DOI:10.11918/j.issn.0367-6234.201605004

城市局地气候的可视化评估及分析

刘 琳[1],刘 京[1,2],肖荣波[3],李智山[3]

(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:城市化进程的快速发展使得城市区域形成了独特的局地气候,为此,提出热环境评估模型与地理信息系统GIS相结合的气候评估方法,并选取空气温度T_a、热岛强度UHII以及室外空间的舒适性指标OUT-SET*作为评估参数.以广州市大岗北的规划区域为例,对多地块条件下的气候参数进行模拟计算和空间可视化分析.结果显示:在整个研究区域内,T_a全天平均值分布在27.73~29.96 ℃,UHII全天平均值分布在-0.48~2.2 ℃,OUT-SET*全天平均值分布在29.05~33.44 ℃,均体现出很大的空间差异性.对比土地利用分布图及绿地率与容积率的空间分布图可知,热气候参数与热舒适参数都不同程度地受到下垫面特性参数的影响.通过对绿地率、容积率与UHII、OUT-SET*进行线性相关分析可知,UHII与绿地率和容积率均有显著的负相关,相关系数为-0.433和-0.490;OUT-SET*与绿地率之间相关系数为-0.295,负相关较弱,而与容积率之间相关性系数为-0.79,负相关显著;气候适宜的城市空间规划,需要根据不同的气候评价指标和限度来合理均衡地配置下垫面特性参数.

关键词:城市规划;局地尺度;热气候;评估;空间可视化

中图分类号:TU14 **文献标志码**:A **文章编号**:0367-6234(2017)08-0109-07

Urban local climatic visualized evaluation and analysis

LIU Lin[1], LIU Jing[1,2], XIAO Rongbo[3], LI Zhishan[3]

(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: Rapid urbanization contributes to unique local climate. This paper proposed an integrated climatic evaluation method by combining a thermal environmental evaluation model and the geographical information system. The air temperature (T_a), urban heat island intensity (UHII), and the outdoor thermal comfort index (OUT-SET*) were selected as evaluation parameters. A planned region area in Dagang District of Guangzhou was adopted as a case study, the climatic parameter calculations and spatial visualization under multiple urban blocks were conducted. Results showed that daily average T_a varied between 27.73 ℃ and 29.96 ℃, the average UHII varied between -0.48 ℃ and 2.2 ℃, while OUT-SET* varied between 29.05 ℃ and 33.44 ℃. By referring to the land use map and spatial distribution maps of green coverage ratio and building floor area ratio, these climatic parameters were influenced in different extent by underlying surface characteristic parameters. By quantitative linear correlation analysis between these parameters, it revealed that UHII had significant negative correlations with both the green coverage ratio and building floor area ratio, the correlation coefficients of which were -0.433 and -0.490, respectively. OUT-SET* had significant negative correlation with the building floor area ratio and weak negative correlation with green coverage ratio, the correlation coefficients of which were -0.295 and -0.790, respectively.

Keywords: urban planning; local scale; thermal climate; evaluation; spatial visualization

近年来,城市化进程的快速发展与城市人口的激增使原有的自然植被或裸露土地被各种各样的建筑物以及大量的沥青道路所替代[1],并带来了一系列的城市气候问题,如"城市热岛与湿岛"等[2-4].在城市居民生产生活所处的城市冠层内部,由于空间构成、表面材料的独特性,进而形成了城市不同区域独特的气候状态[5].当前的规划区(几十平方公里)通常按照土地利用性质及建筑功能性划分为几十个至数百个地块,在这样的局地尺度内部通常形成了多样化的局地气候[6].针对规划区域多地块的设计条件和空间尺度,如何对局地气候进行准确而有效的评估,并对其进行定性与定量的综合分析,是得到气候适宜的可持续性城市规划的必要条件.

在城市气象学领域,已经开发了不少适用于局地尺度的气候评估模型.其中,城市冠层模型(urban

收稿日期:2016-05-01
基金项目:国家十二五科技支撑项目(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

canopy model)[7]以能够处理长期动态的气候模拟的特点而广泛应用到局地气候评估中,如 Town Energy Balance (TEB)[8]、Local-scale Urban Meteorological Parameterization Scheme[9].然而,现有的局地尺度模型并不适合于城市规划领域的应用,主要表现在:1)更关注研究区域气象参数的变化规律,缺乏对实际规划区域中建筑类型与下垫面类型多样性的考虑,计算过程复杂且需要有气象学的专业知识背景,并不能被城市规划便捷而有效地应用;2)当前模型的计算不能和规划空间的地块相结合,不能直观清晰地反应气候参数和下垫面设计参数的地理位置对应与空间分布状态,从而不能有效地指导规划设计.因此,针对上述提及的问题,本文利用改进的城市冠层模型,进一步考虑城市局地规划区域不同的下垫面空间结构和特性参数所产生的局地气候效应,对规划区域内多个地块的局地气候参数进行动态模拟评估,并与地理信息系统(GIS)相结合,利用其空间呈像功能,得到规划区域局地气候参数计算结果的空间分布图,从而实现规划区域气候条件的空间可视化评估分析,为建设气候适宜的可持续城市规划设计提供一套崭新的技术方法.

1 评估方法

1.1 评估参数

作为衡量城市规划建设的气象环境效应的评估参数,应满足客观性、有效性及以人为本的可靠性原则.因此,本文综合考虑局地空间不同城市化建设与空间布局所带来的热气候效应,选用气象学中主要的气象参数——空气干球温度 T_a、城市化效应的特性参数——热岛强度 UHII,以及人体在室外空间的舒适性评估指标——室外新标准有效温度 OUT-SET* 作为评估参数.其中,空气温度是直接反应局地空间热环境状态的最主要的因素,且空气温度是计算热岛强度的基础参数,也是评估不同热环境状态下人体热舒适、反映人体健康的热应力等的核心参数,因此,将空气温度作为一个主要的评估参数.热岛强度 UHII 主要用于反映城市化建设对热气候的综合影响效应[10],参考热环境设计标准中的计算方法,UHII 可以通过比较各个地块的模拟计算温度数据与典型气象日空气温度的差值而获得.舒适性评估指标 OUT-SET* 可以有效反应人体在室外空间的生理热舒适性与热应力,其几乎涵盖了空气温度、平均辐射温度、湿度、风速、服装热阻及人体代谢率等所有因素的无限组合;在 OUT-SET* 的计算中,由单独的适用于室外空间的太阳辐射及红外辐射强度计算模型来计算室外平均辐射温度[11].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* 考虑了综合的热气候因素和人体热平衡因子,是可适用于全年气候条件下室外热环境人体舒适性评价的比较理想的指标之一[12-14].现有的研究结果显示,在炎热的夏季气候条件下,OUT-SET* 值越高,人体的舒适性越差.

1.2 评估流程

针对研究区域多个地块的控规条件,采用热环境评估模型与地理信息系统 GIS 相结合,获得研究区域多地块条件下的热环境参数评估结果和空间可视化分布.图 1 给出了整体评估方法的结构流程.

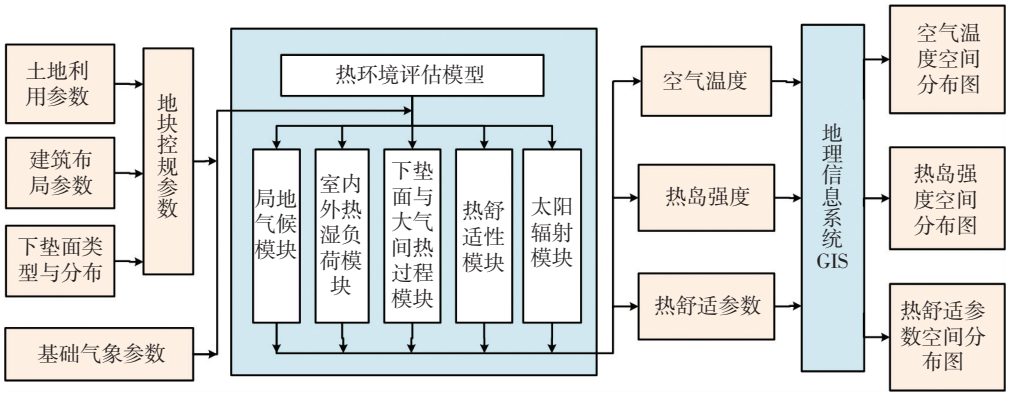


图 1 整体评估方法的结构流程

Fig.1 Structure flowchart of the overall evaluation method

地块控规参数:主要包括土地利用参数(如居住用地、工业用地、商业用地、体育用地、园林、水域等用地类型)、建筑布局参数(建筑密度、建筑高度或者容积率等)、下垫面类型与分布(绿地率、水体比率、沥青覆盖率等).在控规阶段,通常选取容积率和绿地率作为主要的控规参数,本文主要考虑容积率和绿地率作为下垫面特性参数.

热环境评估模型是在城市冠层模型的基础上改

进得到的热环境参数预测模型[15-16].相比原始的城市冠层模型,本文的热环境评估模型进一步考虑了实际城市区域内多种下垫面类型和不同建筑功能类型共存的情况,并耦合计算了建筑内部的热湿负荷、建筑排热量、大气与下垫面之间的热质传递,以及局地气候参数与热舒适参数的动态计算.整个模型由局地气候模块、室内外热湿负荷模块、下垫面与大气间热过程模块、太阳辐射模块、热舒适性模块等耦合而成,如图 1 所示.朱岳梅等[17]、穆康等[18]、宋晓程等[19]分别对此评估模型进行了子模块的模型理论讨论及实例应用验证,表 1 列举了模型中应用的主要理论方程.此计算模型主要针对规划行业中的控规阶段,依据每个地块的基本控规参数,在给定基础气象数据的基础上进行动态模拟计算,从而获得各个地块逐时的气候评估参数(空气温度、热岛强度)和热舒适参数(OUT-SET*)等.

表 1　热环境评估模型的主要理论方程式

Tab.1　Main theoretical equations of thermal environmental evaluation model

考虑层面	理论方程式	主要参数说明
运动量方程	$\frac{\partial U(z,t)}{\partial t}=\frac{1}{m}\frac{\partial}{\partial z}(-m\langle u'w'\rangle)-caU\mid U\mid$	$U(z,t)$ 为风速, m·s^{-1};$\Theta(z,t)$为空气温度, ℃;$X(z,t)$为空气含湿量, g·kg^{-1};$-\langle u'w'\rangle$ 为雷诺应力, m^2·s^{-2};$-\langle\theta'w'\rangle$ 为大气热流通量, m·℃·s^{-1};$-\langle x'w'\rangle$ 为大气湿流通量, mg·kg^{-1}·s^{-1};G 为冠层内的显热散热量, W;S 为冠层内的散湿量, kg·s^{-1}
热力学方程	$\rho c_p V\frac{\partial\Theta(z,t)}{\partial t}=\rho c_p V\frac{1}{m}\frac{\partial}{\partial z}(-m\langle\theta'w'\rangle)+G$	
湿量方程	$\rho V\frac{\partial X(z,t)}{\partial t}=\rho V\frac{1}{m}\frac{\partial}{\partial z}(-m\langle x'w'\rangle)+S$	
涡扩散方程	$-\langle u'w'\rangle=K_m\frac{\partial u}{\partial z}$,$-\langle\theta'w'\rangle=K_h\frac{\partial u}{\partial z}-$,$\langle x'w'\rangle=K_v\frac{\partial u}{\partial z}$	K_m, K_h, K_v分别为湍动运动量、热量、湿量交换系数,m^2·s^{-1}
建筑室内冷热负荷计算方程	$R\frac{\mathrm{d}\theta_r}{\mathrm{d}t}=\sum A_i\alpha(\theta_{s,i}-\theta_r)+c_p\dot{m}(\theta_o-\theta_r)+H_g$ $\rho V\frac{\mathrm{d}X_r}{\mathrm{d}t}=\dot{m}(X_o-X_r)+L_g$	Θ_r, θ_o分别为室内外空气温度, ℃; X_r, X_o分别为室内外含湿量,g·kg^{-1};$\theta_{s,i}$为墙体表面温度,℃;H_g为建筑内部产热量, W;L_g为建筑内部产湿量, g·h^{-1}
建筑空调制冷系统排热量计算方程	$Q_{bt}=(1+1/COP)\cdot H_{total}\cdot IP$	Q_{bt}为空调实际散热量, W; H_{total}为空调的全热负荷, W
下垫面热量平衡方程	$R_{n,i}=R_s\downarrow-\varepsilon_i\sigma T_i^4+\varepsilon_i(F_{is}R_l\downarrow+\sum_j F_{ij}\varepsilon_j\sigma T_j^4)$	$R_{n,i}$为净辐射通量, W·m^{-2};$R_s\downarrow$为向下短波(太阳)辐射通量, W·m^{-2};$R_l\downarrow$为向下长波漫射红外辐射通量, W·m^{-2};F_{ij}为两个微元面之间的角系数
感热通量及潜热通量计算方程 树木—H_t,EV_t 沥青道路—H_a,EV_a 土壤—H_s, EV_s 草地—H_g, EV_g 水体—H_w, EV_w	$H_t=(6.79+5.99\times U_{1.25})(T_{t,i}-T_{1.25})$ $EV_t=A_t\alpha_w\beta_t(X_t-X_a)$ $H_a=(5.21+7.53\times U_{1.5})(T_{a,i}-T_{1.5})$ $EV_a=re_a(\varphi/\varphi_{max})k_x(X_a-X_{1.5})$ $H_s=(5.21+7.53\times U_{1.5})(T_{a.i}-T_{1.5})$ $EV_s=re_s(\varphi/\varphi_{sat})\alpha_x(X_s-X_{1.5})$ $H_g=(4.5+5.2\times U_{1.25})(T_{g,i}-T_{1.25})$ $EV_g=\kappa\cdot EV_s$ $H_w=c\rho C_H U_{10}(T_{w,i}-T_{10})$ $EV_w=\rho C_E U_{10}(X_w-X_{10})$	T_i为表面温度, ℃;α_w为树冠散湿系数;β_t为树冠的树叶群蒸发效率;Re 为蒸发率;α_x 为传质系数;κ 为同等条件下绿地散湿通量与土壤散湿通量的比值;c 为空气的定压比热, J/(kg·K);ρ为空气密度, kg·m^{-3};C_H和 C_E为距水面 10 m 处显热及潜热 bulk 传输系数
热舒适定义方程	$Q_{sk}=\alpha'_{SET}(T_{sk}-\mathrm{SET}^*)+w\alpha'_{eSET}(p_{sk}-0.5p_{SET})$	Q_{sk}为皮肤总散热量, W;T_{sk}为皮肤温度, ℃;p_{sk}为皮肤表面的水蒸气分压力;p_{SET}为饱和水蒸气分压力, kPa

地理信息系统(GIS)广泛应用于城市气候研究的空间数据处理、数据存储与数据分析中[20].依据地块空间信息,GIS 对评估模型计算获得的气候参数进行空间的呈像处理,从而得到各气候评价参数在研究区域的空间分布图,从而进行局地气候的空间可视化评估分析.

2　评估案例

2.1　评估区域

选取广州市大岗镇北区综合开发区为研究区域.其规划居住人口规模 5.5 万人,总用地规模 6.71 km^2,其中城市建设用地 5.62 km^2.整个规划区

域被划分成 259 个地块,以水涌和绿道为纽带,通过景观轴、景观特色空间以及标志性景观节点的建构,创造丰富的景观效果,并涵盖了居住建筑用地、商业用地、公共服务用地、园林绿地、水体景观等多层次的土地利用类型,如图 2 所示.

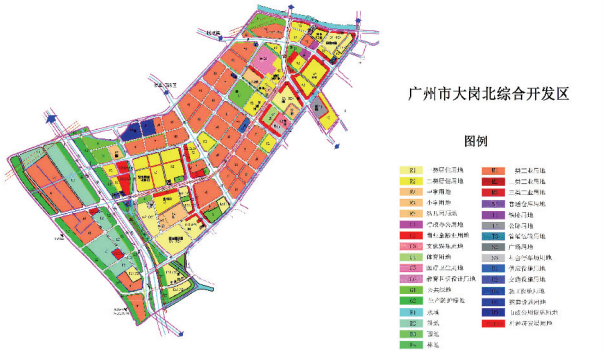


图 2 整体规划区域的土地利用分布

Fig.2 Land use distributions of overall planning region

2.2 气象条件

广州市位于东经 113°17′、北纬 23°8′,地处珠江三角洲北缘,具有南亚热带典型的季风海洋性气候.广州市的夏季长而炎热,全年平均气温 20~22 ℃,平均相对湿度 77%.因此选取广州夏季典型气象日气象数据为基础气象数据[21],对研究区域的局地热气候进行评估.图 3 展示了广州夏季典型气象日的空气干球温度和相对湿度的逐时分布.如图 3 所示,空气干球温度在 26~31 ℃,相对湿度在 55%~90%呈周期性变化.

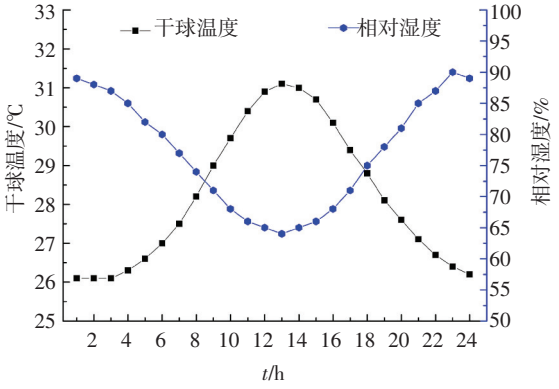


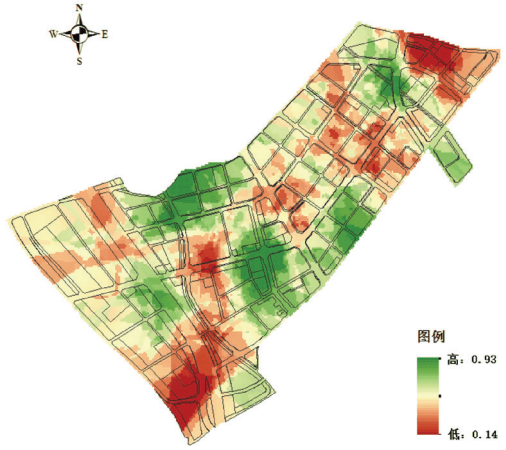
图 3 广州夏季典型气象日大气干球温度和相对湿度的逐时分布

Fig.3 Hourly variations of air temperature and relative humidity on typical weather day in summer of Guangzhou

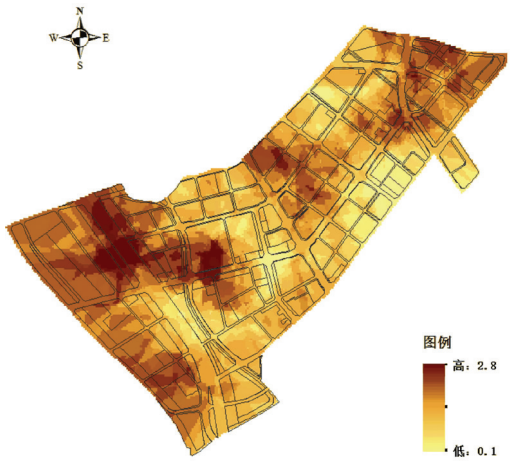
3 结果分析

3.1 评估区域下垫面特性空间分布

根据大岗北研究区域的规划数据,利用 GIS 将两个典型的下垫面特性参数——绿地率和容积率在多个规划地块中的数据进行空间可视化,如图 4 所示.图 4(a)为绿地率的空间分布图,整个研究区域的绿地率主要分布在 0.14~0.93,对比图 1 的土地利用类型可知,主要的居住建筑区及工业建筑区的绿地率较低,但区域内大量的公共绿地、防护绿地、园地、林地等绿色景观使得整个研究区域仍有大部分公共空间的绿化程度达到了较高水平.图 4(b)为容积率的空间分布图,整个研究区域的容积率主要分布在 0.1~2.8,在工业用地及居住用地的集中区域,其容积率较高,在其余的公共空间中容积率较低.对比绿地率与容积率的分布图可知,建筑功能性集中且密集的区域,其绿地率较低,容积率较高;而绿地景观、娱乐休闲活动区域等公共空间,其绿地率较高,容积率较低.



(a) 绿地率



(b) 容积率

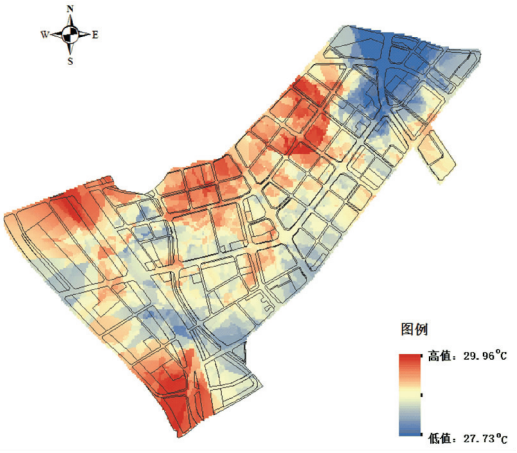
图 4 绿地率及容积率在研究区域内的空间分布

Fig.4 Spatial distributions of green coverage ratio and floor area ratio in research region

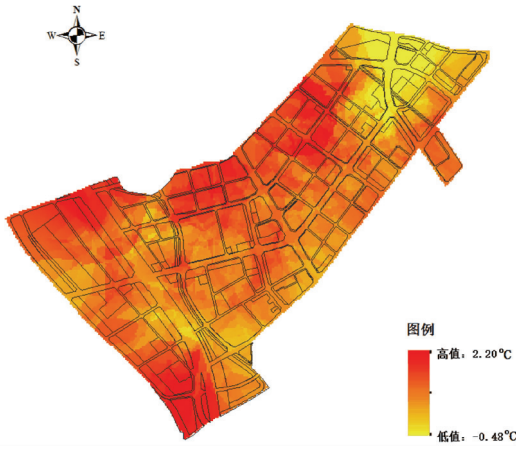
3.2 热气候参数空间分布

为了能够展现研究区域热气候条件的整体情况,主要考虑气候评估参数 24 h 平均值的空间分布特性.根据热环境评估模型的计算结果可以获得热气候参数的 24 h 全天平均值,利用 GIS 的空间数据读取以及空间插值的功能,将空气温度平均值以及

UHII 平均值的空间分布图进行可视化,结果如图 5 所示.整个研究区域空气温度的全天平均值分布在 27.73~29.96 ℃,UHII 的全天平均值分布在-0.48~2.2 ℃.根据土地利用情况可知,工业建筑区域与居住建筑区域的空气温度及 UHII 值较高.对比绿地率与容积率的分布图可以看出,部分绿地率极低的区域,其空气温度与 UHII 值明显高于其他地区;然而,部分容积率较高的区域,空气温度与 UHII 值反而显示出较低的水平;在绿地率与容积配比适中的区域,其空气温度与 UHII 显示出明显的低值,可见,空气温度与 UHII 的分布与绿地率和容积率的空间分布具有一定的内在相关性关系.



(a) 空气温度平均值



(b) 热岛强度平均值

图 5　空气温度平均值及热岛强度平均值在研究区域内空间分布

Fig.5　Spatial distributions of average air temperature and UHII in research region

3.3　热舒适参数空间分布

为了能够反映研究区域整体的气候适宜性水平,利用 GIS 将人体舒适性参数 OUT-SET* 的全天平均值进行空间可视化,图 6 展示了 OUT-SET* 的空间分布.可以看出,整个研究区域 OUT-SET* 的平均值主要在 29.05~33.44 ℃变化.根据土地利用分布情况来看,部分工业建筑区的 OUT-SET* 值较高,绿地空间的 OUT-SET* 值较低;对比绿地率的分布图可知,绿地率较高的区域, OUT-SET* 值部分相对较低,但并不是绝对的,在部分绿地率高的区域,其 OUT-SET* 的值并没有明显地处于低值;而对比容积率分布图可以看出,容积率较高的区域,其 OUT-SET* 的值反而相对普遍较低.

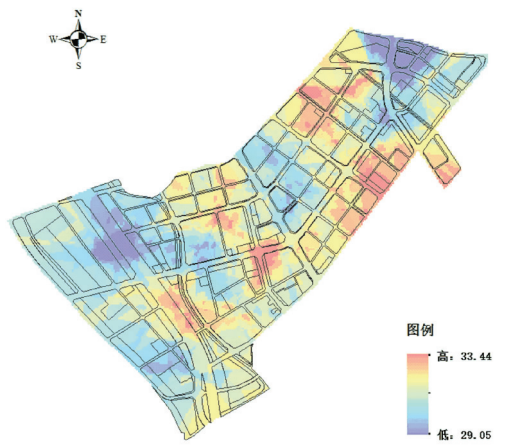


图 6　OUT-SET* 平均值在研究区域内的空间分布

Fig.6　Spatial distributions of human thermal comfort average index OUT-SET* in research region

3.4　因子分析

根据上文的分析可知,热气候参数与热舒适参数都不同程度地受到下垫面特性参数的影响.因此,考虑绿地率与容积率对热气候与热舒适的量化影响非常必要.由于空气温度与热岛强度均反应热气候状态,且热岛强度是通过局地空气温度与郊区空气温度差比较而得到的,更能反应城市化效应对热气候的影响.因此,将绿地率、容积率这两个特性参数与热岛强度、人体舒适性参数 OUT-SET* 进行量化线性相关分析.为了能够得到均一化的结果分布,将绿地率、容积率、UHII 与 OUT-SET* 进行标准化数据处理后,再进行量化分析,得到的结果如图 7、8 所示.

由图 7 可以看出,UHII 与绿地率和容积率均有显著的负相关.其中,UHII 与绿地率的相关性系数为-0.433,显著性系数为 0.094;与容积率的相关性系数为-0.490,显著性系数为 0.054.当绿地率与容积率增大时,UHII 将会显著地下降.这主要是因为绿地率的增加,能够有效地分散太阳对建筑结构的辐射,减少建筑物之间由于植物遮阴造成的地表面温度而形成的长波辐射交换,并通过蒸散效应降低周围环境气温,进而显著地降低了空气温度和 UHII;而随着容积率的增加,建筑物排热量会相应增加,但是对于太阳辐射较为强烈的夏季,建筑物可以对太阳辐射产生有效地遮挡,极大地减少了城市空

间的热量吸收,因而从整体来看,容积率对于炎热夏季的热岛效应具有一定的缓解作用.

由图 8 可以看出,OUT-SET* 与绿地率之间的相关性系数为-0.295,显著性系数为 0.267,虽然二者存在着一定程度的负相关,但显著性较弱.而 OUT-SET* 与容积率之间有着显著的负相关关系,其相关性系数为-0.79,显著性系数为 0.000.上述现象的主要原因为当绿地率增加时,空气温度得到了相应程度的降低,但是室外空间的人体舒适性除了与温度参数有关,还与风速及空气湿度有关,当绿地空间过多时,会减少自然风的流通,且增加了空间湿度,这对于高温高湿的夏季是不利于人体舒适的,所以,对于室外人体舒适性参数的相关性影响较小.而容积率的增加能够有效地降低室外空间的太阳辐射强度,进而提高人体的舒适性.

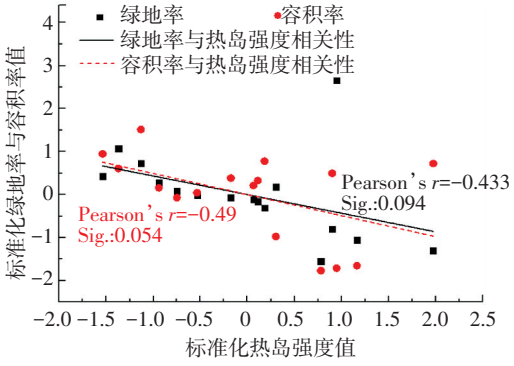


图 7 热岛强度与绿地率和容积率的线性相关关系

Fig.7 Linear correlation relationship between UHII and green coverage ratio and floor area ratio

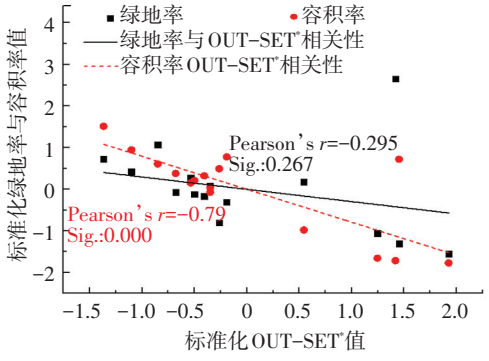


图 8 OUT-SET* 与绿地率和容积率的线性相关关系

Fig.8 Linear correlation relationship between OUT-SET* and green coverage ratio and floor area ratio

综上,要得到气候适宜的城市空间规划,需要根据不同的气候评价指标和限度来合理均衡地配置下垫面特性参数.规划师可以依据气候参数的空间可视化分布图,清晰直观地了解规划区域局地的气候状态,并通过参照相关标准,将热岛强度与热舒适指标值超过规定标准的区域界定为气候问题区域.针对气候问题区域,规划师通过适当地提高绿地率或增加建筑高度的方式来适当提高容积率,有效地降低问题区域的空气温度并提高人体舒适性.因此,通过气候参数的模拟计算与空间可视化分布的研究,可以更好地帮助规划师指导气候适宜的城区规划.

4 结 论

本文构建了以热环境评估模型和地理信息系统 GIS 相结合的适用于规划区域不同下垫面空间结构特性的气候评估方法.主要选取了空气干球温度 T_a、城市化效应特性参数 UHII 以及室外空间人体舒适性参数 OUT-SET* 作为评估参数.以广州市大岗镇北区综合开发区为例,利用提出的评估方法对多地块条件下的气候参数进行模拟计算,并将计算结果进行空间可视化分析.

大岗北规划区域的全天平均空气温度、UHII、OUT-SET* 的空间分布图显示出各气候评估参数在研究区域内具有很大的空间差异性,其中,整个研究区域的 T_a 平均值分布在 27.73~29.96 ℃,UHII 平均值分布在-0.48~2.2 ℃,OUT-SET* 平均值分布在 29.05~33.44 ℃.对比土地利用分布图及绿地率与容积率的空间分布图可知,热气候参数与热舒适参数都不同程度地受到了下垫面特性参数的影响.通过对绿地率、容积率与热岛强度、OUT-SET* 进行量化的线性相关分析可知,UHII 与绿地率和容积率均有显著的负相关,相关系数为-0.433 和-0.490;OUT-SET* 与绿地率之间相关系数为-0.295,存在着较弱的负相关,而与容积率之间相关性系数为-0.79,有着显著的负相关.因此,气候适宜的城市空间规划,需要根据不同的气候评价指标和限度来合理均衡地配置下垫面特性参数.

在当前阶段,气候知识与信息在土地使用和城市规划方面的应用依旧匮乏,面对未来更多的特大型、高密度、紧凑性的城市设计与规划项目,考虑气候适宜性的可持续城市发展面临着重大的挑战.因此,针对局地规划区域,本文提出的气候评估方法将准确便捷的气候计算模型与 GIS 相结合,可以方便规划师清晰直观地对不同城市空间形态下的气候参数与人体舒适性水平进行评估分析,以便对问题区域的规划方案进行及时的优化和调整.这样的评估方法对于应用气候措施和开展相关的规划实践与指导提供了有力的技术支撑.

然而,本文的结果分析是基于本文研究案例广州市大岗北区的基本规划条件和其夏季典型气象日的气象条件来进行的.论述结果虽然是将城市规划的空间格局参数与局地气候参数进行了统筹性的量化分析,但是因子分析的理论意义和评估方法的应用性需要在今后对其他更多的气候条件和更为广泛

的规划区域进行进一步的验证和综合分析.

参考文献

[1] 何慧,徐涵秋. 小区规划对其热环境影响的遥感分析[J]. 城市规划,2012,36(11):33-38.
HE Hui, XU Hanqiu. Impact on thermal environment by district planning based on remote sensing technology [J]. Planning Studies, 2012,36(11):33-38.

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

[3] 周淑贞,王行恒. 上海城市湿岛与城区雾[J]. 应用气象学报,1991,2(3):255-263.
ZHOU Shuzhen, WANG Hangheng. The urban moistureisland and urbanfog of shanghai [J]. Quarterly Journal of Applied Meteorology, 1991,2(3):255-263.

[4] 任超,吴恩融. 城市环境气候图[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2012:150-152.
REN Chao, WU Enrong. Urban climatic maps [M]. Beijing: China Building Industry Press,2012:150-152.

[5] 埃维特·埃雷尔,戴维·波尔穆特. 城市小气候[M]. 叶齐茂,倪晓晖,译. 北京:中国建筑工业出版社,2014:18-20.
EVYATAR E, DAVID P. Urbanmicroclimate [M]. YE Qimao, NI Xiaohui, translate. Beijing: China Building Industry Press, 2014: 18-20.

[6] 吉野正敏. 局地气候原理[M]. 郭可展,译. 南宁:广西科技出版社,1989:1.
YOSHINO M. Localclimatic principle[M]. GUO Kezhan, translate. Nanning: Guangxi Science and Technology Press, 1989:1.

[7] GRIMMOND C S B, BLACKETT M, BEST M J, et al. The international urban energy balance models comparison project: First results from phase 1 [J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2010, 49(6): 1268-1292.

[8] MASSON V. A physically-based scheme for the urban energy budget in atmospheric models [J]. Boundary Layer Meteorology, 2000, 94(3): 357-397.

[9] GRIMMOND C S B, OKE T R. Turbulent heat fluxes in urban areas: observations and a local-scale urban meteorological parameterization scheme (LUMPS) [J]. Journal of Applied Meteorology, 2002, 41: 792-810.

[10] BRANDSMA T, WOLTERS D. Measurementand 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.

[11] PICKUP J, DE DEAR R J. An outdoor thermal comfort index (OUT_SET). Part 1: The model and its assumptions [C] // The 15th International Congress of Biometeorology and International Conference on Urban Climatology. Sydney: World Meteorological Organization, 2000: 1-6.

[12] KURAZUMI Y, JIN I, KNODO E, et al. The influence of outdoor thermal environment on young Japanese females [J]. International Journal of Biometeorology, 2014, 58(5): 963-974.

[13] SPAGNOLO J, DEAR DE R J. A field study of thermal comfort in outdoor and semioutdoor environments in subtropical Sydney, Australia [J]. Building and Environment, 2003, 38(5): 721-738.

[14] WEE P C, KANDA M, MORIWAKI R. Numerical prediction of outdoor thermal index using mesoscale meteorological model [J]. Doboku GakkaiRonbunshuu B, 2001, 45: 259-264.

[15] KONDO H, LIU F. A study on the urban thermal environment obtained through one-dimensional urban canopy model [J]. Journal of Japan Society for Atmospheric Environment, 1998, 33(3): 179-192. (in Japanese)

[16] TANIMOTO J, HAGISHIMA A, CHIMKLAI P. An approach for coupled simulation of building thermal effects and urban climatology [J]. Energy and Buildings, 2004, 36(8): 781-793.

[17] MU Kang, LIU Jing, LI Fangfang, et al. The dynamic prediction on outdoor thermal climate in a complicate urban complex [C] // 13th Conference of the International Building Performance Simulation Association. France, 2013: 998-1005.

[18] ZHUYuemei, 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.

[19] 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.

[20] REN Chao, NG E Y Y, KATZSCHNER L. Urban climatic map studies: A review [J]. International Journal of Climatology, 2011, 31(15): 2213-2233.

[21] 张晴原. 建筑用标准气象数据手册[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2012.
ZHANG Qingyuan. Typical meteorological database handbook for buildings [M]. Beijing: China Building Industry Press, 2012.

(编辑　刘　彤)