基于 VTA 法及应力波诊断技术的行道树安全风险评估*

程 睿 黎国健 蒋 慧 翁恩斌
深圳市方格生态环境有限公司 广东深圳 518048

摘要：为精细化管养城市树木并科学防控树木安全风险，采用 VTA 法及应力波诊断技术对深圳市 3 条主干道路行道树的安全风险状况进行评估。结果表明：1）存在安全风险的树木涉及 37 个树种，总计 900 余株，占比约 4.20%，其中安全风险率超过 10%的树种有阴香、马占相思、南洋楹、银合欢；2）树干病变情况比较严重的树种为阴香、南洋楹和马占相思，其中主干空洞率分别为 57.65%、36.36%和 26.67%，阴香和南洋楹的树干病变率随胸径的增大而呈上升趋势；3）树体机械损伤极易诱发树干腐朽空洞问题，在植株密度较大的阴蔽生境表现更严重。为此，建议从行道树日常管养、适生树种选择、安全隐患排查等方面采取安全风险防控措施。

关键词：行道树；树干空洞；应力波诊断；安全风险评估
DOI：10.12169/zgcsly.2024.02.04.0001

Risk Assessment for Street Tree Safety Based on VTA Method and Sound Wave Detection Technology

Cheng Rui Li Guojian Jiang Hui Weng Enbin
(Shenzhen Fangge Ecological Environment Co., Ltd., Shenzhen 518048, Guangdong, China)

Abstract: In order to ensure delicacy management of urban trees and promote the science-based risk control for tree safety, the paper uses the VTA method and stress-wave diagnostic technology to assess the safety risk of the street trees along three urban expressways in Shenzhen. The results show that: 1) There are totally more than 900 trees with safety risk, which are related to 37 tree species and account for 4.20% of the total street trees. Among them, *Cinnamomum burmanni*, *Acacia mangium*, *Falcataria falcata*, and *Leucaena leucocephala* are the tree species whose proportion of trees with safety risks exceeds 10%; 2) *C. burmanni*, *F. falcate* and *A. mangium* are the species suffering from relatively severe trunk lesion, while the trunk cavity rates of the three species reach 57.65%, 36.36%, and 26.67%, respectively. The trunk lesion rate of *C. burmanni* and *F. falcate* increases with the increased diameter at Breast Height; and 3) Mechanical damage to trees is prone to inducing the trunk decay and cavity, especially in shaded habitats with high plant density. In this sense, recommendations are proposed to reduce the risk with control measures such as street tree management, selection of suitable tree species, and investigation of hazards.
Keywords: street tree; trunk cavity; stress-wave diagnostic; risk assessment for safety

行道树对改善城市生态环境具有不可替代的作用[1]。因树种差异和健康状况影响，一些行道树存在折断、倒伏等潜在安全风险，而恶劣的环境气候条件会加剧这种风险。如频遭台风困扰的我国东南沿海地区，随着全球气候异常变化，台风呈现“频次增加、季节变长、强度增强”的特点。频繁的台风侵袭尤其是超强台风带来的狂风暴雨会对树木造成极大的破坏力，大量树木因风灾而折断甚至倒伏，严重危害城市公共安全，造成财产损失和人员伤亡。如 2023 年 9 月 1 日的超

收稿日期：2024-02-04
* 基金项目：深圳市绿化管理处委托项目“深圳市主干道行道树木安全隐患调查评估”(2023020)
第一作者：程睿(1984-)，男，硕士，高级工程师，研究方向为园林植物应用与生态修复技术。E-mail：chengrui99888@163.com

强台风“苏拉”，其平均风力 10~11 级，阵风 12 级以上，造成深圳市 5 000 余株树木倒伏，北环大道快速路甚至因树木倒伏造成人员伤亡，一度中断交通。

开展树木健康与安全风险评估，对存在安全隐患的树木及时采取必要的管养措施以消除或降低安全风险，以及对城市精细管理和精准决策具有重要意义。树木安全风险评估是通过对树木的结构信息和外观进行评价[2]，而其内部缺陷还需借助专业仪器诊断。树木风险评估研究在国外已持续几十年[3-5]，但国内尚处于起步阶段[6-7]。近年，北京[8]、上海[9]、广州[10]等城市已陆续有相关研究报道，但频遭台风侵袭的深圳地区却鲜有针对树木安全风险评估的研究。随着我国一线城市精细化管理工作的推进，城市树木安全风险评估研究开始受到重视。本研究以深圳市北环大道、深南大道及滨河滨海大道 3 条城市快速路为研究对象，通过对沿线行道树的健康状况与安全风险进行全面调查评估，为城市树木的精细化管养和安全防控提供科学依据。

1　研究区概况

深圳（113°43′—114°38′E，22°24′—22°52′N）地处中国东南沿海地区，属亚热带海洋性气候，年均气温 23.30 ℃，年均降水量 1 933.30 mm，全年 86%降水量集中在 4—9 月。常年主导风向为东南偏东风，夏季受锋面低槽、热带气旋、季风云团等天气影响，暴雨、雷暴、台风多发，年均受台风影响 4~5 次。

2　研究方法

2.1　调查范围

调查时间为 2023 年 9—10 月，调查范围涉及北环大道、深南大道及滨河滨海大道 3 条深圳市东西向交通干道全段，具体涉及双向车（人）行道两侧 5 m 范围内的所有树木。其中，北环大道西起宝安立交，止于上步立交，全长 19.50 km；深南大道西起南头检查站，止于沿河路，全长 25.60 km；滨河滨海大道西起怡海大道，东接船步路，全长约 20 km。3 条快速路的主道设计速度均在 80 km·h^{-1}，辅道设计速度 40 km·h^{-1}，日车流量巨大。

2.2　树木安全风险检测评估

采用 VTA（Visual Tree Assessment）法及 Arborsonic 树木断层诊断仪器对行道树的安全风险进行评估。VTA 法通过视觉观察树木缺陷病症及借助简单工具测量并量化多种指标来评估树木风险等级[11-12]。参考 ISA（International Society of Arboriculture）相关建议[13]，评估指标选取主干倾斜、树冠偏冠、树皮损伤、树干腐朽、主干中空、病虫害、主根裸露及腐朽等 8 项。Arborsonic 树木断层诊断仪器是通过测量分析应力波在健康树木中的传播速度比在受损树木中快的原理来检测树干内部缺陷。树干检测断面设定在易空洞的 50~150 cm 高度范围，标准断面设定为 1 m，若标准断面检测无空洞情况则继续对 50 cm 及150 cm 断面进行检测，即每棵树检测断面 1~3 个。

具体评估步骤：1）人工排查出安全隐患较大或健康状况较差的树木；2）利用 VTA 法对人工排查出的树木进行视觉评估；3）在 VTA 评估基础上，对疑似主干空洞且肉眼无法确认的树木，尤其是敲击树干有明显回响、树势衰弱、有严重机械损伤及蛀干虫害的树木，再用仪器进行内部缺陷检测；4）采用 EXCEL 软件进行数据处理并做图。安全风险评价方法参考了广州市地方标准《园林树木安全性评价技术规范》（DB4401/T 17-2019）。

3　结果与分析

3.1　主干道行道树安全风险评估

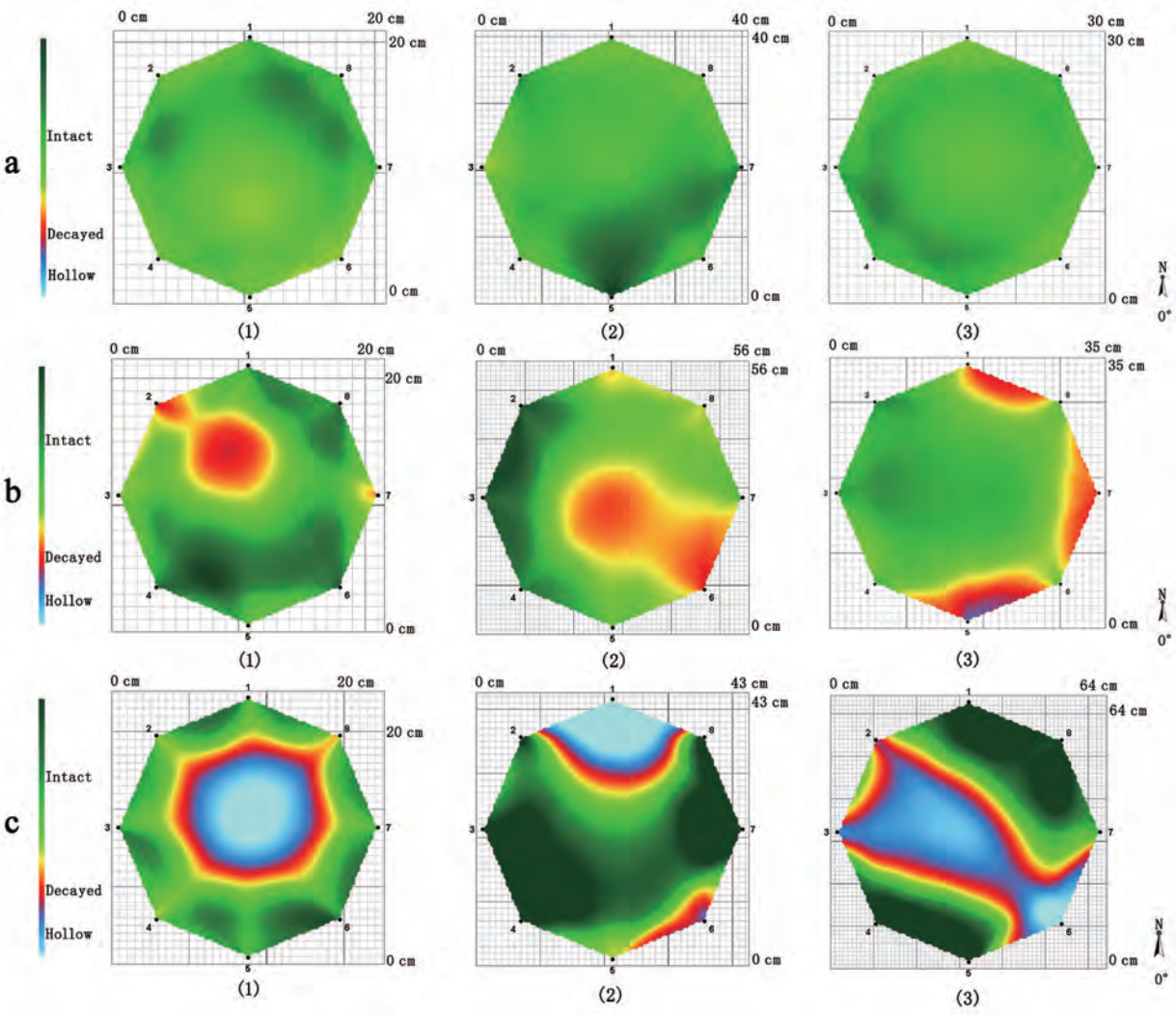
VTA 视觉评估结果表明，3 条主干道存在安全风险的树木涉及 37 个树种，总计 900 余株，约占行道树总数的 4.20%。各行道树种的安全风险率（存在安全风险树木数量占该种树木总数的比例）存在较大差异。安全风险率较高的树种依次为阴香、马占相思、南洋楹、银合欢、非洲楝、火焰树、桉及麻楝等（表 1）。存在安全风险的行道树树种占比较高的主要是南洋楹、阴香、马占相思和非洲楝等（表 2）。

3.2　行道树树干检测评估

树干内部缺陷检测结果如图 1 所示，绿色断面表示主干完整，橙红色及黄色区域表示主干存

表 1 各行道树种的安全风险率

序号	树种	安全风险率/%	序号	树种	安全风险率/%
1	阴香 *Cinnamomum burmanni*	17. 49	20	海南红豆 *Ormosia pinnata*	1. 85
2	马占相思 *Acacia mangium*	13. 13	21	白兰 *Michelia* × *alba*	1. 52
3	南洋楹 *Falcataria falcata*	12. 17	22	垂叶榕 *Ficus benjamina*	1. 27
4	银合欢 *Leucaena leucocephala*	10. 86	23	木麻黄 *Casuarina equisetifolia*	1. 03
5	非洲楝 *Khaya senegalensis*	8. 26	24	人面子 *Dracontomelon duperreanum*	0. 99
6	火焰树 *Spathodea campanulata*	6. 72	25	杧果 *Mangifera indica*	0. 95
7	桉 *Eucalyptus robusta*	6. 42	26	木棉 *Bombax ceiba*	0. 87
8	麻楝 *Chukrasia tabularis*	6. 09	27	高山榕 *Ficus altissima*	0. 86
9	红花羊蹄甲 *Bauhinia* × *blakeana*	5. 73	28	雅榕 *F. concinna*	0. 83
10	吊瓜树 *Kigelia africana*	5. 69	29	海南蒲桃 *Syzygium hainanense*	0. 80
11	樟 *Camphora officinarum*	5. 32	30	秋枫 *Bischofia javanica*	0. 75
12	榄仁 *Terminalia catappa*	5. 05	31	宫粉羊蹄甲 *Bauhinia variegate*	0. 72
13	美丽异木棉 *Ceiba speciosa*	3. 71	32	长芒杜英 *Elaeocarpus rugosus*	0. 62
14	大叶杜英 *Elaeocarpus balansae*	3. 70	33	小叶榄仁 *Terminalia neotaliala*	0. 54
15	白千层 *Melaleuca cajuputi*	3. 51	34	紫花风铃木 *Handroanthus impetiginosus*	0. 07
16	凤凰木 *Delonix regia*	2. 98	35	大叶相思 *Acacia auriculiformis*	0. 41
17	黄金香柳 *M. bracteata*	2. 94	36	榕树 *F. microcarpa*	0. 38
18	黄槿 *Talipariti tiliaceum*	2. 79	37	大花紫薇 *Lagerstroemia speciosa*	0. 32
19	铁刀木 *Senna siamea*	1. 89			



注：a 完整树干检测图例；b 腐朽树干检测图例；c 空洞树干检测图例。

图 1 应力波树木断层扫描检测图

表 2　存在安全风险的行道树树种占比

树种	占比/%	树种	占比/%
南洋楹	19.61	垂叶榕	2.30
阴香	15.86	桉	2.30
马占相思	12.35	麻楝	2.42
非洲楝	11.74	雅榕	2.18
凤凰木	4.96	小叶榄仁	1.45
樟	4.48	木棉	1.21
银合欢	4.24	美丽异木棉	1.09
火焰树	1.45	榄仁	0.85
人面子	3.03	其他	5.45
海南蒲桃	3.03		

在不同程度腐朽病变情况，蓝色区域表示主干存在空洞情况。树干内部缺陷检测涉及 22 个树种，总计 225 株树木，其中阴香 85 株，南洋楹 44 株，马占相思 30 株，银合欢 20 株，非洲楝 15 株，凤凰木 13 株，火焰树 11 株，其他树种因检测样本数过少，在此不做讨论。如图 2 所示，阴香的主干病变率（主干腐朽与空洞树木数量占该树种检测样本总数的比例）是所有检测树种中最高的，其次是南洋楹、马占相思，其主干空洞率分别达到 57.65%、36.36%和 26.67%。

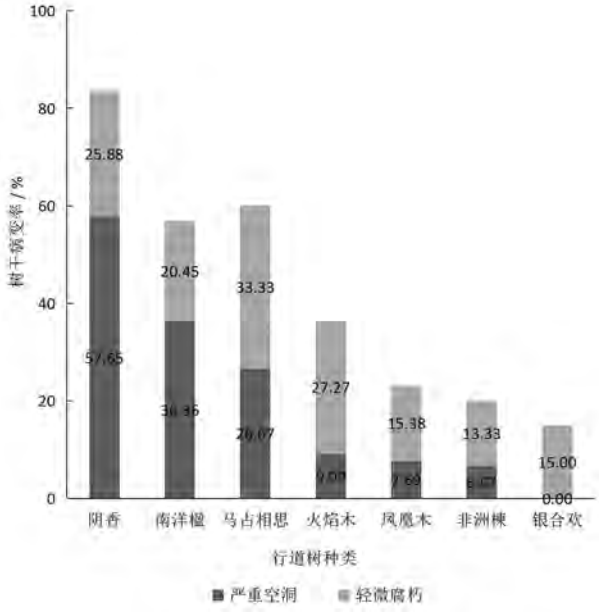


图 2　行道树树干病变率

3.3　树干空洞率随胸径分布的变化特征

树龄检测不便，而胸径与树龄具有正相关性，因此分析树干空洞率随胸径分布的变化特征可间接说明其与树龄的关系。因其他树种胸径分布范围较窄或样本数过少在此不做讨论，仅对阴香、南洋楹和马占相思的树干空洞率随胸径的分布变化特征进行分析。

阴香的胸径主要分布在 20～50 cm 范围，因此仅对 21～30 cm、31～40 cm、40 cm 以上 3 个胸径范围的阴香树干空洞率进行分析。结果显示阴香的树干空洞率随树木胸径增大而增加。

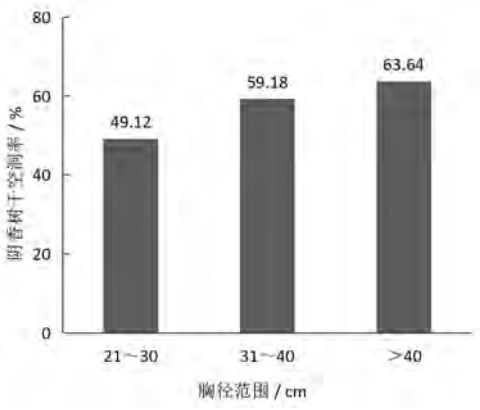


图 3　阴香树干空洞率随胸径分布的变化特征

根据胸径分布，南洋楹按 31～40 cm、41～50 cm、51～60 cm、61～70 cm、71～80 cm、80 cm 以上 6 个胸径范围对其树干空洞率进行了统计分析。结果（图 4）显示，南洋楹树干空洞率也是随着胸径增大而呈增加趋势。

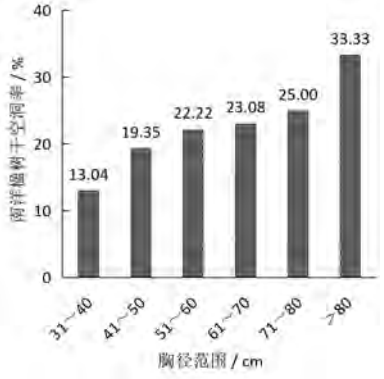


图 4　南洋楹树干空洞率随胸径分布的变化特征

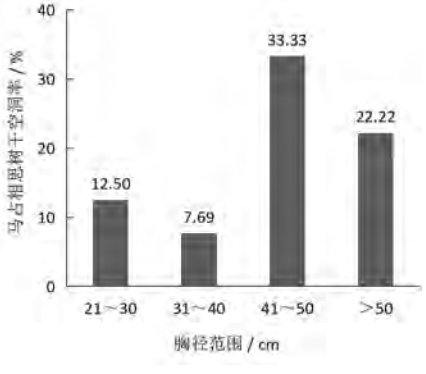


图 5　马占相思树干空洞率随胸径分布的变化特征

如图5所示，马占相思与阴香、南洋楹不同，其树干空洞率随胸径分布的变化特征没有明显的规律。

4 讨论

安全风险评估结果表明，阴香、马占相思、南洋楹、银合欢等树种的安全风险率普遍较高，均超过10%，其次是非洲楝、火焰树、桉、麻楝等树种，这与台风季树木的实际受损情况基本相符。南洋楹、阴香及马占相思等是广东沿海地区台风季发生折干倒伏情况比较严重的树种，非洲楝是台风季拔根倒伏比较严重的树种之一，而银合欢、桉等是台风季发生折枝、折干损伤较多的树种[14-16]。

树干内部缺陷检测结果表明，阴香主干的腐朽与空洞情况最为严重，主干空洞率高达57.65%；其次是南洋楹和马占相思，其主干空洞率也分别高达36.36%和26.67%。研究认为，阴香、南洋楹和马占相思等树干空洞率高是其台风季易发生折干倒伏风险的重要原因；而易发生拔根倒伏的非洲楝多以高大树为主，但其树干空洞率在实际检测中却较低，主干倾斜、偏冠情况则较多。非洲楝的拔根倒伏风险主要是因其树体高大、枝干较密易招风，加之根系分布较浅且不均及主干倾斜、偏冠等造成。非洲楝等绿化树木多是种植假植苗，一般缺失主根，加之受树池空间所限，后期根系分布较浅、易偏长，在种植早期若树体较大加之支撑不牢或未及扶正容易发生主干倾斜。因此，日常管养工作中，做好行道树早期的支撑扶正和后期的修剪控高及台风季应急排查修剪工作极为必要。

阴香和南洋楹的树干病变率均随树木胸径的增大而呈增加趋势，表明阴香和南洋楹的树龄越大，则其树干发生腐朽空洞的几率也更高、情况也更严重，安全风险也更大。研究认为，阴香、南洋楹均属速生树种，在城市绿化早期种植的此类树种已逐渐步入老化衰退期，加之本身木质较脆[17]，生命周期内也易受台风侵袭损伤，随着树龄增大其在高温高湿高盐的沿海气候环境中发生树干腐朽空洞的概率自然更高。调查发现，在胸径20 cm以上的阴香中，其树干发生腐朽空洞及蛀干虫害的现象非常普遍，甚至肉眼可见的腐朽空洞情况都较为普遍，尤其是枝干存在机械损伤的阴香几乎都存在腐朽空洞问题；而南洋楹树干发生腐朽空洞及蛀干虫害的情况多发生在树龄较大或树皮及枝干存在机械损伤的树木中，与阴香情况一样，树体存在机械损伤的南洋楹几乎都会发生腐朽空洞问题。

调查结果表明，树皮破损、枝干断裂或截枝截干造成的木质部裸露问题，若处置不当或不及时则对树干发生腐朽空洞病变的影响非常大，在植株密度较大的阴蔽生境中树干病变问题表现更为明显。究其原因，主要是因为树体机械损伤后若不能对创面进行及时妥当的处理，则其开放性伤口紊乱、不平齐极易带来雨水积聚和病虫害侵袭[18]，进而导致树体腐朽空洞和树势衰弱病变，而东南沿海城市常年高温高湿高盐的气候环境也加剧了机械损伤的危害程度。马占相思也存在同样情况，其发生腐朽空洞的树干也大多存在不同程度的机械损伤情况，与阴香和南洋楹不同的是，树干和树皮完好的马占相思即便树龄较大，对其树干仪器检测出的空洞情况也相对较少，这可能也是马占相思的树干空洞率随胸径分布的变化特征与阴香、南洋楹不同，没有呈现明显规律的重要原因。

为此，建议在日常管养中注意以下几点：1）及时将风灾及修剪后形成的树体损伤创面修剪平整并涂抹愈合剂对其封闭处理，防止雨水浸入及病菌感染，对已出现感染的创伤面应先清理消毒后再涂抹愈合剂进行处理；2）定期开展树干涂白和病虫害防治工作；3）定期开展树木健康与安全风险评估工作，重点排查老化衰弱树木及早期种植的速生树种，做好树木安全风险防控的同时，应逐步更新老化衰弱树木并淘汰不适宜的速生树种。

5 结论

深圳市3条主干道存在安全风险的树木涉及37个树种，总计900余株，约占树木总数的4.2%。安全风险率较高的树种主要是阴香、马占相思、南洋楹、银合欢及非洲楝等速生树种。阴香、南洋楹和马占相思的主干空洞率分别达到

57.65%、36.36%和 26.67%，树体机械损伤是其腐朽空洞的重要诱因之一。阴香和南洋楹随树龄越大其主干空洞率越高，安全风险也越大。非洲楝的主干空洞率相对较低，易拔根倒伏的植株多与树体高达和根系分布较浅、偏长有关。为降低行道树的潜在安全风险，建议沿海城市绿化应选择抗风性强、根系发达的适生树种并适当疏林种植；日常管养中提高行道树精细化管养水平的同时，还应定期开展健康风险评估与安全隐患排查工作，逐步淘汰不适宜的树种，更新老化衰弱树种。

参考文献

[1] PONCE-DONOSO M, VALLEJOS-BARRA O, INGRAM B, et al. Urban trees and environmental variables: Relationships in a city of central Chile[J]. Arboriculture & Urban Forestry, 2020, 46(2): 84-95.

[2] VON DÖHREN P, HAASE D. Risk assessment concerning urban ecosystem disservices: The example of street trees in Berlin, Germany[J]. Ecosystem Services, 2019, 40: 101031.

[3] DURGA RAO K, GOPIKA V, SANYASI RAO V V S, et al. Dynamic fault tree analysis using Monte Carlo simulation in probabilistic safety assessment [J]. Reliability Engineering & System Safety, 2009, 94(4): 872-883.

[4] MATTHECK C, BETHGE K. The structural optimization of trees[J]. Naturwissenschaften, 1998, 85(1): 1-10.

[5] 刘瑞雪，任少蕾. 台风灾害下城市绿地园林树木风灾损伤及影响因素[J]. 中国城市林业，2023，21(2)：76-82.

[6] 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价[J]. 林业资源管理，2022(5)：91-98.

[7] 吴悠绿，肖鹏峰，刘豪，等. 基于因子分析法与 k-means 聚类的行道树安全风险评价[J]. 西南林业大学学报(自然科学)，2023，43(1)：137-145.

[8] 刘晓晴，李浩然，郑严仪，等. 北方城市行道树树体安全性评价：以东王庄带状绿地与学院路行道树为例[J]. 现代园艺，2017(14)：142.

[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] MATTHECK C, BRELORE H. The body language of trees: A handbook for failure analysis [M]. London, HMSO Publications Centre, 1994.

[12] MATTHECK C, BRELOER H. Field guide for visual tree assessment (VTA)[J]. Arboricultural Journal, 1994, 18(1): 1-23.

[13] DUNSTER J A, SMILEY E T, MATHENY N, et al. Tree Risk Assessment Manual [M]. Champaign: International Society of Arboriculture, 2017.

[14] 张德顺，曾明璇，奉树成，等. 我国沿海地区城市行道树抗台风评价与应用[J]. 中国城市林业，2022，20(5)：151-156，162.

[15] 黄东兵，吴德. 台风对深圳市行道树的影响及其应对措施探析[J]. 南方农业，2016，10(15)：77-79.

[16] 唐洪辉，宋磊，李毓琦，等. 不同台风等级对珠海城市绿化树木的影响[J]. 林业与环境科学，2021，37(2)：1-6.

[17] 董毅，黄义钧，何国强，等. 华南地区城市常见园林树木风灾受损等级及抗风能力研究[J]. 广东农业科学，2020，47(6)：30-38.

[18] 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.