

# 长江口航道治理研究中数、物模技术的应用

高敏<sup>1</sup>, 顾峰峰<sup>2</sup>, 范期锦<sup>1</sup>

(1. 交通运输部长江口航道管理局, 上海 200003; 2. 上海河口海岸科学研究中心, 上海 201201)

**摘要:** 潮汐河口受径流和潮流共同作用。径潮流动力的不同及其复杂的时空变化导致河口的不同区段水沙特性等也明显不同。在河口治理研究和工程实践中必须充分考虑这些特征。河口治理研究应采用数模、物模多种手段综合研究的方法, 因数模和物模技术具有不同的特点和适用范围, 研究方法及其具体评价指标应根据研究区段的水沙特性和研究目的合理选用。以长江口深水航道治理工程的实践为例, 介绍数物模综合研究技术的应用及效果。

**关键词:** 长江口; 研究方法; 数学模型; 物理模型; 评价指标; 应用

中图分类号: U 617

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2013)S1-0121-16

## Application of numerical model and physical model to study on the Yangtze estuary waterway regulation

GAO Min<sup>1</sup>, GU Feng-feng<sup>2</sup>, FAN Qi-jin<sup>1</sup>

(1. Yangtze Estuary Waterway Administration Bureau, MOT, Shanghai 200003, China;

2. Shanghai Estuarine & Coastal Science Research Center, Shanghai 201201, China)

**Abstract:** The tidal estuary is jointly influenced by the river flow and tidal current. The dynamic difference of the tidal current and river flow and their complex temporal and spatial variation result in obviously different characteristics of water and sediment in different river reaches. The characteristics should be taken into account during the study of estuary regulation. An intergraded method combining numerical model and physical model are consequently adopted in the estuary regulation. Due to the fact that numerical model and physical model have different features and application scopes, the research method and evaluation index should be reasonably selected according to the characteristics of water and sediment in a specific river reach and research purposes. Based on the practice of the Improvement Project of the Deep-draft Channel of the Yangtze Estuary, the application of comprehensive research of numerical model and physical model and their effects are presented.

**Key words:** the Yangtze estuary; research method; numerical model; physical model; evaluation index; application

实体物理模型与数值模型是研究口水沙及地形的变化规律及预测水工建筑物等治理工程修建后, 水、沙的运动变化和河床演变的重要技术手段。数模和物模技术各有其优点<sup>[1]</sup>, 但由于人们认识水平的限制, 目前数模和物模技术均存在一定的局限性, 应合理界定其适用范围。

长江口是典型的潮汐河口(图1), 具有丰水、多沙及中等强度潮差(但潮量巨大)的特征。潮汐河口特有的动力条件, 如径流、潮流、波浪、盐淡水混合和风暴潮等使得河口地区的水、沙特性, 与内河近似均匀流及平衡输沙的情况差异较大。影响长江口发育和河床演变最主要

收稿日期: 2011-09-02

作者简介: 高敏(1976—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事港口航道工程。

的动力因素是径流和潮流，在河口的不同区段，径潮流动力强弱及力量对比存在差异，水沙特性迥异。而河口治理研究范围广，研究内容和目的

也不尽相同。这些因素给常用的数、物模技术手段的选择和适用性论证以及评价指标的选用等带来较大的困难。

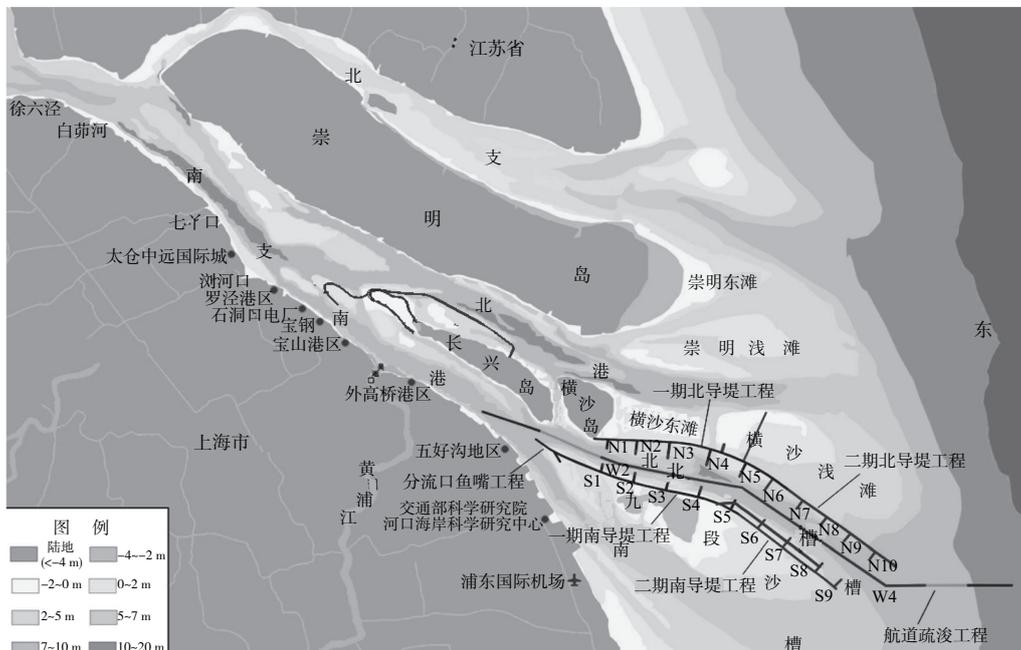


图1 长江口总平面布置

很多学者针对数、物模技术在长江口的应用开展了相关研究。如在长江口深水航道治理过程中，陈志昌等<sup>[2]</sup>在长江口整体物理模型中为模拟口外旋转流而自主开发了可逆泵控制系统；张俊勇等<sup>[3]</sup>就长江口全沙物模研究的可行性进行了研究，窦希萍等<sup>[4]</sup>建立了长江口全沙数学模型。这些研究，已在潮汐条件下的动力控制及悬沙和底沙的数、物模模拟技术等方面取得了重要的成果。

在长江口深水航道治理方案研究中，既要考虑由底沙运动带来的地形调整，又要考虑底沙和悬沙共同作用带来的对航道回淤的影响。数学和物理模型试验是评价这些目的是否实现及实现程度的主要手段。然而，长江口不同区段水、沙特性的差异，使得在这一评价过程中，如何科学合理地采用研究技术和技术指标就显得至关重要。

在实际应用中，宜采用数模、物模综合研究的方法，根据研究的对象和目的充分发挥各模拟技术的长处，综合分析解决实际问题。本文主要根据长江口深水航道治理工程的研究实践，概要介绍如何针对不同的研究课题、对象河段的水、

沙运动特点，合理选择研究方法、界定两类模型的主要研究目标和选择评价指标。

## 1 长江口基本水、沙条件及航道治理研究内容

### 1.1 长江口基本水、沙条件

长江口上游水文站大通站的径流量和输沙量基本可代表长江入海的水沙量。自1950年以来，多年平均径流量为 $8.965 \times 10^{12} \text{ m}^3$ ，每年5—10月的洪季径流量约占全年的70%，变化相对平稳；多年平均输沙量为3.90亿t，洪季输沙量约占全年的87%。自20世纪80年代中叶开始，输沙量呈减小趋势，三峡蓄水后大通站输沙量又明显减小，2003—2010年平均年输沙量为1.52亿t。三峡工程运行后对水量呈现蓄洪补枯作用（削峰填谷），总体上洪季径流量和输沙量略有减少。

长江口潮量巨大，洪季大潮可达 $5.3 \times 10^{10} \text{ m}^3$ ，短时间尺度上，潮汐影响远大于径流。口外潮汐为正规半日潮，口内潮汐变为非正规半日浅海潮；潮波在河口内传播过程中发生变形，沿程高、低潮位增加、潮差减小，涨潮历时缩短、落潮历

时增长; 拦门沙航道上段潮流方向主要以往复流为主, 口外为顺时针旋转流; 拦门沙内外均存在涨、落潮流路分歧现象, 涨落潮主流路分歧是宽浅河段中形成落潮主槽和涨潮副槽的重要原因, 也是长江口形成分汊河型及呈现周期性演变规律在动力条件方面的根本原因<sup>[5]</sup>。

长江口徐六泾以下河段, 根据径流、潮流动力的对比, 基本可分为拦门沙以上河段(南支、南港和北港上段)、拦门沙河段(北港下段、北槽和南槽)和口外(拦门沙以外)河段。在平均流量与中潮组合下, 拦门沙以上河段的落潮量是涨潮量的2~3倍, 径流对河床演变的影响是主要因素; 拦门沙河段的落潮量是涨潮量的1~2倍, 为落潮流占优河段; 口外段为旋转流, 水下三角洲的发育主要受潮汐动力条件和来沙条件等控制。随着洪枯季和大中小潮变化, 各段的涨落潮力量及对比有所变动。

长江口不同区段的悬沙粒径基本相同, 而底沙粒径呈向口外逐步变细的特征。

## 1.2 航道治理研究主要内容

河口治理研究领域的主要研究对象包括航道治理工程、河势控制工程、围垦圈围工程、港口码头工程、越江通道工程和环保生态修复工程等。航道治理工程通常采用“整治”、“疏浚”或“整治+疏浚”的工程措施以达到一定的航道建设目标。长江口深水航道治理工程主要通过修建堤坝等整治建筑物工程稳定和改善局部河势、调整流场, 改善局部水、沙运动特性, 消除浅段并辅以疏浚成槽, 以实现整治目标。整治建筑物工程实施后, 一般均会对工程周边的局部流场、工程区段流场、河口各汊道涨落潮量的动力分配等产生不同的影响, 从而对局部地形乃至河口河势变化产生一定的影响。航道治理工程研究中还特别需要重点关注工程后航道区域的回淤量及回淤分布情况, 必须充分考虑底沙和悬沙运移的综合影响。

目前, 还不能以纯理论计算(或辅以经验公式)直接解析上述需研究的内容, 仍必须通过模

拟手段进行研究。

## 2 长江口航道治理研究数物模技术的选用

### 2.1 数、物模研究的技术特点

数学模型和物理模型有着各自鲜明的特点。数学模型是基于古典流体力学的基础随着现代电子计算技术的进步而快速发展起来的, 它通过一定的数学方程式和定解条件进行数值求值, 得到需要求解的要素, 模拟研究对象的变化过程。随着计算能力的提高和研究的进步, 数学模型逐步从原来的简单一维、发展到二维和三维模型, 计算要素也从最初的水流流场模拟发展到波浪、泥沙、盐度和温度等多要素综合计算。在河口航道治理研究方面, 主要采用潮流数模和泥沙数模等。从实践经验看, 不考虑泥沙、河床演变等因子的河口潮流数模对工程引起的流场变化有较高的模拟计算精度; 在无工程对流场造成明显调整的情况下, 经过率定验证的航道回淤泥沙数模对以悬沙落淤为主的航道回淤量及分布预报有一定的精度。但长江口拦门沙河段的泥沙运动受径流、潮汐、波浪作用以及盐水等的影响, 悬沙絮凝沉降的物理化学过程及规律极为复杂, 在泥沙数模中尚难同时考虑上述因素对地形变化、航道回淤等的综合影响。

物理模型是建立在试验水力学的基础上, 将研究对象按满足一定相似条件及相似准则, 缩制而成的实体模型。在物理模型中, 通过模拟和监测工程前后流场、地形等要素的变化, 推算出原型各要素的变化, 进而分析工程的影响等。河口航道治理研究中常用的物理模型有潮流定床模型、以底沙运动为主的底沙动床模型(也称清水动床模型)和以悬沙运动为主的悬沙淤积定床模型等。潮流定床模型对流场及工程实施后的流场变化已有很高的模拟精度, 但相对于潮流数模来说, 试验研究费用较高。清水动床物模对短期河口河床演变及工程前后流场变化引起的对底部泥沙输移影响以及河床的调整有较高的模拟精度。限于认知水平和物模变态比尺效应等的影响, 目

前还难以在物模中模拟河口咸淡水混合、泥沙絮凝沉降以及最大浑浊带等,考虑河口底沙、悬沙和含盐度等多要素共同作用的全沙物理模型仍处于研究阶段。

综上所述,在河口航道治理研究中,潮流数模和潮流定床物模均有相当的模拟计算精度,是通常采用的不可或缺的技术手段。从目前的数、物模研究技术手段的理论成熟度和操作难度的角度来看,泥沙数学模型更加侧重于模拟悬沙输运过程中悬沙与底部泥沙交换,清水动床物理模型更侧重于底沙输移对河床塑造的模拟。

## 2.2 数、物模技术的选用原则

在河口航道治理研究中,研究方法和数、物模型研究技术手段选择的主要原则为:

1) 应利用和发挥各类模型的优点,采用数模、物模多手段综合研究分析的方法。根据研究区段的水沙特性和具体研究目的,有针对性的选择数模、物模等研究手段,开展综合研究。单一的选择某种研究手段,往往不能全面反映工程的影响,难以正确预测和评价工程的实施效果。

2) 当主要关注工程实施前后局部和周边流场的变化,工程对各汊道涨落潮量、水位及分流的影响时,可选择采用潮流数模或定床物模为主的研究手段。

3) 当研究区段主要受底沙影响且悬沙影响较小时,为研究工程实施后滩槽地形的变化和河床演变情况,可选择清水动床物模为主的研究手段。

4) 当研究区域主要受悬沙影响,且主要考虑工程实施对悬沙输移能力及航道回淤的影响时,则主要考虑选择航道回淤泥沙数模为主的研究手段。同时需要结合清水动床物模模拟工程对地形的调整情况,利用调整后的地形和流场结合泥沙数模综合考虑工程实施的效果。

要判断研究区域是以底沙还是悬沙作用为主,主要可从以下2个方面分析:1) 底沙和悬沙的粒径分布;2) 涨落潮流动力强度。

悬沙、底沙的根本区别在于研究区域是否

有足够的动力、悬扬足够多的底部泥沙进入到水体,参与水平输运,上述两点是决定这一过程的主要因子。底沙与悬沙粒径分布差异较大时,河床调整通常以底沙作用为主,差异较小时则主要以悬沙作用为主。长江口不同区段的底部泥沙粒径基本为向口外逐步变细,而潮流动力则基本呈向口外逐步增大的特征。因而,从粒径和动力场的变化特征可知,越往口外悬沙的影响逐步增大,底沙影响逐步减小。

取长江口2个典型区段的治理工程研究具体分析数物模综合研究方法的应用及数模、物模型技术的选用:一是北槽拦门沙河段的长江口深水航道治理三期YH101减淤工程;二是位于拦门沙河段以上的南北港分汉口河段的新浏河沙护滩和南沙头通道限流潜堤工程。这2个区段水、沙特性不同,航道回淤机理不同,在航道治理方案研究中对数、物模技术的选用和综合应用也有明显差异。

## 3 拦门沙河段航道治理研究模型技术的综合应用

长江口深水航道治理工程主要位于北槽拦门沙河段。通过一~三期工程的治理,航道水深实现了从工程前的7 m加深至12.5 m,工程已于2011年5月18日通过国家竣工验收。三期YH101减淤工程(图2中丁坝延长的部分)的实施,为实现三期12.5 m航道建设目标起到了关键的作用。

### 3.1 拦门沙河段水沙特性及回淤机理

该河段的悬沙和底沙的中值粒径见图3和图4,其中悬沙接近0.01 mm,底沙0.01~0.03 mm。从粒径分析来看,悬沙与底沙的粒径分布接近,底沙与悬沙交换频繁。

底沙的中值粒径对应的泥沙起动流速约0.8~1.5 m/s(10 m水深,沙玉清公式,图5)。而该研究区域的平均流速基本都大于0.8 m/s(表1)且落潮占优,即大多数时刻可到达底沙起动的条件且泥沙净向下输运;另外,0.01~0.03 mm对应的泥沙起动流速和悬扬流速基本接近(图6)<sup>[6]</sup>,即底沙易起动悬扬进入悬移状态,以悬移质形式运动,航道回淤以悬沙落淤为主,该河段落潮流

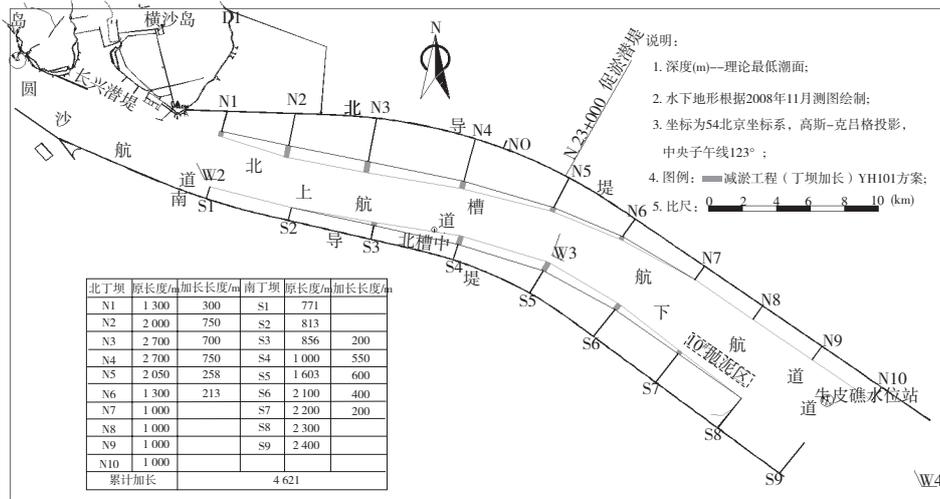


图2 长江口三期YH101减淤工程平面

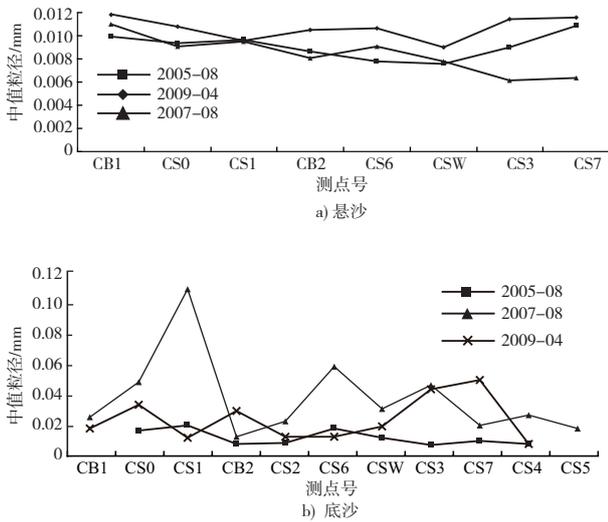


图3 不同时期悬沙中值粒径变化综合比较

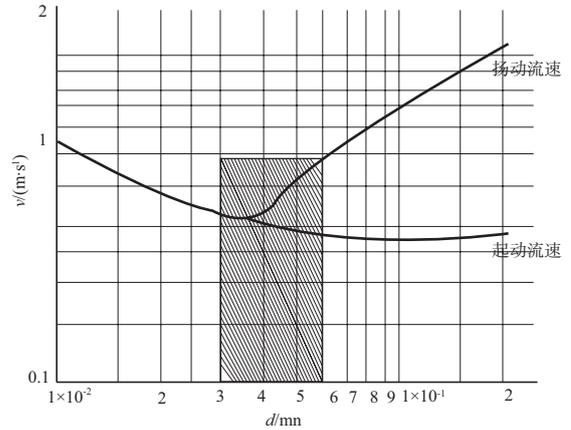


图6 起动流速和扬动流速示意

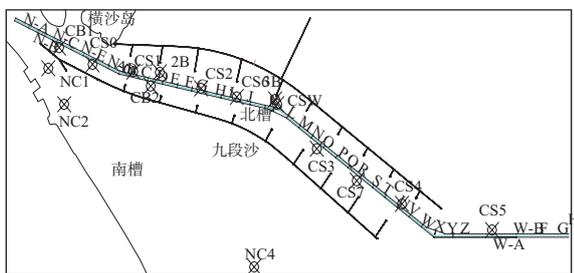


图4 测点及航道单元位置

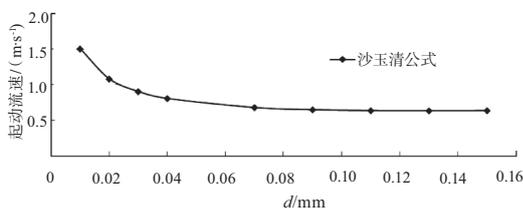


图5 起动流速计算曲线

表1 北槽测点潮周期平均流速实测 (大潮) m/s

测点号	2009年8月 (洪季)			2009年2月 (枯季)		
	落潮平均	涨潮平均	落潮/涨潮	落潮平均	涨潮平均	落潮/涨潮
CS0	1.09	0.78	1.40	0.92	0.81	1.14
CS1	1.16	0.82	1.41	1.03	0.97	1.06
CS2	1.38	0.83	1.66	1.09	1.15	0.95
CS6	1.50	0.92	1.63	1.24	1.06	1.17
CSW	1.34	0.96	1.40	1.16	1.05	1.10
CS3	1.37	0.76	1.80	1.25	1.00	1.25
CS7	1.52	0.97	1.57	1.39	1.01	1.38
CS4	1.15	0.85	1.35	1.01	0.86	1.17
CS5	0.81	0.75	1.08	0.71	0.63	1.13

占优, 需要通过落潮流输沙入海。

长江口拦门沙河段存在较为明显的高浓度浑浊带, 而北槽航道回淤严重的区域正是长江口最大浑浊带的位置所在 (图7)。长江口拦门沙河段航道回淤量呈洪季大枯季小的特征, 洪季回淤总

量占全年回淤量的70%~80%。这与细颗粒悬沙的垂线分布洪枯季差异巨大密切相关，洪季的底部高浓度泥沙特征非常明显（图8），憩流时刻近底部甚至会出现几十倍于垂线平均值的高浓度，近底部高浓度泥沙的形成和输运过程是洪季航道集中、高强度落淤的主要原因之一。

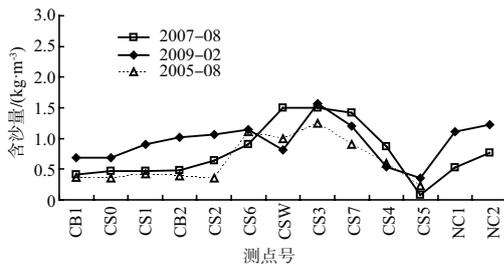


图7 北槽洪、枯季测点垂线平均含沙量纵向分布

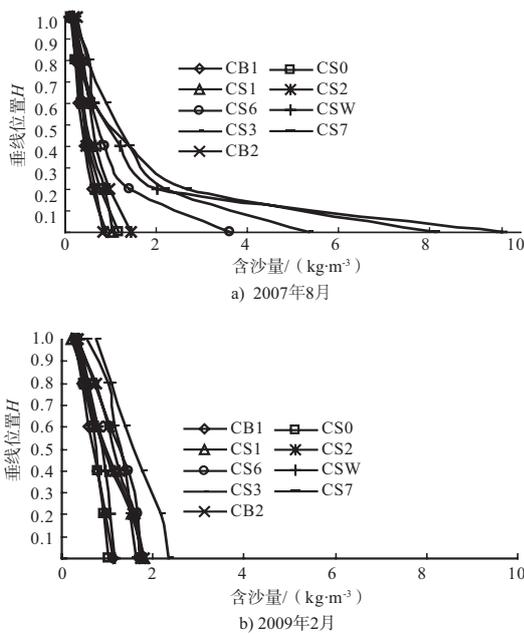


图8 北槽测点垂向各分层的平均泥含沙量分布曲线

不同的水、沙垂线结构和潮汐动力的分布和相对强弱将明显带来不同的泥沙水平输运，决定了高浓度泥沙带的位置；水沙垂线结构不仅受到潮汐动力的加减速变化影响，也受到径流、水温、絮凝、泥沙粒径变化等的影响，这些影响是潮汐河口泥沙动力过程和回淤机理复杂性的最主要表现。在潮汐动力河口，考虑悬沙的输运不仅需要考察纵向流速的相对强度和沿程分布，涨落潮的动力及相对强弱也非常重要。这就对以悬沙淤积为主的拦门沙区段航道治理研究时模型技术

手段的综合应用及评价指标选用等提出了更高的要求。由于拦门沙河段水沙环境的复杂性以及数模和物模技术手段的局限性，往往需要综合利用数物模手段，以全面预测和评价工程方案的实施效果。

三期工程开工后，北槽航道回淤量出现逐年增大且回淤分布集中的特征（图9），航道维护和加深困难，在充分分析航道回淤时空变化特征和现场水沙条件变化，认为出现这一困难的主要原因是：三期工程后，北槽流场发生了变化，主要表现在水动力条件沿程分布的改变。在下段水流动力显著增强的同时，中段动力，特别是落潮流动力减弱，输沙能力低于上下段。加之中段具有极有利于产生悬沙淤积的自然特性，三期开工后回淤量明显增大<sup>[7]</sup>。

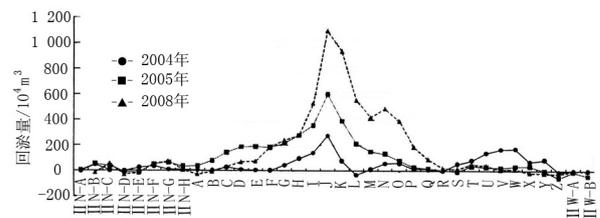


图9 北槽航道减淤工程平面

### 3.2 模型技术的综合应用

#### 3.2.1 模型技术的综合研究方法

基于前述对拦门沙河段水沙特性的分析及北槽航道回淤主要原因的认识，形成了研究制定三期减淤工程方案的总体思路：

通过调整部分丁坝长度，缩窄北槽中段河宽，以显著增强中段的落潮和输沙动力，并使流速增量覆盖上下游一定范围，尽可能减小对上、下段动力的削弱；综合考虑各处丁坝加长对北槽纵向和横向流场动力分布的调整作用，使纵向动力的变化平缓，横向动力的分布有利于改善河床断面形态，实现减淤目的。

根据这一思路，减淤工程要能调整流场、输沙动力分布，改善河床形态，主要通过减少悬沙落淤来达到航道减淤目的。由此在YH101工程研究中采用了以下综合技术手段：

通过潮流数模筛选出流场调整较优的方案→利用清水动床物模研究方案对地形的调整效果→将调整后的地形反馈到潮流数模重新计算流场的调整效果→调整后的地形反馈到航道回淤泥沙数模研究优选的方案实施后的航道淤积分布和总量→综合进行经济技术比较确定工程实施方案<sup>[8]</sup>。

因此,在拦门沙航道减淤方案的研究中,综合采用了潮流数模、清水动床物模和航道回淤泥沙数模等技术手段,利用潮流数模和泥沙数模对流场变化及悬沙输移能力变化模拟精度较高的特点,分析流场的变化及悬沙落淤对航道的影响,辅以动床物模对河床冲淤调整的预报,综合研究工程的治理效果。

### 3.2.2 模型评价指标的选用

#### 1) 数学模型研究评价指标的选用。

##### ①落急流速指标应用示例。

在YH101方案研究初期,潮流数学模型研究中采用了包括涨落急、平均流速,优势流、落潮分流比、流向、潮量等多项评价指标。鉴于本工程的目标是调整北槽内纵向流场分布、增强中段的落潮动力和输沙能力,故本研究中重点采用了落急流速纵向分布这一评价指标。从图10和图11可知,工程后北槽中段的落潮动力得到明显的增强,流速的沿程分布也呈中段大的特点。工程实施后,北槽内落急流速变化与航道淤强的增减基本一致,总体上,工程后落急流速增加的区段淤强减小,而落急流速减小的区段淤强有所增加,说明方案初选时主要以落急流速的变化和分布作评价指标是适宜的。

##### ②输沙能力指标应用示例。

前已述及,北槽航道的回淤以悬沙落淤为主。因此,就某一区段而言,平衡状态下的悬

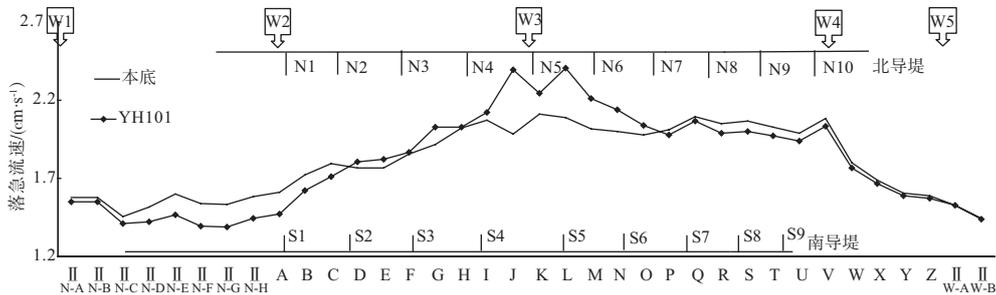


图10 YH101实施前后北槽航中落急流速对比

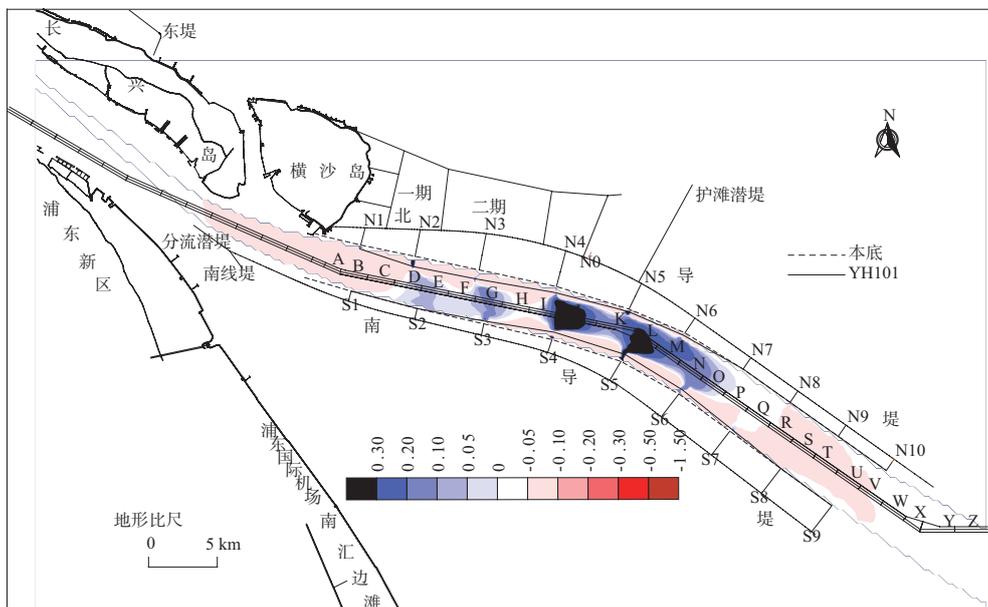


图11 YH101实施前后北槽落急流速变化 (单位: m/s)

沙输沙率越大，该区域滞留泥沙就会越少、回淤量将越小。悬移质泥沙的输沙率不仅仅决定于流速，而且还与流量<sup>[9]</sup>等有关。

考虑到涨、落潮期泥沙输运能力的时空及强度的差异，定义各点在平衡输沙状态下、一个潮周期内泥沙输运净通量的周期平均值为输沙能力。它代表了潮汐动力条件下，潮周期内的悬沙相对输运能力。输沙能力计算如下：

$$sh = (\bar{s}_1 \times \sum_{T_1} \bar{q}_1 dt + \bar{s}_2 \times \sum_{T_2} \bar{q}_2 dt) / (T_1 + T_2) \quad (1)$$

式中：输沙能力 ( $sh$ ) 的单位为 $kg/(m \cdot s)$ ；式(1)由于只采用含沙量平均值而没有考虑每一瞬时值与平均值之间的差异对输沙能力值的影响，因而输沙能力的绝对值计算结果是有误差的，但误差值相对而言是个小值，不妨碍用式(1)评价方案之间的输沙能力差异。 $T_1$ 、 $T_2$ 为一个潮周期内落潮和涨潮历时， $\bar{q}_1$ 为落潮流量， $\bar{q}_2$ 为涨潮流量。落潮期平均含沙量以平衡含沙量计算，即( $\bar{s}_1$ )挟沙力公式取为：

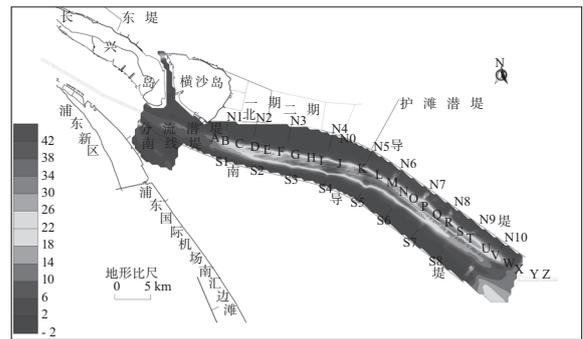
$$\bar{s}_1 = 5.11 \left( \frac{\bar{u}^3}{\bar{h}} \right)^{0.63} \quad (2)$$

式中： $\bar{u}$ 、 $\bar{h}$ 为落潮平均值；同理可计算得到涨潮期平均含沙量 $\bar{s}_2$ 。

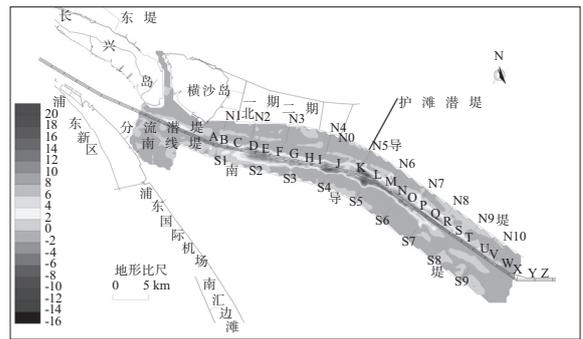
图12为三期工程前北槽内输沙能力的分布；YH101工程实施后的输沙能力；图13则为二者输沙能力的差值分布。三期YH101工程实施后，在北槽中上段的输沙能力增加较为明显，而中下段的输沙能力增幅不明显，局部单元减小较为明显，且S5丁坝以下南侧边滩减小明显，这和实际地形调整及航道回淤的变化较为一致。据此可知，拦门沙河段以减少悬沙淤积为主要目的的工程方案数模研究中，采用输沙能力指标来评价方案的优劣也是适宜的。

③其它技术指标的应用。

从工程实践看，北槽内的落潮优势流只能反应涨落潮流的力量对比，不能完全反应涨落潮动力值的变化情况，不宜作为重要的评价指标；北槽落潮分流比在工程实施后会有所减小，而随着



a) 三期工程前



b) 14YH101实施后

图12 三期工程前的输沙能力 (单位:  $kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$ )

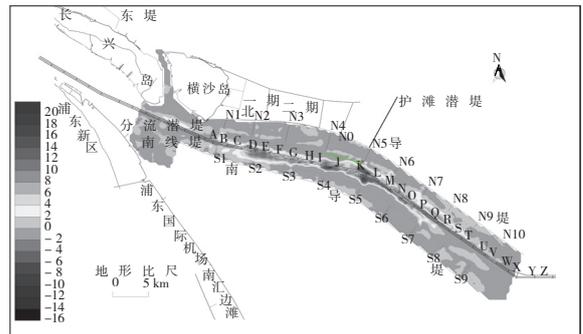


图13 YH101工程实施前后输沙能力差值 (单位:  $kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$ )

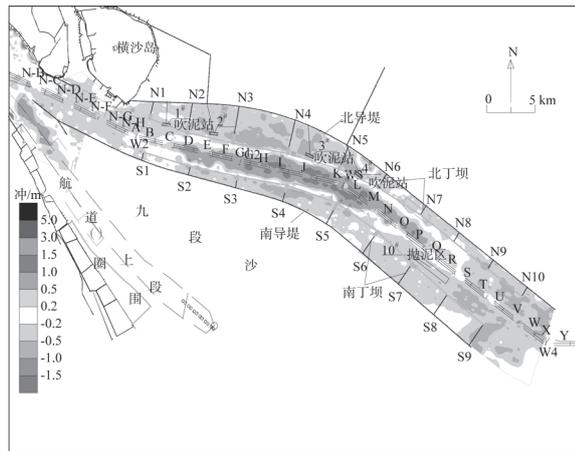
地形冲刷调整，分流比有所恢复，可作为工程影响的评价指标；流向与航道的交角对悬沙落淤有一定的影响，应作为比较重要的评价指标；而高低潮位的变化对航道回淤量无直接的对应关系，可作为防洪排涝安全评价指标。

在航道回淤泥沙数模研究中，还重点采用了航道沿程各疏浚单元的回淤量这一重要指标，以分析不同工程方案情况下航道回淤量的沿程分布及回淤总量。

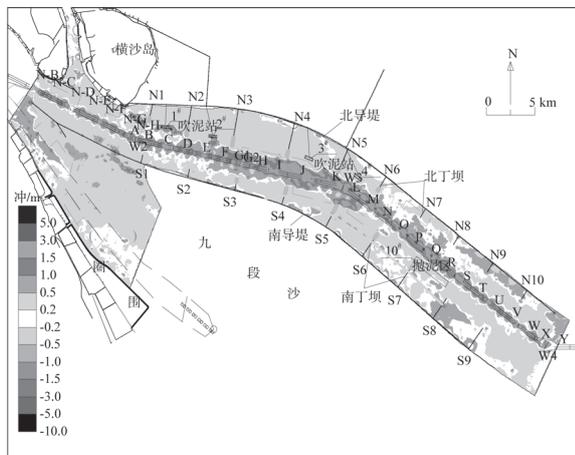
2) 动床物理模型研究评价指标的选用。

如前所述，清水动床物模定性上对工程引起的地形调整的预测结果具有较高精度，定量上受悬沙等影响略有差异。清水动床物模主要采用地形冲

淤量、冲淤范围等评价指标。图14为YH101工程实施前后的物模预测和实际地形调整情况, 在工程主要的治理区域——北槽中段的冲淤部位和幅度基本吻合, 现场调整范围和幅度略大。可见, 清水动床物模可以反映河床主要的冲淤特征。



a) 物模预测 (工程后2 a)



b) 实测 (2009-02—2011-02)

图14 YH101实施前后清水动床地形调整结果

### 3.2.3 数物模型技术的综合应用

#### 1) 物模地形结果反馈到数模作流场计算。

工程实施后的局部地形调整, 改变了过流断面, 对于流场的反作用会较为明显。因此, 需要考虑工程对流场和地形调整的综合效果。根据YH101实施前及实施后2年的两次不同的地形条件计算得到北槽流场的差异见图15 (以落急流速差值表示); 另外, 仅在数模中将航道地形从10 m 加深至12.5 m带来的北槽流场的差异也较为明显

(图16), 说明航道较大幅度的基建增深对流场的调整效果不容忽视。上述两例表明, 对工程实施后的地形进行较为精确的模拟对于提高工程后实际流场的预报精度至关重要。

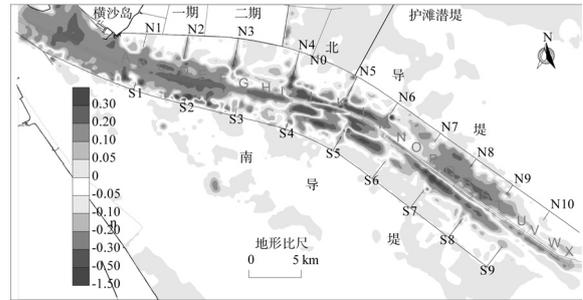


图15 YH101实施前后北槽地形变化引起的落急流速差异 (m/s)

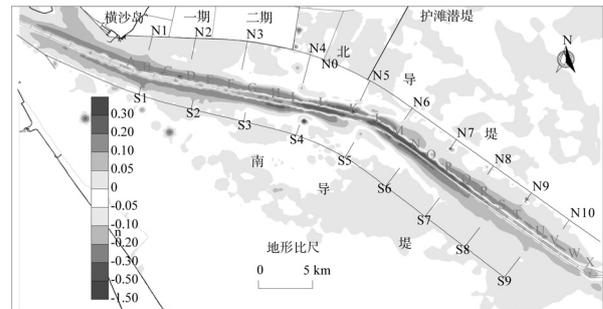


图16 航道从10 m加深至12.5 m引起的落急流速差异 (m/s)

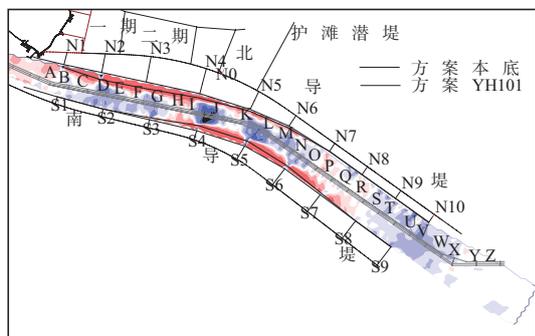
由于清水动床物模基本能反映河床的冲淤调整, 采用物理模型的结果进行流场或泥沙场的预测将较明显的增大预测精度。YH101工程研究中分别采用本底地形和物模动床预测地形进行潮流数模计算, 落急流速差值分别见图11和图17。与利用实际地形计算的结果比较可知, 利用动床物模调整后的地形计算的流场更加符合工程实施后的实际。

#### 2) 物模地形结果反馈航道回淤计算。

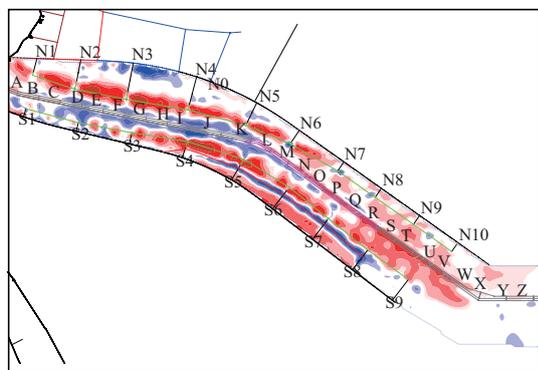
航道回淤泥沙数模不能直接考虑河床地形调整的影响。而如前述, 局部地形较大程度的调整对于流场的改变较为明显, 从而也会影响到航道回淤的计算。因而, 利用物模对河床调整模拟精度较高的特点, 在悬沙数模中增加考虑河床变化的影响, 可进一步提高航道回淤预测的精度。

利用动床物模中调整后的地形条件在泥沙数模中对2010年(YH101方案实施后1 a)北槽航道年回

淤量的预测值与2010年的航道实际回淤量基本一致(图18)。



a) 物模调整



b) 实测地形

图17 YH101实施前后的落急流速变化

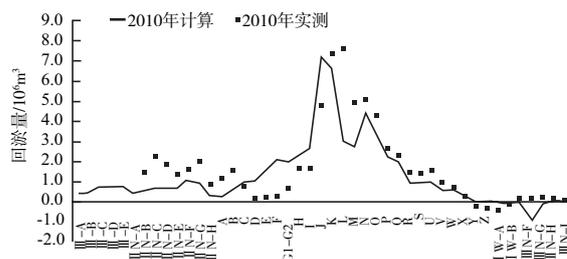


图18 物理模型中调整后地形条件下的泥沙数模计算结果与实测值比较

### 3.3 三期YH101实施后的实际效果

1) 12.5 m航道加深效果明显。

由图19可知,自2006年9月三期工程开工至2009年1月,三期航道浚深困难,全槽航道平均水深从10.54 m下降到10.52 m,成槽率(指航道成槽方量除以船方量)小于0。而自减淤工程实施后,辅以疏浚力量投入的增加,成槽效果明显,航道成槽率达到了0.51。2010年3月5日全槽航道平均水深增加到13.06 m,加深了2.52 m;三期交工验收后,12.5 m航道水深维护良好,2011年3月24日全槽航道平均水深为13.23 m,并保持了12.5 m航道100%的通航深度保证率。

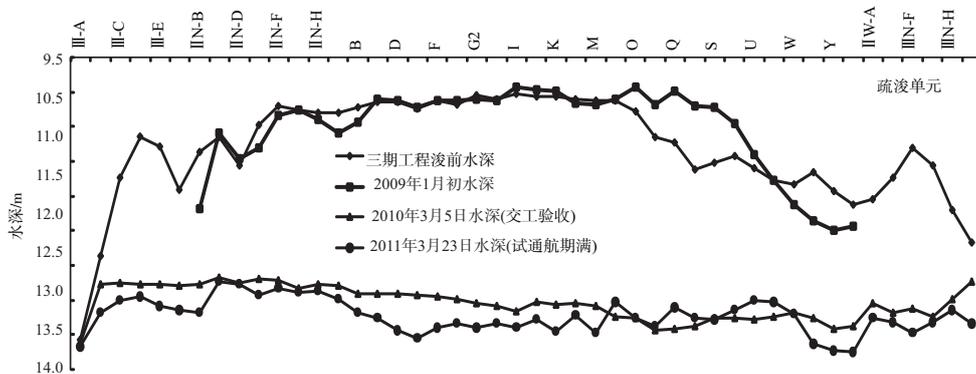


图19 三期工程实施前后航道水深对比

2) 航道回淤总量减少,回淤分布得到改善。

从图20和图21减淤工程实施前后同时时间跨度(含洪、枯季)的航道回淤强度的沿程分布看,减淤工程实施后,北槽中段I、J、K等单元回淤强度大大高于上下游区段的分布形态已有明显改观:回淤峰值降低(峰值位置略向下游移动),回淤强度呈现沿程分布坦化的趋势,航道上、下游分别出现了回淤强度的次峰值区,这种形态变

化与工程前的预测是基本一致的。

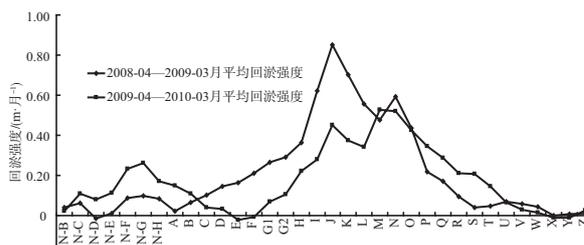


图20 YH101工程实施前后各段航道回淤强度沿程分布比较

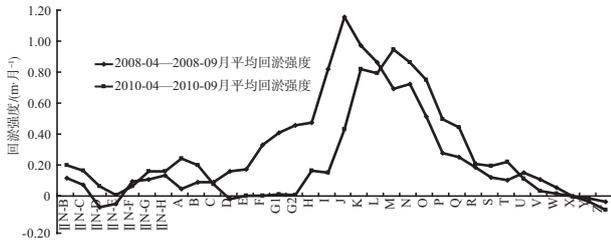


图21 10 m和12.5 m航道维护的  
航道回淤强度沿程分布比较

由此可见, 综合采用前述数、物模技术手段, 研究确定的YH101减淤工程方案的实施效果是比较理想的; 我们在北槽拦门沙河段治理方案

研究中对数物模研究手段的应用是基本恰当的。

#### 4 南北港分汉口河段航道治理研究模型技术的综合应用

南北港分汉口河段为长江口第二级分汉河段。2005年11月交通运输部宣布长江口10.5 m深水航道上延至南京。但此后南北港分汉口河段的宝山北水道10.5 m航道通航条件持续恶化, 航道水深局部不足、航道轴线扭转。为此, 交通运输部长江口航道管理局及时组织了该河段治理工程研究, 实施了新浏河沙护滩和南沙头通道限流潜堤工程(图22), 取得了明显效果<sup>[10]</sup>。

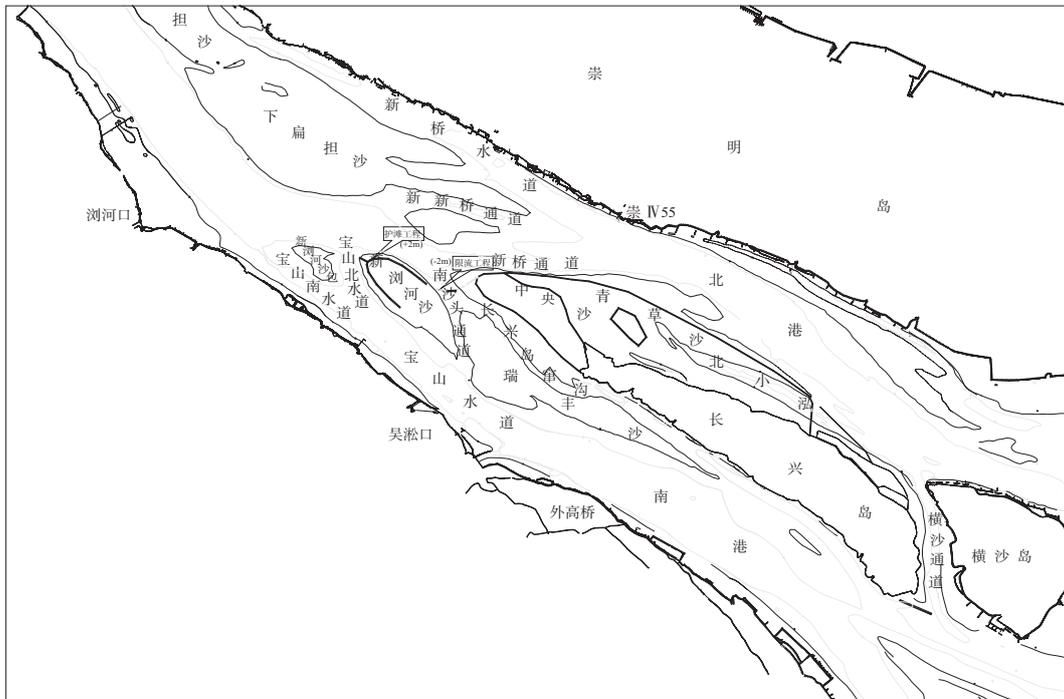


图22 新浏河沙护滩及南沙头通道潜堤工程布置

#### 4.1 南北港分汉口河段水沙特性及主要问题

从表2、图23多次底质采样结果来看, 南北港分汉口河段底质平均中值粒径在0.1~0.2 mm, 而悬沙中值粒径约0.01 mm, 远小于底沙; 该区域底沙的扬动流速大于起动流速(图6), 分别约为1.1 m/s和0.4 m/s, 当流速介于两者之间时, 此类泥沙基本呈推移质运动特征。分汉口河段航道区域潮周期平均流速约在0.3~1 m/s, 最大落潮流速可达1.5 m/s(图24); 这样的水动力条件下, 该区域底部泥沙大部分可以起动, 但不足以全部悬扬, 使得该区域的河

势变化以底沙呈推移质输移的运动特征; 另外, 该区域水流的落潮历时明显大于涨潮历时, 即底沙落潮期向下输移的特征显著。

表2 南北港分流口河段底质粒径 $d_{50}$ 特征 mm

采样点	2009年		采样点	2005年8月
	第二季度	第四季度		
Q4	0.009	0.159	z11	0.129
Q5	0.127	0.250	z14	0.089
Q6	0.025	0.247		
Q7	0.035	0.157		
Q8	0.202	0.250		
Q9	0.042	0.012		

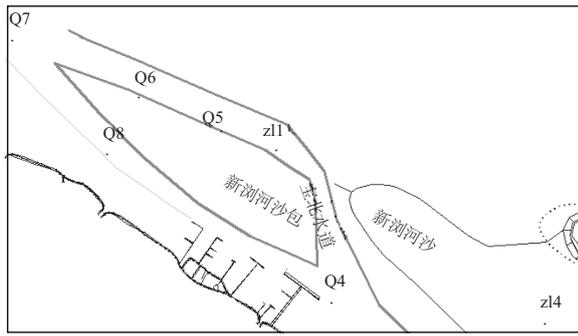
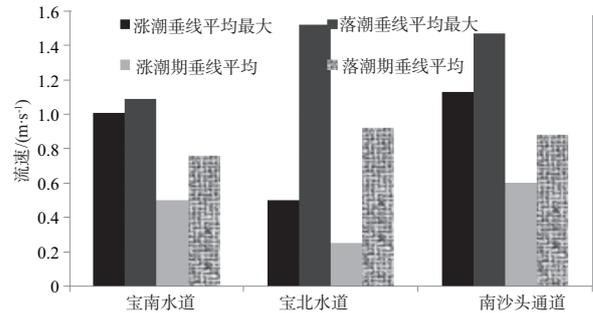


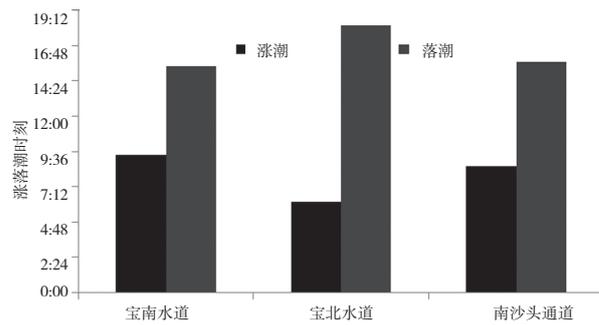
图23 南北港分流口底质采样点位置

南北港分汊口发育有5个活动沙体、6条分流汊道（图25），是典型的多滩多汊河段，同时也是长江口历史上自然变化最为复杂、河势稳定性较差的河段。

近年来，新浏河沙包、新浏河沙和中央沙头呈持续冲刷后退态势，2002年12月—2007年2月期间各沙头10 m等深线分别下移约2.9 km，1.4 km，



a) 流速



b) 涨落潮历时

图24 分流口河段水流动力特征值

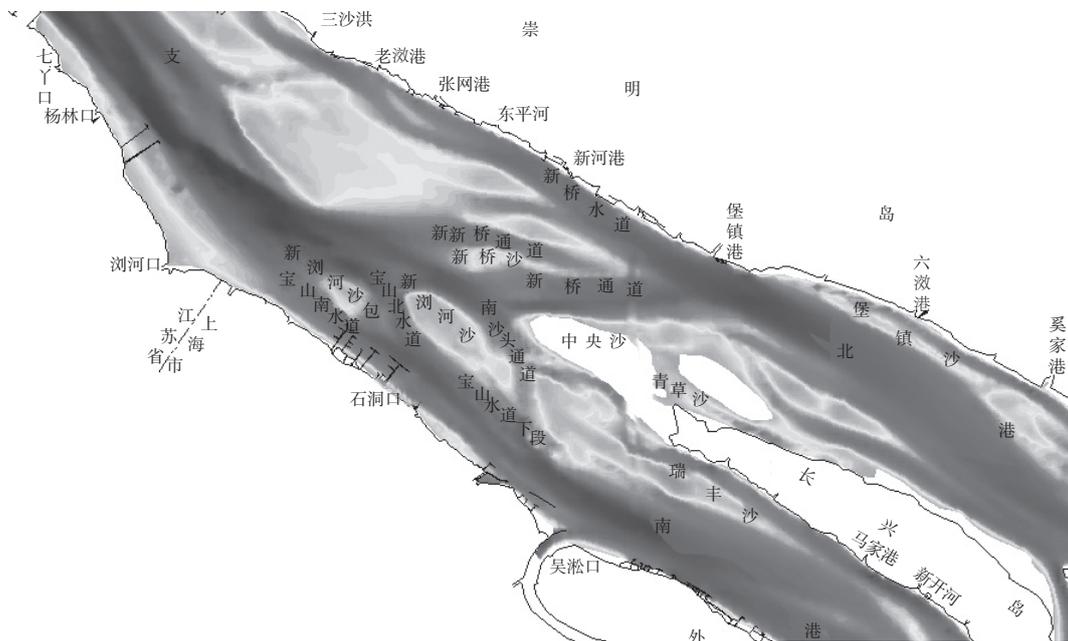


图25 工程前长江口南北港分汊口河道形势

1.3 km（图26）；南沙头通道下段呈冲刷发展态势、河槽容积明显扩大，在一定程度上减少了宝山南、北水道的分流量，不利于宝山南北水道的航道维护；而同时，宝山北水道航道轴线不断扭曲偏转，航宽缩窄，通航条件持续恶化，至2006年5月，其10.5 m等深线最窄宽度已不足设计要求

的350 m。

综上，宝山北水道通航条件的持续恶化主要因分汊口河段局部河势不利变化的影响，上游及新浏河沙及新浏河沙包沙头和沙体冲蚀的泥沙随落潮流持续输移进入航道所致，航道回淤土以底沙输移为主。

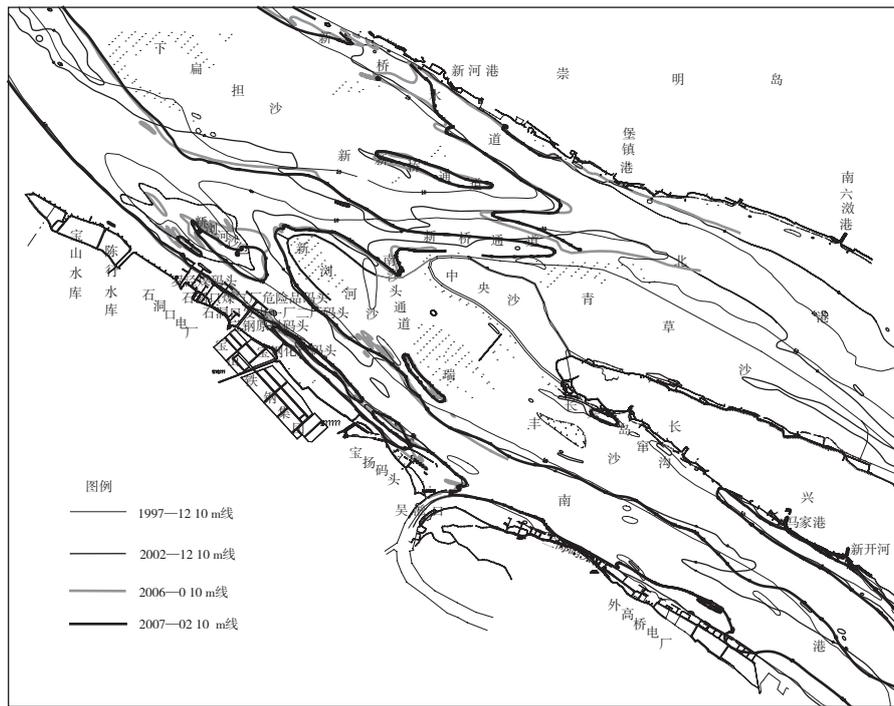


图26 工程前南北港分流口10 m等深线变化(1997—2007年)

## 4.2 模型技术的综合应用

### 4.2.1 模型技术的综合研究方法

基于以上认识,并通过河势分析,得出了南北港分汉口河段的治理可以先于南支上段白茆沙治理实施,而且可以先行在南港入口实施的重要结论,研究提出希望能在南港进口段用局部整治工程实现以下三个目标:控制南北港分汉口河段河势的不利变化,特别要控制新浏河沙的冲刷下移及南沙头通道的冲刷发展,有利于稳定南北港分汉口河势;有利于改善宝山北、南水道的通航及维护条件;有利于长江口12.5 m深水航道向上延伸。

针对该段底沙的推移质运动特性,结合治理目标,以中央沙圈围和青草沙水库工程实施为基础,研究确立了治理方案的基本思路是“固滩、限流”。通过新浏河沙护滩堤守护新浏河沙,避免其进一步冲刷后退和控制底沙向下输移;通过南沙头通道限流潜堤工程,减小南沙头通道的落潮潮量,增强宝山北水道的落潮动力,冲刷河槽以满足航道通航水深及宽度需求。

根据这一思路,治理研究重点要分析工程实施后需要守护沙体处流场动力减少幅度、各汉道的动力分配变化以及对滩槽地形的调整幅度,由

此本工程研究中采用了以下综合研究手段:

采用“潮流数模方案筛选+清水动床物模定方案”的综合研究技术手段确定治理工程的总平面方案。即用潮流数模筛选确定了护滩堤、潜堤的高程;治理效果的预测主要以清水动床物模对地形冲淤调整的模拟成果为主,即据动床物模的成果并综合进行经济技术比较后最终确定治理方案。

### 4.2.2 模型评价指标的选用

#### 1) 数学模型研究评价指标的选用。

在潮流数模中,为合理确定护滩堤及限流潜堤的高程、分析各汉道动力条件变化,评价工程实施效果,主要采用了落急流速和断面落潮量两个评价指标。

#### ①落急流速指标应用示例。

考虑到守护范围和工程造价,堤身不宜过高,新浏河沙护滩堤主要设置在 $-2 \sim 0$  m等深线附近,因落急时刻底沙输移幅度较大,护滩堤应能有效减小滩面流速、阻止落急时刻的滩面冲刷,经分析论证护滩堤的高程定为2.0 m(高于该河段落急水位),而各汉道动力的调整主要与南沙头通道限流潜堤的堤顶高程有关。图27为限流潜堤不同高程情况下宝山北水道、南水道以及南沙头通道的落急流速变化。由图27可知,当限流潜堤高程低

于-2.0 m时,各水道动力变化较缓,在-2.0~0 m存在梯度变化拐点,随着堤顶高程的增加,各水道流速变化明显。南沙头通道限流堤高程为-2 m,0 m时宝山北水道落急流速增加的最大值分别为0.30 m/s, 0.44 m/s, 而南沙头通道的落急流速减少的最大值分别为0.46 m/s, 0.63 m/s。

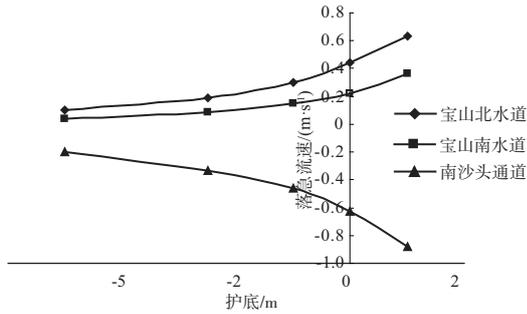


图27 限流堤不同高程情况下南港三水道落急流速变化情况

②断面落潮量指标应用示例。

水道断面涨落潮量代表一个水道的整体动力情况,由于南北港区域主要由落潮流控制,所以重点关注落潮量的变化。图28为限流潜堤不同高程情况下宝山北水道、南水道以及南沙头通道的落潮量变化,由图可知,与落急流速相似,限流堤堤顶高程在-2.0~0 m时,落潮量存在梯度变化拐点,随着堤顶高程的增加,各水道落潮量变化明显。南沙头通道限流堤高程为-2 m,0 m时宝山北水道落潮量

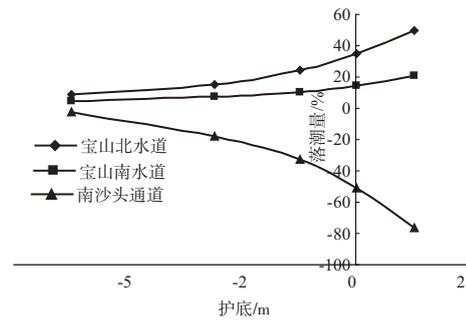


图28 限流堤不同高程情况下南港三水道落潮量变化情况

增加的最大值分别为20.95%, 32.05%, 而南沙头通道落潮量减少的百分数分别为35.64%, 54.2%。

综合上述各水道落急流速和落潮量的变化结果,潮流数模推荐限流潜堤-2.0 m和0 m两个方案进行清水动床物模试验,分析各水道地形调整幅度,最后确定限流堤堤顶高程为-2.0 m。工程前后的现场实测资料表明,工程后南沙头通道落潮动力明显减弱,宝山北水道和宝山南水道的落潮动力增强,与数模研究成果基本一致。

2) 动床物理模型研究评价指标的选用。

清水动床物模试验结果除了反映护滩堤对新浏河沙的护滩效果外,更重要的是要说明宝山北水道、宝山南水道的航道冲刷调整结果,在不进行疏浚施工的条件下,能否满足航道安全通航需求。清水动床物模主要采用等深线变化、地形冲淤部位及幅度等评价指标。图29为动床物模预报

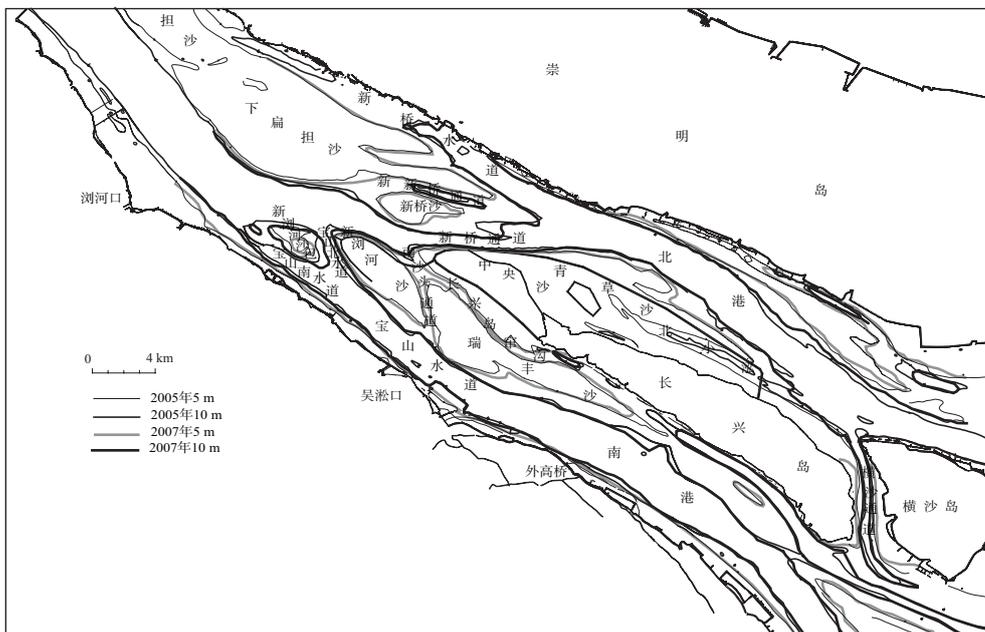


图29 模型预报2005-04—2007-04等深线变化



流速、输沙能力、航道回淤量的沿程分布形态及其变化量，地形冲淤调整的部位及幅度等可作为评价工程实施效果的重要指标；以底沙输移为主的河段航道治理研究中，落急流速、断面流量、地形等深线变化及冲淤调整的部位及幅度等可作为评价工程实施效果的重要指标。

**参考文献：**

[1] 王光谦. 河流泥沙研究进展[J]. 泥沙研究, 2007(2): 64-81.  
 [2] 陈志昌, 罗小峰, 长江口深水航道治理工程物理模型试验研究成果综述[J]. 水运工程, 2006(12): 134-140.  
 [3] 张俊勇, 陈立, 吴华林, 等. 长江口全沙物模研究基础及展望[J]. 水运工程学报, 2009(2): 26-32.  
 [4] 窦希萍, 李提来, 窦国仁. 长江口全沙数学模型研究[J]. 水利水运科学研究, 1999(2): 136-145.

[5] 范期锦, 金鏐, 蔡云鹤, 等. 长江口深水航道治理工程成套技术总报告[R]. 上海: 交通部长江口航道管理局, 2006.  
 [6] 曹祖德, 焦桂英, 赵冲久. 粉沙质海岸泥沙运动和淤积分析计算[J]. 海洋工程, 2004 22(1): 59-65.  
 [7] 谈泽炜, 范期锦, 郑文燕, 等. 长江口北槽航道回淤原因分析[J]. 水运工程, 2009(6): 91-102.  
 [8] 交通运输部长江口航道管理局. 长江口深水航道治理三期工程减淤工程实施效果分析报告[R]. 上海: 交通运输部长江口航道管理局, 2010.  
 [9] 顾峰峰, 戚定满, 牟林, 等. 长江口悬沙挟沙力能力率定和验证[J]. 泥沙研究, 2010(5): 1-6.  
 [10] 谈泽炜, 范期锦, 高敏, 等. 长江口航道治理研究新进展[C]//中国海洋工程学会. 第十四届中国海洋(岸)工程学术讨论会论文集, 2009: 891-900.

(本文编辑 郭雪珍)

《水运工程》优秀论文评选

**评委点评：**

数值模拟分析、物理模型试验是研究河口水沙运动和河床演变的主要技术手段，在举世闻名的受径潮流复杂作用的长江口深水航道治理工程研究中，其应用表现得淋漓尽致。

在《长江口航道治理研究中数、物模技术的应用》一文中，作者根据长江口航道治理工程研究实践，分别以具有不同水沙运动特点的栏门沙河段和南北港分汉口河段为例，根据不同河段特点详细分析、合理选用模型和具体方法，归纳总结数模和物模综合研究技术的应用及效果评价，对研究受径流和潮汐共同作用的复杂河口航道治理方法具有很好的借鉴价值。



2012年12月

**评委简介：**

金国强，教高、浙江省交通规划设计研究院副总工程师。

主持了一批如杭甬运河、上海赵家沟航道东沟船闸、京杭运河（浙江段）三级航道整治工程、钱塘江中上游航运开发工程、甌江中下游航运开发工程等大型项目的前期研究和设计工作。在内河航道、船闸、港口工程设计方面积累了丰富的经验。有近10项技术成果获得省、部和国家级咨询成果及优秀设计奖；在国家核心期刊上发表论文10余篇。