北京林业大学学报
JOURNAL OF BEIJING FORESTRY UNIVERSITY

基于地表枯落物的植物群落抗火性评价

姚鳗卿 张德顺 朱瑞琳 张振

Evaluation of fire resistance of plant communities based on ground litter: a case study of the green belt around Shanghai City, eastern China

Yao Manqing, Zhang Deshun, Zhu Ruilin, Zhang Zhen

引用本文:
姚鳗卿, 张德顺, 朱瑞琳, 张振. 基于地表枯落物的植物群落抗火性评价[J]. 北京林业大学学报, 2025, 47(5):110–122. doi: 10.12171/j.1000–1522.20230348
Yao Manqing, Zhang Deshun, Zhu Ruilin, Zhang Zhen. Evaluation of fire resistance of plant communities based on ground litter: a case study of the green belt around Shanghai City, eastern China[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2025, 47(5):110–122. doi: 10.12171/j.1000–1522.20230348

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20230348

您可能感兴趣的其他文章
Articles you may be interested in

温带云冷杉混交林凋落物养分的空间分布特征
Spatial distribution characteristics of litter nutrients in temperate spruce–fir mixed forests
北京林业大学学报, 2021, 43(3): 73–84. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20200065

青藏高原北部戈壁区植物多样性及其环境解释
Plant diversity and its environmental explaination in gobi district of northern Qinghai–Tibet Plateau, northwestern China
北京林业大学学报, 2017, 39(12): 17–24. https://doi.org/10.13332/j.1000–1522.20170395

毛乌素沙地油蒿枯落物分解对增温的响应
Response of litter decomposition to warming of *Artemisia ordosica* in Mu Us Desert of northwestern China
北京林业大学学报, 2020, 42(6): 134–141. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20190092

色季拉山西坡表层土壤有机碳的小尺度空间分布特征
Spatial distribution characteristics at small scale of soil organic carbon in topsoil of the west slope in Sejila Mountain, western China
北京林业大学学报, 2020, 42(9): 70–79. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20190481

青岛崂山次生植物群落物种分布及多样性特征
Species distribution and diversity characteristics of secondary plant communities in Laoshan Mountain of Qingdao, Shandong Province of eastern China
北京林业大学学报, 2020, 42(8): 22–33. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20190414

贵州赤水桫椤国家级自然保护区植物群落特征
Characteristics of plant community in the Guizhou Chishui *Alsophila spinulata* National Nature Reserve, southwestern China
北京林业大学学报, 2019, 41(1): 19–31. https://doi.org/10.13332/j.1000–1522.20180165

DOI:10.12171/j.1000−1522.20230348

基于地表枯落物的植物群落抗火性评价
——以上海市环城绿带为例

姚鳗卿　张德顺　朱瑞琳　张　振
（同济大学建筑与城市规划学院，高密度城市人居环境生态与节能教育部重点实验室，上海 200092）

摘要:【目的】火灾是城市人居环境的主要灾害之一，严重威胁居民的生命财产安全及城市的生态效益。本文构建了基于地表枯落物的植物群落抗火性综合评价体系，旨在为城市绿地系统的火灾防控与管理、生态安全保障以及绿地健康维护提供新的思路与解决方案。**【方法】**本研究以上海市环城绿带典型乔木群落和地表枯落物为研究对象，通过实地调研获取质量特征与空间分布数据，其中单位面积质量平均值、变异系数、偏度和峰度 4 个指标来描述地表枯落物的质量特征；选择变程和分维数，通过 Kriging 插值法分析其空间分布。并且使用量热仪得到热值、燃烧时间、温度变化和不完全燃烧指数等实测数据，用以表征群落的燃烧特性。基于上述 3 个方面共 10 个指标，采用 CRITIC 权重法构建地表枯落物的群落抗火性综合评价体系，并对群落抗火性进行排序和分析。**【结果】**(1)不同群落的地表枯落物单位面积质量差异显著，范围为 46.92 ~ 604.48 g/m^2；桂花 B 群落的离散程度最高，变异系数、偏度和峰度均最大。(2)地表枯落物的空间分布呈现 3 类抗火性排序：破碎化分布(第 1 类) > 局部集中式分布(第 2 类) > 大面积集中式分布(第 3 类)。(3)池杉群落和落羽杉群落的地表枯落物热值较高、不完全燃烧指数较低、燃烧时间长、温度变化中等，抗火性较差；相同条件下，朴树群落的地表枯落物较难引燃；总体而言，针叶树群落抗火能力弱于阔叶树群落。(4)基于综合评价体系，21 个群落的抗火性排序从强到弱为朴树 B 群落、桂花 B 群落、(梧桐 + 女贞)群落 、无患子 B 群落 、(栾树 + 女贞)群落、无患子 A 群落、香樟群落、(枫香 + 枫杨)群落 、(杜英 + 鹅掌楸)群落 、朴树 A 群落、银杏群落、(银杏 + 香樟 + 女贞)群落、(蚊母树 + 杨树)群落、栾树群落、(女贞 + 无患子)群落、榉树群落、池杉群落、三角槭群落、桂花 A 群落、女贞群落、落羽杉群落。**【结论】**地表枯落物数量越少、分布破碎化程度越高、燃烧性越弱的群落，其综合抗火能力越强。

关键词：植物群落；抗火性；地表枯落物；空间分布；植物燃烧特性
中图分类号：S732　**文献标志码：**A　**文章编号：**1000−1522(2025)05−0110−13
引文格式：姚鳗卿，张德顺，朱瑞琳，等. 基于地表枯落物的植物群落抗火性评价——以上海市环城绿带为例 [J]. 北京林业大学学报，2025，47(5)：110−122. Yao Manqing, Zhang Deshun, Zhu Ruilin, et al. Evaluation of fire resistance of plant communities based on ground litter: a case study of the green belt around Shanghai City, eastern China[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2025, 47(5): 110−122.

Evaluation of fire resistance of plant communities based on ground litter: a case study of the green belt around Shanghai City, eastern China

Yao Manqing　Zhang Deshun　Zhu Ruilin　Zhang Zhen
(Key Laboratory of Ecology and Energy-Saving Study of Dense Habitat, Ministry of Education, College of Architecture and Urban Planning, Tongji University, Shanghai 200092, China)

收稿日期: 2023−11−30　**修回日期:** 2024−11−22
基金项目: 国家自然科学基金项目(32071824)，2024 年同济大学研究生教材建设项目(2024JC07)和同济大学中央高校基本科研业务费专项(22120240668)。
第一作者: 姚鳗卿，博士生。主要研究方向：生态与气候变化响应规划、园林植物应用。Email：manqingyao@163.com　地址：200092 上海市四平路 1239 号同济大学建筑与城市规划学院。
责任作者: 张德顺，教授，博士生导师。主要研究方向：风景园林规划设计、生态与气候变化响应规划、园林小气候调控规划、风景旅游区规划。Email：zds@tongji.edu.cn　地址：同上。
本刊网址: http://j.bjfu.edu.cn；http://journal.bjfu.edu.cn

Abstract:［**Objective**］Fire is one of the major disasters affecting urban human settlement environment, which brings increasingly severe challenges to residents' personal property and urban ecological benefits. In this paper, a comprehensive evaluation system of fire resistance of plant communities based on ground litter was constructed, which provides a new control idea for fire prevention and control and management of urban green space system, urban ecological safety and maintenance of green space health.［**Method**］In this study, typical arbor communities and surface litter in the Shanghai Ring Green Belt were taken as research objects. Field survey was carried out to obtain data on mass characteristics and spatial distribution. Four indices, namely the average mass per unit area, coefficient of variation, skewness and kurtosis were used to describe mass characteristics of surface litter. Its spatial distribution was analyzed through range, fractal dimension, and Kriging interpolation. In addition, a calorimeter was used to obtain measured data such as calorific value, combustion time, temperature change, and incomplete combustion index, which were used to characterize the combustion characteristics of communities. Based on a total of 10 indices from the above three aspects, the CRITIC (criteria importance through intercriteria correlation) weight method was adopted to construct a comprehensive evaluation system for fire resistance of surface litter communities, and fire resistance of communities was ranked and analyzed.［**Result**］(1) The average mass per unit area of ground litter in different communities varied greatly, ranging from 46.92 to 604.48 g/m^2. The mass dispersion degree of ground litter per unit area of each community was large, that is, there were a lot of fallen leaves deposited in some areas, and the mass was far above average value. The highest degree of dispersion was *Osmanthus fragrans* B community, and its coefficient of variation, skewness and kurtosis were the largest. (2) In terms of spatial distribution of ground litter, the comparative order of fire resistance was as follows: type I (fragmentation distribution) > type II (local centralized distribution) > type III (large area centralized distribution). (3) The heat value of ground litter was high, incomplete combustion index was small, burning time was long, temperature was moderate, and fire resistance was poor. Under same conditions, the ground litter of community was difficult to ignite. In general, fire resistance of conifer community was lower than that of broadleaved trees. (4) According to comprehensive evaluation system, the order of fire resistance of 21 communities from strong to weak was as follows: *Celtis sinensis* B community, *Osmanthus fragrans* B community, *Firmiana simplex* + *Ligustrum lucidum* community, *Sapindus saponaria* B community, *Koelreuteria paniculata* + *Ligustrum lucidum* community, *Sapindus saponaria* A community, *Camphora septentrionalis* community, *Liquidambar formosana* + *Pterocarya stenoptera* community, *Elaeocarpus decipiens* + *Liriodendron chinense* community, *Celtis sinensis* A community > *Ginkgo biloba* community, *Ginkgo biloba* + *Camphora officinarum* + *Ligustrum lucidum* community, *Distylium racemosum* + *Populus euramericana* 'I-214' community, *Koelreuteria paniculata* community, *Ligustrum lucidum* + *Sapindus saponaria* community, *Zelkova serrata* community, *Taxodium distichum* var. *imbricatum* community, *Acer buergerianum* community, *Osmanthus fragrans* A community, *Ligustrum lucidum* community, *Taxodium distichum* community.［**Conclusion**］Communities with less surface litter, more fragmented distribution and weaker combustibility have stronger overall fire resistance.

Key words: plant community; fire resistance; ground litter; spatial distribution; combustion characteristics of plants

随着城市高密度人居环境的不断发展，气候变暖和城市热岛效应的持续加剧，全球各地的火灾频率和强度也愈加严重[1]，其带来的巨大破坏对人身安全、经济发展、社会秩序和生态环境等方面构成了严重威胁[2]。其中，城市近郊绿地由于植被覆盖率较高，且普遍采用“重灭火、轻控灾”的粗放式管理方式，存在较大火灾隐患，一旦发生火灾，往往会造成严重的后果。因此，城市火灾应该优先关注近郊区域。上海环城绿带作为典型的城市近郊绿地，在规划设计和管理上对潜在火灾风险的应对措施不足，亟需加强防火和避灾研究，以制定有效的风险防控策略。

目前，关于植物抗火性能的研究可分为 3 个尺度：微观的物种尺度、中观的群落尺度以及宏观的景

观尺度。物种尺度作为该领域的基础，研究起步较早，抗火植物已在防火林带、防灾绿地等领域得到广泛应用，并取得了显著成效[3−4]；景观尺度则以斑块作为最小分析单元[5−6]，研究者主要关注斑块在景观空间上的排列状况如何影响林火的发生与蔓延[7]。群落尺度的研究在物种与景观之间发挥着纽带作用，其重要性不言而喻[8]。不同植物个体在空间中以特定方式组合后，会改变群落内燃烧小气候条件[9]，且混合可燃物的燃烧特性与单一可燃物存在显著差异[10]。然而，现有对群落的研究多集中在物种构成或以林分结构为代表的少数特征[11−13]，有限的指标难以全面反映植物群落的抗火特征。此外，尽管已有许多学者探讨了群落空间结构与可燃物质量之间的关系[14]，但可燃物质量本身难以真实且全面地反映植物群落的抗火性。因此，有必要进一步筛选表征群落抗火性的指标，以更科学地评估群落的抗火能力。

地表枯落物在植物群落的生态过程中扮演着关键角色，能够有效反映空间结构与可燃物质量的情况，同时其积累会增加该区域的火灾风险。根据《园林绿化养护标准》CJJ/T 287—2018，地表枯落物的清理属于绿地管理中“清理保洁”范畴。相关条例规定：绿地应保持清洁，并整理清除影响景观的杂物、干枯枝叶、树挂等；收集的垃圾杂物和枯枝落叶应及时清运，不得随意焚烧。然而，城市近郊绿地的养护等级大多为三级（保持较干净、整洁），对地表枯落物的清理频率较低，导致火灾隐患增加。

基于此，本文以植物群落为研究对象，以气候变化背景下城市近郊绿地的植物群落抗火性提升为研究目标。通过调研实测得到的环城绿带典型群落的地表枯落物数据，从质量属性、分布特征和燃烧特性 3 个方面，对植物群落的抗火性进行综合评价，揭示影响群落抗火性的空间结构特征。提出从空间结构角度构建抗火植物群落的技术对策，为城市近郊绿地的维护和管养提供科学依据，进而强化城市绿地的整体安全格局与生态韧性。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区域概况

上海市的平均海拔高度约 4 m，属亚热带海洋性季风气候，四季分明，年均气温 17.6 ℃，年均降水量 1 586.5 mm。研究地点属于上海市环城绿带（图 1），沿外环线道路（S20）始建于 20 世纪 90 年代，规划全长 97 km，规划总面积为 7 241 hm^2[15]，植被以乔木为主，其植物群落自 2018 年林带建成后，经过较长时间的更新与演替后已趋于稳定[16−17]，以落叶阔叶林和常绿阔叶林为主[18]。

1.2 样地设置与调查

在 2022 年 1—3 月进行实地踏查，选取了高频出现且呈自然状态的典型乔木群落，共 21 个样方



图 1 研究区域与样方位置

Fig. 1 Study area and plot location

（图 1），包含了 14 科 18 种乔木树种（表 1）。

1.3　地表枯落物的群落质量指标采集方法

在环城绿带中选取距离道路边界 8～15 m 的无地被林地布设 21 个 15 m × 15 m 样方，根据 GPS 定位仪记录下样方四角的地理位置。在每个样方内采用机械采样法，选取 3 m × 3 m 网格的中央点位，框定 1 m × 1 m 的范围，作为基准方格（图 2）。现场用精度为 1 g 的电子秤进行称量，记录该基准方格的枯落物质量，其周边的 8 个 1 m × 1 m 方格的地表枯落物质量用基准方格乘以质量系数的方法计算。称量枯落物完成后，现场用密封袋取样并标记其分布位置。

将样品称质量后放入 85℃ 的烘干箱内，烘干至恒质量后测量样品干质量。

$$R=\frac{(W_A-W_E)-(W_a-W_e)}{W_a-W_e} \tag{1}$$

式中：R 为含水率，W_A 是样品烘干前总质量（g），W_a 是样品烘干后总质量（g），W_E 是信封湿质量（g），W_e 是信封干质量（g）。

1.4　地表枯落物的群落燃烧指标测定方法

将样品烘干、粉碎，取 1 g 压饼，使用 ZDHW-10A 微机高精度量热仪（热容量为 10 169 J）进行枯落物

表 1　研究区域的主要物种基本信息

Tab. 1　Basic information of main species in the research area

序号	群落名称		树种	拉丁名	科	属	生活型
1	落羽杉	落叶林	落羽杉*	*Taxodium distichum*	杉科	落羽杉属	落叶针叶乔木
2	池杉		池杉*	*Taxodium distichum* var. *imbricatum*	杉科	落羽杉属	落叶针叶乔木
3	枫香＋枫杨		枫香*	*Liquidambar formosana*	金缕梅科	枫香树属	落叶阔叶乔木
			枫杨*	*Pterocarya stenoptera*	胡桃科	枫杨属	落叶阔叶乔木
4	榉树		榉树	*Zelkova serrata*	榆科	榉属	落叶阔叶乔木
5	朴树A		朴树*	*Celtis sinensis*	榆科	朴属	落叶阔叶乔木
6	朴树B		朴树*				
7	无患子A		无患子*	*Sapindus saponaria*	无患子科	无患子属	落叶阔叶乔木
8	无患子B		无患子*				
9	三角槭		三角槭*	*Acer buergerianum*	槭树科	槭属	落叶阔叶乔木
10	栾树		栾树*	*Koelreuteria paniculata*	无患子科	栾树属	落叶阔叶乔木
11	银杏		银杏*	*Ginkgo biloba*	银杏科	银杏属	落叶针叶乔木
12	银杏＋香樟＋女贞	常绿落叶混交林	银杏*	*Ginkgo biloba*	银杏科	银杏属	落叶针叶乔木
			香樟*	*Cinnamomum camphora*	樟科	樟属	常绿阔叶乔木
			女贞*	*Ligustrum lucidum*	木犀科	女贞属	常绿阔叶乔木
13	蚊母树＋杨树		蚊母树*	*Distylium racemosum*	金缕梅科	蚊母树属	常绿阔叶乔木
			杨树*	*Populus euramericana* ‘I-214’	杨柳科	杨属	落叶阔叶乔木
14	杜英＋鹅掌楸		杜英	*Elaeocarpus decipiens*	杜英科	杜英属	常绿阔叶乔木
			鹅掌楸	*Liriodendron chinense*	木兰科	鹅掌楸属	落叶阔叶乔木
15	女贞＋无患子		女贞*	*Ligustrum lucidum*	木犀科	女贞属	常绿阔叶乔木
			无患子*	*Sapindus saponaria*	无患子科	无患子属	落叶阔叶乔木
16	栾树＋女贞		栾树*	*Koelreuteria paniculata*	无患子科	栾树属	落叶阔叶乔木
			女贞*	*Ligustrum lucidum*	木犀科	女贞属	常绿阔叶乔木
17	梧桐＋女贞	常绿落叶混交林	梧桐*	*Firmiana simplex*	梧桐科	梧桐属	落叶阔叶乔木
			女贞*	*Ligustrum lucidum*	木犀科	女贞属	常绿阔叶乔木
18	桂花A	常绿林	桂花	*Osmanthus fragrans*	木樨科	木樨属	常绿阔叶乔木
19	桂花B		桂花				
20	香樟		香樟*	*Camphora officinarum*	樟科	樟属	常绿阔叶乔木
21	女贞		女贞*	*Ligustrum lucidum*	木犀科	女贞属	常绿阔叶乔木

注：群落类型后附有A、B是为区分同树种构成的不同群落。*表示上海市《环城绿带工程设计规范（DG/TJ08-2112—2012）》中的推荐树种。

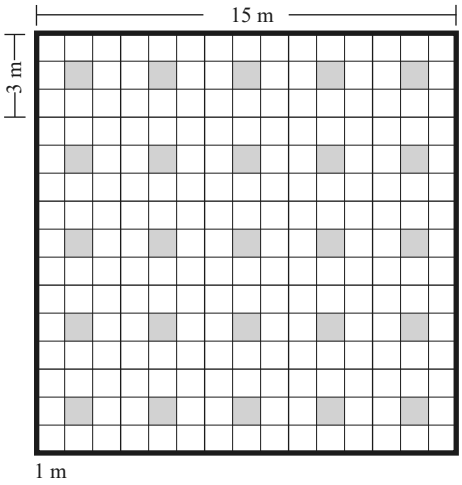


图 2 地表枯落物称量点位

Fig. 2 Weighing points for ground litter

的燃烧试验。每个群落的枯落物做 3 个重复。

依照树种进行枯落物的燃烧试验，测得不同树种地表枯落物燃烧指标后，纯林群落的地表枯落物燃烧特性与构成该群落的单一树种的燃烧特性相同；混交林则根据调研过程中不同树种地表枯落物的质量比进行加权计算，得到群落的地表枯落物的燃烧特征指标。

1.5 评估模型的构建方法

CRITIC（criteria importance through intercriteria correlation）权重法即基于指标间相关性和变异性来确定权重的客观赋权法[19]。

计算第 j 项指标的标准差（S_j）。

$$S_j = \sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}\left(x_{ij}-\bar{x}_j\right)^2} \tag{2}$$

式中：n 代表样本数量，x_{ij}表示第 i 个样本中第 j 项指标的值，$\bar{x}_j$指第 j 项指标的均值。

计算指标间的相关系数（r_{ij}）。

$$r_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^{n}\left(x_{ij}-\bar{x}_j\right)(x_{ki}-\bar{x}_i)}{\sqrt{\sum_{k=1}^{n}\left(x_{kj-\bar{x}_j}\right)^2\sum_{k=1}^{n}(x_{ki}-\bar{x}_i)^2}} \tag{3}$$

式中：k 代表样本序号，r_{ij}衡量的是第 i 项指标和第 j 项指标之间的线性相关程度，取值范围在 [−1，1] 之间。

计算第 j 项指标的冲突性指标（C_j）。

$$C_j = S_j\sum_{i=1}^{m}\left(1-r_{ij}\right) \tag{4}$$

式中：m 是指标的总数。

计算各项指标的权重（w_j）。

$$w_j = \frac{C_j}{\sum_{j=1}^{m}C_j} \tag{5}$$

式中：各项指标的权重综合为 1。

植物群落火灾的发生、发展和蔓延与地表枯落物的结构组成、燃烧特性、数量大小和分布情况等息息相关[14]。基于此，本研究从这 3 个方面共选取 10 个指标（表 2），构建基于地表枯落物的群落抗火性综合评价体系。

$$Y_1 = 0.108\,4X_1 + 0.092\,2X_2 + 0.080\,3X_3 + 0.071\,7X_4 \tag{6}$$

$$Y_2 = 0.125\,8X_5 + 0.117\,1X_6 \tag{7}$$

$$Y_3 = 0.086\,9X_7 + 0.111\,6X_8 + 0.102\,3X_9 + 0.103\,6X_{10} \tag{8}$$

$$Y = Y_1 + Y_2 + Y_3 \tag{9}$$

式中：Y 表示群落抗火性综合得分；Y_1、Y_2、Y_3 分别表示质量特征、空间分布特征和燃烧特征方面的抗火性评分；$X_1 \sim X_{10}$ 分别表示地表枯落物单位面积质量平均值、质量变异系数、质量偏度、质量峰度、变程、分维数、热值、燃烧时间、温度变化和不完全燃烧指数。

表 2 植物群落抗火性综合评价指标及其权重

Tab. 2 Comprehensive evaluation indexes of fire resistance of plant communities and their weights

指标类别	序号	指标	标准化处理	权重/%	
质量特征抗火性（Y_1）	X_1	单位面积质量平均值	负向化	10.84	35.26
	X_2	质量变异系数	正向化	9.22	
	X_3	质量偏度	正向化	8.03	
	X_4	质量峰度	正向化	7.17	
空间分布特征抗火性（Y_2）	X_5	变程	负向化	12.58	24.29
	X_6	分维数	正向化	11.71	
燃烧特征抗火性（Y_3）	X_7	热值	负向化	8.69	40.44
	X_8	燃烧时间	负向化	11.16	
	X_9	温度变化	负向化	10.23	
	X_{10}	不完全燃烧指数	正向化	10.36	

2　结果与分析

2.1　地表枯落物的质量抗火性分析

各群落的地表枯落物含水率（图 3）显示，近 70% 的群落地表枯落物含水率低于 15%，表明这些枯落物极易引燃。其中，银杏群落的含水率最高，达到 27.1%；而朴树 A 群落和朴树 B 群落的含水率最低，分别为 8.2% 和 9.6%。

通过野外采集及实验室烘干处理，可从每个样方中获得 25 个 1 m × 1 m 面积内地表枯落物的干质量，为该样方中地表枯落物的单位面积质量。不同植物群落间，单位面积地表枯落物质量的平均值差异显著（图 4）。其中，枫香 + 枫杨群落的平均质量最大，达到 604.48 g/m^2；而女贞群落的平均质量最小，仅有 46.92 g/m^2，相差将近 12 倍。超过 50% 群落的地表枯落物的质量在 200 ~ 400 g/m^2 的范围内。即便是由同物种构成的不同群落的枯落物平均质量也存在显著差异。例如，朴树 A 群落的枯落物平均质量为 536.88 g/m^2，而朴树 B 群落则为 223.17 g/m^2。

香樟群落地表枯落物的平均值和中位数差异最为显著，其最大值为 1 069 g/m^2，是平均值的 4 倍。相比之下，池杉群落的地表枯落物单位面积质量中位数与均值差值最小，且其误差线及箱体最短，表明池杉群落的地表枯落物总体数量较少且分布较为均匀。

在地表枯落物单位面积质量的最值方面，各个群落的最小值差异较小，超过一半集中在 20 ~ 80 g 的范围内；但最大值则差异显著，其中枫香 + 枫杨群落的最大值达到 1 443.65 g/m^2，而女贞群落的最大值仅为 150.62 g/m^2。

由于标准差受平均值的影响，总体呈现随平均值增大而上升的趋势（图 5a）。因此，引入变异系数的概念，其反映了单位面积枯落物质量的离散程度。结果显示，各植物群落的枯落物均呈现较大程度的离散性，近一半群落的变异系数落在 20% ~ 40% 的区间内（图 5b）。其中，桂花 B 群落的变异系数最大，达到 99.32%，其枯落物质量最大值为 659.86 g，接近平均值的 5 倍；而池杉群落的变异系数最小，为 17.09%。

偏度用于描述数据分布形态的对称性。在研究的群落中，11 个群落的地表枯落物单位面积质量偏度绝对值小于 0.5，表明其分布基本对称；其余群落的偏度大于 0，其中桂花 B 群落的偏度最大，达到 1.9。峰度则用于描述数据分布形态的陡缓程度。绝大多数群落地表枯落物单位面积质量的峰度绝对值在 1 以内，而桂花 B 群落的峰度达到了 3.44，表明其数据存在偏差极大的离群值。偏度和峰度的分析结果表明，地表枯落物单位面积质量分布中存在极端值（极大或极小），导致数据分布不集中。这种不连续的枯落物分布可能抑制火势在地表的蔓延，从而增强群落的抗火性。

2.2　地表枯落物的空间分布抗火性分析

采用半方差函数分析群落地表枯落物的空间分布特征。结果显示，7 个群落的地表枯落物符合高斯模型，11 个群落符合指数模型，3 个群落符合球形模型。

在本研究中，变程（a）的大小反映了地表枯落物的聚集尺度。变程越大，表明地表枯落物在更大范

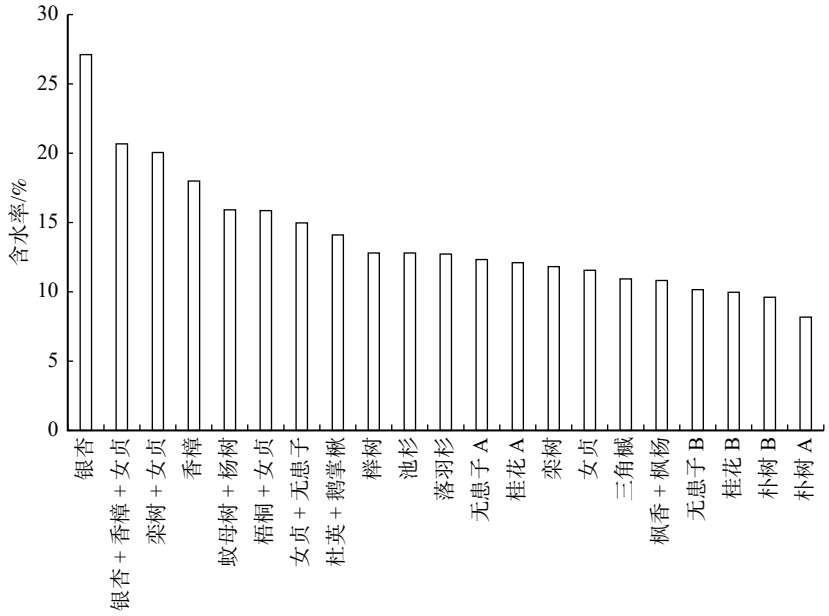


图 3　地表枯落物含水率

Fig. 3　Moisture contents of ground litter

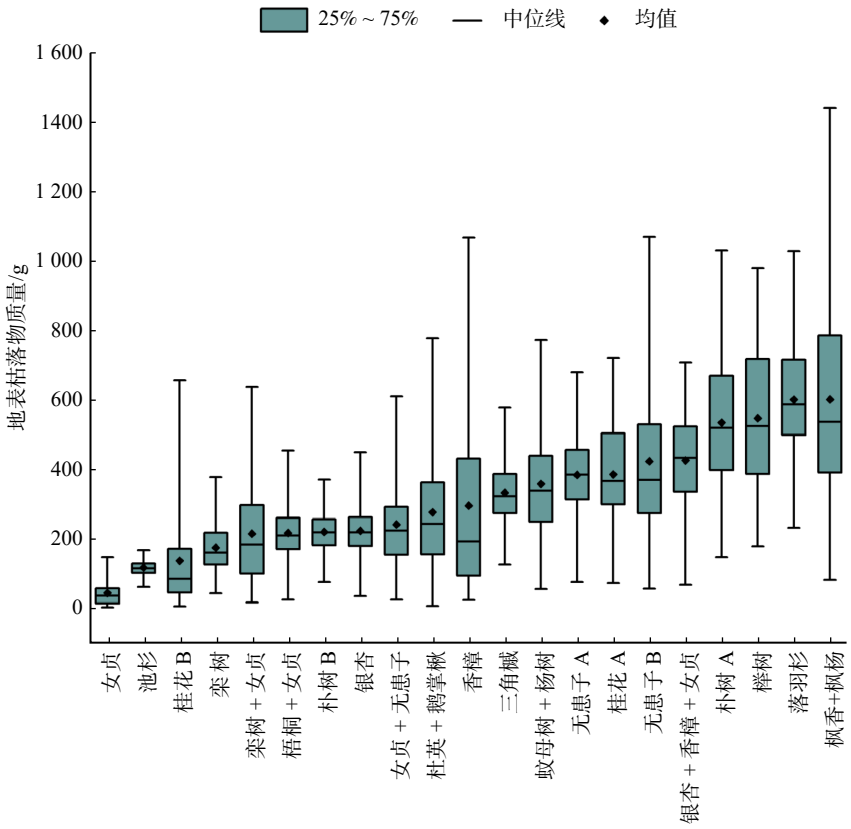


图 4 地表枯落物干质量

Fig. 4 Dry mass of ground litter

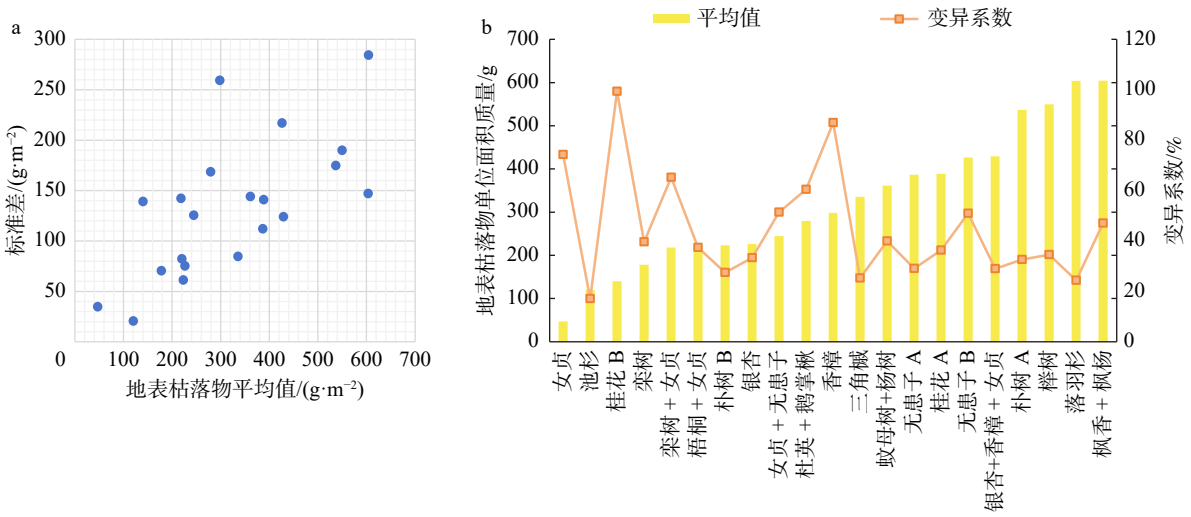


图 5 地表枯落物标准差与变异系数

Fig. 5 Standard deviation and coefficient of variation of ground litter

围内呈现聚集分布，火势更容易在群落中蔓延。其中，(栾树 + 女贞)群落的变程最小，为 2.321 m，表明其地表枯落物的分布较为碎片化，火势较难蔓延；而女贞群落的变程最大，为 20.340 m，火灾可能通过大面积的枯落物斑块向外扩散。

分维数(D)是变异曲线的曲率，用于表征地表枯落物的空间异质性程度。分维数越大，表明地表枯落物的空间变异性越大；分维数越小，则是枯落物分布越均一。不同群落间的分维数较相近，范围在 1.653 ~ 1.939 之间。整体来看，分维数整体随变程增大而减小(图 6)，表明群落地表枯落物在越大范围内呈现聚集分布时，其分布也更加均匀，火灾在群落内蔓延的可能性更高。

利用 Kriging 插值法绘制了 21 个群落的地表枯落物空间分布图(图 7)。结合各个群落的变程分析结果，其范围在 2.32 ~ 20.34 m 之间，呈三级阶梯分布。不同变程区间都对应不同的枯落物分布格局，据此可将群落分为 3 类，进一步比较它们之间的斑

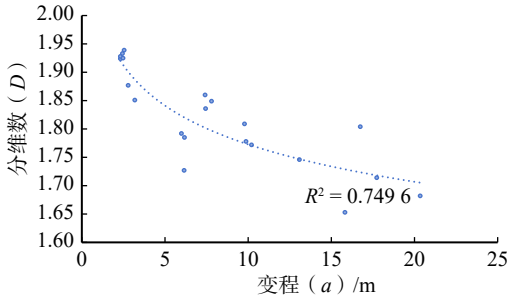


图 6　分维数–变程散点图

Fig. 6　Fractal dimensional-variable range scatter plot

块大小、数量及其火蔓延趋势。

图 7 中将群落地表枯落物的质量大小分为 7 个区间，并通过由深到浅的不同色阶表示。颜色最深的区域对应地表枯落物数量最多的区域，定义为易燃斑块；颜色最浅的区域对应地表枯落物数量最少的区域，定义为不易燃斑块；其余色阶的区域则为潜在蔓延通道，一般包围并连接若干个易燃斑块。根据这些通道的形状和走势，可以推断火灾的蔓延趋势。根据变程（a）范围的不同，群落地表枯落物的分布格局可分为 3 类：第 1 类是破碎化分布，变程范围在 2 ~ 3 m，地表枯落物集中在若干个面积较小的易燃单元中，彼此相对独立，火灾较难蔓延；第 2 类是局部集中式分布，变程范围在 5.99 ~ 10.20 m，地表枯落物集中在 3 ~ 5 个面积中等的单元中，单元间有通道相连；第 3 类是大面积集中式分布，变程范围在 13.00 ~ 20.34 m，枯落物集中在 1 ~ 2 个大面积单元中，且该单元统领群落地表空间。

2.3　地表枯落物的燃烧抗火性分析

燃烧特征包括热值、不完全燃烧指数、燃烧时间和温度变化 4 个指标，是影响抗火性综合评价的最重要特征。

不同树种之间的燃烧热值差距较大（图 8a）。朴树的热值最小，仅为 2 921.00 J/g，而池杉的热值最大，高达 4 923.50 J/g。与池杉同为针叶树且同属的落羽杉，其枯落物热值也较高，达到 4 828.00 J/g。近半树种的枯落物热值集中在 4 000.00 ~ 4 500.00 J/g 区间内。不同物种地表枯落物的不完全燃烧指数结果如图 8b 所示，主要集中在 5.00% ~ 7.00% 之间。其中，落羽杉的不完全燃烧指数最低，仅有 3.03%；而朴树、杜英和榉树的不完全燃烧指数分别为 13.48%、12.15% 和 11.75%，远高于其他树种。大多数物种的地表枯落物燃烧时间集中在 900 ~ 1 000 s 之间（图 8c）。其中，杜英的燃烧时间最短，为 758 s；池杉和落羽杉的燃烧时间最长，均为 1 088 s。绝大多数树种的燃烧温度变化在 1.5 ~ 2.0 ℃ 之间，不同物种间的差异并不明显（图 8d）。

综合分析 4 个燃烧指标（表 3）发现，落羽杉和池杉群落的燃烧属性非常相似，表现为热值高、不完全燃烧指数小、燃烧时间长、温度变化中等。作为针叶树，落羽杉和池杉的燃烧特性与阔叶树种差异较大，其热值均大于 4 800.00 J/g，远高于阔叶树约 4 000.00 J/g 的热值平均值；同时，其不完全燃烧指数约为 3%，远低于阔叶树 7% 的平均不完全燃烧指数。

朴树群落的燃烧热值极低，不完全燃烧指数最大（13.48%），温度变化最小（1.34℃），表明其枯落物在相同条件下较难引燃。此外，榉树群落和无患子群落也表现出较难点燃的特性。

2.4　综合抗火性评价

城市植物群落的综合抗火性由质量、空间分布与燃烧抗火性共同组成。从整体看，燃烧抗火性总体所占的权重较大，约为 40%，燃烧特征直接反映了可燃物的燃烧强度、持续性和热辐射表现，是评价群落抗火性的重要组成部分。其次是质量抗火性；占比最小的为空间分布抗火性，占 24.09%，该类别下仅有 2 个指标，因此总体权重较小。

使用公式（6~9）分别计算各个群落的综合抗火性、质量抗火性、空间分布抗火性和燃烧抗火性的评分。抗火性评分越高，表明群落抗火性越强。

综合抗火性以及质量、空间分布和燃烧的抗火性如图 9 所示。朴树 B、桂花 B、（梧桐 + 女贞）群落等的抗火能力突出，而女贞、落羽杉群落等综合抗火性较差。具体而言，桂花 B 群落在质量和空间分布抗火性上均表现良好；朴树 A 群落和朴树 B 群落的燃烧抗火性评分为 0.38，其抗火性能远超其他群落；相比之下，池杉群落和落羽杉群落的燃烧抗火评分仅为 0.05，抗火性能较其余阔叶群落弱。

3　讨　　论

火灾的发生与可燃物类型密切相关，地表枯落物作为易燃物质，当其积累量达到一定阈值时，遇到火源极易引发火灾。因此，地表枯落物作为植物群落火灾的关键驱动因素和基本条件[19–21]，其结构组成、燃烧特性、数量大小以及分布格局对研究植物群落火灾的火行为具有至关重要的影响[22]。基于此，本研究将直接作用于植物群落地表火火行为的影响因素归纳为质量特征、空间分布、燃烧特性 3 个维度，深入探讨各维度相关指标与火行为之间的内在联系。

在对质量特征的研究中，本研究选取了质量平均值、变异系数、偏度和峰度 4 个指标进行分析。地表枯落物的含水率通常处于较低水平，一般小于

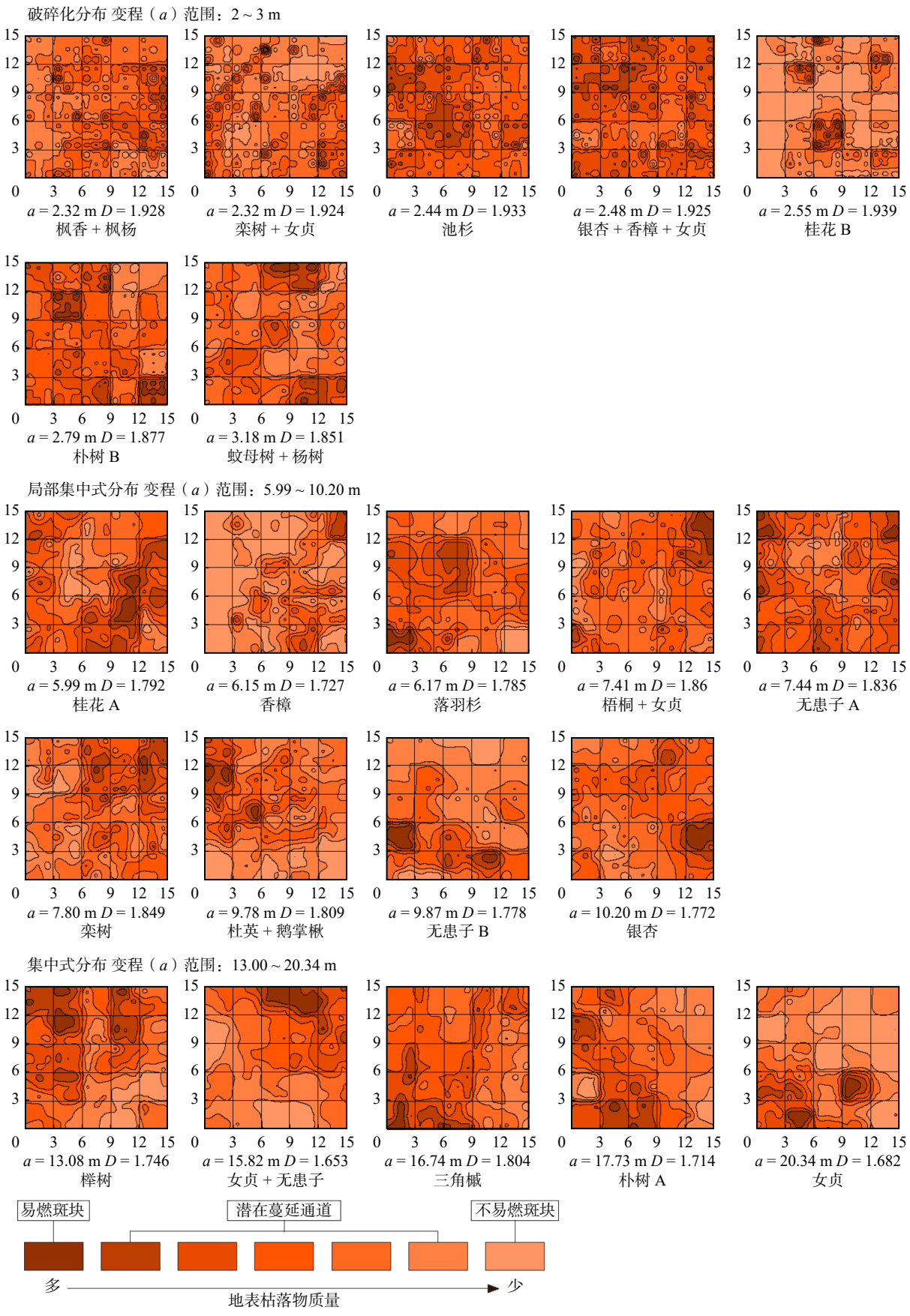


图 7 不同群落的地表枯落物空间分布格局及分类

Fig. 7 Spatial distribution pattern and classification of ground litter in different communities

15%，与鲜叶 50%～80% 的含水率相比[23–25]，差距显著，这使得地表枯落物极易被引燃，成为火灾发生的严重隐患。从质量平均值来看，地表枯落物单位面积质量平均值越大，意味着单位面积内的可燃物数

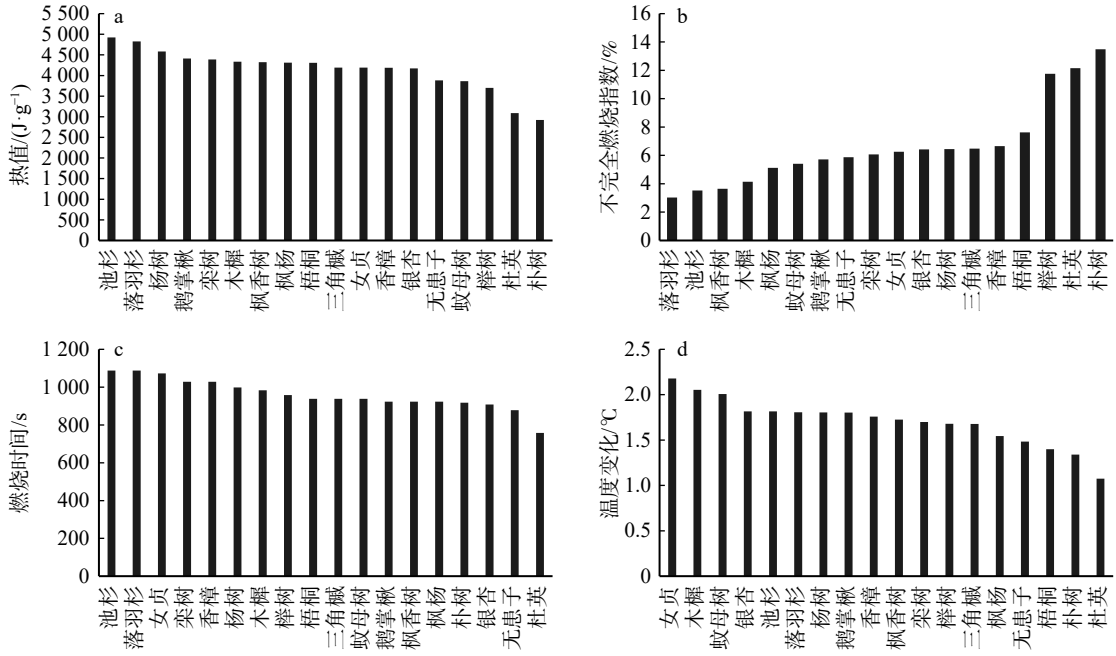


图 8　不同树种的地表枯落物燃烧特征图

Fig. 8　Burning characteristics diagram of ground litter of different tree species

表 3　群落燃烧特性

Tab. 3　Combustion characteristics of communities

序号	群落类型	热值/(J·g^{-1})	不完全燃烧指数/%	燃烧时间/s	温度变化/℃
1	池杉	4 923.50	3.52	1 088.00	1.82
2	落羽杉	4 828.00	3.03	1 088.00	1.81
3	蚊母树 + 杨树	4 439.20	6.24	986.00	1.85
4	杜英 + 鹅掌楸	4 410.50	5.71	923.00	1.80
5	栾树	4 388.00	6.06	1 028.00	1.70
6	桂花A	4 335.00	4.14	983.00	2.05
7	桂花B	4 335.00	4.14	983.00	2.05
8	栾树 + 女贞	4 325.77	6.12	1 042.14	1.85
9	枫香 + 枫杨	4 320.63	3.83	923.00	1.70
10	梧桐 + 女贞	4 306.00	7.62	938.00	1.40
11	三角槭	4 193.50	6.47	938.00	1.68
12	女贞	4 190.00	6.25	1 073.00	2.18
13	香樟	4 186.67	6.65	1 028.00	1.76
14	银杏 + 香樟 + 女贞	4 175.58	6.45	947.83	1.84
15	银杏	4 170.50	6.42	908.00	1.82
16	女贞 + 无患子	3 975.80	5.98	936.50	1.69
17	无患子A	3 884.00	5.87	878.00	1.48
18	无患子B	3 884.00	5.87	878.00	1.48
19	榉树	3 698.67	11.75	958.00	1.68
20	朴树A	2 921.00	13.48	918.00	1.34
21	朴树B	2 921.00	13.48	918.00	1.34

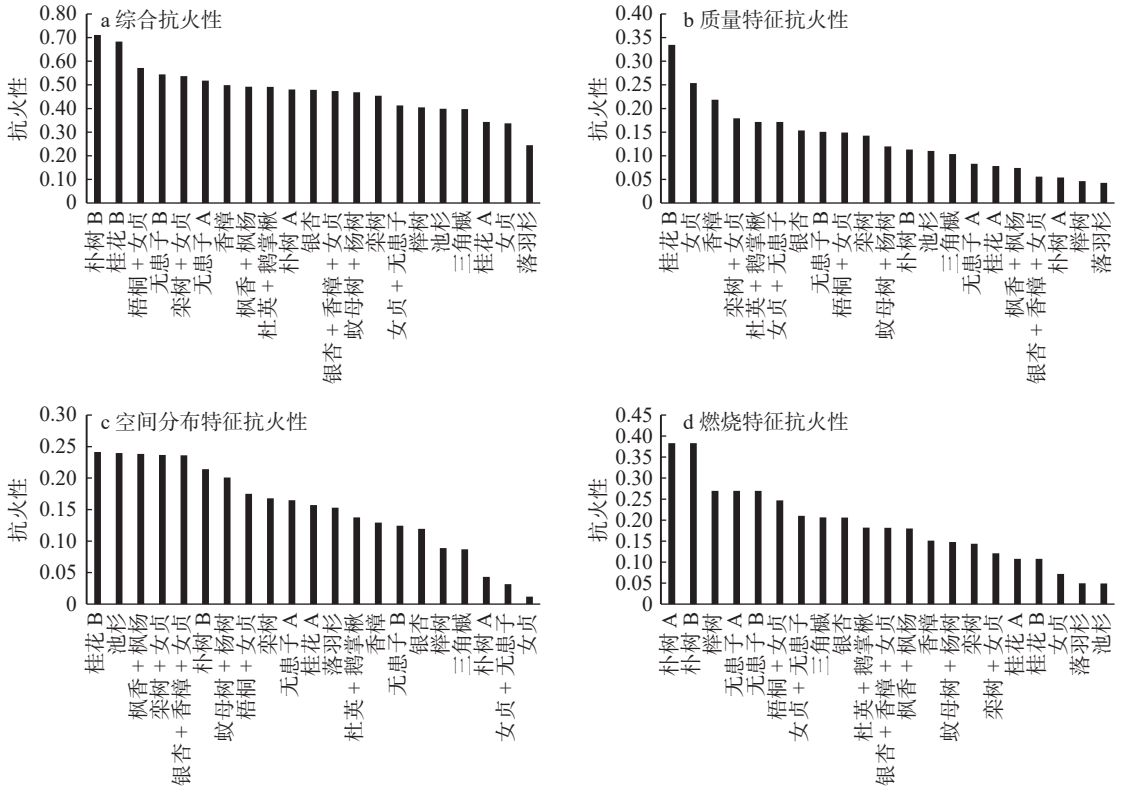


图 9 试验群落的抗火性柱状图

Fig. 9 Bar chart of fire resistance of the test communities

量越多，一旦起火，可供燃烧的物质丰富，群落抵抗火灾的能力也就越差，这也与前人的研究结论一致[26]。而变异系数、峰度和偏度所反映的情况则有所不同，这 3 个指标的值越大，表明地表枯落物在单位面积上的质量分布越不均匀。这种不均匀分布使得火灾发生时，火势难以在整个区域内均匀蔓延，从而在一定程度上增强了群落的抗火性。植物群落的地表枯落物质量特征与森林火灾中林分结构的复杂性（如乔木、灌木和草本层的连续性）对林火传播的影响相似，当群落结构较为单一，水平和垂直分布的连续性差时，其群落的火灾发生风险较低[27]。

需要明确的是，影响群落抗火性的因素复杂多样，不仅取决于作为主要可燃物的植物及其枯落物。气候条件、地形地貌以及风向风速等因素同样对群落抗火性有着重要影响[28]。气候条件中，空气温度和湿度直接影响可燃物的含水量，进而影响群落抗火性[29]；而风是群落火灾发生与蔓延的主要因子，不仅能降低林中的空气温度，加速可燃物的水分蒸发[30]，还能在火源出现时改变热对流，增加热平流，加速火灾蔓延[31]。地形变化和立地条件则主要是通过坡度与坡向影响可燃物的质量与含水量[32]，从而间接影响群落抗火性。城市环境中，人类与动物活动同样会干扰地表枯落物的分布，例如公园管理人员会将枯落物堆积起来便于打扫，影响其连续性和分布格局，进而影响火势的发展。

由于样地位于环城绿带这一复杂的开放空间环境中，使用样方法收集群落空间结构和地表枯落物数据时，受到气候、地形以及其他生物因素的影响，使得本研究存在一定的局限性。样方范围外的植物和周边生境会对样方内部产生干扰，例如周边乔木的地表枯落物可能会在风力作用下飘落至样方内部，改变样方内枯落物的数量和分布；动物的活动也可能干扰地表枯落物的原有分布状态。这些不可控的自然因素导致在数据收集过程中产生了一定程度的系统误差，对研究结果的准确性产生了潜在影响。此外，尽管本研究在样地选择上均选取了无明显坡度的平坦场地，但不同地形条件会导致地表枯落物在重力、水流以及风力等作用下呈现不同的分布状态，进而影响火灾的发生和蔓延。因此，在未来的研究中，地形因素应被纳入重点讨论范围，以便更全面、准确地评估植物群落的抗火性。

4 结 论

在气候变化背景下，火灾风险显著上升，频繁发生的火灾正在挑战植物群落的抗火能力和城市生态系统的安全格局。本研究以上海市环城绿带的 21 个植物群落为研究对象，基于地表枯落物对植物群落抗火性进行评价和排序，探讨了群落空间结构对抗火性的影响，并构建了基于空间结构的抗火性预测模型。

从质量、空间分布和燃烧特征 3 个维度对植物群落进行分析。质量特征反映了群落地表枯落物的数量，其中(枫香 + 枫杨)群落可燃物数量最多，女贞群落最少；空间分布特征描述了群落地表枯落物分布的破碎化程度，由(枫香 + 枫杨)、(栾树 + 女贞)、池杉等 7 个群落属于破碎化分布，地表可燃物连续程度较低；燃烧特征反映了群落地表枯落物点燃的难易程度和热辐射情况，针叶树群落枯落物的引燃风险较阔叶树群落更高，且点燃后火势更剧烈，向外扩散的风险更大。

综合抗火能力方面，21 个群落的抗火性排序从强到弱依次为朴树 B 群落、桂花 B 群落、(梧桐 + 女贞)群落、无患子 B 群落、(栾树 + 女贞)群落、无患子 A 群落、香樟群落、(枫香 + 枫杨)群落、杜英 + 鹅掌楸)群落、朴树 A 群落、银杏群落、(银杏 + 香樟 + 女贞)群落、(蚊母树 + 杨树)群落、栾树群落、(女贞 + 无患子)群落、榉树群落 、池杉群落、三角槭群落、桂花 A 群落、女贞群落、落羽杉群落。由相同树种构成的群落在抗火性综合评价上可能存在较大差异，表明同种植物构成的群落受空间结构影响，抗火性不同。总之，地表枯落物数量越少、分布破碎化程度越高、燃烧性越弱的群落，其综合抗火能力越强。

本研究通过易于测量与观测的地表枯落物指标，快速判断群落的抗火性能，能够高效开展大量植物群落抗火性评估，便于在城市绿地的养护管理中推广与应用。根据研究结果，树木的空间分布结构对群落抗火能力影响显著。因此，在城市近郊区域的低强度绿化管养模式下，规划初期应避免植物规格过于同质化和单一分布形式，充分考虑树种的胸径及冠幅，设置植物初始阈值，为树冠生长留出足够的空间。对于已经生长稳定的机械式布局群落，应结合其生长情况，围绕优势个体，适当移除生长状况不佳的个体，并及时调控地表枯落物质量和分布，以保证群落整体的生态稳定性，提升生态体系的抗火韧性。

参　考　文　献

[1] 岳超, 罗彩访, 舒立福, 等. 全球变化背景下野火研究进展 [J]. 生态学报, 2020, 40(2): 385−401.
Yue C, Luo C F, Shu L F, et al. A review on wildfire studies in the context of global change[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(2): 385−401.

[2] 张彦林, 冯仲科, 姚山, 等. 城市森林火灾时空蔓延模型构建 [J]. 北京林业大学学报, 2008, 30(增刊 1): 27−32.
Zhang Y L, Feng Z K, Yao S, et al. Modelling on temporal and spatial spread of city forest fire[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2008, 30(Suppl.1): 27−32.

[3] Polinova M, Wittenberg L, Kutiel H, et al. Reconstructing pre-fire vegetation condition in the wildland urban interface (WUI) using artificial neural network[J]. Journal of Environmental Management, 2019, 238: 224−234.

[4] Knapp E E, Valachovic Y S, Quarles S L, et al. Housing arrangement and vegetation factors associated with single-family home survival in the 2018 Camp Fire, California[J]. Fire Ecology, 2021, 17(1): 25.

[5] 陈羚, 陈锋, 牛树奎, 等. 北京鹫峰景观格局空间特征与森林火险的关联分析 [J]. 北京林业大学学报, 2021, 43(6): 41−49.
Chen L, Chen F, Niu S K, et al. Correlation analysis between the spatial characteristics of landscape pattern and risk of forest fire in Jiufeng Forest Park of Beijing[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2021, 43(6): 41−49.

[6] Winkler J, Malovcová M, Adamcová D, et al. Significance of urban vegetation on lawns regarding the risk of fire[J]. Sustainability, 2021, 13(19): 11027.

[7] Bradstock R A, Cary G J, Davies I, et al. Wildfires, fuel treatment and risk mitigation in Australian eucalypt forests: insights from landscape-scale simulation[J]. Journal of Environmental Management, 2012, 105: 66−75.

[8] Schwilk D W, Caprio A C. Scaling from leaf traits to fire behavior: community composition predicts fire severity in a temperate forest[J]. Journal of Ecology, 2011, 99(4): 970−980.

[9] 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, 2009, 19(2): 285−304.

[10] 王参. 川西南地区主要针叶林可燃物空间分布及潜在火行为 [D]. 北京: 北京林业大学, 2016.
Wang C. Fuel spatial distribution and potential fire behavior of major coniferous forests in Southwest Sichuan, China [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2016.

[11] Fujioka F M, Weise D R, Chen S C, et al. Reaction intensity partitioning: a new perspective of the national fire danger rating system energy release component[J]. International Journal of Wildland Fire, 2021, 30: 351−364.

[12] Viedma O, Quesada J, Torres I, et al. Fire severity in a large fire in a *Pinus pinaster* forest is highly predictable from burning conditions, stand structure, and topography[J]. Ecosystems, 2015, 18(2): 237−250.

[13] 李连强, 牛树奎, 陶长森, 等. 妙峰山油松林分结构与地表潜在火行为相关性分析 [J]. 北京林业大学学报, 2019, 41(1): 73−81.
Li L Q, Niu S K, Tao C S, et al. Correlations between stand structure and surface potential fire behavior of *Pinus tabuliformis* forests in Miaofeng Mountain of Beijing[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2019, 41(1): 73−81.

[14] Yao M Q, Zhang D S, Chen Y Y, et al. Urban fire risk dynamics and mitigation strategies in Shanghai: integrating spatial analysis and game theory[J]. Land, 2024, 13: 1125.

[15] 李艳, 刘春江, 王云, 等. 环城林带的营造及其经营问题: 以上海市外环林带为例 [J]. 上海交通大学学报 (农业科学版), 2008, 26(2): 168−171, 176.
Li Y, Liu C J, Wang Y, et al. Establishment and management of

forest greenbelts in urban forest: with Shanghai's forest greenbelt as a case study[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University (Agricultural Science Edition), 2008, 26(2): 168−171, 176.

[16] 达良俊, 杨永川, 陈鸣. 生态型绿化法在上海“近自然”群落建设中的应用 [J]. 中国园林, 2004(3): 41−43.
Da L J, Yang Y C, Chen M. The method of ecological greening and its application in the construction of the approaching nature plant community in Shanghai[J]. Chinese Landscape Architecture, 2004(3): 41−43.

[17] 张凯旋. 上海环城林带群落生态学与生态效益及景观美学评价研究 [D]. 上海: 华东师范大学, 2010.
Zhang K X. Study on community ecology of Shanghai Green Belt and ecological benefits and aesthetics assessment of its plant communities [D]. Shanghai: East China Normal University, 2010.

[18] 顾泽, 王博, 陈思帆, 等. 不同火烈度火烧迹地内油松叶功能性状的变化 [J]. 应用生态学报, 2022, 33(6): 1497−1504.
Gu Z, Wang B, Chen S F, et al. Changes of leaf functional traits of *Pinus tabuliformis* in burned areas with different fire severities[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2022, 33(6): 1497−1504.

[19] Diakoulaki D, Mavrotas G, Papayannakis L. Determining objective weights in multiple criteria problems: the critic method[J]. Computers & Operations Research, 1995, 22(7): 763−770.

[20] 袁硕, 李超, 陈昊, 等. 福建省将乐县生物防火林带阻隔网空间布局与规划 [J]. 北京林业大学学报, 2020, 42(5): 88−95.
Yuan S, Li C, Chen H, et al. Spatial layout of biological fuelbreaks in Jiangle County, Fujian Province of eastern China[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2020, 42(5): 88−95.

[21] 郑焕能, 胡海清. 东北东部山地可燃物类型的研究 [J]. 森林防火, 1990(4): 10−13.
Zheng H N, Hu H Q. Study on fuel types in the mountainous areas of eastern Northeast China[J]. Forest Fire Prevention, 1990(4): 10−13.

[22] 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.
Li B Y, Liu G H, Shu L F. Simulation study on surface fire behavior of main forest types in Mentougou District, Beijing[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2022, 44(6): 96−105.

[23] 张德顺, 陈一家, 吴雪, 等. 园林树木的形态特征与阻火能力的相关性 [J]. 中国城市林业, 2020, 18(5): 23−28.
Zhang D S, Chen Y J, Wu X, et al. Correlation between morphological characteristics and fire-retardant capabilities of landscape trees[J]. Journal of Chinese Urban Forestry, 2020, 18(5): 23−28.

[24] 张德顺, 吴雪, 陈陆琪瑶, 等. 上海市常见 26 种园林树种燃烧性评价 [J]. 同济大学学报 (自然科学版), 2021, 49(10): 1399−1406.
Zhang D S, Wu X, Chen-Lu Q Y, et al. Combustibility evaluation of 26 landscape tree species in Shanghai[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2021, 49(10): 1399−1406.

[25] 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.

[26] 李泓岍, 张德顺. 园林植物防火性研究现状与展望 [J]. 中国城市林业, 2022, 20(3): 133−139.
Li H Q, Zhang D S. Research on fireproof landscape plants: progress and prospects[J]. Journal of Chinese Urban Forestry, 2022, 20(3): 133−139.

[27] Enright N J, Fontaine J B, Lamont B B, et al. Resistance and resilience to changing climate and fire regime depend on plant functional traits[J]. Journal of Ecology, 2014, 102(6): 1572−1581.

[28] 周宇峰, 周国模, 余树全, 等. 木荷林分可燃物载量空间分布的研究 [J].北京林业大学学报, 2008, 30(6): 99−106.
Zhou Y F, Zhou G M, Yu S Q, et al. Spatial distribution of combustible substance of *Schima superba* stands in Zhejiang Province, eastern China[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2008, 30(6): 99−106.

[29] Yao M Q, Zhang D S, Zhu R L, et al. Predicting the integrated fire resistance of wildland–urban interface plant communities by spatial structure analysis learning for Shanghai, China[J]. Forests, 2024, 15: 1266.

[30] Svátek M, Rejžek M, Kvasnica J, et al. Frequent fires control tree spatial pattern, mortality and regeneration in Argentine open woodlands[J]. Forest Ecology and Management, 2018, 408: 129−136.

[31] Keeley J E. , Syphard A D. Twenty-first century California, USA, wildfires: fuel-dominated vs. wind-dominated fires[J]. Fire Ecology, 2019, 15(1): 24.

[32] Gissi E, Manea E, Mazaris A D, et al. A review of the combined effects of climate change and other local human stressors on the marine environment[J]. Science of the Total Environment, 2020, 755(1): 142564.

（责任编辑 范 娟
责任编委 李 雄）