

黄河河口潮流和泥沙淤积过程数值分析研究

李东风^{1,3}, 张红武², 钟德钰², 吕志咏¹

(1. 北京航空航天大学 流体力学研究所, 北京 100083; 2. 清华大学 河流海洋研究所, 北京 100084;

3. 浙江水电专科学校, 浙江 杭州 310018)

摘要: 用有限元方法对黄河河口海域的潮流海洋动力过程进行了数值模拟和分析; 通过对典型时刻河口潮流流速矢量图和流速等值线分布图的分析计算, 验证了黄河河口门外以及渤海湾和莱州湾交界点存在的两个高流速场; 通过入海泥沙淤积厚度等值线平面分布及其变化过程、淤积厚度沿入海流路纵向的变化过程和海底典型高等线+1m, 0m和-1m变化过程对河口海岸冲淤、海底变形过程进行了动态跟踪模拟和分析, 所得结果与实测资料和遥感解译图像分析基本一致。

关键词: 黄河河口; 潮流; 河口冲淤; 过程数值模拟

中图分类号: TV148 **文献标识码:** A

黄河河口潮流动力过程和河口泥沙冲淤、海底变形以及岸线演变规律的研究对下游河道治理、河口治理、三角洲经济社会发展和海岸建设和管理意义重大^[1, 2], 对上述问题的研究已取得了很多成果^[3-11], 但大多是以实测资料和遥感信息的分析为手段进行的, 由于实测资料的限制, 利用以上研究手段揭示潮流和泥沙冲淤动力过程是很困难的。利用数值模拟方法研究黄河河口潮流和泥沙冲淤也已取得了很大的进展^[12-16], 但黄河河口问题的复杂性, 对于利用数学模型从数值分析的角度探讨黄河河口潮流动力过程、河口泥沙冲淤、海底变形以及岸线演变等问题还有待进一步研究。本文即利用黄河河口泥沙二维有限元数学模型^[15, 16]对河口主要海洋动力过程和泥沙冲淤、海底变形以及岸线演变过程进行了模拟计算和分析。

1 基本方程和计算原理

1.1 基本方程 黄河河口潮流泥沙二维数学模型的基本方程^[16, 17]包括

(1) 河海水流连续和运动方程

$$\frac{\partial z}{\partial t} + \frac{\partial(U_i H)}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + f \sigma_{ij} U_j + g \frac{\partial Z}{\partial x_i} + \frac{g U_i \sqrt{U_j U_j}}{C^2 H} = \varepsilon_{ij} \frac{\partial^2 U_i}{\partial x_i \partial x_j} \quad (i, j=1, 2) \quad (2)$$

收稿日期: 2004-04-12

基金项目: 高等学校全国优秀博士学位论文作者专项资金(199935); 黄河专项(98z02); 浙江省自然科学基金(M503254); 浙江省高校中青年学科带头人基金项目等。

作者简介: 李东风(1965-), 男, 河南商丘人, 副教授, 主要从事流体力学、水力学、河流动力学及河口海岸工程教学与科研工作。

式中： U_i 为垂线平均流速； H 为水深； Z 为水位； C 为谢才系数， $C = \frac{1}{n} R^{1/6}$ ，水力半径 $R = H$ ； g 、 ρ 、 ν 分别为重力加速度、水密度和紊动黏滞系数， f 为科氏力系数($f=2 \sin \phi$ ， ω 为地球自转角速度， ϕ 为地理纬度。其他参数见文献[16, 17]。

(2)泥沙运动方程

$$\frac{\partial S}{\partial t} + U_j \frac{\partial S}{\partial x_j} - \varepsilon \frac{\partial^2 S}{\partial x_j \partial x_j} = - \frac{K_1 \alpha^* \omega}{H} (f_1 S - S_*) \quad (3)$$

$$\frac{\partial Z_b}{\partial t} - \frac{K_1 \alpha_*}{\gamma_o} \omega_i (f_1 S - S_*) = 0 \quad (4)$$

式中： v_s 为泥沙沉速； S 和 S_* 分别为水流含沙量和挟沙力； f_1 为泥沙非饱和系数； K_1 为考虑紊流脉动在水平方向产生的扩散作用及泥沙存在产生的附加影响而引入的修正系数，简称为附加系数； α 为平衡含沙量分布系数，系数的计算见文献[17]。海洋动力挟沙能力方程见文献[16]。

1.2 定解条件 (1)初始条件 计算域内，在初始时刻给定流速、潮位和含沙量等物理量。(2)边界条件 对进口边界条件，给出进口断面的流量和含沙量过程；对模型的出口即海域开边界利用潮位控制；对有实测资料的开边界上点的潮位，利用调和分析和潮高计算公式确定不同时间的潮位，对其他无实测值的海域开边界上节点的潮位，则根据已知的两个端点的潮位值，通过插值求得。在闭边界上，法向流速为0，而沿切线方向的流速非0。

1.3 方程的离散和数值解法 根据各种计算方法的特点，选用有限元法离散研究区域和方程组。本次计算选用三角形常应变单元类型离散研究区域。方程的求解。对时间、水位和含沙量的进行差分处理，并用预估-校正求解微分方程。

1.4 计算条件 考虑到不同年份的地形对研究分析的代表性和资料的限制，有关从实测资料和遥感图像方面分析入海泥沙运动的研究多见于20世纪80年代前期，因此为便于比较，本次以1982年汛前实测地形为基础进行的泥沙淤积过程计算和分析。

为较好地适应模型范围内的地形、结构物的布置，提高水沙运动模拟精度，将整个计算区域剖分成4200个网格单元，共有4220个节点，并且根据地形、主流和河势的变化在网格划分时进行了疏密调整，计算地形和计算网格见图1。其他条件计算，见文献[15, 16]。

2 涨落潮流运动、高流速场分析

由于研究的计算区域处于渤海莱州湾海域，是渤海海域的局部，其潮流运动受黄渤海大范围海域潮波的制约。在来自黄渤海不同类型、方向、时间和强度的潮波作用影响下，形成了莱州湾具有的南部和北部同时涨潮、南部和北部同时落潮、南部涨潮和北落潮流以及北部涨潮和南部落潮的独特的潮汐潮流现象以及莱州湾北部近海存在的无潮点和全日潮现象。

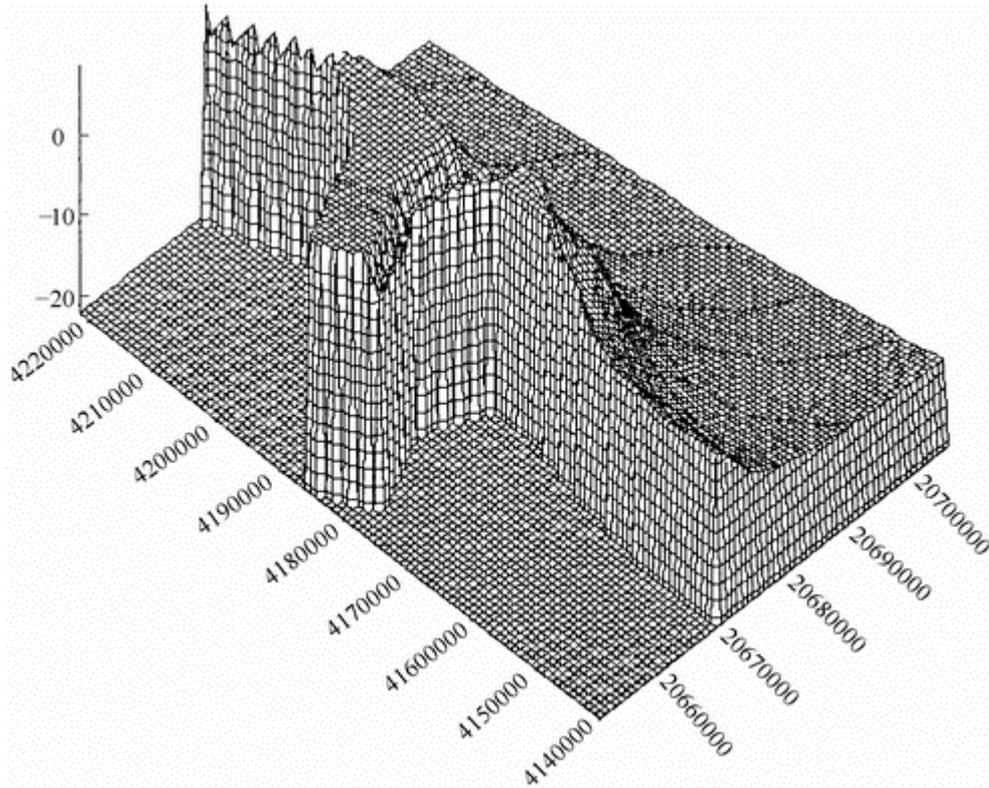


图1 计算区域网格划分和地形

2.1 涨落潮流运动 图2(a)~(d)显示了计算时段的典型径流大流量 $3100\text{m}^3/\text{s}$ 时河口入海径流流量和涨落潮流状态下的流速分布,图中最大流速发生在计算域北部的边界附近最大值为约 2.2m/s 见图2(c),此处恰好位于莱州湾和渤海湾的交界处的湾口附近。从这些图可以看出清水沟流路所在的莱州湾浅海海域受岸线的影响,近海潮流属于往复流;入海河口径流与莱州湾潮流的作用,在河口口门附近流速急剧减小,潮流挟沙能力降低,是泥沙沉降海底淤积,形成河口拦门沙的主要因素;在莱州湾三角洲北部近海海域的无潮点附近,流速很大,此高流速区域不利于泥沙的沉积,有利于泥沙的输送。由于海域涨落潮流出现的时间和位置不同,在河口东北角形成逆时针的涡流流场如图3(c),能够有效阻止清水沟流路的流向北部运动的泥沙,此结论与文献[6]的结论相同。

2.2 高流速场分析 黄河河口入海区域流场及其变化直接影响入海泥沙的输移和沉积。文献[1]、[2]和文献[5]、[6]用实测资料研究了黄河口外流场及其变化和计算区域北部的无潮点和高流速场。研究结果指出随着入海泥沙的淤积和河口沙嘴向海的延伸,河口口门外的流场不断增强,并给出了口门外的高流速场的等值线的平面分布图。为便于分析和比较,由图3(a)和3(b)分别给出了口门外和计算区域北部数值计算的高流速场等值线的平面分布图的结果。对黄河河口口门外的高流速场,通过比较二者在最大流速的位置和大小(实测1987年 $1.87\text{m/s} \sim 1.91\text{m/s}$,本文计算1983年 1.6m/s)和平面分布形态(沿海岸分布)等方面都基本一致;对计算区域北部的高流速场,数值计算结果也在位置、大小和平面分布形态等方面与实测资料^[1]基本一致。

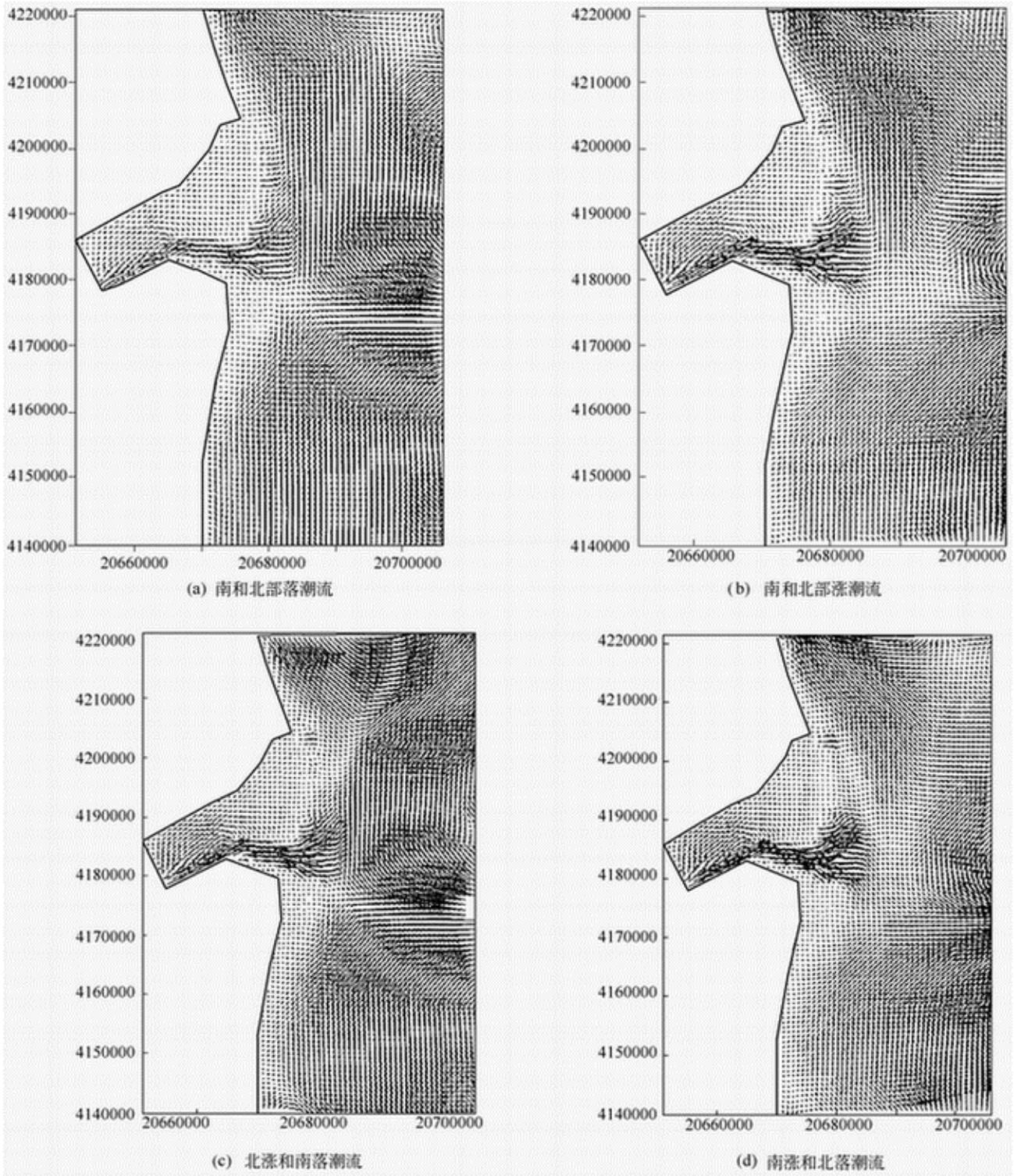


图2 典型涨落潮流流场

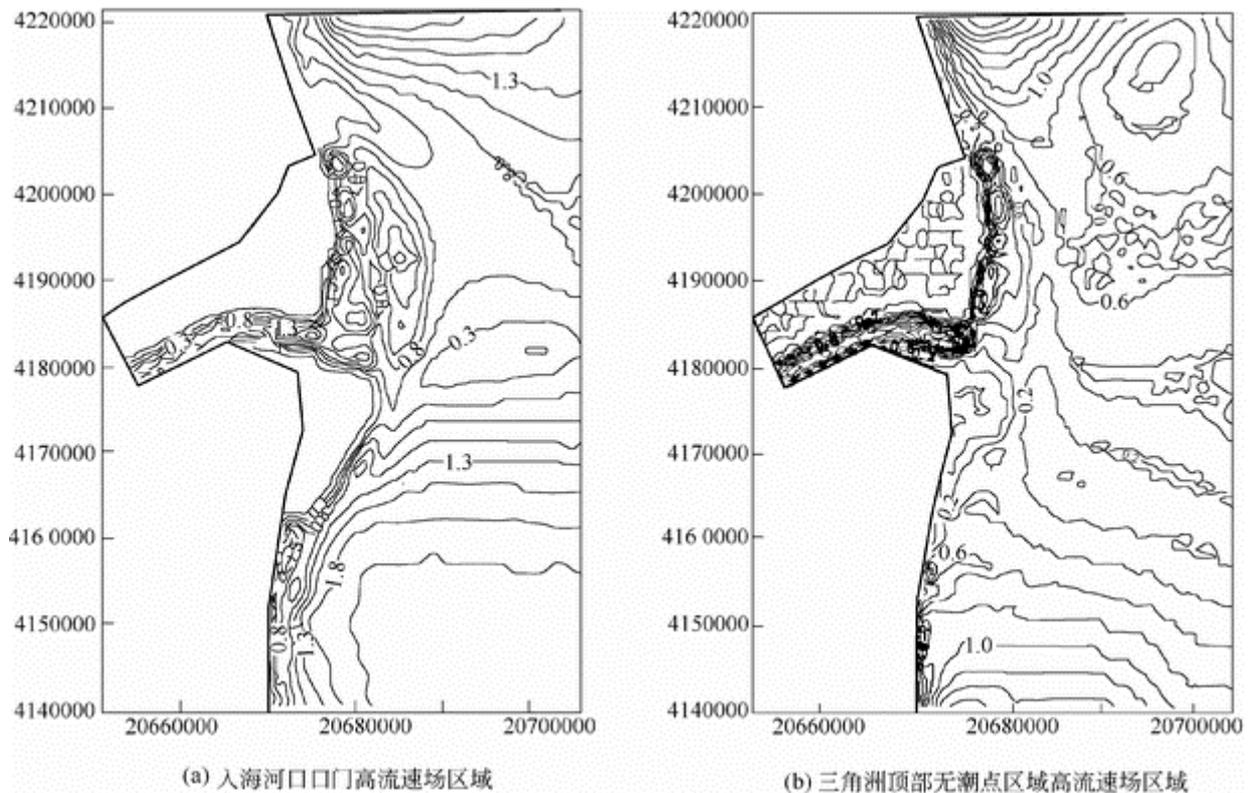


图3 两个典型的高流速区域的流速分布等值线

3 入海泥沙的冲淤过程

以下从入海泥沙的冲淤厚度平面分布变化过程、岸线推进平面分布延伸过程和入海泥沙冲淤(厚度)河口沿流路方向随离散点和随距离的变化过程。

3.1 入海泥沙的冲淤厚度平面分布变化过程 图4(a)、图4(b)、图4(c)和(d)为入海泥沙的冲淤平面分布图,分别为经过1982水文年水沙过程后入海泥沙量分别为0.5亿t,1.5亿t,2.5亿t和5.0亿t时淤积厚度(单位:m)变化过程分布图,由不同计算时段后的淤积厚度图可以看出,随着入海泥沙量的增大,一方面,泥沙淤积厚度不断加大,各个阶段的淤积最大厚度从0.6m、1.3m、4.0m到最大值5.5m;另一方面同一淤积厚度等值线的范围也不断地向前两侧扩展和向前延伸;而且,同一大小的淤积厚度等值线的延伸外推速度从口门向河口南北方向两侧的大于向外海方向的;入海泥沙主要淤积在河口口门处,淤积厚度最大值为5.50m,淤积最大厚度中心在入海方向上位于北京坐标系的(20680000,4187500)处见图(d)。这些计算结果与文献[3、18、19]实测资料或遥感资料分析结果相一致。

3.2 入海泥沙冲淤岸线平面分布延伸过程 图5给出了在上述计算时段内入海泥沙淤积河口淤积延伸+1m、0m和-1m 3个海底高程等值线淤积延伸图。由图5可以看出从+1m、0m到-1m海底高程等值线淤积延伸速度递减,入海河口方向延伸速度大于沿海岸方向的延伸速度,从口门向两侧延伸速度递减。这些计算结果与文献[18]的第182页的实测岸线变化分析结果相一致。

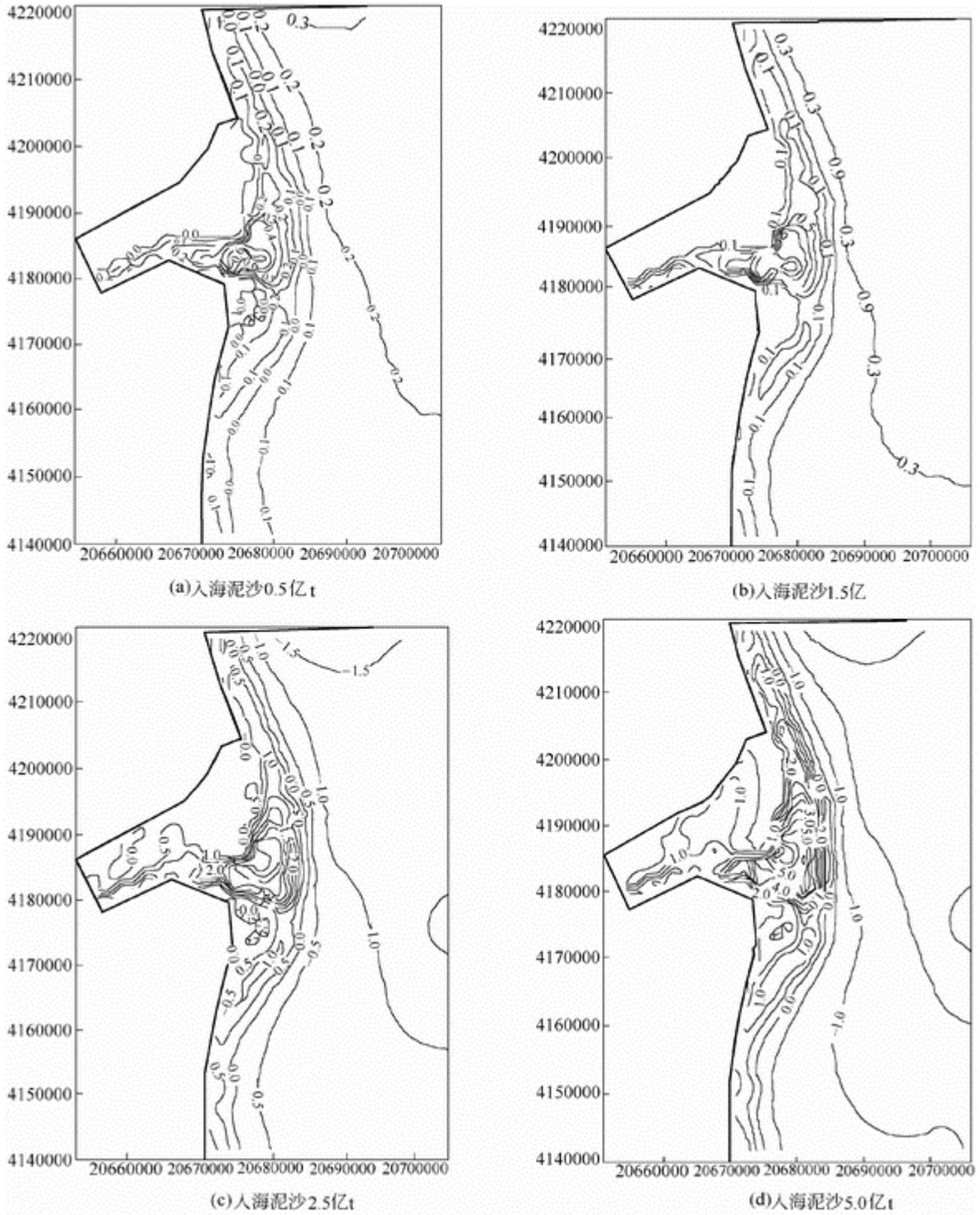


图4 入海泥沙河口淤积过程

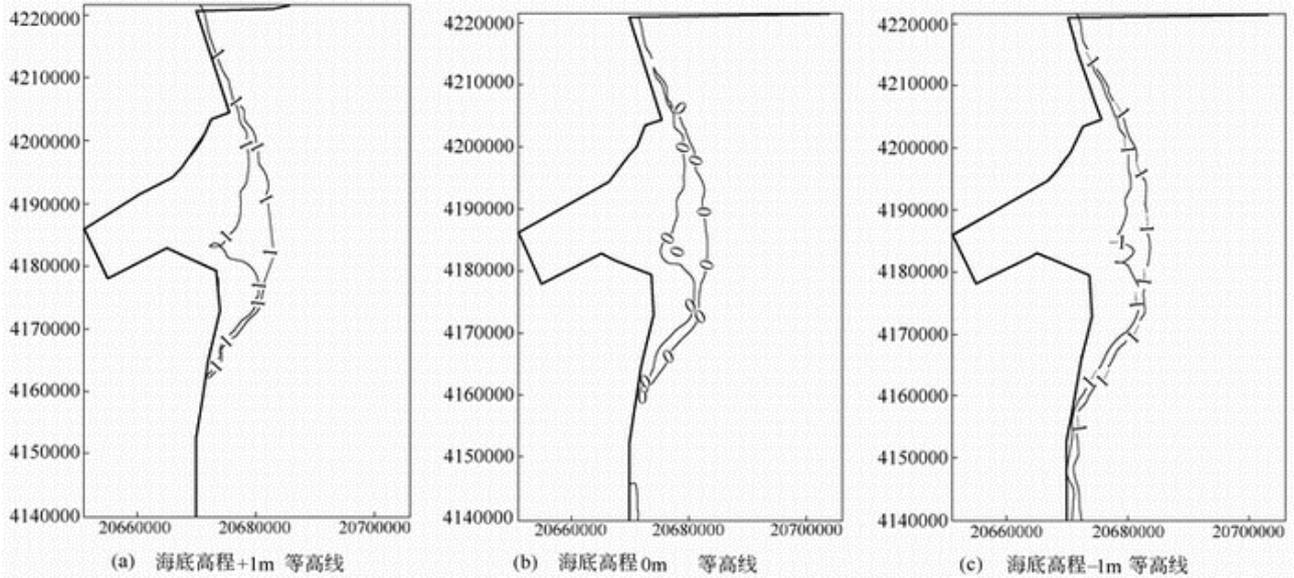


图5 典型海底高程等值线外推延伸

3.3 入海河口流路方向沿程各点泥沙冲淤(厚度)过程分析 为分析入海泥沙沿入海流路方向的淤积状况,选取了河口流路上如图6所示的离散节点(仅标出部分节点),为便于分析,绘制了入海流路沿程淤积厚度随离散节点变化的过程图见图7和入海流路沿程淤积厚度随距离变化的过程见图8。由图可以看

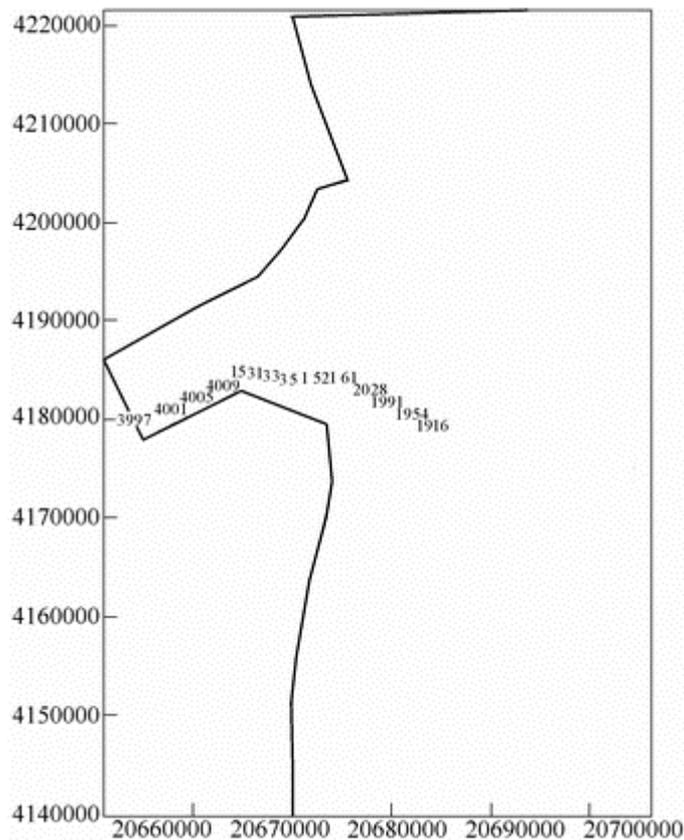


图6 沿程淤积分析选取典型离散节点位置

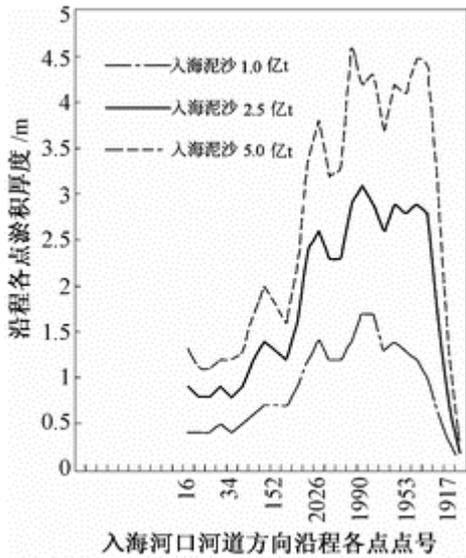


图7 入海流路沿程淤积厚度随典型节点变化过程

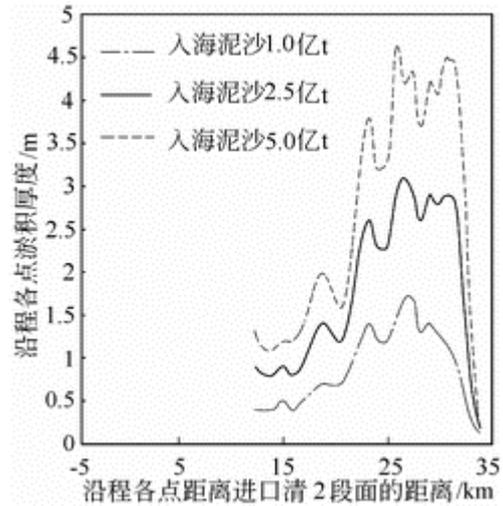


图8 入海流路沿程淤积厚度随距离变化过程

出入海泥沙沿程主要淤积在从节点161到节点1916或距离进口清2断面20km到33km的范围内，淤积强度的最大出位于节点1990和节点1991附近，或距离进口清2断面约27km处。随着入海泥沙数量的不断增加同一节点的淤积强度递减，如淤积强度最大的节点1990，入海泥沙1.0亿t时淤积厚度为1.6m，到入海泥沙5.0亿t时累计淤积厚度为4.6m。

4 结语

由以上分析，可以看出：(1)利用数学模型的特点，能够根据需要选择足够多的数据对海洋动力过程和入海泥沙淤积过程进行动态跟踪分析。显示了数学模型在揭示水沙运动规律方面的优越性；(2)通过典型时刻河口涨落潮流流场、高流速存在的两个区域、河口淤积平面分布和沿程纵向分布以及岸线推进的分析，对河口淤积过程与实测资料进行了对比分析，并得到与实测资料分析结果基本一致的结论。(3)由于海洋动力作用下多沙河口泥沙运动规律的复杂性和实测资料的限制，模型中泥沙的计算还有待于其理论的不不断提高；(4)对于解决流路规划等生产实际问题还有待于建立三角洲海域渤海和莱州湾整体大模型，更好地为三角洲经济和黄河下游的治理服务。

参考文献：

[1] 李殿魁, 杨玉珍, 程义吉, 等. 延长黄河口清水沟流路行水年限的研究[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2002.
 [2] 张启舜, 张世奇, 胡春宏, 等. 黄河口演变规律与整治研究[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 1997.
 [3] 李泽刚. 黄河口附近海区水文要素基本特征[J]. 黄渤海海洋, 2000, 18(3): 20-28.
 [4] 胡春宏, 吉祖稳, 王涛. 黄河口海洋动力特性与泥沙的输移扩散[J]. 泥沙研究, 1996, (4): 1-10.
 [5] 李泽刚. 黄河口外流场及其变化[J]. 人民黄河, 1990, (4): 31-36.
 [6] 程义吉. 黄河河口研究与治理实践[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2002.
 [7] 李泽刚. 黄河近代三角洲海岸的动态变化[J]. 泥沙研究, 1987, (4): 36-44.

- [8] 曹文洪. 黄河河口海岸泥沙输移规律和演变机理及湿地变迁研究[D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 1999.
- [9] 胡春宏, 曹文洪. 黄河口水沙变异与调控()——黄河口水沙运动与演变基本规律[J]. 泥沙研究, 2003, (5): 1-9.
- [10] 胡春宏, 曹文洪. 黄河口水沙变异与调控()——黄河口治理方向与措施[J]. 泥沙研究, 2003, (5): 9-14.
- [11] 曾庆华, 张世奇, 胡春宏, 等. 黄河口演变规律及整治[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 1998.
- [12] 曹文洪, 何少苓, 等. 黄河河口海岸二维非恒定水流泥沙数学模型[J]. 水利学报, 2001, (1): 42-48.
- [13] 张世奇. 黄河口输沙及冲淤变形计算研究[J]. 水利学报, 1990, (1): 23-33.
- [14] 庞重光, 杨作升. 黄河口泥沙异重流的数值模拟[J]. 青岛海洋大学学报, 2001, 31(5): 762-768.
- [15] 李东风, 等. 黄河河口泥沙水动力学数学模型[R]. 郑州: 黄河水利科学研究院研究报告, 2001.
- [16] 李东风, 张红武, 等. 黄河河口数学模型及泥沙输移规律研究[J]. 水利学报, 2004, (6): 1-6.
- [17] 张红武, 吕昕. 弯道水力学[M]. 北京: 水利电力出版社, 1993.
- [18] 钱颖颖, 等. 黄河干流水沙变化与河床演变[M]. 北京: 中国建材工业出版社, 1993.
- [19] 许殿元. 黄河口遥感研究[M]. 北京: 气象出版社, 1990.

Numerical simulation and analysis on tidal current and sediment silting process in Yellow River estuary

LI Dong-feng^{1,3}, ZHANG Hong-wu², ZHONG De-yu², LU Zhi-yong¹

(1. Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China; 2. Tsinghua University, Beijing 100084, China; 3. Zhejiang Water Conservancy and Hydropower College, Hangzhou 310018)

Abstract: The Finite Element Method (FEM) is applied to numerically simulate the tidal flow in the vicinity of the river mouth of Yellow River. The calculated result shows that the areas with high current velocity exist at the outside of the river mouth and at the junction of Bohai Bay and Laizhou Bay. According to the contour lines of sediment deposition, the variation process of deposition thickness along the flow direction as well as the contour lines of seabed, the deformation process of the seabed is analyzed. The calculated result is in good agreement with the observation data as well as the interpretation graphics of satellite remote-sensing data.

Key words: FEM simulation; estuary tidal current; sediment deposition; Yellow River