

武汉市东南部通风廊道构建和气象效应研究¹

成丹 许杨 刘静 陈正洪 阳威 张雪婷

湖北省气象服务中心

【摘要】：武汉市东南部的夏季平均风速以“软轻风”为主，中心城区风速缓慢减小，热岛集中，郊区风速保持稳定波动，大部分区域基本无热岛。尝试构建武汉市东南部的宏观通风廊道系统，并利用 WRF 模式进行数值敏感性试验，定量研究不同廊道建设对周边地区气象场的影响。模拟时间选为 2018 年 7 月 18 日，盛行东南风，模拟试验设置平行于主导风和垂直于主导风的两条通风廊道。结果表明：武汉市东南部的通风廊道有降低气温、提高湿度和增加风速的作用。与无廊道相比，与主导风平行的廊道可致使近地面气温下降 1.4℃，相对湿度提高 8%，风速增加 1.4 m·s⁻¹，垂直高度 100 m 以内降温增湿效应明显，120 m 高度风速增加 1 m·s⁻¹；与主导风垂直的廊道对气温、湿度和风速的作用强度弱于平行廊道，且复合廊道的作用强度与单一廊道基本相同。通风廊道对气温和湿度的影响随风向向下游延伸，但对风速影响甚微。与主导风平行的廊道下风方 1 km 气温降低 0.98℃，相对湿度提高 5.93%，下风方 2 km 气温降低 0.46℃，相对湿度提高 3.12%。通过设计通风廊道，利用主导风偏东风将城郊绿地和水体同中心热岛区串连，引入冷源自然风，导出城市热空气，形成局地对流，可缓解城市热岛。

【关键词】：武汉市东南部；城市热岛；城市通风廊道；WRF 模式

【中图分类号】：P463.3 **【文献标识码】**：A **【文章编号】**：1004-8227(2022)11-2500-14

【DOI】：10.11870/cjlyzyyhj202211015

近年来，我国城市化进程加速推进，原有的自然下垫面被密集的人工建筑替代，使得城市下垫面愈发粗糙^[1,2]；同时伴随人口密度的不断增大，大量人为热及污染物的加剧排放，形成了特殊的城市局地气候，其显著特征为城市风速减小、极端暴雨增加、城市热岛加剧等等^[3,4]。据统计，近 50 a 来中国年平均风速的下降速率为 0.11~0.18 m·s⁻¹·(10a)⁻¹，其中大城市的下降趋势尤为明显，且城市化率每增加 10%，相应的观测风速则减小 0.11 m·s⁻¹^[5,6]。城市处于长期静稳或弱风天气状态时，空气流通能力减弱，污染物扩散速率减小，进而加重城市热岛和空气污染，最终影响城市的宜居性和可持续发展^[7,8]。

城市通风廊道是利用夏季盛行风改善城市气候和环境的一种生态节能方式，其作为道路系统的通风路径，利用空气的流动，将城市外围郊区新鲜洁净的冷空气导入城市内部，同时将城市污染的废气随风稀释排出，从而促进空气循环、降低建筑物能耗、缓解城市热岛、提高人体舒适度^[9,10,11,12]。2015 年 12 月，中央城市工作会议特别提出要“增强城市内部布局的合理性，提升城市的通透性和微循环能力”；2016 年 2 月，国家发展改革委员会与住房和城乡建设部联合印发《城市适应气候变化行动方案》^[13]，明确提出要“打通城市通风廊道，增加城市的空气流动性”。

目前国内外多地相继开展了关于城市风环境的研究应用项目。德国斯图加特市利用城市周边山坡地的峡谷地带及山隘出口

¹ 收稿日期：2021-04-14；修回日期：2022-01-04

基金项目：湖北省气象局科技基金项目（2018Z10）

作者简介：成丹（1988 ~ ），女，高级工程师，主要研究方向为应用气象。E-mail: 501985033@qq.com

* 通讯作者 E-mail: 702158412@qq.com

作为冷空气流通的重要通道,连接城市作用空间与补偿空间,确保有效的空气流动,将该市由空气污染严重的“雾都”改善成为“疗养胜地”^[14,15]。日本东京都利用现有街道和河川以及建筑高低错落的布置,引入海风,由高层建筑引起建筑背风面的下沉风,评定出五级风道系统^[16,17]。中国香港通过增加绿化空间、减少地面覆盖率、加强与开敞空间地区的连接、控制建筑体积和高度、增加建筑的透风性,从而在微观尺度上满足城市空气流通的相关要求,达到逐步改善城市通风环境的目标^[18,19]。近年来中国大陆的诸多大中型城市也陆续展开了城市通风廊道的设计研究。杜吴鹏等^[20]和王梓茜等^[21]分别针对北京中心城区和通州区,基于背景风环境、城市热岛和地表通风潜力提出了中心城区和通州区通风廊道构建的依据、原则和初步方案;俞布等^[22]基于杭州市多源信息的空间叠置分析,综合构建了由6条一级风道、11条二级风道和12条一级城市绿廊构成的杭州城市多级通风廊道体系;党冰等^[23]利用南京江北新区的多种气象资料,并结合土地利用现状及未来规划资料,构建了核心规划区域东北—西南走向的1条主通风廊道和3条次通风廊道,以及东南—西北、东—西走向的8条局部通风廊道;此外,长沙、西安和郑州等城市也开展了风道设计研究^[24,25,26]。

武汉市,九省通衢,我国重要的交通枢纽和特大型城市。近些年武汉市城市建设高速发展,造成了较严重的工业污染,城市热岛效应加剧。为解决日益恶化的环境问题,2009年武汉市规划局提出“一心、六楔、十带”的绿地系统规划格局^[27];2012年,武汉市国土资源与规划信息中心、武汉大学及香港中文大学对武汉市城市风道进行了联合研究,共同编制了《武汉市城市风道规划管理研究》^[28],确定武汉市主城区风道“三纵、四横、四片、六点”的空间格局和宏观、中观和微观3个等级。本文将基于上述规划的设计原则,利用武汉市东南部(包括武昌区、洪山区和江夏区,下同)的气象观测数据、NCEP全球再分析资料和卫星遥感数据,分析武汉市东南部夏半年的背景风场和城市热岛,构建武汉市东南部的宏观通风廊道系统,并利用WRF模式进行数值敏感性试验,定量研究不同廊道建设对周边地区的气温、相对湿度和风3种主要气象要素的影响。

1 研究区域概况

武汉市东南部由北至南分别为武昌区、洪山区和江夏区,其中武昌区和洪山区隶属武汉市中心城区,总面积587.96 km²,与汉阳区、江汉区、江岸区隔江相望。武昌区属典型的残丘型河湖冲积平原,辖区内山丘多;洪山区以平原为主,有山有水,水阔地宽,西北略低,东南略高。江夏区隶属武汉市郊区,为江汉平原向鄂南丘陵过渡地段,总面积2 018.3 km²,境内有梁子湖、斧头湖、汤逊湖等大小不等的湖泊共136处。武汉市东南部属亚热带季风性湿润气候区,具有常年降水丰沛、热量充足、雨热同季、冬冷夏热、四季分明等气候特点。

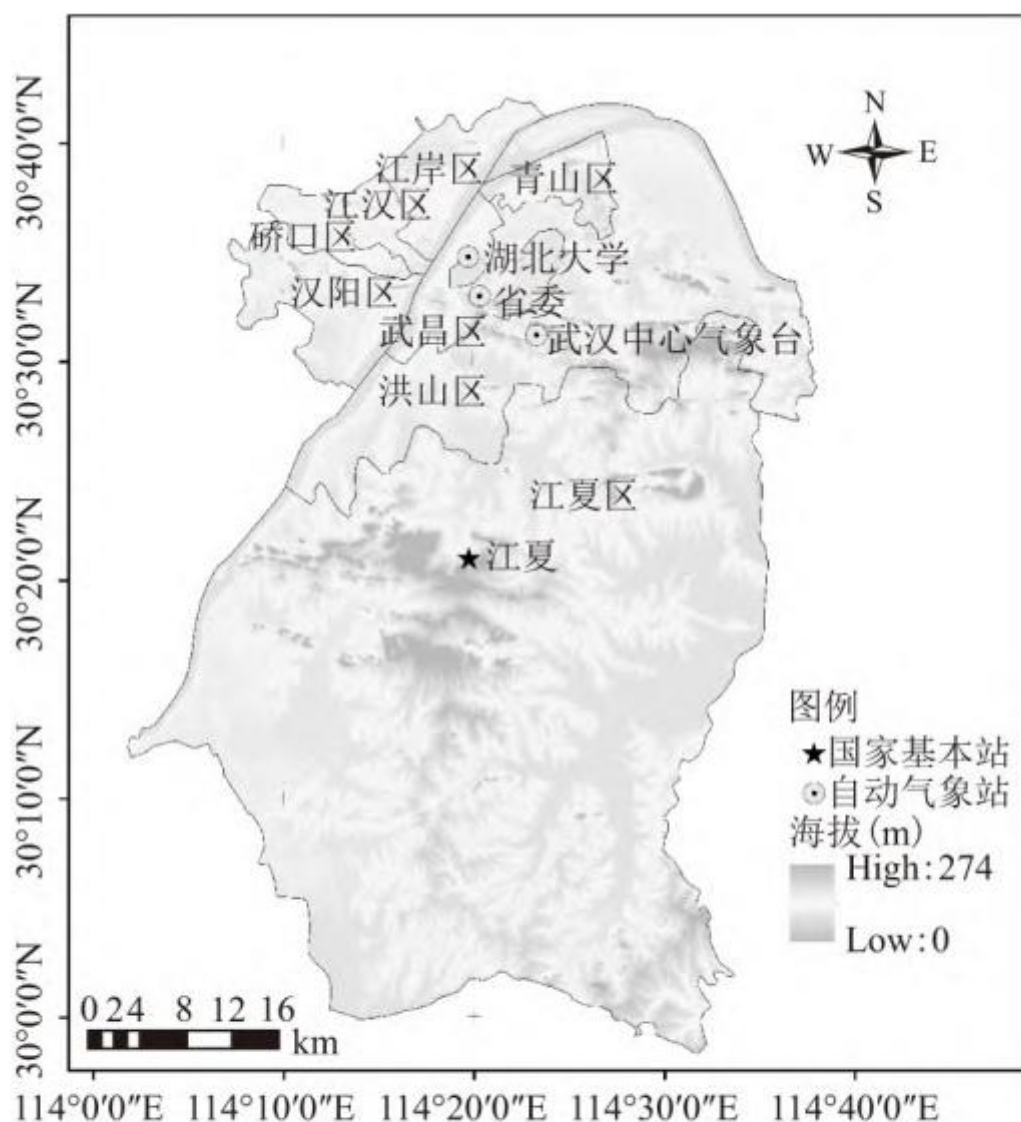


图 1 武汉主要行政区及所研究的气象站分布示意图

Fig. 1 Spatial distribution of main administration regions and studied meteorological stations in Wuhan

2 资料与方法

2.1 气象数据

本文所用的气象数据来源于武汉市东南部的 1 个国家基本气象站和 3 个区域自动气象站, 内容包括 2012~2019 年夏半年 4~9 月的日平均风速、风向和气温。其中国家基本气象站为江夏站(站号 57493), 位于江夏区; 3 个区域自动气象站分别为位于武昌区的湖北大学站(站号 Q1054)和省委站(站号 Q1055), 以及位于洪山区的武汉中心气象台站(站号 Q1051)(见图 1)。所用气象数据均经过了校验和订正, 具有较高的代表性和可信度。

2.2 热岛分析方法

MODIS(中等分辨率成像光谱仪)是搭载在美国宇航局对地观测系统(EOS)系列卫星 Aqua 和 Terra 上的重要传感器,提供 0.4~14.4 μm 波段范围内 36 个通道的对地观测。Aqua 在下午 13:30 时左右和凌晨 1:30 时左右过境,此刻地表温度分别接近日最高值和最低值。MODIS 地表温度产品由 31 和 32 两个热红外波段的数据通过劈窗算法[29]得到,空间分辨率为 1 km,包括逐日,8 d 和逐月产品。本文利用北京时间 2018-07-15~2018-07-20Aqua 的 MYD11A1 逐日数据来分析武汉市东南部的地表热岛强度。为了消除气候环境的影响,更客观地分析温度场的分布及变化,本文对 MODIS 数据每个像素点的地表温度进行归一化处理,定义像元的热岛指数为:

$$L_i = \frac{T_i - \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n T_j}{\sigma}, i=1, 2, \dots, n \quad (1)$$

式中: L_i 为热岛指数; T_i 、 T_j 为像元温度值; n 为研究区域内像元总数; σ 为研究区域内所有像元温度值的标准差。根据热岛指数由大到小划分为 7 个等级,如表 1 所示。

表 1 热岛强度等级划分

等级	指数范围	热岛强度等级
1	>3.0	强热岛
2	2.0~3.0	次强热岛
3	1.0~2.0	弱热岛
4	-1.0~1.0	无热岛
5	-2.0~-1.0	弱冷岛
6	-3.0~-2.0	次强冷岛
7	<-3.0	强冷岛

2.3 数值模拟方法

2.3.1 WRF 模式简介及网格设置

WRF 模式(Weather Research and Forecast Model)是由美国国家大气研究中心 NCAR (National Center for Atmospheric Research)和美国国家环境预报中心 NCEP(National Centers for Environmental Prediction)等共同研发的新一代中尺度天气预报模式,具备完善的物理化参数方案和优秀的跨尺度研究能力,适用于天气预报业务与研究[30]。

为了研究武汉市东南部通风廊道的气象效应，本文采用 WRF-ARW 3.9.1.1 版本，选取 2018 年 7 月 18 日作为模拟时段，当日武汉市东南部的降水量为 0，日照时数大于 8 h，江夏站的主导风向为偏南风，平均风速为 $3.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。具体设置如下：模拟时段为北京时间 2018-07-17T08:00~2018-07-19T02:00 (spin-up 15 h)，共计 43 h；模拟中心点经纬度为 (30.6° N , 114.4° E)，采用 3 层嵌套网格，嵌套区域如图 2 所示，网格距分别为 4.5、1.5、0.5 km，其中第 3 层格点数为 397×403 ，覆盖武汉市整个区域。

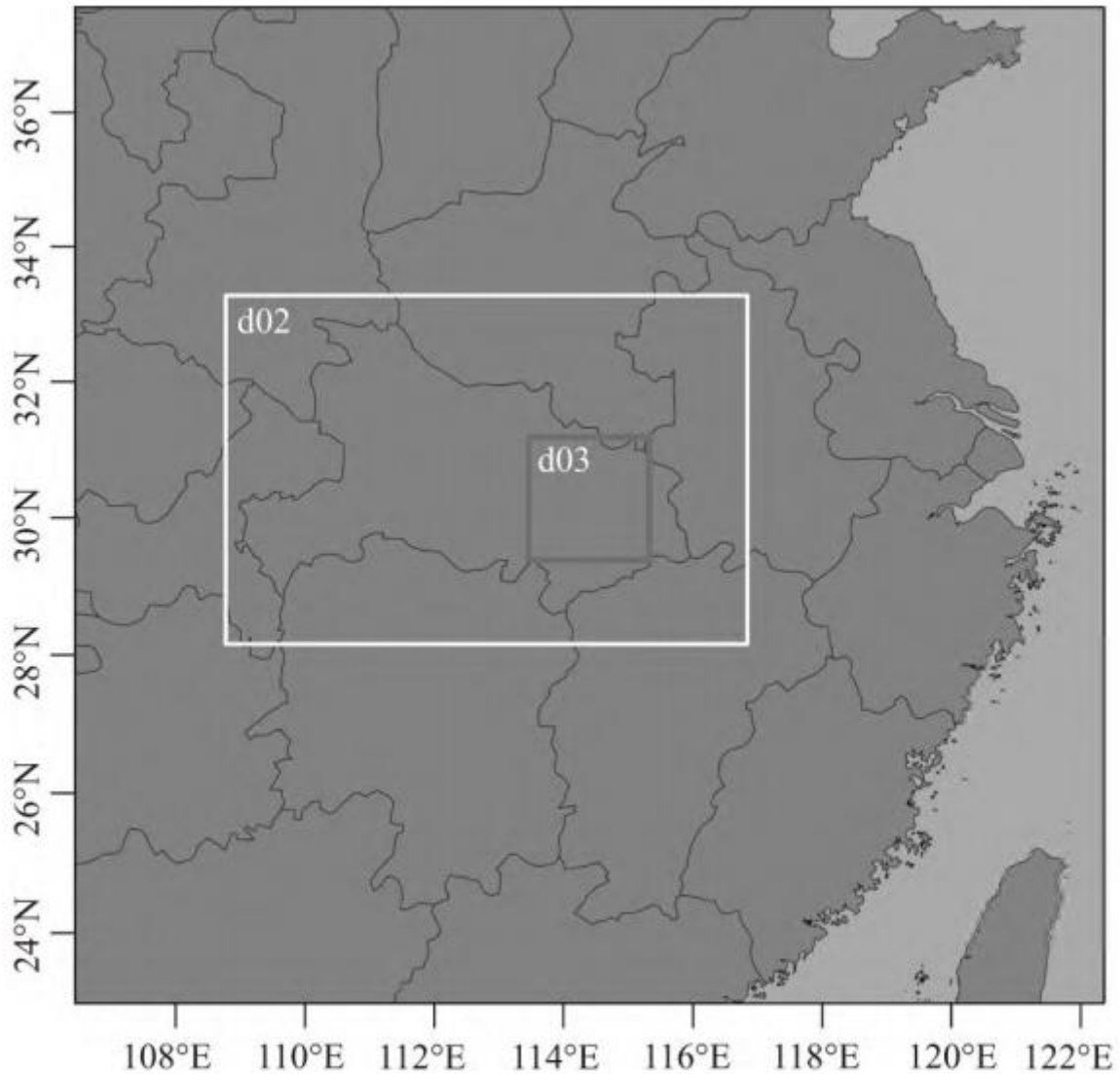


图 2 WRF 模拟嵌套区域

Fig. 2 WRF simulated nested area

2.3.2 边界条件

驱动 WRF 模式的数据主要包括气象数据、地形数据和土地利用类型数据 3 种。本文的气象背景场驱动数据采用了 $1^\circ \times 1^\circ$ NCEP/NCAR 全球 6 h 一次的再分析气象资料 FNL (Final Operational Global Analysis)，该数据由全球数据通信网持续地采集并

进行实时更新，经过数据分析和校正后形成，数据质量较高。

地形和土地利用类型数据是 WRF 模式开展高分辨率数值模拟研究的关键因素。WRF 自带的数据库有 1993 年美国国家地质调查局 (USGS) 全球土地分类 (图 3a) 和中等分辨率成像光谱仪 (MODIS) 两种，虽然数据质量较高，但年代久远，无法准确反映研究区域城市下垫面现状。因此本文利用由清华大学宫鹏教授团队加工生产的“全球 30 m 土地覆盖数据集 FROM-GLC (2017 年)”数据 [31]，并对其进行数字化、重投影、重分类等处理，作为 WRF 模式“真实”下垫面的输入数据 (图 3b)，用于本文的数值试验模拟。由图 3 可见，订正后的武汉市东南部城区面积扩大，不透水地表面积占比分布特征更加精细，且进一步将城市土地利用类型细分为低密度住宅区、高密度住宅区和工商业区。

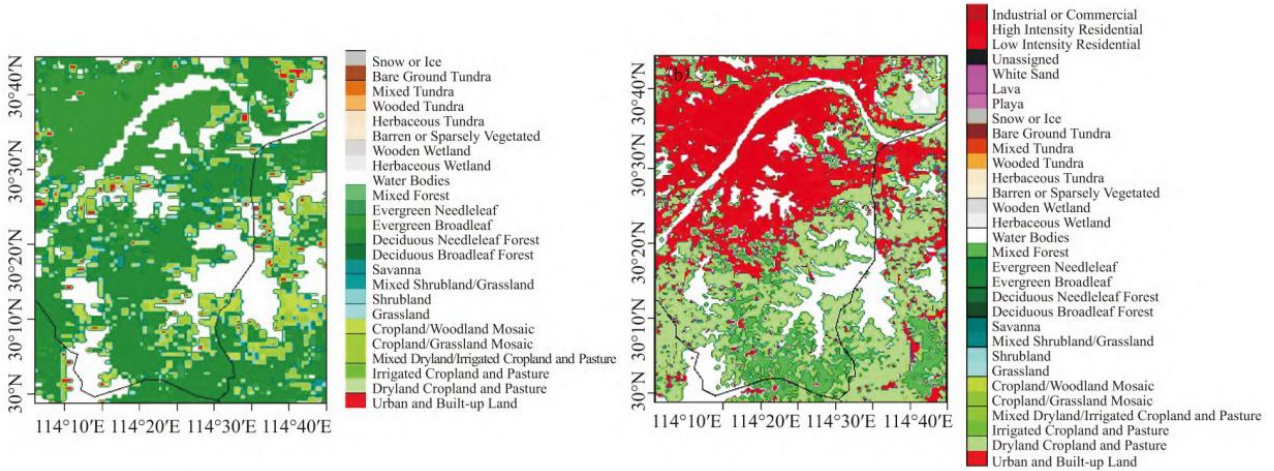


图 3 USGS 土地分类和 FROM-GLC 土地分类中武汉市东南部土地利用类型对比图
Fig. 3 Comparisons of land use types from USGS and FROM-GLC over Southeast in Wuhan

2.3.3 物理方案

为了探究城市内部变化机制，本文所用的高分辨率数值模拟需采用合适的城市物理参数化方案 (表 2)，其中城市冠层模式选择单层城市冠层 UCM，它可以描述城市和建筑的三维特征和人为产热，相关参数见表 3。

表 2 物理参数化方案

物理过程	参数化方案
微物理 (mp_physics)	WSM 6-class graupel scheme
长波辐射 (ra_lw_physics)	RRTMG scheme

短波辐射(ra_sw_physics)	RRTMG scheme
近地面层(sf_sfclay_physics)	Monin-Obukhov(Janjic Eta) Scheme
陆面层(sf_surface_physics)	Noah-MP land-surface model
行星边界层(bl_pbl_physics)	Mellor-Yamada-Janjic (Eta) TKE scheme
积云参数化(cu_physics)	Kain-Fritsch (new Eta) scheme
城市参数化(sf_urban_physics)	Single-layer, UCM

3 结果分析

3.1 背景风场特征

武汉市东南部 4 个典型气象站(即江夏站、中心气象台站、湖北大学站和省委站),从逐年变化趋势来看,江夏站和中心气象台站总体呈稳定波动变化特征,湖北大学站和省委站缓慢下降,尤其 2015 年之后下降趋势尤为显著(图 4a);从逐月变化趋势来看,四站在夏半年 4~9 月的逐月平均风速比较稳定(图 4b);从地理位置看,四个气象站从武汉市东南部的郊区延伸至中心城区,风速依次减小(图 4),其中 2012~2019 年夏半年的平均风速分别为 2.34、1.61、0.70 和 0.59 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。中心城区的风速减小,与城市范围扩大、建筑物高度增加等城市化人为因素密不可分。

对武汉市东南部 4 个气象站 2012~2019 年夏半年不同风速段的风速频率进行统计表明,4 个气象站 0.3~3.3 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 风速段(“软轻风”)出现频率超过全部风速段的六成以上,其中江夏站尤为显著,“软轻风”的频率占比高达 97.4%(图 5a)。而从“软轻风”的风向玫瑰(图 5b)可知,江夏站和中心气象台站以偏东风为主,其中江夏站的偏东风累积出现频率达 40.3%,中心气象台站达 33.3%;湖北大学站以偏北风为主,而省委站各风向较为均衡。“软轻风”是城市通风廊道通风效果最明显的风段,基于以上背景风场分析,可初步确定城市主要通风廊道的走向。

3.2 热岛分布特征

图 6 为 MODIS 地表温度产品制作的 2018 年 7 月 15~20 日武汉市东南部热岛强度分布。可知,强热岛主要集中于建筑众多、人口聚集的中心城区,且热岛集中、相连成片。武昌区、洪山区以及江夏区北部,除水体和部分绿地区域外,大部地区呈现不同程度的热岛分布;江夏区中部和南部,除建筑和裸土区域呈弱热岛外,其余基本无热岛出现,水体为冷岛。故江夏区中部和

南部的城郊绿地和水体可作为城市冷源，通过设计通风廊道，利用主导风将冷源和中心热岛区串连，引入冷源自然风，导出城市热空气，形成局地对流，削弱中心城区连片热岛发展，缓解城市热岛效应。

表 3 UCM 城市物理方案的模拟参数

城市用地类型	建筑平均高度(m)	平均屋顶宽度(m)	道路宽度(m)	人工产热($W \cdot m^{-2}$)	屋顶热容($J \cdot m^{-3} \cdot K^{-1}$)
低密度住宅区	5.0	8.3	8.3	20.0	1.0
高密度住宅区	25.0	12.3	11.8	50.0	1.0
工商业区	30.0	20.0	14.0	90.0	1.0
城市用地类型	墙面热容($J \cdot m^{-3} \cdot K^{-1}$)	道路热容($J \cdot m^{-3} \cdot K^{-1}$)	屋顶导热系数($J \cdot m^{-1} \cdot s^{-1} \cdot K^{-1}$)	墙面导热系数($J \cdot m^{-1} \cdot s^{-1} \cdot K^{-1}$)	道路导热系数($J \cdot m^{-1} \cdot s^{-1} \cdot K^{-1}$)
低密度住宅区	1.0	1.4	0.67	0.67	0.4
高密度住宅区	1.0	1.4	0.67	0.67	0.4
工商业区	1.0	1.4	0.67	0.67	0.4

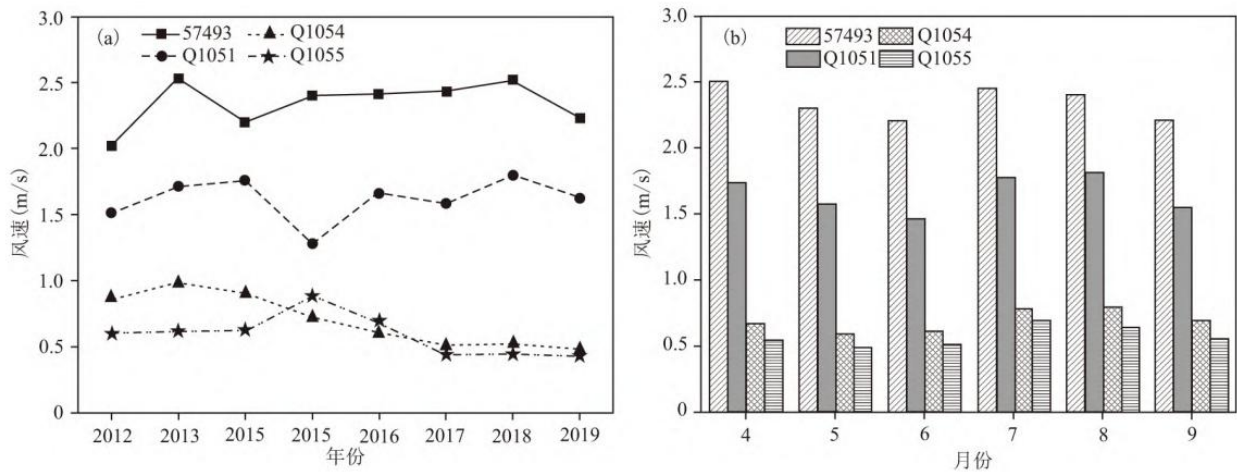


图 4 武汉市东南部四个气象站 2012~2019 年夏半年平均风速年变化 (a) 和月变化 (b)
 Fig. 4 Variation of annual (a) and monthly (b) average wind speed of four meteorological stations over southeast in Wuhan in summer half year from 2012 to 2019

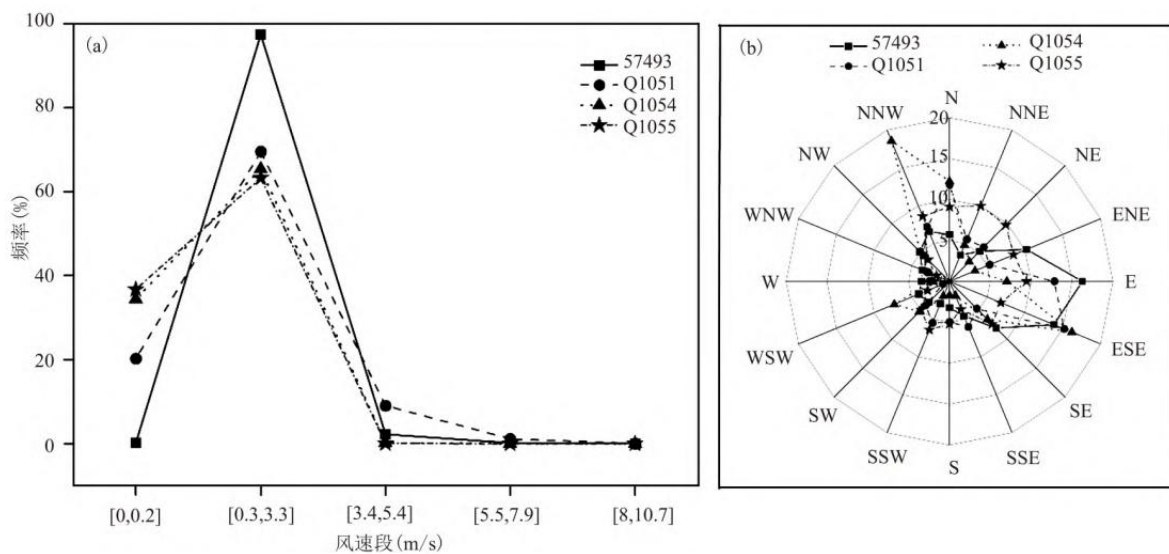


图 5 武汉市东南部四个气象站 2012~2019 年夏半年不同风速段风频统计 (a) 和“软轻风”风速段风向玫瑰 (b, 单位: %)
 Fig. 5 Frequency statistics of different wind speed sections (a) and wind direction rose (b) of “soft breeze” of four meteorological stations over Southeast in Wuhan in summer half year from 2012 to 2019

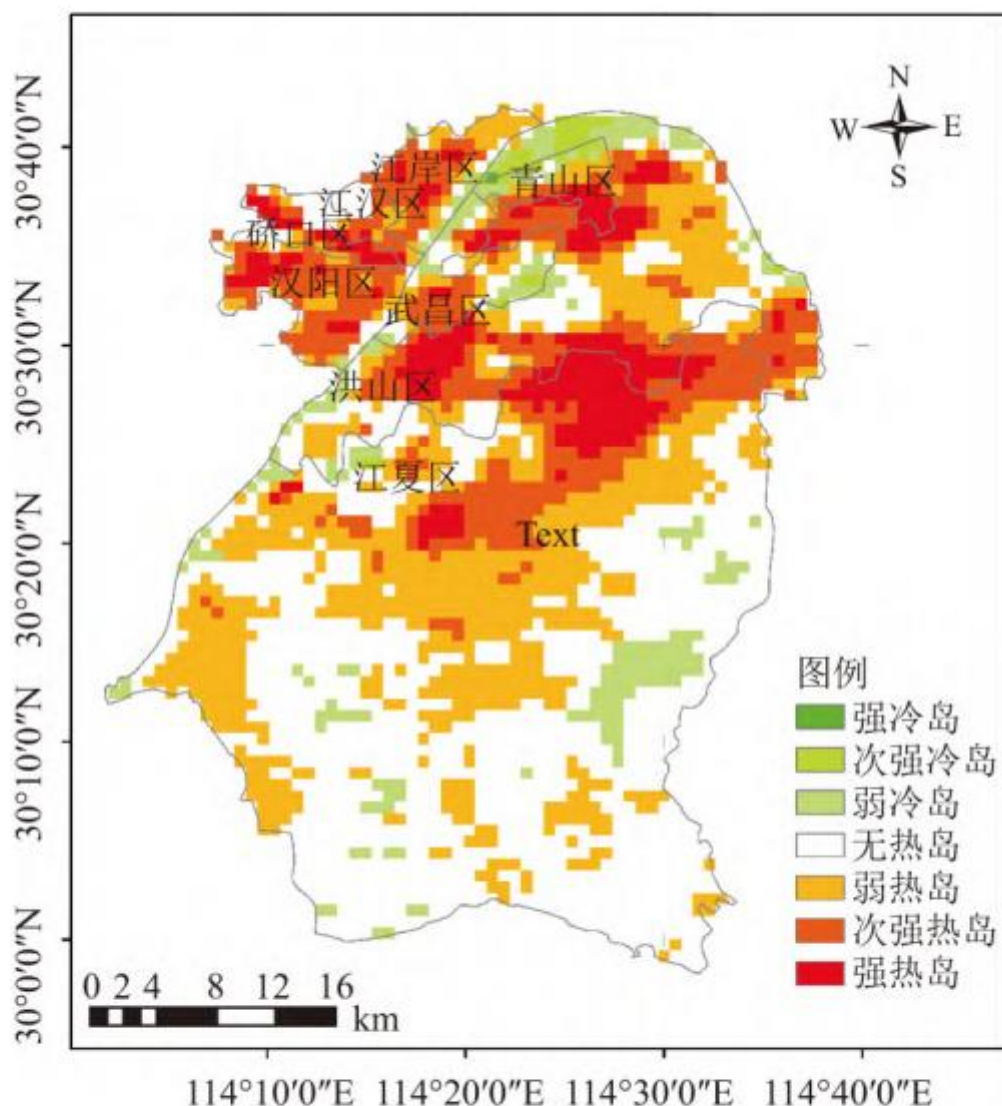


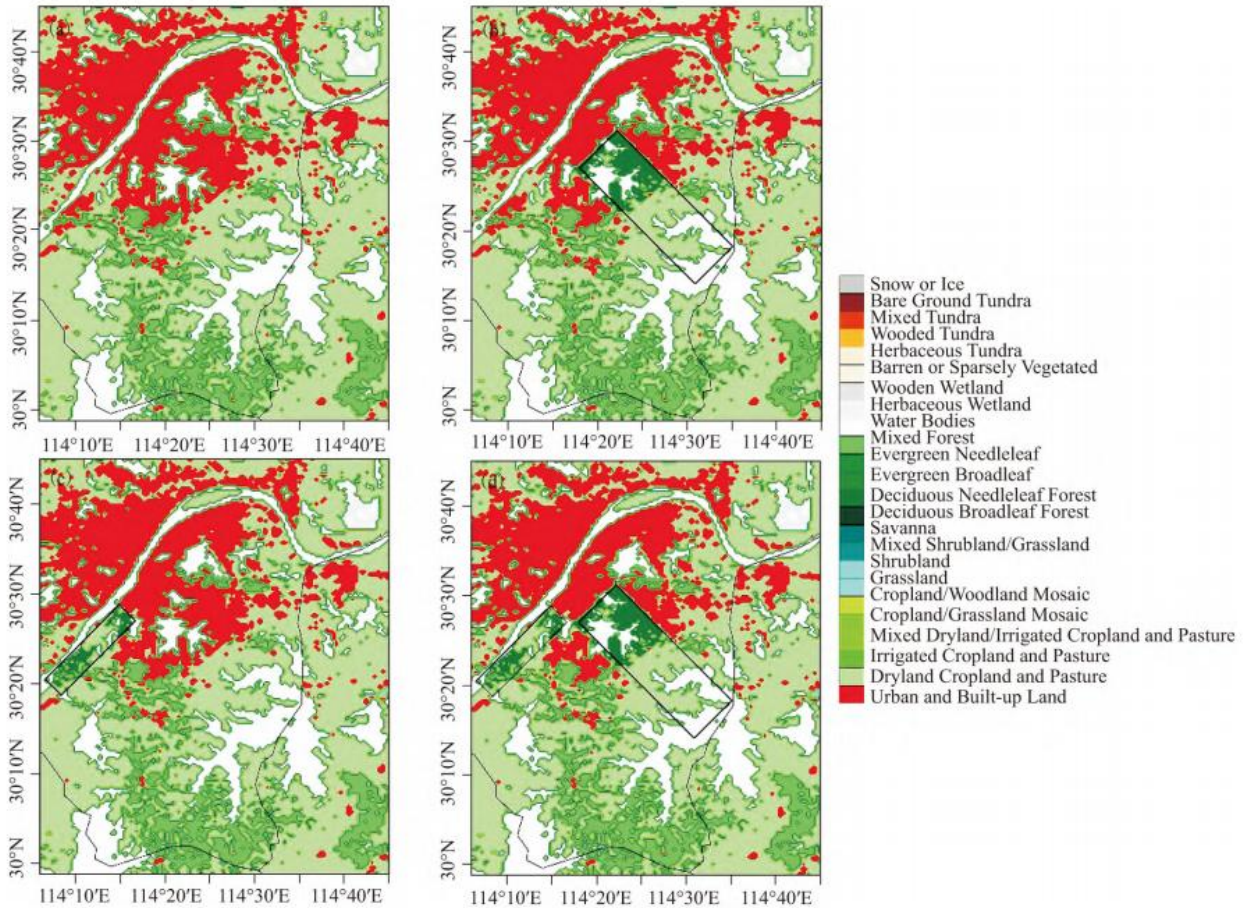
图 6 武汉市东南部 2018 年 7 月 15~20 日热岛强度反演
 Fig. 6 Heat island intensity inversion over Southeast in Wuhan from 15th to 20th in July 2018

3.3 典型个例数值模拟

3.3.1 试验设计

为了分析通风廊道的具体气象效应, 本文基于武汉市通风廊道的规划设计原则, 结合武汉市东南部的气候地理特征及城市形态, 构建不同方向的通风廊道进行数值敏感性试验, 定量研究不同廊道建设对周边地区的风场、温度场和湿度场的影响。其中廊道 1 以江夏区汤逊湖和牛山湖作为载体, 与“软轻风”下的主导风基本平行的连通绿源与中心城区的通风区域(图 7b); 廊道 2 以洪山区青菱湖和野芷湖为载体, 与“软轻风”下的主导风基本垂直的通风区域(图 7c)。构建 4 种下垫面类型, 分别为 case0、

case1、case2 和 case3。其中 case0 的土地利用类型为现状，主要为城市、水体和少量农田(图 7a);case1 设置 1 条通风廊道，即平行“软轻风”下的主导风的廊道 1，廊道内城市地表修改为常绿阔叶林(图 7b);case2 同样设置 1 条通风廊道，即垂直“软轻风”下的主导风的廊道 2，廊道内城市地表同样修改为常绿阔叶林(图 7c);case3 设置 2 条通风廊道，包括 case1 和 case2 的廊道 1 和廊道 2(图 7d)，以此分析复合廊道的气象效应。



注: case0(现状, a); case1(通风廊道 1, b); case2(通风廊道 2, c); case3(通风廊道 1 和 2, d)

图 7 不同个例中的土地利用类型分布

Fig. 7 Distributions of land use types in different experiments

3.3.2 WRF 模拟可靠性检验

为了检验 WRF 模拟结果的可靠性，本文对武汉市东南部四个典型气象站的气温、相对湿度和风速的相关统计参数进行了对比检验(表 4)，并附上江夏站逐时观测和模拟结果的日变化(图 8)。可知，江夏站气温、相对湿度和风速的逐时日变化曲线模拟与观测形态基本相同。此外，四个气象站中，WRF 对于气温和相对湿度的模拟准确度较高，其中四站气温的平均值偏差控制在 1℃以内，相关系数达到 0.90 以上；相对湿度的平均值偏差控制在 7%以内，相关系数达到 0.85 以上。对于风速，江夏站和中心气象台站的平均值偏差较小，但相关系数偏低。而对于湖北大学站和省委站，风速的模拟值与观测值存在较大的偏差。实地调研，发现湖北大学站周边种植了密集树木，省委站周边存在高耸建筑物，湖北大学站和省委站周边探测环境对风向、风速监测产生了较大影响，这可能是 WRF 模拟值与观测值之间误差偏大的一个重要原因。总体而言，可以认为 WRF 对于武汉市东南部气象要素的模拟是合理可信的，可以进行通风廊道的数值敏感性试验研究。

表 4 武汉市东南部四个气象站逐时观测和 WRF 模拟对比统计检验

气温(°C)					
	观测	模拟	平均值偏差	均方根误差	相关系数
57493	32.03	31.40	-0.63	0.94	0.97*
Q1051	33.40	32.97	-0.44	0.91	0.97*
Q1054	34.17	33.30	-0.87	1.74	0.90*
Q1055	33.20	33.01	-0.19	1.09	0.92*
相对湿度					
	观测	模拟	平均值偏差	均方根误差	相关系数
57493	68.46%	62.77%	-5.69%	7.18%	0.96*
Q1051	51.87%	54.93%	3.06%	7.13%	0.89*
Q1054	50.21%	53.86%	3.65%	7.40%	0.85*
Q1055	61.58%	54.77%	-6.81%	10.36%	0.87*
风速(m·s ⁻¹)					
	观测	模拟	平均值偏差	均方根误差	相关系数
57493	3.33	3.13	-0.20	0.95	0.66*
Q1051	2.63	3.06	0.43	1.23	0.47*
Q1054	1.20	3.84	2.64	2.93	0.23
Q1055	0.85	3.17	2.32	2.76	0.16

注：带*通过了 95%置信区间的显著性检验。

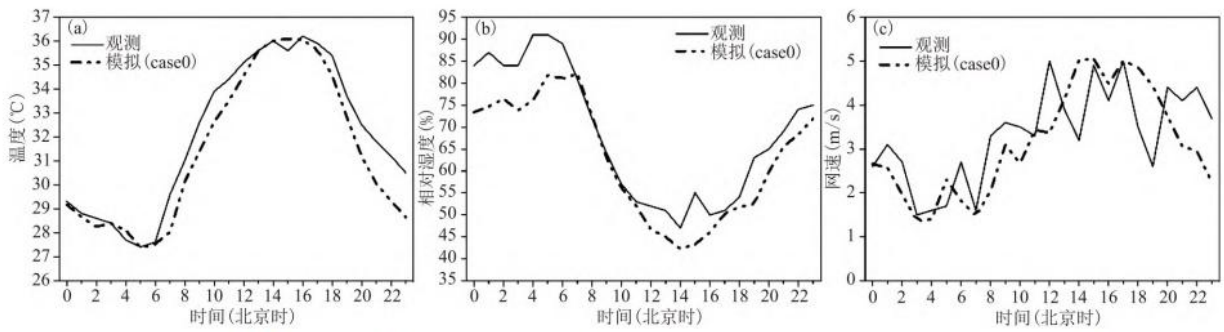


图 8 武汉市东南部江夏站和 case0 的气象要素日变化特征: (a) 气温; (b) 相对湿度; (c) 风速
 Fig. 8 Diurnal variations of (a) temperature, (b) relative humidity, and (c) wind speed obtained from
 Jianguxia meteorological station and simulation of case0

3.3.3 模拟结果分析

图 9 为现状土地利用类型 (case0) 模拟时段内的平均气温、平均相对湿度和平均风场分布。可知, 武汉市东南部中心城区城市热岛效应显著, 其中武昌区和洪山区的平均气温为 $32^{\circ}\text{C}\sim 33.5^{\circ}\text{C}$, 郊区江夏区为 $30^{\circ}\text{C}\sim 31.5^{\circ}\text{C}$, 城市热岛强度大约 2°C 左右。中心城区的平均相对湿度为 $50\%\sim 60\%$, 江夏区为 $65\%\sim 75\%$, 水体相对湿度达到 80% 以上, 中心城区较郊区湿度低 15% 左右, 显示了城市干岛特征。武汉市东南部夏季主导风向为东南风, 受中心城区高密度建筑物等因素影响, 武昌区和洪山区的平均风速在 $1.5\sim 3.3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 之间, 而江夏区大部分区域达到 $3.3\sim 5.4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 较中心城区偏高一个风力等级。

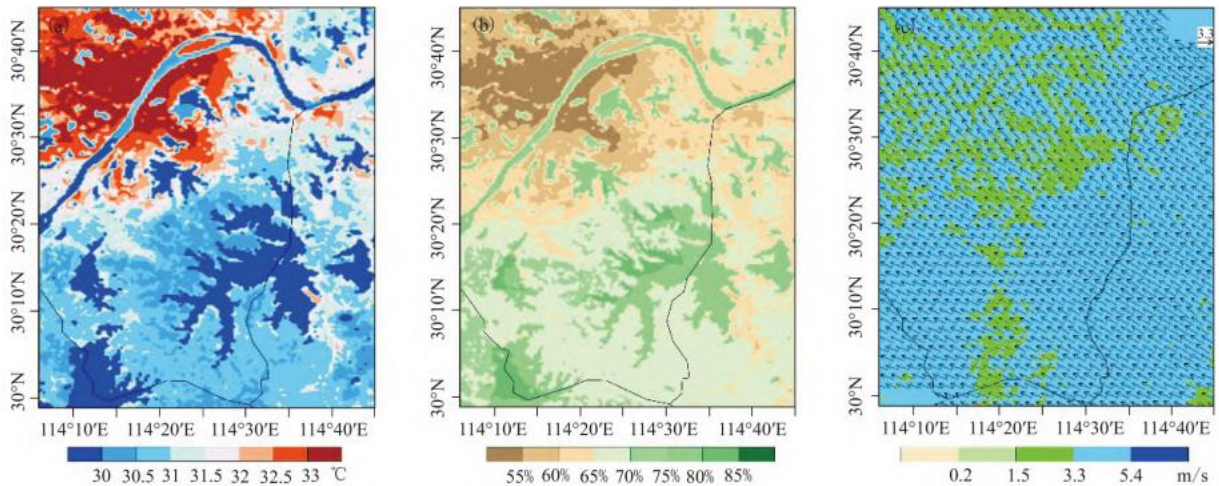
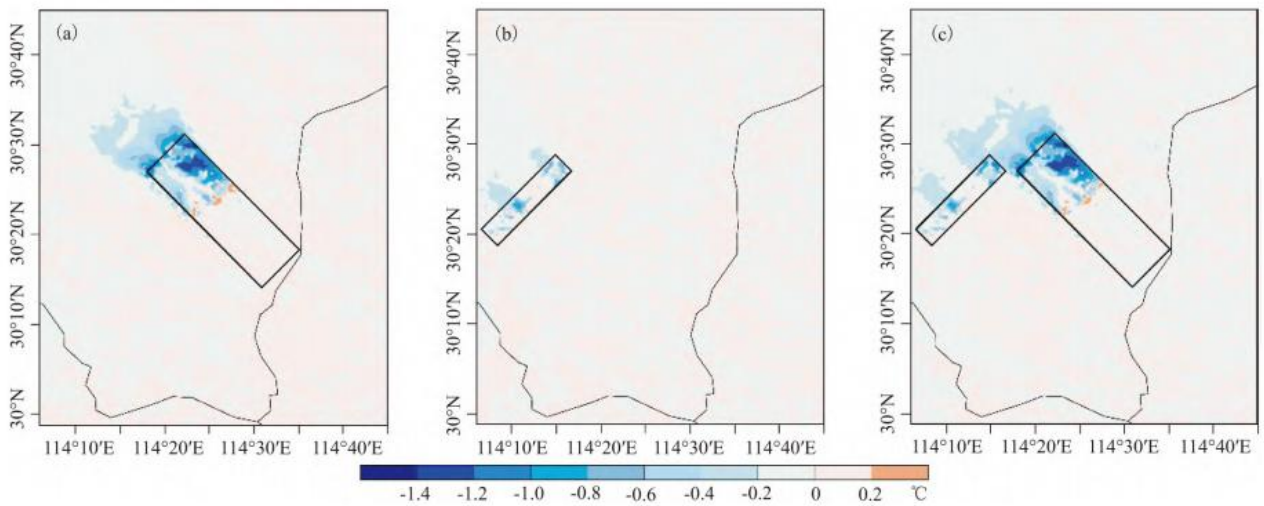


图 9 case0 的平均气温 (a)、平均相对湿度 (b) 和平均风场 (c) 分布
 Fig. 9 Distributions of average temperature (a), average relative humidity (b) and average wind field (c) of case

图 10 为不同土地利用类型平均气温与无廊道时的差值。可知, 与无廊道相比, 有通风廊道时, 廊道区域及其下风方区域有显著的大面积降温。其中与主导风平行的通风廊道 1 廊道内部的降温幅度最高可达 1.4°C 以上, 下风方区域的降温幅度为 $0^{\circ}\text{C}\sim 1^{\circ}\text{C}$; 与主导风垂直的通风廊道 2 的降温幅度低于廊道 1, 其中廊道 2 内部的降温幅度最高可达 0.9°C 以上, 下风方区域的降温幅度为 $0^{\circ}\text{C}\sim 0.4^{\circ}\text{C}$; 当设置两条通风廊道时, 廊道 1 和廊道 2 内部的降温与单一廊道时降温幅度持平, 但下风方区域的降温范围略有增加。

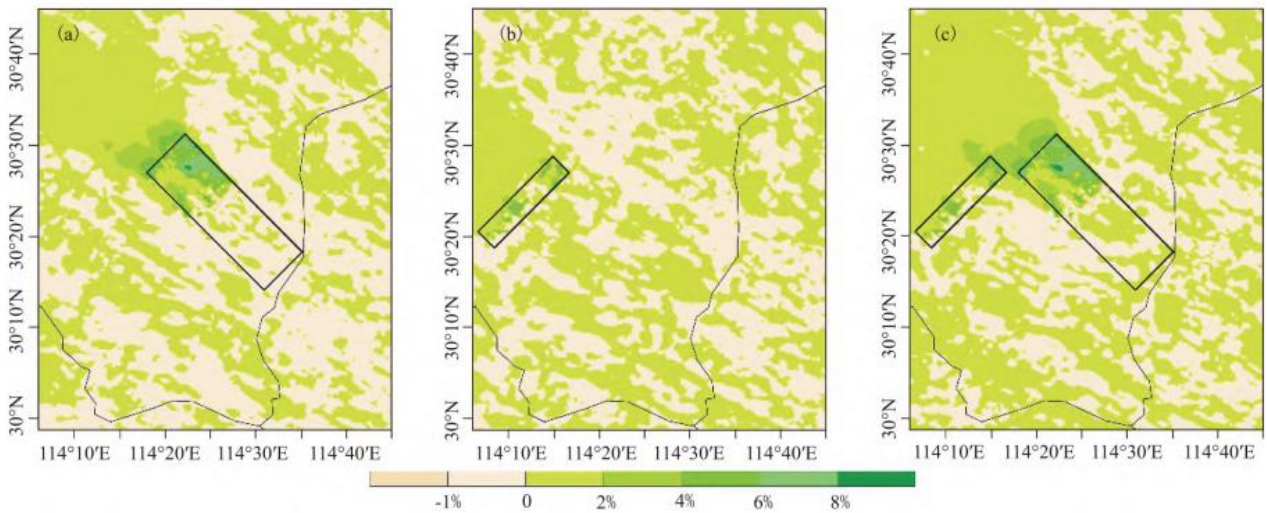


注: (a) case1-case0; (b) case2-case0; (c) case3-case0.

图 10 不同土地利用类型平均气温与无廊道时的差值

Fig. 10 Differences in average temperature between individual cases

图 11 为不同土地利用类型平均相对湿度与无廊道时的差值。可知，与无廊道相比，有通风廊道时，廊道区域湿度增加明显，下风方区域略有增加。其中与主导风平行的通风廊道 1 廊道内部的相对湿度增幅最高可达 8%以上，下风方区域的相对湿度增幅为 0%~6%;与主导风垂直的通风廊道 2 的相对湿度增幅略低于廊道 1，其中廊道 2 内部的相对湿度增幅最高可达 5%以上，下风方区域仅为 0%~2%;当设置两条通风廊道时，廊道 1 和廊道 2 内部的相对湿度与单一廊道时增加幅度持平，下风方区域的湿度增加范围略有扩大。



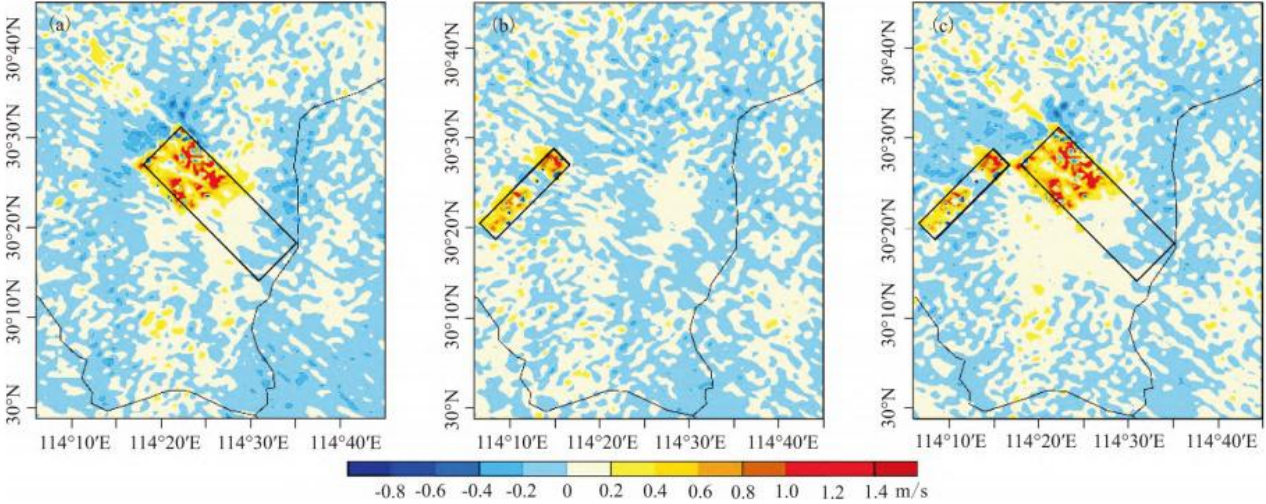
注: (a) case1-case0; (b) case2-case0; (c) case3-case0.

图 11 不同土地利用类型平均相对湿度与无廊道时的差值

Fig. 11 Differences in average relative humidity between individual cases

图 12 为不同土地利用类型平均风速与无廊道时的差值。可知，与无廊道相比，有通风廊道时，廊道区域风速增大明显，但

是下风方区域无明显变化。其中与主导风平行的通风廊道 1 和与主导风垂直的通风廊道 2 廊道内部的风速增大最高均可达 $1.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上；当设置两条通风廊道时，廊道 1 和廊道 2 内部的风速与单一廊道时增加幅度持平，下风方区域的风速也并未出现增加趋势，复合廊道的风速增加效应与单一廊道基本相同。



注：(a) case1-case0; (b) case2-case0; (c) case3-case0.

图 12 不同土地利用类型平均风速与无廊道时的差值

Fig. 12 Differences in average wind speed between individual cases

表 5 总结了 3 种通风廊道个例在廊道内部及下风方不同距离处气温、相对湿度和风速的日平均值和日最大值的最大变化量。可知，通风廊道对气温、相对湿度的影响随着下风方距离的增加而减小。与无廊道相比，廊道 1 内部气温、相对湿度和风速的平均值最大变化量分别为 -1.62°C 、 9.15% 和 $1.46 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ，最大值分别为 -3.55°C 、 16.79% 和 $5.64 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ；下风方 2 km 以内，廊道对降低气温和提高相对湿度仍有较为突出的影响，其中下风方 1 km 气温和相对湿度的平均值最大变化量分别为 -0.98°C 和 5.93% ，2 km 分别为 -0.46°C 和 3.12% ；但廊道对下风向的风速增大作用甚微，其中下风方 1 km 风速的平均值最大变化量仅为 $0.27 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ，2 km 廊道作用完全消失。廊道 2 对气温、相对湿度和风速的影响同廊道 1 类似，但由于廊道方向与主导风垂直，所以对下风方作用距离减小，其中下风方 1 km 气温、相对湿度和风速的平均值最大变化量分别为 -0.39°C 、 2.18% 和 $0.25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ，2 km 廊道作用基本消失。此外，对于 case3 的复合廊道，廊道 1 对气温、相对湿度和风速的影响同 case1 相比基本持平，廊道 2 对气温和相对湿度的影响同 case2 相比略有增加，但对风速增大作用减弱。

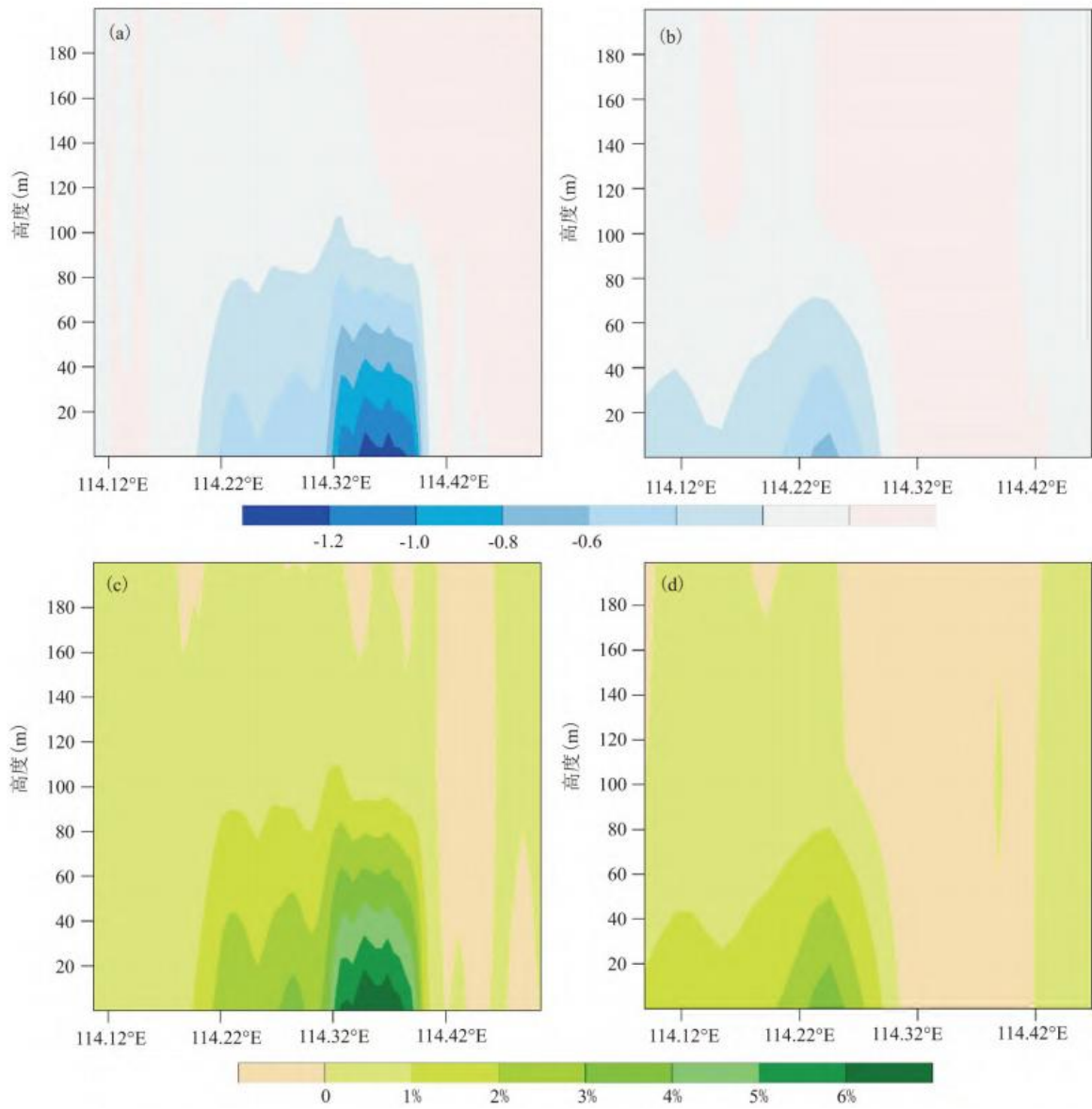
表 5 不同土地利用类型通风廊道内部及下风方不同距离处气温、相对湿度和风速与无廊道时的日平均值和日最大值的极端影响

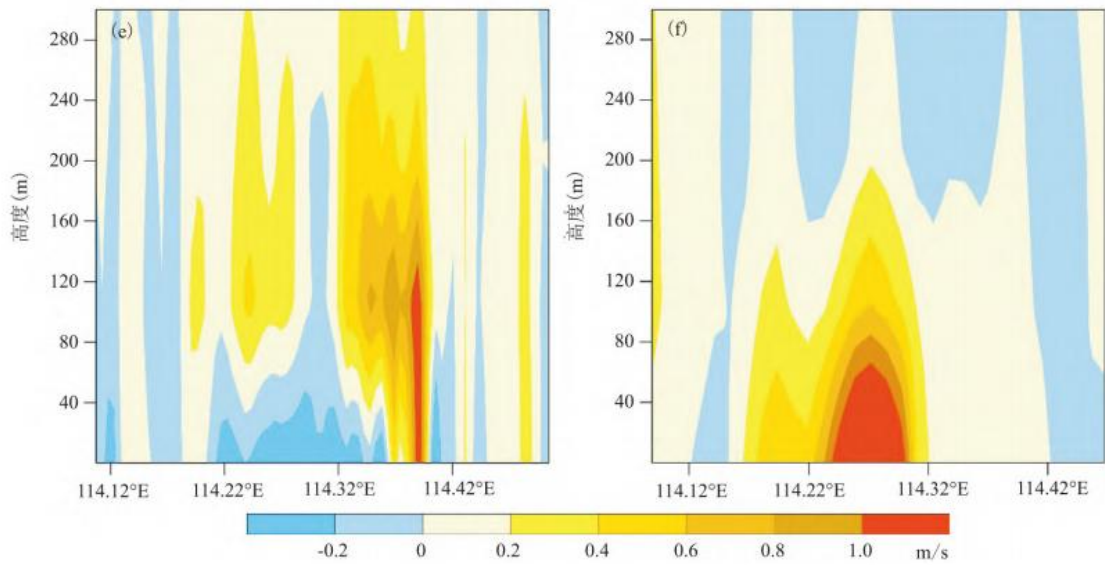
廊道下 风向距离	case1-case0/通风廊道 1			case2-case0/通风廊道 2		
	气温($^\circ\text{C}$)	相对湿度	风速($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	气温($^\circ\text{C}$)	相对湿度	风速($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
廊道内	-1.62 (-3.55)	9.15% (16.79%)	1.46 (5.64)	-0.98 (-2.11)	6.24% (8.93%)	1.39 (3.09)
1 km	-0.98 (-2.25)	5.93% (10.62%)	0.27 (0.45)	-0.39 (-0.96)	2.18% (3.05%)	0.25 (0.39)
	-0.46	3.12%	0.01	-0.02	0.05%	0.01

2 km	(-1.23)	(4.85%)	(0.01)	(-0.06)	(0.12%)	(0.01)
3 km	-0.05 (-0.32)	1.32% (2.46%)	0.01 (0.01)	-0.01 (-0.01)	0.01% (0.01%)	0.01 (0.01)
廊道下 风向距离	case3-case0					
	通风廊道 1			通风廊道 2		
	气温(°C)	相对湿度	风速(m·s ⁻¹)	气温(°C)	相对湿度	风速(m·s ⁻¹)
廊道内	-1.60 (-3.46)	8.95% (16.69%)	1.49 (4.71)	-1.39 (-3.32)	6.32% (10.93%)	1.29 (2.85)
1 km	-0.95 (-2.13)	5.86% (10.47%)	0.32 (0.51)	-0.73 (-2.02)	2.29% (4.15%)	0.22 (0.32)
2 km	-0.44 (-1.18)	2.93% (4.58%)	0.01 (0.01)	-0.05 (-0.05)	0.05% (0.13%)	0.01 (0.01)
3 km	-0.05 (-0.28)	1.22% (2.31%)	0.01 (0.01)	-0.01 (-0.01)	0.01% (0.01%)	0.01 (0.01)

注：无括号值为日平均值，括号内为日极值。

图 13 为不同土地利用类型气温、相对湿度和风速与无廊道时的差值的垂直分布，其中 case1 的通风廊道 1 沿 30.492° N 作东西剖面，case2 的通风廊道 2 沿 30.383° N 作东西剖面。可知，对于与主导风平行的廊道 1，其对气温和相对湿度影响的垂直高度在 100 m 以内，其中 60 m 以下，气温降低 0.6℃ 以上，相对湿度增加 3% 以上，且下风方的降温增湿效应较为明显。对于风速，廊道 1 导致风速增加 1 m·s⁻¹ 的高度大约为 120 m，在 250 m 高度以下，风速增加可达 0.4 m·s⁻¹ 以上，但廊道 1 对下风方并无增大风速作用。对于与主导风垂直的廊道 2，其对气温、相对湿度和风速的影响与廊道 1 基本相同，只是影响高度降低，作用强度减弱，其中风速增加 1 m·s⁻¹ 的高度大约为 60 m，在此高度气温降低 0.2℃~0.3℃，相对湿度增加 1%~2%。





注: (a) 气温(case1-case0); (b) 气温(case2-case0); (c) 相对湿度(case1-case0); (d) 相对湿度(case2-case0); (e) 风速(case1-case0); (f) 风速(case2-case0)

图 13 不同土地利用类型各气象要素与无廊道时的差值的垂直分布

Fig. 13 Vertical distributions of differences in various meteorological elements between individual cases

4 结论

本文通过分析武汉市东南部夏半年的背景风场和城市热岛, 构建了武汉市东南部的宏观通风廊道系统, 并利用 WRF 模式进行数值敏感性试验, 定量研究不同廊道建设对周边地区的温度场、湿度场和风场的影响, 得到以下结论:

(1) 近年来武汉市东南部中心城区平均风速缓慢减小, 热岛集中、相连成片; 郊区风速保持稳定波动, 仅建筑和裸土区域呈弱热岛。

(2) 武汉市东南部的平均风速以“软轻风”为主, 郊区至中心城区风速逐步减小, 主导风向为偏东风, 通过设计通风廊道, 利用主导风将城郊绿地和水体同中心热岛区串连, 引入冷源自然风, 导出城市热空气, 形成局地对流, 可缓解城市热岛效应。

(3) 武汉市东南部的通风廊道有降低气温、提高湿度和增加风速的作用。与无廊道相比, 与主导风平行的廊道可导致气温下降 1.4℃, 相对湿度提高 8%, 风速增加 1.4 m·s⁻¹; 与主导风垂直的廊道可导致气温下降 0.9℃, 相对湿度提高 5%, 风速增加 1.4 m·s⁻¹。复合廊道对气温、湿度和风速的影响程度与单一廊道基本相同。

(4) 武汉市东南部的通风廊道对下风方的气温和湿度的影响随着距离的增加而减弱, 但对风速影响甚微。与主导风平行的廊道下风方 1 km 气温降低 0.98℃, 相对湿度提高 5.93%; 与主导风向垂直的廊道下风方 1 km 气温降低 0.39℃, 相对湿度提高 2.18%。

(5) 武汉市东南部的通风廊道对气温、湿度和风速的影响随着高度的增加而减弱, 其对气温和相对湿度影响的垂直高度在 100 m 以内; 与主导风平行的廊道导致风速增加 1 m·s⁻¹ 的高度大约为 120 m, 与主导风垂直的廊道大约为 60 m。

参考文献

[1] 汪光焘, 王晓云, 苗世光, 等. 城市规划大气环境影响多尺度评估技术体系的研究与应用[J]. 中国科学(D 辑: 地球科

学), 2005, 35(Z1):145-155. WANG G S, WANG X Y, MIAO S G, et al. Research and application of multi-scale assessment technology system of atmospheric environmental impact in urban planning[J]. Science in China(Series D), 2005, 35(Z1):145-155.

[2] 冯娴慧. 城市的风环境效应与通风改善的的规划途径分析[J]. 风景园林, 2014, 5:97-102. FENG X H. The environment effect of urban wind and the planning approach to improve urban ventilation[J]. Landscape Architecture, 2014, 5:97-102.

[3] 窦晶晶, 王迎春, 苗世光, 等. 北京城区近地面比湿和风场时空分布特征[J]. 应用气象学报, 2014, 5:559-569. DOU J J, WANG Y C, MIAO S G, et al. Fine spatial and temporal characteristics of humidity and wind in Beijing urban area[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2014, 5:559-569.

[4] 白杨, 王晓云, 姜海梅, 等. 城市热岛效应研究进展[J]. 气象与环境学报, 2013, 2:101-106. BAI Y, WANG X Y, JIANG H H, et al. Progress of urban heat island effect[J]. Journal of Meteorology and Environment, 2013, 2:101-106.

[5] 查进林. 中国地区土地利用/覆盖变化影响近地面风速的分析[D]. 2015, 昆明: 云南大学. ZHA J L. Impact of land use/cover change on near-surface wind speed in China[D]. 2015, Kunming: Yunnan University.

[6] 史培军, 张钢峰, 孔峰, 等. 中国 1961-2012 年风速变化区划[J]. 气候变化研究进展, 2015, 11(6):387-394. SHI P J, ZHANG, G F, KONG F, et al. Wind speed change regionalization in China in 1961-2012[J]. Climate Change Research, 2015, 11(6):387-394.

[7] MASMOUDI S, MAZOUZ S. Relation of geometry, vegetation and thermal comfort around buildings in urban settings, the case of hot arid regions[J]. Energ Buildings, 2014, 36(7):710-719.

[8] 黄柏良. 城市通风及其影响城市热岛效应与空气质量研究[D]. 2011, 长沙: 中南大学. HUANG B L. Urban ventilation and its impact on urban heat island and air quality[D]. 2011, Changsha: Central South University.

[9] 郑拴宁, 苏晓丹, 王豪伟, 等. 城市环境中自然通风研究进展[J]. 环境科学与技术, 2012, 35(4):87-93. ZHENG S N, SU X D, WANG H W, et al. Review of natural ventilation in urban environment[J]. Environmental Science & Technology, 2012, 35(4):87-93.

[10] 朱飙, 李书严, 李春华, 等. 兰州市新区规划气候条件评估分析[J]. 高原气象, 2013, 32(2):2588-2596. ZHU B, LI S Y, LI C H, et al. Evaluation and analysis on climate condition for new district planning of Lanzhou city[J]. Plateau Meteorology, 2013 32(2):2588-2596.

[11] 房小怡, 杜吴鹏, 李磊, 等. 我国城市规划中气候信息应用回顾与展望[J]. 地球科学进展, 2015, 30(4):445-455. FANG X Y, DU W P, LI L, et al. The application of climate information in urban planning in China: retrospect and future prospect[J]. Advances in Earth Science, 2015, 30(4):445-455.

[12] 尹杰, 詹庆明. 武汉市城市通风廊道挖掘研究[J]. 现代城市研究, 2017, 10:58-63. YIN J, ZHAN Q M. The divided method of urban ventilation path: a case study in Wuhan[J]. Modern Urban Research, 2017, 10:58-63.

[13] 国家发展改革委, 住房城乡建设部. 城市适应气候变化行动方案

[Z/OL]. (2016-2-4) [2021-4-14]. www.cma.gov.cn/2011xwzx/2011xqxxw/2011xqxyw/201602/t20160217_304390.html National Development and Reform Commission, Ministry of Housing and Urban-Rural Development. Action programs of urban adaptation to climate change[Z/OL]. (2016-2-4) [2021-4-14]. www.cma.gov.cn/2011xwzx/2011xqxxw/2011xqxyw/201602/t20160217_304390.html

[14] BAUMUELLER J, HOFFMANN U, REUTER U. Climate Booklet for Urban Development—References for Urban Planning: Ministry of Economic Affairs Baden-Württemberg [M]. 2019.

[15] 刘姝宇, 沈济黄. 基于局地环流的城市通风道规划方法——以德国斯图加特市为例[J]. 浙江大学学报(工学版), 2010, 44(10):1985-1991. LIU S Y, SHEN J H. Urban ventilation channel planning method based on local circulation: A case study of Stuttgart, Germany[J]. Journal of Zhejiang University(Engineering Science), 2010, 44(10):1985-1991.

[16] 东京都港湾局: “海之森”风道规划研究[R]. 日本: 东京, 东京都港湾局. 2008-06-19. Tokyo Bay Bureau: Study on the Planning of “Kaizhimen” wind Channel[R]. Japan: Tokyo, Tokyo Bay Bureau. 2008-06-19.

[17] 任超, 吴恩融. 城市环境气候图——可持续城市规划辅助信息系统工具[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012, 37-49. REN C, WU E R. Urban climate map: A tool for sustainable urban planning auxiliary information system[M]. Beijing: China Building and Building Press, 2012, 37-49.

[18] NG E. Term Consultancy for Expert Evaluation and Advisory Services on Air Ventilation Assessment[R]. Hong Kong: The Chinese University of Hong Kong. 2010.

[19] 任超, 袁超, 何正军, 等. 城市通风廊道研究及其规划应用[J]. 城市规划学刊, 2014, 3:52-60. REN C, YUAN C, HE Z J, et al. A study of air path and its application in urban planning[J]. Urban Planning Forum, 2014, 3:52-60.

[20] 杜吴鹏, 房小怡, 刘勇洪, 等. 基于气象和GIS技术的北京中心城通风廊道构建初探[J]. 城市规划学刊, 2016, 5:79-85. DU W P, FANG X Y, LIU Y H, et al. Construction of ventilation corridors in the Beijing central urban area based on meteorology and GIS technology[J]. Urban Planning Forum, 2016, 5:79-85.

[21] 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. WANG Z Q, CHEN C, YANG Y H, et al. Research on urban ventilation channel planning strategy which based on multivariate data analysis: Take Beijing sub center as an example[J]. Urban Development Studies, 2018, 25(1):87-96.

[22] 俞布, 贺晓冬, 危良华, 等. 杭州城市多级通风廊道体系构建初探[J]. 气象科学, 2018, 38(5):625-636. YU B, HE X D, WEI L H, et al. Primary exploration for construction of urban multilevel ventilation corridors system in Hangzhou[J]. Journal of the Meteorological Sciences, 2018, 38(5):625-636.

[23] 党冰, 房小怡, 吕红亮, 等. 基于气象研究的城市通风廊道构建初探——以南京江北新区为例[J]. 气象, 2017, 43(9):1130-1137. DANG B, FANG X Y, LV H L, et al. Preliminary study on building urban ventilation corridors based on meteorological research: Taking Nanjing Jiangbei new region as the example[J]. Meteorological Monthly, 2017, 43(9):1130-1137.

-
- [24] 席宏正, 焦胜, 鲁利宇. 夏热冬冷地区城市自然通风廊道营造模式研究——以长沙为例[J]. 华中建筑, 2010, 28(6):106-107. XI H Z, JIAO S, LU L Y. Research on the mode of creating urban natural ventilation channel for the areas where it's hot in summer and cool in winter:Take Changsha as an example[J]. Huazhong Architecture, 2010, 28(6):106-107.
- [25] 薛立尧, 张沛, 田姗姗. 西安城市风道景区构建方法及实证设计研究[J]. 中国园林, 2017, 11:58-63. XUE L R, ZHANG P, TIAN S S. Research on Xi'an urban wind-passage scenic area's construction method with evidence-based design[J]. Chinese Landscape Architecture, 2017, 11:58-63.
- [26] 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, 2020, 22(6):1349-1357. SHEN X J, ZHAO R, HE R Z, et al. Research on urban wind environment simulation:A case study of Zhengzhou central area[J]. Journal of Geo-Information Science, 2022, 22(6):1349-1357.
- [27] 李军, 荣颖. 武汉市城市风道构建及其设计控制引导[J]. 规划师, 2014, 30(8):115-120. LI J, RONG, Y. Urban design control for wind corridor:Wuhan case[J]. Planners, 2014, 30(8):115-120.
- [28] 武汉大学, 香港大学, 武汉市国土资源和规划信息中心, 等. 武汉市城市风道规划管理研究[R]. 2013. Wuhan University, Hong Kong University, Wuhan Land Resources and Planning Information Center, et al. Study on Urban Air duct planning and management in Wuhan City[R]. 2013.
- [29] 宋挺, 段峥, 刘军志, 等. 基于 Landsat-8 数据和劈窗算法的地表温度反演及城市热岛效应研究[J]. 环境监测与预警, 2014, 6(5):4-14. SONG T, DUAN Z, LIU J Z, et al. Land surface temperature retrieval from Landsat-8 data using split-window algorithm and its application on the study of urban heat island effect[J]. Environmental Monitoring and Forewarning, 2014, 6(5):4-14.
- [30] 刘祎, 祝善友, 周洋, 等. 南京江北新区城市规划对区域热环境影响的 WRF 模拟研究[J]. 长江流域资源与环境, 2019, 28(2):281-292. LIU W, ZHU S Y, ZHOU Y, et al. Study on the effect of urban planning on urban thermal environment in the Jiangbei new area of Nanjing city based on WRF Model[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2019, 28(2):281-292.
- [31] PENG G, HAN L, MEINAN Z, et al. Stable classification with limited sample:transferring a 30-m resolution sample set collected in 2015 to mapping 10-m resolution global land cover in 2017[J]. Science Bulletin, 2019, 64(6):370-373.