

doi:10.11918/j.issn.0367-6234.2015.02.005

城市局地热气候预测及热岛效应缓解策略

宋晓程¹, 刘 京^{1,2}, 林姚宇³, 刘 琳¹, 王 丹³

(1.哈尔滨工业大学 市政环境工程学院, 150090 哈尔滨; 2.城市水资源与水环境国家重点实验室(哈尔滨工业大学), 150090 哈尔滨; 3.哈尔滨工业大学深圳研究生院 深圳市城市规划与决策仿真重点实验室, 518055 广东 深圳)

摘 要: 为量化分析下垫面对局地热环境的影响, 采用多用途建筑区域热气候评价模型, 以深圳国际低碳城核心启动区为对象, 讨论下垫面构成对热岛强度及热舒适性的影响. 研究表明: 最大局地热岛强度体现最热极端情况的气候差异, 平均局地热岛强度反映全天气温的平均差异; 夜间平均局地热岛强度高于白天; 自然下垫面中, 增大水体和树木的覆盖率起到的降温效果更好, 而适当增加草地的覆盖率能更有效地提高室外环境舒适度.

关键词: 城市热岛; 指标评价; 区域热气候预测模型; 优化策略

中图分类号: TU14

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2015)02-0025-06

Regional thermal climate prediction and mitigation strategy of local urban heat island

SONG Xiaocheng¹, LIU Jing^{1,2}, LIN Yaoyu³, LIU Lin¹, WANG Dan³

(1.School of Municipal and Environmental Engineering, Harbin Institute of Technology, 150090 Harbin, China;

2. State Key Laboratory of Urban Water Resource and Environment(Harbin Institute of Technology), 150090 Harbin, China;

3. Shenzhen Key Laboratory of Urban Planning and Decision Making, Harbin Institute of Technology

Shenzhen Graduate School, 518055 Shenzhen, Guangdong, China)

Abstract: To analyze the effect of underlying surfaces on local thermal climate, this paper took the international low-carbon city of Shenzhen as an example, and the effects of different underlying surfaces on the urban heat island (UHI) and outdoor thermal comfort were discussed by using multipurpose regional thermal climate prediction model. The results showed that the maximum urban heat island intensity(UHII) reflected the temperature difference between urban and suburban of the hottest cases while the average local UHII reflected the average difference of the whole day. And the average local UHII of night was higher than the average local UHII of daytime. Besides, the cooling effects of water and trees were better compared with other natural underlying surfaces, while appropriate increase of grass coverage could more effectively improve the outdoor thermal comfort.

Keywords: urban heat island; evaluation indicator; regional thermal climate prediction model; mitigation strategy

一直以来城市热岛问题备受人们关注.大量研究分析表明,城市热岛效应的分布特征与城市下垫面的结构形态密切相关^[1],是热岛效应问题

研究的重点和难点.研究方法也由过去单一的实地观测^[2]发展到遥感成像^[3]、数值模拟^[4]等结合的多样化研究.

目前国内局地城市热岛效应问题中涉及空间风场和温度场的数值模拟以 CFD 模拟的应用尤为广泛.但是 CFD 模拟在局地城市热气候问题研究方面存在计算容量要求高,长期动态模拟计算周期较长等问题.针对长期动态热岛效应问题,CFD 模拟较难发挥其精确捕捉计算域内三维空

收稿日期: 2014-03-10.

基金项目: “城市水资源与水环境国家重点实验室”开放课题(2010TS04); 深圳市科技研发资金项目(JCYJ20120615145601342, JCYJ20130325151523015).

作者简介: 宋晓程(1987—),女,博士研究生;

刘 京(1972—),男,教授,博士生导师.

通信作者: 刘 京,liujinghit0@163.com.

间场分布的优势,而城市冠层模型不拘泥于城市内复杂的布局,弥补了 CFD 模拟的缺陷,通过对冠层内的热质交换计算研究城市高温化的成因,得到越来越多的推广和应用^[5].然而国内采用冠层模型研究局地城市热岛效应的相关研究较少,且缺少具体定量分析.

基于以上背景,本文采用课题组研发的多用途建筑区域热气候预测模型和软件,以深圳国际低碳城核心启动区为对象,在夏季最热月情况下对该区域的夏季热环境进行了长期动态模拟,研究其局地城市热岛效应及改善策略.

1 研究方法

1.1 多用途建筑区域热气候预测模型

多用途建筑区域热气候预测模型由多个模块互相耦合构成,考虑了城市大气热力、动力特性和各种城市下垫面热物性对城市热气候的影响.模型还可根据需要,模拟实际城市区域尤其是大型城市综合体(由居住、办公、商业金融、文化娱乐、学校等各用途类型建筑共同构成的多功能建筑群落)中不同建筑负荷、设备性能并存以及和城市热气候之间相互作用的复杂情况.为维持这些建筑的室内环境,需要将内部负荷通过空调制冷系统排至室外.而人工排热量影响室外热气候,从而反过来又影响建筑内部负荷.因此本模型考虑了多用途类型建筑并存的都市区域实际情况,针对各用途类型建筑采用不同的内部负荷逐时变化规律、空调制冷系统的形式和安装位置等机制,考虑不同用途建筑排热对区域内部热气候的影响差异.

多用途建筑区域热气候预测模型和软件的主要结构示意图见图 1.

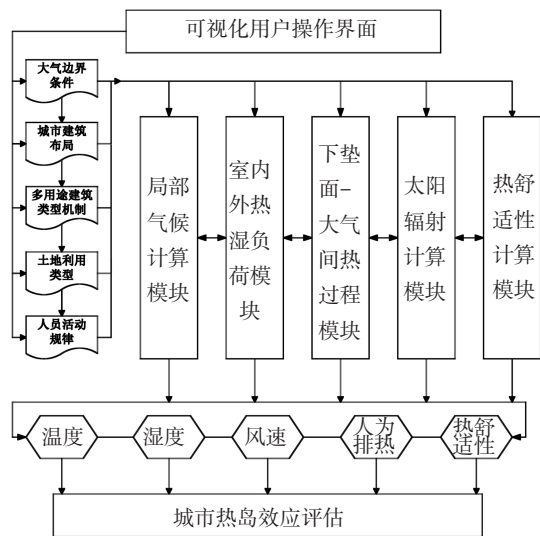


图 1 多用途建筑区域热气候预测模型软件结构示意图

相应计算模块简介如下:

局地气候计算模块 基本方程式参照近藤等提出的城市冠层理论并进行了适当修改^[6],对于建筑群之间及其上部的空气块,只考虑垂直方向的温度、风速和含湿量分布变化.

室内外热湿负荷模块 包含了居住、办公、商业金融、文化娱乐、学校等各种类型的建筑,要注意的是,不同类型建筑内部的负荷逐时变化规律、空调制冷系统的形式、安装位置等都存在明显差异,对区域内部热气候的影响也就不同.本模式中考虑了多功能类型建筑并存的都市区域实际情况^[7].

下垫面-大气间热过程模块 实际的都市区域内除建筑表面外,还存在大量各类型下垫面.这些下垫面通过不同形式与大气间进行热量和水分等物质能量交换,从而极大影响了都市区域内的热气候和风环境.本模型中考虑了不透水人工表面(如建筑外表面、混凝土路面等)、土壤、绿地(草地及树木)以及自由水面等常见的下垫面形式^[8].

太阳辐射计算模块 本模型利用的是光线追踪法(ray tracing method).当区域内存在树木时,树木对太阳辐射具有衰减作用.本研究中假设这种衰减作用与辐射波长以及入射角大小无关,则衰减程度将只是光波通过树冠距离的函数.

热舒适性计算模块 本研究采用新标准有效温度 SET^* 作为室外舒适性指标^[9].该指标不同于其他根据主观评价统计得到的舒适性计算方法,而是以人体生理反应模型为基础,通过分析人体与周围空气间的传热过程导出的.通过冬夏季室外实测和问卷调查方法对各种现有舒适性指标的适用性进行了比较, SET^* 被认为是最为合理科学的室外动态舒适性指标之一^[10].具体建模时,利用 Gagge 的二节点模型来描述人体在非稳态温度或风速环境中的热反应.同时认为人体与周围环境之间的辐射换热(用室外平均辐射温度表示)由两部分组成:人体与不考虑日射辐射的室外环境之间的辐射换热加上太阳直射辐射被吸收的部分.后者通过采用蒙特卡洛法求得人体与室外建筑、路面以及天空之间的角系数后进行太阳辐射计算^[9].室内 SET^* 温度区间划分及其与人体热舒适的对应关系见表 1.

模型中各模块的具体计算方法、设定依据及验证详见文献[7-9].在该计算模型基础之上,课题组开发出方便用户操作使用的多用途建筑区域热气候预测软件,从而进行都市区域热气候的长期动态预测与评价.

表 1 SET* 和热感觉对应关系^[11]

SET* / °C	热感觉	坐着工作的人的生理状态
高于 37.5	很热、很不舒适	调节失调
34.5~37.5	热,令人非常不满	大量出汗
30.0~34.5	温暖,令人不舒适和不满	出汗
25.6~30.0	稍暖,令人有些不满	轻微出汗,血管扩张
22.2~25.6	舒适并令人满意	适中
17.5~22.2	稍凉,令人有些不满	血管收缩
14.5~17.5	凉,并令人不满	身体慢慢变冷
10.0~14.5	冷,令人非常不满	冷颤

1.2 城市热岛强度评价

城市热岛强度是指城市与其附近郊区之间的空间平均温度差值.但这个笼统的概念根据研究者的关注点不同而涵盖了多样化理解和认知.其结果也因“附近郊区”、“天气状况”和“时间轴”等因素的选取而各异.在“附近郊区”地理位置确定情况下,通常在晴朗无风天气条件下,针对研究对象比较不同时间段,如天、月、季和年等热岛效应.热岛强度通常采用最大热岛强度和平均热岛强度进行对比分析.如《国家生态园林城市标准》规定城市热岛效应程度采用城市市区 6~8 月日最高气温的平均值和对应时期区域腹地(郊区、农村)日最高气温平均值的差值表示,相当于最大热岛强度的定义思路;而《绿色建筑评价标准》则采用住区室外日平均气温差值表示热岛效应程度,相当于平均热岛强度的定义思路.基于上述研究理念,本研究中以计算区域 1.2 m 处空气温度作为不同区域的空气代表温度,采用以下两种热岛强度的评价方法^[12]:

1) 最大局地热岛强度

$$UHII_{\max} = \Delta T_{u-r(\max)} = \frac{\int_{t_0}^{t_1} (T_{u1.2\max} - T_{r1.2\max}) dt}{\int_{t_0}^{t_1} dt}, \quad (1)$$

式中: $T_{u1.2\max}$ 为城市内部计算区域日空气温度最大值, $T_{r1.2\max}$ 为对应时期区域腹地(郊区、农村)内 1.2 m 处日空气温度最大值, t_0 为计算初始时刻, t_1 为计算终了时刻.

2) 平均局地热岛强度

$$UHII_{\text{avg}} = \frac{\int_{t_0}^{t_1} T_{u1.2} dt - \int_{t_0}^{t_1} T_{r1.2} dt}{\int_{t_0}^{t_1} dt}, \quad (2)$$

式中: $T_{u1.2}$ 为城市内部计算区域 1.2 m 处空气温度逐时值, $T_{r1.2}$ 为对应时期区域腹地(郊区、农村)内 1.2 m 处空气温度逐时值, t_0 为计算初始时刻, t_1 为计算终了时刻.

2 局地热岛效应现状模拟

2.1 计算条件

本研究以深圳市国际低碳城核心启动区为研究对象,该区域占地面积约 1 平方公里,建筑类型各异,区域建筑面积规划包含了工业建筑(76.3%)、居住建筑(8.4%)、商业建筑(2.5%)和学校类文化建筑(15.5%)等四类,具体土地利用现状图见图 2.根据地方相关建筑节能设计标准^[13-14],设定上述类型建筑的用能和人为热排放情况具体内容.屋顶绿化暂时未考虑.除建筑排热外,城市交通产生的汽车废热排放也必须考虑.本研究选择深圳地区全年最热的 7~8 月的 4 周时间作为计算期间.逐时气象数据来源于中国气象局信息中心与清华大学建筑技术科学系联合开发的气象数据库^[15].



图 2 启动区土地利用现状

为研究现状条件下炎热夏季该区域的热岛强度,设定两个算例:

1) 工况 1——实际工况,对应于启动区目前实际的下垫面构成和城市人为排热情况,反映该区域热气候现状,具体下垫面构成见表 2.

2) 工况 0——基准工况,以深圳市周边郊区现状作为实际工况的对比算例.具体下垫面构成见表 3.

表 2 工况 1 下垫面构成

不透水人工表面覆盖率	土壤覆盖率	水体覆盖率	树木覆盖率	草地覆盖率	空地率	建筑容积率
0.365	0	0.088	0.218	0.125	0	1.820

表 3 工况 0 下垫面构成

不透水人工表面覆盖率	土壤覆盖率	水体覆盖率	树木覆盖率	草地覆盖率	空地率	建筑容积率
0.014	0.028	0.050	0.875	0.030	0	0.003

2.2 计算结果分析

图 3 为计算期间工况 1 与工况 0 对应日最高气温及最大局地热岛强度变化图.按照计算的典型月结果推算,计算期间内工况 1 的日最高气温平均值为 31.51 ℃,工况 0 的日最高气温平均值为 30.24 ℃.按照式(1)可得该区域最大局地热岛强度值约为 1.27 ℃,低于《国家生态园林城市标准》给出的 2.5 ℃限值.

均城市热岛强度为 1.17 ℃^[16].这说明:1)数值模型预测结果可信;2)总体上该区域的热岛强度处于深圳市的平均偏高水平.对比图 3 可以看出,最大局地热岛强度值更多体现气温在最热的极端情况下的城郊气候差异;而局地热岛强度值则反映的是全天气温城郊气候的平均差异.二者有联系但又有区别,对本研究对象来说,平均局地热岛强度值低于最大局地热岛强度值.

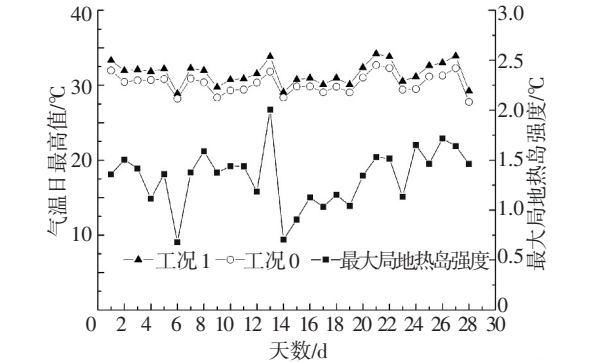


图 3 工况 1 与工况 0 对应日最高气温及差值

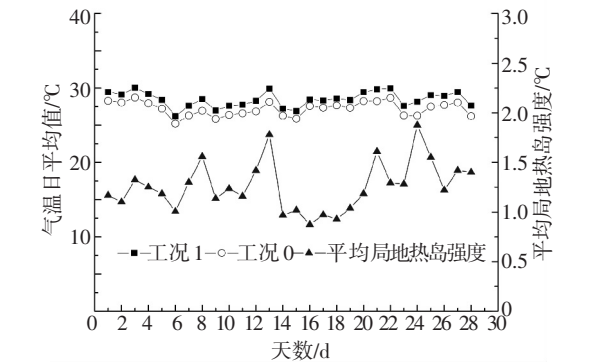


图 4 工况 1 与工况 0 对应日平均气温及差值

图 4 为计算期间内工况 1 与工况 0 对应日平均气温及平均局地热岛强度变化图,按照计算的典型月结果推算,计算期间内工况 1 全天平均气温为 28.43 ℃,工况 0 全天平均气温为 27.19 ℃.按照式(2)可得该区域平均局地热岛强度为 1.24 ℃.深圳市气象局采用同样的指标(仅郊外气象站的位置选择有所不同)实测发布的夏季平

3 缓解热岛强度策略分析

3.1 缓解策略

本研究拟通过调节城市下垫面构成,以增加“良性下垫面”(如水体、树木、草地等)覆盖率,减少人工不透水下垫面的方法探讨进一步降低局地热岛强度的方法.具体调节工况计算条件见表 4.

表 4 调节工况计算条件

工况	不透水人工表面覆盖率	土壤覆盖率	水体覆盖率	树木覆盖率	草地覆盖率	空地率	建筑容积率
2	0.265	0	0.108	0.268	0.155	0	0.182
3	0.200	0	0.122	0.318	0.155	0	0.182
4	0.200	0	0.042	0.318	0.235	0	0.182

与表 1 中给出的工况 1 相比,工况 2 首先有意识地减少了不透水人工表面覆盖率,在可能范围内分别提高了树木、草地和水体覆盖率;工况 3 在工况 2 基础上进一步降低不透水人工表面覆盖率,提高树木覆盖率;工况 4 采用与工况 3 同样的不透水人工表面覆盖率,但减少水体表面覆盖率,提高草地覆盖率.

3.2 缓解效应结果与分析

图 5 为各调节工况对应的最大局地热岛强度值.与实际工况(工况 1)相比,各调节工况对应的热岛强度值均有所下降,其中工况 3 对应值最低(约为 1.10 ℃),比工况 1 降低 0.17 ℃左右.考虑

到宏观尺度的气候规模,0.17 ℃已经是非常明显的效果.可以看出,对下垫面构成进行有效规划和合理配置,可在一定程度上降低热岛强度.工况 4 的热岛效应值略高于工况 3,说明在白天气温较高的时段,相对于草地而言,利用水体降温的效果更好.其主要原因在于,研究对象中的“良性下垫面”,尤其是水体部分具有热容量大,蓄热能力强的特点,其面积的增加对抑制白天最高气温效果最为明显.

图 6 为各调节工况对应的平均局地热岛强度值.可以看出 3 个调节工况同样起到了缓解热岛现象的作用.与上述最大局地热岛强度计算结果

相似,工况 3 的平均局地热岛强度数值最低(约为 1.12 ℃),比工况 1 降低了 0.12 ℃.进一步分析白天和夜间不同时段,可以发现对应于 3 个调节工况,白天平均热岛强度和夜间平均热岛强度相比于工况 1 也都有不同程度的降低,且工况 3 降低的数值也是最多的;可见,良性下垫面比率的增加对缓解平均局地热岛强度同样起到明显的效果.

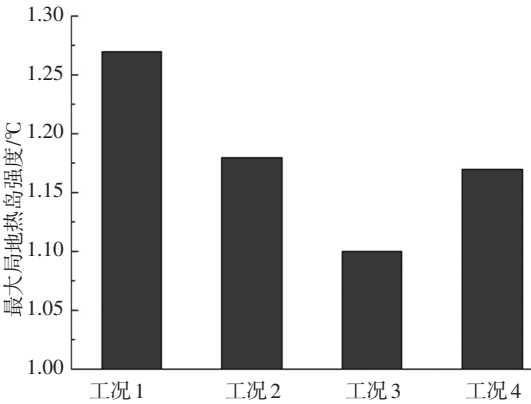


图 5 各工况最大局地热岛强度值对比

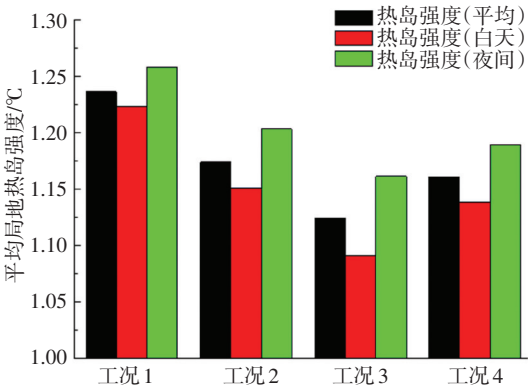


图 6 各工况平均局地热岛强度值对比

同时,对比白天和夜间的平均局地热岛强度,发现夜间热岛强度值要高于白天热岛强度值,主要原因在于城市内部下垫面白天积蓄的热量在夜晚扩散,使得夜间的气温比郊区要高,进而导致夜间的平均局地热岛强度高于白天.该结果得到了大量现场实测的印证.

图 7 给出了各工况对应的 SET^* 区间的时间长度比率.其中横坐标对应表 1 中 SET^* 区间的划分,每个区间对应不同的人体热感觉,纵坐标为计算周期内各 SET^* 温度区间所对应的时间累计值占总时间长度的比率.4 个工况的 SET^* 值都集中在 25.6~37.5 ℃;并且相对于工况 1,3 种调节工况在超过 30 ℃(感觉热不适)的时间长度比率均有不同程度下降;工况 2、3、4 相比于工况 1 超过 30℃的时间长度比率分别下降了 2.2%、3.7%

和 4.6%.而感觉相对舒适的比率区间(25.6~30.0 ℃)相对于工况 1 则分别升高了 2.2%、3.7%和 4.6%;由此可见,与前文局地热岛强度的结论有所不同,工况 4 在改善热舒适性方面具有更好效果,即草地覆盖率的适当增加更能有效地提高室外环境舒适度.其原因主要在于,热岛强度反映的是城郊空气温度的差异,而人体的热感觉与热舒适则与太阳辐射、温度、相对湿度、风速等多种室外环境因素相关.本研究中,工况 4 相比于工况 3 对于室外局地热舒适的综合调节作用更加明显.

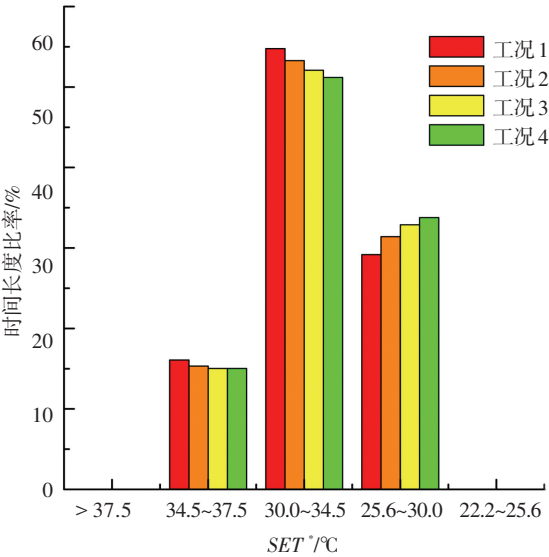


图 7 各工况 SET^* 对应时间长度比率

4 结 论

- 1)以深圳市国际低碳城核心启动区为对象,利用多用途建筑区域气候预测模型预测的区域最大局地热岛强度值约为 1.27 ℃,平均局地热岛强度为 1.24 ℃,略高于深圳市气象局实测发布的 2012 年夏季平均城市热岛强度 1.17 ℃.
- 2)最大局地热岛强度值体现白天最热极端情况下的城郊气候差异,平均局地热岛强度值则反映城郊全天气温平均差异.按照这两种指标衡量的研究区域热岛强度值均处于适中水平.对比白天和夜间不同时段,平均局地热岛强度,夜间热岛强度值高于白天热岛强度值.
- 3)无论采用最大局地热岛强度值或者平均局地热岛强度值,均可发现增加“良性”下垫面覆盖率可不同程度地降低热岛强度,其中水体和树木覆盖率的作用最为明显,其次为草地.另外,适当增加草地覆盖率能更有效地提高室外环境舒适度.

参考文献

- [1] STONE B, NORMAN J M. Land use planning and surface heat island formation: a parcel-based radiation flux approach [J]. *Atmospheric Environment*, 2006, 40(19): 3561–3573.
- [2] KOLOKOTRONI M, GIANNITSARIS I, WATKINS R. The effect of the London urban heat island on building summer cooling demand and night ventilation strategies [J]. *Solar Energy*, 2006, 80(4): 383–392.
- [3] CHEN Xiaoling, ZHAO Hongmei, LI Pingxing, et al. Remote sensing image – based analysis of the relationship between urban heat island and land use/cover changes [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2006, 104(2): 133–146.
- [4] MIHALAKAKOU G, SANTAMOURIS M, PAPANIKOLAOU N, et al. Simulation of the urban heat island phenomenon in Mediterranean climates [J]. *Pure and Applied Geophysics*, 2004, 161(2): 429–451.
- [5] SALAMANCA F, KRPO A, MARTILLI A, et al. A new building energy model coupled with an urban canopy parameterization for urban climate simulations-part I. formulation, verification, and sensitivity analysis of the model [J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2010, 99(3/4): 331–344.
- [6] 刘京, 姜安玺, 王琨, 等. 城市局地-建筑耦合气候评价模型的开发与应用[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2006, 38(1): 38–40.
- [7] MU Kang, LIU Jing, LI Fangfang, et al. The dynamic prediction on outdoor thermal climate in a complicate urban complex [C]//*Building Simulation 2013*. France: INES and INSA Lyon, 2013: 998–1005.
- [8] 朱岳梅, 刘京, 李炳熙, 等. 在城市规划实践中的热气候评价研究[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2011, 43(6): 61–64.
- [9] ZHU Yuemei, LIU Jing, YAO Yang, et al. Evaluating the impact of solar radiation on outdoor thermal comfort by the development and validation of a simple urban climatic model [C]//*International Solar Energy Conference*. Denver: American Society of Mechanical Engineers, 2006: 8–13.
- [10] JENNIFER S, RICHARD D. A field study of thermal comfort in outdoor and semi-outdoor environments in subtropical Sydney Australia [J]. *Building and Environment*, 2003, 38(5): 721–738.
- [11] MCINTYR D A. 室内气候[M]. 龙惟定, 译. 上海: 上海科学技术出版社, 1988: 99–100.
- [12] RIZWAN A M, DENNIS Y C L, LIU C. A review on the generation, determination and mitigation of urban heat island [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2008, 20(1): 120–128.
- [13] 深圳市建设局. SJG10—2003《深圳市居住建筑节能设计规范》[S]. 深圳: [s.n.], 2003: 9–42.
- [14] 深圳市质量技术监督局. SZJG 29—2009《公共建筑节能设计标准》深圳市实施细则[S]. 深圳: [s.n.], 2009: 5–10.
- [15] 中国气象局气象信息中心气象资料室, 清华大学建筑技术科学系. 中国建筑热环境分析专用气象数据集[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005: 9–11.
- [16] 深圳市国家气候观象台(市气候中心). 深圳市城市热岛检测公报[EB/OL]. (2013–02–25) [2014–02–25]. <http://www.szmb.gov.cn/article/QiHouYeWu/qhgcygp/csghgb/2013/02/25/512b2d318507c.html>.

(编辑 赵丽莹)