

热岛效应强迫下的中尺度环流的动力 特征及极限风速的一种解析表达*

李 小 凡

(上海台风研究所)

提 要

本文采用考虑热岛造成的局地热力扰动的 Boussinesq 二维垂直剖面的动力方程组, 利用高截断谱方法, 得到一类稳定的中尺度非线性平衡态和极限风速的解析表达, 证明了局地中尺度环流是热岛造成的局地热力扰动和平流非线性共同作用的结果; 并进一步讨论了热岛强迫下的这类局地环流的某些动力特征。

一、引 言

中尺度环流是一类局地性的大气环流系统, 这类环流变化大, 它的形成和发展对局地天气和气候分布及降水分布有重要的影响。在大城市中, 有大量混凝土建筑物以及频繁的人类活动, 因此热传导率和热容量比郊区和农村要高。一般年平均气温要高 1°C 左右, 而且这类热岛效应能在盛行风影响下, 在下风方形成一类中尺度环流。热岛造成的这种局地环流是一类局地热力扰动强迫作用下形成的中尺度环流。对这种环流, 过去已有人对其观测事实进行了分析, 得到了环流的统计结构及某些统计关系, 并提出了极限风速等概念^[1-3]。然而, 这些研究并没有得到动力学较满意的解释。本文采用垂直剖面的二维 Boussinesq 动力方程组, 利用高截断谱方法, 得到一个六维非线性自治的动力系统, 由此计算非线性平衡态的解析解, 讨论了热岛强迫下造成的局地中尺度环流的某些动力特征。

二、动力谱方程组

由于所讨论的中尺度环流限于低空, Boussinesq 近似成立, 因此采用下列方程组:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \nabla^2 \psi + U \frac{\partial}{\partial x} \nabla^2 \psi - \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} \frac{\partial \psi}{\partial x} + J(\psi, \nabla^2 \psi) \\ = -g \frac{\partial \sigma}{\partial x} + \gamma \frac{\partial^3 U}{\partial z^3} + \gamma \nabla^4 \psi \end{aligned} \quad (1)$$

$$\frac{\partial \sigma}{\partial t} + U \frac{\partial \sigma}{\partial x} + J(\psi, \sigma) - S \frac{\partial \psi}{\partial x} = Q^* \quad (2)$$

* 本文于 1987 年 11 月 19 日收到, 1988 年 12 月 16 日收到最后修改稿。

其中 ψ 为垂直剖面上的流函数; 涡度 ζ 为 $-\nabla^2\psi$; $\sigma = \theta'/\bar{\theta}$; $S = \frac{1}{\bar{\theta}} \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial z}$ 是和稳定度有关的参数; Q^* 是与局地加热扰动有关的参数; U 为环境基本风速, 一般仅考虑随高度的变化, 即 $u = U(z)$, γ 这里是湍流粘性系数。

如果选定讨论的垂直剖面区域水平长度为 $2\pi L$, 垂直长度为 πH , 且选定一组正交归一化的基函数。

1, $\sqrt{2} \cos mz/H$, $2 \cos hx/L \cos mz/H$, $2 \sin nx/L \cos mz/H$, $n, m = 1, 2, \dots$ 截断有限个基函数 E_i , 则 ψ, σ 和 Q^* 可表为:

$$\begin{cases} \psi = \sum_{i=1}^N \psi_i E_i \\ \sigma = \sum_{i=1}^N \sigma_i E_i \\ Q^* = \sum_{i=1}^N Q_i^* E_i \end{cases} \quad (3)$$

并利用 E_i 的性质 $\nabla^2 E_i = -\lambda_i^2 E_i$, λ_i^2 为 E_i 的本征值, 因此, 方程组(1)、(2)变为:

$$\begin{aligned} -\lambda_i^2 \frac{d\psi_i}{dt} = & \sum_{j=1}^N [\psi_j (\lambda_j^2 b_{ji} + c_{ji}) - d_{ji} \sigma_j] \\ & + \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^N (\lambda_k^2 \psi_j \psi_k + \lambda_j^2 \psi_j \psi_k) \pi_{ijk} + \gamma \bar{f}_i + \gamma \lambda_i^4 \psi_i \end{aligned} \quad (4)$$

$$\frac{d\sigma_i}{dt} = \sum_{j=1}^N [-b_{ji} \sigma_j + S d_{ji} \psi_j] + \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^N \psi_j \sigma_k \pi_{ijk} + Q_i^* \quad (5)$$

其中:

$$\begin{aligned} \pi_{ijk} &= \frac{1}{2\pi^2 HL} \int_0^{\pi H} \int_0^{2\pi L} J(E_i, E_k) E_j dx dz \\ b_{ji} &= \frac{1}{2\pi^2 HL} \int_0^{\pi H} \int_0^{2\pi L} U \frac{\partial E_i}{\partial x} E_j dx dz \\ c_{ji} &= \frac{1}{2\pi^2 HL} \int_0^{\pi H} \int_0^{2\pi L} \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} \frac{\partial E_i}{\partial x} E_j dx dz \\ d_{ji} &= \frac{1}{2\pi^2 HL} \int_0^{\pi H} \int_0^{2\pi L} \frac{\partial E_i}{\partial x} E_j dx dz \\ \bar{f}_i &= \frac{1}{2\pi^2 HL} \int_0^{\pi H} \int_0^{2\pi L} \frac{\partial^3 U}{\partial z^3} E_i dx dz \end{aligned}$$

三、自治系统的非线性平衡态和热岛 强迫下的局地中尺度环流

采用下列三个正交归一化基函数:

$$E_A = \sqrt{2} \cos z/H, E_K = 2 \cos x/L \cos z/H, E_L = 2 \sin x/L \cos z/H \quad (6)$$

并假定 Q^* 具有下列形式:

$$Q^* = Q_A E_A + Q_K E_K \quad (7)$$

其中右端第二项为热力扰动项,对于城市地面来说,这一项对应于由于都市化造成的热力扰动。

图 1 是通过实际大气中的典型值得到 Q_A 和 Q_K 后,计算(7)式得到的,等值线为等热量线。显然,图 1 呈现了在 $x=0, z=0$ 处是一加热中心,这一项被认为是由于城市中心区域人口过密、工业效应和人类社会活动造成的,在以后的讨论中将着重注意这个中心,当然,这里考虑了最简单的情形,水平是对称的,但大致得到了描述近地面热力分布的基本特征。

对于 ψ, σ , 同样有下列展开:

$$\begin{cases} \psi = \psi_A E_A + \psi_K E_K + \psi_L E_L \\ \sigma = \sigma_A E_A + \sigma_K E_K + \sigma_L E_L \end{cases} \quad (8)$$

这里必须说明,由于热力扰动最大值在近地面处,故为拟合热力特征,这里选择了这些基函数,但这时模式中 $z=0$ 并不是地理上的地面,而是在实际地面上空某一垂直运动存在处。

把(7)、(8)式代入(4)、(5)式,得到六维非线性自治系统:

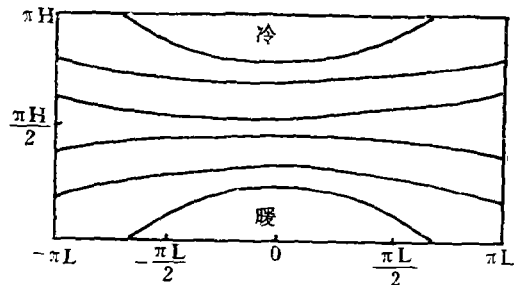


图 1 加热场垂直剖面分布
(等值线间距为 $3 \times 10^{-4} \text{s}^{-1}$)

$$\frac{d\psi_A}{dt} = -H^2 \left(\gamma f + \frac{\gamma}{H^4} \psi_A \right) = f_1 \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \frac{d\psi_K}{dt} = & -H^2 L^2 [(b+c)(H^2 + L^2) \psi_L / H^2 L^2 \\ & - a \psi_A \psi_L / H L^3 - g \sigma_L / L + \gamma (H^2 + L^2) \psi_K / H^4 L^4] \\ & / (H^2 + L^2) = f_2 \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \frac{d\psi_L}{dt} = & -H^2 L^2 [-(b+c)(H^2 + L^2) \psi_K / H^2 L^2 \\ & + a \psi_A \psi_K / H L^3 + g \sigma_K / L + \gamma (H^2 + L^2) \psi_L / H^4 L^4] \\ & / (H^2 + L^2) = f_3 \end{aligned} \quad (11)$$

$$\frac{d\sigma_A}{dt} = -\frac{2a}{HL} (\psi_L \sigma_K - \sigma_L \psi_K) + Q_A = f_4 \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \frac{d\sigma_K}{dt} = & -\frac{b}{L} \sigma_L + \frac{a}{HL} (\psi_A \sigma_L - \sigma_A \psi_L) \\ & + \frac{S \psi_L}{L} + Q_K = f_5 \end{aligned} \quad (13)$$

$$\frac{d\sigma_L}{dt} = \frac{b}{L} \sigma_K - \frac{a}{HL} (\psi_A \sigma_K - \sigma_A \psi_K) - \frac{S \psi_K}{L} = f_6 \quad (14)$$

其中:

$$a = 4 \sqrt{2} / 3 \pi, b = \frac{2}{\pi H} \int_0^{\pi H} U \cos^2 \frac{z}{H} dz,$$

$$c = \frac{2}{\pi H} \int_0^{\pi H} \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} \cos^2 \frac{z}{H} dz,$$

$$f = \frac{\sqrt{2}}{\pi H} \int_0^{\pi H} \frac{\partial^3 U}{\partial z^3} \cos \frac{z}{H} dz$$

这是一个包括涡度平流和温度平流的非线性自治系统。令 $\frac{d}{dt} = 0$, 则经过一系列代数演算, 得到平衡态解析解为:

$$\bar{\sigma}_{K1,2} = \frac{-ABG \pm \sqrt{-A^4 G^2 - (A^2 + B^2) \frac{AHLQ_A}{2a}}}{(A^2 + B^2)} \quad (15)$$

$$\bar{\sigma}_L = -\frac{B}{A} \bar{\sigma}_K - G \quad (16)$$

$$\bar{\sigma}_A = \frac{S}{a} - \left(\frac{2AQ_K \bar{\sigma}_L}{BQA} + \frac{bH}{Ba} + \frac{fH^4}{B} \right) \quad (17)$$

$$\bar{\psi}_A = fH^4 \quad (18)$$

$$\bar{\psi}_K = B\bar{\sigma}_K + A\bar{\sigma}_L \quad (19)$$

$$\bar{\psi}_L = -A\bar{\sigma}_K + B\bar{\sigma}_L \quad (20)$$

这里: $D = \gamma^2 (H^2 + L^2)^2 / H^3 L^3 + \left[(b+c) \frac{H^2 + L^2}{H^2 L^3} + \frac{afH^3}{L^3} \right]^2$

$$A = \frac{g}{L} \frac{\gamma(H^2 + L^2)}{H^4 L^4 D}$$

$$B = \frac{g}{L} \left[(b+c) \frac{H^2 + L^2}{H^2 L^3} + \frac{afH^3}{L^3} \right] / D$$

$$D = \frac{HQA}{2aAQ_K} (b + faH^3)$$

对于这个系统的平衡态(15)–(20), 从表达式(9)–(14)导出 Frechét 微商, 即,

$$DF(0) = \{\partial f_i / \partial \alpha_k\} \quad (21)$$

这里 α_k 分别为 $\psi_A, \psi_K, \psi_L, \sigma_A, \sigma_K, \sigma_L$, $DF(0)$ 为一方阵。

这里 $DF(0)$ 为:

$$DF(0) = \begin{bmatrix} -\frac{\nu}{H^2} & 0 & 0 \\ \frac{a\bar{\psi}_L H}{L(H^2 + L^2)} & -\frac{\nu}{H^2 L^2} & \frac{Ha\bar{\psi}_A}{L(H^2 + L^2)} - \frac{(b+c)}{L} \\ \frac{-a\bar{\psi}_K H}{L(H^2 + L^2)} & \frac{(b+c)}{L} - \frac{Ha\bar{\psi}_A}{L(H^2 + L^2)} & -\frac{\nu}{H^2 L^2} \\ 0 & \frac{2a}{HL} \bar{\sigma}_L & -\frac{2a}{HL} \bar{\sigma}_K \\ \frac{a}{HL} \bar{\sigma}_L & 0 & \frac{S}{L} - \frac{a\bar{\sigma}_A}{HL} \\ -\frac{a}{HL} \bar{\sigma}_K & -\frac{S}{L} + \frac{a}{HL} \bar{\sigma}_A & 0 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix}
 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & \frac{gH^2L}{H^2+L^2} \\
 0 & -\frac{gH^2L}{H^2+L^2} & 0 \\
 0 & -\frac{2a}{HL}\bar{\psi}_L & \frac{2a}{HL}\bar{\psi}_K \\
 -\frac{a}{HL}\bar{\psi}_L & 0 & \frac{a\bar{\psi}_A}{HL}-\frac{b}{L} \\
 \frac{a}{HL}\bar{\psi}_K & \frac{b}{L}-\frac{a\bar{\psi}_A}{HL} & 0
 \end{bmatrix} \quad (22)$$

$$P(\xi) = \text{Det}[DF(0) - \xi I] \quad (23)$$

上述关系式是讨论平衡态稳定性的基本关系式。其中 $\xi = \xi_r + i\xi_i$, I 为单位矩阵。对某组平衡态, ξ' 为方程 $P(\xi) = 0$ 的解, 如果存在:

$$\xi_{r, \max} = M_{\alpha\beta} \{\xi_r^i\}_{i=1,6} < 0$$

则该组平衡态是稳定的, 否则是不稳定的。

下面给出一个实例。环境基本风速 U 为:

$$U = U^*z/\pi H \quad (24)$$

上式表明环境基本速度随高度呈线性分布, U^* 为 z 在 πH 高度上的速率。垂直剖面区域 $2\pi L \times \pi H$ 为 $40000 \times 1000 \text{ m}^2$, $S = 1.167 \times 10^{-5} \text{ m}^{-1}$, $\nu = 10 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, 计算平衡态。选择符合于实际的 Q_A 和 Q_K , 如图 1, 这时, 存在两个平衡态, 其中一个是不稳定的, 对于实际无意义, 故这里着重讨论稳定的平衡态。

由于这里考虑的基本风速 $U^* = 5 \text{ ms}^{-1}$ 是大于零的量且 S 大于零, 即考虑稳定大气的情形。图 2 中清楚地表明了, 在稳定大气中热岛造成的热力扰动正中心的下风方上空有明显的上升运动, 即在 $500-1000 \text{ m}$ 区域中热力扰动正中心下风方为上升运动区(图 2 中大

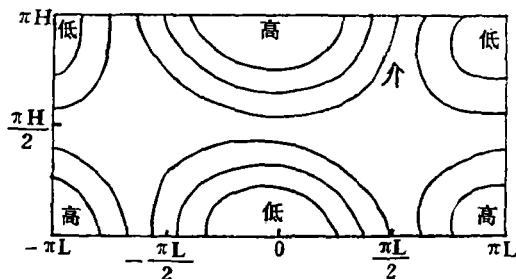


图 2 流函数 ψ 垂直剖面分布
(等值线间距为 $810 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, $\xi_{r, \max} = -0.0246$)

箭头处), 这个上升运动的环流并不是居于热力扰动中心之上, 而且偏于热力中心在它的下风方, 这是和实际观测分析得到的热岛强迫造成的局地中尺度环流相类似的, 很明显, 环境基本风速的存在对这个环流的不对称有重要作用。实际上, 由于热力作用, 城市热岛上空暖而轻的空气上升, 郊区冷空气则从四周向城市辐合。这样, 在城市近地面层便形成

辐合环流。这种环流出现在近地面的几百米气层内,再上去,空气以相反的方向从城市向郊外流出,构成城市热岛的垂直环流。

这里,之所以理论得到的结果相符合于实际观测的结果,原因在于(1)考虑了热岛造成的热力扰动的强迫源,显然,如果 Q_A 给定,通过(15)式当满足式中根号内值须大于等于零条件时,推得 $Q_x \geq \sqrt{-\frac{AH(6+f\alpha H^3)^2 Q_A}{2\alpha L(A^2+B^2)}} = Q_{xc1}$, 这说明热力扰动量必须大于某一临界的 Q_{xc1} 后,即热力扰动必须足够强(这个值实际上是够达到的),环流的平衡态才存在;(2)考虑了非线性平流的作用,从自治系统(9)–(14)中,如果 α 为零,那么平衡态就不存在;(3)环境基本风速场的存在使结果更相似于实际结果。值得注意的是,平衡态是稳定的,因此可以这样认为,这种局地中尺度环流是在热岛造成的热力扰动和 nonlinear 平流的作用下形成和维持的,同时环境基本风速修正了这个环流的空间分布。

四、极限风速的解析表达及讨论

城市热岛的形成与盛行风和天空状况有密切的关系。当风速大到一定值,由于在强通风条件下,热量很快被带走以及动力交换作用加大,因此热岛强度减弱以至消失,这个使热岛现象消失的临界风速值,即是极限风速。从表达式(15)中我们可以得到某种临界关系。显然这种基本风速和反映热岛强度的热力扰动参量 Q_x 有一定的关系,而 Q_x 又和城市的某种热力特征(包括人类社会活动、建筑物和大地覆盖特性)有关。基于这些基本考虑,来作极限风速的讨论。

从表达式(15)得到下列关系:

$$-A^4 G^2 - (A^2 + B^2) \frac{AHLQ_A}{2\alpha} \geq 0 \quad (25)$$

上述关系必须成立,才存在非线性平衡态。展开(25)式,得到极限风速表达式:

$$u_{lim} = \pm \frac{g}{(b^* + \alpha f^* H^3)} \sqrt{\frac{a}{A^* HLQ_A}} Q_x \quad (26)$$

上式已假定:

$$u = U \cdot \bar{U}(z)$$

其中 $\bar{U}(z)$ 是表征风速 u 的垂直结构的一个函数, U 是 u 在 $z = \pi H$ 的风速值。

因此,上述(26)式的参数为:

$$\begin{aligned} A^* &= \frac{g \gamma (H^2 + L^2)}{L H^4 L^4} \\ b^* &= \frac{2}{\pi H} \int_0^{\pi H} \bar{U}(z) \cos^2 \frac{z}{H} dz \\ f^* &= \frac{\sqrt{2}}{\pi H} \int_0^{\pi H} \frac{\partial^2 \bar{U}}{\partial z^2} \cos \frac{z}{H} dz \end{aligned}$$

极限风速表达式(26)表明极限风速的大小是和热岛造成的热力强度成正比,给出个例参量值,计算极限风速表达式(26)。

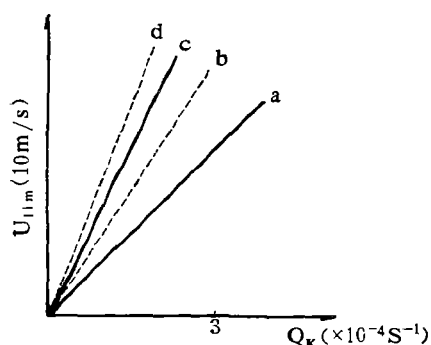


图 3 极限风速随扰动加热的分布

(a, b, c, d 分别表示当 $\bar{U}(z) = \left(\frac{z}{\pi H}\right)^n$, $n=1, 2, 3, 4$ 时的情形)

图 3 反映了极限风速在给定的基本风速廓线条件下与反映热岛强度的热力扰动参量 Q_K 成线性关系。这种关系简单地反映了城市越大, Q_K 越大, u_{11m} 也要求越大这样一种关系。

根据文献[4]中关于人口数和极限风速的资料及温差和人口数的统计关系:

$$\Delta T_{(u-r)_{\max}} = 3.06 \log P - 6.79 \quad (27)$$

从而也估计了城市与乡村温差最大值 $\Delta T_{(u-r)_{\max}}$ 所造成的热力扰动量和极限风速的关系, 发现和图 3 相类似, 资料所反映的统计关系也大致呈线性增长趋势。且图 3 中反映出基本风速廓线的形状对线性增长率有一定的影响。

五、热岛强迫造成的局地中尺度环流的动力特征的进一步讨论

特征矩阵(22)式的 $DF(0)$ 这里表为:

$$DF(0) = \begin{pmatrix} -\frac{\nu}{H^2} & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & & & \\ -\frac{a\bar{\sigma}_K}{HL} & /A \end{pmatrix} \quad (28)$$

这时, $/A$ 矩阵的元素为:

$$\begin{aligned} a_{11} &= -\nu/H^2 L^2, & a_{12} &= \frac{Ha\bar{\psi}_A}{L(H^2 + L^2)} - \frac{(b+c)}{L}, & a_{15} &= \frac{gH^2 L}{H^2 + L^2}, \\ a_{31} &= \frac{2a}{HL} \bar{\psi}_K, & a_{42} &= -\frac{2a}{HL} \bar{\sigma}_K, & a_{34} &= -\frac{2a}{HL} \bar{\psi}_L, \\ a_{35} &= \frac{2a}{HL} \bar{\psi}_K, & a_{42} &= \frac{S}{L} - \frac{a}{HL} \bar{\sigma}_A, & a_{43} &= -\frac{a}{HL} \bar{\psi}_L, \\ a_{45} &= \frac{a}{HL} \bar{\psi}_A - \frac{b}{L}, & a_{53} &= -\frac{a}{HL} \bar{\psi}_K; \end{aligned}$$

这里, 我们为考虑平衡态在热岛造成的热力扰动 Q_K 的变化过程中出现分叉的情形,

需要选择 Q_x 达到使表达式(23)为零。因此,这时候的特征多项式有下列形式:

$$\lambda^5 + \alpha_1 \lambda^4 + \alpha_2 \lambda^3 + \alpha_3 \lambda^2 + \alpha_4 \lambda + \alpha_5 = 0 \quad (29)$$

其中:

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= -2 a_{11}, \\ \alpha_2 &= a_{45}^2 - a_{34} a_{43} - a_{53} a_{35} + a_{11}^2 \\ \alpha_3 &= a_{43} a_{45} a_{35} - a_{34} a_{45} a_{53} - 2 a_{11} (a_{45}^2 - a_{43} a_{34} \\ &\quad - a_{53} a_{35}) + a_{15} (a_{32} a_{43} + a_{31} a_{53}), \\ \alpha_4 &= -2 a_{11} (a_{43} a_{45} a_{35} - a_{34} a_{45} a_{53}) + a_{11}^2 (a_{45}^2 \\ &\quad - a_{43} a_{34} - a_{53} a_{35}) + a_{15} a_{53} (a_{32} a_{45} - a_{35} a_{42}) \\ &\quad - a_{11} a_{15} a_{32} a_{43} + a_{12}^2 (a_{45}^2 - a_{43} a_{34} - a_{53} a_{35}) \\ &\quad + a_{12} a_{15} (a_{31} a_{43} - a_{42} a_{45}) - a_{16} (a_{31} a_{53} a_{11} \\ &\quad + a_{31} a_{45} a_{43} - a_{42} a_{43} a_{34} + a_{15} a_{42}^2) \\ \alpha_5 &= a_{11}^2 (a_{43} a_{45} a_{35} - a_{34} a_{45} a_{53}) - a_{11} a_{15} (a_{32} a_{45} a_{53} \\ &\quad - a_{35} a_{53} a_{42}) + a_{12}^2 (a_{43} a_{45} a_{35} - a_{34} a_{45} a_{53}) \\ &\quad + a_{12} a_{15} (a_{31} a_{54} a_{45} - a_{42} a_{43} a_{35}) + a_{16} a_{11} \\ &\quad (a_{31} a_{43} a_{45} - a_{42} a_{43} a_{34}) - a_{15}^2 (a_{32} a_{43} a_{42} - a_{31} a_{42} a_{53}) \end{aligned}$$

在给定的 Q_A 和基本风速廓线条件下,在一定的 Q_x 时,存在平衡态,其中一类平衡态为稳定,其对应的一对复特征值,在 Q_x 不断增加时,其复特征值的实部从负值变到正值,在实部为零时对应的 Q_{xc2} 为分叉点,这时 Q_{xc2} 满足下列关系:

$$\begin{aligned} &\left[\frac{(A^2 + B^2)x^2}{4 A^2 B^2 G^{*2}} \right] Q_{xc2}^4 - \left[2(A^2 + B^2)x + \frac{(A^2 + B^2)x}{AB^2} \right. \\ &\quad \left. + (A^2 + B^2) \left(x + \frac{A\gamma^3(H^2 + L^2)}{a^2 g H^6 L^5} \right) \right] Q_{xc2}^2 + (4 A^2 B^2 + A^2 \\ &\quad - 4(A^2 + B^2)A)G^{*2} = 0 \end{aligned} \quad (30)$$

这里:

$$\begin{aligned} x &= \frac{AHLQ_A}{2a} - \frac{A\gamma^3(H^2 + L^2)}{a^2 g H^6 L^5} \\ G^* &= GQ_A \end{aligned}$$

表达式(30)表明了 Q_A 和 Q_{xc2} 之间的关系,显然满足这个关系是一类曲线。在这条曲线上稳定平衡态发生分叉,分叉到周期解,这时其周期用下列公式计算:

$$T = 4\pi / \sqrt{\alpha_2 \pm \sqrt{\alpha_2^2 - 4\alpha_4}} \quad (31)$$

其中(31)式表达式的正负号必须选择使得 T 有意义。(30)、(31)两表达式表明分叉到周期解是热岛效应强迫的中尺度环流所具有的固有物理特性造成的,其周期也是由系统的固有频率决定的。这种周期解是以中尺度环流的 x 方向作水平周期振荡,这一部分的详细讨论很类似于作者和朱正心在文献[5]中讨论 200 hPa 面上副热带夏季常定的反气旋系统的准周期振荡的情形,这里不再复述。当然,这种周期性振荡还须在以后的实际观测分析中进一步证实。

上面讨论了热岛强迫下的局地中尺度环流的动力特征,并得到了有关极限风速的一个解析表达,分析表明这种局地中尺度环流是在热岛造成的热力扰动和非线性平流的作用下形成和维持的。并且极限风速的表达也简单地反映了城市热岛效应和极限风速的实

际观测分析。当然,这个模式是高度简化的,不免有所粗糙,但毕竟反映了热岛强迫下的局地中尺度环流的某些动力特征。而对于这样一类局地中尺度环流,之所以能在这样一个简单的模式中反映出较为实际的结果,主要是这个动力模式包括了热岛造成的热力扰动、非线性平流等一些本质性物理因子。这些应在以后的中尺度环流的动力研究中予以着重考虑。

参 考 文 献

- [1] Clarke, J. K., and J. T. Petersen, The effect of regional climate and land use on the nocturnal heat island, Preprint, Conf. Urban Environ. Conf. Biometeorol., 2nd., Philadelphia, pp. 147-152, Am. Meteorol. Soc. Boston, 1972.
- [2] Hershfield, D. M., An investigation into the frequency of freeze-thaw cycles, ph. D. Dissertation, Dept. of Geography, Univ. of Maryland, College Park, Md., 166 pp, 1971.
- [3] Linquist, S., Studies on the local climate in Lund and its environs, Lund studies in Geography, Ser. A., Phys. Geography, vol. 58, No.42, 79-93, 1968.
- [4] Landsberg, H. E., The urban climate, International Geophysics Series, vol. 28, 275 pp, 1981.
- [5] 李小凡、朱正心, 200hPa面上副热带夏季常定反气旋系统的形成维持和准周期振荡, 大气科学, 12, 3, 257-266, 1988.

DYNAMIC CHARACTERISTICS OF MESOSCALE CIRCULATION FORCED BY HEAT ISLAND AND AN ANALYTICAL SOLUTION OF CRITICAL VELOCITY

Li Xiaofan
(Shanghai Typhoon Institute)

Abstract

By using Boussinesq dynamic equations on two-dimensional vertical cross section, which include local heating perturbation caused by heat island, and highly truncated spectral method, a sort of stable mesoscale nonlinear equilibrium states and an analytical solution of critical velocity are obtained. It is found that local mesoscale circulation is produced by both local heating perturbation induced by heat island and nonlinear advection. Furthermore, some dynamic characteristics of local circulation forced by heat island are discussed.