

# 供需视角下老城区通风空间识别与匹配研究

方云皓<sup>1,2</sup>, 赵丽元<sup>1,2\*</sup>

(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)

**摘要:**城市通风空间作为风环境优化的场所,亦是热岛效应缓解、居民舒适度提高的重要载体。从供需视角下开展老城区通风空间研究,能够为城市应对全球气候变化采取的适应性与低碳发展策略提供支撑和指引。论文以上海徐汇区、广州荔湾区、南京鼓楼区以及武汉硚口区为例,基于建筑形态数据、遥感数据、POI数据以及常住人口密度数据等多源数据,分别构建通风供给系数(ventilation supply index, VSI)与通风需求系数(ventilation demand index, VDI)评估老城区的通风供给能力和需求水平,同时采用双变量局部空间自相关模型测度通风供给空间与需求空间的匹配关联程度,识别不同类型通风供需区域并划分管控干预优先级。结果表明:① 老城区整体通风供给能力较低,整体通风需求水平较高,二者在空间上具有显著的错落异质性,供给系数高值区主要分布在蓝绿空间等开阔场所,需求系数高值区主要集聚在高密度、高开发强度空间。② 老城区通风供需区域涵盖高供给—高需求、低供给—低需求、高供给—低需求以及低供给—高需求4种类型,其中处于供不应求(低供给—高需求)状态的空间单元比例约占14.9%~19.7%,通风供需匹配情况总体不容乐观,亟需得到管控优化以提升内部通风供给能力。③ 老城区高优先级管控区域分别位于上海徐汇区的徐家汇街道,广州荔湾区的华林、多宝、岭南、沙面、花地街道,南京鼓楼区的华侨路、湖南路、挹江门街道,武汉硚口区的宗关、汉正街道。

**关键词:**城市通风空间;供需匹配;双变量局部空间自相关模型;管控优先级;老城区

在中国近40年的快速城镇化浪潮中,郊区或乡村人口不断迁往城市,与此同时,大量自然用地逐渐转化为城市建设用地<sup>[1]</sup>。但由于人均土地资源相对匮乏,多数城市往往采取高层、高密度、紧凑型开发建设模式应对可持续发展困境。高强度的人工化布局态势导致城市下垫面气候环境发生剧烈改变,诱发了诸如能源消耗增加、热岛效应频发、雾霾天气增多、环境污染等种种“城市病”<sup>[2]</sup>,其易引发人体感官不适并干扰人的日常活动,严重的甚至危及生命健康<sup>[3]</sup>。面对日益严峻的气候环境问题,城市通风研究逐渐受到关注。城市通风指城市内部空气流动的调节、置换、控制,其作为一种气候适应性手段对于提高居民舒适度、改善人居环境具有显著作用。一方面,较高的城市风速会加快雾霾颗粒

物的驱散;另一方面,城市风途经绿地、水体等城市“冷源”时,会带来显著的降温效益,从而减少城市内部“热量”。伴随中国城镇化进入“下半场”<sup>[4]</sup>,城市通风的合理利用也能够在一定程度减少能源消耗,对于低碳可持续城市建设具有重要意义。

针对城市通风研究,众多学者基于地理学、生态学、城乡规划学等多学科视角将城市通风空间识别作为重点展开解析,主要原因有两点:其一,城市通风空间识别研究指利用不同方法和技术手段,对城市内部通风区域进行定量化、分类化识别的研究,其涵盖风环境的时空格局、结构特征及演变过程等内容,是精准研判局部风环境质量的主要依据;其二,城市通风空间识别研究是通风廊道构建<sup>[5-6]</sup>、通风效能评估<sup>[7-8]</sup>等研究的必要前提,可为城市气候适应

收稿日期:2023-08-08;修订日期:2023-09-28。

基金项目:国家自然科学基金项目(52378056)。[Foundation: National Natural Science Foundation of China, No. 52378056.]

第一作者简介:方云皓(1995—),男,安徽合肥人,博士生,主要研究方向为城市风热环境与城市气候适应性规划。

E-mail: 1198321182@qq.com

\*通信作者简介:赵丽元(1984—),女,江西南昌人,博士,教授,主要研究方向为可持续性城乡规划与设计。

E-mail: liyuanzhao@hust.edu.cn

引用格式:方云皓,赵丽元. 供需视角下老城区通风空间识别与匹配研究[J]. 地理科学进展, 2024, 43(2): 346-360. [Fang Yunhao, Zhao Liyuan. Identifying and matching ventilation spaces in old urban areas from the perspective of supply and demand. Progress in Geography, 2024, 43(2): 346-360.] DOI: 10.18306/dlkxjz.2024.02.011

性政策提供技术支撑。

当前针对城市通风空间的识别研究主要基于风环境评价以及通风潜力(阻力)评估两类范式展开。风环境评价研究指对局部区域风速、风向、风量、空气动力特性以及风场分布规律等进行评估的研究,其常用的方法包括实地测量法<sup>[9]</sup>、风洞实验法<sup>[10]</sup>、计算流体动力学模型(computational fluid dynamics model, CFD model)<sup>[11]</sup>。该类研究可通过实测或模拟的风环境相关特征为城市中风速风量较高、适合通风的空间提供识别依据,但受制于研究方法的局限性,其研究对象一般仅适用于小规模社区、建筑群或地块,在城市级与区域级等更大尺度的测算中往往存在低精度、高成本、高耗时等问题<sup>[12-13]</sup>。此外,城市风环境由于受到下垫面人类活动的剧烈影响,与自然风环境相比更为复杂和多变,仅考虑风速风量等气象要素研判城市通风空间无法为规划管控提供指引。因此,部分学者试图从“潜力”或“阻力”视角,基于GIS平台简化映射城市下垫面的空间形态参数,通过刻画参数的分布规律识别和评估不同类型的通风潜力(阻力)区域<sup>[14-15]</sup>。在众多空间形态参数中,3种风环境研究领域的“标识性”指标(迎风面积指数<sup>[16]</sup>、天空开阔度<sup>[17]</sup>、粗糙度长度<sup>[18]</sup>)的应用最为广泛。尽管建筑密度、道路宽度与街道高宽比等指标对城市风环境也存在一定影响,但其均不是引发其变化的关键要素,主要原因为此类指标无法与风向要素等产生直接联系。当面临不同风向时,无法利用其系统诠释不同风向下气流受到的阻碍作用。相对于建筑密度、道路宽度与街道高宽比等指标,“标识性”指标的计算不仅考虑了建筑物的大小和形状等特征,还纳入了建筑朝向因素,权衡了不同风向下城市建筑物对气流的阻挡效应。大量研究证明,利用“标识性”指标能够精准捕捉城市空间形态对风环境的潜在影响,有利于在机理层面系统性诠释二者的作用关系<sup>[19-20]</sup>。基于空间形态参数的提取与计算,通风潜力(阻力)评估研究一般强调“高潜力”或“高阻力”区域能够表征城市内“适合”或“不适合”的通风空间。然而,无论是风环境评价还是通风潜力(阻力)评估,其从本质上来说仍是对城市通风供给能力的解析,尚未对通风需求侧进行量化测度。因此,部分研究基于问题导向,结合热岛效应<sup>[21]</sup>、空气污染<sup>[22]</sup>等气候问题,通过空间耦合的方式对城市中具备通风能力且亟需通风的区域(需求侧)进行识别。

综上,尽管城市通风空间的识别研究已取得较为丰硕的成果,但较多停留在风环境特征或通风潜力(阻力)的供给侧评估层面,从供需视角对城市通风空间的识别研究尚处于起步阶段。虽然部分研究尝试从热岛效应、空气污染两个层面对城市通风需求程度进行解读,但整体以客观的气候效应为主,忽略了“人”的主观感受,难以反映通风需求程度的合理性。此外,过往的研究对象较少关注老城区。老城区作为城市中人口密度较大、业态功能较为密集的区域,其相对城市其他区域通风散热问题面临更加严峻的挑战<sup>[23]</sup>,尤其在后疫情时代,老城区内局地气候环境变化导致的健康问题愈发值得关注。鉴于此,本文以上海徐汇区、广州荔湾区、南京鼓楼区以及武汉硚口区为例,分别评估老城区的通风供给能力和需求水平,通过测度通风供给空间与需求空间的匹配关联程度,识别不同类型通风供需区域并划分管控干预优先级,以此为城市通风空间研究提供系统性框架,为中国其他城市在未来针对可能面临的气候适应性不足等问题提供思路。

## 1 研究区域

本文选取4座特大城市的老城区作为研究区域(图1),包括上海徐汇区(54.93 km<sup>2</sup>)、广州荔湾区(59.1 km<sup>2</sup>)、南京鼓楼区(54.18 km<sup>2</sup>)以及武汉硚口区(41.46 km<sup>2</sup>)。上海徐汇区位于华东地区,商业较为繁荣;广州荔湾区地处华南地区,拥有大量传统建筑、文化遗产以及商业街区;南京鼓楼区坐落于华东地区,历史、人文、旅游景点较多;武汉硚口区处于华中地区,具有丰富的江滩景观、居住生活设施。4座城市的老城区距离较远、独立性较高、在气候分区上存在差异,但在地理资源条件上存在相似性,其地形均较为平坦,同时均存在重要的河流水系(黄浦江、珠江、长江及汉江)经过。近年来,伴随快速城镇化的发展以及城市开发强度的增加,4座老城区内部通风受阻、热岛效应等气候适应性问题日益凸显,对其展开研究有助于更好地刻画中国老城区通风空间研究的共性与差异性特征。

## 2 研究数据与方法

### 2.1 研究数据及预处理

本文的研究数据主要包括建筑形态数据、风频



图1 研究区域

Fig.1 The study area

数据、Landsat 8 OLI/TIRS 数据、常住人口密度数据以及兴趣点(point of interest, POI)数据,各类型数据信息如表1所示。首先,统计老城区16位风向观测次数,根据单风向次数与16位风向总次数比值计算频率,并绘制成风玫瑰图(图2);其次,参照高德POI数据分类体系与相关文献分类方式<sup>[24-25]</sup>,对幼儿园、小学、老年人活动中心及养老中心等易敏感人群活动场所进行筛选;然后,利用ArcGIS Pro 3.0软件对建筑形态矢量数据、POI数据及人口密度栅格数据进行异常值去除、坐标纠偏、投影、裁剪等操作,利用Envi 5.3软件对已采集的Landsat 8 OLI/TIRS数

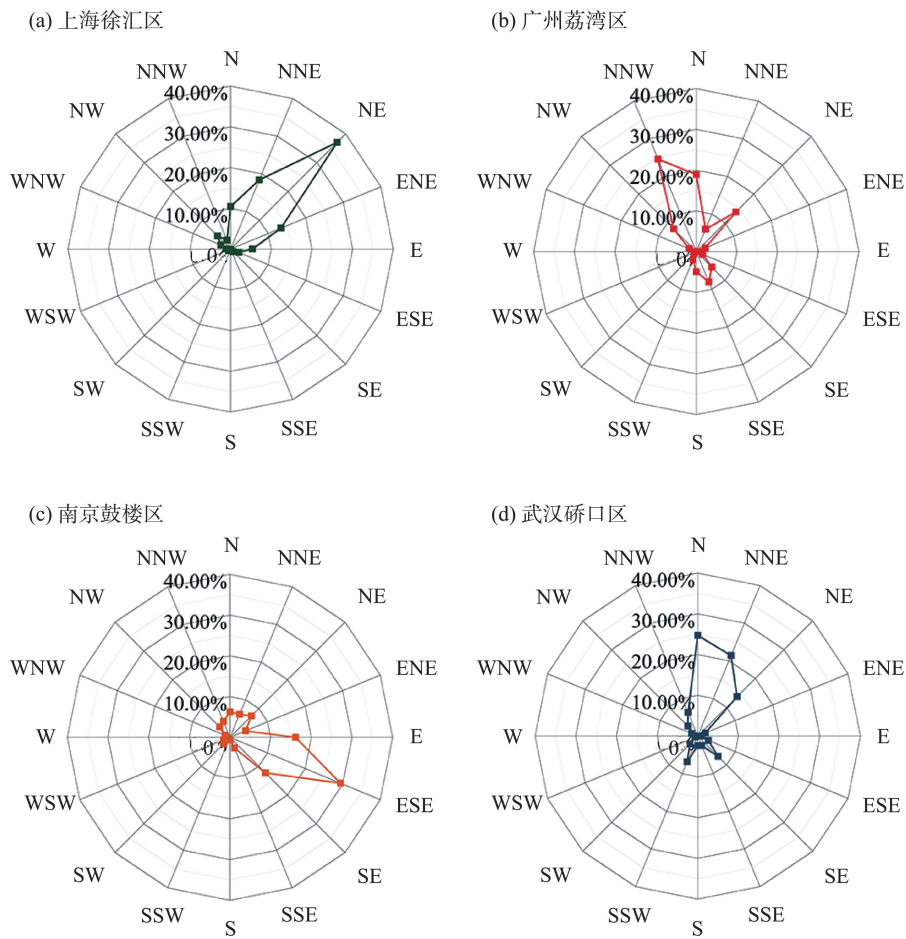
据进行辐射定标、大气校正、几何校正等操作;最后,在此基础上划分200 m×200 m网格单元对上述预处理后的研究数据进行统计。

需要说明的是,本文综合考虑数据的季节性(夏季)、统一性(相近时段)及可获取性(确保选取时段遥感切片含云量较少且大气可见度高)3个方面因素,选取2020年夏季4个相近时段的Landsat 8 OLI/TIRS数据。其中,选择夏季地表温度数据的主要原因为夏季是热岛效应、高温热浪等现象频发的季节,同时该时期具有风速风量较高的特征。相对于全年平均地表温度数据,选择夏季数据不仅可以直观的



表1 数据来源  
Tab.1 Data sources

	空间尺度	时间尺度	来源	用途
建筑形态数据	矢量数据(位置、高度与轮廓信息)	2020年	OpenStreetMap网站( <a href="http://download.geofabrik.de/">http://download.geofabrik.de/</a> )	通风供给能力评估
风向频率数据	—	2016—2020年夏季(6—8月)	慧聚数据网站( <a href="http://hz.hjhj-e.com/home/">http://hz.hjhj-e.com/home/</a> )	
Landsat 8 OLI/TIRS数据	30 m	2020年夏季,其中: 上海徐汇区:2020年8月16日 广州荔湾区:2020年7月11日 南京鼓楼区:2020年8月30日 武汉硚口区:2020年7月2日	地理空间数据云网站( <a href="https://www.gscloud.cn/">https://www.gscloud.cn/</a> )	通风需求危险源评估
常住人口密度数据	100 m	2020年	Worldpop网站( <a href="https://www.worldpop.org/">https://www.worldpop.org/</a> )	通风需求暴露度评估
POI数据	矢量数据(位置信息)	2020年	高德在线地图网站( <a href="http://www.amap.com/">http://www.amap.com/</a> )	通风需求脆弱性评估



注:E、S、W、N分别表示东、南、西、北。

图2 老城区风向频率统计

Fig.2 Statistics of wind frequency in the old urban areas

刻画热环境的恶化情况,提供更具针对性的危险源信息<sup>[20-21]</sup>,还能提高通风需求水平评估的准确性,为分析老城区居民实际的通风需求提供依据。

2.2 研究方法

本文参照相关研究<sup>[26-27]</sup>,以上海徐汇区、广州荔湾区、南京鼓楼区以及武汉硚口区为例,构建供需



视角下老城区通风空间识别与匹配研究框架(图3),包括4个步骤:①利用天空开阔度以及地表粗糙度指标构建通风供给系数,以此评估老城区通风供给能力;②从危险源、暴露度和脆弱性3个方面构建通风需求系数,以此评估老城区通风需求水平;③通过双变量空间自相关模型对老城区通风供需空间的匹配程度进行分析,识别4种区域包括高供给—高需求区域、低供给—低需求区域、低供给—高需求区域、高供给—低需求区域;④以低供给—高需求类型区域作为管控区域,对其干预优先级进行划分。

### 2.2.1 通风供给能力评估

从供给角度来说,老城区通风的供给能力主要与街道的开敞程度以及地表的“粗糙”程度有关。局部区域的开敞程度越低或“粗糙”程度越高,均意味着该区域建筑物之间或建筑物与道路之间的空气流动性越强,通风潜力越高。本文参照既往研究做法<sup>[7]</sup>,评估老城区通风供给能力。

#### (1) 天空开阔度

天空开阔度(sky view factor, SVF)<sup>[28]</sup>作为一个三维城市形态数值,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。其主要基于建筑形态与地面映射等几何模型,设置地面采集点依次发出投向天穹中的扫描束,通过连接计算点与几何建筑的交点,可将建筑在天穹的投影面积比例作为SVF值。本文结合老城区建筑物矢量数据,采取10 m×10 m的分辨率采集点并设置100 m搜索半径来计算单元网格的SVF平均值。SVF表达式如下:

$$SVF = 1 - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sin \gamma_i \quad (1)$$

$$\Omega = \sum_{i=1}^n \int_{\gamma_i}^{\pi/2} \cos \varphi d\varphi = 2\pi \cdot \left( 1 - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sin \gamma_i \right) \quad (2)$$

式中:SVF为天空开阔度(无量纲),取值范围为[0, 1],数值越接近1代表空间开敞程度越高; $\Omega$ 为天空可视立体角(rad); $\gamma_i$ 为第*i*个方位角时的影响地形高度角(rad);*n*为方位角数目(个)。

#### (2) 粗糙度长度

城市地表相对自然地表更加“粗糙”,其纹理在空间分布上具有异质性,如何明确“粗糙”程度尚无最佳方案,目前最为常用的方法是采用粗糙度长度(roughness length, RL)<sup>[29]</sup>这一指标对其进行大范围度量。粗糙度长度指空气流动受阻时风速为0的位

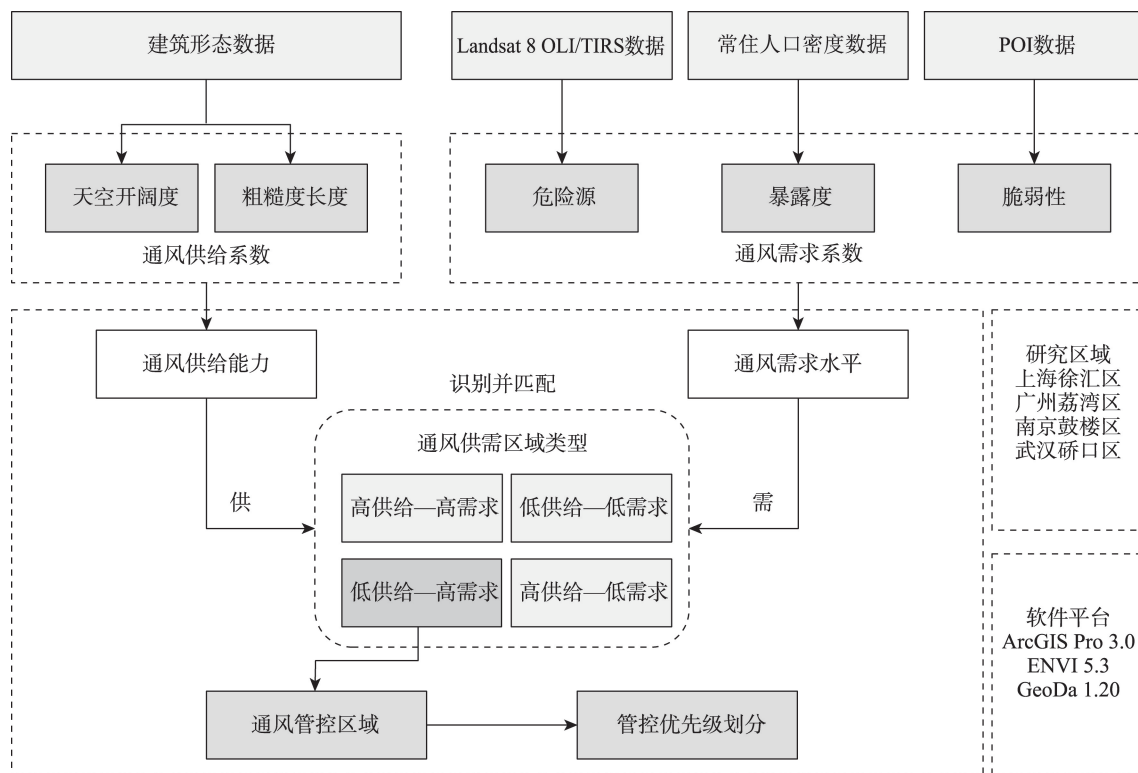


图3 研究框架

Fig.3 Research framework

置与地表的相对空间距离。该指标来源于空气动力学,是反映城市下垫面的粗糙程度的重要参数,其与城市空间形态密切相关,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。本文参照相关文献<sup>[29]</sup>,基于城市形态学模型,根据单元网格内建筑物的几何形状、密度以及高度分布等参数进行测算,其计算过程如下:

$$\frac{Z_d}{Z_h} = 1.0 - \frac{1.0 - \exp[-(7.5 \times 2 \times \lambda_F)^{0.5}]}{(7.5 \times 2 \times \lambda_F)^{0.5}} \quad (3)$$

$$\frac{Z_0}{Z_h} = \left(1.0 - \frac{Z_d}{Z_h}\right) \exp\left(-0.4 \times \frac{U_h}{u_*} + 0.193\right) \quad (4)$$

$$\frac{u_*}{U_h} = \min\left[(0.003 + 0.3 \times \lambda_F)^{0.5}, 0.3\right] \quad (5)$$

式中: $Z_d$ 为零平面位移高度(m); $Z_0$ 为粗糙度长度(m); $Z_h$ 为粗糙元高度(m); $U_h$ 为风速(m/s); $u_*$ 为摩阻速度(m/s); $\lambda_F$ 为单位迎风面积密度<sup>[16]</sup>,由特定风向迎风面积密度 $\lambda_{F(\theta)}$ 及其权重(16位风频)经过加权计算得到:

$$\lambda_{F(\theta)} = \sum_{\theta=1}^{16} \frac{\lambda_{p(\theta)}}{A_T} \times p(\theta) \quad (6)$$

式中: $\theta$ 为风向;16为风向方位集合; $\lambda_{p(\theta)}$ 为垂直于特定风向的建筑迎风面面积( $m^2$ ); $A_T$ 为网格单元面积( $200\text{ m} \times 200\text{ m}$ ); $p(\theta)$ 为特定风向频率,16位风向频率统计结果如图2所示。

### (3) 通风供给系数

天空开阔度与粗糙度长度均已被证明是直接影影响城市通风的关键指标。本文参照相关文献<sup>[17,30]</sup>,基于天空开阔度与粗糙度长度两个指标构建通风供给系数(ventilation supply index, VSI),以此评估老城区通风供给能力,其计算公式为:

$$VSI_0 = \frac{SVF}{RL} \quad (7)$$

式中:SVF为天空开阔度,RL为粗糙度长度(m), $VSI_0$ 为初始通风供给系数。采取归一化方式处理初始通风供给系数获取VSI指数(无量纲),其取值范围为[0, 1],数值越接近1表示城市地表通风潜力越高,通风供给能力越强。

#### 2.2.2 通风需求水平评估

从需求角度来说,老城区通风的需求水平主要与外界的气候威胁以及居民的活动分布有关。本文采用IPCC第5次报告定义的“危险源(hazard)—暴露度(exposure)—脆弱性(vulnerability)”评估框架

对通风需求水平进行评估:

#### (1) 危险源

危险源指与自然灾害有关的物理事件及其影响。在通风需求视角下,本文利用地表温度指标对危险源特征进行评估,其理由为优化城市风环境的目标之一是有效减缓地表温度的升高,避免高温热浪、热岛效应等对城市居民造成的热环境威胁。作为需求层面的危险源,地表温度高值区的通风潜力亟需得到提升。基于Landsat 8 OLI/TIRS遥感切片数据与ENVI 5.3软件,采用单通道算法中的辐射传输方程法(大气校正法)对2020年夏季4座老城区的地表温度进行反演。该方法综合考虑辐射面的多种功能以及大气对地表热辐射的消减影响,能够准确反映地面热环境的空间分布情况<sup>[31]</sup>。

首先,计算热辐射强度( $L_\lambda$ ),其主要由大气向上辐射亮度( $L_u$ )、大气向下辐射亮度( $L_d$ )以及卫星传感器接收地面的真实辐射组成,具体计算步骤如下:

$$L_\lambda = [\varepsilon \cdot B(T_s) + (1 - \varepsilon)L_d]\tau + L_u \quad (8)$$

式中: $\varepsilon$ 为地表比辐射率; $B(T_s)$ 为同温度下黑体在热红外波段的辐射强度; $\tau$ 为大气透射率,其与 $L_u$ 、 $L_d$ 均可通过NASA官网查询(<https://atmcorr.Gsfc.nasa.gov/>)。

其次,根据Planck反函数,将 $B(T_s)$ 转换为对应的热力学地表温度( $T_k$ ),单位为K,其计算过程为:

$$T_k = K_2 / \ln[1 + K_1 / B(T_s)] \quad (9)$$

式中: $K_1$ 和 $K_2$ 为热红外波段的定标常数,可通过查看遥感切片数据中MTL文件获取。对于TIRS 10波段而言, $K_1=774.89\text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \mu\text{m})$ , $K_2=1321.08\text{ K}$ 。

最后,利用ArcGIS Pro 3.0软件的栅格计算器进行单位转换,以将热力学地表温度( $T_k$ )转换为摄氏地表温度( $T$ ),单位为 $^\circ\text{C}$ 。

#### (2) 暴露度

暴露度指在不同灾害级别中人群、建筑、基础设施等因子的暴露情况。在通风需求视角下,本文参照相关文献<sup>[24]</sup>,基于常住人口密度指标对暴露度特征进行评估,其理由是常住人口密度表征城市人口的整体分布趋势,反映城市居民的通风诉求。人口越密集的区域,社会群体暴露于热环境危险源的概率越大,同时对风环境的感知力和偏好程度越强,对通风的需求量越高。

#### (3) 脆弱性

脆弱性指受灾体承受灾害的能力。在通风需

求视角下,本文参照相关文献<sup>[25-26]</sup>,利用幼儿园、小学、老年人活动中心及养老中心等易敏感人群活动场所的POI设施密度对脆弱性特征进行评估,其选取依据为相较于成年人,幼年与老年人等弱势群体身体抵抗能力差,自我保护和灾害应对能力弱,对风热环境(或气候舒适度)更为敏感。此类易敏感POI设施密度越高的区域,幼年与老年人口数量或聚集程度越强,同时也更易受到由通风潜力不足引发的负面影响。

#### (4) 通风需求系数

本文通过构建通风需求系数(ventilation demand index, VDI)对老城区的通风需求水平进行评估。具体来说,参照相关文献的做法<sup>[26]</sup>,首先根据危险源、暴露度及脆弱性评估结果明确相应指标的权重与分值区间(表2),其中危险源由均值—标准差法<sup>[32]</sup>予以划分;其次,通过加法合成法<sup>[33]</sup>加权叠加得到初始通风需求系数,该方法在强调客观实际的同时能够反映评价对象的综合水平,适用于指标信息内容不重复的情况,其计算公式为:

$$VDI_0 = \sum_{i=1}^3 w_i \times DIS_i \quad (10)$$

式中:VDI<sub>0</sub>为初始通风需求系数; $w_i$ 与DIS<sub>*i*</sub>分别为第*i*个指标的权重与分值;3为“危险源—暴露度—脆弱性”框架指标数量。为了使结果能够与通风供给评估结果进行匹配,对初始通风需求系数进行归一化处理,得到VDI指数(无量纲),其取值范围为[0, 1],数值越接近1表示通风需求水平越高。

#### 2.2.3 通风供需空间匹配

本文利用Geoda 1.20软件中的双变量局部空间自相关模型<sup>[34]</sup>对老城区通风供需匹配情况进行测度,在此基础上划分供需区域类型。该模型能够揭示空间单元属性值与邻近空间上其他属性值的相关性,在刻画两类地理要素的空间关联与依赖特

征时具有较高的适用性,可用于探测通风供需变量(VSI指数与VDI指数)在局部空间的关联与集聚特征,其计算表达式为:

$$I_i = z_i \sum_{j=1}^n w_{ij} z_j \quad (11)$$

式中: $I_i$ 反映网格单元*i*中VSI指数与VDI指数的局部空间关系; $z_i$ 和 $z_j$ 分别为空间单元*i*、*j*方差标准化的观测值; $w_{ij}$ 为空间权重。基于 $I_i$ 可形成LISA(local indications of spatial association)分布图,能够直观呈现供需变量的空间匹配模式。本文依据供需变量空间分布关系,将LISA分布图划分为5种类型:高供给—高需求区域、低供给—低需求区域、低供给—高需求区域、高供给—低需求区域以及无显著性区域。

#### 2.2.4 通风管控区域优先级划分

城市通风管控区域的优先级划分,能够为可持续城市规划管理提供依据,尤其在土地面积、自然资源、发展空间等集约节约的高强度发展模式下,有序的管控对于居民生活舒适性的提高与城市气候适应性的增强具有重要意义。本文在通风供需区域类型划分的基础上,将低供给—高需求区域定义为管控区域,采用优先级指数(priority index, PI)<sup>[35]</sup>对管控区域进行优先级划分,计算公式如下:

$$PI = \frac{(\text{Hazard} + 1) \times (\text{Exposure} + 1) \times (\text{Vulnerability} + 1)}{VSI + 1} \quad (12)$$

式中:Hazard为归一化地表温度(危险源指数);Exposure为归一化常住人口密度(暴露度指数);Vulnerability为归一化易敏感POI设施密度(脆弱性指数);VSI为通风供给系数。PI值越高,表明该地区的管控优先级越高。

本文基于4座老城区PI值,利用自然断点法按由大到小顺序将管控区域划分为I~IV级。

表2 基于危险源、暴露度及脆弱性的城市通风需求水平评估指标及权重

Tab.2 Urban ventilation demand assessment indicators and weights based on hazard, exposure, and vulnerability

层级	指标(单位)	权重	分值				
			10	8	6	4	2
危险源	地表温度(°C)	0.4	$T_{\text{mean}} + \text{STD} \leq T_m$	$T_{\text{mean}} + 0.5\text{STD} \leq T_m < T_{\text{mean}} + \text{STD}$	$T_{\text{mean}} - 0.5\text{STD} \leq T_m < T_{\text{mean}} + 0.5\text{STD}$	$T_{\text{mean}} - \text{STD} \leq T_m < T_{\text{mean}} - 0.5\text{STD}$	$T_m < T_{\text{mean}} - \text{STD}$
暴露度	常住人口密度(人/hm <sup>2</sup> )	0.3	$1500 \leq D$	$800 \leq D < 1500$	$400 \leq D < 800$	$100 \leq D < 400$	$D < 100$
脆弱性	易敏感POI设施密度(个/hm <sup>2</sup> )	0.3	$8 \leq P$	$5 \leq P < 8$	$3 \leq P < 5$	$1 \leq P < 3$	$P < 1$

注: $T_m$ 为某座老城区某像元地表温度的归一化值; $T_{\text{mean}}$ 为某座老城区标准化地表温度的平均值;STD为某座老城区地表温度标准差; $D$ 为常住人口密度; $P$ 为易敏感POI设施密度。



### 3 结果分析

#### 3.1 老城区通风供给能力空间分布

本文利用通风供给系数(VSI)来反映4座老城区的通风供给能力(图4)。结果表明,上海徐汇区的VSI高值区分布在黄浦江沿线地区,低值区分布在徐家汇、枫林路、斜土路、凌云路等街道,呈现“东高西低”的趋势;广州荔湾区的VSI高值区主要沿珠江后航道以及南部的海龙、中南、东沙街道分布,低值区分布在北部的西村、站前、南源、彩虹、逢源、金花、龙津等12个街道,呈现“南高北低”的趋势;南京鼓楼区的VSI高值区分布在长江沿线地区,低值区分布在江东等街道,呈现“南低北高”的趋势;武汉硚口区的VSI高值区分布在汉江以及西北部的易家、长丰、古田街道,低值区分布在汉水桥、宝丰、荣华、汉中、六角亭、汉正等街道,呈现“东低西高”的

分布趋势。

可以看出,4座老城区的VSI分布存在相似性。VSI高值区均集聚在江系河流等水域以及绿地、林地等植被覆盖率较高区域,此类区域具有宽敞开阔、无高密度建筑物阻挡、空气流动性较强、通风效能较高的特征;VSI低值区均集聚在狭窄巷道、高层住宅等区域,此类区域具有人类活动干预较强、建筑密度较大、开发强度较高的特征,通风条件相对较差。此外,通过计算可知,上海徐汇区、广州荔湾区、南京鼓楼区以及武汉硚口区的VSI平均值依次为0.23、0.26、0.27、0.28,表明4座老城区整体通风供给能力较低。

#### 3.2 老城区通风需求水平空间分布

本文利用通风需求系数(VDI)来反映4座老城区的通风需求水平,结果如图5。结果表明,上海徐汇区的VDI高值区主要分布在徐家汇街道,少量分

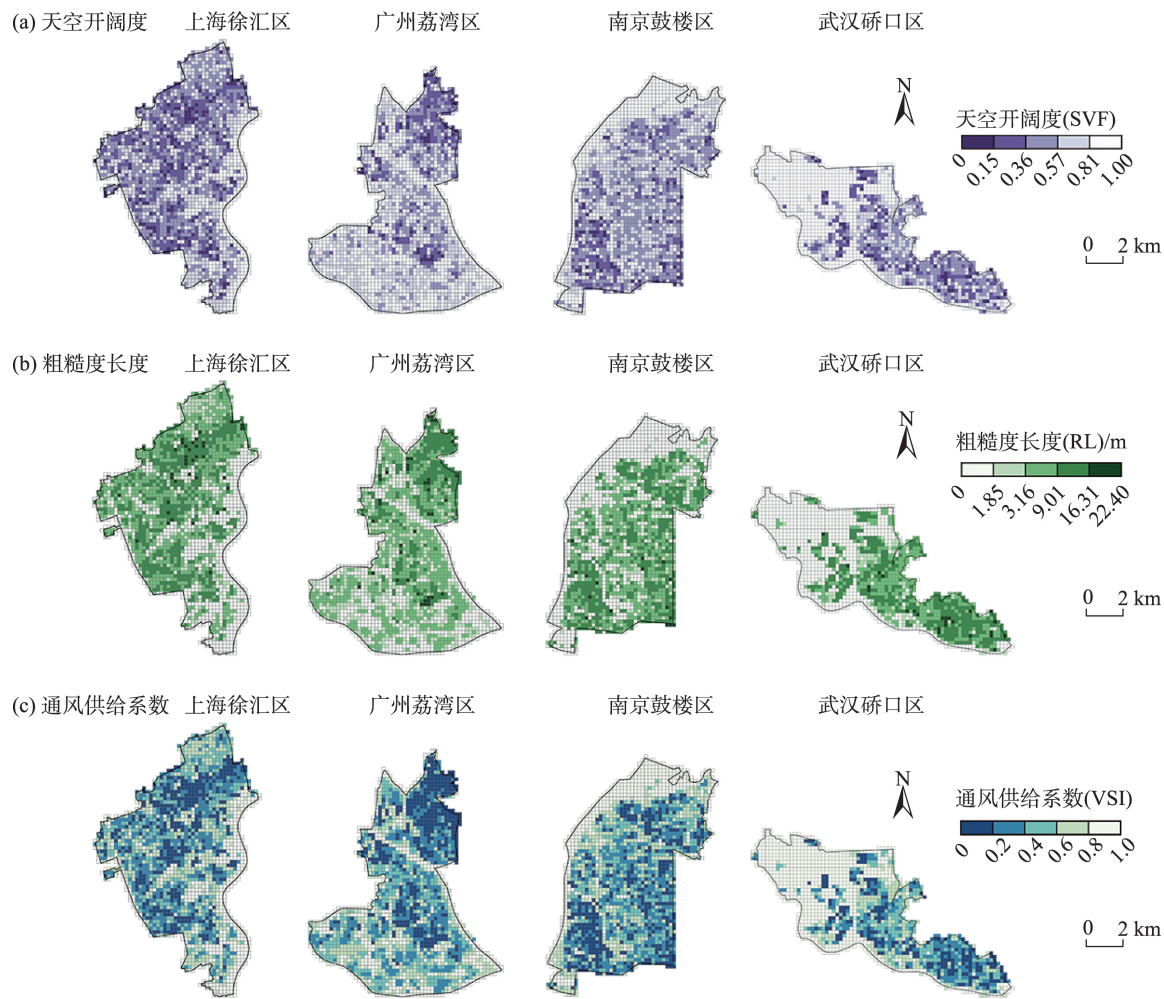


图4 老城区天空开阔度(a)、粗糙度长度(b)以及通风供给系数(c)空间分布

Fig.4 Spatial distribution of sky view factor (a), roughness length (b), and ventilation supply index (c) in the old urban areas

布在漕河泾、天平路等街道,低值区主要分布在黄浦江沿线地区;广州荔湾区的VDI高值区主要集聚在珠江北侧西村、站前、南源、彩虹、逢源、金花、龙津等12个街道,少量分布在珠江南侧冲口街道,低

值区主要分布在珠江后航道以及南部的茶滘、东沙等街道;南京鼓楼区的VDI高值区主要分布在湖南路、华侨路、挹江门等街道,低值区分布在长江沿线地区;武汉硚口区的VDI高值区主要分布在宝丰、

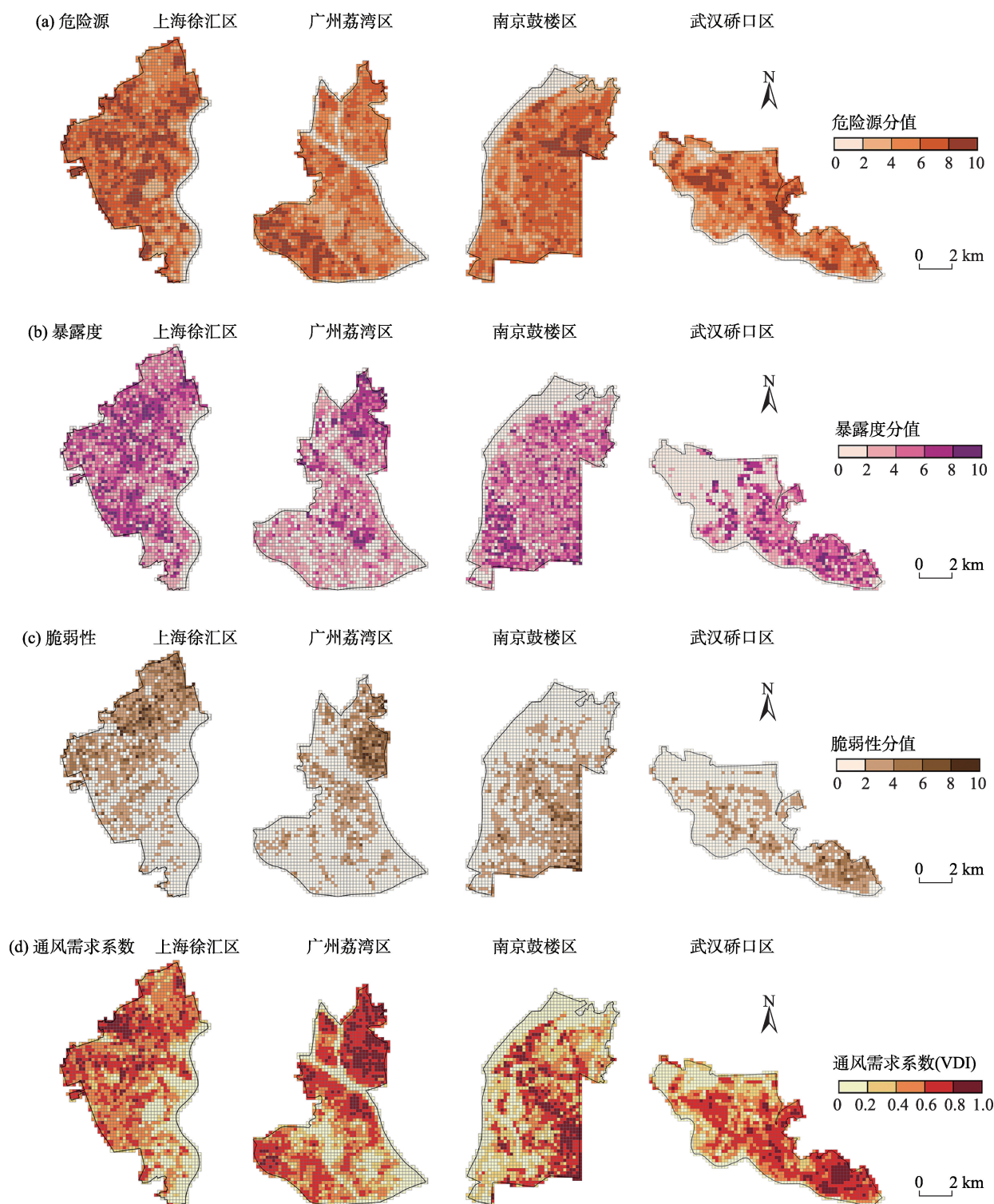


图5 老城区危险源(a)、暴露度(b)、脆弱性(c)与通风需求系数(d)空间分布

Fig.5 Spatial distribution of hazard (a), exposure (b), vulnerability (c), and ventilation demand index (d) in the old urban areas



荣华、汉中等街道,低值区分布在汉江流域及易家、长丰、古田等街道。

可以看出,4座老城区的VDI分布存在相似性,但在空间上均呈现出与VSI相对立的分布格局。VDI高值区均集中在商业中心,包含大量的商铺、办公楼和购物设施,少量分布在公寓、住宅楼以及历史文化街区,此类区域具有基础设施集中、热量集聚、人口密集、风通透性不足等特征;VDI低值区均集中在植被水体等蓝绿空间、公园与广场等开阔场所,此类区域具有低温、开发强度低、人口与基础设施稀疏、通风需求量低的特征。此外,通过计算可知,上海徐汇区、广州荔湾区、南京鼓楼区以及武汉硚口区的VDI平均值依次为0.61、0.54、0.55、0.54,表明4座老城区整体通风需求水平较高。

### 3.3 老城区通风供需区域类型

为了进一步解析4座老城区的通风供需匹配情况,本文基于双变量局部空间自相关模型分别探测通风需求系数与通风供给系数的LISA聚类形式。如图6所示,上海徐汇区的低供给—高需求区域主要集聚在徐家汇、田林、漕河泾、斜土路街道以及漕河泾新兴技术开发区,高供给—低需求区域主要分布在黄浦江沿线地区,少量分布在龙华街道、长桥街道、华泾镇;广州荔湾区的低供给—高需求区域主要呈“连片状”集聚在珠江北侧西村、站前、南源、彩虹、逢源、金花、龙津等12个街道,少量呈“斑块状”分布在珠江南侧石围塘、花地、冲口、海龙街道,高供给—低需求区域主要分布在珠江后航道以及茶滘、东漖、东沙街道;南京鼓楼区的低供给—高需求区域主要集聚在华侨路、湖南路、中央门、建宁路、挹江门、宝塔桥街道,高供给—低需求区域主要分布在长江沿线地区;武汉硚口区的低供给—高需

求区域主要集聚在宗关、宝丰、荣华、汉中、六角亭、汉正等街道,高供给—低需求区域主要分布在汉江流域及易家、长丰、古田街道。此外,4座老城区的高供给—高需求与低供给—低需求区域占比均较少且分布较为零散。

4座老城区通风供需匹配情况存在相似性。一方面,在空间分布上,4座老城区的低供给—高需求空间均具有低通风潜力、强人类活动干预、高建设强度、高温、高人口与基础设施密度等特征,而高供给—低需求空间均具有高通风潜力、高植被水体覆盖、低开发强度、低温、低人口与基础设施密度等特征。另一方面,结合通风供需匹配类型统计可知(图7),4座老城区的LISA聚类比例均呈现“高供给—低需求(16.8%~21.6%)>低供给—高需求(14.9%~19.7%)>高供给—高需求(3.7%~8.5%)>低供给—低需求(1.6%~4.2%)”的规律,其中上海徐汇区、广州荔湾区、南京鼓楼区以及武汉硚口区的低供给—高需求区域分别为304、324、377、301个空间单元,高供给—低需求区域分别为343、426、390、330个空间单元,表明4座老城区供不应求和供过于求的区域占比均较高,通风供需匹配情况总体不容乐观。

### 3.4 老城区通风管控区域优先级划分

本文基于优先级指数对管控区域(即低供给—高需求区域)进行优先级划分,按管控优先级由高到低依次划分为I~IV级,其中I级管控区域是需要优先干预以缓解老城区通风供需矛盾的重点区域。如图8所示,上海徐汇区的I级管控区主要分布在徐家汇街道;广州荔湾区的I级管控区主要分布在华林、多宝、岭南、沙面、花地街道;南京鼓楼区的I级管控区主要分布在华侨路、湖南路、挹江门街道;武汉硚口区的I级管控区主要分布在宗关、汉正街道。

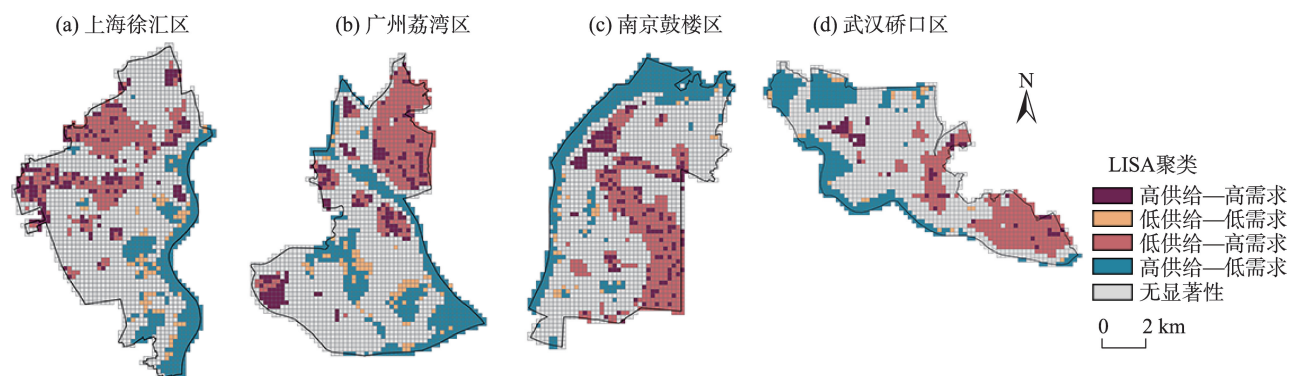


图6 老城区通风供需匹配类型空间格局

Fig.6 Spatial pattern of the types of ventilation supply and demand matching in the old urban areas



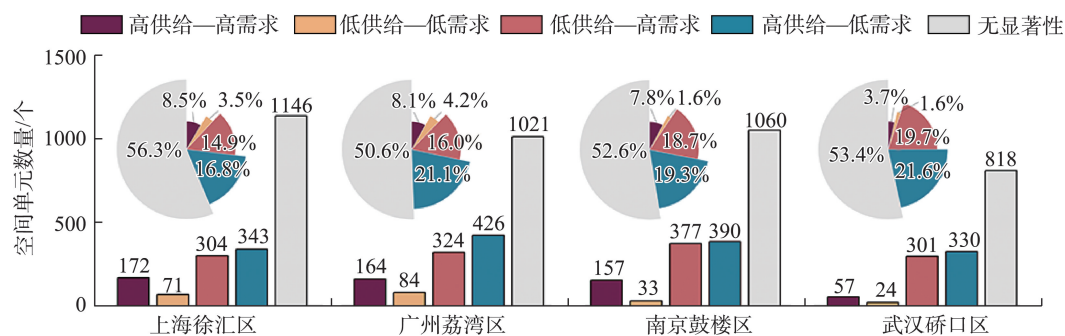


图7 老城区通风供需匹配类型统计

Fig.7 Statistics on the types of ventilation supply and demand matching in the old urban areas

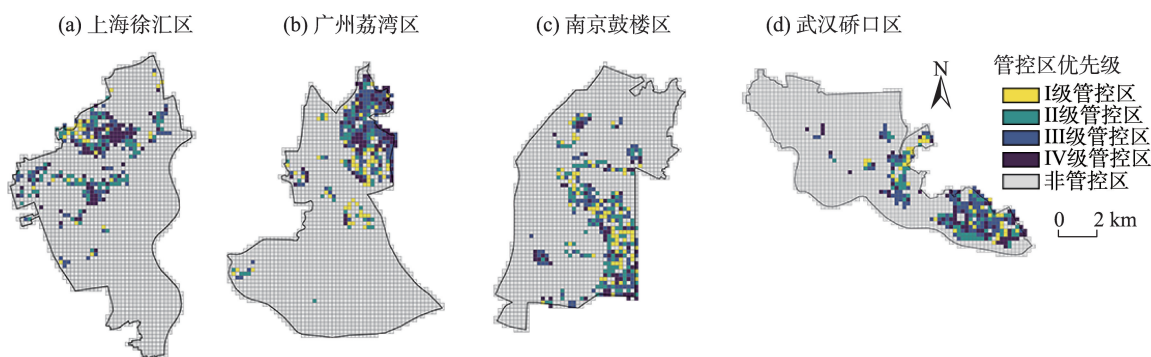


图8 老城区通风管控区域优先级空间分布

Fig.8 Spatial distribution of priority ventilation control areas in the old urban areas

## 4 讨论

本文针对老城区通风供需空间进行识别与匹配研究,由研究结果衍生的探索性认知与观点可概括为以下几点:

(1)“危险源—暴露度—脆弱性”框架对于丰富老城区通风需求水平评估研究具有重要意义。在以人为本的发展理念下,如何将通风需求与居民日常生活、工作相结合,是系统性地开展老城区通风评估工作的基础和前提。既往研究<sup>[7,36-37]</sup>对于通风需求的解读,常集中在城市气候层面,主要包括热岛效应(高温热浪)或空气污染两类。城市气候层面的要素仅反映客观的“危险源”特征,对于城市中“人”的关怀较少,难以体现合理的通风诉求。例如,在本研究中,若仅考虑“危险源”特征,对于地表温度值较高且相等的两种片区来说,其通风需求量应当是相同的,但若在此基础上考虑POI密度或常住人口密度等暴露度或脆弱性因素,两种片区的需求量则可能会出现空间异质性。这意味着仅考虑城市气候因素难以构建映射通风需求水平的系统性评

估框架,同时也说明结合多源数据的“危险源—暴露度—脆弱性”框架具有科学性与合理性,能够反映城市居民对通风的实际需求水平。

(2)供需匹配思路对于老城区中亟需通风区域的识别具有指引作用。在高强度的开发模式下,如何研判老城区中最需要通风的场所并将通风管控策略落实在最迫切的地区,是城市气候适应性规划的重要一环。既往研究<sup>[13-14,17]</sup>常集中于利用通风供给侧评估结果探寻关键区域,即通过相关建筑形态指标对城市通风潜力(阻力)进行测算,由此将通风潜力低值区或通风阻力高值区作为风环境优化区域。上述研究的做法存在局限性,主要原因在于实际生活中,通风供给和需求空间一般存在显著的错落差异,并非所有通风潜力低值区均需要得到提升。例如,对于本研究识别的低供给—低需求类型区域来说,尽管其通风潜力较低,自身的通风条件较差,但其对通风的需求也较低,在资金预算受限情形下,此类区域相对低供给—高需求类型区域,提升通风效能的必要性仍然较低。从本质上来说,城市通风空间供需匹配的关键在于平衡城市人口

和建成环境之间的关系,通风供给与需求评估均是老城区通风研究不可或缺的一部分,综合考虑通风空间的供需匹配能够更加精准、全面地识别老城区中亟需通风的区域。

(3) 结合4座老城区的发展现状与I级管控区域,有利于制定因地制宜的通风管控策略。①上海徐汇区的徐家汇街道(I级管控区域)是上海市中心地带,拥有繁华的商场和多样化的购物中心。建议严格控制用地、建筑密度、街道走向等因素,在条件允许情况下,可以以主干路(宜山路、漕溪路等)、商业街区(衡山路商业街)以及商业建筑的“缝隙”空间为载体构建街区尺度(50~100 m 宽度不等)通风廊道,确保高密度地区的空气流通性。②广州荔湾区的华林、岭南、多宝等街道(I级管控区域)毗邻珠江后航道北侧且拥有较多历史建筑、繁华夜市与手工艺市场。建议在保持历史建筑风貌的同时,控制珠江沿线的建筑高度与场地间口率,部分滨江空间可做底层架空和裙房疏通处理,尽可能促进部分滨江风流入街区内部。此外,应制定合理的夜市摊位摆放区间,保证街道两侧的开场率,增加通风与空气对流。③南京鼓楼区的华侨路、湖南路等街道(I级管控区域)是南京著名的商业街与主要交通枢纽。建议采取交通限制措施,如限制车辆通行、推广公交工具使用等,缓解热源排放与热压力。此外,建议利用各类街角(狮子桥步行美食街)、广场(凤凰国际广场)、口袋空间以及重要交通地段建设“T形”空间<sup>[23]</sup>,增强内部节点风速,同时设置步行或活动硬质铺装区域为透水地面,保证商业步行街和室外休息区的通风散热效果,以此提供更加舒适的风热环境。④武汉硚口区的宗关、汉正街道(I级管控区域)聚集了住宅楼、商铺以及公园、广场等开放空间。由于老城区开发强度过高,大规模的面状绿化改造难以实施,建议利用原有带状公园、滨江绿地等生态本底,加强绿源间的衔接,根据主导风向或通风轴线建构生态网络,以加大内城绿地气候调节功能的有效半径,促进密集建设城区中的空气流动。同时,采取“见缝插绿”、屋顶绿化、垂直绿化的形式增加居住区与商业办公区的绿地面积,以此提供通风和降温效果。

(4) 尽管供需视角能够在一定程度上完善传统城市通风空间识别研究,但本文仍存在两个方面有待后续检验:①受制于数据的可获取性,对于通风需求的计算主要依托于地表温度数据、POI数据、常

住人口密度数据,但总体来说数据类型划分不够细致,导致通风需求的评估结果较为单一。后续在条件允许情况下,将结合多源数据(如不同性别、年龄的高精度人口密度数据)展开面向老城区不同人群的差异性通风需求分析。②选取上海徐汇区、广州荔湾区、南京鼓楼区以及武汉硚口区作为实证研究对象,其在国内城市老城区研究中具有典型性,后续将结合国外特大城市老城区进行对比分析以完善相关结论推导。

## 5 结论

本文以上海徐汇区、广州荔湾区、南京鼓楼区以及武汉硚口区为例,基于建筑形态数据、遥感数据、POI数据以及常住人口密度数据等多源数据,对老城区的通风供给能力和需求水平进行评估,通过测度空间匹配关联的方式识别4种类型通风供需区域,并开展管控区域的优先级划分,以此为城市低碳发展与气候适应性策略提供指引。主要研究结论如下:

(1) 上海徐汇区、广州荔湾区、南京鼓楼区以及武汉硚口区的通风供给系数均值依次为0.23、0.26、0.27、0.28,整体通风供给能力较低,通风需求系数均值依次为0.61、0.54、0.55、0.54,整体通风需求水平较高。在空间上,通风供给与需求空间存在显著的错落性分布格局。通风供给空间格局由天空开阔度以及地表粗糙度指标确定,其高值区主要分布在植被水体等蓝绿空间、公园与广场等开阔场所。通风需求空间格局由危险源、暴露度以及脆弱性指标共同决定,其高值区主要集聚在办公楼、购物设施、公寓住宅楼等高密度区域。

(2) 老城区通风供需区域涵盖高供给—高需求、低供给—低需求、高供给—低需求以及低供给—高需求4种类型。其中上海徐汇区、广州荔湾区、南京鼓楼区以及武汉硚口区的供不应求(低供给—高需求)空间单元数量分别为304、324、377、301个,分别占总类型的14.9%、16.0%、18.7%、19.7%,在空间上主要集中在低通风潜力、强人类活动干预、高建设强度、高温、高人口与基础设施密度区域,该类型区域亟需得到管控优化以提升内部通风供给能力。

(3) 老城区低供给—高需求类型区域可划分为4个管控优先级(I~IV级),其中I级管控区域是需要

优先干预以缓解老城区通风供需矛盾的重点区域,分别分布于上海徐汇区的徐家汇街道,广州荔湾区的华林、多宝、岭南、沙面、花地街道,南京鼓楼区的华侨路、湖南路、挹江门街道,武汉硚口区的宗关、汉正街道。

## 参考文献(References)

- [1] 汪光焘. 城市: 40年回顾与新时代愿景 [J]. 城市规划学刊, 2018(6): 7-19. [Wang Guangtao. Chinese cities: Review of 40 years' development and visions in the new era. Urban Planning Forum, 2018(6): 7-19. ]
- [2] 杨仕琪, 王冀, 窦银银, 等. 1916—2020年北京城市变迁及其与区域气候演化的关系 [J]. 地理学报, 2023, 78(3): 620-639. [Yang Shiqi, Wang Ji, Dou Yinyin, et al. Spatio-temporal evolution of urbanization and its relationship with regional climate change in Beijing over the past century. Acta Geographica Sinica, 2023, 78(3): 620-639. ]
- [3] Gong P, Liang S, Carlton E J, et al. Urbanisation and health in China [J]. The Lancet, 2012, 379: 843-852.
- [4] 仇保兴, 叶蒙宇, 宁坤. 关注我国城镇化下半场的十二个拐点 [J]. 城市发展研究, 2021, 28(9): 1-7. [Qiu Baoxing, Ye Mengyu, Ning Kun. Twelve inflection points focusing on the second half of urbanization in China. Urban Development Studies, 2021, 28(9): 1-7. ]
- [5] 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. doi: 10.1080/20964129.2020.1747946.
- [6] 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. [Zheng Zuofang, Lei Xiaoyan, Gao Hua. Ventilation corridor in Beijing, Part I: Simulation of environmental effects. Scientia Geographica Sinica, 2022, 42(4): 631-639. ]
- [7] 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. doi: 10.1016/j.buildenv.2022.108810.
- [8] 陈翔, 孙武, 沈子桐, 等. 广州市主城区风道特征与通风效能评估 [J]. 地理学报, 2021, 76(3): 694-712. [Chen Xiang, Sun Wu, Shen Zitong, et al. Characteristics of ventilation channel and ventilation efficiency assessment: A case study of main built-up area in Guangzhou. Acta Geographica Sinica, 2021, 76(3): 694-712. ]
- [9] Zou J W, Yu Y C, Liu J L, et al. Field measurement of the urban pedestrian level wind turbulence [J]. Building and Environment, 2021, 194: 107713. doi: 10.1016/j.buildenv.2021.107713.
- [10] Tominaga Y, Shirzadi M. Wind tunnel measurement of three-dimensional turbulent flow structures around a building group: Impact of high-rise buildings on pedestrian wind environment [J]. Building and Environment, 2021, 206: 108389. doi: 10.1016/j.buildenv.2021.108389.
- [11] Wang W W, Chen H, Wang L Z, et al. Integrating multiple models into computational fluid dynamics for fine three-dimensional simulation of urban waterfront wind environments: A case study in Hangzhou, China [J]. Sustainable Cities and Society, 2022, 85: 104088. doi: 10.1016/j.scs.2022.104088.
- [12] 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.
- [13] Hsieh C M, Huang H C. Mitigating urban heat islands: A method to identify potential wind corridor for cooling and ventilation [J]. Computers, Environment and Urban Systems, 2016, 57: 130-143.
- [14] 赵文博, 刘洪杰, 田雪婷, 等. 基于UCMap的城市气候空间格局分析: 以广州市为例 [J]. 地理科学进展, 2019, 38(3): 452-464. [Zhao Wenbo, Liu Hongjie, Tian Xueting, et al. Environmental climate spatial pattern of Guangzhou City based on urban climatic map. Progress in Geography, 2019, 38(3): 452-464. ]
- [15] 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. doi: 10.1016/j.uclim.2022.101091.
- [16] 冯章献, 王士君, 金珊合, 等. 长春市城市形态及风环境对地表温度的影响 [J]. 地理学报, 2019, 74(5): 902-911. [Feng Zhangxian, Wang Shijun, Jin Shanhe, et al. Effects of urban morphology and wind conditions on land surface temperature in Changchun. Acta Geographica Sinica, 2019, 74(5): 902-911. ]
- [17] Lai S X, Zhao Y J, Fan Y F, et al. Characteristics of daytime land surface temperature in wind corridor: A case study of a hot summer and warm winter city [J]. Journal of Building Engineering, 2021, 44: 103370. doi: 10.1016/j.jobe.2021.103370.
- [18] 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. [Shen Xinjie, Zhao Rui, He Ruizhen, et al. Research on urban wind environment simulation: A case study of Zhengzhou central area. Journal of Geo-information Science, 2020, 22(6): 1349-1357. ]
- [19] Liu Y H, Fang X Y, Cheng C, et al. Research and applica-



- tion 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.
- [20] 刘勇洪, 徐永明, 张方敏, 等. 城市地表通风潜力研究技术与应用: 以北京和广州中心城为例 [J]. *规划师*, 2019, 35(10): 32-40. [Liu Yonghong, Xu Yongming, Zhang Fangmin, et al. Research and application of urban surface ventilation potential: Cases of Beijing and Guangzhou. *Planners*, 2019, 35(10): 32-40. ]
- [21] 刘勇洪, 张硕, 程鹏飞, 等. 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 [J]. *生态环境学报*, 2017, 26(11): 1892-1903. [Liu Yonghong, Zhang Shuo, Cheng Pengfei, et al. Research and application of heat and ventilation environment assessment for city planning: A case study of Jinan central urban area. *Ecology and Environmental Sciences*, 2017, 26(11): 1892-1903. ]
- [22] 杜吴鹏, 房小怡, 刘勇洪, 等. 面向特大城市的风环境容量指标和区划初探: 以北京为例 [J]. *气候变化研究进展*, 2017, 13(6): 526-533. [Du Wupeng, Fang Xiaoyi, Liu Yonghong, et al. Indexes and zoning research of wind environmental capacity for metropolis: A case of Beijing. *Climate Change Research*, 2017, 13(6): 526-533. ]
- [23] 彭翀, 邹祖钰, 洪亮平, 等. 旧城区风热环境模拟及其局部性更新策略研究: 以武汉大智门地区为例 [J]. *城市规划*, 2016, 40(8): 16-24. [Peng Chong, Zou Zuyu, Hong Liangping, et al. Numerical simulation of wind and thermal environment in inner cities and strategies for partial renewal: A case study of Dazhimen, Wuhan. *City Planning Review*, 2016, 40(8): 16-24. ]
- [24] 谢盼, 王仰麟, 刘焱序, 等. 基于社会脆弱性的中国高温灾害人群健康风险评价 [J]. *地理学报*, 2015, 70(7): 1041-1051. [Xie Pan, Wang Yanglin, Liu Yanxu, et al. Incorporating social vulnerability to assess population health risk due to heat stress in China. *Acta Geographica Sinica*, 2015, 70(7): 1041-1051. ]
- [25] 郑颖生, 王墨, 李建军, 等. 城市高温风险评估与气候适应性规划策略: 以亚热带高密度城市深圳为例 [J]. *规划师*, 2021, 37(14): 13-19. [Zheng Yingsheng, Wang Mo, Li Jianjun, et al. Risk assessment of high temperature and adaptive planning strategies: Shenzhen example. *Planners*, 2021, 37(14): 13-19. ]
- [26] 辛儒鸿, 曾坚, 李凯, 等. 城市热环境调节服务供需失衡关键区识别与优先级划分 [J]. *地理研究*, 2022, 41(11): 3124-3142. [Xin Ruhong, Zeng Jian, Li Kai, et al. Identifying the key areas and management priorities of the imbalance between supply and demand in urban thermal environment regulation. *Geographical Research*, 2022, 41(11): 3124-3142. ]
- [27] 辛儒鸿, 曾坚, 李凯, 等. 城市内涝调节服务供需关键区识别与优先级划分 [J]. *生态学报*, 2022, 42(2): 500-512. [Xin Ruhong, Zeng Jian, Li Kai, et al. Identify key areas and priority levels of urban waterlogging regulation service supply and demand. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(2): 500-512. ]
- [28] Zakšek K, Oštir K, Kokalj Ž. Sky-view factor as a relief visualization technique [J]. *Remote Sensing*, 2011, 3(2): 398-415.
- [29] Grimmond C S B, Oke T R. Aerodynamic properties of urban areas derived from analysis of surface form [J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 1999, 38(9): 1262-1292.
- [30] Liu Y H, Cheng P F, Chen P, et al. Detection of wind corridors based on "Climatopes": A study in central Jinan [J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2020, 142: 869-884.
- [31] 郝珈纬, 张安兵, 王贺封, 等. 高分一号与 Landsat 8 影像反演的参考蒸散发研究 [J]. *测绘科学*, 2018, 43(11): 103-110, 124. [Hao Jiawei, Zhang Anbing, Wang Hefeng, et al. Inversion study on reference evapotranspiration based on GF-1 and Landsat 8 images. *Science of Surveying and Mapping*, 2018, 43(11): 103-110, 124. ]
- [32] 乔治, 卢应爽, 贺瞳, 等. 城市热岛斑块遥感识别及空间扩张路径研究: 以北京市为例 [J]. *地理科学*, 2022, 42(8): 1492-1501. [Qiao Zhi, Lu Yingshuang, He Tong, et al. Identifying urban heat island patches and spatial expansion path based on remote sensing technology: A case of Beijing City. *Scientia Geographica Sinica*, 2022, 42(8): 1492-1501. ]
- [33] 李刚, 李建平, 孙晓蕾, 等. 主客观权重的组合方式及其合理性研究 [J]. *管理评论*, 2017, 29(12): 17-26, 61. [Li Gang, Li Jianping, Sun Xiaolei, et al. Research on a combined method of subjective-objective weighing and the its rationality. *Management Review*, 2017, 29(12): 17-26, 61. ]
- [34] Anselin L. Local indicators of spatial association—LISA [J]. *Geographical Analysis*, 1995, 27(2): 93-115.
- [35] Maragno D, Gaglio M, Robbi M, et al. Fine-scale analysis of urban flooding reduction from green infrastructure: An ecosystem services approach for the management of water flows [J]. *Ecological Modelling*, 2018, 386: 1-10.
- [36] 陈宏, 周雪帆, 戴菲, 等. 应对城市热岛效应及空气污染的城市通风道规划研究 [J]. *现代城市研究*, 2014, 29(7): 24-30. [Chen Hong, Zhou Xuefan, Dai Fei, et al. The

study of urban ventilation corridor planning based on the accommodation of urban heat island and pollutions. *Modern Urban Research*, 2014, 29(7): 24-30. ]

[37] Zheng Z F, Ren G Y, Gao H, et al. Urban ventilation plan-

ning and its associated benefits based on numerical experiments: A case study in Beijing, China [J]. *Building and Environment*, 2022, 222: 109383. doi: 10.1016/j.buildenv.2022.109383.

## Identifying and matching ventilation spaces in old urban areas from the perspective of supply and demand

FANG Yunhao<sup>1,2</sup>, ZHAO Liyuan<sup>1,2\*</sup>

(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, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** Urban ventilation space, as a place for wind environment optimization, is also an important carrier for heat island effect mitigation and residents' comfort improvement. The study of ventilation space in old urban areas based on the perspective of supply and demand can provide support and guidance for the adaptive and low-carbon development strategies adopted by cities to address global climate change. Taking Xuhui District in Shanghai, Liwan District in Guangzhou, Gulou District in Nanjing, and Qiaokou District in Wuhan as examples, the ventilation supply index (VSI) and ventilation demand index (VDI) were constructed based on architectural morphology data, remote sensing data, point of interest (POI) data, and resident population density data to evaluate the ventilation supply capacity and demand level of the old urban areas, respectively. Then, a bivariate local spatial autocorrelation model was used to measure the degree of correlation between ventilation supply space and demand space. Additionally, this study identified different types of ventilation supply and demand areas and priority areas for regulatory intervention. The results show that: 1) The old urban areas have low average ventilation supply coefficients and high average ventilation demand coefficients, both of which have significant spatial heterogeneity. High supply coefficients are mainly distributed in open spaces such as green space and water, while high demand coefficients are mainly clustered in high-density and high-development intensity spaces. 2) The ventilation supply and demand spaces in the old urban areas include four types: high supply-high demand, low supply-low demand, high supply-low demand, and low supply-high demand. The proportion of spatial units with low supply-high demand is approximately 14.9% to 19.7%. This indicates that the matching of ventilation supply and demand in the old urban areas is not optimistic, and there is an urgent need for control and optimization to enhance the ventilation supply capacity. 3) The high-priority control areas in the old urban areas are Xujiahui Street in Xuhui District, Shanghai; Hualin Street, Duobao Street, Lingnan Street, Shamian Street, and Huadi Street in Liwan District, Guangzhou; Huaqiaolu Street, Hunanlu Street, and Yijiangmen Street in Gulou District, Nanjing; and Zongguan Street and Hanzheng Street in Qiaokou District, Wuhan.

**Keywords:** urban ventilation space; supply and demand matching; bivariate local spatial autocorrelation model; control priority; old urban areas