

青岛地区边界层结构的数值模拟*

王卫国 蒋维楣

(南京大学大气科学系, 南京 210093)

摘 要 本文建立了一个非静力的三维细网格边界层模式, 对青岛地区复杂下垫面条件下的边界层结构和湍流特征作了数值模拟, 模式采用能量闭合方案, 舍弃了静力近似, 以提高空间分辨率和模式精度。模拟以实测资料为初始输入, 对该地区风场和湍流场作了较细致的模拟分析, 与观测资料相比, 结果合理地一致。结果表明了陡峭地形和不规则海岸线对局地风场和湍流场影响很大。

关键词 三维非静力边界层数值模式 能量闭合 复杂地形

1 引言

青岛地区三面濒海, 东部是海拔高达 1133 m 的崂山, 西侧是胶州湾。要细致地研究该地区的 PBL 结构, 必须采用较细的网格, 因为这里山地范围不大但很陡, 且水陆交界线复杂。理论研究表明, 对于这类地形, 特别在对流强时, 取细网格, 静力近似的模式是不适合的, 必须用非静力模式, 目前这方面用于实际模拟的例子不多见。另外, 研究^[1,2]表明, 实用的 $E-\varepsilon$ 能量闭合方案能够比较真实地响应大气运动的规律, 且能模拟湍流量。本文工作从提高模式分辨率和精度出发, 建立了细网格的非静力、 $E-\varepsilon$ 能量闭合的三维边界层模式, 对青岛地区 PBL 的平均场和湍流场进行模拟, 细致研究了陡峭地形和不规则海岸线的影响, 旨在为研究该地区的边界层及污染物输送扩散模拟等提供基础。

2 模式

2.1 控制方程组及闭合方案

采用地形跟随坐标系中的三维非静力边界层模式控制方程组^[3]。包括速度 u, v, w , 位温 θ 的预报方程和连续方程。闭合方案采用工程上实用的 $E-\varepsilon$ 闭合方案^[4]。在地形跟随坐标系中, 湍能(E)和耗散率(ε)的预报方程以及湍流扩散系数 K_{mz} 为

$$\frac{d^* E}{dt} = S + B + DH \left(\frac{K_{mh}}{\sigma_E}, E \right) + DV \left(\frac{K_{mz}}{\sigma_E}, E \right) - \varepsilon, \quad (1)$$

$$\frac{d^* \varepsilon}{dt} = DH \left(\frac{K_{mh}}{\sigma_\varepsilon}, \varepsilon \right) + DV \left(\frac{K_{mz}}{\sigma_\varepsilon}, \varepsilon \right) + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{E} \{ S - (1 - C_{3\varepsilon}) B \} - C_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon^2}{E}, \quad (2)$$

$$K_{mz} = C_\mu E^2 / \varepsilon, \quad (3)$$

1994-07-15 收到, 1995-04-17 收到再改稿

* 本文得到国家自然科学基金项目 (No.49135110) 资助

式中

$$\begin{aligned}\frac{d^*}{dt} &= \frac{\partial}{\partial t} + u \frac{\partial}{\partial x} + v \frac{\partial}{\partial y} + w^* \frac{\partial}{\partial z^*}, \\ S &= \left(\frac{h_d}{h_d - z_g} \right)^2 K_{mz} \left[\left(\frac{\partial u}{\partial z^*} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z^*} \right)^2 \right], \quad B = \frac{g}{\theta} \left(\frac{h_d}{h_d - z_g} \right) K_{\theta z} \frac{\partial \theta}{\partial z^*}, \\ DH(K, \eta) &= \frac{\partial}{\partial x} \left(K \frac{\partial \eta}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K \frac{\partial \eta}{\partial y} \right), \quad DV(K, \eta) = \left(\frac{h_d}{h_d - z_g} \right)^2 \frac{\partial}{\partial z^*} \left(K \frac{\partial \eta}{\partial z^*} \right).\end{aligned}$$

其中 h_d 为模式顶高度, z_g 为地形高度, z 为笛卡尔坐标中的垂直分量, w^* 为地形跟随坐标系里的垂直速度。在大气中, 方程(1)~(3)式中参数 σ_E , σ_ε , C_{1c} , C_{2c} , C_{3c} , C_μ 等的取法是为复杂的, 许多作者进行过研究^[5], 作为将此方案用于中尺度模拟的尝试^[6,7], 简单地取: $C_\mu = 0.09$; $\sigma_E = 1.0$; $\sigma_\varepsilon = 1.3$; $C_{1c} = 1.44$; $C_{2c} = 1.92$ 。稳定时, C_{3c} 取 1.0; 不稳定时, C_{3c} 取 0.0; $K_{\theta z}$ 一般取为 $1.35K_{mz}$ 。

2.2 初始、边值条件及计算方法

模拟以实测风速、位温资料为初始值。假定初始时刻湍能和耗散率处于定常状态, 由初始的风、温分布可确定 E 、 ε 的初始值。

侧边界假定梯度为零, 上边界假定: $u_{\text{top}} = u_g(t)$; $v_{\text{top}} = v_g(t)$; $\theta_{\text{top}} = \theta_{\text{top0}}$ (初始顶边界值); $E = 0.0$; $\varepsilon = 0.0$ 。这里 $u_g(t)$ 、 $v_g(t)$ 用天气图上 08:00 和 20:00 的观测值按时间内插得到。底边值是地面以上第一层的值, 对 u , v , θ 可用地面和地面以上第二层的值根据近地层内的 Businger 廓线关系求得。地面温度简单地假定为正弦波变化 (振幅据实测资料拟合), 水面温度在计算中为常数, E 和 ε 的下边界:

$$\begin{aligned}E &= 5.5u_*^2 + 0.5w_*^2, \\ \varepsilon &= \frac{u_*^3}{\kappa z \varphi_m} + \frac{g(w'\theta')}{\theta_{\text{地}}},\end{aligned}$$

$\overline{w'\theta'}$ 为地面热通量, w_* 为对流速度尺度 (m/s), φ_m 为稳定度函数。气压的下边界则令在地面附近 w^* 定常, 忽略平流与扩散项, 可得到地面扰动气压 π' 与 θ 的关系式, 用迭代法求解。上边界则令扰动为零。

模式方程组求解用差分方法。为了保持计算的稳定性, 采用三点平滑: $\overline{\varphi_i} = i\varphi_i + (1-i)(\varphi_{i+1} + \varphi_{i-1})/2$, 文中 λ 取 0.5。气压 π' 的求解^[8]则是首先不考虑气压的作用求得虚拟速度场 V_0 , 而它与真正速度 V 间的关系为

$$V = V_0 + F(\pi')\Delta t, \quad (4)$$

其中 $F(\pi')$ 是运动方程中与气压有关的项。 V 满足连续方程式, 将(4)式代入连续方程中, 得到一个关于气压的泊松方程, 再用超松弛迭代法求解。

3 实际模拟分析

模拟水平范围 $100 \text{ km} \times 100 \text{ km}$ (图 1), 格点数 40×40 , 水平方向上采用拉伸网

格, 最小格距 1.5 km; 模式顶高约 5 km, 分为 13 层, 格距由底往上逐渐增大。

3.1 实际模拟中的初始风场处理

本文用实测风输入风场调整模式^[8], 模拟域内有 5 个测试点资料, 为了多利用一些测站的资料, 处理时考虑了以图 1 所示的模拟域为中心的 300 km × 300 km 区域, 此域内有十个测站点资料(潍坊、日照、团岛、沧口、伏龙山、莱阳、崂山、朝连岛、海阳、千里岩), 它们分布比较均匀, 既有陆上点, 又有水面上点。在大范围内, 将区域以格距 10 km 划分, 进行风场的内插、调整, 输出的结果在图 1 所示域内的格点值作为此小范围内风场调整的初始值, 再次进行内插和风场调整计算, 获得在非均匀细网格格点上的初始风场的分布。本文模拟的是 1988 年 8 月 12 日的情况, 该日的天气条件有利于形成局地海陆风。

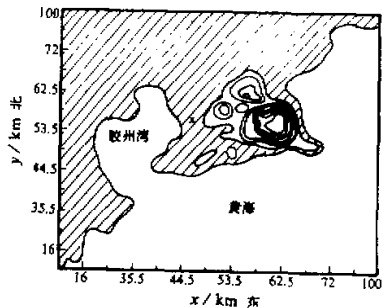


图 1 模拟域的地形等值线图
“x”为测试点位置

3.2 结果与分析

用所建模式从 8 月 12 日 08:00 开始积分至次日 08:00, 每两小时输出一 次结果。

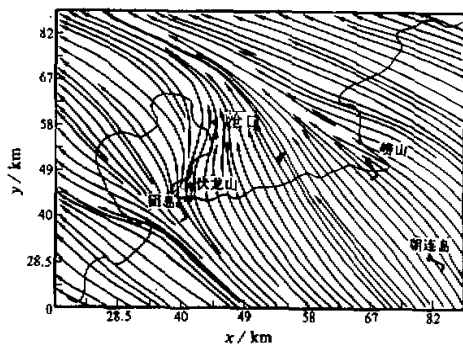


图 2 14:00 地面的水平风场流线图

图 2 是模式计算得到的地面 ($z^* = 25$ m) 14:00 的水平风场流线图, 从图上可看到水陆交界线对地面流场的影响。地面大部分地区盛行东南风 (向岸流)。在青岛市区西海岸, 受南侧海岸的海风影响较大, 向岸流不明显 (吹偏南风)。崂山附近由于水陆和地形的作用, 水面上流线辐散, 陆地上流线辐合。在高空, 风场受下垫面地形、水陆差异等影响相对较弱, 受大尺度风场的影响大些。

图 3 是模式计算得到的 14:00 在 $y = 53.5$ km 处垂直剖面 ($x-z$) 上的风矢图。白天地面加热, 导致水面上为辐散下沉气流, 陆地上大部分为辐合上升气流, 地形影响了陆地上气流的走向, 明显地表现在迎风坡气流被抬升, 背风坡气流有下曳的趋势。低层海风的极大值出现在水陆交界处。在西侧的海岸附近 ($x = 40$ km 左右), 来自东、西岸的海风气流在此处汇合, 形成较强的辐合气流, 并出现一个环流。与白天相比, 夜里流场方向发生较大的变化, 岸边的地形增强了陆风。

图 4a、b 是 14:00 在 $y = 53.5$ km 处垂直剖面 ($x-z$) 上位温和湍能等值线分布。白天, 陆地上空低层大气为不稳定层结, 海风把海面上稳定的较冷的空气吹向陆地, 使水陆交界处等温线呈特有的“舌”状分布^[8]。图 4a 中, 在崂山东侧、胶州湾东侧位温呈

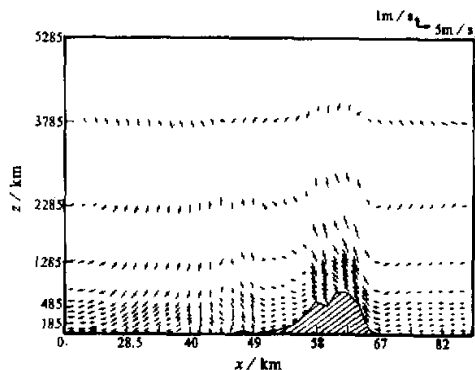


图3 14:00 $y=53.5\text{km}$ 处
垂直剖面 $x-z$ 上的风矢图

两个“舌”状分布。崂山东侧的海风较强劲,“舌”状分布伸向内陆(向西)较远,约 9km ,而胶州湾东侧的海风较弱,此分布伸向陆地(向东)不远,约 3km 左右。

TKE 的高值出现在大气层结的不稳定区域(图 4b)。14:00,陆地上空 TKE 高值集中在 450m 以下, TKE 最高值达 $0.98\text{m}^2/\text{s}^2$, 出现的高度在 100m 左右。从湍能支配方程分析知,在对流混合层内支配 TKE 变化的是浮力作用。耗散率的分布形式与 TKE 分布类似。TKE 和 ε 共同表征的湍流扩散能力由湍流

扩散系数 K_y 表征。白天较大的 K_y 分布在陆地上空的不稳定层内,14:00 时, K_y 最大值为 $40\text{m}^2/\text{s}$, 位置与 TKE、 ε 极值出现的位置大致相同。

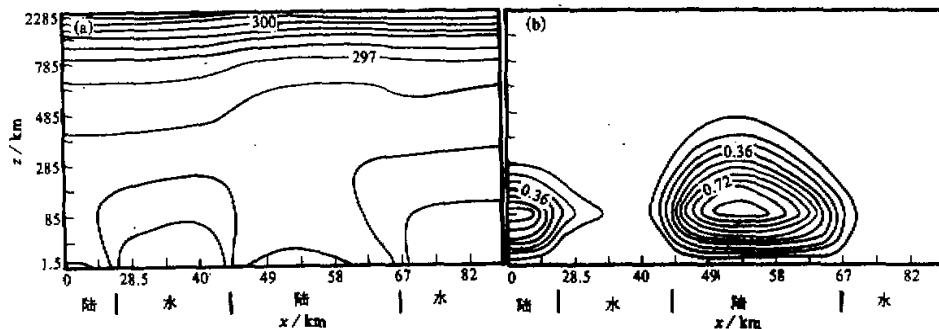


图4 $y=53.5\text{km}$ 处垂直剖面 ($x-z$) 上等值线 (14:00)

(a) 位温, 等值线最大 301.7K , 最小 294.7K , 间隔 0.7K

(b) 湍能, 等值线最大 $0.9\text{m}^2/\text{s}^2$, 最小 0 , 间隔 $0.09\text{m}^2/\text{s}^2$

3.3 初步检验与比较分析

用来检验的实测资料取自青岛发电厂扩建工程环境影响研究的夏季测试, 经过对测试结果与附近气象台(站)的常规观测资料相比, 表明是可靠的。位置如图 1 中“ $\times$ ”所示的测试点的测试项目包括了小球测风和温度探空, 探测高度约 1500m 。

图 5 给出了该点 8 月 12 日下午 4 点的观测结果和模式计算结果。比较表明, 在 300m 高度以下风速分量的计算值与观测值相当吻合, 在 300m 以上, 虽然 u 分量比较结果在符号上相反, 但它的量值很小(小于 1.0m/s), 与 v 分量相比不是主导方向, 所以对整个风矢的方向影响较小; 对于占主导方向的 v 分量在底层(300m 以下)和高层(700m 以上)比较结果吻合较好, 中层(300m 至 700m) v 量值上有些差别, 但

方向上是一致的。模式计算结果低层风速与观测结果的一致说明了模式能够较好模拟地形(山地、海岸线)对风场的影响。较高层的较大偏差, 据分析, 主要为模式中简单考虑大尺度背景风的影响(如, 用地转风表征), 背景大尺度风的切变对风场的垂直分布有较大的影响, 特别是在高空受地面热力或机械强迫影响不大的情况下。如何较好地考虑大尺度风的影响是本模式进一步完善的重要内容之一。

图 2 中有地面流场与实测地面风向的比较。实测点有陆上点: 沧口、伏龙山、团岛、崂山, 水面上点: 朝连岛。经比较可知, 除了崂山点偏差稍大外, 模拟的流场与实测是吻合的。模式对湍流特征的模拟效能在文献[2]中已作过初步的检验, 本文中我们把本模式的结果与其他作者模拟的类似问题的结果^[6,9]进行了比较, 发现结果所示的分布特征和量值比较一致。

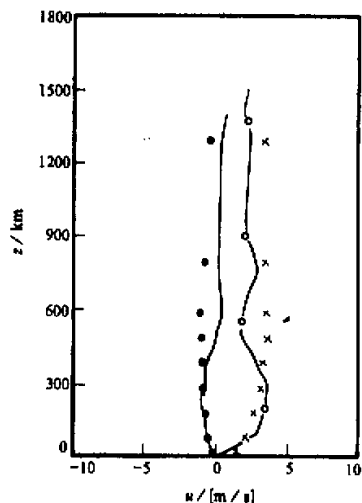


图 5 模式计算结果与实测结果的比较

• 计算 u , — 观测 u , × 计算 v , ○ 观测 v

4 结语

通过对细网格、非静力、能量闭合的边界层模式模拟结果的分析及与实测资料的比较, 说明了所建模式性能良好, 能较准确地模拟实际地形条件下边界层的特征。模拟分析表明: ①不规则的水陆交界线对地面流场的影响较大; ②山地的存在很明显使得垂直剖面的流场变复杂, 且岸边的地形使白天海风和夜里陆风增强; ③白天岸边陆上位温(垂直剖面)分布呈明显的“舌”状分布, 而夜里海面上的“舌”状分布不明显; ④白天在陆上不稳定层结内有较大的湍能(TKE), 这里湍流扩散系数(K_v)较大, 反映了较为剧烈的湍流交换。

如何较好地表征天气尺度风的影响等是完善本模式的重要内容。建立地—气相互作用的模式以及与扩散模式的联接对中小尺度的污染预报研究有重要意义, 也是本文要进一步做的工作。

参 考 文 献

- 1 王卫国、蒋维楣, 1994, 海岸 TIBL 的数值模拟 $\bar{E}-\epsilon$ 闭合模式的应用, 南京大学学报, 30(1), 179~183.
- 2 蒋维楣、王卫国, 1994, 太湖岸边边界层结构的数值试验, 南京大学学报, 庆祝朱炳海教授从事气象学教学科研工作六十年专刊, 375~380.
- 3 Pielke, R.A. 著, 张杏珍等译, 1991, 中尺度气象模拟, 气象出版社, 59~62.
- 4 Rodi, W. et al., 1985, In *Turbulence and Diffusion in Stable Environments*, (edited by J.C.R. Hunt), Oxford University Press, 111~140.

- 5 Holt, T. and Raman, S., 1988, A review and comparative evaluation of multilevel boundary layer parameterizations for first-order and turbulent kinetic energy closure schemes, *Reviews of Geophysics*, **26**(4), 761 ~ 780.
- 6 Huang, C.Y. and Raman, S., 1989, Application of the E- ϵ closure model to simulations of mesoscale topographic effects, *Boundary Layer Meteorol.*, **49**, 169 ~ 195.
- 7 Weiming Sha and Takeshi Kawamura et al., 1991, A numerical study on sea / land breezes as a gravity current: Kelvin-Helmholtz billows and inland penetration of the sea-breeze front, *J. Atmos. Sci.*, **48**(14), 1649 ~ 1665.
- 8 蒋维楣, 吴小鸣著, 1991, 海岸地区气象过程与大气扩散研究, 南京大学出版社, 7 ~ 14.
- 9 Jiang Weimei and Wu Xiaoming et al., 1992, A higher order closure model applied to research on the structure of the thermal internal boundary layer (TIBL), *Boundary Layer Meteorol.*, **61**, 301 ~ 307.

Numerical Simulation on the Structure of the Atmospheric Boundary Layer in Qingdao Regions

Wang Weiguo and Jiang Weimei

(Department of Atmospheric Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093)

Abstract In this paper, a 3-dimensional fine-mesh non-hydrostatic PBL model has been developed and used for numerical simulation on the PBL structure and turbulence characteristics in Qingdao regions. In order to improve the resolving power and accuracy of the model, the energy closure scheme (E- ϵ) was used without the hydrostatic restriction. The initial fields used in this model were from observed data. Wind, temperature and turbulence fields were analyzed in details. The results obtained from this model agree with observations. The results indicate that abruptness terrain and irregular coasts greatly affect the local wind fields and turbulence fields.

Key words 3-D nonhydrostatic PBL numerical model energy closure complex terrain