

文章编号: 0559-9350 (2002) 09-0055-06

大涡模拟水环境中污染物团的运动规律

马福喜¹, 李志伟²,

(1. 华北水利水电学院 水利系, 郑州 450045; 2 香港理工大学 土木与结构工程系, 香港)

摘要: 本文采用大涡模拟方法封闭引入浮力特性并经空间平均后的 Navier-Stokes 紊流方程, 对水环境中污染物的运动规律进行研究。在用有限差分法对控制方程进行求解时, 用破开算子法将控制方程分为对流、扩散和源项三部分, 其中对流项用 QUICKET 程式求解, 扩散项用中心差分求解, 源项用 Gauss-Seidel 迭代法求解。数值计算结合物理模型结果表明, 污染物团在水环境中运动除有时均定量关系之外, 还有三大定性规律: 第一, 污染物团在时间和空间上具有不规则性; 第二, 污染物团后部是空的; 第三, 在同一条件下进行多次试验 (数学和物理), 污染物团的运动是不一样的。计算表明大涡模拟要优于通常的 $\kappa-\epsilon$ 紊流模型, 它不但能够象 $\kappa-\epsilon$ 紊流模型那样计算出污染物在水环境中的时均运动规律, 而且能够计算出其在空间上的不对称发展过程, 能够准确地再现其在物理模型中的不对称运动特性。计算结果无论从定性特性还是从定量关系上都与试验结果吻合一致。

关键词: 紊流; 大涡模拟; 污染物团

中图分类号: X143

文献标识码: A

污染物在水体中的运动规律对水环境具有重大的影响。近 50 年来人们对它进行了深入广泛的物理和数学两种模型的研究。SCORER (1957)^[1] 发现污染物团在静水中的运动是局限在一个锥体范围内的, 而同一组参数不同次试验, 锥体的顶角之间是存在差异的。Turner (1957)^[2] 也发现不同次试验之间污染物团的形状存在明显的差异。Koh 和 Chang (1973)^[3] 用一个积分模型对污染物团的时均总体变量进行了计算。Sin 和 Zhang (1994)^[4] 用一个二维 $k-\epsilon$ 模型, Li 和 Zhang (1996)^[5] 及 Li (1997)^[6] 用一个三维混合长模型, Yu 和 Li (1998)^[2] 及 Ma 和 Li (2001)^[8] 用一个三维 $k-\epsilon$ 模型等, 对不同种类和形式的污染物的运动进行了数值研究。然而这些研究均局限于对它的时均特性的研究上, 对它在不同试验中观察到的差异性却无能为力。1994 年 Morton^[9] 等利用大涡模拟方法成功地模拟出了这一差异性。大涡模拟是近 30 年来才发展起来的一种新型的紊流模型。它是对流体运动中起重要作用的大涡进行直接计算, 对其中起较小作用的小涡进行模拟的一种方法。它能够反映出流体中的脉动运动, 进而能计算出污染物在其中运动的差异性。本文将结合物理模型试验, 采用大涡模拟方法不但对污染物运动的时均特性, 而且对它的微观脉动特性进行精细模拟。

1 数学模型

类似于推导 $k-\epsilon$ 紊流模型方程的办法, 对三维不可压缩具有浮力效应的 Navier-Stokes 方程进行空间平均 (不象前者那样取时间平均) 可得大涡模拟时的紊流控制连续方程和动量方程 (Li 和 Wang 2000)^[10]:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

收稿日期: 2001-05-28

基金项目: 香港理工大学科研基金及华北水利水电学院重点学科和重点实验室基金资助项目

作者简介: 马福喜 (1963-), 男, 河南辉县人, 副教授, 主要研究方向: 水工水力学、环境、泥沙、波浪等的数值模拟。

$$\begin{cases} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho_{ref}} \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial[(\nu + \nu_t)S_{xx}]}{\partial x} + \frac{\partial[(\nu + \nu_t)S_{xy}]}{\partial y} + \frac{\partial[(\nu + \nu_t)S_{xz}]}{\partial z} + g_x \frac{\rho - \rho_{ref}}{\rho_{ref}} \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{1}{\rho_{ref}} \frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\partial[(\nu + \nu_t)S_{xy}]}{\partial x} + \frac{\partial[(\nu + \nu_t)S_{yy}]}{\partial y} + \frac{\partial[(\nu + \nu_t)S_{yz}]}{\partial z} + g_y \frac{\rho - \rho_{ref}}{\rho_{ref}} \\ \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{1}{\rho_{ref}} \frac{\partial P}{\partial z} + \frac{\partial[(\nu + \nu_t)S_{xz}]}{\partial x} + \frac{\partial[(\nu + \nu_t)S_{yz}]}{\partial y} + \frac{\partial[(\nu + \nu_t)S_{zz}]}{\partial z} + g_z \frac{\rho - \rho_{ref}}{\rho_{ref}} \end{cases} \quad (2)$$

其中式 (2) 中密度差项是污染物的浮力效应项 (Yu 和 Li, 1998)^[7]。

相应的污染物浓度方程为 (Li, 1997):

$$\begin{aligned} \frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} + w \frac{\partial C}{\partial z} = \\ \frac{\partial}{\partial x} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_{St}} \right) \frac{\partial C}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_{St}} \right) \frac{\partial C}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_{St}} \right) \frac{\partial C}{\partial z} \right] \end{aligned} \quad (3)$$

引入 Smagorinsky 涡粘性模型 (Smagorinsky, 1963):

$$\nu_t = L^2 \sqrt{0.5 [S_{xx}^2 + S_{yy}^2 + S_{zz}^2 + 2(S_{xy}^2 + S_{yz}^2 + S_{zx}^2)]} \quad (4)$$

$$L = 2C_s (\Delta_x \Delta_y \Delta_z)^{1/3} \quad (5)$$

式中: ν_t 是小涡的涡粘性系数; L 是紊动特征长度; C_s 是模型常数, 取值范围为 0.1~0.2, 本文取 0.1; Δ_x , Δ_y 和 Δ_z 是网格尺寸。式 (2) 和 (4) 中的各速度应变为:

$$S_{xx} = 2 \frac{\partial u}{\partial x}, S_{yy} = 2 \frac{\partial v}{\partial y}, S_{zz} = 2 \frac{\partial w}{\partial z};$$

$$S_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}, S_{yz} = \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y}, S_{zx} = \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x}$$

污染物密度 ρ 由下式确定:

$$\rho = \rho_{ref} + \frac{\partial \rho}{\partial C} (\rho - \rho_{ref}) = \rho_{ref} [1 + \beta (\rho - \rho_{ref})], \quad (6)$$

其中 $\beta = \frac{1}{\rho_{ref}} \frac{\partial \rho}{\partial C}$ 。

在上述各控制方程中 x , y 和 z 是坐标变量; u , v 和 w 分别是空间平均速度在坐标轴 x , y 和 z 向的分量; P 是动水压强; g_x , g_y 和 g_z 分别是重力加速度在 x , y 和 z 向的分量, 且 $g_x = 0$, $g_y = 0$, $g_z = -9.8 \text{ m/s}^2$; ρ 和 ρ_{ref} 分别是污染物及环境水的密度; C 是污染物浓度; σ_{St} 是 Schmidt 数, 取值 0.5 (Lauder 和 Spalding, 1974)^[12]。

这里用有限差方法解上述模型方程。用破开算子法将控制方程分为对流、扩散和源项三部分。其中对流项用 QUICKEST (Li, 1997)^[6] 程式求解, 扩散项用中心差分求解, 源项用 Gauss-Seidel 迭代法求解。

计算初始条件假定流体在长方体水池中处于静止状态 (见图 1); 污染物团从水面放入。为反映污染物团在初始时刻放入时对水体的扰动, 在初始时刻污染物团所占据的空间点上加入速度随机脉动量, 大小为

$(2\% \sim 10\%) W_0$, 其中 $W_0 = 0.9 \sqrt{g \frac{\rho_0 - \rho_{ref}}{\rho_{ref}} D_0}$ (Score, 1957)^[11], 而

$\frac{\rho_0 - \rho_{ref}}{\rho_{ref}}$ 为初始相对密度差; D_0 为污染物团当量直径。

边界条件除水面采用刚盖假定外, 其余均为固体不可滑移条件。

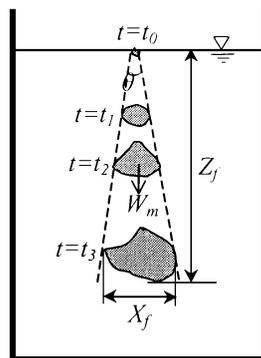


图 1 污染物在水环境中运动示意

2 计算结果与试验结果对比分析

本文将要研究的污染物在水环境中运动见示意图 1。在数值模拟的同时，于试验室中进行了相应的物理模型观察。图 2 为三组观察结果的立面照片。图 3 为数值模拟的相应结果，它为同一组物理参数的 10 组不同的计算结果。数值计算范围：长 0.6m，宽 0.6m 及水深 1.2m。计算采用 $65 \times 65 \times 135$ 网格。污染物参数： $(V_0 B_0)^{1/2} = 5.49 \text{cm}^{3/2}$ ，其中 V_0 为初始体积，占据相应 $7 \times 7 \times 7$ 个网格。计算时

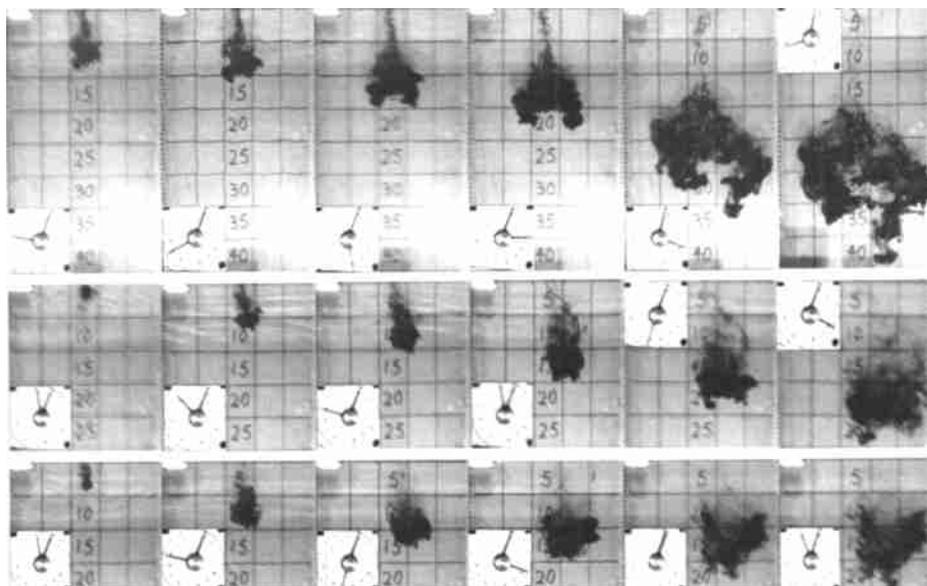


图2 实验中对污染物运动的观察

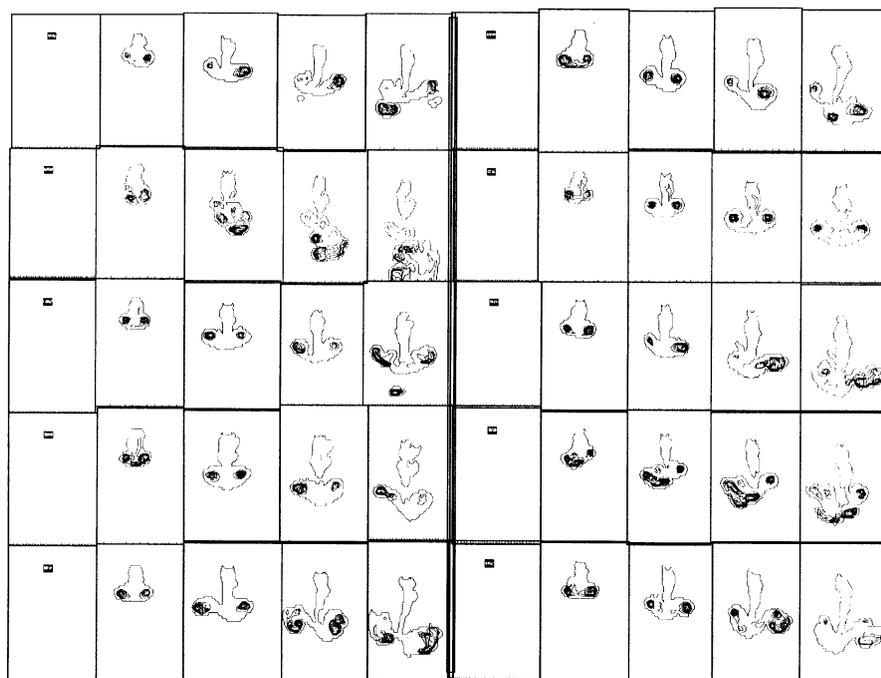


图3 计算污染物运动（竖向中心切面）

间步长 $\Delta t = 0.01\text{s}$ ，计算时间 10s 。从图 2 和图 3 可以看出，两者定性是一致的，并且同时展现出：(1) 污染物的运动尽管是在对称的物理空间中运动，它的运动却具有不对称性；(2) 污染物团显示出凹凸特性；(3) 同一组参数在每次不同的实践中具有不同的运动结果。图 4 为 Scorer 从水体上方向下的一

个观察结果，图 5 是相应图 3 的水平剖面上的结果。这两个图除进一步反映出上述三个特性外，还反映出了污染物团的空尾特性。图 6~图 8 是计算的污染物运动时均定量关系，它们是 10 组结果的系宗平均，其中各符号定义见图 1。具体结果是：(1) 污染物前锋位置 Z_f 正比于时间 t 的 0.51 次方，这与 Scorer 的试验平均结果 0.5 次方基本一致；(2) 污染物扩散宽度 L_f 与前锋位置关系是 $Z_f = 1.9L_f$ ，亦即锥体顶角 $\theta = 30^\circ$ ，Scorer 试验所得比例系数范围是 1.5~2.5，其相应的平均值是 2；(3) 污染物团运动速度 W_m 正比于 $\frac{1}{Z_f}$ ，与 Scorer 的试验结果完全一致。

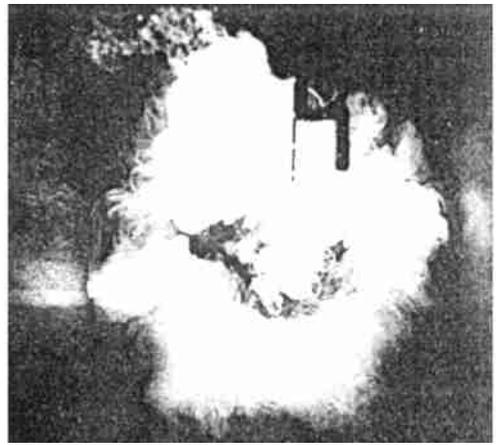


图 4 污染物团空尾特性 (Scorer, 1957)^[1]

为比较其见，图 9 给出了作者用 $k-\epsilon$ 模型计算所得污染物浓度等高线图 (Ma 和 Li, 2001)^[8] 的算例。它表明 $k-\epsilon$ 模型只能给出对称的平均结果，而不能计算出污染物的真实运动情形，同时它也没有能够模拟出污染物的空尾特性。

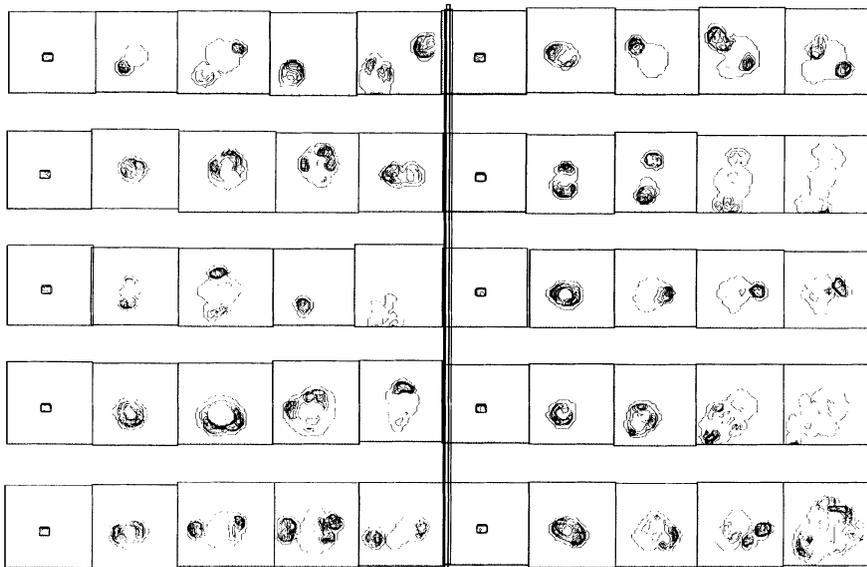


图 5 计算污染物团空尾特性

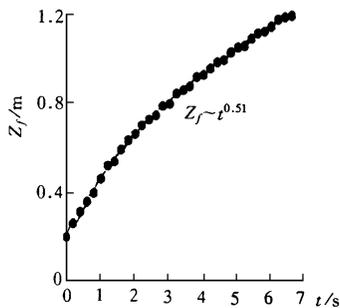


图 6 污染物前锋位置

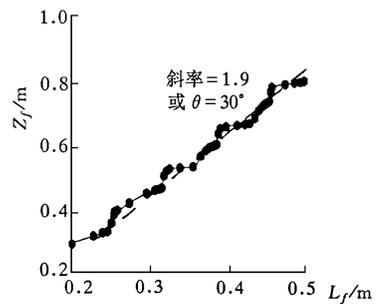


图 7 污染物扩散宽度随前锋位置的变化

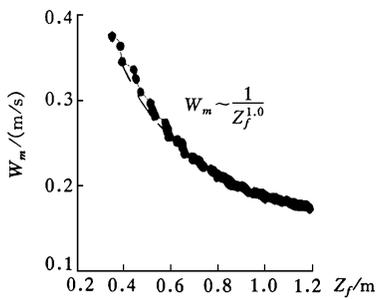


图8 污染物团下降速度随其位置的变化

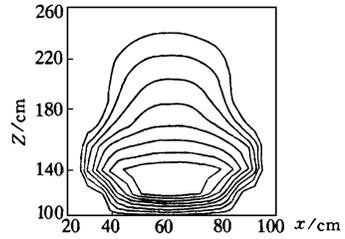


图9 $k-\epsilon$ 模型计算所得污染物浓度等高线

3 结论

采用大涡模拟的办法对污染物在水体中的运动进行了成功的模拟。数值计算及物理模型试验表明：定性上（1）污染物尽管在对称的物理空间中运动，它的运动却具有不对称性；（2）污染物团显示出凹凸特性；（3）同一组参数在不同的实践中具有不同的运动结果。定量上（1）污染物前锋位置正比于时间的 0.51 次方；（2）污染物扩散宽度与前锋位置成正比关系，比例系数约为 1.9，或者说污染物运动将限于一个顶角为 30° 的锥体之内；（3）污染物团运动速度与前锋位置成反比关系。计算结果无论从定性特性还是从定量关系上都与试验结果吻合一致。

参 考 文 献：

- [1] Scorer R S. Experiments on convection of isolated masses of buoyant fluid [J] . J. Fluid Mech. 1957, 2: 583—594.
- [2] Turner J S. Buoyant vortex rings [J] . Proc. R. Soc. Lond., A. 1957, 239: 61—75.
- [3] Koh R C Y, Chang Y C. Mathematical model for barged ocean disposal of wastes [R] . Pacific Northwest Envir. Res. Lab. Nat. Envir. Res. Ctr., Corvallis, Ore. 1973.
- [4] Sin Y S, Zhang L W. Numerical modelling of sludge dumping in a stratified environment [C] . Proc., Int. Conf. On Hydr. in Civ. Engrg. 1994: 327—332.
- [5] Li C W, Zhang F. Three-dimensional simulation of plumes using a split-operator scheme [J] . Int. J. Numer. for Heat and Fluid Flow 1996, 6 (2): 25—36.
- [6] Li C W. Convection of particle plumes [J] . J. Hydr. Res. 1997, 35 (3): 363—376.
- [7] Yu T S, Li C W. Instantaneous discharge of buoyant fluid in cross-flow [J] . J. Hydr. Engrg., ASCE 1998, 124 (11): 1161—1176.
- [8] Ma F X, Li C W. 3D Numerical Simulation of Ambient Discharge of Buoyant Water [J] . Applied Numerical Modeling, 2001, 25 (5): 375—384.
- [9] Morton B R, Nguyen K C, Cresswell R W. Similarity and self-similarity in the motion of thermals and puffs [M] . Recent research Advances in the Fluid Mechanics of turbulent jets and Plumes. 1994.
- [10] Li C W, Wang J H. Large eddy simulation of free surface shallow-water flow [J] . Int. J. Numer. Meth. Fluids 2000, 34: 31—46.
- [11] Smagorinsky J. General circulation experiments with the primitive equations. Part I: the basic experiment [J] . Monthly weather review 1963, 91: 91—152.
- [12] Launder B E, Spalding D B. The numerical computation of turbulent flow [J] . Comp. Meth. Appl. Mech. and Engrg. 1974, 3: 269—289.

Large eddy simulation of pollutant movement in water

MA Fu-xi¹, LI Zhi-wei²

(1. North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power, Zhengzhou 450045, China;

2 Hong Kong Polytechnic University, Hung Hom, Kowloon, Hong Kong, China)

Abstract: The large eddy simulation (LES) method is applied to the closure of N-S equations in the study of pollutant movement in water. The 3-D buoyancy extended large eddy model is established for numerical simulation. The governing equations are split into three parts during solving the finite difference equations for advection, dispersion and propagation. The advection part is solved by QUICKEST program. The dispersion part is solved by central difference method and the propagation part is solved implicitly by using the Gauss-Seidel iteration method. The numerical simulation is in good agreement with experimental result. It is concluded that: 1) pollutant lump has an appearance of characteristic protuberances; 2) hollow is happened to the rear of the pollutant lump; 3) variability between different pollutant realizations may exist even if the events have the same parameters. The result shows that the LES method is better than the $k-\epsilon$ model.

Key words: turbulent flow; large eddy simulation; pollutant lump; experiments

(上接第 54 页)

Model for dilapidation mechanism of riverbank

HUANG Ben-sheng^{1,2}, BAI Yu-chuan², WAN Yan-chun^{2,3}

(1. Guangdong Research Institute of Water Resources and Hydropower, Guangzhou 510610, China;

2. Tianjin University, Tianjin 300072, China; 3. South China University of Technology, Guangzhou 510610, China)

Abstract: A model for analyzing the stability of riverbank and predicting the dilapidation is proposed. Two probable modes of failure are to be considered including rotational failure and plane failure. The effects of pore water pressure and lateral static pressure on the failure surface are analyzed. Probabilistic approach is applied to predict the river section with potential risk of dilapidation. The model is used to calculate the stability of a river section in the upstream of Zhujiang River. The result shows that the river water level, groundwater level, configuration of riverbank as well as the erosion resistance of soil are main factors affecting the stability of the riverbank.

Key words: stability of riverbank; dilapidation; failure mode; probabilistic approach