

DOI: 10.20103/j.stxb.202310292343

方云皓, 顾康康. 城市通风廊道研究综述. 生态学报, 2024, 44(13): 5444-5458.

Fang Y H, Gu K K. Review of urban ventilation corridor research: characteristics and progress. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(13): 5444-5458.

城市通风廊道研究综述

方云皓^{1,2}, 顾康康^{3,4,*}

1 华中科技大学建筑与城市规划学院, 武汉 430074

2 湖北省城镇化工程技术研究中心, 武汉 430074

3 安徽建筑大学建筑与规划学院, 合肥 230601

4 安徽省国土空间规划与生态研究院, 合肥 230022

摘要: 通风廊道对于城市气候适应性提高以及人居环境品质改善具有重要意义, 开展综述分析有利于对城市通风廊道研究进行系统梳理。既往综述研究过多强调通风廊道的理论框架、实践案例与规划编制, 对通风廊道的构建方法及效应维度关注不足。总结了城市通风廊道的概念内涵、系统构成与研究进展, 并指出其与城市风环境的关联, 从微观与宏观尺度分别梳理了城市通风廊道的构建方法, 归纳微观尺度方式为基于现状或模拟气流的观测, 包括实地测量法、风洞实验法与计算机数值模拟法, 宏观尺度方式为基于空间形态指标的通风路径测度, 具体涵盖建筑形态指标选取、评价体系构建、空间路径生成 3 个步骤。研究也对城市通风廊道的效应维度、管控措施与规划实践进行概括, 指出其效应维度主要聚焦于引风、降温、除霾, 管控措施以指标预警方式为主, 规划实践具有因地制宜的特征。未来研究应结合电路理论挖掘新的通风廊道构建方法与模型, 从低碳与健康两个方面拓宽通风廊道效应维度, 同时尝试利用多学科交叉的方式处理通风廊道研究尚存的矛盾争议。

关键词: 城市通风廊道; 城市风环境; 空间形态; 构建方法; 引风-降温-除霾; 指标预警

Review of urban ventilation corridor research: characteristics and progress

FANG Yunhao^{1,2}, GU Kangkang^{3,4,*}

1 School of Architecture and Urban Planning, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China

2 Hubei Engineering and Technology Research Center of Urbanization, Wuhan 430074, China

3 School of Architecture and Planning, Anhui Jianzhu University, Hefei 230601, China

4 Anhui Institute of Land Spatial Planning and Ecology, Hefei 230022, China

Abstract: Ventilation corridor is crucial to the improvement of urban climate adaptation and the quality of the human environment. A review is helpful to promote the systematic organization of urban ventilation corridor research. Previous review studies have focused on the theoretical framework, practice cases, and planning codification of ventilation corridors, with little attention to their construction methods and effect dimensions. First, this paper summarized the conceptual connotation, systematic composition and research progress of urban ventilation corridors and pointed out their association with the urban wind environment. Second, the study illustrated the construction methods of urban ventilation corridors at micro and macro scales, respectively. The micro-scale method was based on the observation of the current or simulated airflow, including the field measurement method, wind tunnel experiment method, and computational fluid dynamics (CFD) method. The macro-scale approach was based on the measurements of ventilation paths via spatial morphology indicators, which included three steps: the selection of architectural morphology indicators, the construction of the evaluation system, and the generation of spatial paths. Third, the study provided an overview of the effect dimensions,

基金项目: 安徽省自然科学基金(2008085ME160)

收稿日期: 2023-10-29; 网络出版日期: 2024-04-25

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: kangkangu@163.com

control measures, and planning practices of urban ventilation corridors. We pointed out that the effect dimensions mainly included wind diversion, cooling and haze removal, the control measures were based on the indicator warning method, and the planning practices were characterized by local adaptation. Furthermore, future research could combine circuit theory with new methods and models for constructing ventilation corridors, broaden the dimensions of ventilation corridor effects from low-carbon or health aspects, and try to utilize a multidisciplinary approach to deal with the contradictory controversies that still exist in ventilation corridor research.

Key Words: urban ventilation corridor; urban wind environment; spatial morphology; construction method; induced wind-cooling-haze removal; indicator warning

全球气候环境问题给人类社会的可持续发展带来了严峻挑战,已成为 21 世纪最广泛、最紧迫、最难解决的问题之一^[1]。作为人口和资源集中的区域,城市面临的气候问题更为严峻,急剧扩大的城市规模和高强度的开发模式导致人工环境大规模侵占自然环境,致使局地气候发生改变的同时也威胁着城市居民的健康^[2]。面对日益严峻的城市气候环境问题,城市通风廊道研究被逐渐纳入部分城市或地区的发展战略及政策中,其已成为政府、学者以及公众等社会各界密切关注的重要议题。

当前对于以城市通风廊道为主题,开展基本特征、存在问题和发展趋势的综述型研究较少,其大多以中文文献为主,发表人员也主要为中国学者。任超等^[3]对开展通风廊道实践的城市进行梳理和汇总,重点介绍了德国斯图加特、日本东京都、中国香港和武汉 4 个城市(区域)的通风廊道建设情况,解析通风廊道设计在区域、城市及街区层面的应用策略;张沛等^[4]从城市通风廊道的系统、功能、建设标准及规划策略等方面总结其理论研究,同时以国外的斯图加特市与国内的香港等地为例,通过实践案例对城市通风廊道的探索性建设经验进行论述。王伟武等^[5]在归纳城市风道的形成机制与规划理论的基础上,概括了国内外城市通风廊道的规划实践工程,重点强调了德国和日本的实践历程和内容。张睿等^[6]从实地测量法、风洞实验法、计算机数值模拟法(Computational Fluid Dynamics, CFD)3 个方面介绍了城市风环境的分析方法,概述了宏观与微观尺度下城市通风廊道的相关研究进展。王鹏等^[7]从发表时间、资助情况、学科合作方面分析中国 2001—2017 年城市通风廊道规划研究文献,对国内城市通风廊道规划的理论架构、技术与方法、建设与管理进行总结评述,提出了通风廊道的应用方向及要点。房小怡等^[8]强调中国通风廊道规划研究与实践经历了 4 个发展阶段,总结了城市通风廊道在技术方法、应用策略和政策法规方面的进展。许涛等^[9]基于 1999—2019 年知网和 Web of Science 数据库的文献源,对国内外通风廊道研究概括(包括发文数量、关键词、机构合作关系等)进行文献计量分析,梳理总结了国内外通风廊道的研究历程。冀泓宇等^[10]侧重于从缓解热岛效应的层面,对 1980—2022 年收录在知网、维普以及万方数据库的通风廊道文献进行梳理与研究热点总结,包括通过数值模拟法识别通风廊道、在风景园林视角下构建通风廊道、城市形态定量研究 3 个方面。王冠等^[11]以街谷因子、建筑密度和迎风面积比 3 类城市形态指标为代表,对中微观尺度下城市下垫面形态因子与风环境的关联性研究进行梳理,指出未来相关研究可向发掘并完善相关城市形态参数、阐明非稳态条件下城市下垫面多因子的影响机制、完善与应用风环境评估指标体系 3 个方向拓展。

综上,既往城市通风廊道综述研究对于其理论框架、实践案例与规划编制较为关注,忽略了对通风廊道技术方法的系统总结,对于通风廊道效应维度的关注也较少。鉴于此,本文系统梳理城市通风廊道研究的特征与进展,包括其概念内涵、构建方法、效应维度、管控措施、规划实践与未来发展趋势等,旨在①系统整合、总结和评估已有的城市通风廊道研究成果,提高对城市通风廊道研究特征和进展的全面认识,为城市通风廊道理论与方法研究提供借鉴、参考和指引;②深化对城市通风廊道与气候适应性城市建设的理解,为城市规划、气象灾害防治以及城市可持续发展政策提供科学实践依据。

1 城市通风廊道概念内涵与研究进展

“城市通风廊道”一词源于德语的“Ventilationsbahn”,其中“Ventilations”的含义为“通风”,“Bahn”代表

“廊道”^[12]。国内相关学者在此基础上提出了包括“通风走廊^[13]”、“绿色廊道^[14]”以及“通风道^[15]”等概念, 其在内核含义上略有侧重, 直到 2006 年《香港规划标准与准则(第十一章: 城市设计指引)》的颁布才首次明确并统一了城市通风廊道的定义和功能。之后, 中国气象局分别于 2015 年、2018 年发布了《城市通风廊道规划技术指南(第 1 版)》与《气候可行性论证规范(城市通风廊道)》, 对城市通风廊道概念进行了系统性阐述, 即城市通风廊道是以促进大气良性循环、缓解热岛效应、改善城市空气品质、提升体感舒适度为目的, 为城区引入新鲜、冷湿空气而构建的空间通道。

1.1 城市通风廊道系统构成

城市自然通风来源于由风压差及热压差形成的局地环流系统。据此, 德国斯图加特市最早开展了城市通风廊道实践, 并提出了相应的通风廊道理论和编制技术办法^[16]。依据德国通风廊道评价标准, 城市通风廊道系统主要由补偿空间(Ausgleichsraum)、作用空间(Wirkungsraum)与空气引导通道(Luftleitbahn)构成^[12], 如图 1 所示。

作用空间指风环境亟需改善的建成或待建区域, 主要表征为高强度建设区、人口密集街区以及热量浊气集聚区; 补偿空间包含新鲜空气的来源区域、冷空气生成区域以及能够激发空气循环的热补偿或空气调节区域, 其往往以湖泊、水库、山谷、近郊林地、城市绿地等大型蓝绿空间为载体; 空气引导通道被定义为将补偿空间的空气连接至作用空间的通道, 在类型上依据流动气体特征可被划分为通风道(Ventilationsbahn)、新鲜空气通道(Frischlufthahn)与冷空气通道(Kaltluftbahn)^[17]。补偿空间、作用空间与空气引导通道作为城市通风廊道系统的基本构成, 具有“产生(源)-输送(流)-影响(汇)”的全过程属性^[18]。

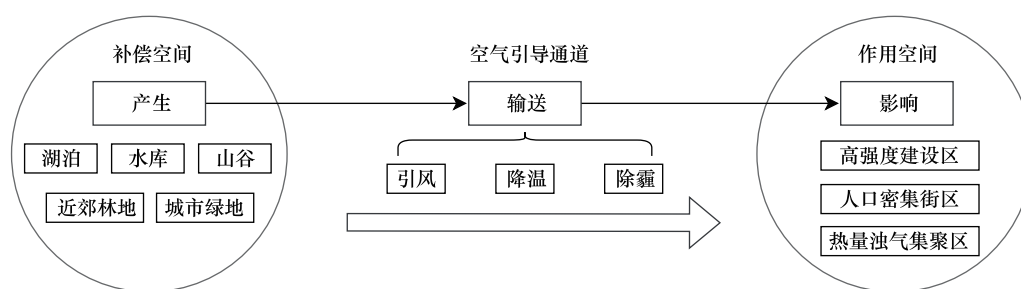


图 1 补偿空间、作用空间与空气引导通道的逻辑关联

Fig.1 Correlation between compensation space (Ausgleichsraum), effective space (Wirkungsraum), and ventilation path (Luftleitbahn)

1.2 城市通风廊道与城市风环境

城市背景风环境解析是研究通风廊道的重要前提。城市背景风环境指城市中风的状况、特征与变化情况, 包括风速、风力(湍流)、风向等, 一般可利用气象站点数据^[19]或实地监测数据^[20]获取。既往研究往往强调背景风环境分析是通风廊道研究的首要环节, 但对于通风廊道与风环境的联系尚未作系统性介绍^[21-22]。本研究尝试从风速、风力(湍流)、风向 3 个重要参数就二者的联系进行扩展解读(图 2):

①风速指单位时间内空气运动的速度。由于风速直接影响空气的流动情况, 其又被视为对通风廊道选址和分布影响最显著的背景风环境因子。一般而言, 通风廊道往往布置在整体风速较高或具有较大通风潜力的区域, 换言之, 若某个区域为静风区或整体风速较低, 则不适合构建通风廊道^[23]。此外, 风速因子也可被用于检验通风廊道构建是否合理的指标(通风廊道内部的整体风速值往往高于相邻或其他区域)^[24]。

②风力指空气流动时产生的湍流程度。目前在分析城市背景风环境时, 主要借助 CFD 技术对风力(湍流)进行模拟仿真计算。在城市范围内, 通风廊道的规划与设计涉及到源点(补偿空间)和终点(作用空间)的选取, 而解析两种区域内风力(湍流)的性质和特点为研判其选取合理性的标准之一。一般而言, 源点处应当具有强湍流属性, 能够为通风廊道提供更强风压与更多的风能^[25], 终点处应当具有高弥散性的空气流动特征^[26], 有助于将空气污染物和热量稀释和排除。

③风向指风吹来的方向,通常用 16 位罗盘方位表示。风向频率表示某一时期某风向的出现次数占总观测次数的百分比,其中最大风频的风向角范围合集可表征为主导(盛行)风向,其在类型上可划分为年均主导风向^[27]与季节主导风向^[28],在数量上一般包含一个或多个。通风廊道的构建一般以城市主导风向为依据^[27-29],主要是由于在各风向下均建设通风廊道存在资源浪费、耗时耗力、不符合可持续发展目标等问题。通过解析风向及其频率,可以最大程度利用自然风资源,确定通风廊道的走向、形状和尺寸。

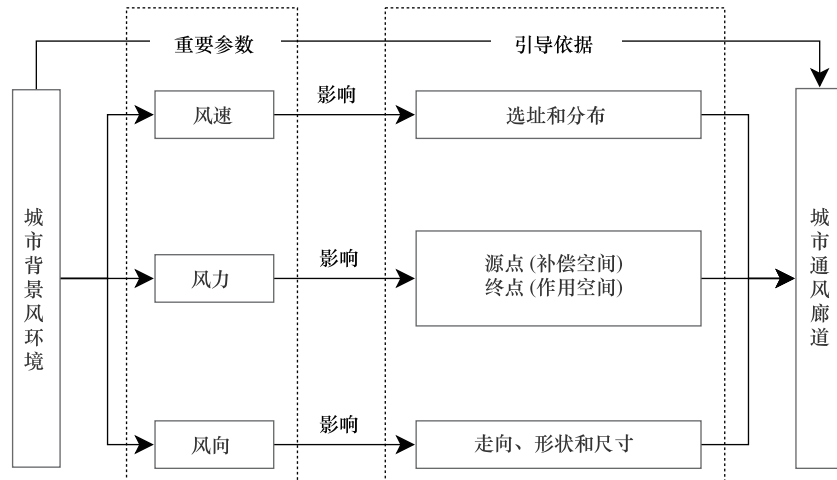


图 2 城市风环境与城市通风廊道的关联

Fig.2 Relationship between urban wind environment and urban ventilation corridors

1.3 城市通风廊道研究进展

如图 3 所示,中文论文的发文量在 2000—2014 年始终较少,在 2014 年后呈现显著增加态势,在 2020 年达到 29 篇,随后又呈现下降趋势;中文论文的引文量始终较少,在 2000—2022 年始终维持在 0—3 篇。英文论文的发文量与引文量在 2000—2022 年均呈现逐年增长态势,在 2022 年分别达到 244 篇,2486 篇。由统计结果可知,在全球气候变化以及快速城市化等多重背景下,城市通风廊道研究愈发受到关注,其相应研究论文发文量与引文量不断增多,但以英文论文形式为主。

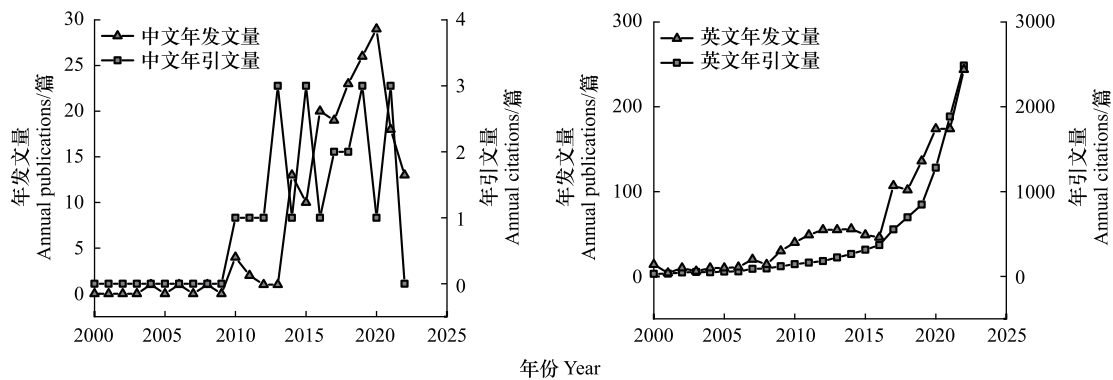


图 3 2000—2022 年城市通风廊道论文发文量和引文量

Fig.3 Publications and cites on urban ventilation corridor research from 2000 to 2022

2023 年 12 月 26 日在中国知网期刊数据库和 Web of Science 数据库分别检索了 2000—2022 年发表的中英文论文;中文论文的检索式为“通风廊道”or“风廊”or“城市通风道”or“通风走廊”,共计 195 篇;英文论文的检索式为“Ventilation Corridor”or“Urban Ventilation”or“Urban Ventilation Corridor”or“Wind Corridor”,共计 1651 篇

2 城市通风廊道构建技术方法

探寻合适的通风廊道构建(识别)技术方法是通风廊道研究中最重要的一环,当前关于城市通风廊道构建方法种类繁多,但总体上涵盖微观与宏观两种尺度(图4)。

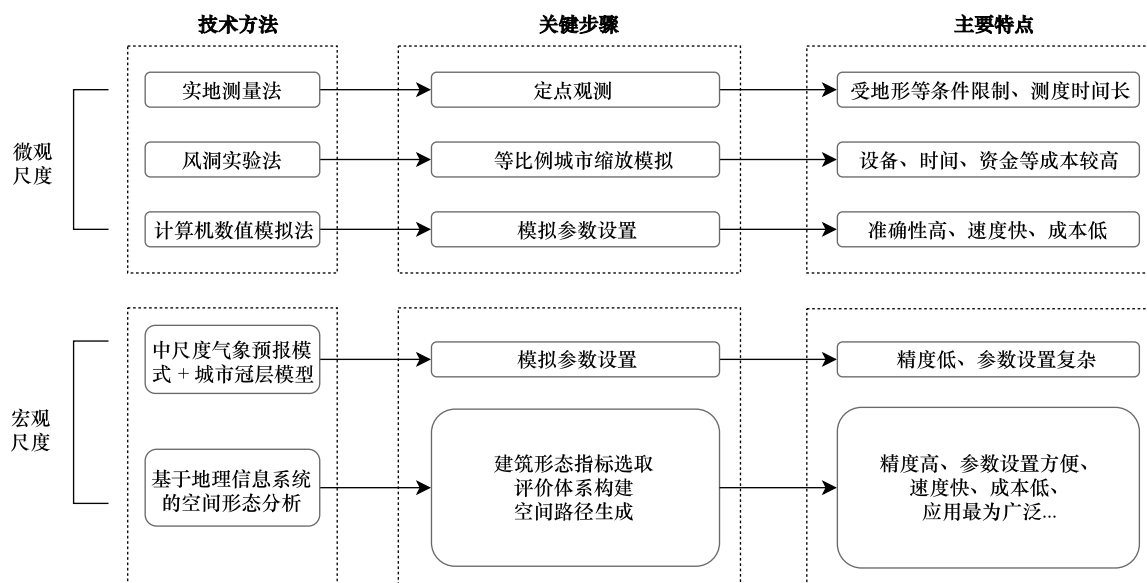


图4 微观与宏观尺度城市通风廊道构建技术方法

Fig.4 Methods of constructing urban ventilation corridors at micro and macro scales

2.1 微观尺度:基于现状或模拟气流的观测

微观尺度的通风廊道构建技术指通过对风环境的观测和模拟来刻画气体的流动轨迹,具体方法经历了由实地测量法、风洞实验法向 CFD 模拟技术的转变。

实地测量法^[20]是风环境观测中最直接有效的手段,其可以通过测量具体方位的风速和风向来确定风场的分布规律。此方法能够获取最真实可靠的数据,但一般仅适用于小尺度的定点观测,在测度的过程中易受地理环境与气象条件的影响而较难控制,同时也存在长期监测耗时耗力的问题。

风洞实验法^[30]是等比例缩放城市模型的实验室方法,其可通过在闭合半封闭结构中仿真风速、风向、气压等风环境表征来模拟气体流动。该方法具有操作相对简单、可控制性较强、受外界影响较小、连续观测的特点,并在动态层面完善了风环境研究的整体性与连续性,但同时其又存在过度依赖设备、时间、资金等成本方面的问题。

伴随计算机科学的进步,CFD 模拟技术^[31-33]逐渐得到发展,该方法基于流体力学原理和数值计算方法对气体流动连续动力学方程进行求解,从而预测和分析气体流动的参数和特性。相比于风洞实验方法,其可以利用计算机设置物理参数环境(例如风源、风场边界条件等)并实现数据处理与可视化的动态全过程,具有准确性高、速度快、成本低等多种优势。根据其适用范围、计算能力、模拟条件的不同,涌现出 PHOENICS、FLUENT、Envi-Met、scSTREAM、CFX、STAR-CD、Airpak 等软件。

2.2 宏观尺度:基于空间形态指标的通风路径测度

宏观尺度的通风廊道也能够通过模拟气流的方式构建。相关研究一般结合中尺度气象预报模式(Weather Research and Forecasting Model, WRF)以及城市冠层模型(Urban Canopy Model, UCM)展开,其研究范式与 CFD 模拟研究相似,但在参数设置中,除建筑形态参数外,还需对气象、土地利用、数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM)等维度参数予以考虑^[34-36]。由于模型系统自身限制,此类模拟通常基于 1—10km 尺度网格构建通风廊道,估算精度较为粗糙。相对来说,较为主流的方式是基于地理信息系统

(Geographic Information System, GIS)的空间形态分析方法,其计算原理是依据空间形态自身的分布规律,选择最“畅通”、最经济、最大效能、最符合城市居民需求的空間作为通风廊道的路径载体,主要涵盖建筑形态指标选取、评价体系构建、空间路径生成 3 个步骤(图 5)。

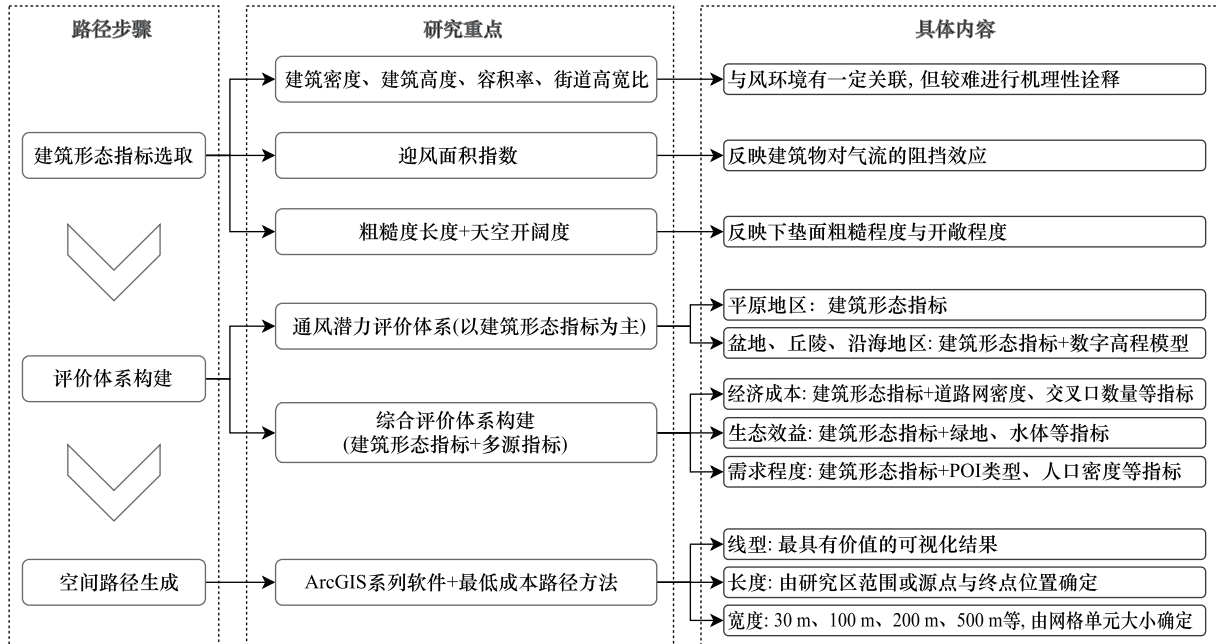


图 5 基于空间形态指标的通风路径测度

Fig.5 Measurement of ventilation paths based on spatial pattern indicators

建筑形态指标选取是宏观尺度通风廊道建立的基础,其理论依据来源于城市下垫面建筑形态与风环境的相互作用关系,具体来说包括 3 种类型建筑形态指标:①建筑密度、建筑高度、容积率、街道高宽比等指标^[37]。该类指标在研究初期被发现与风环境存在一定关联,但经过后续研究证实无法通过此类指标捕捉城市空间形态与风环境的线性或非线性关联,因而在机理层面较难进行风环境-建成环境指标的相关性诠释。为了填补这一不足,相关学者提出了风环境研究领域的“标识性”指标,即②迎风面积指数(Frontal Area Indexes, FAI)^[38—39]。该指标反映在一定高度增距上,某一特定风向下建筑物迎风面积与建筑物所在地块面积之比,相对于①类型指标,其不仅考虑了建筑物的高度、宽度,还纳入了建筑物朝向等因素,在一定程度上与风向产生直接关联^[40]。在不同风向下,城市建筑物对气流的阻挡效应不同,其对应的迎风面积指数也具有差异性。为了权衡地区的迎风面积指数空间分布情况,相关学者往往结合风玫瑰图,将多个方位(4 位^[41]、8 位^[42]、16 位^[43])的风向频率作为权重,利用加权的方式计算综合迎风面积指数。目前大量研究^[44—45]选择迎风面积指数作为通风廊道的构建指标,其已被证实与实测或模拟风速之间存在显著相关性。伴随研究的深入,有学者认为迎风面积指数本质是对下垫面粗糙程度的刻画,真正影响城市风环境的关键因子是地表粗糙度^[46],也有学者发现区域的开敞程度也能够对城市风环境产生重要作用^[47]。因此,一种组合式指标,即③粗糙度长度(Roughness Length, RL)与天空开阔度(Sky View Factor, SVF)逐渐受到重视^[48—50]。粗糙度长度指空气流动受阻时风速为 0 的位置与地表的相对空间距离,其不仅反映建筑物的大小、形状和布局等特征,还能够表征近地面气流的湍流强度与通风能力。天空开阔度指在一个特定位置和方向上天空的可见范围和程度,反映在地表能量收支平衡条件下城市局部空间的开敞程度。

评价体系构建是宏观尺度通风廊道建立的核心,一般分为两种:①一种是仅考虑“阻挡”效应的通风潜力评价体系构建。在平原地区,研究通常基于迎风面积指数、粗糙度长度、天空开阔度中某一种类型指标^[38,51—52]或结合粗糙度长度与天空开阔度构成的组合式指标(通风潜力指标^[23]或通风阻力指标^[41])来构建

评价体系,组合式指标可根据乘法^[49]或双指标阈值区间法^[53]来计算。在盆地^[54]、丘陵^[55-56]、沿海^[20]等区域,除建筑形态指标外,还需要考虑 DEM 等地形因子对空气流动的阻挡影响;②另一种是基于建筑形态指标与多源指标的综合评价体系构建,其不仅考虑了建筑形态或地形对气体流动的影响,还斟酌了通风廊道产生的经济、社会、生态等多维度效益。例如,依据建筑形态指标与道路网密度、交叉口数量等指标组成的评价体系主要是考虑利用开敞空间和主、次干路作为通风廊道空间载体^[57]。一方面,可以利用通风廊道“吹走”路面车辆排放的雾霾和热量,另一方面,不需要为构建通风廊道而单独开辟新的开敞空间,在一定程度上节约了经济成本;依据建筑形态指标与归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)、改进归一化水体指数(Modified Normalized Difference Water Index, M-NDWI)等指标组成的评价体系主要是考虑利用开敞空间和绿地、水体等蓝绿空间作为通风廊道空间载体^[58]。绿地和水系能够依赖自身的功能属性调节周围的气温和湿度,促进空气流动,而当作为通风廊道空间载体时,其带来的引风、降温、除霾效果要远高于水泥路等硬质地表,能够有效改善城市的生态环境质量;依据建筑形态指标与 POI 类型、人口密度等指标组成的评价体系主要是对通风廊道需求程度的考虑^[59]。无论是选择道路亦或是绿地、水体作为构建载体,其均是从供给侧层面(通风廊道效能供给)对评价体系的探索,在此基础上结合 POI 类型、人口密度等指标有利于从需求侧(人口、基础设施等层面)解析城市居民对通风的需求程度,有助于在供需匹配框架下丰富并完善通风廊道评价体系。

空间路径生成是宏观尺度通风廊道建立的关键。通风廊道自身不具有可视性特征,在空间分析中,一般借助 ArcGIS 系列软件与最低成本路径方法(Least Cost Path, LCP)^[28,38,42,45,52,56]对其路径实现空间可视化,包括其线型、长度和宽度等特征。线型特征是通风廊道研究中最具有价值的可视化结果,通常将其作为实际通风廊道工程的参考依据^[60-61];长度一般由研究区的自身范围^[62-63]或源点(补偿空间)和终点(作用空间)的位置^[25,58]决定;宽度主要由分析网格单元的大小决定,一般包括 10m^[60]、30m^[52]、100m^[42]、200m^[44]、500m^[41]等,网格单元越小,宽度越窄,构建的通风廊道路径越精细,目前对于网格单元尺度的选择尚没有统一标准。然而,在网格单元分析模式下,通风廊道的宽度始终保持不变,但等宽的通风廊道显然不符合实际所需,因此较多研究通常结合线性特征,对比城市下垫面实际的土地利用类型进行通风廊道的路径筛选与等级划定^[48,61,63-65]。

3 城市通风廊道效应维度、管控措施与规划实践

除城市通风廊道的构建技术方法外,其效应维度、管控措施与规划实践也是相关学者的研究重点,如图 6 所示。

3.1 通风廊道效应维度:引风-降温-除霾

通风廊道产生的效应包括生态、气候、经济、社会等多种维度,但就既往研究而言,大多从 3 个维度展开评估工作:

第一类聚焦于通风廊道的引风效应^[48,66-67],其主要是对通风廊道构建后城市(局部)风环境要素,包括风速、风力(湍流)、风向等因子展开测度,以空气流动、通风状况等结果作为研判通风廊道构建合理性的前提。一般来说,引风效应测度通常结合实地测量^[48]以及 CFD 模拟方法^[67]展开。

第二类是结合温度数据评估通风廊道的降温效应^[38,42,52,63]。常用的温度数据获取方式^[68]一般包括实地监测、气象站点监测与遥感卫星反演。前两种方式一般适用于微观尺度下通风廊道的降温效应测度,且通常与 CFD 模拟方法相结合。相比于前两种方式,遥感反演方法由于具有覆盖范围广、图像直观和时间高度同步的优点。

第三类是结合空气污染数据评估通风廊道的除霾效应^[26-27,69]。与温度数据的获取渠道类似,空气污染数据(主要为 PM_{2.5}数据)也能够通过上述 3 种方式计算得到。但由于遥感卫星类型(主要是 LANDSAT 和 MODIS 系列卫星)的差异,温度数据的精度(最高可精确到 30m)一般较气溶胶数据(一般为 1000m)高,致使

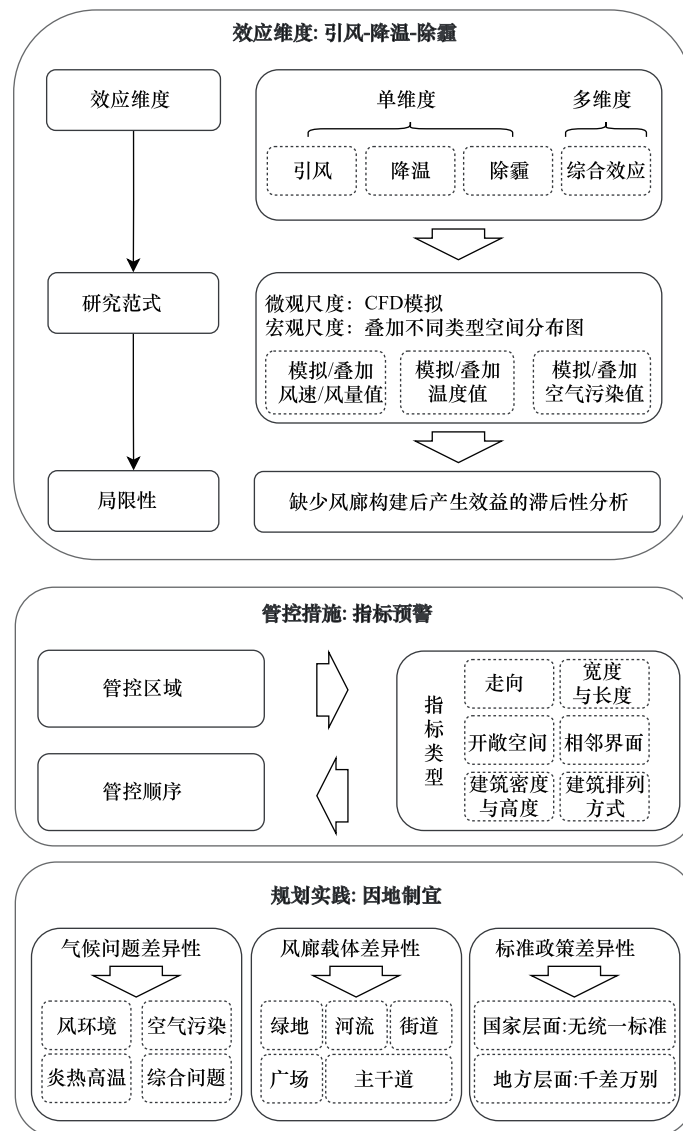


图 6 城市通风廊道效应维度、管控措施与规划实践

Fig.6 The effect dimensions, control measures and planning projects of urban ventilation corridors

研究通风廊道降温效应的文献数量要显著高于除霾效应。

此外,突破单一维度限制,从多维度评估通风廊道的综合效应逐渐成为研究趋势^[41]。伴随城镇化水平的提高以及建成环境的高密度化,部分城市往往在夏季面临高温热浪现象的同时也可能在冬季面临雾霾频繁问题。此外,有充分证据表明热岛效应与浊岛效应之间存在较强的耦合协调关系,此种关联会加剧气候变化对城市的威胁^[70]。然而,目前通风廊道综合效应研究大多停留在理论框架制定阶段,缺少量化的效应测度^[71]。

在研究范式上,微观尺度通风廊道的引风、降温、除霾效应研究较为单一,一般借助 CFD 模拟方法开展^[72]。相比之下,宏观尺度研究一般采取将已构建的通风廊道分布图与风环境分布图、地表温度分布图或空气污染分布图进行空间叠加的方式,通过计算通风廊道路径中的风速风量、温度或空气污染数值来权衡引风、降温、除霾效应,涵盖通风廊道与非通风廊道的效应对比^[52]、基于模型构建的通风廊道与通风廊道实际规划方案的效应对比^[41]、不同等级通风廊道的效应对比^[73]等研究。空间叠加方法在大范围的效益评估上存在显著优势,但仅适用于“通风廊道是否产生效应”问题的解答,无法针对滞后性问题,即“通风廊道构建后产生的

效应是多少”进行量化分析。针对这一局限,部分研究^[53,74-75]尝试从宏观与微观尺度相结合的视角,利用GIS空间分析与CFD数值模拟的组合方法对通风廊道构建后产生的引风、降温、除霾进行系统性解析。

3.2 通风廊道管控措施:指标预警

城市通风廊道管控指为了保证通风廊道内的空气流动受障碍物遮挡影响而对其途径的开发建设强度与建筑形态采取的控制与管理活动^[76],从本质上来说,其是在控制线详细规划与城市设计过程中,通过指标预警的方式制定管控要素的建设或调控标准,包括走向、宽度与长度、开敞空间、建筑密度与高度、相邻界面、建筑排列方式6类^[8]:①走向。应保证通风廊道的走向与主导风向的夹角不超过45°,在条件允许情况下尽可能保持在0—30°(在该夹角范围内通风廊道对全域风环境的改善效果最佳^[77])。因此,有研究提出一级通风廊道与主导风夹角不超过30°,二级通风廊道与主导风夹角不超过45°的观点^[78];②宽度与长度。在城市尺度,一、二级通风廊道的宽度应分别控制不小于500m、100m^[79]。在街道尺度,通风廊道的宽度应控制在30—100m以内^[77];③开敞空间。原则上通风廊道内部应主要为带状绿地、河流、街道、广场、主干道等开敞空间,若存在已建设或拟新建建筑,应严格控制建设用地比例,保证一级、二级通风廊道的建设用地比例分别不高于20%、25%^[80],也有研究指出应控制绿化覆盖率在30%以上^[8];④建筑密度与高度。若通风廊道内存在建设用地,建筑密度和高度也应当予以控制,其中一级、二级通风廊道内的建筑密度应当分别低于25%、30%^[80];⑤相邻界面。主要是对由相邻建筑界面组合形成的高宽比例与场地间口率进行管控,一级通风廊道两侧建筑高宽比不大于0.5,场地间口率不小于40%;二级通风廊道两侧建筑高宽比则控制在1.0之内,场地间口率不小于30%^[81];⑥建筑排列方式。对于建筑排列方式没有严格的管控要求,一般不宜采用封闭的围合空间布局,建议采取错列式、斜列式、自由式、对角递增式、高低错落式的布局方式。

总体而言,既往研究对通风廊道管控的指标类型认知已较为统一,但对于管控指标的阈值大小仍处于讨论与完善阶段。除管控指标外,管控顺序和管控区域也应当予以合理设置。就管控顺序而言,走向、宽度与长度、开敞空间指标应在制定控制线详细规划方案时加以考虑,建筑密度与高度、相邻界面指标应在制定控规地块指标图则时加以衡量^[80];就管控区域来说,仅仅针对一、二级通风廊道内部的分级管控具有局限性,应当结合用地类型构建“分级+分区”的管控体系^[78],其中重点区域应当从片区和建筑单体两个层面予以管控^[82]。

3.3 通风廊道规划实践:因地制宜

针对日益严峻的气候问题,世界各国陆续展开了城市通风廊道的规划实践。国外包括德国斯图加特、日本东京,国内既包括香港、杭州、福州、广州、深圳等沿海城市,也包括武汉、长沙、北京、成都、西安、郑州、合肥、济南等内陆城市,其实施单位一般以城市规划设计研究院、气象局、自然资源和规划局以及地方高校为主^[8],如表1所示。

通风廊道规划实践具有因地制宜的特征,主要包括3点原因:①面临的气候问题具有差异性。由于地理区位、自然条件以及经济发展等客观因素,不同城市往往面临着不同的气候问题,其通风廊道的构建目的也存在差异性。如香港构建通风廊道主要针对的是风环境较差问题,武汉、福州主要针对的是夏季炎热高温问题,沈阳主要针对的是空气污染问题,广州、济南主要针对的是综合性气候问题;②通风廊道的构建载体选择具有差异性。在实际工程项目中,通风廊道的构建需要以带状绿地、河流、街道、广场、主干道等作为空间载体,但由于不同区域的生态资源本底、道路交通状况、建筑组合分布存在显著差异,相应可选择的通风廊道载体也具有不同类型;③地方标准政策具有差异性。在国家层面,以中国气象局为主的多个部门出台了通风廊道的相关国标、行标、技术导则和规定,但对于通风廊道的具体实施路径没有明确的要求。在地方层面,政府在组织规划编制的过程中较少有专门研究城市通风廊道与风环境的标准,通风廊道通常在过往的绿地系统规划、生态保护规划等编制中涉及,但一般不具体,由此导致通风廊道规划工程通常需要结合当地其他规划的标准予以施行。在国土空间规划背景下,不同地区空间形态指标的控制标准千差万别,相应的通风廊道规划实践也面临不同的建设要求,需要根据自身发展需求因地制宜的展开。

表 1 国内外部分城市通风廊道规划实践梳理

Table 1 A review of the planning and implementation practices of ventilation corridors in certain cities domestically and internationally

城市 City	时间 Year	实践目标 Practical objectives			实践特点 Practical features
		引风	降温	除霾	
德国斯图加特 Stuttgart, Germany	1970s			•	提出“补偿空间”、“作用空间”与“空气引导通道”概念
日本东京 Tokyo, Japan	2007		•		完成“风之道”研究,提出包括海陆风、山谷风及公园风在内的 5 级风道系统
中国香港	2003	•			绘制香港城市环境气候图并将市区划分为 9 个风环流区
中国武汉	2012		•		基于城市形态量化风渗透性,提出利用 6 条绿楔打造风道
中国杭州	2013		•	•	依据局地气候特点划分 15 个独立风区,在工业区等热中心组团之间构建多级通风廊道
中国安庆	2014		•	•	从“城区-分区-街区”3 个层级提出差异化的通风廊道控制指标要求及规划策略
中国福州	2014		•		以自然江河为“轴”和“廊”,建设通风口和降温节点
中国沈阳	2014			•	依托河流、铁路、绿楔、道路绿化带等开敞空间构建风廊
中国贵阳	2015	•	•	•	预留并控制建设空间,构建城市近地通风网络
中国南京	2015		•	•	利用建设用地“留白”空间构建通风廊道路径与进风口
中国长沙	2016		•	•	在“总规-控规-修规”层面分别提出风道规划建设要求,保障建设的可实施性
中国北京	2016		•	•	构建通风廊道网络系统,打通阻碍廊道连通的关键节点,严格控制划入风廊区域建设规模,
中国广州	2016	•	•	•	制定 3 类风环境控制区:迎风控制区、强风利用区、静风改善区
中国成都	2016	•		•	针对风廊宽度、建筑高度和密度、建筑布局形式和建筑体量等提出控制要求,促进郊区生态冷源与城市中心连通
中国西安	2016	•		•	根据现有风景资源类型与景观特征提出风道管控措施
中国深圳	2017	•	•		在城市功能疏解和更新调整中,将腾退空间优先用于留白增绿,利用湖泊、河流、山体等生态冷源建设通风廊道
中国郑州	2017		•	•	以铁路、河流、高速公路、主干道等为载体构建多级通风廊道,划定一、二级通风廊道长度和宽度
中国合肥	2018	•		•	结合旧城改造,腾出通风廊道空间,连接生态冷源,促进局地风循环
中国济南	2018	•	•	•	结合城市“热源”、“冷源”、土地利用以及建筑物信息,构建 3 级通风廊道

• 代表存在此实践目标

4 研究展望

基于当前城市通风廊道研究特征梳理,本文进一步从构建方法、效应维度以及矛盾争议 3 个方面拓展未来城市通风廊道的研究深度(图 7)。

4.1 通风廊道构建方法挖掘:电路理论

微观与宏观尺度通风廊道的构建方法各有侧重,均具有偏向性与局限性。微观尺度侧重于对“气流”的仿真,但受制于跨尺度、高精度的 CFD 软件开发,宏观尺度侧重于对“路径”的提取,但受制于 LCP 的理论与方法运用。从本质上来说,利用 LCP 模型捕捉的通风廊道路径并不等同于气体流动的轨迹,主要是因为当气流遇到交叉口、建筑物等“分支节点”时,不会如 LCP 模型所假设的仅沿着累积风阻最小的路径流动,部分气流会选择通风阻力成本较高的分支通过。尽管部分研究^[74-75]试图从宏观与微观尺度相结合的视角探索“路径”与“气流”的一体化构建范式,但其大多是对“路径”中的局部“气流”进行仿真模拟,尚未对全域的“气流”进行量化分析。愈来愈多的证据^[83-84]表明,电路理论(Circuit Theory)的应用能够突破上述方法瓶颈,其通过将通风廊道中的气压、气流及建筑形态参数分别类比作电压、电流和电阻,不仅可以识别风阻最小的“路径”,

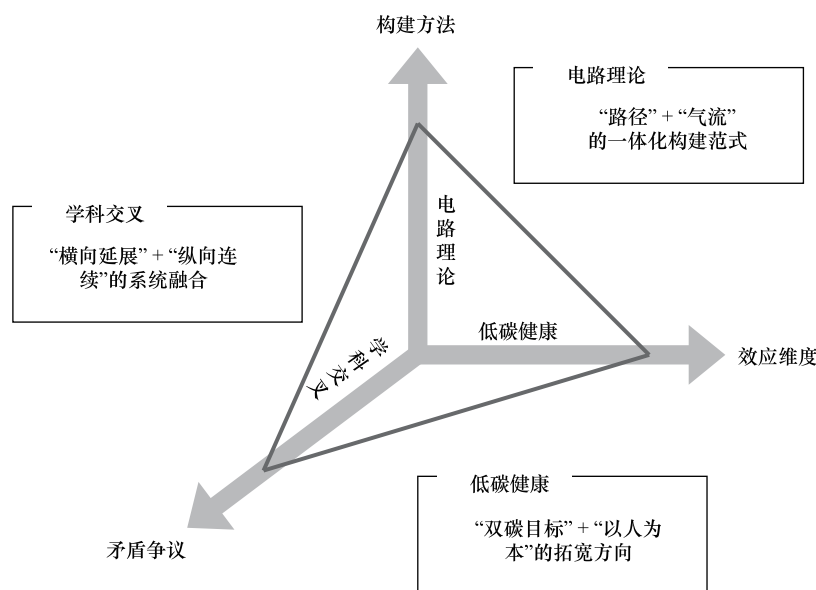


图7 城市通风廊道研究未来拓展方向

Fig.7 Future research directions for urban ventilation corridors

还能够对路径中“气流”的迁移与扩散过程(包括“气流”遇到“分支节点”时的分裂过程)进行仿真模拟。但目前而言,结合电路理论的通风廊道研究仍处于起步阶段,其主要聚焦在新模型构建^[73,85]与模型优化^[86],能否广泛应用需要进一步验证。

4.2 通风廊道效应维度拓宽:低碳健康

引风、降温与除霾效应是过往通风廊道研究中最为集中的3个维度,这主要是因为风透性不足、热岛效应以及浊岛效应是城市中较为常见的气候问题。然而,就通风廊道的概念内涵来说,其带来的效益是多方面的,涉及生态、气候、经济、社会等多种维度。因此,通风廊道的效应维度还可在引风、降温与除霾的基础上进一步拓宽,例如低碳与健康维度。①低碳维度。从能源的视角来看,通风廊道构建是对风能的利用。当面对夏季高温时,构建通风廊道可引导冷空气流入城市内部来疏散其热量,为城市其他能源消耗设施(例如空调)缓解压力,当面对冬季雾霾时,构建通风廊道可实现自然通风和空气循环,将城市内部二氧化碳等温室气体运输至郊区以实现自然沉降。因此,有序推进城市通风廊道的规划和建设,是实现低碳城市目标的关键举措之一;②健康维度。多数文献通常根据风环境是否得到优化^[66]、温度是否减小^[63]、PM_{2.5}浓度是否降低^[69]等来验证通风廊道构建的合理性。尽管此类验证方式适用于大多数通风廊道研究,但缺少对人群健康效应的考虑。相对于通风廊道的引风、降温与除霾效应,其健康效应研究能够从主客观相结合、供给与需求相结合的视角进一步挖掘通风廊道的研究深度,尤其在后疫情时代,通风廊道的健康效应研究不仅对于传染性疾病的预防手段具有重要指引作用,对于气候风险的防范策略也具有重要意义。

4.3 通风廊道矛盾争议突破:学科交叉

尽管城市通风廊道研究已取得较为丰硕成果,但仍存在2点不可避免的矛盾争议:①城市“降温”是否由通风廊道运输的冷空气带来。城市通风廊道的构建载体包括绿地、水体等蓝绿空间已被诸多证据证明存在降温效应,当城市利用通风廊道达到降温效应时,如何验证此效应是由通风廊道产生的,而不是由蓝绿空间导致的,亦或者,在诸多城市高温适应性策略中,通风廊道能够发挥多大效应,尚不得而知;②通风廊道是否能“吹”走雾霾。冬季雾霾出现的主要前提是冷空气较弱且已形成静稳天气,在此条件下较难形成流动风,不适宜进行通风廊道的建设,换言之,雾霾和自然风在同一时间同一地点“出现”是矛盾且不合理的。引发上述矛盾争议的根本性原因是由于通风廊道研究较为复杂且涉及多种学科,各学科领域研究缺乏横向的延展性和纵

向的连续性,对部分问题尚不能从机理性层面予以解释。例如,就通风廊道构建方法而言,涉及流体力学、地理学、气象学;就通风廊道效应来说,地表温度、PM_{2.5}数据的爬取涉及遥感、生态学,人群健康数据的获取涉及医学、公共卫生学;就通风廊道管控来说,需要城市规划学、建筑学的支撑。综上,在未来的研究中,可采取多学科交叉方式,从原理、方法、技术、应用等方面发挥各领域优势并加强彼此的交叉和衔接。

5 结论

本文对城市通风廊道研究特征与进展进行系统性梳理,在介绍城市通风廊道的概念内涵的基础上,分别从微观与宏观尺度概括城市通风廊道的构建技术方法,总结城市通风廊道的效应维度、管控措施与规划实践等特征,并指出未来城市通风廊道研究的发展方向,以期为城市通风廊道的理论方法与规划实践提供指引。其主要结论如下:

(1)城市通风廊道研究论文成果数量不断增多,但以英文论文形式为主。城市通风廊道由作用空间、补偿空间与空气引导通道组成,解析风速、风力(湍流)、风向等背景风环境因素是研究城市通风廊道的重要前提。

(2)城市通风廊道构建方法涵盖宏观与微观尺度,微观尺度方式主要为基于现状或模拟气流的观测,涵盖实地测量法、风洞实验法与计算机数值模拟法。宏观尺度方式主要为基于空间形态指标的通风路径测度,涵盖建筑形态指标选取、评价体系构建、空间路径生成3个步骤。

(3)城市通风廊道的效应维度主要聚焦于引风、降温、除霾,城市通风廊道的管控措施以指标预警方式为主,城市通风廊道的规划实践往往具有因地制宜的特征。

此外,城市通风廊道下一步研究重点可考虑以下3个方面:①结合电路理论挖掘新的通风廊道构建方法与模型,并对其精度及适用性进行合理性验证;②从低碳与健康两个方面探索通风廊道的功能,结合多源数据拓宽通风廊道效应维度;③利用学科交叉的方式探寻通风廊道的作用机理,对通风廊道尚存的矛盾争议予以解答。

参考文献(References):

- [1] Diffenbaugh N S, Field C B. Changes in ecologically critical terrestrial climate conditions. *Science*, 2013, 341(6145): 486-492.
- [2] 谢正辉,刘斌,延晓冬,孟春雷,徐宪立,刘宇,秦佩华,贾炳浩,谢瑾博,李锐超,王龙欢,王妍,陈思. 应对气候变化的城市规划实施效应评估研究. *地理科学进展*, 2020, 39(1): 120-131.
- [3] 任超,袁超,何正军,吴恩融. 城市通风廊道研究及其规划应用. *城市规划学刊*, 2014(3): 52-60.
- [4] 张沛,黄清明,田姗姗,薛立尧. 城市风道研究的现状评析及发展趋势. *城市发展研究*, 2016, 23(10): 79-84, 104.
- [5] 王伟武,黎菲楠,王頔. 城市风道研究动态及走向. *城市问题*, 2018(2): 36-40.
- [6] 张睿,李红艳. 基于风环境要素的城市通风廊道建设研究综述. *华中建筑*, 2018, 36(6): 44-48.
- [7] 王鹏,蒋昊成,雷诚. 我国城市风道规划研究评述与展望. *现代城市研究*, 2019, 34(7): 91-98, 130.
- [8] 房小怡,李磊,刘宛,任超,王佳文,程宸,于瀛,张硕,杜吴鹏,刘勇洪. 我国城市通风廊道研究与实践进展. *生态学杂志*, 2021, 40(12): 4088-4098.
- [9] 许涛,邵彤,李涵璟,贺玺桦,王苗. 城市通风廊道研究进展. *景观设计*, 2022, 6: 54-61.
- [10] 冀泓宇,丁国昌. 国内城市通风廊道缓解城市热岛研究进展与趋势. *四川建筑*, 2023, 43(1): 55-60.
- [11] 王冠,周宏轩,王文真,孙婧,马泉. 中微观尺度上城市形态指标与城市通风的关联性研究进展. *生态科学*, 2023, 42(1): 252-262.
- [12] Kress R. Regionale Luftaustauschprozesse und ihre Bedeutung für die räumliche Planung (in German). Bundesminister für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau, 1979.
- [13] 肖笃宁,高峻,石铁矛. 景观生态学在城市规划和管理中的应用. *地球科学进展*, 2001, 16(6): 813-820.
- [14] 朱强,俞孔坚,李迪华. 景观规划中的生态廊道宽度. *生态学报*, 2005, 25(9): 2406-2412.
- [15] 李鹏,余庄. 基于气候调节的城市通风道探析. *自然资源学报*, 2006, 21(6): 991-997.
- [16] 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. *浙江大学学报(工学版)*, 2010, 44(10): 1985-1991.

- [17] Mayer H. Bestimmung von stadtklimarelevanten Luftleitbahnen (in German). UVP-report, 1994, 5: 265-267.
- [18] 曾穗平, 运迎霞, 田健. “协调”与“衔接”——基于“源-流-汇”理念的风环境系统的规划策略. 城市发展研究, 2016, 23(11): 25-31, 70.
- [19] Liu X Q, Huang B, Li R R, Zhang J H, Gou Q, Zhou T, Huang Z H. Wind environment assessment and planning of urban natural ventilation corridors using GIS: Shenzhen as a case study. Urban Climate, 2022, 42: 101091.
- [20] Guo F, Zhang H C, Fan Y, Zhu P S, Wang S Y, Lu X D, Jin Y. Detection and evaluation of a ventilation path in a mountainous city for a sea breeze; the case of Dalian. Building and Environment, 2018, 145: 177-195.
- [21] Luo Y W, He J, Ni Y L. Analysis of urban ventilation potential using rule-based modeling. Computers, Environment and Urban Systems, 2017, 66: 13-22.
- [22] Yuan C, Ren C, Ng E. GIS-based surface roughness evaluation in the urban planning system to improve the wind environment-A study in Wuhan, China. Urban Climate, 2014, 10: 585-593.
- [23] 刘勇洪, 张硕, 程鹏飞, 陈鹏, 魏来, 房小怡. 面向城市规划的热环境与风环境评估研究与应用——以济南中心城为例. 生态环境学报, 2017, 26(11): 1892-1903.
- [24] Liu Y H, Xuan C Y, Xu Y M, Fu N, Xiong F L, Gan L. Local climate effects of urban wind corridors in Beijing. Urban Climate, 2022, 43: 101181.
- [25] Wang W W, Wang D, Chen H, Wang B Y, Chen X. Identifying urban ventilation corridors through quantitative analysis of ventilation potential and wind characteristics. Building and Environment, 2022, 214: 108943.
- [26] Han L, Zhao J Y, Zhang T, Zhang J. Urban ventilation corridors exacerbate air pollution in central urban areas: evidence from a Chinese city. Sustainable Cities and Society, 2022, 87: 104129.
- [27] 汪小琦, 高菲, 谭钦文, 肖竹韵. 高静风频率城市通风廊道规划探索——成都市通风廊道的规划实践. 城市规划, 2020, 44(8): 129-136.
- [28] Li Q M, Zheng J P, Yuan S, Zhang L X, Dong R M, Fu H H. RAV model: study on urban refined climate environment assessment and ventilation corridors construction. Building and Environment, 2024, 248: 111080.
- [29] 王梓茜, 程宸, 杨袁慧, 房小怡, 杜吴鹏. 基于多元数据分析的城市通风廊道规划策略研究——以北京副中心为例. 城市发展研究, 2018, 25(1): 87-96.
- [30] He Y Y, Liu Z X, Ng E. Parametrization of irregularity of urban morphologies for designing better pedestrian wind environment in high-density cities-A wind tunnel study. Building and Environment, 2022, 226: 109692.
- [31] Chen S L, Lu J, Yu W W. A quantitative method to detect the ventilation paths in a mountainous urban city for urban planning: a case study in Guizhou, China. Indoor and Built Environment, 2017, 26(3): 422-437.
- [32] 苏纳, 周典, 孙宏生. 城市新区通风廊道规划方法研究——以西咸新区为例. 现代城市研究, 2017, 4: 27-31, 36.
- [33] Xu Y P, Wang W W, Chen B Y, Chang M, Wang X M. Identification of ventilation corridors using backward trajectory simulations in Beijing. Sustainable Cities and Society, 2021, 70: 102889.
- [34] Li X S, Lin K, Shu Y L, Lin X D. Comparison of the influences of different ventilation corridor forms on the thermal environment in Wuhan City in summer. Scientific Reports, 2023, 13: 13416.
- [35] 成丹, 许杨, 刘静, 陈正洪, 阳威, 张雪婷. 武汉市东南部通风廊道构建和气象效应研究. 长江流域资源与环境, 2022, 31(11): 2500-2513.
- [36] 任庆昌, 魏冀明, 戴维. 区域风环境研究与通风廊道建设实施建议——以珠三角为例. 热带地理, 2016, 36(5): 887-894.
- [37] 尹杰, 詹庆明. 城市通风与形态关联性探究——以武汉市为例. 环境保护, 2016, 44(22): 59-63.
- [38] Hsieh C M, Huang H C. Mitigating urban heat islands: a method to identify potential wind corridor for cooling and ventilation. Computers, Environment and Urban Systems, 2016, 57: 130-143.
- [39] 尹杰, 詹庆明. 武汉市城市通风廊道挖掘研究. 现代城市研究, 2017, 10: 58-63.
- [40] Xu F S, Gao Z. Frontal area index: a review of calculation methods and application in the urban environment. Building and Environment, 2022, 224: 109588.
- [41] Fang Y H, Zhao L Y. Assessing the environmental benefits of urban ventilation corridors: a case study in Hefei, China. Building and Environment, 2022, 212: 108810.
- [42] Wong M S, Nichol J E, To P H, Wang J Z. A simple method for designation of urban ventilation corridors and its application to urban heat island analysis. Building and Environment, 2010, 45(8): 1880-1889.
- [43] 詹庆明, 欧阳婉璐, 金志诚, 章莉. 基于RS和GIS的城市通风潜力研究与规划指引. 规划师, 2015, 31(11): 95-99.
- [44] Ng E, Yuan C, Chen L, Ren C, Fung J C H. Improving the wind environment in high-density cities by understanding urban morphology and surface roughness: a study in Hong Kong. Landscape and Urban Planning, 2011, 101(1): 59-74.

- [45] Wong M S, Nichol J, Ng E. A study of the “wall effect” caused by proliferation of high-rise buildings using GIS techniques. *Landscape and Urban Planning*, 2011, 102(4): 245-253.
- [46] Xu Y, Ren C, Ma P F, Ho J, Wang W W, Lau K K L, Lin H, Ng E. Urban morphology detection and computation for urban climate research. *Landscape and Urban Planning*, 2017, 167: 212-224.
- [47] Yang F, Qian F, Lau S S Y. Urban form and density as indicators for summertime outdoor ventilation potential: a case study on high-rise housing in Shanghai. *Building and Environment*, 2013, 70: 122-137.
- [48] 杜昊鹏, 房小怡, 刘勇洪, 何永, 贺健. 基于气象和 GIS 技术的北京中心城区通风廊道构建初探. *城市规划学刊*, 2016, 5: 79-85.
- [49] 刘勇洪, 徐永明, 张方敏, 程宸. 城市地表通风潜力研究技术方法与应用——以北京和广州中心城为例. *规划师*, 2019, 35(10): 32-40.
- [50] Liu Y H, Xu Y M, Zhang F M, Shu W J. A preliminary study on the influence of Beijing urban spatial morphology on near-surface wind speed. *Urban Climate*, 2020, 34: 100703.
- [51] 申鑫杰, 赵芮, 何瑞珍, 王琦, 郭煜琛. 郑州市市区风环境模拟研究. *地球信息科学学报*, 2020, 22(6): 1349-1357.
- [52] Lai S X, Zhao Y J, Fan Y F, Ge J. Characteristics of daytime land surface temperature in wind corridor: a case study of a hot summer and warm winter city. *Journal of Building Engineering*, 2021, 44: 103370.
- [53] Gu K K, Fang Y H, Qian Z, Sun Z, Wang A. Spatial planning for urban ventilation corridors by urban climatology. *Ecosystem Health and Sustainability*, 2020, 6(1): 1747946.
- [54] Ren C, Yang R Z, Cheng C, Xing P, Fang X Y, Zhang S, Wang H F, Shi Y, Zhang X Y, Kwok Y T, Ng E. Creating breathing cities by adopting urban ventilation assessment and wind corridor plan-The implementation in Chinese cities. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2018, 182: 170-188.
- [55] Huang J D, Wang Y C. Identification of ventilation corridors through a simulation scenario of forest canopy density in the metropolitan area. *Sustainable Cities and Society*, 2023, 95: 104595.
- [56] 巫溢涵, 詹庆明. 丘陵地区城市的风道规划方法研究——以广州城市设计重点地区为例. *城市规划*, 2022, 46(7): 24-34.
- [57] 王桂芹, 胡燕, 郑伯红. 基于道路气流特征的城市广义通风廊道模拟研究——以衡阳县为例. *铁道科学与工程学报*, 2020, 17(6): 1586-1594.
- [58] Fang Y H, Gu K K, Qian Z, Sun Z, Wang Y Z, Wang A. Performance evaluation on multi-scenario urban ventilation corridors based on least cost path. *Journal of Urban Management*, 2021, 10(1): 3-15.
- [59] 李智杰, 乔治杰, 李昌华, 高元, 薛靖裕. 基于多域 POI 定位与双缓解风向引导的潜在城市通风廊道筛选模型. *地球信息科学学报*, 2023, 25(3): 479-494.
- [60] Peng F, Wong M S, Wan Y L, Nichol J E. Modeling of urban wind ventilation using high resolution airborne LiDAR data. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2017, 64: 81-90.
- [61] Liu Y H, Cheng P F, Chen P, Zhang S. Detection of wind corridors based on “Climatopes”: a study in central Ji’nan. *Theoretical and Applied Climatology*, 2020, 142: 869-884.
- [62] Ying S, Wang M, Zhang W T, Sun H R, Li C P. City-scale ventilation analysis using 3D buildings with Guangzhou case. *Urban Climate*, 2023, 49: 101471.
- [63] Qiao Z, Xu X L, Wu F, Luo W, Wang F, Liu L, Sun Z Y. Urban ventilation network model: a case study of the core zone of capital function in Beijing metropolitan area. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 168: 526-535.
- [64] 俞布, 贺晓冬, 危良华, 陈亮, 周雯. 杭州城市多级通风廊道体系构建初探. *气象科学*, 2018, 38(5): 625-636.
- [65] 薛立尧, 张沛, 王臻晨, 郭煜琛. 城市通风分析及绿地协同规划设计研究——以西安为例. *现代城市研究*, 2021, 9: 77-84, 91.
- [66] 陈翔, 孙武, 沈子桐, 朱琳琳, 张佳滨, 许伟. 广州市主城区风道特征与通风效能评估. *地理学报*, 2021, 76(3): 694-712.
- [67] Zheng Z F, Ren G Y, Gao H, Yang Y J. Urban ventilation planning and its associated benefits based on numerical experiments: a case study in Beijing, China. *Building and Environment*, 2022, 222: 109383.
- [68] 江颂, 彭建, 董建权, 程雪雁, 丹宇卓. 地表城市热岛效应的概念内涵与定量刻画. *地理学报*, 2022, 77(9): 2249-2265.
- [69] Cariolet J M, Colombert M, Vuillet M, Diab Y. Assessing the resilience of urban areas to traffic-related air pollution: application in Greater Paris. *Science of the Total Environment*, 2018, 615: 588-596.
- [70] Fang Y H, Gu K K. Exploring coupling effect between urban heat island effect and PM_{2.5} concentrations from the perspective of spatial environment. *Environmental Engineering Research*, 2022, 27(2): 200559.
- [71] 陈宏, 周雪帆, 戴菲, 管毓刚. 应对城市热岛效应及空气污染的城市通风道规划研究. *现代城市研究*, 2014, 7: 24-30.
- [72] Meng M R, Xi C, Feng Z B, Cao S J. Environmental co-benefits of urban design to mitigate urban heat island and PM_{2.5} pollution: considering prevailing wind’s effects. *Indoor and Built Environment*, 2022, 31(7): 1787-1805.
- [73] Fang Y H, Zhao L Y, Dou B Y, Li Y, Wang S X. Circuit VRC: a circuit theory-based ventilation corridor model for mitigating the urban heat

- islands. *Building and Environment*, 2023, 244: 110786.
- [74] 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. *中国园林*, 2019, 35(6): 84-88.
- [75] Lau T K, Tsai P C, Ou H Y, Lin T P. Efficient and cost-effective method for identifying urban ventilation corridors using a heuristic search algorithm. *Sustainable Cities and Society*, 2024, 101: 105144.
- [76] 曹靖, 黄闯, 魏宗财, 周永鹏, 王岚. 城市通风廊道规划建设对策研究——以安庆市中心城区为例. *城市规划*, 2016, 40(8): 53-58.
- [77] 匡晓明, 陈君, 孙常峰. 基于计算机模拟的城市街区尺度绿带通风效能评价. *城市发展研究*, 2015, 22(9): 91-95, 157.
- [78] 黄闯, 魏宗财, 曹靖, 邓汗青. 城市通风廊道系统构建及管控探索——以合肥市为例. *上海城市规划*, 2020, 4: 120-125.
- [79] 邹哲, 康健, 周志宇, 郭军, 王汉旗. 特大城市主城区通风廊道规划控制研究——以天津市为例. *建筑科学*, 2019, 35(6): 91-97, 107.
- [80] 梁颖严, 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. *风景园林*, 2014, 5: 92-96.
- [81] 陈旭斌. 关于城市风道规划的管控及改善策略研究. *智能城市*, 2019, 5(9): 14-16.
- [82] 刘名瑞, 曾勤, 邓玮, 区惠霞. 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. *城市规划学刊*, 2021, 4: 35-42.
- [83] Wang A, Zhang M M, Ren B, Zhang Y W, Al Kafy A, Li J X. Ventilation analysis of urban functional zoning based on circuit model in Guangzhou in winter, China. *Urban Climate*, 2023, 47: 101385.
- [84] Guo A D, Yue W Z, Yang J, Li M M, Xie P, He T T, Zhang M X, Yu H S. Quantifying the impact of urban ventilation corridors on thermal environment in Chinese megacities. *Ecological Indicators*, 2023, 156: 111072.
- [85] Xie P, Yang J, Wang H Y, Liu Y F, Liu Y L. A New method of simulating urban ventilation corridors using circuit theory. *Sustainable Cities and Society*, 2020, 59: 102162.
- [86] Xie P, Yang J, Sun W, Xiao X M, Xia J C. Urban scale ventilation analysis based on neighborhood normalized current model. *Sustainable Cities and Society*, 2022, 80: 103746.