

对流边界层大涡模拟*

王雪梅¹⁾ 雷孝恩²⁾ 洪钟祥²⁾

(1) 中山大学环境科学系, 广州 510275; 2) 中国科学院大气物理所)

摘要 建立一个均匀地面上三维边界层的大涡模式, 增加物质守恒方程, 并将它用于对流边界层湍流和物质输送的研究, 得到了合理的平均场和湍流场.

关键词 对流边界层, 大涡模拟, 物质输送

分类号 X 16

对流边界是白天大气边界层的主要存在形式, 对流边界层以它强烈的扩散和输送作用以及独特显著的大涡结构引起人们的普遍关注, 担负了大部分热量水汽及污染物向整个大气层传送和稀释的作用, 因而研究对流边界层的特性, 了解它的结构及污染物输送规律不仅对该问题本身的认知有意义, 而且对许多实际环境问题也有重要意义.

目前研究大气边界层的手段很多, 本文采用大涡模拟方法来研究对流边界层, 大涡模拟是直接模拟原理和计算机能力的局限二者之间在某种程度上的折中, 其基本思路是: 对流动的大尺度湍流结构(大涡)进行直接求解, 而对小尺度湍流结构(次网格结构)进行参数化, 它比其它模式更能细致地反映湍流状况, 因此, 本文在理论基本上建立了三维大涡模式, 更细致地研究对边界层的湍流发生、发展及物质交换过程.

1 三维模式的建立

1.1 控制方程组

利用描述流体运动的 N-S 方程组和物质标量守恒方程, 采用浅对流、不可压、Boussinesq 假设, 在这样条件下适合大气运动的方程组可写为:

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + U_j \frac{\partial U_i}{\partial X_j} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial P}{\partial X_i} + \frac{\theta'}{\theta_0} g W_{3i} + \mathcal{E} \frac{\partial U_i}{\partial X_j \partial X_j} - \mathcal{K} U_k X_{jk}$$

$$\frac{\partial U_i}{\partial X_j} = 0 \quad \frac{d'}{dt} = -\frac{\theta'}{\theta_0} \quad \frac{\partial q}{\partial t} - U_j \frac{\partial q}{\partial X_j} = \mathcal{E} \frac{\partial q}{\partial X_j \partial X_j} + S'_q$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} - U_j \frac{\partial \theta}{\partial X_j} = \mathcal{E} \frac{\partial \theta}{\partial X_j \partial X_j} + S'_\theta$$

其中, q 为物质量.

* 中国科学院大气物理所 LAPC 资助

收稿日期: 1998-07-10 王雪梅, 女, 28岁, 讲师

1.2 网格参数化

LES对湍流运动方程组采用空间滤波的结果是使方程中出现了次网格通量项, 大涡模式的次网格闭合方法在很多方面直接借鉴于系综平均模拟的闭合技术, 但在两个方面有很显示的不同, 其一是, 大涡模拟所进行的空间过滤的宽度是与计算网格的大小有关的, 因此在次网格闭合过程中计算网格的尺度便成了一个重要的长度尺度; 其二, 大涡模式往往使网格尺度落在湍流惯性副区的尺度之内, 这样大气中的小尺度湍流可以利用 Kolmogorov 均匀各向同性湍流理论的研究成果, 预见惯性副区中湍流的统计特征, 在本论文中采用的是湍流动能闭合方案.

与系综平均模拟所作的闭合类似, 对次网格应力可作如下闭合假设

$$\tau_{ij} = -K_m \left[\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right]$$

这里仍沿用了系综平均闭合中所采用的符号, 但各项意义已不同, 而且仍遇到需要确定 K_m 的问题.

$$K_m = C_2 \lambda_2 e^{1/2}$$

式中, C_2 为一系数, λ_2 为次网格湍流长度尺度, e 为次网格湍流动能.

$$e = \frac{1}{2} \left(\overline{U'^2} + \overline{V'^2} + \overline{W'^2} \right) \quad \lambda_2 = \min \left[\Delta, 0.76 e^{1/2} \left(\frac{g}{\theta_0} \frac{\partial \theta}{\partial z} \right)^{-1/2} \right]$$

次网格湍能方程为

$$\frac{\partial e}{\partial t} = -\bar{u}_i \frac{\partial e}{\partial x_j} - \overline{U'_i U'_j} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\overline{W'\theta'}}{\theta_0} g - \frac{\overline{\theta' U'_i} \left(\overline{e + d'/d_j} \right)}{\partial x_i} - X$$

最后两项可以表示为

$$\overline{U'_i} \left(\overline{e + d'/d_j} \right) = -2K_m \frac{\partial e}{\partial x_i} \quad X = \frac{C e^{3/2}}{\lambda_2}$$

其中, $C = 0.19 + 0.51 \frac{\lambda_2}{\Delta}$, Δ 为特征网格距.

次网格热量扩散系数 K_m 取如下关系

$$K_m = \left[1 + 2 \frac{\lambda_2}{\Delta} \right] \cdot K_m$$

1.3 模拟区域

水平方向网格点数为 20×20 , 格距为 200 m, 垂直网格数为 40, 格距为 50 m.

2 模拟应用

图 1 显示了模式初始化后 50 min 的风速场及位温场结构, 图 1 给出的是经过模式区域正中 ($y = 10 \Delta y$) 的 $X-Z$ 截面上等值线图. 从图 1 可以看出, 在水平 4 km 的范围内分布着 3 个对流泡, 平均距离 1.6 km, 垂直方向热泡足以贯穿整个对流层, 第一个热泡还进入了上层温层; 从位温等直线图可以看出温度场与垂直速度场的大致对应关系; 另外从位温和物质等直线图还可以看出瞬时对流层顶盖的大致位置及相应的波动情况, 此时边界层高度大约为 1000 m, 从顶部逆温层等值线密集的区域看, 波动范围可达 250 m; 从水平速度场可看出, 在边界层内部, 水平速度较小, 在边界层顶附近出现风速极大值, 这表明垂直对流运动能在受到上层逆温顶盖的强迫作用, 很大一部分转变为水平运动动能.

图 2 给出了热量和物质垂直通量廓线 (分别用地表热量和物质通量无量纲化), 从图 2a

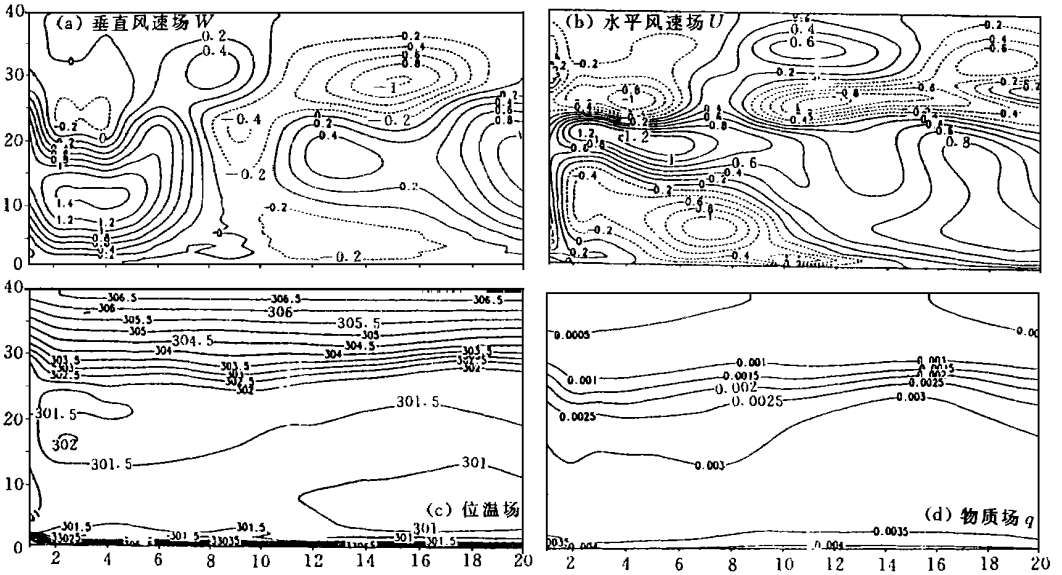


图 1 10号网格处 X-Z截面 U、W、q 分布

中可以看出热量通量从地面到边界层顶呈线性减小趋势，并且在对流层顶附近出现了负的极大值，而后又逐渐增大到零并维持到模式顶，边界层顶部的负值是由于边界层内部空气与上部逆温层中较暖空气的夹卷作用，使热量从逆温层传到边界层中造成的；从图中还可以看出次网格项的贡献在边界层中部以上几乎为 0，但 400 m 以下到地面逐渐增大，这是因为地面附近受地表制约使湍流尺度减小，次网格的贡献增大，这与理论结果是相符的。

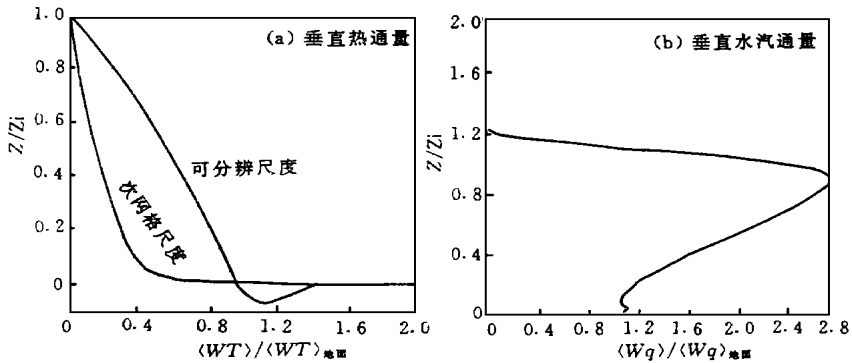


图 2 热量通量和物质通量廓线

物质通量廓线在图 2b 中，在大约 0.9 Z_i 以下廓线接近线性增加，在 0.9 Z_i 附近取得最大值后又递减，到 1.2 Z_i 减小到零，这一结论与 Deardorff (1974) 及 Andre (1978) 的三阶闭合模式模拟水汽的结果是一致的。

3 结 语

本文建立了一个均匀平坦下垫面上考虑物质输送的大气对流边界层大涡模式，运用它

进行了理想条件下对流边界模拟及探讨, 不仅得到合理的湍流场而且还得到在对流边界层中污染物分布和扩散与湍流场的相互关系, 更为细致地了解污染物的输送.

参 考 文 献

- 1 蔡旭晖, 陈家宜. 一个对流边界层大涡模式的建立和调试. 大气科学, 1995, 19 (4): 415~ 421
- 2 Deardorff J W. Three-dimensional numerical study of height and mean structure of a heated planetary boundary layer. Bloun Layer Meteor, 1974 (7): 81~ 105
- 3 Mason P J. Large-eddy simulation of the convective atmospheric boundary layer. J Atmos Sci, 1989, 46 1492~ 1516
- 4 Moeng C H. A large-eddy-simulation model for the study of planetary boundary layer turbulence. J Atmos Sci, 1984, 41 2052~ 2061

A Large-Eddy Simulation Model on Convective Boundary Layer

*Wang Xuemei** *Lei Xiao'en* *Hong Zhongxiang*

Abstract A large-eddy model is established to simulate the convective boundary layer (CBL) on the flat and homogenous earth surface and a pollutant conservation equation is added to the model. It has been added to study the turbulence and pollutant transportation of CBL and reasonable mean and turbulent fields are obtained.

Keywords convective boundary layer, large-eddy model, pollutant transportation

* Department of Environmental Science, Zhongshan University, Guangzhou 510275, China