustion

变暖的一个不容忽视的因素。北京地区 6 种树木的 CO<sub>2</sub> 释放速率曲线如图 6 所示，结果为杨树  $0.1923\%$ 、油松  $0.1866\%$ 、沙地柏  $0.2038\%$ 、侧柏  $0.1346\%$ 、国槐  $0.1432\%$ 、紫丁香  $0.1484\%$ 。由此可以得出 6 种树木 CO<sub>2</sub> 释放速率的大小排序为沙地柏、杨树、油松、紫丁香、国槐、侧柏。综上所述，在本次研究的 6 种树木中，沙地柏具有较高的 CO<sub>2</sub> 释放速率，侧柏具有较低的 CO<sub>2</sub> 释放速率。

**2.5.3 O<sub>2</sub> 消耗速率** 燃烧过程中的耗氧量与燃烧的剧烈程度密切相关。耗氧量越大，燃烧过程中消耗的 O<sub>2</sub> 越多，燃烧特性也就越强。这意味着燃

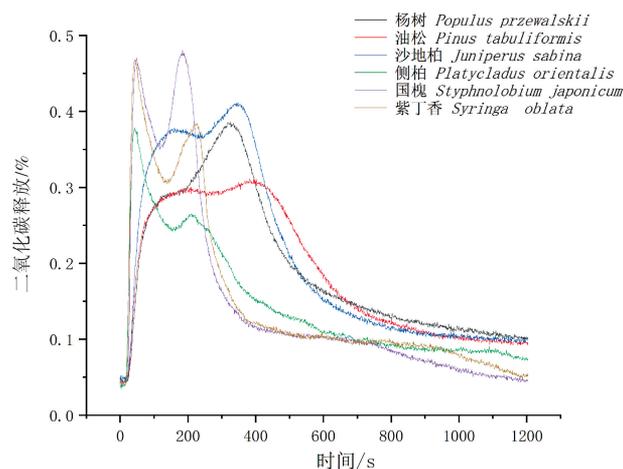


图6 6种树木燃烧CO<sub>2</sub>生成速率

Figure 6 CO<sub>2</sub> production rate of six tree species during combustion

烧会更加剧烈,火势更为猛烈,燃烧速度更快,释放的能量也更大。因此,耗氧量的增加往往会导致火灾的严重程度加剧,对周围环境和人员造成更严重的影响。北京地区6种树木的O<sub>2</sub>消耗速率曲线如图7所示,结果为杨树20.8084%、油松20.8095%、沙地柏20.7791%、侧柏20.8490%、国槐20.8331%、紫丁香20.8350%。由此可以得出6种树木O<sub>2</sub>消耗速率的排序为侧柏、紫丁香、国槐、油松、杨树、沙地柏。综上所述,在本次研究的6种树木中,侧柏具有较高的火灾危害性,沙地柏具有较低的火灾危害性。

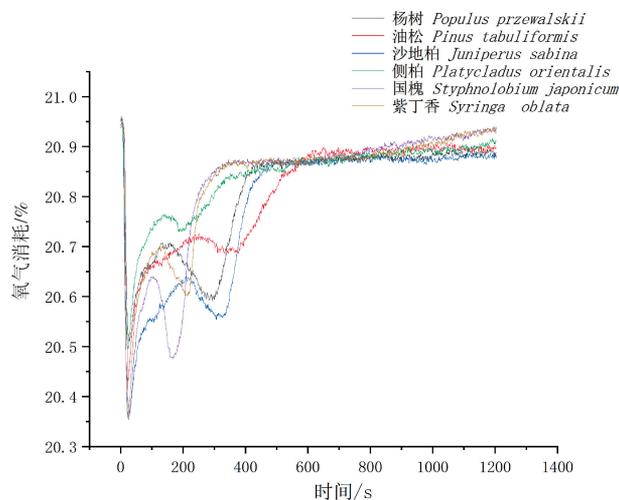


图7 6种树木燃烧O<sub>2</sub>消耗速率

Figure 7 O<sub>2</sub> consumption rate of six tree species during combustion

## 2.6 6种树木燃烧性的综合评价

通过熵权法对6种树木的燃烧性进行评估,综

合考虑了质量损失速率、生烟速率、热释放速率、有效燃烧热、一氧化碳、二氧化碳生成和氧气消耗这7个评价指标。经过计算,得出了每个维度的权重以及各树种在这些维度上的得分。根据得分结果,确定各指标在燃烧性中的重要性排序,并比较各树种在燃烧特性上的表现。通过熵权法计算得出相应得分为热释放速率0.4498、有效燃烧热值0.3785、生烟速率0.5064、质量损失速率0.4676、O<sub>2</sub>消耗量0.3374、CO生成速率0.3283、CO<sub>2</sub>生成速率0.4794。由此可以得出各指标在燃烧性中的重要性大小排序为生烟速率、CO<sub>2</sub>生成速率、质量损失速率、热释放速率、有效燃烧热值、O<sub>2</sub>消耗速率、CO生成速率。通过熵权法计算得出各树种相应得分为杨树0.6287、油松0.7222、沙地柏0.8025、侧柏0.2397、国槐0.3356、紫丁香0.2188。

由此可以得出燃烧性综合性排序由大到小为沙地柏、油松、杨树、国槐、侧柏、紫丁香。油松的评分明显高于侧柏,表明油松与侧柏相比燃烧性较强。因此,根据结论在选择针叶类防火树种时,侧柏比油松更为合适。熵权法计算结果显示,沙地柏的评分为0.8025,而紫丁香的评分为0.2188,沙地柏的评分明显高于紫丁香,表明沙地柏与紫丁香相比燃烧性更强。

## 3 结论与讨论

本文主要研究了树种的燃烧特性对森林火灾防控的影响,以及如何筛选合适的防火树种。通过使用锥形量热仪对北京地区6种常见树种小枝的燃烧性进行测试,并采用熵权法进行综合评价。通过熵权法,得出了树种的防火能力排序由大到小依次为紫丁香、侧柏、国槐、杨树、油松、沙地柏。防火能力较强的紫丁香和侧柏可考虑作为防火区域的优势树种。

本研究为森林防火管理提供了重要的参考,强调了不同树种的防火能力差异。这些发现有助于指导森林管理部门和环境保护机构制定更有效的防火政策和措施,从而提高森林防火能力,保护生态环境的安全和健康。该研究的发现为森林防火建设提供了实质性的建议,特别是在对火灾防护要求较高的区域,如加油站、居住区建筑附近的林区和城市防火树种的选择方面。紫丁香和侧柏被确认为抗火性能较好的树种,因此在防火

建设中应该优先考虑选用这些树种。抗火性能相对较差的油松和沙地柏则需要加强管理, 包括及时进行疏枝修剪和凋落物的清理等措施。这项研究凸显了不同树种之间抗火性能的差异。但本研究仅分析了北京地区的 6 种常见树种燃烧特性, 后期可以考虑涵盖更多种类的树种, 增加样本量, 甚至扩展到不同地区进行对比研究, 以便在森林防火建设中选择最合适的树种, 提高防火效果, 保护人们的生命财产安全。同时, 今后研究中可以考虑探讨这些树种生长特性在实际防火工作中的应用效果, 如适宜在何种地形、土壤种植、种植密度、防火带设置等, 以提供更实际具体的指导建议。

### 参考文献

- [1] 宋林姝, 王峥, 刘燕, 等. 北京常见灌木燃烧特性及抗火性评价[J]. 生态学杂志, 2023, 42(5): 1056-1064.
- [2] 孟雪松, 欧阳志云, 崔国发, 等. 北京城市生态系统植物种类构成及其分布特征[J]. 生态学报, 2004, 24(10): 2200-2206.
- [3] 郭文霞, 牛树奎, 康东伟, 等. 北京地区主要乔木树种的抗火性分析[J]. 北京林业大学学报, 2010, 32(3): 84-89.
- [4] 黎书会, 吴艳, 孙志东, 等. 基于熵权法的 6 种树种树皮抗火性研究[J]. 林草资源研究, 2024(1): 41-47.
- [5] 李炳怡, 刘冠宏, 舒立福. 北京门头沟区主要林分类型地表火行为模拟研究[J]. 北京林业大学学报, 2022, 44(6): 96-105.
- [6] 王小雪. 黑龙江省主要草本可燃物燃烧性研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2012.
- [7] 付芝红, 呼延佼奇, 李锋, 等. 城市不同地表覆盖类型对土壤呼吸的影响[J]. 生态学报, 2013, 33(18): 5500-5508.
- [8] 张思玉. 论林火的三重属性[J]. 科技信息(学术研究), 2007(20): 15-16.
- [9] 王晓丽. 北京山区森林燃烧性研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2010.
- [10] 牟韵洁, 高德民, 龙腾腾, 等. 张家口崇礼区主要植物叶片理化性质及燃烧性分析[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2024, 48(6): 239-244.
- [11] 钟金, 朱宇颀, 覃方兴, 等. 四川省常见树种防火期凋落物燃烧性分析[J]. 防护林科技, 2024(3): 50-55.
- [12] 闫晶, 宋林姝, 李秉玲, 等. 6 种北京常见草本植物燃烧性分析与评价[J]. 应用生态学报, 2024, 35(2): 363-370.
- [13] 秦乃花, 陈瑞, 吕常笑, 等. 山东省不同林分地表可燃物载量及其燃烧性研究[J]. 西北林学院学报, 2023, 38(5): 176-183.
- [14] 黄冠杰, 梁泽锐, 李大锋. 广州市从化区森林可燃物区域性分布特征[J]. 林业与环境科学, 2024, 40(6): 104-108.
- [15] 魏书精, 罗斯生, 罗碧珍, 等. 气候变化背景下森林火灾发生规律研究[J]. 林业与环境科学, 2020, 36(2): 133-143.
- [16] 严朝东, 林育述, 陈轩阳, 等. 东莞大屏嶂森林火险等级评价与区划[J]. 广东林业科技, 2014, 30(2): 35-40.
- [17] 杜秋洋, 武英达, 刘鹏科. 《森林火灾扑救》课程教学改革的探索[J]. 森林防火, 2024, 42(3): 82-85.
- [18] 何丽娟, 杨芳. 西北五省森林保护和灾害防治分析[J]. 林业与环境科学, 2021, 37(1): 19-24.
- [19] 文斌, 谢献强, 孙萌, 等. 基于加权 Logistic 回归模型的森林火灾预测[J]. 林业与环境科学, 2019, 35(4): 79-83.
- [20] 王振师, 魏书精, 谢继红, 等. 林火燃烧环境对灭火效果的影响研究[J]. 林业与环境科学, 2019, 35(2): 84-88.
- [21] 王璐鹏, 马云, 罗民军, 等. 广东省 10 种典型常绿阔叶林细小可燃物的燃烧特性[J]. 林业与环境科学, 2023, 39(1): 90-95.