

# 城市发展对夜间海陆风环流 影响的预测模拟\*

张雷鸣 苗曼倩\*\* 洪钟祥 周乐义 李 军

(中国科学院大气物理研究所大气边界层物理和大气化学国家重点实验室, 北京 100029)

## 提 要

本文利用一个三维中尺度模式模拟了长江三角洲地区的海陆风环流状况, 以及城市发展后动力热力效应对环流的影响, 其中热力效应主要考虑了城乡反照率的差别, 模式考虑了海陆温差、通量传输、太阳辐射、科里奥利效应等因子。模拟结果得到了长江三角洲地区的夜间垂直环流状况, 辐散辐合带分布, 预测了城市发展后的环流情形, 为大气扩散评价以及城市建设规划提供了一定的依据。

**关键词:** 长江三角洲; 城市发展; 环流预测。

## 一、引 言

随着现代工业的高速发展, 城市建设的迅速扩大, 大气污染现象愈来愈严重, 研究污染物能否迅速扩散到离人口密集区很远的地方历来是一个十分重要的问题。长江三角洲是我国工业发达及人口十分密集的地区, 大气污染物的扩散传输与海陆风环流密切相关, 研究长江三角洲城市发展后的环流变化趋势, 对该地区的大气扩散评价及城市规划建设是很有帮助的。关于海陆风研究已有许多工作, Estoque<sup>[1]</sup>最早用二维模式进行了数值模拟, Alpert 等<sup>[2]</sup>也曾做过二维数值模拟, Pielke<sup>[3]</sup>、Warner<sup>[4]</sup>、金浩等<sup>[5]</sup>也进行了三维模拟。除此之外, Neumann<sup>[6]</sup>、Sun 和 Orlanski 等<sup>[7]</sup>曾对海风进行了分析研究。上述研究成果表明用三维模式对海陆风进行模拟是必要的, 并且由于中尺度的观测资料的匮乏, 数值模拟就更不可缺少。

本文利用张雷鸣、赵鸣<sup>[8]</sup>的三维模式, 对长江三角洲地区的海陆风环流进行了模拟, 并模拟了城市发展(水平范围扩大, 粗糙度亦加大)后的环流情形。一些特征值是采用上海地区的常规气象资料, 对长江、崇明岛亦进行了水、陆网格化。

1993年3月24日收到, 4月27日收到修改稿。

\* 国家自然科学基金项目。

\*\* 南京大学大气科学系。

## 二、模式简介

### 1. 基本方程组

地形坐标系下的基本方程组为

$$\begin{aligned} \frac{du}{dt} = & f_v - f_{v_q} - \theta \frac{\partial \pi}{\partial x} + g \frac{z^* - \bar{s}}{\bar{s}} \frac{\partial z_G}{\partial x} - g \frac{z^*}{\bar{s}} \frac{\partial s}{\partial x} + \left( \frac{\bar{s}}{s - z_G} \right)^2 \frac{\partial}{\partial z^*} \left( K_x^m \frac{\partial u}{\partial z^*} \right) \\ & + \frac{\partial}{\partial x} \left( K_H \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_H \frac{\partial u}{\partial y} \right), \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{dv}{dt} = & -fu + fu_q - \theta \frac{\partial \pi}{\partial y} + g \frac{z^* - \bar{s}}{\bar{s}} \frac{\partial z_G}{\partial y} - g \frac{z^*}{\bar{s}} \frac{\partial s}{\partial y} + \left( \frac{\bar{s}}{s - z_G} \right)^2 \frac{\partial}{\partial z^*} \left( K_y^m \frac{\partial v}{\partial z^*} \right) \\ & + \frac{\partial}{\partial x} \left( K_H \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_H \frac{\partial v}{\partial y} \right), \end{aligned} \quad (2)$$

$$\frac{d\theta}{dt} = \left( \frac{\bar{s}}{s - z_G} \right)^2 \frac{\partial}{\partial z^*} \left( K_t^{\theta} \frac{\partial \theta}{\partial z^*} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( K_H \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_H \frac{\partial \theta}{\partial y} \right), \quad (3)$$

$$\frac{dq}{dt} = \left( \frac{\bar{s}}{s - z_G} \right)^2 \frac{\partial}{\partial z^*} \left( K_x^q \frac{\partial q}{\partial z^*} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( K_H \frac{\partial q}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_H \frac{\partial q}{\partial y} \right), \quad (4)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w^*}{\partial z^*} - \frac{1}{s - z_G} \left( u \frac{\partial z_G}{\partial x} + v \frac{\partial z_G}{\partial y} \right) - \frac{1}{s - z_G} \left( \frac{\partial s}{\partial t} + u \frac{\partial s}{\partial x} + v \frac{\partial s}{\partial y} \right) = 0, \quad (5)$$

$$\frac{\partial \pi}{\partial z^*} = -\frac{s - z_G}{\bar{s}} \frac{g}{\theta}, \quad (6)$$

这里

$$\pi = C_p \left( \frac{P}{P_0} \right)^{R/c},$$

$$w^* = \frac{\bar{s}}{s - z_G} w - \frac{z^*}{s - z_G} \left( \frac{\partial s}{\partial t} + u \frac{\partial s}{\partial x} + v \frac{\partial s}{\partial y} \right) + \frac{z^* - \bar{s}}{s - z_G} \left( u \frac{\partial z_G}{\partial x} + v \frac{\partial z_G}{\partial y} \right),$$

$$\frac{d}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + u \frac{\partial}{\partial x} + v \frac{\partial}{\partial y} + w^* \frac{\partial}{\partial z^*}.$$

物质面  $s$  的预报方程可以从连续方程得到, 从  $z^* = 0$  至  $z^* = s$  积分, 上下边界处假设  $w^* = 0$ ,

$$\frac{\partial s}{\partial t} = -\frac{1}{s} \int_0^s \left\{ \frac{\partial}{\partial x} [u(s - z_G)] + \frac{\partial}{\partial y} [v(s - z_G)] \right\} dz^*. \quad (7)$$

### 2. 边界及初始条件

侧边界条件取无梯度边界条件。

下边界条件  $u = v = w^* = 0$ , 陆面温度由辐射平衡确定, 海面温度由于海水的半透明性及大热容量取为常数值 290K, 陆面湿度  $q_G = F_w q_{G|_s} + (1 - F_w) q(1)$ ,  $q_{G|_s}$  为陆面饱和水汽,  $F_w$  为土壤湿度, 取  $F_w = 0.15$ , 海面湿度等于饱和比湿。

上边界条件为物质面。

初始风场由切应力、科里奥利力、气压梯度力三力平衡求解得到。初始湿度场由地面面向上逐渐减小,模式顶部为一小量。初始温场上部取稳定层结,下部中性层结,即

$$\frac{\partial \theta}{\partial x} = 0.4 \text{ } ^\circ\text{C} / 100\text{m}, \quad z > 100\text{m}$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial x} = 0, \quad z \leq 100\text{m}$$

边界层参数化,地表能量平衡,差分方案参见文献[8]。

### 3. 模拟区域及参数选择

模拟区域如图 1 所示,分别将陆地、水面网格化。水平方向:  $x$  方向 49 个格点,  $y$  方向 45 个格点,格距为 5km,  $z$  方向取 14 层,各层高度为 10, 20, 50, 100, 200, 500, 1000, 1500, 2000, 2500, 3000, 3500, 4000, 4500(单位 m)。

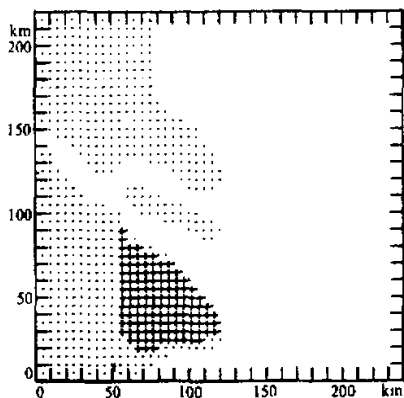


图 1 模拟区域

空白处为海面,黑点区域为陆地,“+”号区域  
为发展后的城市,中间黑点为崇明岛

参数选择如下,大尺度的陆面粗糙度取为 5 cm,海面粗糙度可以由  $z_0 = 0.032u^2 / g$  求出,  $z_0 \geq 0.0015\text{cm}$ ,初始地转风根据上海地区常规气象资料,取  $V_g = 5\text{m/s}$ ,方向  $115^\circ$ ,模拟季节取为 3 月底,日落开始积分,土壤密度为  $\rho = 1.5 \text{ g/cm}^3$ ,土壤导温率为  $k_s = 0.007\text{cm}^2/\text{s}$ ,地面反照率乡村为 0.25,城市为 0.3。

## 三、结果分析

### 1. 试验 1: 城市未发展情形

如图 1 所示,假设城市并未有很大发展,设整个陆地(黑点区域及“+”号区域)上粗糙度  $z_0$  为 5cm,地面反照率为 0.25。日落 18:00 开始积分,此时假设海陆无温差,地面温度为 290K。

图 2 给出了 22:00, 06:00 高度 15m 处的水平风矢量场,最大风矢量为 5m/s。由图 2a 可以看出,由于陆面粗糙度比海面粗糙度大,而此时海陆温差尚不明显,动力效应起主要作用。因此,陆地上的风远小于海面上的风,风向变化亦不甚明显,在迎风向东海岸及南海岸出现了风的辐合区,如图中上海地区东南沿海一带,以及长江的北面陆地,风都是辐合的。而上海地区的北海岸一带,风则是辐散的。由于陆面长波辐射冷却,使得陆地气温逐渐降低,随着海陆温差加大,热力效应逐渐起主要作用。陆地上的风向逐渐旋转,向右偏移,靠近陆地的海面上风向也向右偏转而远离陆地的海面上风向变化很小。陆面上空 15m 处的风逐渐变成西风,从图 2b 可以看出,陆面上风的转向其

实是陆风与初始风场合成的结果,使得东南风逐渐减小,然后为零,最后又变成西风。夜间在陆地的中央地带形成了静风区。而静风区是由东向西移动的。这正是初始风场与陆风相互作用的结果。同时,在海陆交界的东北面出现明显的风辐合区,且辐合区逐渐向海上推进。

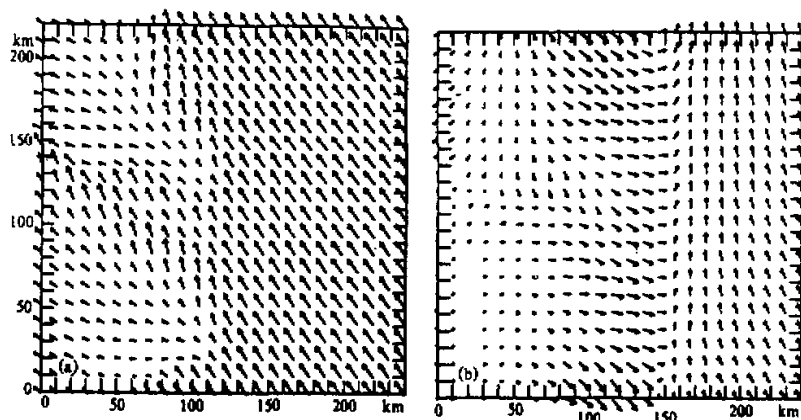


图2 试验1中15m处水平风场

(a)为22:00, (b)为06:00

图3为试验1中750m高度处的垂直速度场。图中 $H$ 为最大值, $L$ 为最小值,图中单位为 $\text{cm/s}$ 。日落以后,陆面上长波辐射降温出现海陆温差,靠近地面的冷空气密度加大引起下沉气流,如图3a为夜间22:00垂直速度场,可以看出,下沉气流中心是靠近海边的陆地上空,崇明岛四周皆为水面,因此,崇明岛上出现了最大下沉气流,上海地区的东部,南通地区的东南部都有下沉中心。图中最大上升及下沉气流不到 $5\text{cm/s}$ ,此时海陆温差 $1.5^\circ\text{C}$ 左右。海陆交界处陆面上空气下沉产生了陆地指向海洋

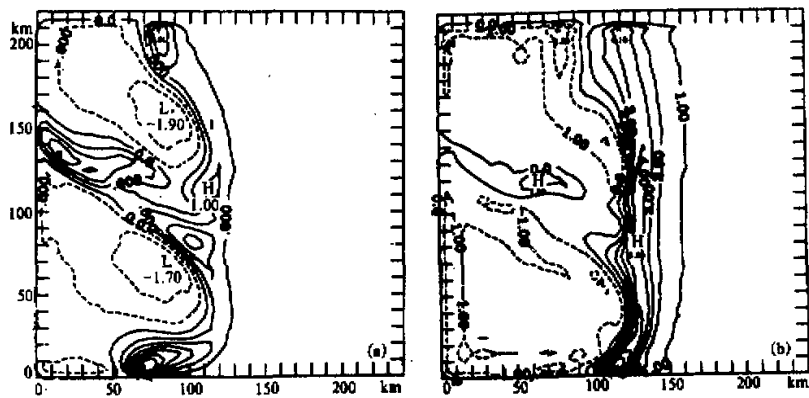


图3 试验1中750m高处垂直速度场

(a)为22:00, (b)为04:00

的风分量,这正是我们从图2中看到的情况。图3b为凌晨4:00的垂直速度场,此时最大海陆温差约 $10^{\circ}\text{C}$ ,最大上升气流约 $9\text{cm/s}$ ,在长江水面上,海岸线东部都有上升气流中心,垂直环流逐渐向海洋推进,至凌晨6:00,向东延伸约50km。

## 2. 试验2: 城市发展后的情形

试验2假设上海地区皆发展成为城市,如图1所示,“+”号区域表示城市。取城市粗糙度为 $1\text{m}$ ,其它陆面粗糙度仍为 $5\text{cm}$ 。城市反照率取为 $0.30$ ,陆地仍为 $0.25$ 。

图4给出了试验2与试验1的风场差。既用试验2中的风场减去对应格点,对应时刻的试验1的风场,将是由于城市出现后的风场差。图4a和图4b分别为22:00和06:00在 $15\text{m}$ 高度处的水平风场。

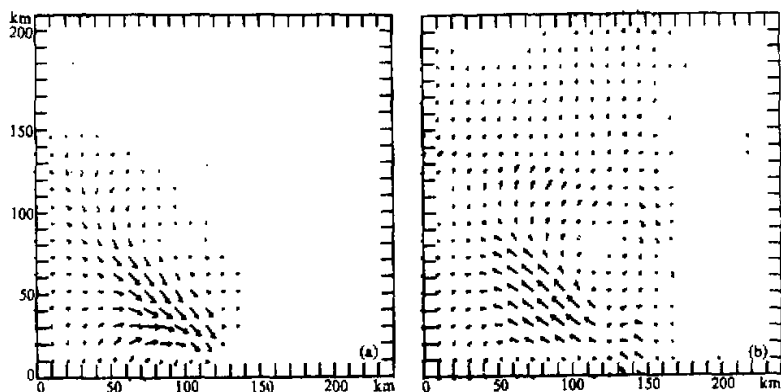


图4 试验2与试验1在 $15\text{m}$ 高处风场差

(a)为22:00, (b)为06:00

由图4a可知,夜间22:00,此时海陆温差仍然较小,动力作用仍占有主要因素。此时,在城区,有一个与迎风方向相反的西北方向的风差,这正是城市阻力作用所致。随着海陆温差加大,城市作用使得陆风强度减小,风差顺时针偏转,且影响范围也是由西向东推进,既由城市向海洋推进。夜间02:00,影响范围在 $x$ 方向 $100\text{km}$ 处,04:00中已达到 $120\text{km}$ 左右,及至凌晨06:00,已达到 $150\text{km}$ 以外。可见,对于夜间陆风情况,城市大粗糙度反而减弱了陆风强度,城市存在时的海陆温差要比无城市存在时小,及减弱了热力效应,这也将减弱陆风强度。同时由于平流作用在城市的下风区亦受到影响,图2a中影响范围较小,下风方向影响较明显,随着热力效应的增强,影响范围逐渐扩大,风差逐渐扩大,且形成了一个顺时针的小环流,这正是动力热力综合作用的结果。

图5给出了试验2的垂直速度场,从模拟的结果看,即使在模拟区域有一大块区域有很大的粗糙度,并没有产生很强的垂直速度,试验2与试验1的垂直速度场之差在 $1\text{cm}$ 以下,差别主要局限在城区的上空。其原因可这样解释。垂直环流是动力作用和热力作用共同形成的。且热力作用比动力作用更重要, Pielke<sup>[3]</sup>曾通过数值试

验得出这一结论。由于试验 2 并不比试验 1 中的热力效应强, 相反, 城市热岛效应, 其热力效应反而比试验 1 中小一些, 但由于本实验中只考虑了城市、乡村的粗糙度及反照率的差别, 而土壤密度、水汽含量、热容量等差别未包含进去, 故而热岛效应较小, 因此, 试验 2 与试验 1 中的热力效应相差不大, 这可以从位温分布图上看出来。因此, 试验 2 比试验 1 动力作用大, 热力效应小, 两种作用相抵消而使垂直速度场变化不大是合理的。李乐泉、李兴生<sup>[9]</sup>曾得到城市热岛中与此类似的结论。

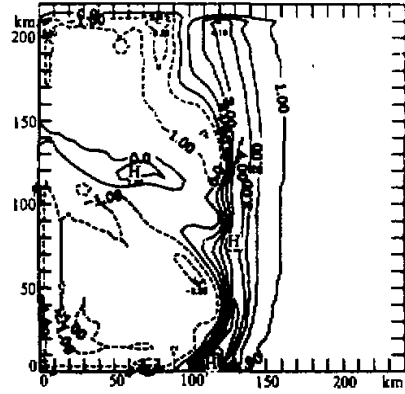


图 5 试验 2 中 750m 高处 04:00 垂直速度场

### 3. 试验 3: 整个长江三角洲皆发展成为城市

如图 1 所示, 假定所有陆地皆发展成为城市, 取粗糙度 1.5m, 地面反照率 0.30, 其它同实验 1。

试验结果与试验 2 得到的结论类似, 只是由于城市范围的扩大, 城市粗糙度的增加, 影响的范围更广一些, 渗透到海洋上的距离更远一些。

## 四、结 论

(1) 长江长三角洲地区陆面水面交错, 下垫面地形及热力性质有很大差异, 夜间会出现明显的陆风及垂直环流, 辐散辐合区与风向及地形密切相关。

(2) 大范围的城市发展后, 由于粗糙度的增加, 夜间热力效应的减弱, 会使陆风减弱, 垂直速度变化不大。

(3) 陆风的改变会对污染物的传输产生影响, 白天由于城市粗糙度增加, 热力效应也增强必将对海陆风及垂直环流产生更大作用, 有待进一步研究。

## 参 考 文 献

- [1] Eatoque, M.A., 1961, A theoretical investigation of the sea breeze, *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **87**, 136-146.
- [2] Alpert, P. and Neumann, J., 1983, A simulation of the Lake Michigan winter land breeze on the 7th of November 1978, *Mon. Wea. Rev.*, **111**, 1873-1881.
- [3] Pielke, R.A., 1974, A three dimensional numerical model of the sea breezes over south Florida, *Mon. Wea. Rev.*, **102**, 115-139.
- [4] Warner, T. J., Anthes, R. A. and McNab, A. L., 1978, Numerical simulations with a three-dimensional mesoscale model, *Mon. Wea. Rev.*, **106**, 1079-1099.
- [5] 金浩、王彦昌, 1991, 三维海陆风的数值模拟, *大气科学*, **15**(1), 25-32.
- [6] Neumann, J., 1977, On the rotation rate of the direction of the sea and land breezes, *J. Atmos. Sci.*, **34**, 1913-1917.

- [7] Sun, W. Y. and Orlanski, I., 1981, Large mesoscale convection and sea breeze circulation, Part 1: linear stability analysis, *J. Atmos. Sci.*, **38**, 1675-1709.
- [8] 张雷鸣, 赵鸣, 1992, 地形对冷空气的影响, 计算物理, **9**, 799-805.
- [9] 李乐泉, 李兴生, 1992, 城市大气边界层的数值研究, 大气科学, **16**(2), 237-247.

## Numerical Simulation of the Land-Sea Breeze Circulation in the Nighttime due to City Expansion

Zhang Leiming, Miao Manqian, Hong Zhongxiang, Zhou Leyi and Li Jun

(Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029)

### Abstract

In this paper, a three-dimensional numerical meso-scale model was carried out to simulate the land-sea breeze circulation in the nighttime in the Changjiang River delta area, the dynamic and thermal effect on the circulation due to city expansion was also simulated. The roughness and albedo difference between city and rural was considered. The flux transfer, solar radiation, Coriolis effect etc. were also included in this model. The simulation results showed vertical circulation condition, divergence and convergence zone. The circulation condition after city expansion was also given. It provided some bases for atmospheric diffusion and city construction.

**Key words:** Changjiang River delta area; city expansion; circulation forecast.

### 书 讯

## 《大气科学》1993 年增刊——统计气象学专辑出版

随着《大气科学》事业的迅速发展,科研成果日益增多,《大气科学》稿源丰富。为适应国内外学术交流的需要,缩短出版周期,《大气科学》1993 年第 17 卷增刊——“统计气象学专辑”现已出版,这本专辑的内容包括当代气象统计学的最新成果,其中涉及非线性动力学、气候的统计诊断和预报、统计动力预报、统计学方法的研究,如回归分析时间序列、投影追踪、斜交因子分析等。这本专辑共刊登文章 20 篇,144 页,约 20 万字,定价 8.40 元。为保持刊物的完整性,请已订阅《大气科学》的单位或个人购买这期增刊,并欢迎其他读者购买。

购买《大气科学》1993 年增刊的单位或个人,请速将款(包括邮寄挂号费每本 10 元整)汇到《大气科学》编辑部,并在汇款附言中写明“购 1993 年增刊”,编辑部收到汇款后将及时把刊及收据用挂号寄上。

(《大气科学》编辑部)