DOI:10.12171/j.1000−1522.20210200

城市公园树木安全风险评估
——以北京动物园为例

国　健[1,2]　乔红雍[1]　袁　涛[1]　王树标[2]　牟宁宁[2]　贾建飞[2]　席　帆[2]　夏　炜[2]
（1. 北京林业大学园林学院，国家花卉工程技术研究中心，花卉种质创新与分子育种北京市重点实验室，城乡生态环境北京实验室，林木花卉遗传育种教育部重点实验室，北京 100083；2. 北京动物园，北京 100044）

摘要:【目的】城市公园绿地内种植大量树木，其安全隐患常被忽视。准确掌握树木健康状况，进行树木安全风险评估，旨在为树木安全管理提供依据。**【方法】**以北京动物园内胸径 10 cm 以上乔木为研究对象，通过目测和简易工具调查树体健康状况，运用层次分析法评估树木安全风险等级,采用因子分析法分析北京动物园内树木安全风险潜在影响因子。通过 PiCUS-3 弹性波树木断层诊断仪检测树干中空状况。**【结果】**(1)北京动物园内胸径 10 cm 以上乔木有 6 361 株，包括 103 株极高风险树、229 株高风险树、363 株中风险树和 5 666 株低风险树。风险等级极高和高的树种为毛白杨、槐树、刺槐、泡桐和绦柳，具有树干破损、树干异常音、严重偏冠、有病虫害、树基松动等总体特征。(2)树干(树干 > 0.3 m 部分)破损、树干基部(树干 ≤ 0.3 m 部分)破损、根系异常是北京动物园排名前 3 的树木安全风险潜在影响因子。(3)PiCUS-3 弹性波树木断层诊断仪与简易工具对绦柳树干中空状况的检测差异性极大，而对毛白杨、泡桐等树种检测未见明显差异。**【结论】**城市动物园中，树种、树龄和树体体量等内在因素以及树木立地条件、异常天气、游人或动物破坏等外部因素共同决定树木健康状况。树木健康状况和栽植位置综合决定树木安全风险等级的高低。弹性波树木断层诊断仪有助于提高评估准确度，调查评估时可针对性地使用。本文首次在城市动物园开展树木安全风险评估，对城市公园树木安全风险管理、建立树木安全监测机制有参考和借鉴意义。

关键词：动物园；树木安全；风险评估；树木监测；城市林业
中图分类号：S731　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1000−1522(2025)03−0128−11
引文格式：国健，乔红雍，袁涛，等. 城市公园树木安全风险评估——以北京动物园为例 [J]. 北京林业大学学报，2025，47(3)：128−138. Guo Jian, Qiao Hongyong, Yuan Tao, et al. Tree safety risk assessment in urban parks: taking Beijing Zoo as an example[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2025, 47(3): 128−138.

Tree safety risk assessment in urban parks: taking Beijing Zoo as an example

Guo Jian[1,2]　Qiao Hongyong[1]　Yuan Tao[1]　Wang Shubiao[2]　Mou Ningning[2]
Jia Jianfei[2]　Xi Fan[2]　Xia Wei[2]
(1. School of Landscape Architecture, National Engineering Research Center for Floriculture, Beijing Key Laboratory of Ornamental Plants Germplasm Innovation & Molecular Breeding, Beijing Laboratory of Urban and Rural Ecological Environment, Key Laboratory of Genetics and Breeding in Forest Trees and Ornamental Plants of Ministry of Education, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;
2. Beijing Zoo, Beijing 100044, China)

Abstract: [**Objective**] Green spaces in urban parks contain a large number of trees whose safety hazards are often overlooked. Tree safety risk assessment and accurate grasping the safety status of trees can provide a basis for tree safety management. [**Method**] Trees with DBH ⩾ 10 cm in Beijing Zoo were used for the

收稿日期: 2021−05−26　**修回日期:** 2025−01−21
基金项目: 北京园林绿化增彩延绿科技创新工程项目(2019-KJC-02-10)。
第一作者: 国健。主要研究方向：古树大树、植保相关技术工作。Email：tuoxie@sina.com　地址：100044 北京市西城区西直门外大街 137 号。
责任作者: 袁涛，博士，教授。主要研究方向：园林植物繁殖、栽培与应用。Emai：yuantao@bjfu.edu.cn　地址：100083 北京市海淀区清华东路 35 号北京林业大学园林学院。
本刊网址: http://j.bjfu.edu.cn；http://journal.bjfu.edu.cn

study. Tree health was investigated visually and with simple tools, hierarchical analysis was applied to assess the risk level of tree safety and factor analysis was used to analyze potential impact factors of tree safety risks in Beijing Zoo. Trunk hollow condition was detected by means of PiCUS-3 Sonic Tomograph. [**Result**] (1)There were 6 361 trees with DBH ≥ 10 cm in Beijing Zoo, including 103 very high-risk trees, 229 high-risk trees, 363 medium-risk trees and 5 666 low-risk trees. Those with extremely high and high risk levels were *Populus tomentosa*, *Styphnolobium japonicum*, *Robinia pseudoacacia*, *Paulownia fortunei*, *Salix matsudana* 'Pendula' with the general characteristics of broken trunks, abnormally toned trunks, severely deflected crowns, infested with pests and diseases, and loose tree bases. (2) The tree trunk (trunk height > 0.3 m) breakage, the base of the tree trunk (trunk height ≤0.3 m) damage and the root abnormalities were the top 3 potential influencing factors for tree safety risks in Beijing Zoo. (3) There was a significant difference in detection of hollow conditions within the trunks of *Salix matsudana* 'Pendula' between PiCUS-3 Sonic Tomograph and simple tools, however, no significant differences were observed between the two methods in tree species such as *Populus tomentosa* and *Paulownia fortunei.* [**Conclusion**] In urban zoos, the health status of trees is determined by both intrinsic factors such as tree species, age, and size, as well as external factors including site conditions, abnormal weather, and damage caused by visitors or animals. The safety risk level of trees is determined by a combination of their health status and their planted location. PiCUS-3 Sonic Tomograph can enhance the accuracy of evaluations and can be used selectively. This paper is the first time to carry out tree safety risk assessment in an urban zoo, which is of reference and significance for tree safety risk management and the establishment of a tree safety monitoring mechanism in urban parks.

Key words: zoo; tree safety; risk assessment; tree monitoring; urban forestry

城市树木具有美化城市景观、减少“热岛效应”、减噪除尘、增加生物多样性等功能[1]，其经济和生态价值高，并随树木的生长而最大化，但树木带来的风险也会随树龄的增长而增加[2]。近年来花粉过敏[3]、树枝折断、掉落砸人伤物的事件[4]屡有报道，树木安全风险管控逐渐成为当前园林绿化部门急需解决的问题。美国最早提出一套包括树木位置、根系、树干和枝条等 4 大类共 85 个指标的树木危险等级系统[5]，可全面反映树木的生存状况，但耗时费力。Mattheck 等[6]从根系、树干和枝干 3 部分提出潜在危险性的评价基准，包括根系不稳定，树干异常倾斜、裂痕、腐朽中空，枝干 V 形夹角和枯枝等。我国学者[7−9]对风雪等天气导致树木灾害的发生机制开展深入研究，为判断树木安全风险提供理论依据。随着研究的推进，“树木风险评估”在 20 世纪 90 年代后逐渐取代“危树”一词，并被认为是识别、分析和评估风险的系统过程[10−11]。树木安全风险评估要充分考虑发生安全风险的后果、概率和可能的时间 3 个因素[12−13]。

树木安全管理的城市绿地范围主要包括街道[14−15]、公园绿地[16]、居民区[17]，管理对象包括行道树、古树[18]等。公园绿地中树木产生安全风险时，可能危害的不仅涉及游客，也可能破坏构筑物、地下管线、设备器材、铺装座椅、围栏支撑、古树名木等绿地中诸多目标，带来严重损失。相较于其他城市公园，动物园涵盖城市公园的各项功能与特性，在此基础上还存在全年客流量大、儿童占比高、参观人群集中、大量圈养野生动物需饲养与展示等特点。动物园中的树木具有城市公园的普遍性，也具有动物园的特殊性，研究其安全风险具有十分重要的代表意义。全国现有 140 余家城市动物园，北京动物园建园历史悠久，全年游客众多，园区饲养大熊猫、金丝猴等珍贵野生动物。在对园区胸径 10 cm 以上乔木树种生长、养护状况的调查和数据分析基础上，构建树木安全风险评估方法，评估园区内树木安全风险等级，分析常见异常问题、高风险树木成因、一般特征与潜在影响因子等，并在此基础上提出北京动物园树木安全风险管控的方法建议，旨在为城市公园乃至城市绿地开展树木安全风险管理提供参考。

1　研究区概况与研究方法

1.1　北京动物园概况

北京动物园地处北京市西城区（39°56′51″N，116°20′36″E），属典型暖温带半湿润大陆性季风气候，四季分明，春秋短促，夏季炎热多雨，冬季寒冷干燥。1 月最冷平均气温−7～−4 ℃，7 月最热平均气温 25～26 ℃。年均降水量约 600 mm，全年降水 75%集中在 6—8 月。

北京动物园占地面积约 80 km^2，始建于 1906 年，园区内大树林立，新植树少，树木种植区域约 50 km^2。截至 2020 年，园区饲养展览动物 441 种，共 5 000 余只，是中国开放最早、动物种类最多、占地面积最大的城市动物园[19]。全年游客众多，2010 年和 2015 年分别为 700 万、850 万，2018 年已达到 980 万，暑期旺季单日游客量可达 15 万，多为家长携带儿童参观，婴幼儿比例相较其他城市公园显著偏高。

北京动物园现存 42 株树龄 100 年以上挂牌古树，养护精细，保护水平高，具有不可替代的特殊性，本文重在探索具有较强普适性的树木安全风险评估方法，因而未将其列入本次研究对象。

1.2 树木安全风险评估内容与方法

一是依据《城市树木健康诊断技术规程》[20]，通过目测诊断法（VTA）[21]，辅助以木锤、改锥等工具进行树木调查，判断树木健康状况，进而评估树体健康危险度。二是根据树木风险因素，以树体健康危险度与树木栽植位置为评价指标，开展树木安全风险评估，最终得到树木安全风险等级。

1.2.1 树木健康状况调查与评估

本研究中，树木健康状况调查与评估主要从一级调查（初步诊断）、二级调查（精细诊断）、树体健康危险度评估 3 个方面开展。一级调查和二级调查具体方案见图 1。树体健康危险度评估表见表 1。

一级调查。对北京动物园内胸径 10 cm 以上乔木（不含挂牌古树）开展初步调查。记录树木基础信息，对设定的 10 项诊断指标开展评估。等级判定为差和极差的树木启动二级调查。填写、上传数据于金数据软件（https://jinshuju.net）。

二级调查。调查参考《城市树木健康诊断技术规程》，并充分考虑城市动物园树木特有隐患（标记*），一并列入调查表格。按从整体到局部、从上到下的顺序，目测诊断观察树梢、树干、根系等，同时对树干（树干 > 0.3 m 部分）和树基（树干 ≤ 0.3 m 部分）分别用木锤敲打听音、改锥 45°倾斜插入根颈辅助判断。

树体健康危险度评估。完成一、二级调查后，对调查中与树木安全密切相关的偏冠、树干倾斜、落枝危险等 11 项评估项目进行量化打分，参考层次分析法中重要性标度模型，两两比较各指标，给出重要性分级评分[22]。重要性评分的标准参考书籍文献、行业经验、专家以及动物园技术人员等综合意见，逐一比较得出重要性的分级评分。最终各项求和相加，依据总分值判定得到树体健康危险度，用于反映树木自身生长状况。

1.2.2 树木安全风险等级评估

城市公园中，树木安全风险等级的判定主要由

区块	树种	树木位置	
树木编号	调查时间	调查小组	记录人
树高	胸径	东西冠幅	南北冠幅
偏冠	□ 无	□ 有	
落枝危险	□ 无	□ 有	
树干倾斜	□ 无	□ 有	
树皮损伤、腐朽	□ 无	□ 有	
木质部开裂	□ 无	□ 有	
蛀干害虫	□ 无	□ 有	
病害	□ 无	□ 有	
树干异常音	□ 无	□ 有	
树基松动	□ 无	□ 有	
根颈部腐朽	□ 无	□ 有	
等级判定	□ 优	10项全部正常	结束调查
	□ 良	1项异常或长势有提高空间	结束调查
	□ 差	2项以上异常或1项异常严重	二级调查
	□ 极差	多项异常严重，已无存活价值	建议伐除

a 北京动物园树木一级调查表

生境状况	立地条件	□ 绿地内 □ 道路广场 □ 坡地 □ 兽舍运动场内*		
	遮荫情况	□ 无 □ 遮挡其他 □ 被遮挡		
	土壤质地	□ 砂土 □ 壤土 □ 黏土 □ 其他		
	现有维护	□ 无 □ 围栏 □ 支撑、拉纤 □ 树洞修补 □ 复壮沟井* □ 防腐涂刷 □ 其他		
局部诊断	诊断内容	骨架大枝	树干（树干 > 0.3 m部分）	树基（树干 ≤ 0.3 m部分）
	树皮损伤、腐朽	□ 0 □ < 0.08 □ 0.08 ~ 0.16 □ 0.16 ~ 0.33 □ ≥ 0.33	□ 0 □ < 0.08 □ 0.08 ~ 0.16 □ 0.16 ~ 0.33 □ ≥ 0.33	□ 0 □ < 0.08 □ 0.08 ~ 0.16 □ 0.16 ~ 0.33 □ ≥ 0.33
	木质部开裂	□ 0 □ < 0.08 □ 0.08 ~ 0.16 □ 0.16 ~ 0.33 □ ≥ 0.33	□ 0 □ < 0.08 □ 0.08 ~ 0.16 □ 0.16 ~ 0.33 □ ≥ 0.33	□ 0 □ < 0.08 □ 0.08 ~ 0.16 □ 0.16 ~ 0.33 □ ≥ 0.33
整体诊断	糖朽、树洞	□ 无 □ 有		
	枯枝	□ 无 □ 2 cm < 直径 ≤5 cm □ 直径 > 5 cm		
	病害	□ 无 □ 有 描述:		
	蛀干害虫	□ 无 □ 有		
	根系异常	□ 无 □ 盘绞 □ 裸露;支撑根/非支撑根 □ 腐朽:芯部/表层 □ 根颈部腐朽		
	树干倾斜	□ 无 □ <10°		
综合判定		□ 轻微受害 □ 严重受害 □ 不健全		
建议措施		□ 无 □ 修剪 □ 伐除更新 □ 修补维护 □ 支撑抱箍 □ 土壤改良 □ 药剂处理 □ 其他		
树木其他特征		□ 部分有毒 * □ 枝干有刺 □ 过敏源 □ 果实可食用 *		

b 北京动物园树木二级调查表

偏冠. 以树干为中点，树冠投影任意方向左右面积相差 3 倍以上；落枝危险. 直径 > 2 cm 的易折易落或已折未落枝条；树干倾斜. 树干偏离垂直方向超 10°；树皮损伤、腐朽. 仅树皮有缺损，木质部完好；木质部开裂. 开裂处最大宽度 > 2 cm；蛀干害虫. 树干或枝桠有虫洞、虫孔或虫粪等能证明蛀干害虫活动的痕迹；病害. 树干出现如异常肿大、树皮腐烂、有菌类子实体或不明液体流出等症状；树干异常音. 树干内部因空洞或腐朽等原因导致木锤敲击声与正常声音有差别；树基松动. 推动树干判断是否晃动，根据胸径大小决定力度大小；根颈部腐朽. 用改锥斜向下 45°戳探根颈部一周，判断是否可插入及插入深度。*表示城市动物园树木特有隐患。

图 1 北京动物园树木健康状况调查方案

Fig. 1 Survey plan for tree health status in Beijing Zoo

表 1　北京动物园树体健康危险度评估

Tab. 1　Health risk assessment of trees in Beijing Zoo

评估项目	评估指标	重要性评分	评估结果
偏冠	无	0	
	有	3	
树干倾斜	0	0	
	< 10°	1	
	10° ~ 25°	3	
	> 25°	5	
病虫害(病、虫分别计算)	无	0	
	有	1	
落枝危险	直径 ⩽ 2 cm	0	
	2 cm < 直径 ⩽ 5 cm	1	
	直径 > 5 cm	3	
局部诊断(骨架大枝、树干和树基分别计算)	0	0	危险度Ⅰ：> 10分或极差树 危险度Ⅱ：5 ~ 10分 危险度Ⅲ：< 5分或良树 危险度Ⅳ：优树
	< 0.08	1	
	0.08 ~ 0.16	3	
	0.16 ~ 0.33	5	
	⩾ 0.33	7	
树干异常音	无	0	
	有	1	
树基松动	无	0	
	有	5	
糟朽、树洞	无	0	
	有	1	
根系异常	正常	0	
	裸露	1	
	腐朽	7	
果实是否可食用	否	0	
	是	1	
树高	< 20 m	0	
	⩾ 20 m	1	

注：危险度从高到低为Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ。

其发生安全问题时造成的人、财、物等损失的风险可能性大小而定。本研究选取树体健康危险度与树木栽植位置作为评估指标，前者决定了该树种发生安全问题的可能性大小，后者决定了树木危害目标和造成损失的严重程度。参考层次分析法中的重要性标度模型，两两比较各指标，给出重要性分级评分。最终各项求和相加，依据总分得出树木安全风险等级(表 2)。使用 SPSS 26.0 软件，采用因子分析法，分析树木安全风险潜在影响因子。

1.3　PiCUS-3 抽样检测

使用 PiCUS-3 弹性波树木断层诊断仪(PiCUS- 3，Argus Electronic，德国)，对主要游览区域中成行列、成片群的聚集树木随机抽样检测断面，辅助验证树干内部情况。该仪器适用于检测树干外观完整的树木的内部腐朽程度，确定采样高度后，将探针固定于树干一周取一个断面，收集断面数据。因弹性波在树干不同介质中传播速度不同，由此转化成不同颜色的扫描图像，深棕、浅棕、绿、粉、蓝的颜色顺序表示腐朽程度从正常到严重，逐渐加重。中空率为绿、粉、蓝 3 种颜色区域面积的总和占断面总面积的百分比。当腐朽区域中心与树干中心一致时，Wagener、Coder、Fraedrich、Mattheck 等相关模型都可用来参考分析；当腐朽区域延伸至树干外部，使外部开裂时，Mattheck 模型更适用[23]。

该检测方法可以在树干无破损的情况下探测内部腐朽情况，准确度高，作用突出，但操作仪器受场地限制，且经费投入高，目前主要在古树名木保护领域中投入使用较多。

表 2　北京动物园树木安全风险等级评估

Tab. 2　Tree safety risk level assessment in Beijing Zoo

评估项目	评估指标	重要性评分	风险评估结果
树体健康危险度	Ⅰ	7	⩽ 6分：低 7 ~ 8分：中 9 ~ 10分：高 >10分：极高
	Ⅱ	4	
	Ⅲ	2	
	Ⅳ	1	
树木栽植位置(危害目标)	绿地(人、周边植物)	3	
	道路广场(人、设施设备)	5	
	兽舍运动场(动物、人)	4	
	陡坡(人、设施设备)	1	

2　结果与分析

2.1　树木健康状况

北京动物园内胸径 10 cm 以上乔木共 6 361 株，分布于 30 科、45 属、69 种/品种，其中常绿树 2 177 株，落叶树 4 184 株，常绿树与落叶树的比值为 1∶1.92。栽植数量前 10 的树种为圆柏(*Juniperus chinensis*)、油松(*Pinus tabuliformis*)、栾树(*Koelreuteria paniculata*)、侧柏(*Platycladus orientalis*)、绦柳(*Salix matsudana* 'Pendula')、毛白杨(*Populus tomentosa*)、槐树(*Styphnolobium japonicum*)、刺槐(*Robinia pseudoacacia*)、臭椿(*Ailanthus altissima*)和白皮松(*Pinus bungeana*)(表 3)。

一级调查判定结果，园内有优树 4 526 株，良树 935 株，差树 842 株，极差树 58 株，分别占 71.15%、14.70%、13.24%、0.91%(表 3)。其中白皮松栽培数量最少，优树比例最高，无极差树；侧柏、栾树、油松和圆柏各等级比例优于总占比，长势较优；而刺槐、

表 3 北京动物园一级调查判定结果

Tab. 3 Judgment results of the primary investigation in Beijing Zoo

树种	优株数量(占比/%)	良株数量(占比/%)	差株数量(占比/%)	极差株数量(占比/%)	总计株数
白皮松 *Pinus bungeana*	190(84.44)	13(5.78)	22(9.78)	0(0.00)	225
侧柏 *Platycladus orientalis*	255(78.46)	36(11.08)	33(10.15)	1(0.31)	325
臭椿 *Ailanthus altissima*	195(69.15)	72(25.53)	12(4.26)	3(1.06)	282
刺槐 *Robinia pseudoacacia*	153(50.83)	47(15.61)	99(32.89)	2(0.66)	301
槐树 *Styphnolobium japonicum*	174(56.68)	82(26.71)	48(15.64)	3(0.98)	307
栾树 *Koelreuteria paniculata*	240(72.95)	45(13.68)	41(12.46)	3(0.91)	329
毛白杨 *Populus tomentosa*	195(62.10)	37(11.78)	81(25.80)	1(0.32)	314
绦柳 *Salix matsudana* ‘Pendula’	242(76.34)	9(2.84)	66(20.82)	0(0.00)	317
油松 *Pinus tabuliformis*	497(82.97)	53(8.85)	47(7.85)	2(0.33)	599
圆柏 *Juniperus chinensis*	736(82.79)	197(10.91)	52(5.85)	4(0.45)	889
其他 Others	1 649(66.68)	444(17.95)	341(13.79)	39(1.58)	2 473
总计	4 526(71.15)	935(14.70)	842(13.24)	58(0.91)	6 361

绦柳、槐树、毛白杨种栽培数量多，但差树比例较高。

对长势差、极差的 900 株树木展开二级调查，主要问题树种为刺槐、毛白杨、绦柳、槐树、圆柏，占比达 39.11%。在异常问题中，树皮损伤、腐朽发生率最高，树基松动发生率最低，说明长势差和极差的树木客观反映了北京动物园整体树木的异常问题分布情况，具有代表性和参考意义(表 4)。对高发树种和高发异常问题的判定可指导树木修补、复壮、伐除等措施的精准化实施，常见树木异常表现见图 2。

北京动物园内生境良好区域的树木，健康程度由自身生物特性决定。常绿树具有生长缓慢、寿命长、抗性强的特点，园区内白皮松、桧柏等树种整体长势优良，异常问题少。落叶树中如毛白杨、绦柳、刺槐等树种，生长迅速、生命力强但寿命短，易表现为异常问题多发、高发，但树势健壮、生长旺盛，此种情况隐患最大，易发生安全问题，需要重点关注。

经树体健康危险度判定，北京动物园内现有健康危险度 I 级树木 265 株(4.17%)，健康危险度 II 级树木 291 株(4.57%)，健康危险度 III 级树木 1 279 株(20.11%)，健康危险度 IV 级树木 4 526 株(71.15%)。分析认为北京动物园当前有 265 株树木自身健康状况极差，应立即组织修补修复或伐除更新；有 291 株树木生长不良，如不采取措施，其会在较短时间内发展成为危险度更高的树木；有 1 279 株树木当前长势一般，存在部分不良问题，应在 5 年内提前人为干预；有 4 526 株长势良好，如保持当前养护水平，短期不会发生树势恶化现象。

2.2 树木安全风险等级评估

综合树体健康危险度和栽植位置，评估北京动物园的树木安全风险等级。结果(图 3)显示：北京动物园内有 103 株极高风险树，229 株高风险树，363 株中风险树，5 666 株低风险树；极高风险树共

表 4 北京动物园二级调查异常问题及其高发树种

Tab. 4 Abnormal problems and their high incidence tree species in the secondary investigation of Beijing Zoo

异常问题	株数	发生率/%	高发树种(株数)				
树皮损伤、腐朽	439	48.78	槐树(38)	加杨(33)	栾树(28)	毛白杨(50)	绦柳(34)
树干倾斜	302	33.56	刺槐(54)	绦柳(29)	油松(21)	白蜡(21)	侧柏(19)
偏冠	252	28.00	刺槐(29)	毛白杨(27)	油松(23)	白蜡(20)	栾树(18)
树干异常音	239	26.56	毛白杨(31)	刺槐(24)	加杨(24)	钻天杨(21)	槐树(17)
落枝危险	198	22.00	刺槐(21)	榆树(17)	槐树(16)	绦柳(14)	白蜡(12)
蛀干害虫	184	20.44	加杨(20)	槐树(17)	绦柳(17)	刺槐(14)	毛白杨(12)
木质部开裂	176	19.56	毛白杨(17)	加杨(16)	刺槐(15)	绦柳(12)	槐树(11)
根颈部腐朽	171	19.00	刺槐(21)	钻天杨(20)	毛白杨(19)	绦柳(12)	圆柏(11)
病害	169	18.78	毛白杨(21)	加杨(13)	泡桐(13)	白皮松(11)	槐树(11)
树基松动	29	3.22	加杨(4)	栾树(4)	毛白杨(3)	侧柏(2)	构树(2)



图 2　北京动物园常见树木异常表现

Fig. 2　Common tree abnormalities in Beijing Zoo

涉及 22 个树种，其中槐树、白蜡、加杨、泡桐、栾树排名前 5；高风险树涉及 34 个树种，其中毛白杨、刺槐、绦柳、泡桐、槐树排名前 5。在北京动物园中，极高风险和高风险树应被列入需特别管控的高风险树木范围，具体树种见图 3。

运用因子分析方法，将树木健康评价体系中的具体指标计算结果进行排序，北京动物园内排名前 3 的树木安全风险潜在影响因子为树干（树干 > 0.3 m 部分）破损、树干基部（树干 ≤ 0.3 m 部分）破损、根系异常。主要作为直接因子发挥作用的为树洞、落枝（直径 > 5 cm）危险、根系异常等，主要作为间接因子发挥作用的为树基松动、树干异常音、病虫害等（表 5）。

分析结果表明，树木中下部分的不健康状况会增加其风险性。在日常管理中，树体中上部的问题易观察和修复，如折枝、断杈等问题；树体低处的缺损或病变难以发现和修复，如树基松动、树干倾斜，严重时树木倒伏。因此，北京动物园在园林养护工作中需重点关注根系、根颈、树基和树干部分。

另外，树木安全风险等级为极高风险的 103 株树木，其树体健康危险度全部为 I 级；229 株高风险树中有 154 株树体健康危险度 I 级，75 株为树体健

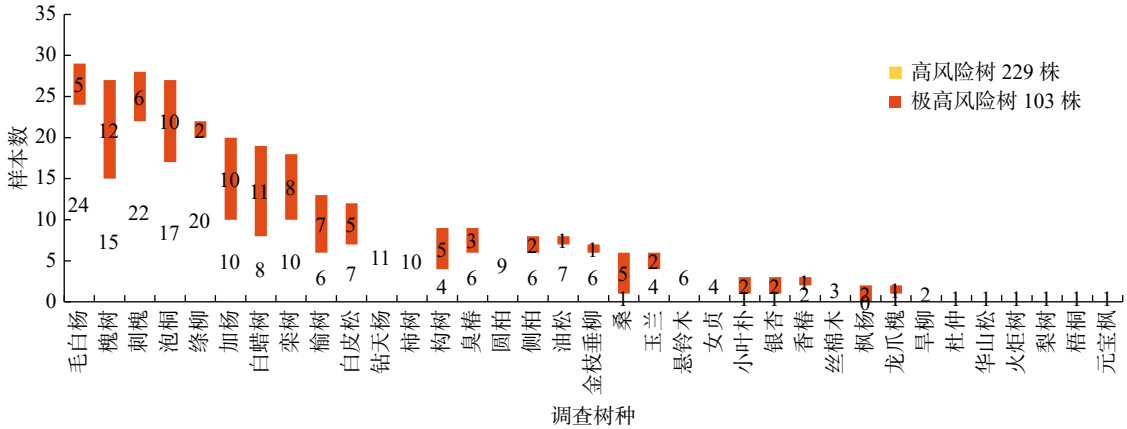


图 3　北京动物园高风险和极高风险树木

Fig. 3　High risk and extremely high-risk trees in Beijing Zoo

表 5 成分得分系数矩阵分析

Tab. 5 Analysis of component score coefficient matrix

名称	直接因子	间接因子	综合得分	权重/%
偏冠	−0.143	0.094	64.87	8.23
病虫害	−0.052	0.264	54.59	6.92
树干倾斜	0.091	0.039	63.89	8.10
落枝危险(直径 > 5 cm)	0.129	−0.053	58.89	7.47
树干基部(树干 ≤ 0.3 m 部分)破损	0.067	0.088	74.80	9.48
落枝危险2 cm < 直径 ≤ 5 cm	0.111	−0.006	49.65	6.30
树干(树干 > 0.3 m部分)破损	0.054	0.113	79.30	10.06
骨干大枝破损	0.052	0.116	65.62	8.32
树干异常音	−0.041	0.251	52.81	6.70
树基松动	−0.144	0.311	52.85	6.70
树洞	0.139	−0.083	48.15	6.11
根系异常	0.149	−0.116	73.19	9.28
树高(≥ 20 m)	0.089	0.044	50.03	6.34

注:直接因子和间接因子的方差解释率分别为77.549%和22.451%。

表 6 PiCUS-3 诊断结果统计

Tab. 6 Diagnosis result statistics of PiCUS-3

树种	总样本株数	0 < 中空率 ≤ 10%	10% < 中空率 ≤ 30%	30% < 中空率 ≤ 60%	中空率 > 60%
绦柳 *Salix matsudan* ‘Pendula’	44	11	20	10	3
毛白杨 *Populus tomentosa*	26	15	9	2	0
泡桐 *Paulownia fortunei*	23	17	6	0	0
槐树 *Styphnolobium japonicum*	11	6	3	2	0
钻天杨 *Populus nigra* ‘Italica’	11	7	4	0	0
悬铃木 *Platanus* × *acerifolia*	10	7	3	0	0
加杨 *Populus* × *canadensis*	10	7	1	2	0
其他	34	19	10	3	2
合计	169	89	56	19	5

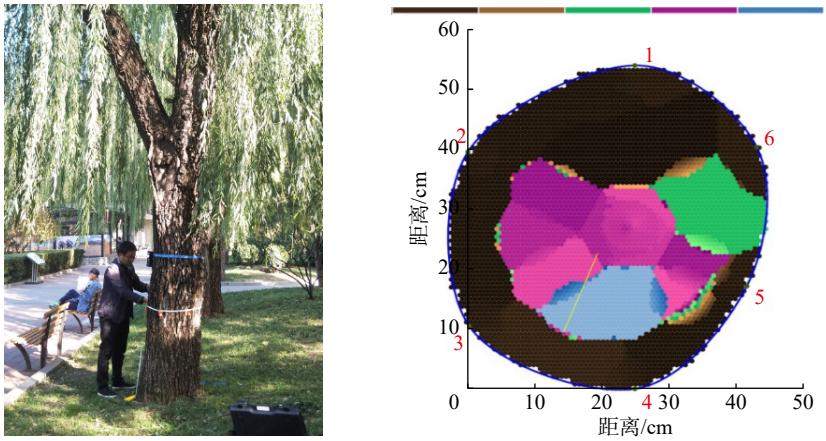
康危险度 II 级。这表明树木安全风险等级客观反映出了树木自身健康状况，但树木的不同危害目标和栽植位置决定了其被关注的程度和顺序。这种评估方法可以将风险性最大的树木筛选出来，优先进行管控，达到开展树木安全风险评估的目的。

2.3 PiCUS-3 检测

此次抽样检测树木主体均外观完整，因此本文选用 Wagener 模型，设定中空率 30% 为危险性阈值，超过 60% 为严重危险。共检测收集 169 个断面数据，绝大多数样本中空率较低，其中中空率 ≤ 10% 的样本占 52.67%，中空率介于 10% ~ 30% 的样本占 33.14%，中空率 > 60% 的样本仅占 2.96%(表 6)。

PiCUS-3 诊断发现，北京动物园内绦柳发生中空腐朽的概率高，腐朽程度大，但隐蔽性极强，应特别注意。13 株树干中空率 > 30% 的绦柳中，有 7 株树木生长状况调查结果为优树。如猴山厕所北侧绦柳目测诊断为优，但 PiCUS-3 检测发现其树干 0.5 m 处中空率为 43.9%(图 4)。园内 23 株泡桐中空率均小于 30%(图 5)，但 83% 的泡桐出现树皮、树干损伤腐朽问题，因此树皮和树干的外伤是泡桐安全风险的主要表现，易被观察和发现。使用 PiCUS-3 共检测 26 株毛白杨，在长颈鹿区西部的被评估为差树的 2 株毛白杨(图 6)中空率介于 30% ~ 60%；被评估为优树或良树的其余 24 株毛白杨中空率均小于 30%，树木生长状况调查结果与 PiCUS-3 诊断结果大致相符。

PiCUS-3 诊断结果显示，城市绿地中不同树种在同样环境中内部健康状况和风险类型差别较大，



红色数字表示探针编号。深棕、浅棕、绿、粉、蓝的颜色顺序表示腐朽程度从正常到严重，逐渐加重。中空率为绿、粉、蓝 3 种颜色区域面积的总和占断面总面积的百分比。下同。

图 4 猴山北侧绦柳外观与内测图

Fig. 4 Appearance and interior map of *Salix matsudana* ‘Pendula’ located on the northern side of Monkey Mountain

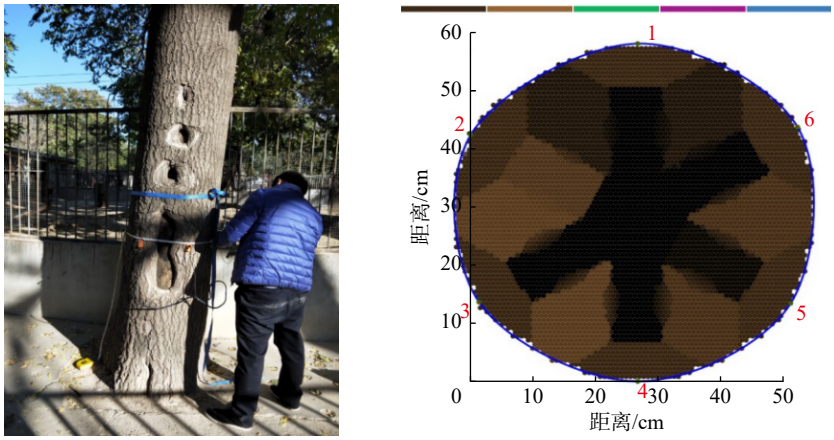


图 5　马鹿运动场西侧泡桐外观与内测图

Fig. 5　Appearance and interior map of *Paulownia fortune* located on the western side of Red Deer Stadium

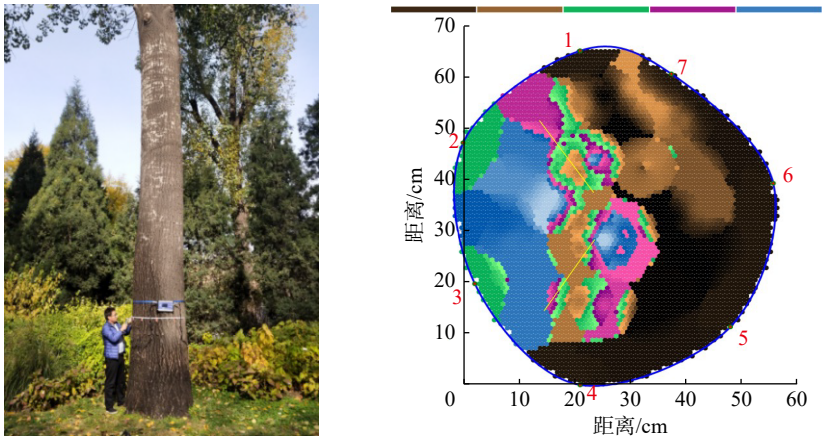


图 6　长颈鹿区西部毛白杨外观与内测图

Fig. 6　Appearance and interior map of *Populus tomentosa* located on the west of giraffe area

因此目测判断树木内部情况难免出现误差。未来工作中可使用仪器抽样检测栽植数量较多的行道树和骨干树等，判断树种特性，挑选出易表现为外观完整、内部腐朽的树种，作为重点关注对象，开展精细化检测。

3　讨　　论

3.1　树种、环境、人类活动共同决定树木健康状况

树木因树种不同，其生长习性、结构特点、抗逆性、环境适应性皆各异，从而影响树冠结构、木质部强度和根系稳定性等。宋立洲等[24]认为：树种特性可决定大树、古树的树洞形成。槐树、楸树等阔叶类树种木质松软，较易形成主干中空开放式大洞；而柏树、白皮松等木质致密，一般很少形成孔洞。同种树木间，老树、大树的健康状况一般情况下低于幼树、小树[25]。贾益兴等[26]对广州市环市路树木安全风险的相关性分析结果表明，环市路行道树的风险因子随着树木体量的增长而增加。高敏等[27]指出，槐树、刺槐等树木本身的结构特点是影响其在灾害性天气中很容易倒伏的主要因素。本次调查也发现，在栽植数量前 10 的树种中，异常问题高发树种集中于毛白杨、加杨、刺槐、槐树和绦柳，白皮松、油松、圆柏、侧柏虽种植数量也较多，但其异常问题的比例较低。这体现了树种特性的决定作用。

立地条件也是城市动物园树木安全风险的影响因素。地形、水系、广场、道路和建筑等，决定着树木得到的光照、水分和温度条件的不同。地面过度铺装会促使根颈部腐朽、土壤板结；地下管线、构筑物占用空间，影响了树木根系生长。近年全球极端天气事件频发，冬季冰雪后树枝的负重超过正常负载，可超树木承受能力的 30 倍，导致枝条压弯、折断或倒伏[28]。北京动物园内生长的树龄逾 50 年的雪松，在 2013 年遭遇北京冬季超低温天气后，树势逐渐衰弱，枝梢干枯，针叶褪绿，感染真菌病害，多株半年后死亡。瞬时强风以及夏季入汛多雨，都会不同程度影响树木健康，造成不可逆的伤害[29]。

游客攀爬、撞击、踢打树木和刻树皮等不文明行为，成为树洞形成和折枝的诱因。工程建设中，损伤树皮、树根会造成树势衰弱。在公园中，人为的植物规划和种植设计是否科学合理也可间接影响树木的

健康。贾益兴等[26]和李庆卫等[30]均强调树种规划在行道树抗风对策中的重要性。作者在其他公园绿地调研时，发现很多园区存在树木过密现象，光照、通风不良等因素可引发树体倾斜、冠高比失衡、病虫害增多等健康问题。应将短期效应和长期观赏相结合，合理设计种植密度，且随着树木的生长及时、灵活地调整种植密度，这有助于维护树木的健康。另外，城市动物园中圈养环境下野生动物的自然行为，如长颈鹿、斑马等啃食树皮、采食树叶，会造成树势衰弱[31]；大象等大型动物的践踏和禽类粪便残留，使得土壤透气持水性下降、含盐量升高，影响树木长势[32]。

3.2 树木健康状况与栽植位置共同决定其风险等级

在城市树木风险评估方面，现有方法多围绕树木自身发生损伤事件的可能性、严重性而展开，较少研判由于树木损伤导致人群伤害、建筑物损坏等的可能性。因此，本文将树木健康状况作为风险发生可能性的判定条件，将树木栽植位置作为风险发生严重性的判定条件，综合评估树木风险等级，认为二者共同决定树木风险等级。本文研究结果表明，在北京动物园中树木健康状况与树木的风险等级存在明显负相关关系，当树木健康状况越好，树木的风险等级越低，反之亦然。树木安全风险等级能够客观准确地反映树木的整体健康状况，在管控树木安全风险时可以达到监控树木健康的目的，这与刘珈翠[33]、陈钧泽[34]研究结论相符。

3.3 弹性波树木断层诊断仪提高了风险评估的准确性

近十几年以来，基于可视化评估理念开发的树木风险评估方法得到广泛推广，可视化评估法不断完善，涵盖树木的树体结构、力学强度和生物学特征等多方面[28, 34]。弹性波树木断层诊断仪是近年来树木内部可视化检测的仪器之一，梁善庆等[35]学者验证其检测准确度高，可以客观反映树干内部腐朽状况。本研究在完成树木风险评估后，采用 PiCUS-3 弹性波树木断层诊断仪进行随机抽样检测，在判断树体是否中空、中空严重程度项目上，仪器检测结果与仅靠调查人员皮锤敲击判断结果在不同树种间存在明显差异。在树干中空率 > 30% 的树种中，毛白杨、泡桐、槐树、加杨人为判断与仪器检测结果重合；而在绦柳中，人为判断与仪器检测结果有较大偏差，13 株树干中空率 > 30% 的绦柳中，有 7 株树木生长状况调查结果为优树。使用目测和简易工具在实践中具有一定局限性，本次研究中进一步明确了树木内部可视化的检测可以大幅提高某些树种（如绦柳）的安全风险评估准确性。在下一步工作中，将继续开展不同树种的验证，筛选出更多建议辅助仪器检测的具有中空腐朽隐蔽性强特点的树种，提高其风险评估的准确性。

4 建　　议

树木的安全不仅关系着游客人身安全，也可能对圈养的动物和其他设施造成损害。本研究聚焦北京动物园内树木的安全问题，基于现场调查，综合考虑了动物园内树木的健康状况、生长环境、周边设施、动物行为、人为影响密度等多重因素，对存在安全隐患的树木进行了全面的风险等级划分。研究结果为后续北京动物园树木安全的隐患排查与防治提供了依据。基于划分的风险等级和识别出的安全隐患，参考古树、大树安全评估的技术体系[36]，为完善北京动物园树木风险管理，提出如下建议。

第一，制定树木安全风险管理规划。特别强调建立长效管理机制，包括定期巡查、专业维护和公众安全教育等，以确保公园树木的持续安全。全力管控极高风险树，逐步修补修复，报伐更新；重点监控高风险树，采取修剪、修补、支撑等维护手段；积极处理中风险树，主要是修剪枯枝干杈。同时结合笼舍、运动场的特殊立地条件，因地制宜，制定科学、合理、有动物园特色的动物笼舍树木养护管理措施。

第二，建立树木监测机制。依据树木风险等级的高低，制定不同巡视频次（养护人、技术员）、安全评估频次、响应机制，并以不同的颜色代码标记（表 7）。并对具有极高、高风险的树木设置风险提示牌，提示游客该树潜藏风险。

表 7　城市公园树木监测机制建议

Tab. 7　Suggestions on tree monitoring mechanism in urban parks

内容	树木风险等级			
	极高	高	中	低
养护人巡视频次	每日	每月	每3个月	每半年
技术员巡视频次	每月	每3个月	每半年	每年
安全评估频次	每半年	每年	每3年	每5年
响应机制	极端天气前警戒提示，2 h内处理问题	12 h内处理问题	48 h内处理问题	结合日常管理处理问题
颜色代码	红	橙	黄	绿

近年由于公共绿地中树木的安全隐患问题，园林绿化管理部门成为被告、付出赔偿的机会显著增加[37]。园林绿化相关部门已着手制定树木健康评价系列标准，推广树木体检、树木医生等，但养管单位对于责任区树木的安全风险管理工作尚未起步。本研究以北京动物园为例，开展树木健康状况调查，评估树木安全风险等级，发现在北京动物园胸径 10 cm 以上 6 361 株乔木中，有 103 株极高风险树，229 株高风险树，363 株中风险树和 5 666 株低风险树，同时验证了弹性波树木断层诊断技术对风险评估的积极辅助作用。本研究将树木安全风险筛选分级至可管理控制程度，指导实践落实逐级消减树木安全风险，研究结果将为设立一套便捷、准确、高效的植物调查评估方法提供重要参考。

《城市绿地分类标准》(CJJ/T 85—2017)中，动物园属于公园绿地中的专类公园，本研究为以北京动物园为代表的城市公园绿地乃至其他公共绿地的树木安全管理提供了参考和借鉴，丰富了城市公共绿地健康管理的内涵，有助于推动城市绿化事业向更加安全、健康和可持续的方向发展，期待这些研究成果能够引起相关管理部门的重视，并在实际工作中得到广泛应用。

参 考 文 献

[1] 张秀英. 园林树木栽培养护学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2005.
Zhang X Y. Garden tree cultivation and maintenance[M]. Beijing: Higher Education Press, 2005.

[2] Roy S, Byrne J, Pickering C. A systematic quantitative review of urban tree benefits, costs, and assessment methods across cities in different climatic zones[J]. Urban Forestry & Urban Greening, 2012, 11: 351−363.

[3] 张德山, 海玉龙, 冯涛, 等. 北京地区 1~4 天花粉浓度预报的应用研究 [J]. 气象, 2010, 36(5): 128−132.
Zhang D S, Hai Y L, Feng T, et al. Applied research on the 1−4 day pollen concentration forecast in Beijing Area[J]. Meteorological Monthly, 2010, 36(5): 128−132.

[4] 李笑寒, 黄力, 杨圣贺, 等. 缙云山常绿阔叶林雪灾受损特征及影响因素 [J]. 林业科学研究, 2017, 30(5): 735−742.
Li X H, Huang L, Yang S H, et al. Patterns and factors causing snow-induced forest damage in a subtropical evergreen broad-leaved forest on Jinyun Mountain[J]. Forest Research, 2017, 30(5): 735−742.

[5] Bakken S. Tree hazard control program: guidelines and standards for the california department of parks and recreation[R]. Sacramento: The Resources Agency, 1986.

[6] Mattheck K, Breloer H. The body language of trees, a handbook for failure analysis[M]. London: Her Majesty's Stationary Office, 1994: 240.

[7] 李秀芬, 朱教君, 王庆礼, 等. 森林的风/雪灾害研究综述 [J]. 生态学报, 2005, 25(1): 148−157.
Li X F, Zhu J J, Wang Q L, et al. Forest damage induced by wind/snow: a review[J]. Acta Ecologica Sinica, 2005, 25(1): 148−157.

[8] 张志祥, 刘鹏, 邱志军, 等. 浙江九龙山自然保护区黄山松种群冰雪灾害干扰及其受灾影响因子分析 [J]. 植物生态学报, 2010, 34(2): 223−232.
Zhang Z X, Liu P, Qiu Z J, et al. Factors influencing ice and snow damage to *Pinus taiwanensis* in Jiulongshan Nature Reserve, China[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2010, 34(2): 223−232.

[9] 吴贻军. 风雪灾害下树木断裂机制及风险评估与防护 [D]. 合肥: 安徽农业大学, 2016.
Wu Y J. Fracture mechanism of trees by wind and snow disaster and risk assessment and cabling, bracing and other support systems for trees[D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2016.

[10] Keiron H. Tree risk assessment manual[J]. Arboricultural Journal: The International Journal of Urban Forestry, 2014, 36(3): 179−180.

[11] Koeser A K, Richard J H, Klein R W, et al. Assessment of likelihood of failure using limited visual, basic, and advanced assessment techniques[J]. Urban Forestry & Urban Greening, 2017, 24: 71−79.

[12] Klein R W, Koeser A K, Hauer R, et al. Risk assessment and risk perception of trees: a review of literature relating to arboriculture and urban forestry[J]. Arboriculture & Urban Forestry, 2019, 45(1): 26−38.

[13] Dunster J A, Smiley E T, Matheny N, et al. Tree risk assessment manual.[J]. Arboricultural Journal, 2014, 36(3): 179−180.

[14] 汪瑛. 北京市行道树结构分析与健康评价 [D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2011.
Wang Y. The structural analysis and health assessment of roadside trees in Beijing[D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2011.

[15] 蔡园园, 闫淑君, 吴沙沙, 等. 11 种常用行道树危险度评估 [J]. 森林与环境学报, 2015, 35(2): 169−174.
Cai Y Y, Yan S J, Wu S S, et al. Assess the damage risk of 11 main street trees[J]. Journal of Forest and Environment, 2015, 35(2): 169−174.

[16] 叶有华, 虞依娜, 彭少麟. 澳门松山公园树木健康评估 [J]. 热带亚热带植物学报, 2009, 17(2): 131−136.
Ye Y H, Yu Y N, Peng S L. Evaluation of tree health in Songshan Park, Macao[J]. Journal of Tropical and Subtropical Botany, 2009, 17(2): 131−136.

[17] 黄帅帅. 北京市居住小区林木健康评价研究 [D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2019.
Huang S S. Health assessment of trees in residential areas of Beijing[D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2019.

[18] 张乔松, 杨伟儿. 古树、大树的安全评估 (上)[J]. 园林, 2014(2): 64−68.
Zhang Q S, Yang W E. Safety assessment of ancient and big trees

(I)[J]. Landscape Architecture, 2014(2): 64−68.

[19] 杨小燕. 北京动物园志 [M]. 北京: 中国林业出版社, 2002.
Yang X Y. Beijing Zoo annals[M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 2002.

[20] 刘勇, 马红, 李国雷, 等. DB11/T 1692-2019, 城市树木健康诊断技术规程 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2019.
Liu Y, Ma H, Li G L, et al. DB11/T 1692-2019, Technical specification for diagnosis of urban tree health[S]. Beijing: Standards Press of China, 2019.

[21] 黄敏硕. 以 VTA 法进行台中市绿园道行道树之危险度评估 [D]. 台北: 国立中兴大学园艺学研究所, 2010.
Huang M S. Damage risk assessment of street trees on green park road of Taichung City by VTA method[D]. Taipei: Graduate Institute of Horticulture, National Chung Hsing University, 2010.

[22] 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.
Weng S F, Li C M, Pang R J. Establishment of landscaping tree health assessment model using analytic hierarchy process[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2009, 24(1): 177−181.

[23] 梁善庆. 古树名木应力波断层成像诊断与评价技术研究 [D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2008.
Liang S Q. Study on diagnosis and assessment technology of stress wave tomography in old and famous trees[D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2008.

[24] 宋立洲, 焦进卫, 高云昆, 等. 香山公园古树、大树树洞调查及修复 [J]. 中国城市林业, 2009, 7(10): 54−56.
Song L Z, Jiao J W, Gao Y K, et al. A survey and treatment of tree holes in the old and big trees in Xiangshan Park[J]. Urban Forestry in China, 2009, 7(10): 54−56.

[25] 李月. 西安地区行道树的健康和安全性评价 [D]. 西安: 西北农林科技大学, 2022.
Li Y. Street tree health and safety evaluation in Xi’an area[D]. Xi’an: Northwest A&F University, 2022.

[26] 贾益兴, 雷杰, 黄颂谊. 广州市环市路行道树树木安全风险评导管理探析 [J]. 广东园林, 2021, 43(4): 93−96.
Jia Y X, Lei J, Huang S Y. Safety risk assessment and management of street trees on Huanshi Road in Guangzhou[J]. Guangdong Landscape Architecture, 2021, 43(4): 93−96.

[27] 高 敏, 刘建军. 园林树木安全性研究概述 [J]. 西北林学院学报, 2014, 29(4): 278−281.
Gao M, Liu J J. Overview of security research on the landscape trees[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2014, 29(4): 278−281.

[28] 吴贻军. 风雪灾害下树木断裂机制及风险评估与防护 [D]. 合肥: 安徽农业大学, 2016.
Wu Y J. Fracture echanism of trees by wind and snow disaster and risk assessment and cabling, bracing and other support systems for trees[D]. Hefei: Agricultural University, 2016.

[29] 郭子燕, 柯雨沁, 李海燕, 等. 基于台风危害的厦门地区园林树木受损原因研究 [J]. 中国园林, 2020, 36(1): 122−127.
Guo Z Y, Ke Y Q, Li H Y, et al. Study on tree damage causes in Xiamen City based on typhoon hazards[J]. Chinese Landscape Architecture, 2020, 36(1): 122−127.

[30] 李庆卫, 陈碧娥. 台风对城市园林绿化的危害及对策研究 [M]. 北京: 中国林业出版社, 2020.
Li Q W, Chen B E. Research on the hazards and countermeasures of typhoons on urban landscaping[M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 2020.

[31] 于学伟, 蒋国红, 江志. 动物行为与动物园安全管理 [J]. 野生动物学报, 2014, 35(3): 352−356.
Yu X W, Jiang G H, Jiang Z. Animal activities and zoo safety management[J]. Chinese Journal of Wildlife, 2014, 35(3): 352−356.

[32] 张小刚, 曹子薇, 张宝利, 等. 畜禽粪便对环境的影响及防治对策 [J]. 家畜生态学报, 2014, 35(11): 77−80.
Zhang X G, Cao Z W, Zhang B L, et al. Effect of livestock and poultry excrements on environment and the control countermeasures[J]. Journal of Domestic Animal Ecology, 2014, 35(11): 77−80.

[33] 刘珈翠. 香港屋邨绿化树木的风险评估 [D]. 广州: 华南农业大学, 2018.
Liu J C. The risk assessment of trees in housing estates by Hong Kong special administrative region government[D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2018.

[34] 陈钧泽. 城市树木致伤风险可视化评估: 以武汉市中山公园为例 [D]. 武汉: 华中农业大学, 2023.
Chen J Z. Visual assessment of urban tree injury risk: a case study of Zhongshan Park in Wuhan City [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2023.

[35] 梁善庆, 王喜平, 蔡智勇, 等. 弹性波层析成像技术检测活立木腐朽 [J]. 林业科学, 2008, 44(5): 109−114.
Liang S Q , Wang X P, Cai Z Y, et al. Elastic wave tomography in standing tree decay detection[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2008, 44(5): 109−114.

[36] 张乔松, 杨伟儿. 古树、大树的安全评估 (下)[J]. 园林, 2014(3): 54−58.
Zhang Q S, Yang W E. Safety assessment of ancient and big trees (II)[J]. Landscape Architecture, 2014(3): 54−58.

[37] 北京市怀柔区人民政府. 绿化树突然倒塌砸伤树下人, 这个损失应该找谁来赔?[EB/OL]. (2022−08−22)[2022−12−01]. https://www.bjhr.gov.cn/zt/qwpf/yasf/202208/t20220822_2797659.html.
Huairou District People’s Government of Beijing. Who should compensate for the sudden collapse of a green tree that injured people?[EB/OL]. (2022−08−22)[2022−12−01]. https://www.bjhr.gov.cn/zt/qwpf/yasf/202208/t20220822_2797659.html.

（责任编辑 赵田芸
责任编委 赵秀海）