

上海市常见26种园林树种燃烧性评价

张德顺, 吴雪, 陈陆琪瑶, 胡立辉, 李科科, 战颖, 姚驰远

(同济大学建筑与城市规划学院, 上海 200092)

摘要: 对上海市常见的26种园林树种的枝条、叶片、树芯进行燃烧实验,测定其含水率、树皮厚度、比叶面积、燃烧热值、燃烧时间与温度变化等14个燃烧性指标,综合评价了各树种的抗火性特征,发现比叶面积指标对树种燃烧性影响较大。通过方差分析,阐述了树种功能性状与燃烧特征之间的相关性,并基于聚类分析将26种园林树木按照其燃烧特征分为防火能力强、中、差3类,确定了上海市应对火灾的园林树种选择的优化链。

关键词: 园林植物;燃烧性;抗火性;树种评价

中图分类号: TU986

文献标志码: A

Combustibility Evaluation of 26 Landscape Tree Species in Shanghai

ZHANG Deshun, WU Xue, CHEN Luqiyao, HU Lihui, LI Keke, ZHAN Ying, YAO Chiyan

(College of Architecture and Urban Planning, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: The combustion experiments of branches, leaves and cores of 26 landscape tree species in Shanghai were conducted. Fourteen combustion indexes including moisture content, bark thickness, specific leaf area, combustion calorific value, combustion time and temperature change were determined, of which the specific leaf area was the most important. The fire resistance characteristics of each tree species were evaluated comprehensively. Based on the analysis of variance, the correlation between the functional traits of tree species and the burning characteristics was elaborated. According to their burning characteristics, twenty-six species of landscape trees were divided into 3 categories: strong, medium, and weak. Then the optimal chain of landscape tree species selection for fire response in Shanghai was determined by cluster analysis at last.

Key words: landscape plant; combustibility; fire resistance; tree species evaluation

城市化进程的加快、气候变化的影响和城市热岛效应的加剧,使得火灾变为城市的主要灾害之一。城市规划、建筑、消防等部门都在不断研究应对火灾的对策。城市绿地作为降低潜在火灾风险和减灾避险的载体,相关研究也要从绿地生态系统和绿色基础设施的角度出发,探索减少灾害风险的技术方法^[1-2]。园林树木是城市绿地生态体系功能服务发挥的主体,针对不同的绿地环境选择合适的树种是提升城市生态安全和绿地健康的根本途径^[3]。不同园林树木的防火性能有差异,为应对城市火灾,择优因地制宜地选择树种是居安思危、未雨绸缪、防患于未然、可持续发展的思路。本文以上海市常见的26种园林树种为研究对象,通过对其含水率、叶面积、树皮厚度、燃烧性指标的差异分析,得出不同树种的燃烧性区别,为城市园林规划应对火灾构建绿化树种的选择提供参考。

1 实验对象与方法

1.1 实验对象

选择26种上海市常见园林树种为研究对象(表1),其中落叶树种18种,常绿树种8种,分为乔木、灌木、针叶树、阔叶树以及不同观赏类型的树木,涵盖了目前风景园林中应用的主要基调树种和骨干树种。

1.2 实验方法

使用量热仪分别对实验树种的枝条、叶片、树芯进行燃烧实验,测定其功能性状指标,即含水率、树

收稿日期: 2021-01-15

基金项目: 国家自然科学基金(31770747, 32071824)

第一作者: 张德顺(1964—),男,教授,博士生导师,农学博士,主要研究方向为园林植物设计与风景园林规划。
E-mail: zds@tongji.edu.cn

通信作者: 姚驰远(1990—),女,理学博士,主要研究方向为城市生态、绿地健康与园林植物应用。

E-mail: cyao@tongji.edu.cn



论文
拓展
介绍

表1 测定树种名录

Tab. 1 List of tree species tested

编号	树种	学名	编号	树种	学名
1	银杏	<i>Ginkgo biloba</i>	14	水杉	<i>Metasequoia glyptostroboides</i>
2	梧桐	<i>Firmiana simplex</i>	15	榉树	<i>Zelkova serrata</i>
3	枫香	<i>Liquidambar formosana</i>	16	鹅掌楸	<i>Liriodendron chinense</i>
4	光皮楸木	<i>Swida wilsoniana</i>	17	白玉兰	<i>Magnolia denudata</i>
5	紫叶李	<i>Prunus cerasifera</i> f. <i>atropurpurea</i>	18	紫薇	<i>Lagerstroemia indica</i>
6	五角枫	<i>Acer pictum</i> subsp. <i>mono</i>	19	龙柏	<i>Sabina chinensis</i> 'Kaizuca'
7	苦楝	<i>Melia azedarach</i>	20	日本冷杉	<i>Abies firma</i>
8	喜树	<i>Camptotheca acuminata</i>	21	女贞	<i>Ligustrum lucidum</i>
9	全缘叶栾树	<i>Koelreuteria bipinnata</i> var. <i>integrifoliola</i>	22	乐昌含笑	<i>Michelia chapensis</i>
10	黄栌	<i>Cotinus coggygia</i>	23	大叶冬青	<i>Ilex latifolia</i>
11	无患子	<i>Sapindus saponaria</i>	24	广玉兰	<i>Magnolia grandiflora</i>
12	乌柏	<i>Triadica sebifera</i>	25	雪松	<i>Cedrus deodara</i>
13	落羽杉	<i>Taxodium distichum</i>	26	香樟	<i>Cinnamomum camphora</i>

皮厚度、比叶面积,以及燃烧性指标,即燃烧热值、燃烧时间、温度变化共14个指标。

实验时间为2018年7月21日至8月1日,平均气温26~32℃,天气晴朗,东南风3~4级。为减少实验误差,每日的采样时间为9:00—11:00,用长枝剪在每种树木冠层四周依次选取生长健康的当年生新鲜枝叶各5~8个,用生长锥取树芯3~5个,分别放入自封袋中,于2 h内带回实验室称重、烘干,以进行燃烧实验。

1.2.1 含水率

将样品装入事先称好的信封中立即称重,样品质量在60 g以上,称重后放到105℃的烘箱内恒湿烘干至恒重,再称其干重 W 及信封的干重,随后将样品装进自封袋中,放入干燥器中干燥,防止吸水。含水率计算公式如下:

$$M = (M_1 - M_2) / M_1 \times 100\% \quad (1)$$

式中: M 为含水率; M_1 为样品鲜重; M_2 为样品干重。

1.2.2 叶面积

取出烘干后的叶片8~10片,放入扫描仪中扫描,借助AutoCAD对叶片轮廓进行描边,从而计算每个叶片的叶面积,最后取平均值。

1.2.3 树皮厚度

选择生长健康,生长环境大致相同的3~5棵树木,用生长锥在实验样本高1.3 m的树干处,垂直方向钻取长度约10 mm,直径为2 mm的树芯,且树皮、形成层、木质部相互连接,无中断,放入自封袋内带回实验室。使用电子游标卡尺对采集样本的树皮部分进行测量并记录每个样本的树皮厚度,取平均值。将测量后的样本及时密封,以备燃烧实验使用。

1.2.4 燃烧性指标

实验室中模拟真实的燃烧环境,采用ZDHW-

10A微机高精度量热仪(热容量为10 169 J),仪器要求实验室温度为25~26℃并保持稳定,测定叶片、枝条、树芯的燃烧特征。

实验前调试量热仪并进行实验条件测试,完成后用电子天平称量1.000 g(误差不超过0.050 g)样品放入干净干燥的坩埚中,固定好点火丝与实验样品后放入氧弹中密封,冲入氧气(纯度为 $\geq 99.999\%$,压力为2.5~3.0 MPa),放入量热仪中,并在操作界面中点击“启动”按钮,约3 min后开始点火,若点火成功,则样品开始燃烧,燃烧完成后记录样品热值、燃烧时间、温度变化;若点火失败则重复之前操作,若3次点火均不成功,则认为该样品属于极不易燃烧类型(例如紫薇)。为减少实验误差,每种样品重复3次。

1.3 数据处理与分析

使用EXCEL 2016对各项指标进行数据初步处理与图表绘制,并使用SPSS 23.0中的一般线性模型进行功能性状指标与树种燃烧性指标之间的方差分析,用系统聚类法对26种树种进行聚类分析。

方差分析与聚类分析所涉及的指标数据均采用极值法进行标准化处理,其中含水量、燃烧时间、燃烧热值、温度变化差异数据均为树种叶片、枝条、树芯3个部位所测数值在极值标准化后的平均数值。

2 结果与分析

2.1 含水率差异性分析

含水率是树木水分含量与干物质的比率,是树木火灾、野火风险评估的关键因素之一^[4],也可指叶片水含量相对于鲜物质的量。两种计算方式都与叶片含水率和叶片干物质含量有关^[5]。不同树种的水

分差异是影响树木燃烧特征的主要因素,树木在燃烧过程中体内水分会吸收大量热能,特别是叶片部分,其占树木水分含量的90%以上,直接影响燃烧时间、火势蔓延速率以及可燃物产生的气体浓度等,尤其是火灾风险和传播速度^[6]。分析比较不同树种的含水率是防火树种研究的重要组成部分,研究表明,树木含水率越低越易引燃,并且蔓延迅速,在一定程度上影响燃烧反应的难易程度,可作为预测、火灾风险评估的指标之一。

落羽杉、鹅掌楸、梧桐、紫叶李和苦楝的叶片含水率最高,黄栌、雪松、香樟、广玉兰、日本冷杉的叶

片含水率最低;紫薇、梧桐、水杉、喜树、大叶冬青的枝条含水率最高,榉树、银杏、龙柏、黄栌、雪松的枝条含水率最低;水杉、乌桕、日本冷杉、鹅掌楸、落羽杉树芯含水率最高,梧桐、银杏、紫薇、光皮槭木、大叶冬青的树芯含水率最低。通过极值标准化法对3种部位平均后,其综合含水量值的排序为水杉、落羽杉、鹅掌楸、乌桕、女贞、喜树、枫香、苦楝、梧桐、香樟、全缘叶栎树、白玉兰、大叶冬青、无患子、乐昌含笑、日本冷杉、紫薇、紫叶李、五角枫、广玉兰、龙柏、雪松、光皮槭木、榉树、银杏、黄栌。26种园林树种各部分含水率变化见图1。

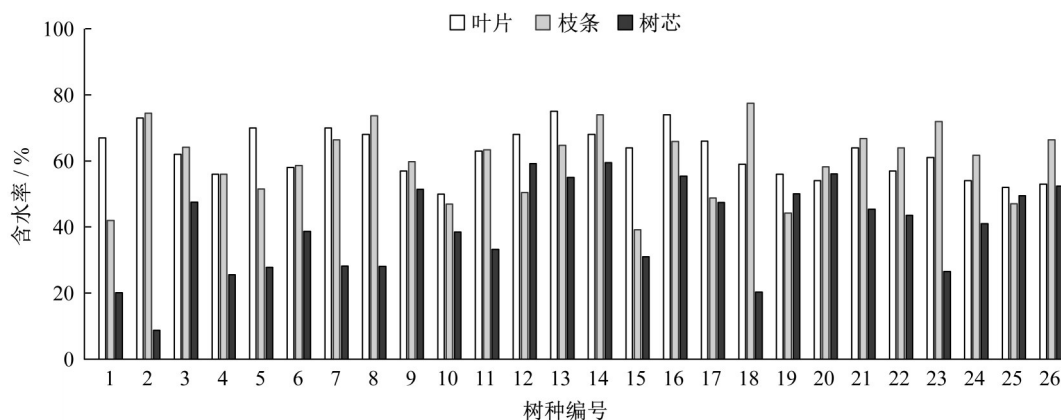


图1 26种园林树种各部分含水率变化

Fig. 1 Moisture content of leaf, twig and core of 26 landscape tree species

树种之间的含水率差异显著,同一树种叶片、枝条、树芯的含水率差异也较显著。这说明含水率与不同树种结构及叶片、枝条、树芯的内部组织有关,结构组成的差异,造成其结合水的能力不同。叶片、枝条、树芯三者的含水率中,叶片与枝条的水分含量较高,其中叶片与枝条的水分差异并不显著,但二者与树芯的水分含量存在较大差异。树木的树干部分燃烧风险最高,防火能力最低,叶片和枝条部分燃烧风险较低,防护能力较好。以往研究表明,叶片含水率高于枝条、树芯,是树木可燃物中最敏感的指标^[7],更是火势蔓延中关键影响因素。

2.2 树皮厚度差异性分析

树皮是茎(老树干)维管形成层以外的所有组织,是树干外围的保护结构,对植物的存活起着重要作用,它在一定程度上可以保护树木的内部组织不受机械损伤和虫害侵蚀^[8],尤其是在火灾中,树皮的热隔离作用可以提高树木的灾后存活率。有研究表明,树木的树皮厚度与树木的防火性成正相关关系,在一定阈值内树木的防火能力随着树皮厚度的增大

而增强。26种乔木中紫叶李、白玉兰、榉树、光皮槭木、黄栌的树皮较薄(图2),树木的防火性较弱;大叶冬青、广玉兰、日本冷杉、梧桐、落羽杉的树皮较厚,树木防火性较强。

2.3 比叶面积差异性分析

比叶面积即叶的单面面积与其干重之比,受叶片厚度、性状、质量、水分含量等因素的影响,综合反应了叶片的形态特征,与树木的生长情况和生境有紧密的联系,是特定研究条件下树木生理生态研究的首选指标^[9]。为了探究直观的形态特征与树木燃烧性的关系、比叶面积对树木的防火性的影响,对实验树木中26种树种的比叶面积进行测定。

经分析,26种树种中光皮槭木、水杉、五角枫、银杏等比叶面积较小(图3),全缘叶栎树、苦楝、广玉兰、白玉兰、梧桐的比叶面积较大。研究表明,比叶面积可以指示树木的阻燃能力,比叶面积较大的树木,难以燃烧,燃烧的反应时间较长。关于比叶面积与树木的燃烧能力的关系,现阶段研究较少,尚无明确结论。

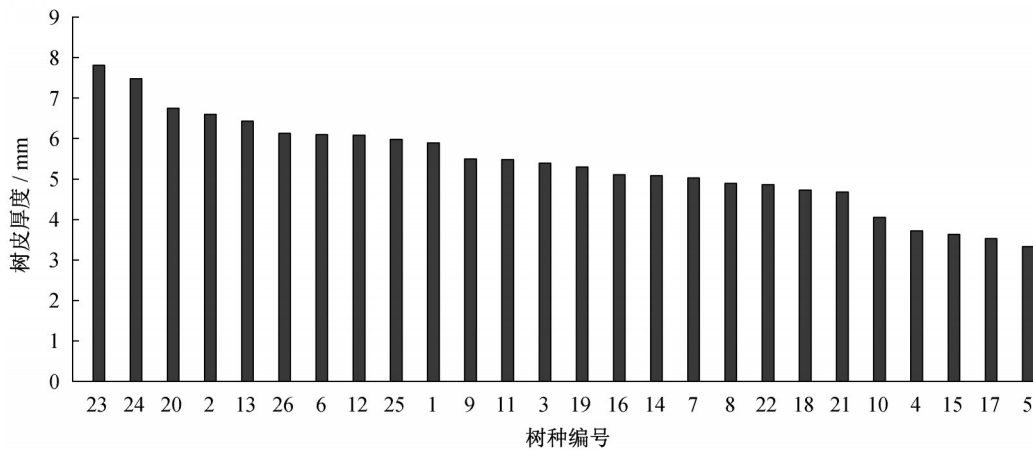


图2 不同树种树皮厚度的比较

Fig. 2 Comparison of bark thickness of different tree species

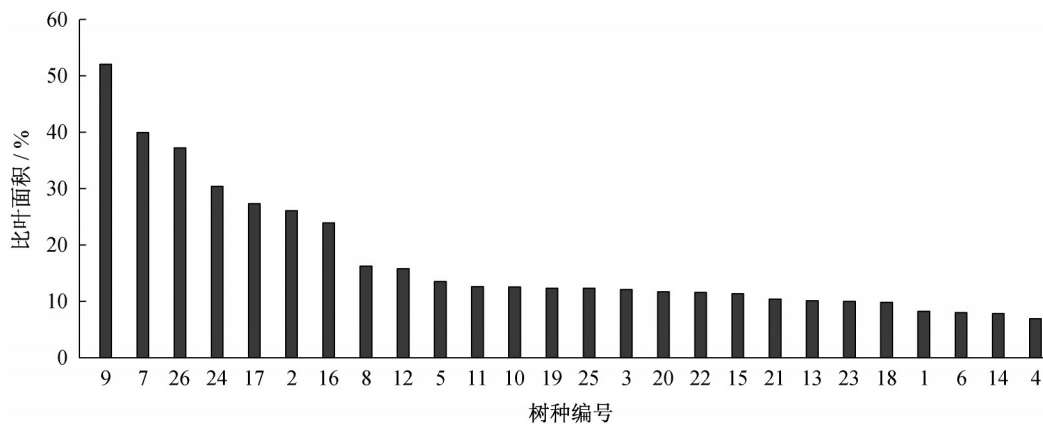


图3 不同树种比叶面积变化

Fig. 3 Comparison of specific leaf area of different tree species

2.4 燃烧时间差异性分析

燃烧分为有焰燃烧和无焰燃烧,有焰燃烧是气体的氧化阶段,并伴有火焰的过程,通过可燃物表面燃烧的挥发物使燃烧环境高达 $450\sim 500\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[9]。燃烧时间是指可燃物从有焰燃烧到火焰熄灭的这段时间^[10]。在同一火环境中,理论上同等质量的可燃物的燃烧时间可以反应可燃物的阻燃能力。树木不同部位的燃烧时间则可以作为树木阻燃能力的评价指标,燃烧时间越长,火势蔓延与传播速率就会减慢,树木的阻燃能力则越强。

不同树种的叶片燃烧时间差异性比较显著(图4),其中紫叶李、黄栌、广玉兰、白玉兰的叶片均未引燃,未进行燃烧反应,燃烧时间、燃烧热值与温度变化均为0,说明以上4种树木的叶片具备较强的防火性;在成功点火的叶片中,水杉、枫香、苦楝、龙柏、大叶冬青、鹅掌楸的燃烧时间较短,同样条件下燃烧反应进行的速度较快,较难控制燃烧环境的温度,不利于火势控制和扑救工作;银杏、女贞、日本冷杉、五角

枫、喜树、紫薇的燃烧时间较长,叶片的阻燃性较强。

枝条的燃烧实验中,喜树、紫薇枝条点火失败,未进行燃烧反应,热值、燃烧时间、温度变化均为0,阻燃性较强,在火灾发生时可有效延长燃烧时间、控制火势蔓延;在点火成功的24种树木中燃烧时间较短的是日本冷杉、枫香、大叶冬青、全缘叶栎树、苦楝等,燃烧时间较长的是紫叶李、黄栌、无患子、乌柏、水杉、榉树、鹅掌楸、香樟等。

与叶片、枝条相比,不同树种间树芯燃烧时间的差异性较低,原因在于树芯中的水分含量较低,纤维素、木质素等阻燃物的含量较高,且燃烧的反应时间较短,导致差异不明显。26种乔木树芯的燃烧时间较短的是龙柏、榉树、落羽杉、大叶冬青、全缘叶栎树、银杏;燃烧时间较长的是紫叶李、无患子、广玉兰、梧桐和香樟。

相关研究表明,树木的树冠属性对树木的防火效果有显著影响^[11-12]。因此比较叶片、枝条、树芯三

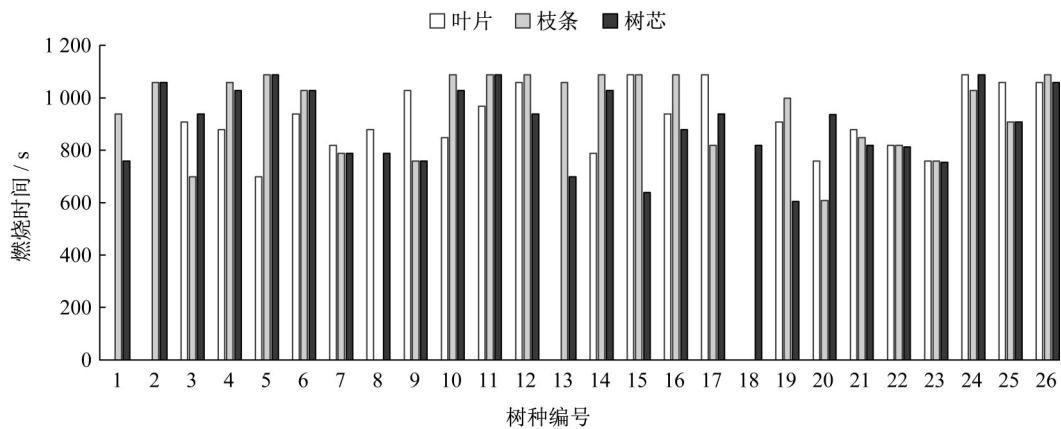


图 4 不同树种燃烧时间对比

Fig. 4 Comparison of burning time of different tree species

者燃烧的时间,枝条因其粗纤维等易燃物质的含量较高,灰分含量较低,所以其燃烧时间明显长于其他二者^[13]。三个部位燃烧时间综合评判,广玉兰、香樟、无患子、五角枫和乌桕具有较强的抗火性。

2.5 燃烧热值差异性分析

热值即单位质量可燃物在 25 °C,压力 110 kPa 条件下完全燃烧时所放出的热量^[14],是影响火行为的主导因素,热值越大,其产生的辐射热越多,整个燃烧环境的升温速度就越快,导致火行为的燃烧强

度不断增大,可加速扩展火势范围以及火势的蔓延。热值是评价可燃物燃烧特征的重要指标。

不同树种叶片的热值差异如图 5 所示。点火成功的树木中紫叶李、鹅掌楸的热值较低,叶片燃烧时放出的热量较少,有利于控制火势蔓延,可以起到一定程度的防火作用;黄桷、香樟、雪松、光皮徠木的热值较高,燃烧过程中会产生较高的热量,使火环境的温度迅速升高,加剧火烧强度。

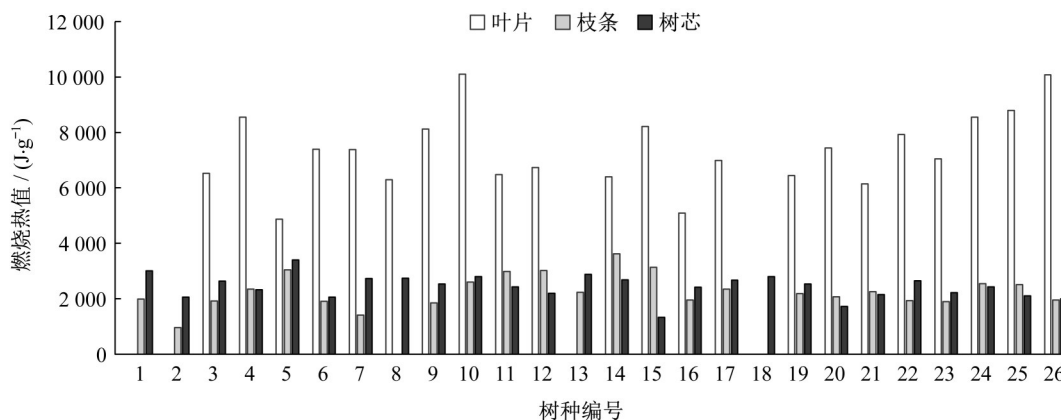


图 5 不同树种燃烧热值比较

Fig. 5 Comparison of combustion calorific values of different species

不同树种枝条的热值差异显著,紫薇、喜树不易引燃,即枝条防火性较强,其余树木中枝条热值较低的是梧桐、苦楝、全缘叶栎树,说明其燃烧过程中放出的热量较少,防火性较强;热值较高的水杉、榉树、紫叶李、乌桕,燃烧过程中放出的热量会加剧火灾强度与灾害损失程度,防火性较弱。

经分析,26 种乔木的燃烧热值中,榉树、日本冷杉、香樟、梧桐的热值较低,放出的热量少,防火效果较强;紫叶李、银杏、落羽杉、黄桷、紫薇的燃烧热值

较高,燃烧过程中放出的热量较多,防火性较差。

不同树种间的热值差异显著,叶片、枝条与树芯的热值差异也较为显著。除紫薇、梧桐等未引燃的样品外,与树芯相比,叶片、枝条的水分含量较高,但是二者的平均燃烧热值也相对较高。原因是叶片与枝条中的单宁酸与树脂含量较高,该化学成分会促进可燃物在燃烧过程中并放出更多热量。其次与枝条与树芯相比,叶片的灰分含量较高^[12],这些都会加剧火烧强度从而成为叶片热值较高的原因。3 个部

分综合评判,梧桐、紫薇、喜树、落羽杉、日本冷杉的热值最低。

2.6 温度变化差异性分析

热辐射作用下燃烧环境的温度与可燃物的内部结构、导热系数有关^[15]。温度的升高侧面反映了可燃物导热系数的大小,导热系数小,热量难以从可燃物的内部传到外部,其表面温度升高的幅度较小,因此燃烧性较弱,防火性较高。由于实际的燃烧温度过高,无法直接测得,本实验以量热仪氧弹筒发热量

引起的外水箱中的温度变化为燃烧性指标。

26种树木叶片的温度变化差异对比中(图6),落羽杉、紫薇、梧桐未点燃,具备较强的防火性,可配置形成防火性能较高的植物群落;其余树种,广玉兰、雪松、苦楝、日本冷杉、乌桕等温度变化较小,对火环境的影响较小;燃烧时间较长的是全缘叶栎树、枫香、龙柏、乐昌含笑、大叶冬青等,导热系数较大,燃烧过程中的热量的传播速度较快,导致环境温度升高,加剧火灾强度。

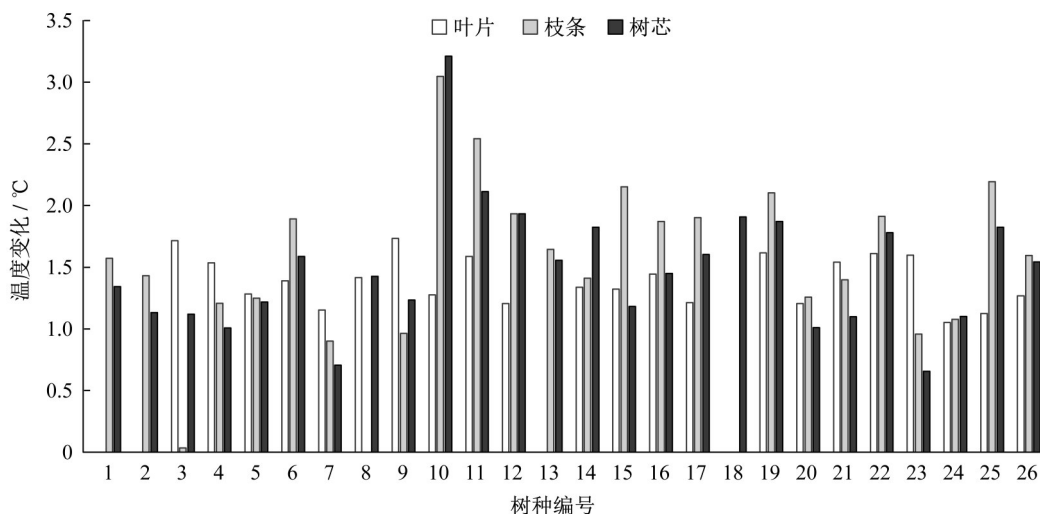


图6 不同树种温度变化对比

Fig. 6 Comparison of temperature changes of different tree species

枝条燃烧实验中,枫香、苦楝、大叶冬青、全缘叶栎树、广玉兰、光皮楝木6种树种枝条的防火性较强,温度变化较小,导热系数较小,热量难以传播,有利于控制火势蔓延;黄栌、无患子、雪松、榉树、龙柏的温度变化较大,导热系数大使得热量迅速传播,加剧火灾强度,防火效果较弱。

与叶片、枝条相比,树干部分的干物质含量较高,易燃性较高。经分析26种乔木中银杏、大叶冬青、苦楝、光皮楝木、日本冷杉的树芯温度变化较小,导热系数较小,火环境的温度升高幅度较小;黄栌、无患子、乌桕、紫薇、龙柏的树芯温度变化较大,热量易传播导致火环境温度升高,易加剧火灾强度,防火性较弱。

综合分析枝条、叶片与树芯的温度变化,发现三者差异较小,紫薇、梧桐、银杏、落羽杉、苦楝综合的温度差值较小。由于实验样品质量较小,燃烧时间有限,可燃物自身放出的热量差异较小,此外氧弹筒中热量传递到外水箱的过程中存在热损耗,因此,不同树种间的温度变化出现趋同的现象。

2.7 方差分析

利用SPSS中一般线性模型,以含水量、树皮厚

度、比叶面积3项功能性状为固定因子,以燃烧时间、燃烧热值、温度变化为因变量进行方差分析,探究各树种功能性状对燃烧特征的影响程度。

方差分析结果表明(表2),树种比叶面积的大小对燃烧时间造成了显著影响($p < 0.05$),树种间含水量的差异对树种燃烧所产生的热值造成了显著影响($p < 0.05$),比叶面积对树种燃烧时对外界环境产生的温度变化造成了极显著的影响($p < 0.01$)。

2.8 聚类分析

以各树种所测得的各项指标数据为分类依据,利用系统聚类法对26种园林树种进行聚类分析,得到26种园林树种基于燃烧性综合特征的抗火表现,聚类结果如图7所示。

第1类:喜树、落羽杉、银杏、紫薇、日本冷杉、大叶冬青和梧桐。

第2类:苦楝、全缘叶栎树、广玉兰和香樟。

第3类:龙柏、乐昌含笑、枫香、女贞、五角枫、雪松、无患子、乌桕、水杉、鹅掌楸、光皮楝木、榉树、紫叶李、白玉兰和黄栌。

表 2 功能性状指标-燃烧性指标方差分析

Tab. 2 ANOVA table of functional traits - combustion index

因变量	固定因子	Ⅲ类平方和	自由度	均方	F	显著性
燃烧时间	含水量	1.093	24	0.046	8.537	0.265
	树皮厚度	1.051	24	0.044	0.911	0.695
	比叶面积	1.049	19	0.055	6.734	0.013*
燃烧热值	含水量	0.501	24	0.021	2088.248	0.017*
	树皮厚度	0.500	24	0.021	38.437	0.127
	比叶面积	0.450	19	0.024	2.804	0.103
温度变化	含水量	0.742	24	0.031	13.496	0.212
	树皮厚度	0.711	24	0.030	0.881	0.703
	比叶面积	0.718	19	0.038	8.467	0.007**

注:*表示 $p < 0.05$; **表示 $p < 0.01$ 。

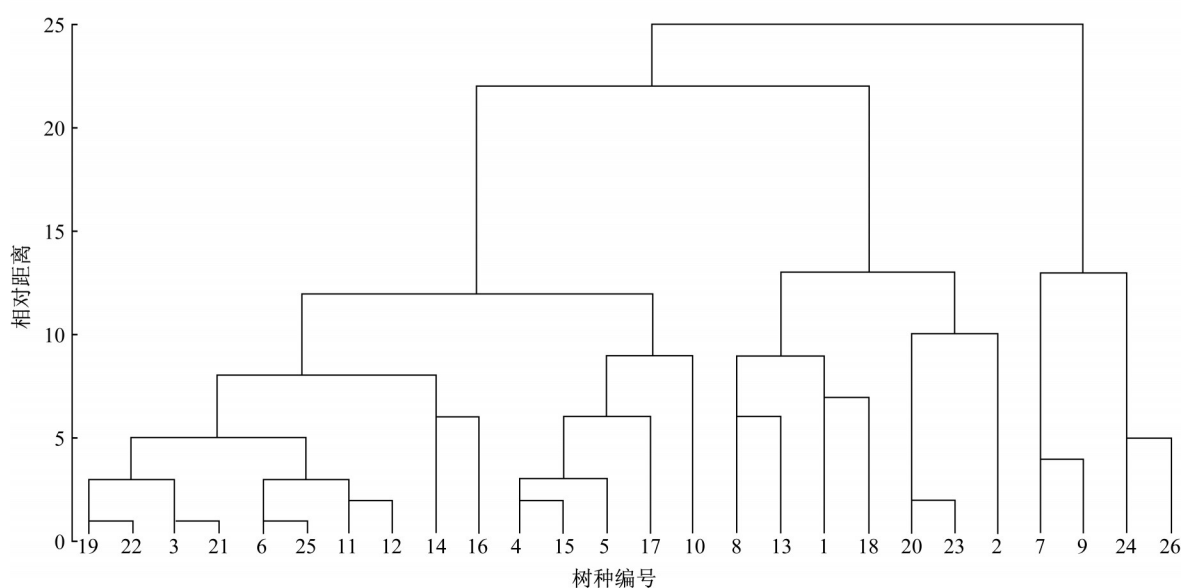
使用平均联接(组间)的树状图
重新调整距离聚类合并

图 7 26 种树种的燃烧性聚类图

Fig. 7 Flammability cluster of 26 landscape tree species

3 结论与讨论

园林树种的综合防火能力受园林树种功能性状与燃烧特征的影响。树种含水量对树种燃烧热值具有显著影响,比叶面积分别对燃烧时间与燃烧时温度变化产生了显著与极显著影响。在聚类分析的基础上,根据3大类树种各指标特征,将26种园林树种防火能力分为3个等级:喜树、落羽杉、银杏、紫薇、日本冷杉、大叶冬青、梧桐防火能力最强;苦楝、全缘叶栎树、广玉兰、香樟防火能力中等;龙柏、乐昌含笑、枫香、女贞、五角枫、雪松、无患子、乌柏、水杉、鹅掌楸、光皮桉木、榉树、紫叶李、白玉兰、黄栌防火能力较差。

园林树木的抗火性不仅受含水量、树皮厚度、比

叶面积、部位燃烧时间、部位燃烧温度变化差异、燃烧热值影响,还受树木形态特征、群落成分构成和结构、立地生态环境、生物和人为因子的影响。形态分枝点低、群落郁闭度低、易燃树种混杂、干旱少雨、生物与人为活动失序都会引发火灾,所以防火树种的选择、群落的抗火设计、立地水湿环境的布局、生态系统的御火调控、人为活动的避险意识要紧密结合起来。抗火树种选择因地制宜、规划设计适地适树、系统管理科学精准,以确保园林绿化的生态安全和绿地健康。

气候变化尤其是全球气候变暖、CO₂浓度升高、城市热岛效应会极其显著地增加火灾的发生概率。在降水基本恒定的条件下,温度升高意味着环境空气相对湿度降低,在低湿度生境下,园林植物的易燃

性会提高。常用园林树种抗火性的生理指标和燃烧性特征的定量分析有助于园林规划在火险频繁地区减少高可燃性树种的应用,以降低树种对发生绿化火灾的脆弱性。

本文对常见26种树种抗火性的测析可以有效的指导基于防火目标的园林树种规划与种植设计。除抗火树种的选择外,还可以通过增加树冠遮热率,调控树木枝叶部分的孔隙率、枝下比和树冠比来提升群落的防护性和风景园林绿化体系的防火性^[16-17],进而增强城市系统的生态韧性。

作者贡献声明:

张德顺:论文研究计划制定,论文撰写。

吴雪:论文研究实施,初稿编写。

陈陆琪瑶:论文完善,插图绘制。

胡立辉:论文研究辅助实施。

李科科:论文研究辅助实施。

战颖:数据补充分析。

姚驰远:论文优化,修改提升。

参考文献:

- [1] BENISTON M. Climatic change in mountain regions: a review of possible impacts [J]. *Climatic Change*, 2003, 59(1):5.
- [2] DOSWALD N, MUNROE R, ROE D, *et al.* Effectiveness of ecosystem-based approaches for adaptation: review of the evidence-base [J]. *Climate and Development*, 2014, 6(2):185.
- [3] QUAN X W, HE B B, YEBRA M, *et al.* Retrieval of forest fuel moisture content using a coupled radiative transfer model [J]. *Environmental Modelling and Software*, 2017, 95:290.
- [4] WU C Y, NIU Z, TANG Q, *et al.* Predicting vegetation water content in wheat using normalized difference water indices derived from ground measurements [J]. *Journal of Plant Research*, 2009, 122(3):317.
- [5] DAVIES G M, LEGG C J, SMITH A A, *et al.* Rate of spread of fires in *Calluna vulgaris*-dominated moorlands [J]. *Journal of Applied Ecology*, 2010, 46(5):1054.
- [6] WEBER J A, USTIN S L. Diurnal water relations of walnut trees - implications for remote-sensing [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1991, 29(6):864.
- [7] EVERT R F. Esau's plant anatomy: meristems, cells, and tissues of the plant body: their structure, function, and development [M]. 3rd ed. Hoboken: John Wiley and Sons Inc, 2006.
- [8] DRYSDALE D. An introduction to fire dynamics [M]. 2nd ed. Hoboken: John Wiley and Sons Inc, 1999.
- [9] THOMAS J A, WHITE J D, MURRAY D B. Tree species influence woodland canopy characteristics and crown fire potential [J]. *Forest Ecology and Management*, 2016, 362:169.
- [10] 杜兰萍. 基于性能化的大尺度公共建筑防火策略研究 [D]. 天津: 天津大学, 2007.
DU L P. Research on performance-based fire protection for large scale public buildings [D]. Tianjin: Tianjin University, 2007.
- [11] 翟春婕. 林火时变辐射热流下可燃物热解着火及火蔓延模型研究 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2018.
ZHAI Chunjie. Characteristics of ignition time and fire spread of solid combustibles in wildland fire [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2018.
- [12] 王晓丽. 北京山区森林燃烧性研究 [D]. 北京: 北京林业大学, 2010.
WANG Xiaoli. Study on combustibility of forests in Beijing mountain area [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2010.
- [13] 鞠琳. 黑龙江省主要树种燃烧性能研究 [D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2009.
JU Lin. Study on combustibility of several main tree species in Heilongjiang Province [D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2009.
- [14] RICHARD B M. Seasonal meteorological effects upon streamflow in northern Utah [J]. *Hydrological Sciences Journal*, 2009, 12:45.
- [15] BUTLER B W, COHEN J, LATHAM D J, *et al.* Measurements of radiant emissive power and temperatures in crown fires [J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 2004, 34(8):1577.
- [16] 张德顺, 陈一家, 吴雪, 等. 园林树木的形态特征与阻燃能力的相关性 [J]. *中国城市林业*, 2020, 18(5):23.
ZHANG Deshun, CHEN Yijia, WU Xue, *et al.* Correlation between morphological characteristics and fire-retardant capabilities of landscape trees [J]. *Journal of Chinese Urban Forestry*, 2020, 18(5):23.
- [17] 张德顺, 陈陆琪瑶, 吴雪, 等. 上海金山区园林防护绿地群落调查及防火配置优化 [J]. *中国城市林业*, 2021, 19(1):19.
ZHANG Deshun, CHEN Luqiyao, WU Xue, *et al.* Investigation on protection green space community and optimization of fire protection configuration in Jinshan District, Shanghai [J]. *Journal of Chinese Urban Forestry*, 2021, 19(1):19.