

引用格式: 杨士士, 王伟文, 常鸣, 等. 北京市潜在风道的数值模拟与综合识别[J]. 地球信息科学学报, 2020, 22(10): 1996-2009. [Yang T S, Wang W W, Chang M, et al. Numerical simulation and comprehensive identification of potential wind corridors in Beijing[J]. Journal of Geo-information Science, 2020, 22(10): 1996-2009.] DOI: 10.12082/dqxxkx.2020.200242

北京市潜在风道的数值模拟与综合识别

杨士士^{1,2}, 王伟文^{1,2*}, 常 鸣^{1,2}, 王雪梅^{1,2}

1. 暨南大学环境与气候研究院, 广州 511443; 2. 粤港澳环境质量协同创新联合实验室, 广州 511443

Numerical Simulation and Comprehensive Identification of Potential Wind Corridors in Beijing

YANG Tushi^{1,2}, WANG Weiwen^{1,2*}, CHANG Ming^{1,2}, WANG Xuemei^{1,2}

1. Institute for Environmental and Climate Research, Jinan University, Guangzhou 511443, China; 2. Guangdong-Hongkong-Macau Joint Laboratory of Collaborative Innovation for Environmental Quality, Guangzhou 511443, China

Abstract: From the perspective of local and micro scales, construction of ventilation corridor in urban area was proposed by optimized planning and architectural design in previous studies. However, for contemporary megacities and urban agglomerations, both urban heat island and pollutant transport may involve a larger scale of regional impact. It may have more practical significance to integrate regional natural geographical resources to identify and plan ventilation corridors in urban peripheral areas to be developed. Taking Beijing as an example, potential ventilating areas is preliminarily identified by drawing the map of aerodynamic roughness length in this study. First, monthly mean wind fields from numerical simulation outputs of January and July demonstrate that, in winter with strong background wind, the distribution of horizontal wind speed is highly consistent with the distribution of underlying surface roughness. There is an obvious wind path in the northeast of urban Beijing. Wind speed drop significantly when passing through the urban area due to the high surface roughness, and partially recovers in the urban downstream. Second, thermodynamic analysis suggests that the low temperature area outside the city in summer is contrary to prevailing wind direction; both the size of the compensation space and thermal gradient between the compensation and the action space are smaller than that in winter, hence the available wind resources to refresh the city are scarce. Third, a dimensionless ventilation index is estimated by integrating the weighted surface temperature and roughness length. In Beijing, the index is in between 0 and 0.25 in winter, and is in between 0 and 0.60 in summer. The smaller the value is, the stronger the ventilation capacity. The ventilation capacity in winter is significantly better than that in summer due to the effect of seasonal thermodynamic difference. Fourth, the simulated velocity is further combined to divide the ventilation performances into 4 grades, and the potential ventilation corridors in Beijing are identified in winter

收稿日期: 2020-05-15; 修回日期: 2020-08-10.

基金项目: 国家重点研发计划地球观测与导航重点专项项目(2017YFB0503901); 国家自然科学基金项目(41875010、41705123); 2019广东省科技创新战略专项资金项目(2019B121205004)。[**Foundation items:** National Key Research and Development Plan of China, No.2017YFB0503901; National Natural Science Foundation of China, No.41875010, 41705123; Special Fund Project for Science and Technology Innovation Strategy of Guangdong Province, No.2019B121205004.]

作者简介: 杨士士(1995—), 男, 广东广州人, 硕士生, 主要从事大气科学与大气环境研究。

E-mail: yangtushi@stu2018.jnu.edu.cn

*通讯作者: 王伟文(1981—), 男, 广东广州人, 副教授, 主要从事城市气候与大气环境研究。E-mail: wwangeci@jnu.edu.cn

and summer, respectively. In winter, the length of the ventilation corridor running through Beijing is about 200 km; it introduces wind resources from the periphery of the city to improve the self-purification capacity of the city. In summer when the background wind is weak, the connectivity of the wind path is poor and the ventilating capacity is weak. Optimizing urban agglomeration planning will be hence practical helpful.

Key words: ventilation corridor; urbanization; surface roughness; urban heat island; numerical simulation; Beijing; land use; land cover

***Corresponding author:** WANG Weiwen, E-mail: wwangeci@jnu.edu.cn

摘要:过去从局地尺度和微尺度优化规划和建筑设计角度,城市规划与建筑学科的研究者提出了构建城市区域通风廊道的思想。但对目前的特大城市和城市群而言,无论城市热岛还是污染物输送都可能涉及更大尺度范围的区域影响。结合自然地理资源条件,对城市外围待发展区域的风道识别和规划,可能更具有现实意义。本文基于空气动力学粗糙长度计算通风指数,从动力学角度初步识别出北京不同区域的通风潜力:①利用数值模拟输出的1月和7月平均水平风场发现,在背景风较强的冬季,水平风速的分布与下垫面的粗糙度保持高度一致,在北京城区东北方向存在一条明显的风道,在通过城区时受城市下垫面的拖曳影响出现显著的风速下降,在城市下风方向风速又有所回升;②与热力分析对比发现,夏季城市外的低温区域与盛行风向相悖,偏南方向上的补偿空间面积比冬季小且与作用空间的温差也小,流向城市的可利用风资源匮乏;③基于近地面温度和粗糙长度加权计算后得到通风指数,冬季为0~0.25,夏季为0~0.60,数值越小通风能力越强,受季节热力差异影响,冬季通风能力显著优于夏季。④进一步结合数值模拟的风速分布,将通风评价结果划分为4个等级,从北京市全域尺度分冬、夏两季识别了北京市的潜在风道,冬季贯穿南北的风道全长约200 km,从城市外围引入风资源,可有效提高城市自净能力,而在背景风较弱的夏季,风道贯通性较差,气流疏导能力弱,亟待区域联动优化城市群发展规划。

关键词:通风廊道;城市化;地表粗糙度;城市热岛;数值模拟;北京市;土地利用;土地覆盖

1 引言

城市化是人类社会发展的必由之路,但高速城市化进程也带来了许多问题。城市化通过对下垫面的改变和城市功能带来的排放,影响其上盖大气,造成了城市热岛和大气污染等问题,威胁着城市居民的健康^[1-3]。在城市快速扩张的过程中,规划布局的不合理,可能加剧城市小气候和生态环境的恶化,成为制约城市可持续发展的重要因素之一。城市下垫面形态是随着城市发展建设不断演变的,城市土地高强度开发利用、城市规模扩张、城市密度增大、人口集聚,都可能导致城市通风能力下降^[4]。研究表明,优化城市通风可提高空气流通能力,降低建筑能耗,对于缓解城市热岛效应具有重要作用^[5-6]。通风也有助于稀释污染:大气污染物通过平流输送和湍流混合,平均风速越高,排放源下风向的污染物浓度就越小^[7]。由于建筑物的存在,城市下垫面粗糙度增加,导致城市的平均风速和街区内的空气循环效率普遍降低,加剧了城市地区的空气污染。因此,如何优化城市形态,构建城市通风廊道,已成为城市规划和建设中需要重点考虑的影响因素^[8]。

德国是最早开展城市通风廊道研究的国家,日

本部分城市于20世纪90年代后期开始相关研究^[9-10]。国内城市针对风道研究还比较薄弱,亟需风道构建技术方法及规划设计控制指引^[8]。中国香港自2003年“非典型肺炎”疫情后开始致力于针对高密度城市的通风研究^[11]。2015年,国家发展和改革委员会、住房和城乡建设部联合颁布了《城市适应气候变化行动方案》^[12],第一次从国家层面提出要依托城市形态要素中的道路、绿地、公共空间等,打通城市通风廊道,增加城市的空气流动性,缓解城市热岛和空气污染等问题。随后,我国一些大城市都相继开展了通风廊道的研究和规划^[13-18]。

城市气候研究通常被划分为不同的空间尺度^[4,7],城市通风作为城市气候的一个研究方向,这些尺度划分同样适用。街谷内的微尺度到街区的局地尺度,研究手段有计算流体力学(CFD)和风洞模拟等^[19-21]。其中,计算流体力学是一种使用数值模拟方法在计算机中对流体力学控制方程继续计算求解的技术,由于其经济简便的优势而被更为广泛的应用^[22]。由于对湍流的模拟精度不一定会影响通风评估的整体精度,因而在众多的CFD技术中,备受推崇的仍然是速度更快、计算成本更低的雷诺平均纳维-斯托克斯方程(RANS)湍流模型^[23]。近年来,一些新技术与CFD结合被应用到城市通风模拟中,如机器

学习、图像识别等为代表的新兴方法^[24]、中尺度气象模拟方法^[25]、地理信息系统(GIS)等技术^[26-27],这些结合多应用在跨越局地、城市到区域的更大尺度上。近年来相关的研究不断涌现,多数研究都针对建成区进行数值模拟或地理信息分析^[9-11,13-18]。但结合自然地理资源条件,对待发展区域的风道识别和规划,更具有现实意义。对于现代的超级城市和城市群,无论城市热岛还是污染物输送都可能涉及更大尺度范围的区域影响^[28]。为了捕捉大尺度区域范围内城市对通风的影响,通常会在中尺度边界层模型中加入单层或多层的城市冠层模型(UCM)^[29],或与湍流模拟结合以获取不同级别的风道模拟结果^[30]。在边界层气象模型中加入化学模型,则可以深入探讨风道对污染物分布的潜在影响^[31]。

数值模拟与GIS的结合能获取更具体的风道信息^[32-33],例如利用最小成本路径法确定潜在风道的位置^[34]。也有最新的研究在传统风道模拟分析的基础上提出了一种基于电路理论的风道识别方法,能覆盖研究区域内的所有网格单元,更优于最小成本路径法^[35]。不同的观测手段则可能会在不同尺度上被采用^[36]。冠层通风主要受城市形态的影响,如建筑密度、建筑高度、高宽比、迎风面密度、天空可视因子、粗糙长度等,城市形态研究因此越来越受重视^[37-38]。局部气候区(LCZ)被认为是一项重要的研究,它通过上述几何和形态学参数来定义LCZ类别,从而定义和研究城市气候^[39]。城市气候图是另一个城市形态参数在城市气候中的应用^[40]。

在北京,城市气候图的建立可以评估典型城市形态对热负荷和通风潜力的影响^[41]。为了对北京这样的特大城市的城市边界层进行数值模拟,城市形态通常是参数化的^[42]。耦合模式模拟结果表明,实际建筑物周围的气流与中尺度模式提供的边界上的环境风有很大不同^[43]。在气象模拟中加入优化的城市冠层参数,可获取更精细的风场模拟结果^[44]。地理信息系统和遥感技术的应用在一定程度上补充了中尺度模拟有限的空间分辨率,根据流体力学理论计算建筑高度的风阻系数,建立了北京核心城区的通风网络模型^[45]。但过去的这些研究,集中关注了北京城市区域的通风环境,包括前文提到的北京市通风廊道规划,均局限在北京六环以内的中心城区。但对于处在华北平原城市群中的北京地区,无论城市热岛还是污染物输送,都可能涉

及更大范围的区域影响。本文“北京地区”指的是北京市行政规划边界内的全部区域。在整个北京地区的空间尺度上,潜在的风道尚待明确。本文将利用冬、夏两季的中尺度气象模拟,结合动力学和热力学分析,以及综合地理图层叠加结果,识别北京地区的潜在风道。

2 研究区概况

首都北京是中国的政治、文化中心,直辖市面积16 410 km²,建成区1485 km²,常住人口2153.6万(2019年)。北京市山区面积约占总面积的62%,平原区面积约占38%,地形西北高,东南低,平均海拔43.5 m,平原海拔高度20~60 m,山地一般海拔1000~1500 m(图1)。西部为西山,属太行山脉;北部和东北部为军都山,属燕山山脉。气象观测和数值模拟均显示了北京市显著的城市热岛^[46-47]。同时,1960年以来北京地区的平均风速显著下降,部分归因于城市化的影响^[48]。随着北京城市面积的外扩蔓延以及京津冀地区城市群发展的深化,对区域气候变化的影响将更为剧烈。北京市提出了不同层级的通风廊道规划建议,将城市公园、河流、湖泊、公路、绿化带以及城市低层建筑连接起来,形成通风廊道,包括5条500 m宽的主廊道和一些80 m宽的次级廊道^[49-50]。针对北京风道规划的研究同时指出,风道在静稳天气下无法改变大尺度的扩散条件,其在空气质量改善方面的作用仍有待探讨^[50]。

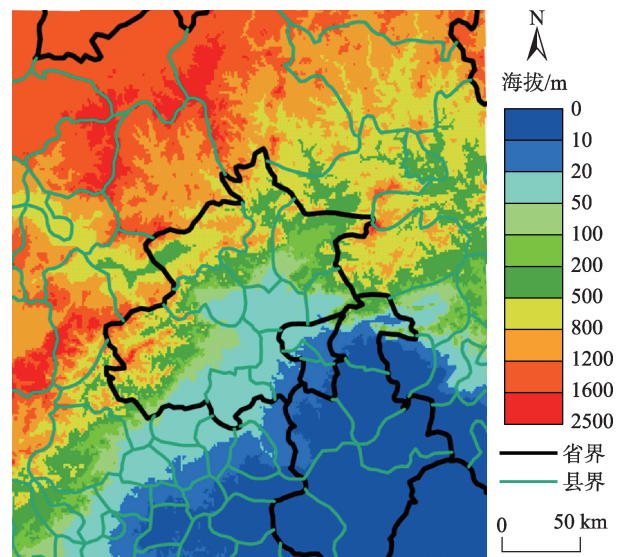


图1 北京及周边地区海拔高度分布

Fig. 1 Topography of Beijing and surrounding areas

但通风廊道在一定程度上影响了微气候环境,增加了局部风力,有助于减少局地热岛效应;合理规划和建设通风廊道,从长远来看,可作为城市生态环境改善的补充措施^[51]。

3 数据来源和研究方法

3.1 数据来源

本文利用了美国地质勘探局(USGS)提供的2015年全球陆地覆盖数据(GLC2015),其植被连续场(VCF)数据集提供了1982—2016年0.05°空间分辨率的全球植被覆盖^[52]。依据GLC2015影像文件对不同分数植被覆盖度进行划分,获得模拟区域内的地表覆盖类型(图2(a))。WRF(The Weather Research and Forecasting Model)提供的默认土地利用资料存在滞后^[53],就通常的城市化速度而言,本研究更新到2015年,能基本满足对近5年进行数值模拟的地表覆盖数据更新的需要。为了对土地利用数据进行交叉检验,图2(b)同时给出了2018年的地表覆盖数据(GLC2018)。由于旱田、水田和混

合田在2015年和2018年的数据中存在交叉,图2将它们统一为干旱/灌溉混合型农田和牧场。数据表明,2015年和2018年的土地利用类型,尤其是城市规划区和建成区没有显著的空间差异。本研究对后续不同年份(2018年、2019年)的模拟,均采用2015年的GLC土地利用数据。

3.2 数值模拟及数据输入

数值模拟基于WRF中尺度气象模式进行,本文使用的模式版本为ver.3.9.1。WRF是气象研究和数值天气预报的大气建模系统,通常用于1~10 km水平网格的模拟,在城市尺度上可以反映城市地形和建筑物总体布局对背景风场的影响。精确的地表分类在提高WRF模拟精度中有着重要意义^[25]。模拟选用了Purdue Lin作为微物理选项^[54],RRTMG作为长波辐射方案^[55],Goddard作为短波辐射方案^[56-57],Noah作为陆面方案^[58],以及延世大学(YSU)作为行星边界层方案^[59](表1)。模式输出分辨率500 m×500 m,网格数600(纬向)×700(经向),中心经纬度40°15' N,116°30' E。我们模拟了2019年的

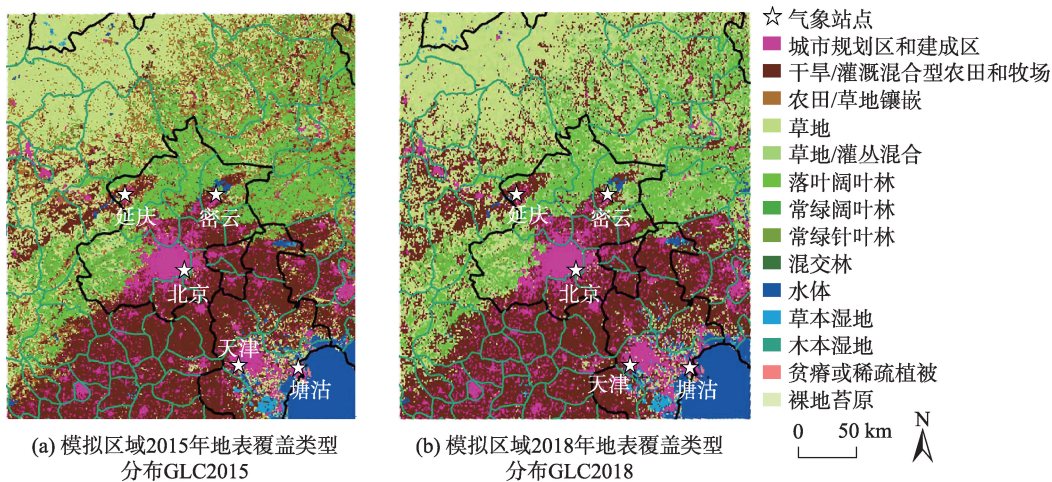


图2 模拟区域的土地利用类型分布

Fig. 2 Distribution of land use types in the WRF simulation area

表1 WRF 模拟物理参数化方案选择

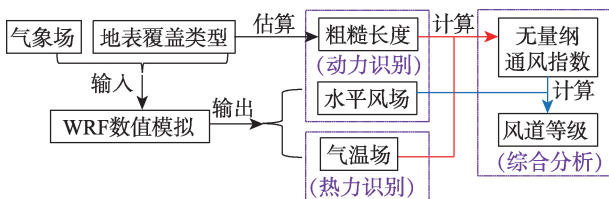
Tab. 1 Physical parameterization schemes in WRF simulation

物理过程(英文名称)	方案选择	参考文献
微物理(Microphysics)	Purdue Lin scheme	Chen & Sun ^[54]
长波(Long wave)	RRTMG	Iacono等 ^[55]
短波(Short wave)	Goddard shortwave	Chou & Suarez ^[56] , Matsui等 ^[57]
陆面(Land Surface)	Noah Land Surface Model	Chen & Dudhia ^[58]
行星边界层(Planetary Boundary Layer)	Yonsei University scheme	Hong等 ^[59]

1月和7月,分别代表冬季和夏季。冬季选取了1月1日0时至2月1日0时(UTC)的模拟结果输出进行分析;夏季选取了7月1日0时至8月1日0时(UTC)的输出。此外,为了检验所选取的2个月是否具有典型性,本文也模拟了2018年的1月和7月进行了对比,模拟的具体日和时间、模式参数化方案选取、网格设置等均与2019年一致,地表覆盖数据输入仍然用GLC2015。大尺度气象场的初始和边界条件利用了美国国家环境预测中心(NCEP)发布的再分析数据(FNL)^[60],数据水平分辨率 $1^{\circ}\times 1^{\circ}$,垂向31层,每天4个时次)。此外,利用国家气象局提供的标准站点气象观测日值资料(<http://www.nmic.cn/>),对模拟结果进行验证。选取的站点标示在图2中,验证的气象要素包括气压,气温和风速。

3.3 风道综合识别方法

本文基于数值模拟结果,结合动力学和热力学方法,获取北京地区潜在风道的综合识别结果,具体流程如图3所示。首先通过形态学方法计算北京地表粗糙长度最大值,结合数值模拟的风速分布,从空气动力学上识别北京地区的潜在风道。再从热力学角度,利用气温分布将城市通风系统分为作用空间、补偿空间和空气引导通道,比对冬夏两季热力差异对城市风资源贡献的大小。最后的综合分析分为2步:第①步采用序关系法量化不同因子的影响,建立无量纲通风指数;第②步结合数值模拟结果,计算获取北京地区通风潜力的等级评价空间分布图。



注:红色箭头表示区域通风潜力最主要的影响因子的计算;蓝色箭头部分表示风道等级的计算。

图3 技术路线

Fig. 3 The technology roadmap

(1) 形态学方法估算粗糙长度

空气流经下垫面上方时会受到地表的表面拖曳以及粗糙元的阻力(型阻)。地表粗糙度越低,气流通过的阻力越小,风速下降的幅度越小。地表粗糙度可以用气象学中的动力学粗糙长度 z_0 来定量表达,是指近地层风速向下递减到零时的高度(以

零平面位移高度 z_d 为高度起点)。常用的计算方法有微气象方法和形态学方法2种。形态学方法可以通过精确的地理信息和遥感信息来实现。通过将观测资料计算结果和形态学模型计算结果比较发现,形态学方法模拟动力粗糙度是可行的。由地形起伏产生的粗糙度使用地形粗糙长度来衡量,可通过Smith-Carson方程^[61]计算。

$$z_0 = 0.2 \times (\Delta H)^2 / L \quad (1)$$

式中: z_0 为因地形起伏产生的地形粗糙长度; ΔH 为距离 L 范围内的海拔高程差。

城市表面比起自然表面要粗糙的多,城市表面的纹理也不尽相同。形态学方法依赖于粗糙度参数和易于观测的城市结构参数(如高度、密度、排列形式等)之间的函数关系^[6]。城市地区估算 z_0 需要提取的主要参数是建筑覆盖率和建筑高度。本文利用USGS的GLC2015输出的 z_0 数据,该数据采用形态学方法,即根据粗糙元的几何形状、分布密度等计算动力学粗糙长度^[62]。

(2) 空间热力差异分析

从热力学的角度,城市下垫面气候功能评价标准研究将城市通风系统分为作用空间、补偿空间和空气引导通道^[8,15]。作用空间是指需要改善风环境或降低污染的地区,补偿空间指产生新鲜空气或局地风系统的来源地。空气引导通道亦即风道,是指将新鲜冷空气由补偿空间引导至作用空间的连接通道,其下垫面粗糙度一般较小。本研究将利用模拟输出的气温场,分析北京地区冬夏两季的空间热力差异,通过热力学方法识别北京地区潜在风道(图3)。

(3) 潜在风道综合评价方法

过往城市风道的研究多以城区作为对象,影响通风性能的因子主要是城市冠层参数。参考相关研究^[17],本文尝试拓展空间尺度,将整个北京地区纳入城市风道分析的考察范围,以地表形态以及热力因素作为评价城市通风性能的指标,构建北京的通风廊道。在城市通风潜力各项因子的影响评价中,需赋予各个指标不同的权重系数。采用序关系法确定各影响因子权重值,由于下垫面粗糙长度表征其对近地风的拖曳作用大小,且以城区温度高值中心为参照点,周边区域温度越高和城区的温差就越小,因热力差异产生的风力也就越弱,故选取地表粗糙度 ω_1 、近地温度 ω_2 共2个区域通风潜力最主要的影响因子(图3红色箭头部分)。基于2个因子

对通风潜力的阻碍作用程度比较分析,确定 $\omega_1 > \omega_2$ 的顺序关系,再根据粗糙长度以及温度的数量级(粗糙长度的数值范围在0.0001~0.5000 m之间,而气温的数值范围在-6~26 °C之间),设定 $\omega_1 : \omega_2$ 为100:1,且 $\omega_1 + \omega_2 = 1$,得到 $\{\omega_1, \omega_2\}$ 评价因子的权重系数: $\omega_1 = 0.99, \omega_2 = 0.01$ 由此系数分别乘以其对应的影响因子并将之叠加,得到无量纲的通风指数(Ventilation Index)。

$$I_v = 0.99 \times z_{0_max} + 0.01 \times T_2 \quad (2)$$

式中: z_{0_max} 为粗糙长度最大值; T_2 为2 m气温;指数值越高表示通风能力越差。

最后,风道等级的计算,见图3蓝色箭头部分。无量纲通风指数(I_v)作为削弱通风能力的指数,将模拟得到的10 m平均风速与之进行相减,计算等到风道等级。

$$G_v = U_{10} - I_v \quad (3)$$

式中: U_{10} 为10 m风速; G_v 为风道等级(Ventilation Grade)。由此计算出地表粗糙度和温度差异对风

速的影响,得到潜在风道的综合评估结果。

4 结果及分析

4.1 数值模式性能验证

利用气象观测资料对模拟结果进行验证,对比了模拟区域内网格点土地利用类型为城市的5个标准气象站(北京、延庆、密云、天津和塘沽,见图2),验证的气象要素包括风速,气温和气压。观测与模拟的日均风速时间序列对比如图4所示。表2给出了相应的验证统计量。就偏差(*BIAS*)而言,北京站的总体偏差最小,除7月北京和延庆的模拟值有所低估(*BIAS*为负)外,模式对10 m风速的模拟结果整体偏高。1月的北京、天津和塘沽的10 m风速与站点观测风速的相关系数(*R*)分别为0.57, 0.49, 0.67,延庆和密云分别为0.34和0.33。位于城市内的站点模拟值和观测值的*R*相对较高,下垫面覆盖类型的性质可能对近地风速模拟的准确度产生一

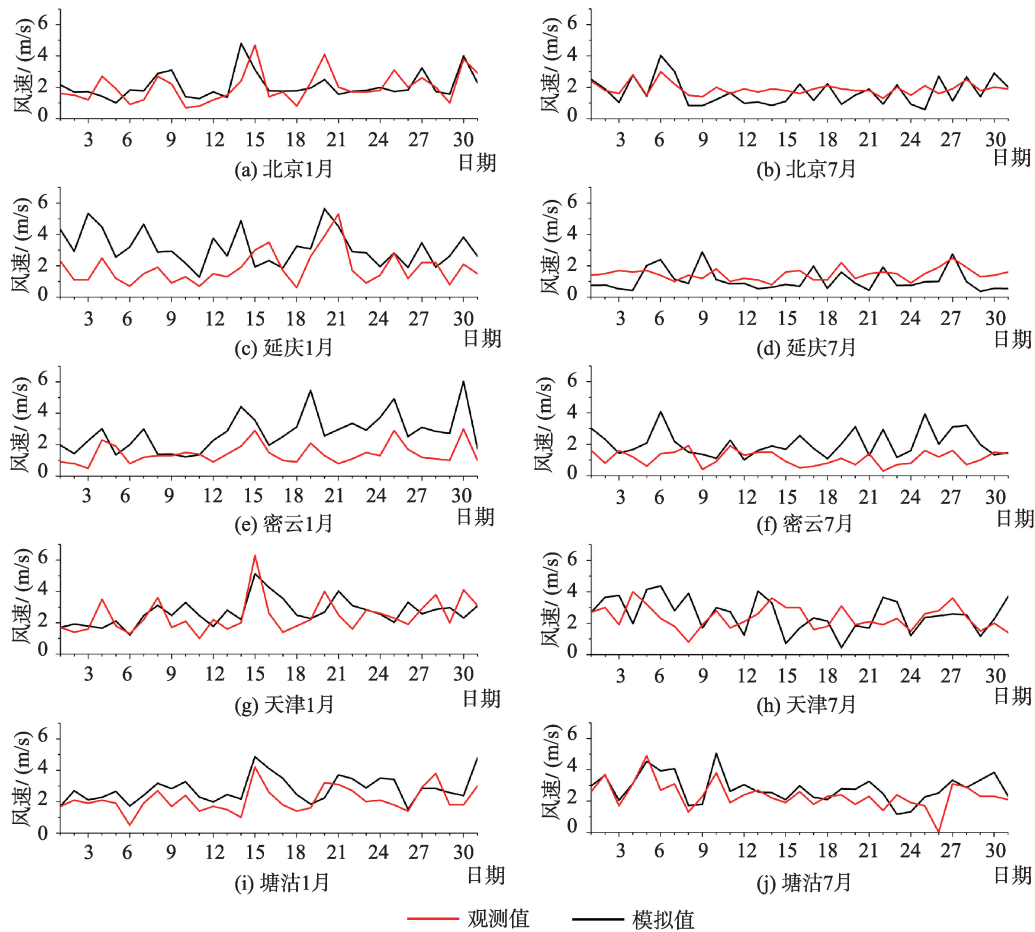


图4 2019年1月和7月10 m风速日均值序列

Fig. 4 Daily series of wind speed at 10 m in January and July 2019

表2 模拟输出站点10 m风速验证统计量
Tab. 2 Validation statistics of 10 m wind speed
at stations from WRF output

站点	1月			7月		
	BIAS	RMSE	R	BIAS	RMSE	R
北京	0.07	0.83	0.57	-0.09	0.83	0.43
天津	0.28	1.01	0.49	0.20	1.16	0.20
塘沽	0.74	1.20	0.67	0.44	0.83	0.66
密云	1.40	1.79	0.33	1.02	1.44	0.22
延庆	0.34	1.29	0.34	-0.38	0.77	0.29

定的影响。7月的R整体低于1月,可能是夏季相对复杂的天气过程所致。图4和表2的验证结果显示,WRF模拟的平均风速和变率与观测值没有显著的差异,该模拟结果可以用于关注月均风速分布的潜在风道识别。气温和气压的验证结果较风速的验证结果好。表3和表4给出了气温和气压相应的验证统计量。模拟与观测的气温时间序列相关系数在0.68~0.89之间,而气压时间序列的R值都在0.9以上。

4.2 北京通风潜力的动力识别

本文利用USGS的GLC2015数据,通过地理信息系统可视化后得到北京市地表粗糙长度最大值($z_{0,max}$)的空间分布如图5所示。可以看出,北京市

表3 模拟输出站点2 m气温验证统计量

Tab. 3 Validation statistics of 2 m air temperature
at stations from WRF output

站点	1月			7月		
	BIAS	RMSE	R	BIAS	RMSE	R
北京	0.66	1.53	0.85	-0.44	1.83	0.76
天津	2.17	2.39	0.89	-0.51	1.54	0.85
塘沽	0.05	1.07	0.88	-1.01	2.06	0.74
密云	4.59	5.04	0.72	0.25	1.64	0.78
延庆	4.76	5.34	0.68	-1.89	2.36	0.80

表4 模拟输出站点海平面气压验证统计量

Tab. 4 Validation statistics of sea level pressure at
stations from WRF output

站点	1月			7月		
	BIAS	RMSE	R	BIAS	RMSE	R
北京	-0.15	1.89	0.93	-1.18	1.59	0.95
天津	-0.33	1.92	0.93	-0.60	1.20	0.95
塘沽	0.22	1.87	0.93	-0.01	1.08	0.94
密云	2.03	2.88	0.92	-1.64	1.94	0.95
延庆	1.88	2.74	0.90	-0.74	1.27	0.94

城区由于高密度建筑群的影响,地表粗糙度较高,城区西面和北面的山地地形较高且主要分类为阔叶林以及针叶林(图2),也显示出较高的粗糙度, $z_{0,max} \geq 0.5$ m,过去的粗糙长度经验估算研究表明^[6],这些下垫面粗糙元的平均高度通常大于2 m,属于通风潜力较差的类型;其次为稀树草原以及树林的混合区,这些地区 $z_{0,max}$ 基本在0.1~0.5 m之间,可界定为通风潜力一般的下垫面类型;灌木丛和草地的混合区粗糙长度相对较低, $z_{0,max}$ 普遍处于0.01~0.10 m之间,通风潜力较好;水体则有着最低的粗糙度($z_{0,max} \leq 0.01$ m),包括雪地、冰面、泥地、沙漠以及柏油路面等,是通风潜力最好的下垫面类型。因此,可以进一步将下 $z_{0,max}$ 按照上述的几个阈值将北京地区的通风潜力分为较差、一般、较好和极好四级,从动力学角度初步识别出北京市不同区域的通风潜力(图5)。

图6给出了WRF模拟的月平均风速分布。北京市冬季的平均风速显著高于夏季,冬季盛行偏北风。夏季盛行东南风,与观测统计一致^[19]。冬季,东北风在进入怀柔区之后,受延庆县山地地形阻隔的影响出现绕流,并最终通往地形高度较低的延庆县西南方向;而由密云县而来的北风则伴随着西边东北风因绕流而形成的西北风汇合,在北京城区东北方向形成一条明显的风道。这条大风速带在经过城区时受城市下垫面的拖曳作用呈现显著的风速下降;而在城市下风方向,由于离开城市地区后下垫面粗糙度下降,风速有所回升。对

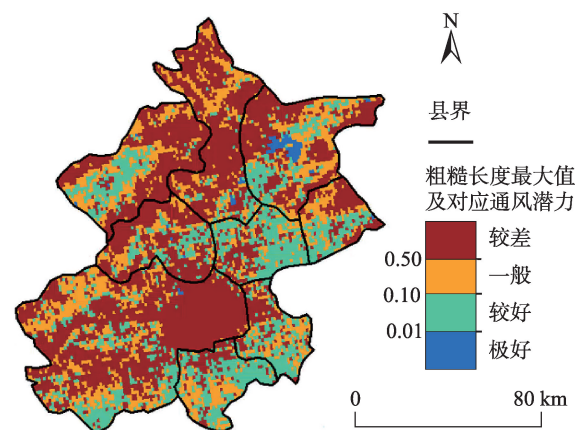


图5 根据USGS土地利用类型数据(GLC2015)估算的粗糙度长度最大值($z_{0,max}$)的通风潜力评估
Fig. 5 Evaluation of ventilation performance by maximum roughness length ($z_{0,max}$) based on USGS land use data (GLC2015)

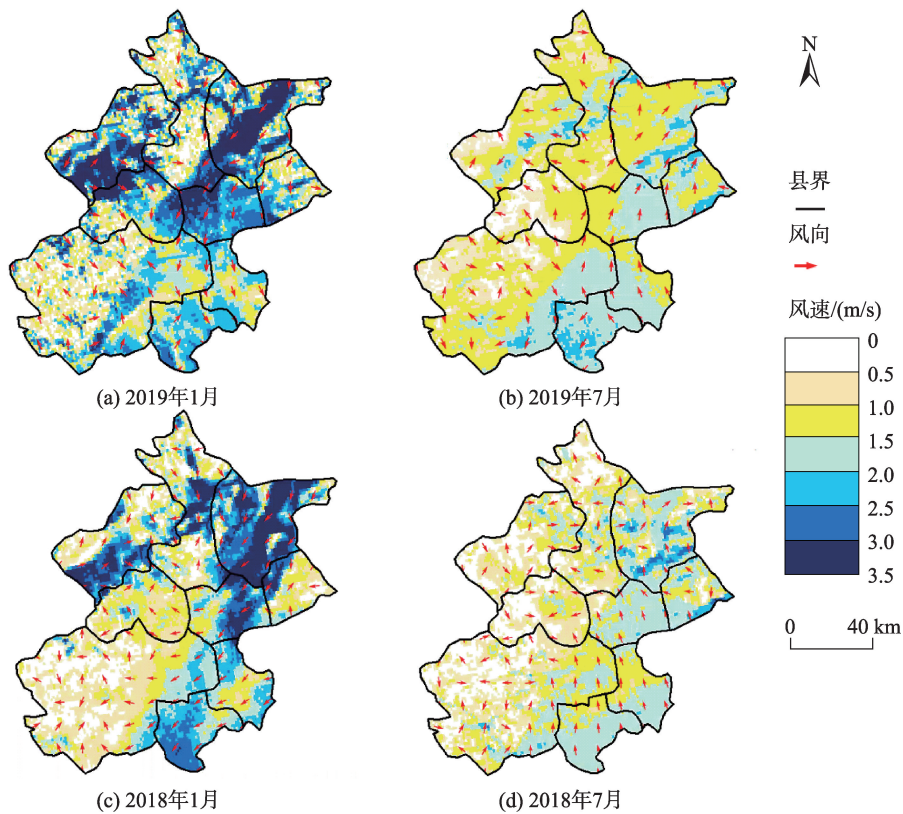


图6 北京 10 m 高度风场月平均风速、风向模拟值空间分布

Fig. 6 WRF-simulated mean wind speed and wind direction at 10 m above the ground

比图 5 和图 6(a)可以发现,在背景风比较强的冬季,水平风速的分布与下垫面的粗糙度保持高度一致。而在背景风较弱的夏季(图 6(b)),模拟结果没有显著的东北-西南走向的风道,西北大部分区域平均风场较弱,普遍在 1.5 m/s 以下。月均风速 1.5 m/s 的等值线也把城市区域粗略划分为东南和西北 2 部分。

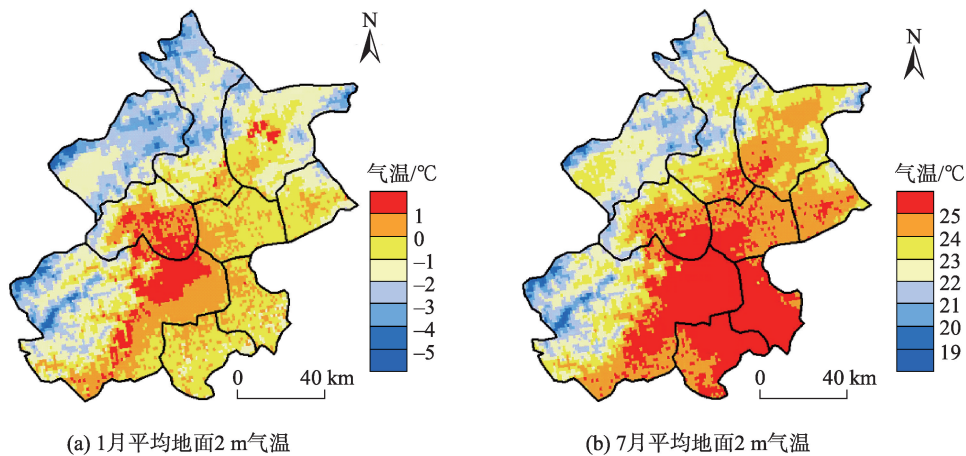
图 6(c)和图 6(d)给出了 2018 年 1 月和 7 月模拟的月均风场。相比 2019 年,2018 年 1 月北京城区东北方的大风速带往东南方略为偏移,同时,城区下风方向(西南方)的风速相比 2019 年 1 月也偏低约 1 m/s。总体上,山脉、复合林地覆盖的地表,粗糙度大,风速较低;平原、农田覆盖的地表,粗糙度小,风速较高。这在完整模拟的 4 个月份中没有本质的差异。且风向的分布在两年的同一月份中也基本吻合。后文选取 2019 年作为典型年份,利用模拟数据对潜在风道进行分析评估。

4.3 北京通风潜力的热力识别

影响地区通风潜力的因素包括动力和热力 2 个方面。数值模拟的风场(图 6)是不同因素耦合的输

出结果。本节我们利用模拟输出的近地面气温水平分布,通过热力梯度分析北京地区的作用空间、补偿空间以及联系二者的热力学风道,进一步讨论热力在北京地区通风的影响。

从热力学角度,作用空间通常是以城市核心区为中心向四周逐步扩展的区域,由于下垫面性质和众多热源的存在形成了城市热岛,使得其温度明显高于郊区。补偿空间与作用空间之间通常存在较大的热压和风压梯度差。因此,可以依据城市地表温度的高温区和低温区来大致判定作用空间和补偿空间。从图 7 数值模拟输出的 2 m 气温(T_2)可见,北京城区西、北方向高海拔山区的气温在不同季节都较平原地区低,但 1 月城市核心区与郊区的温度差异可达 2~3 °C,7 月则仅有 0~1 °C,因此对北京来说 1 月的城市热岛效应比 7 月更为显著。冬季,补偿空间在城市北面,与盛行风向一致,作用空间与补偿空间的温差较大,热力差异导致城市可用补偿风资源更多。夏季,城市外的低温区域与盛行风向相悖,偏南方向上的补偿空间面积比冬季小且与作用空间的温差也小,因此流向城市的可利用风

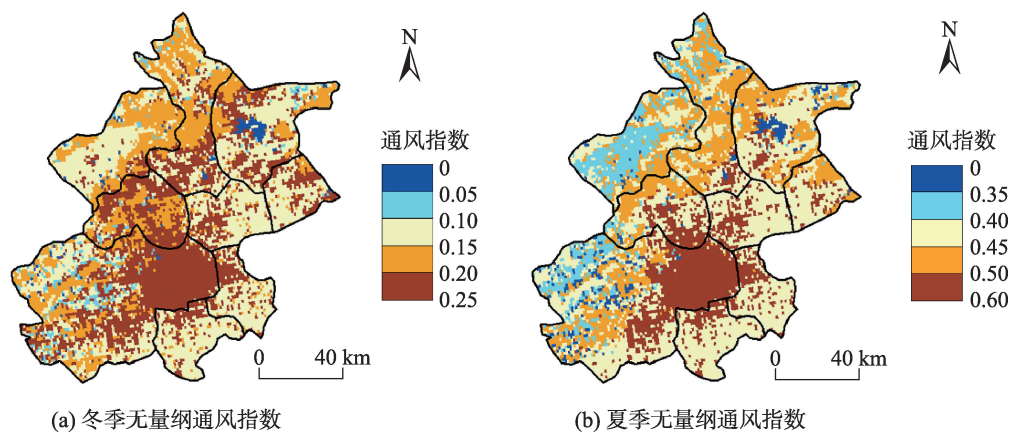
图7 WRF模拟的2019年1月、7月平均地面2 m气温(T_2)Fig. 7 WRF simulated mean surface temperature at 2 m above the ground (T_2)

资源较冬季少。夏季的热补偿风资源少,风力不足,造成风道连贯性较差,城市区域的污染更难依靠风道向城外输送。

4.4 潜在风道综合分析

图8给出了采用序关系法估算得到的无量纲通风指数,可以看出冬夏两季的通风能力分布与粗糙长度分布(图5)基本吻合,平原的低矮植物生长区以及水体的通风能力总体优于山地和城区。在相同的下垫面情况下,受到季节热力差异的影响,冬季的通风指数区间为0~0.25(图8(a)),夏季为0~0.60(图8(b))。冬季的通风能力强于夏季,与模式输出的季节风场(图6)风速差异相符。

依据图6城市风环境模拟的结果,结合图8计算的近地面温度 T_2 和粗糙长度 z_0 加权后得到的通风指数,将通风评价结果分为4个等级,从北京市全域尺度分冬夏两季构建通风廊道(图9)。可以看到,冬季有较为明显的四条风道(五处入口),其中位于燕山和军都山谷间的风道贯穿北京市东北至西南,涉及密云县、怀柔区、顺义区、昌平区、北京市区、房山区,将这些区域串联,全长约200 km,从城市外围引入风资源,可能降低城市区域的热岛效应,提高城市自净能力。鉴于大尺度上冬季盛行西北风,这条东北-西南走向的主风道主要受地形控制。在较强烈的西北风天气下,背景风也可能翻越怀柔区和昌平区境内的低地(图6(a)),进而影响北



注:数值越小通风能力越强,冬季总体强于夏季。

图8 结合地面2 m气温 T_2 和地表粗糙度 z_0 用序关系法确定的无量纲通风指数(I_v)Fig. 8 Dimensionless ventilation index (I_v) is determined by the order relation method of the surface temperature T_2 and roughness of z_0

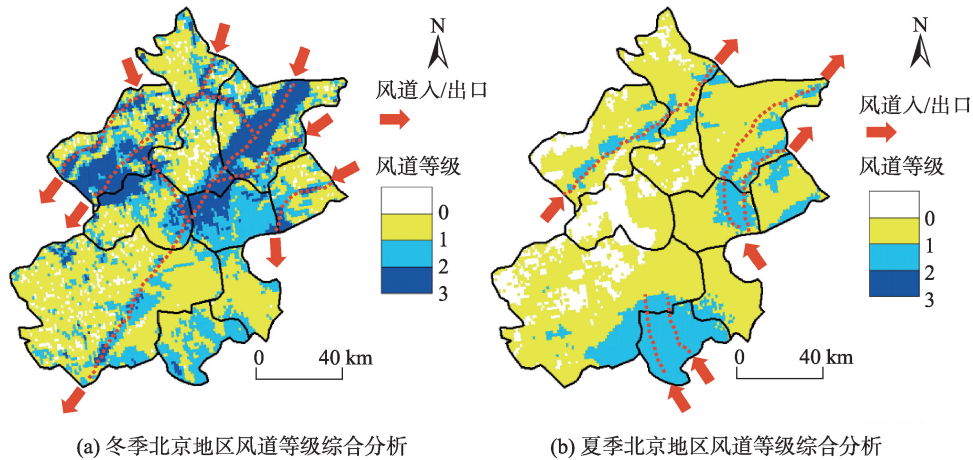


图9 北京地区风道等级综合分析

Fig. 9 Comprehensive analysis of ventilation grades in Beijing

京主城区。另外4个风道入风口在主廊道东西两侧,主要连接延庆县、密云县、昌平区、平谷区的山谷风,单条风道约70 km。总体而言,冬季的风道有较好的连续性,依托由东至西的几条风道,偏北风有可能穿过北京地区吹向下风向的毗邻省市。相比之下,夏季的风道贯通性较差,南部的风速带并没有与北部相通,其空气疏导能力较弱。

4.5 讨论

北京市现有的通风廊道规划,集中关注六环以内的中心城区。该规划提出的五条一级通风廊道是基于北京市目前的城市建设密度和开阔程度规定的五条线路,不是重新开辟,但在通风廊道规划范围内,未来建筑物的高度、密度等都将严格控制^[49]。包括城市气候图的建立,也集中关注了六环以内的区域^[41]。但建成区内可以改变的空间景观非常有限,主城区的通风廊道,更多的是为了提倡城市生态绿地的保留。当前北京城市化的发展模式仍然是以主城区向外围蔓延和卫星县城的扩展为主。然而,本研究发现,目前的通风廊道规划与人类活动的实际需求可能存在矛盾:冬季的颗粒物污染可能更多的来自于北京西北方向的自然源,且冬季的城市热岛实质上有助于节省供暖所需的能耗;而夏季需要更多的通风以缓解热岛效应的同时,也需要更好的扩散条件减轻京津冀区域污染源排放对北京空气污染造成的负担。

结合北京地区气候和地理资源提出的规划建议,可能对未来的发展更具实际指导价值。对北京的气候,过去有大量的研究^[25,46-48],但在北京地

区全域尺度的通风廊道识别,过去并不多见。有研究根据季风气候和整体地势高低对这个尺度上的北京通风廊道进行了定性分析^[50],但缺乏数据和模拟分析的支持。在未来,需要持续量化的探讨城市外缘通风环境改善所带来的效应。尤其关注北京市东南地区在京津冀区域联动中的规划,在城市群发展中谋求有助于夏季通风的规划设计,将风道规划纳入城市群总体规划、城市设计中,严格控制并优化风道内的建设活动,充分利用自然条件,开发城市通风潜力,从而改善城市内部微气候。值得关注的是,已经有少量新的研究对这一方面进行了探索,如北京副中心通州区的城市通风廊道规划策略研究,以及北京城市边缘区通风廊道型林地的营建方法研究等^[63-64]。而本文的结果,为北京地区划出了后续城市通风廊道规划中值得重点关注的区域。

5 结论

本文利用不同季节的中尺度数值模拟,结合动力学和热力学耦合分析,识别北京地区的潜在风道,在过去研究的方法学基础上整合出一种新的风道识别技术框架。同时,本文的研究区域为北京地区,即直辖市的行政边界内的全部区域。中尺度的模拟结果可作为中心城区细致规划模拟等工作的边界条件和外围通风环境。相较以往局限在北京六环以内的中心城区的研究,本研究空间范围的扩大不但意味着研究尺度的不同,同时也带来了区域通风上的一些新的认识。北京地区风道识别获得

的主要结论有:

(1)下垫面形态很大程度上影响着低层大气的运动状态。我们通过绘制北京的空气动力学粗糙长度,从动力学角度初步识别出北京不同区域的通风潜力。数值模拟输出的月均水平风场显示,只有在背景风较强的冬季,水平风速的分布才与下垫面的粗糙度保持高度一致,在北京城区东北方向存在一条明显的风道,在通过城区时受城市下垫面的拖曳影响出现显著的风速下降,在城市下风方向风速又有所回升。

(2)结合热力分析发现,夏季城市外的低温区域与盛行风向相悖,偏南方向上的补偿空间面积比冬季小且与作用空间的温差也小,因此流向城市的可利用风资源较冬季少。

(3)进一步结合近地面温度和粗糙长度加权后得到的通风指数,将通风评价结果分为4个等级,从北京市全域尺度分冬夏两季构建了通风廊道。冬季贯穿南北的风道从城市外围引入风资源,可能降低城市区域的热岛效应,提高城市自净能力。相比之下,在背景风较弱的夏季,风道贯通性较差,气流疏导能力弱。

参考文献(References):

- [1] 武夕琳,刘庆生,刘高焕,等.高温热浪风险评估研究综述[J].地球信息科学学报,2019,21(7):1029-1039. [Wu X L, Liu Q S, Liu G H, et al. Risk assessment of heat waves: A review[J]. Journal of Geo-information Science, 2019,21(7):1029-1039.]
- [2] 杨若,敖祖锐,张晶,等.中小尺度下植被冠层对屋顶表面温度的调控效应分析[J].地球信息科学学报,2019,21(7):1097-1108. [Yang R, Ao Z R, Zhang J, et al. Effect of vegetation canopy on rooftop surface temperature at city block and building scale[J]. Journal of Geo-information Science, 2019,21(7):1097-1108.]
- [3] 邹雨轩,吴志峰,曹峥.耦合土地利用回归与人口加权模型的PM_{2.5}暴露风险评估[J].地球信息科学学报,2019,21(7):1018-1028. [Zou Y X, Wu Z F, Cao Z. Assessing PM_{2.5} exposure risk by coupling land use regression model and population weighted model[J]. Journal of Geo-information Science, 2019,21(7):1018-1028.]
- [4] Grimmond C S B, Roth M, Oke T R, et al. Climate and more sustainable cities: Climate information for improved planning and management of cities, producers/capabilities perspective[J]. Procedia Environmental Science,

2010,1:247-274.

- [5] Wang W W, Zhou W, Ng E, et al. Urban heat islands in Hong Kong: Statistical modeling and trend detection[J]. Natural Hazards, 2016,83(2):885-907.
- [6] Dai J N, Wang X M, Dai W, et al. The impact of inhomogeneous urban canopy parameters on meteorological conditions and implication for air quality in the Pearl River Delta region[J]. Urban Climate, 2019,29:100494.
- [7] Oke T R, Mills G, Christen A, et al. Urban Climates[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2017.
- [8] Ren C, Yang R Z, 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.
- [9] 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, Chen 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.]
- [10] 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 C K, et al. A study of air path and its application in urban planning[J]. Urban Planning Forum, 2014(3):52-60.]
- [11] Ng E. Policies and technical guidelines for urban planning of high-density cities - air ventilation assessment (AVA) of Hong Kong[J]. Building and Environment, 2009,44(7):1478-1488.
- [12] 中华人民共和国国家发展和改革委员会,中华人民共和国住房和城乡建设部.国家发展改革委住房城乡建设部关于印发城市适应气候变化行动方案的通知[J].建筑节能,2016(3):5. [National Development and Reform Commission of the People's Republic of China, Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Notice of National Development and Reform Commission and Ministry of Housing and Urban-Rural Development on publishing plans for urban adapting to climate change[J]. Building Energy Efficiency, 2016(3):5.]
- [13] 赵红斌,刘晖.盆地城市通风廊道营建方法研究——以西安市为例[J].中国园林,2014(11):32-35. [Zhao H B, Liu H. Research on the methods of building ventilation corridors among basin cities: Taking the city of Xi'an as the example [J]. Chinese Landscape Architecture, 2014(11):32-35.]

- [14] 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, Lu 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.]
- [15] 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.]
- [16] 张云路,李雄.基于城市绿地系统空间布局优化的城市通风廊道规划探索——以晋中市为例[J].城市发展研究,2017,24(5):35-41. [Zhang Y L, Li X. Study on urban ventilation channels planning based on optimization of the spatial layout in urban green space: A case study of Jinzhong[J]. Urban Development Studies, 2017,24(5):35-41.]
- [17] 刘姝宇,余波,宋代风,等.基于气候分析的城市通风系统构建方法初探——以厦门市为例[J].城市建筑,2019,16(13):61-66. [Liu S Y, Yu B, Song F, et al. Preliminary study on construction method of urban ventilation system based on climate analysis: A case of Xiamen[J]. Urbanism and Architecture, 2019,16(13):61-66.]
- [18] 王伟武,黎菲楠,王嶝,等.基于通风潜力及风特征量化分析的城市风道构建[J].浙江大学学报(工学版),2019,53(3):470-481. [Wang W W, Li F N, Wang D, et al. Urban ventilation corridor construction based on ventilation potential and quantitative analysis of wind characteristics [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2019,53(3):470-481.]
- [19] 林定,申小云,朱勇兵,等.典型深街谷内树木空间配置对行人呼吸高度处气流的影响[J].地球信息科学学报,2018,20(9):1235-1243. [Lin D, Shen X Y, Zhu Y B, et al. Effect of spatial distribution of trees on the airflow pedestrian breath in the Typical deep street canyon[J]. Journal of Geo-information Science, 2018,20(9):1235-1243.]
- [20] Wang W W, Xu Y, Ng E, et al. Evaluation of satellite-derived building height extraction by CFD simulations: A case study of neighborhood-scale ventilation in Hong Kong [J]. Landscape and Urban Planning, 2018,170:90-102.
- [21] 陆麟,李丹,王子月,等.城市通风廊道数值模拟与优化设置研究[J].浙江建筑,2015,32(3):49-54. [Lu L, Li D, Wang Z Y, et al. Study on the numerical simulation and optimization setting for the city ventilation corridors[J]. Zhejiang Construction, 2015,32(3):49-54.]
- [22] 李磊,吴迪,张立杰,等.基于数值模拟的城市街区详细规划通风评估研究[J].环境科学学报,2012,32(4):946-953. [Li L, Wu D, Zhang L J, et al. Ventilation assessment on urban-block detailed planning based on numerical simulation [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2012,32(4):946-953.]
- [23] Blocken B, Stathopoulos T, van Beeck JPAJ. Pedestrian-level wind conditions around buildings: Review of wind-tunnel and CFD techniques and their accuracy for wind comfort assessment[J]. Building and Environment, 2016, 100:50-81.
- [24] Ding C, Lam K. P. Data-driven model for cross ventilation potential in high-density cities based on coupled CFD simulation and machine learning[J]. Building and Environment, 2019,165:106394.
- [25] 张亦洲,苗世光,戴永久,等.北京夏季晴天边界层特征及城市下垫面对海风影响的数值模拟[J].地球物理学报,2013,56(8):2558-2573. [Zhang Y Z, Miao S G, Dai Y J, et al. Numerical simulation of characteristics of summer clear day boundary layer in Beijing and the impact of urban underlying surface on sea breeze[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2013,56(8):2558-2573.]
- [26] 张丽英,裴韬,陈宜金,等.基于街景图像的城市环境评价研究综述[J].地球信息科学学报,2019,21(1):46-58. [Zhang LY, Pei T, Chen Y J, et al. A review of urban environmental assessment based on street view images[J]. Journal of Geo-information Science, 2019,21(1):46-58.]
- [27] 任庆昌,魏冀明,戴维.区域风环境研究与通风廊道建设实施建议——以珠三角为例[J].热带地理,2016,36(5):887-894. [Ren Q C, Wei J M, Dai W. Characteristics of regional wind environment and construction of ventilation corridors: A case study of the Pearl River Delta[J]. Tropical Geography, 2016,36(5):887-894.]
- [28] Liu Y S, Zhou Y, Li Y R. Ventilating Beijing cannot fix pollution[J]. Nature, 2016,53:441-441.
- [29] Chen Y, Zhang N, Zhu Y. High-resolution simulations of the urban thermal climate in Suzhou City, China[J]. Atmosphere, 2019,10:118.
- [30] 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.]
- [31] 刘红年,贺晓冬,苗世光,等.基于高分辨率数值模拟的杭州市通风廊道气象效应研究[J].气候与环境研究,2019,24(1):22-36. [Liu H, He X D, Miao S G, et al. A study on meteorological effect of the Hangzhou ventilation corridors

- based on high resolution numerical simulation[J]. *Climatic and Environmental Research*, 2019,24(1):22-36.]
- [32] Gu K, Fang Y, Qian Z, et al. Spatial planning for urban ventilation corridors by urban climatology[J]. *Ecosystem Health and Sustainability*, 2020,6(1):1747946.
- [33] 李璐,潘文卓,孙凯,等.基于大气环境分析的常州通风廊道研究[J].*环境工程*,2019(37):511-515. [Li L, Pan W Z, Sun K, et al. Study on Changzhou ventilated corridor planning based on atmospheric environment analysis[J]. *Environmental Engineering*, 2019(37):511-515.]
- [34] 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):1349-1356. [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*, 2020,22(6): 1349-1356.]
- [35] 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.
- [36] Wang W W, Ng E. Air ventilation assessment under unstable atmospheric stratification - A comparative study for Hong Kong[J].*Building and environment*, 2018,130(2):1-13.
- [37] Wei R, Song D, Wong N H, et al. Impact of urban morphology parameters on microclimate. *Procedia Engineering*, 2016,169:142-149.
- [38] 贺文慧,杨昕,汤国安,等.基于数字高程模型的城市地表开敞度研究——以南京老城区为例[J].*地球信息科学学报*,2012,14(1):94-100. [He WH, Yang X, Tang GA, et al. Research on sky view factor in urban area based on urban digital elevation model: A case study of Nanjing old city[J]. *Journal of Geo-information Science*, 2012,14(1): 94-100.]
- [39] Stewart I D, Oke T R, Local climate zones for urban temperature studies[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2012,93(12):1879-1897.
- [40] Ren C, Ng E, Katzschner L. Urban climatic map studies: A review. *International Journal of Climatology*, 2011,31(15):2213-2233.
- [41] He X D, Shen S H, Miao S G, et al. Quantitative detection of urban climate resources and the establishment of an urban climate map (UCMap) system in Beijing[J]. *Building and environment*, 2015,92(10):668-678.
- [42] Miao S G, Li P Y, Wang X Y. Building morphological characteristics and their effect on the wind in Beijing[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2009,26(6):1115-1124.
- [43] Miao Y C, Liu S H, Chen B C, et al. Simulating Urban flow and dispersion in Beijing by coupling a CFD model with the WRF model[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2013,30(6):1663-1678.
- [44] He X D, Li Y H, Wang X R, et al. High-resolution dataset of urban canopy parameters for Beijing and its application to the integrated WRF_Urban modelling system[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018,208:373-383.
- [45] Qiao Z, Xu X L, Wu F, et al. Urban ventilation network model: A case study of the core zone of capital function in Beijing metropolitan area[J]. *Journal of cleaner production*, 2017,168:526-535.
- [46] Miao S G, Chen F, LeMone M A, et al. An observational and modeling study of characteristics of urban heat island and boundary layer structures in Beijing[J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2009,48(3):484-501.
- [47] Liu, W D, Ren G Y, Yang P. Spatial and temporal characteristics of Beijing urban heat island intensity[J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2013,52(8): 1803-1816.
- [48] Li Z, Yan Z W, Kai T, et al. Changes in wind speed and extremes in Beijing during 1960-2008 based on homogenized observations[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2011,28(2):408-420.
- [49] 杜吴鹏,房小怡,刘勇洪,等.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*,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.]
- [50] 曾忠忠,袁靖智.北京市通风廊道的模拟研究[J].*华中建筑*,2017,35(11):36-41. [Zeng Z Z, Yuan J Z. Simulation research on Beijing ventilation corridor[J]. *Huazhong Architecture*, 2017,35(11):36-41.]
- [51] Du W P, Zhu R, Fang X Y. Construction of ventilation corridors and smog control in Beijing[J]. *Chinese Journal of Urban and Environmental Studies*, 2017,5(3):1750016.
- [52] Hansen M, Song X P. Vegetation Continuous Fields (VCF) yearly global 0.05 deg. [data set]. NASA EOSDIS Land Processes DAAC. Accessed 2020-02-18 from <https://doi.org/10.5067/MEaSUREs/VCF/VCF5KYR.001>.
- [53] 常鸣,樊少芬,王雪梅.珠三角土地覆被资料优选及在WRF模式中的初步应用[J].*环境科学学报*,2014,34(8): 1922-1933. [Chang M, Fan S F, Wang X M. Impact of re-fined land-cover data on WRF performance over the Pearl River Delta region, China[J]. *Acta Scientiae Cir-*

- cumstantiae, 2014,34(8):1922-1933.]
- [54] Chen S H, Sun W Y. A one-dimensional time-dependent-cloud model[J]. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 2002,80(1):99-118.
- [55] Iacono M J, Delamere J S, Mlawer E J, et al. Radiative forcing by long-lived greenhouse gases: Calculations with the AER radiative transfer models[J]. *Journal of Geophysical Research Atmosphere*, 2008,113:D13103.
- [56] Chou M D, Suarez M J. A solar radiation parameterization (CLIRAD-SW) for atmospheric studies[R]. NASA Tech. Memo, 1999,10460(15):1-42.
- [57] Matsui Y, Zhang Y F, Paulson R F, et al. Dual role of a C-terminally truncated isoform of large tumor suppressor kinase 1 in the regulation of hippo signaling and tissue growth[J]. *DNA and Cell Biology*, 2019,38(1):91-106.
- [58] Chen F, Dudhia J. Coupling an advanced land-surface: Hydrology model with the Penn State/NCAR MM5 modeling system. Part I: Model implementation and sensitivity [J]. *Monthly weather review*, 2001,129:569-604.
- [59] Hong S Y, Noh Y, Dudhia J. A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes [J]. *Monthly weather review*, 2006,134(9):2318-2341.
- [60] National Centers for Environmental Prediction/National Weather Service/NOAA/U.S. Department of Commerce (2000): NCEP FNL Operational Model Global Tropospheric Analyses, continuing from July 1999. Research Data Archive at the National Center for Atmospheric Research, Computational and Information Systems Laboratory. <https://doi.org/10.5065/D6M043C6>.
- [61] Smith F B, Carson D J. Some thoughts on the specification of the boundary-layer relevant to numerical modeling[J]. *Boundary Layer Meteorology*, 1977,12(3):307-330.
- [62] Ek M B, Mitchell K E, Lin Y, et al. Implementation of Noah land surface model advances in the National Centers for Environmental Prediction operational mesoscale Eta model[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2003,108(D22),8851.
- [63] 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 X, 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.]
- [64] 徐一丁,杨子蕾,李运远.北京市城市边缘区通风廊道型林地营建方法研究——以黑庄户地区为例[J].*北京林业大学学报*,2020,42(2):135-148. [Xu Y D, Yang Z L, Li YY. Construction method of ventilation corridor woodland in urban fringe area of Beijing: Taking the Heizhuanghu District as an example[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2020,42(2):135-148.]