

基于树木视觉评估与无损检测技术的大客流区树木安全风险检测研究

Research on Tree Safety Risk Detection in High Pedestrian Traffic Areas Based on Visual Tree Assessment and Non-Destructive Testing

蔡开梁¹ 周午祖轩¹ 贺坤^{1*} 王本耀²
CAI Kailiang¹ ZHOU Wuzuxuan¹ HE Kun^{1*} WANG Benyao²

(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(2025)11-0117-08
DOI: 10.12193/j.laing.2025.11.0117.015
中图分类号: TU986
文献标志码: A
收稿日期: 2025-01-25
修回日期: 2025-03-21

摘要

城市大客流区的树木因高密度人流和车流而面临更高的安全风险, 传统树木风险评估方法难以全面、客观地识别潜在风险。整合视觉树木评估 (VTA) 和无损检测技术 (NDT), 以上外滩和南京东路为研究对象, 在视觉评估的基础上, 采用 PICUS-3 声波断层扫描和 TRU 雷达技术检测树干空腐和根系状况, 并构建树木风险评估体系。结果表明, 大部分树木树干空腐情况轻微或未出现, 且空腐程度总体呈现出从上下逐渐加重的趋势, 表明树干空腐存在相互感染现象。根系方面, 大部分树木的粗根分布密度较为均匀, 但部分树木存在根系缺失问题。此外, 树干空腐和根系密度并未表现出明显的相关性。两个大客流区超过 80% 的树木风险等级处于可接受或可忽略范围, 但约 1/3 树木根系风险较高, 存在安全隐患。树木风险因子以根系缺失出现频率最高, 树干空腐和蛀干类害虫等问题次之。为城市树木安全管理提供新思路与技术支持, 对提升大客流区域树木安全性具有重要意义。

关键词

大客流区; 树木安全风险; 视觉树木评估; 无损检测; 探地雷达; 树干空腐

Abstract

Trees situated in urban environments with substantial pedestrian activity are exposed to elevated safety hazards owing to the dense concentration of both pedestrian and vehicular traffic. Furthermore, conventional tree risk assessment methodologies often encounter challenges in identifying potential hazards in a comprehensive and objective manner. This study innovatively integrates traditional Visual Tree Assessment (VTA) and Non-Destructive Testing (NDT) techniques, employing the Bund and Nanjing East Road as research locations. Based on visual assessment, PICUS-3 acoustic tomography and TRU radar techniques are utilized to detect the trunk cavitation and root conditions, thereby facilitating the development of a comprehensive tree risk assessment system. The results indicated that the majority of the trees exhibited minimal or no trunk hollow rot. Moreover, the extent of hollow rot generally demonstrated a pattern of progressive worsening from the apex to the base of the trees, suggesting a phenomenon of mutual infection of trunk hollow rot. As for the root system, most of the trees had a relatively uniform distribution density of coarse roots, but some trees had missing roots. In addition, trunk hollow rot and root density did not show a significant correlation. More than 80% of the trees in the two high-traffic areas had risk ratings in the acceptable or negligible range. Yet approximately one-third of the trees exhibited a significant risk to their root systems, posing a safety hazard. Three risk factors had the highest frequency of root deficiency, with trunk hollow rot and stem-boring pests being the next most frequent problems. The study provides new ideas and technical support for urban tree safety management, which is important for improving tree safety in high-traffic areas.

Keywords

high pedestrian traffic areas; tree safety risk; visual tree assessment; nondestructive testing; ground penetrating radar; trunk decay

蔡开梁

2000年生/男/重庆巴南人/在读硕士研究生/
研究方向为城市树木风险评估

周午祖轩

2000年生/男/四川自贡人/在读硕士研究生/
研究方向为城市行道树真菌生态研究

贺坤

1982年生/男/山东潍坊人/教授/研究方向为
园林植物应用及城市绿地健康

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

基金项目:

上海市绿化市容局项目“基于智慧化场景的城市行道树监测与管理技术研究”(编号: G240506)

城市大客流区域是指在特定时间段内,单位时间内的客流量较大的区域^[1]。大客流通常建筑物密集、人流活动频繁,因此对城市绿化和树木安全提出了更高标准与要求。大客流区域的树木一旦出现倾倒或断裂等突发状况,将对行人、车辆等构成严重威胁,甚至可能引发重大公共安全事故^[2]。因此,开展大客流区域树木风险检测,能够及时发现并消除潜在的安全隐患,有效保障公共安全。

近年来,国内在城市树木安全风险评估领域取得了显著进展^[3-5]。其中,传统的视觉评估技术因其操作简便、高效和实时性强而被广泛应用^[6-7],但也存在主观性强,评估精度不足以及难以评估树木内部结构缺陷的问题^[4,8-9]。该方法易受光照条件、枝叶遮挡等环境因素干扰以及主观经验影响,且难以量化评估树木内部结构缺陷(如树干空腐、根系损伤)。随着无损检测技术的引入^[10-12],视觉评估在获取树木内部空腐及根系健康信息方面的局限性得到了有效弥补,其中,PICUS-3应力波树木断层成像技术广泛应用于树干内部空腐情况,具有较高的准确性^[8];而树木雷达检测(Tree Radar Unit, TRU)等则能够有效探测树木根系的大小、分布深度和范围^[13]。本研究整合了视觉树木评估和无损检测技术,视觉树木评估通过直观观察快速识别外部缺陷,而NDT则深入探测内部健康状况。二者结合弥补单一方法的局限,通过多维度数据交叉验证,显著提升树木安全风险的科学性、全面性和精准性。国内关于树木风险评估主要集中在行道树上,例如,程睿等^[5]利用VTA-风险矩阵法对深圳市深南大道的行道树进行安全性评估;陈文静等^[3]运用主成分分析法和聚类分析法对南京市法桐行道树进行了安全性调查,国内研究



图1 研究区域
Fig. 1 Study area

多采用视觉树木评估(VTA)^[6-7]、GIS技术^[4]、LIDAR数据^[14]等方法,分析行道树的健康状况、结构特征及潜在风险。然而,大客流区的树木种类更为多样,其所面临的安全风险也更为复杂。因此,针对大客流区域内树木的安全风险评估,需要采用更加精细和科学的评估方法。

上海作为中国东部沿海超大城市,常年面临台风等极端气象灾害威胁。以2024年14级强台风“贝碧嘉”为例,其过境导致市区多处树木倒伏,引发严重安全隐患^[15]。这一背景突显大客流区域树木风险评估的重要性。本研究选取外滩和南京东路两个典型大客流区域为研究对象,通过视觉树木评估和无损检测技术,系统开展树木风险检测与评估,为城市大客流区域树木安全管理提供了新的技术路径和方法支撑。

1 研究区域概况

1.1 研究区域

上海市位于中国华东地区,地处长江入海口,东临东海,属于亚热带季风气候,四季分明,气候湿润。上海市行政区域总面积为6 340.5 km²,常住人口为2 489.43万人,人口密度达3 926人/km²。本研究选择上海市外滩(北京东路至金陵东路段及陈毅广场)和南京东路步行街(中山东一路至西藏中路)大客流区的树木作为研究对象(图1),共调研294株树木,主要树木品种包括槭树(*Acer* spp.)、香樟(*Cinnamomum camphora*)、悬铃木(*Platanus orientalis*)、银白槭(*Acer saccharinum*)和银杏(*Ginkgo biloba*)。

1.2 研究方法

1.2.1 技术路线

研究的技术路线如图2所示,首先选择

具有代表性的外滩和南京东路步行街大客流区域的树木作为研究对象，采用视觉评估法对树木外观状况进行初步评估，并结合PICUS-3应力波树木断层成像仪和TRU树木雷达这两种无损检测技术，精确检测树干空腐及根系状况。基于视觉树木评估和无损检测的结果，从风险可能性和风险后果两个维度构建树木风险量化评估体系，从而确定每株树木的风险等级。在此基础上，进一步分析了高风险指标之间的相关性，并为不同风险等级的树木提出响应措施。

1.2.2 树木无损检测方法

PICUS-3应力波树木断层成像仪基于弹性波传播特性，通过多点式传感器阵列检测应力波在木质部中的传播速度差异生成断层扫描图像，从而量化识别树干内部腐烂、空洞缺陷，主要适用于评估树木的结构安全性。基于大多数树种的树干结构特征，本研究将树干统一划分为三个关键部分：贴地处（截面A）、胸径测量处（截面B）和分枝处（截面C）（图3），其距离地面的高度分别为30 cm、130 cm和180 cm。随后，利用PICUS-3声波断层扫描技术对三个截面进行空腐检测，并通过PICUS Q74程序生成断层扫描图，图中不同颜色区域代表不同的木材状况：棕色和黑色区域表示健康木材，绿色区域对应木材过渡区，而紫色、蓝色和白色区域则指示存在腐烂或空心现象，可能存在潜在安全隐患。

TRU树木雷达检测通过高频电磁波技术将电磁波发送至地下，利用电磁波在介质界面反射与折射的特性进行根系探测，并通过介电常数的差异解析根系的空间分布，生成根系的三维分布图，主要用于研究根系的生长特性、分布范围及密度。本研究使用TRU树木根系雷达探测地表下21 ~ 40 cm范围内

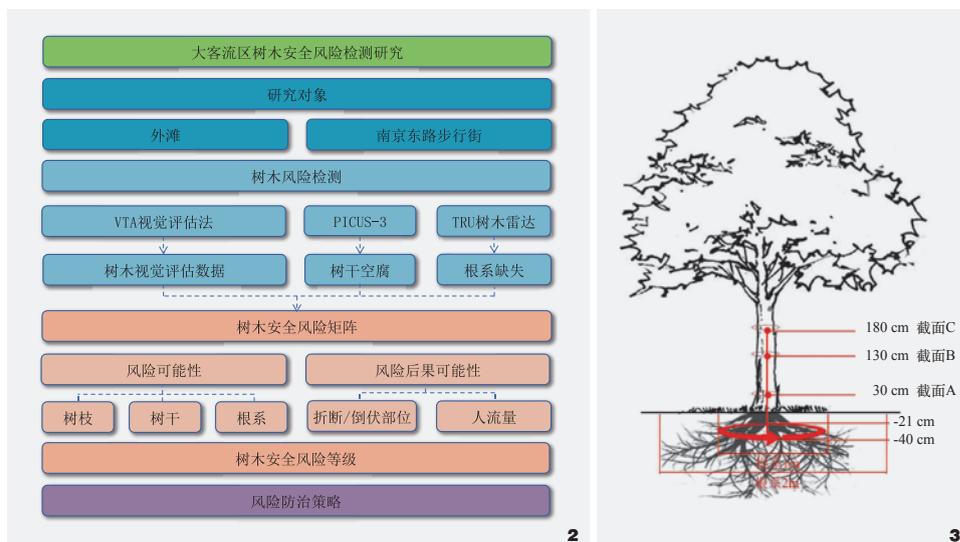


图2 技术路线图
Fig.2 Technical flow chart

图3 树干及根系检测过程图
Fig. 3 Trunk and root inspection process diagram

的根系分布。检测过程中，采用同心圆法布置探测路线（图3），以树木主干为圆心，半径设为1.0 m和2.0 m，进行绕树扫描。通过配套软件Tree Win处理扫描数据，获取根系密度及不同深度粗根反射点的占比，反映相应深度的粗根数量。

1.2.3 树木安全风险评价指标体系的构建

风险矩阵法 (Risk Matrix) 是一种系统化的风险评估工具，广泛应用于风险分级、识别和应对策略制定^[16-17]。本研究采用风险矩阵表法对树木风险等级进行评估，通过量化树木风险可能性 (P) 和后果严重性 (S) 来评估

风险等级 (R)^[18]，其中，P值反映树木结构性缺陷概率，S值评估树木与环境的潜在冲突程度。将P值和S值代入风险矩阵表（表1）即可确定R值，表2详细列出了各风险等级的划分标准及特征。

常见树木风险主要源于树干、树枝和根系的异常^[6-7,19]，根系缺失导致整树倾倒、大型枯枝折断以及枝干腐烂引发树干断裂等，本研究选取对树木风险影响较大的11项关键风险因子构建大客流区树木风险评估的指标体系（表3），其中根系缺失是根据TRU树木根系雷达所检测到的在距树干1 m和2 m的树木根系的粗根密度占比来判定。

表1 树木风险矩阵表
Tab. 1 Tree risk matrix

树木风险等级 (R) (R = P×S) Tree risk level	风险严重程度性 (S) Risk severity				
	I (可忽略)	II (轻度)	III (严重)	IV (灾难)	
风险可能性 (P)	I (低)	1	2	3	4
	II (中)	2	4	6	8
	III (高)	3	6	9	12
	IV (极高)	4	8	12	16

表2 风险等级划分
Tab. 2 Classification of risk level

风险等级 (R) Risk level	风险等级划分 Risk level classification	描述 Description
严重风险	IV (12 ~ 16)	存在严重安全威胁和潜在损害, 极有可能发生树木倒塌或折断事件, 需及时进行处理以降低风险
中等风险	III (8 ~ 9)	存在一定的安全威胁和潜在损害, 需要进一步评估再决策
可接受的风险	II (3 ~ 6)	风险因素比较安全, 但存着潜在风险, 应持续观察
可忽略的风险	I (<3)	风险因素基本安全, 但不排除其存在一定的安全隐患

1.2.4 数据处理

采用Microsoft Excel 2020对树木风险评估数据进行整理和初步分析。为了深入探讨树干不同截面的空腐情况与不同区域粗根分布密度之间的相关性, 使用R语言(版本4.1.0)进行统计分析, 并生成相关性可视化图表。采用Origin 2022软件进行其他图形的绘制。

2 结果与分析

2.1 树干空腐与根系分析

2.1.1 树干空腐分析

表4显示, 大客流区域中, 大部分树木的树干空腐情况较好, 约30.61%的树木未出现空腐, 表现为三个截面上健康木质占比均超过99%。但仍有207株树木出现空腐, 其中47.28%

为空腐等级2, 空腐等级3和4的树木分别为59株和6株, 表明大多数树木空腐程度较轻。不同树种分析显示, 悬铃木的空腐主要集中在等级1和等级2, 占比高达86.67%, 整体健康状况较好; 银杏则以等级3为主, 香樟有16.67%的树木空腐达到等级4, 问题较为严重。

从树干空腐的不同维度分析(图4)发现, 树干各截面的健康木质占比存在显著差异。在健康木质占比大于99%时, 截面A、B和C分别为135次、146次和143次。而当健康木质占比低于80%时, 截面A出现了12次, 截面B和截面C仅分别为4次。进一步分析较差木质和空腐木质的分布发现, 树干空腐呈现出截面A>B>C的趋势。这表明树干空腐严重程度从上至下逐渐加深, 且树干空腐在垂直方向上可能存在梯度变化。

表3 大客流区树木风险评估指标体系和评分标准
Tab. 3 Tree risk assessment index system and scoring standard for high pedestrian traffic areas

风险评估 A Risk assessment A	评估项目 B Evaluate item B	评估指标 C Evaluation index C	指标评分标准 Indicator evaluation standard				
			1	2	3	4	
风险可能性评估 P	树枝 B1	树冠偏冠 C1	无	轻	中	重	
		树木倾斜 C2	未倾斜	≤ 10°	> 10°, ≤ 20°	> 20°	
		顶梢枯死 C3	未枯死	≤ 25%	> 25%, ≤ 50%	> 50%	
		大型枯枝 C4	无	轻	中	重	
		菌类子实体 C5	无	轻	中	重	
		蛀干类害虫 C6	无	轻	中	重	
		机械损伤 C7	无	轻	中	重	
	树干 B2	树木内部空腐 C9	树洞 C8	没有树洞	已修补, 恢复正常	已修补, 尚未恢复	没有愈合趋势
			截面 A	三个截面黑色和棕色像素百分比都为99%~100%的断层图像	三个截面至少有一个面黑色和棕色像素百分比为91%~98%且其余截面为≥91%的断层图像	三个截面至少有一个面黑色和棕色像素百分比为71%~90%且其余截面为≥71%的断层图像	三个截面至少有一个面黑色和棕色像素百分比为≤70%的断层图像
			截面 B				
	根系 B3	盘根 C10	无	轻	中	重	
			根系缺失 C11	区域粗根分布密度占比	60%~69%	70%~79%或91%~100%	101%~110%
	风险后果严重性 评 S	树木衰竭部位 B4	可能折断/倒伏部位 C12	二级枝	一级枝	树干	整株
区域风险状况 B5		人流量等级 C13	低危	中危	高危	极危	

表4 不同树种树干空腐等级情况
Tab. 4 Trunk decay levels in different tree species

树种 Tree species	数量 / 株 Number of trees	空腐等级 / % Hollow decay level			
		等级 1	等级 2	等级 3	等级 4
槭树	13	0.00	76.92	23.08	0.00
香樟	6	33.33	50.00	0.00	16.67
悬铃木	225	39.11	47.56	11.56	1.77
银白槭	24	0.00	54.17	45.83	0.00
银杏	26	0	23.08	73.08	3.84
总计	294	30.61	47.28	20.07	2.04

2.1.2 根系分析

图5显示，根系粗根分布密度随水平距离增加呈显著递减趋势。在距树干1 m和2 m处，地下21 ~ 40 cm深度范围内的粗根密度分别为5.28根/m和3.53根/m。密度分布的中位数及四分位数均呈现空间衰减特征，这可能与根系生长空间受限有关。此外，1 m和2 m处的粗根密度分布相对集中（仅1 m处存在两个异常值），表明树木根系粗根分布具有较高的空间均质性。进一步分析显示（图6），粗根密度占比且总体趋向于0.6 ~ 0.7，且逐步向外扩展。

表5显示，大客流区内树木根系缺失现象普遍存在，占比超过80%，其中16.33%的树木未出现根系缺失。根系缺失程度以等级2（轻微缺失）为主，占32.65%（96株），等级3和4缺失均为75株。悬铃木和银白槭在等级1和2的占比超过50%，根系状况相对良好；而槭树和银杏则表现出更为严重的根系缺失问题。

2.1.3 树干空腐与根系的相关性分析

基于R语言的相关性分析结果表明（图7），树干截面健康木质占比与距树干1 m、2 m处根系粗根分布密度无显著相关性（ $p > 0.05$ ），表明树干空腐程度与根系粗根分布之间不存在直接关联。然而，树干不同部位的空腐程度呈现显著正相关（ $p < 0.01$ ），这可能与空腐病害的纵向扩展或相互感染机制有关。

2.2 不同树种的风险评估结果

根据表6所示，外滩及南京东路区域5种树木中，悬铃木的风险等级最高，其中Ⅳ级风险占比6.67%（15株）。Ⅲ级风险树木共44株（14.97%），以悬铃木（36株）和银白槭（4株）为主。相对而言，Ⅰ级和Ⅱ级风险树木占比分别为32.31%和47.62%，各树种Ⅱ级及以下风险占

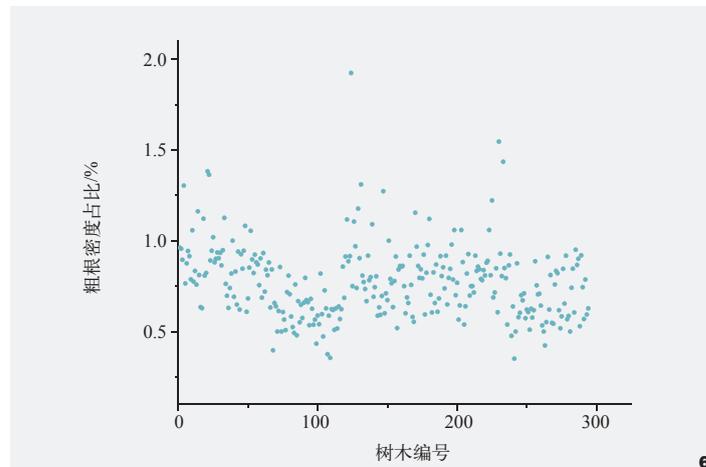
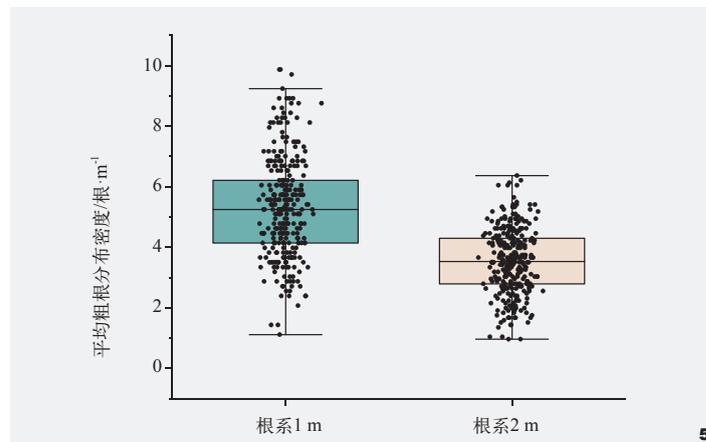
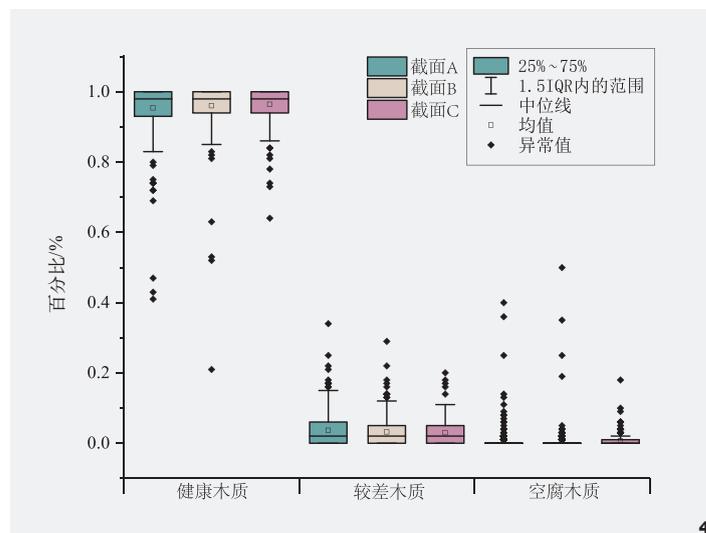


图4 树干不同截面各类木质的占比
Fig. 4 Proportion of different wood types at various cross-sections of the tree trunk

图5 树木根系平均粗根分布密度
Fig. 5 Average distribution density of main roots in tree root

图6 距树干1 m和2 m的粗根密度占比
Fig. 6 Percentage of thick root density 1 m and 2 m from the trunk

表5 不同树种根系缺失情况
Tab. 5 Root deficiency levels in different tree species

树种 Tree species	数量 / 株 Number of trees	根系缺失等级 / % Root system deficiency level			
		等级 1	等级 2	等级 3	等级 4
槭树	13	23.08	15.38	23.08	38.46
香樟	6	0.00	100.00	0.00	0.00
悬铃木	225	17.78	31.11	28.89	22.22
银白槭	24	8.33	41.67	16.67	33.33
银杏	26	11.54	30.77	11.54	46.15
总计	294	16.33	32.65	25.51	25.51

表6 大客流区树种安全风险可能性评估情况
Tab. 6 Safety risk probability assessment of tree species in high pedestrian traffic areas

树种 Tree species	数量 / 株 Number of trees	风险可能性等级 P/% The level of risk probability				树木可能倒伏 / 折断的部位 S/% Potential locations for tree fall/breakage			
		I级	II级	III级	IV级	1(二级枝)	2(一级枝)	3(树干)	4(整株)
槭树	13	30.77	61.54	7.69	0.00	69.23	7.69	23.08	0.00
香樟	6	0.00	100.00	0.00	0.00	50.00	50.00	0.00	0.00
悬铃木	225	34.22	43.11	16.00	6.67	52.44	16.44	19.11	12.00
银白槭	24	8.33	75.00	16.67	0.00	54.17	0.00	45.83	0.00
银杏	26	46.15	42.31	11.54	0.00	15.38	3.85	73.08	7.69
总计	294	32.31	47.62	14.97	5.10	50.00	14.29	25.85	9.86

比均超过75%，表明区域整体风险水平较低。在风险部位分布方面，二级枝折断为主要风险源(50%)，除银杏外，其他树种的二级

枝折断比例均超过50%。树干折断风险占比25.85%，其中银杏的树干折断风险超过50%，需重点关注。

由图8可知，树枝风险整体较低，95%以上处于II级及以下，仅悬铃木部分达到III级，未发现IV级风险。树干风险同样以II级及以下为主(92.69%)，仅悬铃木和银白槭部分达到III级，且仅悬铃木存在IV级风险。相比之下，根系风险显著较高，近30%处于III级及以上，其中悬铃木、银白槭和银杏部分达到III级，悬铃木存在IV级风险，槭树和香樟也有部分处于III和IV级，表明根系健康状况需重点监测。

2.3 树木风险评估结果

根据表7可知，两个大客流区约80%的树木风险等级为II级及以下，整体风险水平较低。区域对比分析表明，外滩III级及以上风险比例(3.39%)显著低于南京东路(7.69%)。在风险后果方面，约70%的树木为II级及以下，但南京东路IV级风险后果占比(16.24%)明显高于外滩(5.65%)。综合评估表明，大客流区域内80%的树木风险处于可接受范围，10.54%为中等风险，5.1%为重大风险。其中，南京东路重大风险树木占比(11.11%)

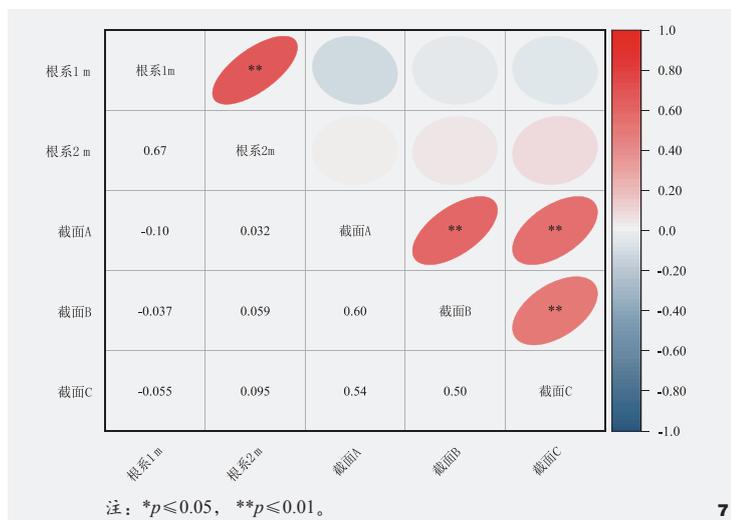


图7 树干不同截面的空腐程度与根系粗根分布密度的相关性分析
Fig. 7 Correlation analysis between the degree of hollow rot in different sections of the trunk and the density of the distribution of thick roots in the root system

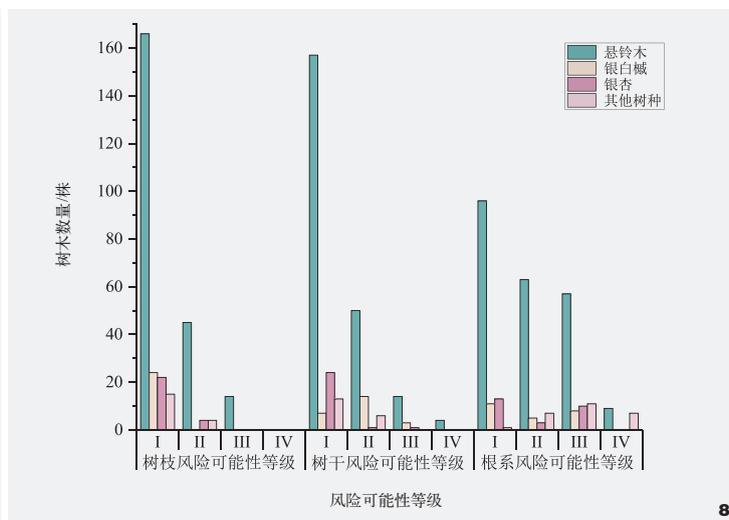


图8 不同树种的风险可能性评估结果
Fig. 8 Assessment results of risk probability of different tree species

显著高于外滩 (1.13%), 表明南京东路需重点关注高风险树木的管护。

2.4 树木风险因子调查统计结果

由图9可知, 树木风险主要受多重因素影响, 其中根系缺失 (C11) 是最关键的风险因子, 在294株样本中出现257次, 涉及所有树种, 且多表现为中等风险程度。其次, 树干内部空腐 (C9) 发生频率达204次, 虽普遍存在但以轻度风险为主。蛀干类害虫 (C6) 发生109次, 是第三大风险因素。相比之下, 与树枝相关的风险因素 (C1-C5) 发生频率普遍较低, 其中树干倾斜 (C2) 发生95次, 且46.3%达到中等及以上风险程度。树冠偏冠 (C1) 和树洞 (C8) 也呈现较高发生频率。

3 讨论

近年来, 台风、暴雨等极端天气事件频发, 显著增加了树木倒伏风险^[20-21]。与其他城市建成区相比, 大客流区域树木生长环境更为恶劣^[22], 不仅面临交通污染、空气质量差、噪音污染和温度波动等多重胁迫, 还受到土壤压实、养分匮乏等限制, 导致树木健康状况普遍较差, 易发生树干空腐和根系发育不良等问题。研究表明, 两个研究区域大部分树木风险值较低, 但南京东路区域因高密度建筑群的影响, 其树木风险显著高于外滩区域。高密度建筑的存在会直接改变风环境, 尤其在建筑峡谷区域, 风速和风向的变化可能增加树木倒伏或断裂的风险^[23]。此外, 建筑的降温^[24]、遮阴^[25]等微气候因素, 进一步加剧了该区域树木倒伏和断裂的风险。

树干空腐是多种因素协同作用的结果, 主要包括病虫害侵袭、环境胁迫以及树木自身的老化等因素。树木受到病虫害侵袭时, 病原菌或昆虫能通过啃食树皮和木质部直接对树木造成伤害^[26], 同时, 真菌进入树干内部, 分泌多种酶分解木材成分加快树干内部腐烂分解^[27-28]。此外, 树干内部空腐也可能源于自然的生长缺陷或外部创伤^[29], 例如, 不科学的管理 (如不当树冠修剪, 车辆碰撞造成的机械损伤等) 所造成的树干伤口暴露, 使得树木的树干伤口暴露在外, 极易遭受病原

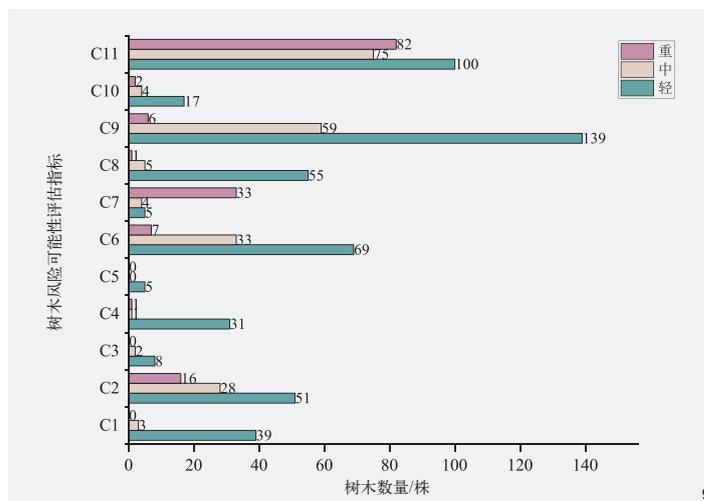


图9 树木风险可能性评估指标的发生频率
Fig. 9 Frequency distribution of tree risk probability assessment indicators

体的侵袭^[30]。与树干相比, 根系所面临的风险主要源自于生长环境的局限性。在城市中, 树木的生长空间通常受到土壤面积狭小、土壤肥力不足等因素的限制, 根系在类环境中难以充分伸展和发展^[31-32], 进而影响树木的稳定性和健康^[27]。大客流区往往伴随着较高的市政建设和基础设施更新的频率, 频繁的道路施工和开挖地下管道等工程, 往往也会对树木的根系造成不可逆的损伤^[33-34]。

树木风险评估是保障公共安全和城市绿化环境的重要环节, 本研究整合了视觉树木评估和无损检测技术, 建立了多维度的树木风险评估体系, 为树木风险管理提供了更为全面和量化的数据支撑。基于研究发现, 本研究建议采用分级管理策略: (1) 建立“传统筛查—无损检测”的递进式评估机制, 通过高效简便的传统方法进行初步筛查, 再针对性地开展无损检测; (2) 实施差异化的风险管理措施, 对低风险树木进行定期巡检和维护, 对中风险树木开展局部修复 (如树洞修补、土壤改良等), 对高风险树木则采取隔离、加固 (安装支撑杆、缆绳系统) 或替换等安全措施。 (3) 在树种选择和种植规划方

表7 不同大客流区树木安全风险评估等级占比
Tab. 7 Percentage of tree safety threat and risk assessment levels in different high pedestrian traffic areas

道路名 Road name	数量 / 株 Number of trees	风险可能性等级 P/% The level of risk probability				风险后果严重性等级 S/% Severity level of risk consequences				风险等级 R/% Risk level			
		I级	II级	III级	IV级	I级	II级	III级	IV级	I级	II级	III级	IV级
南京东路大客流区	117	24.79	48.72	18.80	7.69	10.26	60.68	12.82	16.24	27.35	56.41	5.13	11.11
外滩大客流区	177	37.29	46.89	12.43	3.39	10.73	56.50	27.12	5.65	35.59	49.15	14.12	1.13
总计	294	32.31	47.62	14.97	5.10	10.54	58.16	21.43	9.86	32.31	52.04	10.54	5.10

面, 建议市政部门优化城市树木空间布局, 在高风险区域优先选用抗风性强、适应性好的树种, 同时建立健全树木健康监测和风险评估体系, 实现城市树木的可持续管理。

4 结论

本研究创新性地构建了基于视觉树木评估与无损检测技术融合的大客流区域树木安全风险评估体系, 并对大客流区的树木进行了全面详细的风险检测和评估。研究结果表明, 外滩和南京东路步行街大客流区约80%的树木风险等级处于可接受范围, 但仍有近20%的树木达到中等及以上风险等级, 亟需采取针对性风险管控措施。尽管多数树木的风险发生概率较低, 但由于大客流区域特殊的环境压力(如土壤压实、空气污染等)和人流密集特征, 其风险后果严重性普遍处于较高水平。大客流树木面临的主要风险点包括根系的缺失、树干内部空腐以及蛀干类害虫等问题。其中, 树干空腐呈现出明显的纵向梯度特征, 即空腐程度随树干高度降低而加剧, 且与根系密度无显著相关性。本研究通过实证分析, 揭示了影响树木安全风险的关键因素, 为树木管理与维护提供了数据支持和理论依据。 

注: 文中图表均由作者自绘/摄。

参考文献

- [1] SAROORAJ R B, PRAYLA S S. Optimal Routing with Spatial-temporal Dependencies for Traffic Flow Control in Intelligent Transportation Systems[J]. *Intelligent Automation & Soft Computing*, 2023, 36(02): 2071-2084.
- [2] SOGE A, POPOOLA O, ADETOYINBO A. Detection of Decay and Hollows in Living Almond Trees (*Terminalia Catappa* L. Roxb.) Using Electrical Resistivity Method[J]. *Journal of the Indian Academy of Wood Science*, 2018, 15(02): 181-189.
- [3] 陈文静, 曹雨秋, 张慧会, 等. 法桐行道树生长健康评价——以南京市热河路为例[J]. *中南林业科技大学学报*, 2022, 42(08): 176-190.
- [4] 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(09): 106-111.
- [5] 程睿, 黎国健. 深圳市城市快速路行道树木安全风险评估研究[J]. *园林*, 2024, 41(08): 133-139.
- [6] 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, 2021.
- [7] 程睿, 黎国健, 蒋慧, 等. 基于VTA法及应力波诊断技术的行道树安全风险评估[J]. *中国城市林业*, 2024, 22(03): 56-61.
- [8] TARMU T, KIVISTE A, NÄKK A, et al. The Application of Sonic Tomography (PicUS 3 Sonic Tomograph) to Detect and Quantify Hidden Wood Decay in Managed Norway Spruce Stands[J]. *Forests*, 2022, 13(08): 1260.
- [9] 刘星旦, 康永祥, 甘明旭, 等. 黄帝陵古侧柏树干心腐研究[J]. *西北林学院学报*, 2017, 32(02): 180-187.
- [10] 肖夏阳, 文剑, 肖中亮, 等. 基于雷达波的树木躯干内部缺陷探测识别[J]. *林业科学*, 2018, 54(05): 127-134.
- [11] 邱向辉, 王立海. 探地雷达(GPR)在木材无损检测应用中的可行性探讨[J]. *无损检测*, 2013, 35(11): 51-54.
- [12] 吴贻军, 姚剑飞, 吴俊, 等. 基于ABAQUS有限元法的空洞树干强度分析[J]. *西北林学院学报*, 2022, 37(03): 205-210.
- [13] LI M, KANG Y X, NGUYEN V Q, et al. 3D Reconstruction of the Tree Internal Decay Based on Radar Waves[J]. *BioResources*, 2022, 17(04): 6277-6292.
- [14] 穆田宝, 吴琳娜, 张海涛, 等. 基于车载LiDAR数据的行道树信息提取及安全风险评估[J]. *林业资源管理*, 2022(05): 91-98.
- [15] 台风“贝碧嘉”今晨登陆上海 国家防总办公室、应急管理部持续会商部署防范应对工作[J]. *中国安全生产科学技术*, 2024, 20(09): 127.
- [16] 阮欣, 尹志逸, 陈艾荣. 风险矩阵评估方法研究与工程应用综述[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2013, 41(03): 381-385.
- [17] CHUNG H, PARK J, KIM B K, et al. A Causal Network-based Risk Matrix Model Applicable to Shield TBM Tunneling Projects[J]. *Sustainability*, 2021, 13(09): 4846.
- [18] DUNSTER K. Beyond Turf and Lawn: Poaceae in this Age of Climate Change[M]// *Grasses - Benefits, Diversities and Functional Roles*. InTech, 2017.
- [19] ROSŁON-SZERYŃSKA E, SIKORSKI P, ZARAŚ-JANUSZKIEWICZ E. The Effectiveness of the Visual Method of Hazard Tree Assessment (WID Method) in the Management of Urban Trees[M]// *Plants in Urban Areas and Landscape*. Nitra: Slovak University of Agriculture, 2014: 89-93.
- [20] 黄颂谊, 沈海岑, 陈峥. 台风“山竹”对粤港澳大湾区城市园林树木的影响调查[J]. *广东园林*, 2020, 42(02): 26-31.
- [21] 陈峥, 黄颂谊. 台风对城市园林树木的影响及灾后景观修复对策初探——以厦门“莫兰蒂”台风为例[J]. *现代园艺*, 2018(17): 93-96.
- [22] 卞方圆, 陈爽. 近15年来南京城市居住区树木结构变化研究[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2018, 42(02): 127-133.
- [23] 古亚宁. 基于GIS和CFD模拟的台风灾害下受损园林树木的城市空间分布特征研究——以广州为例[D]. 广州: 华南理工大学, 2021.
- [24] 李玉洁. 树木绿化对城市微环境影响的大洞模拟研究[D]. 北京: 中国气象科学研究院, 2023.
- [25] 王欣冉, 孙妍, 徐程扬. 人为管护因素哑变量对行道树国槐胸径-树高模型精度的影响——以北京市中心城区为例[J]. *中国城市林业*, 2024, 22(03): 16-25.
- [26] YAMAMOTO Y, ISHIKAWA Y, UEHARA K. Characteristics of Trees Infested by the Invasive Primary Wood-borer *Aromia Bungii* (Coleoptera: Cerambycidae)[J]. *Insects*, 2022, 13(01): 54.
- [27] LUNDELL T K, MÄKELÄ M R, HILDÉN K. Lignin-modifying Enzymes in Filamentous Basidiomycete - Ecological, Functional and Phylogenetic Review[J]. *Journal of Basic Microbiology*, 2010, 50(01): 5-20.
- [28] HANUM S F, IRYADI R, RAHAYU A, et al. Wood Decay Diagnostic of *Joannesia Princeps* Vellozo at Bali Botanical Garden Using Arborsonic Acoustic 3D Tomograph[J]. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, 935(01): 012069.
- [29] TOPTUN A, BONDARENKO Y J M I A, RE-SOURCES C O T. Negative Factors Affecting the Sanitary Status of Tree Plants and Effective Approaches to Their Research[J]. *Mechanization in Agriculture & Conserving of the Resources*, 2020, 66(01): 42-45.
- [30] SUCHOCKA M, SWOCZYNA T, KOSNO-JOŃCZY J, et al. Impact of Heavy Pruning on Development and Photosynthesis of *Tilia Cordata* Mill. Trees[J]. *PLoS One*, 2021, 16(08): e0256465.
- [31] 郑宝仁, 卢宝伟. 哈尔滨城市园林树木绿地土壤肥力质量调查[J]. *黑龙江科技信息*, 2010(02): 131.
- [32] KODRÍK J, KODRÍK M. Root Biomass of Beech as a Factor Influencing the Wind Tree Stability[J]. *Journal of Forest Science*, 2002, 48(12): 549-564.
- [33] 陈超燕, 束庆龙, 张鑫, 等. 园林树木衰退原因及其保健措施[J]. *安徽农业科学*, 2005, 33(07): 1343-1344.
- [34] WANG W. What is Under These Dying Trees? An Urban Soil Environment Survey[J]. *Australian Forestry*, 2020, 83(02): 101.