

# 广州典型小区微气候特征观测与数值模拟研究\*

林满<sup>1</sup>, 王宝民<sup>1,2</sup>, 刘辉志<sup>2</sup>

(1. 中山大学大气科学系, 广东广州 510275;  
2. 中国科学院大气物理研究所 LAPC, 北京 100029)

**摘要:** 根据广州下垫面类型和湿热气候特征, 选取广州大学城一个小区为试验基地, 在典型的晴朗天气条件下, 通过实地观测和微尺度数值模式 ENVI-met, 探讨该地区的微气候特征。数值模式能较好地模拟温度、湿度及流场的空间分布和时间变化特征, 结果显示: ① 模拟区域内不同的下垫面存在高温低湿、低温高湿的现象; ② 毗邻两栋建筑之间可形成狭管流效应, 风速值约为来流风速的 1.4~1.7 倍; ③ 单体方形建筑物两侧出现角隅大风, 阵风风速可达平均风速的 2~3 倍; ④ 街谷型建筑之间有微弱的街谷涡旋形成, 其强度与街谷的几何配置和来流风向有关。

**关键词:** 微气候; ENVI-met; 数值模拟; 广州

**中图分类号:** P404 **文献标志码:** A **文章编号:** 0529-6579(2015)01-0124-06

## Observational and Numerical Study on the Microclimate over A Typical Community in Guangzhou

LIN Man<sup>1</sup>, WANG Baomin<sup>1,2</sup>, LIU Huizhi<sup>2</sup>

(1. Department of Atmospheric Sciences, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China;  
2. LAPC, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

**Abstract:** Based on the hot and humid climate and the underlying surface of Guangzhou, taking a typical community in Guangzhou Higher Education Mega Center as the test site, we analyze the microclimate characteristics over this area by meteorological observational data and a numerical model ENVI-met under typical sunny weather condition. The results indicate that the ENVI-met model can successfully simulate the special distribution and temporal evolution of temperature, humidity and flow field. ① There exist high temperature and low humidity, low temperature and high humidity over the different surfaces. ② Channeling effect can be found between the Adjoining Buildings, and the wind speed will become 1.4 to 1.7 times of the upper stream. ③ The corner flow can take place on two sides of the Single Building, and wind gust may be two to three times of the average wind speed. ④ There exists vortex between the Street Canyon Buildings. This effect is connected with the aspect ratio and the approach flow. This study helps us better understand some microclimate phenomenon in the area under sunny weather condition, which may play an important role in pedestrian comfort and diffusion of air pollutants, and can represent the features of hot and humid area. The research has practical significance for the city planning in the region with similar microclimate characteristics.

**Key words:** microclimate; ENVI-met; numerical simulation; Guangzhou

\* 收稿日期: 2013-10-22

**基金项目:** 国家重点基础研究发展计划(973计划)(2010CB428504), 气象行业专项(GYHY201306042)和中国科学院大气物理研究所开放基金项目(LAPC-KF-2009-01)联合资助项目

**作者简介:** 林满(1990年生), 男, 研究方向: 大气物理学与大气环境; **通讯作者:** 王宝民; E-mail: wangbm@mail.sysu.edu.cn

随着全球气候变暖，城市化引起的气候和环境变化越来越受到重视。城市微气候的研究始于 20 世纪 70 年代，德国斯图加特市为了减低弱风条件下的污染，绘制了第一张都市气候图<sup>[1-2]</sup>，从而展开了城市微气候的研究工作。2000 年后，日本开始关注城市化引起的局地气候变化，东京 23 区的热环境图于 2005 年问世<sup>[3-4]</sup>。2003 年，我国香港在发生“非典”之后，意识到城市通风的重要性，香港规划署联合香港中文大学等高校，采用多种手段对香港城市微气候开展系统研究<sup>[5-6]</sup>。

影响城市微气候特征的因子主要是下垫面类型，包括城市建筑、绿地、水体、土壤等的分布，从而产生微气候的局地差异。城市微气候研究方法可概况为外场观测、风洞实验和数值模拟。外场观测一般可以获得近地面要素的水平分布，而垂直廓线观测则有一定难度。风洞实验可对中性层结条件下的流场特征进行研究。随着计算条件的不断发展，数值模式在微气候研究中的应用越来越广泛，而且能够捕捉微气候特征的三维结构及演变<sup>[7-9]</sup>。

处于湿热地区的广州市，人口密集，经济发达，然而针对该地区的城市微气候研究还比较少<sup>[10-11]</sup>。本文以广州大学城一个典型小区为试验基地，选取代表性的晴朗天气条件，采用现场观测和数值模拟相结合的方法，研究该地微气候时空分布特征，以期为具有相似微气候特征的城市规划与设计提供一定的参考。

## 1 研究地点及观测方案

### 1.1 研究地点

研究地点位于番禺广州大学城内一个典型小区（图 1），研究范围 420 m × 370 m。图中 L（23.04N，113.23E）为该区域的标准参考位置。该区包括了 3 类典型的建筑形式：单体方形建筑、毗邻双体建筑和街谷建筑，下垫面类型有广场、水泥路面、树木、草地和水体，是多种下垫面混合组成的典型城市下垫面。此外，该地绿化均为亚热带地区常见植被，其蒸发率及叶面积指数等生物参数在广州地区有很好的代表性。因此选择该地微气候特征进行研究，对于广州地区城市复杂下垫面和亚热带湿热气候的特点都具有很好的典型意义。

### 1.2 观测方案

观测时间为 2013 年 4 月 14 日 09:00 - 19:00 时（北京时，下同），每小时观测 1 次，观测项目包括 2.0 m 高度的风速、气温、相对湿度及云量。观测仪器及参数见表 1，观测点共设置 8 个（图

1）。此外，也利用了自动气象站观测的风向和风速资料，该自动气象站位于研究区域西侧约 250 m 处。观测期间广州地区处于高压中心附近，位于高空高压脊后部，天气比较稳定，近地面风向为偏南风，属于比较典型的晴朗天气。本文统计分析了 1970 - 2000 年广州市番禺区的气象观测资料，其主导风向即为偏南风，而 4 月季风开始爆发，高温高湿天气开始增多，因此本文的观测代表了广州地区偏南风和高温高湿情况下的一种典型天气条件。

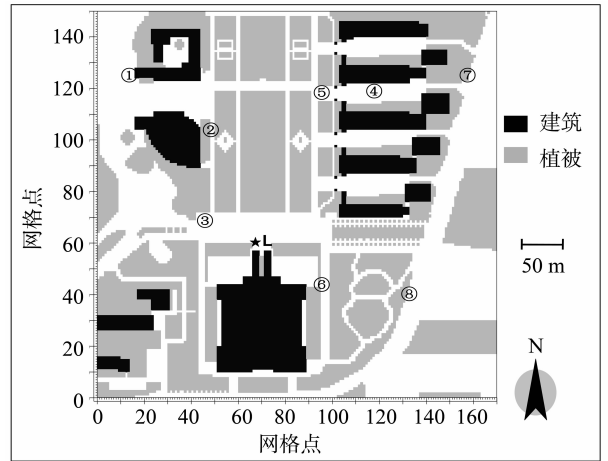


图 1 观测点分布图（序号代表观测点）

Fig. 1 Distribution of observational sites (number represents site)

表 1 观测仪器及参数

Table 1 Specific parameters of the observational instruments

项目	RotronicHP22	FYF-1 便携式
	温湿度仪	风向风速仪
测量范围	温度: -50 ~ 200℃, 湿度: 0 ~ 100%	风速: 0 ~ 30 m/s 风向: 0 ~ 360°, 16 个方位
测量精度	温度: ±0.1℃, 湿度: ±0.8%	风速: ±(0.3 + 0.03v) m/s 风向: ±1/2 方位
允许风速	20 m/s	—
启动风速	—	风速: 0.8 m/s, 风向: 1.0 m/s
工作环境	温度: -10 ~ 60℃, 湿度: ≤100%	温度: -10 ~ 45℃, 湿度: ≤100%

## 2 数值模式及模拟方案

### 2.1 数值模式简介

数值模式 ENVI-met<sup>[12]</sup> 由德国 Mainz 大学 Michael Bruce 教授及团队开发，模式以流体动力学和热力学方程组为基础，采用 1.5 阶湍流闭合方案，适用于城市环境中下垫面 - 植被 - 大气相互作用的三维微气候模拟研究。ENVI-met 模式在城市街区通风、热环境、污染物传输扩散及人体热舒适度等方面得到广泛应用<sup>[13-14]</sup>。ENVI-met 模式典型水平

分辨率为 0.5 ~ 10 m, 积分时间长度为 24 ~ 48 h, 最大时间步长为 10 s, 在这样的高分辨率条件下可以分析建筑物、下垫面、植物之间的相互作用。本文采用 ENVI-met 模式, 研究该区流场、温度场和湿度场等微气候特征, 模拟方案如下。

## 2.2 数值模拟方案

模拟区域 (图 1) 为 420 m × 370 m, 垂直高度 2 500 m, 网格距为 2.5 m × 2.5 m × 3 m, 模式采用开式侧边界条件, 模拟起始时间与开始观测的时间一致。10 m 高度风速和风向利用自动气象站观测资料, 温度和相对湿度利用当日 09:00 时 8 个观测点的平均值, 云量为当日 09:00 时的观测值。模拟初始参数为: 10 m 高度风速 1.6 m/s、风向 226°、气温 295.6 K, 2 m 高度相对湿度 61.8%、2 500 m 高度比湿 7 g/kg、低云量 6 (模

式 1 h 后低云量为 1)、中云量 1、高云量 0。

## 3 结果与分析

### 3.1 观测结果

观测得到的温度、相对湿度和风速的统计结果 (图 2) 表明: 沥青路表面 (测点 8) 为高温, 铺设地砖的表面 (测点 6) 为低温, 街谷型建筑物的内部空地 (测点 4) 因为受建筑阴影的影响, 在 14:00 时之前为低温, 之后为高温; 街谷型建筑物的通风口处 (测点 5)、测点 6 是高湿区, 而测点 4 在 14:00 时前是高湿, 之后是低湿; 测点 6 是大风区, 测点 8 是小风区。这些观测结果显示了明显的微气候因子局地差异, 同时也提供了不同下垫面与植被作用而影响气象因子的参考价值。

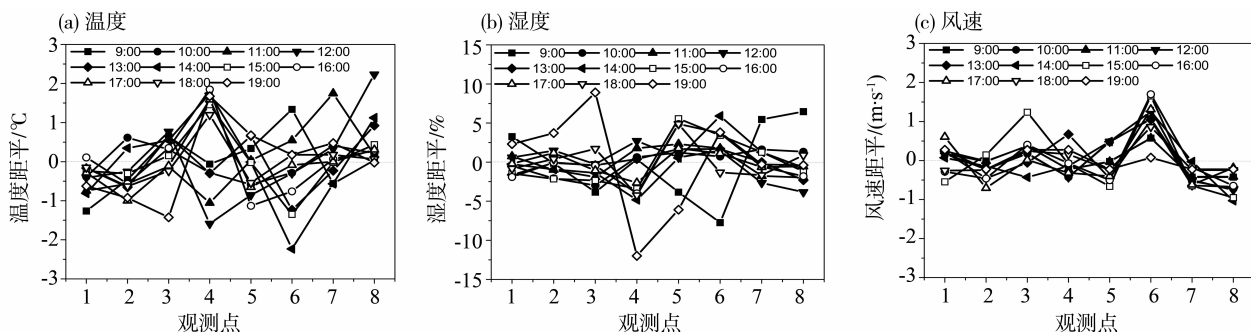


图 2 温度、相对湿度和风速观测结果统计

Fig. 2 Observational temperature, relative humidity and wind speed

### 3.2 模式和观测结果对比

图 3 给出了测点 2 的数值模拟结果与观测结果的距平值对比。温度的模拟值与实际观测值非常接近, 而从温度和湿度模拟的趋势看, 该模式很好地捕捉了两个物理量的日变化情况。12:00 时后, 温度升高、湿度降低, 18:00 时后, 温度降低、湿度升高, 并且在大部分时间, 模式准确地反映了该时刻的数值相对平均值的高低趋势, 模拟结果与

观测结果比较吻合, 其中模拟值的变化幅度稍小。风速模拟略逊于温度和湿度的模拟, 实际观测中, 风速瞬时变化大, 而模式结果的趋势较平缓, 但在时间平均值上两者非常接近, 分别是 0.8 m/s 和 0.5 m/s。其他观测点的模拟结果对比与测点 2 的结果类似 (图略), 因此, ENVI-met 模式能够较好的模拟气温、相对湿度和风速分布。

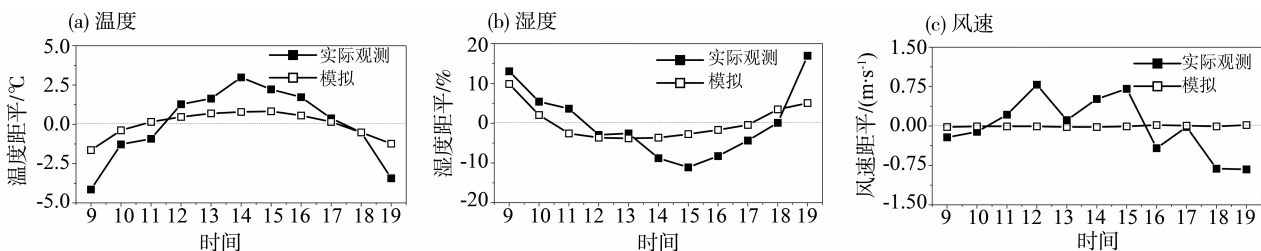


图 3 模式模拟气温、相对湿度和风速与观测结果的对比

Fig. 3 Comparison of temperature, relative humidity and wind speed between simulations and observational results

### 3.3 温度、湿度及风速水平分布特征

图 4 给出了 15:00 时的温度、湿度、风速的空间分布图。由图可看出，温度、湿度在该时刻的空间分布受下垫面的影响较大，且存在明显的高温低湿、低温高湿现象。硬体表面没有植被覆盖，是高温区，其中沥青路表面温度最高，水分蒸发快，配以开阔地形气流对水气的输送，同时也是湿度最低的区域；土壤区域由于表面植被的遮阴效果，温度较低，湿度较高，且两者的空间分布均匀，梯度小；而水体表面温度最低，且温度变化幅度最小，与之相对应，其表面湿度最大。风速图上，特别关注大建筑的周围，气流受阻挡，发生绕流，易出现大风，同时建筑的不同方位风速差异大；而密集的建筑之间，空间较封闭，空气流通差，需加强自然通风的设计。开阔地形（包括水体、硬体表面）

和植被覆盖的区域，是风速的过渡区域，风速均匀，约为 1.0 ~ 1.6 m/s。

珠江三角洲地区城市化进程非常快，密集的建筑群会使得空气停滞，降低通风效果，增加资源能耗。若是在城市建设的过程中，根据该地区的主导风向，合理安排建筑布局，设计通风管道，便可以提高城市通风效果。另外，本文中研究区域内较大范围的植被覆盖与水体设计，有明显的降温增湿作用，对于较长时间处于炎热天气的广州来说，也是很好的规划参考因素。城市规划中需要发挥江流河道、绿化对城市降温的作用，但需特别注意植被高度，才能保证行人空间里的通风效果，提高人体舒适度，在节约能源消耗的同时，也有利于污染物的传输扩散。

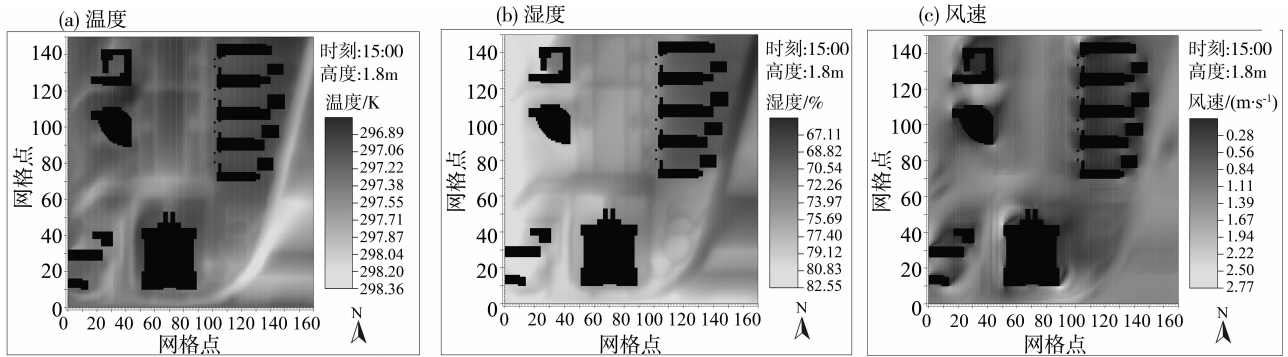


图 4 模拟的温度、湿度和风速的水平分布

Fig. 4 Horizontal distribution of temperature, relative humidity and wind speed

### 3.4 流场特征分析

主导风向为西南风时，南北走向毗邻的两栋建筑周围 1.8 m 高度的水平流场分布（图 5）中，可以看出在两栋建筑间出现高风速，其风速值约为来流风速的 1.4 ~ 1.7 倍，这就是狭管效应导致的“狭管流”，亦称“巷道风”，俗称“穿堂风”，其成因是气流截面减小而形成的不可压缩流体的流速升高。在城市街区中，狭管效应主要出现在行人高度（1.75 ~ 2 m），而在高处该效应不明显<sup>[15]</sup>。狭管效应导致的高风速可能会对行人产生不适，但另一方面，狭管流对污染物的传输扩散有一定的促进作用。

图 6 给出了单体建筑物周围 1.8 m 高度的水平流场分布。来流风向为西南风，建筑物迎风面被阻塞的气流在其两侧产生绕流，形成角隅流强风区。其风速特别是阵风风速可达到来流平均风速的 2 ~ 3 倍。当城市中主导风向与建筑物成一夹角时，若

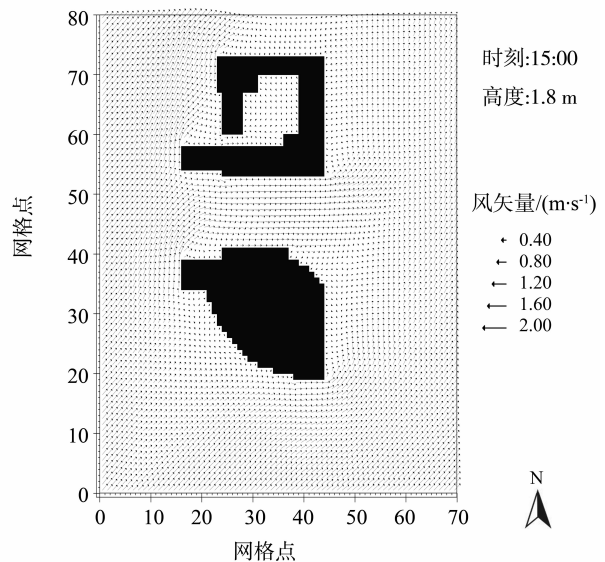


图 5 毗邻的建筑物周围水平流场分布

Fig. 5 Horizontal flow field around Adjoining Buildings

来流风速为 8 m/s (5 级风), 在角隅流区阵风可达 20 m/s (9 级风)<sup>[7]</sup>, 这时便需要加强整个城市的高空物体的抗风力设计。在建筑物的下风方向 (东北角) 是尾流区, 此区域内基本气流微弱, 可能出现有涡旋, 与建筑物的配置及风向有关。

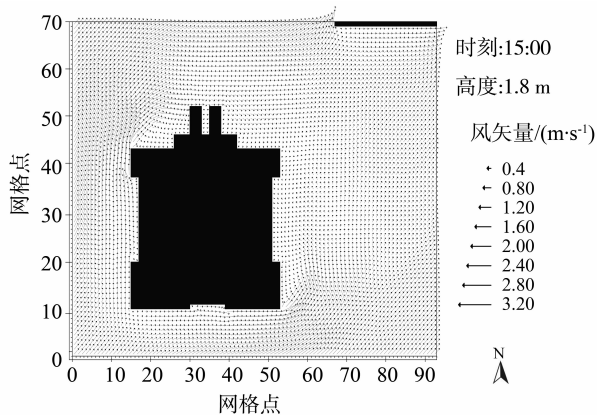


图 6 单体建筑物周围水平流场分布

Fig. 6 Horizontal flow field around Single Building

从单体建筑物的南北方向垂直剖面的流场分布 (图 7) 可以看到, 平均风流经该建筑后, 形成的流场可分为下冲区、上升区和尾流区。下冲区: 在建筑物的迎风面的下部分 (图 7 中垂直格点 9 以下部分), 平均流碰到迎风墙面后, 被迫分流, 下半部分的气流冲向地面并形成微弱的回流; 上升区: 迎风面上半部气流越过建筑物, 由于流线压缩而流动加快, 形成在屋顶前部的强风区; 尾流区: 建筑物背风面都是尾流区, 这里风速减弱, 并有弱涡旋形成, 对污染物的传输扩散不利。

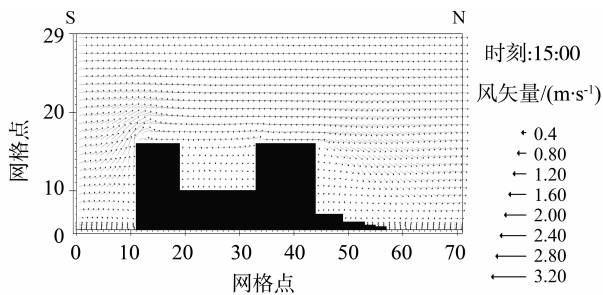


图 7 单体建筑物南北方向垂直剖面流场分布 (图左侧为南)

Fig. 7 Flow field along south to north vertical cross section of Single Building ( Left is South)

街谷型建筑的南北方向垂直剖面流场分布 (图 8) 显示的迎风面气流下冲、上升和屋顶强风

区特征与单体建筑物南北垂直剖面的流场分布相似。其 4 个街谷间风速较低, 并有微弱的涡旋形成。有关研究指出<sup>[16]</sup>, 街谷涡旋的出现与否、强度大小及出现个数与街谷的几何配置 (街谷高宽比) 和来流风向有关, 例如当来流风向垂直街谷走向时最易出现街谷涡旋, 此时也对污染物的扩散极为不利。城市中, 教学楼及商业中心区等多为街谷型建筑, 此时更需要配合该地区的主导风向设计建筑走向, 以增强建筑群利用自然通风对局地污染物的清除能力。

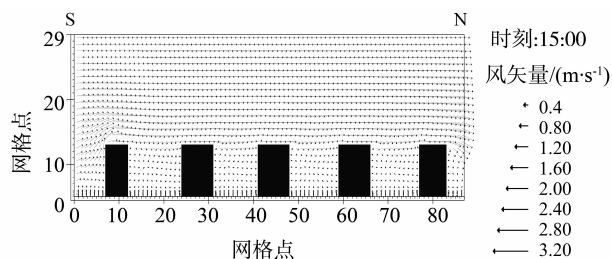


图 8 街谷型建筑南北方向垂直剖面流场分布 (图左侧为南)

Fig. 8 Flow field along south to north vertical cross section of The Street Canyon Buildings ( Left is South)

## 4 结 论

采用观测和模式相结合的方法, 以广州大学城一个典型小区为试验基地, 选取典型高压系统控制下的晴朗天气, 研究了气温、湿度和风场的微气候特征, 对典型下垫面类型 (水泥路面、绿化带和 水体) 与典型建筑形式 (单体建筑、双体建筑和街谷建筑) 的微气候效应进行分析, 得到以下结论:

1) ENVI-met 模式在考虑各种下垫面及建筑物的热力学和动力学参数后, 能够较好地捕捉该区域的温度、湿度及流场的空间分布和时间变化, 并与实地观测结果吻合。

2) 在晴朗天气条件下, 水泥路面、绿化带和 水体导致的温度和湿度分布有显著差异, 水泥路面表现出高温低湿, 水体表面表现出低温高湿的特征, 而绿化带则是温度与湿度的过渡区域, 植被降温增湿作用介于水体和水泥路面之间。

3) 单体建筑、毗邻双体建筑和街谷建筑形式对 流场的影响各异。来流为西南风时, 单体建筑物迎风面两侧出现角隅大风, 阵风风速可达平均风速的 2.0~3.0 倍; 毗邻的双体建筑间行人高度出现

狭管流, 风速值约为来流风速的 1.4 ~ 1.7 倍; 街谷建筑物之间出现弱涡旋, 各建筑物的背风尾流区风速微弱。

4) 揭示的上述微气候特征有助于城市规划中完善及综合考虑各种下垫面的布局、建筑走向及建筑形式的优化选择。

#### 参考文献:

- [1] KNOCH K. Über das Wesen einer Landesklimaaufnahme [J]. Meteorol Z, 1951, 5: 173 - 184.
- [2] BAUMOLLE R J, REUTER U. Demands and requirements on a climate atlas for urban planning and design [R]. Stuttgart: Office of Environmental Protection, 1999.
- [3] YAMAMOTO Y. Measures of mitigate urban heat islands [J]. Global Change and Sustainable Development, 2008, 1(2): 18 - 46.
- [4] Architectural Institute of Japan. Observational studies of the urban heat island-cooling effect of urban park [R]. Tokyo: Architect Institute of Japan, 2008.
- [5] CUHK. Urban climatic map and standards for wind environment-feasibility study[R]. Hong Kong: Planning Department, 2006.
- [6] 任超, 吴恩融, KATZSCHNER L, 等. 城市环境气候图的发展及其应用现状[J]. 应用气象学报, 2012, 23(5): 593 - 603.
- [7] 桑建国, 刘辉志, 王宝民, 等. 街谷环流和热力结构的数值模拟[J]. 应用气象学报, 2002, 13(特): 69 - 81.
- [8] WANG B M, LIU H Z, SANG J G, et al. Numerical simulation of pedestrian level winds around tall buildings [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2007, 46(2): 102 - 109.
- [9] HANG J, LI Y G, RICCARDO B, et al. On the contribution of mean flow and turbulence to city breathability: the case of long streets with tall buildings[J]. Science of the Total Environment, 2012, 416: 363 - 373.
- [10] 陈卓伦, 赵立华, 孟庆林, 等. 广州典型住宅小区微气候实测与分析[J]. 建筑学报, 2008, 11: 24 - 27.
- [11] 李晋, 张威. 体育馆非对称形态对观众区风环境的影响[J]. 华南理工大学学报:自然科学版, 2012, 40(9): 139 - 159.
- [12] BRUSE M, HERIBERT F. Simulating surface plant-air interactions inside urban environments with a three dimensional numerical model [J]. Environmental Modelling & Software, 1998, 13(4): 373 - 384.
- [13] FAZIZ A T and HELMUT M. Effects of asymmetry, galleries, overhanging facades and vegetation on thermal comfort in urban street canyons [J]. Solar Energy, 2007, 81: 742 - 754.
- [14] 周宇, 穆海振. 微尺度气象模式在环境影响评价中应用初探[J]. 高原气象, 2008, 27(增): 203 - 209.
- [15] BLOCKEN B, CARMELIETA J, STATHOPOULOS T. CFD evaluation of wind speed conditions in passages between parallel buildings—effect of wall-function roughness modifications for the atmospheric boundary layer flow [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2007, 95: 941 - 962.
- [16] SIMOENS S, AYRAULT M, WALLACE J M. The flow across a street canyon of variable width-Part 1: Kinematic description [J]. Atmospheric Environment, 2007, 41: 9002 - 9017.
- [13] 张璐, 杨修群, 汤剑平, 等. 夏季长三角城市群热岛效应及其对大气边界层结构影响的数值模拟 [J]. 气象科学, 2011, 31(4): 431 - 440.
- [14] LIN C Y, CHEN F, HUANG J C, et al. Urban heat island effect and its impact on boundary layer development and land-sea circulation over northern Taiwan [J]. Atmos Environ, 2008, 42(22): 5635 - 5649.
- [15] 范绍佳, 王安宇, 樊琦, 等. 珠江三角洲大气边界层概念模型的建立及其应用 [J]. 热带气象学报, 2005, 21(3): 286 - 292.
- [16] 范绍佳, 王安宇, 樊琦, 等. 珠江三角洲大气边界层特征及其概念模型 [J]. 中国环境科学, 2006, 26(Suppl.): 4 - 6.
- [17] FAN S J, FAN Q, YU W, et al. Atmospheric boundary layer characteristics over the Pearl River Delta, China, during the summer of 2006; measurement and model results [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2011, 11: 6297 - 6310.
- [18] 蒙伟光, 张艳霞, 李江南 等. WRF/UCM 在广州高温天气及热岛效应模拟中的应用 [J]. 热带气象学报, 2010, 26(3): 273 - 282.
- [19] 王志铭, 王雪梅. 广州人为热初步估算及敏感性分析 [J]. 气象科学, 2011, 31(4): 422 - 430.
- [20] 蓝静. 珠三角区域气溶胶污染及低能见度过程的数值模拟 [D]. 广州: 中山大学, 2013.

(上接第 123 页)