

# 长江口水域三维水动力数值模拟研究

陈祖军<sup>1</sup>, 韦鹤平<sup>2</sup>, 陈美发<sup>3</sup>

(1. 上海市水务规划设计研究院, 上海 200232; 2. 同济大学环境学院, 上海 200098;  
3. 上海市水务局, 上海 200040)

**摘 要:** 本文在前人对河口水域三维水动力研究的基础上, 建立了长江口水域三维非线性斜压浅海与陆架模式, 并首次应用到长江口水域尾水排放水动力数值模拟研究中。考虑到实际河口形状和海底地形, 采用平面和垂向三维坐标变换, 在空间完全交错的网格系统上离散化控制方程组, 并引入 ADI 计算方法数值求解。数值模拟结果基本上反演了长江口水域的三维水动力状况。

**关键词:** 长江口; 水动力场; 三维数值模拟; 输运扩散

**中图分类号:** P414 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003 - 0239 (2004)03 - 0037 - 09

## 1 引言

二十世纪 80 年代以前, 水动力模拟还多采用一维和二维模型来完成<sup>[1~2]</sup>, 这主要是受实测技术与计算机条件的限制。近年来, 随着计算机内存的大幅度增加及计算技术的改进, 三维模拟已逐渐得到推广应用<sup>[3~8]</sup>, 其中包括对河口分层流<sup>[5]</sup>、河口盐水入侵<sup>[6]</sup>、海岸工程<sup>[7]</sup>、海湾潮流及污染物输运<sup>[8~9]</sup>、河工或港口建筑物局部水流直接精细模拟<sup>[10]</sup>等。在三维数值模拟方法中, 除经典的 FDM、FVM 和 FEM 等数值解法的应用外<sup>[3、9]</sup>, 新型杂合解法如 Lagrange-Euler 法<sup>[11]</sup>、流速分解法<sup>[12]</sup>、分步杂交法<sup>[13~14]</sup>、垂向级数法<sup>[15]</sup>、过程分裂法<sup>[16~18]</sup>等方法也应运而生。同时, 随着对河口、海湾及近海潮流模拟研究的深入, 考虑因素也趋于复杂且更接近于实际水流状况, 先后出现了陆架及浅海正压模型<sup>[19~22]</sup>、斜压模型<sup>[16、18、22、23]</sup>、环流模型<sup>[24]</sup>等, 其中有的模型还加入了温盐变化模型<sup>[16、23]</sup>、紊流闭合模型<sup>[25~26]</sup>及适应于海底地形变化的伸缩坐标变换模型<sup>[28~30]</sup>等。

本文在前人水动力数值模拟研究的基础上, 建立了长江口水域三维非线性斜压浅海与陆架模式, 并首次应用到长江口水域尾水排放水动力数值模拟研究中, 数值模拟结果基本上反演了长江口水域的三维水动力状况。

## 2 三维水动力数学模型的建立

### 2.1 水动力控制基本方程组

收稿日期: 2003-12-17; 修订日期: 2004-06-24

作者简介: 陈祖军 (1969-) 男, 环境工程博士, 长期从事水环境数值模拟研究与规划工作。

假设海水不可压缩, Boussinesq 和静力近似, 由 Cartesian 坐标系下的三维水流运动 N-S 方程可得平面正交曲线坐标  $\xi$ - $\eta$  下和垂向  $\sigma$ -坐标系下的水动力控制方程组:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{1}{g_{11}g_{22}} \frac{\partial(Hug_{22})}{\partial \xi} + \frac{1}{g_{11}g_{22}} \frac{\partial(Hvg_{11})}{\partial \eta} + \frac{\partial w}{\partial \sigma} = q_L \quad (1)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{u}{g_{11}} \frac{\partial u}{\partial \xi} + \frac{v}{g_{22}} \frac{\partial u}{\partial \eta} + \frac{w}{H} \frac{\partial u}{\partial \sigma} + \frac{uv}{g_{11}g_{22}} \frac{\partial g_{11}}{\partial \eta} - \frac{v^2}{g_{11}g_{22}} \frac{\partial g_{22}}{\partial \xi} - f_v \\ & = -\frac{1}{\rho_0 g_{11}} P_\xi + F_\xi + \frac{1}{H^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} (v_\sigma \frac{\partial u}{\partial \sigma}) + M_\xi \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{u}{g_{11}} \frac{\partial v}{\partial \xi} + \frac{v}{g_{22}} \frac{\partial v}{\partial \eta} + \frac{w}{H} \frac{\partial v}{\partial \sigma} + \frac{uv}{g_{11}g_{22}} \frac{\partial g_{22}}{\partial \eta} - \frac{u^2}{g_{11}g_{22}} \frac{\partial g_{11}}{\partial \eta} + f_u \\ & = -\frac{1}{\rho_0 g_{22}} P_\eta + F_\eta + \frac{1}{H^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} (v_\sigma \frac{\partial v}{\partial \sigma}) + M_\eta \end{aligned} \quad (3)$$

$$\frac{\partial P}{\partial \sigma} = -g\rho H \quad (4)$$

$$\rho = \frac{1000P_0}{\lambda + \alpha P_0} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial S}{\partial t} + \frac{1}{g_{11}g_{22}} \left\{ \frac{\partial(ug_{22}S)}{\partial \xi} + \frac{\partial(vg_{11}S)}{\partial \eta} \right\} + \frac{\partial(wS)}{\partial \sigma} \\ & = \frac{1}{g_{11}g_{22}} \left\{ \frac{\partial}{\partial \xi} (D_\xi g_{22}) \frac{\partial S}{\partial \xi} + \frac{\partial}{\partial \eta} (D_\eta g_{11}) \frac{\partial S}{\partial \eta} \right\} + \frac{1}{H^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} (D_\sigma \frac{\partial S}{\partial \sigma}) \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{1}{g_{11}g_{22}} \left\{ \frac{\partial(ug_{22}T)}{\partial \xi} + \frac{\partial(vg_{11}T)}{\partial \eta} \right\} + \frac{\partial(wT)}{\partial \sigma} \\ & = \frac{1}{g_{11}g_{22}} \left\{ \frac{\partial}{\partial \xi} (D_\xi g_{22}) \frac{\partial T}{\partial \xi} + \frac{\partial}{\partial \eta} (D_\eta g_{11}) \frac{\partial T}{\partial \eta} \right\} + \frac{1}{H^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} (D_\sigma \frac{\partial T}{\partial \sigma}) \end{aligned} \quad (7)$$

式中,  $\xi$  和  $\eta$  分别为正交曲线坐标系水平方向坐标, SIGMA- $\sigma$  为立面坐标;  $u$ 、 $v$  和  $w$  为对应  $\xi$ - $\eta$ - $\sigma$  坐标方向的速度分量, 其中  $u$  和  $v$  与 Cartesian 坐标系下的速度分量的变换关系与二维模拟相同<sup>[31]</sup>,  $w$  的计算式为:

$$w = w_0 - \frac{1}{g_{11}g_{22}} [ug_{22}(\sigma H_\xi + \zeta_\xi) + vg_{11}(\sigma H_\eta + \zeta_\eta)] - (\sigma H_\sigma + \zeta_\sigma) \quad (8)$$

$q_L$  为单位水域因源汇流(如入流、出流、降雨及蒸发等)引起的水体变化量;  $P_\xi$  和  $P_\eta$  为压力

梯度,且存在:

$$\frac{1}{\rho_0 g_{11}} P_{\xi} = \frac{g}{g_{11}} \frac{\partial \zeta}{\partial \xi} + \frac{gH}{\rho_0 g_{11}} \int \left( \frac{\partial \rho}{\partial \xi} + \frac{\partial \sigma}{\partial \xi} \frac{\partial \rho}{\partial \sigma} \right) d\sigma \quad (9a)$$

$$\frac{1}{\rho_0 g_{22}} P_{\eta} = \frac{g}{g_{22}} \frac{\partial \zeta}{\partial \eta} + \frac{gH}{\rho_0 g_{22}} \int \left( \frac{\partial \rho}{\partial \eta} + \frac{\partial \sigma}{\partial \eta} \frac{\partial \rho}{\partial \sigma} \right) d\sigma \quad (9b)$$

式中,左边第一项为因水位变化引起的正压梯度(barotropic)项,第二项为温盐梯度引起的所谓斜压梯度(hypotropic)项。 $F_{\xi}$ 和 $F_{\eta}$ 为水平雷诺应力不平衡项,对于河口海湾大网格尺度水域,沿边界附近的剪切应力可以忽略,则 $F_{\xi}$ 和 $F_{\eta}$ 可简化为:

$$F_{\xi} = \nu_H \left( \frac{1}{g_{11}^2} \frac{\partial^2 u}{\partial \xi^2} + \frac{1}{g_{22}^2} \frac{\partial^2 u}{\partial \eta^2} \right); F_{\eta} = \nu_H \left( \frac{1}{g_{11}^2} \frac{\partial^2 v}{\partial \xi^2} + \frac{1}{g_{22}^2} \frac{\partial^2 v}{\partial \eta^2} \right) \quad (10)$$

式中, $\nu_H$ 和 $\nu_v$ 分别为水平涡粘系数及垂向涡粘系数,且 $\nu_H = \nu_v^{[31]}$ 。

盐度和温度控制方程(6)和(7)中, $D_{\xi}$ 和 $D_{\eta}$ 为水平紊动扩散系数,一般取各向同性,即 $D_{\xi} = D_{\eta} = D_H$ ;  $D_v$ 为垂向紊动扩散系数,为涡粘系数的函数<sup>[32]</sup>:

$$D_v = \nu_v / \sigma_c \quad (11)$$

式中,参数 $\sigma_c$ 为 Prandtl-Schmidt 数,其值取决于物质浓度 $C$ 。

## 2.2 紊流模型

本文采用 $k$ - $L$ 紊流模型与水动力模型结合,即:

$$\nu_v = c_{\mu} L \sqrt{k} \quad (12)$$

式中, $c_{\mu}$ 为经验常数。混合长度 $L$ 修正式为:

$$L = \kappa(z+h) \sqrt{1 - \frac{z+h}{H}} F_L(Ri) \quad (13)$$

式中, $F_L(Ri)$ 称为阻滞函数,它与 Richardson 数 $Ri$ 的关系为<sup>[32]</sup>:

$$F_L(Ri) = \begin{cases} \exp(-2.3Ri) & Ri \geq 0 \\ (1-14Ri)^{1/4} & Ri < 0 \end{cases}$$

紊动动能 $k$ 必须从 $k$ 的输运方程中求解。对应于变换坐标系下的输运方程为:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{u}{g_{11}} \frac{\partial k}{\partial \xi} + \frac{v}{g_{22}} \frac{\partial k}{\partial \eta} + \frac{w}{H} \frac{\partial k}{\partial \sigma} = \frac{1}{H^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} [(\nu)_{\text{mol}} + \frac{\nu_{3D}}{\sigma_k}] \frac{\partial k}{\partial \sigma} + P_k + B_k - \varepsilon \quad (14)$$

式中, $P_k$ 为紊动动能的产生项,即:

$$P_k = 2\nu_H \left\{ \frac{1}{2} \frac{1}{H^2} \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial \sigma} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial \sigma} \right)^2 \right] + \left[ \frac{1}{g_{11}} \left( \frac{\partial u}{\partial \xi} \right)^2 \right] \right\}$$

$$+ \frac{1}{2} \left( \frac{1}{g_{22}} \frac{\partial u}{\partial \eta} + \frac{1}{g_{11}} \frac{\partial v}{\partial \xi} \right)^2 + \left[ \frac{1}{g_{22}} \left( \frac{\partial v}{\partial \eta} \right)^2 \right]$$

在  $k-L$  模型中, 假定耗散率  $\varepsilon$  为混合长度  $L$  和紊动能  $k$  的函数:

$$\varepsilon = c_D \frac{k\sqrt{k}}{L}$$

式中,  $c_D$  为常数, 来自于  $k-\varepsilon$  模型中的常数  $c_\mu$ , 且  $c_D = c_\mu^{3/4} \approx 0.1925$  [33]。

### 3 数值模拟

#### 3.1 计算条件的处理

##### 3.1.1 初始条件

关于初始条件的处理, 通常有“热起动”和“冷起动”两种方法。本文采用如二维模型一样的“热起动”方法处理初始条件。

##### 3.1.2 边界条件

###### (1) 底部边界条件

河(海)床边界 ( $\sigma = -1$ ,  $z = -h$ ) 有不入(或不透)运动学条件为:

$$w|_{\sigma=-1} = 0$$

动力学边界条件为:

$$\frac{\nu_y}{H} \frac{\partial \vec{v}}{\partial \sigma} \Big|_{\sigma=-1} = \frac{\tau_b}{\rho}$$

式中,  $\tau_b$  为底床应力矢量, 它们实际上为水流和波共同作用的结果。

热力学边界条件为:

$$\frac{\nu_y}{H} \frac{\partial S}{\partial \sigma} \Big|_{\sigma=-1} = 0; \quad \frac{\nu_y}{H} \frac{\partial T}{\partial \sigma} \Big|_{\sigma=-1} = 0$$

###### (2) 自由表面边界条件

在自由表面 ( $\sigma = 0$ ,  $z = \zeta$ ), 运动学条件:

$$w|_{\sigma=0} = 0$$

动量方程的边界条件:

$$\frac{\nu_y}{H} \frac{\partial \vec{v}}{\partial \sigma} \Big|_{\sigma=0} = \frac{\tau_s}{\rho}$$

式中,  $\theta$  为风应力矢量和局部网格线  $\eta$  方向的夹角。

热力学边界条件:

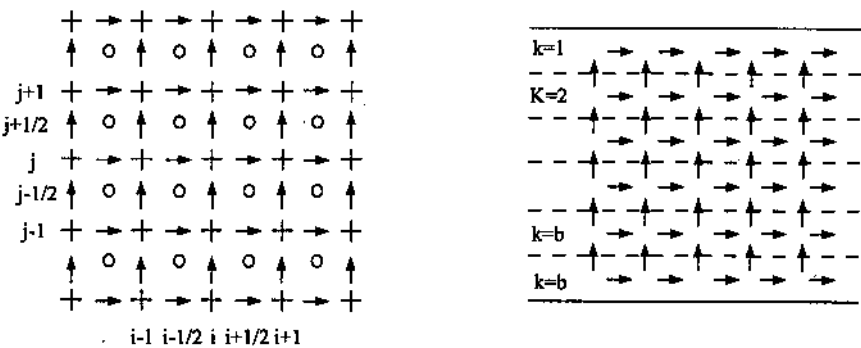
$$\frac{v_v}{H} \frac{\partial S}{\partial \sigma} \Big|_{\sigma=0} = 0; \quad \frac{v_v}{H} \frac{\partial T}{\partial \sigma} \Big|_{\sigma=0} = 0$$

(3) 开边界条件

本文采用黎曼不变量 (Riemann invariant):  $U \pm \zeta \sqrt{\frac{g}{h}} = f_k(t)$

3.2 数值解法

在完全交错的空间网格系统上(平面和垂向交错网格系统分别如图 1a、b 所示),采用交替隐式离散方法 (ADI)对三维正交曲线网格坐标系下的控制方程组式 (1~6)进行离散求解,其过程和其他数值模拟相关技术详见文献 [8]。



(a) 计算变量平面网格布置图

(b) 计算变量垂向网格布置图

图 1 三维数值模拟交错网格计算示意图

4 长江口水域三维水动力模拟

4.1 模拟区域

本文选取长江口水域南支及口门附近区域进行三维水动力模拟(见图 2),其上游边界为南门至浏河、下游边界为崇明东 E2-佘山 E1-E3。模拟区域计算网格如图 3 所示,共计 40×112×5 个,其边界条件由二维模拟结果输入 [8]。



图 2 长江口水域三维模拟计算范围图

图 3 三维模拟网格系统图

4.2 模型率定和验证

本文选取模型率定时间为 2000 年丰水期的 9/3/0: 00~9/9/0: 00, 验证时间为 2001 年枯水期的 3/14/0: 00~3/19/0: 00, 图 4(a 和 b)为白龙港测站表、中、底(即. 第 1、3 和 5 层, 下文同)三层流速和流向的计算值与实测值的比较图。

4.3 长江口三维水动力数值模拟结果

运用三维水动力模型, 对长江口水域枯季和丰季三维流场进行了数值模拟。图 5(a、b)分别示枯水期 2001 年 3 月 18 日 0:00 的表层和中层流场分布图; 同时我们做了白龙港和石洞口对应断面的垂向流场分布(图略); 因篇幅有限, 丰水期模拟分层流场和垂向流场分布图略, 详见文献[8]。

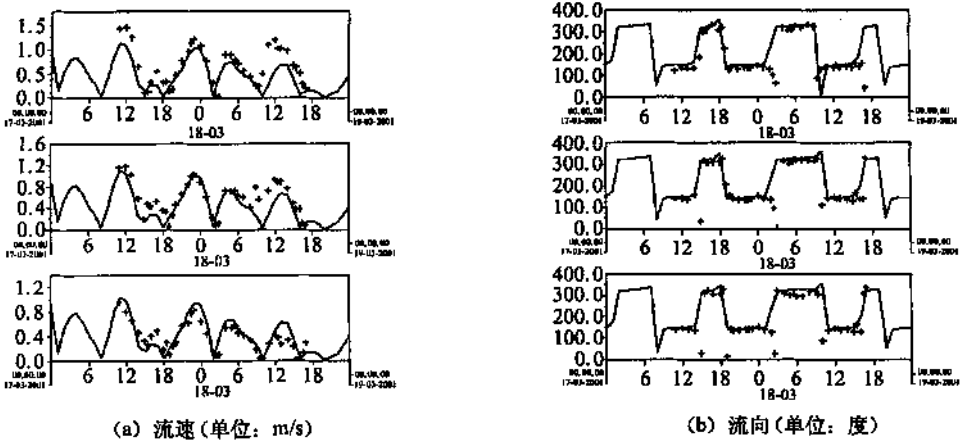


图 4 白龙港测站表、中、底层计算值与实测值比较图

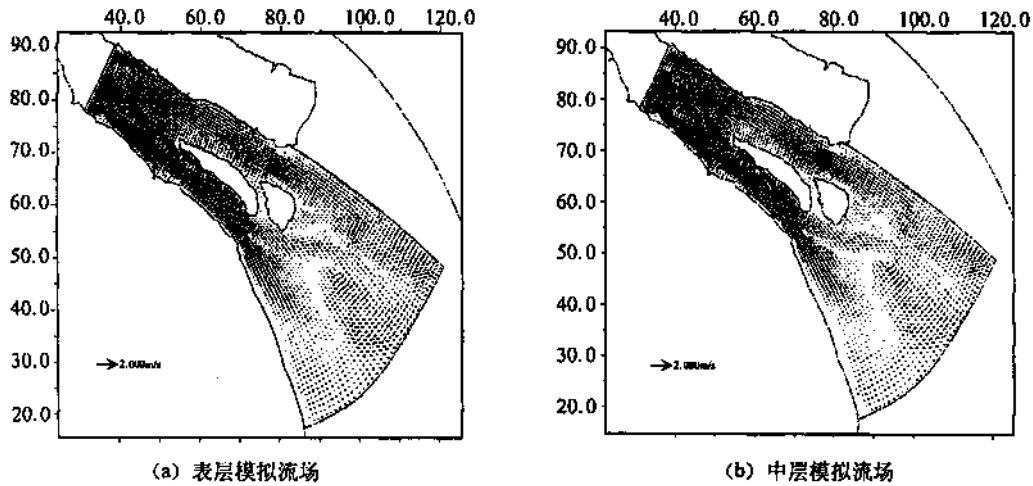


图 5 长江口三维水动力场分层模拟结果

从三维分层流场模拟结果可知(见图5),在南支与南北港河段中主要表现为往复流、而在横沙东滩以外水域则表现为旋转流;深水航道工程导流堤中水流归槽现象明显,对该水域水流影响较大,局部流向变化突出(如下游导流堤出口处);南支河段转流时流态表现复杂,局部漩涡较多,如石洞口河段及吴淞口水域等,流急时受河槽影响,分流现象明显。

从三维垂向流场模拟结果可知(图略),由于河床的复杂地形及河槽的作用,水流在横向及垂向上流态也很复杂。模拟期间发现,不同潮型不同潮时,可以出现不同的横向离岸或向岸环流形式,从模拟结果看出白龙港断面存在向岸或离岸流,石洞口断面表现为由中心向两岸流态势;不同季节的模拟也呈现出类似情况。

总的来说,分层流场图和特定断面流场图均呈现出各层流场分布互不相同,一般为表面水流速度要大于中层和底层速度,底层最小;但在特定地点,尤其在深槽或地形变化急剧的地方(如长江口涨潮沟、南北主槽串沟),会表现出底部流速大于中层或表层流速,并且还出现局部垂向分量较大的情况。长江口河槽复杂,明、暗潮滩众多,水流经过上述水域时,流速流向急剧变化,这些情况使得长江口水域水流水平方向和垂向掺混加强,从而也表现为较强的紊动混合性,符合长江口水域为中等强度混合河口的特性<sup>[34]</sup>,有利于长江口部分岸段的尾水排放后污染物的输运扩散。

## 5 结论

(1) 本文综合现有河口水域水动力模型及计算技术的特点,建立了长江口水域三维非线性斜压浅海与陆架模式,采用交错网格及 ADI 交替隐式逐行对其进行了离散求解;

(2) 结合长江口枯水期和丰水期的实测水文资料对三维模型进行了率定和验证,结果表明该模型能够较好地反演长江口水域三维水动力状况,适合于该水域水动力模拟的研究;

(3) 首次将此类三维模型应用到长江口水域尾水排放水动力数值模拟研究中。三维模拟结果表明,涨、落潮流受河床地形影响,水平和垂向紊动掺混作用强烈,符合长江口水域为中等强度混合河口的特性,因此,在一定程度上可以选择该区域部分岸段进行上海市尾水的海水处置。

## 参考文献:

- [1] Leendertse, J. J. A water quality simulation model for well-mixed estuaries and coastal sea. Principle of computation, CA. Rand Corp. RM-6230, 1970, 1:15~37.
- [2] Chung, T. J. Finite element analysis in fluid dynamics., McGraw-Hill, Inter. Book Company, 1978.
- [3] 赵士清. 长江口三维潮流数值模拟[M]. 水利水运研究, 1985, 1:8~20.
- [4] 韩国其, 汪德灌, 许协庆. 潮汐河口三维水流数值模拟[J]. 水利学报, 1989, 12:54~60.
- [5] 邱晨霞, 等. 应用 k-ε 模型模拟 3D 分层流[J]. 水利学报, 1997, 7:7~22.
- [6] 匡翠萍. 长江口盐水入侵三维数值模拟[J]. 河海大学学报, 1997, 25(4):54~59.
- [7] 李孟国. 海岸工程中实用三维流场数学模型研究[J]. 海洋通报, 1995, 14(6):2~10.
- [8] 陈祖军. 尾水外排长江口水域污染物输运扩散规律的研究[C]. 上海:同济大学博士学位论文, 2002.

- [9] 王祥三. 强混合型河口海域三维-多层二维平面扩散综合模型的研究及应用 [J]. 环境科学与技术, 1994, 4: 1~7.
- [10] Ma fu-xi. Numerical prediction of 3D highly turbulent flow with free surfaces., J. of Hydrodynamics, 1995, B (1) : 77~84.
- [11] Leendertse, J J. R C. Alexander, S K. Liu, A three dimensional model for estuaries and coastal sea. Principles of computations, R-1471-Owrr, CA. Rand Corp., Santa Monica California, 1973, 1 :
- [12] 孙文心. 三维浅海流体力学的一种数值方法 流速分解法. 物理海洋数值计算 [M], 郑州 :河南科技出版社, 1992.
- [13] 石 磊. 一个关于河口及浅海的三维分步杂交模型 [J]. 青岛海洋大学学报, 1996, 26(4) : 396~404.
- [14] 李 翊, 何少苓, 陆吉康. 三维动边界破开算子法不恒定流模拟研究 [J]. 水利学报, 1998 ,(8) : 8~13.
- [15] 宋志尧. 海岸河口 3D 水流垂向级数解模型 [M]. 河海大学博士学位论文, 1998.
- [16] 诸裕良, 严以新, 茅丽华. 大江河口三维非线性斜压水流盐度数学模型 [J]. 水利水运科学研究, 1998 ,(2) : 129~138.
- [17] 李提来, 奚希萍, 黄晋鹏, 长江口边界拟合坐标的三维潮流数学模型 [J]. 水利水运科学研究, 2000 ,(3) : 1~6.
- [18] 刘 桦, 吴 卫, 何友声, 等. 长江口水环境数值模拟研究 水动力数值模拟 [J]. 水动力学研究与进展, 2000 , A, 15(1) : 18~30.
- [19] 朱耀华, 方国洪. 陆架和浅海环流的一个三维正压模式及其在渤、黄、东海的应用 [J]. 海洋学报, 1994 ,16 (6) : 11~20.
- [20] 刘子龙, 王船海, 等. 长江口三维水流模拟 [J]. 河海大学学报, 1996 ,24(5) : 108~110.
- [21] 黄 平. 一种模拟三维海流运动的差分方法 [J]. 热带海洋, 1999, 18(1) : 31~36.
- [22] 王 辉, 孙文心. 自适应网格应用于黄渤海潮流模拟 [J]. 青岛海洋大学学报, 1999 ,29(4) : 556~562.
- [23] 朱建荣, 沈焕庭, 朱首贤. 三维陆架模式及其应用 [J]. 青岛海洋大学学报, 1997 ,27(2) : 145~156.
- [24] 奚振兴, 杨连武. 一种三维环流模型及其应用 [J]. 计算物理, 1993 ,10(1) : 25~36.
- [25] 史峰岩, 朱首贤, 朱建荣, 等. 杭州湾, 长江口余流及其物质输运作用的模拟研究 I : 杭州湾, 长江口三维联合模型 [J]. 海洋学报, 2000 ,22(5) : 2~12.
- [26] 黄立文, 王献孚, 愈齐清, 等. 多开边界群岛海域溢油模拟的水动力模式. 武汉交通科技大学学报, 2000 ,24 (4) : 367~371.
- [27] 白玉川, 于天一. 分步分层拟三维水流数学模型及其在廉州湾潮流计算中的应用 [J]. 1998 ,20 (5) : 126~135.
- [28] 田嘉宁, 李建中, 小池武. 东京湾流场三维数值模拟 [J]. 西安理工地形学报, 1997 ,13(1) : 35~41.
- [29] 张存智. 黄海北部海域三维潮流数值模型 [J]. 海洋预报, 2000 ,17 (1) : 1~120.
- [30] 闫 菊. 胶州湾三维潮流模拟及潮致余流的数值模拟 [J]. 地球科学进展, 2001 , 16(2) : 172~177.
- [31] 陈祖军, 尾水排放长江口水域对上海市水资源影响的研究. 海峡两岸水资源暨环境保护上海论坛论文集 [C]. 西安 : 陕西人民出版社, 2002.
- [32] Delft hydraulics, User manual of Delft3D-FLOW, Version 1.00, 1999.
- [33] 金忠青. N-S 方程的数值解和紊流模型 [J]. 河海大学出版社, 1989.
- [34] 杨许侯, 金成法, 马道华. 长江口南港水道潮流特征分析 [J]. 海洋通报, 1999, 18(1) : 1~11.