

气候变化背景下上海行道树风险评估及管理策略研究

Research on Risk Assessment and Management Strategy of Shanghai Street Trees in the Context of Climate Change

李楠¹ 郭文婷¹ 贺坤^{1*} 王本耀^{2*}
LI Nan¹ GUO Wenting¹ HE Kun^{1*} WANG Benyao^{2*}

(1.上海应用技术大学生态技术与工程学院, 上海 201418; 2.上海市绿化管理指导站, 上海 201020)
(1. School of Ecological Technology and Engineering, Shanghai Institute of Technology, Shanghai, China, 201418; 2. Shanghai Greening Management Guidance Station, Shanghai, China, 201020)

文章编号: 1000-0283(2024)11-0092-10
DOI: 10.12193/j.laing.2024.11.0092.012
中图分类号: TU986
文献标志码: A
收稿日期: 2024-03-12
修回日期: 2024-04-30

摘要

气候变化导致极端天气频发、降水模式改变等,直接或间接影响了城市行道树的健康和安全,导致城市行道树具有潜在的危险性和较高的风险不确定性,城市树木的风险管理面临着巨大挑战。提升行道树风险管理能力是推动城市文明治理的重要步骤。立足于气候变化背景,结合当前国内外对树木风险管理的实践经验和前沿研究,分析行道树风险发生的内外因素。为有效评估行道树风险,提出一种基于各指标因子与行道树风险等级相关性的风险评估模型。基于模型的理论分析和逻辑推理,综合考虑行道树生长环境、风险状况等因素,结合上海地区的实际情况,提出城市行道树全生命周期风险管理的应对策略:因地制宜地制定树种规划和加强理论研究、积极探索气候变化下多暴露因子指标的行道树风险评估方法、提升组织架构和构建完备的风险管理体系,并有效探讨行道树风险的管理机制。以为国内行道树管理水平的提升提供理论支撑,为政府制定相关制度和体系建设提供实践参考。

关键词

气候变暖; 极端天气; 树木风险; 管理策略; 上海

Abstract

Climate change has led to frequent extreme weather and changes in precipitation patterns, which directly or indirectly affect the health and safety of urban street trees, resulting in potential hazards and high-risk uncertainty of urban street trees, and the risk management of urban trees is facing significant challenges. Improving the risk management capability of street trees is a crucial step to promote the civilized governance of cities. Based on the background of climate change, combined with the current practical experience and cutting-edge research on tree risk management at home and abroad, this paper analyzes the internal and external factors of street tree risk. To effectively evaluate the risk of street trees, a risk assessment model was proposed based on the correlation between each index factor and the risk level of street trees. Based on the theoretical analysis and logical reasoning of the model, comprehensively considering the growth environment and risk status of street trees, combined with the actual situation in Shanghai, this paper puts forward the coping strategies for the whole life cycle risk management of urban street trees: formulating tree species planning and strengthening theoretical research according to local conditions, actively exploring the street tree risk assessment method with multiple exposure factor indicators under climate change, improving the organizational structure and constructing a complete risk management system, and effectively discussing the management mechanism of street tree risk. In order to provide theoretical support for improving the management level of street trees in China and provide a practical reference for the government to formulate relevant systems and systems.

Keywords

climate change; extreme weather; tree risk; management strategies; Shanghai

李楠

1998年生/女/山东济南人/在读硕士研究生/研究方向为城市树木风险评估

贺坤

1982年生/男/山东潍坊人/副教授/研究方向为园林植物应用及城市绿地健康

王本耀

1986年生/男/山东青岛人/高级工程师/研究方向为绿化技术研究与管理

*通信作者 (Author for correspondence)
E-mail: 652755713@qq.com; wangbenyao@163.com

基金项目:

上海市科技创新行动计划“基于复合生态效益的城市树木(行道树)生态应用关键技术研究”(编号: 19DZ1203701); 上海建工集团重点研发课题“多生境多要素多目标协同的植物园林景观营造关键技术与示范”(编号: 22JCSF-27)

作为社会要素高度集中区域,城市在给人们提供便利的同时也孕育着风险。在全球气候变化和快速城市化进程背景下,随着城市人员集聚程度增加,加之城市热岛效应、雨岛效应显著,特别是以高温热浪、强降雨、风暴潮为主的极端天气和其他灾害频发,气候变化导致的安全隐患对居民安全也产生威胁。城市绿化是城市基础设施的重要组成部分,行道树作为城市绿化的骨架,能够迅速适应城市环境中的各种条件和限制,为城市居民和各类生物提供绿色舒适的环境,对改善城市生态环境、保护生态平衡具有重要意义。然而,气候变化给行道树带来了风险不确定性和潜在危机。降雨减少和气温升高可能会威胁城市树木的健康和生存^[1],气候压力(高温或干旱)和昆虫破坏增加树木死亡的风险^[2],而台风带来的大风、暴雨等使不健康或者有风险的树木发生倒伏、断枝等现象,砸伤路人的事故常有发生。因此,气候变化适应下的树木风险管理逐渐成为当前国际社会的关注重点。近年来,众多学者围绕着气候变化下的城市树木风险,开展应对气候变化下的某类特殊灾害对于树木健康和死亡的影响等研究^[3-7]。中国香港地区提出“以地点为本”和“以树木为本”的城市树木风险评估及管理措施^[8],上海^[9]、广州^[10]等地也开展定期的城市树木精准检测和风险评估工作,搭建城市树木健康诊断和风险预警平台。但多数研究还停留在定性评估树木风险以及风险被动防御研究^[11-13],缺乏系统全面的气候变化影响下的城市树木风险管理机制,在管理机制的理论研究和实践方面存在不少缺环。

上海是典型的沿海大三角洲气候脆弱带,梅雨、台风、暴雨、热浪、风暴潮等极端天气气候事件频发,是气候灾害、海洋灾

害、环境灾害的高风险地区。而且,地域狭小、人口集中、建筑密集,经济要素聚集度高,同其他城市相比面临着更为严峻的城市风险治理形势。基于气候变化特点和保障公共安全的现实需求,开展上海树木风险机制研究具有一定的代表性和实践意义。行道树是城市树木的重要组成部分,也是风险相对较大的一类城市树木,相比于其他城市树木面临更多的风险隐患。行道树的生长位置比较特殊,更易受到道路交通、根系受限、土壤条件差、人为干扰和病虫害传播等多重压力的影响。为了更好地应对行道树的健康生长和风险控制,政府每年投入大量的人力、物力作为保障,这增加了城市管理负担。目前上海不断探索城市管理的新模式,尤其是在精细化管理方面取得显著成效,行道树作为上海特别是中心城区的一张绿化名片,科学有效地管理行道树,不仅关乎城市绿化的质量提升和应用效果,更与改善市民生活质量、满足市民对美好生活的向往和需求息息相关。因此,主动应对气候变化,分析气候变化背景下行道树风险的形成机理,搭建行道树风险管理的基本框架,结合上海地区的实际情况提出全周期的城市行道树风险管理模式,对于未来的城市树木安全管理具有重要的现实意义。

1 行道树风险形成机理和风险源识别

科学识别行道树风险源是开展风险评估和制定风险管理机制的重要前提。气候变化背景下气候灾害发生几率增长,高密度的城市建设压缩了行道树的生长空间,台风、暴雨、热浪等极端天气的加持导致行道树出现树干折断、树体倒伏等,威胁到车辆和行人安全。以上海为例,夏季有台风、暴雨、强对流、高温热浪,秋冬季有雾霾、低温、雨

雪冰冻等气候灾害。从对树木造成的风险而言,台风对上海造成的树木倒伏损失最大。此外,雷电、暴雨造成的树木倒伏等也较为严重。

国内外学者分别从树木抗性^[14-15]、环境影响^[16-17]、土壤理化性质^[18]以及行道树养管^[19]等方面对树木风险机理进行研究,但更多的是关注树木本身的脆弱性,忽略气候变化这一关键因素所带来的影响。基于气候变化对树木健康生长的影响,行道树风险按影响因素来源的不同可以分为外部和内部风险源两类。此外,管理不当叠加内外部风险源导致行道树发生风险的可能性也会更高^[20](图1)。

1.1 外部风险源引发的树木风险

以上海为例,导致行道树发生风险的外部风险源除城市建设和行道树立地环境之外,还包括台风、暴雨、高温热浪等极端气候。

(1) 台风、暴雨等极端天气威胁行道树安全。上海地处中国东部沿海,平均每年遭遇台风2~5次。作为具有不可抗力的自然灾害,台风对城市绿地系统造成极大影响和破坏。例如,2019年超强台风“利马奇”造成上海3.6万株树木倒伏;2021年台风“烟花”导致全市2万多株树木倒伏,其中行道树倒伏7600多棵;2023台风“黑格比”导致上海树木倒伏460多棵,断枝1410棵。预计未来20年,上海强降雨的日数和强度都会呈增加趋势,这些典型台风、暴雨导致的树木倒伏均会导致交通堵塞、建筑和汽车等设施损坏,对城市运行和居民安全造成巨大危害。

(2) 高温热浪和干旱等影响行道树的生长和健康。城市气温升高导致行道树处于生

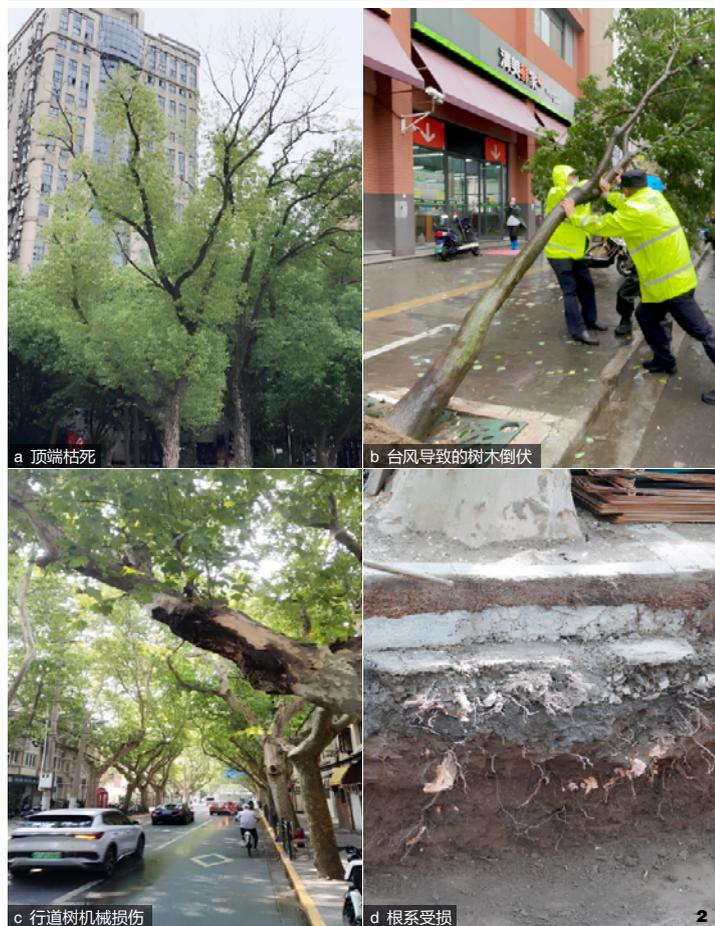
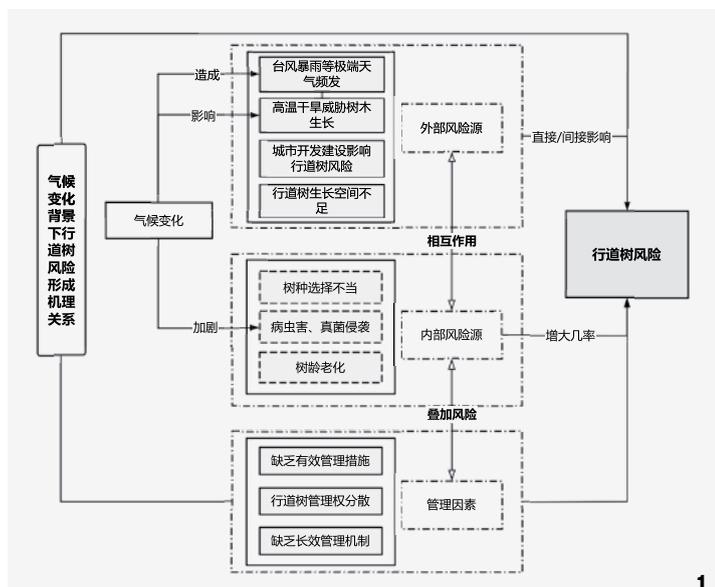


图1 气候变化背景下行道树风险形成机理图
Fig. 1 Schematic diagram of street tree risk formation under the background of climate change

图2 外部风险源引发的行道树风险
Fig. 2 Street tree risk caused by external risk sources

长状态的时间更长^[6]。极端高温则会加速树木冠层受损，而夏季干旱则进一步导致行道树顶梢枯死(图2-a)，甚至整株死亡、倒伏。近10年来，上海在全球变暖和城市化的双重影响下，平均温度上升了1.1℃，且中心城区的增温幅度大大高于郊区增温幅度。城市化和工业化导致的热岛效应更加剧了夏季高温多发^[21]。而预计未来20年，上海夏季极端高温的日数将进一步增加，而且中心城区的热岛效应也会越发明显，对于行道树等树木的健康危害会更为严重。

(3) 城市建设诱发恶劣天气对树木风险的影响增大。上海很多的道路和街道空间逼仄，加上建筑密度大，很容易引发狭管效应和风切变效应。强台风来袭的时候，由于高密度的城市环境和建筑形态影响使得风力聚集风压增强，导致行道树产生巨大负压，极易被折断、倒伏(图2-b)，危及行人和行车安全。此外，街道狭窄导致的汽车对树木造成的机械损伤(图2-c)，以及由于影响建筑而采取的不当修剪措施，也是树木风险产生的重要外因。

(4) 立地环境狭促导致行道树根系支撑作用明显不足。同国内其他城市类似，上海绝大部分的行道树都生长在相对狭窄的树穴之中。各类高架线、建筑以及地下管网的交织使行道树的地上、地下空间受到了严重挤压，加上树穴周围的硬质铺装导致根部只能在有限的范围内生长，无法向外扩散根系^[22]，也阻碍土壤水分的渗透和循环(图2-d)，从而造成树木根冠比失衡，树体偏冠、倾斜、倒伏的可能性增加。此外，行道树土壤密实度、种植土层浅、地下水位高以及道路、管线施工等导致根系被切断也会严重影响根系固着力。

1.2 内部风险源引发的树木风险

行道树的安全风险与树木本身也密切相关，取决于树种、树龄、树势以及病虫害的影响。特别是树干、树枝、根系等部分树体结构是否正常或受到损害直接关系到树木的安全性(图3)。

(1) 树种选择不当影响行道树安全。一些行道树自身的特点成为影响树木安全的重要因素，例如上海从20世纪50年代开始，曾三次引入桉树(*Eucalyptus robusta*)却屡屡失败。原因是桉树适宜在温暖潮湿的环境中生长，抗寒性较差，零下2℃就会逐渐死亡。而上海冬季寒冷，最低温度达零下13℃，不适宜桉树的生存^[23]。还有一些阔叶树由于树冠开阔和侧枝延展，较易出现负重过度而断裂。而一些靠水平根系支撑的浅根系树种，受城市环境的影响会导致根系发展不平衡，一遇到灾害性天气便很容易倒伏。如遇连续降雨，土壤含水量达到饱和，一旦遭遇狂风，极易倒伏。

(2) 病虫害频发导致行道树生长不良。气候变化对上海动植物的生存环境和条件产生改变,对生物多样性也有较大的威胁^[24-25]。气候变化导致树木病虫害出现北移和传播范围加剧,周期延长等现象,而且发生间隔不断下降^[26]。研究表明,温暖的城区可能会增加树木病虫害爆发的风险,且害虫的个体更大、繁殖能力更强。在开展行道树健康评估的过程中,也发现上海的行道树遭受天牛等蛀干害虫以及白蚁等危害的情况时有发生。高温、高湿环境致使病虫害发生更加严重和集中,直接威胁到行道树健康生长,致使行道树抗风性和树干的安全性下降。在此前上海行道树风险安全评估的研究中^[27],研究者上海市16个行政区内随机选择了817棵行道树,采用VTA诊断法等对树木的基本信息进行采集,后基于风险矩阵法对采集到的树木指标进行评估,包括树冠负荷重、主干腐烂/中空、大型枯枝、树洞等基础指标。结果表明:有超过90%的行道树处于中等风险水平,其安全隐患问题主要集中在树体状况,具体表现为主干腐烂、树洞、大型枯枝等现象,最常见的问题是树木遭遇食性害虫的侵袭,并涉及多个树种。

树龄老化影响行道树的健康和稳定性。行道树生长到一定程度后,生长势明显减弱,如顶端优势消失、枯枝增加,存在折断以及倒伏的风险。上海中心城区的很多行道树是法桐 (*Platanus orientalis*) 或香樟 (*Cinnamomum camphora*),随着树龄增加,其对环境的适应力越来越差,生长衰退使其容易发生腐朽和被病菌感染,造成机械损伤的几率也比较高。20世纪90年代末以来上海中心城区呈现出明显的热岛效应^[29],而气温的升高直接导致行道树老化加速和寿命缩短^[29]。

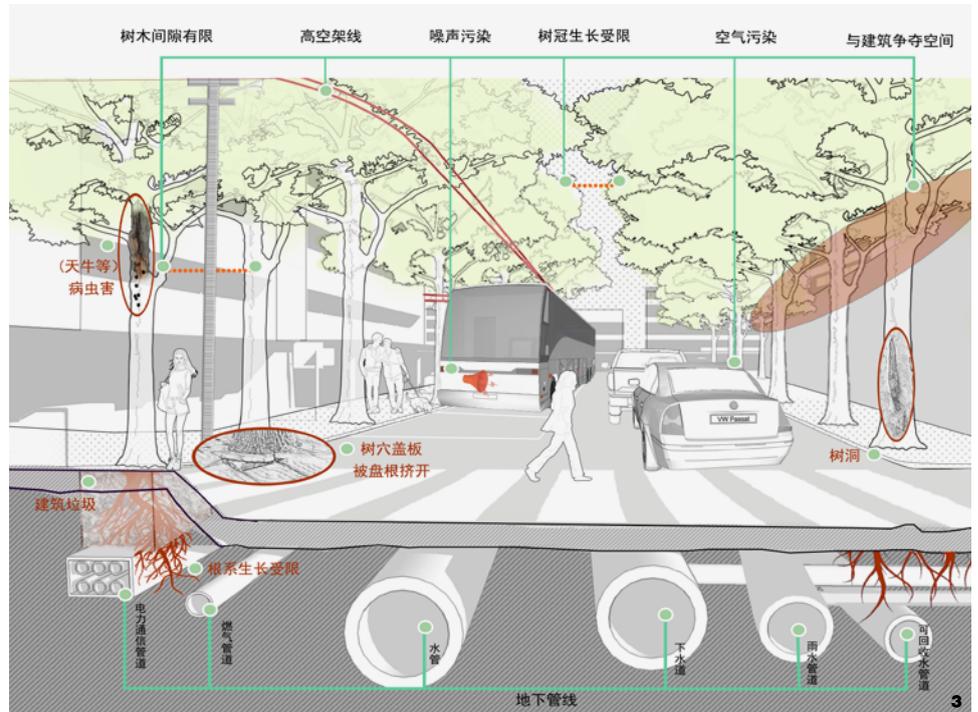


图3 树木风险各类内外部风险源
Fig. 3 Various internal and external risk sources of tree risk

1.3 管理因素

目前,上海针对行道树日常管理制定了一系列措施,发布相应的技术标准用于指导全市行道树的日常管理和风险防控。但总体而言还缺乏应对气候变化的有效管理措施,特别是行道树的管理权分散:绿化、路政等部门只针对职能范围行道树进行管理,忽略了行道树整体的种植规划与生长监控;目前的行道树管理主要以日常的修剪、施肥、病虫害防治和树穴改造等常规工作为主,缺乏主动应对气候变化的长效管理机制。

2 气候变化影响下行道树风险评估体系的构建

2.1 气候变化影响下的行道树风险评估概况

树木风险评估工作在国外起步较早,评估标准、指标和方法已经较为成熟。20世纪

60年代,“树木风险管理 (tree risk management)”的概念首次被提出^[30]。1971年,Plane系统根据树木潜在的故障率、危机目标以及危害后果来确定树木的风险等级,为此后的树木风险评估打下了基础^[31-33]。1987-1994年,Hickman在Paine系统的基础上进行改进和补充,由此确定出树势、树干和倾斜度是评估树木风险的三个重要指标。1994年,德国树木学家Matherly等^[34]出版了*A Photo-graphic Guide to the Evaluation of Hazard Trees in Urban Areas (2ded)*。Mattheck等^[35]在同年提出了可视化树木风险评估法 (Visual Tree Assessment, VTA)。随后,国际树木学会 (ISA) 将树木风险评估分为目测评估、基础评估和高级评估三种评估等级,为城市树木风险评估提供基本方法。相比于国外,国内树木风险评估工作起步较晚,20世纪90年代后期才有树木健康的思想意

识, 研究区域主要集中在台湾、香港和广州等少数地区。国内对于行道树的研究主要集中在城市绿化、行道树树种分析应用、行道树的养护管理以及城市行道树的健康检测和评价等方面^[36]。近年来, 各学者大都根据所研究地区的实际情况构建起相应的树木评价指标体系。如上海地区对树木健康的评价多运用层次分析法^[25,37], 或运用主成分分析法与其他方法相结合建立树木健康评价体系^[38-39]。目前国内树木风险评估体系和方法研究相对较多, 但并未形成系统的树木安全评估体系。

在行道树安全与未来气候变化的关联上, 尚缺乏综合且全面的评估, 尤其是在气候变化影响下城市行道树风险管理应对策略的效果评估方面, 这就迫切需要构建更加科学合理的综合性评估框架, 建立基于气候、环境、行道树、管理等多评估指标集成的综合评估, 既能分析行道树风险的可能性和后果严重性, 又能将风险评估和管理对策进行关联, 更加准确地评估气候变化对行道树安全的影响以及风险管理策略的应用效果。

2.2 气候变化影响下的行道树风险评估指标

根据区域灾害系统理论研究, 灾害风险是由孕灾环境、致灾因子与承灾体共同综合作用的结果^[40]。结合IPCC第5次报告提出的气候风险“危险性—暴露度—脆弱性”的评估框架^[41], 基于气候变化下行道树风险的形成机理和风险源, 行道树风险可以理解为暴露于气候变化的行道树, 由于自身敏感性特征及所处环境对气候变化的应对能力可能使建筑、设施和居民受到的负面影响, 因此文章提出可选择致灾因子危险性、孕灾环境暴露度、承灾体脆弱性作为理解和评估行道树

风险的三个主要维度。

2.2.1 危险性指标

危险性是造成行道树风险的关键指标, 气候变化下的致灾因子危险性主要是气候变化对行道树造成的不良影响。行道树折断、倒伏等受台风、暴雨影响较大, 与台风发生强度、降雨量大小、极端高温的天数等有着直接关系, 因此可选取台风频率、台风等级、降雨强度、极端降水分布4个指标因子。

2.2.2 暴露度指标

暴露度是指增加承灾体风险的不利环境和位置, 即行道树、居民等受灾体暴露在致灾因子威胁范围的数量或价值。研究表明, 行道树空间分布与受灾体暴露风险有很大关联, 建设用地比例较高的地区人口、建筑、经济活动潜在暴露规模较高。一方面上海城市建筑密度大且要素流动快速, 土地空间利用压力大, 因此选取建筑密度、土地利用类型这两个因子; 另一方面城市居民是风险的直接承载者, 行道树倒伏、折枝、树干断裂会对周围的行人、建筑、车辆等造成潜在危害, 若行道树倒伏范围内并未危及到目标, 则不构成风险。交通量越大, 人群越聚集, 产生风险的可能性就更高, 所以交通量、人口密度也被选取为其中两个指标因子。

2.2.3 承灾体脆弱性指标

脆弱性是指承灾体抵抗各类风险的敏感程度和能力。行道树所表现出来的风险形式主要是由树种、树龄、树势、冠高比、根系状况等内在因素以及立地条件、养护水平外在因素共同造成的, 其中树冠形态、木材特性、根系结构与行道树抗风险能力的相关

系数最高^[42]。结合已有的研究成果^[27]和气候变化对行道树致灾特征, 选取大幅偏冠、枝条折断、病虫害、顶梢枯死、主干倾斜、树洞、机械损伤、主干腐烂、根系腐烂、根部外露、防风固定装置、土壤容重等作为评估树木脆弱性的指标。从管理脆弱性出发, 基于城市在应对、抵御各类风险灾害方面的能力, 选取养护水平、城市基础设施、风险问题处置效率三个指标因子对管理水平作出评估(表1)。

2.3 行道树风险评估指标量化与综合评估模型

行道树风险评估是行道树安全风险管理的重要步骤, 能够为行道树风险管理策略的制定奠定科学基础。通过层次分析法、图层叠置法或者主成分分析法、熵值法等确定各评估指标权重的基础上, 建立综合评价模型是开展行道树风险机制研究的点睛之笔^[20]。为全面理解造成行道树风险的内外因素与行道树风险等级之间的关系, 文章基于气候变化对城市行道树风险的影响, 提出可以量化各指标与行道树风险等级之间的相关性的方法。该方法综合考虑了行道树的生长状况、健康状况、周边环境等多因素, 旨在实现对行道树风险的科学、精准评估。

在指标综合过程中, 基本方法是乘法规则与加法规则。乘法在体现指标的敏感度和差异性上更为突出, 使得不同指标之间的差异性在综合结果中更为明显。因此, 可以通过乘法计算指标的综合结果, 具体计算方法如下: 行道树风险等级度=危险性×暴露度×承灾体脆弱性。

由于各指标的量纲和单位不同, 为使各个指标之间具有可比性, 需要对指标进行标准化处理来确定指标权重。对于分类变量

表 1 行道树风险评估指标体系
Tab. 1 Risk assessment index system of street trees

评估指标 Evaluation indicators	评估要素 Evaluation factors	指标层 Indicator layer	与行道树风险等级 的相关性 Correlation with the street tree risk level	相关性释义 Relevance definition
危险性指标	极端气候	台风频率	+	台风频率越高, 行道树受到台风影响越广泛, 风险发生的可能性越高
		台风等级	+	台风等级越高, 对树木稳定性的破坏越大, 风险产生的可能性越高
		降雨量	+	降雨量越大, 树木根系的固着力越低, 易倒伏, 风险产生的可能性越高
		极端降水分布	+	极端降水分布地区越广泛, 树木倒伏范围越大, 产生的风险后果范围也随着变大
暴露度指标	立地环境	建筑密度	+	建筑密度越大, 狭管效应更易使树木倒伏, 且树木倒伏后, 发生事故的后果严重性越大
		土地利用类型	-	对土地类型按照自然属性进行赋值, 若自然属性等级越高, 树木风险产生时, 所造成的后果危害越小
	受灾体数量	交通量	+	交通量越大, 行道树产生倒伏或断枝风险, 更易危及行车安全, 后果越严重, 伤害程度越高、持续时间越久
		人口密度	+	人口密度越大, 行道树产生倒伏或断枝风险, 更易危及行人安全, 伤害程度等级高, 后果越严重
脆弱性指标	树枝	树冠大幅偏冠	+	树冠大幅偏冠, 影响树体稳定性, 树木更易受外界影响产生风险, 风险发生的可能性变高
		枝条折损	+	枝条折损率越高, 树木更易产生枝条断落风险, 影响行人安全, 后果越严重
		病虫害	+	病虫害入侵树木, 树木受损部位变脆弱, 更易发生断裂, 产生风险, 风险产生的可能性越高
		顶梢枯死	+	顶梢枯死越严重, 树木更易产生枝条断落风险, 影响行人安全, 后果越严重
	树干	主干倾斜	+	主干大幅倾斜, 影响树体稳定性, 树木更易受外界影响产生倒伏, 发生事故的可能性越高
		树洞	+	树木产生风险的可能性会随着树洞的严重程度加大而变高
		机械损伤	+	树木的机械损伤部位脆弱, 树木产生风险的可能性越高
	根系 / 土壤	主干腐烂	+	主干腐烂影响树体稳定性, 树木受外界影响产生风险的可能性变高
		根系受损 / 腐烂	+	根系腐烂导致树木稳定性变差, 树木产生风险的可能性变高
		根部外露 / 凸起	+	根系外露导致树木稳定性变差, 树木产生风险的可能性变高
		防风固定装置	-	树木产生风险的可能性会随着防风固定装置的完备程度而降低
	人工环境	土壤容重	+	土壤容重越大, 树木稳定性越差, 产生风险的可能性越大
		养护水平	-	养护水平越好, 树木的健康程度和安全性越高, 风险发生的可能性越小
基础设施		-	基础设施越完善, 树木的安全性越高, 风险发生的可能性越小	
问题处置效率		-	风险事故发生后, 风险后果的严重性会随着处置效率的提高而降低	

注: 表中“+”代表两者呈正相关,“-”代表两者呈负相关。

(如树种、土地利用类型等)可以通过编码或赋值转化为数值型变量。行道树风险等级与各指标之间的相关性采用皮尔森相关分析法 (Pearson two-tailed bivariate correlations)。基于相关性分析结果,选择显著相关的指标作为自

变量,行道树风险等级作为因变量,建立多元线性回归模型,以解释各指标与行道树风险等级之间的相关性强弱及方向。

由于不同区划行道树种类以及管理水平存在差异,具体的操作步骤需要根据实际情

况进行定制。因此,文章未给出详细的操作步骤,而是提供了一种评估指标与风险等级划分的框架性方法。在实际应用中,各地可根据本地特点,结合文章提出的方法,以制定具体的操作细则。

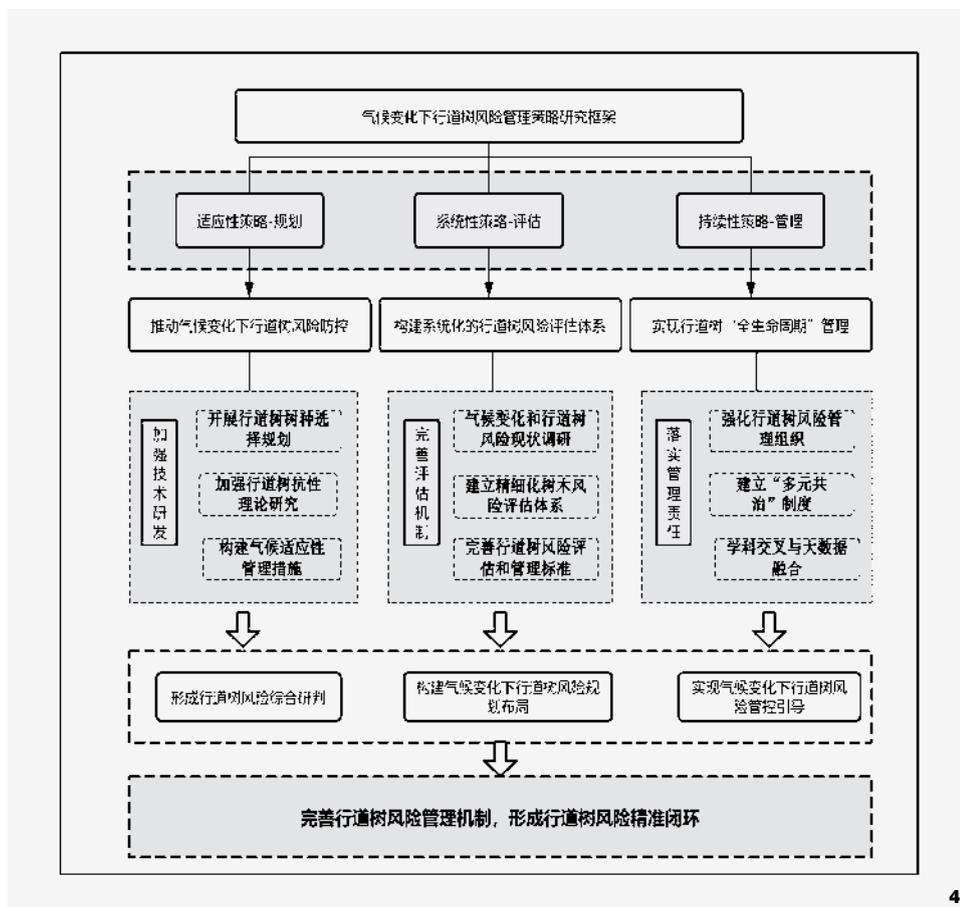


图4 气候变化下行道树风险管理机制框架
Fig. 4 Framework of street tree risk management mechanism under climate change

3 气候变化影响的行道树风险管理策略研究

据统计，上海的行道树数量已达150万株，种类已有70余种，主要包括悬铃木 (*Platanus × acerifolia*)、香樟、栾树 (*Koelreuteria paniculata*)、银杏 (*Ginkgo biloba*) 等，其中悬铃木、香樟占行道树总体数量的7成左右^[11-12]。目前，上海行道树风险管理主要以日常管养和被动应急救援救灾为主。如何减少气候变化产生的行道树风险，推动气候变化下行道树风险防控体系建立是当前需要努力的方向。在选择气候变化背景影响下的行道树风险管理应对策略上，应从规划、评估、管理三个层面提出针对性策略 (图4)。

3.1 规划层面——加强技术研发，主动应对气候变化引发的行道树风险

(1) 理清基本需求，开展行道树树种选择规划。提高上海的行道树安全性，要综合考虑行道树面对台风、高温干旱、病虫害等各种极端气候胁迫的响应。根据上海的气候特点和常发极端天气危害，树种尽量选择抗风、抗病能力强的深根性树种。此前已有学者对上海地区常见的园林树种进行抗风性研究，对树木抗风性进行了综合客观的分析，总结出了具体的抗风树种^[43-44]，特别是冠层稀疏、树冠呈塔形的树木抗风能力较强。此外，综合考虑树种适应高温干旱和恶劣立地

环境的能力，以及树种的抗病虫害能力，编制适宜上海地区的行道树“黑名单”和“白名单”，指导新建道路的树种选择。按照立地环境、种植结构等选择合适的树种，减少气候变化对树木的损害。

(2) 聚焦关键技术，加强行道树抗性理论研究。加强气候变化影响的监测预警和综合管理，全面系统收集上海地区气候变化及城市相应资料，深入开展城市风环境研究，综合各城区、街道的布局和建筑类型以及灾后行道树受损分布，分析出对强风具有高敏感度的重点区域，进而重点关注此类区域的行道树风险，并在新建道路规划阶段优化行道树树种结构和种植模式。同时，开展行道树的抗风性综合评估与分级，将实际灾后的行道树的受损情况与理论抗风性评价模型相结合并比对修正，提高抗风性评价的充分性、有效性及准确性。此外，加强行道树病虫害的检疫和防控，对易感染病虫害的行道树采取预防措施，减小感染病虫害概率，发现异常时及时进行综合治理，以减少由于树干空洞或者枝条受损导致的风险。

(3) 探索应用方案，构建气候适应性管理措施。结合上海的气候特征，应对台风、高温等气候变化，增加城市绿化等基础设施的韧性和可持续性，重点关注行道树根系生长、树冠修剪和树干应力等。首先深入开展树木根系土壤生态环境研究，提高树穴规格和土壤标准，有条件的道路应采用行道树树池连接带形式 (图5-a)，并与市政管线保持合理的距离，为行道树留出足够的生长空间。上海已在南京东路等重点区域使用模块化行道树种植，较好地解决了根系与市政管道之间的矛盾 (图5-b)。此外，深入开展行道树修剪措施研究，修剪应从日常管养向应对风险的维护性修剪转变，保证行道树树冠处于

平衡状态, 提高树木抗风能力(图5-c)。台风过后应及时处理修剪后的伤口, 减少树洞等次生伤害。最后, 应该开展行道树防风加固技术研究, 防止树木树冠树干失衡(5-d)。对于新栽植或高风险行道树, 应该选用高强度、永久性的支撑设施, 因制宜选择合适的支撑措施。

3.2 评估层面——完善评估机制, 行道树风险管理工作前移

提升行道树风险的气候变化综合应对能力, 需要结合问题导向和需求牵引, 坚持风险管理关口前移, 有效落实风险防控工作, 以期满足城市快速发展和公共安全的现实需求。

(1) 强化区域气候变化特征和行道树风险的现状调研。结合上海地区的气候特点和资源开展行道树风险评估的数据收集和分析工作, 采用风险防控点位系统生成与现场勘查相结合的方法, 对全市重点道路的重点树木进行GIS定位与数据录入, 建立图文一体的电子档案, 明确所在地区具体面临的气候变化风险类型和行道树风险的空间分布情况。依据风险评估结果开展对气候变化的树木生长问题和行道树风险防控对策研究, 为全市行道树规划和供需方案的制定提供方向, 从而加强技术研究与实际管理工作方案的衔接。

(2) 建立快速评估和重点监测相结合的树木风险评估体系。以风险评估来甄别行道树风险的敏感区域和重点区域是实现风险管理的重要前提。首先, 应建立上海市行道树的综合数据库, 加强对行道树生长状况、树木结构、患病状态等风险信息的日常监控。对于“老病树”等风险较高的植株, 做好“一树一档”; 对重点区域的行道树开展经



图5 应对气候变化的行道树风险管理方案
Fig. 5 Risk management scheme for street trees in response to climate change

常性的风险评估隐患排查, 构建“发现隐患、评估预判和实施管控”等连贯机制。此外, 开展基于信息技术的行道树风险“快速精确诊断”评估。根据各区环境条件, 提供实时的行道树风险预警, 预判可能出现的灾害类型, 提供更有针对性的管理措施, 提高行道树风险管理的效率和精确度。

(3) 完善行道树风险评估和管理的标准规范, 推进标准化建设。气候变化背景下, 多灾种发生的频率在增加, 这就要求在行道树风险防御过程中加快推进标准体系建设, 使行道树的安全管理立足于法规制度之上。将气候变化及其影响和行道树风险评估情况有效纳入到园林绿化工程技术标准制修订过程, 尽快出台“树木风险评估技术规程”, 规范树木风险预警、风险防控、风险响应和风险责任认定等一系列过程。此外, 由于气候

变化具有明显的尺度效应, 因此不同层级的行道树风险应对和风险评估结果的运用也有所差异, 在市级层面应该实现行道树风险预案全覆盖, 细化台风等重大灾害后的应急管理预案, 各区级层面的应急预案体系则应该重点关注管护责任, 明确各部门职责和权限, 加强交通、应急、消防、电力等部门与绿化部门间的纵向和横向联结。

3.3 管理层面——落实管理责任, 构建全生命周期风险管理机制

实现行道树的“全生命周期”管理, 全面提高行道树应对气候变化的风险防控和治理效能, 需要完善“风险发现、信息传输、评估标准、管控措施”于一体的全系列响应机制, 全方位落实管理责任, 全面提高城市树木风险防控和治理效能。

(1) 强化行道树风险管理组织, 形成高效协同的应急响应机制。按照上海“两级政府、三级管理、四级网络”的分级管理体制, 成立由市、区、街道等各级部门联合作业的风险处置机制。通过网格划分区域, 明确分工和职责, 严格考核等方式开展行道树风险的网格化管理。当前, 上海市对于行道树风险防控还是以被动应对为主, 从应对过程来看主要表现为“重处置、轻预防”“重事后、轻事前”, 所以需要进一步加强各部门协作, 形成上下合力, 不断规范行道树风险管理的全过程机制, 从评估、预防、处置、善后等方面建立一整套的协同响应机制。

(2) 建立以政府为主导、居民参与的“多元共治”制度, 实现行道树风险防控管理闭环。行道树风险管理要充分发挥多主体的作用, 构建政府为主导, 社会组织和民众等多元主体共同参与的机制, 充分发挥社会力量。积极培育应急管理社会组织, 发挥社会组织作为城市运行风险的发现者、风险管理服务的提供者和应急事件的处置者的作用。充分利用上海政务云、“一网通办、一网统管”等平台, 规范市民的参与方式和途径, 形成统一协调的多元治理网络和多主体之间的利益均衡。

(3) 加强城市行道树风险防控理论下的学科交叉与大数据融合。在城市化过程中, 行道树等这一类受灾体承受着多重致灾因子耦合和不确定性的多番变化。在具体的行道树安全风险管理中, 首先应充分利用各学科优势, 以学科交叉的方式将行道树风险纳入城市的风险管理体系中。其次, 通过卫星遥感、大数据等现代技术手段来获取行道树的分布、生长状况以及实现数据源的自动化处理, 并针对风险制定相应的管理措施, 确保管理决策的客观性和科学性。用好信息技

术、数字技术, 统筹推进风险树木的数据共享, 完善城市树木风险信息管理模块, 提升城市风险感知预警能力, 利用信息平台的可视化优势, 让风险防控有图可见。

4 结论

气候变化已对自然和城市生态系统造成了诸多不利影响和损害。为提升城市对气候变化的适应能力, 需要及时采取应对措施。上海市由此提出了开展城市气候变化风险评估、加强适应气候变化策略研究, 以提高城市适应气候变化能力的举措。在此背景下, 必须充分识别气候变化背景下行道树潜在的健康风险, 科学评估并提出有针对性的措施, 提升城市绿地生态系统的风险治理能力。

文章以上海为例, 以气候变化为切入点, 对极端气候变化下的城市行道树安全风险的管理策略进行研究, 采取定性与定量相结合的方法, 从致灾因子危险性、孕灾环境暴露度、承灾体脆弱性三个维度进行行道树的安全风险评估, 构建行道树安全风险评估体系, 对气候环境、社会、经济等方面的要素进行系统且全面的评估, 由此探讨如何构建完善的行道树风险管理策略, 提出由“被动防御”向“主动应对”转变的全生命周期的行道树风险治理策略, 旨在提高城市在气候变化影响下应对行道树风险的长效治理能力。

未来, 以上海为代表的高密度超大城市在应对气候变化影响时, 还应该推进城市绿化的“智慧赋能”, 利用信息技术加快推进树木风险机制研究, 同时推动地理信息系统、大数据、人工智能、物联网和云计算等在树木风险管理机制中的应用, 提高城市风险防控精准能力。同时, 推进城市树木风险与隐

患排查大数据系统建设, 整合相关部门信息, 实现绿化、应急、消防、城市管理等部门对城市树木风险管理的全覆盖和全集中, 综合统筹政府各个职能部门、基层社会组织和市民等多方资源, 加强城市树木风险精准闭环管控, 从而提升特大城市风险防控精准能力。

注: 文中图表均由作者自绘/摄。

参考文献

- [1] ESPERON-RODRIGUEZ M, TJOELKER M G, LENOIR J, et al. Climate Change Increases Global Risk to Urban Forests[J]. *Nature Climate Change*, 2022, 12(10): 950-955.
- [2] ANDEREGG W R L, CHEGWIDDEN O S, BADGLEY G, et al. Future Climate Risks from Stress, Insects and Fire Across US Forests[J]. *Ecology Letters*, 2022, 25(6): 1510-1520.
- [3] HAQUE C E, BURTON I. Adaptation Options Strategies for Hazards and Vulnerability Mitigation: An International Perspective[J]. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 2005, 10(3): 335-353.
- [4] 王军, 谭金凯. 气候变化背景下中国沿海地区灾害风险研究与应对思考[J]. *地理科学进展*, 2021, 40(5): 870-882.
- [5] 方佳毅, 史培军. 全球气候变化背景下海岸洪水灾害风险评估研究进展与展望[J]. *地理科学进展*, 2019, 38(5): 625-636.
- [6] MASRI S, JIN Y, WU J. Compound Risk of Air Pollution and Heat Days and the Influence of Wildfire by SES Across California, 2018-2020: Implications for Environmental Justice in the Context of Climate Change[J]. *Climate*, 2022, 10(10): 145.
- [7] CASIANO FLORES C, CROMPVOETS J. Assessing the Governance Context Support for Creating a Pluvial Flood Risk Map with Climate Change Scenarios: The Flemish Subnational Case[J]. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 2020, 9(7): 460.
- [8] Hong Kong Greening Landscape and Tree Management Section Development Bureau. Guidelines for Tree Risk Assessment and Management Arrangement[Z]. 2009-06.

- [9] 贺坤, 宋平, 王本耀, 等. 上海城市行道树安全风险评估研究[J]. 中国园林, 2021, 37(9): 106-111.
- [10] 贾益兴, 雷杰, 黄颂谊. 广州市环市路行道树树木安全风险评估与管理探析[J]. 广东园林, 2021, 43(4): 93-96.
- [11] 金海湘, 黄颂谊, 罗怡柳. 台风灾害下城市园林树木应急管理体系探讨[J]. 广东园林, 2019, 41(4): 4-8.
- [12] 翁殊斐, 黎彩敏, 庞瑞君. 用层次分析法构建园林树木健康评价体系[J]. 西北林学院学报, 2009, 24(1): 177-181.
- [13] 韩付家. 树木风险评估研究概况[J]. 山东林业科技, 2013, 43(5): 90-94.
- [14] BUGGS R J A. Changing Perceptions of Tree Resistance Research[J]. PLANTS, PEOPLE, PLANET, 2020, 2(1): 2-4.
- [15] 周利芬, 吴红华, 李正农. 树木抗风及对风环境影响的研究综述[J]. 自然灾害学报, 2015, 24(5): 199-206.
- [16] 刘鸣, 张德顺. 气候变暖对城市园林树木的影响[J]. 科学, 2019, 71(3): 25-28.
- [17] The 2018 European Heatwave Led to Stem Dehydration but not to Consistent Growth Reductions in Forests | Nature Communications[EB/OL]. [2023-09-24]. <https://www.nature.com/articles/s41467-021-27579-9>
- [18] 贺坤, 宋婷, 王本耀, 等. 上海市行道树土壤理化性质与树木健康的相关性研究[J]. 中国园林, 2022, 38(2): 66-70.
- [19] 杨芳绒, 李丰芹, 张体英, 等. 城市行道树生长环境分析与养护措施探讨[J]. 河南林业科技, 2001(3): 26-28.
- [20] 冷红, 李泓锐, 袁青. 气候变化背景下空间健康风险的评估方法及韧性规划应对[J]. 上海城市规划, 2022(06): 16-23.
- [21] 申倩倩, 束炯, 王行恒. 上海地区近136年气温和降水量变化的多尺度分析[J]. 自然资源学报, 2011, 26(4): 644-654.
- [22] 潘晓俊. 浅谈市政活动对行道树的影响——以辖区内代表性道路为例[J]. 现代园艺, 2017(5): 60-61.
- [23] 王泰哲. 浅谈抗寒性桧树在上海地区的引种和选育[C]//上海市风景园林学会论文集. 上海: 上海市园林科学研究所, 2005: 3.
- [24] 杨淑平, 张德顺, 李跃忠, 等. 气候变暖背景下上海园林树木病虫害的应对策略[J]. 中国城市林业, 2016, 14(5): 30-34.
- [25] 杨淑平, 张德顺, 李跃忠, 等. 气候变暖情景下上海园林树木抗病虫能力评价[J]. 北京林业大学学报, 2017: 87-97.
- [26] 戈峰. 应对全球气候变化的昆虫学研究[J]. 应用昆虫学报, 2011, 48(5): 1117-1122.
- [27] 宋平. 基于VTA-风险矩阵法的上海市行道树安全风险评估研究[D]. 上海: 上海应用技术大学, 2022.
- [28] 陈振林. 上海城市气象灾害风险管理的实践与思考[J]. 气象科技进展, 2017, 7(6): 54-58.
- [29] LOCOSSELLI G M, BRIENEN R J W, LEITE M D S, et al. Global Treering Analysis Reveals Rapid Decrease in Tropical Tree Longevity with Temperature[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2020, 117(52): 33358-33364.
- [30] POKORNY J D. Urban Tree Risk Management: A Community Guide to Program Design and Implementation[M]. US: USDA Forest Service, Northeastern Area, State and Private Forestry, 2003.
- [31] PAINE L A. Administrative Goals and Safety Standards for Hazard Control on Forested Recreation Sites[R]. Res. Paper PSW-RP-88. Berkeley, CA: Pacific Southwest Forest and Range Experiment Station, Forest Service, U.S. Department of Agriculture, 1973.
- [32] PAINE L A. Coding Hazardous Tree Failures for a Data Management System[R]. Gen. Tech. Rep. PSW-29. Berkeley, CA: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Southwest Forest and Range Experiment Station, 1978.
- [33] PAINE L A. Tree Hazard Control on Recreation Sites Estimating Local Budgets[R]. Res. Note PSW-RN-160. Berkeley, CA: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Southwest Forest and Range Experiment Station, 1967.
- [34] MATHENY N P, CLARK J R. A Photographic Guide to the Evaluation of Hazard Trees in Urban Areas[J]. International Soc. Arboriculture: Savoy, Illinois, 1994, 634.
- [35] MATTHECK C, BRELOER H. Field Guide for Visual Tree Assessment (vta)[J]. Arboricultural Journal, 1994, 18(1): 1-23.
- [36] 李晶晶, 李旺红, 于达勇, 等. 基于VTA法的个旧市行道树潜在危险度调查与评估[C]//中国风景园林学会. 中国风景园林学会2021年会议论文集. 北京: 中国建筑工业出版社, 2021: 5.
- [37] 许滔山, 李亮, 王万胜, 等. 海岛大径级树木健康评价指标体系构建——以上海大金山岛为例[J]. 植物科学学报, 2023, 41(05): 573-582.
- [38] 姜冉. 广玉兰 (*Magnolia grandiflora*) 健康评价与生境因子研究[D]. 上海: 上海师范大学, 2023.
- [39] 张雪. 基于i-Tree Eco模型的校园树木健康评价及生态效益研究[D]. 上海: 上海应用技术大学, 2023.
- [40] 史培军. 四论灾害系统研究的理论与实践[J]. 自然灾害学报, 2005(6): 1-7.
- [41] IPCC Core Writing Team. Climate Change 2014: Synthesis Report[R]. Geneva: IPCC, 2014.
- [42] GÖCKE L, RUST S, RUHL F. Assessing the Anchorage and Critical Wind Speed of Urban Trees Using Root-Plate Inclination in High Winds[J]. Arboriculture & Urban Forestry, 2018, 44(1): 1-11.
- [43] 张德顺, 刘鸣, 姚驰远, 等. 气候变化背景下滨海地区园林树种抗风性研究进展[J]. 风景园林, 2021, 28(11): 68-73.
- [44] 张德顺, 李科科, 李玲璐, 等. 上海滨海地区25种园林树种的抗风性研究[J]. 北京林业大学学报, 2020, 42(7): 122-130.