

上海 14 种园林树种根系结构与锚固力的相关性研究

张德顺¹, 陈一家¹, 张振¹, 奉树成², 王本耀², 陈莹莹¹

(1. 同济大学 建筑与城市规划学院, 上海 200092; 2. 上海市绿化管理指导站, 上海 200020)

摘要: 全球气候变化引发的灾害性风暴潮和台风事件发生频度和成灾强度有不断上升的趋势, 这对城市园林树木的抗风性提出了更高的要求, 增强根系锚固力是提升树种抗风的重要环节。研究筛选了 14 种上海园林树种开展静态拉力荷载实验, 比较不同树种锚固力差异, 结合“完全挖掘法”采集的 14 种树种根系结构数据, 运用相关分析和多元逐步回归分析探究了根系结构与锚固力的定量关系。实验结果为: 14 种树种根系锚固力排序为: 细叶青冈 > 水紫树 > 三角枫 > 天竺桂 > 北美枫香 > 枫香 > 日本黄栌 > 豆梨 > 女贞 > 榉树 > 纳塔栎 > 乌桕 > 南京椴 > 东方杉; 相关性分析筛选出 11 项与根系锚固力显著相关的指标, 且均为正相关关系, P 值由大到小依次是: 直径 1 500 mm 范围内树根平面投影面积占比 R_{1500} 、直径 1 000 mm 范围内树根平面投影面积占比 R_{1000} 、直径 500 mm 范围内树根平面投影面积占比 R_{500} 、树根质量 M_r 、主要水平根数目 N_h 、主要斜出根数目 N_o 、根幅 S_r 、水平根垂直投影面积占比 R_h 、斜出根垂直投影面积占比 R_o 、主要垂下根数目 N_d 、地径 D_g ; 发现描述根系水平向特征的指标对根系锚固力的影响大于描述根系纵向生长的指标; 多元逐步回归分析得到 M_r 、 N_h 和 R_{500} 与 F_{max} 的回归模型为: $F_{max} = -3.620 + 0.699M_r + 0.589N_h + 0.356R_{500}$ 。该研究得到了树木根系锚固力排序, 发现根系的水平投影指标与根重对锚固力影响显著, 研究结果为丰富华东地区园林树种抗风性评价数据库、优化抗风性园林树木的选择与管理养护提供了理论支持。

关键词: 园林树种; 根系锚固力; 根系结构

中图分类号: S688

文献标志码: A

Relationship Between Root Architecture and Anchorage Force of 14 Landscape Tree Species in Shanghai

ZHANG Deshun¹, CHEN Yijia¹, ZHANG Zhen¹, FENG Shuncheng², WANG Benyao², CHEN Yingying¹

(1. College of Architecture and Urban Planning, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Shanghai Greening Management and Guidance Station, Shanghai 200020, China)

Abstract: The frequency and intensity of disastrous storm surges and typhoon events due to global climate change are increasing, leading to heightened requirements for the wind resistance of urban landscape trees. Enhancing the root anchorage force is an important way to improve the wind resistance of tree species. Fourteen tree species in Shanghai were selected to conduct a static tension test, and the anchorage force of different tree species was compared in this paper. Based on the root distribution data of 14 tree species collected by the “complete excavation method”, the correlation analysis and nonlinear regression analysis were performed to explore the correlation between root architecture and anchorage force. The preliminary results indicate that the sequence of the anchorage forces of the 14 root systems is as follows: *Cyclobalanopsis gracilis* > *Nyssa aquatic* > *Acer buergerianum* > *Acer buergerianum* > *Cinnamomum japonicum* > *Liquidambar styraciflua* > *Liquidambar formosana* > *Cotinus coggygria* > *Pyrus calleryana* > *Ligustrum lucidum* > *Zelkova serrate* > *Quercus nuttallii* > *Triadica sebifera* > *Tilia miqueliana* > *Taxodiomera peizhongii*; The correlation analysis screened out 11 indexes significantly correlated with root anchorage force, all of which were positively correlated. The P values of the 11 indexes are in a descending order of R_{1500} , R_{1000} , R_{500} , M_r , N_h , N_o , S_r , R_h , R_o , N_d , and D_g . It is found that indexes describing the horizontal characteristics of roots have a greater influence on the anchorage force of roots than indexes describing the vertical growth of roots. The multiple linear regression model of M_r , N_h , R_{500} , and F_{max} is obtained by multiple stepwise regression analysis $F_{max} = -3.620 + 0.699M_r + 0.589N_h + 0.356R_{500}$. In conclusion, this study obtained the anchorage force ranking of tree roots and found that the horizontal projection index of roots and root weight had significant effects on the anchorage force. The results

收稿日期: 2023-03-01

基金项目: 国家自然科学基金(32071824); 上海城市树木生态应用工程技术研究中心项目(17DZ2252000)

第一作者: 张德顺, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为气候变化景观应对研究、园林植物造景和风景旅游规划与景观营造。E-mail: zds@tongji.edu.cn

通信作者: 陈莹莹, 博士生, 主要研究方向园林植物应用。E-mail: 690584773@qq.com



论文
拓展
介绍

enriched the wind-resistant evaluation database of landscape tree species in East China and provided theoretical support for the selection, management, and maintenance of wind-resistant landscape trees.

Key words: landscape tree species; anchorage force; root architecture

全球气候变化引发的灾害性风暴潮和台风事件的发生频度和成灾强度有不断上升的趋势,频发的风害对城市园林树种的抗风性提出了更高的要求^[1]。上海市作为我国东部沿海城市,城市规模大,人口、经济、资源聚集性高,因而其城市安全的敏感性和影响也更为突出^[2]。近年来,台风所诱发的树木风折、风倒和风拔现象频频发生。因此,园林树木必须具有较强的抗风性,才能防控台风对城市绿地生态系统与植物群落结构和功能的负面影响,降低对城市生态安全和绿地健康的隐患^[3]。

国内外关于树木风害的研究一般从树冠、树干和树根3个方面展开,风力大小、树木生物力学特性、根系与土壤的相互作用力是影响树木风害的主要因素^[4]。但由于根系结构观察的难度较大,相关定量分析研究进展相对迟缓。树木根系作为树木的地下部分,与土壤形成根土板复合体^[5],是响应风害的关键部位。静态拉力荷载实验是目前研究根系锚固力应用广泛的方法,可以简单直观地反映树木发生倒伏时的受力情况,有助于了解和预测树木发生风倒的临界风荷载^[6]。Tanaka等^[7]通过树木牵引实验验证了垂柳(*Salix babylonica*)和日本核桃(*Juglans ailanthifolia*)由于根系结构类型差异而具有不同强度的根系锚固力。此外,立地环境也对根系锚固力有影响,Kamimura等^[8]通过静态拉力荷载实验证明根土板含水量的增加会使根系锚固力降低。多项研究发现植物根系会根据地形地貌、盛行风向等生长环境差异适应性地调控自身的根系结构分布^[9-10],也证明根系的生物量、根直径、根系分布密度等根系结构指标与根系锚固力密切相关^[11-12]。根面积比(root area ratio, RAR)、根面积指数(root area index, RAI)等也是常见的衡量植物根系在土壤中密度与含量的指标^[13]。

综上所述,树木的根系结构与土壤的物理性质共同影响了树木的根系锚固能力,而根系形态结构又通过影响根系和土壤的相互作用关系成为影响根系锚固力的主要因素^[14]。目前,对根系形态结构多

局限于根系形态结构的少数几项指标与根系锚固力的分析,缺乏对根系锚固力响应机制上的深入研究,导致目前在华东沿海地区抗风性树种选择时所能参考的理论依据也较为缺乏。

因此,本文通过静态拉力荷载试验评估不同树种发生风害的临界荷载,同时结合根系结构的定量化参数体系,分析树木根系锚固力与根系结构的关系,以期优化城市园林树种抗风能力的策略提供理论参考。

1 研究方法

1.1 研究地概况

试验场地选择位于上海市宝山区的森林植被种质资源基地(31°23'33"N, 121°19'55"E),区域年平均气温17.1℃~18.0℃。年平均降水量1 173.4 mm,降水集中在5—9月。试验场地中的土壤质地为黄棕壤,黏度适中,30 cm深度下土壤紧实度在2 005~2 011 kPa间波动,土壤容重在1.30~1.37 g·cm⁻³,土壤性质较为稳定。试验在2021年五月下旬进行,试验开始前一周均为晴天,静态拉力荷载试验共进行了3 d。为保证土壤环境的稳定性,3 d内分别对实验对象周边的土壤含水量进行测量,第一天土壤含水率为12.39%,第二天为12.35%,第三天为12.47%。

1.2 实验对象

本研究参考历年上海植物研究中的常见树种与上海部分绿地施工清单,结合实验操作条件等现实因素,最终筛选出14种上海园林树种(表1)。既包括女贞(*Ligustrum lucidum*)^[15]、乌桕(*Triadica sebifera*)、日本黄栌(*Cotinus mill*)、纳塔栎(*Quercus nuttallii*)^[16]等在上海地区已经广泛栽植的树种,也包含水紫树(*Nyssa aquatica*)^[15]、细叶青冈(*Cyclobalanopsis gracilis*)、豆梨(*Pyrus calleryana*)等暂未广泛使用,但具有良好园林应用潜力的树种。为了提高实验数据的代表性,本实验每种树种材料选择3棵用于根系锚固力重复实验,共42株苗木作为实验对象,获取其根系结构。实验树种的生长环境一致、生长情况良好,且胸径控制在(5.5±0.7) cm,高度控制在(3.5±0.5) m,以减少土壤环境差异、树种规格等因素对实验结果的影响。

1.3 根系锚固力测定

本研究使用静态拉力荷载试验来测定树种的根系锚固力。根系锚固力测量器材参考Tsen-Tieng等^[6]的研究定制,包括绞盘、铁质支架、拉力传感器

表 1 试验树种清单

Tab. 1 List of experimental tree species

编号	树种	拉丁名
1	三角枫	<i>Acer buergerianum</i>
2	天竺桂	<i>Cinnamomum japonicum</i>
3	日本黄栌	<i>Cotinus mill</i>
4	细叶青冈	<i>Cyclobalanopsis gracilis</i>
5	女贞	<i>Ligustrum lucidum</i>
6	枫香	<i>Liquidambar formosana</i>
7	北美枫香	<i>Liquidambar styraciflua</i>
8	水紫树	<i>Nyssa aquatica</i>
9	豆梨	<i>Pyrus calleryana</i>
10	纳塔栎	<i>Quercus nuttallii</i>
11	南京椴	<i>Tilia miqeliana</i>
12	乌柏	<i>Triadica sebifera</i>
13	榉树	<i>Zelkova serrata</i>
14	东方杉	<i>Taxodiomera peizhongii</i>

和固定绳。试验前先在树干离地高 1 m 处将其锯断,以去除树木倒伏时树冠与树干自重对根系的受力影响;将不锈钢手摇绞盘固定在距离被试树种 2 m 距离处的支架上,支架另一端通过麻绳固定在更加粗壮的树干上,以保证施加荷载时仪器稳定;麻绳统一固定在树干距离地面 70 cm 处,确保被试树种的拉力受力点一致,麻绳与绞盘连接处固定拉力传感器;由南向北对试验对象施加拉力荷载,通过控制绞盘绞动圈数来改变拉力,控制树干倾斜角度,试验树种的受力方向与地面保持水平,记录拉力变化情况。绞盘每绞动半圈,树干倾斜 2.65°,并通过拉力传感器记录一个读数,直到拉力传感读数达到最大值,代表了根系锚固力大小,记为 F_{max} (图 1)。

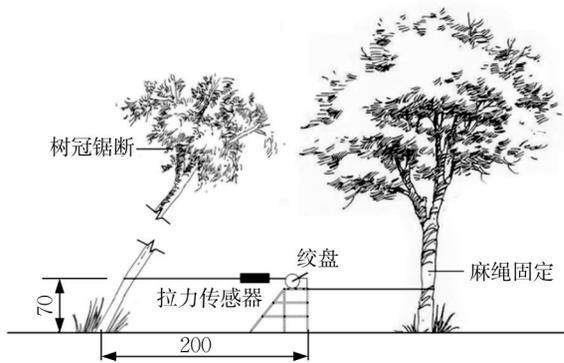


图 1 静态拉力实验示意图(单位:cm)

Fig. 1 Diagram of static tension test(unit:cm)

1.4 根系结构定量分析

(1) 根系结构获取

“完全挖掘法”具有操作简单、结果准确和开展限制因素少等优势^[17],是根系形态结构研究的经典

方法,本研究采用该法以获取较为精确的根系结构。通过预挖掘确定直径 1.5 m、深 0.8 m 的圆形树坑以尽量减少根系机械损伤,收集到被试树种的完整根系结构。其中,榉树 2 号根系被发现有明显的破坏痕迹(图 2),为确保根系的完整性和样本数据的有效性,该样本被舍弃。挖掘出树根后,去除根系间的土壤,拍摄树根结构图像,借助 Adobe Photoshop、AutoCad 等软件处理图像,以获取根系结构相关参数。

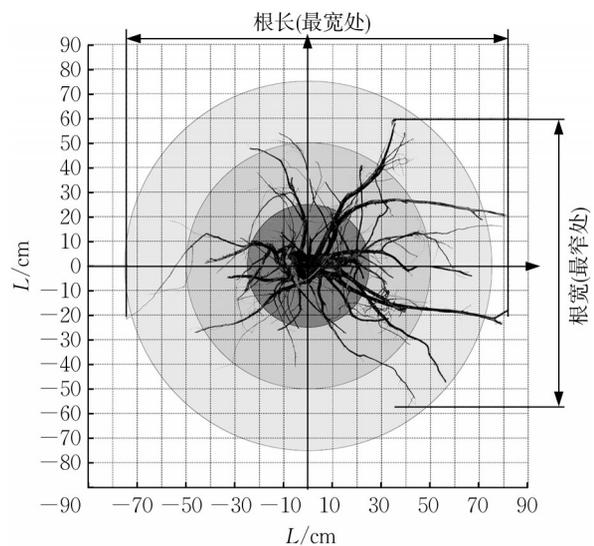


图 2 被舍弃的榉树 2 号根系样本

Fig. 2 Abandoned root sample of *Zelkova serrata*

(2) 根系指标的确定

根系处理后,获得根系结构的垂直投影图像和水平投影图像,分别如图 3、图 4,共筛选出 16 个量化根系结构的参数,将其分为根系总生物量、根系结构分布、根系直径和根系密度 4 类(表 2)。



□ 直径 1 000~1 500 mm 范围的树根平面投影
 ■ 直径 500~1 000 mm 范围的树根平面投影
 ■ 直径 0~500 mm 范围的树根平面投影

图 3 水平投影图像

Fig. 3 Horizontal projection image

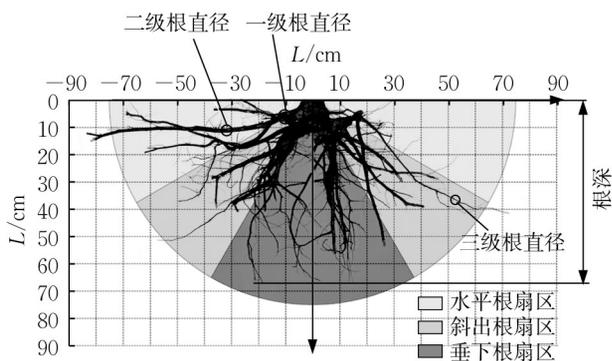


图 4 垂直投影图像

Fig. 4 Vertical projection image

1.5 数据分析

统计根系锚固力、根系结构指标参数数据,运用 SPSS 26.0 进行 Pearson 相关性分析和多元回归分析,使用 Origin 2023 绘图。

表 2 根系锚固力相关的根系结构参数

Tab. 2 Root architecture parameters related to root anchorage force

指标大类	具体指标	定义及计算方法
根系总生物量	树根质量 M_r	挖出树根,清除根际土后称重
	地径 D_g	苗木靠近地表处的茎部直径
	根幅 S_r	根平面投影近似椭圆形,分别测量根系投影椭圆长轴 a 与短轴 b ,则根幅的表达式为: $S_r = \pi \cdot a \cdot b / 4$
	根深 L_d	主根或一级根的最大深度
根系结构分布	主要水平根数目 N_h	选取对于根系有结构意义(即所有的一级根和所有直径大于一级根最小直径的二级根和三级根)的与水平面夹角小于 30° 的根系进行统计
	主要斜出根数目 N_o	选取对于根系有结构意义的与水平面夹角在 $30^\circ \sim 60^\circ$ 之间的根系进行统计
	主要垂下根数目 N_d	选取对于根系有结构意义的与水平面夹角在 $60^\circ \sim 90^\circ$ 之间的根系进行统计
根系直径	一级根直径 D_1	随机选择 5 根从基底发出的一级根,在距离发出点 100 mm 处测量直径,平均后得出结果
	二级根直径 D_2	随机选择 5 根从一级根分叉出的二级根,在距离分叉处 100 mm 处测量直径,平均后得出结果
	三级根直径 D_3	随机选择 5 根从二级根分叉出的三级根,在距离分叉处 100 mm 处测量直径,平均后得出结果
根系密度	直径 500 mm 范围内的树根平面投影面积占比 R_{500}	以树干中心为圆心,分别向外画直径为 500 mm, 1 000 mm 与 1 500 mm 的圆,用 Photoshop 分别统计与计算树根的平面投影在这三个范围内的面积占比
	直径 1 000 mm 范围内的树根平面投影面积占比 R_{1000}	
	直径 1 500 mm 范围内的树根平面投影面积占比 R_{1500}	
	水平根垂直投影面积占比 R_h	
	斜出根垂直投影面积占比 R_o	
	垂下根垂直投影面积占比 R_d	选取最能完整表达树根结构的角度的,分别以树根基底中心为圆心,以水平面为垂直面向外画直径为 1 500 mm 的半圆,以 30° 为一个扇区分别划分出两个水平根扇区、两个斜出根扇区与两个垂下根扇区,用 Photoshop 分别统计与计算水平根、斜出根与垂下根在各自范围内的面积占比

2.2 14 种树种根系结构对比

不同树种根系指标均值统计结果如图 6 所示,在不同根系结构指标上各树种表现出不同的排序差异。在根重 M_r 上(图 6a),细叶青冈最重,其次为水紫树和北美枫香,最轻的是东方杉;在根幅 S_r 上(图 6a),细叶青冈、水紫树明显大于其他树种,最小的是北美枫香;

2 结果与分析

2.1 14 种树种拉力荷载对比

静态拉力荷载实验结果如图 5 所示,图中箱型图点划线代表中位数,横线和方形小白点代表平均值。

F 代表树干不同倾斜角度下,拉力传感读数。 F_{max} 为拉力传感读数最大值,代表了根系锚固力大小。 F_{max} 反映树种的临界荷载和根系锚固力,由大到小的排名为:细叶青冈 > 水紫树 > 三角枫 > 天竺桂 > 北美枫香 > 枫香 > 日本黄栌 > 豆梨 > 女贞 > 榉树 > 纳塔栎 > 乌柏 > 南京椴 > 东方杉。 F_{max} 同样反映了不同树种根系对拉力荷载的敏感度,在拉力作用距离相同时,拉力越小,说明树种对拉力作用越敏感,越容易受风害。从箱体位置看,多数树种箱体位置居中或偏上,中位数大于平均值,箱型图检验可知数据无离群值。

水紫树根深最深,为 1.06m,与最浅的豆梨差别达到 0.675 m(图 6b);地径 D_g 纳塔栎最大,东方杉地径最小(图 6b);根直径对比中(图 6c),水紫树各级根直径均大于其他树种,而东方杉没有三级根,记为 0。

树根不同范围的水平投影面积占比对比如图 6d,细叶青冈的 R_{1500} 、 R_{1000} 、 R_{500} 均为最大值,而东方杉均为

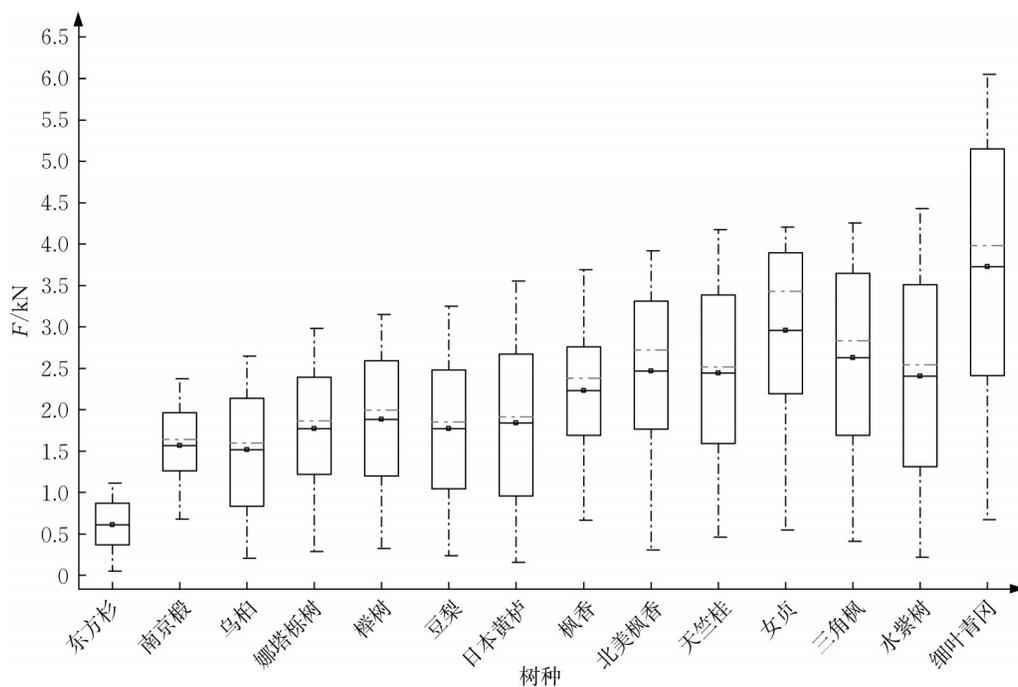


图5 14种树种根系锚固力比较

Fig. 5 Comparison of root anchorage force of 14 tree species

最小值。在树根垂直投影根数目中,细叶青冈的 N_h 和 N_o 最多, N_h 最少的是北美枫香, N_o 最少的是乌桕, N_d 最多的是纳塔栎,最少的是东方杉和女贞。垂直投影面积占比分析可知,细叶青冈、水紫树、南京椴占比较高,而东方杉、枫香和北美枫香占比较低。

2.3 根系结构与锚固力相关性分析

通过 Pearson 相关性分析可知(表 3),根系锚固力 F_{max} 与 M_r 、 D_g 、 S_r 、 N_h 、 N_o 和 N_d 、 R_{1500} 、 R_{1000} 、 R_{500} 、 R_h 、 R_o 等 11 项根系结构指标都具有显著的正相关性。比较 P 值排序发现根系密度中三项水平面投影面积占比指标(R_{1500} 、 R_{1000} 和 R_{500})与 F_{max} 相关性最高,其次是 M_r 和 N_h 。 D_g 与 N_d 在 0.05 水平相关性显著,而各级根直径和垂下根相关的两项指标(L_d 和 R_d)均未表现出显著相关性。且描述水平向结构参数的 P 值大于描述垂直投影结构指标的 P 值,说明水平向根系结构对锚固力具有更显著的影响。

将已有的根系结构参数与锚固力数据经过标准化处理后,进行逐步线性回归建模,筛选出 M_r 、 N_h 、 S_{1000} 构成最优模型见式(1),拟合优度 $R^2=0.771$,德宾-沃森值是 1.385,说明残差存在一定程度的正相关。F 值为 45.914, sig 为 0,认为该多元线性回归方程显著,可建立线性模型。残差统计表显示库克距离均小于 1,因此数据满足多元逐步回归分析的要求。

$$F_{max} = -3.620 + 0.699M_r + 0.589N_h + 0.356R_{500} \quad (1)$$

式中: F_{max} 为最大根系锚固力; M_r 为根系重量; N_h 为主

要水平根数目; R_{500} 为直径 500 mm 范围内根系水平投影面积占比,以上参数均需将测量数据标准化处理后代入。方差膨胀系数 VIF 均小于 10,可通过共线性诊断。

3 讨论

3.1 根系锚固力对园林树种抗风性的参考价值

本实验的 14 种树木根系锚固力测量结果有助于华东地区园林树种抗风性评价的后续研究和数据库的扩展,提高强抗风性园林树种选择的系统性和全面性。

研究中根系锚固力数据与先前相关研究的结论基本符合^[18-20]。在同类树种根系拉力比较中,枫香的根系抗拉特性处于中等水平^[18],榉树^[19]被多次验证风倒危险较高。在抗风倒性上,三角枫和女贞则是公认的优势树种^[21-22]。结合上海海湾国家森林公园的 2015 年风害树种记录(表 4),发现公园中树种倒伏率乌桕(8.49%)>女贞(7.85%)>枫香(2.83%),该排序高度符合实验中三种树种的锚固力排序,说明静态拉力实验结果与树木倒伏率具有一致性,因此树种的根系锚固力排序可作为城市园林树木配置的参考因素。结合城市不同区域立地条件、不同用地类型的功能与需求,适应性配置具有不同根系锚固力的树种是科学而合理的选择。例如,在城市风速更高的区域,树木具有更大的倒伏风险,可以选择枫香、北美枫香、细叶青冈等锚固力较强的树种,在风速较低、倒伏风险较低的区域,可以

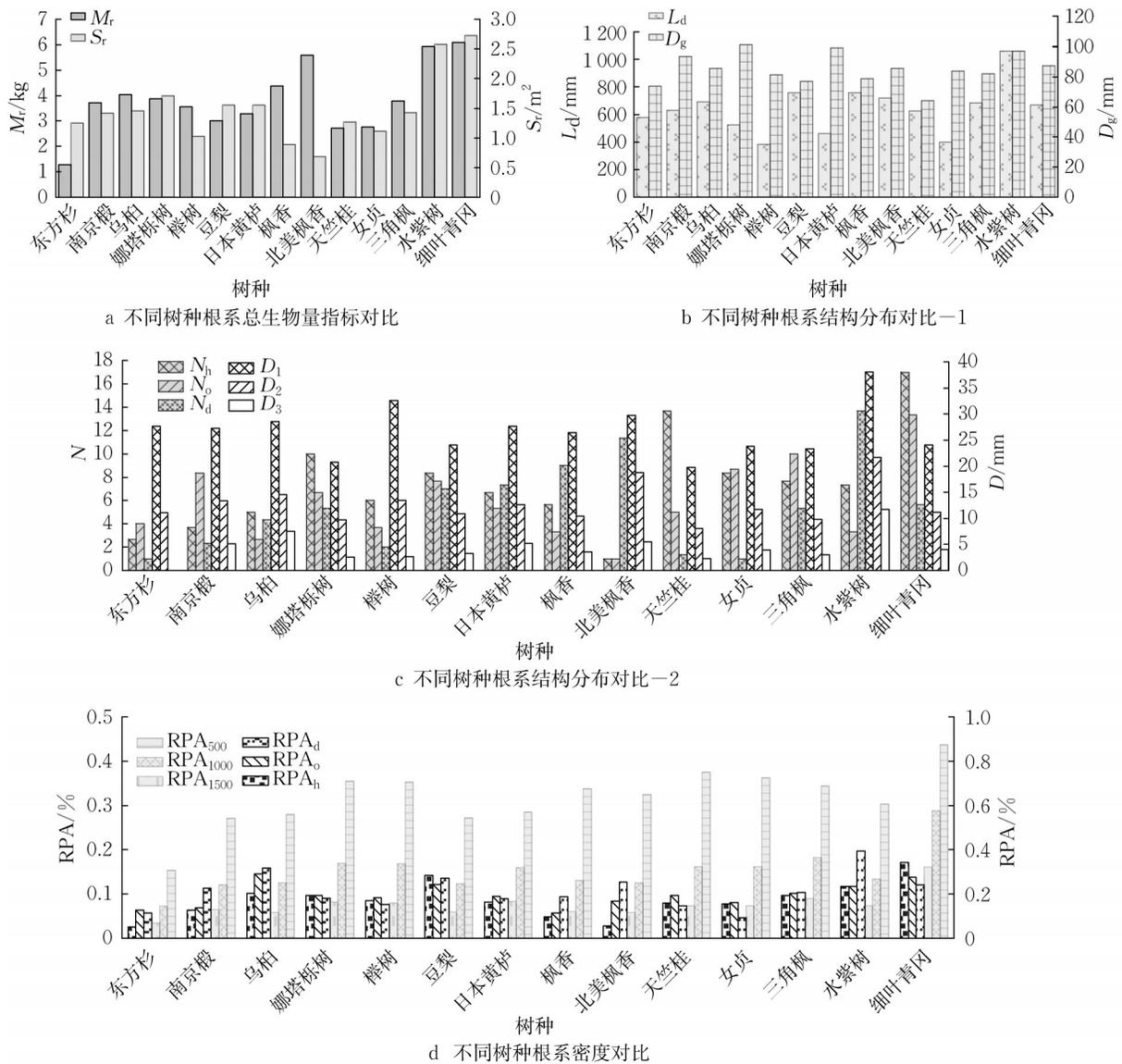


图 6 14 种树种 4 类根系结构参数对比

Fig. 6 Comparison of root architecture parameters of 14 tree species

配合乌柏、娜塔栎、东方杉等景观效果好但锚固力较弱的树种。

3.2 影响根系锚固力的形态结构因子

本研究探讨了 16 项根系形态参数与根系锚固力的相关性,有 11 项参数与锚固力相关性显著。相关结论也与同类研究一致^[23-29],说明结论可靠。分析发现根系在水平方向上的扩展对锚固力的影响大于根系在深度上的扩展。其一可能是因为横向根系更有助于构成根系支撑网络,与土壤更紧密地结合成根土复合体,提高根系锚固强度^[29];其二,与垂下根相比,水平根和斜出根受到更大的土壤作用的粘聚力和压力(图 7)。本实验中树木发生倾斜时连带着翘起的多是水平根与斜出根固着的表层土壤,分析树干倒下时的受力可知,垂下根以树干底部为圆心,向两侧旋转,土壤的质量施加

到垂下根上的少,根系更多受到土壤摩擦力的影响,与根系本身的结构没有较大关联。而水平根和斜出根受到土壤施加的压力和粘聚力,起到更为显著的锚固作用。因此,水平方向上根土复合结构水平根数量越多、密度越大、根幅越广,越有助于扩大根土板的体积和整体重量,提供更多抗树木倾覆的受力点,从而增强整体根系的锚固力。

关于各级根直径与锚固力无显著相关的问题,有两方面的原因。一方面是因为根系一般通过和土壤作用形成根土复合体实现锚固作用,而对根土板的体积和重量起决定作用为根重、根幅、根深、根系密度等指标,它们与锚固力的高显著相关也都体现了这点(表 3)。相对于这些指标,根系直径对根土板体积、根系和土壤的粘聚力作用都明显更为有限。

表 3 根系指标与锚固力 Pearson 相关性分析结果
Tab. 3 Pearson correlation analysis between root index and anchorage force

指标大类	具体指标	与 F_{max} 的相关性指数	Pearson 相关性指数排序
根系总生物量	M_r	0.709**	4
	D_g	0.345*	11
根系结构分布	S_r	0.489**	7
	L_d	0.236	
	N_h	0.701**	5
	N_o	0.514**	6
	N_d	0.362*	10
根系直径	D_1	0.022	
	D_2	0.159	
	D_3	0.252	
根系密度	R_{1500}	0.789**	1
	R_{1000}	0.775**	2
	R_{500}	0.744**	3
	R_h	0.452**	8
	R_o	0.414**	9
	R_d	0.258	

注：“*”表示在 0.05 水平相关性显著，“**”表示在 0.01 水平相关性显著

表 4 2015 年上海海湾国家森林公园部分常用树种风倒情况

Tab. 4 Wind fall of some commonly tree species in Shanghai Gulf National Forest Park in 2015

树种	拉丁名	总数	倒伏	倒伏率
栎树	<i>Koelreuteria paniculata</i>	22 900	95	0.004 1
侧柏	<i>Platycladus orientalis</i>	25 798	357	0.013 8
马褂木	<i>Liriodendron chinense</i>	1 443	26	0.018 0
香樟	<i>Cinnamomum camphora</i>	35 229	851	0.024 2
枫香	<i>Liquidambar formosana</i>	814	23	0.028 3
无患子	<i>Sapindus saponaria</i>	6 792	265	0.039 0
美国皂荚	<i>Gleditsia triacanthos</i>	6 241	319	0.051 1
光皮树	<i>Cornus wilsoniana</i>	6 851	352	0.051 4
臭椿	<i>Ailanthus altissima</i>	1 380	187	0.135 5
黄连木	<i>Pistacia chinensis</i>	6 379	408	0.064 0
重阳木	<i>Bischofia polycarpa</i>	6 259	419	0.066 9
女贞	<i>Ligustrum lucidum</i>	7 183	564	0.078 5
乌桕	<i>Triadica sebifera</i>	8 093	687	0.084 9
珊瑚朴	<i>Celtis julianae</i>	3 126	346	0.110 7
水杉	<i>Metasequoia glyptostroboides</i>	121	14	0.115 7

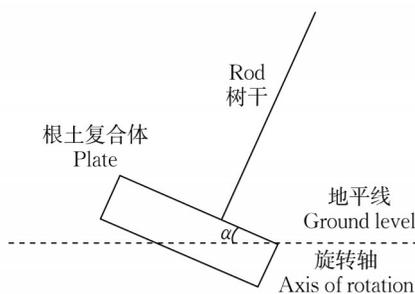


图 7 树木倾斜与根土复合体结构示意图
Fig. 7 Structure of tree slope and root-soil complex

另一方面是在本实验中施加的拉力通常没有使根系结构达到受力极限而发生大量断裂,而现有研究与直径显著相关的是根系发生断裂时的根系极限抗拉力^[30],而非本研究关注的根土板整体的锚固力。

由于实验条件精细度不足等原因,本文主要针对具有结构意义的根系展开探讨,未涉及毛细根对根系锚固作用的影响。已有研究表明完全挖根法中毛细根损失率可能达到 20%~40%^[31],这部分损失的毛细根可能导致树根质量 M_r 和根系密度指标 (R_{500} 、 R_{1000} 、 R_{1500} 、 R_h 、 R_o 、 R_d) 数据偏小,削弱以上指标对根系锚固力影响的显著性,但并不改变基本判断。而毛细根对根系锚固力影响的机理和程度则希望未来有更精准的实验方法和仪器对该领域加以补充和完善。

3.3 不足与展望

由于研究条件和客观因素限制,本研究尚存在一些有待进一步研究和完善的地方:

(1) 城市园林树种生长环境的局限,实际应用中城市园林树木的锚固力可能小于树种自然生长条件下的根系锚固力^[20],因而倒伏率也要高于树木在自然状态下的倒伏率。复杂的小气候环境(阵风的逐步胁迫)^[32]、有限的树池空间、土壤理化性状等限制了树木根系的正常生长,削弱了根系固着土壤增加根土板质量的能力,从而导致其抗倒伏性降低。因此需要结合城市园林树木生长的特殊性展开进一步研究,加强根系锚固力研究与实际应用的联系,提高研究成果落地实践的可靠性。

(2) 台风天气往往在风胁迫条件下伴随强降水,而本实验条件不足以对所有树种开展降水模拟下的静态拉力实验。为了验证土壤含水量对根系锚固力是否有影响,本研究结合实际条件,在相同试验地,选择了相同规格的 2 棵北美枫香和 3 棵纳塔栎两种根系结构差异较大的树种,进行 4 h 的间歇浇灌实验(连续浇灌 0.5 h,停止 0.5 h,让土壤水分充分下渗),模拟强降水天气下含水量接近饱和的土壤环境,浇灌后立即进行拉力实验。在土壤含水量近饱和状态下,北美枫香平均锚固力为 2.19 kN,纳塔栎平均根系锚固力为 2.26 kN,与常态下根系锚固力对比可知,北美枫香锚固力下降了 44.13%,纳塔栎下降了 24.16%。依据试验结果推测强降水可能会对根系锚固力产生减弱作用,且不同的根系结构所受到的影响程度也有所不同。受制于客观条件,样本量有限,台风时土壤含水量对树木根系锚固作用的影响及其量化关系值得更进一步的实验加以探究。

4 结论

本文探究了14种上海常见园林树种的根系锚固力,结合根系形态结构参数,借助统计学方法探究树木根系结构与锚固力的量化关系,得到如下结论:

(1)14种树种根系锚固力排序为:细叶青冈>水紫树>三角枫>天竺桂>北美枫香>枫香>日本黄栌>豆梨>女贞>榉树>纳塔栎>乌桕>南京椴>东方杉,根系锚固力反映了树木在台风天气下树木的抗倒伏能力,因此该排序可以作为园林树木抗性评价的参考。

(2)通过相关性分析发现,16个根系结构指标中11项与根系锚固力呈显著正相关。其中, R_{1500} 、 R_{1000} 、 R_{500} 等三项根系密度指标以及 M_r 和 N_h 与锚固力的相关性更强,说明在一定风速条件下,树木水平投影的根系密度、根重、根幅对树木根系锚固力具有重要影响。即,根系水平向分布密度越高、根系水平向扩展越多,根系越重,根系锚固力越强。相关性排序发现,水平投影的根系密度指标的P值大于垂直向投影的密度指标的P值,根系在水平方向上的扩展对锚固力的影响大于根系在深度上的扩展。

(3)多元逐步回归分析得到 M_r 、 N_h 和 R_{500} 与 F_{max} 的回归模型为: $F_{max} = -3.620 + 0.699M_r + 0.589N_h + 0.356R_{500}$ 。可以说明 M_r 、 N_h 和 R_{500} 这三项是最能代表根系锚固力的指标。该结果与相关性分析结果基本符合,根系水平根数量越多,水平投影面积占比越大,根重越重,则根系锚固力越强。

作者贡献声明:

张德顺:实验设计。

陈一家:论文研究与核心实验。

张振:参与核心实验与研究讨论。

奉树成:指导灌水实验。

王本耀:参加锚固力测定。

陈莹莹:论文初稿撰写与修改校对。

参考文献:

- [1] 刘敏,王军,殷杰,等.上海城市安全与综合防灾系统研究[J].上海城市规划,2016(1):1.
LIU Min, WANG Jun, YIN Jie, et al. Study on the urban safety and comprehensive disaster prevention in Shanghai [J]. Shanghai Urban Planning Review, 2016(1):1.
- [2] 石婷婷.从综合防灾到韧性城市:新常态下上海城市安全的战略构想[J].上海城市规划,2016(1):13.
SHI Tingting. From comprehensive defense to resilient cities: strategic conception of shanghai's city security in the new normal [J]. Shanghai Urban Planning Review, 2016(1):13.
- [3] 张厚江.城市树木生长质量的检测[J].林业科学,2005(6):201.
ZHANG Houjiang. Inspection of growth quality for urban trees [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2005(6):201.
- [4] 张德顺,刘鸣,姚驰远,等.气候变化背景下滨海地区园林树种抗风性研究进展[J].风景园林,2021,28(11):68.
ZHANG Deshun, LIU Ming, YAO Chiyuan, et al. Research advances of wind resistance of landscape tree species in coastal areas under climate change. [J]. Landscape Architecture, 2021, 28(11):68.
- [5] 付江涛,李光莹,虎啸天,等.植物固土护坡效应的研究现状及发展趋势[J].工程地质学报,2014,22(6):1135.
FU Jiangtao, LI Guangying, HU Xiaotian, et al. Research status and development tendency of vegetation effects to soil reinforcement and slope stabilization [J]. Journal of Engineering Geology, 2014, 22(6):1135.
- [6] TSEN-TIENG D L, RAHARDJO H, CHOON L E, et al. Anchorage and stability of tree root - soil plates[J]. Environmental Geotechnics, 2018, 7(5): 330.
- [7] TANAKA N, SAMARAKOON M B, YAGISAWA J. Effects of root architecture, physical tree characteristics, and soil shear strength on maximum resistive bending moment for overturning *Salix babylonica* and *Juglans ailanthifolia* [J]. Landscape and Ecological Engineering, 2012, 8(1):69.
- [8] KAMIMURA K, KITAGAWA K, SAITO S, et al. Root anchorage of hinoki (*Chamaecyparis obtuse* (Sieb. Et Zucc.) Endl.) under the combined loading of wind and rapidly supplied water on soil: Analyses based on tree-pulling experiments [J]. European Journal of Forest Research, 2012, 131(1): 219.
- [9] NICOLL B C, RAY D. Adaptive growth of tree root systems in response to wind action and site conditions[J]. Tree Physiology, 1996, 16(11): 891.
- [10] DANJON F, FOURCAUD T, BERT D. Root architecture and wind-firmness of mature *Pinus pinaster* [J]. New Phytologist, 2005, 168(2): 387.
- [11] LEE J T, YEN L Z, LEE M J. Wind affects the growth, root anchorage and tensile strength of Australian pine (*Casuarina equisetifolia*) seedlings[J]. Journal of Forest Research, 2019, 24(4): 219.
- [12] MONTAGNOLI A, TERZAGHI M, CHIATANTE D, et al. Ongoing modifications to root system architecture of *Pinus ponderosa* growing on a sloped site revealed by tree-ring analysis [J]. Dendrochronologia, 2019, 58: 125650.
- [13] 蒋静,张超波,张雪彪,等.土壤水分对植物根系固土力学性能的影响综述[J].中国农学通报,2015,31(11):253.
JIANG Jing, ZHANG Chaobo, ZHANG Xuebiao, et al. Review on the effects of soil moisture on mechanical properties of soil reinforcement by plant roots [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2015, 31(11):253.
- [14] YANG M, DÉFOSSEZ P, DANJON F, et al. Analyzing key factors of roots and soil contributing to tree anchorage of *Pinus* species[J]. Trees, 2018, 32(3): 703.
- [15] 韩玥枫.论上海城市林荫道建设中的行道树种选择[J].中

- 国园林,2019(S2):80.
- HAN Yuefeng. On the selection of tree species in the construction of urban boulevard in Shanghai [J]. Chinese Landscape Architecture,2019(S2):80.
- [16] 张德顺,刘鸣.基于“植物功能性状-生态系统服务”评价框架的园林树种选择方法——以上海为例[J].中国园林,2020,36(2):106. ZHANG Deshun, LIU Ming. A “plant functional traits-ecosystem services” approach for the selection of landscape trees: A case study in Shanghai [J]. Chinese Landscape Architecture,2020,36(2):106.
- [17] 李子敬,陈晓,舒健骅,等.树木根系分布与结构研究方法综述[J].世界林业研究,2015,28(3):13. LI Zijing, CHEN Xiao, SHU Jianhua, *et al.* Research methods for tree root system distribution and structure: A review[J]. World Forestry Research,2015,28(3):13.
- [18] 李贺鹏,岳春雷,陈友吾,等.浙南山区6种优势乔木植物根系的力学特性研究[J].浙江林业科技,2010,30(3):6. LI Hepeng, YUE Chunlei, CHEN Youwu, *et al.* Mechanical properties of root systems of six dominant tree species in mountainous area of the southern Zhejiang[J]. Journal of Zhejiang Forestry Science and Technology,2010,30(3):6.
- [19] 张德顺,李科科,李玲璐,等.上海滨海地区25种园林树种的抗风性研究[J].北京林业大学学报,2020,42(7):122. ZHANG Deshun, LI Keke, LI Linglu, *et al.* Wind resistance of 25 landscape tree species in coastal area of Shanghai[J]. Journal of Beijing Forestry University,2020,42(7):122.
- [20] 王玉岱,朱爱萍,陈建华,等.台风对泰安市绿化树木危害情况调查[J].山东林业科技,1998(3):46. WANG Yudai, ZHU Aiping, CHEN Jianhua, *et al.* Investigation of typhoon damage to Tai'an green trees[J]. Journal of Shandong Forestry Science and Technology,1998(3):46.
- [21] 杨东,万福绪,顾汤华,等.上海海岸防护林造林树种的选择[J].南京林业大学学报(自然科学版),2012,36(2):95. YANG Dong, WAN Fuxu, GU Tanghua, *et al.* Study on the selection of afforestation species for coastalprotective in Shanghai city[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Science Edition),2012,36(2):95.
- [22] 陈波,江俊浩.杭州城市园林绿化树种的选择[J].浙江农业科学,2011(5):1042. CHEN Bo,JIANG Junhao. The choice of tree species for urban landscape greening in Hangzhou [J]. Journal of Zhejiang Agricultural Sciences,2011(5):1042.
- [23] LIU Y, JIA Z, GU L, *et al.* Vertical and lateral uprooting resistance of *Salix matsudana* Koidz in a riparian area [J]. The Forestry Chronicle, 2013, 89(2): 162.
- [24] DANQUECHIN DORVAL A, MEREDIEU C, DANJON F. Anchorage failure of young trees in sandy soils is prevented by a rigid central part of the root system with various designs[J]. Annals of Botany, 2016, 118(4): 747.
- [25] TANIKAWA T, IKENO H, TODO C, *et al.* A quantitative evaluation of soil mass held by tree roots[J]. Trees, 2021, 35: 527.
- [26] KRIŠĀNS O, SAMARIKS V, DONIS J, *et al.* Structural Root-plate characteristics of wind-thrown Norway spruce in hemiboreal forests of Latvia[J]. Forests, 2020, 11(11): 1143.
- [27] ZHANG X, KNAPPETT J A, LEUNG A K, *et al.* Small-scale modelling of root-soil interaction of trees under lateral loads[J]. Plant and Soil, 2020, 456: 289.
- [28] ZANETTI C, VENNETIER M, MÉRIAUX P, *et al.* Plasticity of tree root system structure in contrasting soil materials and environmental conditions[J]. Plant and soil, 2015, 387: 21.
- [29] YANG M, DÉFOSSEZ P, DANJON F, *et al.* Tree stability under wind: simulating uprooting with root breakage using a finite element method[J]. Annals of Botany, 2014, 114(4): 695.
- [30] 左志严,格日乐,乌仁图雅,等.内蒙古中西部3种乡土植物根系抗拉力学特性的对比研究[J].水土保持通报,2015,35(2):52. ZUO Zhiyan, GE Rile, WU Rentuya, *et al.* Root tensile mechanism comparison of three aboriginal plants in central-western inner Mongolia area [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2015, 35(2): 52.
- [31] JUDD L A, JACKSON B E, FONTENO W C. Advancements in root growth measurement technologies and observation capabilities for container-grown plants[J]. Plants, 2015, 4(3): 369.
- [32] YANG M, DEFOSSEZ P, DUPONT S. A root-to-foliage tree dynamic model for gusty winds during windstorm conditions[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2020, 287: 107949.