

河口近海水环境问题数值模拟的若干注记

耿兆铨 李志永

(浙江省水利河口研究院 浙江 杭州 310020)

摘要 :针对河口近海越来越多的环境水力学问题 ,列举其数值模拟的工作步骤、内容和选择数学模型的原则 ,介绍数值模拟技术和经验 ,强调采用设计流场的必要性和计算成果合理性分析的重要性。具体讨论浓度(温度)场计算、海域事故溢油模拟以及工程水域泥沙冲淤预测的若干问题。
关键词 :河口 ;近海 ;环境水力学 ;数值模拟 ;设计流场 ;泥沙 ;事故溢油
中图分类号 :TV148 **文献标识码** :A **文章编号** :1006-7647(2009)06-0029-05

Notes on numerical simulation of water environmental problems in inshore estuary//GENG Zhao-quan ,LI Zhi-yong (Zhejiang Institute of Hydraulics and Estuary , Hangzhou 310020 , China)

Abstract :Due to increasing numbers of problems relating to environmental hydraulics in inshore estuaries , the work stages , content , and principle used to choose the mathematical model for numerical simulation of water environmental problems are described. Technology and experience of numerical simulation are presented. It is increasingly necessary and important to adopt the design flow field and to analyze the reasonability of calculation results. Some issues are discussed , such as the concentration/temperature field , simulation of oil spill accidents at sea , and prediction of sediment scouring in engineering projects.
Key words :estuary ; inshore ; environmental hydraulics ; numerical simulation ; design flow field ; sediment ; oil spill accident

随着社会生产力的不断提高和河口近海区域涉水工程的大量兴建 ,工程海域的环境水力学问题越来越突出 ,河口近海区域的环境水力学问题的研究也越来越重要。计算机科学技术的迅猛发展 ,为数值模拟涉水工程所致的环境水力学问题提供了有效的研究手段 ,用数值方法研究水环境问题发挥了越来越大的作用。很多人能应用成熟的数学模型 ,但应用的效果却差别很大。对工程实际问题了解越透彻、对选用的数学模型理论和模块结构掌握越自如 ,就越能用电脑模拟好工程问题 ,更能用大脑对数学模型成果进行合理性分析 ,模型的调试和验证就更有方向 ,模拟得到的最终成果也更加可信。

工程中常见的数值模拟环境水力学问题的步骤与内容如下 :

- a. 了解项目。主要包括 :①明确项目背景、性质及工程可行性(符合政策、法律、法规、技术、经济合理可行) ;②明确项目审批需要准备的送审文件(项目建议书/工程可行性报告、环境评价报告书、海域使用论证证书等)。
- b. 现场踏勘。主要包括 :①踏勘项目选址、评价区域特性及周边环境敏感点 ;②明确业主咨询的

- 内容、必须的相关资料和咨询服务完成的时限等。
- c. 收集资料。主要包括 :①文档 ,含工程概况、项目建议书或工程可行性报告、本项目及邻近项目已有的研究报告 ;②图件 ,含设计图、涉水工程布置图、邻近海域详细水下地形图、大范围水下地形图 ;③资料 ,含已有或拟测的水文资料、水质资料、污染物源强资料、污水排放方式等。
- d. 努力做好相关方(业主、设计部门、咨询单位、协作单位等)的协调配合工作 ,严格掌控工作进度和报告质量。

1 数值模拟技术

水环境问题的数值模拟方法很多^[1-3] ,很难说哪种最好 ,但针对要求解决的实际工程问题 ,通过详尽了解和透彻理解 ,抓住了问题的关键 ,就可以选用更合适的数值模拟方法。模拟水环境问题常用的数值方法主要有 :有限差分法(FDM)^[4-5]、有限单元法(FEM)^[6-7]、有限控制体积法(FVM)^[2]等等。近些年来 ,FVM 因其物理意义更加明晰直观 ,更易控制物理量的动态平衡 ,能处理任意形状的单元 ,较能适应边界复杂的计算域而得到广泛应用。

1.1 计算域选取和合理概化

针对要解决的实际问题,选定数学模型维数,选用最合适的数值模拟方法。灵敏的数值模拟工作者,应该能抓住问题的主要矛盾,切中要害,从而使复杂问题简单化。

依据工程对计算域边界的影响尽可能小的要求和边界资料容易取得的条件,选择大小适当的计算域。水边界尽量与水流方向垂直或平行,并垂直于相交的陆边界。

除研究桥墩类建筑物的近区水流和泥沙冲淤需要精细掘出桥洞乃至桥墩外,对于宏观模拟高桩结构类涉水建筑物,诸如码头、栈桥、大桥等,通常采用南京水利科学研究院推荐的加糙计算方法^[8]。

需要强调的是:对于非恒定水流的计算域,数值概化中要时刻牢记“缓变”两字,无论是平面边界、水底地形,还是断面间距、网格尺度,都要力求“缓变”。因为在导出非恒定流方程时就已经规定了这一假设前提,其中也隐含了适用条件。作为合格的数值模拟工作者,应该掌握所使用的数学模型理论,对计算公式有能力推导,对程序模块结构、功能有透彻的理解。比如对水流计算中十分重要的糙率系数,当出现较大的位相差和数值差时,首先考虑的是合理调整水边界潮位(这样做可以事半功倍),然后再调整糙率系数,以对验证精度起到锦上添花的作用。

1.2 网格生成和布设

网格生成一般借助于商业软件。网格太密,计算工作量太大;网格太疏,又会坦化源汇附近物理量的变化梯度。网格剖分原则主要有:①远离工程海域的水域和不必太关心的水域,可以布置较大尺度的计算网格;②在工程水域适当加密网格,在地形、物理量变化大的区域进一步加密网格;③取、排水口(源汇区)附近重点加密网格,以反映大梯度分布,把握好对整个工程水域的影响;④单元大小变化要均匀过渡,必要时采用网格嵌套技术;⑤尽量采用形态好(尽可能接近正三角形)的三角形网格,矩形网格的长宽比不宜过大,忌用网格长宽比大于5的长方形和十分尖而长的锐角三角形,尤其是带两个尖细锐角的大钝角($>150^\circ$)三角形。

实践表明:恰当选取计算域,合理概化水下地形和水、陆边界,网格布设疏密有致,能够有效避免计算过程中的“空间失稳”^[9],避免出现解的大梯度奇异(例如计算域局部浓度高于污水排放浓度的不合理现象)。

1.3 时间步长控制

显格式时间步长应该严格满足C-F-L条件;隐格式理论上属于无条件稳定,但对于潮强流急的海

域和涨落潮历时很不均衡的河口区(例如钱塘江河口),为了确切模拟潮流场随时间的急剧变化,也不宜使用过大的时间步长,何况要确保数值过程稳定有效,也必须满足上述“缓变”的要求。

1.4 计算成果合理性分析与校正

计算成果的合理性分析至关重要,它是判断研究结论是否可信的关键。除了计算过程中对实测资料的认真验证外,还必须依靠对实际问题 and 理论概念的透彻理解,依靠与其他试验成果的比较,以及必要的敏感性分析。

在数值模拟中,我们不应该仅仅相信数值计算的数据,还应该仔细复核数值计算的条件、认真校核用于计算浓度^[10-11]、温度^[12]场的排放源强,以及预报的海域事故溢油^[13-16]范围与途径、强潮河口的盐度运移规律^[17]、工程海域泥沙冲淤^[18]幅度的可能性。负责的数值模拟工作者,应该能对可疑的结果通过认真分析,及时去伪存真、修正错误。卓越的成果合理性分析能力往往得益于丰富的工作经验积累。

2 工程水域泥沙冲淤计算

建立泥沙数学模型是以流体力学和泥沙运动的物理、力学规律为基础的。由于泥沙问题的复杂性,不同的研究者对具体条件的简化和取舍有所不同,因而形成了学术纷呈、大同小异的众多泥沙数学模型。现有的泥沙数值计算方法是在一、二维浅水水动力学数值方法的基础上发展起来的。如果含沙量不是很大,床面变形缓慢,水流方程和泥沙方程就可以单独求解,称为非耦合解;如果含沙量大,或者海床变形剧烈,就必须联立求解完整方程组,称为耦合解。对于河口及海岸所处的水域,含沙量相对较低,床面变形相对比较缓慢,可以采用非耦合解的途径处理。

2.1 偏微分方程数值解

泥沙输送和床面变形方程中含有一些可变参数,如阻力系数、水流挟沙力、起动流速等,实际计算中,这些参数的取值是否合理,常常成为数值模拟成果好坏的关键。由于目前人们对泥沙的运动机理认识尚不充分,即便在恒定均匀流中,也不能从理论上确切给出其运动规律的数学表达式。而在潮汐非恒定流作用下,细颗粒泥沙的搬运和淤积过程是输沙问题中最为复杂的问题,迄今对这一问题研究的进展尚不多,主要依靠经验来确定模型所需要的参数。因此,充分利用工程海域现场观测资料,率定方程中诸参数,仍是数值模拟工作的重点之一。

对于海域来沙为主的强潮海域,泥沙垂向掺混较好,含沙量相对较低,海床变形缓慢,泥沙输运计算沿用垂线平均的二维非恒定流作用下的输沙方程,可

以与水流方程非耦合求解^[6]。其控制方程见文献^[8]。这一方法理论基础较扎实,但长历时的数值模拟十分费时费力,而且需要做地形—水流的多次反馈计算,计算成果与经验方法比,也未必更准确。

2.2 河相关系经验模式解

在缺乏大范围计算域泥沙边界条件的情况下,泥沙冲淤计算可以采用经过验算的带一定经验性的河相关系方法(类似于海洋学中海域流场计算仍需参考、沿用河流糙率)。

由于计算域水边界缺乏含沙量资料,计算域内也缺乏系统的含沙量资料和较完备的历年水下地形图,无法用河床变形方程进行长历时逐时计算,不得不采用经过验算的带一定经验性的河相关系方法,即假设在宽广海域,其边岸局部工程建筑物实施前后,挟沙关系式 $S = kV^2/H$ 仍可沿用。工程建造前、后各物理量分别采用下标 1 和 2 表示,则有

$$\frac{S_1}{S_2} = \frac{\frac{k_1 V_1^2}{H_1}}{\frac{k_2 V_2^2}{H_2}} \tag{1}$$

由于 $V = q/H$,上式可写成:

$$\frac{S_1}{S_2} = \frac{k_1}{k_2} \left(\frac{H_2}{H_1} \right)^3 \left(\frac{q_1}{q_2} \right)^2 \tag{2}$$

$$\frac{H_2}{H_1} = \left(\frac{k_2}{k_1} \right)^{\frac{1}{3}} \left(\frac{q_2}{q_1} \right)^{\frac{2}{3}} \left(\frac{S_1}{S_2} \right)^{\frac{1}{3}} \tag{3}$$

对每个计算节点,加入计算点 i 的下标,可得

$$H_{i2} = \left(\frac{k_2}{k_1} \right)^{\frac{1}{3}} \left(\frac{S_{i1}}{S_{i2}} \right)^{\frac{1}{3}} \left(\frac{q_{i2}}{q_{i1}} \right)^{\frac{2}{3}} H_{i1} \tag{4}$$

式中: H_{i1} 、 H_{i2} 分别为工程实施前、后计算点 i 的水深; S_{i1} 、 S_{i2} 分别为工程实施前、后计算点 i 的含沙量; q_{i2} 、 q_{i1} 分别为工程实施前、后计算点 i 的单宽流量。由此可进一步得到计算点 i 在工程实施前后稳定了的冲淤量 P

$$P_i = Z_{i2} - Z_{i01} - \alpha H_{i1} \tag{5}$$

式中: Z_{i01} 为工程实施前计算点 i 的海底高程;

$$\alpha = \left(\frac{k_2}{k_1} \right)^{\frac{1}{3}} \left(\frac{S_{i1}}{S_{i2}} \right)^{\frac{1}{3}} \left(\frac{q_{i2}}{q_{i1}} \right)^{\frac{2}{3}} \tag{6}$$

利用这种半经验、半理论关系式,可以计算出各计算点工程实施前后的冲淤量,进而可用数值后处理方法绘出等值线,确定影响范围。该方法曾在甬江河口、钱塘江河口、杭州湾及舟山海域的涉水工程对海床冲淤影响中得到检验和应用。

2.3 基于刘家驹挖槽回淤理论的计算公式

按照 JTJ 213—1998《海港水文规范》,挖槽回淤的年淤积强度可按式计算:

$$P_1 = \frac{\omega S_1 t}{\rho_0} \left\{ K_1 \left[1 - \left(\frac{d_1}{d_2} \right)^3 \right] \sin \theta + K_2 \left[1 - \frac{1}{2} \frac{d_1}{d_2} \left(1 + \frac{d_1}{d_2} \right) \right] \cos \theta \right\} \tag{7}$$

式中: P_1 为航道底面的淤积强度, m ; ρ_0 为淤积物的干密度, kg/m^3 ; $\rho_0 = 1750 D_{50}^{0.183}$ (D_{50} 为淤积颗粒的中值粒径, mm); ω 为细颗粒泥沙的絮凝沉降速度, m/s ,取 $\omega = 0.0004 m/s$; S_1 为相应于平均水深 d_1 的浅滩水域的平均含沙量, kg/m^3 ; t 为淤积历时, s ; K_1 和 K_2 分别为横流和顺流淤积系数,在缺少现场资料的情况下,可取 $K_1 = 0.35$, $K_2 = 0.13$; d_1 和 d_2 分别为浅滩平均水深和航道开挖后的水深, m ; θ 为航道走向与水流流向之间的夹角($^\circ$)。

这一方法用于港区、航道的开挖回淤甚好,能按历时年月计算冲淤量。但对于较大范围的海区冲淤,计算成果有其局限性。

3 海域事故溢油数值模拟

根据 GB/T 19485—2004《海洋工程环境影响评价技术导则》,对海域事故溢油应采用溢油数学模型进行预测。目前国内主要采用 Blokker 溢油模式^[13]、赵文谦溢油模式^[14]和窦振兴等的“油粒子”模式^[15]。由于风潮共生流作用下的溢油运移范围可能很大,必须采用大范围的计算域计算流场,因此,笔者在工程实践中常选用 Blokker 模式^[16]。

3.1 溢油油膜中心点运移轨迹计算模式

海域水体在潮汐和风作用下,形成风、潮共生流。计算风、潮共生流可采用下述两种方法之一,视具体情形选择之,即

- a. 在水流动量方程中计及风应力。
- b. 采用 Hoult 的矢量型经验公式:

$$V_t = V_{ot} + V_{水流} + bV_{风} \tag{8}$$

式中: V_{ot} 为油膜扩散速度,当扩散到最大稳定面积后, $V_{ot} = 0$; b 为风对油膜运动的作用系数,它主要取决于风、油类、海水性质、水温等(取值为 $0.01 \sim 0.03$); $V_{水流}$ 为水体的表面流速,它与垂线平均流速之间有一定的关系,主要取决于流速在垂向的分布(如对称分布或抛物线分布)。

在算得风、潮共生流场的基础上,再进行 Lagrange 无质量标记点运动轨迹追踪计算,研究油污染物排放后长历时地随潮流游荡的最终去向。用 Lagrange 质点追踪计算矢量式,可描述油污染物质随潮流在水域中运动的轨迹:

$$U_L = \frac{1}{T} [X(x_0, t + T) - X(x_0, t_0)] = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} U_L(x_0, t) dt \tag{9}$$

用无质量标记点位代表溢油油膜中心位置,具体的计算公式为

$$X_i(t_N) = X_i(t_{N-1}) + \int_{t_{N-1}}^{t_N} \{ U_e [X_i(t_{N-1}), t] + \nabla U_e [X_i(t_{N-1}), t] \} dt \quad (10)$$

式中: $U_e(x, y, t)$ 为欧拉流速;下标 i 为无质量标记点点号,其初始位置为 (X_i, t_0) , t 为时刻, N 为时步, ∇ 为梯度算子。利用三节点等参数三角元面积坐标,易于求得新点位的插值流速。最终可求得不同时刻溢油油膜中心位置。

由于时间、地点、数量及相应的风、流等众多不确定因素,因此计算中不可能将所有情况一一加以描述,仅能对主导风向下的几种溢油风险组合情况进行预测分析。

由于流场平面分布的不均匀性和全域涨落潮时间的非一致性,不同潮时发生溢油后油膜中心点运动轨迹是不一样的。同时,不同方向风对表层流场的驱动对油膜中心点运移的轨迹也有一定影响。因此,在较易发生溢油事故的航道和码头前沿,分别按涨急、高平、落急、低平 4 个不同时刻,投放相应示踪标记点,进行溢油油膜中心点运移轨迹的计算,依据工程所在地区的年盛行风向和主要频率的风速,宜选择典型风况并叠加大、小潮条件设计溢油工况。

3.2 油膜扩散直径和扩散面积计算

根据数学模型得出不同时刻溢油油膜中心位置后,可按 Blokker 提出的油膜扩散直径的经验公式,进一步预测油膜的扩散范围。

$$D_t^3 - D_0^3 = \frac{24}{\pi} k (d_w - d_o) \frac{d_o}{d_w} V_o t \quad (11)$$

式中: t 为时间, min; D_t, D_0 分别为油膜 t 时刻扩散的直径和初始直径, m; k 为常系数; V_o 为计算溢油量, m^3 ; d_w 和 d_o 分别为水和油的相对体积质量。

必须指出,溢油公式(11)一般适用于溢油 24 ~ 36 h 内油膜连续的情形,对于海面有狂风巨浪的溢油工况,必须根据观测实况及时修正预测结果。

4 若干问题讨论

本节讨论的问题仅限于宏观的具有自由面水域的环境问题,不涉及精细流体力学的数值模拟。

4.1 海洋环境水力学数值模拟必须选用设计流场

4.1.1 流场计算是水体传质计算的关键和前提

“流场不对,满盘皆输”。流场模拟不准确,其后的污染物浓度场、泥沙冲淤、事故溢油计算模拟成果均不可信!根据 GB/T 19485—2004 之 5.5.3 节 a 的

要求,具有满足需求的实测资料,包括:开边界端点的潮位数据(用于模型的边界条件),计算域内至少 2 个站的潮位数据(用于模型潮位验证),计算域内 2 ~ 6 个测点的海流周日连续观测数据(用于模型潮流验证),测点的多少依评价等级的高低确定。数学模型验证的目的,在于通过验证、率定,取得预测计算的合适参数。

4.1.2 预测计算必须选用设计流场

据 GB/T 19485—2004 之 5.5.3 节 e 的规定,进行数值计算时,应考虑模型使用的数据资料的不确定性,进行输入对输出的敏感性分析,同时对模型的输出结果进行概率分析,并明确相应的置信区间。笔者力主选用设计流场预测计算污染物浓度场。这是因为,某一、二次实测流场的时机不一定会恰好选择在典型大、小潮或典型中潮,对应的保证率分别为 10%、90%、50%,很可能介于三者之间的某一个,以此实测资料的不完备流场来计算、预测污染物浓度场,不但没有代表性,而且预测的结果很可能得出“对环境影响不明显”的结论,而工程项目投运后污染物对环境的实际影响要大得多,这是十分危险的!所以,采用设计流场预测污染物浓度场,远比用某一、二次实测流场预测浓度分布更具有频率概念的代表性和可靠性。浙江舟山内海域已建或拟建的众多石化、码头及修造船工程项目的实践已证明了这一点。

4.1.3 设计流场的定义及边界条件制作

设计流场定义时应参照地面水环评导则和海洋工程环评导则,对不利流场条件进行规定。笔者建议河口近海设计流场定义为:在不利潮差条件下,仍能保证工程海域环境免受损害的不利流场(大、小潮对应的保证率分别为 10% 和 90%)。设计流场制作过程如下:

a. 选择一个包括工程海域在内的较大范围海域,该海域具有长系列的潮位站,而且水边界资料比较容易取得。例如舟山内海域,其中有定海、镇海潮位(水文)站。

b. 选择地理位置有代表性、有长系列观测资料的潮位站(长期站),作潮差累积频率计算,求得 10%、50%、90% 的潮差数值,分别代表大、中、小潮典型潮差。

c. 在实测潮位资料中选取相近潮差的大中小潮期的潮位过程线样板,采用相关方法(如海洋学的调和分析法)推求计算域的每个水边界的潮位过程线。如实测潮差与典型频率潮差相去甚远,则可以采用同频率放大(缩小)推求得到。

d. 沿用验证流场所得参数计算设计流场,比较

和调整边界条件,取得流态合理的设计流场。

4.2 污水海洋处置工程水污染物排放的初始稀释度及混合区范围^[19-21]

a. 几个定义 放流管加污水扩散器合称为污水放流系统,将污水由陆上处理设施经放流系统从水下排入海洋称为污水海洋处置。污水由扩散器排出后,在出口动量和浮力作用下与环境水体混合并被稀释,在出口动量和浮力作用基本完结时污水被稀释的倍数称为初始稀释度。污水自扩散器连续排出,各个瞬时造成附近水域污染物浓度超过该水域水质目标限值的平面范围的叠加(亦即包络)称为混合区。

b. 初始稀释度和混合区面积估算。污水河口、海洋处置的初始稀释度估算公式见 GB 18486—2001《污水海洋处置工程污染控制标准》。污水排入面积在 600 km² 以上的河口、海湾,其允许混合区范围 $A_s < 3 \text{ km}^2$ 。污水排入面积小于 600 km² 的河口、海湾,其允许混合区范围 $A_s = \min(A_{s1}, A_{s2})$, $A_{s1} = 2400(L + 200) \text{ m}^2$ (其中 L 为扩散器长度, m); $A_{s2} = A_0 \times 10^6/200 \text{ m}^2$ (其中 A_0 为计算点位至湾口的海湾面积, m²)。估算公式如下:

Fetterof 公式

$$M \leq 9.78 Q^{1/3} \quad M > 1200 \text{ m}$$

Mackenthum 公式

$$M \leq 0.991 Q^{1/2} \quad M < 1200 \text{ m}$$

新田公式

$$\lg A = 1.226 \lg Q + 0.0855$$

其中: Q 为污水排放量, m³/d; M 为离排放点任何方向混合区不应超过的限制尺度, m; A 是浓度稀释 100 倍的混合区面积, m², 当 $Q = (1 \sim 180) \text{ 万 m}^3/\text{d}$ 时, 混合区允许范围介于 0.2 ~ 1.4 km²。

可见, 污水混合区估算的面积变幅甚大, 最大有数量级之差。说明以上估算公式只能算经验公式。

c. 浓度计算公式估算。为避免浓度场数值计算的盲目性, 可先按 HJ/T 2.3—1993《环境影响评价技术导则·地面水环境》, 采用约瑟夫-新德那模式(简称约-新模式)的浓度计算公式进行估算, 以便对计算的量值大体心中有数。

参考文献:

- [1] DRONKERS J J. Tidal theory and computations[C]//Advances in Hydrosience, 1975: 145-230.
- [2] 帕坦卡 S V. 传热和流体流动的数值方法[M]. 郭宽良, 译. 合肥: 安徽科学技术出版社, 1984.
- [3] 耿兆铨. 二维非恒定流动的有限元数学模型[J]. 华东水利学院学报, 1984(4): 94-105.

- [4] 林秉南, 赵雪华, 施麟宝. 河口建坝对毗邻海湾潮汐影响的计算(二维特征理论法)[J]. 水利学报, 1980(3): 1-8.
- [5] LEANDERTSE J J. Aspects of a computational model for long-period water wave propagation[R]. 1967.
- [6] CHUNG T J. Finite element analysis in fluid dynamics[M]. New York: McGraw-Hill International Book Co., 1978.
- [7] 耿兆铨. 浅水潮波的二维显式迎流有限元模式[C]//周连第. 全国第一届水动力学学术研讨会论文集. 北京: 海洋出版社, 1984: 69-74.
- [8] JTJ/T 233—1998, 海岸与河口潮流泥沙模拟技术规程[S].
- [9] 耿兆铨. 非恒定流数值解空间失稳问题分析[J]. 水利学报, 1985(7): 1-5.
- [10] 韩曾萃, 程杭平, 耿兆铨. 二维非恒定污染场的计算[J]. 环境污染与防治, 1985(2): 1-5.
- [11] 韩曾萃, 程杭平, 耿兆铨. 秦山核电厂循环废水放射性及热量的稀释计算[J]. 海洋工程, 1986(2): 22-31.
- [12] GENG Zhao-quan, NI Yong-qiang. Numerical study of dilution to hot water discharged from power plant[C]//HOPLEY D. 93 PACON Proceedings. Beijing, 1993: 399-404.
- [13] BLOKKER P C. Spreading and evaporation of petroleum products on water[C]//Proceedings of 4th International Harbor Congress, Antwerp, 1964: 911-919.
- [14] 张永良, 刘培哲. 水环境容量综合手册[K]. 北京: 清华大学出版社, 1991: 996-999.
- [15] 窦振兴, 杨连武, 张存智, 等. 渤海海域溢油微机化预报体系研制“八五”国家科技攻关项目 85-903-08-05-02 子专题研究报告[R]. 大连: 国家海洋环境保护研究所, 1995.
- [16] 耿兆铨, 倪勇强, 程杭平. 溢油和含油废水对舟山海域水质影响的数值分析[J]. 水动力学研究与进展: A 辑, 1991(51): 46-54.
- [17] 耿兆铨, 倪勇强. 杭州湾盐度计算研究[C]//周连第. 第 14 届全国水动力学研讨会论文集. 北京: 海洋出版社, 2000: 56-62.
- [18] 李志永, 倪勇强, 耿兆铨. 乐清湾泥沙运动数值研究[J]. 泥沙研究, 2004(4): 77-81.
- [19] LEE J H W, NEVILLE-JONESS P. Initial diffusion of horizontal jet in crossflow[J]. Hydraulic Engineering, ASCE, 1987, 113(Hy5): 615-629.
- [20] GB18486—2001, 污水海洋处置工程污染控制标准[S].
- [21] GENG Zhao-quan, NI Yong-qiang, PAN Chun-hong, et al. Application of an explicit upstream FEM in estuary study[J]. China Ocean Engineering, 1999, 13(3): 343-352.

(收稿日期: 2009-04-21 编辑: 马敏峰)

