

深圳市光明区园林树木树干缺陷应力波检测评价研究

Research on Stress Wave Detection and Evaluation of Trunk Defects in Landscape Trees in Guangming District, Shenzhen

程 睿

CHENG Rui

(深圳市方格生态环境有限公司, 深圳 518048)

(Shenzhen Fangge Ecological Environment Co., Ltd., Shenzhen, Guangdong, China, 518048)

文章编号: 1000-0283(2025)06-0107-07

DOI: 10. 12193 / j. laing. 2025. 06. 0107. 012

中图分类号: TU986

文献标志码: A

收稿日期: 2024-10-23

修回日期: 2025-01-21

摘 要

采用应力波无损检测技术对光明区道路沿线和区属公园的388棵树木的树干内部缺陷情况进行检测评价。结果表明:(1)79.38%的树木存在不同程度的树干空洞问题,15.98%的树木存在不同程度的树干腐朽问题,树干完整的树木仅占4.64%;(2)道路沿线的树干空洞等级主要分布在Ⅱ级(38.44%),其次是Ⅲ级(30.61%)、Ⅳ级(7.14%)和Ⅴ级(0.34%),而区属公园的树干空洞等级则主要分布在Ⅲ级(45.74%),且占比也更大,分布在Ⅳ级(20.21%)和Ⅴ级(2.13%)的比例也远高于道路沿线;(3)超过80%的树干空腐问题都发生在胸径 ≤ 40 cm的青壮树木中,而空腐多是由外力损伤树干引起;(4)树干空腐数量较多、程度比较严重的树种,如凤凰木(*Delonix regia*)、樟树(*Camphora officinarum*)、南洋楹(*Falcataria falcata*)、阴香(*Cinnamomum burmanni*)及美丽异木棉(*Ceiba speciosa*)等速生树种。总体而言,区内树干损伤现象较为普遍、空腐问题较为严重,主要由栽植、管养不善造成。研究结果可为全区的园林树种规划和种植管养工作提供参考和指导。

关键词

光明区;园林树木;应力波检测;树干空腐;树木健康评价

Abstract

The stress wave non-destructive testing technology was employed to detect and assess the internal defects of 388 garden trees in the Guangming District of Shenzhen. The results indicated that: (1) 79.38% of the trees exhibit hollow trunks, 15.98% have decayed trunks, and only 4.64% have intact trunks. (2) The trunk hollowing levels of roadside trees are primarily concentrated at level II (38.44%), followed by level III (30.61%), level IV (7.14%) and level V (0.34%). The trunk hollowing levels of park trees are predominantly distributed in the higher concentrated at level III (45.74%), which constitutes a larger proportion, as well as having a significantly greater distribution in Grade IV (20.21%) and Grade V (2.13%) than street trees. (3) More than 80% of trunk decay and hollowing issues occur in trees with Diameter at Breast Height (DBH) ≤ 40 cm, with decay and hollowing are predominantly resulting from external damage to the trunk. (4) Tree species exhibiting severe trunk hollowing and decay, such as *Delonix regia*, *Camphora officinarum*, *Falcataria falcata*, *Cinnamomum burmanni*, and *Ceiba speciosa*, are mainly fast-growing tree species. Insufficient planting and management practices are the principal cause of the extensive damage to trunks and the severe issues of decay and hollowing. The findings of this research can provide valuable references and guidance for planning and managing garden tree species throughout the region.

Keywords

Guangming District; garden tree; stress wave detection; trunk decay and hollow; tree health assessment

程 睿

1984年生/男/陕西蒲城人/硕士/高级工

程师/研究方向为园林与生态修复技术

基金项目:

深圳光明区城管局委托项目“光明区园林树木安全风险评价研究项目”(编号: 2024-FW-0124)

树木健康状况是影响树木安全风险的最主要因素，而评价树木健康状况的主要因子包括树干空腐、根系异常、严重偏冠、树干倾斜、病虫害、老化衰弱等^[1]，其中，树干空腐会给树木带来严重的折杆折枝甚至倒伏隐患。因此，树干空腐成为评价树木健康状况和树木安全风险的最重要因子之一。20世纪60年代起，应力波无损检测技术开始应用于木材内部缺陷检测以提高其利用率^[2-3]。该技术因其检测过程不会破坏木材结构，而且检测过程快速，检测结果直观、可靠，一直是木材无损检测的重要手段。随着应力波检测技术的不断进步，20世纪90年代开始，该项技术被逐渐应用到活木检测当中^[4-5]，并作为树干内部缺陷检测的重要诊断手段应用于城市绿化树木的健康与安全风险评价。近十年，国内学者针对活木的应力波检测技术开展了大量研究^[6-9]，该项技术开始在国内用于树木健康与安全风险评价中^[10-11]。

随着国内城市的精细化管理水平越来越高，对城市树木健康与安全风险的评价也越来越受到重视^[12-13]。深圳作为沿海城市，每年都会经历多次的台风侵袭并发生风灾致树木大量倒伏的自然灾害。针对深圳地区绿化树木的抗风性研究近年虽有零星报道^[14-15]，但针对其健康状况和安全风险的评价研究则鲜有报道^[16-17]。由于树木健康状况直接关系到其安全风险问题，自2023年9月起强台风“苏拉”过境后，深圳各级城管部门对绿化树木的安全风险评价愈加重视，并陆续启动了城市绿化树木的健康检测和风险评估工作。光明区建区时间短，园林树木树龄普遍较小，但树干损伤现象却较为普遍。为此，受光明区城管局委托，本研究在区内首次开展了园林树木的安全隐患排查工作，并借助

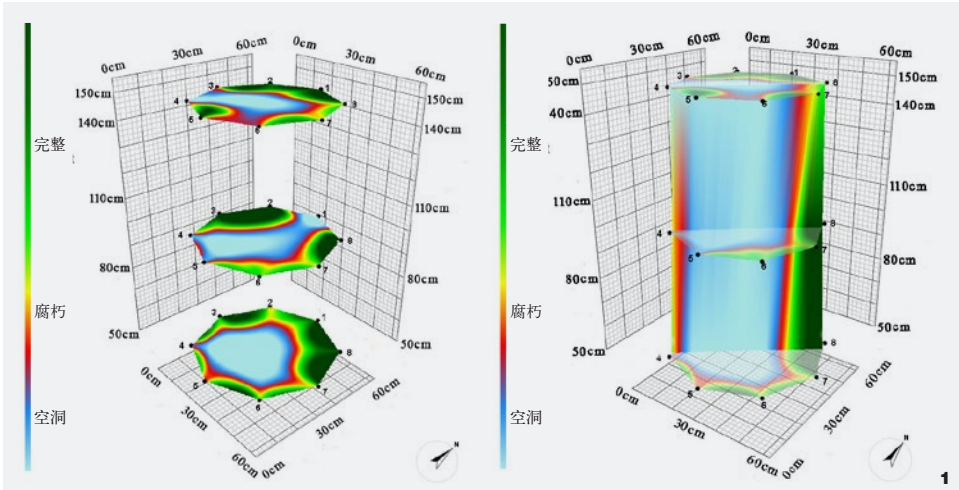


图1 树干应力波检测3D图例
Fig. 1 3D legend of trunk stress wave detection

无损检测技术对园林树木的健康状况开展了诊断和评价研究，旨在为树木的安全风险防控及后续全区的绿化树种规划和种植管养工作提供参考和指导。

1 研究区域与方法

1.1 研究区域

光明区(113° 54' 44" E, 22° 46' 34" N)位于深圳市西北部，是深圳市设立的一个生态型高新技术产业新城，于2007年8月成立并于2018年5月经国务院同意正式设立。光明区位于广深港发展中轴，是广深科技创新走廊的重要节点，也是粤港澳大湾区核心区域之一。全区东西长约16 km，南北长约17 km，总面积156.1 km²，下辖6个街道。区内地势低矮平缓，属低山丘陵地貌，海拔高度在40~90 m；年平均气温24.2℃，年均降水量1 548.7 mm，气候温和，属南亚热带海洋性气候。

光明区的城市绿化多是在近5年完成，但因管养不善、立地条件限制及气候环境等多种因素影响，区内不少园林树木出现长势

不佳、树干损伤及空腐等问题，对其开展树木健康状况检测评价研究极为必要。

1.2 研究方法

1.2.1 研究方法

研发范围覆盖区内道路(含区属道路及6个街道管辖道路)沿线和区属公园园路及步道沿线5 m范围内的行道树及临近的行列树、背景林等。重点选取树干存在损伤、蛀干虫害及树龄较大或敲击树干有明显回响的树木，采用应力波无损检测技术对其树干空腐情况进行详细诊断，同时用测高仪、倾角仪、胸径尺和皮尺等测量每棵树的树高、倾斜度、胸径、冠幅等。

1.2.2 无损检测方法

树干无损检测采用Arborsonic应力波树木断层仪对其内部缺陷进行详细检测。Arborsonic树木断层仪是通过检测应力波在健康树干和空腐树干中的传播速度差来检测树干内部缺陷程度并生成2D断面图，通过检测多个断面也可生成3D断面图(图1)。

树干检测断面高度设定在0~200 cm范围, 优先对有损伤的断面或现场研判认为最可能空腐的断面进行检测, 若树干无明显损伤则先检测100 cm断面, 若第一个断面检测无空腐情况则继续对其它可能空腐部位或50 cm、150 cm断面进行检测, 即每棵树检测断面1~3个。根据检测结果, 部分树干断面仅发现不同程度的腐朽(红色标示)情况但尚未发展到空洞(蓝色标示)这种相对更为严重的程度, 因此将树干检测结果为腐朽和空洞的树干进行了分开统计。树干空腐比例使用Image J图像软件对2D树干断面图像进行处理, 计算出红色(腐朽)或蓝色(空洞)区域占其断面总面积的比例, 并根据空腐比例将其等级均划分为5级(表1)。

1.2.3 数据处理

采用SPSS19.0软件对数据进行统计分析, 并采用Excel 2010软件制图。

2 结果与分析

2.1 树干空腐检测评价结果

本研究总计检测园林树木388棵, 其中道路沿线294棵, 公园94棵, 涉及36种树种。检测评价结果(表2)显示, 有370棵树木存在不同程度的树干空腐问题, 其中树干空腐数量较多的凤凰木、樟树、南洋楹、阴香及美丽异木棉等, 均属速生树种。

2.2 树干空腐的立地环境差异

不同立地环境的树干空腐情况检测结果(图2)显示, 在道路沿线和公园中, 树干存在空洞的树木占比均远大于存在腐朽的树木和树干完整的树木占比, 且树干完整的树木占比均较小。这表明道路沿线和公园的检测树木中, 绝大多数都存在着不同程度的空洞问题。另外, 道路沿线和公园的各自完整树干占比基本接近(分别为4.76%和4.30%), 但公园中树干空洞的树木占比(88.17%)明显大于道路沿线(76.53%), 而树干腐朽的树木占比(7.53%)却明显小于道路沿线(18.71%)。这表明公园的树干空洞情况可能更严重, 或者树干由腐朽发展到空洞程度的速度相比道路沿线更快。表3采用独立样本t检验分析法, 对两种立地环境之间的树干空腐检测结果检验后发现其无显著性差异($p>0.05$)。

表4显示, 道路沿线的树木其树干腐朽等级主要分布在Ⅱ(12.93%)和Ⅲ级(5.44%), 其次是Ⅰ级(4.76%)和Ⅳ级(0.34%), 而其树干空洞等级也主要分布在Ⅱ级(38.44%)和Ⅲ级(30.61%), 其次是Ⅳ级(7.14%)和Ⅴ级(0.34%)。与道路沿线不同的是, 公园的树木其树干腐朽等级仅分布在Ⅰ~Ⅲ级, 且主要分布在Ⅲ(5.32%)和Ⅰ级(4.26%), 其次是Ⅱ级(2.13%); 而其树干空洞等级则主要分布在Ⅲ级(45.74%), 此外分布在Ⅳ级(20.21%)和Ⅴ级(2.13%)的比例也远高于道路沿线的树干

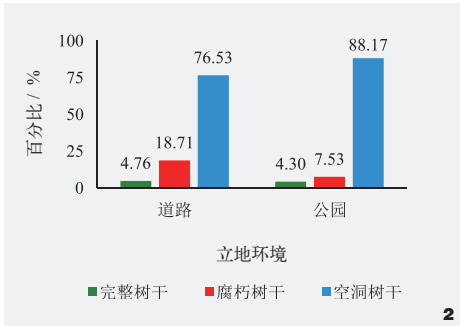


图2 两种立地环境的树干健康状况检测结果
Fig. 2 Health status detection results of trunks in two different site environments

空洞同等级的比例。树干空腐等级分布结果表明, 两种立地环境的树木发生树干空腐问题后, 都存在进一步趋重发展的情况, 对比道路沿线的树木, 公园的树木发生腐朽后不仅更容易发展为空洞问题, 而且发生空洞后也更容易向重度甚至极度空洞程度发展。分析认为, 造成两种立地环境之间的树干空腐检测结果检验无显著性差异的原因, 可能是数据波动性(标准差)过大。如此, 即便检验结果不显著, 但两种立地环境之间的实际差异仍然存在, 即公园的树干空洞情况及发展趋势比道路沿线更严重。

2.3 树干空腐的胸径差异

对道路沿线和公园空腐树干的胸径分布特征的分析结果如图3, 图4所示。道路沿线的树干空腐问题主要发生在胸径不大于40 cm的树木中, 而公园的树干空腐问题则主要发生在胸径不大于30 cm的树木中。这一结果不仅表明区内园林树木其树干空腐问题主要发生在青壮树木中, 且这种情况在公园中表现更甚。胸径更小意味着树龄也 smaller, 其树干发生空腐的可能性自然要比胸径更大的(老化衰弱)树木要小, 而且胸径更小的树干发生空腐问题也意味着其空腐发生的时间可能也比较近。

表1 树干空腐等级划分标准
Tab. 1 Level standards of tree trunk decay and hollowing

等级 Level	空腐比例 Decayed & hollow proportion	空腐程度 Decayed & hollow degree
I	[0, 1%)	无
II	[1%, 25%)	轻度
III	[25%, 50%)	中度
IV	[50%, 75%)	重度
V	[75%, 100%)	极度

表2 光明区树干健康检测评价结果
Tab. 2 Results of trunk health detection and evaluation in Guangming District

树种 Species	数量 / 棵 Number of trees	不同等级腐朽树干 数量 / 棵 Number of decayed trunks at different levels					不同等级空洞树干 数量 / 棵 Number of hollow trunks at different levels				
		I	II	III	IV	V	I	II	III	IV	V
凤凰木 (<i>Delonix regia</i>)	149	6	14	9	0	0	0	79	35	6	0
樟树 (<i>Camphora officinarum</i>)	63	1	5	1	0	0	0	11	33	10	2
南洋楹 (<i>Falcataria falcata</i>)	36	1	4	1	0	0	0	9	15	6	0
阴香 (<i>Cinnamomum burmanni</i>)	23	0	3	2	0	0	0	3	12	3	0
美丽异木棉 (<i>Ceiba speciosa</i>)	14	2	2	3	1	0	0	2	3	1	0
朴树 (<i>Celtis sinensis</i>)	13	0	0	0	0	0	0	4	5	4	0
红花羊蹄甲 (<i>Bauhinia × blakeana</i>)	9	2	1	0	0	0	0	2	2	2	0
蓝花楹 (<i>Jacaranda mimosifolia</i>)	7	0	0	1	0	0	0	3	2	1	0
麻楝 (<i>Chukrasia tabularis</i>)	7	1	0	0	0	0	0	2	4	0	0
高山榕 (<i>Ficus altissima</i>)	6	0	0	0	0	0	0	2	3	0	1
火焰木 (<i>Spathodea campanulata</i>)	6	0	2	0	0	0	0	0	3	1	0
雅榕 (<i>Ficus concinna</i>)	6	1	0	0	0	0	0	2	2	1	0
秋枫 (<i>Bischofia javanica</i>)	5	0	0	1	0	0	0	2	2	0	0
海南红豆 (<i>Ormosia pinnata</i>)	4	0	1	0	0	0	0	2	1	0	0
海南蒲桃 (<i>Syzygium hainanense</i>)	4	0	1	0	0	0	0	3	0	0	0
铁冬青 (<i>Ilex rotunda</i>)	4	0	0	1	0	0	0	0	3	0	0
人面子 (<i>Dracontomelon duperreanum</i>)	3	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0
紫檀 (<i>Pterocarpus indicus</i>)	3	0	0	0	0	0	0	2	1	0	0
红花天料木 (<i>Homalium hainanense</i>)	2	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0
白千层 (<i>Melaleuca cajuputi</i>)	2	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0
黄花风铃木 (<i>Handroanthus chrysanthus</i>)	2	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0
尖叶杜英 (<i>Elaeocarpus rugosus</i>)	2	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0
腊肠树 (<i>Cassia fistula</i>)	2	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0
榕树 (<i>Ficus microcarpa</i>)	2	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0
铁刀木 (<i>Senna siamea</i>)	2	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0
小叶榄仁 (<i>Terminalia neotaliala</i>)	2	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0
垂叶榕 (<i>Ficus benjamina</i>)	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
大王椰子 (<i>Roystonea regia</i>)	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
非洲楝 (<i>Khaya senegalensis</i>)	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
宫粉紫荆 (<i>Bauhinia variegata</i>)	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
黄葛榕 (<i>Ficus virens</i>)	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
黄槐 (<i>Cassiasurattensis</i>)	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
鸡冠刺桐 (<i>Erythrina crista-galli</i>)	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
盆架子 (<i>Alstonia scholaris</i>)	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
水杉 (<i>Metasequoia glyptostroboides</i>)	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
乌桕 (<i>Triadica sebifera</i>)	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
合计	388	18	40	21	1	0	0	132	133	40	3

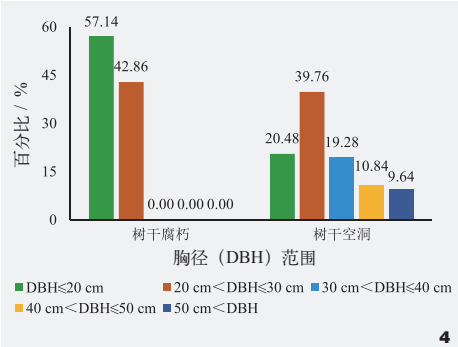
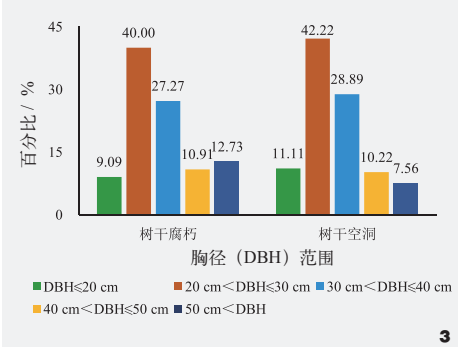


图3 道路沿线腐朽和空洞树干的胸径分布情况
Fig. 3 Distribution of DBH of decayed & hollow trunks along the road

图4 公园里腐朽和空洞树干的胸径分布情况
Fig. 4 Distribution of DBH of decayed & hollow trunks in parks

然而，公园的树干空洞问题发生在胸径不大于30 cm的比例 (60.24%)，尤其是不大于20 cm的比例 (20.48%)，远大于道路沿线（分别为53.33%和11.11%），即公园的树干空洞问题相比道路沿线更趋小胸径化（中小树木）。这进一步印证了公园的树干空洞情况比道路沿线更严重。此外，不同于道路沿线，公园中的树干腐朽问题仅发生在胸径不大于30 cm的树木中，且发生在胸径不大于20 cm的树木中的比例更是高达57.14%。相比胸径20 cm以下的小树，发生树干腐朽可能性应该更大的胸径30 cm以上的公园树木中（发生腐朽后时间应该也更久）却并未发现存在树干腐朽问题的情况表明，公园的树干发生腐朽后可能会在更短时间内就发展到空洞程度，即公园树木的树干由腐朽发展到空洞程度的速度远

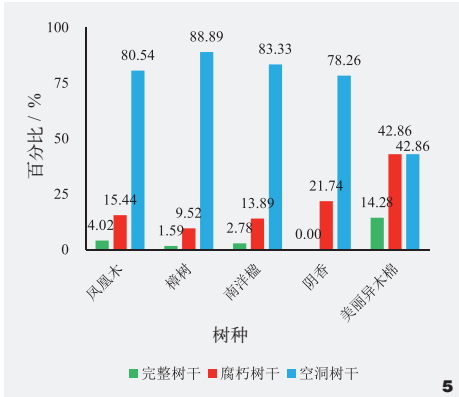


图5 主要树种的树干健康检测评价结果
Fig. 5 Results of trunk health detection and evaluation of main tree species

比道路沿线更快，这可能也是公园的空洞树干的胸径相比道路沿线更趋小胸径化（中小树木）的原因。

2.4 胸径与树干健康检测结果和空腐等级之间的相关性分析

表5显示，胸径与树干健康检测结果之间的负相关性并不显著，但树干腐朽和树干空洞之间呈极显著性正相关。此外，表6显示，随着树干空腐等级的提高，其与树木胸径的相关性由负相关趋向正相关，即空腐的树木其空腐程度在胸径更大的树木中看起来比在胸径更小的树木中表现似乎更严重，但这种差异并不显著（ $p > 0.05$ ）。

2.5 树干空腐的树种差异

主要树干空腐树种的分析结果（图5）显示，除美丽异木棉的空洞树干占比为42.86%外，凤凰木、樟树、南洋楹和阴香等树种的空洞树干占其检测数量的比例更高（78.26%~88.89%）。

表7显示，美丽异木棉的树干腐朽等级分布在I~IV级，凤凰木、樟树、南洋楹和阴香的树干腐朽等级则分布在I~Ⅲ级。另

表3 两种立地环境的树干空腐状况检测结果
Tab. 3 Decayed & hollow status detection results of trunks in two different site environments

立地环境 Site condition	树干腐朽 / % Decayed trunk	树干空洞 / % Hollow trunk
道路	4.68 ± 6.04	19.13 ± 18.27
公园	1.86 ± 2.51	22.07 ± 17.94

注：表中数据为均值±标准差。

表4 不同等级树干空腐的树木占比
Tab. 4 Proportion of trees with decayed & hollow trunks at different levels

立地环境 Site condition	树干腐朽 / % Decayed trunk					树干空洞 / % Hollow trunk				
	I	II	III	IV	V	I	II	III	IV	V
道路	4.76	12.93	5.44	0.34	0.00	0.00	38.44	30.61	7.14	0.34
公园	4.26	2.13	5.32	0.00	0.00	0.00	20.21	45.74	20.21	2.13

表5 胸径与树干健康检测结果之间的相关性分析
Tab. 5 Correlation analysis between DBH and trunk health detection results

因子 Factor	树干完整 Intact trunk	树干腐朽 Decayed trunk	树干空洞 Hollow trunk
胸径	-0.435	-0.463	-0.478
树干完整	—	0.732	0.647
树干腐朽	—	—	0.993**

注：**代表 $p < 0.01$ 。

表6 胸径与不同树干空腐等级之间的相关性
Tab. 6 Correlation between DBH and different levels of decayed & hollow trunks

形态因子 Form factor	树干腐朽 Decayed trunk					树干空洞 Hollow trunk				
	I	II	III	IV	V	I	II	III	IV	V
胸径	-0.570	-0.383	-0.492	0.514	—	—	-0.412	-0.544	0.266	0.514

表7 主要树种的不同等级树干空腐的树木占比
Tab.7 Proportion of decayed & hollow trunks of the main tree species at different levels

树种 Species	树干腐朽 / % Decayed trunk					树干空洞 / % Hollow trunk				
	I	II	III	IV	V	I	II	III	IV	V
凤凰木	4.03	9.39	6.04	0.00	0.00	0.00	53.02	23.49	4.03	0.00
樟树	1.59	7.94	1.59	0.00	0.00	0.00	17.46	52.38	15.87	3.17
南洋楹	2.78	11.11	2.78	0.00	0.00	0.00	25.00	41.66	16.67	0.00
阴香	0.00	13.04	8.70	0.00	0.00	0.00	13.04	52.18	13.04	0.00
美丽异木棉	14.28	14.29	21.43	7.14	0.00	0.00	14.29	21.43	7.14	0.00

外，除樟树的树干空洞等级分布在Ⅱ~V级外，其他4种树的树干空洞等级均分布在Ⅱ~Ⅳ级；其中凤凰木的树干空洞等级主要

集中在Ⅱ级，其他4种树的树干空洞等级主要集中在Ⅲ级。结果表明，除美丽异木棉表现略好外，樟树、南洋楹、阴香和凤凰木的

树干空洞问题均比较严重，其中樟树、南洋楹和阴香的树干发生空洞后相比凤凰木更易向重度空洞程度发展，尤其是樟树更易发展到极度空洞的程度。

3 讨论

外力损伤、病虫害、生理性病害及环境胁迫等因素都可能造成树皮损伤，而树皮损伤后引起的伤口积水、病原微生物及腐生菌入侵，更是造成损伤扩大、树干空腐的主要原因^[18]。树干空腐问题一般多发生在树龄较大的老化衰弱树木中^[11]。然而，抵御不良环境能力差的幼树、薄皮树及愈伤部位，以及长势衰弱、修剪过度或分枝点过高，造成枝叶稀疏、树冠偏小不能为树干形成遮阳的树木等，也很容易因环境胁迫发生树皮损伤^[19]。本研究中，树干空腐问题主要集中在胸径 ≤ 40 cm的青壮树木甚至20 cm以下的中小树木中，主要原因是光明区内的园林树木普遍是近5年才种植的中小苗木，胸径40 cm以上的树木普遍较少，而且发生树干空腐问题的树木，其树干基本都存在不同程度的损伤，即局部树皮剥落、开裂致木质部裸露问题。

调查研究发现，光明建区时间不长，园林树木生长时间较短，但区内树干损伤现象却非常普遍，且树干损伤多发生在近3~5年间。光明区地处南亚热带季风气候区，夏季气温偏高、持续时间长，年平均气温24.2℃，比深圳市年平均气温23.3℃还高出0.9℃，而且新建区的地面硬质铺装多，高大遮阴乔木却非常稀少。地表硬化会明显改变城市树木赖以生存的气候及土壤等环境因子^[18]，显著提高地表温度和热辐射，高温天气容易对树木造成热胁迫，使其生长受到抑制，造成树势衰弱^[20]，在夏季烈日曝晒、地面热辐射

和热风侵袭等多重环境胁迫下，树皮容易因严重失水干燥而开裂，引起韧皮部、维管形成层等干死导致严重的日灼伤害^[19]。较大的冠幅和郁闭度显然能够有效缓解硬化地表对树木形成的热胁迫^[21]，但光明区内的园林树木多是种植时间较短的中小树木且都是根系欠发达的假植苗，普遍枝叶稀疏、冠幅偏小、长势偏弱，而种植时间较短的中大树木却因修剪过度存在同样的问题，夏季长时间的高温热胁迫可能是区内园林树木树干损伤较为普遍的最主要原因。此外，运输、吊装及种植过程中的外力损伤以及后期管养不善可能也是造成或加剧树干损伤的一个重要原因。作为树干的保护和养分运输组织的树皮层，一般轻微损伤且未进一步受到病虫害侵害则损伤部位会逐渐自愈，否则会进一步恶化。损伤较为严重的树干，若未能及时人工干预对其进行修复处理，长时间暴露在温湿环境则会极大增加损伤扩大和病虫害侵害风险。此外，树干损伤处理方式或修补材料不专业，会使损伤部位更易蓄积雨水、滋生病原微生物，反而加剧了伤口的腐烂速度和程度。调查发现，随意用水泥、发泡剂、泡沫板甚至泥巴等不良材料修补填充树干缺损部位的情况不仅在光明区较为普遍，在深圳其它区同样存在。

树干空洞一般是由腐朽逐步发展而来，即完整树干损伤或病变后首先会发展为腐朽，之后才会进一步发展为空洞。本研究涉及的388棵园林树木中，79.38%的树干存在不同程度的空洞缺陷，15.98%的树干存在不同程度的腐朽缺陷，完整树干仅占4.64%。研究认为，这一结果与区内的气候环境息息相关。光明区年均降水量1 548.7 mm，且主要集中在4~10月。显然，常年温湿的气候环境是诱使树干损伤扩大并向空腐发展的直接原因，

也是加速树干由腐朽快速向空洞发展的重要原因，即树干损伤后一旦恶化，在较短时间内即可由腐朽发展到空洞的程度。本研究结果还表明，公园的树干空洞情况比道路沿线更严重，或者其树干由腐朽发展到空洞程度的速度相比道路沿线更快、也更易向重度甚至极度空洞程度发展。调查研究发现，道路沿线的树木多是行道树及临近的行列树，种植相对稀疏，生长环境更通透，而公园的树木种植密度明显要更大，其背景林中能遮阴的大树相对道路沿线也更多，所以公园树木的生长环境通风透光性较差。适宜的立地环境条件可发挥树木最大的生长潜能和抗病性，而适宜的林木密度能够为树木生长提供良好的通风透光条件和林内湿度，有利于林木健康生长并抑制病原微生物滋生蔓延^[22]。显然，较差的通风透光条件加上常年的温湿气候环境，是公园树木相比道路树木发生腐朽后更易发展为空洞且空洞程度更严重的最主要原因，也是造成公园中胸径 ≤ 20 cm的树干空洞问题远比道路沿线更严重的原因。

木质坚硬的树木相对不易被腐生菌和病虫害侵染而发生树干空腐^[23]，木质疏松、密度低的速生树种更易发生树干空腐^[11]。本研究中，树干空腐数量较多且树干空洞问题比较严重的凤凰木、樟树、南洋楹、阴香及美丽异木棉等均属速生树种。南洋楹枝干易折易损，阴香树干极易被病虫害侵害和空腐^[16]。调查发现，樟树在深圳地区长势普遍不佳，尤其在硬质铺装多、地面辐射强的道路沿线和广场表现更差。研究认为，这与深圳地区夏季气温偏高而樟树对区内高温环境的热胁迫耐受性明显较差有关。此外，凤凰木及美丽异木棉作为深圳地区种植较多也较为适宜的观花类树种之一，整体表现尚可，但在本研究中其树干损伤和空腐问题较为严重，分析

认为,除了与新种树木长势偏弱、对环境的热胁迫耐受性较差有关外,更多还是管养不善造成。凤凰木虽是速生树种,但其木质相对较为紧致,耐腐性稍好,其树皮层自愈能力也明显较其它树种要强,这可能也是其树干空洞程度主要集中在Ⅱ级的原因。

4 结论

利用应力波诊断技术对光明区内的388棵园林树木的树干缺陷进行了检测评价研究。结果表明:(1) 79.38%的树干都存在空洞问题,15.98%的树干存在腐朽问题,完整树干仅占4.64%;(2) 受常年的温湿环境影响,树干发生腐朽后在较短时间内即可发展为空洞,而公园的树木相比道路沿线,其树干空腐速度可能更快、空腐程度也更严重;(3) 超过80%的树干空腐问题都发生在胸径 ≤ 40 cm的青壮树木中,而发生空腐的树干基本都存在不同程度的树皮损伤致木质部裸露问题;(4) 树干空腐数量较多、程度比较严重的树种,如凤凰木、樟树、南洋楹、阴香及美丽异木棉等多是木质疏松的速生树种。

因此,在城市绿化中应优选良种苗木、严控苗木质量、科学合理栽植;对新种苗木应加强日常管养,避免人为或环境因素损伤树干;在日常巡护中,对发生损伤的树干应及时尽早的进行人工干预修复处理,促进树体创面愈合;定期开展园林树木的安全隐患排查和健康风险检测评价工作。

注:文中图表均由作者绘制。

参考文献

[1] 黄义钧,何国强,张建华,等.园林树木形态因子与树种抗风能力关系探讨[J].西南大学学报(自然科学版),2020,42(05): 69-79.

[2] 刘艳贞,谢华,周伟,等.应力波法检测活立木品质的研究进展[J].林业机械与木工设备,2013,41(01): 22-23.

[3] 路程琳,何宇航,谢雨宏,等.应力波断层扫描法在立木检测方面的研究现状[J].林业机械与木工设备,2022,50(10): 37-40.

[4] MATTHECK C G, BETHGE K A. Detection of Decay in Trees with Metriguard Stress Wave Timer[J]. Journal of Arboriculture, 1993, 19(6): 374.

[5] GILBERT A E, SMILEY E T. Picus Sonic Tomography for the Quantification of Decay in White Oak (*Quercus alba*) and Hickory (*Carya* spp.)[J]. Journal of Arboriculture, 2004, 30(5): 277-281.

[6] 葛晓雯,王立海,孙天用,等.基于应力波和阻抗仪技术的旱柳内部腐朽定量检测[J].林业科技开发,2014,28(05): 87-91.

[7] 李佳捷,杜晓晨.基于压缩感知和空间插值的树木内部缺陷应力波层析成像算法[J].现代计算机,2019(17): 26-29.

[8] 徐鹏飞,管成,张厚江,等.用于树干内部缺陷筛查的应力波临界波速确定研究[J].西北林学院学报,2022,37(01): 222-229.

[9] 鲍宇,杜晓晨,叶程浩.不同含水率条件下树木内部应力波传播规律的研究[J].浙江林业科技,2023,43(05): 34-41.

[10] 于博,谢璐迪,胡一博,等.基于ARBOTOM断层仪的校园树木健康程度检测[J].中国城市林业,2024,22(3): 50-55.

[11] 程睿,黎国健.深圳市城市快速路行道树安全风险评价研究[J].园林,2024(8): 133-139.

[12] 谭旭,张潇巍,李爽,等.风荷载下树木稳定性的无损评估方法[J].森林工程,2024,40(02): 127-141.

[13] 陈钧泽,钟乐,周桃,等.城市树木致伤风险可视化评估:以武汉市中山公园为例[J].中国园林,2023,39(08): 121-126.

[14] 朱炫燕,谭广文,陈碧燕,等.深圳前海片区园林树木抗风性综合评价[J].热带农业科学,2023,43(03): 96-104.

[15] 李利孝,蔡鸣,宋健,等.深圳市阴香类行道树风致失效模式及失效风速预测研究[J].自然灾害学报,2022,31(02): 148-155.

[16] 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价[J].中国城市林业,2024(6): 56-61.

[17] 李志雄,唐立鸿,叶少萍.城市行道树安全性评价与管理提升建议——以深圳市深南大道为例[J].广东园林,2024,46(02): 35-41.

[18] 冯博,陈树萍,郭壹锋,等.毛白杨空腐形成原因及复壮策略探析[J].现代园艺,2024,47(19): 76-78.

[19] 吉浩.树干纵向皮损原因分析及应对措施[J].现代农业科技,2024(16): 81-83.

[20] 宋英石,李晓文,李锋,等.北京市奥林匹克公园不同地表类型对土壤动物多样性的影响[J].应用生态学报,2015,26(4): 1130-1136.

[21] 陈媛媛,江波,王效科,等.北京典型绿化树种幼苗光合特性对硬化地表的响应[J].生态学报,2017,37(11): 3673-3682.

[22] 东庆龙,曹志华,张鑫.树木健康与环境因素的关系分析[J].安徽林业科技,2011,37(01): 42-44.

[23] 郭保平,张树民,高旭珍.古树健康诊断及复壮措施[J].山西林业科技,2022,51(01): 56-58.