

城市通风廊道研究进展

Urban Ventilation Corridors: A Review of Research Progress

李谷一 徐茹芸 乔孟托 张龙*

LI Guyi, XU Ruyun, QIAO Mengtuo, ZHANG Long*

基金项目: 云南省教育厅科学研究基金项目“昆明城市公园绿地冷岛效应及其影响因素研究”(编号: 2023J0709)

摘要

随着城市环境问题的日益突出, 通风廊道作为改善城市微气候的方法引起广泛关注, 但缺乏系统性梳理研究。利用 CiteSpace 对 Web of Science 核心数据库中 1997—2024 年的 487 篇相关文献进行可视化处理, 总结了研究进展和热点, 为后续相关研究提供科学参考。结果表明, 城市通风廊道研究合作薄弱; 研究方法较为单一且缺少合理的方法组合; 研究区存在分类问题; 研究方向相对单一; 研究与现实的关联相对薄弱且缺乏解决实际问题的具体策略。未来研究应突破技术层和策略层的界限, 更注重在系统思维层面上构建多样化的城市通风廊道结构, 深入挖掘电路理论、后向轨迹模拟、深度强化学习等新研究模式, 并在逆向思维和健康、经济等新命题背景下, 探寻新的研究方向。

Abstract

With the intensification of urban environmental challenges, ventilation corridors have garnered increasing attention for their role in improving urban microclimates. However, existing research remains fragmented and lacks a systematic synthesis. This study employs CiteSpace to visually analyze 487 publications on urban ventilation corridors indexed in the Web of Science Core Collection from 1997 to 2024. The review summarizes major research trends and thematic hotspots. Results indicate limited cooperation among researchers and institutions. The research methods are relatively simplistic and lack a reasonable combination of methods. There is a classification problem in the research area, and the research direction is relatively single. The correlation between the research and reality is relatively weak. The research lacks a specific strategy for solving the practical problems. Future research should prioritize bridging the technical-strategic divide through system-level thinking for diversified ventilation corridor configurations. Researchers will have to dig deeper into new research paradigms such as circuit theory, backward trajectory modeling, and deep reinforcement learning (DRL). In addition, new research directions are explored in the context of reverse thinking and new propositions in health and economics.

文章亮点

1) 从历史演进的角度系统分析城市通风廊道研究方法的优势与缺陷, 并在此基础上提出宏观—微观尺度结合的方法框架构想与新的研究模式; 2) 以城市问题为导向进行研究对象的精准分类, 在逆向思维层面与社会性新命题下拓宽通风廊道研究方向。

关键词

城市通风廊道; CiteSpace; 可视化; 城市微气候; 计算流体力学

Keywords

Urban ventilation corridors; CiteSpace; Visualization; Urban microclimate; Computational fluid dynamics

收稿日期: 2025-03-01

修回日期: 2025-03-31

在城市化快速发展的大背景下, 建筑密度大幅提升, 城市环境问题严重影响居民的生活品质与身体健康。越来越多的研究证明城市通风廊道对提升城市热舒适度、减少城市空气污染等具有重要意义^[1-3]。相关研究将城市冠层、下垫面粗糙度与城市几何形态等作为数值模拟的研究对象^[4-6], 在改善微气候层面为城市的规划设计提出科学性指导。因此, 有必要对城市通风廊道的研究进展进行系统梳理、分析, 这有助于进一步推动该领域的学术研究发展, 为城市微气候改善提供更坚实的支撑。本文利用 CiteSpace 软件, 通过对相关文献的知识聚类、合作网络、关键词共现与突现分析的可视化, 总结城市通风廊道近二十年的研究特征和发展脉络, 并进一步对研究的热点和局限性进行讨论, 以期为后续相关研究和城市规划设计提供科学指引。

1 研究设计

本文聚焦于“城市通风廊道”, 于 2024 年 9 月对 Web of Science (WOS) 核心数据库进行检索。以“通风廊道 (Ventilation Corridor)”为主题, 初步筛选发布于 1997 年—2024 年的文献, 随后以“城市透气性 (City Breathability)”“行人风环境 (Pedestrian Wind Environment)”“城市通风 (Urban Ventilation)”“城市通风廊道 (Urban Ventilation Corridor)”“风廊 (Wind Corridor)”等为关键词进行二次检索, 并剔除与研究主题无关的文献, 最后筛选出英文文献 487 篇。将文献数据输入 CiteSpace 后, 以作者、机构、关键词作为分析节点类型, 选择寻径网络算法 (Pathfinder) 对文献进行可视化处理, 简化文献网络并突出其重要结构特征。作为能够多角度进行信息对比交互的工具, CiteSpace 揭示了数据深层的联系^[7]。

2 研究进展分析

2.1 文献计量分析

据统计, 截至 2023 年城市通风廊道相关文献总数为 438 篇。本文根据年发文量划分城市通风廊道的研究阶段, 故以 438 篇文献为基础进行计量分析, 可得出 2010 年为城市通风廊道研究萌芽期和发展期的转折点 (图 1)。

1997—2010 年的文献总数为 24 篇, 年均发文量约为 1.71 篇, 表明该阶段对城市通风廊道的研究处于萌芽期。此阶段又可分为 2 个部分: 1997—2002 年, 相关研究局限于城市大气候与城市污染, 并未系统性地将城市通风情况与人居环境相联系; 2003—2010 年, 由于严重急性呼吸系统综合症的袭击^[8], 相关领域开始将研究缩小至人体感官舒适尺度, 城市通风廊道研究层面从宏观城市气候向微观行人风环境转变。

2011—2023 年的文献总数为 414 篇, 年均发文量约为 31.85 篇, 表明该阶段相关研究处于发展期。该阶段城市化进程加剧导致城市通风问题日益凸显, 这引发了社会的高度关注。2015 年, 推动“城市和人类居住区具有气候韧性和

可持续性”成为可持续发展目标之一^[9], 城市微气候尺度层面的研究日益深化, 进一步带动了城市通风廊道研究的发展。

2.2 核心作者及机构合作情况分析

利用可视化工具获取城市通风廊道研究的作者合作网络图谱 (图 2) 以及核心机构合作网络图谱 (图 3)。图谱显示, 在 1997—2024 年, 参与研究的 300 位核心作者之间存在 395 种合作关系, 网络密度值为 0.008 8; 而 291 个核心机构之间存在 336 种合作关系, 网络密度值为 0.008。可见作者之间和机构之间的合作关系均较为薄弱。

2.2.1 核心作者

从图 2 中可直观发现, 作者共现网络分别以杭建 (Hang Jian)、吴恩融 (Ng Edward)、大冈凉三 (Ooka Ryoza) 为中心, 形成了 3 个相对显著的合作集团。经统计, 中山大学大气科学学院的杭建教授发表相关文献 28 篇, 其主要研究区域为广州, 研究侧重于通过数值模拟的方法探索城市结构对气候的影响机制, 为调节室外热环境提供科学依据^[3]。香港中文大学建筑学院的吴恩融教授发表相关文献 13 篇, 研究集中于城市通风评估和规划, 且多次聚焦于香港的通风策略设计^[5,8,10]。暨南大学环境与气候学院的王雪梅教授对相关领域的研究起步于 2020 年, 但发展较快, 同样运用数值模拟的方法研究建筑等对城市通风的影响机制^[11-12]。可见相关研究人员的研究方向和方法较为统一。但统计得到的研究区域多为研究人员所属高校的所在城市或高密度城市, 如广州、香港、北京、深圳等, 呈现出较强的地缘特征, 跨区域合作较为缺乏, 学术联系强度有待提升。

2.2.2 核心机构

在共现网络图谱中, 机构名称的字号越大, 表示该机构在数据集中出现的频次越高。在 CiteSpace 的细分数据中, 仅出现 4 次的中国科学院大气物理研究所 (Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences) 的中心性 (Centrality, C 值) 高达 0.17, 而出现 37 次的香港理工大学 (Hong Kong Polytechnic University) 和中山大学 (Sun Yat-sen University) 的 C 值仅为 0.05, 这表明研究存在高频次与低影响的错位; 香港大学 (The University of Hong Kong) 出现 32 次, 香港中文大学 (The Chinese University of Hong Kong) 出现 21 次, C 值均

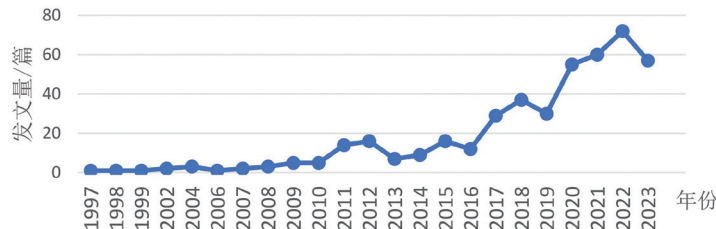


图 1 1997—2023 年城市通风廊道发文量分布

Fig.1 Annual publication trends in urban ventilation corridors research (1997—2023)

为 0.15, 表明这 2 所机构在相关研究中起到较为重要的作用。仅香港大学与另外 3 所发文量较高的机构存在薄弱的合作关系, 可见发文量较高的核心机构之间虽存在跨机构合作, 但合作数量少, 交流开放度有限。虽然城市通风廊道研究的起步时间早, 但于 2016 年才步入平稳发展阶段, 这也从侧面反映了该研究领域正处于探索期。

2.3 文献热点分析

2.3.1 关键词共现分析

在城市通风廊道关键词共现图谱 (图 4) 中, 289 个关键词节点存在共现关系的连线数量 E 为 584, 网络密度值为 0.014, 这表明在 1997—2024 年, 该领域相关研究主题较为广泛、分散。

节点的半径和字号越大, 其对应的关键词频次越高; 节点外圈为紫色表明该关键词在共现网络中的重要性高, 且紫色圈越粗, 节点越重要。分析数据, 发现“*cf simulation*”

(计算流体力学模拟)、“*pollutant dispersion*”(污染物扩散)、“*city breathability*”(城市透气性)、“*pedestrian wind environment*”(行人风环境)和“*urban ventilation*”(城市通风)是频次领先的 5 个节点, 频次分布在 79~109, C 值分布在 0.01~0.14; 而“*buildings*”(建筑)、“*computational fluid dynamics*”(计算流体力学)、“*comfort*”(舒适度)、“*air flow*”(气流)、“*natural ventilation*”(自然通风)是中心性领先的 5 个节点, C 值分布在 0.23~0.43, 频次分布在 31~41。其中, 计算流体力学 (Computational Fluid Dynamics, CFD) 共出现 2 次。结合文献, 发现研究主要侧重于对方法 (尤其是数值模拟) 的深入挖掘, 而缺乏解决实际城市环境问题的具体通风策略。同时, 中心性较高的关键词, 绝大多数频次较低。二者重叠度小, 说明关键词出现的频次和重要性无直接联系, 即城市通风廊道的研究现状和重点存在一定程度上的偏差。

2.3.2 关键词聚类时序分析

CiteSpace 的时间线视图突出了

各个聚类中文献在时间维度上的跨度; 而突现词所在的文献与对应时间段引文的激增相关联^[13], 能够直观呈现出研究热词持续的时间。

聚类模块性指数 (Q 值) 大于 0.3 表明聚类结构显著; 平均轮廓值 (S 值) 大于 0.7 时, 聚类则是高效率且令人信服的^[14]。在时间线视图 (图 5) 的 11 个聚类的信息中, Q 值为 0.750 1, 表明每个聚类都有清晰的轮廓; S 值

为 0.897 6, 意味着聚类结果可进一步分析。

视图中排名前 6 的聚类分别为“#0 *air pollution* (空气污染)”“#1 *frontal area index* (FAI, 锋面面积指数)”“#2 *thermal comfort* (热舒适性)”“#3 *urban heat island* (UHI, 城市热岛)”“#4 *computational fluid dynamics*”“#5 *turbulence model* (湍流模型)”。其中, 与研究方法相关

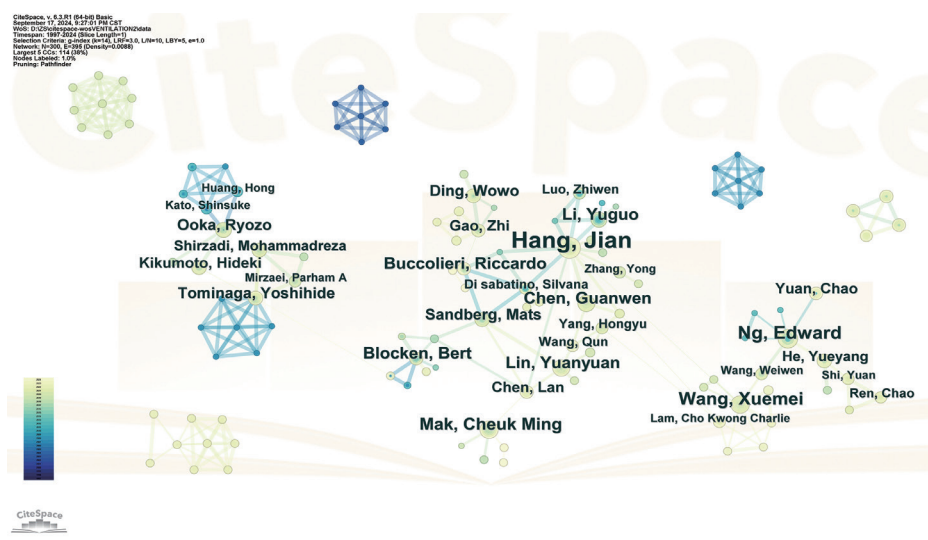


图 2 城市通风廊道研究作者共现网络

Fig.2 Co-authorship network of key scholars in urban ventilation corridors research



图 3 城市通风廊道研究机构共现网络

Fig.3 Institutional collaboration network in urban ventilation corridor research

的关键词主题占半数：FAI 为评估下垫面粗糙度和分析城市通风廊道的重要参数^[6]；CFD 为数值模拟方法，而湍流模型被定义为 CFD 仿真中的重要方面。而空气污染和城市热岛是城市通风性能降低后的主要环境问题。可见

相关研究持续关注城市空气污染问题和热岛效应，并且重视研究方法。

2.3.3 关键词突现分析

在突现分析中设置“ $\gamma[0,1]=1.0$ ”，得到 14 个突现主题词，不同类型的突现词表明城市通风廊道是流体力学、

大气物理学、建筑学、景观生态学、城市学等多学科交叉的研究热点。突现结果呈现了城市通风廊道的研究前沿（近三年突现强度为 4.21~4.67），包括“wind corridor（风廊）”“temperature（气温）”“city（城市）”“urbanization（城市化）”。“Hong Kong”作为突现词中唯一的地标性名词，在 2017—2018 年受到了高度关注（突现强度为 4.05）。在 487 篇相关文献中，出现频次较高且具有代表性的研究区还有日本新潟、深圳、南京、北京、武汉、广州等城市，这也从侧面映射出研究多聚焦于高密度城市，需求导向明显。

前 14 个突现词中存在 3 个与研究方法相关的突现词——“models”（模型，突现时间为 2007—2017 年，强度为 4.82）、“cfd”（突现时间为 2010—2014 年，4.66）与“large eddy simulation”（大涡模拟，突现时间为 2016—2018 年，强度为 4.1），进一步突出了数值模拟等研究方法对通风廊道的研究进程的影响。其他突

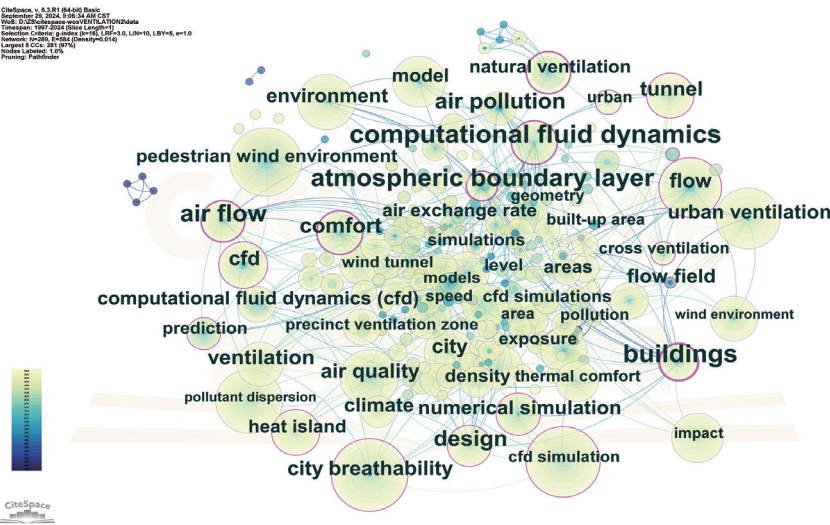


图 4 关键词共现网络
Fig.4 Keyword co-occurrence network

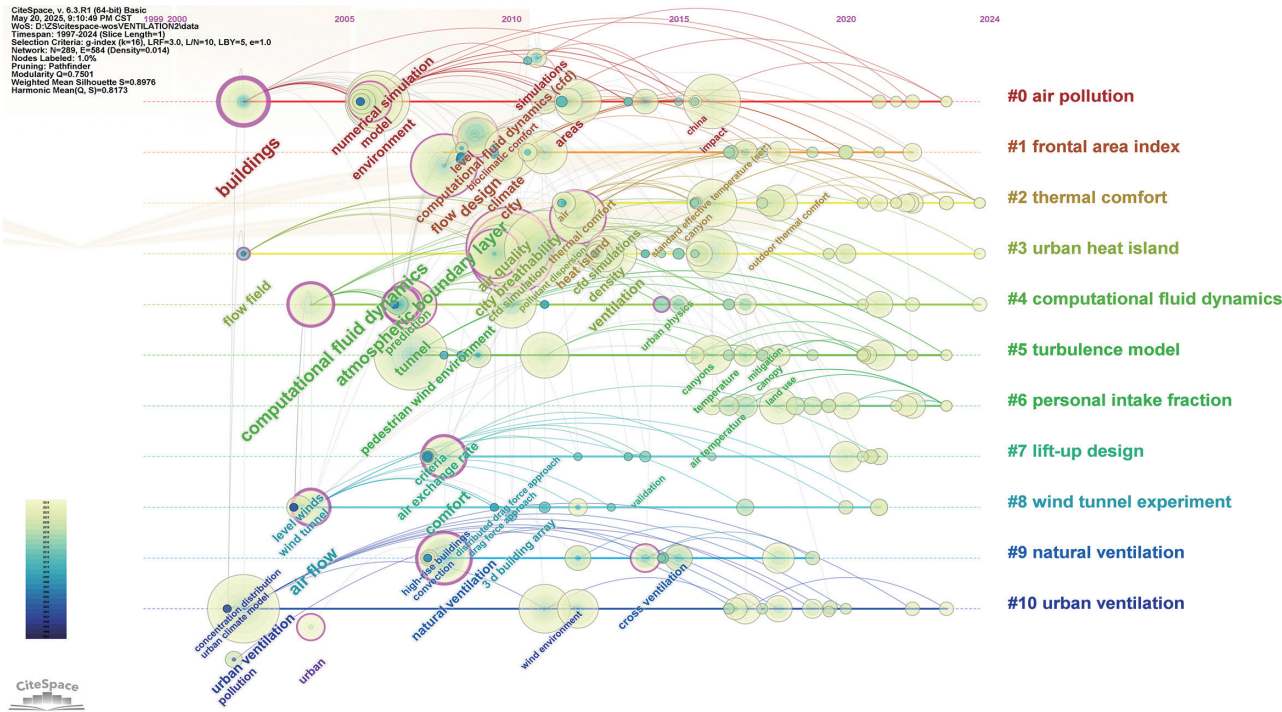


图 5 1997—2024 年关键词时间线视图
Fig.5 Keywords timeline clustering map (1997—2024)

现词多与理论相关,如“field pollutant dispersion”(现场污染物扩散,突现时间为2015—2020年,强度为3.83)、“pedestrian wind environment”(突现时间为2014—2019年,强度为6.8)、“prediction”(预测,突现时间为2012—2018年,强度为6.73)、“dispersion”(扩散,突现时间为2010—2015年,强度为4.18)、“flow”(流动,突现时间为2008—2014年,强度为4.1)等,表明相关研究侧重于模型优化与城市通风廊道的评估,研究的现实意义有待加强。

分析发现城市通风廊道研究多服务于大城市,但城市通风廊道专项研究存在大片空白,研究的针对性强而普适性弱。

3 研究方法进展与分析

3.1 通风廊道早期研究方法局限

评估下垫面粗糙度是定位城市通风廊道的要点之一。早期测量时,粗糙度评估依赖于历史数据的集合,如Alan G. Davenport^[15]与Jon Wieringa^[16]创建的针对不同土地利用类型的粗糙度参考表,但视觉评估易导致数据分析的主观错误,且受风向制约。为进一步提高数据的可靠性,利用不同高度的传感器获得数据的微气象学方法兴起^[17]。然而,该方法成本高,需大量观测数据^[18]且对误差的敏感度高,并受相关法律限制而难以采集研究区的相关样点。

3.2 CFD的发展和局限

传统观测方法(野外测量、热遥感等)在城市通风廊道研究的微气候分析中占主导地位^[19],但随着计算资源的进步,数值模拟方法崛起^[20]。2004年开始,CFD越来越多地被应用于模拟城市风环境的研究^[21]。CFD的优势在于其可在微观尺度上模拟气流的多向运动情况^[22],提供整个计算域中任何被研究的变量的信息^[23],从而直观显示出城市通风廊道的分布情况。且CFD能够将速度场与温度场进行耦合,从而更加精准高效地选择通风廊道节点。然而,精细化的特点导致其计算成本过高且受制于计算机的性能,因此CFD只能在极小区域内(单个建筑、小型社区等)实施。此外,风洞法也能够对气流等细节上的变化进行客观而真实地记录,但同样受实验成本高、模拟范围有限等限制^[24]。

CFD模拟的理想城市区域仅包含简单的建筑物形状,而真实城市的复杂性通常远超理想城市,构建相应的模型更为艰难,其验证过程更具挑战性,需要依赖现场测量数据。此外,多数研究采用雷诺平均纳维-斯托克斯(Reynolds-averaged Navier Stokes, RANS)方程或大涡模拟(Large Eddy Simulations, LES)^[25]。由于LES的计算要求高,RANS又能够基本满足研究需求,在LES被证实精度层面优于RANS模拟的前提下,绝大多数研究仍采用RANS方程^[26]。Yamada and Mellor E-ε是微气候模拟工具ENVI-Met中唯一可用的湍流模型选项,因此,尽管相关指南中^[27-28]并未明确推荐,其依旧是CFD中常用的湍流模型。目前已出现更多改进过并被验证在某些方面性能更好的湍流模型,但它们在相关研究中的应用率相对较低。

综上所述,研究应聚焦于LES的改进与更多湍流模型的优化、验证和使用,让CFD能够适应多样化的城市情况。

3.3 地理信息系统的发展和局限

2010年,基于地理信息系统(Geographic Information System, GIS)的方法在城市通风廊道领域的研究中快速发展^[29]。该方法通过计算下垫面粗糙度分析城市通风环境,结合FAI和最低成本路径(Least Cost Path, LCP)来定位城市区域的主要通风廊道,突破了前文2种数值模拟方法在范围上的局限。其中LCP指两点间阻力最小的路径,通常以粗糙度、植被面积和水域等为依据定位通风廊道;FAI则综合考虑了建筑物的高度、宽度(正面面积)和风向。与微气象方法相比,FAI无需借助高塔或仪器测量数据^[6],FAI的值越大,风阻越大,通风潜力越低^[30]。该方法具有计算效率高、过程便捷和结果直观的优点,但LCP只分析阻力最小的通风廊道,在增加风口数量后,廊道会出现重叠现象,难以分离有效信息^[24]。

3.4 新方法的兴起

基于电路理论^[31]的分析方法尝试突破上述方法的不足,将城市冠层中的空气阻力类比成电路中的阻力值,风的出入口分别代表低电位和高电位,2个电位之间形成的电流代表通风的概率和质量。此方法能够分析大尺度城市通风环境,并避免进行空气动力学复杂计算,但因电流仅代表通风概率,该方法不能和CFD模拟一样精确呈现建筑周围的气体流动情况。另有邻域归一化电流模型(NN-CM)使用邻域归一化来改进基于电路理论的城市通风廊道识别方法,降低了结果的主观性^[32]。此外,还有基于激光雷达(LightLaser Detection and Ranging, LiDAR)数据观察垂直风廓线从而识别通风廊道的新方法^[17]。该方法在形态计量分析中对粗糙度参数(粗糙度、长度和位移高度)以及孔隙率进行研究,为研究提供了更高精度的地形特征,如地形起伏与障碍物属性(类型、尺寸及孔隙率)等。

4 讨论

城市通风廊道研究缺乏以相关理论为科学指导,解决实际城市热岛效应及通风问题的具体策略和建议,且研究区、研究方法具有较大发展空间。既往研究并未全面考虑温度和盛行风等因素的变化对通风廊道的影响,研究方向也存在局限,这使得研究在全球城市范围的适用性较弱。基于此,未来城市通风廊道的研究应探索更多方法,深挖研究区域,以多样化的方式连接廊道,并展开多学科和多地域的合作。

4.1 通风廊道研究方法探索

前文提到CFD计算成本高且只能在极小范围内进行模拟,因此,除尝试多样化的湍流模型与优化LES之外,建议在前期模型建立阶段,通过“点”验证、“点”评估的形式,结合实地测量与影像数据,将CFD模型用于小区域通风廊道潜力的验证与廊道策略的评估。如尝试利用已有的高分辨率热红外卫星影像数据对CFD模型预测的地表温度进行检验,通过偏差率大小评估模型预测微气候的能力^[33],更精

准地指导补偿空间和通风廊道节点的选择。而较大区域的通风廊道则考虑通过遥感（Remote sensing, RS）与 GIS 评估通风条件^[34]。

在中期通风廊道生成阶段，优先选择 LCP、电路理论等成本相对较低、能够快速形成策略的方法。但 LCP 模型捕捉的通风廊道路径不等于气流轨迹，气流无法根据风量、风速等数据准确地沿着累积风阻最小的路径进行流动^[35]，因此在形成通风廊道的过程中不能精准地选择合适的节点。而电路理论将“气流”类比为“电流”进行仿真模拟，理论上存在突破上述方法瓶颈的可能，但其在相关领域的研究中存在较大空白，应对其模型优化与模拟结果的验证进行深入探索。因此在末期形成不同策略时，考虑将二者形成的路径均作为结果选项，利用 CFD 进行结果评估，对比出最优项。或将二者形成的路径进行合理拟合，即用关键点标出 2 种方法形成的不同路径，然后利用 CFD 选择较优点，最后将这些点连线形成唯一的路径策略，通过反复的验证和修改，直至路径策略达到较优结果（图 6）。

在 CFD 验证方面，目前大多数实地气温测量活动的数据适用性仍存在局限，这是气象条件的复杂多变性导致的。气温测量活动不仅需要精确测量大量参数（在模拟中用作边界条件），且需对城市区域范围、测量精度等信息进行详尽记录，否则将无法进行全面的验证演算^[23]。因此，若同一地区的相关机构能够加强合作，完成繁琐庞大的数据收集工作，也能更高效地形成较为完整的共享数据库。

RS、GIS 与 CFD 等方法在经过不断完善后基本满足了

大尺度与微尺度研究的需要，但现有研究极少关注中尺度大气环流对地面通风性能的影响。而区域通风廊道（Regional Ventilation Corridor, RVC）对大气环流敏感度高，考虑气候因素将使通风廊道的研究更加全面。王伟文等^[11]以北京为研究区提出了一种基于 FLEXPART-WRF 模型对空气块进行后向轨迹模拟从而识别 RVC 的新方法，该方法能够有效识别中尺度大气环流下 RVC 的边界层，以及城市冠层通风在天气尺度和季节尺度上的时空差异。该耦合模型已被广泛应用于污染物扩散研究^[36]，但很少被用于识别通风廊道，其能够在一定程度上弥补目前在气候、季节层面下通风廊道动态变化的研究空缺。

此外，在人工智能兴起的当下，张秉超等^[37]于 2024 年提出一种以智能城市捕风器为基础的新框架，研究抓住香港广告牌密集的特性，将其设计为“捕风器”，利用深度强化学习（Deep Reinforcement Learning, DRL）模型进行训练，从而达到实时改善风环境的效果。然而，目前 DRL 的方法仍面临样品利用效率低下、计算成本高等问题，且该方法是否能够应用于真实城市仍有待验证。因此，在研究城市通风廊道层面，除出现次数较多的 CFD、GIS、RS 等方法外，电路理论、后向轨迹模拟、DRL 等新兴研究模式也存在巨大的研究空白和价值，有待深入挖掘。

4.2 通风廊道研究区深挖

目前通风廊道相关研究对研究区的分类局限于规模大小、气候差异等基本形态层面，但这种划分方法并不准确。不同规模的城市在构建通风廊道时所用的方法并无明显差

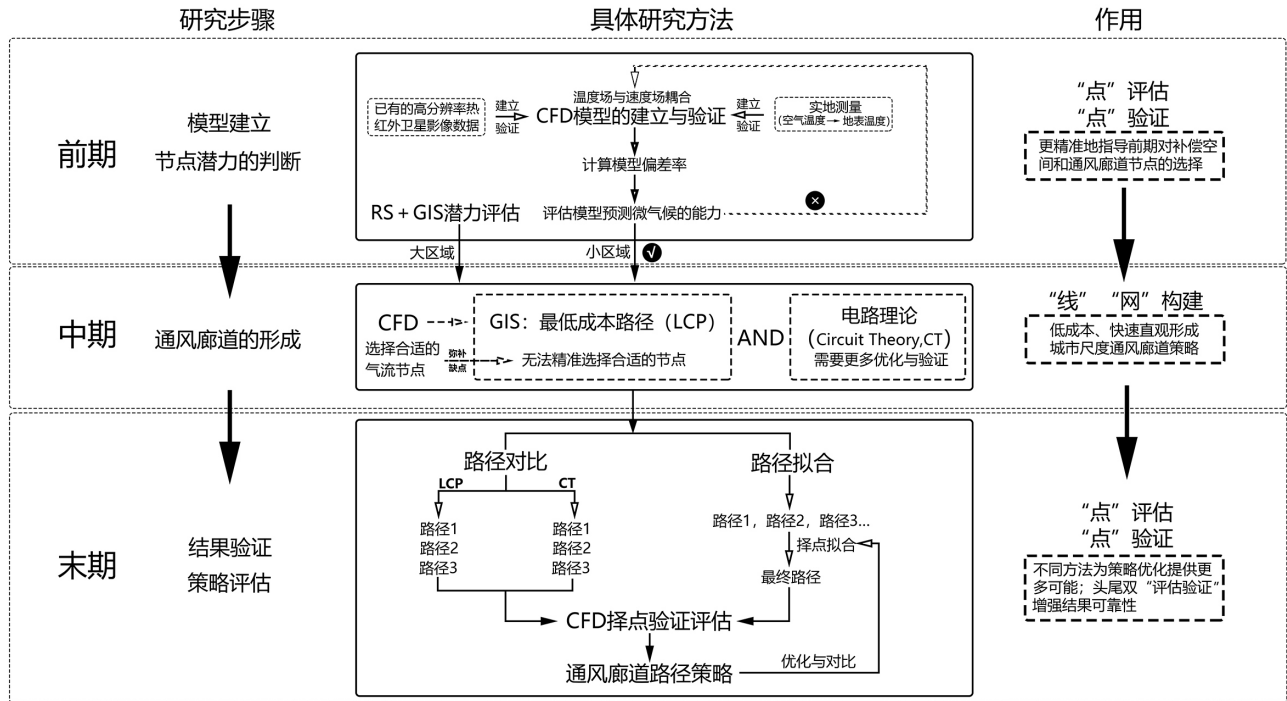


图 6 宏观 - 微观尺度通风廊道研究方法框架构想

Fig.6 Conceptual framework for macro-micro scale method for urban ventilation corridor research

异, 真实城市面临的主要环境问题才是研究区的分类依据, 如“火炉城市”武汉^[38]等较倾向于利用通风廊道缓解城市热岛效应, 改善人口密集地区的风环境; 香港^[39]、深圳^[40~41]倾向于改善城市建筑密集区的风环境格局; 北京则聚焦于空气污染等问题。在面临相似问题的地区展开合作显然更为合理, 但既往研究并未对研究区的异质性进行合理分类, 这也导致相关合作无法高效对接并展开。

此外, 目前大多数策略方案均以缓解城市热岛效应为出发点^[1,42], 但热岛效应并非全无好处。如纬度较高的地区, 热岛效应能够在一定程度上减少其在寒冷天气的能源消耗。此外, 部分地区如昆明, 在多风季节的行人风环境较差且城市空气污染加重^[43], 因此需要进行风环境格局优化, 解决“风多风大”的问题。然而, “加强寒冷地区热岛效应”“以降低通风性能为目标的通风格局优化”这2个逆向思维层面的命题存在较大研究空白。相关领域对研究需求的认知不清晰导致研究区域类型相对单薄, 而研究区的局限又带来研究方向的局限。

如今越来越多的研究将通风廊道的概念应用于真实城市的规划设计中, 因此, 研究区域的选择与研究目标的拓展变得十分重要。部分城市将通风廊道研究作为区域绿地规划策略的优化措施之一, 如针对东北辽阳城市绿地格局优化的研究强调了城市风场对绿地功能的影响, 以通风廊道的形式优化氧气扩散格局, 并提出新的氧气源和通风廊道^[2]。同时少部分研究开始聚焦于城市规划设计在通风层面的其他现实意义, 如在 COVID-19 爆发后, 部分研究开始以通风为落脚点改善住宅区布局^[44]。2021 年王品等^[45]以香港为研究区突破性地城市空气通风与自然死亡率进行关联性研究; 同年, 黄焕春等^[46]提出城市热岛对人类健康构成严重威胁, 并以北京为研究区, 将通风廊道作为降低城市空间健康风险的措施之一。这类研究为促进城市规划在健康格局层面的进展提供了重要的指导意义。

因此, 研究区的扩大应着眼城市的实际问题, 在生态、环境等中心议题的基础上, 将不同地区的通风廊道与健康、经济等主题相结合, 这不仅具有现实意义, 而且是存在较大空白的研究方向。

4.3 通风廊道连接多样化

通风廊道研究应综合考虑“线与线”和“点与线”2种连接方式。城市为“面”, 通风廊道则为“线”, “线与线”的连接为城市通风廊道之间的连接。在连接问题上, 除了确保通风廊道之间的连续性外, 洁净空气、冷空气补偿空间(森林、草甸、湖泊等)的识别应作为解决城市通风问题的源头而受到重视。因此, 通风廊道与补偿空间的联系也必不可少, 即实现点与线的有效连接。

同时要综合考虑城市通风廊道内、外部网络结构的合理性。将各通风廊道的性能、影响范围以及城市建设成本等纳入评估标准, 形成合理的内部网络。并在设计单个城市通风廊道时, 考虑其与周围其他城市通风廊道的连接, 以形成更广阔的外部通风网络。

此外, 应根据城市的不同情况因地制宜地构建通风廊道, 确定城市通风廊道的节点与补偿空间的主要类型(开敞空间、水体或绿地)。例如, 相关研究利用研究区(位于韩国世宗特别自治市)拥有大量风生成林(wind-generating forests, WGF)、风扩散林(wind-spreading forests, WSF)和风连接林(wind-connecting forests, WCF)的特性建立风廊森林, 使夜间产生的新鲜空气能够流向城市开发地区的森林, 克服了对区域发展不利的风条件, 有效改善城市的风环境^[47]。

4.4 展开多学科、多地域合作

通风廊道的研究需结合不同类型数据的空间分布图(如风量风速、温度和污染值)与 CFD 模型进行效果评估^[35], 即 CFD 的验证仍是获得模型可靠结果的必要步骤。因此, 相关研究应进行实地测量, 获得可用于验证的数据, 从而确定通风廊道的策略在真实城市区域的应用效果。而且野外测量活动能够提供更多的合作机会, 发展多样的合作模式, 加强跨地域、跨学科的合作。然而, CFD 研究方法多用于大气科学等相关领域, 城市通风廊道的构建却更多以风景园林、景观、建筑、城乡规划、环境设计等专业为主, 这类学科往往使用 GIS、电路理论等更简便的方法。

从核心机构与作者的共现网络中可知, 核心作者中出现频次较高的中山大学大气科学学院的杭建教授与暨南大学环境与气候学院的王雪梅教授均更倾向于运用数值模拟的方法研究城市通风的机制, 而非构建通风廊道; 香港中文大学建筑学院的吴恩融教授则集中于研究城市通风评估和规划。因此, 可推测合作网络薄弱的原因是技术层与策略层的割裂, 技术层研究聚焦于模型的构建与评估, 缺乏对其实际应用的延伸; 策略层研究则聚焦于构建通风廊道, 缺少对其合理性的数据支撑。未来研究可更多地与大气科学、环境科学与工程等相关学科合作, 形成技术与策略的互补, 将城市气候学的研究成果运用到建筑和城市设计中。

5 结论

本研究利用 CiteSpace 将城市通风廊道相关文献的多维度数据可视化, 展现了研究的进程与热点: 城市通风廊道研究以 2010 年为转折点分为萌芽期和发展期; 研究具有多学科交叉的特点, 但方向和方法较为统一; 研究聚焦于运用数值模拟的方法对城市微气候进行模拟, 确定城市通风廊道的位置并评估其性能; 目前仍侧重于探索微观尺度, 对宏观尺度的探索仅为研究的发展趋势。同时, 城市通风廊道研究存在局限: 作者和机构的合作薄弱; 研究方法较为单一且缺少合理的方法组合; 研究区的地缘特征强, 较少依据城市问题对研究区进行分类; 对研究方向和实际意义的拓展不足, 并未全面考虑温度和盛行风随时间变化对通风廊道的动态影响; 缺乏解决实际城市通风问题的具体策略和建议。因此, 城市通风廊道未来研究可考虑以下 4 个方面: 1) 因地制宜地选择补偿空间与廊道节点, 在策略层面综合考虑“线与线”和“点与线”2 种城市通风廊道连接方式, 以及通风廊道内

部与外部网络结构的相互影响。2) 将不同的研究方法组合分析, 并深入挖掘电路理论、后向轨迹模拟、DRL 等新研究方法和模式。3) 以问题为导向划分城市研究区, 在逆向思维层面以及健康、经济等新议题的背景下, 拓宽通风廊道的研究方向。4) 以数据库共享的形式加强研究机构间的联系, 并在技术层和策略层进行跨学科交流。

本研究在数据可视化的基础上, 较为系统全面地梳理了城市通风廊道研究方法的发展历程, 并提出宏观-微观尺度上通风廊道研究方法框架构想; 融合相关研究案例提出新的研究模式; 深挖研究合作薄弱的原因与研究方向的局限, 并提出合理建议, 为后续研究提供新的科学思路。然而, 相关数据仅来源于 WOS 数据库的 487 篇文献, 且提出的研究方法组合构想并未得到充分的数据和文献支撑, 可能影响结论的准确性。

注: 图片均由作者自绘。

参考文献:

- [1]ASHIE Y, KONO T. Urban - scale CFD analysis in support of a climate - sensitive design for the Tokyo Bay area[J]. International Journal of Climatology, 2011, 31 (2) : 174-188.
- [2]ZHOU Y, SHI T, HU Y, et al. Urban green space planning based on computational fluid dynamics model and landscape ecology principle: A case study of Liaoyang City, Northeast China[J]. Chinese geographical science, 2011, 21 (4) : 465-475.
- [3]HANG J, LI Y, SANDBERG M. Experimental and numerical studies of flows through and within high-rise building arrays and their link to ventilation strategy[J]. Journal of wind engineering and industrial aerodynamics, 2011, 99 (10) : 1036-1055.
- [4]BUCCOLIERI R, SANDBERG M, DI SABATINO S. City breathability and its link to pollutant concentration distribution within urban-like geometries[J]. Atmospheric Environment, 2010, 44 (15) : 1894-1903.
- [5]NG E, YUAN C, CHEN L, et al. Improving the wind environment in high-density cities by understanding urban morphology and surface roughness: A study in Hong Kong[J]. Landscape and Urban planning, 2011, 101 (1) : 59-74.
- [6]XU F, GAO Z. Frontal area index: A review of calculation methods and application in the urban environment[J]. Building and Environment, 2022, 224: 109588.
- [7]任智军, 朱东华, 荆雷. 基于可视化数据挖掘的管理科学科技文本分析研究[J]. 科学学与科学技术管理, 2006 (1) : 8-12.
- [8]NG E. Policies and technical guidelines for urban planning of high-density cities—air ventilation assessment (AVA) of Hong Kong[J]. Building and environment, 2009, 44 (7) : 1478-1488.
- [9]COLGLAZIER W. Sustainable development agenda: 2030[J]. Science, 2015, 349 (6252) : 1048-1050.
- [10]NG E, CHENG V. Urban human thermal comfort in hot and humid Hong Kong[J]. Energy and Buildings, 2012, 55: 51-65.
- [11]WANG W, YANG T, LI Y, et al. Identification of pedestrian-level ventilation corridors in downtown Beijing using large-eddy simulations[J]. Building and Environment, 2020, 182: 107169.
- [12]XU Y, WANG W, CHEN B, et al. Identification of ventilation corridors using backward trajectory simulations in Beijing[J]. Sustainable Cities and Society, 2021, 70: 102889.
- [13]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[J]. 四川建筑, 2023, 43 (1) : 55-60.
- [14]陈悦, 陈超美, 刘则渊, 等. CiteSpace 知识图谱的方法论功能[J]. 科学学研究, 2015, 33 (2) : 242-253.
- [15]DAVENPORT A G, GRIMMOND S, OKE T R, et al. Estimating the roughness of cities and sheltered country[C]//12th Conference on Applied Climatology. Asheville, NC: Amer Meteor Soc, 2000.
- [16]WIERINGA J. Updating the Davenport roughness classification[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1992, 41 (1-3) : 357-368.
- [17]WICHT M, WICHT A. LiDAR-based approach for urban ventilation corridors mapping[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2018, 11 (8) : 2742-2751.
- [18]GRIMMOND C S B, KING T S, ROTH M, et al. Aerodynamic roughness of urban areas derived from wind observations[J]. Boundary-Layer Meteorology, 1998, 89: 1-24.
- [19]RIZWAN A M, DENNIS L Y C, CHUNHO LIU. A review on the generation, determination and mitigation of Urban Heat Island[J]. Journal of environmental sciences, 2008, 20 (1) : 120-128.
- [20]SOUC H C, GRIMMOND S. Applied climatology: urban climate[J]. Progress in physical geography, 2006, 30 (2) : 270-279.
- [21]YOSHIE R, MOCHIDA A, TOMINAGA Y, et al. Cooperative project for CFD prediction of pedestrian wind environment in the Architectural Institute of Japan[J]. Journal of wind engineering and industrial aerodynamics, 2007, 95 (9-11) : 1551-1578.
- [22]PENG F, WONG M S, WAN Y, et al. Modeling of urban wind ventilation using high resolution airborne LiDAR data[J]. Computers, Environment and Urban Systems, 2017, 64: 81-90.
- [23]TOPARLAR Y, BLOCKEN B, MAIHEU B, et al. A review on the CFD analysis of urban microclimate[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017, 80: 1613-1640.
- [24]XIE P, YANG J, WANG H, et al. A New method of simulating urban ventilation corridors using circuit theory[J]. Sustainable Cities and Society, 2020, 59: 102162.
- [25]VAN HOOFF T, BLOCKEN B, GOUSSEAU P, et al. Counter-gradient diffusion in a slot-ventilated enclosure assessed by LES and RANS[J]. Computers & Fluids, 2014, 96: 63-75.
- [26]BLOCKEN B, STATHOPOULOS T, VAN BEECK J. Pedestrian-level wind conditions around buildings: Review of wind-tunnel and CFD techniques and their accuracy for wind comfort assessment[J]. Building and Environment, 2016, 100: 50-81.
- [27]BLOCKEN B. Computational Fluid Dynamics for urban physics: Importance, scales, possibilities, limitations and ten tips and tricks towards accurate and reliable simulations[J]. Building and Environment, 2015, 91: 219-245.
- [28]TOMINAGA Y, MOCHIDA A, YOSHIE R, et al. AIJ guidelines for practical applications of CFD to pedestrian wind environment around buildings[J]. Journal of wind engineering and industrial aerodynamics, 2008, 96 (10-11) : 1749-1761.
- [29]WONG M S, NICHOL J E, TO P H, et al. A simple method for designation of urban ventilation corridors and its application to urban heat island analysis[J]. Building and Environment, 2010, 45 (8) : 1880-1889.
- [30]YANG J, WANG Y, XIAO X, et al. Spatial differentiation of urban wind and thermal environment in different grid sizes[J]. Urban Climate, 2019, 28: 100458.

- [31]MCRAE B H, DICKSON B G, KEITT T H, et al. Using circuit theory to model connectivity in ecology, evolution, and conservation[J]. Ecology, 2008, 89 (10) : 2712-2724.
- [32]XIE P, YANG J, SUN W, et al. Urban scale ventilation analysis based on neighborhood normalized current model[J]. Sustainable Cities and Society, 2022, 80: 103746.
- [33]TOPARLAR Y, BLOCKEN B, VOS P, et al. CFD simulation and validation of urban microclimate: A case study for Bergpolder Zuid, Rotterdam[J]. Building and environment, 2015, 83: 79-90.
- [34]LIU Y, FANG X, CHENG C, et al. Research and application of city ventilation assessments based on satellite data and GIS technology: a case study of the Yanqi Lake Eco - city in Huairou District, Beijing[J]. Meteorological Applications, 2016, 23 (2) : 320-327.
- [35]方云皓, 顾康康. 城市通风廊道研究综述 [J]. 生态学报, 2024, 44 (13) : 5444-5458.
- [36]CHEN W, WANG X, COHEN J B, et al. Properties of aerosols and formation mechanisms over southern China during the monsoon season[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2016, 16 (20) : 13271-13289.
- [37]ZHANG B, LI C Y, KIKUMOTO H, et al. Smart urban windcatcher: conception of an AI-empowered wind-channeling system for real-time enhancement of urban wind environment[J]. Building and Environment, 2024, 253: 111357.
- [38]YIN J, ZHAN Q, TAYYAB M, et al. The ventilation efficiency of urban built intensity and ventilation path identification: a case study of Wuhan[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2021, 18 (21) : 11684.
- [39]KWOK Y T, DE MUNCK C, LAU K K L, et al. To what extent can urban ventilation features cool a compact built-up environment during a prolonged heatwave? A mesoscale numerical modelling study for Hong Kong[J]. Sustainable Cities and Society, 2022, 77: 103541.
- [40]ZHANG S, FANG X, CHENG C, et al. Research on the Planning Method and Strategy of Urban Wind and Heat Environment Optimization—Taking Shenzhen, a Sub-Tropical Megacity in Southern China, as an Example[J]. Atmosphere, 2022, 13 (9) : 1395.
- [41]LIU X, HUANG B, LI 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.
- [42]LAU T K, TSAI P C, OU H Y. Efficient and cost-effective method for identifying urban ventilation corridors using a heuristic search algorithm[J]. Sustainable Cities and Society, 2024, 101: 105144.
- [43]施择, 毕丽玫, 史建武, 等. 昆明多风季节大气 PM2.5 污染特征及来源分析 [J]. 环境科学与技术, 2014, 37 (12) : 143-147, 153.
- [44]LU H, XIA M, QIN Z, et al. The Built Environment Assessment of Residential Areas in Wuhan during the Coronavirus Disease (COVID-19) Outbreak[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2022, 19 (13) : 7814.
- [45]WANG P, GOGGINS W B, SHI Y, et al. Long-term association between urban air ventilation and mortality in Hong Kong[J]. Environmental Research, 2021, 197: 111000.
- [46]HUANG H, YANG H, CHEN Y, et al. Urban green space optimization based on a climate health risk appraisal—A case study of Beijing city, China[J]. Urban Forestry & Urban Greening, 2021, 62: 127154.
- [47]SUNG U J, EUM J H, SON J M, et al. Planning strategies of wind corridor forests utilizing the properties of cold air[J]. Land, 2021, 10 (6) : 607.

作者简介:

李谷一/2004年生/女/浙江温州人/西南林业大学园林园艺学院(昆明 650224)/在读本科生/专业方向为风景园林规划设计

徐茹芸/2003年生/女/湖北鄂州人/西南林业大学园林园艺学院(昆明 650224)/在读本科生/专业方向为风景园林规划设计

乔孟托/1999年生/女/山东济南人/西南林业大学园林园艺学院(昆明 650224)/在读硕士研究生/专业方向为风景园林规划设计

张龙(*通信作者)/1990年生/男/河南濮阳人/博士/西南林业大学园林园艺学院(昆明 650224)/讲师/研究方向为城市微气候、风景园林遗产保护/E-mail: zhanglong@swfu.edu.cn