

城市规划实践中的热气候评价

朱岳梅^{1,2}, 刘京³, 李炳熙², 叶祖达⁴, 饶红⁴, 王静懿⁴

(1. 哈尔滨工业大学 市政环境工程学院, 150090 哈尔滨, zhuyue mei@hit.edu.cn; 2. 哈尔滨工业大学 能源科学与工程学院, 150090 哈尔滨; 3. 哈尔滨工业大学 城市水资源与水环境国家重点实验室, 150090 哈尔滨; 4. 奥雅纳(上海)工程咨询有限公司, 200031 上海)

摘要: 为量化评价城市规划方案对城市热气候的影响, 提出了适用于城市区域热气候预测模型的不同下垫面传热、蓄热和蒸发量计算方法. 以北京地区某大型生态城规划项目为实例, 引入城市区域局部温升作为评价指标. 利用该计算模型和该指标, 分析了规划方案实施前后该区域热气候变化程度, 并与常规规划方案进行比较, 说明在夏季高温、太阳辐射较大的情况下, 通过有效的规划设计(提高绿地和树木面积率、降低建筑能耗和减少建筑排热等), 可以显著缓解城市化过程对热气候的影响.

关键词: 城市规划; 城市区域热气候预测模型; 下垫面; 城市区域局部温升

中图分类号: TU984

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2011)06-0061-04

Thermal climate evaluation in process of urban planning

ZHU Yue-mei^{1,2}, LIU Jing³, LI Bing-xi², YE Zu-da⁴, RAO Hong⁴, WANG Jing-yi⁴

(1. School of Municipal and Environmental Engineering, Harbin Institute of Technology, 150090 Harbin, China, zhuyue mei@hit.edu.cn; 2. School of Energy Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, 150090 Harbin, China; 3. State Key Laboratory of Urban Water Resource and Environment, Harbin Institute of Technology, 150090 Harbin, China; 4. Arup International Consultants (Shanghai) Co. Ltd, 200031 Shanghai, China)

Abstract: To evaluate the effect of urban planning on urban thermal climate quantitatively, an urban region thermal climate prediction model based on the calculation of heat transfer, heat storage and evaporation rate from various kinds of underlying surfaces is presented and a new evaluating index named as urban district local temperature rising is introduced. Taking a certain eco-city planning project in Beijing as a case study, its temperature variation between pre-and post-urban planning is studied by the model and index. By comparing with normal urban planning, the results show that under the conditions of high temperature and huge solar radiation in midsummer, effective urban planning strategies (such as the increase of lawn and tree ratio, reduction of building energy consumption and building heat release, and so on) can alleviate the negative effect of urbanization on thermal climate.

Key words: urban planning; urban region thermal climate prediction model; underlying surface; urban district local temperature rising

在过去的城市规划实践中, 比较注重社会和经济因素对城市的影响, 不太重视城市生态环境

和气候问题. 实际上, 在城市或城市区域的规划过程中正确了解城市气候的特点, 从可持续城市发展角度提出有针对性的规划方案, 对于改善城市化对气候环境的影响, 缓解城市热岛效应, 有效降低城区温度, 提高城市环境舒适度, 降低城市及建筑耗能具有非常重要的意义^[1-2]. 但到目前为止, 关于城市规划方案对城市区域热气候影响的相关

收稿日期: 2010-03-03.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50879015).

作者简介: 朱岳梅(1973—), 女, 博士后, 讲师;

刘京(1972—), 男, 教授, 博士生导师;

李炳熙(1962—), 男, 教授, 博士生导师.

研究还非常缺乏,且以定性分析为主^[3],缺乏有说服力的计算模型和计算数据作为理论支撑。

1 下垫面传热传质计算与城市区域热气候预测模型

利用开发的城市区域热气候预测模型,对城市规划前与实施后热气候变化进行预测评价。

该模型由局地气候模块、建筑热湿负荷计算模块、太阳辐射计算模块和热舒适性模块等部分组成,将实际城市中的建筑群落分布进行了适当简化处理,在大气流动计算中导入了建筑群的拖曳力影响。结合我国的实际情况,给出了建筑系统设备排热的较为详细的计算方法。另外,模型中利用光子追踪法、蒙特卡洛法等计算城市冠层内各形体表面之间复杂的形态系数。此模型涵盖了城市与建筑热气候问题的所有主要相关因素。该模型的基本框架参见文献[4]。通过与实测结果的比较,证明该模型可以较好地反映城市冠层内各物理量的变化趋势。同时计算方法简易,可用于城市内特定区域热气候的定量评估^[5]。为更好地计算城市规划过程中不同下垫面形式的传热、蓄热和蒸发量计算方法,进而评价不同规划方案对城市热气候的影响,对该模型进行了进一步的改进和完善。

1.1 下垫面传热基本计算

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、植被(以树木为代表)以及自由水面5种不同的下垫面形式。其中传热计算按照一维传热计算方法,将深度0.5 m处的温度设为下边界条件。下垫面的热量平衡方程为

$$R_{n,i} = R_s - \varepsilon_i \sigma T_i^4 + \varepsilon_i (F_{is} R_i + \sum_j F_{ij} \varepsilon_j \sigma T_j^4) = H_i + E_i + G_i. \quad (1)$$

式中: $R_{n,i}$ 、 R_s 、 R_i 为作用在建筑表面或其他下垫面微元面积 i 上的辐射净通量、向下短波(太阳)辐射通量和向下长波漫射红外辐射通量, $W \cdot m^{-2}$; ε_i 为建筑表面或其他下垫面微元面积 i 的长波红外辐射率; σ 为 Stefan-Boltzman 常数,取 $5.67 \times 10^{-8} W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$; F_{ij} 为微元面 i 对另一微元面 j 的角系数($i \neq j$); T_i 为微元面 i 的绝对温度, K; H_i 、 E_i 、 G_i 分别为由微元面 i 的感热通量(下垫面与大气之间温度差形成的对流换热部分)、散湿通量(下垫面的水分蒸发和凝结引起的热量吸收或释放部分)和向下垫面内部传递的导热通量(下垫面的蓄热部分, $W \cdot m^{-2}$); 根据 Stefan-Boltzman 定律,式(1)中的 $\varepsilon_i \sigma T_i^4$ 部分实质为向上的长波红外辐射量。

1.2 不同下垫面感热通量计算

计算感热通量时,考虑各种下垫面的土地构成比例,根据各下垫面表面温度与大气侧空气温度之差求得。其中土壤、人工表面的对流换热系数根据开发者实测获得的经验式^[6]。

$$\alpha = 5.42 + (2.87 + 3.05 I_u) \times U, \quad R = 0.88. \quad (2)$$

式中: α 为对流换热系数, $W \cdot m^{-2} \cdot ^\circ C^{-1}$; U 为下垫面附近处风速, $m \cdot s^{-1}$; I_u 为室外风速湍动强度。时均风速 U 与包含湍动强度 I_u 的风速之间的相关关系根据实测可知大致呈指数正比关系。

对于绿地表面的对流换热系数,则采用实测得到的经验式^[7]。

$$\alpha = 4.5 + 5.2 \times U. \quad (3)$$

对于水面的感热通量 H_w ($W \cdot m^{-2}$),在水文学中一般利用拖曳系数法进行实测研究,相关成果很多。本文采用式(4)^[8]计算。

$$H_w = \rho c_p C_H U (\theta_s - \theta_a). \quad (4)$$

式中: C_H 为热输送系数,本文取 1.82×10^{-3} ; θ_s 和 θ_a 分别为水面和大气温度, $^\circ C$ 。实际计算时,为统一算法便于编程,式(4)改写为式(2)或式(3)传统传热学对流换热形式。

对于树木来说,考虑组成树冠的每一片树叶表面的对流换热规律将会使问题变得极端复杂,同时没有实际意义。引入针对树冠的平均对流换热系数 α_f ,根据经验式(5)^[9]计算。

$$\alpha_f = 6.79 + 5.99 \times U. \quad (5)$$

由于本研究中树木是像建筑物一样的立体结构,故对流换热表面面积 A_f 的计算方法与其他下垫面也有所不同,计算式为

$$A_f = V_f \times \alpha_f \times 2. \quad (6)$$

式中: V_f 为树木树冠部分体积, m^3 。

1.3 不同下垫面散湿通量计算

与计算感热通量类似,计算散湿通量时考虑各种下垫面的土地构成比例,根据各下垫面表面含湿量与大气侧空气含湿量之差求得。对于土壤表面的水分蒸发量计算,一般采用热湿同时传递的计算方法,但计算量较大,特别是与前述大气计算部分耦合求解时,甚至产生计算不稳定。本模型采用简化方法^[10],引入了蒸发比 r_e 的概念,它表示实际土壤蒸发量相对于完全湿润土壤蒸发量的比值。该方法可以分离热、湿计算,散湿计算只需考虑地面上一点即可,极大地简化了计算过程。土壤散湿通量 E_s ($kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$) 的计算式为

$$E_s = r_e (\varphi / \varphi_{sat}) \alpha_x (X_{sat} - X_a). \quad (7)$$

式中: r_e 为蒸发比,是土壤的重量含水率 Φ

($\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$)与饱和含水率 $\Phi_{\text{sat}}(\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1})$ 的函数; α_x 为传质系数, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}(\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1})^{-1}$, $\alpha_x = \frac{\alpha}{c_v Le}$. 其中 c_v 为湿空气容积比热, $\text{J}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{K}^{-1}$; X_{sat} 、 X_a 分别为对应于土壤表面温度的饱和含湿量和空气中的含湿量, $\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$.

绿地散湿通量和建筑或人工路面等不透水表面的散湿量计算方法与土壤类似,参考文献[11].

树冠部的散湿量 $E_f(\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$ 可根据实测得到的经验式概算^[12]

$$E_f = A_f \alpha_w \beta_f (X_f - X_a). \tag{8}$$

式中: α_w 为树冠散湿系数, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}(\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1})$,等于 $7.0 \times 10^{-6} \alpha_f$; β_f 为构成树冠的树叶群蒸发效率,一般可取 0.3; X_f 为叶面平均含湿量, $\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$,一般可认为对应于树叶表面温度的饱和含湿量.

湖泊、河流等自然大水体水面散热与蒸发问题的研究由来已久. 考虑到各计算方法的精度,以及嵌入计算模型的便利性等因素,本文采用简化计算方法

$$E_w = \rho C_E U (X_w - X_a). \tag{9}$$

式中: E_w 为水面散湿通量, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$; C_E 为水气输送系数,取 2.07×10^{-3} ; X_w 为水面含湿量, $\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$,一般认为对应水表面温度的饱和含湿量.

近年来屋顶绿化作为一项改善城市气候的措施正越来越受到重视^[12]. 其计算方法包括了前文中关于土壤和草地散热散湿的计算方法.

2 应用案例

2.1 规划项目概要

图 1 为北京某大型生态城规划项目区域总体规划图. 该区域以居住、休闲、服务型建筑等为主,约 131.92 公顷. 整个区域的建筑布局和朝向考虑了城市通风作用,设置了通风廊道. 由于实际规划中建筑物的形状、体积、间距均不尽相同,本文通过统计方法按照城市区域热气候预测模型的要求进行了简化,同时严格保持实际规划方案中的重要信息:如地块的容积率约 0.89、绿地率(指公共绿地、宅旁绿地、公共服务设施所属绿地和道路绿地)约 33.2%、道路、广场、空地用地率约 18.1%、树木用地面积率约 28.1%、水域面积率约 5.2%等. 另外,根据北京地区的林木情况设定为栎属、桦属、杨属为主的阔叶林,树冠高度设定为 10 m.

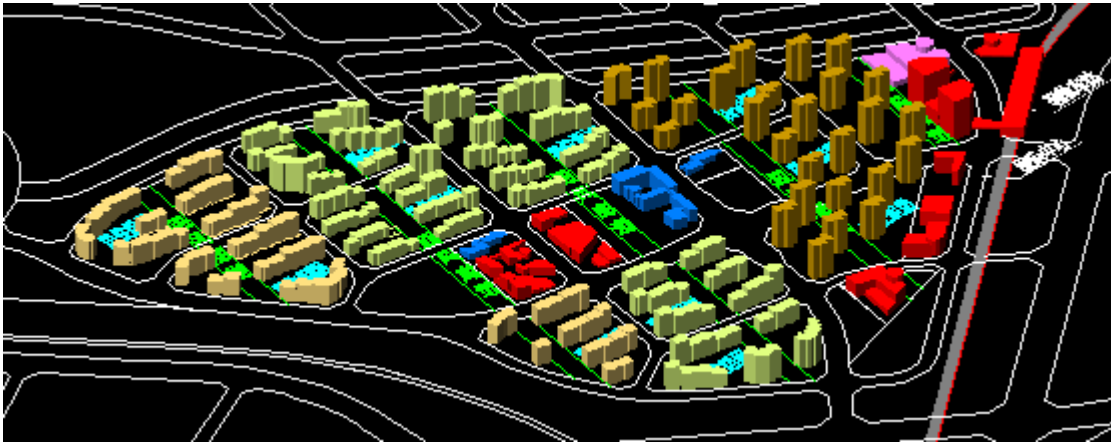


图 1 项目区域总体规划图

根据地方建筑节能标准等^[13],规划区域内居住建筑围护结构构成和热物性参数分别为:墙体,外保温(装饰面砖聚氨酯复合板 70 mm) + 现浇混凝土 180 mm,传热系数 $0.36 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$; 窗体,辐射率 ≤ 0.25 Low-E 中空玻璃(12 mm) + 铝合金窗框,传热系数 $1.70 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$. 另外,从降低气温的角度,设定 30% 的屋顶绿化,外墙反射率提高至 0.2. 根据相关调查文献[14],居住类建筑夏季供冷以分散式房间空调器为主,保有率在

2002 年已达到 96.8%. 使用时间设在晚 9 点至翌日凌晨 3 点之间. 另外,文献[15]给出了北京地区崇文门等繁忙路段机动车尾气排放的废热量和日变动比率,考虑到具体区域交通性质的差异,本对象区域的交通废热峰值按文献给值的 2/3 取值.

2.2 评价指标

涉及的城市规划区域大致对应于城市气象学分类中的中尺度 - γ (水平距离 1 ~ 25 km 以内)

问题,而热岛效应及热岛强度在理论上更适用于更宏观的尺度规模(如针对城市尺度的中尺度-β,即水平距离在25 km以上).为明确概念起见,本文提出“城市区域局部温升值”.ΔC作为评价指标,该指标反映特定的城市区域规划前与实施后对大气温度的影响,计算式为

$$\Delta C = T_{\text{urban}} - T_0.$$
 (10)

式中: T_{urban} 为该对象区域在夏季典型日内白天(8时—18时)及夜间(19时—翌日7时)冠层高度内大气温度的时均值,反映建成后该区域的实际热气候状况.根据北京地区气象数据^[16],选择北京地区全年最热的7月—8月的4周时间作为计算期间.然后参考文献[17],选择出计算期间的典型日(该日平均气象参数最接近计算期间内气象参数的平均值)来计算ΔC值.为消除初始条件影响,取计算期间前一周作为预计算; T_0 为该对象区域在相同的夏季代表月内白天(8时—18时)及夜间(19时—翌日7时)冠层高度内大气温度的时均值,该值作为规划前后比较的基准值.对本文的规划对象来说,规划前该区域为未开发荒地,以土壤和植被为主.

2.3 结果与分析

2.3.1 典型日城市区域局部温升

图2所示为规划实施后的典型日下垫面热平衡关系.其中,进入地表面的得热部分设为正,离开地表面的热损失部分设为负.进入白天后,净辐射得热量 R_n 逐渐增加,相应地感热 H 和散湿通量 E 也增加.但总体上看,由于规划用地的土地构成比较合理,绿地和树木所占面积比率较大,故散湿通量很大,白天 H/R_n 和 E/R_n 的最大值分别为37%和43%.这部分潜热散热对调节该区域的热气候起着很大的作用.同时在此期间剩余的近20%的净辐射得热量通过传热形式进入地中,在夜间以长波辐射的形式释放出来.

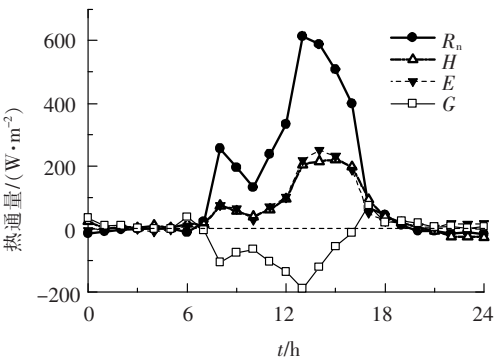


图2 规划实施后夏季典型日下垫面热平衡关系

图3给出了规划前与规划实施后夏季典型日温度变化,表1给出了计算出的白天与夜晚城市

区域局部温升值ΔC.由结果看,由于不透水人工表面(建筑外表面、道路等)对太阳辐射的反射率比其他下垫面小,同时凸凹不平的建筑形状又不利于太阳辐射的反射,导致区域内部热量聚集、温度升高,与规划前的状态相比,局部温度大致上升0.82℃;而夜晚主要是考虑了建筑空调排热因素,导致与规划前状态相比,局部温度大致上升0.81℃.

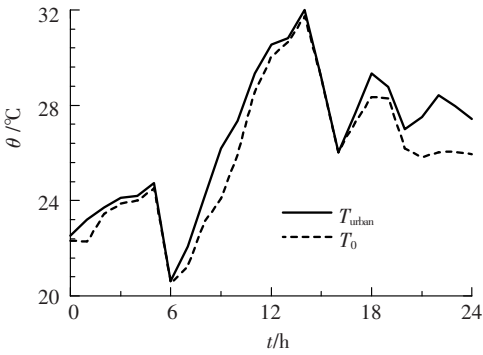


图3 规划前与实施后夏季典型日温度变化

2.3.2 本文方案与常规方案的局部温升值对比

为进一步分析本文方案对减缓城市区域高温化方面的作用,还进行了常规方案的模拟.常规方案的基本设定条件(建筑容积率等)与规划方案相同,区别点主要体现在:1)绿地率设为规范下限的30%,不考虑树木.相应的人工不透水表面积增加;2)采用常规的建筑围护结构和空调制冷方式与设备;3)未考虑针对区域热气候问题的专门措施,未考虑地块内气流流动和热量的有效扩散、未考虑屋顶绿化作用、采用常规的外墙反射率0.1等.其计算结果见表1.可以看出,常规方案下ΔC值在白天和夜晚都超过了1.5℃.

表1 规划区域内夏季典型日白天及夜晚的

城市区域局部温升值			℃
时间段	本文方案	常规方案	
白天(8时—17时)	0.82	1.74	
夜晚(18时—翌日7时)	0.81	1.77	

3 结 语

利用城市区域热气候预测模型以及本文提出的城市区域局部温升值指标,可以用于评价不同城市规划方案在改变城市热气候方面的作用,为可持续发展生态城市建设提供了一种定量的评价方法.从给出的实例可以看出,通过有效的规划设计(提高绿地和树木面积率、降低建筑能耗和减少建筑排热、提高建筑群之间的通透性、增加屋顶绿化和提高外墙反射率等),可以显著缓解城市化过程对热气候的影响. (下转第75页)