

基于适地适树微气候理念的植物选择与配置——以澳门为例

Plant Selection and Arrangement Based on the Principle of Matching Tree Species to Sites under Microclimate Considerations: A Case Study of Macao

周子明 潘丽宇 陈润桦 谢俊民*

ZHOU Ziming, PAN Liyu, CHEN Runhua, XIE Junmin*

摘要

随着全球气候变化和城市化进程的加速,城市绿地设计应精准适应复杂的环境条件,但传统的植物配置以经验为主,缺乏对环境因素与植物适应性的系统考虑。以澳门3个典型绿地(城市公园、道路绿化、庭院绿化)为例,通过流体力学技术模拟微气候,分析日照和风环境特征,构建基于微气候分区的量化评估框架。研究表明,高密度建成区中建筑显著影响微气候,氹仔中央公园以“中日照+大风”为主,多为“喜阳+抗风”植物;高士德-俾利喇街以“中日照+大风”“低日照+微风”为主,无耐阴及不抗风植物;澳门城市大学开放空间以“中日照+微风”为主,无耐阴植物。鉴于现状植物配置与场地明显不匹配,结合微气候分区与适地适树理念,提出植物配置优化建议。

Abstract

With the acceleration of global climate change and urbanization, urban green space design should be precisely adapted to complex environmental conditions. However, traditional plant configuration is largely experience-based and lacks systematic consideration of the interplay between environmental factors and plant adaptability. Taking three typical green spaces in Macao—urban parks, roadside greenery, and courtyard greening—as case studies, this research employs fluid dynamics technology to simulate microclimates, analyze solar radiation and wind environment characteristics, and construct a quantitative assessment framework based on microclimate zoning. The findings reveal that in high-density built-up areas, buildings significantly influence microclimates. Taipa Central Park is predominantly characterized by 'moderate sunlight + strong winds', with a majority of 'sun-loving + wind-resistant' plants; Avenida de Horta e Costa-Rua de Francisco Xavier Pereira is mainly defined by 'moderate sunlight + strong winds' and 'insufficient sunlight + light breezes', with no shade-tolerant or non-wind-resistant species; while the open spaces of City University of Macao are primarily 'moderate sunlight + light breezes', with no shade-tolerant species. Given the evident mismatch between current plant configurations and site conditions, this study proposes optimization recommendations for plant configuration by integrating microclimate zoning with the principle of matching species to site conditions.

文章亮点

1) 揭示了高密度城市中高层建筑阴影与狭管效应对植物生长环境的耦合影响,识别3种典型绿地的微气候,发现现状配置在强风区与弱光区存在显著不匹配。2) 提出了基于日照与风环境组合分区的植物配置前期分析工具,为高密度亚热带城市的绿地更新与树种选择提供了可操作的技术路径。

关键词

适地适树; 微气候模拟; 植物配置; CFD技术; 高密度城市

Keywords

Suiting trees to sites; Microclimate simulation; Plant configuration; CFD technology; High-density cities

收稿日期: 2025-12-16

修回日期: 2026-02-13

在全球气候变化与快速城市化进程中, 植被作为生态系统的组成部分, 其生长状况受到多重环境压力显著制约^[1-2]。在此背景下, 植物对不同生境条件的响应程度存在显著差异, 其适应性直接影响绿地系统的生态效益与可持续性。

日照与风是影响植物适应性的基础立地条件。日照强度直接影响植物光合作用, 而日照长度影响植物的开花和结实等生物学事件^[3]。植物对日照的需求具有物种特异性, 通常可分为喜阳、中性与耐阴类型, 光补偿点与光饱和点决定了其在具体光照条件下的生长潜力^[4]。与此同时, 风环境直接影响植物的生理过程与形态结构。适宜的风速有助于气体交换与蒸腾, 但强风可能导致植物机械损伤并抑制生长^[5-6]。风的空间分布受城市地形、建筑形态与下垫面特征的共同影响, 会形成高度异质的局地微气候^[7-10]。因此, 系统理解日照与风对植物的作用机制, 是科学提升城市绿地适应性的基础。

适地适树理念强调根据立地条件选择适应性强的植物种类, 以保障植物健康生长与生态系统的可持续性^[11]。该原则在园林与农业生产中历史悠久, 早在《淮南子》《齐民要术》等文献中已有体现^[12-13]。近年来, 随着生态规划与城市绿化的发展, 适地适树研究逐步从理论向实践转化^[14], 但仍存在明显不足。现有研究多关注宏观气候指标或单一环境因素^[15], 较少综合考量日照、风速等动态微气候因子在街道尺度至单株尺度的空间异质性。在高密度建成区, 建筑布局、道路走向等因素导致日照与风环境呈现显著差异, 传统以行政区或气候区为单元的立地划分方法难以精确反映树木实际生长条件^[16-17]。因此, 如何建立一套能够精细刻画微气候特征, 并据此指导植物配置的方法, 成为当前城市绿地规划与管理中亟待解决的问题。

计算流体学技术 (Computational Fluid Dynamics, CFD) 能够精确刻画复杂城市形态下的气流、温度与辐射分布^[18], 为“适地”评价与“适树”选择提供科学依据。目前研究城市气候常用的流体学计算软件有PHOENICS、ENVI-met和FLUENT。相较于通用的CFD软件,

WindPerfectDX在建筑尺度的风热环境模拟中具备更高的场景适配性与建模效率, 能够有效耦合建筑、植被与下垫面的综合影响; 同时, 其在计算成本与模拟精度之间取得了良好平衡, 更适用于规划应用层面的多情景对比分析, 从而为树木适宜性评价提供可靠技术支撑^[19]。

综上, 研究以澳门特别行政区为例, 通过融合适地适树理念与CFD微气候模拟, 提出高密度城市环境下植物配置的优化路径, 旨在提升城市绿地的生态适应性、缓解热岛效应, 并提高城市系统韧性。

1 研究区域概况

澳门特别行政区 (22°11'N, 113°33'E) 陆地面积约 32.9 km², 三面环海, 属亚热带海洋性季风气候。受冬夏季风交替影响, 澳门夏季 (6—8月) 盛行偏南风, 高温多雨; 冬季 (12月—次年2月) 盛行偏北风, 温和少雨^[20]; 太阳辐射较强, 蒸发旺盛^[21]; 台风多发于7—9月, 常伴随暴雨和风暴雨。

澳门建筑密集, 属于全球超高密度城市之一^[21]。其绿地空间有限, 且各区域的日照和风环境差异较大。本文以澳门绿地系统中的休闲游憩绿地为研究对象, 并根据建筑高度和空间围合特征加以分类, 重点分析3个典型区域: 氹仔中央公园 (公园类)、高士德-俾利喇街道路 (道路绿化类)、澳门城市大学开放空间 (庭院绿化类, 以下简称“澳城大开放空间”)。其中, 氹仔中央公园位于高层建筑围合空间之中, 周边平均建筑高度达99.18 m, 受周边建筑阴影影响较大, 尤其在冬季太阳高度角较低时, 公园内部局部区域 (尤其北侧) 的日照长度受限; 夏日日照条件较好, 但午后部分区域可能被西侧建筑遮挡。高士德-俾利喇街绿地位于条带状狭长空间, 道路两侧平均楼高为41.75 m, 街道两侧建筑密集, 日照严重不足, 仅午间可获得短暂直射光。澳城大开放空间位于中层建筑围合空间之中, 周边平均楼高为26.01 m, 空间开敞, 日照较为充足, 风速偏低。3种绿地具有不同的功能, 代表了不同的微气候空间形态 (图1)。

基于实地调研, 研究统计了不同绿地空间内植物的种

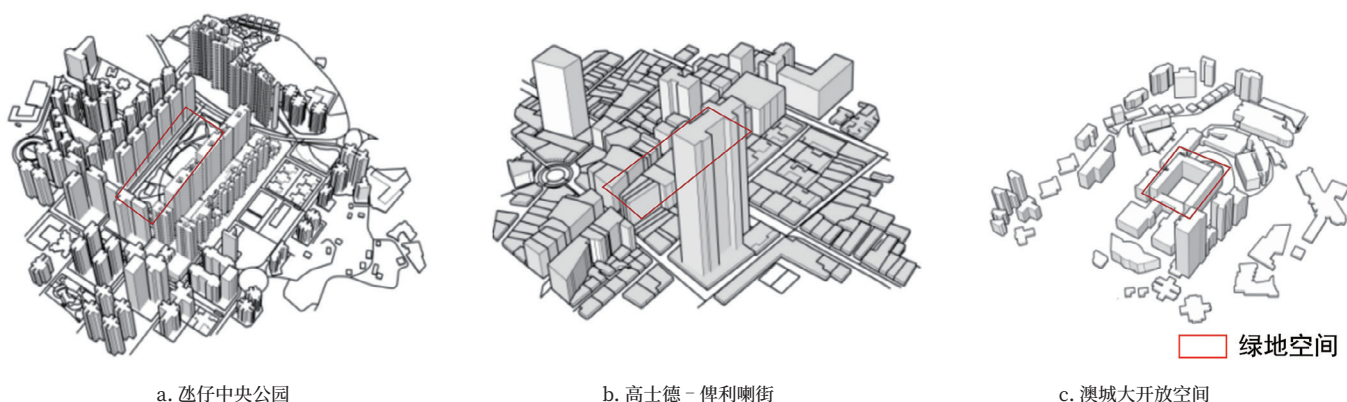


图1 研究区域模型
Fig.1 Model of the study area

类、数量及空间分布（图2），并参照《澳门植物名录：2004》^[22]，依据光照需求与抗风性能对树种进行了归类划分。在氹仔中央公园的48种植物中，喜阳、中性、耐阴植物种类分别占43.75%、33.33%、22.92%，抗风、一般防风、不抗风植物种类分别占45.83%、31.25%、22.92%；高士德马路和俾利喇街交汇处植物种类较少，仅有3种树木，喜阳、中性植物种类分别占66.67%、33.33%，无耐阴树种，而抗风、一般防风植物种类分别占66.67%、33.33%，无不抗风植物；澳城大开放空间的34种树木中，喜阳、中性植物种类分别占58.82%、41.18%，无耐阴植物，而抗风、一般防风、不抗风植物种类分别占50.00%、35.29%、14.71%。

2 研究方法

2.1 数据来源

本研究所用数据包含：1）澳门地球物理气象局的气象数据，包括太阳辐射总量、风向、逐时平均风速与阵风风速等信息，可为气候数值模拟提供参考依据；2）研究场地三维模型，通过实地考察和SketchUp建模获取。以研究区域为中心，模型在水平范围向外扩展至少达到周围最高建筑高度的2倍，满足数值模拟建模要求。3）植物分布与属性数据，通过线上与线下2种途径获取，并参考澳门自然网^①、澳门市政署绿化资讯^②等平台，结合实地调研与《澳门植物志》^③进行核实确认。上述数据可反映立地条件层面的气候背景与建成环境，以及植物特性层面的光照与风的需求。

2.2 微气候模拟

本研究使用WindPerfectDX软件进行微气候模拟。该软件是一款专为建筑、规划和景观设计开发的三维热流解析软件，被广泛应用于风环境、日照、城市热岛等多种建筑环境的模拟^[23-24]。首先，将场地模型转成STL格式，导入WindPerfectDX。随后，进行焦点区域加密的网格划分

（表1），风环境和日照模拟均基于各场地植被的平均高度截面进行，氹仔中央公园、高士德-俾利喇街和澳城大开放空间的高度截面分别为2.03 m、2.51 m、1.69 m。最后，设置日照与风的气象条件，执行模拟计算。其中，日照模拟包含日照长度和强度2部分，风环境模拟则涵盖全年日常情形的平均风速，以及易发生台风和强风的夏冬季节特殊情形的最大阵风。

研究通过WeatherSystem软件对澳门全年日照数据进行统计分析，将每日日照长度划分为短日照（ $0 \leq t < 4$ h）、中日照（ $4 \leq t < 8$ h）、长日照（ $8 \leq t \leq 12$ h）3级，每日日照强度划分为弱日照（ $0 \leq E < 1.5 \text{ kW} \cdot \text{h/m}^2$ ）、中日照（ $1.5 \leq E < 3.0 \text{ kW} \cdot \text{h/m}^2$ ）、强日照（ $3.0 \leq E \leq 4.5 \text{ kW} \cdot \text{h/m}^2$ ）3级。鉴于日照强度对植物光合作用影响更显著，而日照长度主要调控生长节律^[25]，结合澳门高密度城市建筑遮阴复杂的特点，本研究赋予日照强度0.6、日照长度0.4的权重，基于日照长度和强度，计算综合日照指数CSI，公式如下：

$$CSI = 0.4 \times \text{日照长度等级} + 0.6 \times \text{日照强度等级} \quad (1)$$

根据CSI值（1.0~3.0）将日照环境划分为低日照S1（ $1.0 \leq CSI < 1.5$ ）、中日照S2（ $1.5 \leq CSI < 2.3$ ）、高日照S3（ $2.3 \leq CSI \leq 3.0$ ）3级。

研究通过WeatherSystem软件对澳门气象站风速风向数据进行统计，结果显示：澳门全年最高频风向为北风，平均风速为3.64 m/s；夏冬两季的最高频风向分别为东南风和北风，平均最大阵风分别为6.08 m/s和6.94 m/s。基于此，研究于WindPerfectDX中设置3种模拟工况：工况一代表常规场景，为全年最高频风向（北风）与全年平均风速的组合；工况二、三代表冬夏特殊场景，分别为夏季主导风向（东南风）与夏季平均最大阵风风速组合、冬季主导风向（北风）与冬季最大阵风组合。根据同区域研究^[26]及《建筑结构荷载规范》（GB 50009—2012）中地面粗糙度分类，研究区高层建筑密集且地形起伏显著，符合“地貌D（中

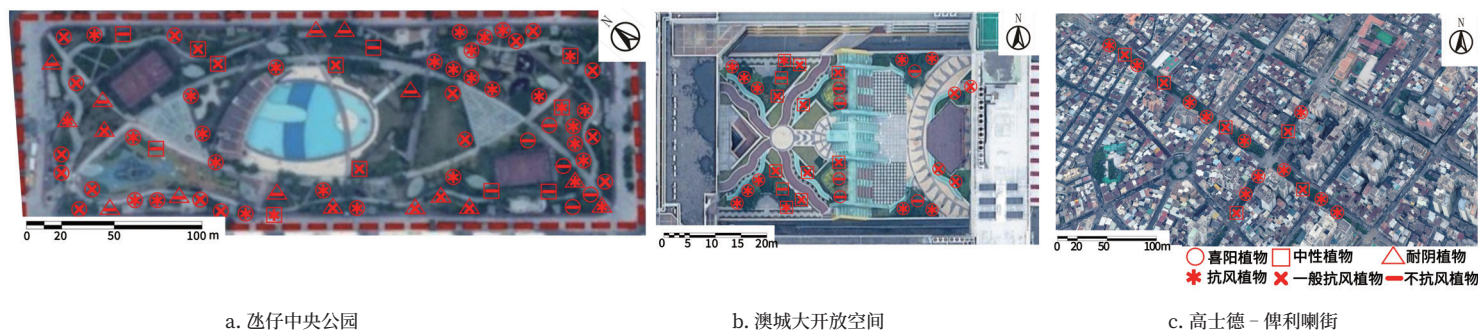


图2 研究区域植被类型与分布

Fig.2 Vegetation types and distribution in the study areas

① 澳门自然网 <https://www.iam.gov.mo/nature/c/facility/park>。

② 澳门市政署绿化资讯 <https://www.iam.gov.mo/c/garden/itemlist>。

③ 《澳门植物志》由澳门特别行政区民政总署园林绿化部与中国科学院华南植物园合作编写，共三卷。

高层建筑密集的丘陵地区)”特征,故研究以距地面10 m 高度(与气象站一致)为基准,采用地貌D进行模拟。风环境评价中,将平均风速划分为微风W1($v<1.5\text{ m/s}$)、中风W2($1.5\text{ m/s}\leq v<3.0\text{ m/s}$)、大风W3($v\geq 3.0\text{ m/s}$)3级;将最大阵风划分为微阵风($v<3.0\text{ m/s}$)、中阵风($3.0\text{ m/s}\leq v<6.0\text{ m/s}$)、强阵风($v\geq 6.0\text{ m/s}$)3级。

3 结果与分析

3.1 日照分析

氹仔中央公园日照环境具有明显季节差异(图3~4)。场地在夏季约90%的区域每日日照时长超过4 h,约90%的区域处于中日照强度等级;在冬季约80%的区域每日日照不足4 h,弱日照强度区域约占85%。场地南侧的季节差异最为明显,夏季与冬季的每日日照时长和日照强度差值分别约为4.7 h和 $2.2\text{ kW}\cdot\text{h/m}^2$ 。从全年平均结果来看,场地内每

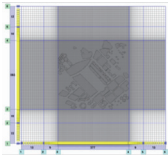
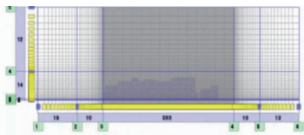
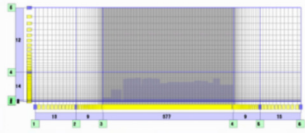
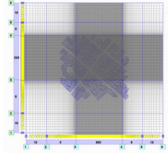
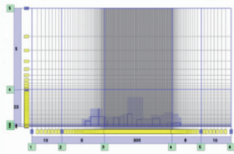
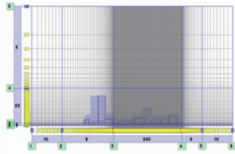
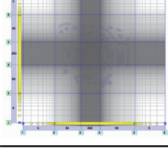
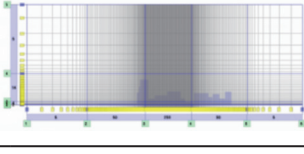
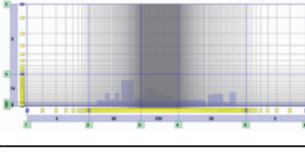
日日照时长低于6 h,日照强度低于 $1.6\text{ kW}\cdot\text{h/m}^2$,南侧为主要低日照区域。

高士德-俾利喇街以短日照和弱日照区域为主(图5~6)。场地年均每日日照时长低于1.64 h,日照强度低于 $1.1\text{ kW}\cdot\text{h/m}^2$;夏季日照强度略高于冬季,但未改变场地整体弱日照的分布特征。

澳城大开放空间夏季日照条件高于冬季(图7~8)。夏季场地内每日日照时长均超过4 h,中心区域局部达到强日照等级;冬季每日日照时长均低于4 h,日照强度低于 $2.2\text{ kW}\cdot\text{h/m}^2$ 。全年平均每日日照时长低于4.09 h,日照强度低于 $2.5\text{ kW}\cdot\text{h/m}^2$,日照水平总体由北向南降低。

基于综合日照指数CSI,氹仔中央公园超过85%的区域属于中日照等级;高士德-俾利喇街无高日照等级区域;澳城大开放空间的高、中、低日照区域分别占30%、50%和20%(图9)。

表 1 建模尺度与网格设定
Tab.1 Modeling scale and grid settings

研究区域	建模尺度	Z 轴网格条件设定图	X 轴网格条件设定图	Y 轴网格条件设定图	网格设定数值
氹仔中央公园	818 m× 805 m× 168 m				9 892 596 (391×423×56)
高士德-俾利喇街	417 m× 394 m× 271 m				9 539 264 (396×426×54)
澳城大开放空间	430 m× 397 m× 116 m				9 672 600 (488×468×40)

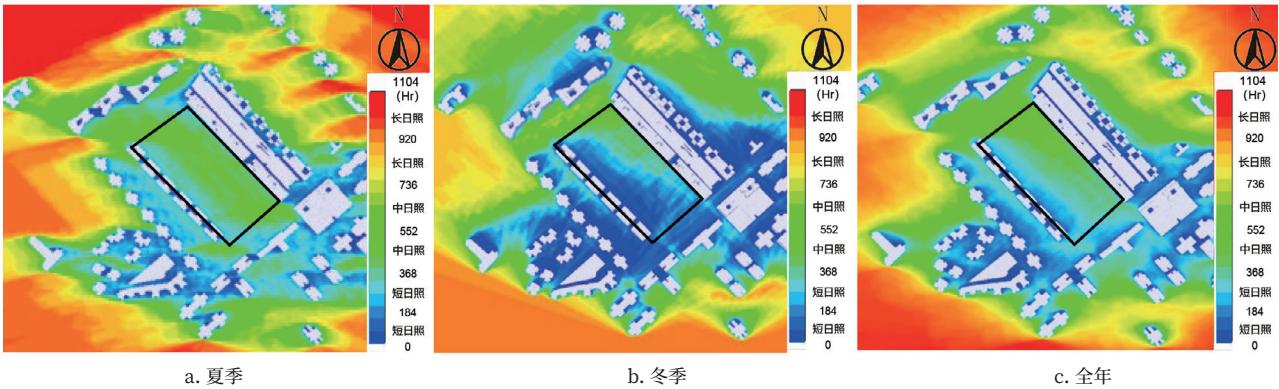


图 3 氹仔中央公园日照长度模拟分析
Fig.3 Solar duration simulation analysis of Taipa Central Park

3.2 风环境分析

研究表明,夏季与冬季最大阵风与全年平均风速呈现不同的空间分布特征(图10~12)。氹仔中央公园在夏季最大阵风工况下,约46%的区域达到中阵风及以上等级;在冬季最大阵风工况下约90%的区域达到中阵风及以上等级,且中心区域出现强阵风。全年平均风速以中风和东风为主,局部区域超过3.0 m/s。

高士德-俾利喇街冬季最大阵风主要为4.0~5.5 m/s,属于中阵风等级;夏季场地内风速差异较大,部分区域约为2.7 m/s,另有区域低于1.5 m/s;全年平均风速主要为2.0~2.5 m/s,北路段风速明显高于南路段(图11)。

澳城大开放空间夏季局部最大阵风超过6.0 m/s,达到强阵风等级;冬季最大阵风低于2.8 m/s。全年平均风速较低,主要为0.8~1.6 m/s,但夏季局部存在强阵风

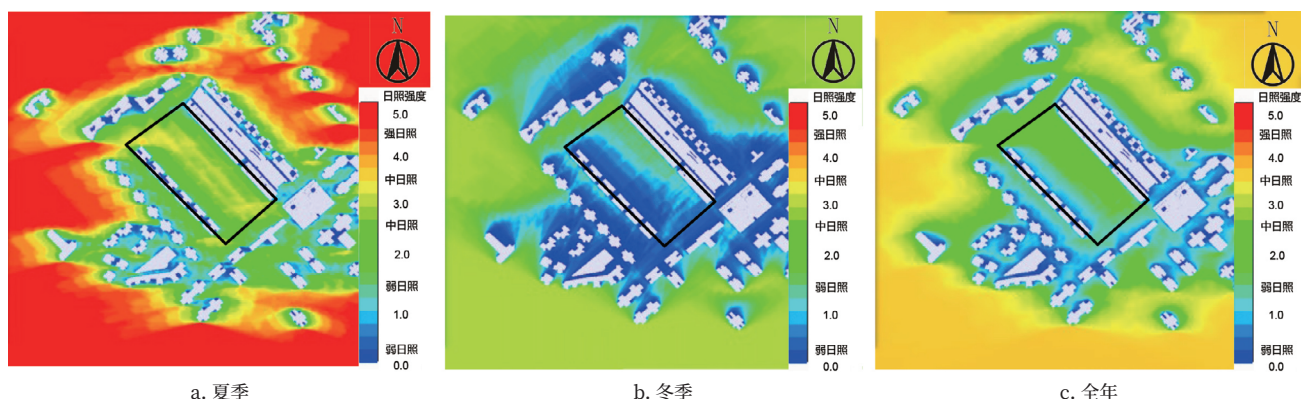


图4 氹仔中央公园日照强度模拟分析

Fig.4 Solar intensity simulation analysis of Taipa Central Park

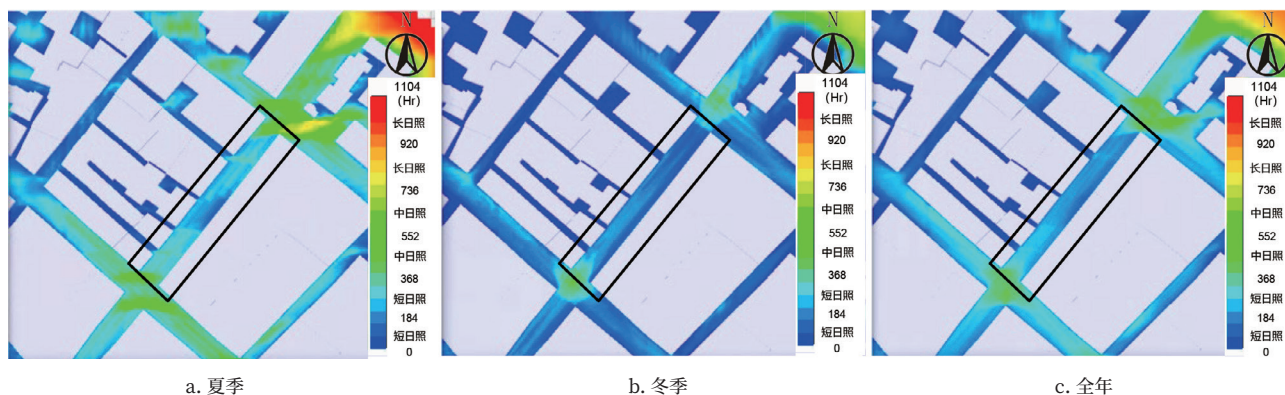


图5 高士德-俾利喇街日照长度模拟分析

Fig.5 Solar duration simulation analysis of Avenida de Horta e Costa-Rua de Francisco Xavier Pereira

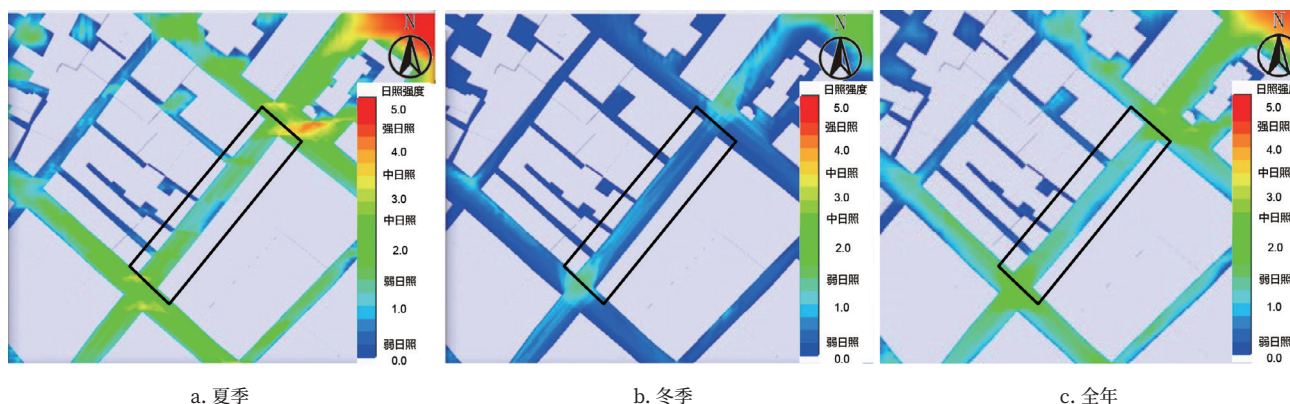


图6 高士德-俾利喇街日照强度模拟分析

Fig.6 Solar intensity simulation analysis of Avenida de Horta e Costa-Rua de Francisco Xavier Pereira

险（图12）。

研究将全年平均风速分级与夏、冬季强阵风区进行空间叠加后发现，3个场地呈现不同的风环境格局（图13）。氹仔中央公园内部风速差异较明显，夏季与冬季强阵风区在场地中部和南部存在一定重叠。高士德-俾利喇街的夏季强阵风区主要集中于街道南段；其冬季未达到强阵风阈值。

澳城大开放空间整体以微风和中风为主，风速总体由西向东升高，夏季强阵风主要出现在场地边缘，冬季未形成强阵风区。总体而言，氹仔中央公园受到的季节性强阵风影响较为复杂，其余2个场地的强阵风影响则具有较明显的局部性。

3.3 植物适应性分析

研究根据综合日照等级与平均风速，将3个场地划分为

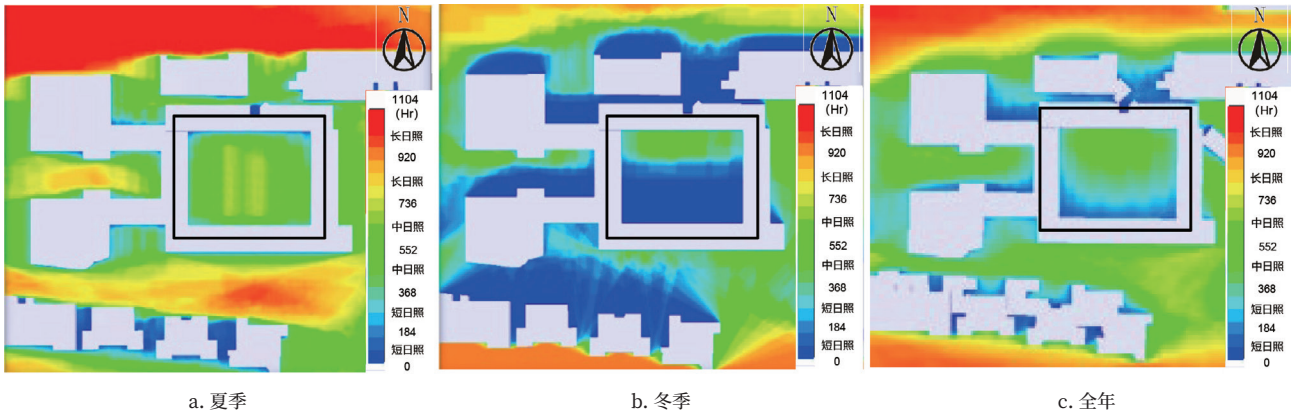


图 7 澳城大开放空间日照长度模拟分析
Fig.7 Solar duration simulation analysis of City University of Macao Open Space

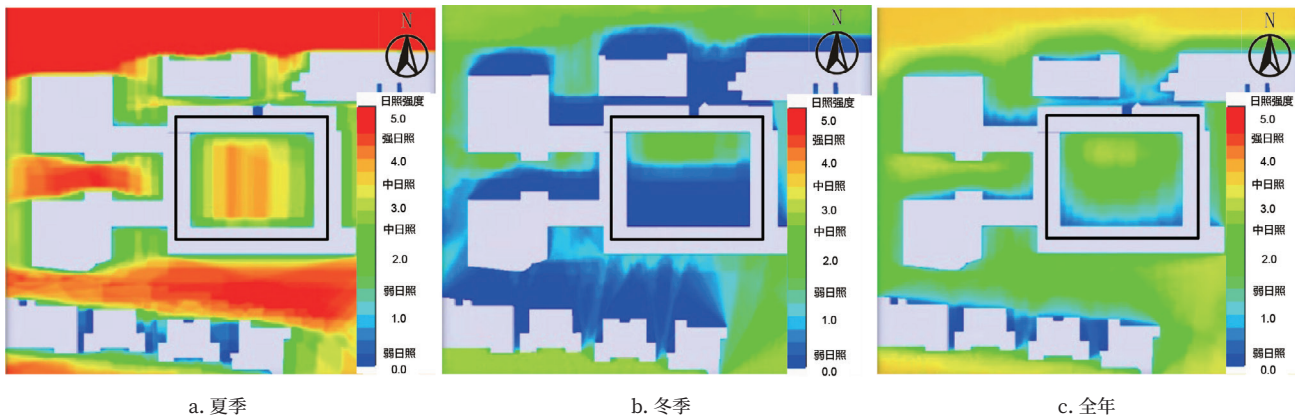


图 8 澳城大开放空间日照强度模拟分析
Fig.8 Solar intensity simulation analysis of City University of Macao Open Space

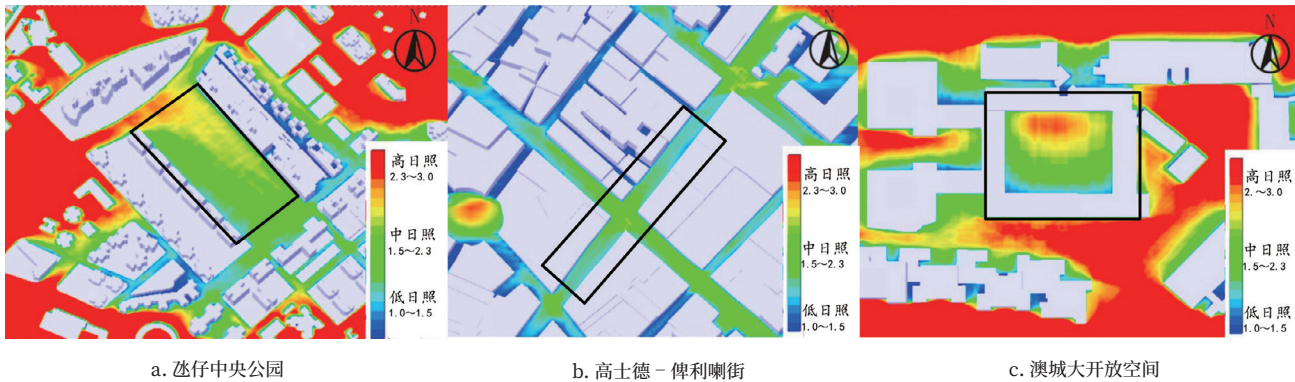


图 9 综合日照模拟结果
Fig.9 Comprehensive solar radiation simulation results

不同的微气候组合分区(图14)。氹仔中央公园主要包括“S3+W1”(高日照+微风)和“S2+W3”(中日照+大风)2类,前者位于场地北部,后者覆盖场地中部和南部。高士德-俾利喇街北段为“S2+W3”(中日照+大风),南

段为“S1+W1”(低日照+微风),呈现较明显的带状分异。澳城大开放空间由北向南依次分布“S3+W2”(高日照+中风)、“S2+W1”(中日照+微风)和“S1+W2”(低日照+中风),形成较清晰的日照梯度。总体而言,氹

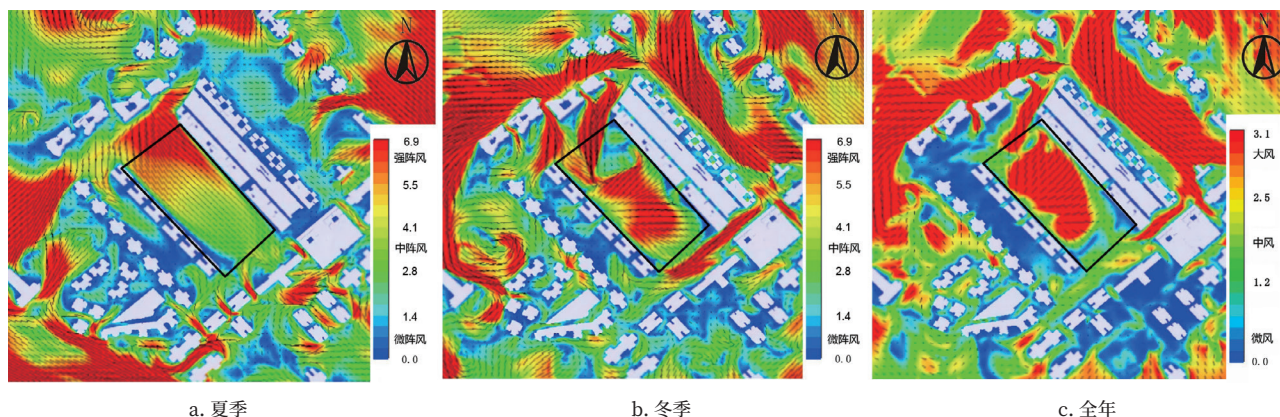


图 10 氹仔中央公园风环境模拟分析

Fig.10 Wind environment simulation analysis of Taipa Central Park

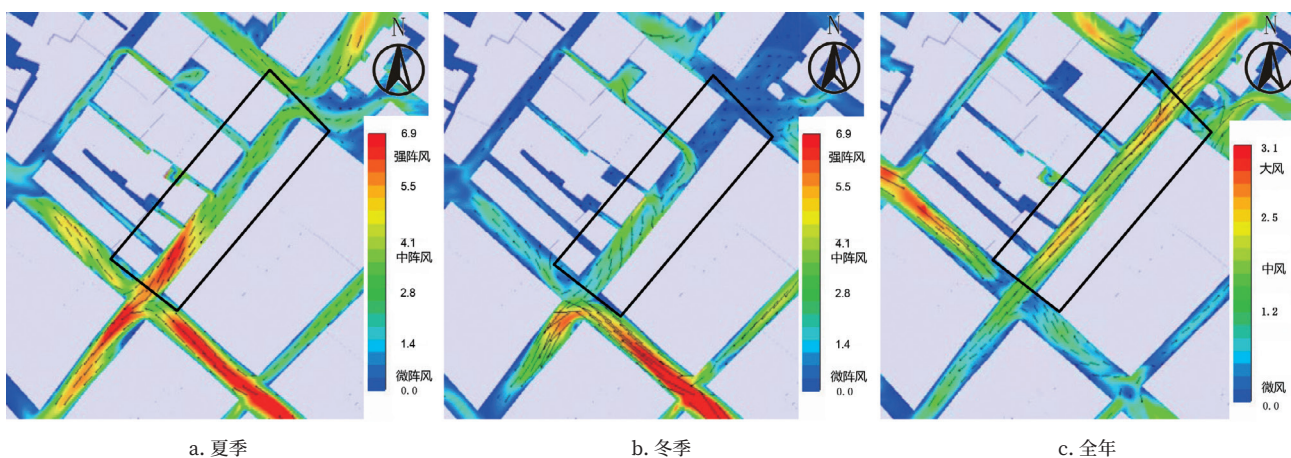


图 11 高士德-俾利喇街风环境模拟分析

Fig.11 Wind environment simulation analysis of Avenida de Horta e Costa-Rua de Francisco Xavier Pereira

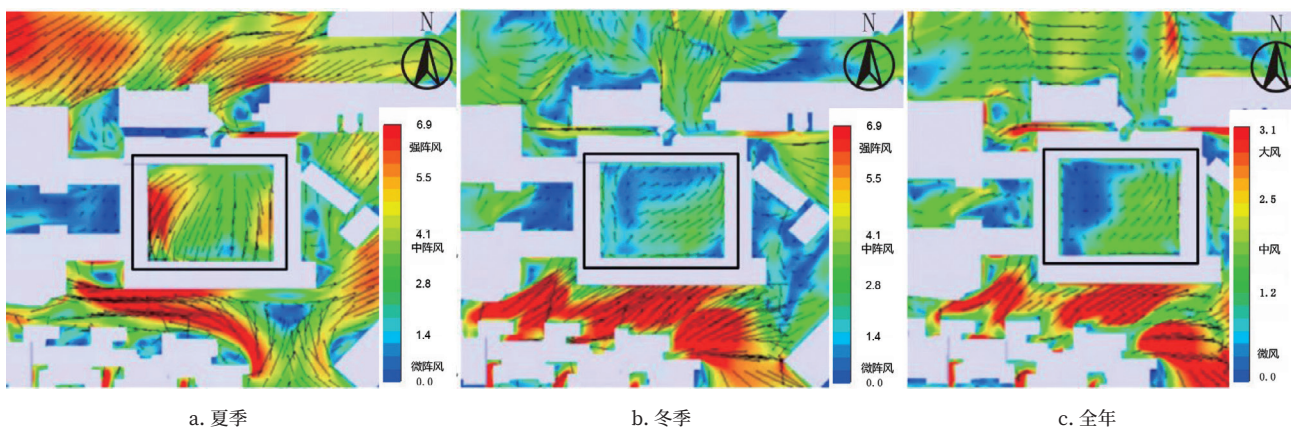


图 12 澳城大开放空间风环境模拟分析图

Fig.12 Wind environment simulation analysis of City University of Macao Open Space

仔中央公园和高士德-俾利喇街均存在局部大风分区，澳城大开放空间则主要表现为由北向南递减的日照梯度。

根据植物光照需求与抗风性能，可划分“喜阳+抗风”“中性+一般抗风”“耐阴+不抗风”等9种植物组合。从现状植物类型来看，氹仔中央公园记录的48种植物涵盖全部9种组合，其中“喜阳+抗风”植物种类最多，为13种，占27.08%；“中性+抗风”植物为8种，占16.67%；“中性+不抗风”植物为3种，占6.25%。高士德-俾利喇街共记录3种植物，包括2种“喜阳+抗风”植物和1种“中性+一般抗风”植物，分别占66.67%和33.33%，未记录耐阴及不抗风植物。澳城大开放空间共记录34种植物，其中“喜阳+抗风”植物和“中性+一般抗风”植物种类较多，分别为15种和10种，占44.12%和29.41%；“喜阳+一般抗风”植物和“中性+抗风”植物均为2种，分别占5.88%，未记录耐阴植物（图15）。

结合图2，研究发现氹仔中央公园“S2+W3”分区内仍分布一般抗风或不抗风植物；高士德-俾利喇街“S1+W1”分区内未记录耐阴植物；澳城大开放空间南侧“S1+W2”分区内仍分布喜阳植物。由此可见，现状配置的潜在适配风险主要表现为低日照分区缺少耐阴植物，以及强风分区存在抗风性不足的植物。

4 讨论

研究发现，澳门高密度建成区中不同绿地类型的日照与风环境具有明显空间分异。高士德-俾利喇街受狭长街谷、较高建筑界面和有限天空开敞度影响，全年日照长度与日照强度均处于低值区间；氹仔中央公园位于高层建筑围合空间，建筑阴影与道路风廊共同作用，使局部区域同时呈现日照受限和风速强化特征；澳城大开放空间的围合程度相对较低，日照分布仍受周边建筑遮挡影响，形成较清晰的内部梯度。街谷形态、建筑高度、道路朝向和绿化参数对城市冠层内部的辐射、风速和热环境具有重要影响^[27-28]。因此，植物配置前期需要识别场地内部的微气候差异，将日照、风环境等因素转化为可判断的空间分区。

植物适应性分析表明，现状配置中存在2个主要问题：一是在日照受限分区配置喜阳植物，二是在局部强风分区配置抗风性一般或枝叶柔弱的植物。前者可能限制植物光合作用和开花表现，后者会增加枝叶撕裂、枝干折损和后期维护压力。已有研究表明，树木遮阴和城市绿化能够降低局地热环境负荷^[29-30]，但在街谷空间中，树形、冠层密度和种植位置也会影响通风效率与热量扩散过程^[31-32]。因此，适地适树评价不仅要关注树种名录，还应将植物生态习性与具体种植

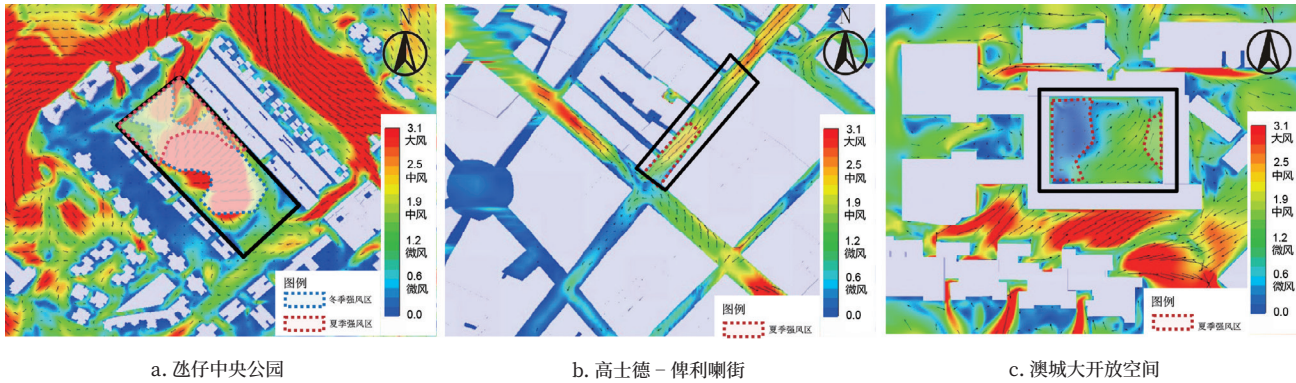


图 13 全年平均风速分级与季节强阵风区的空间叠加

Fig.13 Spatial overlay of annual mean wind speed classes and seasonal strong gust zones



图 14 3 个典型场地的类型

Fig.14 Site types for the three study areas

点位的微气候条件结合考虑。

基于上述结果，本文提出的日照与风环境组合分区可作为植物配置的前期分析工具。氹仔中央公园应重点识别强风通道与季节性阴影区，在风速强化区域配置抗风性较强的树种，在日照受限区域增加中性或耐阴植物比例；高士德-俾利喇街应优先选择耐阴、抗风且冠层形态适宜的树种，并通过控制株距和冠层连续度维持基本通风；澳城大开放空间可依据内部日照梯度进行分区配置，避免在低日照区域集中种植喜阳植物。英国林业委员会发布的城市树木选择指南强调，树种选择需综合考虑场地限制、树木性状、生态服务与长期养护^[33]。对于澳门这类高温高湿、台风频发且绿地空间有限的城市，基于微气候模拟的适地适树方法有助于降低植物生长不良率和维护成本，也可为高密度亚热带城市绿地更新和街道绿化优化提供参考。

5 结论

本研究基于适地适树微气候理念，以澳门典型绿地氹仔中央公园、高士德-俾利喇街、澳城大开放空间为研究对象，采用CFD模拟技术系统分

析了日照与风环境的空间分异特征，并评估了现有植物配置的适应性。研究表明：在日照方面，3个场地全年均无长日照和强日照；高士德-俾利喇街的日照条件最差，夏季和冬季大面积区域日照不足，需格外关注植物的耐阴需求；氹仔中央公园与澳城大开放空间的日照条件差异较小，前者尤其要注意冬季南侧部分区域无日照，后者的日照分布呈现明显分界线，由北向南递减。在风环境方面，氹仔中央公园风速最大，全年多处于中风至大风等级，场地中心形成风速大于3 m/s的风场；高士德-俾利喇街风速次之，全年平均风速为2~2.5 m/s，北路段风速明显高于南路段；澳城大开放空间全年平均风速最低，夏季局部存在强阵风风险。基于日照与风环境的组合分析，3个场地共识别出多种微气候类型：氹仔中央公园有“高日照+微风”“中日照+大风”2种类型；高士德-俾利喇街有“低日照+微风”“中日照+大风”2种类型；澳城大开放空间有“高日照+中风”“中日照+微风”“低日照+中风”3种类型。现状植物配置存在明显不匹配问题，如在强风区配置不抗风植物、弱光区配置喜阳植物，导致部分植株生长不良、

叶黄、枝干弯折等现象。

研究的创新性主要体现在3个方面：一是将CFD微气候模拟技术（WindPerfectDX）引入适地适树定量评估框架，突破了传统经验主导的植物配置模式；二是提出了基于日照和风环境组合分区的植物配置前期分析工具，实现了微气候分区与植物生态习性的直接对接；三是以澳门为典型高密度城市案例，揭示了高层建筑阴影与狭管效应对植物生长环境的耦合影响，丰富了亚热带高密度城市微尺度绿化适应性研究。

但研究仍存在以下局限性：1）仅聚焦日照与风环境，未纳入土壤水分、温湿度等多元因素；2）微气候模拟基于各场地树冠平均高度，未能反映多层群落结构中不同高度层的微气候差异；3）实地调研的植物生长状态为横断面数据，缺乏长期追踪验证。未来研究可从以下方面深入：一是引入多源环境数据，构建植物与环境耦合模型；二是开展垂直结构分层模拟，探索“乔-灌-草”不同层次的微气候梯度；三是建立典型绿地植物生长的长期监测机制，验证并优化模拟参数；四是将微气候分区方法嵌入常用规划设计软件，便于设计初期快速评估；五是扩大研究范围至深圳、香港等同类高密度亚热带城市，形成区域性适地适树技术导则。

注：图片均由作者自绘。

参考文献：

- [1] 张恒, 张艺川, 詹永杰, 等. 低碳城市建设背景下日本近 20 年屋顶绿化研究进展 [J]. 广东园林, 2024, 46 (5) : 31-38.
- [2] 董沛钦. 生态理念下的风景园林设计研究 [J]. 花木盆景 (花卉园艺), 2022 (7) : 84-86.
- [3] 邢阿宝, 崔海峰, 俞晓平, 等. 光质及光周期对植物生长发育的影响 [J]. 北方园艺, 2018 (3) : 163-172.
- [4] 钟佳定, 刘建麟, 许月丽, 等. 口袋公园内有无植物影响行人风环境的评估 [J]. 建筑节能 (中英文), 2021, 49 (12) : 132-138.
- [5] 战秀梅, 韩晓日, 佟晔, 等. 高产施肥条件下玉米的光合特性研究 [J]. 杂粮作物,

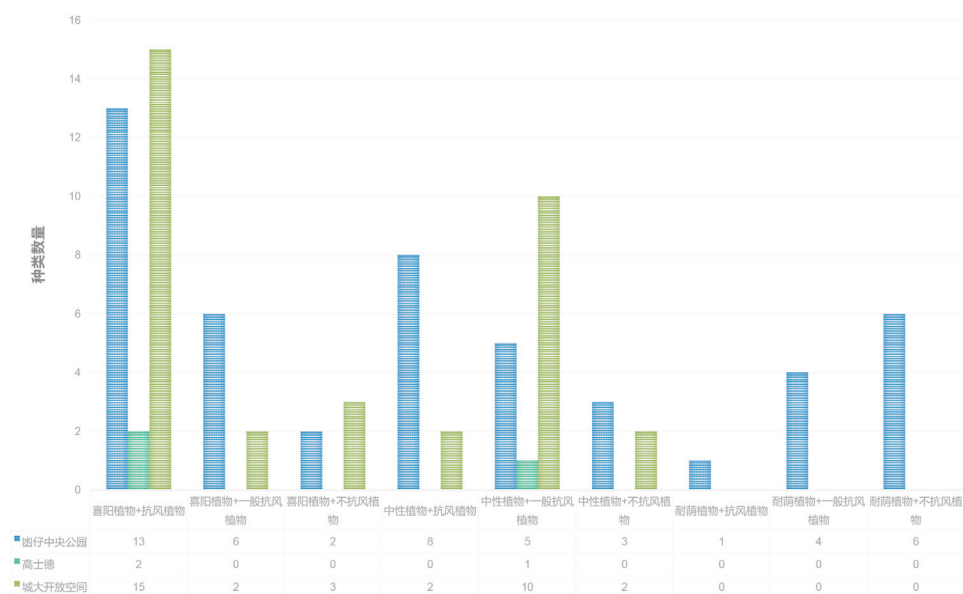


图 15 研究区域植物适应性匹配

Fig.15 Plant adaptability matching assessment in the study areas

2008 (4) : 251-254.

[6] 甄竹. 住宅空中庭院的气候适应性研究: 以第 II 建筑气候区为例 [D]. 邯郸: 河北工程大学, 2020.

[7] 白龙. 绿化对建筑周围风热环境及空气质量的影响研究 [J]. 建设科技, 2022 (14) : 34-36.

[8] 柯咏东, 桑建国. 小型绿化带对城市建筑物周围风场影响的数值模拟 [J]. 北京大学学报 (自然科学版), 2008 (4) : 585-591.

[9] GROMKE C, BUCCOLIERI R, DI SABATINO S, et al. Dispersion study in a street canyon with tree planting by means of wind tunnel and numerical investigations—evaluation of CFD data with experimental data[J]. Atmospheric Environment, 2008, 42 (37) : 8640-8650.

[10] 李霞, 王国栋, 薛绪掌, 等. 温室内不同风速对盆栽甜椒生长及蒸腾的影响 [J]. 农业工程学报, 2008, 24 (S2) : 214-218.

[11] 宋光辉. 谈树种选择上如何做到适地适树 [J]. 黑龙江科技信息, 2013 (35) : 245.

[12] 孙笑一. 适地适树与植物多样性的发展 [J]. 农业开发与装备, 2016 (2) : 76-77.

[13] 李志坚. 《农政全书》的生态环境思想 [J]. 乐山师范学院学报, 2010, 25 (2) : 92-95.

[14] 刘静源. 园林立体绿化中的植物配置和养护措施 [J]. 现代园艺, 2014 (8) : 145.

[15] NG W Y, CHAU C K. A modeling investigation of the impact of street and building configurations on personal air pollutant exposure in isolated deep urban canyons[J]. Science of the Total Environment, 2014, 468-469: 429-448.

[16] 曾明颖, 王仁睿, 王早. 园林植物与造景 [M]. 重庆: 重庆大学出版社, 2018: 368.

[17] HANG J, LI Y, SANDBERG M, et al. The influence of building height variability on pollutant dispersion and pedestrian ventilation in idealized high-rise urban areas[J]. Building and Environment, 2012, 56: 346-360.

[18] 王月明, 乔雨轩, 王楠楠, 等. 国内 CFD 模拟在城市微气候中的应用综述 [J]. 中国城市林业, 2021, 19 (2) : 53-60.

[19] QIN H, PAN L, WU X, et al. Investigating the Wind Flow Modulation of Tree Crown Morphology and Layout at Different Heights[J]. Forests, 2025, 16 (11) : 1698.

[20] LIU J, WU X, PAN L, et al. Multi-Scale Analysis of the Mitigation Effect of Green Space Morphology on Urban Heat Islands[J]. Atmosphere 2025, 16 (7) : 857.

[21] 安晓娇. 澳门高密度城区绿色空间营造策略研究 [D]. 北京: 北京建筑大学, 2020.

[22] 中国科学院华南植物园, 澳门民政总署园林绿化部. 澳门植物名录: 2004[M]. 广州: 中国科学院华南植物园, 2004.

[23] HSIEH C-M, JAN F-C, ZHANG L. A simplified assessment of how tree allocation, wind environment, and shading affect human comfort[J]. Urban Forestry & Urban Greening, 2016, 18: 126-137.

[24] PAN L, HSIEH C-M, YU C-Y. Do parks act as cool islands? a cross-scale evaluation of their daytime cooling dynamics through land surface temperature and thermal comfort in macau[J]. Sustainable Cities and Society, 2025, 130: 106617.

[25] 毛凯. 草坪植物与光照 [J]. 草业科学, 1997 (6) : 65-66, 71.

[26] 梅思雨, 潘丽宇, 谢俊民, 等. 典型夏季日情境下公园下垫面与遮阳对热舒适的影响关系研究 [C]// 台湾中国文化大学都市计划与开发管理学系. 都市规划专业学术交流: 台湾中国文化大学 X 澳门城市大学论文集. 2025.

[27] OKE T R. Street design and urban canopy layer climate[J]. Energy and Buildings, 1988, 11 (1-3) : 103-113.

[28] PENG M, HUANG H. The synergistic effect of urban canyon geometries and greenery on outdoor thermal comfort in humid subtropical climates[J]. Frontiers in Environmental Science, 2022, 10: 851810.

[29] ARMSON D, STRINGER P, ENNOS A R. The effect of tree shade and grass on surface and globe temperatures in an urban area[J]. Urban Forestry & Urban Greening, 2012, 11 (3) : 245-255.

[30] BOWLER D E, BUYUNG-ALI L, KNIGHT T M, et al. Urban greening to cool towns and cities: A systematic review of the empirical evidence[J]. Landscape and Urban Planning, 2010, 97 (3) : 147-155.

[31] NG W Y, CHAU C K. Evaluating the role of vegetation on the ventilation performance in isolated deep street canyons[J]. International Journal of Environment and Pollution, 2012, 50 (1-4) : 98-110.

[32] MORAKINYO T E, OUYANG W L, LAU K K L, et al. Right tree, right place (urban canyon): Tree species selection approach for optimum urban heat mitigation—development and evaluation[J]. Science of the Total Environment, 2020, 719: 137461.

[33] FORESTRY COMMISSION ENGLAND. The Urban Tree Manual: The Right Tree in the Right Place for a Resilient Future[R]. Bristol: Forestry Commission England, 2018.

作者简介:

周子明/2002 年生 / 女 / 山东东营人 / 硕士 / 澳门城市大学城市与可持续发展研究院 (澳门 999078) / 专业方向为城市热岛

潘丽宇/2000 年生 / 女 / 广西贵港人 / 博士 / 澳门城市大学城市与可持续发展研究院 (澳门 999078) / 专业方向为城市热岛与热舒适

陈润桦/1999 年生 / 女 / 浙江金华人 / 硕士 / 澳门城市大学城市与可持续发展研究院 (澳门 999078) / 专业方向为城市规划与设计

谢俊民 (* 通信作者) /1976 年生 / 男 / 台湾人 / 博士 / 澳门城市大学城市与可持续发展研究院 (澳门 999078) / 副教授 / 研究方向为城市热岛与热舒适 /E-mail: chunming@cityu.edu.mo