

# 三维海陆风的数值模拟

金 皓

王彦昌

(南京大学大气科学系)

## 提 要

本文利用地形坐标, 建立了一个模拟用的三维海陆风模式, 来模拟城市、斜坡和海岸形状等对海陆风的影响。结果表明, 海陆风主要受海陆温差影响, 海岸线附近的坡地和城市的存在, 对海风发展有利。

关键词: 海陆风环流; 复杂地形; 边界层参数化; 三维中尺度数值模拟。

## 一、引 言

随着沿海地区经济和工业的发展, 正确揭示海陆风的规律, 已成为日益迫切的需要。海陆风是沿海地区一个重要的气象特征, 最早揭示海陆风现象的有Defant<sup>[1]</sup>, Haurwitz<sup>[2]</sup>和Schmidt<sup>[3]</sup>。但是直到70年代, 由于计算机能力大大增强, 才有可能进行三维数值模拟。McPherson<sup>[4]</sup>最早做了海陆风环流的三维模拟, 随后, O'Brien<sup>[5]</sup>等人进一步完善了理论研究, 并创建了应用模式。

本文进行有地形和城市等复杂情形的三维海陆风模拟, 为说明物理机制, 为实际应用奠定理论基础。本文选用的地形、城市和海岸线形状都是规则的, 并分别作模拟, 以便相互比较, 找出其特征。在此基础上, 进一步复杂化, 考虑地形、城市和海岸线共同作用的结果。

## 二、模 式

### 1. 基本方程

从质量、热量和动量守恒关系出发, 利用所研究的中 $\beta$ 尺度的特性, 进行了静力平衡和不可压条件简化, 并用地形坐标

$$z^* = s \frac{z - z_G(x, y)}{s - z_G(x, y)},$$

方程可写为

$$\begin{aligned} \frac{du}{dt} = f(v - v_g) - \theta \frac{\partial \pi}{\partial x} + g \frac{z^* - s}{s} \frac{\partial z_G}{\partial x} \\ + \left( \frac{s}{s - z_G} \right)^2 \frac{\partial}{\partial z^*} \left( k_z \frac{\partial u}{\partial z^*} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( k_H \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_H \frac{\partial u}{\partial y} \right), \end{aligned}$$

1988年12月15日收到, 1990年3月15日收到修改稿。

$$\begin{aligned}\frac{dv}{dt} &= -f(u-u_g) - \theta \frac{\partial \pi}{\partial y} + g \frac{z^* - s}{s} \frac{\partial z_G}{\partial y} \\ &\quad + \left( \frac{s}{s-z_G} \right)^2 \frac{\partial}{\partial z^*} \left( k_z \frac{\partial v}{\partial z^*} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( k_H \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_H \frac{\partial v}{\partial y} \right), \\ \frac{d\theta}{dt} &= \left( \frac{s}{s-z_G} \right)^2 \frac{\partial}{\partial z^*} \left( k_z \frac{\partial \theta}{\partial z^*} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( k_H \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_H \frac{\partial \theta}{\partial y} \right), \\ \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w^*}{\partial z^*} - \frac{1}{s-z_G} \left( u \frac{\partial z_G}{\partial x} + v \frac{\partial z_G}{\partial y} \right) &= 0, \\ \frac{\partial \pi}{\partial z^*} &= - \frac{s-z_G}{s} \cdot \frac{g}{\theta}.\end{aligned}$$

这里  $\pi$  经常称为 Exner 函数:  $\pi = c_p \left( \frac{P}{P_0} \right)^{R/c_p}$

$$\begin{aligned}w^* &= \frac{s}{s-z_G} w + \frac{z^* - s}{s-z_G} \left( u \frac{\partial z_G}{\partial x} + v \frac{\partial z_G}{\partial y} \right), \\ \frac{d}{dt} &= \frac{\partial}{\partial t} + u \frac{\partial}{\partial x} + v \frac{\partial}{\partial y} + w^* \frac{\partial}{\partial z^*},\end{aligned}$$

其中  $P_0$  是地面气压,  $s$  是模式顶的高度, 为 4000m,  $z_G$  是地形高度, 其余变量的表示都是气象中常见的.

## 2. 边界层参数化

本模式选用的铅直扩散系数  $k_z$  公式如 O'Brien<sup>[5]</sup>, 具体表达如下:

$$k_z(z^*) = \begin{cases} k_{zi} + \frac{(z_i - z^*)^2}{(z_i - h_s)^2} \left\{ k_{hs} - k_{zi} + (z^* - h_s) \left[ \frac{\partial k_{hs}}{\partial z^*} + 2 \frac{(k_{hs} - k_{zi})}{z_i - h_s} \right] \right\}, & z_i \geq z^* \geq h_s, \\ k_{zi}, & z^* > z_i, \\ \left( \frac{z^*}{h_s} \right) \cdot k_{hs}, & z^* < h_s. \end{cases}$$

公式中  $z_i$  和  $h_s$  分别表示边界层高度和近地层高度,  $k_{zi}$  和  $k_{hs}$  则表示相应高度上的铅直扩散系数.

$z_i$  和  $h_s$  的高度可参照 Blackadar 和 Tennekes<sup>[6]</sup> 的公式求出

$$\begin{aligned}z_i &= 0.25 \frac{u_*}{f}, \\ h_s &= 0.01 \frac{u_*}{f},\end{aligned}$$

其中  $f$  为科里奥利参数, 由模拟区域所在的纬度决定,  $u_*$  是近地层的特征风速.

这里取  $k_{zi} = 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ , 根据 Monin-Obukhov 相似理论, 就可闭合求得  $h_s$ ,  $z_i$  和

$k_h$ . 据常规经验, 水平扩散系数  $k_H$  为对应点上的铅直扩散系数  $k_z$  的 10 倍. 这样, 就求得了扩散系数  $k_H$  和  $k_z$  的空间分布.

### 3. 边界条件

(1) 下边界条件(在  $z^*=0$  处)

温度场是人为给定的, 海面温度  $\theta_0$  取为常值, 其值为  $\theta_0=298\text{K}$ , 陆面温度为  $\theta=\theta_0+A_1\sin 2\pi t/T$ , 根据常规经验, 城市温度设为  $\theta=\theta_0+3+A_2\sin 2\pi t/T$ , 其中  $A_1=10\text{K}$ ,  $A_2=8\text{K}$ ,  $T=24$  小时, 地面风场为零.

(2) 上边界条件( $z^*=4000\text{m}$  处)

假设满足通量为零, 即

$$k_z \frac{\partial \phi}{\partial z^*} = 0,$$

其中  $\phi$  可为  $u$ ,  $v$  或  $\theta$ ,  $\pi$  取常值.

(3) 侧边界条件

$$\frac{\partial \phi}{\partial x} = \frac{\partial \phi}{\partial y} = 0,$$

其中  $\phi$  可为  $u$ ,  $v$  或  $\theta$ .

### 4. 计算方法

本文选用  $25 \times 25$  格点的水平拉伸网格, 模拟范围为  $160 \times 160 \text{ km}^2$ , 内部是  $5\text{km}$  的间隔, 靠近边界处, 以成倍的速度增长到  $20\text{km}$ , 水平格距的分布为

$$\Delta x(n) = \Delta y(n) = \begin{cases} 5 \times 2^{3-n} \text{ km}, & 1 \leq n \leq 2. \\ 5 \text{ km}, & 3 \leq n \leq 22. \\ 5 \times 2^{n-22} \text{ km}, & 23 \leq n \leq 24. \end{cases}$$

在铅直方向, 大气分成 10 层, 其高度分布是非均匀的, 第 1 层到第 10 层的高度依次为 0, 50, 100, 300, 600, 1000, 1500, 2100, 3000 和 4000(m).

物理量  $u$ ,  $v$ ,  $\theta$  和  $\pi$  均分布在网格点上, 受内部水平网格距的约束, 本模式取的时间步长为 1 分钟.

把方程离散化, 本模式选用的空间差分格式为平流项和水平扩散项用当前时刻物理量的中心差, 铅直扩散项取前一时刻和后一时刻的物理量中心差的平均. 对于动量方程, 科里奥利项取当前时刻物理量, 压力梯度项和地形作用项均用当前时刻的物理量的中心差. 在积分方案中, 第一步用时间后差积分, 以后各时刻用时间中心差. 这是一种半隐、半显的积分方案, 用追赶法求解. 为了使计算稳定, 模式采用空间 9 点平滑的方法来滤波.

### 5. 初始场的处理

本文所用的初始场为理想场. 水平速度场是考虑科里奥利力、压力梯度和铅直扩散项共同作用得到的, 其方程为

$$\frac{\partial u}{\partial t} = f(v - v_g) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k_z \frac{\partial u}{\partial z} \right),$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} = -f(u - u_g) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k_z \frac{\partial v}{\partial z} \right).$$

位温场由下方程解得

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left( k_z \frac{\partial \theta}{\partial z} \right).$$

初始场方程的边界条件为

上边界:  $u = u_g$ ,  $v = v_g$ ,  $\theta = \theta_s$ .

下边界:  $u = 0$ ,  $v = 0$ ,  $\theta = \theta_0$ .

本模式中, 给定地转风  $u_g = -0.5 \text{ m/s}$ ,  $v_g = 0.5 \text{ m/s}$ , 上、下边界位温相同,  $\theta_0 = \theta_s = 298 \text{ K}$ . 初始场的求解方法是局地项用时间后差, 扩散项取下一时刻的值, 而对于动量方程中的科里奥利项取当前时刻的值, 用追赶法求解, 这是通过非定常解来逼近定常解, 同时假设初始场的铅直速度为零.

### 三、结 果 分 析

为了能充分阐明沿海地区的气象特征, 充分体现模式机能, 本文对平直海岸无坡地、平直海岸有坡地、平直海岸有坡地有城市的情形分别模拟, 相互比较, 可以清晰地看到海岸、坡地和城市的作用, 为模式在复杂地形条件下的应用, 提供了可行性论证; 为模式在沿海地区进行污染物的输送和扩散的模拟, 提供了气象背景场.

本模式的模拟结果每 2 小时输出一次, 这里列出一些主要的结果.

#### 1. 平直海岸线、无地形的情形

这是一个极简单的海陆风数值模拟, 初始风场是一个水平均匀的大尺度背景场, 基本特征是沿岸风和离岸风的合成.

观察积分 4 小时的风场, 就可看到海风出现在海岸附近, 范围为 40km 左右, 向岸推进达 10km. 而离海岸较远处风场, 还没受局地效应影响, 仍是大尺度背景场. 此时, 海风只是处于初生阶段, 向上发展高度只有 100m. 积分 6 小时, 海风进一步增强, 其风速达 3—4m/s, 而且已形成较弱的铅直环流, 向上发展高度达 300—400m.

图 1 是离地面高 50m 的水平风矢量场, 图中的虚线是海岸线, 虚线的左侧为海面, 而右侧为陆地. 图 2 是垂直于海岸的一个风的铅直剖面图, 这两图都是积分 12 小时的结果. 观察其风场, 可以看出: 海风在进一步增强, 上升气流极强, 达 40—50cm/s, 出现明显的铅直环流, 环流中心高 600 多米, 在海面上空离海岸约 10km 处. 以上这些模拟结果, 与 Fisher<sup>[7]</sup>, Frizzola 和 Fisher<sup>[8]</sup> 的观测结果一致.

从图 1 还发现, 白天的陆面上的风速比海面上的风速小, 这是由于白天陆面上大气层结较海面上的不稳定, 动量迅速向上传递. 从图 2 可看到, 在离海岸 10 多公里的陆面上空, 有一条辐合带, 并有较强的气流抬升, 这是符合质量守恒原理的.

积分 14 小时, 发现陆面上的风在迅速增强, 且把辐合区域推向海岸线, 随着积分时间进一步增长, 陆风分量增强趋于明显.

观察夜间风场, 可发现陆风要比海风弱得多, 且没有影响到海面上. 其原因是夜间

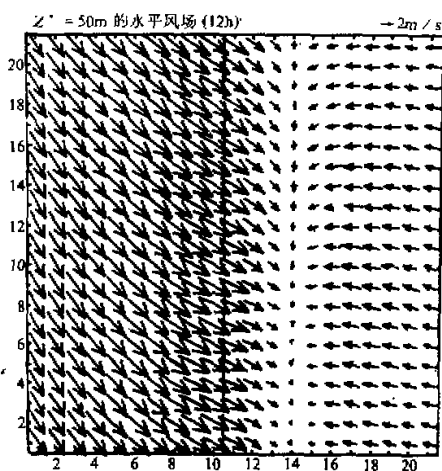


图1 平直海岸无地形的情形

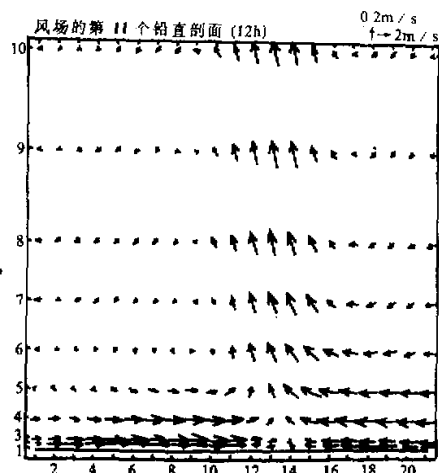


图2 平直海岸无地形的情形

的铅直扩散参数比白天的小得多, 相对周围大气, 夜间冷中心的强度, 远比白天热中心的强度来得小. 如果模式考虑辐射冷却, 这种辐射冷却在夜间起重要作用, 它将弥补由于夜间的铅直扩散系数小而引起的大气冷却不足的现象.

## 2. 平直海岸线、有坡地的情形

这是一个较简单的海陆风模拟, 与前一种情形不同的是在陆面上加一个斜坡地形, 斜坡坡度约为 1:17, 以研究地形对海陆风的作用. 为了明了而便于比较, 这里采用同一时刻有地形和无地形相比较的方法来分析.

观察 2 小时的风场, 在坡面上出现了谷风, 且谷风的影响区域向上扩散得很快, 已影响到坡面上 100m 高度的大气. 积分 4 小时, 有地形时, 海风出现得略早些, 且谷风的出现先于海风, 此时, 谷风和海风已联成一片.

从积分 8 小时的风场分析发现谷风增大, 而且在坡面上部有上升气流产生, 在坡面的底部出现下沉气流, 形成一个较弱的铅直环流. 和前一情形比较, 发现由于坡地的影响, 海风范围大, 强度也稍大, 形成的铅直环流较强, 环流中心较高, 且向陆面偏移.

图 3 是积分 12 小时的风场, 从图中可以看出, 海风发展得相当旺盛, 其海风厚度达 600 多米, 铅直环流发展很完善, 范围较大, 已不能在图上看到一个完整的闭合环流. 比较图 2 和图 3, 有坡地时, 海风发展较强, 表现在海风的水平范围大, 厚度大, 铅直环流大而强, 但在海岸线附近没有出现强的上升气流, 这是由于坡地的影响, 陆面上吹的也是向岸风, 在海岸附近没有形成辐合区, 从而就看不到强抬升.

积分 14 小时, 海面上向岸风分量迅速减小, 谷风也明显减弱. 从积分 18 小时的风场, 可看到, 陆风在增强, 其影响范围也在扩大. 到积分 20 小时, 陆风进一步增强, 范围已扩大至海岸线附近, 且陆风发展的高度较高, 可看到有铅直环流产生.

分析积分 24 小时的风场(见图 4), 陆风还在增强, 铅直环流更明显, 谷风已完全消失, 坡面上出现了山风, 山风和陆风已联成一片, 这充分体现出地形对陆风的作用.

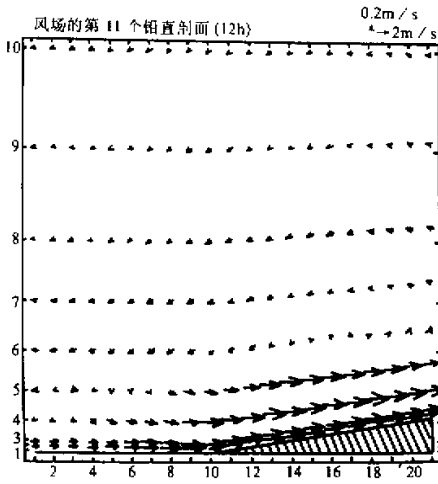


图3 平直海岸、斜坡地形的情形

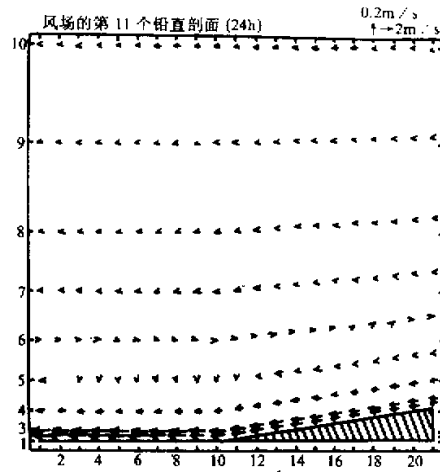


图4 平直海岸、斜坡地形的情形

由于坡地的存在,局地风场受到较大的影响.在坡地上空,出现谷风和山风的转化,但由于没有考虑地表面冷却的差异,这一转化进程可能要比实际过程慢些.在前一情形已谈到由于夜间的铅直扩散系数较小,又没考虑大气辐射冷却,不易产生陆风.但加入坡地后,由于坡面的下泄,因而容易产生陆风,形成陆风环流.

### 3. 平直海岸线、有坡地和城市的情形

这是一个理想化的较复杂的模拟.斜坡地形上有一个正方形的城市.城市位于海边,范围为  $30 \times 30 \text{ km}^2$ ,如图6所示.城市和其周围的陆地的区别是温度的日变化不同,其表达形式如本文前面所述,主要考虑的是城市的热岛效应.

初始场分布与第二情形完全一致.为了考虑城市的作用,这里采用同一时刻斜坡地形上有城市和无城市相比较的方法来分析.

比较积分2小时的风场,在有城市的海岸附近更容易出现海风,海风和谷风、城市热力效应共同作用使城市上空比其周围有较厚的向岸风.积分4小时,发现有城市时的海风,发展得快,影响区域大,比无城市时的海风的影响高度高200m左右.

把积分12小时的图5和图3比较,可看到有城市时的海风影响范围大,伸展略高些,铅直环流也较强,但不是很明显.

比较积分18小时和22小时的风场,可看到城市对陆风的影响很微弱,但城市的存在,有助于山风的出现.

图6是积分24小时的风场,此时,城市的温度高于海温和陆面温度,城市上空的大气层结已不稳定,动量迅速向上传递,造成地面风速比周围的小,这很容易从图6中看到.

由此可见,城市热岛的存在,可加强海风的生成和发展,同时有助于山风的出现.尽管海边城市在海陆风生成和发展过程中不是起主导作用,但它的影响还是可见的.

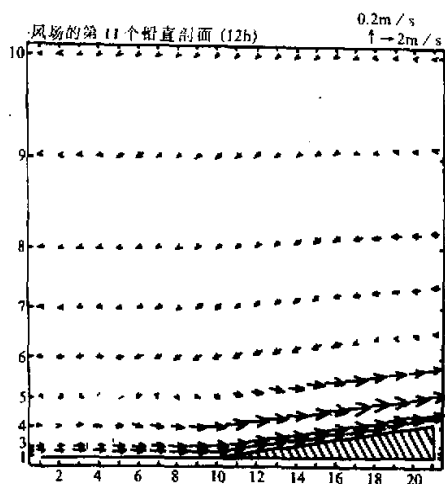


图5 平直海岸、斜坡地形、有城市的情形

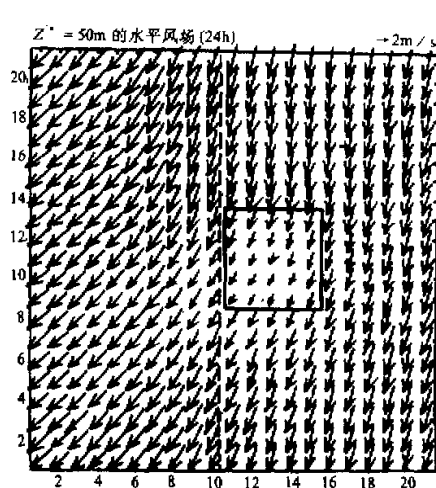


图6 平直海岸、斜坡地形、有城市的情形

#### 四、结 论

分析模拟结果,可得到结论如下:

1. 海陆风的形成主要受海陆温差的影响,海风影响范围和强度都比陆风大,在无地形的海陆风模拟中,在海岸线附近会出现辐合带,其上空有强的气流抬升。

2. 由于沿海坡地的影响,形成的海风比平坦地形时产生的海风范围大,强度也强,垂直环流明显,并出现海陆风的交替,在斜坡地形上相应山风和谷风的交替,说明沿海地形对该地区的海陆风有不可忽略的影响。

3. 城市热岛的影响,使海风发展较快,影响区域大,城市上空的海风特别厚,城市对陆风的影响微弱,但它却加快了山风的出现,而且对城市上空的风有很大影响。

总之,本模式模拟海陆风场的结果较为合理,但还有许多地方有待改进,如地表温度人为给定不恰当等。若在物理过程中增加辐射和凝结潜热释放,结果应更符合实际。

#### 参 考 文 献

- [1] Defant, F., 1950, Theorie der Land-und seewind. Arch. Meteorol. Geophys. Bioklimatol. Ser. A2, 404—425.
- [2] Haurwitz, B., 1947, Comments on the sea breeze circulation. *J. Meteor.* 4, 1—8.
- [3] Schmidt, F. H., 1947, An elementary theory of the land and seabreeze circulation. *J. Meteor.* 4, 9—15.
- [4] McPherson, A. D., 1970, A numerical study of the effect of a coastal irregularity on the sea breeze. *J. Appl. Meteor.* 9, 767—777.
- [5] O'Brien, J. J., 1970, A note on the vertical structure of the eddy exchange coefficient in the planetary

- boundary layer, *J. Atmos. Sci.* **27**, 1213 — 1215.
- [6] Blackadar, A. K. and H. Tenneks, 1968, Asymptotic similarity in neutral barotropic planetary boundary layers, *J. Atmos. Sci.* **25**, 1015 — 1020.
- [7] Fisher, E. L., 1960, An observation study of the sea breeze, *J. Meteor.* **17**, 645 — 660.
- [8] Frizzola, J. A. and Fisher, E. L., 1963, A series of sea breeze observation in New York city area, *J. Appl. Meteor.* **2**, 722 — 739.

## NUMERICAL SIMULATION OF THREE-DIMENSIONAL SEA-LAND BREEZE

Jin Hao and Wang Yanchang

(Department of Atmospheric Sciences, Nanjing University)

### Abstract

This study uses terrain-following coordinate and builds a simulant model of three-dimensional sea-land breeze to simulate the effects of cities, slope surfaces and coastal lines on the sea-land breeze. The results show that sea-land breezes are mainly affected by the difference of temperature between sea and land. The slope surface and the city enhance the development of sea-land breezes.

**Key words:** Sea and land breeze circulation; Complicated relief; Parameterization of boundary layer, Numerical simulation of three-dimension mesoscale system.