

# 钱塘江江心排污的数值模拟

毛献忠 韩曾萃

(浙江省河口海岸研究所 杭州 310016)

**摘 要** 从立面二维非恒定流体动力学方程出发,应用 $k-\epsilon$ 湍流模式计算流场,再用准三维的浓度对流-扩散方程,即考虑了侧向扩散的立面二维浓度控制方程,模拟了钱塘江江心6个竖管排污在潮流作用下近区浓度场,其结果和实际观测值基本吻合。

**关键词** 江心排污  $k-\epsilon$  湍流模式 浓度场

**分类号** X703

## 1 引 言

随着工业生产的迅猛发展和人民生活水平的日益提高,城市的污水排放量越来越大,污水处置是现代城市所面临的重大环境工程问题。目前,我国许多沿海城市已经实施或正在筹建海洋和江河污水处置工程,以解决污水的环境问题。

杭州市钱塘江污水河口处置工程已建成并投入运行,为了能及时了解和预测污染稀释过程和污染影响范围,需要采用数学模型来研究排放口近区排放动量对流场的干扰、污染物在近区的掺混稀释效果。同时也为其他工程选取排放口的位置和排放方式提供理论依据。

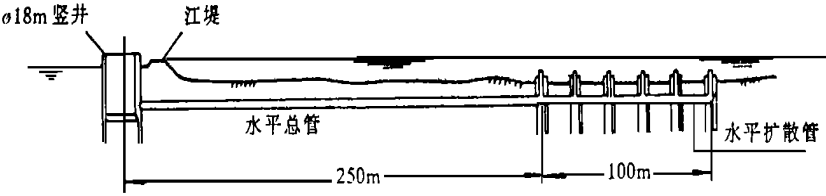


图1 排放口工程剖面图

Fig. 1. Profile of discharge outlet

钱塘江江心多点排污是把排污管从江底部垂直于岸边伸入江心,在排污的干管上设有六根垂直向上的排污支管,间距20m (图1),目前,日排污量约23万 t。观测资料表明,近区底部的浓度绝对值远大于远区,而且超标值主要在近区,因而近区的浓度计算比远区显得重要。在近区,污染物的浓度垂向分布极不均匀,且其垂向梯度比水平梯度大,由于平面二维变量都采用水深平均的概念,因而无法反映近区浓度在垂向的分布,因此用立面二维的 $k-\epsilon$ 模型来研究较平面二维更合适。但立面二维的计算又是把一定间距多点排放方式概化为无限密集的窄

本文于1995年3月24日收到,1995年8月4日收到修改稿。

\* 国家“八五”攻关项目子课题。

缝式排放口，这种假设和钱塘江江心100m 中六点排放的实际情况相差甚远。通过多组次的验算，本文采用以立面二维为基础同时又考虑侧向扩散的准三维浓度对流-扩散方程，使计算更符合实际。

2 数学模型

2.1 立面二维  $k$ - $\epsilon$  湍流模式的基本方程

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(u \Phi) + \frac{\partial}{\partial z}(w \Phi) = \frac{\partial}{\partial x}(\Gamma_{\Phi} \frac{\partial \Phi}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial z}(\Gamma_{\Phi} \frac{\partial \Phi}{\partial z}) + S_{\Phi}$$

(1)

式中  $\Phi$ 代表所求问题的因变量，可认为是  $u, w, k, \epsilon$  的函数； $u$  及  $w$  分别为纵向  $x$  及垂向  $z$  的时均流速； $k$  为湍能动能； $\epsilon$  为湍能耗散率； $\Gamma_{\Phi}$  为扩散系数； $S_{\Phi}$  为源或汇项。当  $\Phi$  为某一特定变量时， $\Gamma_{\Phi}$  和  $S_{\Phi}$  有相应的意义和表达式，式 (1) 亦有特定的意义，不考虑浮力作用时，式 (1) 包含的具体方程及相应符号的表达式如表1所示。

表1 式 (1) 包含的具体方程及相应符号的表达式

Table 1. Specific equations and appropriate variables in Eq. (1)

| 方 程            | $\Phi$     | $\Gamma_{\Phi}$           | $S_{\Phi}$                                                                                                                                                                                |
|----------------|------------|---------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 连续方程           | 1          | 0                         | 0                                                                                                                                                                                         |
| $x$ 方向动量方程     | $u$        | $\nu_e$                   | $-\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x}(\nu_t \frac{\partial u}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial z}(\nu_t \frac{\partial w}{\partial x})$     |
| $z$ 方向动量方程     | $w$        | $\nu_e$                   | $-g - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x}(\nu_t \frac{\partial u}{\partial z}) + \frac{\partial}{\partial z}(\nu_t \frac{\partial w}{\partial z})$ |
| $k$ 方 程        | $k$        | $\nu_t/\sigma_k$          | $G_k - \epsilon$                                                                                                                                                                          |
| $\epsilon$ 方 程 | $\epsilon$ | $\nu_t/\sigma_{\epsilon}$ | $\frac{\epsilon}{k}(C_1 G_k - C_2 \epsilon)$                                                                                                                                              |

表中  $p$  为压强， $\rho$  为水的密度， $\nu_t$  为有效湍流扩散系数； $\nu_t$  为湍流粘性系数， $\nu_k, \nu_{\epsilon}$  及  $G_k$  值由下式计算

$$G_k = 2\nu_t[(\frac{\partial u}{\partial x})^2 + (\frac{\partial w}{\partial z})^2] + \nu_t(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x})^2$$
$$\nu_t = C_{\mu} \frac{k^2}{\epsilon}; \quad \nu_e = \nu_t + \nu$$

$\nu$  为水的运动粘性系数，系数  $C_{\mu}$  等采用值如下：

| 系 数   | $C_{\mu}$ | $C_1$ | $C_2$ | $\sigma_k$ | $\sigma_{\epsilon}$ |
|-------|-----------|-------|-------|------------|---------------------|
| 采 用 值 | 0.09      | 1.44  | 1.92  | 1.0        | 1.3                 |

2.2 浓度的对流-扩散方程

为了更真实地模拟浓度的对流和扩散过程，从三维的浓度对流-扩散方程出发：

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial (uC)}{\partial x} + \frac{\partial (vC)}{\partial y} + \frac{\partial (wC)}{\partial z}$$
$$= \frac{\partial}{\partial x}(E_x \frac{\partial C}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(E_y \frac{\partial C}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(E_z \frac{\partial C}{\partial z})$$

(2)

假设河流没有横向流动， $v = 0$ ，但保留三个方向的扩散项，则方程为

$$\begin{aligned} & \frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial (uC)}{\partial x} + \frac{\partial (wC)}{\partial y} \\ &= \frac{\partial}{\partial x} \left( E_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( E_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( E_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad (3)$$

这就是考虑了侧向扩散影响的立面二维浓度控制方程, 和通式 (1) 相比, 增加了浓度侧向扩散项  $\frac{\partial}{\partial y} \left( E_y \frac{\partial C}{\partial y} \right)$ ,

$$\text{而 } E_x = E_z = \frac{v}{\sigma_c} \quad \sigma_c = 0.9 \quad E_y = E_0 \left[ 1 - \left( \frac{x}{x_0} \right)^2 \right] + E_c \quad E_0 = 0.8 \quad E_c = 0.005。$$

### 2.3 初始条件

所有变量都给定初始条件

$$\Phi(x, z, t) \Big|_{t=t_0} = \Phi(x, z, t_0)$$

对于稳定格式, 其假设误差到一定时刻后即消失。

### 2.4 边界条件

(1) 进流条件给定来流速度和来流本底浓度, 可从实际观测值得到。

$$u(x, z, t) \Big|_{x=x_0} = u_0(x_0, z, t) \quad W(x, z, t) \Big|_{x=x_0} = 0 \quad C(x, z, t) \Big|_{x=x_0} = C_0(x_0, z, t)$$

(2) 排放口给定污水排放速度和排放浓度

$$u(x, z, t) \Big|_{\text{排放口}} = u_i \quad w(x, z, t) \Big|_{\text{排放口}} = w_i, \quad C(x, z, t) \Big|_{\text{排放口}} = C_i$$

根据动量守恒和污染物质质量守恒的原理, 由喷口射流的动量和浓度化引到一定宽度 (因实际排污有三个方向对称的侧向分流速, 故取5m 作为统一的宽度或者称厚度) 后的垂向分流速、纵向分流速和浓度。即

$$\rho q w_0 \sin \alpha \Delta t = \rho b_i h_i w_i \Delta t \quad (4)$$

$$(q w_0 \cos \alpha + b_i h_i U_i U_i) \rho \Delta t = \rho b_i h_i u_i w_i \Delta t \quad (5)$$

$$(q \rho C_0 + U_i b_i h_i \rho C_u) \Delta t = (U_i b_i h_i + q) \rho C_i \Delta t \quad (6)$$

$$\therefore w_i = \left( \frac{q w_0 \sin \alpha}{b_i h_i} \right)^{1/2} \quad (7)$$

$$u_i = \left( \frac{q w_0 \cos \alpha + b_i h_i U_i U_i}{b_i h_i} \right)^{1/2} \quad (8)$$

$$C_i = \frac{q C_0 + U_i b_i h_i C_u}{q + U_i b_i h_i} \quad (9)$$

式中  $b_i$ ,  $h_i$  为化引一定的宽度和高度;  $w_0$  为原喷口射流流速, 一般为2.8~3.2m/s;  $C_0$  为污水排放浓度;  $U_i$  为河流底层流速;  $w_i$ 、 $u_i$ 、 $C_i$  为化引到一定宽度后的垂向流速、纵向流速和浓度;  $\alpha$  为射流的角度。

曾比较过不同的化引宽度, 考虑侧向扩散的作用, 最后以5m 的计算结果最符合实际情况,  $h_i$  为排放管的高度,  $h_i = 0.2\text{m}$ 。

(3) 自由面边界 自由面与大气接触, 假设自由滑流边界, 则法向应力  $P_z = -P_a$  (大气压), 切向应力  $\tau = 0$ 。由相对压强知:  $P_z = 0$ ,  $\tau = 0$ , 即自由水面作“准”刚盖假设。

$$\frac{\partial \Phi}{\partial z} = 0 \quad \Phi = u, c, k$$

(4) 固壁边界 固壁边界上的速度应满足无滑移条件, 而固壁上的污染物满足不穿透性

则有

$$u = 0 \quad w = 0 \quad k = 0 \quad \frac{\partial C}{\partial z} = 0$$

由于  $k-\epsilon$  模式只适应于流动中湍流充分发展的区域，紧靠固壁的一层流动的变量由壁函数确定。

(5) 出流条件

出流给定计算补充条件， $w = 0 \quad \frac{\partial p}{\partial x} = 0 \quad \varphi u, c, k$

3 计算方法

用有限控制体积法将式 (1) 离散化 (见图2)，并用 SIMPLE 算法<sup>[1]</sup>，代入初始条件和边界条件迭代求解。

浓度侧向扩散项  $\frac{\partial}{\partial y} (E_y \frac{\partial C}{\partial y})$  用中心差分离散

$$\frac{\partial}{\partial y} (E_y \frac{\partial C}{\partial y}) = E_y \frac{2(C_{\text{侧边界}} - C)}{\Delta y^2} \tag{10}$$

假设排放点的两侧边界条件相同，侧边界取在两排排放点之间的中心垂线上，四堡处  $\Delta y = 10\text{m}$ ，在计算中用排放点上下游边界的平均浓度值近似侧边界值。

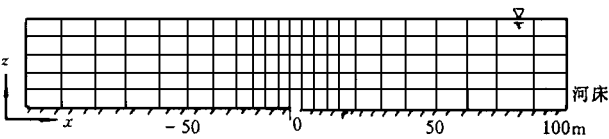


图2 计算网格示意图

Fig. 2. Calculation grid

潮汐河流进出边界是随潮汐变化而交换的，计算时，根据流速判断，流速为正时，为落潮过程，上游为进流，

下游为出流；当流速为负时，则下游为进流，上游为出流。憩流时，计算域内所有变量都保持不变，只要进出口边界条件交换即可。当涨潮的时候，也同样处理。

4 计算结果和分析

分析算例中选用的水文条件引自文献①\*中的第3次观测 (92. 10. 24) 和第4次观测 (93. 3. 1)。

第3次观测到的是中潮，上游径流量为  $450\text{m}^3/\text{s}$ ，潮差为  $\Delta z = 1.30\text{m}$ ，计算了一个潮周，包括落潮流、憩流、涨潮流、憩流和落潮流过程；第4次观测到的上游径流量  $Q = 870\text{m}^3/\text{s}$ ，潮差  $\Delta z = 0.20\text{m}$ ，全部观测均为落潮流，没有涨潮流。

\* ①浙江省河口海岸研究所. 杭州市城市污水排入钱塘江的观测分析总报告. 1993

表2 计算值和观测值的比较 单位: mg/L

| Table 2. Comparison of computational values and surveyed values |     |      |      |      |      |      |      |      |  |
|-----------------------------------------------------------------|-----|------|------|------|------|------|------|------|--|
| 项                                                               | 目   | 落 潮  |      |      |      | 涨 潮  |      |      |  |
| 距排放口距离                                                          |     | 25m  | 50m  | 100m | 300m | 25m  | 50m  | 100m |  |
| 第3次观测<br>的水文条件下                                                 | 观测值 | 5.51 | 4.99 | 5.37 | 5.34 | 8.87 | 8.97 | 8.27 |  |
|                                                                 | 计算值 | 6.66 | 6.40 | 6.26 | 5.83 | 8.17 | 8.10 | 8.06 |  |
|                                                                 | 误 差 | 20%  | 28%  | 16%  | 9%   | 8%   | 10%  | 2%   |  |
| 第4次观测<br>的水文条件下                                                 | 观测值 | 4.48 | 3.63 | 3.89 | 3.69 |      |      |      |  |
|                                                                 | 计算值 | 3.93 | 3.83 | 3.78 | 3.58 |      |      |      |  |
|                                                                 | 误 差 | 12%  | 12%  | 3%   | 3%   |      |      |      |  |

图3~图9和表2是第3次和第4次观测水文条件下的计算值和观测值的比较。从图和表的结果看, 计算值和观测值吻合尚好, 其平均误差为10%, 最大误差为28%, 计算基本能反映实际情况。

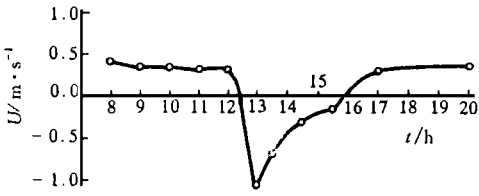


图3 水流过程图  
Fig. 3. Velocity graph

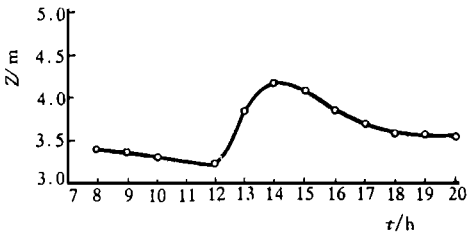


图4 水位过程线  
Fig. 4. Tidal level graph

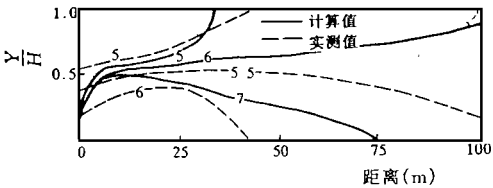


图5 落潮时平均浓度比较  
Fig. 5. Comparison of ebb-averaged concentration

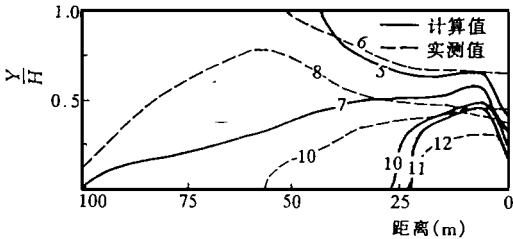


图6 涨潮时平均浓度比较  
Fig. 6. Comparison flood-averaged concentration

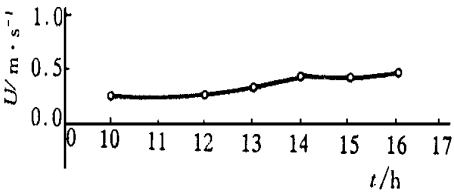


图7 水流过程图  
Fig. 7. Velocity graph

从计算结果可看出, 在近区, 沿水深方向的浓度分布很不均匀, 在第3次观测的水文条件下, 离排放口25~100m 的范围内, 底层的浓度在7~12mg/L, 稀释倍数为18~41; 而在表层 (除憩流状态) 的浓度一般在4~6mg/L, 稀释倍数为55~165。在第4次观测的水文条件下, 底层浓度为4~6mg/L, 稀释倍数为22~52; 表层浓度为2.8~3.8mg/L 稀释倍数为60~260。但是, 沿水深平均浓度, 在两种水文条件下, 离排放口25~100m

的范围内，最大的浓度差值仅为0.4mg/L。这些数据表明，在排放口的近区，垂向的浓度分布计算比水深平均的平面浓度计算重要，它更能反映污染物稀释的过程。

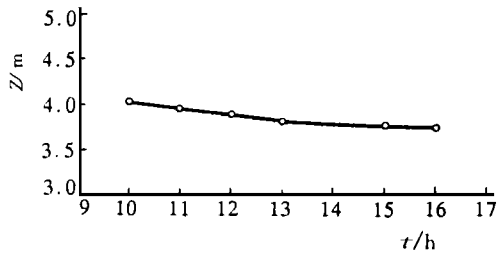


图8 水位过程线  
Fig. 8. Tidal level graph

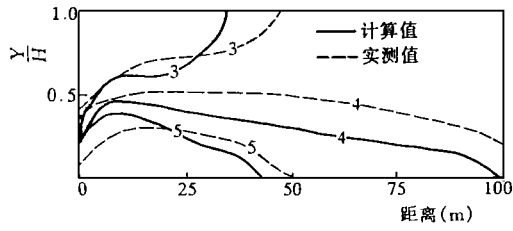


图9 平均浓度比较  
Fig. 9. Comparison of average concentration

5 结 语

- (1) 考虑了侧向扩散的立面二维浓度控制方程能较好地模拟在一个潮周过程中排放口近区的污染物稀释掺混过程，在落急和涨急时，由于来流速度较大，污染物的稀释过程以对流为主；在憩流状态下，由于来流速度较小，污染物的稀释过程以扩散为主（包括侧向扩散）。和观测值比较，计算结果基本可信。
- (2) 在排放口的近区，垂向的浓度梯度远大于平面上的水深平均浓度梯度，因此，计算排放口近区垂向的浓度分布更能反映污染物稀释掺混过程。
- (3) 在相同条件下，水面表层和底层的稀释能力因来流流速的大小差异很大。
- (4) 在有憩流状态的往复流中，计算误差较大，这是因为在浓度控制方程中侧向扩散项的侧向边界的选取和实际情况差异较大，以及侧向扩散系数的选取对计算也比较敏感。这些问题有待于今后计算中更深入的研究，使计算更能体现实际情况。

参 考 文 献

1 Patankar S V. Numerical heat transfer and fluid flow. Mc Graw-Hill. 1980. 197

2 Rodi W. Turbulence models for Environmental Problems. 1980. 257

3 Mao Xianzhong, Han Zengcui. Simulation of concentration distribution due to multi-point wastewater discharging into qiantangjiang river. Proceedings of China- Japan Bilateral Symposium on Fluid mechanics and management Tools for Environment. Beijing, 科学技术出版社, 1994. 152~160

4 陈永灿, 周雪漪, 李玉梁. 潮汐流动中污染物垂向排放的整区计算模型. 水利学报. 1992, (9): 8~14

# Simulation of Concentration Distribution due to Waste-Water Discharging into the Deep Water Area in Qiantangjiang River

Mao Xianzhong and Han Zengcui

(Zhejiang Provincial Institute of Estuarine and Coastal

Engineering Research, Hangzhou, 310016)

**Abstract:** The flow field is simulated by using 2-D vertical unsteady fluid dynamic equations, in which a  $k-\epsilon$  turbulent model is employed. Based on the flow field, concentration distribution is computed by solving a quasi-3-D concentration equation in the near area of 6-point waste-water discharged in the deep water in Qiantangjiang river. Compared of the surveyed fields, the computational results are reasonable.

**Key words:** waste-water discharging into the deep water;  $k-\epsilon$  turbulent model; concentration field.

## 《水科学进展》征稿启事

《水科学进展》是经国家科委和国家新闻出版署批准, 国内外公开发行的学术期刊。《水科学进展》以水为论述主题, 涉及与水有关的所有学科。《水科学进展》突出“新”字, 把“综合性”、“交叉性”和“前沿性”作为办刊特色, 即: 把地球水圈视为地球系统的子系统, 全方位报道关于她的研究成果, 推动学科间的渗透, 促进边缘学科的发展; 鼓励开拓科学前沿, 支持在科学探索中揭示的新事实和阐发的新思想。

《水科学进展》创刊以来, 受到了广大水科学工作者的欢迎。她连续多年被中国科技信息研究所选为我国科技信息分析的“源刊”, 并被确认为对联合国教科文组织国际水文计划 IHP/UNESCO 的贡献, 每期论文题要都被世界主要科技信息检索系统收编, 英文目录刊布在联合国教科文组织国际水文计划的出版物“**IHP INFORMATION**”上, 因而是国际学术交流的重要渠道。

本刊热诚欢迎广大水科学工作者踊跃投稿。尤其欢迎以下几方面的稿件:

1. 题材较重大, 能为国家对与水有关的重大问题的决策提供科学依据的稿件;
2. 反映水科学各分支学科重要研究成果尤其是前沿课题的稿件;
3. 探讨水圈与地球其他圈层相互关系及水与社会发展相互关系等宏观科学问题的稿件;
4. 报道对推动水科学发展有重要意义的新事实、新概念、新途径的稿件;
5. 运用多学科的理论与方法探讨水科学基础理论(尤其是跨学科的生长点)与实际问题的稿件;
6. 介绍有推广价值, 思路新颖的技术方法和经验的稿件。

来稿请寄南京市西康路1号, 水利部南京水文水资源研究所内《水科学进展》编辑部, 邮政编码: 210024, 电话: 3713777- 50747。