

城市树木风致破坏风险评估技术模型探索

周博扬^{1,2,3} 姚茜^{1,2,3} 张江浩^{1,2,3} 林晨^{1,2,3} 文剑^{1,2,3*}

(1. 北京林业大学工学院, 北京 100083; 2. 北京林业大学, 林木资源高效生产全国重点实验室, 北京 100083;
3. 北京林业大学, 林业装备与自动化国家林业和草原局重点实验室, 北京 100083)

摘要: 极端天气下, 城市树木的风致损毁对生态环境、社会经济和公共安全构成严峻挑战。本研究融合计算流体力学(CFD)、探地雷达(GPR)、有限元分析(FEA)与修正 GALES 模型, 提出一种无损检测—风场模拟—力学判稳的树木风险评估框架。通过 GPR 无损检测技术量化树干内部结构和根系分布特征, 结合 FEA 分析提出稳定性影响因素, 用于优化临界风速预测模型; 同时基于实时气象数据与园区地理信息, 构建城市局部风场和风向的快速预测模型, 实现立木的安全性动态风险评估。以北京林业大学校园典型区域为案例, 验证了该方法的可行性。结果表明: 参数化的单体树木模型可精准定位树木的薄弱部位, 有效提高树木风险评估的准确性; 树木形态特征、土壤参数以及树干缺陷与根系分布受不同风速和风向作用, 显著影响树干强度和根土锚固力, 从而影响树木安全稳固。本研究提供的直观可视化预测结果, 为服务城市树木韧性管理提供数据支撑和理论依据。

关键词: 城市树木; 风致破坏风险; 计算流体力学; 探地雷达; 生物力学模型; 临界风速

中图分类号: S731.2; S761.2 文献标识码: A 文章编号: 2097-5279(2026)02-0049-11

DOI: 10.27035/j.cnki.issn2097-5279.20260206

Exploration of technical models for assessing wind-induced damage risk to urban trees

Zhou Boyang^{1,2,3} Yao Qian^{1,2,3} Zhang Jianghao^{1,2,3} Lin Chen^{1,2,3} Wen Jian^{1,2,3*}

(1. School of Technology, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2. State Key Laboratory of Efficient Production of Forest Resources, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 3. Key Laboratory of National Forestry and Grassland Administration on Forestry Equipment and Automation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: Wind-induced damage to urban trees during extreme weather events poses severe challenges to ecological systems, socioeconomic stability, and public safety. This study integrates Computational Fluid Dynamics (CFD), Ground Penetrating Radar (GPR), Finite Element Analysis (FEA), and a modified GALES model to propose a tree risk assessment framework combining non-destructive testing, wind field simulation, and mechanical stability assessment. By quantifying internal trunk structures and root system distributions using GPR non-destructive testing technology, combined with FEA, we proposed stability influencing factors to optimize the critical wind speed prediction model. Meanwhile, a rapid prediction model for urban micro-wind fields and wind directions was developed based on real-time meteorological data and campus geospatial information, enabling dynamic risk assessment of standing tree safety. The feasibility of this approach was validated using the Beijing Forestry University campus, a typical urban campus setting, as a case study. Results indicate that the parameterized individual tree model can accurately identify vulnerable parts of trees, thereby enhancing the accuracy of risk assessments. Tree morphological characteristics, soil parameters, and trunk defects combined with root distribution are significantly influenced by varying wind speeds and directions, which in turn affect trunk strength and root-soil anchorage capacity, ultimately impacting tree stability and safety. This research provides intuitive visualization of predictive outcomes, offering a data foundation and interdisciplinary theoretical basis for resilient urban tree management.

Keywords: urban trees; wind-induced damage risk; computational fluid dynamics; ground penetrating radar; biomechanical model; critical wind speed

收稿日期: 2025-12-27; 修回日期: 2026-02-02。

基金项目: 国家自然科学基金项目(32071679); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(No. BLX202335)。

* 通信作者: 文剑(E-mail: wenjian@bjfu.edu.cn), 教授。

引文格式: 周博扬, 姚茜, 张江浩, 等. 2026. 城市树木风致破坏风险评估技术模型探索[J]. 树木医学, 3(2): 49-59.

Zhou B Y, Yao Q, Zhang J H, et al. 2026. Exploration of technical models for assessing wind-induced damage risk to urban trees[J]. Tree Health, 3(2): 49-59.

城市树木作为绿色基础设施,在缓解热岛效应(Saaroni et al., 2018)、固碳(Säumel et al., 2016)、维护生物多样性(Morpurgo et al., 2023)及提供生态系统服务(Keeler et al., 2019)等方面作用显著。近年来,受气候变化影响,在极端天气下,城市树木倒伏的频率激增,如2018年台风“山竹”造成广州市超9 000株树木损毁(Zhou et al., 2024)。高风险树木若未及时处置,易引发折断或倒伏,威胁基础设施、交通及人身安全(van Haaften et al., 2016)。

相较于自然林分,城市树木因缺乏冠层庇护、根系退化及建筑环境干扰,更易受到湍流的影响(Finnigan, 2000)。树木风致破坏本质为风—树动态相互作用:风荷载引发树冠摆动与枝干形变,当应力超过木材强度极限时,发生主干断裂或整体倒伏(Moore et al., 2018; 邵卓平, 2025)。近年来,HWIND(Peltola et al., 1999)、GALES(Gardiner et al., 2000)与FOREOLE(Ancelin et al., 2004)等混合机械—经验模型被用于评估林分风致破坏风险,但这些模型未考虑单株树特征变异(如树干空腐、根系构型)的影响。目前仅有少数研究尝试将此类模型迁移至城市树木风险评估(Gu et al., 2021; Gu et al., 2025; Zhou et al., 2024)。

树顶风速预测是运用机械—经验模型评估风致树木破坏风险的重要环节。传统风场预测工具WASP模型常与GALES模型等耦合,用于评估林区风害(Mortensen et al., 1993),但难以解析高密度城市环境的气流分离与湍流效应,准确性受限(Carpentieri et al., 2015)。计算流体力学(computational fluid dynamics, CFD)模拟能够实现城市风场与风速的精准模拟与预测。此外,已有研究将树木冠层建模为多孔介质并且取得接近实测数据的结果(Guo et al., 2021; Mahgoub et al., 2021)。

单体树木稳定性是树木风致破坏风险关键影响因素。现有的树木健康评价模型多基于视觉评估法(visual tree assessment, VTA)(Jalkanen and Mattila, 2000; 陈峻崎, 2014),依据人工观测与树木冠幅、枝干倾斜度等指标判定风险等级,主观性强且缺乏力学理论支撑。树木稳定性受树木特征、气候、土壤条件及树干或根部缺陷等多因素影响(Gardiner et al., 2016; 岳小泉等, 2015)。探地雷达(ground penetrating radar, GPR)可定量识别树干空洞空间分布与地下根系三维构型(Li et al., 2022; 韩付家, 2013; 文剑等, 2017),为弥补模型缺陷提供数据支撑。

综上,城市树木风害风险受多尺度、多因素耦合

影响,亟须跨学科融合。本研究结合GPR量化树木内部缺陷、有限元(finite element method, FEM)力学分析方法以及CFD建筑—树木风场耦合模拟,构建基于实时气象数据的快速响应预警框架,并在北京林业大学园区试验示范。该方法兼顾CFD效率与单株精度,实现风灾前快速分级和日常健康管理,旨在为城市树木韧性管理、形态优化与建筑布局调整提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域

北京林业大学主校区(39°59'N, 116°20'E),校园占地约46.4 hm²,绿化覆盖率44.65%,共有乔木115种3 322株,含古树7株(纁七柒, 2016)。校园内建筑呈东西走向,最高建筑72 m,属于典型的高密度城市绿地。这种建筑密集、树种多样、人流密集的特征在城市园区中具有一定代表性。通过实地测量,系统获取了校园内全部建筑的层高、走向以及大部分树木的树种、胸径、树高、冠幅和木材密度等基础数据,并收集了近10年北京市极端天气记录数据。北京市历史气象数据显示,研究区曾多次遭遇强风事件,某些事件瞬时风速超过25 m·s⁻¹,导致部分树木折断或连根拔起,为验证风害风险预测框架提供了宝贵的真实案例。研究区域概况如图1所示。

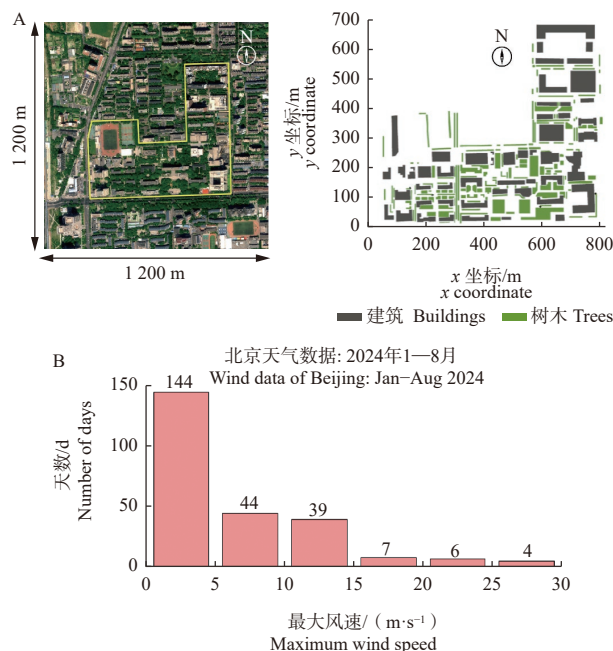


图 1 研究区域概况

Fig. 1 Overview of the study area

注: A. 北京林业大学校园内的建筑和树; B. 北京市极端天气情况。

Notes: A. Buildings and trees on the Beijing Forestry University campus; B. Extreme weather conditions in Beijing.

1.2 研究路线

本研究围绕“风场预测—树体稳定性—破坏风险”主线展开4项工作(图2)：

1)构建校园建筑—树木 CFD 模型,通过输入多风速、多风向工况数据,建立树顶风速(U_c)的不同案例库,结合实时气象预报数据实现快速插值预测;2)利用 GPR 无损检测,获取树干空洞半径比(α)与偏移比(k)建

立树干—树根耦合有限元模型,量化树干、根系缺陷对树木稳定性的削弱程度;3)在 GALES 模型基础上,整合2个修正因子 $f_{rot}(\alpha)$ 、 $f_{offset}(k)$,建立考虑树干缺陷的临界风速(critical wind speed, CWS)预测模型,模拟树干折断、根部倾覆2种失效模式;4)将预测的树顶风速(U_c)与树木的临界破坏风速(CWS)进行比较,实现城市市区树木风致破坏风险的快速评估与实时预警。

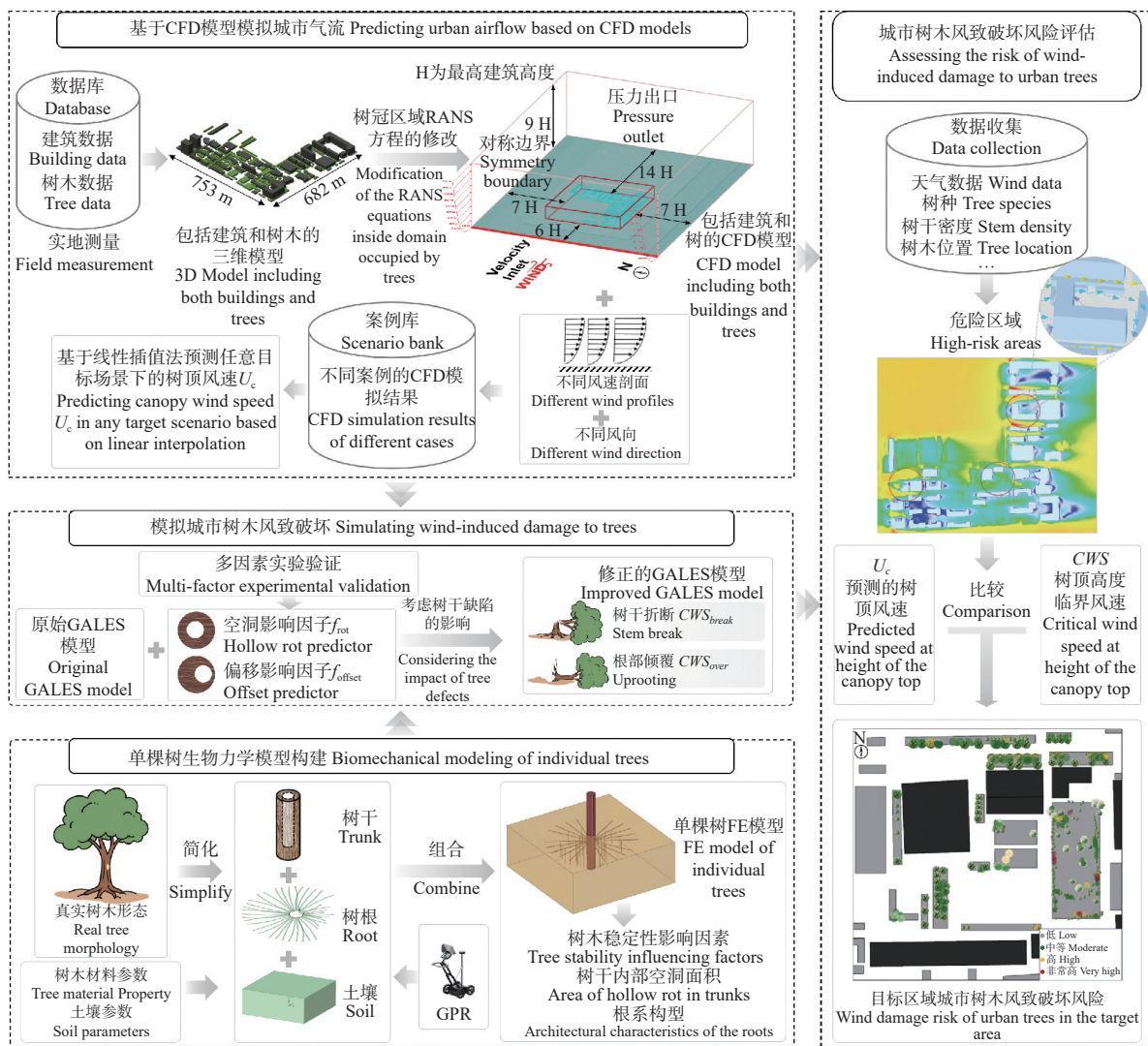


图2 研究路线

Fig. 2 Roadmap of the study

1.3 风险评估工作流程

1.3.1 模拟城市气流与预测园区风场分布

CFD建模中树木冠层的表示对于捕捉其对城市气流的影响至关重要。现有研究将树木视为多孔介质,并在标准流体流动方程中添加动量源项,以体现冠层对风速和湍流的阻尼效应(Kang et al., 2020; Zeng et al., 2020)。本研究采用稳态雷诺平均纳维-斯托克斯(Reynolds-Averaged Navier-Stokes, RANS)方程作为流场控制方程,通过对质量、动量和能量守恒方

程进行简化与修正,使其能够反映树冠与气流之间的相互作用。使用 $k-\epsilon$ 湍流模型实现RANS方程的闭合(Laundar et al., 1983),该模型求解了湍流动能(k)和湍流耗散率(ϵ)两个额外的运输方程。 $k-\epsilon$ 湍流模型是一种广泛应用于风工程领域的双方程湍流模型,已被大量研究证实可有效模拟具有植被的城市建筑环境中气流分布,其可靠性得到了充分验证(Gu et al., 2021; Mochida et al., 2008)。

在动量、湍流动能(turbulence kinetic energy, TKE)

和湍流耗散率 (TKE dissipation) 的输运方程中添加源项 (Buccolieri et al., 2018) 如下:

$$S_{ui} = -\rho \cdot LAD \cdot C_d |U| u_i \quad (1)$$

$$S_k = -\rho \cdot LAD \cdot C_d (\beta_p |U|^3 - \beta_d |U| k) \quad (2)$$

$$S_\varepsilon = -\rho \cdot LAD \cdot C_d \left(C_{\varepsilon 4} \beta_p \frac{\varepsilon}{k} |U|^3 - C_{\varepsilon 5} \beta_d |U| \varepsilon \right) \quad (3)$$

式中: ρ 为空气密度, u_i 代表 i 方向的风速分量, $|U| = \sqrt{\sum_i u_i^2}$ 为风速矢量的大小, LAD (leaf area density) 为叶面积密度。落叶树的 LAD 通常在 $0.5 \sim 2.0 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-3}$ 之间, 取平均值 $LAD = 1 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-3}$ (Gromke and Blocken, 2015)。树冠阻力系数 (C_d) 一般为 $0.1 \sim 0.3$, 取常用值 0.2 (Massman, 1987)。根据相关文献 (Buccolieri et al., 2018), β_p 、 β_d 分别表征湍流生成和耗散的贡献, 取值为 1.0 和 4.0 ; $C_{\varepsilon 4}$ 、 $C_{\varepsilon 5}$ 为 $k-\varepsilon$ 模型常数, 均取值为 1.50 。

将具有相似几何特征的相邻个体进行组合, 能够降低城市对象的复杂性, 同时保证计算精度 (Amorim et al., 2013)。用平行六面体代替建筑物和树木, 将具有相似特征的树木构建为同一个元素, 其

长、宽和高分别对应于树木的平均冠幅和高度。采用六面体网格对目标区域进行离散化, 其中建筑物表面网格尺寸不大于 1 m , 树冠表面网格尺寸不大于 0.6 m 。计算域、进出口、湍流动能及湍流耗散率的边界条件参考 Gu 等 (2021) 的研究, 其余边界条件遵循 COST Action 732 及 AIJ 最佳实践指南 (Franke et al., 2011; Tominaga et al., 2008)。

北京市 2024—2025 年夏季极端天气监测数据显示, 10 m 处的平均最大风速 v_{10} 为 $25.9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。因此, 在构建案例库时, 将风速 v_{10} 设置为 0 、 5 、 10 、 15 、 20 、 25 、 $30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 并考虑西、西北、北、东北、东、东南、南、西南 8 个风向, 共 56 个工况。对具有众多建筑群和树木的城市园区进行 CFD 仿真, 通常需要大量计算资源。线性插值法在预测树木风害和 U_c 方面具有较高准确率 (Gu et al., 2021)。因此, 本研究采用该方法预测实际树顶的风速。通过 CFD 仿真建立 U_c 和 v_{10} 之间的关系, 对于风向的影响则采用最接近案例库风向的结果。图 3 展示了 8 种风向下案例的计算域和网格数量信息。

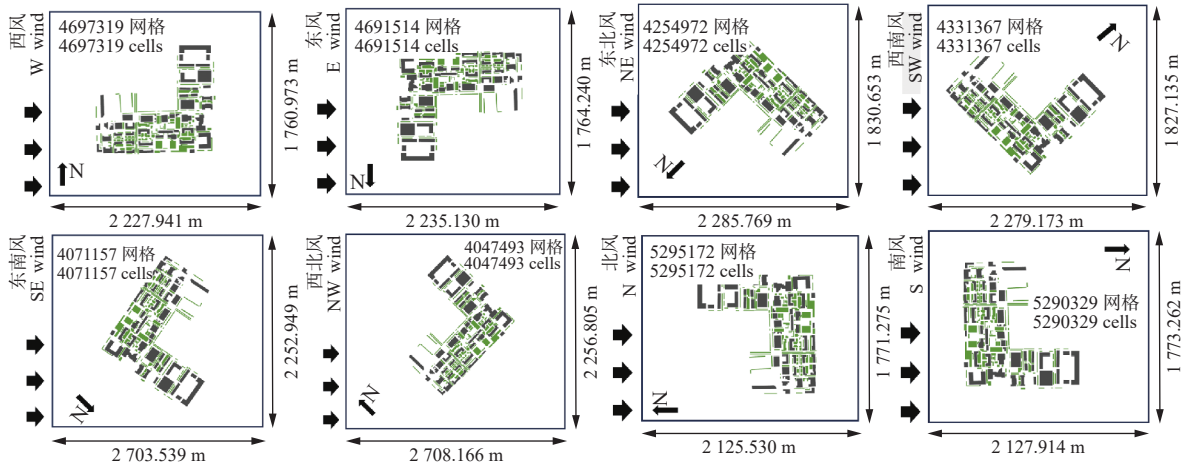


图 3 8 种不同风向案例的基本信息

Fig. 3 Basic information of eight cases with different wind directions

1.3.2 风载荷下单株树生物力学模型构建

在强风作用下, 树木通过树冠重构与树干弯曲变形抵消风荷载, 风致弯矩由根—土综合体的抵抗力矩平衡维持整体稳定性 (图 4)。为量化树干或树根缺陷对树木稳定性的影响, 本研究设置了多组单因素实验 (图 5A、B)。通过比较理想模型与缺陷模型的应力结果差异, 构建影响因子函数。在 8 级风力条件下, 根据风荷载公式 (谭旭等, 2024) 计算树冠等效风阻力, 施加于树干上部, 分别输出树干和树根应力结果。

由于根—土之间相互作用复杂, 根—土锚固受土壤类型、含水率等多因素动态影响, 本研究重点考虑

树干缺陷对其自身强度的影响。基于上述的应力实验结果, 定义 2 种树木稳定性影响因子 f_{rot} 、 f_{offset} 以表示额外应力的增加, 二者分别为考虑了树干空洞、偏移造成的木材强度的损失。根据应力变化规律采用分段线性拟合构建稳定性影响因子, 表达式如下:

$$f_{\text{rot}} = \begin{cases} 1.0 & (0 \leq \alpha < 0.5) \\ \frac{1.8655(\alpha - 0.5)}{1.3771} + 1 & (0.5 \leq \alpha < 1.0) \end{cases} \quad (4)$$

$$f_{\text{offset}} = \begin{cases} 1 & (k < 0.85) \\ 1 + \frac{4(k - 0.80)}{2.0451} & (0.85 \leq k < 0.95) \\ 1 + \frac{70(k - 0.95)}{2.0451} & (0.95 \leq k < 1.00) \end{cases} \quad (5)$$

式中：偏移占比 $k = (s+r)/R$ ，空腐半径比 $\alpha = r/R$ ， r 为空腐半径， R 为树干半径。2 种因子均会导致树干部分承载额外的应力，进而导致树木折断所需的临界风速 CWS_{break} 减小。因此，在共同作用下，两者乘积的倒数与 CWS_{break} 呈正相关。

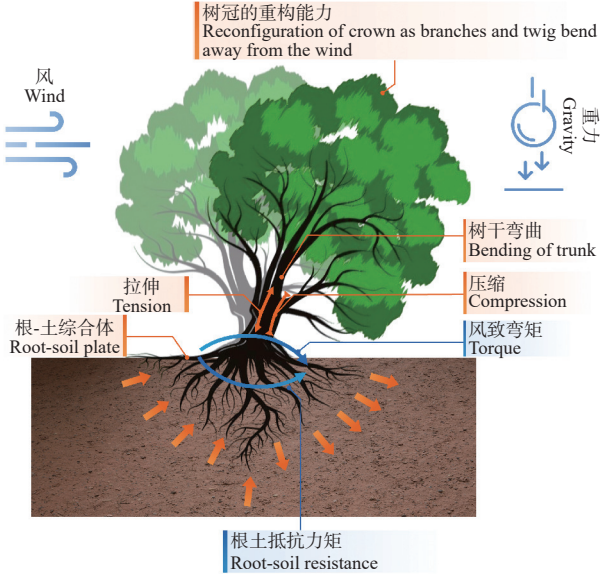


图4 风载荷下树木受力和位移示意图

Fig. 4 Applied forces and movements that occur when a tree is blown to one side by the wind

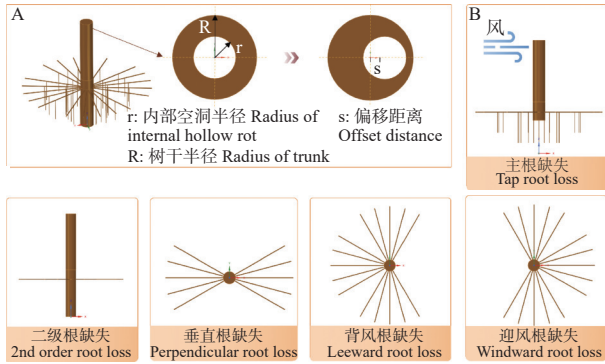


图5 实验方案

Fig. 5 Experimental design

注：A. 树木空腐、偏移模型；B. 根系缺失模型。

Notes: A. Tree hollow rot, offset model; B. Root loss model.

$$G = \frac{(2.7193D/h - 0.061) + (-1.273D/h + 0.9701)(1.1127D/h + 0.0311)^{x/h}}{(0.68D/h - 0.0385) + (-0.68D/h + 0.4785)(1.7239D/h + 0.0316)^{x/h}} \quad (8)$$

式中：0.075 < D/h < 0.45，树木间距 D 设为 5 m。

参数 f_{edge} 由以下公式来计算 (Gardiner et al., 2000)：

$$f_{edge} = \frac{(0.68D/h - 0.0385) + (-0.68D/h + 0.4785)(1.7239D/h + 0.0316)^{x/h}}{(0.68D/h - 0.0385) + (-0.68D/h + 0.4785)(1.7239D/h + 0.0316)^5} \quad (9)$$

式中：树干密度 ρ 和 MOR 来自《中国主要树种的木材力学特性数据库》(中国林业科学研究院木材工业研究所, 1982)。其余的参数 z_0 和 d 参考相关文献 (Gardiner et al., 2000)，取 $z_0 = 0.06h$ ， $d = 0.7h$ ， $f_{knot} = 0.85$ ， $f_{cw} = 1.22$ 。

1.3.3 基于 GALES 模型模拟城市树木风致破坏

本研究选择 GALES 模型进行城市树木风害风险评估，因其所需树木参数最少，且兼容探地雷达实测数据，相较于需获取根系重量的 HWIND 模型及参数复杂的 FOREOLE 模型更具适用性。

GALES 模型将风对树木的破坏分为树干折断和树木倒塌 2 种类型，并且假设风致应力在树冠基部至树干基部之间均匀分布 (Gardiner et al., 2000)。当树干最外部的应力超过树干断裂模量 (modulus of rupture MOR , Pa) 时，树干有折断的风险。公式 (6) 中 f_{knot} 、 f_{edge} 以及 f_{cw} 分别为考虑了树木节疤导致的木材强度的降低、树木相对林分边缘的距离以及树冠的悬垂重量的额外应力。有限元分析表明，树干空洞与几何偏移会导致显著的应力集中，使缺陷区域在相同风荷载下的承载应力大幅提升。 f_{rot} 、 f_{offset} 的物理意义与 f_{edge} 、 f_{cw} 一致。为在风险评估模型中表征这一效应，将其以与 f_{edge} 、 f_{cw} 相同的形式引入 CWS_{break} 公式：

$$CWS_{break} = \frac{1}{k_v D} \left[\frac{\pi \cdot MOR \cdot DBH^3}{32 \rho G (d - 1.3)} \right]^{\frac{1}{2}} \left[\frac{f_{knot}}{f_{edge} f_{cw}} \right]^{\frac{1}{2}} \ln \left(\frac{h-d}{z_0} \right) \left[\frac{1}{f_{rot} f_{offset}} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

式中： $k_v = 0.41$ 为冯卡门系数， d 为零平面位移 (m)， z_0 为空气动力学粗糙度长度， D 为树木之间的平均间距 (m)， G 为阵风因子， DBH 为树木的胸径， h 为树木平均高度 (m)， ρ 为空气密度 ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)。

树木倒塌临界风速 CWS_{over} 由根系抗倾覆力矩与树干重量关系确定：

$$CWS_{over} = \frac{1}{k_v D} \left[\frac{C_{reg} \cdot SW}{\rho G d} \right]^{\frac{1}{2}} \left[\frac{1}{f_{edge} f_{cw}} \right]^{\frac{1}{2}} \ln \left(\frac{h-d}{z_0} \right) \quad (7)$$

式中： C_{reg} 为最大基底弯矩与树干重量 SW (kg) 之间的回归常数 ($\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{kg}^{-1}$)。阵风因子 G 是从风洞试验中确定的 (Gardiner et al., 1997)，与树间距 D 、平均树高 h 、距林分边缘距离 x (m) 有关，可用以下经验公式来计算：

风速 CWS 。根据 U_c 与 v_{10} 之间的关系以及天气预报数据得到预测树顶风速 U_c ，将其与 CWS 进行比较，即可实现单株树风害风险的快速评估。参考 Gu 等 (2021) 提出的树木破坏风险评估标准，4 种不同风险等级如下： $U_c \leq 0.5CWS$ ，树木破坏风险低； $0.5CWS < U_c \leq 0.8CWS$ ，树木破坏风险中等； $0.8CWS < U_c < CWS$ ，树木破坏风险高； $U_c \geq CWS$ ，树木破坏风险极高。

2 结果与分析

2.1 树干、根系缺陷对树木应力分布的影响

有限元实验结果如图 6 所示。结果显示：树干的空腐与偏移显著增大树干最外层应力，从而降低其抗弯强度，但对根系应力的影响相对有限。这是因为树干空洞增大使树干强度降低、风载荷传递效率下降，使得应力集中于树干，根系分担的应力减少。

根系与土壤的锚固强度相对稳定，不受树干空洞的影响。根系对于树干空洞偏移的响应规律不显著。当风载荷与缺陷偏移方向一致时，树干部分最大等效应力进一步升高。当树干空洞半径比 $\alpha < 0.5$ 时或偏移占比 $k < 0.85$ 时，树干部分等效应力变化不显著； $\alpha > 0.5$ 和 $k > 0.85$ 后，树干部分的等效应力呈线性增加。当树干空洞半径比 $\alpha \geq 0.7$ 时，抗折强度下降 30% 左右； $k \geq 0.85$ 时，抗倾覆能力降低 10% 左右 (图 6A、B)。

不同类型根系缺失对于树干应力影响不明显 (图 6C)。当初始载荷倍数增加 10 倍时，最大等效应力值最大的模型为正常模型的 1.10 倍，最大等效应力值最小的模型为正常模型的 0.87 倍。而根系缺失对根系应力的影响随初始载荷倍数增加逐渐明显。其中，当初始载荷增加至 10 倍时，迎风根缺失与背风根缺失模型应力值明显高于正常模型，表明迎风根

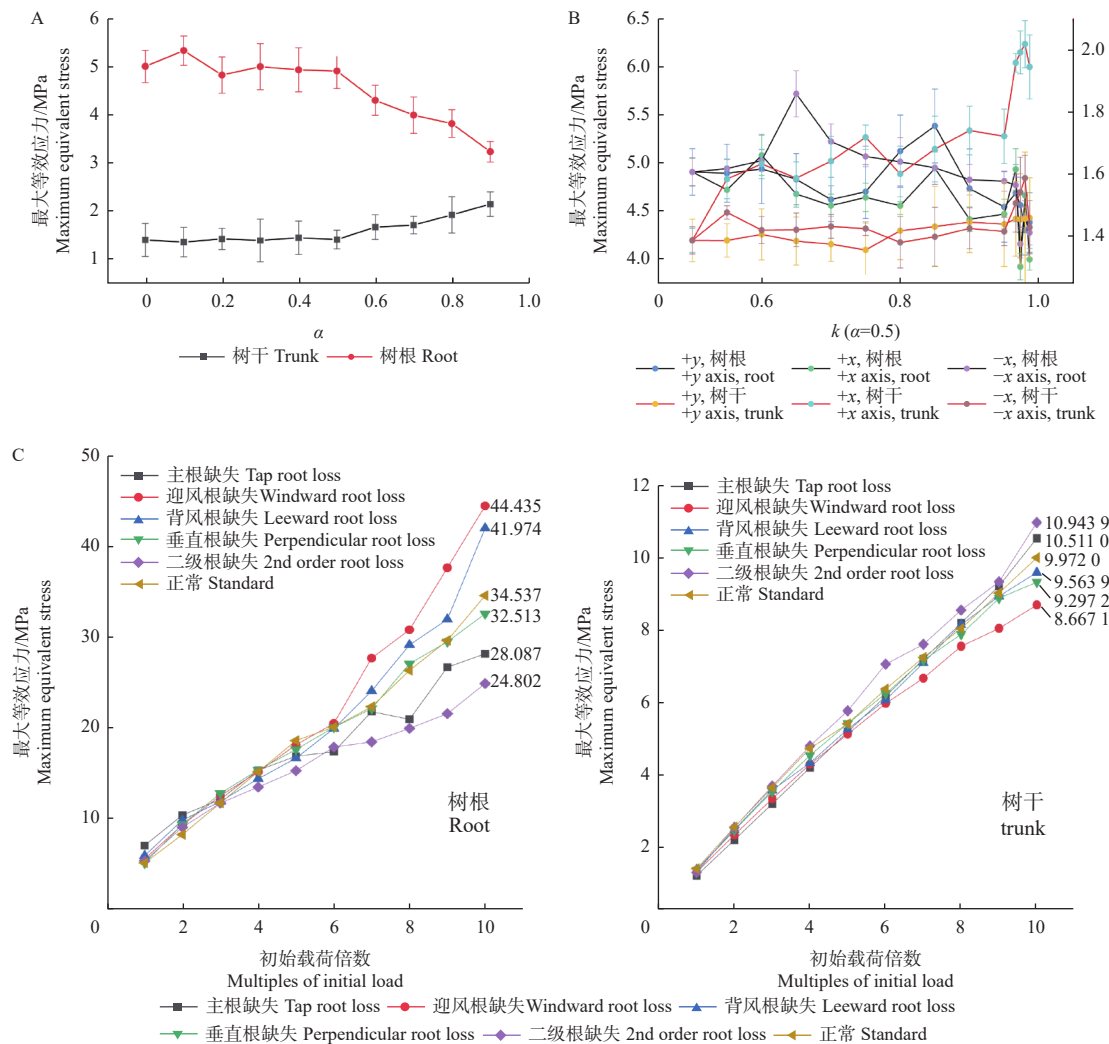


图 6 有限元实验结果

Fig. 6 Finite element experiment results

注：A. 空洞对应力分布的影响；B. 空洞偏移对应力分布的影响；C. 根系缺失对应力分布的影响。

Notes: A. The effect of cavities on stress distribution; B. The effect of cavity displacement on stress distribution; C. The effect of root loss on stress distribution.

与背风根是主要承载应力的部位；主根缺失、垂直根缺失及二级根缺失模型应力值峰值则低于正常模型，这可能是由于此类情况下应力向树干部位转移。

2.2 案例分析

考虑到全校树木种类复杂、数量繁多，采集树木数据过于耗费精力与时间，故选取博物馆、林沼区及流书播惠亭区3个强风区域作为重点研究区域。假设校园内发生10级强风事件($v_0=26.5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)。当风向设置为西风时，强风区域内的最大风速达到峰值，对树木的破坏风险的影响最为显著，因此在这种情

况下开展预测工作流程，以便分析目标区域内树木的破坏情况。

目标区域位于北京林业大学校内“林之心”东侧，该区域内分布的树木种类、数量等信息详见表1。因树木种类过多，所以评估时依据“胸径 $\geq 10\text{ cm}$ 、树高 $\geq 7\text{ m}$ 、冠幅完整且主干明显”的大型乔木的标准筛选135株，忽略幼树、灌木的个体。该区域有1条东西向、2条南北向的校园道路，案例树被命名为“TX”。图7A展示了目标区域建筑、道路和树木的基本信息。

表1 目标区域内树木特征
Tab. 1 Characteristics of trees in the target area

树种 Species	数量 Number	树干密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}$) Stem density	MOR/MPa	C_{reg}
国槐 <i>Styphnolobium japonicum</i> (L.) Schott	10	702(6.7%)	103.4(11.5%)	149.8(14.3%)
白皮松 <i>Pinus bungeana</i> Zucc. ex Endl.	7	486(12.3%)	64.9(18.6%)	149.8(14.3%)
油松 <i>Pinus tabuliformis</i> Carr.	8	544(11.1%)	73.5(12.3%)	131.7(11.5%)
洋白蜡 <i>Fraxinus pennsylvanica</i> Marsh.	51	686(5.8%)	116.0(12.1%)	149.8(14.3%)
圆柏 <i>Sabina chinensis</i> (L.) Ant.	46	609(7.7%)	77.7(10.0%)	149.8(14.3%)
杜仲 <i>Eucommia ulmoides</i> Oliv.	11	670(8.9%)	85.0(13.3%)	149.8(14.3%)
银杏 <i>Ginkgo Biloba</i> L.	2	532(10.5%)	76.3(13.0%)	149.8(14.3%)

注：括号内为变异系数。
Notes: The values in parentheses are the coefficients of variation.

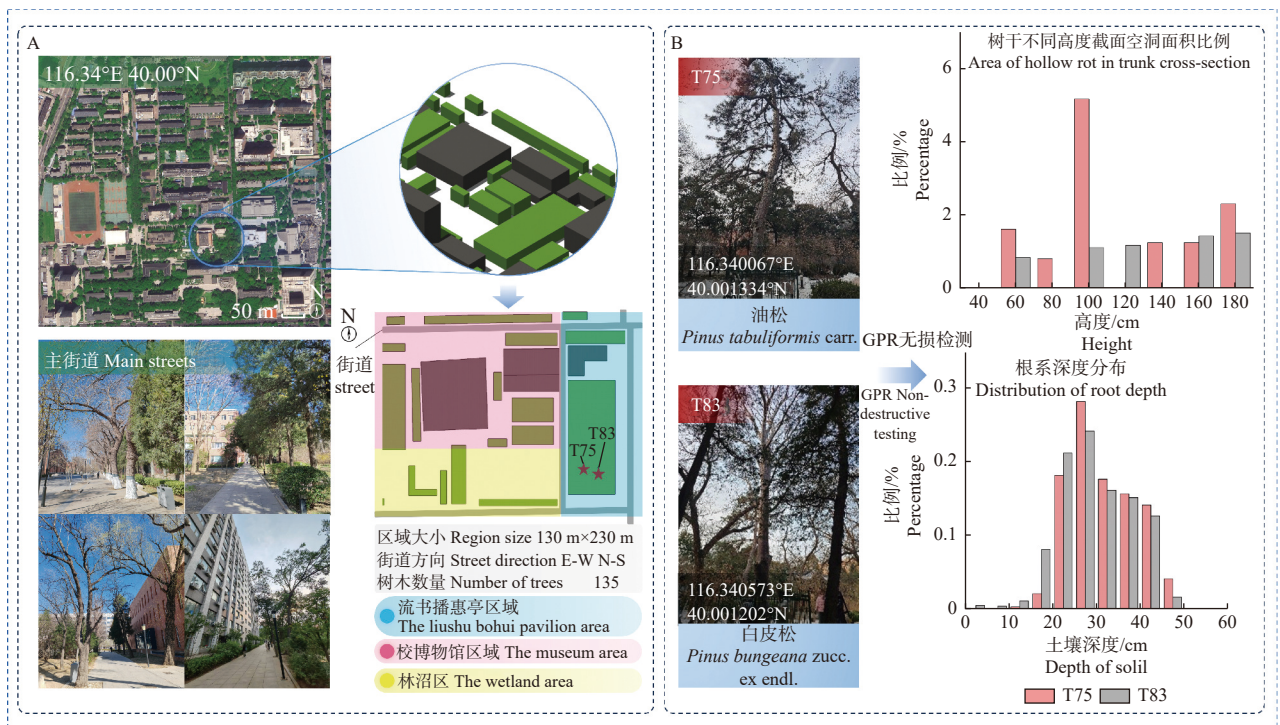


图7 目标区域与重点树木概况
Fig. 7 Overview of the target area and key trees

注：A. 目标区域具体信息；B. 2株重点观测树木形态与GPR检测结果。

Notes: A. Specific information of the target area; B. Morphology and GPR inspection results of the two key observation trees.

在此之前,通过 SIR-3000TRU 树木雷达(900MHz)对区域内编号为 T75、T83 的 2 株松树进行了树干和树根检测。检测结果显示(图 7B),白皮松(T83)根系在正北方向存在显著缺失,而树干内部几乎未出现空腐现象;油松(T75)在高度为 100 cm 的截面处存在较小的空洞(α 约为 0.55)。经修正的 GALES 模型将树木结构缺陷对强度的影响纳入考量范畴,据此得出树木发生折断或倒塌的修正临界风速(图 8)。结果表明,树木连根拔起的临界风速低于拦腰折断的临界风速,表明连根拔起是树木风致破坏的主要模式。临界风速结果表明,油松(T75)树干内的缺陷使其拦腰折断的临界风速降低了 16%(从 $117.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 降至 $98.7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)。虽然在 $v_{10}=26.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,这一变化对该树的破坏风险影响较小,但如果风速持续增大,其破坏的风险可能从较低上升到高风险,再加上根系的缺失可能使树木在特定风向下更易受到破坏。因

此,综合多维度考虑,本研究建议校园管理部门采取适当的加固或支撑措施对树木进行防护。校方管理人员采用在树干周围竖立支撑杆的方式,对树木实施刚性支撑,以规避其倒塌风险。在后续北京地区的多次强风事件中,该树未出现折断或倒塌情况,进一步说明本预测工作流程的可靠性。

图 9 展示了校园中 3 个典型场地的 U_c 与 v_{10} 之间的线性拟合结果,分别是空旷的操场区域,树木密度较高的“林之心”和具有狭窄通道的洋白蜡大道。将 CWS 与线性插值预测所得的 U_c 进行比较,得到该区域内每株树的破坏风险。图 10 呈现了目标区域内各树木的风害风险等级分布情况。其中有 11 株树处于高风险等级、8 株树处于极高风险,这 8 株树与上述重点观测树(T75、T83)的详细数据见表 2。高风险树木大部分胸径较小但树体较高,这种特征使树木破坏临界风速极大降低,也说明预测结果与实地观察一致。

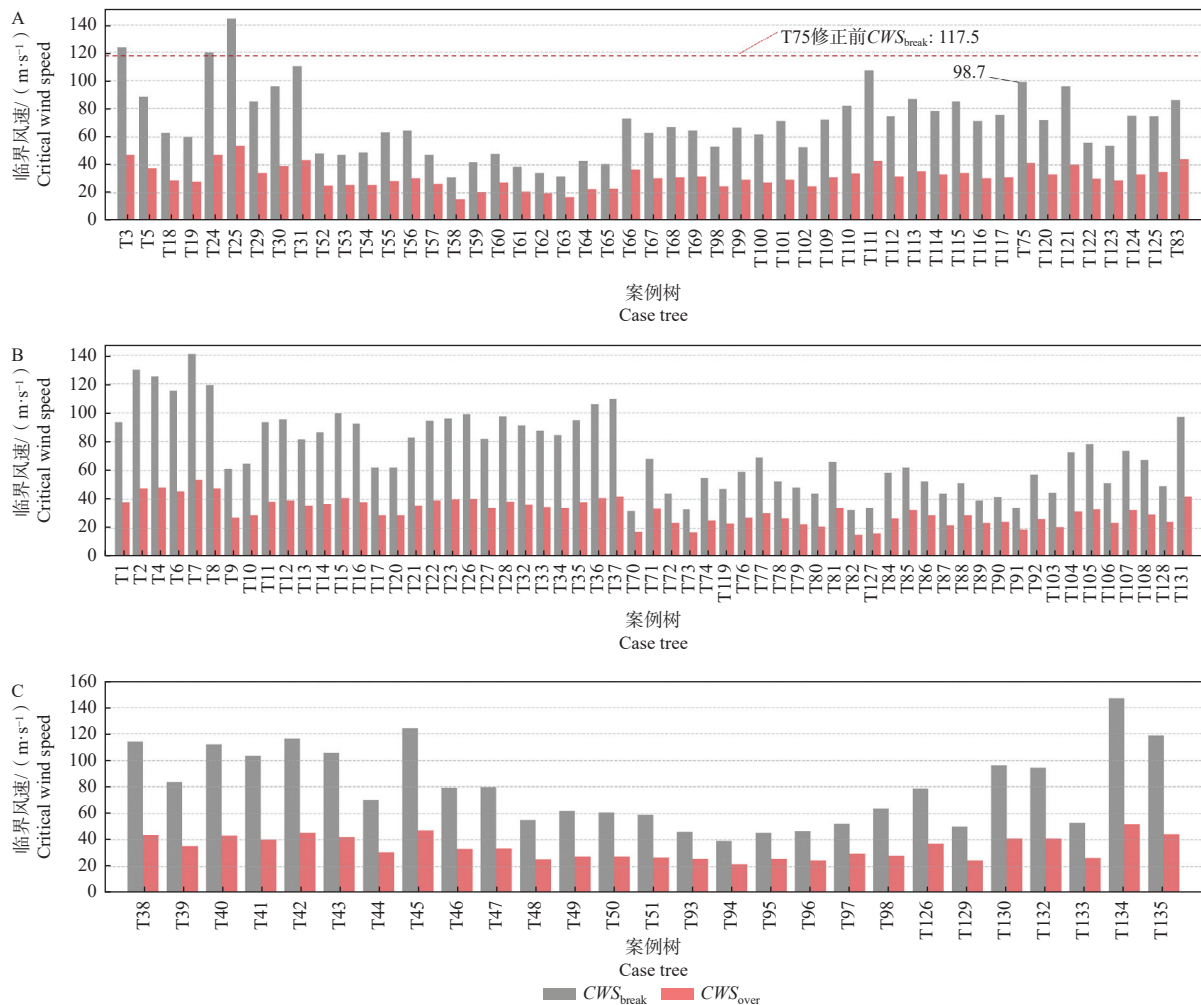


图 8 目标区域内树木的临界风速

Fig. 8 Critical wind speed for trees in the target area

注: A. 流书播惠亭区域; B. 博物馆区域; C. 林沼区。

Notes: A. The liushu bohui pavilion area; B. The museum area; C. The wetland area.

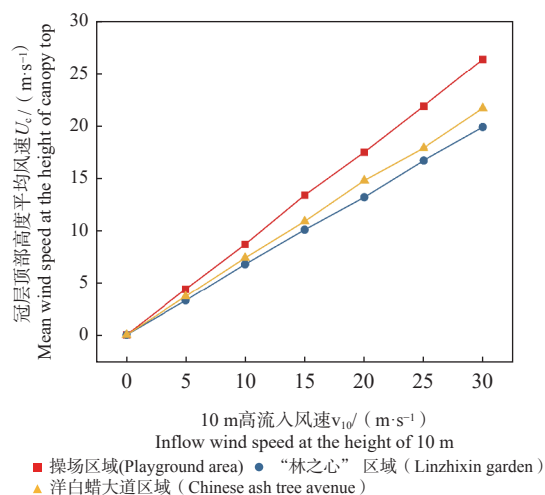


图9 风速线性插值结果

Fig. 9 Linear interpolation results of wind speed

3 讨论

除树木自身力学性质、形态特征和缺陷的影响之外,周围的建筑环境对树木破坏风险也具有显著影响。例如,高风险树木都位于与风向垂直的道路附近或建筑物的拐角处。这是因为当风向与道路垂直时,局部风向会发生变化,树木的破坏风险随之显著上升。在建筑物的拐角处或道路交叉的路口,风速会因文丘里效应或街道峡谷效应急剧增加。这提醒城市规划工作者应重视建筑布局对树木稳定性和公众安全的潜在威胁,合理控制街区建筑密度。对于城市园林工作者,可通过修剪树冠控制树木的细长比,从而提高树木抵抗破坏的能力。在易受风害区域(如高楼间隙、开阔地带)优先种植抗风性强的



图10 目标区域内每株树的破坏风险

Fig. 10 Risk level of wind damage to trees in the target area

注: A. 破坏风险图; B. 高风险树木实拍示例图。1、2、3 分别为实地拍摄的高径比较高的圆柏、油松照片。

Notes: A. Damage risk map; B. Actual photo examples of high-risk trees. 1, 2, 3 are the pictures of the Chinese junipers and Chinese pines with high slenderness ratio in the validation area.

表2 极高风险与重点观测树木的形态特征

Tab. 2 Morphological characteristics of trees at very high risk and under key observation

	编号 No.	树种 Species	树高/m Height	胸径/cm DBH	冠幅/m Crown width	树冠高度/m Crown height
重点观测树 Key observation trees	T75	白皮松	14.3	48.4	7.5	4.3
	T83	油松	13.5	46.8	7.8	4.6
极高风险树 Extremely high-risk trees	T58	圆柏	13.8	14.2	3.1	3.5
	T62	圆柏	12.5	14.0	6.0	4.4
	T63	圆柏	7.9	11.5	3.5	2.5
	T70	圆柏	12.8	13.2	3.4	3.2
	T73	圆柏	10.7	18.5	3.3	2.5
	T82	圆柏	10.8	14.5	4.0	3.8
	T91	圆柏	12.2	18.0	4.6	4.5
	T127	圆柏	14.8	13.0	3.2	3.4

树种(如深根系乔木),并控制树冠密度以减少风阻。

本研究也存在一些局限性:树木内部缺陷的几何建模存在简化假设,实际树干内部空洞多呈现不规则形态,与研究中采用的圆柱体空洞存在差异;CFD模型构建过程中对建筑特征的简化处理(如屋顶结构的简化),可能导致局部风场模拟出现偏差;除大风外,降雨量对根土锚固也有动态影响;单株树生物力学模型中树冠构建存在简化,实际树冠在大风作用下会发生重构并产生变形,可能也会影响风载荷的大小。

未来,本研究将进一步优化根系及树体本构模型参数并开展试验验证。在东南沿海等多风区域开展长期定位观测,通过实际风灾事件验证模型预警的准确性;同时进一步引入降雨、土壤含水量及季节变化等动态环境因子,构建风—雨耦合的树木风险评估模型,从而持续提升模型在各类复杂城市园区环境中的适用性,不断拓展其应用范围与实践价值。随着后续研究的深入推进,本方法有望在城市绿化设施的精细化管理与灾害防控领域发挥更大作用。

4 结论

本研究提出一种多方法融合的树木风险评估方法,实现了园区树木风害风险的精细化评估。该框架通过 GPR 无损获取树干与根系结构关键参数,弥补传统方法的数据空白;通过有限元分析量化缺陷影响发现,当树干空洞半径比 $\alpha \geq 0.7$ 时,抗折强度下降 30% 左右;当 $k \geq 0.85$ 时,抗倾覆能力降低 10% 左右。基于力学分析结果,本研究修正了 GALES 模型,并结合 CFD 风场模拟,实现了对单株树木风险等级的精准划分。案例表明,该方法能有效识别园区内的高风险树木,且仅需基础地理与树木信息,即可推广至城市森林公园、城市绿地、行道树等多种场景,为提升城市绿化设施的韧性以及制定气候适应性规划提供创新思路与方法。

参 考 文 献

陈峻崎. 2014. 北京市古树健康评价研究[D]. 北京: 北京林业大学.

Chen J Q. 2014. Health assessment of ancient trees in Beijing[D]. Beijing: Beijing Forestry University. (in Chinese)

韩付家. 2013. 树木风险评估研究概况[J]. 山东林业科技, 43(5): 90–94, 80.

Han F J. 2013. Overview of tree risk assessment studies[J]. Journal of Shandong Forestry Science and Technology, 43(5): 90–94, 80. (in Chinese)

邵卓平. 2025. 古树断裂、倒伏方式及其力学机制[J]. 树木医学, 2(3):

61–73.

Shao Z P. 2025. Fracture, lodging mode and mechanical mechanism of ancient trees[J]. Tree Health, 2(3): 61–73. (in Chinese)

谭旭, 张潇巍, 李爽, 等. 2024. 风载荷下树木稳定性的无损评估方法[J]. 森林工程, 40(2): 127–141.

Tan X, Zhang X W, Li S, *et al.* 2024. A non-destructive method for assessing tree stability under wind loading[J]. Forest Engineering, 40(2): 127–141. (in Chinese)

文剑, 李伟林, 肖中亮, 等. 2017. 活立木内部缺陷雷达波检测研究[J]. 农业机械学报, 48(10): 180–188.

Wen J, Li W L, Xiao Z L, *et al.* 2017. Radar wave detection of standing trees internal defect[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 48(10): 180–188. (in Chinese)

岳小泉, 王立海, 葛晓雯. 2015. 风荷载作用下树木力学特性研究进展[J]. 森林工程, 31(6): 33–36, 40.

Yue X Q, Wang L H, Ge X W. 2015. Research progress of mechanical properties of trees under wind load action[J]. Forest Engineering, 31(6): 33–36, 40. (in Chinese)

纟七柒. 2016. 北京林业大学校园植物导览手册[M]. 北京: 中国林业出版社.

Yun Q Q. 2016. Beijing Forestry University campus plant guide [M]. Beijing: China Forestry Publishing House. (in Chinese)

中国林业科学研究院木材工业研究所. 1982. 中国主要树种的木材物理力学性质[M]. 北京: 中国林业出版社.

Research Institute of Wood Industry, Chinese Academy of Forestry. 1982. Wood mechanical properties of main tree species in China[M]. Beijing: China Forestry Publishing House Chinese. (in Chinese)

Amorim J H, Rodrigues V, Tavares R, *et al.* 2013. CFD modelling of the aerodynamic effect of trees on urban air pollution dispersion[J]. Science of the Total Environment, 461: 541–551.

Ancelin P, Courbaud B, Fourcaud T. 2004. Development of an individual tree-based mechanical model to predict wind damage within forest stands[J]. Forest Ecology and Management, 203(1/3): 101–121.

Buccolieri R, Santiago J L, Rivas E, *et al.* 2018. Review on urban tree modelling in CFD simulations: Aerodynamic, deposition and thermal effects[J]. Urban Forestry & Urban Greening, 31: 212–220.

Carpentieri M, Robins A G. 2015. Influence of urban morphology on air flow over building arrays[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 145: 61–74.

Finnigan J. 2000. Turbulence in plant canopies[J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 32: 519–571.

Franke J, Hellsten A, Schlunzen K H, *et al.* 2011. The COST 732 Best Practice Guideline for CFD simulation of flows in the urban environment: A summary[J]. International Journal of Environment and Pollution, 44(1/2/3/4): 419–427.

Gardiner B, Berry P, Moulia B. 2016. Review: Wind impacts on plant growth, mechanics and damage[J]. Plant Science, 245: 94–118.

Gardiner B, Peltola H, Kellomäki S. 2000. Comparison of two models for predicting the critical wind speeds required to damage coniferous trees[J]. Ecological Modelling, 129(1): 1–23.

Gardiner B A, Stacey G R, Belcher R E, *et al.* 1997. Field and wind tunnel assessments of the implications of respacing and thinning for tree

- stability[J]. *Forestry*, 70(3): 233–252.
- Gromke C, Blocken B. 2015. Influence of avenue-trees on air quality at the urban neighborhood scale. Part II: Traffic pollutant concentrations at pedestrian level[J]. *Environmental Pollution*, 196: 176–184.
- Gu D L, Zhao P J, Chen W, *et al.* 2021. Near real-time prediction of wind-induced tree damage at a city scale: Simulation framework and case study for Tsinghua University campus[J]. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 53: 102003.
- Gu Y, Liu Y, Chen Y Q, *et al.* 2025. Near real-time warning for urban tree destruction under coupled wind and rain loads: Prediction framework and case study[J]. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 127: 105663.
- Guo X, Gao Z, Buccolieri R, *et al.* 2021. Effect of greening on pollutant dispersion and ventilation at urban street intersections[J]. *Building and Environment*, 203: 108075.
- Jalkanen A, Mattila U. 2000. Logistic regression models for wind and snow damage in northern Finland based on the National Forest Inventory data[J]. *Forest Ecology and Management*, 135(1/3): 315–330.
- Kang G, Kim J J, Choi W. 2020. Computational fluid dynamics simulation of tree effects on pedestrian wind comfort in an urban area[J]. *Sustainable Cities and Society*, 56: 102086.
- Keeler B L, Hamel P, McPhearson T, *et al.* 2019. Social-ecological and technological factors moderate the value of urban nature[J]. *Nature Sustainability*, 2(1): 29–38.
- Launder B E, Spalding D B. 1983. The numerical computation of turbulent flows[M]// Patankar S V, Pollard A, Singhal A K. Numerical prediction of flow, heat transfer, turbulence and combustion. Amsterdam: Elsevier: 96–116.
- Li H B, Zhang X W, Li Z Q, *et al.* 2022. A review of research on tree risk assessment methods[J]. *Forests*, 13(10): 1556.
- Mahgoub A O, Ghani S. 2021. Numerical and experimental investigation of utilizing the porous media model for windbreaks CFD simulation[J]. *Sustainable Cities and Society*, 65: 102648.
- Massman W. 1987. A comparative study of some mathematical models of the mean wind structure and aerodynamic drag of plant canopies[J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 40(1/2): 179–197.
- Mochida A, Tabata Y, Iwata T, *et al.* 2008. Examining tree canopy models for CFD prediction of wind environment at pedestrian level[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 96(10/11): 1667–1677.
- Moore J, Gardiner B, Sellier D. 2018. Tree Mechanics and Wind Loading[M]//Geitmann A, Gril J. Plant Biomechanics: From Structure to Function at Multiple Scales. Cham: Springer International Publishing: 79–106.
- Morpurgo J, Remme R P, Van Bodegom P M. 2023. CUGIC: The Consolidated Urban Green Infrastructure Classification for assessing ecosystem services and biodiversity[J]. *Landscape and Urban Planning*, 234: 104726.
- Mortensen N G, Landberg L, Troen I, *et al.* 1993. Wind atlas analysis and application program (WAsP)[R]. Roskilde: Risø National Laboratory.
- Peltola H, Kellomäki S, Väisänen H, *et al.* 1999. A mechanistic model for assessing the risk of wind and snow damage to single trees and stands of Scots pine, Norway spruce, and birch[J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 29(6): 647–661.
- Saaroni H, Amorim J H, Hiemstra J A, *et al.* 2018. Urban Green Infrastructure as a tool for urban heat mitigation: Survey of research methodologies and findings across different climatic regions[J]. *Urban Climate*, 24: 94–110.
- Säumel I, Weber F, Kowarik I. 2016. Toward livable and healthy urban streets: Roadside vegetation provides ecosystem services where people live and move[J]. *Environmental Science & Policy*, 62: 24–33.
- Tominaga Y, Mochida A, Yoshie R, *et al.* 2008. AIJ guidelines for practical applications of CFD to pedestrian wind environment around buildings[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 96(10/11): 1749–1761.
- van Haaften M A, Meuwissen M P M, Gardebroek C, *et al.* 2016. Trends in financial damage related to urban tree failure in the Netherlands[J]. *Urban Forestry & Urban Greening*, 15: 15–21.
- Zeng F X, Lei C W, Liu J L, *et al.* 2020. CFD simulation of the drag effect of urban trees: Source term modification method revisited at the tree scale[J]. *Sustainable Cities and Society*, 56: 102079.
- Zhou Z J, Fu J H, Xiao Y Q. 2024. Risk of wind destruction to urban trees: Prediction workflow and relative importance of influencing factors[J]. *Sustainable Cities and Society*, 112: 105600.