居住区气温变化模型及应用*

陈恩水

(东南大学建筑工程系, 南京 210096)

摘要 借助居住区热时间常数和地表热时间常数计算城市局地气温变化. 给出的数学模型简单实用, 但考虑了多项城市相关参数. 结果表明实测值与预测值吻合较好. 对部分城市参数作了敏感性分析, 初步揭示了各参数变化对城市居住区气温的影响.

关键词 城市热环境, 拉普拉斯变换, 数学模型, 敏感性分析.

A Model of Cluster Air Temperature Variation and Application

Chen Enshui

(Department of Architecture, Southeast University, Nanjing 210096)

Abstract In this paper, urban air temperature variation in local area using the cluster thermal time constant and the surface thermal time constant were caculated. This model is simple and useful, but it considers many parameters. The simulated results showed that caculated valuse are good agreement with those measured. Finally sensitivity analysis were discussed, the results exhibited the impact of urban parameters variations on cluster air temperature.

Keywords urban thermal environment, Laplace transform, mathematical modeling, sensitivity analysis.

城市热岛现象的存在以及城市覆盖层内下垫面性质和建筑等因素引起的气温变化现象已有广泛的报道. Myrup L. O. 给出了时变的城市热岛数值模式[1], Leahey D. L. 提出了城市混合边界层高度的预测模型并将之用于纽约市的热岛研究[2]; 80年代末期, Mihailovic D. T. 等利用等效、类比和数值模拟等方法, 详细讨论了人为散热、植被、绿化、建筑分布等对城市热环境的影响. 本文给出了一个简单实用的温度变化预测模型, 讨论如何在建筑规划中适当选择各参数, 达到调控局地微热环境的目的.

1 模型建立

1.1 物理参数描述

假设研究区域内的建筑分布均匀, 且均已满足日照要求, 街道两侧的建筑物平均高度为 H(m), 街道宽度为 W(m), 街道走向与正南方向夹角为 θ(deg), 以向西为正, 记 $A(t)$、$H(t)$ 分别为 t 时的太阳方位角和高度角, $\Omega(t)=15(t-12)$ 为 t 时的太阳时角, $t=12$ 表示正午时分, $A(t)$ 和 $H(t)$ 的正负取值与通常记法一致. 记 $v(t)$ 为 t 时风速(m/s), 定义:

$$\begin{cases} \text{街道视野度: SVF} = \cos\left(\mathrm{tg}^{-1}\dfrac{2H}{W}\right) \\ \text{街道平均换热系数:} \\ \quad h(t) = 9.8 + 4.1v(t)\ \ (W/m^2 \cdot K)^{[3]} \end{cases} \tag{1}$$

街道部分遮荫系数: $PSA(t) = \min\{1 - SVF, H|\cos thH(t)\sin(\theta - A(t))| / W\}$ (2)

t 时街道太阳辐射强度: $I(t) = 780(1 - PSA(t))(\sin\varphi\sin\delta + \cos\varphi\cos\delta\cos\Omega(t))$ (W/m^2)

$$t_0 \le t \le t_1 \tag{3}$$

其中, φ、δ 分别为地理纬度和太阳赤纬, t_0、t_1 分别为局地平面日出日没时间.

---

* 国家自然科学基金资助课题(Project Supported by National Natural Science Foundation of China)
陈恩水: 男, 33岁, 博士
收稿日期: 1997-09-26

1.2 数学模型描述

1.2.1 不考虑潜热效应

根据Swaid H.N.等人提出的城市覆盖层内气温预测公式，t 时气温可表示为[4]：

$$T_a(t) = T_a(t_0) + \Delta T_{AS}(t) - \Delta T_{NL}(t)\, \Delta T_{AN}(t) \quad (4)$$

$$t \geq t_0$$

式中，$\Delta T_a(t_0)$ 为 t_0时的基准气温，$\Delta T_{AS}(t)$ 代表太阳辐射增温，$\Delta T_{NL}(t)$ 代表净长波辐射的冷却效应，$\Delta T_{AN}(t)$ 代表人为散热引起的增温，以上诸参量的单位为℃，取：

$$\Delta T_{AS}(t) = \frac{(1-\alpha)}{h(t)} \int_0 \frac{\partial I(\lambda)}{\partial \lambda}$$

$$[1-\exp(-R_2(t-\lambda))]\,d\lambda \quad t \geq t_0 \quad (5)$$

记 $\Delta T_a(t) = T_a(t) - T_a(t_0)$，$\Delta I(t) = I(t) - I(t_0)$，$\Delta I_{NL}(t) = I_{NL}(t) - I_{NL}(t_0)$，$\Delta T_s(x,t) = T_s(x,t) - T_s(x,t_0)$，$\Delta T_s(t) = \Delta T_s(0,t)$，$\Delta T_{AN}(t) = I_{AN}(t) - I_{AN}(t_0)$，$R_2$称为大气热时间常数．则有：

$$\Delta I_{NL}(t) = [\epsilon\sigma\theta_s^4(t) - \epsilon\sigma\theta_a^4(t_0) - Br\sigma\theta_a^4(t) + Br\sigma\theta_a^4(t_0)]\,SVF$$

$$\approx [4\epsilon\sigma\theta_s^3(t_0)\Delta T_s(t) - 4Br\sigma\theta_a^3(t_0)\Delta T_a(t)]\,SVF$$

地表能量平衡方程式为：

$$-K_s \frac{\partial(\Delta T_s(x,t))}{\partial x}\Big|_{x=0} = h(t)[\Delta T_a(t) - \Delta T_s(t)] + (1-\alpha)\Delta I(t) + \Delta I_{AN}(t) - \Delta I_{NL}(t)$$

$$\approx h_2(\Delta T_A(t) - \Delta T_s(t)) + \Delta I_{AN}(t) \quad (6)$$

上式中，$\Delta T_A(t) = (1-\alpha)\Delta I/h_2 + h_1\Delta T_a(t)/h_2$，$h_1 = h(t) + 4\sigma Br\theta_a^3(t_0)\,SVF$，$h_2 = h(t) + 4\sigma\epsilon\theta_s^3(t_0)\,SVF$，$\theta_s(t)$ 及 $\theta_a(t)$ 分别为地表及大气温度的绝对温度值，均以K表示，ϵ、σ、Br 分别为地表发射率、斯坦福-波尔兹曼常数和布伦特常数，K_s 为下垫面导热系数(W/m·K)，α 为地表反射率．一维传热方程为：

$$\frac{\partial(\Delta T_s(x,t))}{\partial t} = \frac{K_s}{\rho_s C_s}\frac{\partial^2(\Delta T_s(x,t))}{\partial x^2} \quad 0 \leq x \leq L \quad (7)$$

下边界条件为：

$$\frac{\partial(\Delta T_s(x,t))}{\partial t}\Big|_{x=L} = 0 \quad (8)$$

取 $\Delta I_{AN}(t) = 0$，对(6)—(8)利用Laplace变换：

$$L[\Delta T_s(x,t)] = \int^{\infty} \Delta T_s(x,t)\,e^{-pt}\,dt = \Delta T_s(x,p)，L\left[\frac{\partial(\Delta T_s(x,t))}{\partial t}\right] = -p\,\Delta T_s(x,p)$$

得(6)—(8)的通解为：

$$\Delta T_s(x,p) = A\cosh qx - A\,\mathrm{ctgh}\,qL\,\sinh qx \quad (9)$$

其中 $q = \left[\frac{\rho_s C_s p}{K_s}\right]^{\frac{1}{2}}$，代入边界条件得：

$$A = T_A(p)/(1 + \frac{K_s q}{h_2}\mathrm{ctgh}\,qL) \quad (10)$$

将(10)展成关于 $\overline{P}$ 的幂级数，求出 $\Delta T_s(t)$ 的近似表达式：

$$A = \Delta T_s(t) \doteq \frac{(1-\alpha)\Delta I}{h_2 a} + \frac{h_1(1-\alpha)\Delta I}{h(t)h_2 R_1 b}[1-\exp(-R_2 t)] - \frac{h_1(1-\alpha)\Delta I}{bh(t)h_2(R_1-R_2)}[\exp(-R_2 t) - \exp(-R_1 t)] \quad (11)$$

其中，$a = (h_2 L + K_s)/h_2 L$，$b = L\rho_s C_s/3h_2$，$R_1 = (3Lh_2 + 3K_s)/L^2\rho_s C_s$，$\rho_s$、$C_s$ 分别为地表容重和比热．因地表导热 $\Delta G(t) = (1-\alpha)\Delta I + h_1\Delta T_a(t) - h_2\Delta T_s(t)$，令：$G(+\infty) \approx G(R_1/R_2)$ 得：

$R_2 = R_1 - 1/b = 3K_s/L^2\rho_s C_s$（实测表明 $R_2 \gg R_1$，R_1称为地表热时间常数）．

1.2.2 考虑潜热效应

在中性稳定条件下，假设[1]：

$$H/LE = C_p\partial T_a(t)/L\partial q(t)，q(t) = E_f(3.75 + 2.64\times10^{-2}T_a^2(t))\times10^{-3} \quad (13)$$

$$dT_a(t) = f(t)\Delta T_a(t) \quad (14)$$

上式中，H、LE 分别为显热换热和潜热换热，$q(t)$ 为比湿，E_f 定义为所研究区域内自由蒸发表面百分比，通常定义为绿化覆盖率，C_p 为定压比热 L，蒸发换热系数，$f(t)$ 为气温增量的修正因子，$\Delta T_a(t)$、$dT_a(t)$ 分别为不考虑潜热效应和考虑潜热效应的气温增量，比较考虑潜热变化效应前后的地表能量收支平衡式得：

$$\Delta G(t) = (1-\alpha)\Delta I(t) + h_1\Delta T_a(t) - h_2\Delta T_s(t) \quad (15)$$

$$dG(t) = (1-\alpha)\Delta I(t) + h_1 dT_a(t) - h_2 dT_s(t) \quad (16)$$

$$dG(t) = -K_s\frac{\partial dT_s(x,t)}{\partial x}\Big|_{x=0} \approx f(t)\Delta G(t) \quad (17)$$

推得: $f(t) = [1 + LE_f T_a(t_0) \times 2.64 \times 10^{-5}$

$$(1 - R_1)/C_p R_1]^{-1} \qquad (18)$$

将 $f(t)$ 代入(14), 得到时不变人为散热条件下的 $T_a(t)$ 公式如下: $T_a(t) = T_a(t_0) +$

$$D[E(R_2, t_0, t) - BF(t)]/A \qquad (19)$$

其中, $A = 1 - \dfrac{4\sigma Br}{h(t)}\theta_a^3(t_0)\mathrm{SVF}$

$$B = \frac{4\sigma\epsilon}{h(t)}\theta_s^3(t_0)\mathrm{SVF}$$

$$D = f(t)(1 - \alpha)/h_1$$

$$E(R_2, t_0, t) = \int_0 \frac{\partial I(\lambda)}{\partial\lambda}[1 - e^{-R_2(t-\lambda)}]\,d\lambda$$

$$F(t) = h_1 E(R_2, t_0, t)/h_2 + (h_1 + h_2 - ah(t))E(R_1, t_0, t)/ah_2$$

2 模型应用和敏感性分析

2.1 模型应用

本文给出的模型比较适用于城市居住区和街道的气温和地表温度的预测, 但不适用广场等空旷地带的气温预测, 本节以南京瑞金新村居住区($H = 15$m, $W = 15$m) 和大纱帽巷居住区($H = 20$m, $W = 15$m) 为背景, 考虑模型的2个应用, 模型涉及的相关参数取值见文献[1]. 表1是2个居住区相关参数比较和计算结果.

对2个居住区气温的预测与实测分析表明两者的最大绝对误差分别为0.9℃和0.8℃, 均方差分别为0.18℃及0.22℃, 平均误差分别为0.3℃和0.45℃. 2个实例预测均表现为平均预测值低于平均实测值, 笔者认为模型本身的简化及忽略人为散热是造成此误差的主要原因. 表2给出了预测值与实测值的比较, 其中 $\Delta T_a(t) = T_a(t) - T_a(6)$, 实测值 $\Delta T(t)$ 代表 t 时的实测值与6时的实测值的差值.

表1 瑞金新村和大纱帽居住区相关参数

相关参数	A	B	D	R_1	R_2	$h(t)$	h_1	h_2	a	$T_a(t_0)$	θ	E_f/%
瑞金新村居住区	0.90	0.14	0.034	0.4	0.902	14	15.4	16	1.33	28.5	90	15%
大纱帽巷居住区	0.92	0.13	0.035	0.35	0.092	13.5	14.5	15	1.35	28.5	90	15%

表2 预测值与实测值比较

时间/o'clock		6:00	8:00	10:00	12:00	14:00	16:00	18:00	20:00
瑞金新村民住区	$\Delta T_a(t)$	0	1.9	4.4	6.4	7.7	7.6	5.33.1	
	$\Delta T(t)$	0	2.2	4.7	6.5	7.9	7.8	5.5	4.0
	$\Delta T_a(t) - \Delta T(t)$	0	-0.3	-0.3	-0.1	-0.2	-0.2	-0.2	-0.9
大纱帽巷居住区	3.3	$\Delta T_a(t)$	0	2.0	4.2	6.3	7.4	7.0	4.9
	$\Delta T(t)$	0	1.8	4.5	6.8	7.8	6.6	5.7	3.6
	$\Delta T_a(t) - \Delta T(t)$	0	0.2	-0.3	-0.5	0.4	-0.4	-0.8	-0.3

2.2 参数敏感性分析

取 $V(t)$、H/W、$T_a(t)$、$T_s(t)$、E_f、θ分别为1.5m/s、1、28.5℃、28.5℃、15%和90°作为参考值, 则若不改变其它参数, 当 $H/W = 1.4$时, 可产生0.6℃的温差, 出现在14:00左右; 当 E_f 增加10%, 可使温度最大降幅达0.7℃; 当风速减少50%时, 可使气温上升0.6℃; 根据 Swaid H. N. 给出的干泥土和混凝土的导热系数和热容值, 它们的 R_2值分别为0.07及0.092, 后者比前者可导致1.5℃的温度增幅.

3 小结

通过本文给出的模型预测结果与实测结果的比较, 发现两者吻合较好, 说明模型比较可靠精确; 通过模型参数的敏感性分析, 定量地给出了各参数对气温产生的可能影响.

参 考 文 献

1 Myrup L O. A numerical model of the urban heat island. J. Appl. Meter., 1969, **8**: 908

2 Leahey D L et al.. A Model for predicting the depth of the mixing layer over an urban heat island with applications to New York city. J. Appl. Meter., 1971, **10**: 1162

3 IHVE. Guide Book A: Design Data. Loodon: I. H. V. E., 1970

4 Swaid H N et al.. Prediction of urban air temperature variations using the analytical CTTC model. Energy and Building, 1990, **14**: 313