

深圳市城市快速路行道树木安全风险评估研究

Research on Security Risk Assessment of Street Trees in Shenzhen Expressway

程睿* 黎国健
CHENG Rui* LI Guojian

(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(2024)08-0133-07
DOI: 10.12193/j.laing.2024.08.0133.016
中图分类号: TU986
文献标志码: A
收稿日期: 2024-03-14
修回日期: 2024-04-29

摘要

对深圳北环大道、深南大道及滨河(海)大道三条快速路行道树木的8项风险因子进行调查检测,并利用VTA-风险矩阵法全面评估行道树安全风险状况。结果表明:三条城市快速路有超过95%的行道树树木风险是可接受或可忽略的,但仍然存在中等风险甚至重大风险的隐患树木,且呈北环大道>深南大道>滨河(海)大道;南洋楹(*Falcataria falcata*)、阴香(*Cinnamomum burmanni*)、非洲楝(*Khaya senegalensis*)、马占相思(*Acacia mangium*)、火焰木(*Spathodea campanulata*)及桉树(*Eucalyptus robusta*)等树木风险可能性均较高,而人面子(*Dracontomelon duperreanum*)、海南蒲桃(*Syzygium hainanense*)的安全性相对较高;行道树可能折断/倒伏部位均以主干为主,但非洲楝、南洋楹、桉树及马占相思的整株倒伏率也较高;在风险等级较高的行道树种中,各风险因子出现频率差异较大,但主干倾斜因子出现频率普遍较高,其次是树皮破损、树干腐朽及主干中空等因子,且风险因子随树木体量和树龄增长而增大。研究结果可为易受台风侵袭的城市行道树木的日常管护及安全风险防控提供科学依据。

关键词

快速路;行道树;风险矩阵;风险因子;安全风险评估

Abstract

To comprehensively evaluate the safety risk status of street trees, this paper investigated and detected eight risk factors of trees on three urban expressways in Shenzhen, including Beihuan Avenue, Shennan Avenue, and Binhe (Hai) Avenue, and evaluated their safety risks using the VTA risk matrix method. The research results indicate that over 95% of the street tree risks on three urban expressways are acceptable or negligible, but there are still hidden trees with moderate or even significant risks, and the order is Beihuan Avenue > Shennan Avenue > Binhe (Hai) Avenue; Trees such as *Falcataria falcata*, *Cinnamomum burmannii*, *Khaya senegalensis*, *Acacia mangium*, *Spathodea campanulata*, and *Eucalyptus* have a higher likelihood of risk, while the safety of *Dracontomelon duperreanum*, and *Syzygium hainanense* is relatively high; The main trunk may be the central part of the broken/lodging parts of street trees, but the whole plant lodging rate is also higher in *Khaya senegalensis*, *Falcataria falcata*, *Eucalyptus*, and *Acacia mangium*; The frequency of occurrence of various risk factors varies among street tree species with higher risk levels, but the frequency of occurrence of trunk inclination factors is generally higher, followed by bark damage, trunk decay, and trunk hollow factors, and the risk factors may increase with the growth of tree size and age. The research findings in this paper may serve as a scientific foundation for the daily management and safety risk prevention and control of urban street trees susceptible to typhoon attacks.

Keywords

expressway; street tree; risk matrix; risk factor; security risk assessment

程睿

1984年生/男/陕西蒲城人/硕士/高级工程师/研究方向为园林植物应用与生态修复技术

黎国健

1974年生/男/广东肇庆人/硕士/高级工程师/研究方向为园林工程与养护技术

*通信作者 (Author for correspondence)
E-mail: chengrui99888@163.com

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”(编号: 2023020)

台风是中国东南沿海地区一种常见的气象灾害，短时强度大、范围广、破坏力强，加之城市高楼大厦之间形成的“狭管效应”促使风力放大数倍，加剧了狂风暴雨的破坏力。2023年9月，超强台风“苏拉”过境深圳，瞬时风力达到12级，导致深圳市区5 000余株城市绿化树木受损倒伏，北环大道甚至因树木倒伏造成人员伤亡。城市绿化树木的生长发育是一个连续的、动态的过程，树木健康状况也是处在不断的动态发展中，加强其安全隐患排查评估工作是防树木倒伏于未然的重要手段。作为沿海城市，深圳市每年不可避免地会遭受不同程度的台风侵袭，期间绿化树木大量倒伏严重阻碍交通甚至伤人事件也时有发生。作为城市交通大动脉的主干道路，任何时候都应确保其畅通无阻，因此对其沿线树木开展隐患排查及安全风险评估尤为重要。

影响树木安全风险的因素较多，包括树种、生长习性、管养水平、气候环境条件等^[1-2]，如何做好树木安全风险防控，确保城市公共安全已经成为城市绿化部门急需解决的问题。树木安全风险评估研究在欧美国家已有数10年的历史^[3-4]，而国内尚处于起步阶段。近年，关于行道树风灾损伤及抗风能力的研究较多^[5-7]，针对行道树安全风险评估的研究也开始受到重视^[8-9]。刘晓晴等^[10]对北京市部分行道树进行安全性调查评价；贺坤等^[11]利用风险矩阵表法评估上海行道树安全风险；吴悠绿等^[12]利用因子分析法评估南京行道树安全风险；乔红雍等^[13]对太原市行道树安全风险也进行了评估。然而，关于深圳地区行道树安全风险评估的研究却未见报道。为此，受深圳市绿化管理处委托，本研究对北环大道、深南大道及滨河（海）大道等深圳市主干道路行道树的健康与安全风

险状况进行了评估，以期为行道树的精细化管理和安全风险防控提供科学依据。

1 研究区域与方法

1.1 研究区域

深圳地处中国南部，北回归线以南，属亚热带季风气候，温润宜人，年平均气温23.3℃，年降雨量1 932.9 mm，全年86%的雨量出现在汛期。汛期分为前汛期（4-6月）和后汛期（7-9月），后汛期主要受热带气旋（台风）、东风波、辐合带的影响，平均有3~4个热带气旋（台风）影响深圳。作为经济特区的深圳城市面积小、人口多、交通压力大，尤其是中心城区范围小，发展建设集中，路网密度和人车流量更为集中，确保城市交通安全畅通运行成为一大难题。

1.2 研究方法

1.2.1 道路选择及行道树调查

本研究将深圳市交通大动脉的北环大道、深南大道及滨河（海）大道三条城市快速路全线作为调查对象。其中，北环大道西起宝安立交（113° 54′ 23″ E，22° 35′ 58″ N），止于上步立交（114° 5′ 54″ E，22° 34′ 10″ N），全长19.50 km；深南大道西起南头检查站（113° 54′ 58″ E，22° 32′ 50″ N），止于沿河路（114° 8′ 50″ E，22° 33′ 10″ N），全长25.60 km；滨河（海）大道西起怡海大道（113° 56′ 9″ E，22° 31′ 41″ N），东接船步路（113° 6′ 47″ E，22° 32′ 30″ N），全长约20 km。三条快速路的主道设计速度均在80 km/h，辅道设计速度40 km/h，日车流量巨大。调查时间为2023年9-10月，调查方法是第一轮利用人工排查对快速路沿线5 m范围内的树木风险因子指标进行人工观测，根据人工初步排查结果，对敲击树干有明显回声、

树势衰弱以及有严重蛀干虫害的树木，再用Arborsonic 3D应力波树木断层扫描仪对树干空洞情况进行检测，树干断面检测图例如图1。

1.2.2 树木安全风险评价方法

树木安全风险是指树木对其影响区域内存在的人、车、建筑等影响目标所构成的潜在危害^[14]。三条主干道涉及行道树数量众多（表1），对存在安全隐患的树木进行风险评估分级，便于绿化管理部门制定科学合理的管养措施以有效防控树木安全风险。因此，参考贺坤、Jim等^[11,15]的相关VTA-风险矩阵法及ISA国际树木学会树木风险评估相关建议^[16]，结合本次安全风险评估实际情况，仅选取操作性强、易获取，对树木健康影响较大且能有效反映树木安全状况的8项主要风险因子作为评估指标体系（表2），评分标准根据偏冠率（Ratio of Crow Inclination，RCI）、树干倾斜度（Trunk Inclination，TI）、树皮破损率（Ratio of Bark Damage，RBD）、树干虫孔率（Ratio of Trunk Insect Hole，RTIH）、树干腐朽率（Ratio of Trunk Decay，RTD）、主干中空率（Ratio of Trunk Hollow，RTH）、主根裸露率（Ratio of Root Exposure，RRE）、主根损伤率（Ratio of Root Damage，RRD）进行评分。其中，RCI=树冠最大枝条长度/该连线上树冠宽度；RBD=树皮破损面积/破损范围圆周面积；RTIH（个/m²）=虫孔数量/树干圆周面积；RTD=腐朽面积/树干断面面积；RTH=中空面积/树干断面面积；RRE=主根最大裸露长度/平均树冠半径；RRD=损伤部位在其与树干中心形成的圆周上的水平弧长/水平周长。表2中涵盖了表征树木结构破坏程度的风险可能性评估P和生长冲突的风险后果严重性S两个部分。将P和S分别量化后代入风险对照值（表3），得到行道树安全总体状况的风险等级R（表4）。其中，VTA（Visual Tree Assessment）

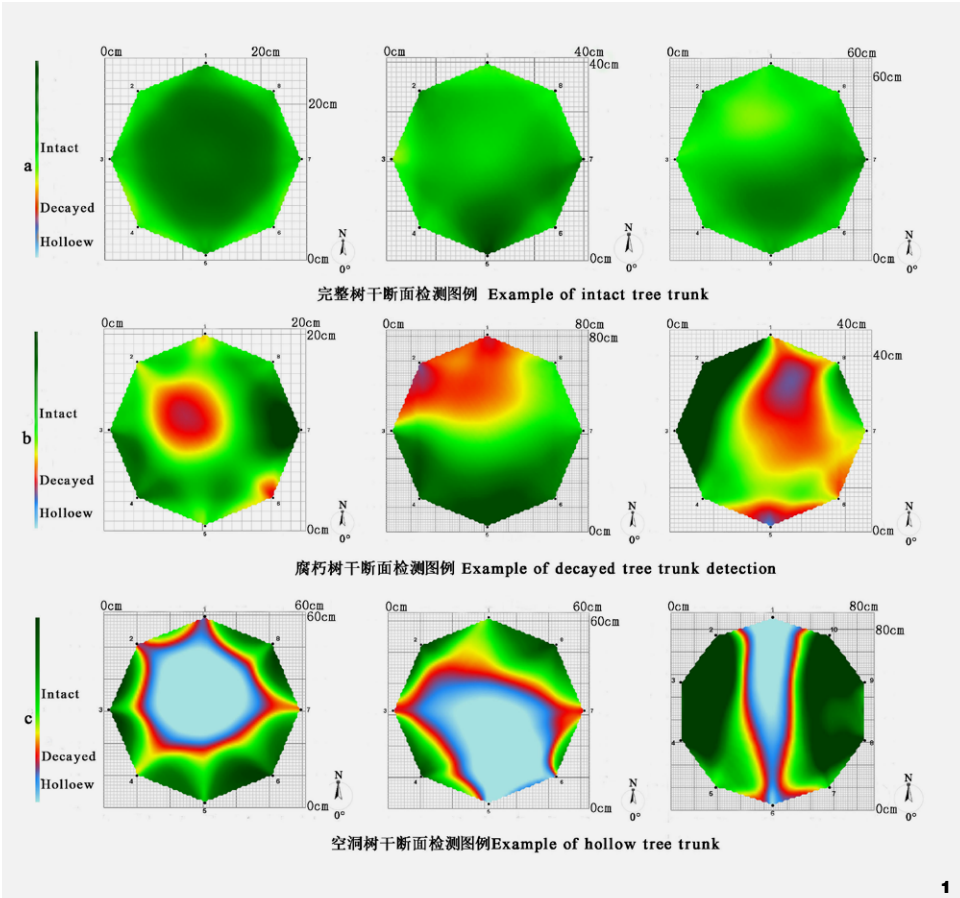


图1 应力波树木断层扫描检测图
Fig. 1 Stress wave detection map of tree trunk

法属于非破坏性检测，由德国学者Mattheck^[17]提出，在国内外应用较为广泛^[15-16]，检测过程分为对树木健康造成危险的因子即生物学

观点检测和对人的危险因子即力学观点检测；风险矩阵法是一种将定性分析和定量分析相结合且能将风险可视化的工具。

表1 行道树木总量及主要树种构成
Tab. 1 Total amount and composition of roadside trees

道路 Street	树种数量 / 种 Number of tree species	树木总量 / 株 Number of trees	主要树种构成 Main tree species composition
北环大道	123	35 284	马占相思 (<i>Acacia mangium</i>) 10.13%、紫花风铃木 (<i>Handroanthus impetiginosus</i>) 8.16%、雅榕 (<i>Ficus concinna</i>) 6.33%、人面子 (<i>Dracontomelon duperreanum</i>) 6.04%、海南蒲桃 (<i>Syzygium hainanense</i>) 5.52%、非洲楝 (<i>Khaya senegalensis</i>) 4.19%、尾叶桉 (<i>Eucalyptus urophylla</i>) 3.75%、阴香 (<i>Cinnamomum burmanni</i>) 3.03%、凤凰木 (<i>Delonix regia</i>) 2.55%、南洋楹 (<i>Falcataria falcata</i>) 2.10%
深南大道	119	19 821	小叶榄仁 (<i>Terminalia neotaliala</i>) 14.04%、雅榕 5.83%、凤凰木 5.17%、黄花风铃木 (<i>Handroanthus chrysanthus</i>) 4.43%、芒果 (<i>Mangifera indica</i>) 3.59%、木棉 (<i>Bombax ceiba</i>) 3.31%、人面子 2.91%、海南蒲桃 2.78%、火焰木 (<i>Spathodea campanulata</i>) 2.53%、阴香 2.13%、南洋楹 1.76%
滨河 (海) 大道	74	19 383	宫粉紫荆 (<i>Bauhinia variegata</i>) 19.46%、雅榕 8.35%、海南蒲桃 5.04%、糖胶树 (<i>Alstonia scholaris</i>) 4.7%、木棉 3.94%、非洲楝 3.68%、麻楝 (<i>Chukrasia tabularis</i>) 3.46%、人面子 2.60%、南洋楹 1.94%

1.2.3 数据处理

采用EXCEL 软件对树木风险评估数据进行整理，并根据VTA-风险矩阵法评估结果，利用SPSS 19.0软件对风险等级较高的行道树的胸径与风险因子间的相关性进行分析。

2 结果与分析

2.1 行道树安全风险等级状况

由表5可知，超过90%的行道树风险可能性等级P处于中等级别及以下；尽管大部分行道树的风险后果严重性等级S均处于轻度和严重等级，占比分别为38.21%和37.92%，但风险后果严重性等级S处于灾难的占比明显较大，为23.19%；有超过95%的行道树风险等级R处于Ⅱ级及以下，但北环大道、深南大道及滨河 (海) 大道不仅都有部分树木的风险等级达到中等风险甚至重大风险，而且中等风险及重大风险等级呈现北环大道>深南大道>滨河 (海) 大道的趋势。

2.2 行道树安全风险评估调查结果

由表6可知，在调查的11种常见行道树中均存在风险可能性高等级的植株，其中南洋楹、阴香、非洲楝和马占相思均有超过10%的植株的风险可能性处于高等级，其次火焰木、桉树及凤凰木也有超过7%的树木

表2 行道树风险评估指标体系与评分标准
Tab. 2 Risk assessment index system and scoring criteria for street trees

风险评估 Risk assessment	评估指标 Evaluation indicators	指标评分标准 Scoring criteria			
		0	1	2	3
可能性评估 <i>P</i>	RCI/%	< 60	< 70	< 80	≥ 80
	TI/°	< 5	< 15	< 30	≥ 30
	RBD/%	0	< 5	< 10	≥ 10
	RTIH	0	< 5	< 10	≥ 10
	RTD/%	< 5	< 15	< 30	≥ 30
	RTH/%	0	< 10	< 20	≥ 20
	RRE/%	0	< 5	< 10	≥ 10
	RRD/%	0	< 5	< 15	≥ 15
后果严重性评估 <i>S</i>	折断 / 倒伏部位	1 (二级枝)	2 (一级枝)	3 (主干)	4 (整株)
	区域风险状况	1 (低危)	2 (中危)	3 (高危)	4 (极危)

表3 风险对照值
Tab. 3 Risk control values

可能性 Possibility	严重程度 Severity level			
	I (可忽略)	II (轻度)	III (严重)	IV (灾难)
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

注：表中数值由风险矩阵中的行列数值计算所得。

表4 风险对照等级
Tab. 4 Risk control level

风险等级 <i>R</i> Risk level	解释说明 Explanatory notes
IV (12 ~ 16)	重大风险, 会引起严重后果, 需紧急处理
III (8 ~ 9)	中等风险, 应予以重视并尽快采取控制措施
II (3 ~ 6)	可接受风险, 应持续观察并加强管养
I (< 3)	可忽略风险, 应正常管养并继续观察

表5 行道树安全风险评估等级占比
Tab. 5 Percentage of safety risk assessment grades for street trees

道路 Street	数量 / 株 Number	风险可能性等级 <i>P</i> /%				风险后果严重性等级 <i>S</i> /%				风险等级 <i>R</i> /%			
		I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV
北环大道	35 284	69.73	19.90	8.62	1.75	0.40	31.15	42.28	26.17	44.22	51.37	3.77	0.64
深南大道	19 821	77.84	14.28	6.57	1.31	0.17	41.85	36.37	21.61	49.25	47.42	2.95	0.38
滨河 (海) 大道	19 383	81.08	12.65	5.12	1.15	1.75	47.33	31.55	19.37	52.76	45.16	1.84	0.25
总计	74 488	74.84	16.52	7.16	1.48	0.69	38.21	37.92	23.19	47.78	48.70	3.05	0.47

风险可能性处于高等级；除了人面子、海南蒲桃的风险可能性较低外，其他行道树中均存在风险可能性极高的植株，其中阴香、南洋楹和马占相思存在极高风险可能性的树木占比均较大，分别为5.24%、1.14%和1.03%。在调查的11种常见行道树中，可能倒伏/折

断的部位主要集中在主干及一级枝。其中，阴香、桉树、火焰木和马占相思的主干折断可能性均超过了50%，尤其阴香主干折断可能性达到69.35%；非洲楝、南洋楹及桉树的整株倒伏可能性分别为17.92%、13.50%和11.96%，明显高于其他行道树，其次马占相

思、火焰木、美丽异木棉的整株倒伏可能性也较高，均超过了5%。

2.3 行道树风险因子调查统计结果

由表7可知，在调查涉及的8项行道树风险因子中，主干倾斜、树皮破损、树干腐

表6 常见行道树安全风险可能性评估情况
Tab. 6 Assessment of safety risk probability of street trees

树种 Tree species	数量 / 株 Number	行道树风险可能性等级 <i>P</i> Risk possibility level of street trees				行道树可能折断 / 倒伏部位 Possible breaking/falling position of street trees			
		I /%	II /%	III /%	IV /%	二级枝 /%	一级枝 /%	主干 /%	整株 /%
阴香	1 526	61.52	18.17	15.07	5.24	1.62	23.05	69.35	5.98
南洋楹	1 577	60.74	21.50	16.61	1.14	0.98	36.78	48.74	13.50
马占相思	3 784	74.93	13.42	10.62	1.03	4.13	31.51	54.62	9.74
非洲楝	3 465	63.34	23.85	12.61	0.20	12.16	32.55	37.37	17.92
凤凰木	2 379	78.37	13.64	7.78	0.21	15.10	39.12	41.92	3.86
火焰木	1 132	78.09	11.75	9.89	0.27	2.39	32.39	57.97	7.25
桉树	1 344	70.55	19.93	8.85	0.67	3.69	18.50	65.85	11.96
小叶榕	4 687	89.01	10.56	0.38	0.04	3.20	47.08	49.72	0
人面子	3 053	95.61	3.57	0.82	0	40.07	37.18	22.75	0
海南蒲桃	3 835	97.00	2.35	0.65	0	41.73	32.05	25.98	0.24
美丽异木棉	456	87.43	8.62	3.07	0.88	13.64	36.10	43.92	6.34

表7 行道树风险因子调查统计结果
Tab. 7 Investigation and statistics results of risk factors of street trees

树种 Tree species	风险因子出现频率 / % Frequency of risk factors							
	树皮破损	主干中空	树干腐朽	主干倾斜	树冠偏冠	蛀干虫害	根系裸露	根系腐朽
阴香	25.19	32.06	26.72	20.61	6.87	9.92	0	0
南洋楹	19.14	5.56	16.05	15.43	4.94	6.79	0.62	0.62
马占相思	24.51	7.84	18.63	22.55	0.98	4.90	0	0
非洲楝	1.03	0	0	18.56	6.19	0	0	0
凤凰木	4.88	0	4.88	9.76	2.44	0	0	0
火焰木	0.00	6.67	13.33	20.00	0	13.33	6.67	0
桉树	10.53	5.26	15.79	15.79	0	5.26	0	0
小叶榕	0	0	15.79	10.53	0	0	0	0
人面子	0	0	4.00	0	4.00	0	0	0
海南蒲桃	0	0	0	7.69	3.85	0	0	0
美丽异木棉	0	0	11.11	22.22	0	0	0	0
合计	14.55	9.44	14.24	16.87	4.18	4.95	0.31	0.15

朽和主干中空4项因子出现频率较高，分别为16.87%、14.55%、14.24%和9.44%，其次是蛀干虫害和树体偏冠两项因子分别为4.95%、4.18%，而根系裸露、腐朽两项因子出现频率较低。另外，在风险等级较高的行道树种中，各风险因子出现频率差异也较大。其

中，阴香的主干倾斜、树皮破损、树干腐朽和主干中空4项风险因子的出现频率均超过20%，尤其主干中空出现频率为32.06%，远超其他树种；南洋楹、马占相思和桉树3种行道树的主干倾斜、树皮破损、树干腐朽出现频率均较高，除桉树树皮破损因子出现频率

为10.53%外，这三种行道树的其他风险因子出现频率均超15%；非洲楝主干倾斜因子出现频率较大（18.56%），其他风险因子出现频率均较低；另外，火焰木、小叶榕及美丽异木棉的主干倾斜、树干腐朽两项因子的出现频率也较大，均超过10%。

表8 行道树胸径与主要风险因子相关性分析
Tab. 8 Correlation analysis between the DBH of street trees and main risk factors

胸径 Diameter	树皮破损 Bark damage	主干中空 Trunk hollow	树干腐朽 Trunk decayed	主干倾斜 Trunk inclined	树冠偏冠 Tree canopy deflection	蛀干虫害 Borer pest
阴香	0.358	0.976	-0.686	0.997*	0.651	-0.108
南洋楹	0.802	0.954**	0.487	-0.909*	-0.057	0.934**
马占相思	-0.808	0.624	-0.864	0.894	-0.706	0.450
桉树	-0.655	0.327	0.924	-0.866	0.778	0.993

注：* $P < 0.05$ ，** $P < 0.01$ 。

2.4 行道树胸径与风险因子相关性分析

调查树种中，阴香的胸径主要集中在20 ~ 50 cm，南洋楹的胸径主要集中在30 ~ 100 cm，马占相思的胸径主要集中在20 ~ 70 cm，桉树的胸径主要集中在30 ~ 80 cm。利用SPSS软件对风险等级较高的阴香、南洋楹、马占相思、桉树的风险因子与胸径间的相关性进行了分析（表8）。因根系裸露、根系腐朽风险因子出现频率较低而未与胸径进行相关性分析。相关性分析结果表明，不同树种的胸径与风险因子间的相关性存在较大差异。其中，阴香的胸径与主干倾斜呈显著正相关；南洋楹的胸径与主干中空、蛀干虫害呈极显著正相关，与主干倾斜呈极显著负相关；马占相思和桉树的胸径与主要风险因子的相关性均不显著。

3 结论

（1）基于VTA-风险矩阵法的评估结果（表5）显示，深圳北环大道、深南大道及滨河（海）大道三条主干道路两侧沿线超过90%的行道树风险可能性等级处于中等级别及以下，表明大部分行道树风险可能性为中等，同时超过95%的行道树风险等级处于Ⅱ级及以下，也表明大部分行道树的风险可忽略或可接受。然而，三条主干道路部分树木仍存在着不可忽视的中等风险甚至重大风险，而且北环大道的隐患树木最多，潜在

风险隐患相比也最大，究其原因主要是北环大道沿线两侧分布的树木相比深南大道及滨河（海）大道其数量更多、密度相对也更大，而且树龄也普遍较大、树体体量大，进入生长衰退期的树木较多。调查发现，树龄过大则树木生长势逐渐趋弱，尤其是速生树种，而树木密度过大在高温、高湿、高盐的沿海城市则树干显然更易发生病虫害及腐朽情况。此外，行道树靠近背景林侧因树木较多会使其外侧生长空间受限，加之每年的台风侵袭，造成行道树不仅更易发生偏冠、主干倾斜等生长缺陷，而且普遍偏向于车行道，造成安全隐患。

（2）根据表6数据可知，在11种常见行道树中，南洋楹、阴香、非洲楝、马占相思、火焰木、桉树及凤凰木的树木风险可能性均较高，尤其阴香、南洋楹和马占相思发生高风险的可能性也更大，相比之下人面子、海南蒲桃及小叶榕的安全性则较高。此外，行道树可能折断/倒伏部位均以主干为主，且以阴香、桉树、火焰木和马占相思为典型代表，而整株倒伏可能性较高的行道树以非洲楝、南洋楹及桉树为代表。分析认为，南洋楹、阴香、非洲楝、马占相思及桉树等行道树均属浅根、速生树种，根系较浅则抗风性差加之木质较脆^[18-19]，造成树干更易折断甚至整株倒伏。另外，基于对台风季倒伏树木情况的多年跟踪调查，发生整株倒伏的非洲楝、

南洋楹及桉树等均以高大树木为主。其中，倒伏的非洲楝胸径多在60 cm以上，树高多在18 m以上；倒伏的南洋楹胸径多在70 cm以上，最大胸径超过100 cm，树高也多在15 m以上；倒伏的桉树胸径多在50 cm以上，树高多在20 m以上。调查还发现，在胸径20 cm以上的阴香中，其主干中空现象较为普遍，且树干腐朽及蛀干虫害现象也较多，尤其是树皮受外力破损及枝干折断或修剪截枝造成的裸露创面，因修复不及时或消毒封口处理不当引发的树干朽烂空洞及蛀干虫害现象极为普遍，这可能也是阴香主干折断可能性远比其他行道树更大但整株倒伏可能性相比较小的原因。

（3）因树体裸露创伤面修复不及时或处理不当而引起的树干腐朽空洞及蛀干虫害现象在南洋楹和马占相思中也较常见。调查过程中也发现，一般树皮完好的南洋楹和马占相思即便在胸径50 cm以上的较大树木中，其主干中空现象在应力波仪器检测中也并不多见。可见，在行道树日常管养中及时防治蛀干虫害并对枝干裸露创伤面及时进行消毒修复处理，尽可能保护树皮层的完整性极为重要。此外，调查还发现，尽管非洲楝是深圳地区抗风性较差、易倒伏树种之一^[20]，但其主干中空、树干腐朽现象却极少，究其原因主要是其高大的体量和较浅的根系使其抗风性较差，致使其主干倾斜现象较多、整株

倒伏风险较大，这也与其整株倒伏可能性远比其他行道树要高但主干折断风险相对又低于其他高风险行道树的评估结果相符。另外，南洋楹、桉树整株倒伏可能性较大也与其根系较浅、树体高大、抗风性差有关。

(4) 深圳市地处台风频发的沿海地区，其行道树主干倾斜、树皮破损、树干腐朽和主干中空4项风险因子出现频率较高并不奇怪(表7)，显然台风更易造成树木尤其体量较大树木的倾斜、折断及其因侵害处理不及时、处置措施不当引起的次生侵害。树木胸径大小一般反映树木体量和树龄大小，因此胸径与风险因子的相关性分析结果表明(表8)，行道树的风险因子可能随着树木体量和树龄的增长而增大，如阴香可能随着树木体量和树龄增长，其更易发生主干倾斜，而南洋楹更易发生主干中空、蛀干虫害。因此，在日常管养工作中，做好行道树木的修剪控高工作，避免树木过高、体量过大极为必要^[21]。然而，南洋楹的胸径与主干倾斜呈极显著负相关，分析认为是由于南洋楹作为深圳地区每年台风季最易倒伏树木之一^[7]，为避免不必要的安全隐患，绿化管理部门每年均会对体量较大且主干倾斜难以有效加固支撑的南洋楹树木进行清理，而对于主干倾斜但体量较小的南洋楹则尽可能采取重修剪和支撑加固处理，绿化部门的这种处理策略在其他行道树尤其是被逐渐淘汰的城市绿化行道树种中较为常见，如非洲楝、马占相思、桉树等。

4 讨论

三条快速路均存在中等风险甚至重大风险的隐患树木，且以南洋楹、阴香、非洲楝、马占相思、火焰木及桉树等为高风险树种，以人面子、海南蒲桃等为低风险树种；行道

树可能折断/倒伏部位均以主干为主，但非洲楝、南洋楹、桉树及马占相思的整株倒伏率也较高；在风险等级较高的行道树种中，各风险因子出现频率差异较大，且风险因子可能随着树木体量和树龄的增长而增大；高风险树种多是城市绿化早期种植的已步入老化衰退期的速生树种；树体机械损伤创面若处置不当或不及时，在高温高湿高盐的沿海地区极易诱发树干腐朽空洞及病虫害问题；树体过于高大及根系较浅会降低树木抗风能力，增加其整株倒伏风险。因此，城市行道树木重建更要重养，建议加强行道树木的日常管养工作并做好其修剪控高与台风季应急排查修剪工作，定期对树干进行涂白处理和病虫害防治，对树体裸露创伤面应及时进行修复或消毒封口处理，同时应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，逐步更新老化衰弱树木及淘汰不适宜的速生树种。

注：文中图表均由作者绘制。

参考文献

- [1] ROMAN L A, WALKER L A, MARTINEAU C M, et al. Stewardship Matters: Case Studies in Establishment Success of Urban Trees[J]. Urban Forestry & Urban Greening, 2015, 14(4): 1174-1182.
- [2] 乔红雅, 袁涛, 李擘. 太原市行道树安全风险评估[J]. 内蒙古农业大学学报: 自然科学版, 2023, 44(3): 26-33.
- [3] KOESER A K, HAUER R J, 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.
- [4] KLEIN R W, KOESER A K, HAUER R J, 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: 26-38.
- [5] 刘瑞雪, 许晓雪. 强台风后城市园林树木的风灾损伤

及其抗风能力研究——以深圳大学后海校区为例[J]. 中国园林, 2020, 36(9): 116-121.

- [6] 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.
- [7] 朱炫熹, 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.
- [8] 陈钧泽, 钟乐, 周桃, 等. 城市树木致伤风险可视化评估: 风险评估与管理探析[J]. 广东园林, 2021, 43(04): 93-96.
- [9] 董元彪, 肖鹏峰, 刘豪, 等. 基于GIS空间分析的城市行道树安全评估[J]. 南京大学学报(自然科学), 2023, 59(02): 201-212.
- [10] 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.
- [11] 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(9): 106-111.
- [12] 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(01): 137-145.
- [13] 乔红雅, 袁涛, 李擘. 太原市行道树安全风险评估[J]. 内蒙古农业大学学报(自然科学版), 2023, 44(3): 26-33.
- [14] KLEIN R W, KOESER A K, HAUER R J, et al. Risk Assessment and Risk Perception of Trees: A Review of Literature Relating to Arboriculture and Urban Forestry[J]. Arboriculture & Urban Forestry, 2019(1): 45.
- [15] JIM C Y, ZHANG H. Defect-disorder and Risk Assessment of Heritage Trees in Urban Hong Kong[J]. Urban Forestry & Urban Greening, 2013, 12(4): 585-596.
- [16] DUNSTER J A, SMILEY E T, MATHENY N, et al. Tree Risk Assessment Manual[M]. Champaign: International Society of Arboriculture, 2017.
- [17] MATTHECK C, BRELOER H. The Body Language of Trees. A Handbook for Failure Analysis[M]. London: Office of the Deputy Prime Minister, Stationery Office. 1993.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 辛如如, 彭剑华, 肖泽鑫, 等. 粤东滨海城市绿化树种抗风性评价与筛选[J]. 林业与环境科学, 2017, 33(02): 29-35.
- [21] EEN D. Tree Risk Assessment and Management in Urban Areas[C]// International Urban Environment and Health Congress, 2016.