缓解城市热岛效应的通风廊道构建研究进展*

徐晨曦 张曦文 吴玲玲

广东工业大学建筑与城市规划学院 广州 510090

摘要：在全球气候变暖的背景下，构建通风廊道是缓解城市热岛效应的有效途径，对改善局地气候环境有重要作用。文章通过梳理 1995—2023 年国内外通风廊道相关研究文献，总结了城市通风廊道对缓解城市热岛效应的作用机制以及构建通风廊道的研究方法，并对当前缓解热岛效应的通风廊道建设标准、多尺度评估、协同规划、现状研究缺陷和未来发展方向进行探讨，旨在为城市热环境改善和可持续宜居城市建设提供参考。

关键词：城市；热岛效应；通风廊道；冷却效应

DOI：10.12169/zgcsly.2023.06.06.0002

Research Progress in Ventilation Corridors Construction to Mitigate Urban Heat Island Effect

Xu Chenxi Zhang Xiwen Wu Lingling

(School of Architecture and Urban Planning, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510090, China)

Abstract: Under the background of global warming, the construction of ventilation corridors is an effective way to mitigate the urban heat island effect, which plays a crucial role in improving local climate condition. By reviewing relevant literature on ventilation corridors in 1995 and 2023 at home and abroad, this paper summarizes the working mechanisms through which urban ventilation corridors alleviate the urban heat island effect, and concludes the research methodologies. Furthermore, the current standards for ventilation corridor construction aiming to mitigate the urban heat island effect, along with multi-scale assessments, collaborative planning, existing limitations in research and future development directions, have been discussed. The study is expected to provide references for improving urban thermal environments and constructing sustainable and livable cities.

Keywords: city; heat island effect; ventilation corridor; cooling effect

城市的快速增长导致城市下垫面结构急剧变化，这种由自然地表向城市使用土地变化的过程必然会对生态环境带来严重影响[1-3]。2022 年 7 月和 8 月，地表温度是自 1880 年以来的第六高[4]。未来城市将会面临更强烈的热岛效应和更频繁的热浪事件，因此，有效缓解城市热岛效应成为全球可持续发展的重要挑战。研究表明，构建城市通风廊道可有效缓解城市热岛效应[5-8]。

城市通风廊道通过将新鲜空气导入城市内部从而减轻城市热岛效应[9]。通风廊道在城市规划研究领域不仅影响区域气候、风热环境、空气质量和建筑能耗，还对城市生态过程产生间接影响[10]。许多地区已将通风廊道规划纳入城市规划

收稿日期：2023-06-06

* 基金项目：国家自然科学基金（42101273）；广东省自然科学基金（2024A1515010038）

第一作者：徐晨曦（1998- ），女，硕士生，研究方向为城市降温与生态规划。E-mail：xucxchancy@163.com

通信作者：张曦文（1993- ），女，博士，讲师，研究方向：景观生态与土地利用。E-mail：zhangxiwen@gdut.edu.cn

中，促进了通风廊道构建、环境效应及量化分析等方面的研究[11-13]。随着可持续发展理念的盛行和气候变化的挑战，城市通风廊道的研究也在不断深入与优化[14]。

文章通过中国知网（CNKI）、Web of Science、Google Scholar 数据库检索了 1995—2023 年通风廊道相关文献，梳理和总结通风廊道对缓解城市热岛效应的作用机制、研究方法和规划实践等内容。本研究旨在探讨通风廊道在城市热岛缓解中的潜力和可行性，为我国高质量发展目标下的城市降温规划与设计提供具有针对性的建议，同时会对城市通风廊道的时空格局优化及“双碳”目标实现等方面产生积极影响。

1　通风廊道缓解城市热岛效应的作用机制

城市热岛效应（Urban Heat Island Effect）是指城市中的空气温度明显高于城市外围郊区的现象[15]。构建城市通风廊道的主要目的是为城市外到建成区内的空气流动提供一条通道，改善城市热岛效应[16]。通风廊道通过创造开放的空间通道，利用周围风的流动实现自然通风，排出热岛区域积聚的热空气，并引入凉爽的外部空气，从而有效降低城市表面和周围环境的温度。德国学者 Kress[17] 根据局地环流运行规律将城市通风系统分为作用空间、补偿空间与空气引导通道，其中，作用空间是指需要改善风热环境的区域；补偿空间是指产生冷空气的区域；空气引导通道则是指为了引导空气流动而设计，可以将空气从补偿空间引导到作用空间的连接通道，即通风廊道[18]。

基于此机制，构建城市通风廊道缓解城市热岛效应的作用主要体现在 3 个方面：1）打破城市热岛环流，使城市周边的冷空气向城市建成区内转移，缓解城市热岛效应；2）增强城市内部空气的流动性，有利于防止城市区域出现局部高温的情况；3）分割大面积的城市空间，减小热岛的规模效应和叠加效应。

2　通风廊道模拟构建的技术方法

缓解城市热岛效应的通风廊道构建研究通常从城市和街区尺度展开，具体研究方法包括边界层风洞实验方法、计算机数值模拟法、基于 GIS 技术的形态分析方法（表 1）。

表 1　构建通风廊道的主要研究方法

主要研究方法		方法概述	优点	缺点
边界层风洞实验		结合常规气象资料，对空气流过研究区域时的详细变化进行客观的观测	便于实际操作；研究结果客观、真实；在方案设计阶段即可进行风环境评估	实验所需人力、物力成本较高；模拟范围有限；对物理模型精度要求严格
计算机数值模拟	CFD 软件	对区域空气流动形成的温度场、速度场结果进行直观显示。构建模型进行城市微气候模拟，评估各类城市热岛效应缓解策略的功效	分辨率高；模拟所需人力、物力成本相对较低；可通过相关参数的设置进行策略验证模拟；结果直观详细	计算复杂及背景信息获取困难；无法准确进行大尺度模拟；模型假设和参数设定较为复杂；无法完全模拟高度复杂的实际情况
	WRF 模型	采用物理参数化方案、建筑参数化、边界条件和后处理评估等方法，模拟和预测城市和地区的热环境变化。通过考虑各因素，提供详细的温度、湿度、风速和风向等气象参数	具有多尺度模拟能力；可扩展性、易于维护、操作简单；能弥补气象站点数据缺失或精度不足等问题	需要高性能计算设备；受空间分辨率限制可能无法完全捕捉城市细小尺度特征
基于 GIS 技术的形态分析	最小成本路径模型	研究地理空间中最优路径选择的方法，通过准备数据、生成成本表面、搜索最小成本路径、评估和调整路径，并进行可视化和结果分析，实现路径选择的优化和规划	综合性强；足够的空间分析能力；计算效率高；结果直观；可提供可视化和定量分析	数据要求高，前期数据获取和处理工作量大；对于复杂的现实情况存在一定局限性

2.1　边界层风洞实验方法

边界层风洞实验方法是结合常规气象资料模拟和研究城市通风环境[19-20]。从 1960 年代起，风洞实验就被引入到城市通风环境的研究中，为城市通风规划提供了技术支撑。例如，关吉平等[21]对上海某拟建大楼周边进行了风洞试验，发现该建筑大部分区域的通风和舒适性都达到了要求，但一些建筑边缘区需要进行改造。该方法虽能够对城市通风流场的详细变化进行客观测量，但会受到高实验成本、模拟范围有限和物理模型

的精度等限制，大多数研究仅限于街区尺度。

2.2 计算机数值模拟法

在通风廊道的研究中，常用的计算机数值模拟方法包括计算流体动力学软件（Computational Fluid Dynamics，CFD）和中观气象模型（Weather Research and Forecast Model，WRF）。

CFD 软件通过数值模拟直观显示区域空气流动的温度场和速度场，以验证中小尺度区域的气候效应或单个地块的热岛效应缓解策略的性能[22]。例如，尹杰和詹庆明[23]将地理信息系统和 CFD 的方法相结合，评估街道的通风潜力，并综合建筑迎风面积密度提取了武汉市的通风廊道。然而，由于计算量大及获取大区域背景信息困难，CFD 通常用于小规模、高分辨率的流体模拟[24]。因此，该方法主要用于中小尺度的风道识别和局部地块的验证评估。

为了弥补 CFD 软件的不足，近年来一些学者将中观气象模型 WRF 和 CFD 模式结合，利用 WRF 模型所提供的大范围环流信息，以实现更精确的通风廊道构建[25-26]。此方法是利用土地利用数据以及常规和自动气象站数据在 WRF 中进行模拟，通过城市三维数据、风向和风速等参数，评估城市通风潜力并构建通风廊道。然而，传统的 WRF 模拟对城市下垫面的描述较为简化，未能充分考虑城市下垫面结构的不均匀性以及城市建筑对低层大气的动力、热力特征和地面能量平衡的影响[27]。因此，一些研究采用城市冠层模型（Urban Canopy Model，UCM）与 WRF 模式耦合以提升 WRF 模拟的表现[28]。

2.3 基于 GIS 技术的形态分析方法

在气象数值模拟的基础上，借助地理信息系统 GIS 技术可以使获取的通风廊道信息更加详实[29]。其中，最具代表性的方法是利用最小成本路径（Least Cost Path，LCP）模型，计算下垫面的表面粗糙度来分析城市通风环境[30]。该方法的实现是基于天空开阔度指数和表面粗糙度指数开发通风阻力系数模型，结合城市主导风向和最小成本路径（LCP）模型构建城市通风廊道[12]。这种方法已取得了许多建设性的成果，并得到了证实[31-33]。然而，该方法无法识别通风廊道宽度和评估没有最小成本路径的区域通风条件。因此，有研究在此基础上结合电路理论进行通风廊道识别，能覆盖整个研究区域内的全部栅格点，从而改善了最小成本路径法的不足[34]。

3 通风廊道的规划实践探索

3.1 通风廊道建设标准研究

不同的通风廊道建设标准会产生差异化的空间特征，进而对城市风热环境和缓解城市热岛效应的效果产生影响。国内外对城市通风廊道的建设标准进行了大量研究[35-36]，主要从廊道宽度、长度和走向等方面确定（表 2）。较早是德国学者 Kress[37]基于城市下垫面气候功能评价，从廊道宽度、长度以及地块控制提出城市通风廊道的建设标准。在此基础上，其他国外学者对廊道走向进行了研究[38-39]。国内相关研究起步较晚，国内学者梁颢严等[40]借鉴国外经验并结合国内实际，将廊道宽度、廊道走向及地块控制作为控制指标，提出通风廊道的建设标准。由于在实际规划中存在已建成的城市环境，廊道建设标准的落实存在一定困难，因此，有关针对已建成的城市环境进行有效且易落实的通风廊道的研究仍需加强。

表 2 国内外通风廊道建设标准

学者	廊道宽度/m	廊道长度/m	廊道走向/(°)	地块控制
KRESS	>30;50 最佳	≥500;1000 以上最佳	—	障碍物垂直于气流方向的宽度应尽量小于等于通道总宽度的 10%,高度不超过 10 m,相邻两个障碍物高度与水平间距的比值不应超过 0.1(建筑物)与 0.2(树木)
吉沃尼、布朗	>100	—	与主导风向夹角≤30	—
梁颢严	主通风廊道:≥150 次通风廊道:≥80	—	与主导风向夹角≤45	建设用地比例≤25%;建筑密度≤30%;相邻界面高宽比≤1,开放度≥30%
党冰	主通风廊道:≥200 次通风廊道:≥120 城区局部通风廊道:≥60	主通风廊道:≥4 000 次通风廊道:≥2 000 城区局部通风廊道:≥1 000	与主导风向夹角≤30	主通风廊道内建设用地比例≤20%;次通风廊道内建设用地比例≤25%;城区局部通风廊道内建设用地比例≤30%

3.2　多尺度通风廊道效应评估

3.2.1　城市群尺度评估

城市群尺度通风廊道的评估是对宏观层面 50~500 km 范围内通风环境的评估。该评估是在充分认识区域风热环境的基础上，将城市群内涉及通风廊道的城市联合起来，开展“联防”“协同”和“共治”。例如，张少康等[41]利用 WRF 模拟探索城市群通风廊道的识别技术与分析方法，构建珠三角城市群通风廊道体系。目前，对于城市群尺度下的通风廊道评估多在引导与控制层面，或与生态廊道结合，而系统科学的定性和定量评估及区域协同方面仍有待深入研究。

3.2.2　城市尺度评估

城市尺度通风廊道的评估是对中观层面 1~50 km 的通风环境状况进行评估。最早是斯图加特市引入城市尺度通风廊道体系，成功改善了空气流动状况[42]。在亚洲地区，日本率先提出分层管理通风廊道的概念，建立主要风道系统引入新鲜空气缓解城市热岛[43]。国内由于近年来受城市化进程速度的影响，诸多城市相继开展了城市尺度的通风廊道研究[44-46]。目前的城市尺度评估研究多通过观测和模拟调整规划布局与建筑形态来缓解城市热岛效应。随着计算机技术和模拟方法的发展，未来可能会探索其他创新的评估方法，使通风廊道的构建更具科学性与前瞻性。

3.2.3　街区尺度评估

街区尺度通风廊道的评估是指针对微观层面 10~1 000 m 城市局部通风环境进行评估，涉及街道宽度、建筑立面设计、绿化覆盖率和周围建筑物的影响等因素。周志宇等[47]通过对比不同住区夏季室外温度和风速空间分布，探讨建筑布局与风热环境的关系。还有研究对街区的通风指标进行综合分析，以评价不同城市街区的综合通风效能，例如，马童和陈天[48]通过城市规划指标与各通风效能指标及总体通风效能的相关性分析，研究通风效能与城市街区形态的关系。

3.3　通风廊道的协同规划

3.3.1　通风廊道与城市结构的协同

不同的城市结构会产生不同的空间特征，从而影响通风廊道的有效性。城市结构中城市形态是重要影响因素之一。陈日飙等[49]基于城市形态在“双循环”+“多尺度”的风环境评估路线下，探讨了城市用地属性对局地气候的敏感性差异。除此之外，合理的城市空间结构也是通风效应的重要影响因素。冯娴慧[50]对城市圈层、轴带及组团结构对城市通风的影响进行了全面分析，并提出了针对不同城市结构的策略以改善城市通风情况。

3.3.2　通风廊道与蓝绿空间的协同

蓝绿空间作为通风网络的重要载体，通过引风、导风和串风等策略发挥作用。城市边缘地带的多样化蓝绿空间为通风廊道提供新鲜空气来源即引风。王绍增和李敏[51]建议，对于作为氧源地的绿地，应根据不同情况将风玫瑰平均瓣长按一定倍数放大，以此得到其范围和形状。导风通常以绿廊或蓝道等形式串联公园和湖泊。由于城市已建成环境的客观性和城市下垫面复杂性的限制，要实现通风廊道内部空气的良好流动，需充分利用蓝绿空间。例如，张雅妮等[52]利用 ENVI-met 模拟了河道两侧的城市空间界面，合理利用开敞空间引导河风进入城市街区，有效改善了城市的小气候环境。

3.3.3　通风廊道与城市路网的协同

通风廊道与城市路网的协同是为了在城市规划中充分利用道路系统优化通风廊道的效果。柏春[53]通过分析不同路网形式的通风特性，基于路网形式、疏密度、顺畅度以及方位等提出了城市通风廊道与城市路网的协同规划方案。此外，构建通风廊道时，道路常作为重要通风通道。例如，毛蒋兴等[54]在构建南宁市广义降温通道时，提出了“一轴、四廊、两道”的城市降温框架，其中“两道”指的就是沿城市主干道及其沿线林荫道所形成的与主导风向平行的降温通道。

3.4　国内城市通风廊道规划实践及其成果

在实施生态文明建设战略的背景下，城市通风廊道规划作为重要举措在城市规划中得到广泛应用。如北京市在《北京城市总体规划（2016—2035 年）》中指出构建多级通风廊道系统，并在通风廊道的区域内严格控制建设规模。广州市与世界银行合作开展“中国可持续发展城市降温项目”试点工作，旨在推动广州“酷城”行动，探索可持续、可负担的城市降温综合解决方案。在

《广州市国土空间生态修复规划（2021—2035年）》中结合生态廊道控制构建市域6条通风廊道。佛山市为治理大气污染工作进行了《佛山市通风廊道专项规划（2018—2035年）》，通过对城市热环境、风环境、建成环境以及城市通风潜力进行评估，确定形成“6主28次风道、37处入风口、3主5次补偿空间、作用空间”的通风系统框架。综上可知，通风廊道在实践中通常具有分级确定、控制与优化相结合的共性。随着国家对于城市可持续发展的重视，相关标准和政策的出台明确了通风廊道规划的重要性和应用要求，促使我国大多数省级行政单元自主开展通风廊道规划，为城市可持续发展和生态环境改善提供了重要支持。

4 展望

文章系统回顾并总结了缓解城市热岛效应的通风廊道构建的相关研究，讨论了不同研究对缓解城市热岛效应的重要性，并梳理了已有研究存在的问题：1）通风廊道的建设标准缺乏针对特定城市环境或不同城市气候的定制化，重视“风道”而忽视规划实施和系统要素。建设标准在区域协同层面缺乏定性与定量结合的研究。2）在不同尺度下构建通风廊道缺乏综合性和系统性。宏观尺度下的规划难以与微观尺度的实施相协调，往往会受到周围已建成环境的影响，导致规划理念难以实施和落地，最终导致通风廊道缓解热岛效应的效果不如预期。3）通风廊道建设主要依赖于模拟软件的理论结果，缺乏实地观测数据的支撑，对已建设或规划建设的通风廊道缺乏后续实地观测和跟踪；相关成果主要基于理论分析，缺乏实践层面的有效验证。4）通风廊道的作用效果通常只考虑当前的降温效应，缺乏对其持续降温能力的评估和验证。

因此，未来的研究重点应集中在以下4个方面：1）增强通风廊道可行性。增加对不同城市环境与气候背景下城市通风廊道构建的对比研究，制定具有针对性和系统性的通风廊道建设标准，注重规划与实践的结合，加强区域层面的定性与定量研究，以提升通风廊道的实际效果和适应性。2）与城市现有功能融合。综合考虑多个要素之间的相互作用和协同效应，可借助未来城市功能疏解、存量用地更新的契机以及城市低效用地集约利用构建城市通风廊道。3）通风廊道构建可持续性验证。建立和完善评价体系以评估通风廊道在缓解城市热岛效应方面的效果，考虑未来城市的扩张趋势，适应不同发展阶段的可持续性，进行通风廊道可持续降温效应的评估，以确保其长期有效地提供降温和改善环境的功能。4）通风廊道效应拓展。未来的通风廊道研究应更加多元化和综合化，应不再局限于关注通风廊道对缓解城市热岛效应的问题，还可以拓展至城市通风廊道用于城市安全、城市韧性以及城市低碳规划等。

参考文献

[1] RUIZ-PÁEZ R, DÍAZ J, LÓPEZ-BUENO J A, et al. Does the meteorological origin of heatwaves influence their impact on health? A 6-year morbidity and mortality study in Madrid (Spain) [J]. Science of the Total Environment, 2023, 855: 158900.

[2] TURNER B L, LAMBIN E F, REENBERG A. The emergence of land change science for global environmental change and sustainability [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2007, 104(52): 20666-20671.

[3] 樊柏青，刘东云，李丹宁，等. 北京市六环内区域城市绿地对地表温度降温效益的差异性[J]. 中国城市林业，2022，20(4)：43-50.

[4] NOAA National Centers for Environmental Information. Monthly global climate report for Annual 2022[R/OL]. [2023-06-06]. https://www.ncei.noaa.gov/access/monitoring/monthly-report/global/202207.

[5] LAI C C, SHIH T P, KO W C, et al. Severe acute respiratory syndrome coronavirus 2 (SARS-CoV-2) and coronavirus disease-2019 (COVID-19): the epidemic and the challenges [J]. International Journal of Antimicrobial Agents, 2020, 55(3): 105924.

[6] HE B J, DING L, PRASAD D. Relationships among local-scale urban morphology, urban ventilation, urban heat island and outdoor thermal comfort under sea breeze influence [J]. Sustainable Cities and Society, 2020, 60: 102289.

[7] ANFINRUD P, STADNYTSKYI V, BAX C E, et al. Visualizing speech-generated oral fluid droplets with laser light scattering [J]. The New England Journal of Medicine, 2020, 382(21): 2061-2063.

[8] LUO X, YANG J, SUN W, et al. Suitability of human settlements

in mountainous areas from the perspective of ventilation: a case study of the main urban area of Chongqing[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 310: 127467.

[9] SHI Z P, YANG J, ZHANG Y Q, et al. Urban ventilation corridors and spatiotemporal divergence patterns of urban heat island intensity: a local climate zone perspective [J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2022, 29(49): 74394-74406.

[10] YANG J, WANG Y C, XUE B, et al. Contribution of urban ventilation to the thermal environment and urban energy demand: different climate background perspectives [J]. Science of the Total Environment, 2021, 795: 148791.

[11] 邹哲, 康健, 周志宇, 等. 特大城市主城区通风廊道规划控制研究: 以天津市为例[J]. 建筑科学, 2019, 35(6): 91-97, 107.

[12] FANG Y H, ZHAO L Y. Assessing the environmental benefits of urban ventilation corridors: a case study in Hefei, China [J]. Building and Environment, 2022, 212: 108810.

[13] CHEN C X, YE S P, BAI Z C, et al. Intelligent mining of urban ventilation corridors based on high-precision oblique photographic images[J]. Sensors, 2021, 21(22): 7537.

[14] GU K K, FANG Y H, QIAN Z, et al. Spatial planning for urban ventilation corridors by urban climatology[J]. Ecosystem Health and Sustainability, 2020, 6(1): 1747946.

[15] 白杨, 王晓云, 姜海梅, 等. 城市热岛效应研究进展[J]. 气象与环境学报, 2013, 29(2): 101-106.

[16] 房小怡, 李磊, 刘宛, 等. 我国城市通风廊道研究与实践进展[J]. 生态学杂志, 2021, 40(12): 4088-4098.

[17] KRESS R. Regionale Luftaustauschprozesse und ihre Bedeutung für die räumliche Planung [M]. Dortmund: Institut for Umweltschutz der Universitat Dortmund, 1979.

[18] 刘姝宇, 沈济黄. 基于局地环流的城市通风道规划方法: 以德国斯图加特市为例[J]. 浙江大学学报(工学版), 2010, 44(10): 1985-1991.

[19] TSE K T, WEERASURIYA A U, ZHANG X, et al. Pedestrian-level wind environment around isolated buildings under the influence of twisted wind flows[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2017, 162: 12-23.

[20] XIE P, YANG J, WANG H Y, et al. A New method of simulating urban ventilation corridors using circuit theory [J]. Sustainable Cities and Society, 2020, 59: 102162.

[21] 关吉平, 任鹏杰, 周成, 等. 高层建筑行人高度风环境风洞试验研究[J]. 山东建筑大学学报, 2010, 25(1): 21-25.

[22] WANG W W, WANG D, CHEN H, et al. Identifying urban ventilation corridors through quantitative analysis of ventilation potential and wind characteristics [J]. Building and Environment, 2022, 214: 108943.

[23] 尹杰, 詹庆明. 基于 GIS 和 CFD 的城市街道通风廊道研究: 以武汉为例[J]. 中国园林, 2019, 35(6): 84-88.

[24] CHANG S Z, JIANG Q G, ZHAO Y. Integrating CFD and GIS into the development of urban ventilation corridors: a case study in Changchun city, China[J]. Sustainability, 2018, 10(6): 1814.

[25] 郑祚芳, 雷小燕, 高华. 北京城市通风廊道研究Ⅰ: 环境效应模拟[J]. 地理科学, 2022, 42(4): 631-639.

[26] 成丹, 许杨, 刘静, 等. 武汉市东南部通风廊道构建和气象效应研究[J]. 长江流域资源与环境, 2022, 31(11): 2500-2513.

[27] 莫尚剑, 沈守云, 廖秋林. 基于 WRF 模式的长株潭城市群绿心通风廊道规划策略研究[J]. 中国园林, 2021, 37(1): 80-84.

[28] 颜廷凯, 金虹. 基于 WRF/UCM 数值模拟的严寒地区城市热岛效应研究[J]. 建筑科学, 2020, 36(8): 107-113.

[29] LIU D D, ZHOU S H, WANG L J, et al. Research on the planning of an urban ventilation corridor based on the urban underlying surface taking Kaifeng city as an example[J]. Land, 2022, 11(2): 206.

[30] QIAO Z, XU X L, WU F, et al. Urban ventilation network model: a case study of the core zone of capital function in Beijing metropolitan area[J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 168: 526-535.

[31] DANG B, LIU Y H, LYU H L, et al. Assessment of urban climate environment and configuration of ventilation corridor: a refined study in Xi'an[J]. Journal of Meteorological Research, 2022, 36(6): 914-930.

[32] FANG Y H, GU K K, QIAN Z, et al. Performance evaluation on multi-scenario urban ventilation corridors based on least cost path[J]. Journal of Urban Management, 2021, 10(1): 3-15.

[33] LIU X Q, HUANG B, LI R R, et al. Wind environment assessment and planning of urban natural ventilation corridors using GIS: Shenzhen as a case study[J]. Urban Climate, 2022, 42: 101091.

[34] 申鑫杰, 赵芮, 何瑞珍, 等. 郑州市市区风环境模拟研究[J]. 地球信息科学学报, 2020, 22(6): 1349-1357.

[35] 杨务发, 余坤勇, 耿建伟, 等. 福州市通风廊道选线与优化[J]. 中国城市林业, 2022, 20(4): 123-128.

[36] 党冰, 房小怡, 吕红亮, 等. 基于气象研究的城市通风廊道构建初探: 以南京江北新区为例[J]. 气象, 2017, 43(9): 1130-1137.

[37] KRESS R. Regionale Luftaustauschprozesse und ihre Bedeutung für die räumliche Planung [M]. [Bonn-] Bad Godesberg: Bundesminister für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau, 1979

[38] 布朗 G Z, 马克·德凯. 太阳辐射·风·自然光: 建筑设计策略[M]. 常志刚, 刘毅军, 朱宏涛, 译. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.

[39] 巴鲁克·吉沃尼. 建筑设计和城市设计中的气候因素[M]. 汪芳, 阚俊杰, 张书海, 译. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.

[40] 梁颢严, 李晓晖, 肖荣波. 城市通风廊道规划与控制方法研究以《广州市白云新城北部延伸区控制性详细规划》为例[J].

风景园林,2014(5):92-96.
[41]张少康,刘沛,魏冀明.基于风环境分析的珠三角地区城镇空间规划引导[J].规划师,2016,32(9):118-122.
[42]任超,吴恩融,卢茨·卡施纳.城市环境气候信息在德国城市规划中的应用及其启示[J].国际城市规划,2013,28(4):91-99.
[43]KUSAKA H,KIMURA F,HIRAKUCHI H,et al.The effects of land-use alteration on the sea breeze and daytime heat island in the Tokyo metropolitan area[J].Journal of the Meteorological Society of Japan Ser II,2000,78(4):405-420.
[44]韩旭.基于气候功能评估的城市通风廊道规划建设:以西安市主城区为例[J].建筑与文化,2021(4):154-155.
[45]向艳芬,郑伯红,郭睿,等.基于空间封闭度的城市通风廊道构建:以衡阳县城为例[J].热带地理,2023,43(8):1523-1535.
[46]刘名瑞,曾勤,邓玮,等.重点地区城市设计的风环境评估及规划管控研究:以广州市为例[J].城市规划学刊,2021(4):35-42.
[47]周志宇,康健,舒平,等.建筑布局对住区风热环境的影响分析与优化策略[J].济南大学学报(自然科学版),2023,37(3):349-361.
[48]马童,陈天.公共健康视角下城市街区综合通风效能与规划响应研究[J].西部人居环境学刊,2022,37(2):39-46.
[49]陈日飙,陈竹,尹名强,等.通风节能视角中多尺度的风环境评估方法研究:以深圳后海中心区为例[J].南方建筑,2023(2):77-87.
[50]冯娴慧.城市的风环境效应与通风改善的规划途径分析[J].风景园林,2014(5):97-102.
[51]王绍增,李敏.城市开敞空间规划的生态机理研究(下)[J].中国园林,2001,17(5):32-36.
[52]张雅妮,殷实,肖毅强.气候适应性视角下的河道空间城市设计评价和策略研究:以广州市荔枝湾涌改造一期工程为例[J].西部人居环境学刊,2018,33(3):73-79.
[53]柏春.城市路网规划中的气候问题[J].西安建筑科技大学学报(自然科学版),2011,43(4):557-562.
[54]毛蒋兴,古艳,蒙金华,等.基于热岛效应的城市广义降温通道构建[J].规划师,2015,31(12):65-71.