

韩典辰, 闫衡, 张方敏, 等, 2023. 合肥市主城区地表通风潜力研究与应用[J]. 气象, 49(5): 600-610. Han D C, Yan H, Zhang F M, et al, 2023. Study and application of urban surface ventilation potential: a case of main urban area of Hefei[J]. Meteor Mon, 49(5): 600-610(in Chinese).

## 合肥市主城区地表通风潜力研究与应用\*

韩典辰<sup>1</sup> 闫衡<sup>1</sup> 张方敏<sup>1</sup> 邓汗青<sup>2,3</sup> 田红<sup>2</sup> 卢燕宇<sup>4</sup>

1 南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心/江苏省农业气象重点实验室, 南京 210044

2 安徽省气候中心, 合肥 230031

3 中国气象局上海城市气候变化应对重点开放实验室, 上海 200092

4 安徽省气象局气象科学研究所/大气科学与卫星遥感安徽省重点实验室, 合肥 230031

**提 要:** 以合肥市主城区为例, 采用气象观测数据、卫星遥感数据、地理信息等数据, 通过计算天空开阔度、地表粗糙度等城市生态参数, 对合肥市主城区通风潜力进行等级划分, 并对通风廊道建设提出建议。结果表明, 位于合肥市主城区的合肥经济技术开发区和双凤开发区热岛效应较严重, 中心区域天空开阔度较差, 大部分区域在 0.5 以下, 南淝河沿岸地表粗糙度较小, 但其两侧地表粗糙度较大。大部分区域地表通风潜力一般, 东南侧靠近巢湖区域和南淝河沿岸通风潜力较高, 建筑区域与西北侧区域通风潜力较差。结合合肥市主城区的风向玫瑰图、城市空间热环境分析, 构建了四纵两横的六条通风廊道。

**关键词:** 城市通风廊道, 城市热岛, 合肥市主城区, 地表通风潜力

**中图分类号:** TU14, TU119

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.7519/j.issn.1000-0526.2023.012902

## Study and Application of Urban Surface Ventilation Potential: A Case of Main Urban Area of Hefei

HAN Dianchen<sup>1</sup> YAN Heng<sup>1</sup> ZHANG Fangmin<sup>1</sup> DENG Hanqing<sup>2,3</sup> TIAN Hong<sup>2</sup> LU Yanyu<sup>4</sup>

1 Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters/Jiangsu Key Laboratory of Agriculture Meteorology, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

2 Anhui Climate Center, Hefei 230031

3 Key Laboratory of Cities' Mitigation and Adaption to Climate Change in Shanghai, CMA, Shanghai 200092

4 Anhui Institute of Meteorological Sciences/Anhui Province Key Laboratory of Atmospheric Sciences and Satellite Remote Sensing, Hefei 230031

**Abstract:** Taking the main urban area of Hefei as an example, this paper uses meteorological observation data, satellite remote sensing data, geographic information data and other data to classify the ventilation potential of the main urban area of Hefei by calculating urban ecological parameters such as sky openness and surface roughness, and then we give suggestions on the construction of ventilation corridors. The results show that the heat island effect is serious in Hefei Economic and Technological Development Zone and Shuangfeng Development Zone. The sky view factor in the central area is poor with most areas below 0.5, and the surface roughness along the South Feihe River is lower, but the surface roughness on both sides is higher. The surface ventilation potential is moderate in most area of the region, except the higher ventilation potential in the southeast area near Chaohu Lake and the coast of the South Feihe River. The ventilation

\* 上海城市气候变化应对重点开放实验室开放基金(QHBHSYS201901)和安徽省公益性研究联动计划项目(1604f0804002)共同资助

2022 年 7 月 24 日收稿; 2023 年 3 月 22 日收修定稿

第一作者: 韩典辰, 主要从事生态气象研究. E-mail: 20191208013@nuist.edu.cn

通讯作者: 张方敏, 主要从事生态气象研究. E-mail: fmin.zhang@nuist.edu.cn

potential in the building area and the northwest area of this region is poor. Based on the wind direction rose diagram and the analysis of urban space thermal environment, we construct six ventilation corridors with four longitudinal and two horizontal lines preliminarily constructed.

**Key words:** urban ventilation corridor, urban heat island, main urban area of Hefei, surface ventilation potential

## 引言

2017年中国城区总面积为19.84万 $\text{km}^2$ ,城镇化水平达58.52%(国家统计局,2018)。目前,中国大量城市都处在不同程度的急剧扩张期,城市的空间环境、结构机理都发生了显著变化(房小怡等,2021)。城市生态环境受到较严重干扰,给城市发展建设带来了诸多问题(王建国,2009;刘学峰等,2009)。例如,城市下垫面粗糙度越大时,对城市风的流通性影响越大,导致城市内部风速大大降低,污染物扩散变得更加困难(Ren et al, 2018; 邹立尧等, 2010; 敖雪等, 2020; 刘敬乐等, 2020)。张爱英等(2009)研究表明,中国年平均风速线性变率为 $-0.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,风速减小与城市化进程加快和台站周围环境变化有着密切的关系。1962—2012年南京地区的雾-霾日多出现在近地面风速较小、湿度较大的气象条件下(程婷等, 2014)。2007—2013年江苏省24个地面观测站点的分析表明,当风速小于 $3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,雾-霾出现频率较高,其中风速在 $1 \sim 2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时雾-霾发生概率最高(曹剑秋和郭品文, 2016)。

城市建设发展所具有的特殊地表结构不仅干扰污染物扩散,还对城市热环境产生了极大的影响(成丹等, 2022; 柯宗贤等, 2023)。研究表明,高度集中的人为热排放导致城市热岛效应加剧,改变了城市地区的微气候,影响城市居住的舒适度(党冰等, 2017)。北京城区风速大于 $3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,热岛效应基本消失(王喜全等, 2006)。2008—2013年湖南省长沙市的风速与城市热岛强度呈负相关,在顺风方向热岛强度随风速增大而减弱(贺广兴等, 2016)。江苏省苏州市城郊的城市热岛除与云量、气温有关外,还与城区风向有关(戎春波等, 2009)。吉林省长春市辖区在垂直方向建筑物较高、水平方向建筑物密度较大的地区,迎风面积指数较大,气流流通受到较大阻碍,地表温度显著升高(冯章献等, 2019)。

城市通风廊道是提高城市通透性、改善城市微气候、减缓城市污染与热岛效应的有效途径之一(刘勇洪等, 2017; 王梓茜等, 2018; 邢佩等, 2019),为此

迫切需要根据城市热环境以及风环境特征合理规划通风廊道。QX/T437—2018(中国气象局, 2018)明确指出,城市通风廊道是指由空气动力学粗糙度较低的、气流阻力较小的城市开敞空间组成的空气引导通道,并给出确定通道的具体实施方法。根据通风廊道确定标准,本文基于气象观测、遥感和地理信息系统,以合肥市主城区为例,结合城市风环境分析、城市热环境分析和通风潜力评价,开展合肥市城市通风廊道规划的研究,并以此为基础对合肥市主城区的通风廊道进行初步构建,为城市环境规划提供借鉴。

## 1 研究区域与数据

### 1.1 研究区域

合肥市主城区位于城市中部(图1),城镇用地约占主城区面积的28.31%,共19个区(镇)单位。主城区东南侧邻近巢湖,中部庐阳区有董铺、大房郢两大水库;南淝河呈东南—西北走向经过庐阳区、蜀山区、瑶海区、包河区最终汇入巢湖;主城区西南和

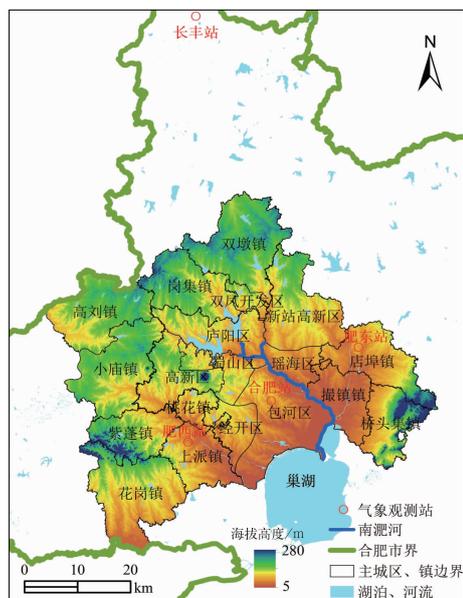


图1 研究区分布图

Fig. 1 Distribution map of the study area

西部偏远地区为大别山余脉,南部属于皖南山区。整个主城区地势由西北向东南降低。

## 1.2 研究数据

本研究使用的数据包括合肥市主城区的卫星遥感数据、气象观测资料、高分辨率的地理信息数据,其中气象数据来自合肥市主城区的肥西、合肥、肥东,以及主城区北部长丰气象观测站逐小时观测资料,观测要素包括风速、风向等,观测时间范围为 2013 年 1 月 1 日至 2017 年 12 月 31 日。数据经过严格的质量控制,剔除数据异常值,对于缺失数据采

用线性内插法进行补充。地理信息数据与卫星遥感数据来源于地理空间数据云平台(<http://www.gscloud.cn/>),包括 2010 年合肥市主城区的建筑物高度数据、30 m 分辨率的数字高程模型数据和 5 m 分辨率的土地利用类型数据,卫星遥感数据包括 2016—2019 年的 Landsat8 卫星遥感数据,其中 2019 年 4—11 月卫星过境期间拍摄遥感图像云量偏多(均大于 20%),反演误差较大,经对比后发现 2019 年 3 月 12 日卫星过境拍摄图像质量清晰,图像信息反演计算后仍可表明合肥市主城区热岛变化,故选取此时间进行遥感图像分析,数据信息如表 1。

表 1 遥感影像基本参数

Table 1 The basic parameters of the remote sensing image

卫星型号	成像日期/年-月-日	云量/%	条带号/行编号	地图投影	时间分辨率/d
Landsat8	2016-7-25	0.64			
Landsat8	2017-9-14	1.38	121/38	UTM-WGS84	16
Landsat8	2018-7-31	0.18			
Landsat8	2019-3-12	0.04			

## 2 研究方法

城市通风潜力评估主要根据城市建筑物的分布情况,计算城市表面的粗糙程度和城市天空遮蔽程度。城市表面粗糙程度可由空气动力粗糙度长度确定,天空遮蔽程度可由天空开阔度确定(杜吴鹏等,2016)。本文通过 Landsat8 卫星遥感数据反演城市地面温度,分析城市中提供新鲜冷空气的补偿空间和热污染严重的作用空间,结合城市的风向风频数据绘制城市风玫瑰图,分析研究区域的主导风向,利用城市生态环境评估指标天空开阔度和地表粗糙度对合肥市主城区的地表通风潜力进行评估。将城市热力分布、地表通风潜力分布、城市内部空气引导通道和城市周边通风廊道规划相结合,给出合肥市通风廊道的初步规划方案。

### 2.1 城市风玫瑰图

利用合肥市主城区 2013 年 1 月 1 日至 2017 年 12 月 31 日长丰站、肥东站、合肥站和肥西站风速风向逐小时观测资料绘制合肥市主城区的年平均风向玫瑰图,通过分析得出合肥市近 5 年的风向风速分布特征和主导风向。

## 2.2 城市热环境

### 2.2.1 热岛强度

城市通风廊道的重要作用之一是通过空气流通带走城市地区的热量,达到热量的再分配,缓解城市热岛(任超等,2014)。本文利用 Landsat 8 卫星遥感数据,使用劈裂窗式算法反演合肥市主城区 2016—2019 年的热岛强度(Rozenstein et al,2014),根据热岛强度分级标准进行等级划分(杜吴鹏等,2018)(表 2),得到合肥市主城区连续四年的城市热岛强度空间变化图。

表 2 热岛强度等级划分

Table 2 Classification of the heat island intensity

热岛强度等级	热岛强度含义	日热岛强度( $I$ )/ $^{\circ}\text{C}$
1 级	强冷岛	$I \leq -7.0$
2 级	较强冷岛	$-7.0 < I \leq -5.0$
3 级	弱冷岛	$-5.0 < I \leq -3.0$
4 级	无热岛	$-3.0 < I \leq 3.0$
5 级	弱热岛	$3.0 < I \leq 5.0$
6 级	较强热岛	$5.0 < I \leq 7.0$
7 级	强热岛	$I > 7.0$

### 2.2.2 城市绿源

城市绿源指城市或郊区中能够改善城市气象环境的且具有一定面积的水体、绿地和农田等,是城市中新鲜冷空气的源地,对缓解城市热岛效应有重要

作用。绿量依据植物叶片面积,是反映绿地覆盖率和生态效应的重要指标。本文结合 Landsat8 数据和土地利用类型数据,首先根据遥感图像中近红外和红光波段数据计算归一化植被指数(NDVI),然后利用式(1)估算城市地区的绿量(S)(郇苏闯等,2012)。参考姚学祥等(2015)和中国气象局(2018)绿源划分标准对研究区域绿源等级进行划分(表3),得到2019年合肥市主城区绿源分布。

$$S = \frac{1}{(1/30000 + 0.0002 \times 0.03^{NDVI})} \quad (1)$$

表 3 绿源等级划分标准

Table 3 Classification of the green source

绿源等级	绿源含义	土地利用类型	绿量(S)/m <sup>2</sup>
1级	强绿源	水体	S ≥ 3600
2级	较强绿源	林地或绿地	S ≥ 20000
3级	一般绿源	林地或绿地	16000 ≤ S < 20000
4级	弱绿源	农田	S ≥ 12000

### 2.3 天空开阔度估算

天空开阔度(sky view factor, SVF)常用来评估复杂城市内部建筑物对天空的遮蔽程度(Chatzipoulka et al, 2018; 贺文慧等, 2012),已成为城市形态学重要指标之一。根据天空开阔度模型(Zakšek et al, 2011),在所规定半径(R)内,以α为方位角步长,在不同方位角上寻找该方位角内最大地形高度角(γ),计算出天空可视立体角,并作归一化处理,即可得SVF,其值在0~1,值越大表明该区域建筑对天空遮蔽度越低,风流通性越良好。

已有研究表明,当R=200 m, α=5°时,既能够保证计算精度,又能够提高计算速度(张海龙等, 2015),因此基于2010年合肥市城区10 m空间分辨率数字高程模型(DEM)数据与建筑物高度数据,采用上述参数计算得到10 m空间分辨率合肥市主城区天空开阔度分布。

### 2.4 地表粗糙度估算

随着城市建筑密度增加,城市粗糙程度对城市内部空气的流动的阻碍愈发明显。影响城市地表粗糙度的因子有很多,其中最主要的因子为建筑物高度和覆盖度(张强和吕世华, 2003)。根据形态学模型(Grimmond et al, 1998),城市地表粗糙度(surface roughness, SR)计算公式如下:

$$Z_0 = Z_h(1.0 - \frac{Z_d}{Z_h})\exp(-0.4 \frac{U_h}{u_*} + 0.193) \quad (2)$$

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

$$\frac{u_*}{U_h} = \min[(0.003 + 0.3\lambda_f)^{0.5}, 0.3] \quad (4)$$

式中:Z<sub>0</sub>为粗糙度长度(单位:m),Z<sub>h</sub>为建筑物高度(单位:m),Z<sub>d</sub>为零平面位移高度(单位:m);U<sub>h</sub>为建筑物高度处的风速(单位:m·s<sup>-1</sup>),u<sub>\*</sub>为摩阻速度(或剪切速度,单位:m·s<sup>-1</sup>);λ<sub>f</sub>为建筑物迎风面积密度,即某一高度的迎风面积指数(frontal area index, FAI)(Wicht et al, 2017; 沈娟君等, 2017),值越大,表明该区域建筑对流动风的阻碍作用越大,即该区域通风性能越差,反之,值越小表明该区域通风性能越好。

某风向的迎风面积密度λ<sub>f(z,θ)</sub>可以根据式(5)进行计算:

$$\lambda_{f(z,\theta)} = \frac{A(\theta)_{\text{proj}(\Delta z)}}{A_T \Delta z} \quad (5)$$

式中:A(θ)<sub>proj(Δz)</sub>是某高度增距Δz上正交于风向的投影面上的建筑表面面积(单位:m<sup>2</sup>),θ是风向角,A<sub>T</sub>是网格面积(单位:m<sup>2</sup>)。结合研究区域的风速和风向特点,利用气象观测数据得到研究区风玫瑰图,计算出多个方向的迎风面积密度,并按照风频P<sub>θ,i</sub>进行加权平均,最后得到研究区的迎风面积密度:

$$\lambda_{f(z)} = \sum_{i=1}^n \lambda_{f(z,\theta)} P_{\theta,i} \quad (6)$$

式中n为风向角的个数。

本文利用2010年合肥市城区10 m空间分辨率的DEM数据、建筑物高度数据和2013—2017年多年平均风速数据计算而得的合肥市10 m空间分辨率迎风面积密度分布,根据该数据计算得出10 m空间分辨率的地表粗糙度分布。

### 2.5 通风潜力等级划分

城市天空开阔度和地表粗糙度直接影响城市的通风潜力。目前,根据天空开阔度和地表粗糙度对地表通风潜力的划分尚无统一标准,所以在不同地区进行通风潜力评估的时候,可以适当地调整划分标准。本研究参考王梓茜等(2018)提出的标准进行划分(表4)。

表 4 地表通风潜力等级划分

通风潜力类型	1 级	2 级	3 级	4 级	5 级
粗糙度长度/m	>2	1~2	1~2	≤1	≤1
天空开阔度(SVF)	—	<0.65	≥0.65	<0.65	≥0.65
含义	无或很低	一般	较高	高	很高

利用 2.3 和 2.4 小节介绍公式计算得到天空开阔度和地表粗糙度数据,根据表 4 的分类方式对通风潜力类型进行等级划分,得出合肥市主城区的地表通风潜力分布。

### 3 结果分析

#### 3.1 合肥市主城区风力特征

风速在  $3.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  以下的软轻风为城市通风廊道重点利用的风段。根据长丰站、肥西站、合肥站

和肥东站风向风速玫瑰图(图 2),合肥市主城区合肥站和肥西站主要受到偏东风控制,风速最高能达到  $5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  以上,正东方向软轻风出现频率最高;长丰站地处主城区北部,主要受到东偏南气流控制,而肥东站则受到主城区东北侧气流控制,两站风速小于  $3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  的软轻风频率可达 9% 以上。王薇等(2018)、黄闯等(2020)研究表明,合肥市主城区主要受到正东方向气流控制,夏季盛行东南风,冬季盛行东北风,均与本研究结果相符。综合来看,由于合肥市主城区西侧为海拔较高的大别山余脉,南侧为皖南山区,均对气流有较大的阻碍作用,西风 and 西南风

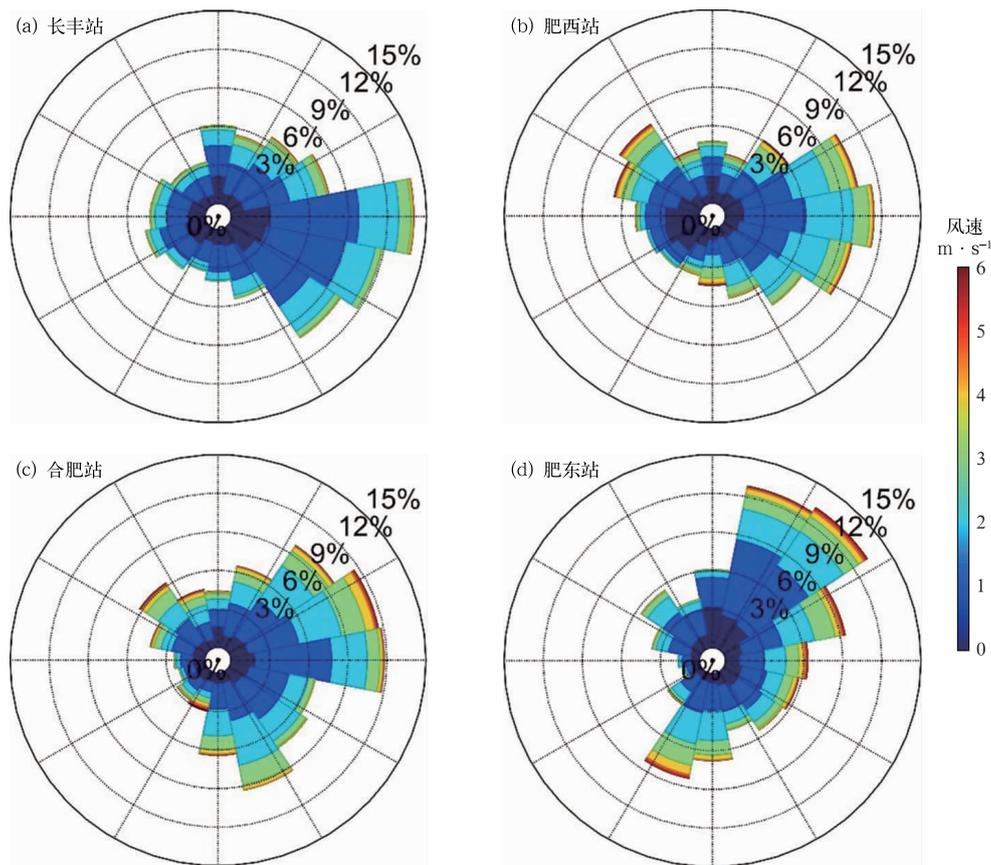


图 2 2013—2017 年合肥市主城区观测站均风玫瑰图

Fig. 2 Rose chart of average wind in four sites in the main urban area of Hefei from 2013 to 2017

出现的频率相对较低,且平均风速大都在  $3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  以下。主城区东部和北部地势较为平坦开阔,气流多从主城区东偏北方向经过主城区。

### 3.2 城市热环境

通过 2016—2019 年的 Landsat8 卫星遥感数据反演得到合肥市主城区的热岛强度空间变化(图 3 和表 5),对比各个年份的热岛强度变化可以发现:合肥市主城区的热岛区域大多集中在建筑密集、人口集中的城市区域,以片状区域的形式出现;合肥经济技术开发区(简称经开区)与上派镇热岛强度最大,且热岛区域面积随着城市的扩张而增加,呈辐散状向东北和西北方向蔓延。对比 4 年热岛强度分布变化,非热岛区面积占比缩减 19.6%,而热岛区面积占比扩大 16.8%,强热岛区面积占比扩大 2.8%。主城区强热岛区域逐渐由单边向多边化发展,至 2019 年,以双凤开发区为中心区域已成为第二个热

岛效应密集区。城市冷岛区域主要集中在主城区的水体、郊区等区域,至 2018 年,主城区冷岛区域面积显著减小。2019 年,尽管在主城区西南侧出现冷岛区,但主城区热岛在东部、北部和西北部面积显著扩张,可以判断出 2019 年热岛效应进一步加重。

由 2017 年和 2019 年的 Landsat8 卫星遥感数据计算得到合肥市主城区的绿源分布(图 4)。2017 年主城区绿源分布较广,河流贯穿建筑密集区形成强绿源。主城区西南部紫蓬镇分布有紫蓬山森林公园,植被覆盖度较高,东北部新站高新区有张桥水库与鹤翔湖,净化空气能力较强,为强绿源。主城区四周郊区建筑分布较少,以较强绿源和一般绿源为主。至 2019 年,合肥市主城区绿源数量急剧减少,在建筑物分布密集区域绿源分布几乎消失,少数强绿源多数集中在庐阳区董铺水库和大房郢水库,建筑密集区周边绿源退化较严重,由较强绿源和一般绿源退化为弱绿源,净化空气能力减弱。

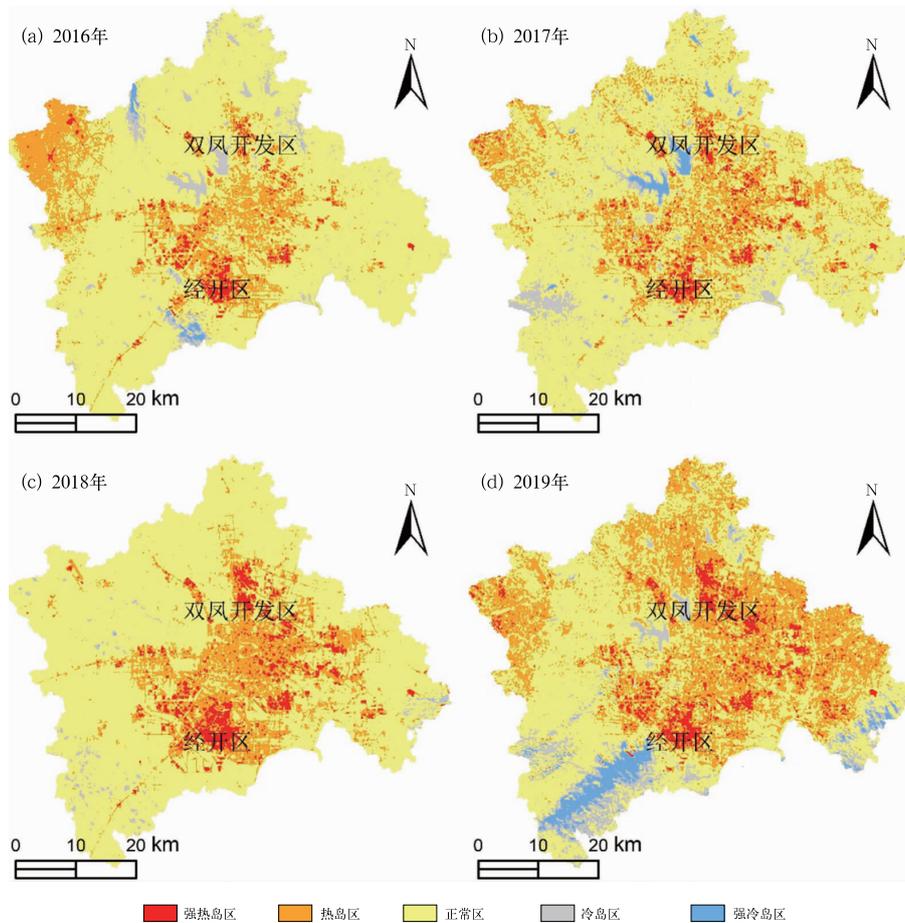


图 3 2016—2019 年合肥市主城区热岛强度变化

Fig. 3 Variations of the heat island intensity in the main urban area of Hefei from 2016 to 2019

表 5 2016—2019 年合肥市主城区热岛强度变化(单位:%)

Table 5 Variation statistics of the heat island intensity in the main urban area of Hefei from 2016 to 2019 (unit: %)

年份	热岛面积百分比			
	强热岛区	热岛区	热岛区总计	非热岛区
2016	2.2	17.7	19.9	80.1
2017	2.9	20.8	23.7	76.3
2018	4.6	18.6	23.2	76.8
2019	5.0	34.5	39.5	60.5

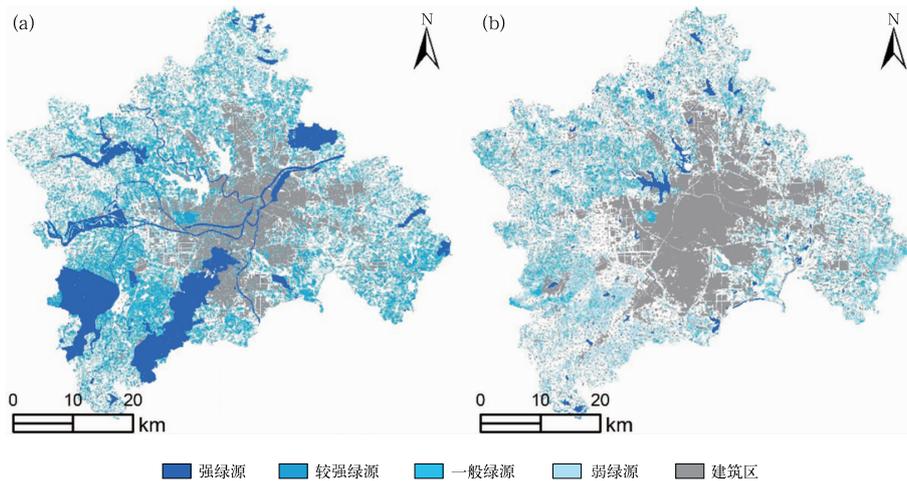


图 4 (a)2017 年和(b)2019 年合肥市主城区绿源分布

Fig. 4 Distributions of the green source in the main urban area of Hefei in (a) 2017 and (b) 2019

城市内部次级通风廊道的作用主要是将城市内的补偿空间和作用空间连接起来,形成较为通畅的城市内空气循环系统。合肥热环境分析表明,其作用空间主要为经开区和双凤开发区,补偿空间为董铺水库和大房郢水库。主城区东南侧为巢湖,也可以作为补偿空间,依此构建连接补偿空间和作用空间的次级通风廊道。

### 3.3 天空开阔度

计算合肥市主城区 10 m 网格分辨率的建筑物密度、建筑物高度和天空开阔度分布(图 5),发现合肥市主城区中心区域的建筑物密度大多在 0.2 以上,经开区、上派镇和高新区部分区域达到 0.6 以上,建筑分布密度较高。合肥市主城区中心建筑高

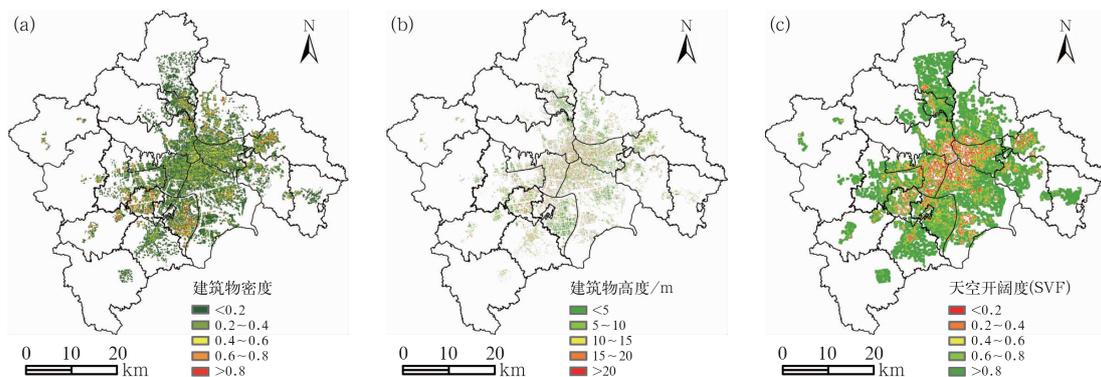


图 5 2010 年合肥市主城区(a)建筑物密度,(b)建筑物高度和(c)天空开阔度分布

Fig. 5 Distributions of (a) building density and (b) building height and (c) sky view factor in the main urban area of Hefei in 2010

度普遍较高,基本在 10 m 以上,经开区南部建筑密集区高度较低,小于 5 m,高新区西南部建筑密集区高度较高,部分区域大于 20 m。合肥市主城区天空开阔度(SVF)从中心向四周呈辐射状向外发散增大,主城区中心值 SVF 较低,小于 0.6,建筑物高大密集的区域 SVF $\leq$ 0.3。总体对比来看,SVF 分布与建筑物密度和高度相似,但 SVF 较差区域(SVF $\leq$ 0.3)与建筑物高度较高区域更加吻合,当建筑物高度小于 5 m 时,对 SVF 影响较小。

### 3.4 地表粗糙度

图 6 是合肥市主城区的 10 m 网格分辨率的迎风面积指数(FAI)分布。FAI 主要反映建筑物对风的阻挡作用,FAI 越大建筑物对风阻碍作用越大。在新站高新区与双墩镇北部建筑物较少,FAI 较小(FAI $\leq$ 0.2);在双凤开发区和南淝河西侧的主城区中心,FAI 较大(FAI $\geq$ 0.4);在经开区南部、高新区西侧区域建筑物较密集,高度较高,FAI 偏大,部分区域可达 0.6 以上;主城区东南部包河区建筑密度较低,FAI 较低。

图 7 为合肥市主城区的 10 m 网格分辨率的地表粗糙度(SR)分布。主城区 SR 整体呈现从东南向西北递增的趋势,瑶海区和包河区 SR 较小,新站高新区和蜀山区 SR 较大。在新站高新区中心沿着南淝河有一条西北—东南向的 SR 低值区(SR $\leq$ 1.5 m),其两侧均为高值区(SR $\geq$ 1.5 m);瑶海区和包河区整体建筑物密度和高度较低,SR 较小(SR $\leq$ 1.5 m),对风的穿越和流通阻碍较小;蜀山区大部分

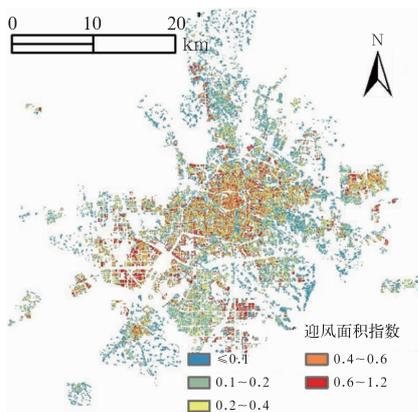


图 6 2013—2017 年合肥市主城区迎风面积指数多年平均分布  
Fig. 6 Averaged distribution of the frontal area index in the main urban area of Hefei from 2013 to 2017

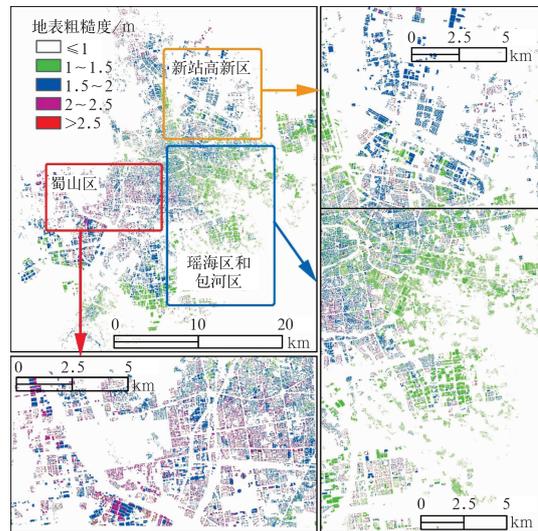


图 7 2013—2017 年合肥市主城区地表粗糙度平均分布  
Fig. 7 Averaged distribution of surface roughness in the main urban area of Hefei from 2013 to 2017

区域 SR 较大(SR $\geq$ 2 m),对风的穿越和流通形成较大的阻碍。

### 3.5 通风潜力等级

综合主城区天空开阔度与地表粗糙度分布,制作主城区 10 m 网格分辨率地表通风潜力分布(图 8a)。整体来看,主城区通风潜力分布差异较大,通风潜力较高的地区占 10%,多分布于主城区东南侧;通风潜力为无或很差的地区占 23%,多分布于主城区西侧。主城区东南侧建筑密度与高度较低,粗糙度较小,通风潜力较高,且距离主城区热岛强度较高区域较近,适宜作为通风廊道起点;主城区中部受到建筑密度影响,通风潜力一般;在主城区西侧和西北侧由于地形的阻挡,西风和西北风较少,通风潜力为较低,不适宜作为通风廊道起点。

通风廊道起点应设置在通风潜力较大区域,通过街道干线、河流或建筑物低矮稀疏区贯穿主城区并将区域绿源相串联,廊道走向与风向基本相符,起到降低城市热岛作用。结合合肥市主城区主导风向分析、城市绿源分布和地表通风潜力评价,制作合肥市主城区的通风廊道规划图(图 8b)。整体为四纵两横的通风廊道布局,连通城市绿源与通风潜力较高的地区。1 号和 2 号通风廊道横贯整个主城区,为主城区输送东北气流;3 号、5 号和 6 号通风廊道皆在

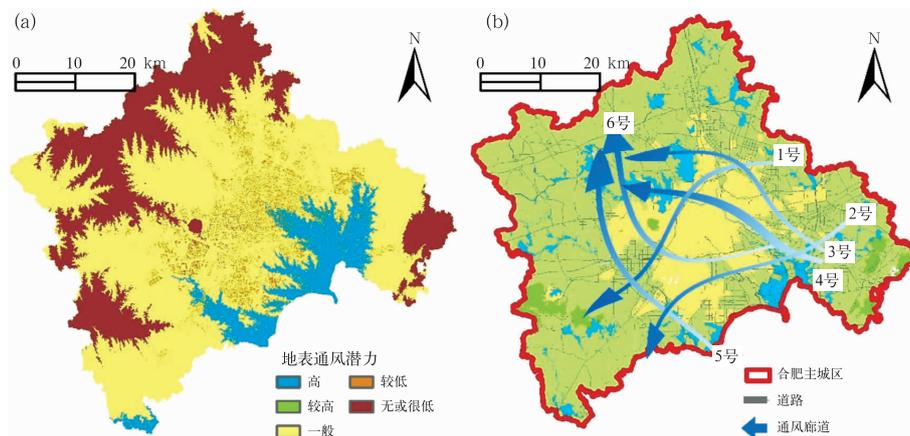


图 8 合肥市主城区(a)通风潜力分布和(b)通风廊道规划

Fig. 8 Distribution of (a) ventilation potential and (b) ventilation corridor in the main urban area of Hefei

通风潜力较高区域开始,通过地表粗糙度较低路线,将东南侧绿源产生的新鲜空气贯穿主城区,有利于缓解经开区和双凤开发区强热岛区;4号通风廊道通过南淝河河道,将主城区东南侧与西北侧绿源相连接,有利于缓解主城区中心的城市热岛效应。其中多条廊道有相互交叉的地点,应进行重点管控,防止存在高大建筑,对风的流通形成阻碍。

#### 4 结论与讨论

城市通风廊道规划基于城市已有建设规划的基础上,利用气象观测数据、卫星遥感数据和城市地理信息数据,通过计算城市生态参数,对城市的风环境、热环境进行科学的分析和评估,提出城市通风廊道建设的可行方案,以缓解当前城市日益严重的环境污染、城市热岛等问题。本文通过计算天空开阔度、地表粗糙度得到合肥市主城区地表通风潜力的分布,结合风向玫瑰图、热岛强度分布对合肥市主城区的通风潜力进行评估,提出合肥市主城区通风廊道的初步规划。结论如下:

(1)2016—2019年合肥市主城区城市热岛强度分析表明,经开区和双凤开发区城市热岛现象较严重。热岛区域面积多年呈增大趋势,且强热岛区域逐渐向东西方向不断扩张。

(2)对合肥市主城区的通风潜力进行评估表明,合肥市主城区全年以偏东风为主,东南侧和南淝河沿岸通风潜力较高,西侧和西南侧区域由于大别山余脉对气流的阻挡,通风潜力较低。在建筑物密集的合肥市主城区中心,通风潜力较低。

(3)综合城市生态参数,以缓解城市热岛为主要目的,构建出四纵两横的城市通风廊道,连通了城市绿源区域和通风潜力较高区域,同时打通了热岛效应严重的经开区和双凤开发区,以及通风能力较弱的城市中心区域,符合合肥市主城区常年主导风向的需求。

在评估地表通风潜力时,每个地区由于发展状况和地理位置的不同,通风潜力的划分标准也不尽相同,目前很难有统一标准。我国南北跨度较大,不同城市间气候背景、发展规划差异较大,构建城市通风廊道,缓解城市热岛的方法和方案应该根据地区、气候和城市发展状况和需求的不同进行调整,同时需要配合实地调查建立合理完善的评价体系,进行科学合理的规划。

#### 参考文献

- 敖雪,翟晴飞,崔妍,等,2020. 城市化对辽宁省近地面风速的影响分析[J]. 气象,46(9):1153-1164. Ao X, Zhai Q F, Cui Y, et al, 2020. Analysis of urbanization effect on near-surface wind speed change in Liaoning Province[J]. Meteor Mon, 46(9):1153-1164 (in Chinese).
- 曹剑秋,郭品文,2016. 江苏省雾霾天气特征分析[J]. 气象科学,36(4):483-493. Cao J Q, Guo P W, 2016. Characteristics analysis on fog and haze weather in Jiangsu Province[J]. J Meteor Sci, 36(4):483-493(in Chinese).
- 成丹,许杨,刘静,等,2022. 武汉市东南部通风廊道构建和气象效应研究[J]. 长江流域资源与环境,31(11):2500-2513. Cheng D, Xu Y, Liu J, et al, 2022. A study of constructing of the Wuhan ventilation corridors and simulating their meteorological effects [J]. Resour Environ Yangtze Basin, 31(11):2500-2513(in Chinese).

- 程婷,魏晓奔,翟伶俐,等,2014.近50年南京雾霾的气候特征及影响因素分析[J].环境科学与技术,37(6):54-61. Cheng T, Wei X Y, Zhai L L, et al, 2014. An analysis of climatic characteristics and influence factors of fog and haze in Nanjing in recent 50 years[J]. Environ Sci Technol, 37(6): 54-61 (in Chinese).
- 党冰,房小怡,吕红亮,等,2017.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,43(9):1130-1137. Dang B, Fang X Y, Lü H L, et al, 2017. Preliminary study on building urban ventilation corridors based on meteorological research—taking Nanjing Jiangbei New Region as the example [J]. Meteor Mon, 43(9): 1130-1137 (in Chinese).
- 邸苏闯,吴文勇,刘洪禄,等,2012.城市绿量的遥感估算与热岛效应的相关分析——以北京市五环区域为例[J].地球信息科学学报,14(4):481-489. Di S C, Wu W Y, Liu H L, et al, 2012. The correlation between urban greenness and heat island effect with RS technology: a case study within 5th ring road in Beijing [J]. J Geo-Inf Sci, 14(4): 481-489 (in Chinese).
- 杜吴鹏,房小怡,刘勇洪,2018.面向适应的精细化城市通风廊道规划气象评估技术[M].北京:北京市气候中心. Du W P, Fang X Y, Liu Y H, 2018. Meteorological Evaluation Technology of Fine Urban Ventilation Corridor Planning for Adaptation [M]. Beijing: Beijing Climate Center (in Chinese).
- 杜吴鹏,房小怡,刘勇洪,等,2016.基于气象和GIS技术的北京中心城区通风廊道构建初探[J].城市规划学刊, (5): 79-85. Du W P, Fang X Y, Liu Y H, et al, 2016. Construction of ventilation corridors in the Beijing central urban area based on meteorology and GIS technology [J]. Urban Plan Forum, (5): 79-85 (in Chinese).
- 房小怡,李磊,刘宛,等,2021.我国城市通风廊道研究与实践进展[J].生态学杂志,40(12):4088-4098. Fang X Y, Li L, Liu W, et al, 2021. Progress of researches and practices of urban ventilation corridors in China [J]. Chin J Ecol, 40(12): 4088-4098 (in Chinese).
- 冯章献,王士君,金珊合,等,2019.长春市城市形态及风环境对地表温度的影响[J].地理学报,74(5):902-911. Feng Z X, Wang S J, Jin S H, et al, 2019. Effects of urban morphology and wind conditions on land surface temperature in Changchun [J]. Acta Geogr Sin, 74(5): 902-911 (in Chinese).
- 国家统计局,2018.中国统计年鉴[M].北京:中国统计出版社:4-5. Nation Bureau of Statistics, 2018. China Statistical Yearbook [M]. Beijing: China Statistics Press: 4-5 (in Chinese).
- 贺广兴,王先华,孙杰,2016.风速及风向对城市热岛强度的影响研究[J].环境工程,34(7):145-148. He G X, Wang X H, Sun J, 2016. The influence of wind speed and direction on urban heat island [J]. Environ Eng, 34(7): 145-148 (in Chinese).
- 贺文慧,杨昕,汤国安,等,2012.基于数字高程模型的城市地表开阔度研究——以南京老城区为例[J].地球信息科学学报,14(1):94-100. He W H, Yang X, Tang G A, et al, 2012. Research on sky view factor in urban area based on urban digital elevation model: a case study of Nanjing old city [J]. J Geo-Inf Sci, 14(1): 94-100 (in Chinese).
- 黄闯,魏宗财,曹靖,等,2020.城市通风廊道系统构建及管控探索——以合肥市为例[J].上海城市规划, (4): 120-125. Huang C, Wei Z C, Cao J, et al, 2020. Construction and regulation of urban ventilation corridor system: a case study of Hefei [J]. Shanghai Urban Plan Rev, (4): 120-125 (in Chinese).
- 柯宗贤,王东海,曾智琳,等,2023.粤港澳大湾区下垫面对“5·22”极端强降雨过程影响的研究[J].气象,49(1):12-26. Ke Z X, Wang D H, Zeng Z L, et al, 2023. Underlying surface effect on the extreme heavy rainfall event on 22 May 2020 in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area [J]. Meteor Mon, 49(1): 12-26 (in Chinese).
- 刘敬乐,姚青,蔡子颖,等,2020.基于天津255 m气象塔对近年天津近地面风和气温变化特征的研究[J].气象,46(9):1235-1244. Liu J L, Yao Q, Cai Z Y, et al, 2020. Analysis of temperature and wind variation characteristics based on the 255 m meteorological tower in Tianjin [J]. Meteor Mon, 46(9): 1235-1244 (in Chinese).
- 刘学锋,任国玉,梁秀慧,等,2009.河北地区边界层内不同高度风速变化特征[J].气象,35(7):46-53. Liu X F, Ren G Y, Liang X H, et al, 2009. The characteristics of wind speed variation at different altitudes of boundary layer in Hebei Province [J]. Meteor Mon, 35(7): 46-53 (in Chinese).
- 刘勇洪,张硕,程鹏飞,等,2017.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,26(11):1892-1903. Liu Y H, Zhang S, Cheng P F, et al, 2017. Research and application of heat and ventilation environment assessment for city planning—a case study of Jinan central urban area [J]. Ecol Environ Sci, 26(11): 1892-1903 (in Chinese).
- 任超,袁超,何正军,等,2014.城市通风廊道研究及其规划应用[J].城市规划学刊, (3): 52-60. Ren C, Yuan C, He Z J, et al, 2014. A study of air path and its application in urban planning [J]. Urban Plan Forum, (3): 52-60 (in Chinese).
- 戎春波,刘红年,朱焱,2009.苏州夏季城市热岛现状及影响因素分析研究[J].气象科学,29(1):84-87. Rong C B, Liu H N, Zhu Y, 2009. The study of the urban heat island and its influence factors in Suzhou City [J]. J Meteor Sci, 29(1): 84-87 (in Chinese).
- 沈娟君,邱新法,何永健,等,2017.城市建筑迎风面积密度矢量/栅格计算模型对比研究[J].地球信息科学学报,19(11):1433-1441. Shen J J, Qiu X F, He Y J, et al, 2017. Study on comparison of vector/raster calculation model of frontal area density of urban buildings [J]. J Geo-Inf Sci, 19(11): 1433-1441 (in Chinese).
- 王建国,2009.基于城市设计的大尺度城市空间形态研究[J].中国科学:技术科学,39(5):830-839. Wang J G, 2009. Research on large-scale urban spatial morphology based on urban design [J]. Sci Sin (Technol), 39(5): 830-839 (in Chinese).
- 王喜全,王自发,郭虎,2006.北京“城市热岛”效应现状及特征[J].气候与环境研究,11(5):627-636. Wang X Q, Wang Z F, Guo H, 2006. The study of the urban heat island in Beijing City [J]. Climatic Environ Res, 11(5): 627-636 (in Chinese).
- 王薇,邓卓剑,胡春,2018.合肥城市混合住区风环境的模拟比较与评价[J].工业建筑,48(7):54-59. Wang W, Deng Z J, Hu C, 2018.

- Comparison and evaluation of wind environment simulation of mixed settlements in Hefei[J]. *Ind Constr*, 48(7): 54-59 (in Chinese).
- 王梓茜,程宸,杨袁慧,等,2018. 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*, 25(1): 87-96. Wang Z X, Cheng C, Yang Y H, et al, 2018. Research on urban ventilation channel planning strategy which based on multivariate data analysis; take Beijing sub center as an example [J]. *Urban Dev Stud*, 25(1): 87-96 (in Chinese).
- 邢佩,房小怡,张宁,等,2019. 城市近地面高分辨率快速风场模型构建与应用[J]. *气象*, 45(7): 978-988. Xing P, Fang X Y, Zhang N, et al, 2019. Construction and application of the urban surface high-resolution and fast wind field model [J]. *Meteor Mon*, 45(7): 978-988 (in Chinese).
- 姚学祥,房小怡,杜吴鹏,等,2015. 城市规划气候评估与通风廊道设计技术研究与应用[M]. 北京:北京市气象局. Yao X X, Fang X Y, Du W P, et al, 2015. Research and Application of Climate Assessment and Ventilation Corridor Design Technology in Urban Planning[M]. Beijing: Beijing Meteorological Administration (in Chinese).
- 张爱英,任国玉,郭军,等,2009. 近 30 年我国高空风速变化趋势分析[J]. *高原气象*, 28(3): 680-687. Zhang A Y, Ren G Y, Guo J, et al, 2009. Change trend analyses on upper-air wind speed over China in past 30 years [J]. *Plateau Meteor*, 28(3): 680-687 (in Chinese).
- 张海龙,祝善友,王明江,等,2015. 基于 3D 建筑物数据的天空开阔度估算及其城市热岛应用研究——以 Adelaide 为例[J]. *遥感技术与应用*, 30(5): 899-907. Zhang H L, Zhu S Y, Wang M J, et al, 2015. Sky view factor estimation based on 3D urban building data and its application in urban heat island—illustrated by the case of Adelaide [J]. *Remote Sens Technol Appl*, 30(5): 899-907 (in Chinese).
- 张强,吕世华,2003. 城市表面粗糙度长度的确定[J]. *高原气象*, 22(1): 24-32. Zhang Q, Lü S H, 2003. The determination of roughness length over city surface [J]. *Plateau Meteor*, 22(1): 24-32 (in Chinese).
- 中国气象局,2018. 气候可行性论证规范 城市通风廊道: QX/T 437—2018[S]. 北京:气象出版社. China Meteorological Administration, 2018. Specifications for climatic feasibility demonstration—Urban ventilation corridor: QX/T 437—2018[S]. Beijing: China Meteorological Press (in Chinese).
- 邹立尧,国世友,王冀,等,2010. 1961—2004 年黑龙江省近地层风速变化趋势分析[J]. *气象*, 36(10): 67-71. Zou L Y, Guo S Y, Wang J, et al, 2010. Variation trends of the surface wind speed in Heilongjiang Province from 1961 to 2004 [J]. *Meteor Mon*, 36(10): 67-71 (in Chinese).
- Chatzipoulka C, Compagnon R, Kaempf J, et al, 2018. Sky view factor as predictor of solar availability on building façades [J]. *Solar Energy*, 170: 1026-1038.
- Grimmond C S B, King T S, Roth M, et al, 1998. Aerodynamic roughness of urban areas derived from wind observations [J]. *Boundary Layer Meteor*, 89(1): 1-24.
- Ren C, Yang R Z, Cheng C, et al, 2018. Creating breathing cities by adopting urban ventilation assessment and wind corridor plan—the implementation in Chinese cities [J]. *J Wind Eng Ind Aerodyn*, 182: 170-188.
- Rozenstein O, Qin Z H, Derimian Y, et al, 2014. Derivation of land surface temperature for landsat-8 TIRS using a split window algorithm [J]. *Sensors*, 14(4): 5768-5780.
- Wicht M, Wicht A, Osińska-Skotak K, 2017. Detection of ventilation corridors using a spatio-temporal approach aided by remote sensing data [J]. *Eur J Remote Sens*, 50(1): 254-267.
- Zakšek K, Oštir K, Kokalj Ž, 2011. Sky-view factor as a relief visualization technique [J]. *Remote Sens*, 3(2): 398-415.

(本文责编:何晓欢)