

DOI: 10.5846/stxb202009302525

孙武, 沈子桐, 乔志强, 孙靛, 张佳滨, 张坤, 许伟. 城市主城区立体模型的构建与风环境模拟——以广州主城区为例. 生态学报, 2021, 41(7): 2632-2641.

Sun W, Shen Z T, Qiao Z Q, Sun J, Zhang J B, Zhan K, Xu W. Construction of the three-dimensional model and simulation of the wind field in central urban districts: A case study of Guangzhou central urban districts. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(7): 2632-2641.

城市主城区立体模型的构建与风环境模拟 ——以广州主城区为例

孙 武^{1,*}, 沈子桐¹, 乔志强¹, 孙 靛¹, 张佳滨¹, 张 坤¹, 许 伟²

1 华南师范大学地理科学学院, 广州 510631

2 广东省建筑科学研究院集团股份有限公司, 广州 510500

摘要:以 22 km×21 km 的广州主城区为例,以 40 m 建筑间距作为风道宽度低限、用容积高度对建筑高度赋值和垂向拔高为建模特色,概括构建了城市尺度的立体模型。在此基础上,分别模拟了广州主城区中性流条件下,弱风(2 m/s)和强风(5 m/s)、近地面 10、25、50 m 三个高度的风环境。模拟表明:来流 5 m/s 下主城区存在不同风速等级、不同平面形态以及不同高度面的风道;白云山、珠江新城等面积较大的地形或建筑高地形成了减速明显的背风区条带,并相互组合形成了重要的风口和具有较高基面的强风道;在不同高度上主城区风速均由周边向城市中心降低;风道风速强烈地依赖于风道走向,风道风速与走向夹角呈三次函数递减,两者拟合优度 R^2 为 0.512。模拟结果很好地呈现了城市尺度宏观地形白云山和建筑密集区相互间的作用,反映了城市尺度模型构建与模拟的优势。

关键词:城市模型;中性流;CFD;风道;风环境;广州

Construction of the three-dimensional model and simulation of the wind field in central urban districts: A case study of Guangzhou central urban districts

SUN Wu^{1,*}, SHEN Zitong¹, QIAO Zhiqiang¹, SUN Jing¹, ZHANG Jiabin¹, ZHANG Kun, XU Wei²

1 School of Geography, South China Normal University, Guangzhou 510631, China

2 Guangdong Provincial Academy of Building Research Group Co., Ltd., Guangzhou 510500, China

Abstract: An urban-scale three-dimensional model is constructed based on the workstation platform, and the method of CFD is used to simulate the urban wind environment under the condition of neutral current and identify ventilation channels on different spatial scales, which will help to enrich the methods and theories of ventilation channels planning. Through combining the generalized construction of the urban-scale three-dimensional shape with the identification of ventilation channels organically, this paper takes 22×21 km of main urban area of Guangzhou as an example, takes 40 m of building spacing as the low limit of wind tunnel width, uses the volume height to assign the building height and vertical elevation as the modeling characteristics, and builds a simplified and generalized three-dimensional model of urban scale. The wind environment near the ground at the height of 10 m and 25 m under the condition of neutral current in Guangzhou central urban districts is simulated under different combinations of weak wind (2 m/s) and prevailing wind (5 m/s) and southeast and northwest wind directions through the process of urban-scale three-dimensional modeling, grid division, calculation and solution. The simulation shows that: whether it is weak wind or prevailing wind, there exist ventilation channels with

基金项目:国家自然科学基金项目(41771001);广州市科技计划项目(201704020136)

收稿日期:2020-09-30; 修订日期:2020-12-05

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: sunw@senu.edu.cn

different wind speed levels, different plane shapes and different height surfaces in central urban districts; large terrains or building highlands such as Baiyun Mountain and Pearl River New Town form obviously leeward area with obvious decreasing speed, which combine with each other to form important vents and strong ventilation channels with higher bottom surfaces. The wind speed in Guangzhou decreases from the periphery to the city center at different heights averagely. The wind speed and direction of the downwind ventilation channel under the northwest wind and north wind decrease in cubic function. The simulation results show the interaction between Baiyun Mountain and dense building areas on a macro-scale and reflect the advantages of urban-scale model construction and simulation. Meanwhile, it shows that the technical route of constructing urban-scale three-dimensional model and simulation for the method of CFD based on workstation is simple and feasible.

Key Words: urban model; neutral current; CFD; ventilation channels; wind environment; Guangzhou

合理的城市通风廊道规划有助于缓解城市热岛效应及雾霾天气等环境问题。不同空间尺度风道的辨识与城市不同级别立体模型的概括密切相关^[1-3]。因而,探讨在城市立体模型概括构建的基础上,基于计算流体力学软件(CFD)模拟中性流条件下的风环境,并辨识不同空间尺度风道,将有助于丰富风道规划的方法与理论。

在风道的辨识研究中,主要有 GIS+RS、迎风面密度(λf)与动力粗糙度(z_0),以及 CFD 和中尺度气象模式(MM5)等多种方法,最近也出现了最小成本路径(LCP)法^[4-5]。通过土地利用、建筑、地形以及遥感影像等多种数据叠加,运用风洞试验和数值模拟等多种研究方法,由相互验证来辨识风道,已成为目前研究的主流^[6-11]。Ng^[12]在确定香港风道时,分析了不同高度的 λf ,利用 MM5 进行风环境模拟,选取小区域在 CFD 平台下进行建筑物拆建前后风场的对比分析。香港风道规划所采用的技术路线深刻地影响了后来武汉、重庆、深圳和福州等城市的风道规划。2012 年武汉市用 100 m 格网计算 λf ,将武汉市风道分为宏观、中观和微观 3 个等级,并确定了重要风道口的数量及位置^[13]。此外,配合雷达对城市风属性的监测,也成为风道规划中新的支撑手段^[14]。Su^[7]全面评价了风道在中国城市的应用,总结了城市风道辨识、评价和规划的技术路线。上述方法共同的特点是基于格网内 z_0 或 λf 来确定风道。

同 z_0 相比,由于 λf 指标相对统一,目前应用更加广泛。尽管如此,两个指标也有同样的不足。在确定风道时,格网尺度在 100—200 m 之间,是否存在最合适的风道格网尺度?两个指标计算时,一般采用建筑的相对高度,而对于地形复杂的城市,显然适用性差。考虑到建筑物之间得相互遮挡,计算时要选择相对独立的风场系统。而高大建筑物产生的回流与扰流往往会影响其他格网。受宏观地形的影响,城市内各格网的实际风向并不完全同盛行风一致,有些甚至会出现同盛行风相反的情况。最后,基于格网所确定的风道,要落实于规划实际并具有可操作性,从分辨率的角度,还有一定的距离。

因此,有必要寻找一种新的风道辨识的方法,使其具有具体的风道属性,并能进行风况的模拟验证,以指导风道的规划与应用。城市风道辨识与城市立体形态的概括密切相关。城市尺度立体形态建模城市研究的基础,也是城市尺度的风道模拟辨识与验证的重要途径。城市单体建筑物高度的概括目前还没有像地形那样相对统一成熟的方法。加上计算机性能的限制,城市尺度三维模型的表达概括及其模拟应用较少^[15-20]。

围绕城市尺度风道研究的目标,为了突出主要矛盾,也没有必要考虑所有尺度的风道。风道有尺度等级,城市立体形态的概括也有尺度。城市尺度的立体形态对应城市尺度的风道,两者具有密切地联系。因此,如何将城市立体形态的概括构建与城市尺度风道的辨识有机地结合起来是目前城市通风廊道的研究中亟须解决的关键问题之一。

综上所述,以特大型城市广州为例,本文将城市立体形态的概括构建与风道的辨识有机地结合起来,以工作站作为平台,探索面向 CFD 构建城市尺度的立体模型的方法。在此基础上,模拟中性流条件下的风场,辨识不同空间尺度的风道,为城市规划以及城市宜居环境的优化提供科学依据。

1 数据来源与研究区概况

广州主城区单点建筑物高度与面属性数据源于对 2015 年地形图的矢量化与解译。根据谷歌影像上建筑物的阴影高度,将新增建筑物数据更新至 2017 年。研究区的数字高程模型 (DEM) 为 5 m 的等高距。基于 ArcGIS 平台,对上述多源数据进行配准校正,并解译相应时期的遥感影像统一建库。

本文所划定的广州市主城区是以珠江新城为中心半径约为 12 km 的范围,包括了整个海珠区、天河区以及白云区的大部分。主城区建筑用地密度高、车流量大、建筑高度高。外围区域建筑密度和高度低,水域、绿地和丘陵面积大,包括了北部的白云山、龙洞、火炉山等丘地,南部的珠江前后航道、海珠湿地、万亩果园等。建模范围南北 22 km,东西 21 km,面积约 462 km²,包括了中部城市建筑密集区、北部白云山低丘以及平坦的东南部湿地三大地理单元,所建模型能反映城市建筑密集区与周边地形间风场的相互作用(图 1、图 2)。

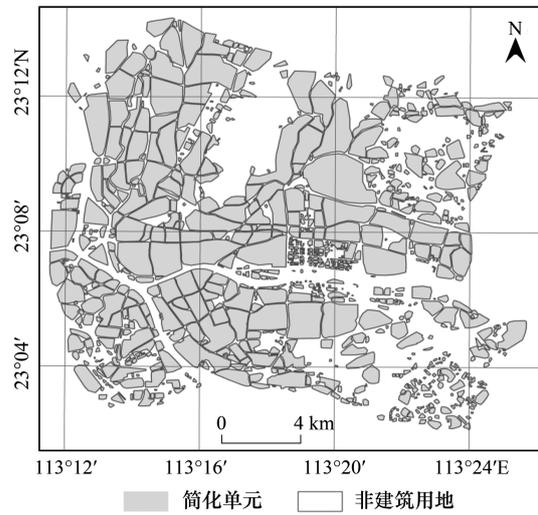


图 1 以 40 m 间距合并的立体模型的平面单元
Fig.1 A plane element of a three-dimensional model merged at a distance of 40m

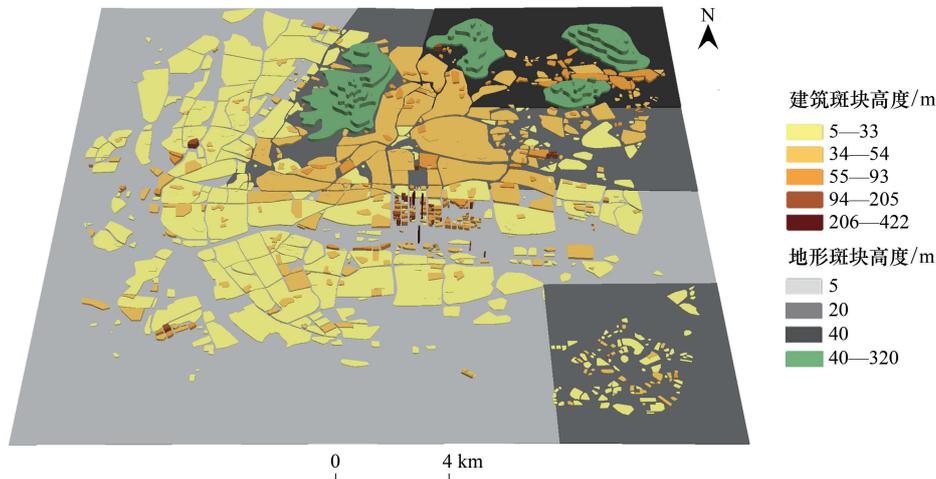


图 2 建筑和地形综合的城市模型
Fig.2 Urban model integrated with architecture and terrain

2 城市尺度立体模型的概括与构建

本文以 40 m 建筑间距作为风道宽度低限、用容积高度对建筑高度赋值和垂向拔高为建模特色,简化概括构建城市尺度的立体模型。

2.1 以 40 m 建筑间距作为风道宽度低限

对于平原型城市,建筑物之间的间距决定了风道的基本宽度。在进行风道识别时,注重建筑物之间的间距而不是道路的宽度,比道路路网在确定风道时更为科学准确。利用 ArcGIS 按一定单体建筑物间距要求,可聚合产生新的建筑单元,新聚合面形状接近自然边界,弥补了格网法建模边界过于机械的不足。

我国将城市道路分为快速路、主干路、次干路和支路,其中大城市快速路红线宽度在 50—60 m 之间,主干路 40—55 m,次干路和支路则为 30—50 m 和 15—30 m。由于 40 m 风道的下限宽度几乎包括了次干路以上的道路以及非建筑低地,覆盖面广。对于城市尺度风道的辨识,该风道宽度下限标准能突出主要矛盾,综合反映城市尺度风道的相互作用及其风道体系。

根据 40 m 的间距合并原则,相应地对整个模型面积低于 1600 m²或长短轴低于 40 m 的图斑、空洞进行剔除。按容差 40 m 简化边界面,移除多余的弯曲(图 1)。

2.2 以容积高度为建筑聚合单元高度赋值

在确定了平面概括单元后,高度的表达有多种方法。若将单元总面积作为总用地面积,得到的城市高度将远远低于实际建筑物高度。但若用建筑基地总面积,高度表达相对正常,这种方法已得到广泛地应用^[21-25]。

本文先根据单体建筑提取所在地形的高程,高程累加建筑高度得到建筑的绝对高度,再通过 40 m 聚合面上各自然单元建筑基地面积的容积高度来表达高度。

$$H = \frac{\sum h_i \times S_i}{S'} \quad (2)$$

式中, H 、 h_i 、 S_i 、 S' 分别是区域内建筑物容积高度、第 i 栋建筑的高度、第 i 栋建筑的基地面积、建筑基底总面积。

2.3 垂向高度的提高

用 40 m 间距聚合后,经过删除与融合,共有 2145 块建筑斑块。小比例尺模型建筑高度的概括必然产生模型的扁平化。格网或自然单元面积越大,扁平化越明显。在风洞模拟中,如要增大雷诺数,就得增强表面的粗糙度或对垂向比例进行放大。长期以来,适当地加高垂向比例即选择变形比例尺是通常的做法^[26-36]。基于上述原理,本文不是简单地同比例拔高所有合并单元,而是利用格网法的特点,通过面积大小不同聚合单元的赋值,实现差异性拔高。具体方法是:在前面 40 m 的聚合面进行容高表达的基础上,再对 ≥ 7 层的建筑按 40 m 间距进行合并并赋容积高度。由于高于 7 层(21 m)建筑的聚合面面积远小于所有建筑的合并,容高高度会有所提高。最后,为了突出高层建筑、标志性建筑对城市风场的影响,叠加突出显示超过 100 m 的单体建筑。

基于综合 DEM 数据,概括后的城市模型高度由基底为 DEM 形成的非建筑面和 3 个建筑高度面组成。利用 40 m 建筑间距,对所有单点建筑物聚合构成底层;对 ≥ 7 层单点建筑物聚合构成中层;最后叠加超过 100 m 的高层建筑为高层。突出显示高层建筑、标志性建筑的方法在上海的模型概括中也得到了应用^[37]。

2.4 构建建筑和地形综合的城市模型

使用 ArcGIS 平台中高级编辑(Advanced Editing)下的平滑和概括功能,大幅度减少不必要的节点,规则其平面形状、辅助进行拓扑错误检查。主建成区北部为 300 m 的白云山(最高海拔为 382 m)、火炉山丘陵,中部以及西南部、西北部地形以平原为主,高差基本在 30 m 以内,东南部地形由海拔稍高的零散区域组成。宏观地形对城市风场的影响是城市尺度模型模拟中的重要方面,但鉴于计算机性能与 CFD 的限制,难以反映具有坡面的白云山复杂地形。本文通过 5、20、40 m 和 20—320 m 四个绝对高度以台阶形式对白云山进行简化。研究区域内,海拔高度在 5 m 以上的区域仍占主体,白云山部分只占约 1/3。此外,利用 3D Analyst Tools 将 DEM 数据转换成等高线,对山体的简化只采用 80 m 的等高距,其他地形的简化则采用 10 m 的等高距。转换后的等高线若有不闭合,需要进行闭合操作。

模型简化与高度赋值均在 ArcGIS 平台中完成,该平台自带三维建模组块 ArcScene 可以较好显示广州市主建成区的立体形态,但输出格式有限且不能接入到网格划分软件 ICEM CFD 中,因此需要将模型导出为 CAD 格式在 Rhino 软件中进行三维建模。Rhino 软件中无法识别高度属性,需要手动根据简化的城市平面形态进行拉伸。对计算后的容积率高度取整,并按不同的高度分别导出为 CAD 格式,构建完成建筑和地形综合

的城市模型(图 2)。

3 网格划分及边界条件的设置

3.1 计算域的构建

对于城市风环境计算域构建尚无统一的标准。COSTAction732(2007)建议计算域的厚度为 6H(H 为模型的最高高度),宽度应以模型两侧边界向外各延伸 5H 距离,入口一侧距离模型为 5H,出口一侧距离模型为 10H^[38]。日本建筑设计科学院(AIJ)关于建筑风环境的指南中建议计算域的入口为 3—5H,厚度为 4H,两侧宽度为 3—5H,出口 5—7H^[25]。本文在日本建筑设计科学院(AIJ)建议的基础上出口侧最终确定为 10H,计算域两侧宽度均为 5H,厚度采用 4H,入口侧也为 5H。

计算域的实体构建主要在 Rhino 软件中通过布尔差集运算得到,然后导出到可以接入 ICEM CFD 中的 IGES 格式。

3.2 ICEM 中的网格划分

由于山体简化后为形状极不规则的曲面,本文在划分网格时采用非结构网格。参数设置适用受计算机性能约束的城市尺度的风环境模拟(表 1)。

3.3 边界条件及其设定

入口的风速剖面为:

$$U(z) = U_g \times \left\{ \frac{z}{H_g} \right\}^\alpha \quad (3)$$

式中, $U(z)$ 为某一高度的平均风速; U_g 、 H_g 分别代表参考高度的平均风速和梯度风高度; z 为参考高度; α 指地表面粗糙度。东南风(夏季风)风向下的来风主要经过番禺农地、湿地与城镇,选取 B 类边界层 α 为 0.16。而在北风或西北风(冬季风)风向下的来风主要经过北部的丘陵山区,选取 C 类标准, α 为 0.22。两风向下参考高度均为 10 m。据五山气象站统计,从 1991 年至 2000 年,广州市年平均风速最高为 1.8 m/s,最低为 1.3 m/s,月平均风速介于 1.5—1.8 m/s 之间。日平均风速小于 1.5 m/s 的天气状况约占 70.7%,每月大概有 21 天为静风,弱风或静风频率较高^[39]。Bornstein 等认为当风速超过 4 m/s 时,可以有效缓解城市内部的热岛效应^[40]。本文选择东南风和西北风两个风向,入流为 5 m/s 和 2 m/s 分别代表强风和弱风条件(表 2)。计算步数统一设置为 1000 步。对速度、动量项和湍动能的收敛残差设置均低于 10^{-4} ,连续项收敛效果较差,故将标准放宽到 10^{-3} 。

4 模拟结果分析

用近地面相对统一的高度面表达研究区域的风环境,有利于风道的辨识与风场的对比。由于主城区林木和多层建筑形成了除地面以外的 9—21m 波状起伏第二个风道高度面,本文尝试重点反映相对于地面 10、25、50 m 三个高度面的风环境。模型北部的白云山由 4 个高度台阶组成,CFD 同一绝对高度的云图截面无法反映相对同一高度整个研究区域的风场环境。鉴于此,分别截取四块地形台阶绝对高度截面为 15、20、30、50 m 的风速云图,拼合得到整个研究区域近地面近似 10、25、50 m 三个相对高度处的风速云图。图 3、图 4 分别表示了来流弱风(2 m/s)和强风(5 m/s)时,东南和西北两风向下的风道与风场环境。图中白色表示两个高度的建筑截面,北部淡绿色的四块为白云山两个高度的丘陵截面。根据风速云图,广州市主城区风道与风场有如下几个特征:

4.1 弱风环境下风道作用不明显

弱风条件下(2 m/s),在近地面 10 m 高度整个广州市主建成区的风速基本在 0.8 m/s 以下,由道路组成的风道风速低于 0.35 m/s,且风道之间风速差异小,风道作用不明显。珠江作为城市尺度最宽的风道风速也只在 1 m/s 左右。西北风下,白云山西侧与南部的公园风速在 1 m/s 左右,是城区内部通风较好的区域。在

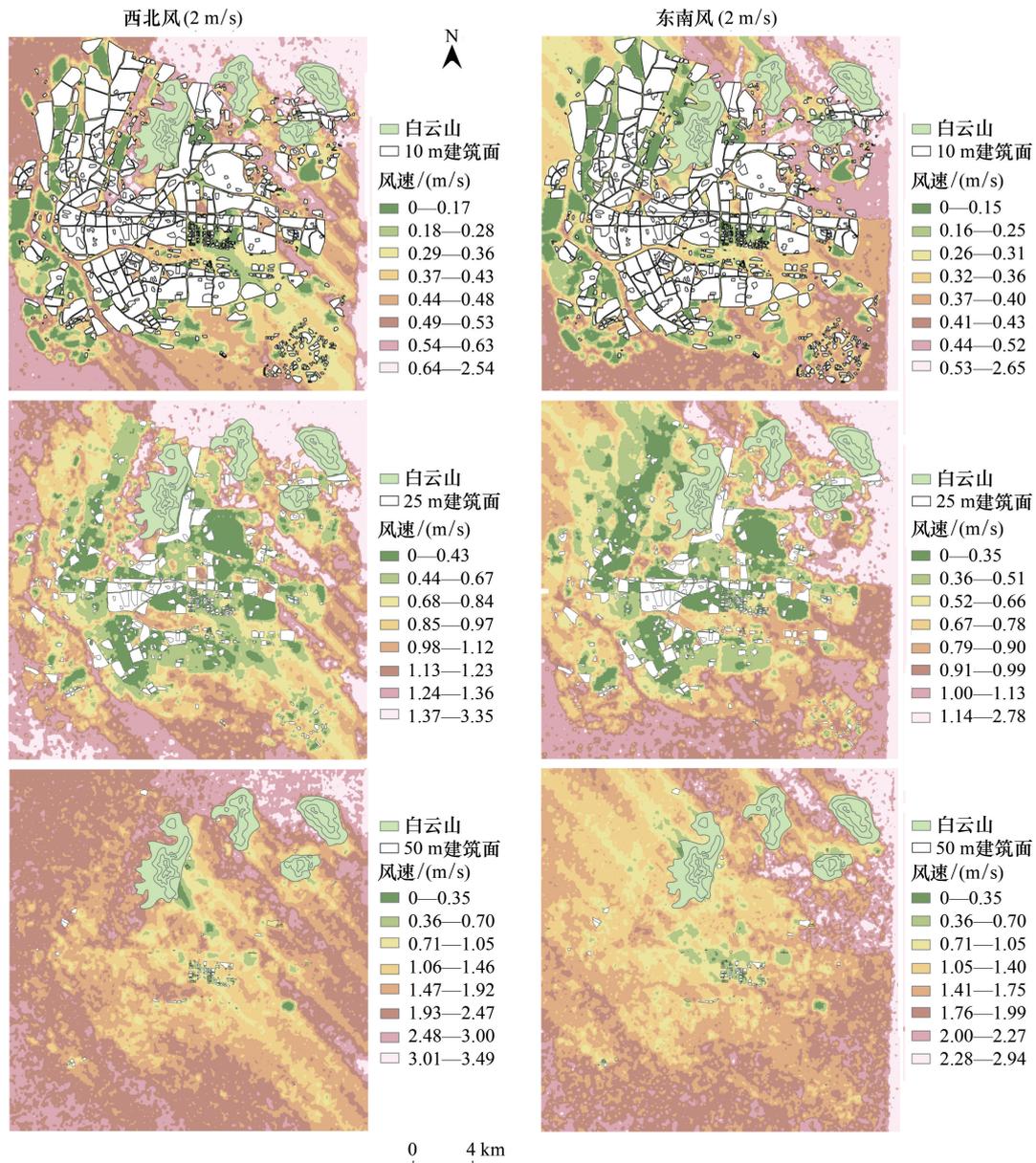


图3 2 m/s 来流下近地面 10、25、50 m 高度的风速

Fig.3 Wind speed of 10 m, 25 m and 50 m above the ground with incoming flow of 2 m/s

25 m 高度,风速并没有明显加强,主城区大部分风速仍在 1 m/s 左右。50 m 高度除了四块白云山丘陵和零星分布的超过 50 m 聚合体的建筑外,主城区风速差异不大,多在 3 m/s 左右。两风向下城市整体通风状况不良(图 3)。若考虑 2 m 的行人高度,风况会更差。主城区静风频率达 12%,秋季各类风向的平均风速总体略高于冬季。出现频率较多的风向往往风速也较大,秋冬两季的北风平均风速分别为 1.98 m/s 和 2.05 m/s,是全年风速的最大值,春夏两季则在东南风向下平均风速最大,分别为 1.93 m/s、1.84 m/s。因此,对于全年以弱风和静风状态为优势频率的主城区,弱风环境下风道风速低、差异小,风道作用的降低具有极大的生态风险。

4.2 5 m/s 来流下风道类型多种多样

在 5 m/s 来流不同盛行风下,不同平面形态、不同风速等级以及不同高度面的风道共存(图 4)。风道平面形态类型多样,除了线性特征突出的道路和河道类(珠江)风道外,还有公园、湿地以及建筑稀疏区域组成的面积不等、走向各异的不同尺度风道。如白云山南侧的公园、白云山西侧的建筑稀疏区域等。来流风速增

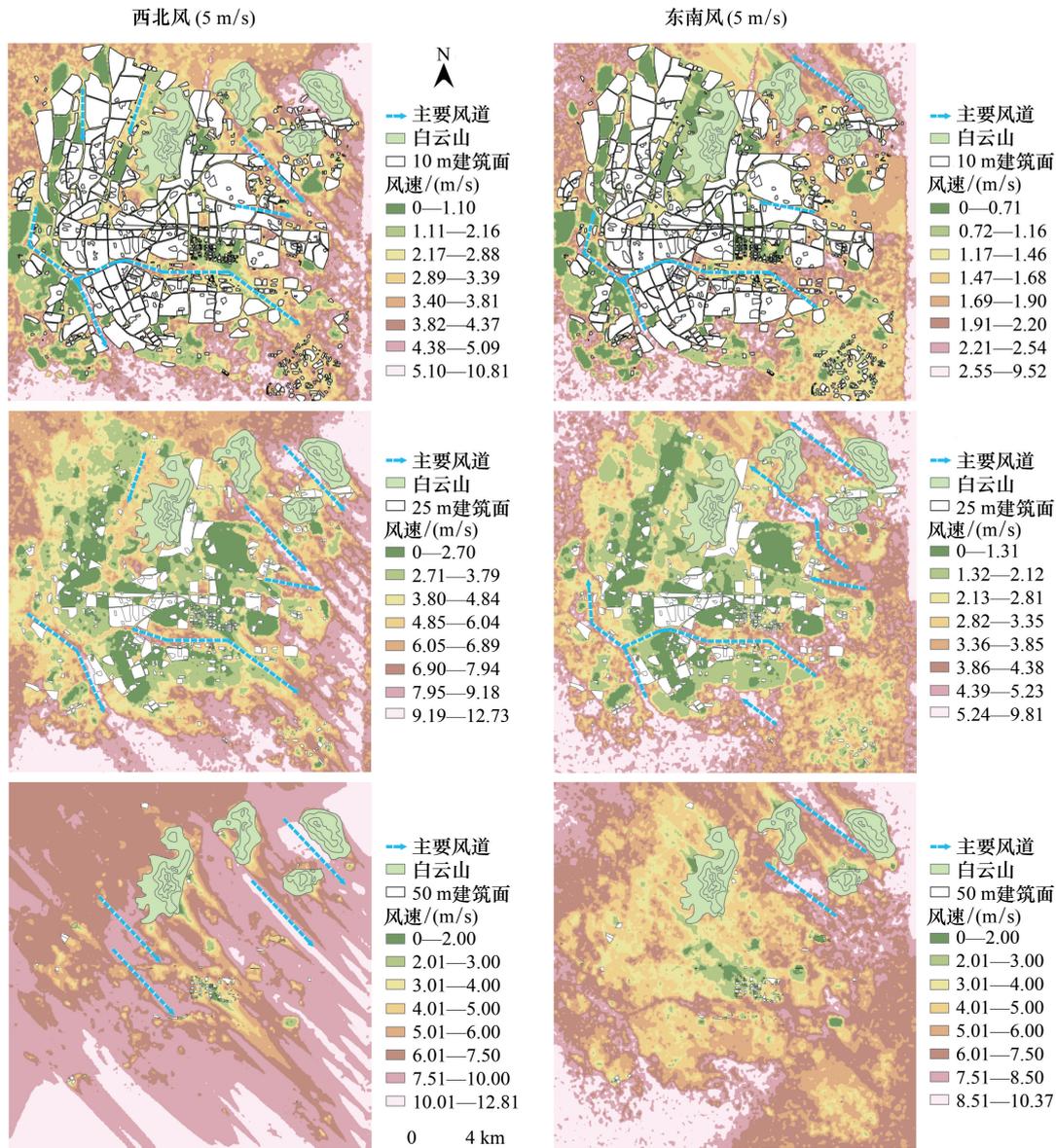


图4 5 m/s 来流下 10、25、50 m 近地高度的风速

Fig.4 Wind speed of 10 m, 25 m and 50 m above the ground with incoming flow of 5 m/s

加到 5 m/s, 外围风速基本保持在 5 m/s 以上, 城市内部的风道风速在 2—3 m/s 左右。迎风区域内狭长风道的通风效果优于越秀区、天河区、海珠区中部等城市内部的风道; 长度较长、宽度较宽的风道通风效果往往优于长度较短的狭窄风道。在不同风向下, 珠江航道的风速在 6 m/s 左右。珠江和广园快速路为城市尺度通风最好的风道。

除了以地面作为高度面的风道外, 还存在以 9 m (三层) 到 25 m (七层) 楼顶面作为高度面的风道。在 25 m 高度面上, 风道的宽度与走向明显同 10 m 高度面具有差异。如白云区西部的低矮工业区、荔湾区、海珠区沿珠江周围的老城区等, 这些建筑物的屋顶与两侧建筑物相比, 高度相对低矮, 成为 10 m 高度截面上连续和宽阔的通风廊道。在 50 m 高度, 北部盆地与谷底的多层建筑 25 m (七层) 同周边的地形相结合, 构成了通风底面, 形成了风道或风口, 在两类背景风下通风廊道显得特别突出。

尽管所建模型能很好地辨识出不同的风道, 但不同风道由于空间尺度、走向、高度以及在主城区所处的位置不同, 所发挥的功能及其对城市的通风作用仍需要进一步研究。

4.3 背风区影响明显

无论是弱风还是强风,白云山、珠江新城等巨大的地形或建筑单元形成的背风区条带在 3 个高度面上表现明显,反映了城市尺度宏观地形对风场的影响,以及地形与建筑物之间的相互作用。东南风向下近地面 10 m 高度风速拼接云图,白云山西侧形成西南东北走向,约 10×3 km 的背风条带,在 25 m 高度表现得较为明显,表现了 300 m 高度的白云山在东南与西北风向下对主城区的影响。正是由于东南风时白云山背风区的影响,总体上使得东南风下白云山西侧风环境弱于西北风。相反,西北风下,紧邻白云山东南的主城区建筑密集区就处于风影之中。同样,作为整个城市屋脊的珠江新城(94—205 m)背风区,也随着风向发生变化,影响来流下方的风环境。东南风下,背风区影响越秀区域,西北风下风影处在珠江上空。类似地,面积小、高度中等的地形或建筑单元也可形成面积较小的背风区。在 50 m 高度,北部白云山丘陵形成的背风低速条带与高速通风廊道均与来流平行绵延数公里,交错平行分布,形成了城市尺度风场空间格局的显著特点(图 4)。

4.4 主城区风速周边与内部差异大

在迎风区或者背风区的气流恢复区是整个城市通风环境最好的地区,弱风条件下外围在 0.5 m/s 以上,盛行风下外围在 5 m/s 以上。相反城市内部,除了面积较大的白云山南侧的公园绿地以及与盛行风走向平行的珠江段,其他区域与风道风速均低于来流。该特点在 3 个高度面上均有体现。核心区珠江新城为城市屋脊;老城区及其珠江新城周边,高度次之;边缘区的白云山西侧、海珠湿地及其周边,建筑密度小,高度低。因此,城市高度与密度由中心向四周递减的特征,造成了主城区内外的风速差异(图 3、图 4)。

4.5 风道风速强烈依赖风道走向

为进一步量化风道走向与风速两者之间的关系,选取近地面 10 m 高度 69 条具有代表性的城市通风廊道,通过 ArcGIS 平台识别走向与主导风向的夹角。在风道中线上,除首尾两个采样点外,每隔 500 m 取一个采样点。风道长度小于 500 m 的首尾两端和中点选取 3 个采样点,取采样点的平均风速作为该条风道的风速。结果表明,西北风和北风风向下风道风速与走向呈三次函数递减,拟合优度 R^2 为 0.512。风道走向同风向一致时,发挥的通风效果最好,夹角在 30° 以上,通风效果明显减弱并保持相对稳定(图 5)。上述发现与前人研究一致^[41-42]。而东南风 R^2 只有 0.144,原因有待深入研究。

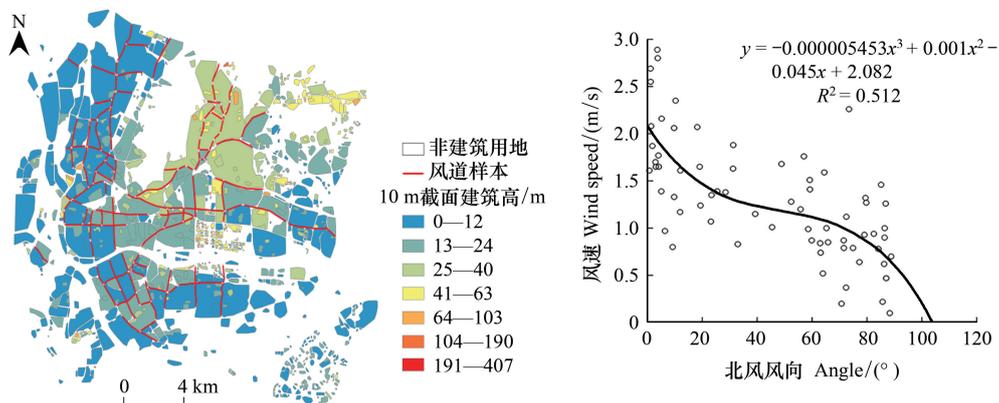


图 5 风道走向与风速间的关系

Fig.5 Relationship between wind channel direction and wind speed

5 结论与讨论

(1)以 40 m 建筑间距、容积高度和垂向拔高为建模特色概括构建城市模型。模拟结果很好地呈现了城市尺度宏观地形和建筑单元相互间的作用特征,反映了城市尺度模型构建与模拟的优势。通过城市三维建模、网格划分、参数设置,所探索的基于工作站面向 CFD 进行城市尺度中性流条件下风道辨识与风环境模拟

的技术路线,将有助于丰富风道规划的方法与理论。

(2)可以辨识出不同平面形态、不同风速等级以及不同高度面的风道。除了以地面作为高度面的风道外,还存在以9 m(三层)到25 m(七层)楼顶面作为高度面的风道。50 m高度由白云山丘陵形成的风道明显。白云山、珠江新城等地形或建筑单元形成高地,无论是弱风还是盛行风,在不同高度上形成了明显的背风区条带,影响下游的风环境。北部丘陵形成的背风低速带与通风走廊高速带与盛行风平行长达数公里,交错平行分布,成为城市尺度风场空间格局的显著特点。在不同高度上,广州市风速由周边向中心降低。

(3)西北风和北风风向向下风道风速与走向呈三次函数递减,拟合优度 R^2 为0.512,这对于城市风道规划,具有重要的参考价值。

在弱风条件下,在近地面10 m高度整个广州市主建成区的风速基本在0.8 m/s以下,风道风速基本低于0.35 m/s,且风道之间差异小。这对于全年基本处于弱风或静风状态的广州市,城市风环境具有极大的生态风险。风道规划中,风道多高度面的存在、风速由边缘向中心递减,以及白云山与建筑单元所形成的背风区的特点必须是风道规划中需要考虑的问题。

本文的技术路线,受制于目前计算机硬件水平,对白云山的地形采用了四级台阶的简化,没有精确的反映坡面立体形态,未来研究中可以更加精细地构建城市立体形态,以提高模拟精度。

区域风环境模拟结果的验证,特别是大尺度空间范围的验证一直是风环境领域研究的难点。目前城市尺度风环境的探讨主要通过数值模拟、物理风洞模拟、ArcGIS平台以及野外实地观测等技术手段。本文所研究的范围有462 km²,地面定点与自动气象站点的数量少,其风向与风速数据不足以表达区域内部的差异。另外无论是物理还是数值模拟,所构建的模型均进行了概括简化,模拟结果与实测数据相互之间的对比还存在尺度的转换问题。尽管如此,为了提高模拟结果的说服力与应用价值,不同研究方法结果间的相互对比,将始终是课题努力的方向。

参考文献(References):

- [1] Sun W, Li T. Building height trends and their influencing factors under China's rapid urbanization: a case study of Guangzhou, 1960 - 2017. *Chinese Geographical Science*, 2020, 30(6): 993-1004.
- [2] 孙武, 王义明, 王越雷, 陈东梅, 陈世栋. 珠江三角洲地面风场的特征及其城市群风道的构建. *生态学报*, 2012, 32(18): 5630-5636.
- [3] 李大全, 孙武, 欧阳睿康, 黄盛, 高梦媛, 李庆祥, 黄启明. 湍流度随高度的变化及其对城市宏观地形的依赖. *热带地理*, 2019, 39(3): 365-376.
- [4] Qiao Z, Xu X, Wu F, Luo W, Wang F, Liu L, Sun Z Y. Urban ventilation network model: a case study of the core zone of capital function in Beijing metropolitan area. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 168(Dec.1): 526-535.
- [5] Wong M S, Nichol J E, To P H, Wang J. A simple method for designation of urban ventilation corridors and its application to urban heat island analysis. *Building and Environment*, 2010, 45(8): 1880-1889.
- [6] Emmanuel R, Lin T P, Ng E, Duarte D H S, Mills G. *Urban climate challenges in the tropics: rethinking planning and design opportunities*. London: Imperial College Press, 2016.
- [7] Su N, Zhou D, Jiang X. Study on the application of ventilation corridor planning in urban new area: a case study of Xixian new area. *Procedia Engineering*, 2016, 169: 340-349.
- [8] Wang R, Ren C, Xu Y, Lau K L, Shi Y. Mapping the local climate zones of urban areas by GIS-based and WUDAPT methods: a case study of Hong Kong. *Urban Climate*, 2018, 24: 567-576.
- [9] Yuan C, Ng E, Norford L K. Improving air quality in high-density cities by understanding the relationship between air pollutant dispersion and urban morphologies. *Building and Environment*, 2014, 71: 245-258.
- [10] 李军, 荣颖. 城市风道及其建设控制设计指引. *城市问题*, 2014, (9): 42-47.
- [11] 任超, 袁超, 何正军, 吴恩融. 城市通风廊道研究及其规划应用. *城市规划学刊*, 2014, 3: 52-60.
- [12] Ng E, Chen L, Wang Y, Yuan C. A study on the cooling effects of greening in a high-density city: an experience from Hong Kong. *Building and Environment*, 2012, 47: 256-271.
- [13] 詹庆明, 欧阳婉璐, 金志诚, 章莉. 基于RS和GIS的城市通风潜力研究与规划指引. *规划师*, 2015, 11: 95-99.
- [14] Wood C R, Pauscher L, Ward H, Kotthaus S, Barlow J, Gouvea M, Lane S E, Grimmond C S B. Wind observations above an urban river using a

- new lidar technique, scintillometry and anemometry. *Science of the Total Environment*, 2013, 442: 527-533.
- [15] 杨涛, 焦胜, 乐地. 围合式高层住区空间布局的风模拟比较与优化—以长沙为例. *华中建筑*, 2012, 30(7): 81-83.
- [16] 曹昊. 西安市主城区通风环境数值建模及分析[D]. 西安: 长安大学, 2015.
- [17] Ashie Y, Kono T. Urban-scale CFD analysis in support of a climate-sensitive design for the Tokyo Bay area. *International Journal of Climatology*, 2011, 31(2): 174-188.
- [18] Oke T R. Boundary layer climates. *Earth Science Reviews*, 1987, 27(3): 265-265.
- [19] 郑辉, 周安伟, 朱忠东. 长沙市城区高层建筑布局与空间优化研究. *山西建筑*, 2007, 33(33): 20-21.
- [20] 芮建勋, 徐建华, 宗玮, 张振国, 陶康华. 上海城市天际线与高层建筑发展之关系分析. *地理与地理信息科学*, 2005, 21(2): 74-76.
- [21] Kim B G, Lee C, Joo S, Ryu K C, Kim S, You D, Shim W S. Estimation of roughness parameters within sparse urban-like obstacle arrays. *Boundary-Layer Meteorology*, 2011, 139(3): 457-485.
- [22] Glander T, Döllner J. Techniques for generalizing building geometry of complex virtual 3D city models. Berlin: Springer, 2008: 381-400.
- [23] Kondo J, Yamazawa H. Aerodynamic roughness over an inhomogeneous ground surface. *Boundary-Layer Meteorology*, 1986, 35(4): 331-348.
- [24] Adolphe L. A simplified model of urban morphology: application to an analysis of the environmental performance of cities. *Environment & Planning B Planning & Design*, 2001, 28(2): 183-200.
- [25] Yoshida H, Omae M. An approach for analysis of urban morphology: methods to derive morphological properties of city blocks by using an urban landscape model and their interpretations. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2005, 29(2): 223-247.
- [26] 孙武, 李庆祥, 黄启明, 陈东梅, 王雷, 任燕妮. 中小比例尺风洞模拟理论的研究与应用综述. *中国沙漠*, 2013, 33(6): 1654-1660.
- [27] Abe M. Mountain clouds, their forms and connected air current. *Central Meteorological Observatory of Japan*, 1929.
- [28] Hertig J A, Liska P. Simulations of regional atmospheric flows on small scale topographical models. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1983, 15(1-3): 77-89.
- [29] Ruel J C, Pin D, Cooper K. Effect of topography on wind behaviour in a complex terrain. *Forestry*, 1998, 71(3): 261-265.
- [30] 王建明, 贾丛贤, 陈凯. 山地附近风场结构的实验研究. *实验流体力学*, 2008, 22(4): 42-47.
- [31] Briatore L, Elisei G, Longhetto A. Local air circulations over a complex coastal site: a comparison among field surveys, hydraulic and mathematical model data. *II Nuovo Cimento C*, 1980, 3(4): 365-381.
- [32] Snyder W H, Castro I P. The critical Reynolds number for rough-wall boundary layers. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2002, 90(1): 41-54.
- [33] Meroney R N, Neff D E, Heskestad G. Wind-tunnel simulation of field dispersion tests (by the U.K. health and safety executive) of water-spray curtains. *Boundary-Layer Meteorology*, 1984, 28(1): 107-119.
- [34] Nemoto S. Similarity between natural wind in the atmosphere and model wind in a wind tunnel. *Papers in Meteorology and Geophysics*, 1961, 12(1).
- [35] Ohba R, Shao Y, Kouchi A. A wind tunnel and numerical investigation of turbulent dispersion in coastal atmospheric boundary layers. *Boundary-Layer Meteorology*, 1998, 87: 255-273.
- [36] Evans S. 3D cities and numerical weather prediction models: an overview of the methods used in the LUCID project. *CASA working paper*, 2009, 148: 19.
- [37] 周俭, 俞静, 陈雨露, 陆天赞. 上海总体城市设计中的城市高度秩序研究. *城市规划学刊*, 2017(2): 11.
- [38] 刘沛, 龚斌, 蔡志磊, 黄艳山. 基于 CFD 模拟分析的湿热地区中小城市广义通风道的研究—以广东省南雄市为例. *中国城市规划学会. 城市时代, 协同规划—2013 中国城市规划年会论文集(09-绿色生态与低碳规划)*. 北京: 中国城市规划学会, 2013: 18.
- [39] 冯娴慧, 魏清泉. 广州城市近地风场特征研究. *生态环境学报*, 2011, 20(10): 1558-1561.
- [40] Bornstein, Robert D. Observations of the urban heat island effect in New York city. *Journal of Applied Meteorology (1962-1982)*, 1968, 7(4).
- [41] Givoni, Baruch. *Climate considerations in building and urban design*. Van Nostrand Reinhold, 1998.
- [42] 匡晓明, 陈君, 孙常峰. 基于计算机模拟的城市街区尺度绿带通风效能评价. *城市发展研究*, 2015, 169(9): 91-95.