

DOI:10.11918/j.issn.0367-6234.2017.02.015

控规阶段的城区热环境评估分析软件

刘 琳¹, 刘 京^{1,2}, 肖荣波³, 李智山³, 饶峻荃¹, 陈 昕¹

(1. 哈尔滨工业大学 市政环境工程学院, 哈尔滨 150090; 2. 城市水资源与水环境国家重点实验室(哈尔滨工业大学), 哈尔滨 150090; 3. 广东省环境科学研究院, 广州 510045)

摘 要: 针对城市规划中的控制性详细规划阶段, 将影响热环境的控规参数进行分类, 并选用新标准有效温度、湿黑球温度、热岛强度作为热环境评估指标. 在城市区域热气候预测模型的基础上, 采用单因子变量的方法分析各控规参数对评估指标的影响, 得到各评估指标的逐时简化计算模型, 并与原计算模型进行对比验证. 结果显示简化模型更为简便快速, 具有较高的计算精度, 并极大提高了运算速度. 通过将数据导入、数据维护、图形展示、数据导出等模块与简化计算模型进行耦合, 开发了城市控制性详细规划热环境评估软件, 并对广州规划区域进行实例应用, 得到4个测试地块的逐时热环境指标值(OUT-SET^{*}、UHII和WBGT), 并实现各参数的界面图形可视化. 结果分析显示研究区域整体的OUT-SET^{*}平均值分布在28~30.5℃, WBGT的最大值分布在29~30℃, 地块1~3的UHII在0.4~1.2℃, 而地块4则出现局地冷岛效应. 不同地块的控规参数设置对热环境指标的分布有重要影响.

关键词: 城市规划; 热环境评估; 数值试验; 热岛强度; 热舒适

中图分类号: TU14 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2017)02-0092-06

Evaluation software for the urban regional thermal environmental analysis for regulatory planning

LIU Lin¹, LIU Jing^{1,2}, XIAO Rongbo³, LI Zhishan³, RAO Junquan¹, CHEN Xin¹

(1. School of Municipal and Environmental Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China;
2. State Key Laboratory of Urban Water Resource and Environment (Harbin Institute of Technology), Harbin 150090, China;
3. Guangdong Provincial Academy of Environmental Science, Guangzhou 510045, China)

Abstract: At the regulatory detailed planning stage, the regulatory planning parameters which influenced thermal environment were classified and the new standard effective temperature, wet bulb globe temperature, urban heat island intensity were all considered as the thermal environmental evaluation index. Based on the developed urban regional thermal climatic prediction model, one-variable method was adopted to analyze the effects of different regulatory planning parameters on these evaluation index. The hourly simplified models of each evaluation index were obtained and showed rapid, simple, and accurate characteristics by comparing with the original model. By combining the data input module, the meteorological parameter maintenance module, the regulatory planning parameter maintenance module, graph presentation module, data output module and the hourly simplified calculation models of evaluation index, the thermal environmental evaluation software for urban detailed regulatory plan was developed and then applied to a field study in Guangzhou. Hourly thermal environmental indicators OUT-SET^{*}, UHII, and WBGT of four test blocks were obtained and the spatial visualizations were realized. Results showed that the average OUT-SET^{*} within the whole research regions ranged from 28℃ to 30.5℃, and the maximum WBGT varied between 29℃ and 30℃. The UHII of block 1 to 3 varied between 0.4℃ and 1.2℃ while that of block 4 had the urban cool island effects. Thus, it reveals that different regulatory detailed planning indicators have important impacts on the thermal environmental parameters.

Keywords: urban planning; thermal environmental evaluation; numerical experiment; urban heat island intensity; thermal comfort

近年来,对城市进行科学规划,建设宜居城市逐

渐成为城市化建设的热点问题.随着城市“热岛效应”等热气候问题日益加剧,宜居城市的建设越来越需要良好的城区热环境做保证.城市控制性详细规划(控规阶段)作为城市规划的重要组成部分,需要着重考虑在城区开发建设过程中,由于土地利用性质与下垫面空间格局改变带来的局地热环境变

收稿日期: 2016-02-16
基金项目: “十二五”国家科技支撑计划项目(2012BAC13B01);
广州市科学研究专项(2014J100112)
作者简介: 刘 琳(1991—),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

化^[1-3],以保证规划区域的宜居性和舒适性。

在控规阶段,规划师通常将较大空间尺度的规划区域细划为几十个至数百个地块,且每一个地块都对应着不同取值的建筑参数和下垫面参数等控规指标,从而形成了多样化的下垫面空间格局。针对控规阶段具有不同空间格局的多个地块,对其进行高效、便捷的地局地热环境模拟评估非常必要。然而,当前常用的 CFD 等模拟方法对空间尺度大、下垫面分布复杂的城市区域往往难以进行前处理的建模,且受到计算机计算能力的限制而不能便捷高效地模拟多地块条件下的区域热环境。近年来,穆康等^[4]在 Zhu 等^[5-6]建立的传统城市冠层模型的基础上,提出了新的城市区域热气候预测模型 UDC。该模型采用数据导入的形式,与 CFD 模拟相比不需要进行类似的前期建模工作,并通过现场测试验证该模型能够较准确地动态预测某个特定区块内的热环境参数变化^[7-9]。然而,在规划实践中发现,采用上述区域热气候预测模型进行区域热环境预测,需要针对每一个局地区域(单个地块)进行数据输入与参数统计,仍需要花费大量的时间和精力进行数值计算,大大增加了工作量。因此,为了能够对规划区域内具有不同控规参数的多个地块进行高效快捷的热环境评估,在既有区域热气候预测模型的基础上,结合规划行业的需求,通过大量的数值试验,得到了热环境评估指标的简化计算模型;在此基础上,将逐时的简化计算模型合成热环境评估软件,使其实现设计参数批量化输入和结果参数批量化输出的功能,并能够自动地将计算结果进行区间评估和图形可视化,为实现环境适宜性的城市规划提供便捷可靠的技术支撑。

1 数值试验

1.1 影响热环境的控规因素及参数选择

城市区域热环境是多种因素复杂作用的结果。结合城市规划中对地块的详细设计参数,选择以下影响热环境的3类主要控规因素及参数:

1) 建筑类型。本研究主要考虑居住、公共、商业这3种典型建筑类型进行模拟计算。

2) 建筑布局及参数。针对建筑空间布局的相关参数,包括建筑密度、容积率、建筑架空率、平均迎风面积比、外表面材料反射率、屋顶绿化率、遮阳构筑物覆盖率。

3) 下垫面类型分布及参数。考虑地块内部不同下垫面类型的分布和配比,包括绿地率、水体覆盖率、硬质地面覆盖率。此外,绿地覆盖情况可考虑草地和林地的细致划分。

1.2 热环境评估指标

为了使热环境的评估指标能够有效、完整地反映室外热环境的特征,本文综合考虑城市环境以及人体适应性等因素,选用新标准有效温度(OUT-SET*)、湿黑球温度(WBGT)、热岛强度(UHI)这几种参数进行区域热环境的评估。OUT-SET*主要用于反映人体的热舒适程度,国外不同地区的冬夏季室外实测和问卷调查方法动态地对各种现有舒适性指标的适用性进行了比较,认为OUT-SET*是最好的可适用于全年气候条件的更合理科学的指标^[10-11],并在室外城市区域的热环境评估中得到广泛应用^[12-14]。WBGT反映在接触热环境时人体所受的热强度,采用自然湿球温度、黑球温度和干球温度3种参数计算获得,广泛用于高温环境的热压力评价^[15]。UHI通过比较城市与郊区气温的差异而获得,广泛用作城市化对气候影响的量化特征参数,来反映区域城市化建设对热气候的影响效应^[16-17]。

1.3 数值试验

1.3.1 UDC 基础计算模型

利用既有的城市区域热气候预测模型UDC作为数值试验的基础计算模型,其结构流程如图1所示。对于给定的控规设计工况,UDC模型可以根据大气边界条件、建筑布局及下垫面配置等控规参数条件和人员活动规律等输入数据,通过局地气候、室内外热湿负荷、下垫面与大气间热过程、太阳辐射、热舒适性、遮阳构筑物等多个计算模块耦合计算,获得相应控规工况条件下的热环境评估指标OUT-SET*、WBGT与空气温度的逐时值。UHI的计算则采用模型计算得到的大气温度值与同时刻当地典型气象日大气温度的差值得出^[18-19],UDC模型经多次验证及案例应用体现了其考虑全面、计算精准的特点^[4-7]。

然而,当前的UDC模型每次计算只能针对指定的控规设计工况,且由于多个子模块的复杂耦合使计算过程异常纷繁复杂。针对控规阶段,研究区域通常依据土地利用性质和建筑功能性以街区为边界将区域划分为多个地块,由于不同地块的土地利用性质、建筑类型以及控规参数条件均不同,利用UDC模型计算多地块、多参数的设计工况将极大地拉长计算周期,耗时耗力,使得控规阶段的热环境评估难以有效实现。

此外,UDC模型所包含的多种计算参数并非控规阶段所需要的设计参数,其主要用于城市气象学和建筑环境学的模拟研究需要。在控规阶段的热环境评估中,还需要专门的有针对性的评估模型来实现高效准确地热环境评估。

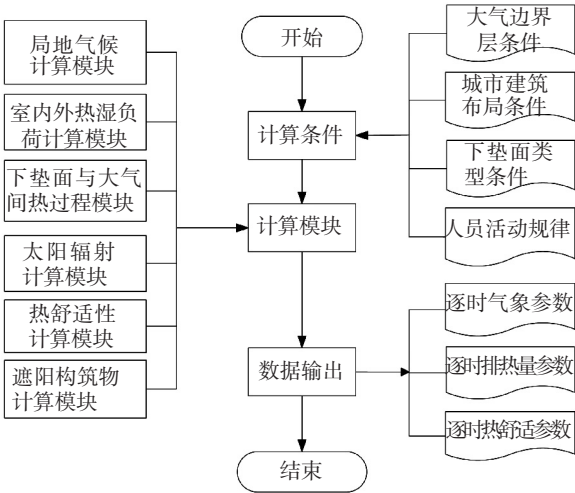


图 1 城市区域热气候预测模型结构流程

Fig.1 Structure flow chart of the urban regional thermal climatic prediction model

1.3.2 简化计算模型

考虑到既有 UDC 模型复杂耗时的特性,以 UDC 为基本计算模型,通过大量的数值试验建立热环境评估指标的简化计算模型,以简化控规阶段热环境评估的计算过程.由上文可知,影响热环境的控规因素主要包括建筑类型、建筑布局及下垫面类型参数,则以控规参数为自变量,以热环境评估指标为因变量,通过不断改变单一自变量的取值,来获得不同工况条件下的因变量计算值,并通过多元线性回归分析的方法得到热环境评估指标的简化计算方程,并以此作为热环境评估指标的简化计算模型,为日后实际控规工况的计算提供便捷的计算依据.

通过参考相应设计标准,表 1 列出了影响热环境的 11 种控规参数的基准试验工况取值及变化范围($B_1 \sim B_7, U_1 \sim U_4$).选用广州作为研究对象城市,并考虑其夏季典型气象日的逐时气象参数,包括干

球温度、相对湿度、水平总辐射照度、水平散射辐射照度、风速、主导风向^[18].UDC 计算模型中采用的建筑围护结构、空调及负荷等相关参数参考公共建筑节能设计标准^[20]与民用建筑供暖通风与空气调节设计规范^[21].

表 1 基准试验工况取值及变化范围

Tab.1 Values and variation ranges of Benchmark test conditions

控规参数分类	子参数	基准试验工况取值	范围
建筑类型参数	建筑类型	居住、商业、公共	
	建筑密度(B_1)	0.20	0.1~0.34
	容积率(B_2)	2.50	0.5~5
	建筑架空率(B_3)	0.50	0~1
	平均迎风面积比(B_4)	0.73	0.45~1
	外表面材料反射率(B_5)	0.50	0.08~0.88
	屋顶绿化率(B_6)	0.50	0~1
建筑布局参数	遮阳构筑物覆盖率(B_7)	0.20	0~0.65
	草地面积覆盖率(U_1)	0.20	0.15~1
	林地面积覆盖率(U_2)	0.20	0.15~1
	水体面积覆盖率(U_3)	0.20	0~1
	透水路面比率(U_4)	0	0~0.3

在数值试验中,针对每一种建筑类型,更改单一控规参数的取值而保持其他参数为基准工况值,且每个控规参数在变化范围内取值 10 组,本次数值试验共进行了 330 组试验工况.对应每组工况的控规参数(自变量)和 UDC 模型计算获得的逐时热环境评估指标参数(因变量),通过多元线性回归分析得到了 OUT-SET*、WBGT、UHII 的逐时线性回归方程.表 2 列举出热舒适指标 OUT-SET* 在居住建筑类型情况下 8 个时段的线性回归分析结果.结果显示,线性回归分析方程的 R square 值均在 0.97 左右,由此可见,本次数值试验得到的热环境评估指标的逐时计算方程可以作为简化计算模型来进行不同控规工况条件下的热环境评估计算.

表 2 热舒适指标 OUT-SET* 在居住建筑类型情况下的多时段线性回归分析结果

Tab.2 Thermal comfort index OUT-SET* values at multiple times derived from linear regression analysis towards the residential building type

OUT-SET*	建筑布局参数							下垫面分布参数				相关性	
	B_1	B_2	B_3	B_4	B_5	B_6	B_7	U_1	U_2	U_3	U_4	常数项	R square
2:00	-10.34	-2.61	-2.84	0.15	0.07	-0.21	0.15	-0.20	-3.76	-2.02	-4.19	35.35	0.965
5:00	-10.59	-2.67	-2.91	0.16	0.07	-0.21	0.15	-0.20	-3.85	-2.06	-4.29	35.42	0.972
8:00	-10.57	-2.67	-2.90	0.16	0.07	-0.21	0.15	-0.20	-3.84	-2.06	-4.28	38.48	0.978
11:00	-9.62	-2.43	-2.64	0.14	0.06	-0.19	0.14	-0.19	-3.50	-1.88	-3.90	34.41	0.981
14:00	-9.03	-2.28	-2.48	0.13	0.06	-0.18	0.13	-0.17	-3.29	-1.76	-3.66	39.14	0.983
17:00	-9.28	-2.34	-2.55	0.14	0.06	-0.19	0.14	-0.18	-3.38	-1.81	-3.76	37.91	0.976
20:00	-3.80	-0.96	-1.04	0.06	0.03	-0.08	0.06	-0.07	-1.38	-0.74	-1.54	32.80	0.968
23:00	-3.66	-0.92	-1.01	0.05	0.02	-0.07	0.05	-0.07	-1.33	-0.71	-1.48	31.83	0.963

1.3.3 原始模型与简化计算模型的对比较证

为了验证热环境评估指标逐时简化计算模型的准确性,在相同的气象背景参数和居住类基准试验

工况的条件下,对既有区域热气候预测模型(UDC)与本研究建立的热环境指标简化计算模型的计算结果进行了比较.图 2 为运用两个模型分别计算获得的

3个热环境指标的24 h逐时值.可以得出,两种模型在相同条件下计算获得的OUT-SET*值相差在0.1℃左右,WBGT的逐时值计算差值约在0.05℃,UHII的逐时值计算结果差值在0.1~0.2℃,可见,热环境评估指标简化模型与计算更为复杂的区域热气候预测模型的计算结果基本一致,具有较高的计算精度.而在计算耗时方面,简化计算模型相比UDC计算模型约缩短了98%的计算时间(在.Net框架下运行),极大地提高了运算速度.

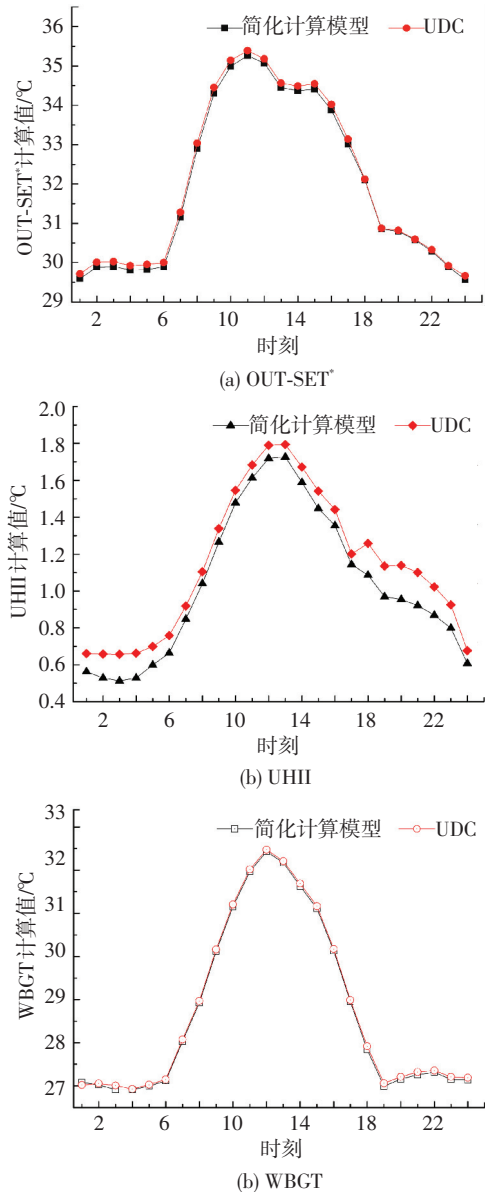


图2 UDC模型和简化计算模型对OUT-SET*、WBGT、UHII 3个指标的逐时计算结果对比

Fig.2 Hourly calculation results of OUT-SET*, WBGT, and UHII of UDC model and simplified model

2 热环境评估软件的开发

为方便城市规划师高效地对规划区域进行热环境的评估,在上述热环境评估指标的逐时简化计算模型的基础上,集成开发了城市控制性详细规划热

环境评估软件,其功能结构如图3所示.

在前处理阶段,软件根据“数据导入模块”同时性地自动录入各地块的控规参数和城市气象条件,并将参数储存;运用气象数据维护模块和控规数据维护模块展现已经录入的参数信息,并提供给用户逐个查看参数及更改保存的功能.在确定所输入信息无误以后,软件利用已建立的热环境评估逐时简化计算模型,对每个地块的热环境评估指标进行计算,在此基础上对整个规划区域的热环境指标进行评估.数值计算完成后,软件的后处理部分会将所有的计算结果在界面上图形可视化,并分别自动同时性地导出单个地块及区域整体的逐时热环境指标的计算结果到输出表中.其中,计算结果的图形可视化分为趋势曲线图和统计直方图两个部分.趋势曲线图主要是热环境指标计算值随时间的变化曲线,用于展示单个地块或区域整体的热环境随时间的变化规律;统计直方图主要针对热舒适评估指标OUT-SET*,根据OUT-SET*的区间值与热环境评价的对应^[22],展示全天OUT-SET*值的统计分布,以综合评估研究区域全天热舒适性.

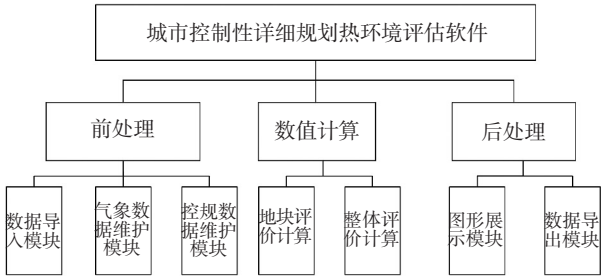


图3 城市控制性详细规划热环境评估软件结构

Fig.3 Structure chart of the thermal environmental evaluation software at the urban regulatory detailed planning

3 案例分析

选用广州市大岗北综合开发区的案例进行热环境的评估.在实施该规划项目过程中,规划方选用了4个典型规划地块,涵盖居住、商业、公共等不同的建筑类型,并采用地块的总设计面积、建筑类型、建筑密度、容积率、绿地率作为4个地块的基本控规参数,见表3所示.

依据已经统计完成的地块控规参数和城市气象信息,利用城市控制性详细规划热环境评估软件对信息进行了同时性地自动读取,并进行热环境指标的逐时数值计算,得到了各个地块逐时的OUT-SET*值、WBGT值、UHII值,并且在界面中图形可视化.以地块1 WBGT的逐时变化曲线和OUT-SET*的舒适性评价区间统计图为例展示,见图4、5所示.图4中,地块1的WBGT于24 h内在26~31℃波动,中午

11:00 达到最大值,而在凌晨 4:00 和夜晚 20:00 达到最小值;图 5 中,地块 1 的 OUT-SET* 在 1 d 24 h 中,有 13 个小时的 OUT-SET* 值处于 25.6~30 ℃ (稍暖),有 11 个小时处于 30~34.5 ℃ (温暖).

表 3 4 个代表性地块的基本控规参数

Tab.3 Basic regulatory detailed planning parameters of four typical blocks

地块	地块设计 总面积/m ²	建筑类型	建筑密度	容积率	绿地率
1	27 081	居住用地	0.30	2.86	0.27
2	5 069	商业用地	0.40	1.80	0.35
3	12 776	公共用地	0.40	2.00	0.35
4	21 388	公共用地	0.13	0.10	0.85

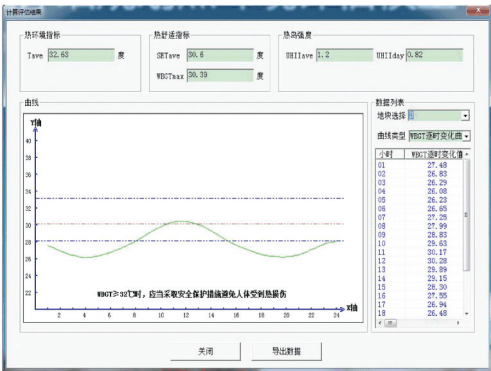


图 4 地块 1 的 WBGT 参数 24 h 的变化曲线

Fig.4 Daily variation curve of WBGT in block 1

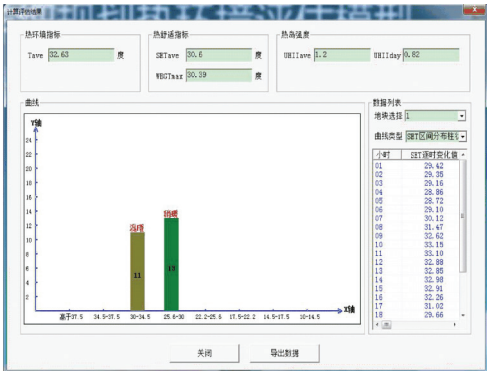


图 5 地块 1 的 OUT-SET* 参数在 24 h 内的区间分布

Fig.5 Daily interval distribution of OUT-SET* in block 1

采用 4 个地块 24 h 内的 OUT-SET*、UHII 的平均值和 WBGT 的最大值量化比较分析 4 个地块在不同控规参数条件下的热环境差异,结果如图 6 所示.可以看出,4 个地块整体的 OUT-SET* 平均值分布在 28~30.5 ℃,WBGT 的最大值分布在 29~30 ℃,地块 1~3 的 UHII 在 0.4~1.2 ℃,而地块 4 则出现了局地“冷岛效应”,其 UHII 值为-0.3 ℃左右.其中,地块 1 的 3 个评估指标值均为最高,地块 4 的 3 个评估指标值均为最低.

比较 4 个地块控规参数设置的差异可知,地块 4 内含有极少的建筑和大面积的绿色植物,这样的下垫面配置减少了建筑的人为排热量,同时大片绿色植物的蒸腾作用和对太阳辐射的遮挡作用,有利于局部地区的温降效应和气候调节作用;而地块 1 含有较高的容积率和相对较小的绿地率,高大密集的建筑会导致较多的建筑人为排热量而促使空气温度的升高,同时缺少绿地空间的气候调节作用,进而恶化了区域的热气候并影响了人体热舒适性.

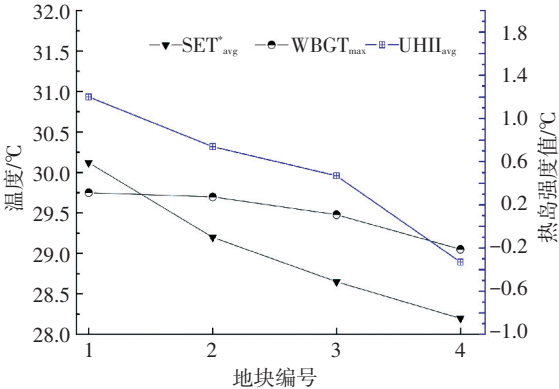


图 6 4 个地块的热环境评估指标分布

Fig.6 Distribution map of the thermal environmental indices of four blocks

4 结 论

- 1) 针对控制性详细规划阶段,通过控规参数与热环境评估指标的总结与分类,依据既有的城市区域热气候预测模型(UDC),采用单因子变量的方法对不同的控规参数进行了大量的数值试验,并以控规参数为自变量,热环境评估指标为因变量,通过多元线性回归分析得到了热环境评估指标的逐时简化计算模型.与 UDC 的对比结果显示简化计算模型具有高效快捷、准确可靠的特点.
- 2) 在简化模型基础上集成了热环境评估软件,其实现了控规参数同时性输入和结果参数同时性输出的功能,并实现了结果参数的区间统计与图形可视化功能,同时方便用户对信息进行查看、更改与存储.
- 3) 通过案例分析的评估结果可知,不同地块的控规参数设置对热环境指标的分布有重要影响,本研究提出的评估软件可有效地对多用途多参数的控规地块进行热环境分析,为实现环境适宜性的城市规划提供便捷可靠的技术支撑.
- 4) 此外,需要指出的是本研究在数值计算过程中,主要考虑各个地块内部下垫面配置和格局所带来的热环境差异,暂未考虑各地块间相互作用的影响,在今后的研究中会更为细致地量化分析局地尺

度研究区域的热环境水平湍流作用.

参考文献

[1] LI Hui, HARVEY J, KENDALL A. Field measurement of albedo for different land cover materials and effects on thermal performance [J]. Building and Environment, 2013, 59: 536-546.

[2] YANG Feng, LAU S S Y, QIAN Feng. Thermal comfort effects of urban design strategies in high-rise urban environments in a sub-tropical climate [J]. Architectural Science Review, 2011, 54 (4): 285-304.

[3] CHEN Liang, NG E, AN Xipo, et al. Sky view factor analysis of street canyons and its implications for daytime intra-urban air temperature differentials in high-rise, high-density urban areas of Hong Kong: A GIS-based simulation approach [J]. International Journal of Climatology, 2012, 32: 121-136.

[4] 穆康,刘京,李芳芳,等. 城市综合体内建筑人为排热及热湿气候动态预测实例分析[J]. 哈尔滨工业大学学报,2015,47(2): 31-36.

MU Kang, LIU Jing, LI Fangfang, et al. Dynamic prediction on building anthropogenic heat release and thermal climate in urban complex[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2015, 47 (2): 31-36.

[5] ZHU Yuemei, LIU Jing, HAGISHIMA A, et al. Evaluation of coupled outdoor and indoor thermal comfort environment and anthropogenic heat [J]. Building and Environment, 2007, 42(2): 1018-1025.

[6] 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, Colorado: Asme International Solar Energy Conference, 2006: 515-521.

[7] RAO Junquan, LIU Jing, XIAO Rongbo, et al. Field measurement and simulation of the micro-thermal climate in a typical dwelling district in China: The Guangzhou case [C] // The 6th International Conference on Energy and Environment of Residential Buildings. England: Institution of Engineering and Technology, 2014: 1-6.

[8] 宋晓程,刘京,林姚宇,等. 城市局地热气候预测及热岛效应缓解策略[J]. 哈尔滨工业大学学报,2015,47(2): 25-30.

SONG Xiaocheng, LIU Jing, LIN Yaoyu, et al. Regional thermal climate prediction and mitigation strategy of local urban heat island[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2015, 47(2): 25-30.

[9] 宋晓程,刘京,林姚宇,等. 基于多用途建筑区域热气候预测模型的城市气候图研究初探[J]. 建筑科学,2014,30(10): 84-90.

SONG Xiaocheng, LIU Jing, LIN Yaoyu, et al. Preliminary study of urban climatic map based on hot climate prediction model for multi-purpose building region [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2014, 30(10): 84-90.

[10] SPAGNOLO J, DEAR DE R. 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] OOKA R, MINAMI Y, SAKOI T, et al. Improvement of sweating model in 2-Node Model and its application to thermal safety for hot environments [J]. Building and Environment, 2010, 45: 1565-1573.

[12] HUANG Hong, OOKA R, KATO S. Urban thermal environment measurements and numerical simulation for an actual complex urban area covering a large district heating and cooling system in summer [J]. Atmospheric Environment, 2005, 39: 6362-6375.

[13] CHEN Hong, OOKA R, HARAYAMA K, et al. Study on outdoor thermal environment of apartment block in Shenzhen, China with coupled simulation of convection, radiation and conduction [J]. Energy and Buildings, 2004, 36: 1247-1258.

[14] XI Tianyu, LI Qiong, MOCHIDA A, et al. Study on the outdoor thermal environment and thermal comfort around campus clusters in subtropical urban areas [J]. Building and Environment, 2012, 52: 162-170.

[15] 许孟楠,李百战,杨心诚,等. 湿球黑球温度(WBGT)评价高温环境热压力方法优化[J]. 重庆大学学报,2014,37(7): 110-114.

XU Mengnan, LI Baizhan, YANG Xincheng, et al. An optimized method to evaluate heat stress with WBGT-index [J]. Journal of Chongqing University, 2014, 37(7): 110-114.

[16] OKE T R. The energetic basis of the urban heat island [J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1982, 108: 1-24.

[17] BRANDSMA T, WOLTERS D. Measurement and statistical modeling of the urban heat island of the city of utrecht (the Netherlands) [J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2012, 51(6): 1046-1060.

[18] 城市居住区热环境设计标准:JGJ286—2013[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2013.

Design standard for thermal environment of urban residential areas: JGJ286—2013[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2013.

[19] RIZWAN A M, DENNIS Y C L, LIU Chunho. A review on the generation, determination and mitigation of urban heat island [J]. Journal of Environmental Sciences, 2008, 20(1): 120-128.

[20] 公共建筑节能设计标准:GB50189—2005[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2005.

Design standard of energy efficiency of public buildings: GB50189—2005[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2005.

[21] 民用建筑供暖通风与空气调节设计规范:GB50736—2012[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2012.

Design code for heating ventilation and air conditioning of civil buildings: GB50736—2012[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012.

[22] 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.

MCINTYR D A. Indoor climate [M]. LONG Weiding, translate. Shanghai: Shanghai Scientific and Technical Publishers, 1988: 99-100.

(编辑 刘 彤)