综述

城市绿化群落抗火性研究现状与展望*

张德顺[1] 朱瑞琳[1] 姚鳗卿[1] 张 振[1] 胡 菊[1,2]

1 同济大学建筑与城市规划学院 上海 200092

2 玉林师范学院智慧农业学院 广西玉林 537000

摘要：随着全球气候逐年变暖和城市化进程的加速，绿化火灾的频发性、严重性、广泛性和多变性愈发凸显。植物群落是城市绿地系统应对气候变化的关键单元，具有助燃和抑火的双重属性。文章在对国内外关于植物群落抗火性表现、抗火性研究及评价等方面综合分析的基础上，探讨目前我国植物群落抗火性研究中存在的不足，并结合植物群落空间结构、预测模型等提出进一步深化研究的方向，为城市绿地火灾防控提供理论基础和技术对策。

关键词：植物群落；抗火性；水平结构；垂直结构；群落尺度

DOI：10.12169/zgcsly.2024.06.18.0003

Research Status and Prospects of Fire Resistance in Urban Greening Community

Zhang Deshun[1] Zhu Ruilin[1] Yao Manqing[1] Zhang Zhen[1] Hu Ju[1,2]

(1. College of Architecture and Urban Planning, Tongji University, Shanghai 200092, China;
2. College of Smart Agriculture, Yulin Normal University, Yulin 537000, Guangxi, China)

Abstract: As the global warming intensifies and the urbanization process accelerates, fires in urban green spaces have increased frequency, severity, extensiveness and variability. Plant community is the key unit of urban green space to address climate change, which has the dual properties of combustion-supporting and fire suppression. The paper makes a comprehensive analysis of fire resistance performance of plant communities as well as the national and international research evaluation on fire resistance, discusses the shortcomings of current research on the fire resistance of plant communities in China, and proposes the direction of future in-depth research in consideration of the spatial structure of plant communities and the use of prediction models. The aim is to provide a theoretical basis and technical countermeasures for fire prevention in urban green spaces.

Keywords: plant community; fire resistance; horizontal structure; vertical structure; community scale

当前，全球气候逐年变暖趋势有增无减。据全球气候模型预测，至 2050 年，所有城市均会趋向亚热带气候，其中 22%的城市将经历未曾出现过的气候状况[1]。未来，高温热浪、干旱少雨以及热岛效应的叠加将使火灾风险显著增加，火灾间隔缩短，强度增大，持续时间延长。同时，复杂气候条件下，我国城市环境因人口稠密、建筑密度大，火灾隐患会越来越凸显。2021 年，我国共接报火灾 74.8 万起，近 2 000 人死亡，其中城市火灾起数和死亡人数占比分别为 45.4% 和

收稿日期：2024-06-18

* 基金项目：国家自然科学基金（32071824）；2024 年同济大学研究生教材建设项目（2024JC07）；同济大学中央高校基本科研业务费专项资金（22120240668）

第一作者：张德顺（1964- ），男，博士，教授，研究方向为城市生态安全与风景园林规划设计。E-mail：zds@ tongji. edu. cn

通信作者：胡菊（1986- ），女，博士，讲师，研究方向为园林植物应用。E-mail：1029191614@ qq. com

49%[2]。气候变化和城市化成为火灾风险与日俱增的重要原因，而城市火灾对人类健康、经济活动和生态环境造成的严重威胁也如日剧增。

植物可通过一系列应对环境变化的直接反应和调节种间关系的间接反应，实现群落变化并反作用于环境，有效缓解气候变化的负面效应[3]。植物群落是植物间、植物与环境间相互作用、相互适应的结果，具有自我修正和恢复的能力，是城市绿地系统应对气候变化的关键单元[4]。火作为生态系统的一种自然因素，将引起群落内光、温、水、土等生态因子的改变，植物群落也将演化出一系列应对火灾的适应机制，但对火的适应能力存在一定限度，受到群落本身特性、火灾时间和强度的影响[5]。近年来，随着绿水青山及生态文明建设的推进，我国城市近郊绿化覆盖率高，可燃物数量多，加之人与绿地的交互频繁，火险等级升高且管控难度逐步加大。

自 1930 年以来，关于植物防火性的研究主要集中在森林（生物防火），其中野火发生的概率预测及对森林生态系统的破坏与恢复影响、不同植被类型对野火的抗性是重中之重。然而，随着全球气候变化不断加剧、森林城市建设的持续推进和城镇化进程的大幅扩展，城市与森林交界面（Wildland Urban Interface，WUI）全面延展，WUI 火灾成为一个紧迫且严重的问题[6]。城市森林火灾属于 WUI 火灾中的一类，因地理位置在市郊或市区，人类活动极大地增加了此类火灾发生的可能性，一旦发生火灾将对整个城市的经济、环境、安全造成巨大威胁[7]。其中，人类活动在城市森林火灾发生因素中占比最大，这也是区别于森林火灾的主要燃烧因素，二者防火性区别主要体现在可燃物类型与环境上：城市森林和森林组成中均有乔灌草的复层结构，但乔灌草各层的植物种类不同，例如前者中的乔木常见绿化树种较后者更为广泛；城市森林立地环境大部分地形平坦、环境简单，火灾相对易控制，而森林火灾因其特殊的地理、气候环境（地形起伏、大风干旱等），火势更复杂，难于驾驭[7]。以上海为例，市郊区域的火灾发生率远高于中心城区，且死亡和受伤人数也最多[8]。绿地群落可通过科学规划与管理，提升抗火能力，减少火灾风险，应对气候变化，强化城市生态安全格局。然而，目前关于城市绿地群落火灾的相关研究较少。因此，积极开展抗火植物群落研究，是应对 WUI 及城市绿地群落火灾风险的有效对策。

1 植物群落抗火性表现

植物群落在与火的共生中演化出了独特的抗火机制，维持着自身的正常进化和演替。例如热带疏林草原通过每 1~5 年重现的火灾来维系草与树木的平衡，避免被森林群落取代[9]。植物群落不易燃烧的特性及阻止火蔓延的能力表现在物种构成和空间结构两个因素上，综合表现为群落类型的差异[10]（图 1）。

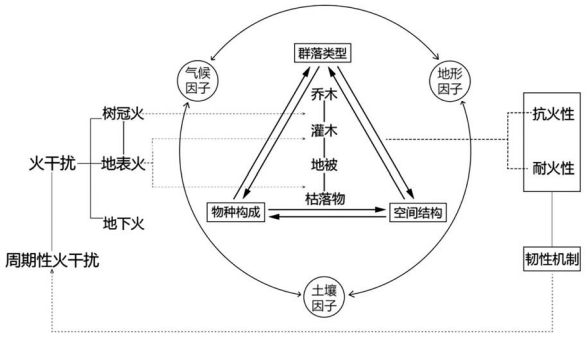


图 1 群落应对火灾的韧性机制

1.1 物种构成

抗火物种可通过形态特征实现其抗火性，其中树皮厚度是被广泛认可的衡量树木抗火性的形态指标，厚树皮能够保护形成层和茎芽免受辐射热的伤害[11]。樟子松（*Pinus sylvestris*）经低强度地表火刺激后，树皮变厚，抗火性增强[5]。刘朗等[12]发现树皮越厚、含水率越高，树种抗火性越强。张德顺等[13]指出树木形态也是影响树木防火能力的重要指标之一，其中树冠直接影响树木的阻火能力。此外，深根性树木可利用土壤层保护根系、地下茎和芽，而部分在火灾高发季进入休眠期的植物，其深埋的球茎借助土壤隔热，可躲避火灾[14]。

1.2 空间结构

空间结构可直接或间接影响燃烧条件，从而影响火灾的严重程度。野火从海岸松（*Pinus pinaster*）灌木混交林转移至邻近的阔叶和短针叶混交林时，火灾严重程度显著降低[15]。群落空间结构分为水平结构和垂直结构（表 1），在各群落

空间结构的综合作用下，直接或间接改变火灾的可燃物和火环境，影响火行为[16-17]。火灾发生需同时具备可燃物、火环境和火源 3 要素[18]，群落空间结构可有效调节其中两要素，即火环境和火源（图 2），在一定程度上反映抗火性能。

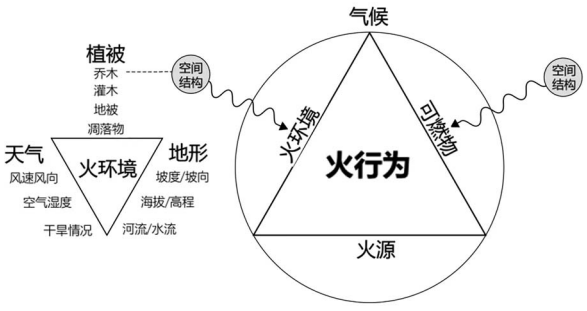


图 2　火灾 3 要素与群落生态结构的关系

1）水平结构。水平结构是群落在空间的水平分化或镶嵌现象，又称镶嵌植物群落或斑块[19]。冠层结构影响地被层和灌木层生长，而地被层作为精细化燃料对群落抗火性尤为关键[16]。乔木层的盖度表征之一为郁闭度，较低的郁闭度利于草类生长及林下风穿行，形成利于火燃烧和蔓延的微气候[16-17]。火灾蔓延受林分结构和组成及景观异质性的影响，而空间异质性导致镶嵌植物群落内微气候和可燃物水平分布差异，使火在蔓延过程中不断变化，结合物种丰富度可说明植物种群在空间分布的不均匀性[20-22]。目前关于物种丰富度与群落抗火性的研究主要聚焦在树种多样性，研究表明针阔混交林的火灾抵抗力强于针叶纯林[16,21-22]。

2）垂直结构。垂直结构是群落在空间的垂直分化或成层现象[19]。群落表现出的垂直连续性，即可燃物在垂直方向上的空间分布，决定了火灾强度是否会跃升[17]。冠层高度是垂直结构影响火行为的重要因子，可通过减少树木枝叶被火焰引燃概率增强抗火性[16-17]。

表 1　植物群落空间结构对抗火性的影响

生态结构		主要结论	表征因子	火灾要素	火行为
水平结构	植被盖度	乔木层：封闭式冠层雨林具有阻燃性[23]；树木覆盖率超过 40%时可燃性急剧下降[24] 灌木层与地被层：不同耐荫树种混合的群落可抑制林下植物生长，减少精细化燃料[16]；随树木覆盖率增加群落可燃性下降[17]；多次火灾的西黄松（*Pinus ponderosa*）林中，地表草本和灌木首先被清除，火灾频率或强度增加[25]	郁闭度 叶面积指数 灌木盖度 草本盖度	可燃物空间分布 可燃物负荷量 微气候	着火难度
	乔木密度	稀树草原的周期性火灾优先燃烧孤立生长的树木，表现与树木密度相关的火后死亡率[26]；热带稀树草原通过周期性的火灾频率和强度保持较低的树木密度[17]	乔木密度 基部盖度	可燃物空间分布	着火难度 火强度
	空间异质性	水平燃料连续性影响火灾蔓延速度[27]；稀树草原中的森林斑块微气候潮湿、草本层稀疏、落叶层较深，不易发生火灾[23]；更具耐火性物种的存在，有助于限制火焰蔓延[16,28]	异质性指数 物种出现频率	可燃物空间分布 微气候	火蔓延 着火难度
	物种丰富度	相比纯针叶树，火灾频发区的针阔叶混交林能提高火灾抵抗力，不易发生火灾[16]；混交林中的火灾程度和强度往往较低[16,22]	Simpson 指数 Shannon-wiener 指数	可燃物特性 微气候	着火难度 火强度
垂直结构	冠层结构	兴安落叶松（*Larix gmelinii*）可燃物总载量与平均胸径、平均树高、草本盖度、凋落物厚度呈显著正相关[29]；低于 3 m 的树木大概率树冠被烧毁并死亡，而高于 3 m 的树木遭受的伤害可忽略不计[30]；任何火灾发生后，5 m 以上树木均未出现树冠烧焦[23]	冠层平均高度 冠层基部高度	可燃物负荷量 微气候	着火难度 火强度 火蔓延
	林下结构	多物种组成的多层林分可产生“燃料阶梯”，增加火灾发生概率，通过光能截获可限制林下植被发展，降低地表火灾强度[16]	灌木平均高度 草本平均高度	可燃物负荷量	火强度
	垂直连续性	添加阶梯燃料将增加垂直燃料的连续性，影响火灾的强度及空间范围[27,31]	垂直连续性指数	可燃物空间分布	火强度 火蔓延

2　群落尺度的植物抗火性

植物抗火性研究可分为微观物种、宏观景观和中观群落 3 个尺度。20 世纪 60 年代，已在微观物种层面开展相关研究[10]。Catry 等[32]对葡萄牙中西部一处遭遇火灾的森林进行 4 年监测，最终 92% 的阔叶树存活，其中蓝桉（*Eucalyptus globulus*）、窄叶梣（*Fraxinus angustifolia*）、木樨榄（*Olea europaea*）、大西洋黄连木（*Pistacia atlantica*）4 年存活率均达 100%；李修鹏等[33]测

定了宁波地区的 29 种木本植物抗火性指标，其中大叶冬青（*Ilex latifolia*）的性状及燃烧防火综合值均最高。随着生态学的兴起，植物抗火性研究上升到景观尺度，重点关注斑块如何通过景观空间影响林火的发生和蔓延[34]。同时，随着地理信息系统、遥感技术、计算机算力和人工智能的发展，景观格局与火灾风险的量化分析也不断进步[35]。Pais 等[36]借助智利火灾地点及土地覆盖类型数据，通过卫星遥感影像识别出火灾高发地点。

群落作为连接物种和景观的桥梁，重要性不言而喻。目前，群落尺度抗火性研究可分为两类。一是火灾对植物群落的影响，研究人员已经发现一些具有良好抗火性的物种或物种特征。张德顺等[37]基于树种防火能力、阻燃特征等提出，上海市金山区防火型城市防护绿地树种为香樟（*Camphora officinarum*）、雪松（*Cedrus deodara*）、水杉（*Metasequoia glyptostroboides*）和紫叶李（*Prunus cerasifera* ‘Atropurpurea’）等；李小川等[38]指出白颜树（*Gironniera subaequalis*）、枫香（*Liquidambar formosana*）、秋枫（*Bischofia javanica*）、麻楝（*Chukrasia tabularis*）、吊瓜树（*Kigelia africana*）和蝴蝶果（*Cleidiocarpon cavaleriei*）在珠三角洲地区火烧迹地等不同类型林地中具有较高的抗火性，可作为城市林业生物防火推荐树种。然而，目前的研究大多仍在关注物种个体，尚未关注物种间的相互作用对火灾的影响。二是植物群落特征对火灾严重性的影响，目前仍集中在有限的参数上，关注较多的是林分结构（表 2）。

表 2 植物群落特征对火灾严重性的影响

研究对象			气候类型/研究地点	植被类型	主要结论	参考文献
火灾要素	植物要素	其他要素				
潜在火行为	群落类型、林分结构、可燃物特性（负荷量、垂直连续性、密度）	地形（坡向、海拔）	亚热带季风气候/中国川西南地区	针叶林（下层分布有灌木和草本）	环境因子和林分特征对森林可燃物的空间分布有明显影响，主要针叶林可燃物表现出明显差异，部分林型在同等燃烧条件下更易发展为树冠火	王叁[39]
	群落类型、植被种类、植被分布	地形、风速与风向	地中海气候/法国	松树－灌木混交林	清理灌木丛可减轻火灾强度和传播，并减少乔木及植物损害；地形和风综合影响时，修剪灌木丛对火蔓延的减缓作用降低	Ganteaume 等[40]
火灾严重程度	林分结构（树木种类、树木密度、胸径、基部盖度、林分高度）	地形（坡度、坡向、坡位、海拔）	地中海气候/西班牙西北部	松树－灌木混交林与少量的阔叶林	火灾严重程度与植被覆盖类型显著相关，阔叶林的火灾严重程度远低于针叶林	Fernandes 等[15]
	林分结构（胸径、林分平均高度、物种丰富度、林分异质性、精细生物量）	地形气候状况	温带大陆性气候/西班牙中部、瓜达拉哈拉省	以海岸松为主的松树林	火灾严重程度是气候条件、林分结构和地形相互作用的结果，且三个因子对火灾严重程度的影响依次降低	Viedma 等[31]
	叶片特征（树种、叶长、叶宽、叶面积）	地形（高程、坡度、年总太阳辐射量）	地中海气候/美国加州、内达华山脉	针叶混交林	叶长显著影响火灾严重程度，平均叶长较长的群落火灾严重程度更高	Schwilk 和 Caprio[41]
火灾频率	群落生产力、物种繁殖类型（火后萌芽/火后再生）	气候（降水、气温）	地中海气候/澳大利亚东南部	灌木林下层草本	生产力下降改变了可燃物结构，也减少了火灾频率	Pausas 和 Bradstock[42]
地表潜在火行为	林分结构：乔木层（胸径、树高、枝下高、冠幅、冠长率）；灌木层（密度、盖度、株数、高度）；草本枯枝落叶层（床层高度、高度、紧密度）	地形（海拔、坡度、坡向、坡位）	暖温带半湿润半干旱季风气候/中国北京妙峰山林场	油松林	地表潜在火行为大小主要受地上可燃物影响，尤其是草本枯枝落叶层，而乔木层的影响相对较小	李连强等[43]

3 植物抗火性评价

3.1 抗火性测定

植物抗火性测定实验包括火烧迹地调查法、野外燃烧实验和室内小型燃烧实验 3 类。

1）火烧迹地调查法。此调查法是统计乔木遭遇火灾后的存活情况，筛选抗火性良好的树种，并分析影响火行为的关键因子[15,41]。刘朗等[12]统计了城市园林绿地火烧迹地上被烧乔木的烧伤程度，筛选出国槐（*Styphnolobium japonicum*）、皂角

（*Gleditsia sinensis*）和柿树（*Diospyros kaki*）3 种抗火性较高的树种，且发现树种抗火性与树皮含水率及厚度相关。

2）野外燃烧实验。受实施难度和危险性的限制，野外燃烧实验应用较少。Enright 等[44]设置 4 m×4 m 的样方火灾实验指出，地中海气候区灌木林火灾后仅依靠幼苗补充来维持生存的物种更易发生局部死亡。

3）室内小型燃烧实验。相比前两种方法，室内小型燃烧实验可操作性与安全性较强，是抗火性研究的主流手段。张德顺等[45]测定了上海常见园林树种的热值、燃烧时间和温度变化，加上含水率、树皮厚度和比叶面积，通过聚类分析将 26 种树种综合抗火表现分为强（喜树（*Camptotheca acuminata*）等 7 种）、中（苦楝（*Melia azedarach*）等 4 种）、差（龙柏（*Sabina chinensis*‘Kaizuca’）等 15 种）3 类；Prior 等[46]从澳大利亚 133 个地点收集草和垃圾燃料样本烘干，并在室内受控条件下燃烧，同时测量着火性、可燃性和持续性，发现草比垃圾燃料燃烧得更快、传播率更高，且热带地区的火灾频率和草燃料的燃烧速率最高，而温带地区的火灾强度和垃圾燃料燃烧过程中的温度最高。

3.2　抗火性评价方法

目前，植物抗火性评价研究主要从两方面开展。

1）基于实测数据结合统计分析方法构建植物抗火性综合评价体系。张德顺等[45]基于枝条、叶片、树芯燃烧性指标，结合聚类分析将 26 种园林树种分为防火能力强、中、差 3 类；李艳芹和胡海清[47]基于理化性质，通过主成分分析和专家打分法指出 19 种乔木中燃烧性最强的是樟子松、红松（*Pinus koraiensis*）、红皮云杉（*Picea koraiensis*）、落叶松（*Larix gmellinii*）。

2）基于抗火性综合评分探究影响抗火性的重要因子，建立预测模型。Burton 等[48]通过构建分段式结构方程模型，发现地表枯落物的叶片卷曲度、密度、表面积与体积比是影响其燃烧属性的重要因素；李修鹏等[33]结合皮尔逊相关分析和偏相关分析，发现比叶面积和叶干物质含量可有效指示树种的抗火性，并基于上述性状指标构建了防火评分模型。

4　展望

目前，植物群落抗火性研究虽已取得了大量成果，但仍存在不足。今后可从以下方面进行针对性研究：

1）进一步分析空间结构等特征。相比研究成果相对丰富、研究方法相对成熟的物种尺度与景观尺度植物抗火性研究，群落尺度常将抗火特性归因于物种构成，而未对空间结构等特征进一步分析。根据文献梳理结果，群落空间结构可通过影响林下植物生长、可燃物分布和林内微气候，对可燃物和燃烧条件产生影响，对火蔓延产生关键作用。基于群落空间特征的植物抗火性研究应重点关注，并在现阶段物种尺度研究成果基础上，进一步关注群落特征对抗火性的影响，同时深化群落尺度研究，提升景观尺度研究的精细度[49]。

2）构建和深化植物群落抗火性综合评价体系。群落空间结构与可燃物质量间的关系已有相关研究，但可燃物质量难以真实且全面地反映植物群落的抗火性。应进一步筛选表征群落抗火性的指标，构建和深化植物群落抗火性综合评价体系。目前，针对植物物种的抗火性研究已有较完善的指标体系和评价方法，可在此基础上进行借鉴和迁移，对群落抗火性进行深入研究[50-51]。

3）建立直观、简单判定植物群落抗火性的预测模型。当下常用的植物抗火性评价方法操作繁琐，其中火灾迹地调查法需大量的实地调研与数据统计来确保分析结果的可信度，工作量大；室内燃烧实验的指标测定和分析冗杂，不利于在实践中推广。不少学者已尝试以环境因子或植物群落空间结构因子为自变量，构建群落可燃物预测模型，可在此基础上选定便于测量的直观指标（如群落空间结构），建立通过直观观察和简单测定便可初步判定植物群落抗火性的预测模型。

4）应用云计算、大数据、AI 和数字孪生等技术，为火灾监测与预防提供新方法。多源数据（遥感、无人机、气象、传感器）的协同会显著提升火灾动态感知精度，有助于科学管控绿化火灾，提升可持续和韧性战略。

参考文献

[1]BASTIN J F,CLARK E,ELLIOTT T,et al.Understanding climate change from a global analysis of city analogues[J].PLoS One,2019,14(7):e0217592.

[2]牛甜辉,耿佃桥,苑轶,等.基于火灾痕迹的起火点判定研究现状及展望[J].中国安全科学学报,2024,34(1):238-246.

[3]ESPELAND E K,KETTENRING K M.Strategic plant choices can alleviate climate change impacts: a review [J]. Journal of Environmental Management,2018,222:316-324.

[4]REINER T,WEST C.Planting in a post-wild world: designing plant communities for resilient landscapes[M].Portland:Timber Press,2015.

[5]胡海清.林火生态与管理[M].修订版.北京:中国林业出版社,2005.

[6]袁惠,钟少波,靳薇.基于文本挖掘的WUI火灾致灾因子网络构建及特征分析[J].计算机系统应用,2024,33(6):251-258.

[7]鞠伟轶,吴洁,王龙帅,等.基于AHP与历史灾情数据的城市森林火灾风险评估[J].工业安全与环保,2022,48(7):16-20.

[8]崔小璐.特大城市火灾的社会特征及治理研究:以上海为例[J].武汉大学学报(哲学社会科学版),2016,69(1):32-45.

[9]BOND W J,SMYTHE K A,BALFOUR D A.*Acacia* species turnover in space and time in an African savanna[J].Journal of Biogeography,2001,28(1):117-128.

[10]田晓瑞,舒立福.防火林带的应用与研究现状[J].世界林业研究,2000,13(1):20-26.

[11]MOREIRA F,DUARTE I,CATRY F,et al.Cork extraction as a key factor determining post-fire cork oak survival in a mountain region of southern Portugal[J].Forest Ecology and Management,2007,253(1/2/3):30-37.

[12]刘朗,刘林,马风云,等.城市绿化树种抗火性能研究[J].森林防火,2015(2):25-29.

[13]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.

[14]WEAVER H.Fire as an ecological and silvicultural factor in the Ponderosa-Pine Region of the Pacific Slope [J]. Journal of Forestry,1943,41(1):7-15.

[15]FERNANDES P M,LUZ A,LOUREIRO C.Changes in wildfire severity from maritime pine woodland to contiguous forest types in the mountains of northwestern Portugal[J].Forest Ecology and Management,2010,260(5):883-892.

[16]JACTEL H,BAUHUS J,BOBERG J,et al.Tree diversity drives forest stand resistance to natural disturbances [J]. Current Forestry Reports,2017,3(3):223-243.

[17]HOFFMANN W A,GEIGER E L,GOTSCH S G,et al.Ecological thresholds at the savanna-forest boundary: how plant traits, resources and fire govern the distribution of tropical biomes[J]. Ecology Letters,2012,15(7):759-768.

[18]KITZBERGER T,BROWN P M,HEYERDAHL E K,et al. Contingent Pacific-Atlantic Ocean influence on multicentury wildfire synchrony over western North America[J].Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America,2007,104(2):543-548.

[19]王伯荪.植物群落学[M].北京:高等教育出版社,1987.

[20]FERNANDES P M,CRUZ M G.Plant flammability experiments offer limited insight into vegetation-fire dynamics interactions[J]. New Phytologist,2012,194(3):606-609.

[21]牟晓明,于应文,王先之,等.青藏高原火绒草斑块群落空间格局分析[J].生态学报,2015,35(16):5306-5315.

[22]SILVA J S,MOREIRA F,VAZ P,et al.Assessing the relative fire proneness of different forest types in Portugal [J]. Plant Biosystems-an International Journal Dealing with All Aspects of Plant Biology,2009,143(3):597-608.

[23]FENSHAM R J,FAIRFAX R J,BUTLER D W,et al.Effects of fire and drought in a tropical eucalypt savanna colonized by rain forest[J].Journal of Biogeography,2003,30(9):1405-1414.

[24]ARCHIBALD S,ROY D P,VAN WILGEN B W,et al.What limits fire? An examination of drivers of burnt area in Southern Africa[J].Global Change Biology,2009,15(3):613-630.

[25]LARSON A J,TRAVIS BELOTE R,ALINA CANSLER C,et al. Latent resilience in ponderosa pine forest: effects of resumed frequent fire[J].Ecological Applications,2013,23(6):1243-1249.

[26]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.

[27]BROOKS M L,D'ANTONIO C M,RICHARDSON D M,et al. Effects of invasive alien plants on fire regimes[J].BioScience,2004,54(7):677-688.

[28]AZEVEDO J C,POSSACOS A,AGUIAR C F,et al.The role of holm oak edges in the control of disturbance and conservation of plant diversity in fire-prone landscapes[J].Forest Ecology and Management,2013,297:37-48.

[29]陈宏伟,常禹,胡远满,等.大兴安岭呼中林区森林死可燃物载量及其影响因子[J].生态学杂志,2008,27(1):50-55.

[30]DE BOOYSEN P V,TAINTON N M.Ecological effects of fire in South African ecosystems [M]. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg,1984

[31]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.

[32]CATRY F X,REGO F,MOREIRA F,et al.Post-fire tree mortality in mixed forests of central Portugal[J].Forest Ecology and Management,2010,260(7):1184-1192.

[33]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.

[34]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.

[35]GUSTAFSON E J.How has the state-of-the-art for quantification of landscape pattern advanced in the twenty-first century? [J]. Landscape Ecology,2019,34(9):2065-2072.

[36]PAIS C,MIRANDA A,CARRASCO J,et al.Deep fire topology: Understanding the role of landscape spatial patterns in wildfire occurrence using artificial intelligence [J]. Environmental Modelling & Software,2021,143:105122.

[37]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):19-24.

[38]李小川,吴泽鹏,陈宏通,等.广东省珠江三角洲城市森林抗火树种筛选研究[J].热带亚热带植物学报,2003,11(4):316-318.

[39]王叁.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.

[40]GANTEAUME A,GUILLAUME B,GIRARDIN B,et al.CFD modelling of WUI fire behaviour in historical fire cases according to different fuel management scenarios[J].International Journal of Wildland Fire,2023,32(3):363-379.

[41]SCHWILK D W,CAPRIO A C.Scaling from leaf traits to fire behaviour: community composition predicts fire severity in a temperate forest[J].Journal of Ecology,2011,99(4):970-980.

[42]PAUSAS J G,BRADSTOCK R A.Fire persistence traits of plants along a productivity and disturbance gradient in Mediterranean shrublands of south-east Australia [J]. Global Ecology and Biogeography,2007,16(3):330-340.

[43]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.

[44]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.

[45]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.

[46]PRIOR L D,MURPHY B P,WILLIAMSON G J,et al.Does inherent flammability of grass and litter fuels contribute to continental patterns of landscape fire activity? [J].Journal of Biogeography,2017,44(6):1225-1238.

[47]李艳芹,胡海清.帽儿山主要树种燃烧性分析与排序[J].东北林业大学学报,2010,38(5):34-36.

[48]BURTON J E,CAWSON J G,FILKOV A I,et al.Leaf traits predict global patterns in the structure and flammability of forest litter beds[J].Journal of Ecology,2021,109(3):1344-1355.

[49]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(7):1266.

[50]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(8):1125.

[51]ZHANG D S,YAO M Q,CHEN Y Y,et al.The role of urban vegetation in mitigating fire risk under climate change: A Review[J].Sustainability.2025,17:2680.