

冷空气强风在大型城市的精细结构和形成机制

向杰勋¹ 陈桂兴¹ 姜平² 吴乃庚³ 温之平⁴

1 中山大学大气科学学院/季风与环境研究中心, 广州 510275

2 重庆市气候中心, 重庆 401147

3 中国气象局广州热带海洋气象研究所, 广州 510080

4 复旦大学大气科学研究院, 上海 200438

摘要 地面强风可直接造成人员伤亡和经济损失,严重影响出行安全、工农业生产等社会秩序。强风的发生与天气系统和复杂下垫面的共同作用密切相关,在城市区域尤为明显。受数值模拟技术和计算资源的限制,对实际天气条件下大范围城区的强风现象进行建筑物分辨率的大规模数值模拟研究仍是一个挑战。本研究利用中尺度气象模式嵌套流体计算动力模式的超高分辨率局地气象预报系统,对强冷空气过程造成广州市区的一次强风事件进行数值模拟,深入探讨强风的精细结构和形成机制。结果表明,伴随着强冷空气入侵,广州市区的平均风速和风场高频扰动均明显增强,且在城市冠层顶尤为明显,呈现区域不均匀的三维结构,数值模拟与地面观测相一致。较大范围的强风速和阵风主要出现在建筑物较为低矮的老城区上空,并持续影响下游河道等开阔区域。在高层建筑密集的新城区,虽然整体风速明显减弱,但能在平行风向的街道狭管和下游区域形成局地强风。特别是,超高层建筑群引起显著的垂直环流,导致强风扰动向下传播,造成最大风速达 8 m/s 的地面局地强风,阵风指数接近 2。上游建筑群引起的风场扰动呈现大尺度湍流结构,能沿着平均气流传播影响数公里之远的下游地区。当风场扰动经过广州塔等单体超高层建筑时,可在其两侧绕流区再次加强,形成局地强风。局地强风和阵风还出现在垂直于风向排列的沿江高层建筑群的侧边,与建筑屏风的阻挡效应和缺口溢出有关。研究结果促进认识城市强风的时空特征和物理机制,有助于提升城市气象的精细化预报水平。

关键词 冷空气 局地强风 风场扰动 大涡模拟 城市建筑物

文章编号 2018140C

doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.1805.18140

收稿日期: 2018-03-21 **收修定稿:** 2018-05-24

作者简介: 向杰勋,男,1992年出生,硕士研究生,主要从事城市气象数值模拟。E-mail: xjiex@mail2.sysu.edu.cn

通讯作者: 陈桂兴 E-mail: chenguixing@mail.sysu.edu.cn

资助项目: 国家自然科学基金面上项目 41775094,广东省气象局科技创新团队计划项目 201704

Funded by: National Natural Science Foundation of China (Grant 41775094), Science and Technology Innovative Research Team Plan of Guangdong Meteorological Bureau (Grant 201704)

Fine-scale structures and formation of strong winds over mega city during a cold surge

XIANG Jiexun¹, CHEN Guixing¹, JIANG Ping², WU Naigeng³, WEN Zhiping⁴

1 Center for Monsoon and Environment Research/School of Atmospheric Science, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275

2 Chongqing Climate Center, Chongqing Meteorological Bureau, Chongqing 401147

3 Institute of Tropical and Marine Meteorology, China Meteorological Administration, Guangzhou 510080

4 Institute of Atmospheric Sciences, Fudan University, Shanghai 200438

Abstract Local strong winds could be hazardous to the street structures and pedestrians, which affects the outdoor activities and traffic safety. The formation of local strong winds is associated with both mesoscale weather and underlying surfaces, particularly over the urban areas where a large number of tall buildings exist. The building-resolving simulation of strong winds over a large city domain at given atmospheric conditions has been challenging, because of the limitations in numerical models and computational resource. Here we investigate a typical event of strong winds induced by cold surge in Guangzhou city using an advanced local weather prediction system, in which a mesoscale model is downscaled to a Computational Fluid Dynamics (CFD) model with Large-Eddy Simulation. Both CFD simulations and observations suggest that, during cold surge, mean wind speed and high-frequency disturbances are enhanced significantly in the city particularly at the top of urban canopy. There are also evident differences between the old and new districts with different buildings characteristics. A large area of strong winds and disturbances are seen above the old district with densely low buildings and its downstream open areas. Over the new district with tall buildings, although the regional mean wind speed is reduced, local strong winds occur to the main streets parallel to wind direct. In particular, high-rise buildings can induce obvious vertical circulation that can lead to a downward movement of wind disturbances and cause near-surface strong winds. Such eddies of the building-induced strong winds can propagate downstream with a considerable distance of up to several kilometers. They can be reinforced when they are passing other high-rise buildings such as Canton Tower. Local strong winds also occur to the flanks of tall buildings aligned along the Pearl River which is perpendicular to ambient wind direction. The blocking effect of those buildings results in an along-river air flow which then outflows the gap without buildings and leads to local strong winds. These findings have important implications for understanding the fine-scale structures and formation of local winds in the city, which helps to improve the prediction of urban winds.

Key words Cold surge, Local strong winds, Wind disturbances, Large-Eddy Simulation, Buildings

1 引言

城市气象条件直接影响广大市民的生产生活。随着城市人口不断增加，城市建筑物数量和高度倍增，人们受城市气象影响不断加剧（胡非等，2003；蒋维楣等，2010）。特别是，我国正处于快速城市化阶段，社会民众对城市气象服务的需求急增（崔桂香等，2013；Argüeso et al., 2014）。除了热岛效应、污染物扩散等气候状态变化，市民们越来越关注极端天气条件下的局地气象灾害。例如，局地强风可造成树木倾倒、高空坠物、厂房广告牌倒塌等一系列城市安全问题，对生命财产安全造成重大威胁。强风、强降水等突发灾害还会威胁行人行车，对出行安全、交通秩序、户外活动等造成负面影响（Aynsley, 1989；Bottema, 2000；蒙伟光等，2007）。因此，增进对城市局地极端气象的机制认识和预报水平是实现精细化天气预报服务和提升防灾减灾能力的关键科学问题，也具有重要社会应用价值（矫梅燕，2007）。

建筑物是构成城市复杂下垫面的主要因素，其对城市边界层的动力热力特征、近地面气象要素和局地环流等有直接调节作用（周莉和席光，2001；Miller et al., 2003；王宝民等，2003；Collier, 2006；梁钊明等，2013）。城市建筑物作为固体出现在近地面流场中，其空间结构和布局的多样性以及建筑物之间的气流干扰、阻挡作用、狭管效应等对于局地气象条件产生显著影响，使气流的分布和结构发生变化。当入流风向平行于街谷时，建筑物之间可形成狭管效应，使沿街谷流动的气流明显加速。当入流风向与街谷走向成一定夹角，建筑物起到阻挡作用而导致迎风面风压增强，并在街谷下游诱发复杂的涡旋（Oke, 1988；Johnson and Hunter, 1999；Sang and Andrews, 2002；王宝民等，2005）。建筑物前方可形成停滞的涡流和下冲气流等，高层建筑物甚至可将高空的高速气流引至地面。高层建筑物不仅能明显调节城市冠层气流，还影响近地气流形成复杂的局地风环境（刘辉志等，2005）。大量研究表明，建筑物几何形状、建筑物间距和排列布局等能对附近区域的近地面风场产生显著影响，并在下游区域形成水平尺度较大的背风环流（Hunter et al., 1992；Zhang et al., 1996；Letzel et al., 2012；Miao et al., 2013；Park et al., 2015a）。建筑物附近的地面风场显著变化可造成局地强风，例如：高层建筑附近存在比平均风速大3倍的局地强风（Jones et al., 2004）。前期研究大多基于建筑工学或理想试验，对街区尺度风场环

境作了深入探讨。值得注意的是，超大城市的建筑群达到数十公里，大范围建筑群的集合影响可起到中尺度强迫作用，其与中小尺度天气系统活动的联系机制尚不太清楚（Chen et al., 2015a,b; Jiang et al., 2017）。随着超高性能计算的发展，对大范围城市区域进行建筑物分辨率的大规模数值试验逐渐成为可能。

城市局地天气不仅受建筑物复杂特征的影响，还与中尺度天气系统密切相关。为考虑城市下垫面和天气系统的共同影响，不少学者提出采用中尺度模式的模拟结果来驱动计算流体动力（CFD）模式，以描写实际天气条件下的城市边界层结构和局地气象灾害。此类中尺度气象模式耦合 CFD 模式的研发与应用在近年取得了引人注目的发展（Baik et al., 2009; 蒋维楣等, 2010; Schlünzen et al., 2011; Miao et al., 2013; 李磊等, 2015）。例如，Tewari 等（2010）指出采用中尺度 WRF 模式输出结果作为 CFD 初边界场，将显著提高 CFD 模式对实际气象要素的模拟能力。Nakayama 等（2012）将中尺度模式结果作为大涡模拟边界入流，对城市中气流波动以及阵风影响因子进行研究，并与实际观测进行了对比。Park 等（2015b）将中尺度气象模式与大涡模拟模式耦合起来，探讨了中尺度风场对湍流结构以及城市通风的影响，指出街谷和十字路口的湍流与上空风场的联系在高层建筑区更为紧密。虽然对实际天气条件下城市气象的研究取得了可喜进展，但是对城市建筑群和特定极端天气条件下的局地强风特征和机制，仍有待深入研究。

由于每个城市的下垫面特征都不一样，引起强风的天气系统也非常多，因此，需对特定条件下的局地强风事件进行深入研究。其中，冷空气是引起冬季强风的典型情况之一（Wang and Chen, 2014）。本研究利用中尺度气象模式嵌套流体计算动力模式的超高分辨率局地气象预报系统，针对冷空气入侵背景下广州城区强风的一次实际个例，进行观测分析和大规模数值试验，深入探讨强风的精细结构和形成机制。具体章节安排如下：第 2 章介绍研究个例的选取、资料及方法；第 3 章分析城市强风在时空上的精细特征和模式验证；第 4 章深入探讨街道局地强风形成的物理机制；第 5 章给出主要结论。

2 资料及方法

本研究关注一次典型的冷空气强风事件,即 2012 年 12 月 29 日强冷空气南下影响华南地区并在广州市区造成强风的过程。下午 14 时之前,广州地区还未受到冷空气影响,近地面盛行偏东风,风速较小。14 时之后,强冷空气开始入侵广州地区,风速逐渐增加,温度则明显下降。据广州市区上游的白云机场地面观测记录,下午到傍晚的气温从 19 摄氏度降到约 7 摄氏度,降温幅度接近寒潮等级。风速从 2 m/s 增强到 8 m/s,风向由偏东风转为北风。为考察市区强风的特征和机制,本研究主要利用观测分析和高分辨率数值模拟两种手段,所用各类数据和模式系统具体如下。

2.1 数据资料

本研究用到的数据资料包括城市气象观测、大气分析资料、地形、建筑等:

(1)广州市区 2 个自动站的数据资料,时间分辨率为逐 5 分钟,气象要素包括风速、风向以及温度。为分析强风周期和阵风等活动特征,本研究使用功率谱分析、带通滤波等统计方法。

(2)美国国家环境预报中心(NCEP, National Centers for Environmental Prediction)提供的 FNL 逐 6 小时再分析资料,水平分辨率为 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$,垂直方向共 26 层。主要用于显示天气形势,并为中尺度模式 WRF 提供初始场和边界条件。

(3)高分辨率地形资料来自 SRTM 90 米数字高程数据 4.1 版本(SRTM 90 m Digital Elevation Database V 4.1),水平分辨率为 90 m。资料前处理用双线性插值方法插值到 10 m 分辨率,用作 CFD 模式试验的地形。

(4)广州城区的建筑物格点资料,包含建筑物形状和高度信息。高层建筑物信息反演基于公开的卫星地图,利用遥感影像数据提取方法,根据太阳高度角、卫星高度角以及卫星地图上建筑物的阴影计算出建筑物的高度,并将其格点化处理。这些格点信息与主要高层建筑物的公开信息进行对比验证,确认反演信息的可靠性。精确反演得到广州中心城区 5×5 平方公里的建筑物形状和高度信息,水平分辨率为 10 m。建筑物信息叠加地形之上,构成 CFD 模式的下垫面。受资料处理的成本限制,中心城区以外的建筑物高度设置为 10 米,建筑物形状仍使用准确的卫星反演信息。

2.2 耦合中尺度—CFD 数值模拟方法

本研究主要采用降尺度数值模拟方法,将常规中尺度数值模式与大涡模式耦合,结合大规模并行计算技术,构建成超高分辨率局地天气预报系统(Chen et al., 2015a)。使用中尺度数值模式模拟出精度较高且接近于实际情况的天气背景场,然后将中尺度模式模拟结果作为初始条件来驱动 CFD 模式。CFD 模式能显式分辨陡峭地形或建筑物的高度和几何形状,其大涡模拟可描写城市下垫面对湍流和局地强风的影响。此类耦合中尺度—CFD 模拟方法近年广泛用于实际天气个例研究,具有良好效果(Baik et al., 2009; Tewari et al., 2010; Schlünzen et al., 2011; Chen et al., 2015b)。

2.2.1 中尺度数值试验

降尺度模拟系统中选取的中尺度气象模式为 NCEP 以及美国国家大气研究中心(NCAR, National Center for Atmospheric Research)等机构联合研发的在业务及研究领域广泛使用的 WRF 模式(Skamarock, 2008)。WRF 模拟试验采用单向四重嵌套(图 1a),模式各区域设置如表 1 所示。模式从外到内水平网格数分别为 270×250 、 328×301 、 391×367 和 501×501 ,水平分辨率分别为 9 km、3 km、1 km 和 200 m。垂直层数为 46 层,模式层顶气压设置为 50 hPa。为更好描写大气边界层和满足 CFD 模式需求,在 WRF 模式中 1 km 高度以下设置了 18 层,尽可能提高大气低层的分辨率。WRF 模式采用逐 6 小时 $1^\circ \times 1^\circ$ 的 FNL 资料作为初始场和边界条件,从 2012 年 12 月 29 日 02 时开始模拟,共积分 24 小时。为保证模式区域方案的一致性,模式内外层均不采用积云参数化方案(Ntelekos et al., 2008; 姜平, 2017)。D1—D4 各区域物理参数化方案设置均保持一致,云物理 WSM6 方案、长波辐射 RRTM 方案、短波辐射 Dudhia 方案、边界层 YSU 方案、陆面过程 Noah LSM 方案、城市冠层 UCM 方案。

图 1 耦合中尺度-CFD 模式的区域设置和城市建筑物。(a)WRF 模式的四个嵌套模拟范围。(b) CFD 模式区域在 WRF 模式最内层区域 D4 中的所在位置。(c) CFD 模式区域内的广州地形(阴影,单位: m)和城市建筑物(灰色格点)。黑色方块和红色圆点分别标记福今路和广州塔自动观测站。(d)广州市区中心即(c)黑色矩形区域的建筑物的三维视图(单位: m)

Fig. 1 Domain setting for the coupled mesoscale-CFD models and the buildings in Guangzhou city. (a) Four simulation domains of the WRF model; (b) The most inner domain D4 of WRF model and the CFD domain; (c) The topography (shaded, unit: m) and buildings (blocks in gray) in the CFD domain; (d) 3D view of the buildings in the city center (unit: m)

表 1 WRF 区域设置

Table 1 Domain setting for WRF model

模式区域	代表地区	水平分辨率	水平网格数	输出时间间隔
D1	中国南部	9 km	270×250	60 min
D2	华南地区	3 km	328×301	30 min
D3	珠三角地区	1 km	391×367	15 min
D4	广州市及周边	200 m	501×501	5 min

为了验证 WRF 模式对天气背景场的模拟，我们将模式结果与之后相应时次的 FNL 分析资料进行对比。图 2a 显示，29 日 08 时冷空气前锋位于 25°N 以北的粤北地区，呈现为明显的南北气压梯度和偏北气流。14 时开始影响珠三角地区，之后与海上的偏东北气流汇合(图 2b)。模拟试验也显示出类似的冷空气南下过程(图 2c,d)，表明 WRF 模式能较好反映了此次天气过程的演变。对比图 2b,d，显示数值模拟得到的冷空气过境时间比实际稍微偏早。我们进一步利用观测资料验证 WRF 模式所模拟冷空气在广州市区的推进情况。选取广州塔自动站为观测资料代表，考虑其周围地势平坦，其中一个观测点离地 127 m 高，受到周边较为低矮建筑物影响较小。图 3 显示，观测到的风速在 14 时之前较小（4 m/s 以下），在 14 时之后的下午时段明显增加，最大风速可达约 10 m/s。数值模拟到的风速显示出类似的时间演变特征，模式也基本抓住相应的温度和风向变化（图略）。模式模拟的冷空气入侵时间比观测提前 2 小时 10 分钟，我们在之后的观测分析和 CFD 模拟将移除这个时间差。另外，WRF 模式模拟到冷空气入侵后的平均风速和增加幅度稍大于观测值。形成差异的可能原因是 WRF 结果代表网格尺度的平均值，且没有显式包含建筑物影响，主要体现伴随天气系统演变的特征；而观测结果则表征了受中尺度天气和建筑物共同影响的局地特征（Park et al., 2015a）。总体而言，WRF 模式能够大致模拟出冷空气经过

广州市区的气象要素演变，可用于驱动 CFD 模式以探究城市建筑群对强风的影响。

图 2 冷空气入侵广州市前后的地面风场（箭头，m/s）和气压场（等值线，hPa）。（a、b）FNL 分析资料；（c、d）WRF 模拟

Fig. 2 Spatial patterns of surface winds (vector, unit: m/s) and pressure (contours, unit: hPa) before (left column) and after (right column) the invasion of cold surge into Guangzhou. (a, c) FNL analysis; (c, d) WRF simulation

图 3 2012 年 12 月 29 日广州市区风速的时间演变。黑线为广州塔自动站(离地面 127 m 高处)，红线为 WRF 模式的模拟结果。横坐标蓝色方框标记三次 CFD 模拟时段，分别代表冷空气入侵之前、入侵期间和入侵之后的三个阶段。数值模拟的冷空气抵达时间比实际观测提前 2 小时 10 分钟，绘图时已移除相应的时间差

Fig. 3 Temporal variations of surface wind speed in Guangzhou during 29 December 2012. Black line denotes the observation from Canton Tower at 127 m AGL, red line denotes the WRF model simulation with the arrival hour adjusted to the observation. The blue rectangles denote three periods of CFD simulation before, during and after the invasion of cold surge

2.2.2 CFD 数值试验

降尺度模拟系统中选取的 CFD 模式为基于大涡模拟的局地气象模式，其具体参数见表 2 (Sha, 2002)。该 CFD 模式基于三维笛卡尔坐标，能显式分辨陡峭地形和城市建筑物，采用 Blocking-off 手段来处理复杂的下垫面几何形状 (Sha, 2008)。模式采用完全可压的 Navier-Stokes 方程组，采用有限元方法离散。压力速度耦合利用 SIMPLER (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations revised algorithm) 方法 (Patankar, 1980)，模式在每个积分步长中反复迭代至收敛，以保证各要素的物理一致性。平流采用的是三阶 QUICK 方案 (third-order upwind Quadratic Upstream Interpolation for Convective Kinematics) (Leonard, 1979)。次网格湍流的处理则是采用经典 Lilly-Smagorinsky 大涡模拟 (Smagorinsky, 1963; Lilly, 2010)。另外，模式主要考虑城市边界层内的较短时间尺度的动力热力过程，不包含湿过程和辐射过程。

CFD 区域在 WRF 模式 Domain 4 的中央位置即广州市中心城区 (图 1b)，主要

包含广州市荔湾区、越秀区、海珠区、天河区等主要行政区（图 1c）。区域大小为 $12 \text{ km} (x) \times 10 \text{ km} (y) \times 2.65 \text{ km} (z)$ ，水平分辨率为 10 m 。为节约计算资源，垂直分辨率在 200 m 以下设置为 10 m ，其上以 5 m 递增。格点总数为 $1200 (x) \times 1000 (y) \times 50 (z)$ 。其中，CFD 模式试验的中央区域为广州市中心，存在大量高层建筑群，是本研究的重点关注区域（图 1d），其余区域设置为模拟缓冲区（Letzel et al., 2012; Park et al., 2015a）。由于冷空气过境过程的持续时间超过 3 个小时，而大涡模式不能进行昂贵的长时间积分来捕捉整个入侵过程。为考察冷空气推进不同阶段的城市风场，本研究设置了 3 次 CFD 试验（图 3 中蓝色方框），分别对冷空气入侵之前、入侵期间和入侵之后 3 个阶段进行精细化模拟。每次试验运行 50 分钟，时间步长设置为 1 秒。3 次 CFD 试验的初始场分别选取为 WRF 模式最内层区域在 29 日 13:20、14:50 和 16:50 的输出场。

表 2 CFD 模式参数

Table 2 Parameters of the CFD model

Model Parameters	Descriptions
Basic equations	Non-hydrostatic/compressible
Coordinate	Three-dimensional Cartesian
Discretization approach	Finite-volume method
Grid system	Staggered
Spatial resolution	Adaptive/uniform
Time integration scheme	Implicit
Advection Scheme	3 rd upwind scheme (QUICK)
Equation solver	SIMPLER algorithm
Surface geometries treatment	Blocking-off method
Turbulence scheme	Large eddy simulation (LES)

3 冷空气强风在广州市区的精细结构

3.1 城市强风的观测分析和数值模拟检验

我们先利用自动站资料考察观测到的市区强风特征。选取老城区福今路和新城区广州塔为代表，分别位于低矮密集建筑区和高层建筑群下游区（图 1c），以便对比不同建筑形态的可能影响。此外，两地观测站都包括了两个不同高度的观测点，可描写风场的垂直结构特征。图 4a,b 显示福今路风速在中午之后特别是下午 14 时开始出现明显加强，近地面（28 米高）风速从约 1 m/s 增加到约 4 m/s，城市冠层顶（94 米高）风速则从约 2 m/s 增加到 10 m/s 以上。值得注意的是，12–15 时段的近地面风场扰动标准差从约 0.25 m/s 增加到 0.5 m/s（图 4a），城市冠层顶甚至增加到 1.5 m/s（图 4b）。广州塔 127 米处的观测资料也显示了城市冠层顶的风速和风场扰动出现类似的加强特征（图 4c）。对比图 4c 和图 4b 可发现，广州塔观测到的平均风速稍小于老城区福今路，但是风场扰动更强，标准差可达到 2 m/s，表现出一定的区域差异。图 4d 则显示，广州塔 532 米处（远在城市冠层之上）风速在下午明显增加，但是风场扰动在冷空气入侵前后均不明显。这些观测结果表明，冷空气入侵导致了市区的平均风速和风场扰动均明显增强，其中风场扰动在城市冠层顶最为显著。前期研究指出北京市区强风在城市冠层顶也存在类似的明显风切变和阵风特性（刘小红和洪钟祥，1996）。新老城区的风速和扰动强度存在差异，可能与两地不同建筑形态（低矮密集建筑和高层建筑群）的影响有关。

图 4 还显示了市区风场扰动在 14 时冷空气入侵之后出现振荡现象。为此，我们进一步定量分析风场振荡的周期特征。功率谱分析表明，14–17 时老城区福今路观测到的风场扰动呈现 30–40 分钟周期的振荡和 10–20 分钟周期的较高频振荡特征，通过 90% 显著性检验（图 5b）。图 5a,b 显示，城市冠层顶的风场扰动较明显，高频（低频）功率谱值为 4.0（5.0） m^2/s^2 ，约为近地面的 10 倍（2 倍）。新城区广州塔 127 米处的风场扰动也表现出明显的高频振荡特征（图 5c）。广州塔 532 米高的风场扰动的高低频功率谱值均小于 127 米处的数值（图 5c,d）。对比图 5b,c 显示，广州塔观测到的风场扰动的高频（低频）功率谱值为 8.0（10.0） m^2/s^2 ，约为福今路的 2 倍；较低频振荡的周期为 45–65 分钟，比福今路的更长，表现出明显的区域差异。

值得注意的是，此类风场扰动的振荡现象在冷空气入侵前不太明显（图 4）。由此可见，城市区域特别是城市冠层顶的风场高频扰动的加强与冷空气入侵过程密切相关。

图 4 福今路和广州塔自动站的观测风速和风场扰动演变（单位：m/s）。黑色线条为 50 分钟滑动平均的风速；蓝色柱状图标示偏离滑动平均风速的 5 分钟风速；红色线条代表风速偏差的滑动标准差。（a、b）分别为福今路 28 m 和 94 m 高处的观测；（c、d）分别为广州塔 127 m 和 532 m 高处的观测

Fig. 4 Temporal variations of the smoothed wind speed and disturbances (unit: m/s) observed at Fujin Road and Canton Tower. Black lines denote the 50-minute running mean; blue bars denote the instantaneous deviation from mean wind speed. Red lines denote the standard deviation of wind speed disturbance. (a, b) Fujin Road site at 28 m and 94 m AGL; (c, d) Canton Tower site at 127 m and 532 m AGL

图 5 14-17 时福今路和广州塔自动站的观测风场扰动的功率谱。（a、b）分别为福今路 28 m 和 127 m 高处的观测；（c、d）分别为广州塔 127 m 和 532 m 高处的观测

Fig. 5 Power spectrum of the observed wind speed disturbances during 14:00-17:00. (a, b) Fujin Road site at 28 m and 94 m AGL; (c, d) Canton Tower site at 127 m and 532 m AGL

我们利用 CFD 模式进一步考察市区的风场演变和扰动特征。图 6 显示，随着冷空气入侵，广州塔 127 米处的平均风速从 2.6 m/s（图 6a）增大至 5.6 m/s（图 6b），最后达到 10.1 m/s（图 6c）。在冷空气入侵之前和入侵之后，进入市区的背景风场处于平稳状态，在 CFD 模式中受建筑摩擦拖曳影响，模拟的平均风场出现缓慢下降（图 6a,c）。在冷空气入侵期间，背景风速有一定增强趋势（图 4），在 CFD 模式中抵消一部分下垫面摩擦影响，使得模拟期间的平均风速维持一定强度（图 6b）。我们更关注的是，冷空气入侵前的风速扰动振幅较小，滑动标准差约为 0.016 m/s（图 6a）。风场扰动在冷空气入侵期间显著增大至 0.73 m/s（图 6b），此后维持相当强度 0.79 m/s（图 6c）。另外，模拟风场扰动呈现出一定的高频振荡，周期约 2-4 分钟，特别是在城市冠层顶。也就是，在福今路 94 米处和广州塔 127 米处的风场扰动功率谱值均明显高于福今路 28 米处和广州塔 532 米处的数值（对比图 7b,c 和图 7a,d）。这些由冷空气入侵所导致的风场扰动加强特征与市区自动站的观测结果相类似，这表明耦

合中尺度—CFD 模式对市区风场分布和演变具有良好的模拟能力。

图 6 同图 4c, 但为广州塔 127 米处的冷空气 (a) 入侵之前、(b) 入侵期间和 (c) 入侵之后的 CFD 模拟风速和风场扰动。三次模拟时段见图 3 中标注

Fig. 6 Same as in Fig. 4c, but for the wind speed of CFD simulations from the Canton Tower at 127 m AGL for the periods (a) before, (b) during, and (c) after the invasion of cold surge as shown in Fig. 3

图 7 同图 5, 但为冷空气入侵期间的 CFD 模拟风场的功率谱

Fig. 7 Same as in Fig. 5, but for the power spectrum of CFD-simulated wind disturbances during the invasion of cold surge

3.2 地面强风的精细水平分布

基于建筑物分辨率的 CFD 模拟试验, 我们先详细考察伴随冷空气入侵的市区风场水平分布特征。图 8a,b 显示, 冷空气入侵前的市区平均风速和扰动幅度均较小, 且区域差异不明显。冷空气入侵期间和入侵之后, 平均风速和风场扰动出现明显的城区差异和局部不均匀特征 (图 8c-f)。图 8c,e 显示, 在东半部的新城, 高层建筑密集区域 (标记 “A1” 和 “A2”) 近地面平均风速整体较小, 与建筑物造成风速减弱的摩擦拖拽效应有关 (Britter and Hanna, 2003; Ryu et al., 2016)。局地风速大值 (即局地强风) 主要出现在高层建筑群之间的开阔区域, 比如广州大道 (“C”)、花城广场 (“D”)、河道中东部区域 (“E、F、G”) 和广州塔下游 (“J”) 等。这些风速大值区呈现了南北走向的条状特征 (例如 “D-F-J”), 与平均风向和街道走向相一致。在西半部的老城区, 低矮密集建筑区 (“B”) 的整体风速值较均匀, 局地差异特征不太明显。图 8d,f 显示的风场扰动幅度与图 8c,e 显示的风速分布相类似, 即局地大风区域通常伴随着明显的风场扰动。因此, 受不同建筑物形态的影响, 新老城区的平均风场和扰动强度在整体和局地两种尺度上均存在明显差异。

图 8c-f 还显示, 珠江河道南岸的沿江区域是局地强风和风场扰动的另一主要地区。局地强风 (“H、L”) 出现在 “金海湾” 和 “海珠半岛” 等沿江超高层建筑群附

近。这类沿江的局地强风区主要呈现东西向排列，大致垂直于背景风向。这明显区别于东半部新城呈南北走向的街道狭管强风，可能与沿江超高层建筑群的屏风阻挡作用有关。第 4 章将深入阐述这些与超高层建筑群有关的局地强风的形成机制。

图 8 CFD 模拟 10-40 分钟期间的市区平均风速（左列）和风场扰动（右列）水平分布。（a、b）冷空气入侵前；（c、d）冷空气入侵期间；（e、f）冷空气入侵之后。箭头为风矢，填色为平均风速或标准差（单位：m/s），灰色标记地面建筑物

Fig. 8 Spatial patterns of surface wind speed (left column, unit: m/s) and standard deviation (right column, unit: m/s) averaged during the CFD simulation of 10-40 minutes (a, b) before, (c, d) during, and (e, f) after the invasion of cold surge. Blocks in gray denote the buildings

3.3 城市风场的精细垂直结构及其与上游建筑特征的联系

为进一步阐明上游建筑群所激发的风场垂直结构及其对下游地区的影响，我们考察城区建筑群与风场垂直结构的对应关系。图 9a 显示新老城区在珠江北岸（上游区域）的建筑物群存在明显差异，珠江河道（下游区域）的建筑较少。图 9b 给出北岸 1 公里范围内的建筑物密度的垂直剖面，显示西半部老城区的建筑物整体较低，建筑物最高高度在 100–200 米，大部分低于 100 米。图 9c 显示，经过上游建筑群影响，河道北岸最强风速（10 m/s 以上）出现在城市冠层之上，距离地面 200–300 米处。在离地 100–200 米高的城市冠层顶出现强烈的风切变，与北京地区的强风特征相类似（刘小红和洪钟祥，1996）。图 9e 显示，城市冠层顶的风场扰动最明显，对应于风切变的大值区域。这显示风速廓线和风场扰动与建筑整体高度存在密切关系，表明它们是上游建筑引起扰动的结果。

与老城区相比，东半部新城存在高层建筑群，最高高度可达 200–540 米（图 9b）。图 9c 显示，新城（ $X=720-830$ ）距离地面 200–400 米高的平均风速明显小于老城区同一高度的风速。这表明新城高层建筑物的摩擦拖曳效应能垂直伸展到较高层次，整体上减弱了平均风速。同时，风场扰动也能伸展较高的 200–500 米，明显不同于老城区风场扰动的较低层次（200 米以下），表明高层建筑物能扰乱整层冷空气（厚度约 500 米）的流动。另外，虽然新城上空的整体风速较小，但是可能出现局地尺度的强风带（例如 $X=800$ 附近），与建筑群之间的街道狭管相对应。

数值模拟得到市区上空的风场扰动（平均风速）在城市冠层顶（冠层之上）较为明显。与老城区相比，新城区的平均风速较小但风场扰动高度较高，与观测结果相一致。另外，对比图 9d,f 和图 9c,e，我们还注意到珠江河道南岸风速和扰动幅度的垂直结构与河道北侧非常相似。由此可见，在没有建筑扰乱的情况下，风场结构能保持一定的连贯性，并传播到下游地区（Letzel et al., 2012）。这些特征提醒我们在考察城市强风特征时，除了考虑局地建筑物的形态与分布，需要考虑整个城市尺度特别是上游数公里范围建筑群的影响，这对评估强风灾害风险有重要意义。

图 9 市区中心建筑物和 CFD 模拟的冷空气入侵期间风场垂直结构。(a) 建筑物分布和分析区域，红色矩形为珠江北岸的建筑区域，绿色竖矩形和横矩形分别标记花城广场-广州塔和珠江南岸的局地强风区；(b) 珠江北岸的建筑密度，统计范围在 (a) 的红色矩形；(c、e) 珠江北岸沿 $Y=520$ 的平均风速和风场扰动标准差；(d、f) 珠江南岸沿 $Y=450$ 的平均风速和风场扰动标准差

Fig. 9 Buildings in the Guangzhou downtown and the vertical structures of wind speed simulated by CFD model. (a) Buildings and analysis domains, with red rectangle for the built-up area to the north of Pearl River and green rectangles for the areas of local strong winds at the Huacheng square to Canton Tower and at the southern bank of Pearl River. (b) Building density in the built-up area to the north of Pearl River. (c, d) Mean wind speed and standard deviation at the northern bank of Pearl River ($Y=520$); (e, f) same as in (c, d), but for the southern bank of Pearl River ($Y=450$)

4 城市高层建筑群引起局地强风的物理机制

上一章分析表明，冷空气入侵期间广州市区的整体风速和周期振荡显著加强，还出现了明显的三维结构和局地强风。高层建筑对局地风场和街谷环流起调节作用，是扰乱风场的重要源区（Assimakopoulos et al., 2003；Miao et al., 2013）。局地强风主要发生在两个主要超高层建筑群的附近和下游。其中一个在市区东部的广州大道、花城广场和广州塔（图 9a 的绿色竖向矩形， $X \sim 820$ ），建筑排列和街道走向呈南北走向。特别是，花城广场两侧的超高层建筑以中心街道为轴线呈近似对称分布，其中国际金融中心东西两塔分别高达 538 米和 440 米，可能对冷空气流动起重要调节（姜平，2017）。另外一个区域在珠江南岸的滨江路（图 9a 的绿色横向矩形， $Y \sim 410$ ），建筑排列主要呈东西走向。本章进一步探讨这两类超高层建筑群对局地

流场和风场扰动的影响机制，阐明不同建筑布局的作用。

4.1 花城广场—广州塔（南北走向）局地强风的形成机制

图 10a,c 显示冷空气入侵期间花城广场—广州塔的风速时空演变。较强风速呈现倾斜的条状特征,显示了自北向南的传播现象。这些条状结构存在明显的一致性,传播距离可达 3 公里以上。根据从强风条状结构轴线的倾斜角度,可估算出风场扰动的向南传播速度为 5–10 m/s。这与相应层次的平均风速相当,显示扰动风场的向下游传播主要受到背景流场的平流输送。此类风场扰动现象反复出现,表明高层建筑群能激发风场的周期性振荡和传播。在模拟 10–40 分钟(30 分钟期间)一共出现了 9–10 次风场振荡,其中较强的振荡约为 5 次,可知振荡周期为 3–6 分钟。来自上游的传播性周期振荡很好地解释了广州塔局地风场的扰动现象(图 6b)。图 10a 还显示,近地面风速振荡的峰值可达 8 m/s,相比于背景风速 4–5 m/s,阵风指数达到 1.6–2。同一时刻强风扰动的南北跨度为 500–1000 米,对应于同一地点的强风持续时间为 1–2 分钟,呈现为大尺度湍流结构。值得注意,近地面和城市冠层的风速均存在三个局地极值,分布位于花城广场北侧入口(Y=650)、花城广场东西两塔(Y=560)、广州塔(Y=434)等超高层建筑附近和下游区域。由此可见,街道狭管气流在经过这些超高层建筑时获得局地加速,风场扰动幅度也随之增加。这些超高层建筑的局地作用可放大来自上游地区的风场扰动,并传播影响下游地区,对应于图 8 所显示局地风场的水平分布特征。

图 10 CFD 模拟的冷空气入侵期间花城广场—广州塔(左列)和珠江南岸(右列)的风速演变(阴影,单位:m/s)。统计区域位于图 9a 的绿色矩形区域。(a、c)的虚线箭头标注图 12 显示的一次强风扰动。(b、d)的虚线箭头标注图 14 显示的一次强风扰动

Fig. 10 Temporal variations of wind speed (shaded, unit: m/s) during the cold surge invasion simulated by CFD model (left column) at the Huacheng square to Canton Tower and (right column) at the southern bank of Pearl River. The domains are marked by the green rectangles in Fig. 9a. Dashed arrows in (a, c) marks a disturbance of strong wind for plotting Fig. 12, while those in (b, d) for plotting Fig. 14

为阐明超高层建筑的局地影响,我们深入考察花城广场国际金融中心东西塔附

近的风场和气压的水平分布和时间演变。图 11a 显示，冷空气入侵期间中心街道的近地面风速明显增加，风向偏北，平行于街道走向。街道风速明显强于两侧密集建筑区的风速，呈现明显的狭管效应（王宝民等，2005）。广场北部地区的平均风速约 4 m/s，双塔之间街道中央的风速增加到~6 m/s，出现了局地加强特征。图 11c 清晰显示东西两塔的上下游地区风速出现频繁扰动。下游地区的风速扰动稍滞后于上游地区，但是风速变得更强。上下游地区的风速差值显示，超高层建筑物附近共出现了约 7 次的局地风场加强现象，间隔约为 5 分钟。

图 11b 显示相应的较高层风场为一致偏北风，强风速主要出现街道上空。东西塔明显高于周边建筑物，起到了明显的阻挡扰乱作用，在它们的迎风面出现了气压正偏差。其中，东塔附近的气压扰动较为明显，可能与东塔的高度更高有关。受此局地气压偏差影响，高塔之间出现显著加强的狭管流场，平均风速加速到 10 m/s。另外，高塔迎风面和两侧还出现明显的下沉运动，强度 1–2 m/s。图 11d 显示东塔迎风面的高层风速与气压扰动存在非常相似的时间演变，均出现了约 7 次的短时极值，稍低层次的下沉运动强度也出现相应波动。这种密切关系表明，当强风扰动冲击到超高层建筑物时，迎风面的气压和下沉运动相应增强（Park et al., 2015b）。下沉运动有利于把高层动量向下输送，可能是近地面风场加速和形成局地强风的关键因素（程雪玲等，2007）。对比图 11c,d 进一步证实，超高层建筑物引起的 7 次高层风场气压扰动很好地对应了近地面风场的 7 次加速现象，并且超前 2–3 分钟，这表明超高层建筑物引起的动力扰动确实是导致地面风场加强的重要过程。

我们再详细看一次风场扰动经过花城广场东西塔的具体过程，特别关注垂直结构的演变。选取 T=17–20 分钟出现典型向南传播的风场扰动为代表（图 10a）。在抵达两塔之前，强风扰动主要出现在北侧地区 100–150 米高度处（图 12a）。风场扰动后部上层伴随着下沉运动（蓝色箭头），导致强风轴线向下倾斜（红色虚线）。风场扰动抵达两塔附近时，下沉运动出现明显加强，强风速轴高度开始向下层移动（图 12b）。扰动经过高塔期间，下沉运动达到最强（-1.4 m/s），其所对应的强风轴线明显下降到 60–70 米高度处（图 12c）。此后，高塔附近仍维持一定强度的下沉运动，导致强风轴线继续下降到近地面，引起地面风速的相应增加（图 12d）。风场扰动向

低层传播的整个过程大约持续了 3 分钟,这对应于图 11c,d 的高低层扰动的时差。类似的特征机制也出现在其它时次的风场扰动(图略)。由此可见,超高层建筑群能增强局地的下沉运动,进而加强与风速扰动有关的三维结构,导致较高层的风场扰动向下传播影响街道地面风速。

图 11 冷空气入侵期间的花城广场国际金融中心的模拟风场和气压的水平分布和时间演变。(a、b) 时间平均的风场(箭头,单位: m/s), 气压偏差(等值线,单位: Pa) 和垂直运动(阴影,单位: m/s), 灰色区域为建筑物。(c) 金融中心上游(黑色线条)和下游(红色线条)的近地面风速(单位: m/s) 和差值(蓝色柱)的时间演变。(d) 东塔迎风面的高层风速(黑色线条,单位: m/s)、气压(红色线条,单位: Pa) 和下沉运动强度(蓝色柱,单位: m/s) 的时间演变。(c、d) 中的红色三角大致标注短期变化的 7 次局地极值

Fig. 11 Spatial patterns and temporal variations of winds and pressure during the cold surge invasion simulated by CFD model (left column) near the International Financial Center (IFC) towers of Huacheng square. (a, b) Mean wind speed (vector, unit: m/s), pressure disturbance (contours, unit: Pa) and vertical motion (shaded, unit: m/s), with black blocks for buildings. (c) Near-surface wind speeds at the upstream (black line) and downstream (red line) of IFC towers and their difference. (d) Upper-level wind (black line, unit: m/s), pressure (red line, unit: Pa) and intensity of sinking motion (blue bars, unit: m/s) at the windward side of IFC eastern tower. Red triangles in (c, d) denote seven times of local maxima of wind disturbances

图 12 一次强风扰动经过金融中心东西塔期间沿 X=820 的垂直结构和时间演变。阴影为水平风速(单位: m/s), 等值线为强于-0.4 m/s 的下沉运动。虚线标注强风轴线, 蓝色箭头标注下沉运动中心位置, 红色三角形为东西塔所在位置

Fig. 12 Vertical structures and temporal variations of a wind disturbance passing the IFC towers of Huacheng square (X=820). Shaded for horizontal wind speed (unit: m/s); contours for sinking motion stronger than -0.4 m/s. Dashed lines denote the axis of strong wind and blue arrows mark the center of sinking motion associated with the wind disturbance. Red triangles denote the location of IFC towers

我们再以广州塔为例,进一步考察单体建筑物如何调节局地风场,关注其对传播性强风扰动的影响。也以两次典型向南传播的风场扰动为例。图 13 左列显示,随着风场扰动经过广州塔西侧,逐渐导致西南侧下游区域的风速明显增强。最强风速出现在广州塔与其西侧建筑群(“X”)之间的通道,可能与绕流和狭管效应的共同作用有关(Smith et al., 2001)。该强风区域与建筑物尾流区的较小风速形成显著对

比，呈现明显的水平风切变。但是，强风区域在后期进一步向下游传播的特征不太明显（图 13d,e），可能与广州塔西南方向的另一个建筑群（“Y”）的阻挡作用有关。图 13 右列显示风场扰动经过广州塔东侧时，风速在东南侧下游区域显著加强，且风速极值区出现明显的向下游传播特征。这种特征不同于风场扰动经过广州塔西侧时的情况（对比图 13 左右列）。由于东南侧建筑群（“Z”）稍高于西侧建筑群（“X”和“Y”），可能与广州塔形成更明显的狭管效应，且其下游方向较为空旷，更有利于风场扰动向下游传播。广州塔周边建筑群布局的差异很好地解释了平均风场和扰动幅度主要出现在广州塔东南部下游区域，而不是西南部区域（图 8c-f）。另外，我们考察了其它时次的风场扰动，也可看到类似的特征机制。由此可见，超高层建筑物的局地流场调节作用可加强风场扰动，并与周边建筑群共同作用造成局地强风的区域性差异。

图 13 强风扰动分别经过广州塔（左列）西侧和（右列）东侧时的近地面风场（箭头，单位：m/s）和气压偏差（线条，单位：Pa）。红色粗箭头标注风场扰动中心，“X-Z”分别标注三个周边建筑群，灰色区域为建筑物

Fig. 13 Near-surface wind (vector, unit: m/s) and pressure disturbance (contour, unit: Pa) associated with the wind disturbances passing the (left column) western and (right column) eastern sides of Canton Tower. Red arrows denote the centers of wind disturbance and black blocks denote the buildings

4.2 珠江南岸滨江路（东西走向）局地强风的形成机制

我们选取珠江南岸的中山大学北门两侧区域为对象（图 9a 的绿色横向矩形），考察垂直于背景风向排列的超高层建筑群对局地流场的影响。图 10b,d 显示沿河岸（东西走向）的最大风速的时间演变。河岸风速出现周期性振荡，周期约为 3 分钟，振荡振幅为 1–3 m/s，与来自上游建筑群引起的风速扰动有关。近地面的较强风速主要出现在高层住宅建筑群“金海湾”西侧的中山大学北门、“海珠半岛”的迎风面，呈现显著的局地性（图 10b）。其中，中山大学北门的近地面最大风速可达 6.5 m/s，大约是最弱风速的两倍。从“金海湾”到中山大学北门出现向西传播的现象（图 10b,d），表明来自上游地区的风场扰动在受到沿江建筑群阻挡之后，可能传播到建筑群侧边。

图 14 显示一次典型的强风扰动影响中山大学北门时的动力场分布特征,选取时次见图 10b,d。一字排列的沿江建筑群能显著阻挡向南流动的冷空气,形成明显的风场和气压场扰动。特别是,强烈的高空偏北风冲击金海湾建筑群,在其迎风面形成了气压扰动(图 14d),并在 100 米以下层次形成明显的下沉运动(图 14c)。建筑群的背风面则出现风速较小的尾流区,气压扰动不太明显。由于单体建筑之间的缝隙空间较小,建筑群起到了像屏风一样的阻挡效果,导致形成明显的高压堆积,使得等压线呈东西走向。受局地气压场影响,金海湾北侧的风向从 150 米高处偏北风转为 50 米高处东北风(图 14b)。在近地面层,建筑群北侧的流场完全转为东西向,气流沿江向西流动(图 14a)。在屏风建筑群的侧边,建筑物较少或较矮,等压线转为南北走向,气流转为向南流动并从河道溢出。最明显的屏风缺口位于金海湾西侧的中山大学北门,成为沿江气流外溢的重要通道。与之相比,金海湾东侧的建筑物较多,气流外溢现象不明显。中山大学北门的强烈东北风明显不同于其北面河道中央的较弱偏东风。由此可见,屏风缺口的局地风场不完全来自其北侧的背景流场,而是受周边建筑群阻挡而形成(图 14a 箭头所示)。进入中山大学北门的强烈偏北气流,还在下游相对开阔的校园里引起较强风速和扰动(图 8 的“K”标记)。不同于一字型排列的金海湾建筑群,海珠半岛建筑群呈半圆形排列,相应的气压扰动造成了辐散型的地面气流。但是,其两侧建筑物较多,缺口效应不太明显,局地风速稍弱于中山大学北门。由此可见,沿江密集建筑群产生显著的屏风阻挡作用,而建筑物较少的临近河岸则起到缺口流出效应,两种作用共同导致缺口处出现局地强风。

图 14 一次强风扰动经过珠江南岸建筑群时的风场(箭头,单位: m/s)、气压偏差(线条,单位: Pa)和垂直运动(阴影,单位: m/s)。黑色区域为建筑物,灰色线条标注下方建筑物轮廓。红色箭头标注中山大学北门附近的气流

Fig. 14 Horizontal winds (vector, unit: m/s), pressure disturbance (contour, unit: Pa) and vertical motion (shaded, unit: m/s) associated with a wind disturbance passing the southern bank of Pearl River. Blocks in black denote the buildings with gray contours for low buildings. Red arrows denote the flows near the northern gate of Sun Yat-sen University

5 结论

本研究主要利用中尺度模式驱动能够分辨单体建筑物的 CFD 模式,分析了一次影响广州市区的冷空气强风过程,侧重关注实际天气变化条件下的市区风场三维结构和扰动特征,并探讨超高层建筑群影响局地强风的物理机制。主要结论如下:

伴随着冷空气入侵,市区平均风速和短时扰动幅度均明显增强,其中城市冠层顶的风场扰动最为显著,呈现出高频振荡现象。新老城区上空的平均风速和扰动强度存在明显差异,新(老)城区的平均风速偏弱(稍强),但是风场扰动偏强(偏弱)。数值模拟结果与市区自动站观测相一致,表明耦合中尺度—CFD 模式具有良好的模拟能力。在低矮密集建筑的老城区下游,强风出现在距离地面 200–300 米处,并在离地 100–200 米的城市冠层顶出现强烈的垂直风切变和风场扰动。在新城区,大量高层建筑物的拖曳和扰乱效应能伸展到较高层次,整体上减弱 200–400 米层的平均风速,并造成明显的风场扰动。由高层建筑物引起的风场扰动能在开阔区域保持连贯性,传播到数公里以外的下游地区。除了城区尺度的风场差异,市区还出现了街道局地尺度的强风和扰动现象,风速大值主要出现在高层建筑群附近和下游的开阔区域,包括新城区高层建筑群之间的街道和珠江河道南岸的沿江高层建筑群附近。

考察新城区主要街道的强风现象显示,街道狭管气流在经过花城广场金融中心等超高层建筑时,出现明显的局地加速,风场扰动幅度也增加。超高层建筑的阻挡扰乱可改变气压和流场特征,产生明显的垂直环流特征,进而加强近地面风速和扰动。当强风扰动经过超高层建筑群之间时,建筑物迎风面的强烈下沉气流能加强与风速扰动有关的垂直结构,导致较高层的动量向下传播影响街道地面风速。单体超高层建筑物也可造成的绕流作用,并与周边建筑群共同作用造成有区域性差异的局地强风。垂直于背景风向的沿江建筑群能显著阻挡向南流动的冷空气,在建筑物迎风面形成明显的高压堆积,起到类似于屏风的阻挡效果。受它们的阻挡影响,近地面气流转为沿江流动,并在建筑物较少的河岸溢出形成局地强风。

研究表明市区整体风场、局地强风及其扰动特征明显受到城市建筑高度和布局的影响。局地流场的空间分布和时间演变不仅依赖于单体建筑物的调节,还依赖于上游建筑(特别是超高层建筑群)的影响。准确表征实际天气背景和城市下垫面的共同影响是模拟城市街道局地强风的关键。目前,本文只对一次冷空气强风个例

进行分析, 今后将对不同天气背景下的各类强风事件进行数值试验, 包括利用敏感性试验来评估局地强风对背景风场的敏感性, 进一步探讨复杂下垫面与中尺度天气现象共同导致局地气象灾害的形成机制。

参考文献 (References)

- Argüeso D, Evans J P, Fita L, et al. 2014. Temperature response to future urbanization and climate change [J]. *Climate Dynamics*, 42 (7–8): 2183–2199, doi:10.1007/s00382-013-1789-6.
- Assimakopoulos V D, Apsimon H M, Moussiopoulos N. 2003. A numerical study of atmospheric pollutant dispersion in different two-dimensional street canyon configurations [J]. *Atmospheric Environment*, 37 (29): 4037–4049, doi:10.1016/S1352-2310(03)00533-8.
- Aynsley R M. 1989. Politics of pedestrian level urban wind control [J]. *Building and Environment*, 24 (4): 291–295, doi:10.1016/0360-1323(89)90022-X.
- Baik J J, Park S B, Kim J J. 2009. Urban flow and dispersion simulation using a CFD model coupled to a mesoscale model [J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 48 (8): 1667–1681, doi:10.1175/2009JAMC2066.1.
- Bottema M. 2000. A method for optimisation of wind discomfort criteria [J]. *Building and Environment*, 35 (1): 1–18, doi:10.1016/S0360-1323(98)00065-1.
- Britter R E, Hanna S R. 2003. Flow and dispersion in urban areas [J]. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 35 (1): 469–496, doi:10.1146/annurev.fluid.35.101101.161147.
- Chen G, Sha W, Iwasaki T, et al. 2014. A building-resolving simulation of sea breeze over Sendai downtown with a parallelized CFD model [J]. *SENAC*, 47, 7–12.
- Chen G, Zhu X, Sha W, et al. 2015a. Toward improved forecasts of sea-breeze horizontal convective rolls at super high resolutions. Part I: Configuration and verification of a Down-Scaling Simulation System (DS3) [J]. *Monthly Weather Review*, 143 (5): 1849–1872, doi:10.1175/MWR-D-14-00212.1.
- Chen G, Zhu X, Sha W, et al. 2015b. Toward improved forecasts of sea-breeze horizontal convective rolls at super high resolutions. Part II: The impacts of land use and buildings [J]. *Monthly Weather Review*, 143 (5): 1873–1894, doi:10.1175/MWR-D-14-00230.1.
- 程雪玲, 曾庆存, 胡非, 等. 2007. 大气边界层强风的阵性和相干结构 [J]. *气候与环境研究*, 12 (3): 227–243. Cheng Xueling, Zeng Qingcun, Hu Fei, et al. 2007. Gustiness and coherent structure of strong wind in the atmospheric boundary layer [J]. *Climatic and Environmental Research*, 12 (3): 227–243, doi:10.3969/j.issn.1006-9585.2007.03.003.
- Collier C G. 2006. The impact of urban areas on weather [J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 132 (614): 1–25, doi:10.1256/qj.05.199.
- 崔桂香, 张兆顺, 许春晓, 等. 2013. 城市大气环境的大涡模拟研究进展 [J]. *力学进展*, 43 (3): 295–328. Cui Guixiang, Zhang Zhaoshun, Xu Chunxiao, et al. 2013. Research advances in large

eddy simulation of urban atmospheric environment [J]. *Advances in Mechanics*, 43 (3): 295–328, doi:10.6052/1000-0992-13-016.

胡非, 洪钟祥, 雷孝恩. 2003. 大气边界层和大气环境研究进展 [J]. *大气科学*, 27 (4): 712–728. Hu Fei, Hong Zhongxiang, Lei Xiaoen. 2003. Recent progress of atmospheric boundary layer physics and atmospheric environment research in IAP [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 27 (4): 712–728, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2003.04.18.

Hunter L J, Johnson G T, Watson I D. 1992. An investigation of three-dimensional characteristics of flow regimes within the urban canyon [J]. *Atmospheric Environment. part B. Urban Atmosphere*, 26 (4): 425–432, doi:10.1016/0957-1272(92)90049-X.

姜平. 2017. 大气重力流的精细结构及其对城市天气的影响 [D]. 中山大学博士学位论文. Jiang Ping. 2017. Fine-scale structures of gravity currents in atmosphere and their impacts on urban weather [D]. Ph. D. dissertation (in Chinese), Sun Yat-sen University.

Jiang P, Wen Z, Sha W, et al. 2017. Interaction between turbulent flow and sea breeze front over urban-like coast in large-eddy simulation [J]. *Journal of Geophysical Research*, 122: 5298–5315, doi:10.1002/2016JD026247.

蒋维楣, 苗世光, 张宁, 等. 2010. 城市气象与边界层数值模拟研究 [J]. *地球科学进展*, 25 (5): 463–473. Jiang Weimei, Miao Shiguang, Zhang Ning, et al. 2010. Numerical simulation on urban meteorology and urban boundary layer [J]. *Advances in Earth Science*, 25 (5): 463–473, doi:10.11867/j.issn.1001-8166.2010.05.0463.

矫梅燕. 2007. 关于提高天气预报准确率的一个问题 [J]. *气象*, 33 (11): 3–8. Jiao Meiyuan. 2007. The ways to enhance the weather forecast skill [J]. *Meteorological Monthly*, 33 (11): 3–8, doi:10.3969/j.issn.1000-0526.2007.11.001.

Johnson G T, Hunter L J. 1999. Some insights into typical urban canyon airflows [J]. *Atmospheric Environment*, 33 (24–25): 3991–3999, doi:10.1016/S1352-2310(99)00164-8.

Jones P J, Alexander D, Burnett J. 2004. Pedestrian wind environment around high-rise residential buildings in Hong Kong [J]. *Indoor and Built Environment*, 13 (4): 259–269, doi:10.1177/1420326X04045685.

Leonard B P. 1979. A stable and accurate convective modelling procedure based on quadratic upstream interpolation [J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 19 (1): 59–98, doi:10.1016/0045-7825(79)90034-3.

Letzel M O, Helmke C, Ng E, et al. 2012. LES case study on pedestrian level ventilation in two neighbourhoods in Hong Kong [J]. *Meteorologische Zeitschrift*, 21 (6): 575–589, doi:10.1127/0941-2948/2012/0356.

李磊, 胡非, 刘京. 2015. CFD技术在我国城市气候环境微尺度问题中的应用 [J]. *气象科技进展*, 5 (6): 23–30. Li Lei, Hu Fei, Liu Jing. 2015. Application of CFD technique on micro-scale issues in urban climatic environment researches in China [J]. *Advances in Meteorological Science and*

Technology, 5 (6): 23–30, doi:10.3969/j.issn.2095-1973.2015.06.004.

梁钊明, 高守亭, 王东海, 等. 2013. 城市下垫面对渤海湾海风锋特征影响的一次数值试验 [J]. 大气科学, 37 (5): 1013–1024. Liang Zhaoming, Gao Shouting, Wang Donghai, et al. 2013. A numerical study of the urban underlying surface effect on the characteristics of a sea breeze front in the Bohai Bay Region [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 37 (5): 1013–1024, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2013.12153.

Lilly D K. 2010. On the numerical simulation of buoyant convection [J]. Tellus, 14 (2): 148–172, doi:10.3402/tellusa.v14i2.9537.

刘辉志, 姜瑜君, 梁彬, 等. 2005. 城市高大建筑群周围风环境研究 [J]. 中国科学: 地球科学, 35 (A01): 84–96. Liu Huizhi, Jiang Yujun, Liang Bin, et al. 2005. Studies on wind environment around high buildings in urban areas [J]. Science in China (Series D Earth Sciences), 48: 1006–1013, doi:10.1360/zd2005-35-S1-84.

刘小红, 洪钟祥. 1996. 北京地区一次特大强风过程边界层结构的研究 [J]. 大气科学, 2. Liu Xiaohong, Hong Zhongxiang. 1996. A study of the structure of a strong wind event in the atmospheric boundary layer in Beijing area [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1996.02.12.

蒙伟光, 闫敬华, 扈海波. 2007. 城市化对珠江三角洲强雷暴天气的可能影响 [J]. 大气科学, 31 (2): 364–376. Meng Weiguang, Yan Jinghua, Hu Haibo. 2007. Possible impact of urbanization on severe thunderstorms over Pearl River Delta [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 31 (2): 364–376, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2007.02.17.

Miao Y, Liu S, Chen B, et al. 2013. Simulating urban flow and dispersion in Beijing by coupling a CFD model with the WRF model [J]. Advances in atmospheric sciences, 30 (6): 1663–1678, doi:10.1007/s00376-013-2234-9.

Miller S T K, Keim B D, Talbot R W, et al. 2003. Sea breeze: Structure, forecasting, and impacts [J]. Reviews of Geophysics, 41 (3), doi:10.1029/2003RG000124.

Nakayama H, Takemi T, Nagai H. 2012. Large-eddy simulation of urban boundary-layer flows by generating turbulent inflows from mesoscale meteorological simulations [J]. Atmospheric Science Letters, 13 (3): 180–186, doi:10.1002/asl.377.

Ntelekos A A, Smith J A, Baeck M L, et al. 2008. Extreme hydrometeorological events and the urban environment: Dissecting the 7 July 2004 thunderstorm over the Baltimore MD Metropolitan Region [J]. Water Resources Research, 44 (8): 134–143, doi:10.1029/2007WR006346.

Oke T R. 1988. Street design and urban canopy layer climate [J]. Energy and Buildings, 11 (1–3): 103–113, doi:10.1016/0378-7788(88)90026-6.

Park S B, Baik J J, Han B S. 2015a. Large-eddy simulation of turbulent flow in a densely built-up urban area [J]. Environmental Fluid Mechanics, 15 (2): 235–250, doi:10.1007/s10652-013-9306-3.

Park S B, Baik J J, Lee S H. 2015b. Impacts of mesoscale wind on turbulent flow and ventilation in a

densely built-up urban area [J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 54 (4): 811–824, doi:10.1175/JAMC-D-14-0044.1.

Patankar S. 1980. *Numerical heat transfer and fluid flow* [M]. Taylor & Francis Press, 214 pp.

Ryu Y H, Smith J A, Bouzeid E, et al. 2016. The influence of land surface heterogeneities on heavy convective rainfall in the Baltimore–Washington metropolitan area [J]. *Monthly Weather Review*, 144 (2): 553–573, doi:10.1175/MWR-D-15-0192.1.

Sang J J, Andrews M J. 2002. Application of the $k-\epsilon$ turbulence model to the high Reynolds number skimming flow field of an urban street canyon [J]. *Atmospheric Environment*, 36 (7): 1137–1145, doi:10.1016/S1352-2310(01)00569-6.

Schlünzen K H, Grawe D, Bohnenstengel S I, et al. 2011. Joint modelling of obstacle induced and mesoscale changes—Current limits and challenges [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 99 (4): 217–225, doi:10.1016/j.jweia.2011.01.009.

Sha W. 2002. Design of the dynamics core for a new-generation numerical model of the local meteorology [J]. *Kaiyo Mon*, 2: 107–112.

Sha W. 2008. Local meteorological model based on LES over the Cartesian coordinate and complex surface [J]. *Meteorological Research Note*, 219: 21–26.

Skamarock W C. 2008. A description of the advanced research WRF version 3 [J]. *Tech. Note*, 1–96.

Smagorinsky J. 1963. General circulation experiments with the primitive equations: I. The basic experiment [J]. *Monthly Weather Review*, 91 (3): 99–164, doi:10.1016/S1352-2310(01)00177-7.

Smith W S, Reisner J M, Kao C Y J. 2001. Simulations of flow around a cubical building: comparison with towing-tank data and assessment of radiatively induced thermal effects [J]. *Atmospheric Environment*, 35 (22): 3811–3821, doi:10.1016/S1352-2310(01)00177-7.

Tewari M, Kusaka H, Chen F, et al. 2010. Impact of coupling a microscale computational fluid dynamics model with a mesoscale model on urban scale contaminant transport and dispersion [J]. *Atmospheric Research*, 96 (4): 656–664, doi:10.1016/j.atmosres.2010.01.006.

王宝民, 柯咏东, 桑建国. 2005. 城市街谷大气环境研究进展 [J]. *北京大学学报 (自然科学版)*, 41 (1): 146–153. Wang Baoming, Ke Yongdong, Sang Jianguo. 2005. An overview of study on atmospheric environment in urban street canyons [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 41 (1): 146–153, doi:10.3321/j.issn:0479-8023.2005.01.021.

王宝民, 刘辉志, 桑建国, 等. 2003. 大风条件下城市冠层流场模拟 [J]. *大气科学*, 27 (2): 255–264. Wang Baoming, Liu Huizhi, Sang Jianguo, et al. 2003. Simulation of flow field in an urban canopy layer during the strong wind [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 27 (2): 255–264, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2003.02.12.

Wang L, Chen W. 2014. An intensity index for the East Asian winter monsoon [J]. *Journal of Climate*, 27 (6): 2361–2374, doi:10.1175/JCLI-D-13-00086.1.

Zhang Y Q, Arya S P, Snyder W H. 1996. A comparison of numerical and physical modeling of stable atmospheric flow and dispersion around a cubical building [J]. Atmospheric Environment, 30 (8): 1327–1345, doi:10.1016/1352-2310(95)00326-6.

周莉, 席光. 2001. 高层建筑群风场的数值分析 [J]. 西安交通大学学报, 35 (5): 471–474. Zhou Li, Xi Guang. 2001. Numerical analysis of the wind field on high buildings [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 35 (5): 471–474, doi:10.3321/j.issn:0253-987X.2001.05.008.

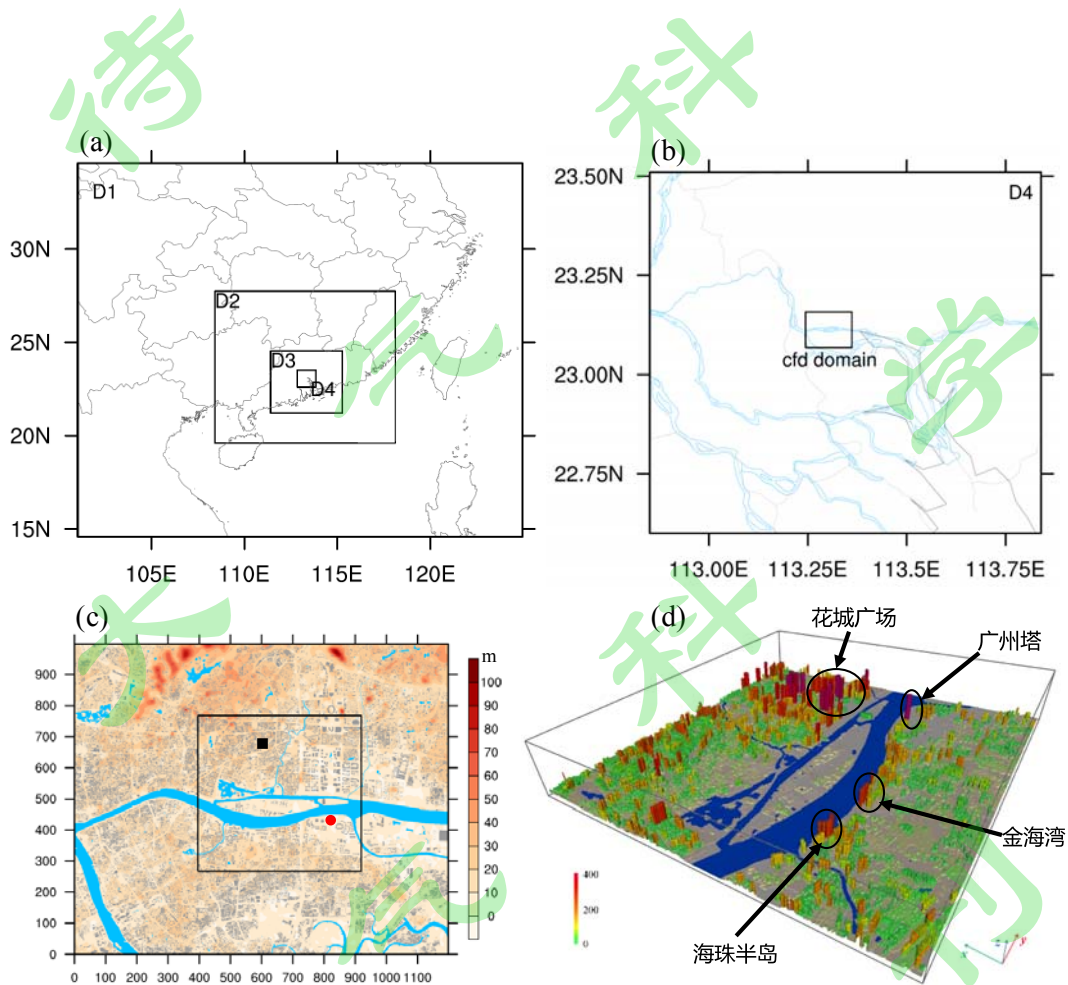


图 1 耦合中尺度-CFD 模式的区域设置和城市建筑物。(a)WRF 模式的四个嵌套模拟范围。(b) CFD 模式区域在 WRF 模式最内层区域 D4 中的所在位置。(c) CFD 模式区域内的广州地形（阴影，单位：m）和城市建筑物（灰色格点）。黑色方块和红色圆点分别标记福今路和广州塔自动观测站。(d) 广州市区中心即（c）黑色矩形区域的建筑物的三维视图（单位：m）

Fig. 1 Domain setting for the coupled mesoscale-CFD models and the buildings in Guangzhou city. (a) Four simulation domains of the WRF model; (b) The most inner domain D4 of WRF model and

the CFD domain; (c) The topography (shaded, unit: m) and buildings (blocks in gray) in the CFD domain; (d) 3D view of the buildings in the city center (unit: m)

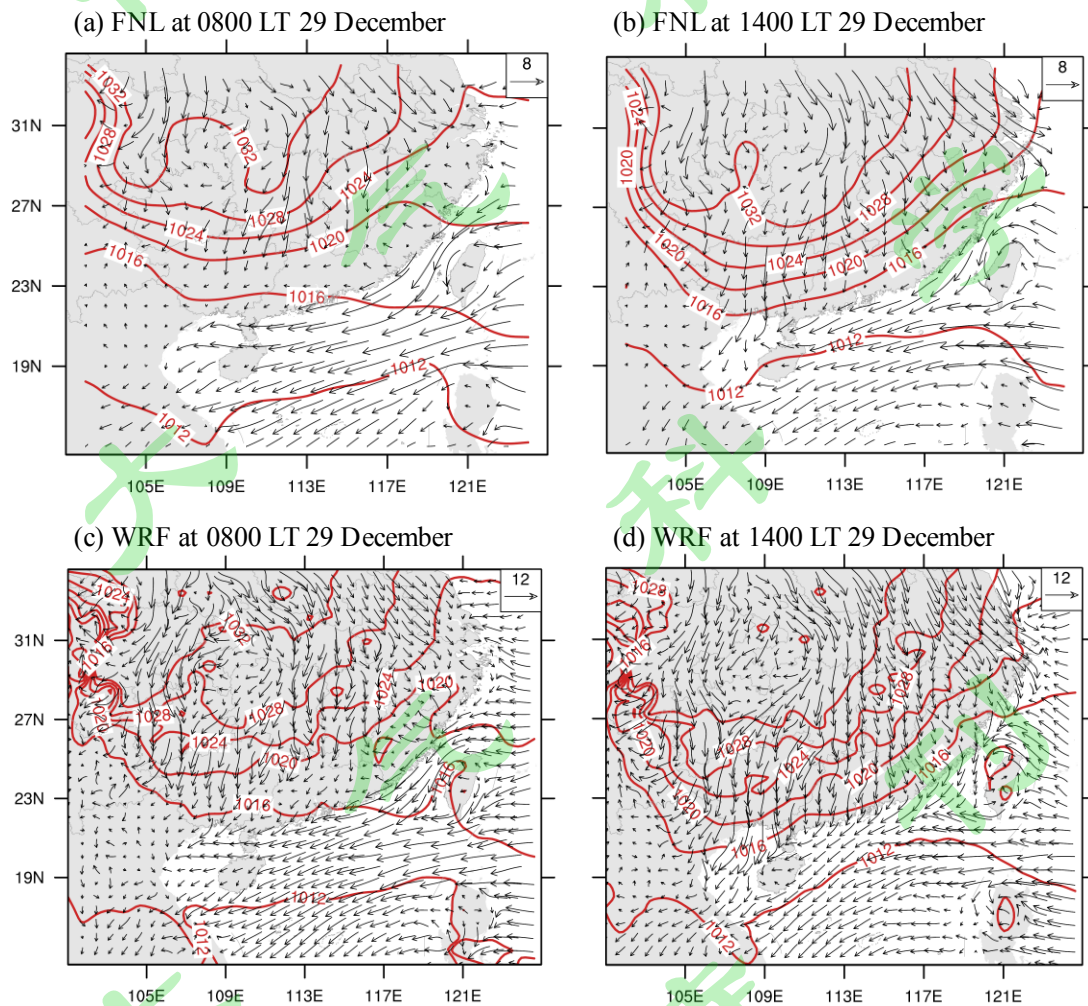


图2 冷空气入侵广州市前后的地面风场(箭头, m/s)和气压场(等值线, hPa)。(a、b) FNL 分析资料; (c、d) WRF 模拟

Fig. 2 Spatial patterns of surface winds (vector, unit: m/s) and pressure (contours, unit: hPa) before (left column) and after (right column) the invasion of cold surge into Guangzhou. (a, c) FNL analysis; (c, d) WRF simulation

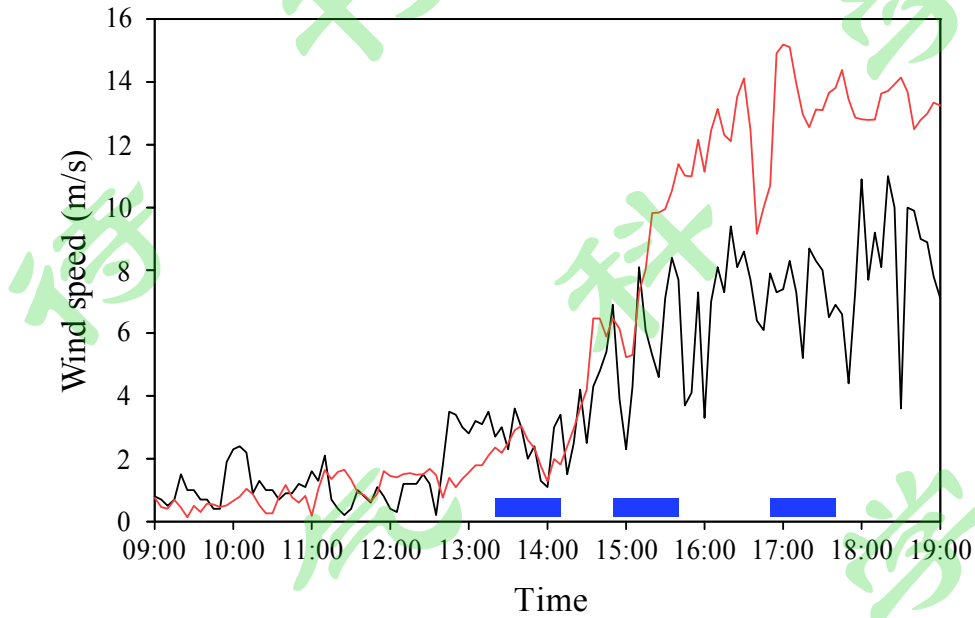


图3 2012年12月29日广州市区风速的时间演变。黑线为广州塔自动站(离地面127 m高处), 红线为WRF模式的模拟结果。横坐标蓝色方框标记三次CFD模拟时段, 分别代表冷空气入侵之前、入侵期间和入侵之后的三个阶段。数值模拟的冷空气抵达时间比实际观测提前2小时10分钟, 绘图时已移除相应的时间差

Fig. 3 Temporal variations of surface wind speed in Guangzhou during 29 December 2012. Black line denotes the observation from Canton Tower at 127 m AGL, red line denotes the WRF model simulation with the arrival hour adjusted to the observation. The blue rectangles denote three periods of CFD simulation before, during and after the invasion of cold surge

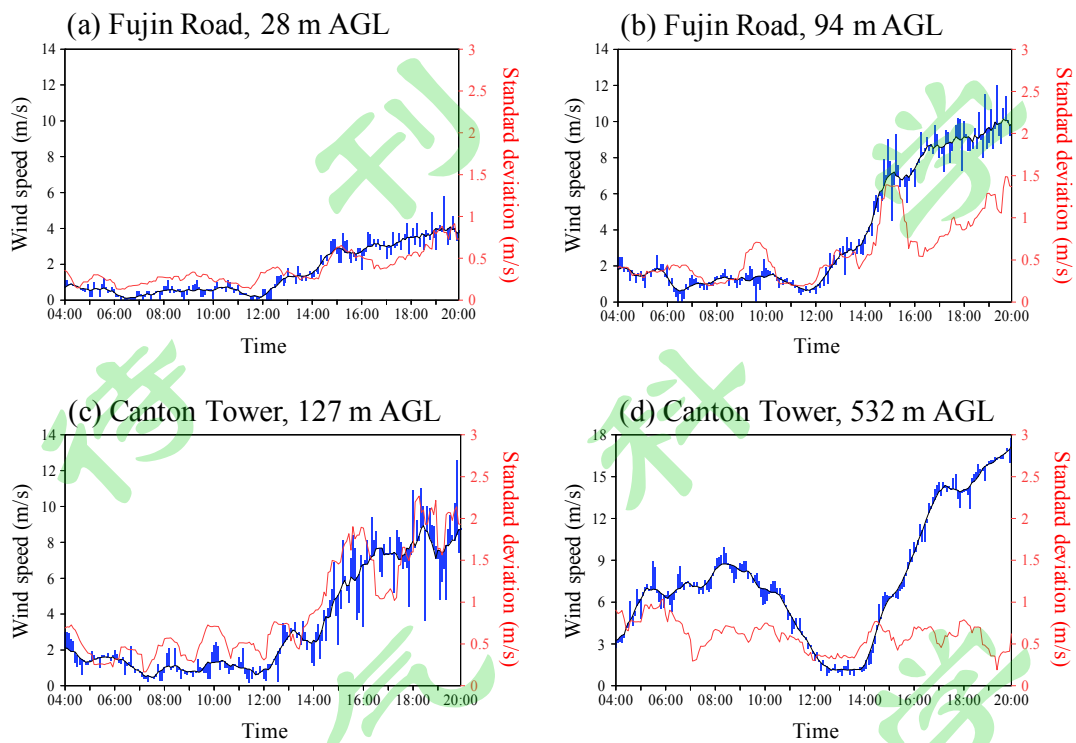


图 4 福今路和广州塔自动站的观测风速和风场扰动演变 (单位: m/s)。黑色线条为 50 分钟滑动平均的风速; 蓝色柱状图标示偏离滑动平均风速的 5 分钟风速; 红色线条代表风速偏差的滑动标准差。(a、b) 分别为福今路 28 m 和 94 m 高处的观测; (c、d) 分别为广州塔 127 m 和 532 m 高处的观测

Fig. 4 Temporal variations of the smoothed wind speed and disturbances (unit: m/s) observed at Fujin Road and Canton Tower. Black lines denote the 50-minute running mean; blue bars denote the instantaneous deviation from mean wind speed. Red lines denote the standard deviation of wind speed disturbance. (a, b) Fujin Road site at 28 m and 94 m AGL; (c, d) Canton Tower site at 127 m and 532 m AGL

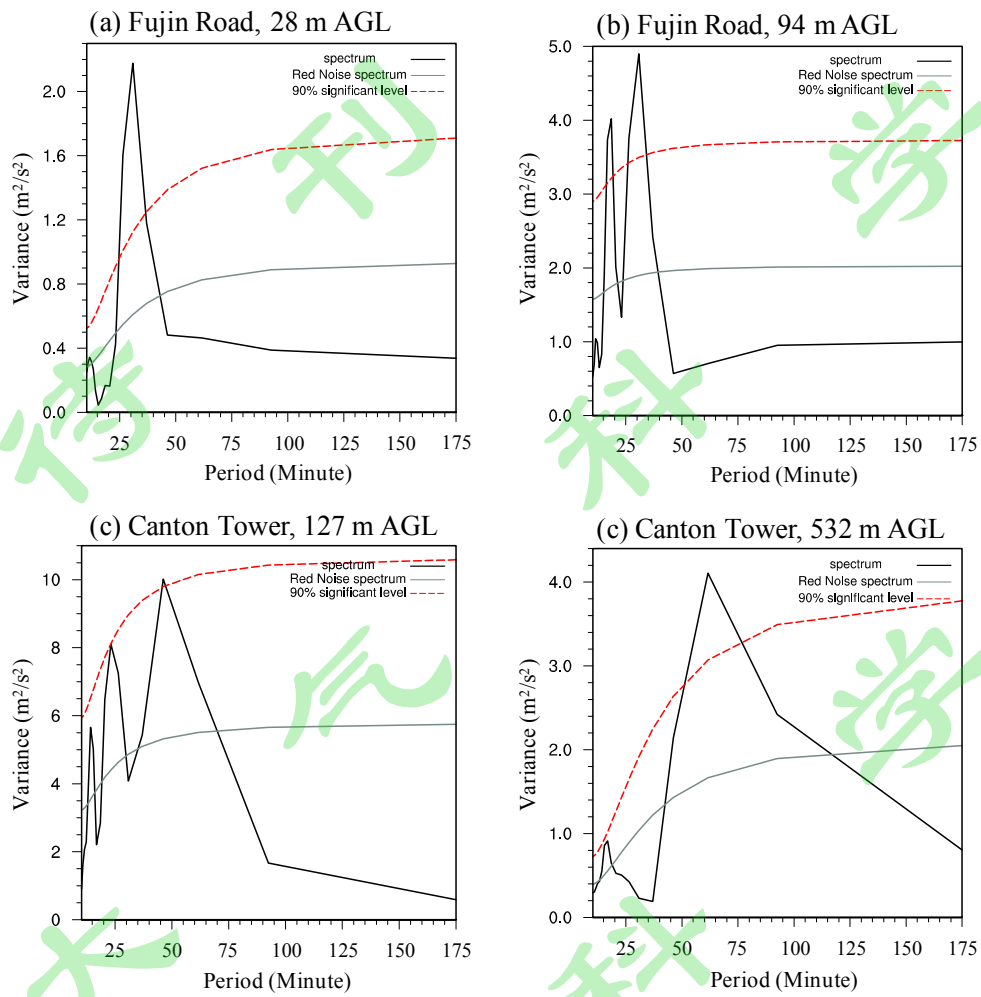


图 5 14-17 时福今路和广州塔自动站的观测风场扰动的功率谱。(a、b) 分别为福今路 28 m 和 127 m 高处的观测；(c、d) 分别为广州塔 127 m 和 532 m 高处的观测

Fig. 5 Power spectrum of the observed wind speed disturbances during 14:00-17:00. (a, b) Fujin Road site at 28 m and 94 m AGL; (c, d) Canton Tower site at 127 m and 532 m AGL

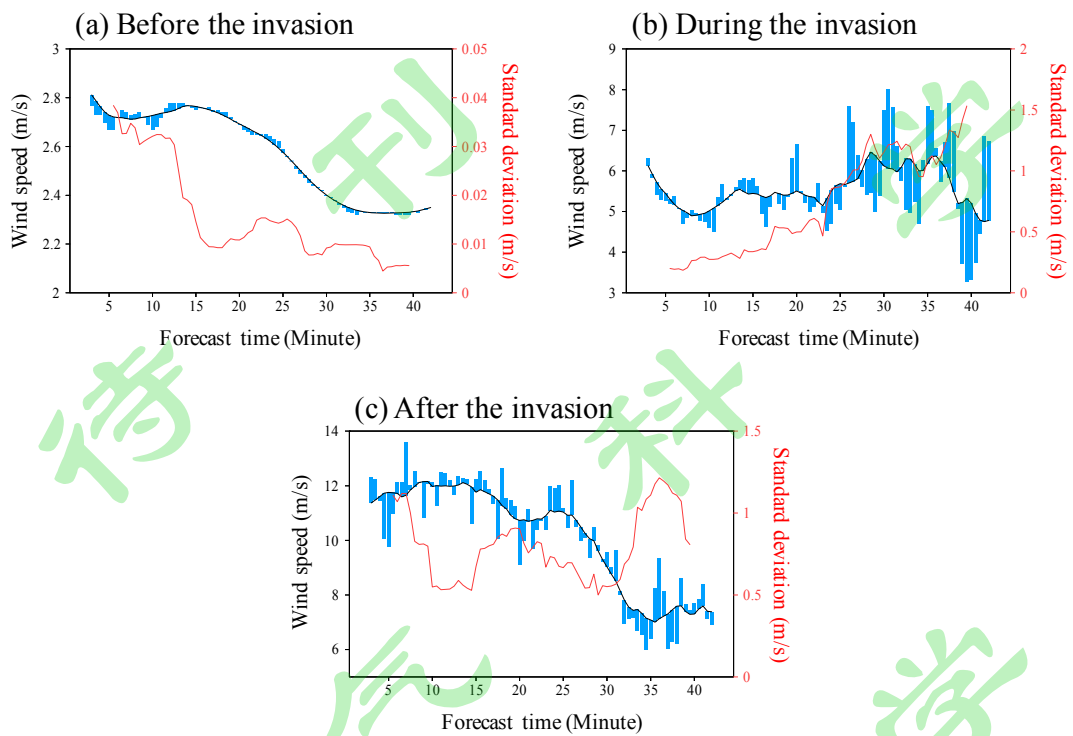


图 6 同图 4c, 但为广州塔 127 米处的冷空气 (a) 入侵之前、(b) 入侵期间和 (c) 入侵之后的 CFD 模拟风速和风场扰动。三次模拟时段见图 3 中标注。

Fig. 6 Same as in Fig. 4c, but for the wind speed of CFD simulations from the Canton Tower at 127 m AGL for the periods (a) before, (b) during, and (c) after the invasion of cold surge as shown in Fig. 3

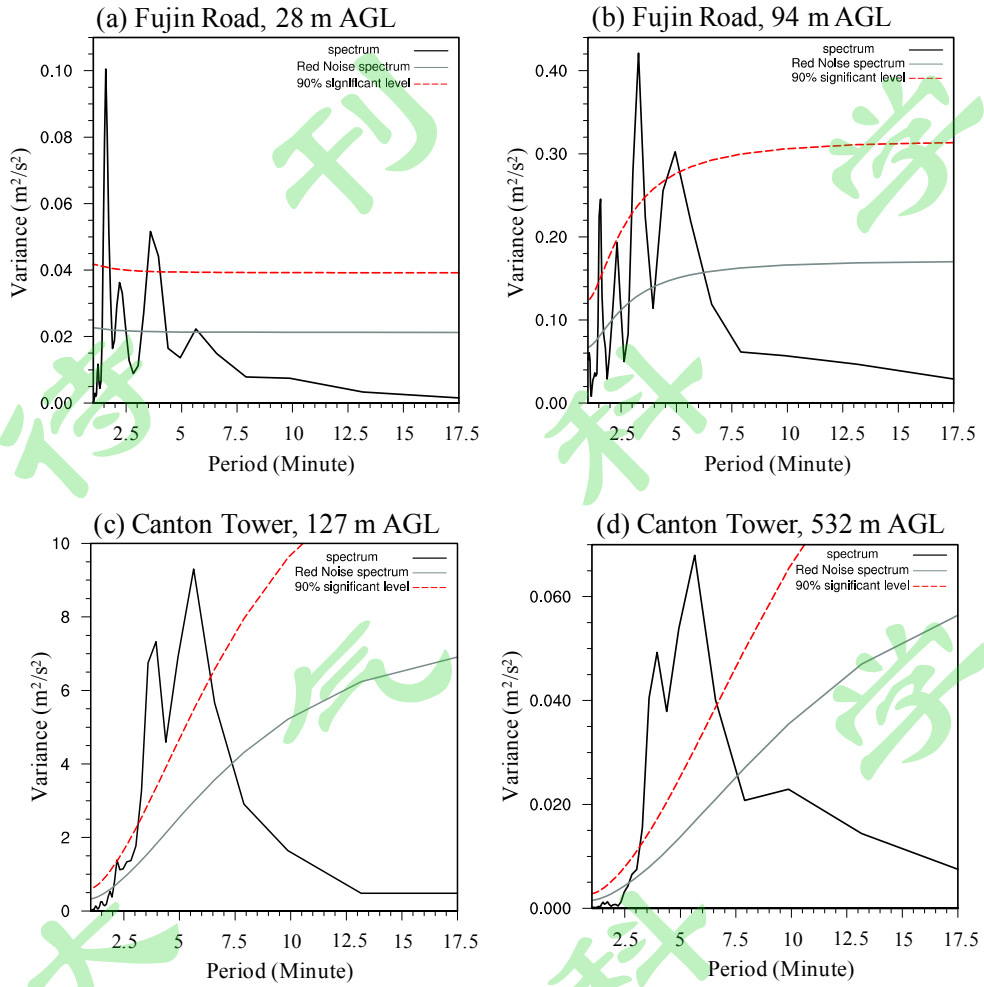


图 7 同图 5，但为冷空气入侵期间的 CFD 模拟风场的功率谱。

Fig. 7 Same as in Fig. 5, but for the power spectrum of CFD-simulated wind disturbances during the invasion of cold surge

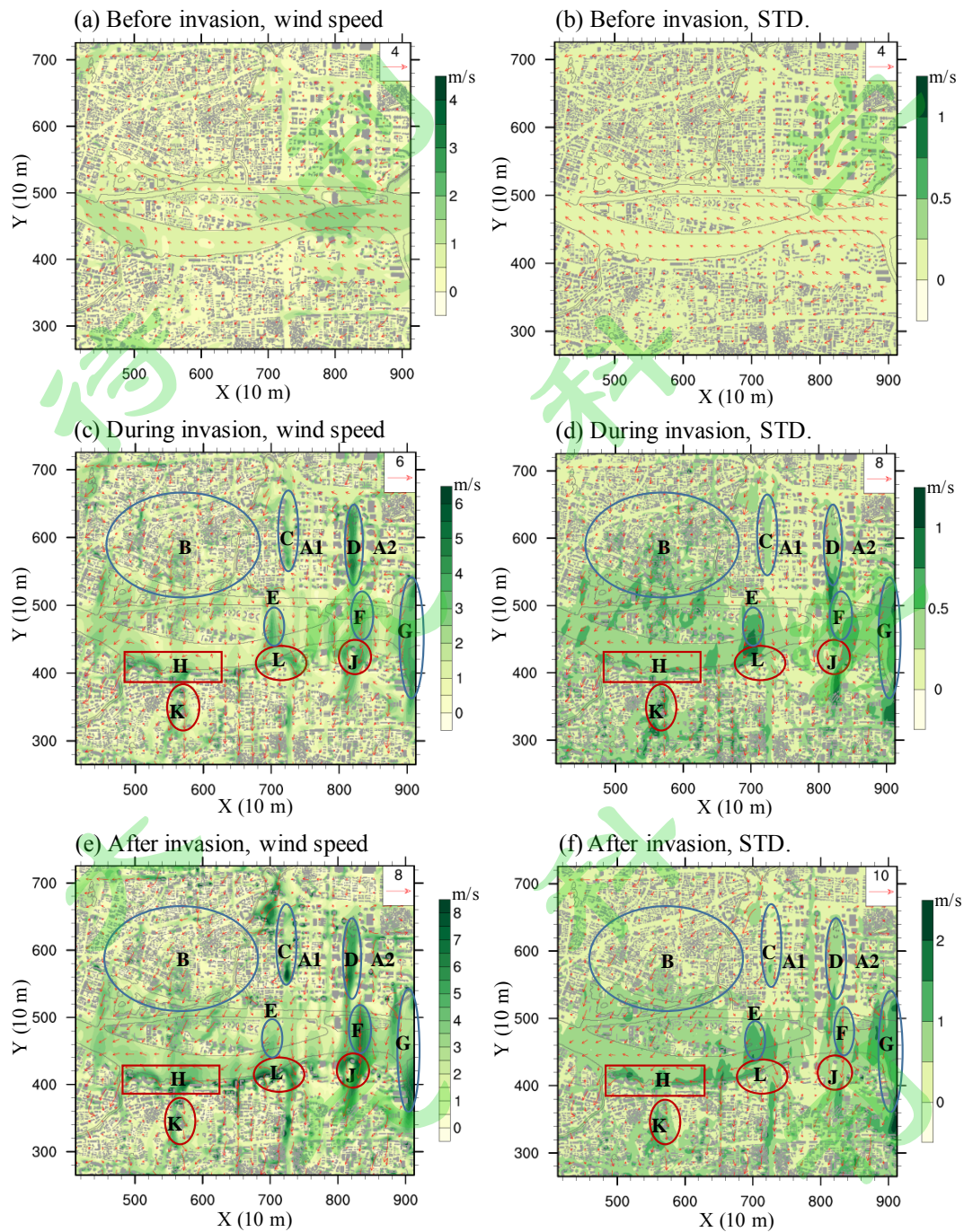


图 8 CFD 模拟 10-40 分钟期间的市区平均风速 (左列) 和风场扰动 (右列) 水平分布。(a、b) 冷空气入侵前；(c、d) 冷空气入侵期间；(e、f) 冷空气入侵之后。箭头为风矢，填色为平均风速或标准差 (单位: m/s)，灰色标记地面建筑物

Fig. 8 Spatial patterns of surface wind speed (left column, unit: m/s) and standard deviation (right column, unit: m/s) averaged during the CFD simulation of 10-40 minutes (a, b) before, (c, d) during, and (e, f) after the invasion of cold surge. Blocks in gray denote the buildings

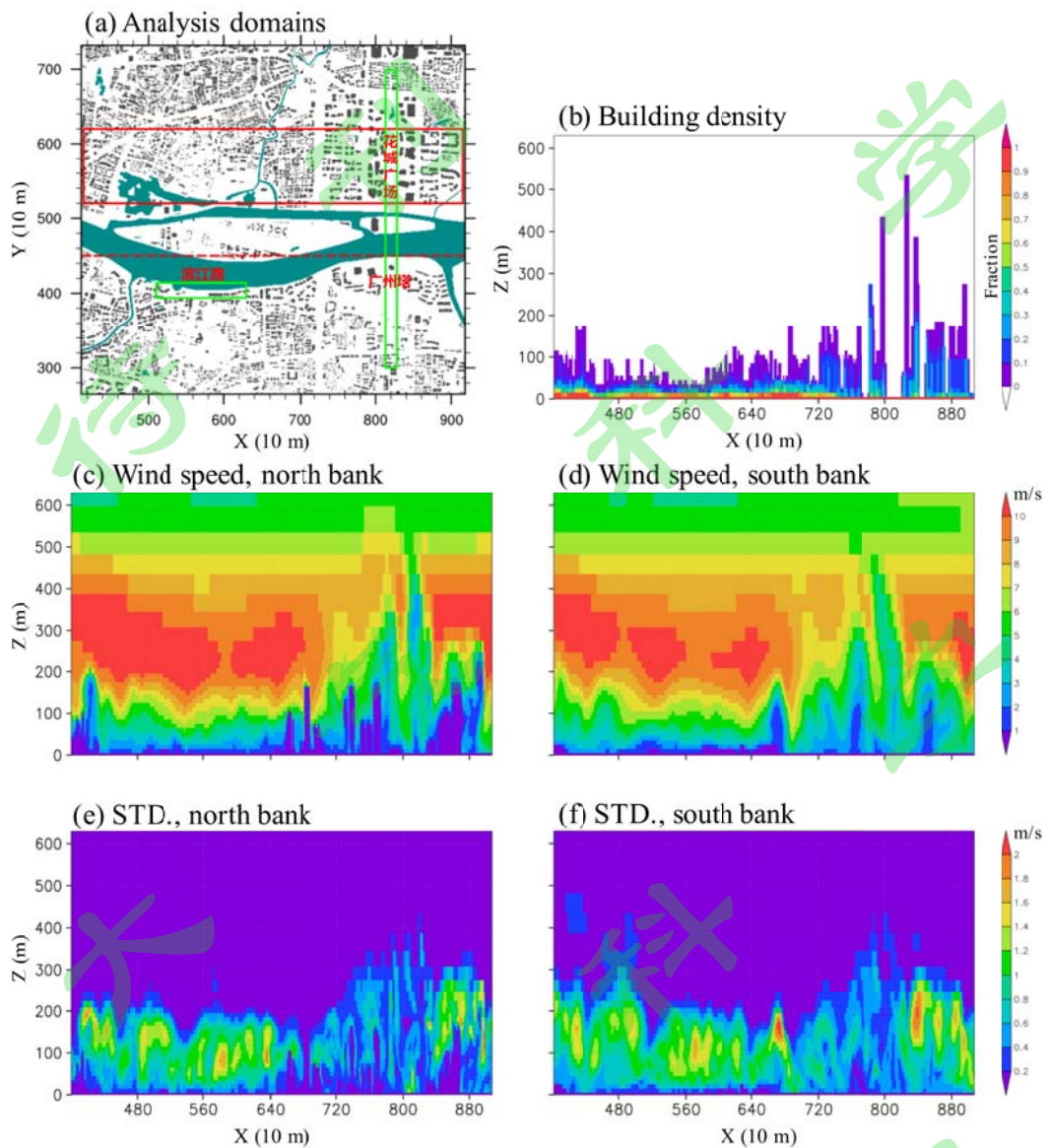


图9 市区中心建筑物和CFD模拟的冷空气入侵期间风场垂直结构。(a) 建筑物分布和分析区域, 红色矩形为珠江北岸的建筑区域, 绿色竖矩形和横矩形分别标记花城广场-广州塔和珠江南岸的局地强风区; (b) 珠江北岸的建筑密度, 统计范围在(a) 的红色矩形; (c、e) 珠江北岸沿 $Y=520$ 的平均风速和风场扰动标准差; (d、f) 珠江南岸沿 $Y=450$ 的平均风速和风场扰动标准差

Fig. 9 Buildings in the Guangzhou downtown and the vertical structures of wind speed simulated by CFD model. (a) Buildings and analysis domains, with red rectangle for the built-up area to the north of Pearl River and green rectangles for the areas of local strong winds at the Huacheng square to Canton Tower and at the southern bank of Pearl River. (b) Building density in the built-up area to the north of Pearl River. (c, d) Mean wind speed and standard deviation at the northern bank of Pearl River ($Y=520$); (e, f) same as in (c, d), but for the southern bank of Pearl River ($Y=450$)

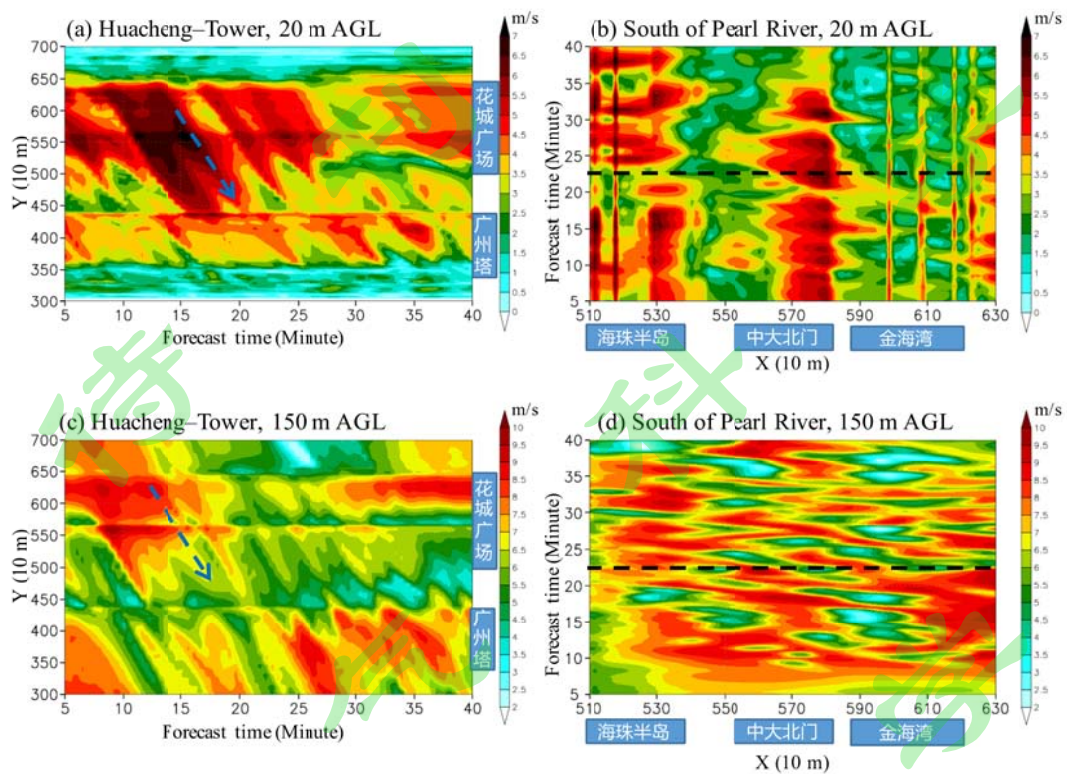


图 10 CFD 模拟的冷空气入侵期间花城广场—广州塔（左列）和珠江南岸（右列）的风速演变（阴影，单位：m/s）。统计区域位于图 9a 的绿色矩形区域。（a、c）的虚线箭头标注图 12 显示的一次强风扰动。（b、d）的虚线箭头标注图 14 显示的一次强风扰动

Fig. 10 Temporal variations of wind speed (shaded, unit: m/s) during the cold surge invasion simulated by CFD model (left column) at the Huacheng square to Canton Tower and (right column) at the southern bank of Pearl River. The domains are marked by the green rectangles in Fig. 9a. Dashed arrows in (a, c) marks a disturbance of strong wind for plotting Fig. 12, while those in (b, d) for plotting Fig. 14

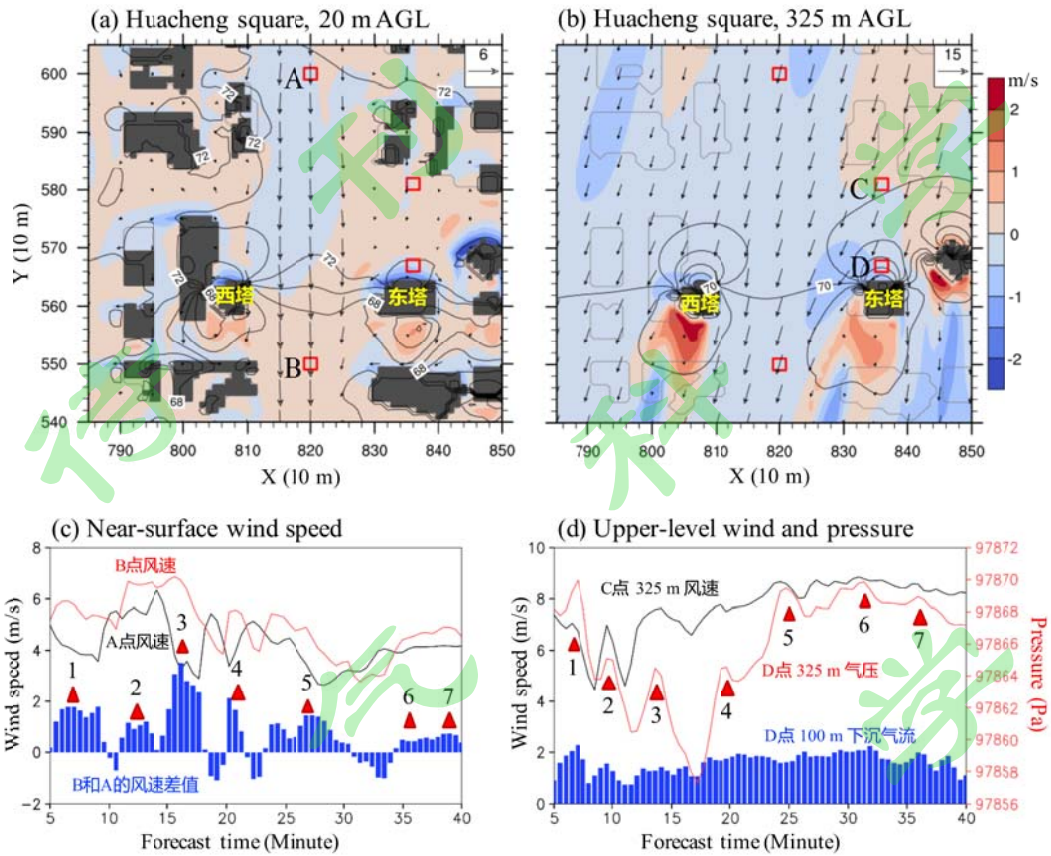


图 11 冷空气入侵期间的花城广场国际金融中心的模拟风场和气压的水平分布和时间演变。(a、b) 时间平均的风场 (箭头, 单位: m/s), 气压偏差 (等值线, 单位: Pa) 和垂直运动 (阴影, 单位: m/s), 灰色区域为建筑物。(c) 金融中心上游 (黑色线条) 和下游 (红色线条) 的近地面风速 (单位: m/s) 和差值 (蓝色柱) 的时间演变。(d) 东塔迎风面的高层风速 (黑色线条, 单位: m/s)、气压 (红色线条, 单位: Pa) 和下沉运动强度 (蓝色柱, 单位: m/s) 的时间演变。(c、d) 中的红色三角大致标注短期变化的 7 次局地极值

Fig. 11 Spatial patterns and temporal variations of winds and pressure during the cold surge invasion simulated by CFD model (left column) near the International Financial Center (IFC) towers of Huacheng square. (a, b) Mean wind speed (vector, unit: m/s), pressure disturbance (contours, unit: Pa) and vertical motion (shaded, unit: m/s), with black blocks for buildings. (c) Near-surface wind speeds at the upstream (black line) and downstream (red line) of IFC towers and their difference. (d) Upper-level wind (black line, unit: m/s), pressure (red line, unit: Pa) and intensity of sinking motion (blue bars, unit: m/s) at the windward side of IFC eastern tower. Red triangles in (c, d) denote seven times of local maxima of wind disturbances

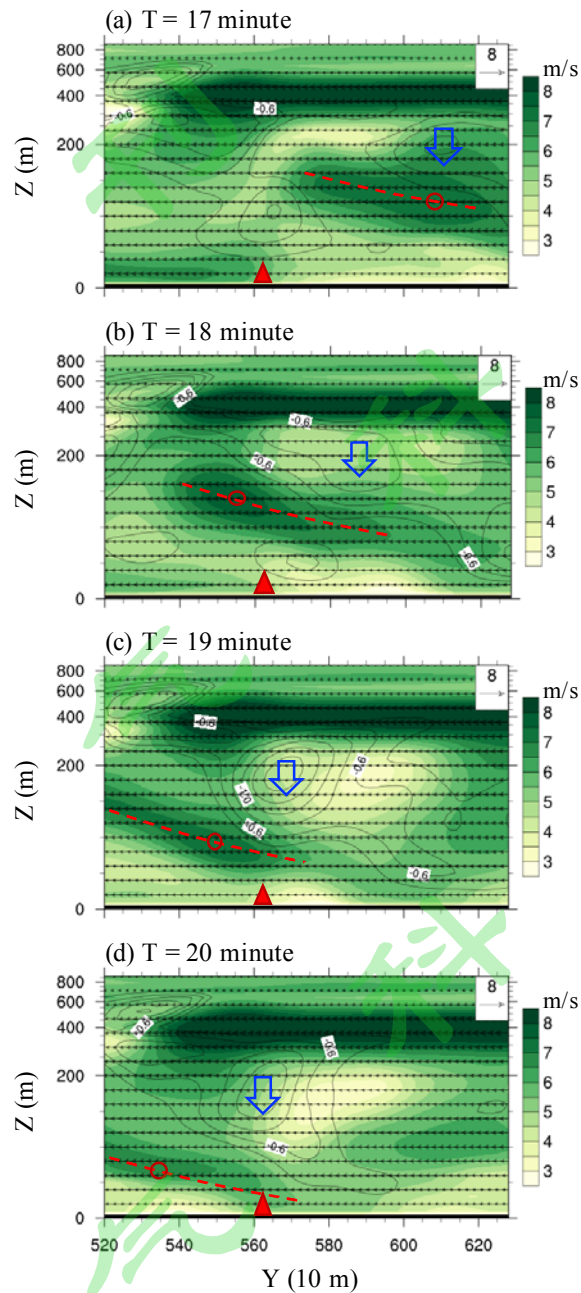


图 12 一次强风扰动经过金融中心东西塔期间沿 $X=820$ 的垂直结构和时间演变。阴影为水平风速（单位：m/s），等值为强于 -0.4 m/s 的下沉运动。虚线标注强风轴线，蓝色箭头标注下沉运动中心位置，红色三角形为东西塔所在位置

Fig. 12 Vertical structures and temporal variations of a wind disturbance passing the IFC towers of Huacheng square ($X=820$). Shaded for horizontal wind speed (unit: m/s); contours for sinking motion stronger than -0.4 m/s. Dashed lines denote the axis of strong wind and blue arrows mark the center of sinking motion associated with the wind disturbance. Red triangles denote the location of IFC towers

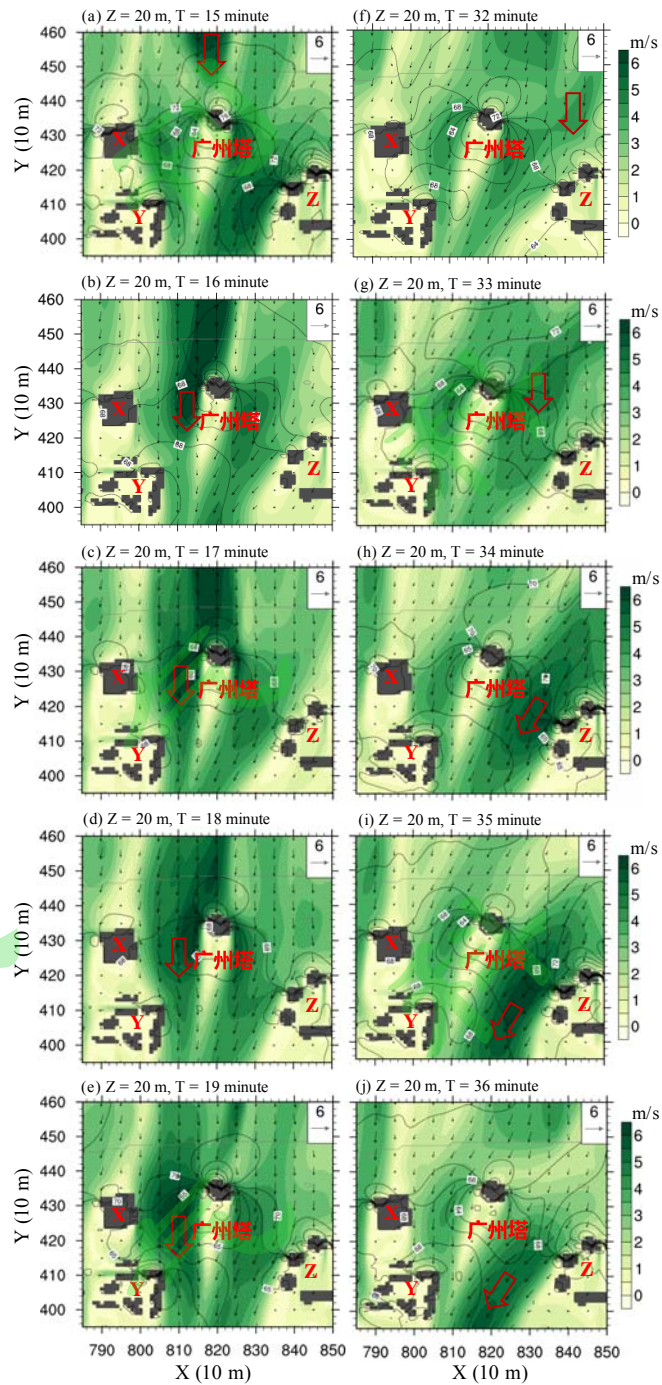


图 13 强风扰动分别经过广州塔（左列）西侧和（右列）东侧时的近地面风场（箭头，单位：m/s）和气压偏差（线条，单位：Pa）。红色粗箭头标注风场扰动中心，“X-Z”分别标注三个周边建筑群，灰色区域为建筑物

Fig. 13 Near-surface wind (vector, unit: m/s) and pressure disturbance (contour, unit: Pa) associated with the wind disturbances passing the (left column) western and (right column) eastern sides of Canton Tower. Red arrows denote the centers of wind disturbance and black blocks denote the

buildings

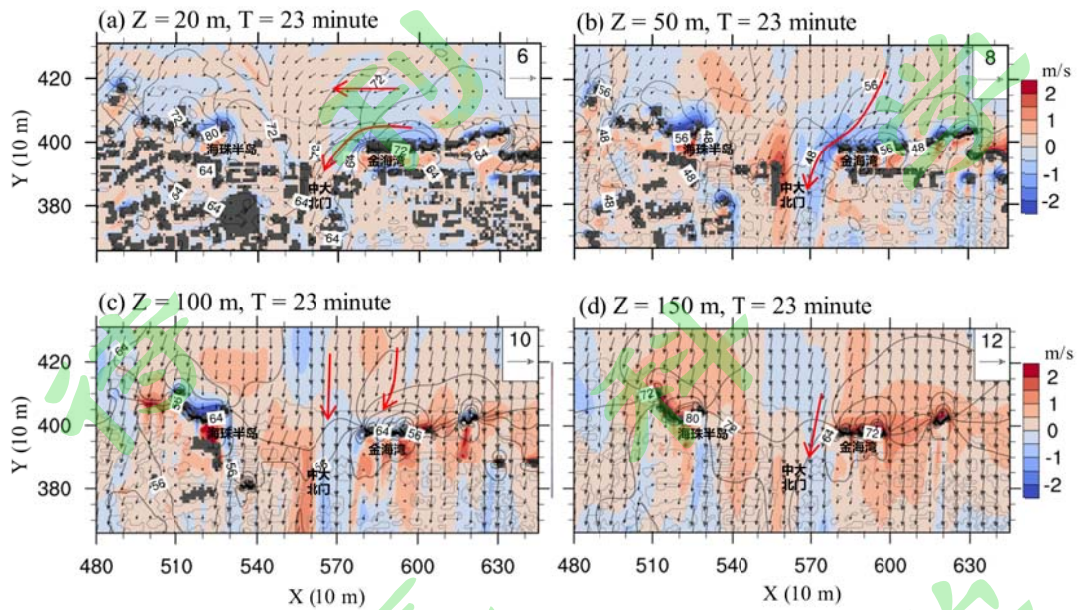


图 14 一次强风扰动经过珠江南岸建筑群时的风场（箭头，单位：m/s）、气压偏差（线条，单位：Pa）和垂直运动（阴影，单位：m/s）。黑色区域为建筑物，灰色线条标注下方建筑物轮廓。红色箭头标注中山大学北门附近的气流

Fig. 14 Horizontal winds (vector, unit: m/s), pressure disturbance (contour, unit: Pa) and vertical motion (shaded, unit: m/s) associated with a wind disturbance passing the southern bank of Pearl River. Blocks in black denote the buildings with gray contours for low buildings. Red arrows denote the flows near the northern gate of Sun Yat-sen University