

基于多尺度地理加权回归的建成环境 对通风潜力的影响研究

——以武汉市主城区为例

杨佳明, 安 睿, 仝照民, 刘艳芳

(武汉大学资源与环境科学学院, 湖北 武汉 430079)

[摘要] 大都市常通过优化建成环境来改善城市通风潜力,以缓解城市热岛效应并提高区域环境质量. 基于风洞试验等方法模拟城市通风潜力缺乏对大尺度的连续监测,传统回归方法忽视了建成环境影响的空间非平稳性和尺度效应. 本文应用电路理论识别武汉主城区通风潜力,基于 3Ds(密度、多样性和设计)指标体系描述建成环境,并详细对比了普通最小二乘法(OLS)、地理加权回归(GWR)和多尺度地理加权回归(MGWR)模型的结果. 研究证实使用考虑空间异质性的局部模型是必要的. MGWR 放宽了 GWR 模型的固定带宽假设,进一步考虑了建成环境因子影响的尺度效应,有效避免了过拟合和异常符号反转. 相关研究应考虑驱动机制的空间异质性和尺度效应.

[关键词] 电路理论,通风潜力,建成环境,多尺度地理加权回归

[中图分类号] K909 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1001-4616(2023)04-0029-11

Effect of Built Environment on Ventilation Potential Based on Multi-scale Geographically Weighted Regression: a Case Study of the Main Urban Area of Wuhan

Yang Jiaming, An Rui, Tong Zhaomin, Liu Yanfang

(School of Resource and Environmental Sciences, Wuhan University, Wuhan 430079, China)

Abstract: Metropolises tend to improve urban ventilation potential through optimizing built environment (BE) to alleviate urban heat island and promote regional environment quality. The simulation of the urban ventilation potential based on wind tunnel tests and other methods lack continuous monitoring on a large scale, and traditional regression methods overlook the spatial non-stationary and scale effects of built environment effects. This paper applies circuit theory to identify the ventilation potential of the main urban area of Wuhan, forms an indicator system to describe the BE based on 3Ds (density, diversity, design) theory, and compares the results of ordinary least squares (OLS), geographically weighted regression (GWR) and multi-scale geographically weighted regression (MGWR) models detailedly. The result has confirmed the necessity of using a local model that considers spatial heterogeneity. MGWR relaxes the fixed bandwidth assumption of the GWR model, further considers the scale effect of built environment factors, effectively avoids overfitting and abnormal symbol reversal. Relevant research should consider the spatial heterogeneity and scale effects of driving mechanisms.

Key words: circuit theory, ventilation potential, built environment, multi-scale geographically weighted regression

随着城市化的快速推进,城市内部出现许多密集的高层建筑,阻碍了城市内部的空气流动,常导致热岛效应^[1]、空气污染^[2]等“城市病”的出现,严重威胁人体健康. 为了解决这些问题,多个城市例如北京^[3]、广州^[4]、成都^[5]等将城市通风廊道(urban ventilation corridor, UVC)的建设纳入国土空间规划等政策体系中,这为城市通风研究提供了契机. 城市通风潜力是 UVC 建设的基础与前提,在城市的可持续发展与生态文明建设中的地位日益重要. 城市的建成环境会显著影响城市通风潜力,如建筑会阻碍通风效率,而以绿地、水域为

收稿日期:2022-10-28.

基金项目:国家自然科学基金重点项目(42230107).

通讯作者:刘艳芳,博士,教授,博士生导师,研究方向:区域规划、经济地理、地理信息应用工程. E-mail: yfliu610@163.com

主的地表可以提供风力廊道^[6]. 因此,模拟城市通风潜力并讨论建成环境对其影响机制具有潜在价值.

传统的城市通风潜力模拟方法多用风洞试验、计算流体力学(computational fluid dynamics, CFD)、气象研究与预报(weather research and forecasting, WRF)模型. 风洞试验^[7]与 CFD^[8]仅适用于小范围建筑群通风模拟,虽然它们的模拟精度较高,但研究结论难以推广至城市尺度. WRF 对风环境模拟结果精度一般大于 1 km,适合大范围城市群风场模拟,但其计算复杂,导致模型的不确定性,需要对模拟结果进行修正^[9-10]. 运用地理信息系统(geographic information system, GIS)技术可以对城区尺度的通风状况进行分析,该方法计算成本低,且具有普适性^[11]. 近年来, Xie 等^[12-13]以武汉市为研究区,在传统 GIS 数值模拟的基础上,扩展了基于电路理论的通风潜力模拟方法,模拟结果可以直观展示高精度的城市通风潜力.

已有研究发现,建筑物的形态和布局^[14]、蓝绿空间的配置^[15]等建成环境指标与通风潜力显著相关,如街道高宽比、建筑密度、天空开阔度等;此外,城市自然邻域对通风潜力的影响不容忽视,如归一化差异植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)^[16]、改进的归一化差异水体指数(modified normalized difference water index, MNDWI)^[17]和地形起伏度^[18]等. 多数研究采用传统的线性回归分析讨论驱动机制,但该模型未考虑因变量的空间异质性;地理加权回归(geographically weighted regression, GWR)虽然考虑了空间异质性,但忽略了不同自变量的影响尺度差异. 江颖慧等^[19]研究发现地表温度(land surface temperature, LST)和 NDVI 的空间自相关具有尺度效应并表现出明显的季节差异. An 等^[20]利用多尺度地理加权回归(multi-scale geographically weighted regression, MGWR)证实建成环境因子对公交通勤占比的影响存在尺度效应.

综上所述,本研究以武汉市主城区为研究区,基于电路理论模拟城市通风潜力,结合建筑数据、三调数据和遥感数据等,构建基于 3Ds(density, diversity, design)的通风潜力影响因素指标体系,在详细对比 GWR 与 MGWR 的结果的基础上,讨论建成环境对通风潜力影响的空间非平稳性和尺度效应,为城市通风环境的改善提供实证基础.

1 研究区域、数据及方法

1.1 研究区概况

武汉是湖北省省会,地处江汉平原东部、长江中游,市内江河纵横、湖港交织,水域面积占全市总面积四分之一. 武汉属北亚热带季风性(湿润)气候,降雨多集中在 6—8 月,雨热同期、四季分明. 由于近年来城市的迅速扩张,截至 2018 年底,武汉市建成区面积为 723.74 km²,常住人口达 1 108 万人. 本研究选取武汉主城区为研究区域(图 1),该区域人口集中、建筑密集,有必要研究其通风潜力,以期构建城市通风廊道缓解夏季形成的城市热岛效应.

1.2 数据来源及处理

本研究搜集了建筑轮廓数据、遥感影像、气象监测、土地利用、人口栅格、道路网络等多源数据,基准数据时点为 2018 年. 其中建筑轮廓矢量数据采集自百度地图,属性包括每栋建筑高度、投影面积等. 利用中分辨率成像光谱仪(moderate-resolution imaging spectroradiometer, MODIS)产品中 8 天合成的地表反射率产品 MOD09A1(500 m 分辨率),选取 2018 年 6、7、8 月轨道号为 h27v05 和 h27v06 的影像,并进行影像预处理、去除异常值、裁剪和拼接等处理. MODIS 数据来源于美国地质勘探局官网. 气象数据来源于美国国家气候数据中心的公开 FTP 服务器,包括每小时的风向、风速等. 本研究将 360°风向角分为 16 个方向,计算各方向 3 个月(6、7、8 月)内平均风向频率,在风玫瑰图(图 2)中将最大风向频率视为该季节(夏季)主导风向,并作为后续研究基础. 经计算,该主导风向为东北风.

人口栅格数据收集自 WorldPop,分辨率为 100 m. 土地利用(第三次全国国土调查)和道路网络数据

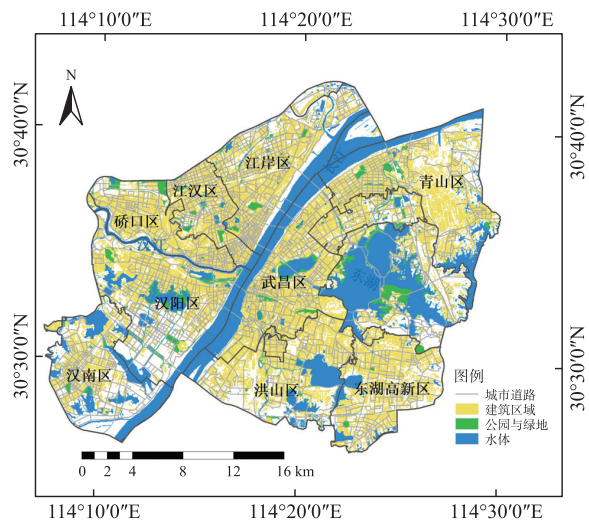


图 1 研究区范围

Fig. 1 The study area

均由武汉市测绘院提供,其中,土地利用数据包括公园与绿地、河流水面等在内的 43 种二级类用地(30 m×30 m),路网数据包括国道、省道、县道、乡道等四级道路。

1.3 模型构建

1.3.1 通风潜力计算

城市冠层中的空气团在遇到城市中的建筑时会形成分流,这恰好与在由节点和电阻组成的电路网络中电流的分流高度相似。在电路中,由欧姆定律 $I=U/R$ 可得,当一定的电压 U 施加到电阻 R 时,通过的电流 I 取决于电阻 R 的大小。电路相关术语对应的城市通风相关概念如表 1 所示。

为保证研究区边界与建成区之间有较大缓冲范围,需要以市中心为圆心,建立半径为 40 km 的圆形缓冲区,区内电阻率默认为 1(保证无建筑区域电阻值为 0),然后运用电路理论,将空间数据转化为栅格图像,计算每个像元阻力值,根据 Xie 等^[12]的研究,该阻力值用建筑迎风指数(frontal area index,FAI)^[21]表示,相当于气流阻力,电流值即表示通风潜力。考虑建筑物的密集程度,每一个像元代表一个节点,相邻节点由电阻连接。电导率 G 用通风指数(ventilation index,VI)表示。FAI 与 VI 公式如下:

$$FAI=\frac{A_f}{A_p},$$

$$VI=\frac{A_h-A_f}{A_p}.$$

其公式解释如图 3 所示。

表 1 电路理论术语的通风相关概念解释

Table 1 Interpretation of ventilation-related concepts in circuit theory terms

电路理论术语	城市通风相关概念解释
电流 I	表示气流通过每一个分支的可能性大小
电压 U	表示在某一方向风场下,由于空气流动产生的能量,其值决定了风力大小
电导率 G	表示在城市冠层中气流通过的难易程度,其值与电阻值呈负相关关系
电阻 R	表示城市冠层中气流遇到建筑物时受到的阻碍程度

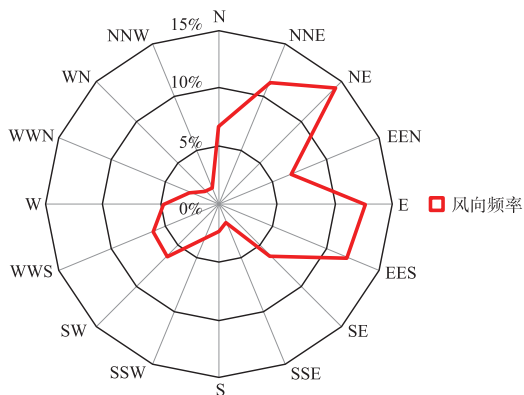


图 2 武汉市 2018 年夏季平均风向频率
Fig. 2 Average wind direction frequency in summer 2018 in Wuhan

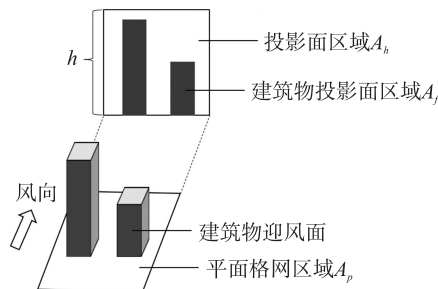


图 3 FAI 与 VI 公式解释
Fig. 3 FAI and VI formula explanation

1.3.2 自变量选取

对于城市的建成环境,有研究表明城市地表通风潜力与建筑高度、容积率和粗糙度长度有明显负相关关系^[22-23],也有研究表明天空开阔度(sky view factor,SVF)与城市通风潜力有正相关关系^[24],而城市蓝绿空间、道路和城市地形等对城市通风潜力也有一定的贡献作用^[25]。随着 Ewing 等^[26]提出建成环境 5Ds 指标体系,有大量关于居民出行方式与建成环境之间相关性的研究,鉴于此,本研究采用基于 3Ds 的指标体系,探究建筑及其周围环境与城市通风潜力之间的相关性,其中各个变量的相关解释如表 2 所示,其空间分布特征如图 4 所示。所有影响因子的栅格数据均采样至 500 m×500 m 的空间分辨率,以保持进一步分析的空间一致性。

1.3.2.1 密度

本研究根据建筑数据,考虑每个城市通风单元的路网密度、建筑密度、容积率和人口密度。有研究表明,道路密度与温度分布范围呈负相关,与最小温度呈正相关^[27],而温度也从侧面反映了通风能力;来风方向建筑越少、密度越小,通风潜力越大^[28];容积率对风速有影响,并且与通风潜力呈负相关^[22];人群的集聚与城市热环境之间有关联^[29]。热环境与风环境密不可分,因此本研究将人口密度作为反映城市通风潜力的指标,经计算,其值在 0~13.21 之间。

表 2 基于 3Ds 的指标体系

Table 2 Index system based on 3Ds

指标	变量	变量解释	平均值	标准差
因变量	通风潜力	500 m×500 m 格网内的模拟电流值	0.008	0.087
	路网密度	500 m×500 m 格网内道路长度与格网面积比(km/km ²)	3.241	5.452
	建筑密度	500 m×500 m 格网内建筑平面投影面积占格网面积百分比	0.144	0.174
	容积率	500 m×500 m 格网内地上总建筑面积与用地面积比	1.743	2.719
	人口密度	500 m×500 m 格网内的单位人口数	0.010	0.018
多样性	土地利用混合度	500 m×500 m 格网内商服、工矿、公共管理与公共服务、住宅和其他各类用地等 5 类用地的土地利用混合熵指数	0.577	0.308
设计	道路平均宽度	500 m×500 m 格网内所有道路的平均宽度值	13.507	9.650
	街道高宽比	500 m×500 m 格网内街道两边的建筑高度与街道宽度比	3.200	2.688
	天空开阔度	500 m×500 m 格网内中心点可见天空空间的比例	0.403	0.346
	粗糙度长度	500 m×500 m 格网内城市表面潜在粗糙单元,反映了城市表面不规则性和异质性	2.287	3.137
自然邻域	地表坡度	500 m×500 m 格网内代表地表起伏的坡度值	2.656	2.694
	NDVI	500 m×500 m 格网内归一化植被指数平均值	0.387	0.146
	NDWI	500 m×500 m 格网内归一化水体指数平均值	-0.174	0.166

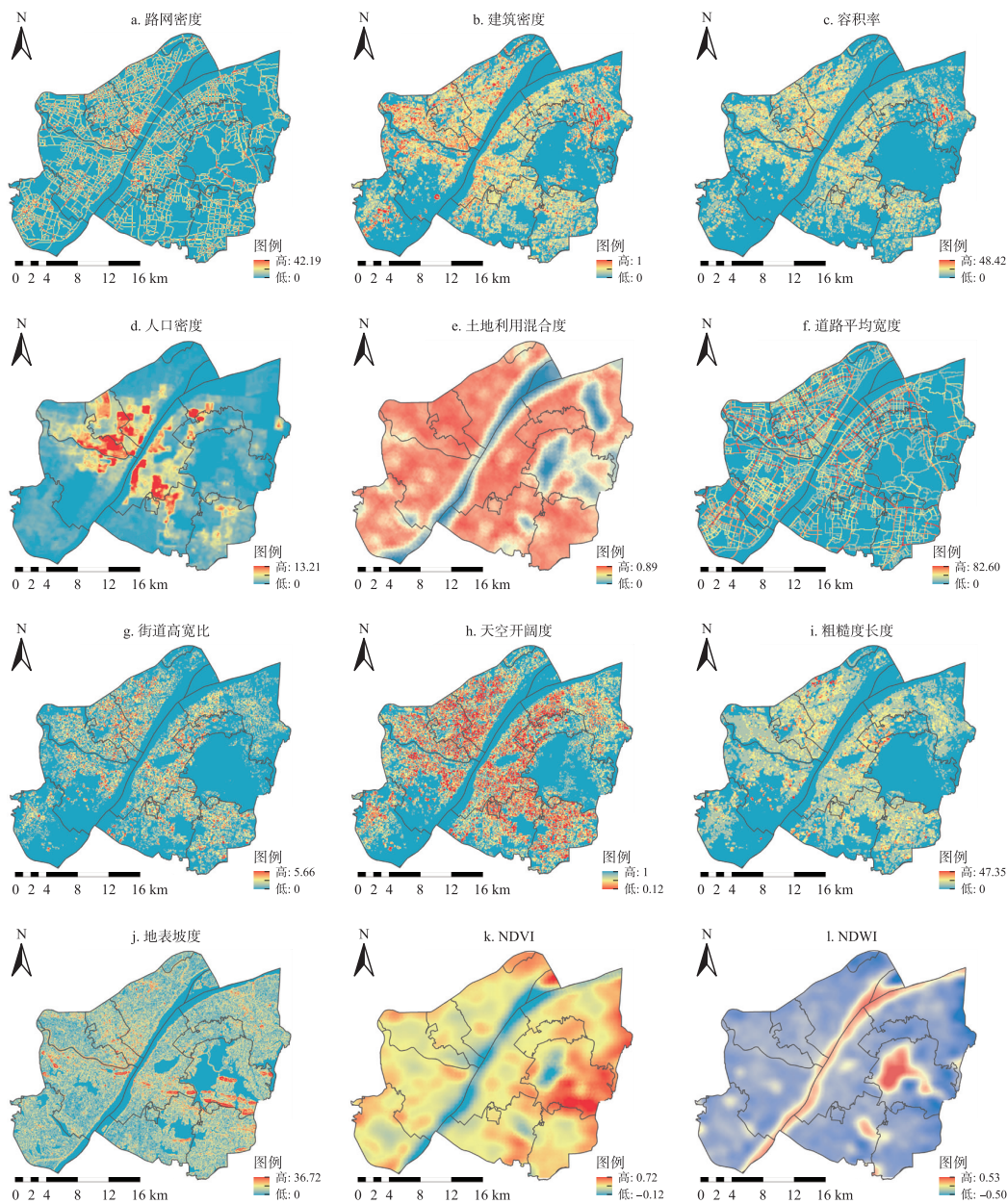


图 4 各自变量空间分布特征

Fig. 4 Spatial distribution characteristics of respective variables

1.3.2.2 多样性

根据武汉市测绘院提供的 2018 年“三调”土地利用数据,本研究将与通风潜力相关的 5 类用地用来测算土地利用混合度^[30],包括商业服务业用地、工矿用地、住宅用地、公共管理与公共服务用地、其他用地(包括水域、林地等用地类型)。经计算,土地利用混合度在 0~0.89 之间。

1.3.2.3 设计

Wang 等^[25]对通风潜力的定量分析研究表明,道路宽度>50 m 是对城市通风潜力影响较大的因素。本研究计算了每个城市通风单元的道路平均宽度,经计算,其值在 0~82.60 之间。

根据 He 等^[31]对城市通风性能的研究,街道高宽比影响周围气流运动的位置与形态,当街道与盛行风的夹角小于 30°时有利于通风。刘勇洪等^[14]认为街道高宽比与天空开阔度密切相关。本研究计算了每个城市通风单元的街道高宽比,经计算,其值在 0~5.66 之间。

天空开阔度是描述三维城市形态的指标,表达了城市空间的封闭程度,是重要的城市形态学参数,并且对城市的通风潜力有重要影响。根据 Li 等^[24]的研究,天空开阔度与空间平均风速比有显著的线性正相关关系。本研究采用 Zakšek 等^[32]提出的基于数字高程模型(digital elevation model,DEM)的栅格计算模型估算天空开阔度,经计算,其值在 0.12~1 之间,城区内大部分地区的天空开阔度较低。

表面粗糙度长度反映了城市下垫面的不均匀性,Fang 等^[17]运用粗糙度长度与天空开阔度构建了通风阻力系数,并以此表征城市通风状况。本研究运用 Grimmond 等^[33]提出的形态学模型对城市粗糙度长度进行计算,其值在 0~47.35 之间。虽然粗糙度长度的计算过程涉及高度,并受到土地利用类型的影响,但粗糙度长度和土地利用类型作为影响通风潜力的重要因素^[6,34],仍有必要单独分析二者与通风潜力的关系,尤其是二者对通风潜力影响的空间异质性。

1.3.2.4 自然邻域

根据 Kim 等^[18]的实验研究,地形对地面 10 m 以上的风速有影响,表现为随着坡度的增加而增加。本研究根据 DEM 计算了每个城市通风单元的地表坡度,结果在 0~36.72 之间。

城市的绿地和水体一直被认为是城市通风廊道的冷源。Fang 等^[17]将 NDVI 和 MNDWI 作为最低成本路径(least cost path,LCP)分析中的两个成本因素对城市通风廊道性能进行研究。本研究计算了每个城市通风单元的 NDVI 与 NDWI,结果分别在-0.12~0.72 和-0.50~0.53 之间。

1.4 模型方法

普通最小二乘法(ordinary least squares,OLS)模型作为一种全局回归模型,其公式如下:

$$y_i = \sum_{j=1}^k \beta_j x_{ij} + \varepsilon_i,$$

式中, i 代表第 i 个城市通风分析单元(500 m×500 m), $i \in \{1, 2, \dots, n\}$; y_i 是模拟城市通风潜力的电流值; β_j 是第 j 个解释变量的系数, $j \in \{1, 2, \dots, k\}$; x_{ij} 是第 i 个城市通风分析单元的第 j 个解释变量; ε_i 代表误差值。本研究 $n=2\,780$, $k=13$ (包括一列常数项)。每个解释变量参数估计可以用矩阵形式表示:

$$\boldsymbol{\beta} = (\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^T \mathbf{y},$$

式中, \mathbf{X} 是解释变量的矩阵(n, k), \mathbf{y} 是模拟城市通风潜力的电流值的观测值, $\boldsymbol{\beta}$ 为各解释变量的回归系数估计值,其为整个研究区域内的平均值,不能反映回归参数的真实空间特征。

相比 OLS,GWR 与 MGWR 考虑了因变量与解释变量之间的空间非平稳性,并为每个回归点设置单独的回归方程,根据其他数据点的不同位置,考虑到数据点和回归点的空间距离,对各数据点赋予权重,距离越近,权重越大。GWR 的公式如下所示:

$$y_i = \sum_{j=1}^k \beta_{ij}(u_i, v_i) x_{ij} + \varepsilon_i,$$

式中, β_{ij} 是第 j 个局部参数; (u_i, v_i) 表示第 i 个通风分析区域格网中心点坐标。每个城市通风分析单元的解釋变量参数估计可以用矩阵形式表示:

$$\boldsymbol{\beta}_i = (\mathbf{X}^T \mathbf{W}_i \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^T \mathbf{W}_i \mathbf{y},$$

式中, $\boldsymbol{\beta}_i$ 表示第 i 个城市通风分析单元局部参数估计的向量($k, 1$), \mathbf{W}_i 是在位置 i 处的对角空间权重矩阵(n, n)。这种方法是一种核回归的广义概念,其内核是一个距离衰减函数,用于确定权重随距离减小的速

度. 这里使用高斯函数来计算权重,其公式如下:

$$W_{iu} = \exp\left[-\left(\frac{d_{iu}}{b}\right)^2\right],$$

式中, W_{iu} 是从第 u 个城市通风分析单元到第 i 个城市通风分析单元的权重; d_{iu} 是从第 u 个城市通风分析单元中心到第 i 个城市通风分析单元中心的距离; b 表示第 j 个变量的回归系数使用的带宽,不同的带宽选择直接影响参与局部回归的邻域点的数量与权重.

GWR 与 MGWR 的带宽搜索一般选择黄金分割搜索,带宽选择通常使用更正的 Akaike 信息标准 (corrected Akaike information criterion, AICc). GWR 虽然考虑了因变量与解释变量之间的空间非平稳性,但是它对所有的解释变量采用固定带宽,这简化了每个协变量的观测值通常在不同空间尺度上产生变化的过程. MGWR 通过使用基于通用加性模型 (generalized additive model, GAM)^[35] 的后退拟合法 (back-fitting algorithm) 为每个解释变量使用不同的优化带宽,这允许每个自变量拥有各自不同的空间平滑水平,解决了 GWR 模型所有变量同一平滑水平的缺陷,降低了估计的偏误,从而反映了各自空间过程的空间作用尺度,产生了比 GWR 更接近真实和有用的空间过程模型. 因此,带宽对于 GWR 中的所有解释变量都是恒定的,但在 MGWR 中随着 j 的变化而变化.

2 结果与讨论

2.1 结果

由表 3 可知,根据 OLS 模型回归结果,除了路网密度、建筑密度和地表坡度,其余变量均与城市通风潜力显著相关. 道路宽度越宽、NDWI 越高,城市通风潜力越大. 相反,城市冠层粗糙度长度越大、人口越密集、建筑容积率越高、土地利用类型越混合、街道高宽比越大、天空开阔度越大、NDVI 越高,城市通风潜力越小. 模型调整后的 R^2 是 0.463, AICc 是 6 178.781. 显然,该模型的解释能力并不高,因此,本研究运用 GWR 和 MGWR 模型来获得局部关系.

表 3 OLS 模型回归结果
Table 3 OLS model regression results

指标	变量	系数	标准误差	P 值	VIF
常数项		0.000	0.014		
密度	路网密度	-0.024	0.015		1.127
	建筑密度	-0.042	0.023		2.649
	容积率	-0.419	0.028	***	4.009
	人口密度	-0.056	0.015	***	1.237
多样性	土地利用混合度	-0.109	0.019	***	1.863
设计	道路平均宽度	0.044	0.016	**	1.277
	街道高宽比	-0.173	0.034	***	5.939
	天空开阔度	-0.126	0.036	***	6.700
	粗糙度长度	-0.172	0.022	***	2.516
自然邻域	地表坡度	0.023	0.015		1.135
	NDVI	-0.053	0.020	*	2.158
	NDWI	0.060	0.023	**	2.740
	Adj. R^2	0.463			
	AICc	6 178.781			

注: * $P<0.05$, ** $P<0.01$, *** $P<0.001$.

首先,应检验 OLS、GWR 和 MGWR 模型的整体效果. 本研究测试了各模型的空间自相关拟合残差. 如图 5 所示,对比 3 种模型的全局莫兰指数 (Moran's I) 与 P 值,OLS 与 GWR 模型的 Moran's I 和 P 值为正, MGWR 的 Moran's I 为负. 这表明, MGWR 能更好处理空间自相关问题. 并且由表 4 所示, MGWR 拟合残差的残差平方和 (residual sum of squares, RSS) 为 689.18、均方根误差 (root mean square error, RMSE) 为 0.50、AICc 为 4 786.42,均为 3 个模型中最小. 由此说明, MGWR 的拟合损失最小.

其次,根据 GWR 和 MGWR 模型的局部 R^2 (图 6), MGWR 的局部区域细节表现比 GWR 更为明显,高值区域更高,低值区域更低.

表 4 3 种模型误差对比

Table 4 Comparison of errors of three models

模型	RSS	RMSE	AICc
OLS	1 487.40	0.73	6 178.78
GWR	782.39	0.53	5 292.65
MGWR	689.18	0.50	4 786.42

总体而言, MGWR 模型拟合误差小于 GWR 和 OLS, 并且可以更好地反映武汉市主城区通风潜力与其影响因素之间的关系。

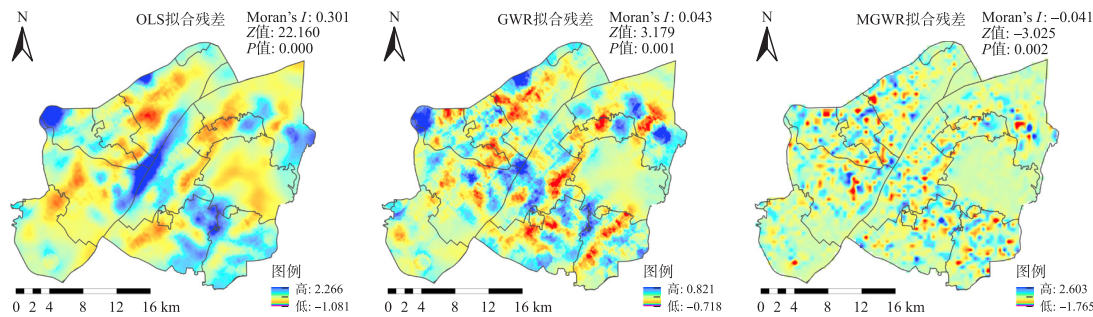


图 5 3 种模型空间自相关特征

Fig. 5 Spatial autocorrelation characteristics of three models

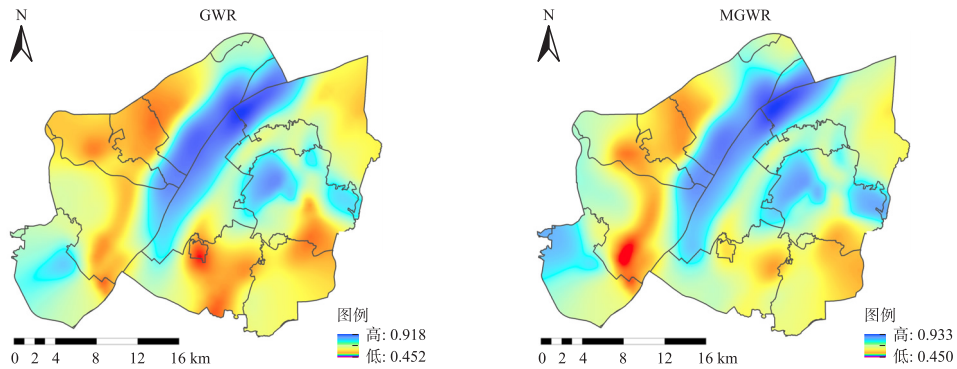


图 6 GWR 与 MGWR 局部拟合空间分布特征

Fig. 6 Spatial distribution characteristics of local fitting of GWR and MGWR

由表 5 可知,本研究各城市通风影响因素的 GWR 模型带宽都为 211,仅占有城市通风分析单元的 7.59%。对于 MGWR 模型,人口密度、街道高宽比、天空开阔度和粗糙度长度的带宽分别为 2 761、1 465、2 779 和 348,都高于 GWR 的固定带宽 211,并且它们的最小值与最大值无符号反转,但在 GWR 模型中其最大值与最小值存在符号反转,这与它们与通风潜力呈现显著负相关关系的预期相矛盾,这可能是由于带宽过小、过度拟合而数据系数变异过大导致的。由此说明, MGWR 的估计结果更加可靠。

表 5 GWR 与 MGWR 系数对比

Table 5 Comparison of GWR and MGWR coefficients

变量	GWR			MGWR		
	带宽	均值	标准差	带宽	均值	标准差
常数项	211	-0.088	0.244	57	-0.062	0.310
路网密度	211	0.001	0.070	733	-0.010	-0.010
建筑密度	211	0.047	0.182	2 777	0.010	0.005
容积率	211	-0.577	0.358	44	-0.567	0.295
人口密度	211	-0.088	0.240	2 761	-0.033	0.004
土地利用混合度	211	-0.080	0.160	545	-0.077	0.080
道路平均宽度	211	0.043	0.096	992	0.037	0.043
街道高宽比	211	-0.183	0.206	1 465	-0.166	0.015
天空开阔度	211	-0.138	0.187	2 779	-0.117	0.003
粗糙度长度	211	-0.159	0.187	348	-0.163	0.099
地表坡度	211	0.006	0.090	1 830	0.009	0.013
NDVI	211	0.034	0.185	621	-0.032	0.078
NDWI	211	0.080	0.194	1 036	0.043	0.029

MGWR 回归结果根据带宽可分为 3 个尺度(图 7):

(1)局部尺度(带宽在 44~621 之间)。容积率(图 7a),其 GWR 结果除汉阳区南部、江岸区北部、武昌

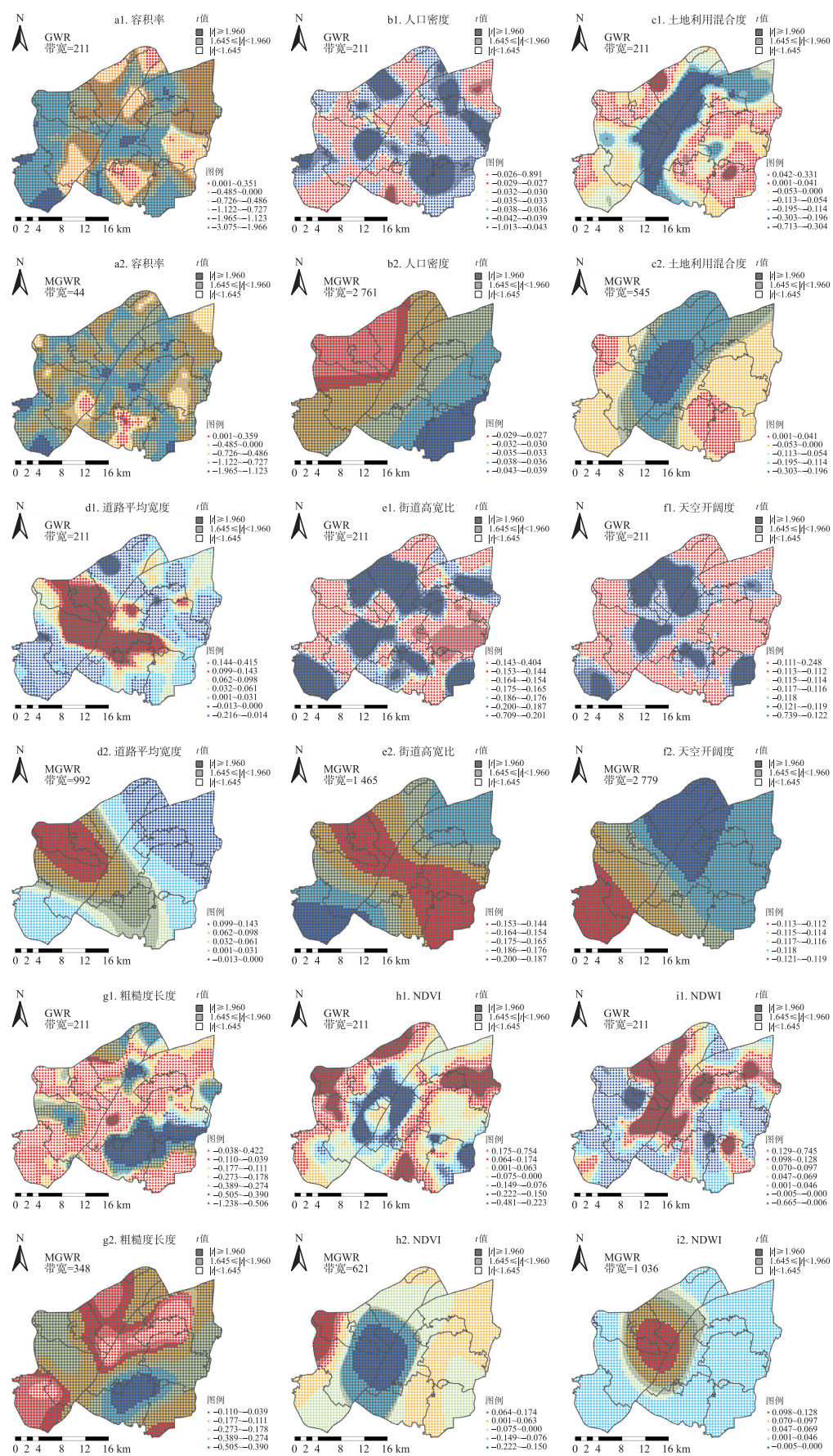


图 7 各自变量 GWR 与 MGWR 系数空间分布对比

Fig. 7 Comparison of spatial distribution of GWR and MGWR coefficients of respective variables

区北部、东湖东部和洪山区以外,其余地区均与通风潜力呈显著负相关,汉南区南部负相关程度最大,系数最低为-3.075。但其 MGWR 模型的带宽为 44,显著负相关区域比 GWR 更大,仅在汉阳区南部和洪山区不显著,且存在符号反转,系数最高为 0.359,在汉南区南部和北部、武昌区中部、江汉区南部和东湖高新区南部与通风潜力呈显著负相关,系数最小值为-1.965。NDVI(图 7h),其 GWR 结果在汉阳区东南部、硚口区东南部、江汉区南部、江岸区南部、武昌区中部、东湖南部、东湖高新区南部和东部与通风潜力呈显著负相关,系数最低为-0.481,在硚口区西部、汉阳区西北部、江岸区西北部、洪山区和青山区南部与通风潜力呈显著正相关,系数最高为 0.754。相比 GWR,其 MGWR 带宽为 621,在武昌区西部、汉阳区东部、硚口区东部、江汉区东南部和江岸区南部与通风潜力呈显著负相关,系数最低为-0.222,在硚口区西部和汉阳区西北部与通风潜力呈显著正相关,系数最高为 0.174。粗糙度长度(图 7g),其 MGWR 结果除汉南区、武昌区中北部、江岸区北部、洪山区和青山区中西部以外,其他区域均与通风潜力呈显著负相关。土地利用混合度(图 7c),其 MGWR 结果在长江沿岸区域与通风潜力呈显著负相关。

(2)区域尺度(带宽在 622~1 465 之间)。道路平均宽度(图 7d),其 GWR 结果在江汉区、硚口区北部、汉阳区中东部、武昌区北部和南部、洪山区北部与通风潜力呈显著正相关,系数最高为 0.415,在汉南区北部、江岸区北部和洪山区部分地区与通风潜力呈显著负相关,与研究预期相反,在青山区、洪山区、江岸区、东湖周边地区、汉南区和汉阳区南部存在异常低值,系数最低为-0.216。相比 GWR,其 MGWR 带宽为 992,在硚口区、汉阳区中北部、江汉区、武昌区中南部和洪山区与通风潜力呈显著正相关,硚口区正相关强度最大,系数最大为 0.143,其在青山区与通风潜力呈负相关,与研究预期相反。NDWI(图 7i),其 MGWR 结果在武昌区西部、汉阳区东北部、硚口区东南部、江汉区和江岸区南部与通风潜力呈显著正相关。街道高宽比(图 7e),其 MGWR 结果在全区域与通风潜力呈显著负相关。

(3)全局尺度(带宽接近 2 780)。该尺度下 MGWR 几乎将所有样本加入回归,系数变化范围较小。天空开阔度(图 7f),其 GWR 结果在汉南区北部、汉阳区东部、洪山区北部、东湖高新区和青山区东部与通风潜力呈显著负相关,系数最大值为 0.248,最小值为 -0.739,存在符号反转。相比 GWR,其 MGWR 带宽为 2 779,全区无系数符号反转,其系数最大值为 -0.112,最小值为-0.121,并且与通风潜力呈显著负相关,全区呈现由西南至东北负相关强度逐渐增强的趋势。人口密度(图 7b),其 MGWR 结果除硚口区、江汉区和江岸区西部以外,其余地区均与通风潜力呈显著负相关,全区呈现由西北至东南负相关强度逐渐增强的趋势。

2.2 讨论

(1)局部尺度(带宽在 44~621 之间)。该带宽下的因子有容积率(图 7a2)、粗糙度长度(图 7g2)、土地利用混合度(图 7c2)和 NDVI(图 7h2)。根据表 3,它们均与通风潜力呈负相关,但刘勇洪等^[14]发现城市地表通风潜力与容积率和粗糙度长度呈正相关关系,这一差异主要是由通风潜力的识别方法不同造成的。传统研究多基于通风阻力系数(ventilation resistance coefficient, VRC)模型识别通风潜力,该方法依赖天空开阔度和地表粗糙度指标,易受数据异常值影响;本研究采用电流值大小表征通风潜力,不受除 FAI 和风向以外因素的干扰,将传统的内生变量调整为驱动因子。容积率高的区域建筑密度与人口密度也较高,规划中应限制区域容积率以增强通风潜力^[36]。洪山区的粗糙度长度较大,而通风潜力较低,虽然存在较大面积水域,但周边建筑密集形成较大风阻,影响了水域的冷源作用,需要补充建设通风廊道。长江沿岸土地利用混合度与通风潜力呈强负相关,作为金融商贸核心区,该区域商住混合的高层建筑较多,显著阻碍了通风潜力。硚口区西部和汉阳区西北部的 NDVI 与通风潜力呈强正相关,大面积绿地为通风提供了便利。但在长江沿岸呈强负相关^[16],这是由于区域内街边绿地、公园绿地与小区绿地面积小而分散,难以形成长距离的通风走廊,应适当推进蓝绿空间连片化发展。

(2)区域尺度(带宽在 622~1 465 之间)。该带宽下的因子有道路平均宽度(图 7d2)、NDWI(图 7i2)和街道高宽比(图 7e2)。根据表 3,街道高宽比与通风潜力呈负相关,道路平均宽度和 NDWI 与通风潜力呈正相关。硚口区道路平均宽度大且多数道路朝向与风向相似,形成了较好的道路通风廊道,但需注意该地区车行带来的负面效应。长江与汉江交汇区及江汉区中部的 NDWI 与通风潜力呈强正相关,因其水源的下风向建筑稀疏,充分发挥了水体冷源作用,提供了良好的通风廊道。街道高宽比在汉南区的负相关强度最大,该地区需要在规划中注意街区内建筑物的间距和高度,采取离散化的建筑配置以疏导气流^[36]。

(3)全局尺度(带宽接近2 780)。该带宽下的因子有人口密度(图7b2)与天空开阔度(图7f2),它们的系数变异较小。人口密度与城市通风潜力在东湖高新区呈强负相关,开发区内人口密集且建筑较高,更容易形成局部热岛。天空开阔度在全区与通风潜力呈显著负相关^[14],但Li等^[24]发现SVF与以风速比表示的通风潜力呈正相关,这一差异是由通风潜力识别方法不同造成的。

3 结论

本文利用电路理论模型模拟2018年武汉市主城区夏季主导风向的通风潜力,综合构建3Ds指标体系,从密度、多样性和设计描述建成环境,同时考虑了自然邻域。详细对比了OLS、GWR和MGWR的回归结果。相比于OLS模型,GWR虽然考虑了空间异质性,但模型中每个变量的带宽是相同的,难以体现不同变量在空间上影响范围的区别,并且带宽较小时,会使得所有变量的系数有较多的异常值与符号反转,与预期相关性相矛盾。MGWR采用的自适应带宽解决了这些问题,可以得到更加合理与稳定的结果。根据MGWR提供的带宽,本文将不同自变量的影响尺度划分为局部、区域和全局3个尺度,充分体现其空间异质性。

本文为城市通风潜力的优化提供了实证启示。但是也存在一定的局限性,MGWR的回归仍然为线性结果,并未考虑建成环境因子对通风潜力的非线性影响,后续考虑使用梯度提升决策树(gradient boosting decision tree,GBDT)等非线性模型进一步探索分析。此外,可考虑对不同气候类型下的不同城市开展相关试验并进行验证,使其在城市规划中更具通用性。

[参考文献]

- [1] KIM S W, BROWN R D. Urban heat island(UHI) intensity and magnitude estimations: a systematic literature review[J]. Science of the total environment, 2021, 779: 146389.
- [2] HAN L, ZHAO J, ZHANG T, et al. Urban ventilation corridors exacerbate air pollution in central urban areas: evidence from a Chinese city[J]. Sustainable cities and society, 2022, 87: 104129.
- [3] 王梓茜, 程宸, 杨袁慧, 等. 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[J]. 城市发展研究, 2018, 25(1): 87-96.
- [4] 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.
- [5] REN C, YANG R, CHENG C, et al. Creating breathing cities by adopting urban ventilation assessment and wind corridor plan: the implementation in Chinese cities[J]. Journal of wind engineering and industrial aerodynamics, 2018, 182: 170-188.
- [6] 成雅田, 吴昌广. 基于局地气候优化的城市蓝绿空间规划途径研究进展[J]. 应用生态学报, 2020, 31(11): 3935-3945.
- [7] ZHAO Y, LI R, FENG L, et al. Boundary layer wind tunnel tests of outdoor airflow field around urban buildings: a review of methods and status[J]. Renewable and sustainable energy reviews, 2022, 167: 112717.
- [8] CHEN G, RONG L, ZHANG G. Impacts of urban geometry on outdoor ventilation within idealized building arrays under unsteady diurnal cycles in summer[J]. Building and environment, 2021, 206: 108344.
- [9] 李心雨, 杨昀, 李自如, 等. WRF大气模式与台风经验模型在超强台风“山竹”过程重构中的比较分析[J]. 海洋工程, 2022, 40(4): 53-64.
- [10] HE J, CHEN D, GU Y, et al. Evaluation of planetary boundary layer schemes in WRF model for simulating sea-land breeze in Shanghai, China[J]. Atmospheric research, 2022, 278: 106337.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 刘勇洪, 徐永明, 张方敏, 等. 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[J]. 规划师, 2019, 35(10): 32-40.

- [15] JIANG Y, HUANG J, SHI T, et al. Interaction of urban rivers and green space morphology to mitigate the urban heat island effect: case-based comparative analysis[J]. *International journal of environmental research and public health*, 2021, 18(21): 11404.
- [16] FANG Y, ZHAO L. Assessing the environmental benefits of urban ventilation corridors: a case study in Hefei, China[J]. *Building and environment*, 2022, 212: 108810.
- [17] FANG Y, GU 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.
- [18] KIM J, YI Y K, MALKAWI A. Topography integration to wind downscaling[J]. *Building and environment*, 2017, 115: 306–315.
- [19] 江颖慧, 焦利民, 张博恩. 城市地表温度与 NDVI 空间相关性的尺度效应[J]. *地理科学进展*, 2018, 37(10): 1362–1370.
- [20] AN R, WU Z, TONG Z, et al. How the built environment promotes public transportation in Wuhan: a multiscale geographically weighted regression analysis[J]. *Travel behaviour and society*, 2022, 29: 186–199.
- [21] 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: 1880–1889.
- [22] 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.
- [23] WICHT M, WICHT A, OSIŃSKA-SKOTAK K, et al. Mapping urban porosity and roughness characteristics as a mean of defining urban ventilation corridors [C]//Conference on Remote Sensing Technologies and Applications in Urban Environments II. Warsaw, Poland. 2017.
- [24] LI J, YOU W, DING W. Exploring urban space quantitative indicators associated with outdoor ventilation potential[J]. *Sustainable cities and society*, 2022, 79: 103696.
- [25] WANG 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.
- [26] EWING R, CERVERO R. Travel and the built environment[J]. *Journal of the American Planning Association*, 2010, 76(3): 265–294.
- [27] 张瑞. 济南道路交通与城市热岛效应研究[D]. 济南: 山东建筑大学, 2015.
- [28] 张硕, 房小怡, 陈静, 等. 城市通风廊道规划技术研究——以石家庄都市区为例[J]. *气象与环境科学*, 2022, 45(3): 51–61.
- [29] 王录仓. 基于百度热力图的武汉市主城区城市人群聚集时空特征[J]. *西部人居环境学刊*, 2018, 33(2): 52–56.
- [30] 党云晓, 董冠鹏, 余建辉, 等. 北京土地利用混合度对居民职住分离的影响[J]. *地理学报*, 2015, 70(6): 919–930.
- [31] HE B, DING L, PRASAD D. Enhancing urban ventilation performance through the development of precinct ventilation zones: a case study based on the Greater Sydney, Australia[J]. *Sustainable cities and society*, 2019, 47: 101472.
- [32] ZAKŠEK K, OŠTIR K, KOKALJ Ž. Sky-view factor as a relief visualization technique[J]. *Remote sensing*, 2011, 3(2): 398–415.
- [33] GRIMMOND C S B, OKE T R. Aerodynamic properties of urban areas derived from analysis of surface form[J]. *Journal of applied meteorology*, 1999, 38(9): 1262–1292.
- [34] HE Y C, CHAN P W, LI Q S. Estimation of roughness length at Hong Kong International Airport via different micrometeorological methods[J]. *Journal of wind engineering and industrial aerodynamics*, 2017, 171: 121–136.
- [35] FOTHERINGHAM A S, YANG W, KANG W. Multiscale geographically weighted regression (MGWR) [J]. *Annals of the American Association of Geographers*, 2017, 107(6): 1247–1265.
- [36] 韩邦龙. 基于风环境评价的城市街区空间形态指标量化研究[D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2020.

[责任编辑: 丁 蓉]