

城市热岛效应的分析解*

桑建国

(北京大学地球物理系)

热岛环流是一种成因复杂的中尺度环流现象。目前的观测分析能力尚无法区分出形成热岛环流的各个因子的相对重要性。例如城市上空的垂直运动和水平风速变化是由粗糙度增加和稳定度减少综合作用的结果,但观测上不能分别估计出这两种作用的大小。数值模拟方法有可能从量级上试验出不同因子的作用大小,但还不能深入到现象和成因之间联系的物理本质。为此,为深入理解这个现象,从不同角度出发的理论分析,仍然是必要的。

本文从大气热力-动力学方程组出发,分析了单纯由于城市的加热作用而引起的热岛环流特征。讨论了环流强度和温度空间分布与背景大气的稳定性和平均风速的关系。这些结果可能有助于进一步深入理解热岛现象,并为现场观测和数值模拟提供某些线索。

1. 线性化模式

在气压对数坐标系中,垂直坐标定义为^[1]。

$$z^* \equiv -H \ln \frac{p}{p_0}$$

其中 p_0 为参考气压(1000 hPa), $H = RT_0/g$ 为高度尺度,是一常数。

在二维的 x, z^* 平面中,如不考虑科氏力和摩擦力,则水平运动方程、静力方程、连续方程和热流入量方程分别为:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + w^* \frac{\partial u}{\partial z^*} = -\frac{\partial \Phi}{\partial x} \quad (1)$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial z^*} = \frac{RT}{H} \quad (2)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w^*}{\partial z^*} - \frac{w^*}{H} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + w^* \Gamma = \frac{\epsilon}{c_p} \quad (4)$$

其中 $w^* = \frac{dz^*}{dt}$ 为 (x, z^*) 坐标系中的垂直运动速度; $\Gamma = \frac{\partial T}{\partial z^*} + \frac{RT}{c_p H} = \frac{T}{\theta} \frac{\partial \theta}{\partial z^*}$, 在低对流层中可近似视为常数; ϵ 为单位质量空气的加热率。

* 本文于1984年8月6日收到,1985年3月7日收到修改稿。

分解所有变量为基本平均量和扰动量之和

$$\psi = \bar{\psi} + \psi'$$

其中 ψ 可为 u, Φ, T, w^* 和 ϵ , 且有 $\bar{w}^* = 0$ 。由(1)–(4)可得到定常状态的线性化扰动量方程

$$\bar{u} \frac{\partial u'}{\partial x} + \frac{\partial \Phi'}{\partial x} = 0 \quad (5)$$

$$\frac{\partial u'}{\partial x} + \frac{\partial w^{*'}}{\partial z^*} - \frac{w^{*'}}{H} = 0 \quad (6)$$

$$\bar{u} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial \phi'}{\partial z^*} \right) + w^{*'} S = \frac{\epsilon' R}{c_p H} \quad (7)$$

其中 $S = R\Gamma/H$ 为一表示大气稳定度状态的常数。下面为书写方便起见,略去上述方程中的星号和 $w^{*'}$ 上的撇号。

方程(5)–(7)经过变换后,可得到关于 w 的方程

$$\frac{\partial^2 w}{\partial z^2} - \frac{1}{H} \frac{\partial w}{\partial z} + \frac{S}{\bar{u}^2} w = \frac{1}{\bar{u}^2} \frac{\epsilon' R}{c_p H} \quad (8)$$

方程右端的非齐次项表现了城市的加热作用,它是叠加在平均加热(冷却)场上的一个扰动场。对于夜间稳定层结下的城市对大气的加热作用,这一项在形式上可表示成为

$$\frac{1}{\bar{u}^2} \frac{\epsilon' R}{c_p H} = A \left(\frac{2L}{x^2 + L^2} - 1 \right) e^{-\alpha z} \quad (9)$$

其中 L 为城市的半宽,城市中心设在 $x = 0$ 处。

方程(8)在给定边条件下有确定的解。边条件设为,在地面

$$z = 0 \text{ 处, } w = 0 \quad (10)$$

在低对流层的某一高度 $z = h$ 处,垂直速度达到极大,

$$\frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (11)$$

于是,得到垂直速度的解为

$$w = \{ e^{z/H} (-\cos \lambda z + B \sin \lambda z) + e^{-\alpha z} \} N \quad (12)$$

其中

$$N = \frac{A}{\alpha^2 + \alpha/H + S/\bar{u}^2} \left(\frac{2L^2}{x^2 + L^2} - 1 \right) \quad (13)$$

$$B = \frac{\alpha e^{-\alpha h} + \frac{1}{H} e^{h/H} \cos \lambda h - \lambda e^{h/H} \sin \lambda h}{e^{h/H} \left(\frac{1}{H} \sin \lambda h + \lambda \cos \lambda h \right)} \quad (14)$$

$$\lambda = \sqrt{S/\bar{u}^2 - 1/4 H^2} \quad (15)$$

将(12)代入(6),可以得到扰动量 u' 的解

$$u' = \left\{ -e^{z/H} (\lambda \sin \lambda z + B \lambda \cos \lambda z) + \left(\frac{1}{H} + \alpha \right) e^{-\alpha z} \right\} \frac{A}{\alpha^2 + \alpha/H + S/\bar{u}^2} \left(2L \arctan \frac{x}{L} - x \right) + C \quad (16)$$

由方程(4)可以得到扰动量 T' 的方程

$$\bar{u} \frac{\partial T'}{\partial x} + w \Gamma = \epsilon' / c_p \quad (17)$$

它的解为

$$T' = \frac{A}{\bar{u}} \left\{ \frac{\bar{u}^2 H}{R} e^{-\alpha z} - [e^{z/H} (-\cos \lambda z + B \sin \lambda z) + e^{-\alpha z}] \frac{\Gamma}{\alpha^2 + \alpha/H + S/\bar{u}^2} \right\} \left(2L \arctan \frac{x}{L} - x \right) + D \quad (18)$$

式(16)和(18)中的常数 C 和 D , 可由特定位置上的扰动量值确定, 例如设 $x=0$ 处,

$$T'=0; u'=0, \text{ 可得到 } C=0 \text{ 和 } D=0.$$

2. 结果与讨论

设低层大气中, 稳定度参数 $\Gamma=0.006^\circ\text{C}/\text{m}$, 平均风速为 $\bar{u}=3\text{ m/s}$ 。于是 $S=0.0002\text{ s}^{-2}$, $\lambda=0.0047\text{ m}^{-1}$ 。常数 α 取为 0.004 m^{-1} , 它表示在 250 m 高处, 城市的加热作用降低到地面值的 $1/e$ 。 h 取为 400 m , L 取为 5000 m , 扰动加热项 $\epsilon'=3\text{ J}/(\text{kg}\cdot\text{s})$ 。将上述值代入(12)、(16)和(18)中, 得到风场 $(\bar{u}+u'(x, z), w(x, z))$ 和温度场 $(\bar{T}(z)+T'(x, z))$ 的图象, 如图 1 和图 2 所示。

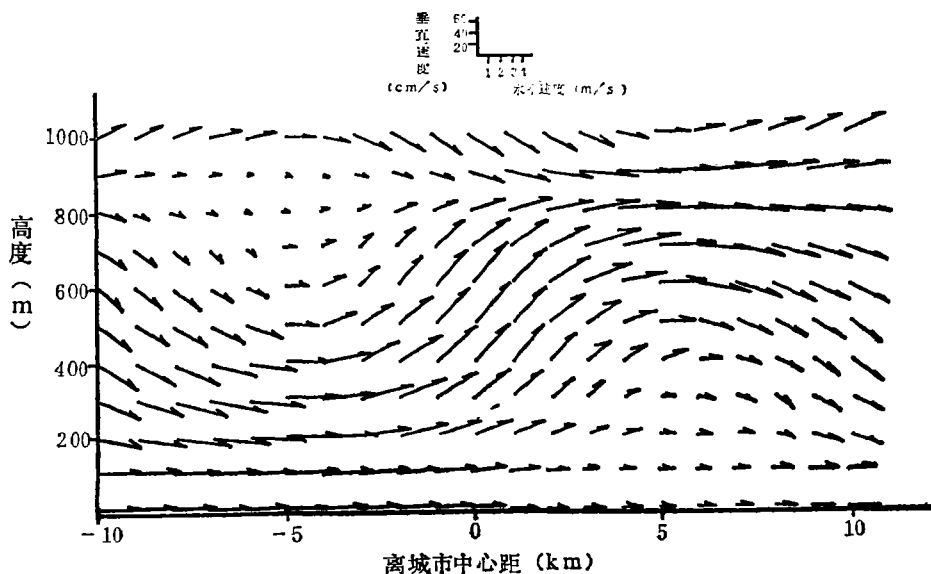


图 1 垂直剖面上流场向量分布

图 1 表明, 水平风在市区内高度 h 以下是辐合的, h 以上是辐散的。最大扰动风速发生在城市的上风和下风边缘 $x=\pm L$ 处。因此在城市的下风向部分出现水平风的最低风速区。Pooler^[2]分析了 Louisville 市的水平风场。他所给出的流线图表明, 在稳定层结的大气中, 气流通过城市时, 在市区的下风部分出现风速和风向的辐合。这种现象的成因, 除了城市的摩擦作用外, 热力造成的辐合是重要的因素。

图 1 还表明, 垂直运动在市区内是上升运动, 在中心附近达到最大。流场在市区内上空呈波动形式。波谷在上风部分, 波峰在下风部分。这种由于城市热力作用所形成的波动,

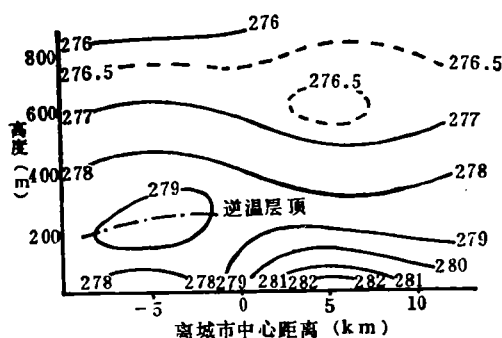
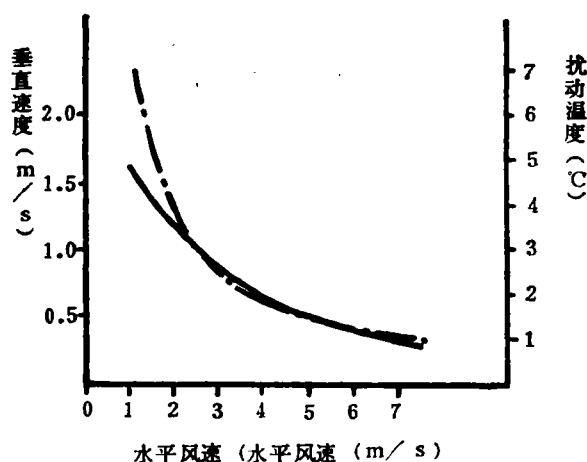


图 2 垂直剖面上等温线的分布

图 3 垂直运动(实线, $x=0$)和地面扰动温度(虚线, $x=L$)随平均风速的变化

类似于气流越过山脊时形成的背风波。有人称这种现象为热山(Thermal-mountain)^[3]。热山波动的波峰出现在城市下风部分,可以由云的观测间接证实。Kratzer^[4]通过分析墨尼黑市的云的分布,给出城市上空云的分布模式。他的模式表明,云多发生在城市的尾流部,和城市下风波动的流线最高部分重合。

图 2 为温度分布的垂直剖面。地面的高温区、即热岛的核心出现在城市的下风部分。这与河村^[5]分析的熊谷市温度分布相符。他提出,在稳定小风(风速小于 5 m/s)情况下,高温中心无例外地出现在城市下风边缘处。

在垂直分布上,城市下风区温度随高度递减快,在 300 m 高度以上温度反比郊区低。因此城市市区和郊区的温度垂直廓线将在 200—300 m 之间的某高度上相交。Duckworth 和 Sandberg^[6]分析了旧金山等城市闹市区和郊区的探空曲线,发现了这种交叉(Cross-over)现象。并且指出城市规模愈大,这种现象愈显著。

在剖面图上还可发现,郊区(城市上风区)上空的温度层结更为稳定,从地面至 300 m 附近为一逆温层。这个区域上空的较高温度是由波谷部分的下沉增温形成的。而在城市下风区的上空则由于上升运动而形成低温区。这种温度场结构和 Bornstein^[7]给出的 1964 年 7 月 16 日 0407—0612 时纽约市的温度垂直剖面相当接近。他的统计还表明,城市市区接地逆温和郊区相比出现频率低、强度弱,但高层逆温出现的频率却高于郊区。这个结论和图 2 给出的计算结果是一致的。

由(9)式可以得出,平均风速 $\bar{u}$ 减小时,会引起 A 的增大。这里 A 对于扰动量 u' , T' 和 w 都起着振幅的作用(见(12)、(16)和(18)式)。

由图 3 可以看出,当水平风速增大时,热岛环流的流场和温度场扰动都会受到抑制。当风速超过 6 m/s 时,单纯由热力作用而形成的热岛现象实际上已被掩盖。

参 考 文 献

- [1] Holton, J.R., An introduction to dynamic meteorology, 172—174, Academic Press, 1972.
- [2] Pooler, F. Jr., Airflow over a city in terrain of moderate relief, *J. Appl. Met.*, 2, 446—456, 1963.
- [3] 大后美保, 長尾隆, 都市気候学, 117, 朝倉書店, 1972.
- [4] Kratzer, A., Das stadtklima Die Wissenschaft, '90, 1956.
- [5] 河村武, 熊谷市における気温分布の解析, 地理評, 37, 243—254, 1964.
- [6] Duckworth, F.S., and J. S. Sandberg, The effect of cities upon horizontal and vertical temperature gradient, *Bull. Amer. Met. Soc.*, 35, 198—207, 1954.
- [7] Bornstein, R. D., Observation of the urban heat island effect in New York City, *J. Appl. Met.*, 7, 575—582, 1968.

AN ANALYTICAL SOLUTION FOR THE EFFECTS OF HEAT ISLAND

Sang Jianguo

(Department of Geophysics, Peking University)