

台风背景下基于计算流体力学数值模拟的 上海市街道风环境评估

张德顺, 曾明璇, 陈莹莹, 张 振, 姚鳗卿

(同济大学 高密度人居环境生态与节能教育部重点实验室, 上海 200092)

摘要: 以上海市徐汇区为建成区代表, 以金山区为市郊滨海区代表, 从行道树视角出发, 通过分析气象数据, 以台风高发时期的最大风速和最多风向为基础数据, 输入计算流体力学 (computational fluid dynamics, CFD) 进行研究区域的风环境模拟, 从风速等级、街道走向与道路绿化结构出发分别评价街道“风-树”生态, 得到研究区域的风环境评价结果。

关键词: 行道树; 计算流体力学; 风环境评价; 优化策略
中图分类号: S732 **文献标志码:** A

Evaluation of Street Wind Environment in Shanghai Based on Computational Fluid Dynamics Numerical Simulation Under Typhoon Background

ZHANG Deshun, ZENG Mingxuan, CHEN Yingying,
ZHANG Zhen, YAO Manqing

(Key Laboratory of Ecology and Energy-Saving of Dense Habitats of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: This paper, using Xuhui District of Shanghai as a representative of urban areas and Jinshan District as a representative of suburban coastal areas, analyzed meteorological data from the perspective of street trees, focusing on the maximum wind speed and direction during periods of high typhoon frequency. Then, it inputted these basic data into CFD (computational fluid dynamics) simulations to model the wind environment of the study area. Afterwards, it evaluated the “wind-tree” ecology of the streets based on wind speed grades, street orientation, and the road greening structure. Finally, it obtained the comprehensive evaluation results of the wind

environment in the targeted areas.

Keywords: street trees; computational fluid dynamics; wind environment assessment; optimization strategy

近 30 年来, 台风发生的数量、能级均在不断增加, 风灾已成为城市绿化的重大危害之一^[1]。在自然灾害与社会、经济、环境脆弱性相耦合的背景下, 台风不仅会影响城市生态系统综合功能的发挥, 还严重威胁到人们的日常生活与居住环境^[2]。街道空间不仅承载着城市交通功能, 还是通风廊道及居民户外活动的基本场所。提升街道的防风避灾功能是维系城市生态安全和绿地健康的重要组成部分。

上海是强风频发的区域之一^[3], 夏季产生的西太平洋台风会带来强烈的风暴潮灾害。城市街道的风环境在极端大风条件下, 与两侧建筑构成风洞效应或狭管效应, 由其产生的局部强风会对居民出行和活动安全造成较大影响^[4]。行道树作为城市中的绿色基础建筑能够有效改善街道风环境, 具有减缓风速、形成通风廊道的作用^[5]。然而行道树在抵御台风的同时, 也承受了巨大风荷载, 经受着较高的灾害风险^[6]。本文以行道树为研究对象, 分别模拟建成区与沿海郊区的街道风环境, 通过量化综合评价, 提出因地制宜的调控对策。

1 研究对象与方法

1.1 研究对象

上海地处东部沿海, 属于亚热带季风气候, 每年 3—8 月盛行东南偏东风, 9—10 月盛行东北风, 11

收稿日期: 2023-05-29

基金项目: 国家自然科学基金(32071824); 同济大学研究生教材建设项目(2024JC07); 同济大学中央高校基本科研业务费专项资金(22120240668)

第一作者: 张德顺, 教授, 博士生导师, 理学博士, 主要研究方向为园林植物与风景园林规划设计。

E-mail: zds@tongji.edu.cn

通信作者: 姚鳗卿, 博士生, 主要研究方向为园林植物应用。E-mail: manqingyao@163.com



论文
拓展
介绍

月一次年 2 月盛行西北偏北风, 是台风高发地区。从时间上看, 台风对上海的影响多集中在每年 7—8 月^[7-9]。平均最大风速出现的位置与影响上海的台风类型有关, 中心位置决定了大风的风向^[10-11]。由于城市下垫面类型的不同, 台风影响时城市各处的实际风速受粗糙度交互作用而表现出差异性^[12]。分别以徐汇区为建成区代表、金山区为市郊滨海区代表研究城郊风环境的差异。

1.1.1 上海市域风环境概况

将上海市 1986—2015 年 11 个气象站的气象数据进行分类, 对每个气象站的月平均风速求平均值, 输入 ArcGIS 软件进行克里金差值分析, 结果见图 1。从平均风速上看(图 2), 因下垫面粗糙度不同, 市区风速明显小于郊区。风速的低值中心位于市中心, 距离市中心越远风速越大, 以金山和崇明风速最大, 崇明岛最大风速达 $3.25 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

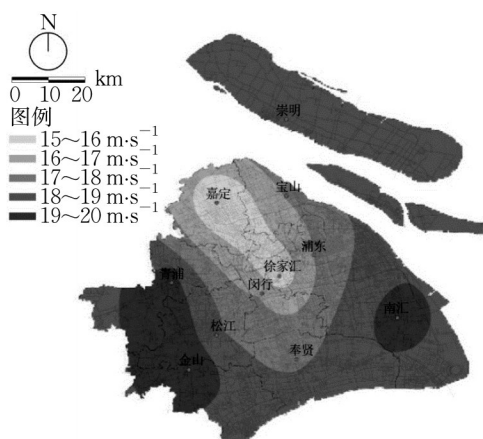


图 1 上海市月最大风速分布图(1986—2015 年)

Fig.1 Monthly maximum wind speed distribution map in Shanghai (1986-2015)

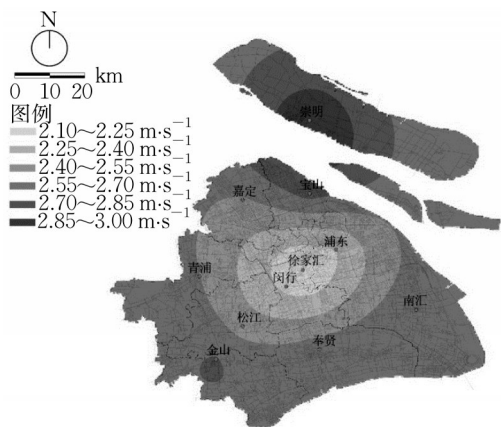


图 2 上海市月平均风速分布图(1986—2015 年)

Fig.2 Monthly average wind speed distribution map in Shanghai(1986-2015)

1.1.2 建成区风环境

将徐家汇气象站 1986—2015 年各风向频率和平均风速制成风玫瑰图(图 3), 该区域盛行风为东风(E), 平均风速为 $1.9 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 静风频率 19%。该区域历史月最大风速($15.0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)出现在 1997 年 8 月, 最高风速风向来自东南(SE), 其风向与登陆台风对上海影响时的特征相符合。根据历史记录, 极端最高风速和阵风都是由台风引起的, 其中 1997 年 8 月的 9711 号台风是徐家汇气象站历史最大月风速记录。将 8 月气象数据制成风玫瑰图(图 4), 8 月盛行风为东风(SE)、东南风(SE), 静风频率 20%。其中平均最高风速为 $11.1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 风向为东南(SE)。

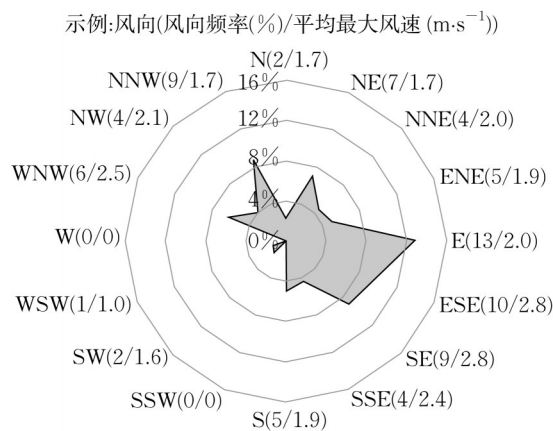


图 3 徐家汇近 20 年风玫瑰图(1986—2015 年)

Fig.3 Wind rose map for Xujiahui Meteorological Station over a 20-year period(1986-2015)

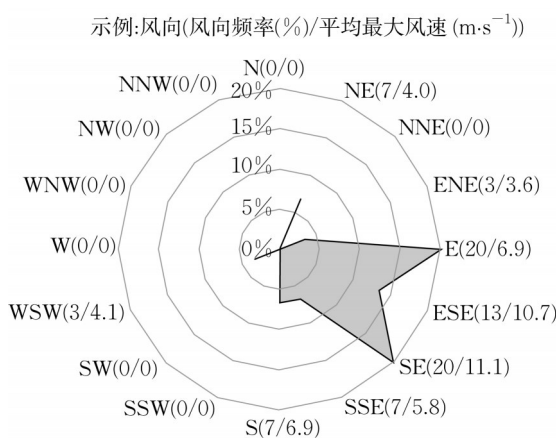


图 4 徐家汇气象站 8 月风玫瑰图(1986—2015 年)

Fig.4 Monthly wind rose map for Xujiahui Meteorological Station in August(1986-2015)

1.1.3 市郊滨海区风环境

选择金山区作为市郊滨海区代表, 将 1986—2015 年各风向频率和平均风速制成风玫瑰图(图

5),盛行风为东南风(SE),平均风速为 $3.0\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,静风频率1%。历史月最大风速($20.7\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)出现在1986年8月,最大风速的风向为东南(SE),其风向与登陆台风对上海影响时的特征相符合。国家气象台台风目录显示,1986年8月22日的8616号台风是历史月最大风速记录。

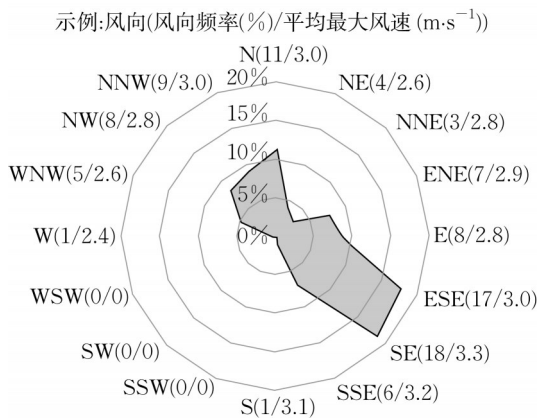


图5 金山气象站近20年风玫瑰图(1986—2015年)
Fig. 5 Wind roses for Kam Shan Weather Station over a 20-year period (1986-2015)

将8月气候数据制成风玫瑰图(图6),8月盛行风为东风(SE),静风频率0%,平均最大风速为 $14.0\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,风向为东南(SE)。

1.2 研究样地

建成区选择徐汇区的内环高架路与沪闵高架路交叉口西北角的商务区与住宅区,其轴测图如图7所示。区域范围沿街建筑形式多样,有建材市场、低层商铺、中高层住宅、高层商务楼。街道的宽度与等级也不同,区域内共有11条道路,类型多样,宽度包含宽阔的双向四车道、适中的双向两车道以及较为狭窄的单向单车道;普遍采用常见的一板两带模式,

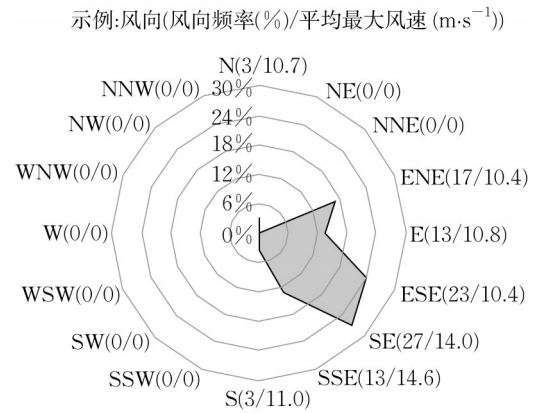


图6 金山气象站8月风玫瑰图(1986—2015年)
Fig. 6 Monthly wind rose map for Kam Shan Weather Station in August (1986-2015)



图7 建成区的路网结构与轴测图
Fig. 7 Road network structure and axonometric map of the study area in central urban area

即一条行车道,两边各设置一条绿化带,人行道近行车道一侧对称布置行道树(表1)。

表1 建成区的道路绿化布置模式及行道树种类

Tab. 1 Layout pattern of street greening and street tree species downtown

序号	道路名称	道路类型	道路绿化布置模式	行道树种
1	凯旋路	双向两车道	一板两带式	二球悬铃木(<i>Platanus acerifolia</i>)
2	蒲汇塘路	双向两车道	一板两带式	二球悬铃木
3	南丹路	双向四车道	一板两带式	二球悬铃木
4	古宜路	双向两车道	一板两带式	复羽叶栎树(<i>Koelreuteria bipinnata</i>)
5	凯进路	单向单车道	一板两带式	楸树(<i>Catalpa bugei</i>)
6	裕德路	双向两车道	一板两带式	无
7	徐虹中路	双向两车道	一板两带式	二球悬铃木
8	宜山路	双向两车道	一板两带式	复羽叶栎树
9	文定路	双向两车道	一板两带式	榉树(<i>Zelkova serrata</i>)
10	汇站街	单向单车道	一板两带式	无
11	中漕路	双向两车道	一板两带式	无
12	徐虹路	单向单车道	一板两带式	无

市郊滨海区选择金山区的临海杭州湾大道两侧的住宅区,其轴测图如图8所示。区域内沿街建筑布局以低层住宅为主,少量高层住宅,由于区域内有部分未开发地及铁轨沿线控制区域,出现无沿街建筑的路段。街道的宽度与等级也不同,共有8条道路,类型相对单一,普遍为双向四车道并且设有足够空间的非机动车道以及人行道;道路绿化布置模式丰富,除一板两带式外,还较多运用三板四带式与四板五带式,布置多条车行道与绿化带(表2)。

1.3 研究方法

分析各站点近30年间的气象数据得出总体风环境特征,对徐汇区和金山区主要街道运用ArcGIS和Sketch UP软件进行矫正和建模,导入FLUENT软件对街道风场进行CFD数值模拟,采用湍流模型中的标准 $k-\epsilon$ 函数,迭代2000次,进行空间模拟。

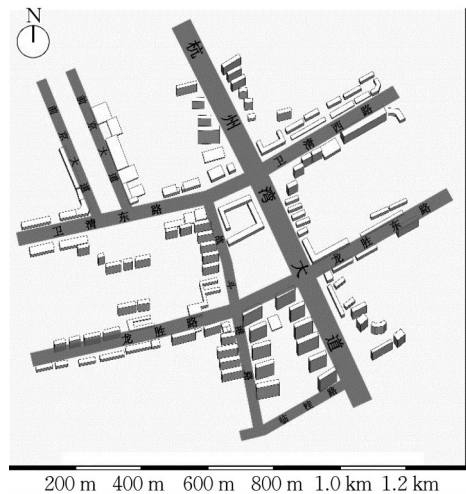


图8 市郊滨海区的路网结构与轴测图

Fig. 8 Road network structure and axonometric map of suburban coastal area

表2 市郊滨海区的道路绿化布置模式及行道树种类

Tab. 2 Layout pattern of street greening and street tree species in suburban coastal area

序号	道路名称	道路类型	道路绿地布置模式	行道树种
1	杭州湾大道	双向四车道	四板五带式	榉树
2	卫清东路	双向四车道	三板四带式	香樟(<i>Cinnamomum camphora</i>)
3	卫清西路	双向四车道	三板四带式	纳塔栎(<i>Quercus nuttallii</i>)
4	龙胜路	双向四车道	一板两带式	香樟
5	龙胜东路	双向四车道	三板四带式	香樟
6	战斗港路	双向两车道	一板两带式	香樟
7	前京大道	双向四车道	四板五带式	香樟、榉树、复羽叶栎树、银杏(<i>Ginkgo biloba</i>)
8	临桂路	双向四车道	一板两带式	香樟

1.3.1 计算域与计算网络设置

以区域的近地风环境为模拟对象,据场地特征参考以往计算域的设置经验^[13],以街区内最高建筑物高度 H 作为基准,设置入流边界与首排建筑距离、出流边界与末排建筑距离、计算域高度均为 $3H$ 。两个区域建模范围的尺度相近,计算域尺度同为 $1.6\text{ km}\times 1.6\text{ km}\times 0.3\text{ km}$ 。

将街区模型导入ANSYS软件中的ICEM CFD界面,由于求解域的边界形状不规则,采用非结构化网格技术,划分单元为四面体网格(Tetra)。而非结构化网格不受求解域形态限制,能够主动改变网格密度以适应各类流场特征,在大型城市环境模拟时表现出高度的符合性,并能确保运算结果与真实环境的匹配。建成区的计算域网格数共计6802836个,市郊滨海区的计算域网格数共计945544个。

1.3.2 边界条件设定

设置气流入口边界为速度入口边界(velocity inlet),下垫面粗糙度为C类, $\alpha=0.22$ ^[14]。粗糙下垫面引起风阻作用使近地风向风速降低,呈由高到低

递减的梯度特征。任意高度的风速可以用以下方程计算:

$$u=u_0(z/z_0)^\alpha$$

式中: u 为距地面 z 高度处的风速, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$; u_0 为参考高度处的风速; z_0 为气象站风速测点高度,一般取10m。

根据徐汇区和金山区8月平均最大风速数据设置风参数,建成区设置初始10m高度风速 $11\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,初始风向东南风(SE);市郊滨海区设置初始10m高度风速 $14\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,初始风向东南风(SE)。

出口边界设为自由出流(outflow),假设出流面上气流已经恢复为正常无阻流动。建筑物表面与地面在模拟中固定不动,因此设置为无滑移的壁面条件(no slip wall)。

2 结果与分析

行道树在台风侵袭时承担了极端大风的严重威胁,因此截取理想行道树风心高度(13m)处的风速

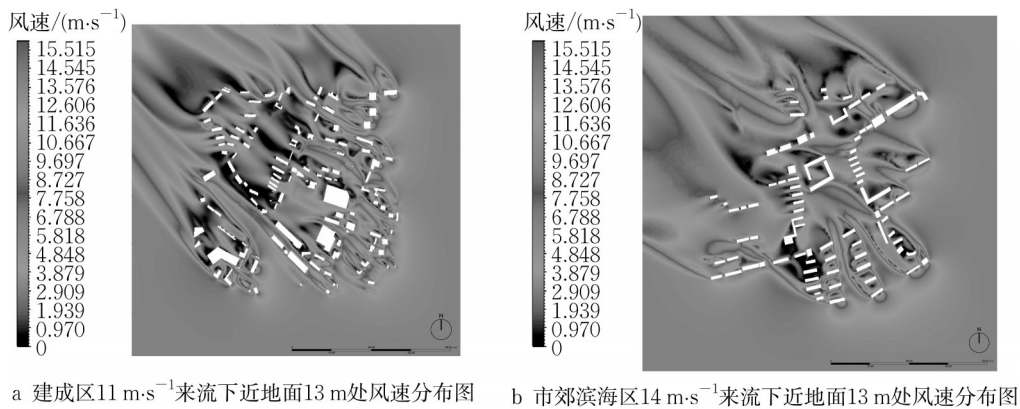


图9 研究区域近地面 13 m 风速分布

Fig. 9 Wind speed distribution 13 m above ground

云图分析街道风环境的基底数据。从图9可以看出,模拟区域的街道风速强烈依赖街道走向。

顺风走向的街道,当风向与道路走向所成夹角小于 15° 时,风阻力效应最小,沿街建筑形成利流通道,风速最大;当夹角在 $15^\circ\sim 45^\circ$ 范围时,风进入街道会受到一定阻力,但其走向仍允许模拟风的通过。在频繁遭遇台风或极端大风区域,尽量减少平行于极大风速风向的道路设置,控制单条走向与极大风速风向夹角不超过 15° 的道路长度,从而有效降低风速,避免形成威胁区域安全的贯穿型高速风通道。

垂直于风向的街道,当风向与道路走向所成夹角大于 45° 时,其沿街建筑的迎风面对风的阻尼作用逐渐加强,风难以进入街道,街道内风速被极大降低。在台风频发区域虽不建议设置过多顺风向街道,但若过多布置侧面迎风的街道,将增大街道两侧建筑的防风要求。可以在垂直于风向的走向设置个别对风环境要求较高的道路,尽量减少夹角在 15° 以内的顺风向街道,合理布局夹角 $15^\circ\sim 45^\circ$ 的街道。

2.1 道路风速评价

本研究尝试以 $4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 为增量区间将模拟结果的风速进行等级划分,风速等级从低至高表示行道树在此等级风速下受损害的可能性从小至大,建成区与市郊滨海区的风速等级划分结果(图10)可以清晰地表现出模拟结果的风速分布特征。再通过ArcGIS软件中对街道的风速等级进行量化。在街区模型中插入风速分布图进行地理配准和栅格图片矢量化,以道路交叉口为划分依据,每两个交叉口之间的道路为一条路段,统计每一条路段的中心线与各等级风速的重合路段长度,路段长度占比最高的风速等级为此路段的风速等级。建成区模拟区域与市郊滨海区模拟区域道路风速等级均可被划分为从

高到低A、B、C、D 4个等级。

统计建成区与市郊滨海区4个风速等级的路段长度占比,两个街区风速等级为A与B的路段长度占比组成相近,但风速等级为C与D的路段长度占比组成具有较明显的差异:建成区中风速等级为D的路段长度占比(14%)与风速等级为C的占比(15%)几乎相同,而市郊滨海区中风速等级为D的路段长度占比(8%)整体较少,风速等级为C的路段长度占比(23%)与风速等级为B的占比(21%)几乎相同。整体来看,建成区危险风速路段占比高于市郊滨海区。

街道行道树在极端大风天气下常常是最先受到冲击的,本研究根据街道与模拟风向的夹角,将风致行道树的破坏力分为4类,建立路段走向的风破坏力评价标准(表3),其中模拟风向为东南风(SE),则以与之垂直的方向($45^\circ/135^\circ$)为基准将各个路段分为4级。建成区与市郊滨海区路段走向的风致行道树破坏力评价结果见图11,可以看出,建成区的行道树更容易受到大风的侵袭,而市郊滨海区由于道路走向的原因,风速对行道树的影响相对较小。

2.2 依据台风阻滞能力的道路绿化结构评价

道路绿化结构差别主要表现在开阔面积与绿化面积的比例不同,该比例随道路行车道宽度增加而提升,行车道增加时开阔面积增加,对台风风力的削减能力下降,树木受损害的风险升高。机动车道数量决定了行车道宽度,道路绿化布置模式决定了道路绿化面积,道路绿化内绿带越多、绿带宽度越大对台风风力的削减能力越强,有利于降低局部风力(表4)。以道路交叉口为分界点,两个分界点之间为一条路段,在ArcGIS中记录每一条路段的机动车道数量与道路绿化布置模式,得到道路绿化结构的阻滞力评价结果如图12所示。

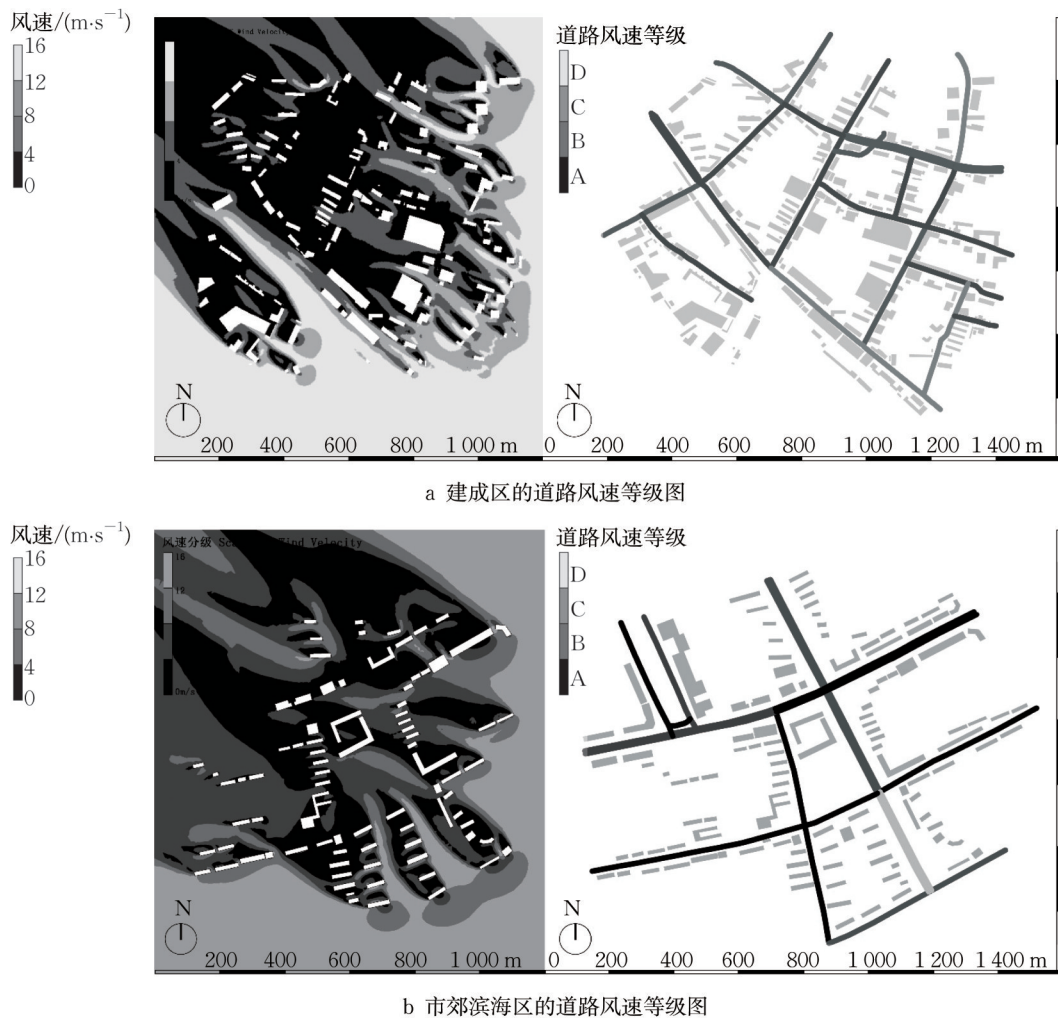


图 10 研究区域的道路风速等级图

Fig. 10 Speed grades of road wind

表 3 风致行道树破坏力评价

Tab. 3 Damage evaluation of wind-induced street tree

模拟风向	道路走向与水平向夹角/(°)	评价
东南向(SE)	0~90	破坏力弱
	90~105或165~180	破坏力一般
	105~120或150~165	破坏力较强
	120~150	破坏力强

分别对两个代表区域道路绿化结构进行评价,并统计各评价等级的路段长度占比,结果显示建成区超过半数的路段绿化结构对风的阻滞能力一般,均为一板两带式的两车道,其余路段长度按占比从大到小依次为:无阻滞力的无行道树路段(26%);阻滞能力弱的路段(14%),均为一板两带式四车道;阻滞能力强的路段(4%),均为一板两带式单车道。市郊滨海区中,没有无行道树路段;阻滞力强的路段长度占比与阻滞力一般的路段长度占比接近,分别为43%与41%,阻滞力强的路段均为四板五带式四车

道,在阻滞力一般的路段中,32%长度占比为三板四带式四车道,9%长度占比为一板两带式两车道;阻滞力弱的路段长度占比16%,均为一板两带式四车道。

3 结论与优化建议

3.1 道路风环境综合评价

建成区的道路绿化布置方式基本为滞风能力最弱的一板两带式,部分街道风速较低,同时路段走向趋近于模拟风向,风对行道树的破坏力较小;市郊滨海区则大部分街道的风速、绿化结构滞风能力、路段走向的风致破坏力均表现良好。此外,市郊滨海区采用四板五带式的路段较多,滞风能力较好。从整体来看,市郊滨海区风环境较好的路段长度占比大于建成区。两个代表区中风环境较差的路段均存在风速等级高的情况,但建成区路段同时存在着因无

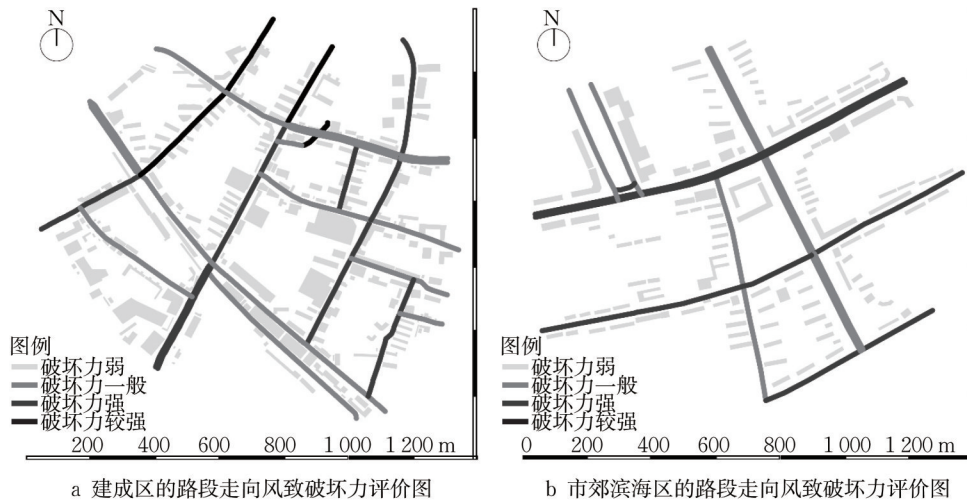


图 11 研究区域的路段走向风致破坏力评价图

Fig. 11 Evaluation of road orientation in the study area

表 4 道路绿化结构对风的阻滞能力评价

Tab. 4 Evaluation of wind blocking ability of road green space structures

机动车道数量	道路绿化布置模式	对风阻滞能力
单车道	一板两带式	阻滞力强
	无道路绿化	无阻滞力
两车道	一板两带式	阻滞力一般
	三板四带式	阻滞力强
	一板两带式	阻滞力弱
四车道	三板四带式	阻滞力一般
	四板五带式	阻滞力强
	无道路绿化	无阻滞力

行道树而无滞风能力的特殊情况,这一般是由于建筑高密度的规划未预留足够的种植空间,或道路设施对行道树的限制较大,此类路段还需进一步优化。

3.2 上海市街道风环境优化建议

建成区优化的主要模式如下:

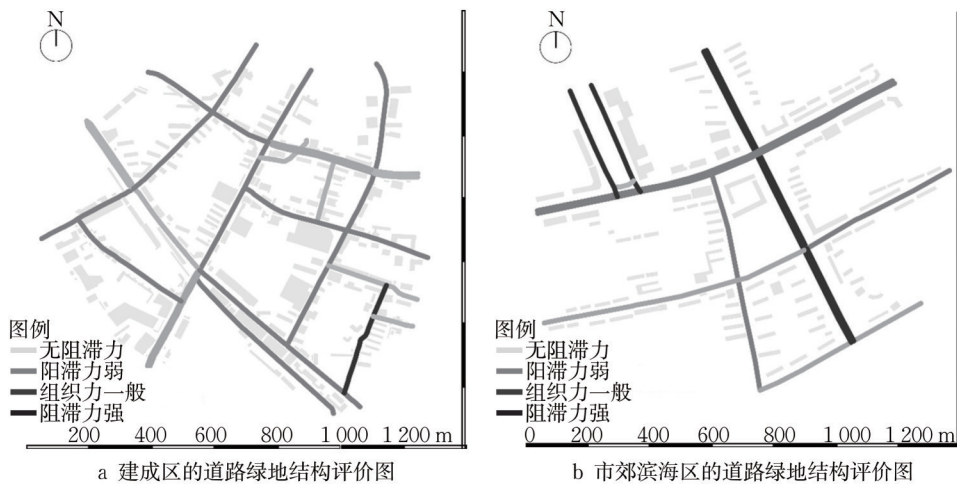


图 12 研究区域的道路绿地结构评价图

Fig. 12 Evaluation of road green space structure in the study area

(1)无行道树道路的优化模式。增加种植树干通直、树冠紧凑,整体树形比较节约空间的行道树。此类树种一般冠幅较小,冠高比也较小,结合定期的整形修剪,以提升阻风和抗风性^[15],可有效降低场地风速。例如凯旋路 1 段与凯旋路 2 段为双向四车道,风环境评价较好,可以选择抗风性评价为一般、较好、好的树种。由于凯旋路一侧人行道紧邻高架桥,行道树的地上空间有限,因此推荐种植树体瘦长挺拔的楸树,其树姿优美,树冠浓密,花冠呈浅粉色,花期 4~5 月,枝叶与花均观赏性较好;而裕德路为单车道,风环境评价较好,两侧为商业建筑,建筑红线与人行道之间存在商业外摆空间,因此宜选择树冠浓密,观赏价值高的色叶树种,推荐种植干形挺直的北美枫香(*Liquidambar styraciflua*),该树原产阿拉巴马州与长江流域气候条件近似,加之适应性强、

根系深,抗风性好,入秋时节呈红色、黄色或纷杂多色的叶片,具有极佳的观赏价值,可作为该路段的行道树。

(2)四车道以上的一板两带式道路优化模式。因其道路空间有限,在机动车道的中心线处增加一定宽度的隔离带,或在机动车道与非机动车道分隔线处增加一定宽度的隔离带,以增强其滞风能力。例如南丹路4段风环境一般,道路空间不足以容纳更多的绿化空间,从提升路段行道树整体的抗风能力为优化切入点,使用间隔种植的方式更换行道树种,推荐抗风性较好的朴树(*Celtis sinensis*),其树冠宽阔饱满,树荫厚实茂密,对有毒气体及粉尘的吸滞作用极强,且适应性强,耐干旱薄瘠,适宜更换悬铃木作为该段的行道树。

(3)所植行道树抗风性差的道路优化模式。从提升道路整体行道树种抗风能力出发,间隔更换抗风性好的行道树,或更换道路一侧的行道树为抗风性好的树种,从而优化道路整体行道树的抗风能力,建立有效的挡风、导风街道绿化体系。例如文定路3段与宜山路1段均为风环境一般的两车道,一侧所植行道树为抗风性差的悬铃木,另一侧推荐种植杜英(*Elaeocarpus decipiens*)或女贞(*Ligustrum lucidum*)。女贞常绿乔木,树形匀称统一,树荫浓密,夏季5—7月开白色小花,姿态娉婷观赏性佳,同时对大气污染抗性较强,能吸附一定的粉尘,因其深根性而抗风性好。杜英为常绿乔木,进入秋冬和早春时节,部分变成深红色的树叶与绿叶交叠映衬,艳丽赏目,且生长速度快,移栽成活率高。以上作为补种行道树都是具有观赏价值的常绿树种,可以丰富建成区的季相特征,延景观赏期。

市郊滨海区优化模式有如下两种:

(1)紧邻绿地道路优化模式。一些道路紧邻防护绿地或者公园绿地,可以利用临近的绿地,通过设计相邻绿地的植物配置有效改善道路风环境。上层乔木选择与相邻道路行道树季相变化互补,抗风能力较好的树种形成整体抗风良好的上层结构。选择中层和下层植物时要注重三层植被观赏时序的互补,营造出兼具风环境适宜性与场地景观效果的街道绿化系统。例如区域中的卫清东路、龙胜东路、杭州湾大道机动车道与非机动车道的分隔绿带绿化树种仅有灌木,具备种植乔木的空间。其中卫清东路、龙胜东路所植行道树为常绿树种香樟,增加的行道树建议选择观赏性与抗风性均较好的树种,提升路段的观赏价值,如枫香(*Liquidambar formosana*)或

乌桕(*Triadica sebifera*)。枫香树干通直,树形舒展,色叶期红烈耀眼的叶色极具园林观赏性。乌桕冠型整齐,叶形美观,秋季寒霜后秋叶透红,观赏性极高。上述树种具备观赏价值的同时具有较好的抗风性,适宜在隔离绿带补植,改善相邻路段的风环境,降低该路段行道树在大风条件下受损可能性。

(2)道路绿化结构空间富余路段优化模式。部分采用三板四带式或四板五带式的道路,其具备足够宽度的绿化隔离带,增加上层乔木,提升道路绿化结构的滞风能力,调控道路风环境。在选择补种行道树时,优选兼具抗风能力与观赏价值的乔木种类,同时考虑其色彩搭配和季相变化对道路原有行道树种的补充。例如临桂路为一板两带式的双向两车道,其东南侧为铁路,铁轨与道路之间存在一定宽度的隔离绿带,绿带中所种植物群落未经过抗风设计,种植方式随意。在该绿带内补种抗风性较好的乔灌木,组合配置构成抗风的植物群落,能够在台风或大风极端气候时为相邻道路的行道树分担风荷载。推荐种植抗风性好的落叶乔木水杉(*Metasequoia glyptostroboides*)搭配常绿灌木红花檵木(*Loropetalum chinense* var. *rubrum*)。水杉是秋叶观赏树种,主干直立,树形优美,塔型树冠表明了其优良的抗风性。红花檵木是常绿观赏树种,叶色艳丽,花期3~4月,花红满枝,与常绿树种搭配种植能极大的提高景观效果。

综上,构建以林荫道为主体的绿色生态框架,形成绿化网络系统是近年来的共识^[16]。除选用抗风性较好的树种之外,匹配分析道路的风环境特征对于城市网络应对气候变化,助推城市风貌提升,增强生态系统韧性将会起到重要作用。

作者贡献声明:

张德顺:实验设计及论文整体设计。

曾明璇:实验实施及文章撰写。

陈莹莹:实验实施与结果分析。

张振:实验设计与结果分析。

姚鳗卿:文章修改与优化。

参考文献:

- [1] EMANUEL K. Increasing destructiveness of tropical cyclones over the past 30 years[J]. *Nature*, 2005, 436: 686.
- [2] 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.
- [3] 史军,肖风劲,穆海振,等.上海地区台风灾害损失评估[J].长江流域资源与环境,2013,22(7):952.
SHI Jun, XIAO Fengjin, MU Haizhen, *et al.* Losses assessment of typhoon disaster in Shanghai during. [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2013, 22 (7):952.
- [4] BLOCKEN B, STATHOPOULOS T, VAN BEECK J P A. Pedestrian-level wind conditions around buildings: review of wind-tunnel and CFD techniques and their accuracy for wind comfort assessment [J]. Building & Environment, 2016, 100: 50.
- [5] 李峻峰.基于数值模拟的行道树布置方式对街道空间通风效能影响分析[C]//中国第一届风景园林与小气候国际研讨会论文集.北京:中国建筑工业出版社,2018:107-114.
LI Junfeng. Analysis of influence of street tree layout on street spatial ventilation efficiency based on numerical simulation [C]//Proceedings of the First International Symposium on Landscape Architecture and Microclimate in China. Beijing : China Architecture & Building Press, 2018:107-114.
- [6] 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.
ZHANG Deshun, ZENG Mingxuan, FENG Shucheng, *et al.* Evaluation and application of typhoon resilient urban street trees in coastal cities of China [J]. Journal of Chinese Urban Forestry, 2022, 20 (5):151.
- [7] FAN P, OUYANG Z, BASNOU C, *et al.* Nature-based solutions for urban landscapes under post-industrialization and globalization: Barcelona versus Shanghai [J]. Environmental Research, 2017, 156:272.
- [8] 刘凤珍.影响上海的台风概况[J].海洋预报,1986(2):53.
LIU Fengzhen. Overview of typhoons affecting Shanghai [J]. Marine Forecasting, 1986(2):53.
- [9] 上海市水利工程设计研究院有限公司.上海市海塘安全评估与检测关键技术开发与应用[R].上海:上海市水利工程设计研究院有限公司,2018.
Shanghai Hydraulic Engineering Design & Research Institute Co, Ltd. Development and application of key technologies for seawall safety assessment and detection in Shanghai [R]. Shanghai: Shanghai Hydraulic Engineering Design & Research Institute Co, Ltd, 2018.
- [10] 徐家良.台风影响上海时风速风向分布特征[J].气象,2005(8):66.
XU Jiali. Distribution of wind speed and direction when typhoons influencing shanghai [J]. Meteorologically, 2005(8):66.
- [11] 王庆,邱智豪,赵月溪,等.基于CFD模拟的台风“山竹”对深圳市园林树木影响研究[J].中国园林,2021,37(2):118.
WANG Qing, QIU Zhihao, ZHAO Yuexi, *et al.* CFD-based investigation and analysis on the destruction of shenzhen landscape trees by typhoon mangkhutin [J]. Chinese Landscape Architecture, 2021, 37(2):118.
- [12] KENJERE S, KUILE B T. Modelling, and simulations of turbulent flows in urban areas with vegetation [J]. Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics, 2013, 123: 43.
- [13] 刘滨谊,司润泽.基于数据实测与CFD模拟的住区风环境景观适应性策略——以同济大学彰武路宿舍区为例[J].中国园林,2018,34(2):24.
LIU Binyi, SI Runze. The landscape adaptability strategy of residential wind environment based on measured data and CFD simulation: a case study of Zhangwu road dormitory area of Tongji University [J]. Chinese Landscape Architecture, 2018, 34 (2):24.
- [14] 曾锴,汪丛军,黄本才,等.计算风工程中几个关键影响因素的分析与建议[J].空气动力学学报,2007,25(4):504.
ZENG Kai, WANG Congjun, HUANG Bencai, *et al.* Suggestion and analysis of several key factors in computation wind engineering [J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2007, 25 (4): 504.
- [15] 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 [J]. Landscape Architecture, 2021, 28(11):68.
- [16] BATALA E, TSITSONI T. Street tree health assessment system: a tool for study of urban greenery [J]. International Journal of Sustainable Development & Planning, 2009, 4 (4):345.