

热力强迫对局地环流的扰动作用^{*1}

黄先伦 李国平

(成都信息工程学院高原大气与环境四川省高校重点实验室, 成都 610225)

摘 要

用积分变换法求解了包含地面加热作用的二维不可压缩流体的 Boussinesq 方程组, 得到一组描述地面加热作用激发的局地扰动流场的解析解, 主要有垂直风、水平扰动风、扰动气压、扰动温度。进而用动力学分析观点结合图形分析, 定性讨论了热力强迫作用对局地环流的扰动作用, 以及加热影响下各物理扰动场的空间分布及时间演变特征。

关键词: 局地环流; 热力强迫; 扰动; 解析解

引 言

局地环流是一种常见的大气运动现象, 一般由热力作用引起的局地环流^[1-2]有: 在沿海地区常见的海陆风, 在山区发生的焚风和山谷风, 以及城市热岛环流等, 研究这些环流的特征和性质对中小尺度天气分析与预报有很大帮助, 对认识局地气候特征和大气循环规律也具有重要作用。

由于引起局地环流的因子很多, 本文着重研究地面及大气加热作用影响下的风场(包括垂直风场, 水平风场, 水平风的垂直切变、水平切变)、温度场(包括水平温度梯度)、散度场和涡度场的空间结构特征及其随时间变化, 试图从动力学分析角度深化人们对局地环流形成机制和变化规律的认识, 对于深入认识热力强迫对局地环流影响, 如城市热岛环流、山谷风、海陆风、焚风、飞机颠簸^[3-7]也具有一定意义。

不少学者研究了局地产生的环流, 如曾侠等^[8]指出在广东沿海大部分气象站受热岛影响, 热岛平均强度为 0.4~0.8 °C。刘熙明等^[9]也指出在北京市夏季热岛出现时, 大气边界层逆温不仅强, 而且逆温层顶较高。刘学锋等^[10]也研究了河北省热岛与温度的关系, 指出大中城市增温趋势最为显著, 季节以冬季增温为最大。也有不少学者利用数值模拟^[11-15]的方法去研究局地环流。桑建国等^[16]也从

动力学角度分析了热岛环流, 但仅关注温度场和流场的三维结构。为了说明局地环流特征, 本文从理论上进一步研究热力强迫对局地环流的影响。

1 数学模型及其解析分析

为使问题的数学分析不致变得过于复杂, 本文没有考虑基本气流的影响, 但分别考虑了热力强迫的两种加热方式, 第一种为地面加热型(可代表地面感热加热); 第二种为高空加热型(可代表大气中的凝结潜热加热)。适合研究局地环流这种小尺度(可忽略地球旋转效应)扰动现象的二维不可压缩流体的 Boussinesq 方程组可以写为:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} = b \quad (2)$$

$$\frac{\partial b}{\partial t} + \omega N^2 = Q \quad (3)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial \omega}{\partial z} = 0 \quad (4)$$

为简单计, 式中表示各扰动量的右上标“'”已略去, 即 u 为纬向风扰动, ω 为垂直风扰动, p 为气压扰动, b 为浮力 ($b = \frac{g\theta'}{\theta_0}$), 又称约化重力 (reduced gravity)。 N 为浮力频率 (Brunt-vasala 频率), $Q = gQ_m / c_p T$ 为地面热力强迫项 (Q_m 为加热率), ρ 为密度(设

* 国家重点基础研究发展计划项目(2004CB418302)资助。

2007-06-27 收到, 2007-12-29 收到再改稿。

为常数,即 $\rho = \rho_0$), 初始扰动场均为零。考虑到地面加热引起的气流扰动形式的复杂性(可能是非谐波型), 本文采用 Nicholls 等^[17] 提出的积分变换法来求该方程组的解析解。

由式(1)和式(4)得:

$$\frac{\partial^2 w}{\partial t \partial z} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} \quad (5)$$

又由式(2)和式(3)得:

$$w = \frac{Q}{N^2} - \frac{1}{N^2} \frac{\partial b}{\partial t} \quad (6)$$

将式(6)代入式(5)经整理得:

$$\frac{\partial^2}{\partial t^2} p_{zz} + N^2 p_{xx} = \frac{\partial^2 (\rho Q)}{\partial t \partial z} \quad (7)$$

1.1 地面加热的扰动作用

考虑地面加热(地面感热)的空间分布特点, 设其具有如下的形式:

$$Q = Q_0 \left(\frac{a^2}{x^2 + a^2} \right) \cos(hz) \quad (8)$$

式(8)中, Q_0 为地面热源的强度, a 为加热区域的半径, $(h) = n\pi/H$ 为 $z=0$ 到 $z=H$ 高度间的垂直波数, 加热率 $Q_{m0} = Q_0 c_p T/g$, 单位: $J \cdot kg^{-1} \cdot s^{-1}$ 。

由于所取的加热形式与时间无关, 所以式(7)右端为 0 并可简化为:

$$\frac{\partial^2}{\partial t^2} p_{zz} + N^2 p_{xx} = 0 \quad (9)$$

对式(9)先取 Laplace(以下简称拉氏)积分变换

($L[f(t)] = \int_0^{+\infty} f(t) e^{-st} dt$) 有:

$$\int_0^{+\infty} \frac{\partial^2}{\partial t^2} p_{zz} e^{-st} dt + N^2 \int_0^{+\infty} \frac{\partial^2}{\partial x^2} p e^{-st} dt = 0 \quad (10)$$

利用拉氏积分变换性质有:

$$\int_0^{+\infty} \frac{\partial^2}{\partial t^2} p_{zz} e^{-st} dt = s^2 L(p_{zz}) - s p_{zz}(t=0) - \frac{\partial}{\partial t} p_{zz}(t=0) \quad (11)$$

当 $t=0$ 时, $\frac{\partial^2 p}{\partial z^2} = 0$, 则式(11)可以变为:

$$\int_0^{+\infty} \frac{\partial^2}{\partial t^2} p_{zz} e^{-st} dt = s^2 L(p_{zz}) - \frac{\partial}{\partial t} p_{zz}(t=0) \quad (12)$$

再取 Fourier(以下简称傅氏)积分变换($F(\cdot) =$

$$\frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{+\infty} f(\cdot) e^{ikx} dx$$
 并记 $F(\cdot) = (\sim)$; $F[L(\cdot)] =$

$(\hat{\cdot})$, 即“ \sim ”表示该量取傅氏积分变换, “ $\hat{\cdot}$ ”表示该量取拉氏积分变换后再取傅氏积分变换。利用

傅氏积分变换性质有:

$$\frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} N^2 \frac{\partial^2}{\partial x^2} L(p) e^{ikx} dx = i^2 N^2 k^2 \hat{p} = -k^2 N^2 \hat{p} \quad (13)$$

则式(10)可以变为:

$$s^2 \hat{p}_{zz} - \frac{\partial}{\partial t} \hat{p}_{zz}(t=0) - k^2 N^2 \hat{p} = 0 \quad (14)$$

当 $t=0$ 时, 有:

$$\frac{\partial}{\partial t} p_{zz} = \rho \frac{\partial Q}{\partial z} \quad (15)$$

将式(8)代入式(15)得:

$$\frac{\partial}{\partial t} p_{zz}(t=0) = -\rho Q_0 (h) \left(\frac{a^2}{x^2 + a^2} \right) \sin(hz) \quad (16)$$

再取傅氏变换得:

$$\frac{\partial}{\partial t} \hat{p}_{zz}(t=0) = -\sqrt{\pi/2} \rho Q_0 (h) \sin(hz) a e^{-ka} \quad (17)$$

所以, 式(14)可以变为:

$$\hat{p}_{zz} - \frac{k^2 N^2}{s^2} \hat{p} = \frac{-\sqrt{\pi/2} \rho Q_0 (h) \sin(hz) a e^{-ka}}{s^2} \quad (18)$$

解此微分方程, 可得通解:

$$\hat{p} = c_1 e^{kz} + c_2 e^{-kz} + A \sin(hz) \quad (19)$$

取刚壁条件, 可求得:

$$\hat{p} = \frac{\sqrt{\pi/2} \rho Q_0 a e^{-ka}}{(h)(s^2 + k^2 N^2 / (h)^2)} \sin(hz) \quad (20)$$

再取拉氏逆变换有:

$$\hat{p} = \frac{\sqrt{\pi/2} \rho Q_0 a e^{-ka}}{kN} \cdot \sin(hz) \cdot \sin\left(\frac{kN}{h} \cdot t\right) \quad (21)$$

对式(21)再取傅氏逆变换($F^{-1}(\cdot) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty}$

$(\cdot) e^{-ikx} dk$), 即求得扰动气压场:

$$p = \frac{\rho Q_0 a \sin(hz)}{2N} \left(\arctan \frac{Nt/(h) - x}{a} + \arctan \frac{Nt/(h) + x}{a} \right) \quad (22)$$

将式(22)代入式(1)~(4)中, 可得浮力场:

$$b = \frac{(h) Q_0 a \cos(hz)}{2N} \left(\arctan \frac{Nt/(h) - x}{a} + \arctan \frac{Nt/(h) + x}{a} \right) \quad (23)$$

扰动位温场:

$$\theta = \frac{(h) \theta_0 Q_0 a \cos(hz)}{2gN} \left(\arctan \frac{Nt/(h) - x}{a} + \right.$$

$$\arctan \frac{Nt/(h) + x}{a} \quad (24)$$

垂直扰动风场:

$$w = \frac{Q_0}{N^2} \cos((h)z) \left\{ \frac{a^2}{x^2 + a^2} - \frac{1}{2} \left[\frac{1}{1 + (\frac{Nt/(h) - x}{a})^2} + \frac{1}{1 + (\frac{Nt/(h) + x}{a})^2} \right] \right\} \quad (25)$$

水平扰动风场:

$$u = -\frac{Q_0 a(h) \sin((h)z)}{2N^2} \left(\arctan \frac{Nt/(h) + x}{a} - \arctan \frac{Nt/(h) - x}{a} - 2 \arctan \frac{x}{a} \right) \quad (26)$$

进一步,可求出风的垂直切变场:

$$\frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{Q_0 a(h)^2}{2N^2} \cos((h)z) \cdot \left(\arctan \frac{Nt/(h) + x}{a} - \arctan \frac{Nt/(h) - x}{a} - 2 \arctan \frac{x}{a} \right) \quad (27)$$

水平散度场:

$$D = -\frac{Q_0(h)}{2N^2} \sin((h)z) \cdot \left[\frac{1}{1 + (\frac{Nt/(h) + x}{a})^2} + \frac{1}{1 + (\frac{Nt/(h) - x}{a})^2} - \frac{2}{1 + (\frac{x}{a})^2} \right] \quad (28)$$

以及经向水平涡度(即垂直于纬向剖面的涡度分量)场:

$$\eta = \frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial x} = \frac{Q_0 \cos((h)z)}{N^2} \left\{ \frac{a(h)^2}{2} \left(\arctan \frac{Nt/(h) - x}{a} - \arctan \frac{Nt/(h) + x}{a} + 2 \arctan \frac{x}{a} \right) + \left\{ \frac{2a^2 x}{(x^2 + a^2)^2} + \frac{1}{a^2} \cdot \left[\frac{Nt/(h) - x}{[1 + (\frac{Nt/(h) - x}{a})^2]^2} - \frac{Nt/(h) + x}{[1 + (\frac{Nt/(h) + x}{a})^2]^2} \right] \right\} \right\} \quad (29)$$

1.2 高空加热的扰动作用

考虑到高空大气加热(相当于潜热加热)的空间分布特点,设其形式为:

$$Q = Q_0 \left(\frac{a^2}{x^2 + a^2} \right) [1 - \cos((h)z)] \quad (30)$$

采用与 1.1 节类似的数学推导过程,可从 Boussinesq 方程组求得高空加热强迫下的扰动流场的解析解,其气压场、浮力场、位温场、垂直风场、水平风场、风的垂直切变场、水平散度场和水平涡度场分别为:

$$p = -\frac{Q_0 a \sin((h)z)}{2N} \left(\arctan \frac{Nt/(h) - x}{a} + \right.$$

$$\left. \arctan \frac{Nt/(h) + x}{a} \right) \quad (31)$$

$$b = -\frac{(h)Q_0 a \cos((h)z)}{2N} \left(\arctan \frac{Nt/(h) - x}{a} + \arctan \frac{Nt/(h) + x}{a} \right) \quad (32)$$

$$\theta = -\frac{(h)\theta_0 Q_0 a \cos((h)z)}{2gN} \left(\arctan \frac{Nt/(h) - x}{a} + \arctan \frac{Nt/(h) + x}{a} \right) \quad (33)$$

$$w = \frac{Q_0}{N^2} \left\{ [1 - \cos((h)z)] \frac{a^2}{x^2 + a^2} - \frac{\cos((h)z)}{2} \cdot \left[\frac{1}{1 + (\frac{Nt/(h) - x}{a})^2} + \frac{1}{1 + (\frac{Nt/(h) + x}{a})^2} \right] \right\} \quad (34)$$

$$u = \frac{Q_0 a(h) \sin((h)z)}{2N^2} \left(\arctan \frac{Nt/(h) + x}{a} - \arctan \frac{Nt/(h) - x}{a} - 2 \arctan \frac{x}{a} \right) \quad (35)$$

$$\frac{\partial u}{\partial z} = \frac{Q_0 a(h)^2}{2N^2} \cos((h)z) \cdot \left(\arctan \frac{Nt/(h) + x}{a} - \arctan \frac{Nt/(h) - x}{a} - 2 \arctan \frac{x}{a} \right) \quad (36)$$

$$D = \frac{Q_0(h)}{2N^2} \sin((h)z) \cdot \left[\frac{1}{1 + (\frac{Nt/(h) + x}{a})^2} + \frac{1}{1 + (\frac{Nt/(h) - x}{a})^2} - \frac{2}{1 + (\frac{x}{a})^2} \right] \quad (37)$$

$$\eta = \frac{Q_0}{N^2} \left\{ \frac{a(h)^2 \cos((h)z)}{2} \left(\arctan \frac{Nt/(h) + x}{a} - \arctan \frac{Nt/(h) - x}{a} - 2 \arctan \frac{x}{a} \right) + \left\{ \frac{2a^2 x}{(x^2 + a^2)^2} [1 - \cos((h)z)] - \frac{\cos((h)z)}{a^2} \cdot \left[\frac{Nt/(h) - x}{[1 + (\frac{Nt/(h) - x}{a})^2]^2} + \frac{Nt/(h) + x}{[1 + (\frac{Nt/(h) + x}{a})^2]^2} \right] \right\} \right\} \quad (38)$$

2 分析和讨论

2.1 地面加热

对在地面加热作用下的扰动流场的解析式(22)~(29)进行动力学定性分析,可以得出以下几点认识:

① 各扰动物理量场的强度与地面加热的大小成正比,即地面热力强迫作用越强,扰动越明显。另外在层结稳定条件下,扰动强度与层结稳定度成反比。

② 与地面加热影响随高度减小的规律一致,扰动温度场和垂直风场的强度也随高度减小。但值得注意的是,扰动水平风场的幅度却随高度增大,即水平风速的变化(水平风切变)在高空反映得更为明显。

③ 根据扰动流场解式(24)~(26),在固定高度、固定时间的条件下,地面非均匀加热作用将使扰动温度场在水平方向(东西方向)呈现出非均匀分布的状态,有利于产生水平温度梯度或者水平切变(图 1a 中的 θ 曲线)。地面加热作用激发的垂直运动在加热中心表现为较强的上升气流,上升区两侧为弱的补偿性下沉气流(图 1a 中的 w 曲线)。在加热中心西侧,地面加热将使水平风加强,而东侧会使水平风减弱(图 1a 中 u 曲线)。因此,地面加热会产生明显的水平温度切变和水平风切变,在加热中心表现最为明显,而且加热中心伴随上升运动,加热中心两侧伴随下沉运动。这些变化有利于产生和加强局地环流,而且局地环流的强度和区域强烈地依赖地面加热的强度和半径。地面加热强度越强,加热半径越小,局地环流强度越强;反之,局地环流的强度就越弱。

④ 时间演变方面,在固定高度的下风区域,地面加热产生的温度扰动随时间迅速增大,最后趋于稳定(图 1b 中的 θ 曲线);垂直速度随时间先是减小,甚至可以变成下沉运动,然后又逐渐增大,最后

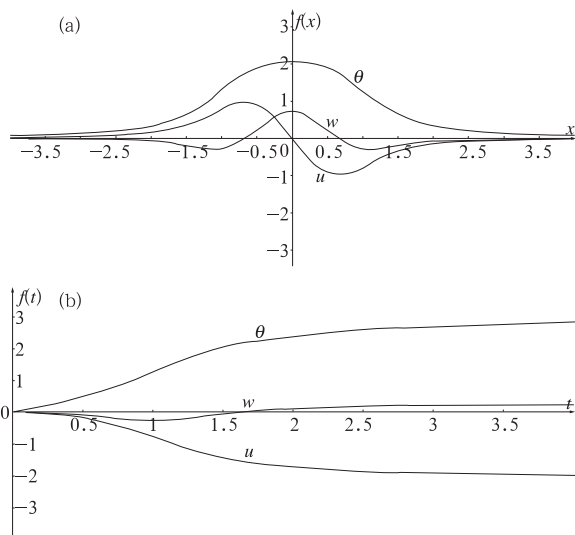


图 1 地面加热引起的温度扰动场 θ 、垂直风场 w 、水平风 u 扰动场水平分布(a)和随时间变化(b)
Fig. 1 Horizontal distribution (a) and time variation (b) of temperature disturbance θ , vertical wind disturbance w and horizontal wind disturbance u affected by surface heating

也趋于稳定(图 1b 中的 w 曲线);水平风随时间开始减小比较缓慢,然后迅速减小,最后趋于稳定(图 1b 中的 u 曲线)。因此,地面加热产生的扰动具有突发性和短时性,由此产生的局地环流也具有突发性和短时性,反映出中小尺度运动的典型特征。

⑤ 根据式(27),由图 2 可分析水平扰动风场的垂直切变在水平方向的变化以及随时间的变化。与水平扰动风场的变化一致,在加热中心区域的西侧,水平风的垂直切变最大;而在东侧垂直切变逐渐减弱。而水平风的垂直切变开始随时间减小较快,而后趋向于稳定,这表明水平风的垂直切变也有明显的突发性和短时性。

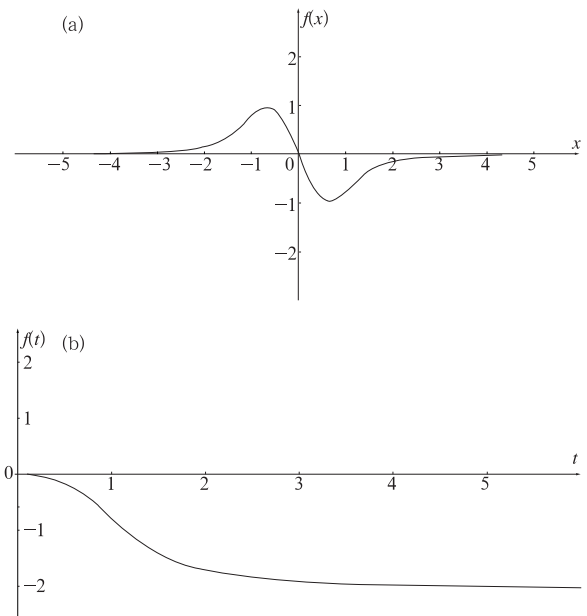


图 2 地面加热引起的水平风垂直切变水平分布(a)和随时间变化(b)
Fig. 2 Horizontal distribution (a) and time variation (b) of vertical shear in horizontal wind affected by surface heating

⑥ 根据式(28),可分析水平散度在水平方向的变化(图 3a)和随时间的变化(图 3b)在加热区域的西侧,散度逐渐增大,达到一个峰值,再逐渐减小,在加热区域中心达到最小值(负值),然后再增大,又达到一个峰值,最后逐渐减小,趋向于零。在加热区域中心,散度小于零,为辐合,对应图 3a 上升运动;而在加热区域中心的两侧散度大于零,为辐散,对应图 1a 下沉运动,即水平散度分布与前述的垂直运动是一致的。而水平散度随时间逐渐增大,到达峰值后再减小,最后趋于稳定。

⑦ 根据式(29),可讨论水平涡度的水平变化(图4a)和随时间的变化(图4b)。涡度在加热区域中心的西侧为逐渐减小,在加热区域的东侧有增强

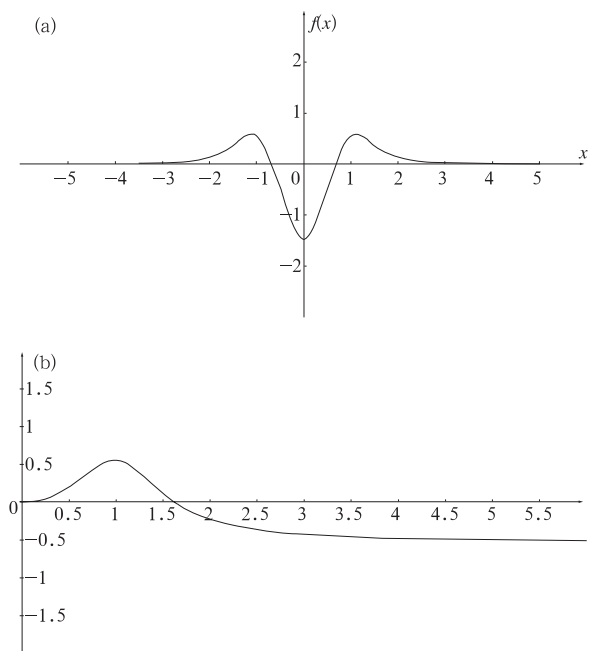


图3 地面加热引起的水平散度水平分布(a)和随时间的变化(b)

Fig. 3 Horizontal distribution (a) and time variation (b) of horizontal divergence affected by surface heating

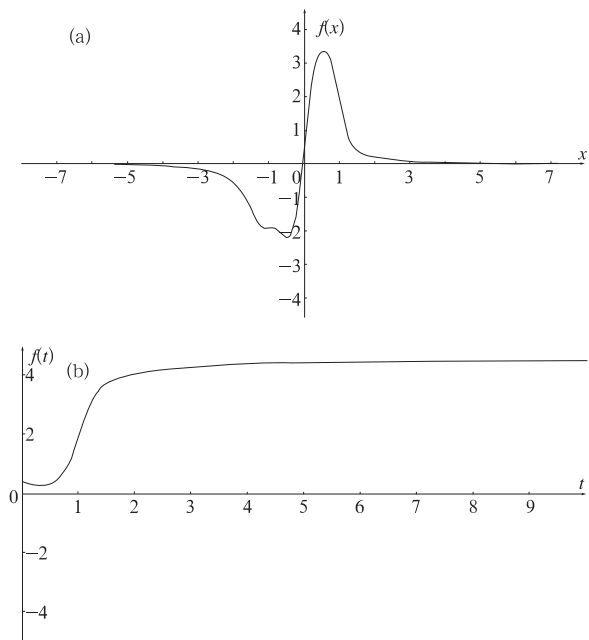


图4 地面加热引起的水平涡度水平分布(a)和随时间变化(b)

Fig. 4 Horizontal distribution (a) and time variation (b) of horizontal vorticity affected by surface heating

的现象,由于此涡度表示的是 $z-x$ 平面上的旋转情况,运动旋转方向按右手法则决定的方向如果与 y 轴正向相同,则为正涡度,否则为负涡度,所以加热中心伴随上升运动,加热中心的两侧伴随下沉运动,与图1a分析的垂直运动分布是一致的。而此水平涡度随时间的变化趋势为:涡度在开始有一个微弱的减小,而后就迅速增大,最后趋向于稳定。

2.2 高空加热

根据式(33)~(35),在固定高度和时间条件下,大气加热作用也使各扰动场在水平方向上呈现不均匀分布,这有利于产生水平温度梯度或者水平温度切变(图5中的 θ 曲线)。同样,大气加热激发的垂直运动在加热区域中心为上升运动,在两侧为下沉运动(图5中的 w 曲线)。而在加热的西侧,加热作用使水平风减弱,在东侧,水平风增强(图5中的 u 曲线),产生风的水平切变。

根据式(36),分析水平风的垂直切变的水平分布(图6)和随时间的变化(图略)。可以看出,水平风扰动的垂直切变的水平分布和水平风扰动一样,在加热的西侧均为减弱,在东侧均为增强。而水平

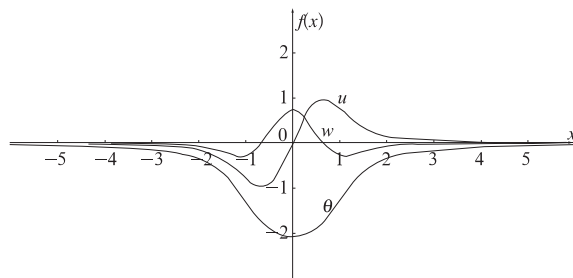


图5 高空加热引起的温度扰动场 θ 、垂直风场 w 、水平风 u 扰动场水平分布

Fig. 5 Horizontal disturbance distribution of temperature θ , vertical wind w and horizontal wind u affected by atmospheric heating

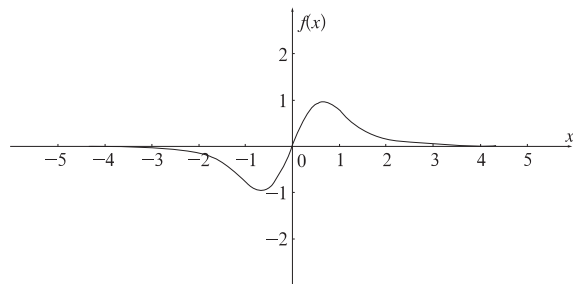


图6 高空加热引起的水平风垂直切变水平分布
Fig. 6 Horizontal distribution of vertical shear in horizontal wind affected by atmospheric heating

风的垂直切变随时间迅速增大,然后趋于稳定。所以水平风的垂直切变也具有明显的突发性和短时性。

根据式(37),分析散度在水平方向的分布(图7)和随时间的分布(图略)。可看出在加热中心为正散度,两侧为负散度,表明在加热中心为辐散,伴随下沉运动,两侧辐合,为上升运动。在时间变化方面,散度先随时间减小,然后逐渐增大,最后趋于稳定。

根据式(38)可分析水平涡度在水平方向的变化(图8)和随时间的变化(图略)。涡度在加热区域中心两侧为明显不对称性,在加热区域中心的西侧,涡度先缓慢增大,再比较快地减小,然后再增大,再减小,最后趋向于零,即呈现波动状变化。涡度是在 $x-z$ 平面上的,所以在加热区域的两侧,气流都是顺时针旋转。在时间变化方面,涡度先有微弱的增大,然后减小,最后趋于稳定。

由此可见,地面加热和高空大气加热下的水平风扰动、水平风的垂直切变和水平散度的变化分布正好相反。

综合以上各项讨论,通过一个比较简单的物理模型,对加热强迫作用通过产生温度梯度,进而改变

风场结构和局地环流的物理适应过程进行了理论分析,初步得出以下的物理概念图像:地面加热不均匀产生温度水平梯度,改变风场结构产生散度、涡度和风垂直切变。由于在加热中心有气流的辐合而引发上升运动,有利于在高空产生凝结潜热释放;而高空大气加热下的水平风扰动、水平风的垂直切变和水平散度的变化分布与地面加热的情形正好相反,则形成两个以地面—高空加热为中心轴左右对称的局地垂直环流圈。

3 结论和讨论

1) 热力强迫,无论是地面加热还是高空大气加热,各扰动物理量场的强度与热力的大小成正比,即热力强迫作用越强,扰动越明显,在层结稳定的条件下,扰动强度与层结稳定度成反比。

2) 在固定高度、固定时间的条件下,地面非均匀加热作用将使扰动温度场在水平方向(东西方向)呈不均匀分布,有利于产生水平温度梯度或者风的水平切变。在加热区域的中心为上升运动,两侧为下沉运动。

3) 地面加热和高空大气加热下的水平风扰动、水平风的垂直切变和水平散度的变化分布正好相反。

4) 水平涡度的分布:在地面加热作用下,在加热区域的西侧为负涡度,在东侧为正涡度;而在大气加热作用下,在加热区域的两侧,都是负涡度。两类加热强迫下,水平涡度随时间变化的趋势也是相反的。

地面加热作用和大气加热作用可使大气中的水平风场、垂直风场和温度场产生扰动,这些扰动及其变化对局地环流有重要作用。作为初步研究,本文定性分析了地面加热和大气加热作用下的风场(包括垂直风场、水平风场、水平风的垂直切变和水平切变)、温度场(包括水平温度梯度)、水平散度场和水平涡度场的空间结构特征及其随时间的变化。从动力学分析的角度深化了人们对局地环流形成机制和变化规律的认识。由于局地环流的复杂性,上述动力学分析还显得较为简单,很有必要开展进一步的数值模拟试验加以完善,如研究地面加热和大气加热作用下风场和温度场的空间分布和时间变化对于局地环流的定量性影响,考虑基本气流的影响和密度扰动的影响等。

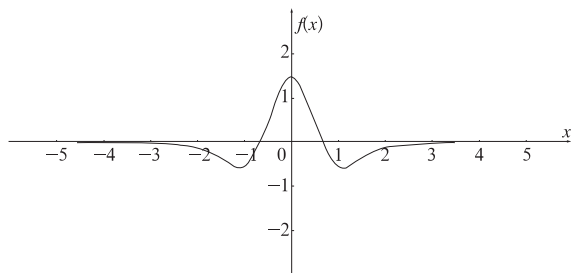


图7 高空加热引起的水平散度水平分布
Fig. 7 Horizontal distribution of horizontal divergence affected by atmospheric heating

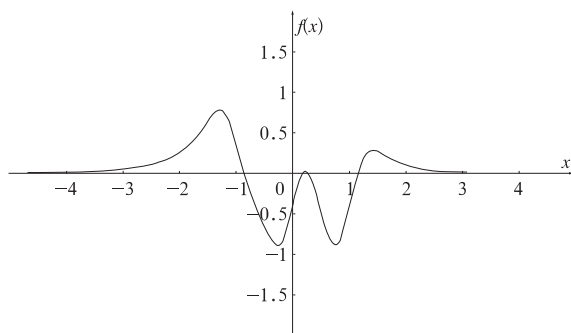


图8 高空加热引起的水平涡度水平分布
Fig. 8 Horizontal distribution of horizontal vorticity affected by atmospheric heating

参考文献

- [1] 陆汉城. 中尺度天气原理和预报. 北京:气象出版社, 2004: 97-102.
- [2] 黄润本, 黄伟峰. 气象学与气候学. 北京:高等教育出版社, 1996: 115-117.
- [3] 邹波. 地面加热对飞机颠簸影响的动力学初步分析. 南京气象学院学报, 2004, 27(4): 527-531.
- [4] 李子良, 陈会芝. 飞机颠簸的气象条件分析. 四川气象, 1999, 19(2): 22-23.
- [5] 陈华利. 飞机颠簸的预报. 四川气象, 1999, 19(3): 32-33.
- [6] 王永忠. 利用风资料判断飞机颠簸的一种方法. 成都气象学院学报, 1999, 14(4): 336-341.
- [7] 王永忠, 朱伟军. 边界层急流型重力波——飞机颠簸的一种形成机制. 南京气象学院学报, 2001, 24(3): 429-432.
- [8] 曾侠, 钱光明, 陈特固, 等. 广东沿海城市热岛特征分析. 气象, 2006, 32(11): 94-97.
- [9] 刘熙明, 胡非, 李磊. 北京市夏季城市热岛特征及其近地层气象场分析. 中国科学院研究生院学报, 2006, 23(1): 70-76.
- [10] 刘学锋, 于长文, 任国玉. 河北省城市热岛强度变化对区域地表平均气温序列的影响. 气候与环境研究, 2005, 10(4): 763-770.
- [11] 仲跻芹, 张朝林, 范冰勇. 北京稳定天气条件下城市边界层环流特征数值研究. 气象科技, 2005, 33(6): 481-486.
- [12] 鞠丽霞, 王勤耕, 张美根, 等. 济南市城市热岛和山谷风环流的模拟研究. 气候与环境研究, 2003, 8(4): 465-474.
- [13] 佟华, 陈仲良, 桑建国. 城市边界层数值模式研究以及在香地区复杂地形下的应用. 大气科学, 2004, 28(6): 957-978.
- [14] 王雪梅. 广州地区局地环流的数值模拟. 高原气象, 2003, 22(2): 198-201.
- [15] 杜世勇, 田勇, 谭晓哲, 等. 济南市局地环流数值预报实验研究. 中国环境监测, 2002, 18(6): 34-37.
- [16] 桑建国, 张治坤, 张伯寅. 热岛环流的动力学分析. 气象学报, 2000, 58(3): 321-327.
- [17] Nicholls M E, Piecke R A, Cotton W R. Thermally forced gravity waves in an atmosphere at rest. *J Atmos Sci*, 1991, 48(16): 1869-1884.

Effects of Thermal Forcing on the Local Circulation

Huang Xianlun Li Guoping

(Center for Plateau Atmosphere and Environment Research,
Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225)

Abstract

Many factors have impact on local circulation such as surface friction, topography, thermal forcing and so on. Attentions are paid to the spatial and temporal variation of wind, temperature, divergence and vorticity which is at the bottom of thermal forcing. Thermal forcing has effect on surface and atmosphere. In order to conduct research on the effects of thermal forcing on local circulation, based on the two dimension Bossinesq equations of mesoscale incompressible atmospheric motion including surface heating, a set of perturbation solutions that mainly including perturbations of vertical motion, horizontal motion, pressure and temperature forced by surface heating is obtained. Then the perturbation effects on the local circulation forced by thermal heating, and temporal and spatial variations of the perturbation fields are qualitatively discussed by using dynamics method. The main conclusions are as follows: The intensity of moment turbulence is positive correlation with the thermal forcing, but in stable stratification, it is negative to stability parameter. Under the condition of fixed altitude and time, differential surface heating is beneficial to the formation of horizontal gradient of temperature or horizontal shear of wind, there is ascending motion in the heating center and sinking motion in both sides of heating center. The horizontal wind disturbance, distribution of vertical wind shear and variation of horizontal divergence resulted from surface heating are opposite to those from atmospheric heating. The distribution of horizontal vorticity is caused by surface heating, there is negative vorticity in the west side of heating center and positive in the east side. But for atmospheric heating, there is negative vorticity in both sides of heating center. The variation

tendency of horizontal vorticity with time is opposite in the two kinds of heating. A simple physical model can be concluded by researching and analyzing. The horizontal gradient of temperature can be caused by the uneven heating of surface and the structure of wind can be changed, by which divergence, vorticity and vertical shear of wind can be caused. Because of the ascending motion caused by convergence of airflow in the center of heating, it is beneficial to releasing latent heat of condensation in atmosphere. The horizontal wind disturbance, distribution of vertical wind shear and variation of horizontal divergence resulted from atmospheric heating are opposite to those from surface heating. And two symmetry local vertical circulation cells are formed which are the central axes of surface-atmospheric heating. The results not only strengthen people's understanding of the mechanism and the rule of local circulation, but also hold the theoretical significance leading to many local circulation problems (such as urban heat island, valley breeze, land and sea breeze and air turbulence) and the influences of thermal forcing on these local circulations.

Key words: local circulation; thermal forcing; perturbation; analytical solution

~~~~~

## 欢迎订阅《应用气象学报》

《应用气象学报》是由中国气象科学研究院、国家气象中心、国家卫星气象中心、国家气候中心、国家气象信息中心和中国气象局大气探测技术中心联合主办的大气科学理论与应用研究的综合性学术期刊。《应用气象学报》将向您提供有关我国大气科学领域内研究和应用成果的最新论文、资料、方法等大量信息,内容包括气象预报、卫星气象、农业气象、海洋气象、航空气象、环境气象、人工影响天气、应用气象、大气探测、遥感技术以及计算机应用技术等学科;还向您介绍国内外现代科技的最新理论与新技术在大气科学中应用的研究论文及信息。主要栏目有论著、短论、综合评述、业务系统、学术论坛、研究简报、书刊评介等。本刊被《中文核心要目总览》确认为大气科学(气象学)类核心期刊,并已首批入选“中国科学引文数据库”(CSCD),中国科学技术期刊文摘(CSTA)国家数据库(英文版)收录的刊源名单,并被美国气象学会“气象与地球天体物理学文摘”(MGA)和美国国际科学应用协会(SAIC)以及中国科学文摘(英文版)等多种文摘摘录。本刊还首批入选“中国学术期刊(光盘版)”、“万方数据——数字化期刊群”和“中文科技期刊数据库”。《应用气象学报》面向广大的气象科研、业务技术人员、在校有关专业的研究生、大专院校师生等专业人员。

《应用气象学报》为双月刊,逢双月出版,可以随时汇款订阅或购买(户名:中国气象科学研究院,账号:11001028600056086013,开户行:建行北京白石桥支行)。2008年6期(每期定价30.00元),总订价180.00元(含邮资)。

订阅地址:北京市中关村南大街46号中国气象科学研究院《应用气象学报》编辑部;邮政编码:100081。

联系电话:(010) 68407086,68408638。E-mail地址:yyqxxb@cams.cma.gov.cn,yyqxxb@163.com。