

长江口水动力及泥沙运动数值模拟

国家“948”项目：“含沙水流模拟技术及可视化系统”（编号：200318）提供资助。

王崇浩，陈建国

中国水利水电科学研究院泥沙研究所，北京市海淀区车公庄西路20号，100044。Email: chwang@iwhr.com 和 chenjg@iwhr.com，电话：010-68786627

摘要：本文用 MIKE21 模型计算研究了长江口水动力特征和泥沙运动规律。文中建立了包括长江口与杭州湾的大尺度二维水动力学模型和长江口水域的小尺度水动力粘性泥沙输移模型，前者为后者提供外海水动力边界条件。基于已有研究成果和实测资料，采用最新的地形资料和同步的水文观测资料对模型进行潮位、潮流及含沙量等的验证。模型计算的潮位、潮流均与实测资料符合良好，计算含沙量及随潮流变化过程与实测含沙量过程基本一致。

关键词：MIKE21 模型，长江口，水动力学模拟，粘性泥沙输移模拟。

1 长江口概况

长江口是我国第一大河口，河口地形十分复杂。自徐六泾以下，长江河口段由崇明岛将长江分为南支和北支，南支又由长兴、横沙岛分为南、北两港，南港再由九段沙分为南槽和北槽形成长江口三级分流、四口入海的河势格局，如图1所示。

长江口水动力过程主要包括径流、潮流、波浪、科氏力、沿岸流及其相互作用。长江口为中等强度的潮汐河口，长江口门中浚站多年平均潮差为 2.66m，最大潮差为 4.62m^[1]。长江口口门外潮汐为正规半日潮，口内潮汐为非正规半日潮。南支潮差由口门往上游逐渐减小，而北支由于其河槽呈喇叭型，潮差由口门往上游逐渐增大，且潮差大于南支。受径流、潮流、波浪等的影响，长江河口动力过程十分复杂，导致长江口沙洲冲淤不定，河势动荡变化，南支主流摆动，北支淤积萎缩。

长江口的波浪以风浪为主，浪向频率与风向频率基本一致，季节性变化十分明显。春季盛行 SE-SSE 浪，夏季盛行 SSE-S 浪，秋季盛行 NE~NNE 浪，冬季盛行 NW~NNW 浪，涌浪以偏东浪向为主。引水船站平均波高为 1.0m，最大波高为 6.2m^[1]。

长江口泥沙来源，有上游流域来沙、口外海滨来沙、河口浅滩和部分河床底沙再悬浮等多种。根据大通水文站多年统计资料，长江口多年平均流量为 29500m³/s，多年平均输沙量为 4.66 亿 t，最大年输沙量为 6.78 亿 t，最小年输沙量为 3.41 亿 t。这些悬移质经过大通至江阴之间的近口段进入河口段，因水面放宽，水势放缓，悬移质中较粗的颗粒在潮流界附近发生落淤，估算每年约 0.6 亿 t，从而使河口段的悬移质组成发生细化。

长江口床沙自江阴至口门逐渐细化，床沙平均粒径分别为^[2]：江阴~中央沙 0.137mm，南港主槽 0.121mm，北港主槽 0.043mm，南槽江亚 0.022mm，南槽铜沙 0.006mm，南槽口门 0.007mm，北槽主槽 0.019mm，北港口门 0.0706mm，北港口外 0.0090mm，北支 0.063mm。

长江口悬沙平均中值粒径为 0.0086mm^[3]，极值变化范围在 0.005~0.017mm 之间。一般来讲，细颗粒泥沙产生絮凝现象的临界粒径为 0.032mm，最佳絮凝粒径为 0.008mm。可见，长江口悬沙基本处于最佳絮凝粒径范围，絮凝造成细颗粒泥沙迅速落淤的作用不容忽视。

本文建立了包括长江口与杭州湾的大尺度二维水动力学模型和长江口水域的小尺度水动力粘性泥沙输移模型，前者为后者提供外海水动力边界条件。基于已有研究成果和实测资料，采用最新的地形资料和同步的水文观测资料对模型进行潮位、潮流及含沙量等的验证。

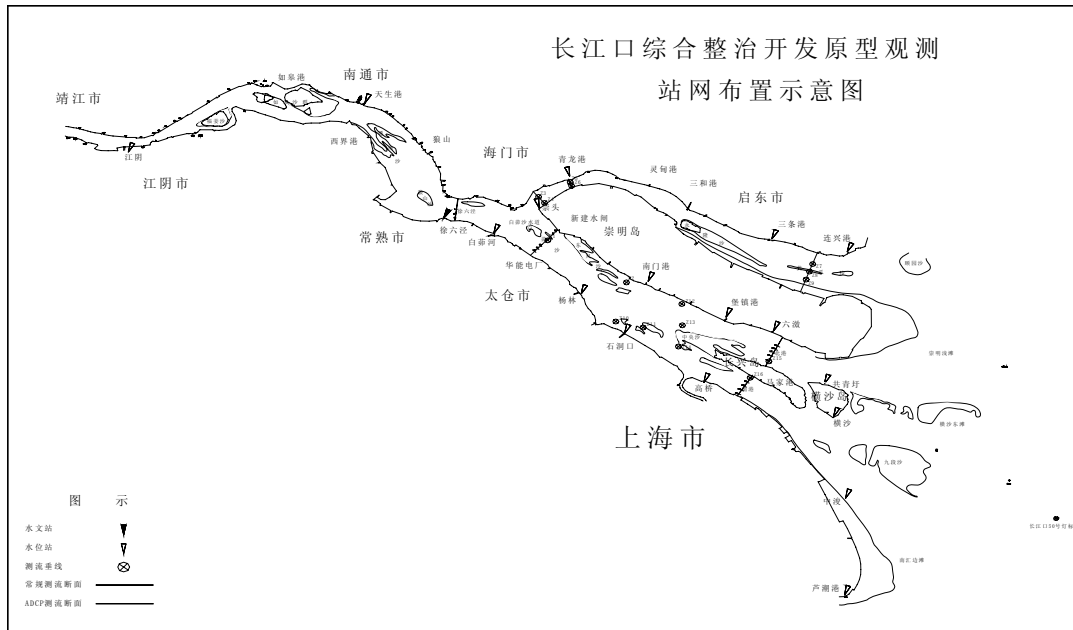


图 1 长江口及测站布置示意图
Fig. 1 Sketch map of Changjiang River estuary and the surveying stations

2 水动力验证计算

2.1 计算范围及计算条件

将长江口和杭州湾作为一个有机整体，有针对性地建立能反映长江河口与杭州湾水动力特性和水量交换等的二维水动力数学模型，模型计算的范围为包括江阴至长江口、杭州湾的水域，即上边界为江阴、东边界为东经 123° 00′、南边界在象山港附近即北纬 29° 45′ 左右、北边界在吕四港北即北纬 32° 15′。计算范围如图 2 所示。

计算范围内，从江阴至长江口杭州湾的地形资料由 6 部分组成。长江澄通河段采用长江口水文水资源勘测局 2001 年实测的 1: 10000 地形图，长江口南支及南北港地形采用 2002 年 1: 25000 实测地形，南北槽地形采用 2002 年 2 月 1: 60000 水下地形图，北支地形采用 2001 年 11 月 1: 25000 实测水下地形图，长江口外地形。采用 1994 年吕四港至花鸟山海图 1:25 万，杭州湾及舟山群岛地形采用 1999 年 12 月中国东海舟山群岛及附近海图 1: 25 万。

经高程基面统一国家 85 高程后的长江口、杭州湾水下计算水域地形图如图 2 所示。根据资料情况，选取 2002 年 9 月 22-30 日的 9 天过程的水位、流速及含沙量资料作为模型验证计算的水文资料。2002 年 9 月水位验证断面 16 个，流速及含沙量验证点 15 个。模型的上边界用同期江阴断面的流量过程，模型外海边界的潮位过程由 Q1、O1、P1、K1、N2、M2、S2、K4、M4、MS4、M6 11 个分潮的调和常数确定潮位过程^[4]。水动力模型计算网格为 $\Delta x = \Delta y = 300\text{m}$ ，结点数 826200 个，其中水域结点数 397942 个，占 48.17%。用 Smagorinsky 公式计算水流涡粘系数，阻力系数 $n = 0.020 - 0.12$ ，模型计算不考虑波浪和风的影响。

2.2 潮位验证

选取上游徐六泾、南支杨林、北支青龙港、南港高桥、北港堡镇及口门连兴港、横沙和中浚

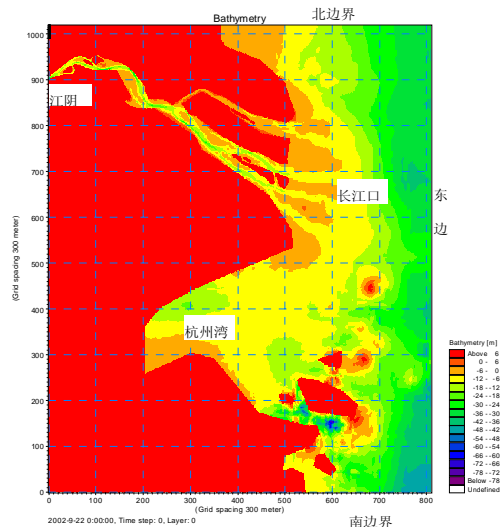


图 2 水动力计算域及地形
Fig. 2 Computational domain and its topography in the hydrodynamics

站进行了潮位验证（见图 3）。总体来说，在模型较大范围的计算水域中，各站水位计算值与实测值总体变化趋势吻合。上游徐六泾河段潮位与实测符合较好，南支各站的潮位总体与计算一致，但大潮时潮差偏小；北支的连兴港符合很好，青龙港的潮位验证稍差，计算潮差及潮时均与实测值有一定差异，分析认为主要是网格太疏，加上该河段近年来不断淤积萎缩，水深较小，导致计算结果不是很好，说明要细致研究长江口南北支水流特性、盐水入侵和冲淤发展等问题时，模型计算需要更细的网格单元。

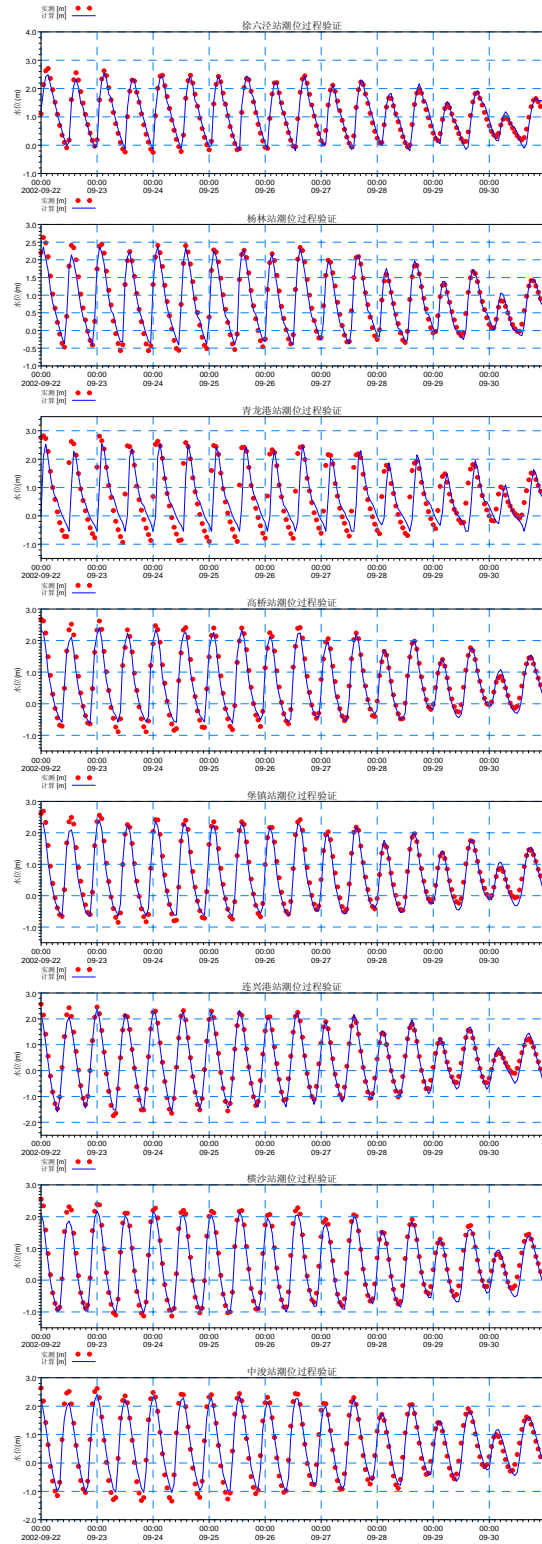


图 3 计算潮位与实测潮位比较

Fig. Comparison of computed and observed tidal elevations

2.3 潮流验证

图 4 为各测点垂线大潮期平均流速与流向计算与实测过程的对比。流速流向的验证结果表明：总体而言，各代表流速流向计算值与实测值吻合良好，个别站流速计算值与实测存在差异。南支上游段白茆断面中，白 3 垂线的计算流速与实测值基本一致，白 2 垂线计算流速偏大，但流向吻合较好。反映该河段的河势复杂性，白茆沙北侧水流除受上游径流和潮流影响外，还受北支倒灌水流的影响，表明要精确模拟长江口的流态需建立更为精细的计算网格。南北支河口的计算流速大小与实测值基本相当，流向吻合得很好，说明模型能很好地模拟南北支的涨落潮往复流。同样，Z13 和 Z14 垂线的计算结果也与实测值基本吻合，可以推定模型能较好地反映南北港的分流比。由于北支的分流很小，北支的出口水流主要受潮流的影响，以往复流的形态上溯及下落，流态较为单一，模型也很好地模拟了流速及流向变化过程。在北支入口崇头及青龙港附近，由于水流极为复杂，计算的 Z3 和 Z5 垂线的流速较实测值明显偏小，但流向基本一致，这直接导致了白 2 断面计算流速偏小，可以说当前的地形和模型计算结果可能使计算的北支分流比偏小。这一方面是当地水流条件复杂，影响了模拟精度；另一方面也成地形处理不精细有关，模型的网格尺寸为 300m，青龙港附近断面很窄，且由于多年的淤积萎缩，边滩发育，水深较浅，所以网格数太少，难以准确反映主槽的存在，即地形被平坦化，进出水流受阻，这也提醒我们下一步有必要更精细的网格或嵌套模型来深入研究长江口水流特性的必要性。但总体来说，MIKE21 模型能很好地模拟长江口的水流，能得到较为真实的潮位、潮流过程。

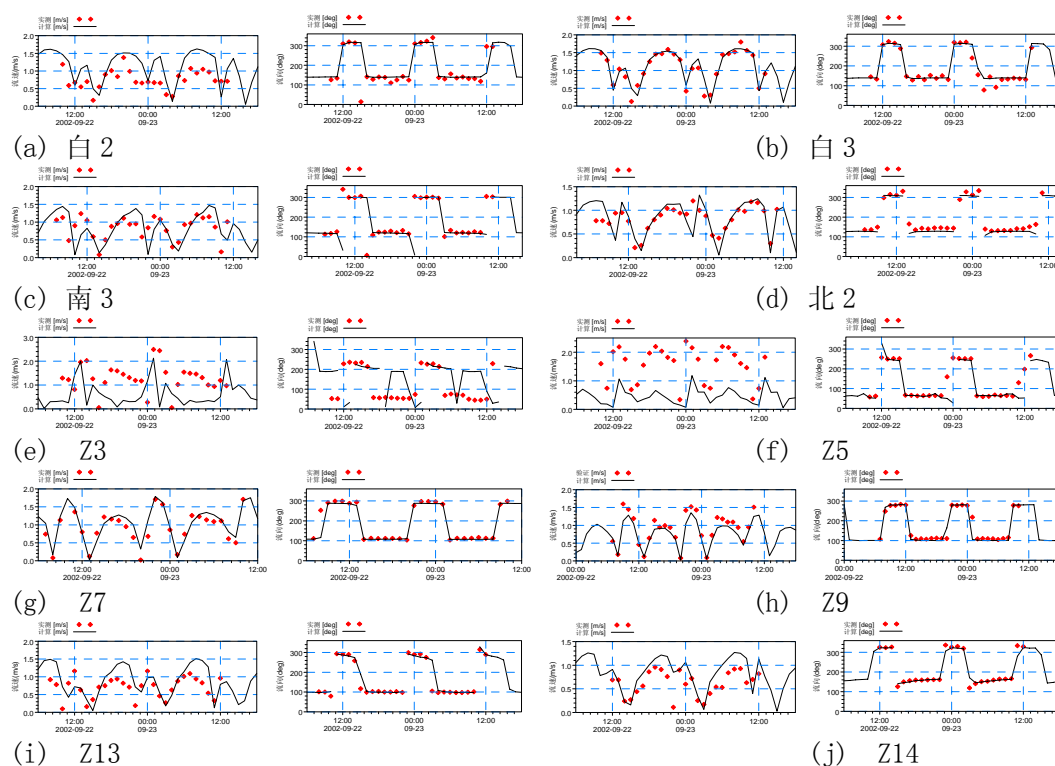


图 4 平均流速与流向验证

Fig. 4 Comparison of computed and measured tidal current

3 长江口泥沙模型的建立与验证

3.1 模型的建立

为提高计算精度，泥沙模型计算选定为只包含长江口的区域，如图 5 所示，上游边界仍在徐六泾断面，外海边界：南至南汇嘴附近、北至连兴港以北 70km、东距南汇嘴约 140km。新的计算区域坐标与北方的转角为 5° ，网格尺寸 $150\text{m} \times 150\text{m}$ 。水流计算边界条件由长江口水流

大模型计算的徐六泾站的流量过程和潮位过程提供，模拟时长同大模型从 2002 年 9 月 20 日 0:00—2002 年 9 月 30 日 23:00，其中前二天为模型的预热时段。时间步长取 30s，水流模拟的 Courant 数为 5.16。

泥沙模型的计算与水流模拟同步耦合进行，边界的含沙量根据平衡输沙的原则由大模型计算的边界水流条件确定，借用河道的挟沙能力公式计算，

$$S^* = k \left(\frac{(u^2 + v^2)^{3/2}}{gh\omega_s} \right)^m \quad (1)$$

式中， S^* 为水流的挟沙能力(kg/m^3)； u 、 v 分别为 x 、 y 方向的流速(m/s)； g 为重力加速度($=9.81\text{m}/\text{s}^2$)； h 为总水深(m)； ω_s 为泥沙的有效沉速(m/s)。

本次计算的泥沙粒径为长江口悬沙的平均颗粒一组，长江口悬沙平均中值粒径为 0.0086mm 。考虑到长江口的实际悬移质级配变化较大，尤其是陆相和海相泥沙的粒径相差较大，变化范围在 $0.0047\sim 0.0172\text{mm}$ 之间，且长江口泥沙基本处于最佳絮凝范围内，但本次计算未考虑盐度在长江口的分布及变化对泥沙沉速的影响，为消除颗粒变化及絮凝沉降的影响，经反复调度，泥沙的沉降速度在不同水域取不同的值，变化范围为 $0.1\sim 5.0\text{mm}/\text{s}$ 之间，徐六泾—南北支汉口陆相泥沙占主导，颗粒较粗，取 $5.0\sim 1.0\text{mm}/\text{s}$ ，南支 $1.0\sim 0.5\text{mm}/\text{s}$ ，北支主要为海相泥沙的输入，颗粒较细，且北支的潮流动力作用较强，所以泥沙颗粒的沉降速度较小，取 $0.5\sim 0.1\text{mm}/\text{s}$ 。

细泥沙颗粒的临界起动和沉降切应力分别取 $0.15\text{N}/\text{m}^2$ 和 $0.12\text{N}/\text{m}^2$ ，冲刷时床面的泥沙侵蚀系数为 $0.00001\text{kg}/\text{m}^2/\text{s}$ 。泥沙的扩散系数取 $1.5\text{m}^2/\text{s}$ 。泥沙计算不考虑波浪掀沙。

3.2 含沙量验证

经过模型的反复调试，计算得到长江口的悬移质泥沙含沙量变化过程，与各站的实测含沙量过程进行比较，以验证模型在泥沙计算方面的可靠性和先进性，计算结果与实测结果的比较如图 6 所示。总体来说，经过调试后，在南支及南、北港，本模型计算的各站的细颗粒泥沙过程基本与实际情况吻合，较好地反映了泥沙颗粒的大、中、小不同潮流过程中的冲刷、沉降过程，体现在含沙量的变化随潮流强度的变化而变化。在白茆断面，中小潮时计算结果与实测值符合良好，白 4 垂线的大潮含沙量计算值稍小，可能与给定的冲刷层厚度等因素有关；南港断面各垂线符合良好，北港断面中、小潮含沙量符合较好，北 2、北 3 垂线大潮含沙量变化幅度略小；在北支出口段的 Z7 垂线，计算含沙量基本反映了实际情况；在北支上段的南北支分汉口附近，如青龙港附近 Z5 垂线，计算与实测含沙量相差较大，计算值明显偏小，这与本河段的复杂水流条件有关，在大模型中的水流验证也不理想，需要加密计算网格，认真处理地形资料，作进一步、更为细致的研究。

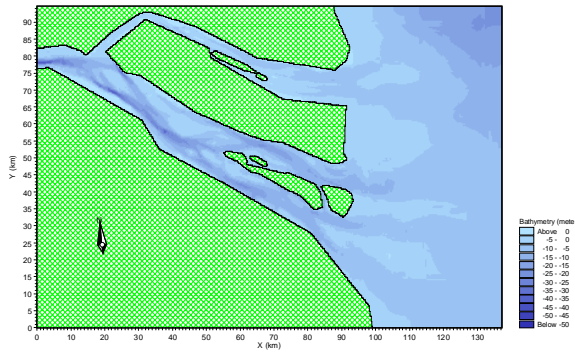
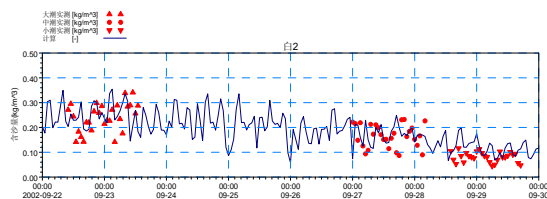


图 5 泥沙模拟计算区域

Fig. 5 Computational domain of sediment modelling



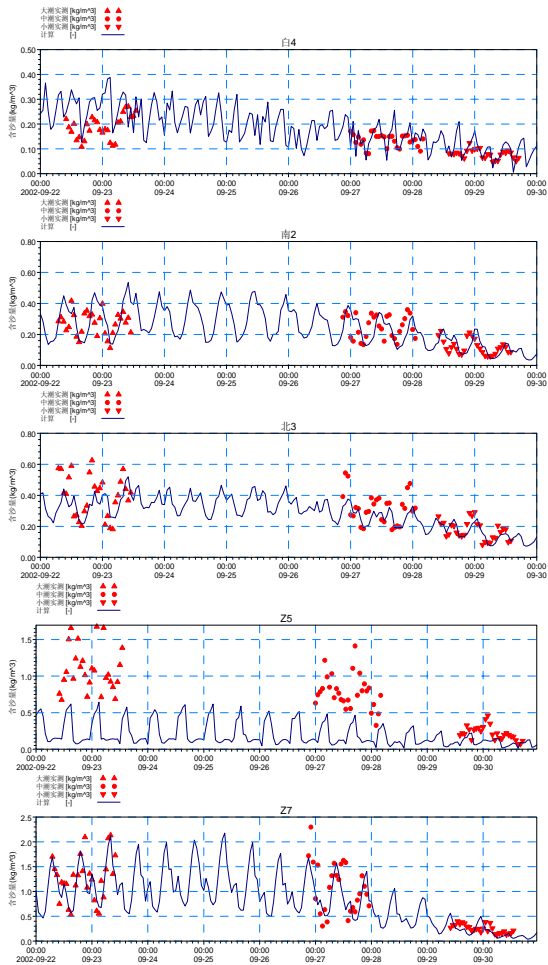


图 6 计算含沙量与实测含沙量比较

Fig. 6 Comparison of computed and measured suspended sediment concentration

4 认识

通过 MIKE21 模型在长江口水动力及泥沙运动的验证应用，得到以下认识：

(1) MIKE21 模型具有理论背景科学、用户界面友好、数据前后处理功能强大、计算速度快及好学易用的特点；

(2) 在长江口水流泥沙模拟计算应用，MIKE21 模型较好反映了长江口水动力特征，也基本上能较好地反映含沙量随潮流的变化过程，结合考虑河口地区细颗粒泥沙的沉降、絮凝特点，MIKE21 模型能较好地模拟河口的细颗粒泥沙过程。由于泥沙运动的影响因素较水流运动更为复杂，既受潮流、波浪等动力因素的影响，还受泥沙的沉降、起动、床面固结过程等重力作用的影响，尚需考虑泥沙颗粒的物理化学特性、泥沙的级配等因素，经反复调试，MIKE21 模型的计算结果能与实测值吻合较好，MIKE21 模型体现了价值，能作为一个有效的工具用于研究河口海岸地区波浪、潮流作用下的泥沙运动及河床演变。

(3) 河口地形一般较为复杂，MIKE21 模型的矩形网格，在地形适应性方面有一定的困难。

参考文献

- [1] 陈吉余、沈焕庭、恽才兴等，长江河口动力过程和地貌演变，上海科学技术出版社，1988。
- [2] 宋志尧等，长江口杭州湾泥沙场数值模拟，河海大学科研报告，2003 年 12 月。
- [3] 沈焕庭、李九发、朱慧芳等，长江河口悬沙输移特性，泥沙研究，1986(1)。
- [4] 河海大学海岸域海洋工程研究所，东中国海大尺度和中尺度潮波传播数值模型计算，2003。

Numerical Modelling of Hydrodynamics and Sediment Transport in the Changjiang River Estuary

WANG Chong-hao and CHEN Jian-guo

(China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing, China)

Abstract: In this paper, the DHI MIKE21 model was used to study the hydrodynamics and sediment transport in the Changjiang River Estuary. First, a hydrodynamic model with the larger computational domain covering the Changjiang River Estuary and Hangzhou Bay was constructed to study the general characteristics of hydrodynamics and provide the hydrodynamic information as the boundary conditions in the following modelling of sediment transport with the finer mesh sizes in the Changjiang River Estuary. Second, the models were validated by measurements, computed tidal level and tidal current are in good agreement with the measured data very well, the computed suspended sediment concentration at different stations are also match the field data generally. Finally, the characteristics of hydrodynamics and sediment transport in the Changjiang River Estuary are studied briefly based on the modelling results. **Key words:** MIKE21 model; Changjiang River Estuary; Hydrodynamics and fine-cohesive sediment transport.