



# 长江口南槽航道治理二期工程整治建筑物 布置方案比选研究\*

李文正

(交通运输部长江口航道管理局, 上海 200003)

**摘要:** 为确定长江口南槽整治建筑物布置方案, 达到良好治理效果, 通过三维水沙数学模型, 系统比选与优化整治建筑物的布置方案。基于南槽复杂的水沙运动特性与河势条件, 遵循“护滩、稳槽、导流、挡沙”的治理思路, 设计多阶段的比选流程。从初始方案入手, 确定江亚北槽下段限流的 NCG1A 方案为优选。通过对比不同平面形态, 发现取消南北侧丁坝群、仅优化导流堤轴线在增强主槽动力、保障通航安全及减少环境影响方面更具优势。对导流堤的高程与长度进行精细化比选, 确定顶高程为 2.0 m 时航道治理效果最佳, 并将堤身长度优化至 24.4 km。NCG5 方案在有效提升南槽主槽落潮动力的同时, 对毗邻的北槽深水航道与九段沙自然保护区影响最小, 实现了航道治理效果、通航安全、工程经济性与生态保护的多目标协同, 为类似河口治理工程提供了有益借鉴。

**关键词:** 长江口; 南槽航道治理二期工程; 数学模型; 整治建筑物

中图分类号: U643

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2026)05-0118-08

## Comparison and selection of building layout schemes for Phase II of the South Channel regulation project in the Yangtze Estuary

LI Wenzheng

(Yangtze Estuary Waterway Administration Bureau, MOT, Shanghai 200003, China)

**Abstract:** To determine the optimal layout scheme for the regulation buildings in the South Passage of the Yangtze Estuary and achieve effective regulation outcomes, this paper employs a three-dimensional sediment-water mathematical model to systematically compare and optimize the layout of these buildings. On the basis of the complex hydrodynamic and sediment transport characteristics of the South Passage alongside its riverine conditions, this paper follows a regulation approach concentrated on “bank protection, channel stabilization, flow diversion, and sediment retention”, and designs a multi-stage comparison and selection process. Starting from the initial scheme, the NCG1A scheme restricted flow in the lower section of the Jiangya North Channel is identified as the preferred option. Subsequent comparisons of different scheme configurations reveal that eliminating the north and south jetty clusters while optimizing only the diversion embankment axis offers greater advantages in enhancing main channel dynamics, ensuring navigation safety, and minimizing environmental impact. Further refinement of embankment elevation and length determine that a crest elevation of 2.0 m yields optimal channel regulation, with the embankment length optimized to 24.4 km. Scheme NCG5 effectively enhances the ebb-tide dynamics of the southern main channel while minimizing impacts on the adjacent northern deep-water channel and

收稿日期: 2025-09-08 录用日期: 2025-10-17

\*基金项目: 国家重点研发计划项目(2024YFB2605900)

作者简介: 李文正(1976—), 男, 硕士, 正高级工程师, 从事港航工程技术研究工作。

Jiuduansha Nature Reserve. This achieves synergistic multi-objective coordination of navigation channel management effectiveness, navigational safety, engineering economics, and ecological conservation, providing valuable insights for similar estuary regulation projects.

**Keywords:** the Yangtze Estuary; Phase II of the South Channel regulation project; mathematical model; regulation building

长江口航道是关系流域经济社会发展全局的运输通道，位于“长江经济带”和“海上丝绸之路”的黄金交叉点，战略地位十分重要。根据长江口航道“一主两辅一支”的规划，长江口南槽航道是该规划中“两辅”中的之一<sup>[1]</sup>，见图1。2018—2021年，长江口建成南槽一期航道，与北槽深水航道形成“一主一辅”格局；北槽航道承担总货运量七成，船舶流量三成；南槽则相反，成为小船主通道并分流部分大船，船舶流量达到七成，通航压力大<sup>[2]</sup>。在此情形下，交通运输部长江口航道管理局组织开展了长江口南槽航道治理二期工程的项目前期研究工作。对比世界各大通航河口治理工程，密西西比河口治理工程长达数年，治理思路从“堤坝政策”推进到“导堤与疏浚”再演变为“双轨并行”，即在维持航运的同时，全力进行生态修复<sup>[3]</sup>。同样，圣劳伦斯河口治理也是一个持续数年的工程，最初是为了航运而大力开挖疏浚，后来开始治理污染；如今的核心思路是保护整个生态系统，通过动态调整如限速等措施，协调航运与保护，并应对气候变化的挑战<sup>[4]</sup>。而莱茵河口的治理经历了从“唯技术论”的工程控制到“基于自然的”韧性适应的根本性转变，其早期工程方案主要包括修筑高堤坝与防洪墙，河道渠化与裁弯取直，建设河口三角洲工程；后期工程方案包括还地于河，港口与生态协同发展等内容<sup>[5]</sup>。这些工程都体现出了河口治理是一项长期工作，其治理思路与工程方案也是在不断改变与适应。长江口南槽水域拦门沙水动力和泥沙运移规律复杂，南槽航道紧邻九段沙湿地国家级自然保护区，周边涉水重大工程设施众多。因此合理、最优选取整治建筑物布置方案，以稳定河势、发挥治理效果、并避免对周边相关设施产生不利影响是至关重要的。

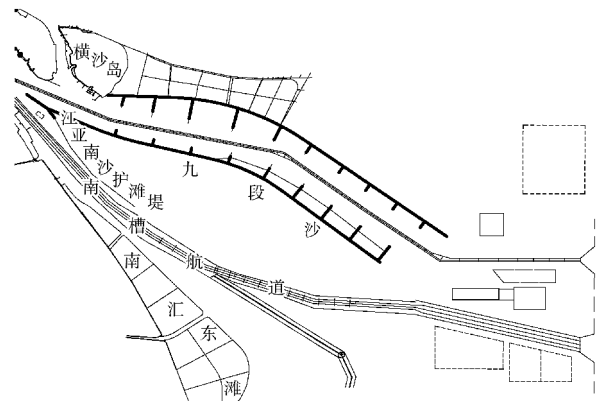


图1 长江口南槽航道

Fig. 1 South Channel of the Yangtze Estuary

## 1 南槽水沙特征

动力方面，南槽中上段以往复流为主，下段至口外旋转流特征增强；主槽上段流速较强(1.15~1.57 m/s)，中下段及口外减弱；江亚南沙头部窄沟在南槽一期工程后动力减弱并淤积，江亚北槽上段涨潮占优，下段落潮略强。盐度呈“上小下大”分布，适宜絮凝的盐度区间(0.7%~1.2%)主要出现在拦门沙段，分层为部分混合型。口外盐度维持在1.5%~2.0%。含沙量呈“中间大两头小”，峰值位于NCH3—NCH4段，最高达1.74 kg/m<sup>3</sup><sup>[6]</sup>。工程对主槽含沙量影响不显著。台风期间近底含沙量显著升高，浮泥出现在水深较大区段。底质分布表现为中上段“北粗南细”，下段“两侧粗中间细”，粗颗粒区域主要为粗粉砂至细砂，细颗粒区域以中细粉砂为主。

## 2 研究方法与技术路线

### 2.1 研究方法

本文采用三维水沙数学模型，通过多阶段、多参数的综合比选，选择相对最优的长江口南槽航道治理二期工程整治建筑物方案。

河势稳定性分析主要通过数学模型计算各整

治建筑物方案在南槽及相邻水域的影响结果。在此技术路线中，第1步需要建立数学模型和开展率定验证<sup>[7]</sup>，主要流程包括：1)根据南槽地形特征、泥沙特性、水沙输运及航道回淤特征，结合长江口水域泥沙动力特性的研究文献、试验成果，分析潮流泥沙数学模型模拟重点，并根据航道回淤影响因素，考虑模型的架构<sup>[8]</sup>；2)建立长江口南槽及深水航道三维潮流数学模型，对重点关心区域的网格进行加密；3)选用近年的水文测验资料，分别对南、北槽及周边水域不同季节的潮位、潮流进行率定和验证；4)建立长江口水域的风场模型、波浪场模型，对非常态条件下的实测风、波浪资料进行率定<sup>[9]</sup>。

在完成数学模型和率定验证后，开展方案计算研究阶段<sup>[10]</sup>，主要流程包括：1)对初选阶

段的方案进行三维流场计算，分析各方案对大范围流场，以及南槽航道水动力条件的影响，比选出较优方案进行下一阶段的深化研究；2)对深化阶段的方案进行三维流场计算，分析各方案对南槽航道水动力条件、北槽航道水动力条件、周边敏感区(如九段沙等)水动力条件的影响，确定整治建筑物的最优长度与高程，提出推荐方案。

### 2.2 技术路线

结合南槽水沙特点和河床演变特征，提出南槽航道“护滩、稳槽、导流、挡沙”治理思路和工程总体平面布置方案<sup>[11]</sup>。工程方案的数学模型比选主要通过初始方案比选、平面形态比选、高程与长度比选、方案优化等4个阶段。主要比选技术路线见图2。

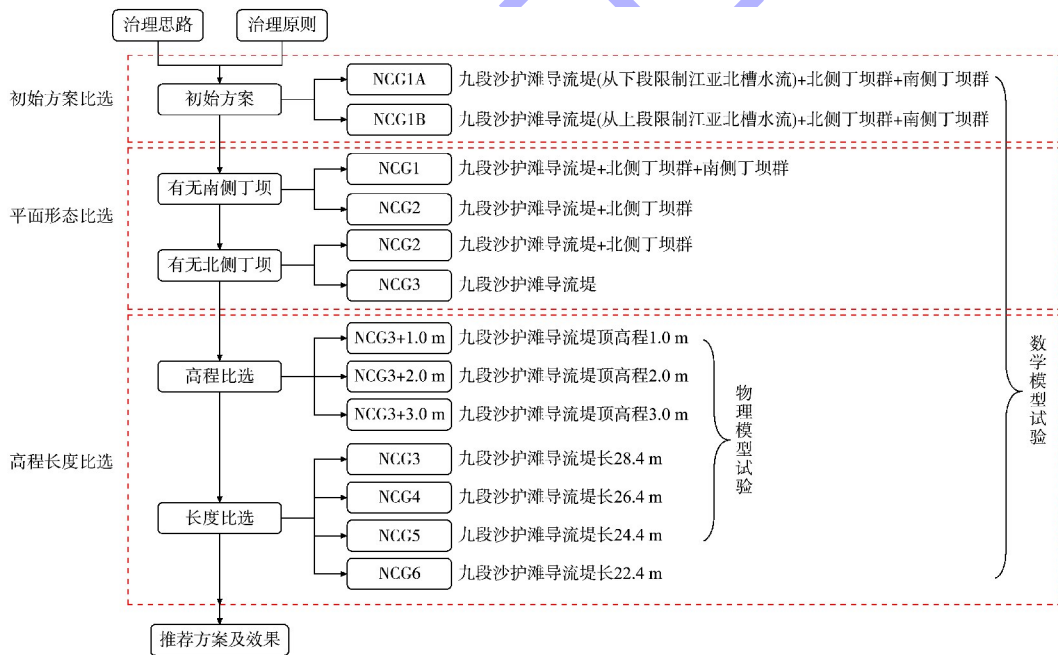


图2 南槽航道治理二期工程方案比选流程

Fig.2 Scheme comparison and selection process for Phase II of the South Channel regulation project

初始方案有2个(2类)：方案NCG1A和NCG1B，分别为江亚北槽下段限流和江亚北槽上段限流。通过两类方案的计算分析，确定方案类型，进入平面形态的比选。

平面形态比选包括两部分：1)有无南侧丁坝比

选(方案NCG1为北侧导流护滩堤+北侧丁坝群+南侧丁坝群，方案NCG2为北侧导流护滩堤+北侧丁坝群)；2)有无北侧丁坝比选(方案NCG2为北侧导流护滩堤+北侧丁坝群，方案NCG3为北侧导流护滩堤)。根据工程方案效果、通航安全以及实施

难度综合考虑, 推荐进入下一个阶段比选的方案。

高程与长度比选包括两部分: 1) 高程比选, 即方案 NCG3+1.0 m、方案 NCG3+2.0 m 和方案 NCG3+3.0 m; 2) 长度比选, 即方案 NCG3(28.4 km)、方案 NCG4(26.4 km)、方案 NCG5(24.4 km) 和方案 NCG6(22.4 km)。综合分析方案效果以及对北槽和九段沙的影响, 推荐最终方案。

### 3 数学模型关键参数取值

长江口三维悬沙数学模型初期基于窦国仁<sup>[12]</sup>推移质输沙公式及相关计算方法, 加入了推移质计算模块; 后期加入天气研究与预报(weather research and forecasting, WRF)模型和近岸波浪模拟(simulating waves nearshort, SWAN)模型分别计算影响长江口水域典型台风作用下的风场与波浪场, 使泥沙模型能够同时满足南槽水域悬移质和推移质起动、输移、沉降过程的计算条件。数学模型中床面粗糙高度取 0.1 mm, 垂向上分为 10 层进行计算。

#### 3.1 泥沙沉降

单颗粒悬沙沉降速度采用下式计算:

$$w_s = \sqrt{(13.95v/d_s)^2 + 1.09 \frac{\rho_s - \rho}{\rho} g d_s} - 13.95v/d_s \quad (1)$$

式中:  $\rho$ 、 $\rho_s$  分别为水、泥沙的密度;  $d_s$  为悬浮泥沙的中值粒径;  $v$  为黏滞系数。

$v$  的计算公式为:

$$v = \frac{1.792 \times 10^{-6}}{1 + 0.03368T + 0.000221T^2} \quad (2)$$

式中:  $T$  为水体温度。

泥沙数值模型中考虑盐度和含沙量对絮凝的作用, 采用下式计算:

$$F = \frac{\omega_{f50}}{\omega_{d50}} \quad (3)$$

式中:  $\omega_{f50}$ 、 $\omega_{d50}$  分别为极限和分散状态下(非絮凝)絮凝的平均沉速, 均采用中值粒径代表。

#### 3.2 临界淤积与冲刷切应力

##### 3.2.1 单纯潮流作用下的床面切应力

在不考虑波浪作用, 仅潮流作用下的床面切应力的计算公式为:

$$\tau = \rho C_b (u_b^2 + v_b^2) \quad (4)$$

式中:  $\rho$  为海水密度;  $u_b$ 、 $v_b$  分别为流体底部  $x$ 、 $y$  方向的流速;  $C_b$  为摩擦系数。

根据对数边界层理论,  $C_b$  由近海底  $z_{ab}$  (模式最底层厚度的一半) 处的流速呈对数分布计算得出, 即  $C_b = \max [k^2 / \ln(z_{ab}/z_0)^2, 0.0025]$ , 其中  $k=0.4$  为卡门常数,  $z_0$  为底部粗糙高度, 根据验证的进行调整为 0.1 mm。

##### 3.2.2 波、流共同作用下的床面切应力

淤积切应力和起动切应力根据实测资料计算值给出, 然后根据验证情况作一定的修正,  $\tau_c$  取值 0.4~0.6 N/m<sup>2</sup>,  $\tau_d$  取值 0.1~0.3 N/m<sup>2</sup>。

#### 3.3 沉降概率与冲刷系数

已有研究表明<sup>[13-14]</sup>, 长江口沉降概率系数  $\alpha'$  取值范围为 0.2~0.9, 模型中根据率定取值在 0.2~0.6。根据现场实测资料进行验算, 初步估算模型冲刷系数  $M$  的范围为 0.02~0.07 g/(m<sup>2</sup>·s<sup>-1</sup>), 而后根据率定调试, 模型中取 0.04 g/(m<sup>2</sup>·s<sup>-1</sup>)。

### 4 方案比选

#### 4.1 初始方案

南槽拦门沙河段涨落潮流路分歧, 江亚北槽下段涨落潮动力强劲, 分流比可达 40% 以上, 1997—2022 年断面落潮的潮量增加 3 亿 m<sup>3</sup>, 对应主槽拦门沙潮量减少 2.4 亿 m<sup>3</sup>, 需要归集江亚北槽下段部分涨落潮量至主槽, 以增强拦门沙主槽动力。考虑江亚南沙护滩堤线现状与九段沙生物多样性维护红线关系, 以及为九段沙工作船码头留出保护区日常工作船舶运行通道, 本文提出两组初始方案进行比选。方案 NCG1A 和 NCG1B, 分别为江亚北槽下段限流和江亚北槽上段限流, 见图 3。

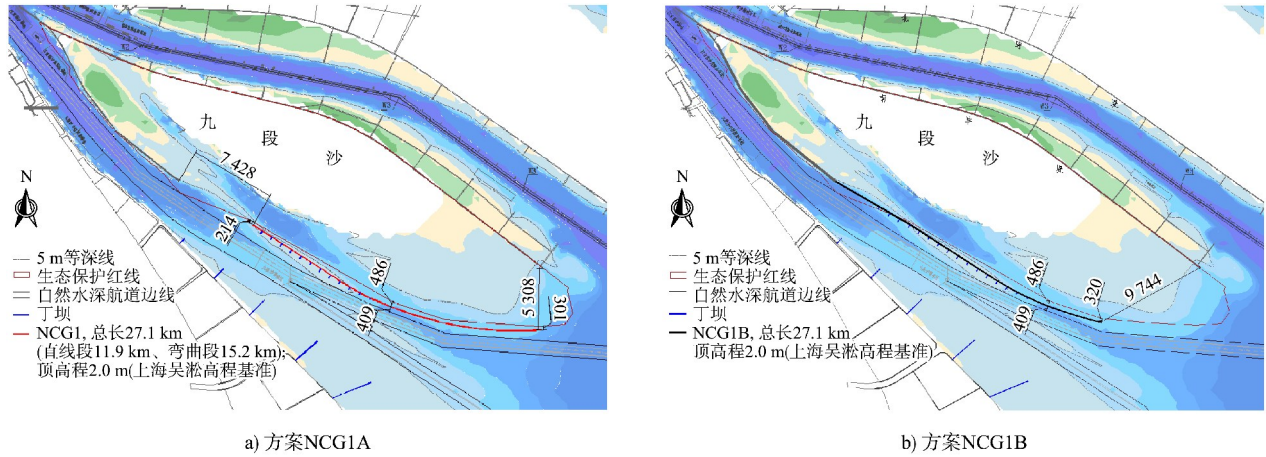


图3 初始方案平面布置(单位:m)

Fig. 3 Layout of initial schemes( unit: m)

方案 NCG1A 实施后,南槽拦门沙段落急流速增加,最大增幅为 0.55 m/s,南槽上段落急流速减小,最大减幅为 0.18 m/s;江亚北槽落潮动力均减小,江亚北槽下段涨潮动力有所减小;北槽动力变化不大,见图4。方案 NCG1B 实施后,南槽拦门沙段落急流速增加,最大增幅达到 0.66 m/s,南

槽上段落急流速减小,最大减幅为 0.69 m/s;江亚北槽上段落潮动力增加,增幅可达 0.23 m/s,江亚北槽下段落潮动力有所减小;江亚北槽下段涨潮动力增加明显,大面积增幅均在 0.15 m/s 以上;北槽进口及上段落潮动力增加明显,最大可达 0.25 m/s,见图5。

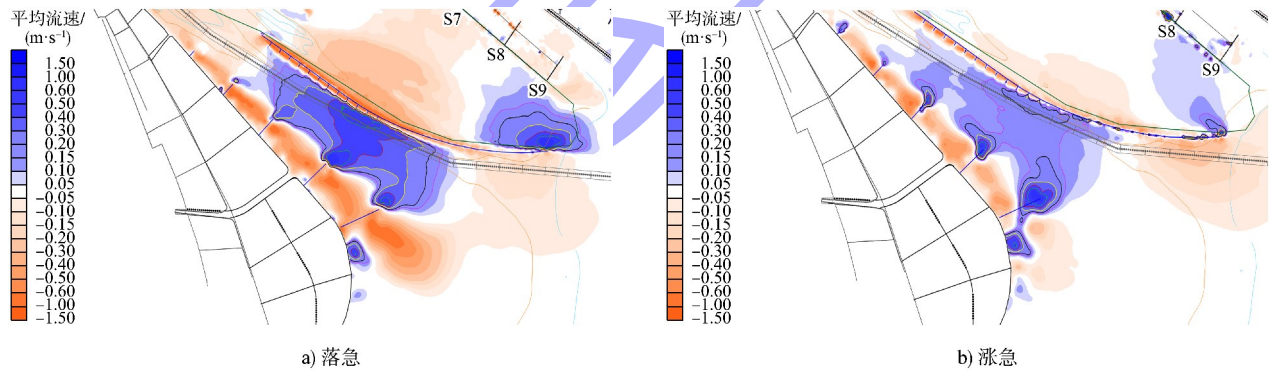


图4 方案 NCG1A 垂线平均流速变化

Fig. 4 Changes in average flow velocity of vertical line in Scheme NCG1A

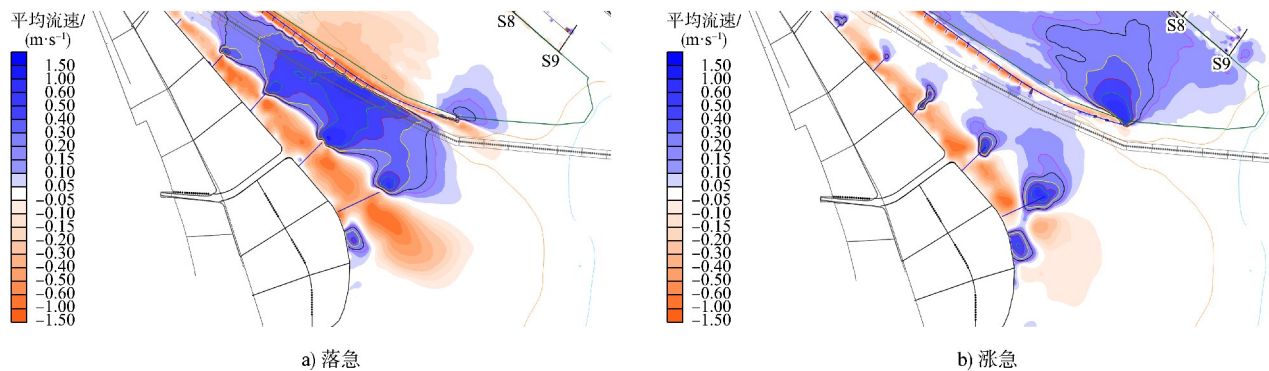


图5 方案 NCG1B 垂线平均流速变化

Fig. 5 Changes in average flow velocity of vertical line in Scheme NCG1B

两个方案相比较,方案 NCG1B 使得南槽主槽拦门沙区段落潮动力增加明显,较方案 NCG1A 的效果好,但其使得南槽上段落急流速大幅减小、江亚北槽上段落潮动力增加较明显,江亚北槽下段及九段沙部分滩面涨潮动力增加明显,不利于九段沙的稳定。另外,方案 NCG1B 进入九段沙生态保护红线,实施难度大。因此,推荐方案 NCG1A 进入下一个阶段方案的比选。

#### 4.2 平面形态比选

南槽航道整治工程平面形态比选研究主要针对南、北侧丁坝群的布置方案开展系统分析。通过对比 NCG1(即方案 NCG1A,有南侧丁坝)、NCG2(无南侧丁坝)和 NCG3(无北侧丁坝、导流堤南移)3种方案,评估不同工程平面形态布置对流速分布与航道治理效果的影响。

结果表明:取消南侧丁坝群后(方案 NCG2),南槽主槽内涨落潮期间流速比工程前总体增加,其中拦门沙浅段区域落急流速最大增幅 0.37 m/s、涨急流速增幅在 0.20 m/s 以内,方案 NCG2 仍可基本达到航道治理要求,同时能有效减少对南岸水利及航道设施运维的不利影响。

在方案 NCG2 基础上进一步优化形成方案 NCG3:取消北侧丁坝群(避免丁坝群对航行的不利影响),将九段沙护滩导流堤轴线南移至原北侧丁坝坝头连线,堤身总长增至 28.4 km。该方案实施后,南槽主槽拦门沙浅段落急流速最大增幅 0.45 m/s、涨急流速增幅 0.20 m/s,治理效果略优于 NCG2 有北侧丁坝群方案。同时,北槽口门流速略有增加,而江亚北槽下段及九段沙自然保护区的流速变化控制在 0.5 m/s 以内。

综合比较结果表明:方案 NCG3 通过导流堤线位优化,在不设置南侧丁坝的前提下,既保持了良好的航道治理效果(落急流速最大增幅 0.45 m/s),又兼顾通航安全、工程经济性和环境保护要求。该方案堤轴线水深条件与原有方案相当,工程量总体可控,且对周边水动力环境影响较小,方案总体较优。

#### 4.3 高程和长度比选研究

##### 4.3.1 高程比选

在平面形态比选的基础上进行高程比选。沿航道设置采样点,提取工程前水位和流速过程线,分析可得:落潮高流速时段(流速大于 0.8 m/s)水位基本在 2.0 m 附近。因此高程方案比选取 3 个方案,护滩导流堤顶高程分别为 1.0、2.0、3.0 m。

在整体流速方面,选取 1.0 m 高程时,南槽主槽拦门沙浅段区域落急流速最大增加 0.44 m/s、涨急流速增幅在 0.10 m/s 以内;江亚北槽下段及九段沙自然保护区部分区域涨落潮流速有所减小,变幅在 0.40 m/s 以内。由于九段沙护滩导流堤阻挡了部分从主槽进入江亚北槽的水流,西堤头上段产生绕流,导致局部流速增加;落潮期间,导流堤下段对水体起到归流作用,下段堤头北侧附近流速也有所提高。当高程升至 2.0 m,拦门沙浅段落急流速增幅 0.45 m/s、涨急流速最大增加 0.20 m/s,江亚北槽下段及九段沙自然保护区内涨落潮流速减小幅度在 0.50 m/s 以内,东、西堤头的北侧局部流速也呈增加趋势。进一步抬高至高程 3.0 m 时,拦门沙浅段落急流速最大增幅 0.46 m/s、域涨急流速增加不超过 0.35 m/s,江亚北槽下段及九段沙自然保护区内涨落潮流速减小区域的变幅仍控制在 0.50 m/s 以内,东、西堤头的北侧局部流速同样有所提升。3 个方案在落急流速的增幅和影响范围上总体接近,其中高程 2.0 m 方案下流速增幅超过 0.20 m/s 的覆盖范围最大;涨急流速的增幅从高到低依次为高程 3.0、2.0 和 1.0 m 方案。

从南槽航道沿程涨落急流速变化来看,不同高程对落急流速的影响趋势基本一致:航道上游段流速略有降低,中段随着高程增加、流速提升,增幅介于 0.44~0.49 m/s,下游段流速基本保持不变。高程 3.0 m 方案因在落潮时阻水作用较强,东堤头附近航道落急流速下降幅度略高于较低高程方案,口外流速则基本不变。涨急流速的变化因高程不同呈现差异:上游段略降,中段随高程增加流速上升更明显,增幅为 0.07~0.34 m/s,下

游段略有减小,同时因壅水作用,口外流速也略有降低。

为进一步分析工程对大流速的影响,针对涨落潮期间流速超过 0.8 m/s 的平均流速开展比较。落潮期间大于 0.8 m/s 的平均流速变化趋势与落急流速一致:航道上游段略有降低,中段增加,下游段略降。具体而言,高程 1.0、2.0 和 3.0 m 方案在上游段降幅为 0.07~0.08 m/s;中段及下段增幅分别为 0.23、0.27 和 0.26 m/s;口外段则分别下降 0.11、0.13 和 0.14 m/s。综合整体流速增幅及影响范围,高程 2.0 m 方案的航道治理效果相对最优。

#### 4.3.2 长度比选

在平面形态比选基础上,围绕堤身长度开展进一步优化。由于 NCG3 方案对北槽下段及口门段涨落急流速存在一定影响,本文以该方案为基准,通过缩短东堤头以减轻不利效应。NCG3 方案东堤头顺经线方向与北槽南导堤的堤头基本平齐,堤长 28.4 km,东堤头水深 7.3 m;在 NCG3 方案基础上优化后形成 NCG5 方案:长度缩短至 24.4 km,东堤头沿北槽深水航道南导堤垂线方向布置,东堤头水深 6.5 m。在此基础上,另设两组对比方案:1)NCG4 方案堤长 26.4 km,东堤头水深 6.3 m;2)NCG6 方案堤长 22.4 km,东堤头水深 6.5 m。

各方案对大范围流速的影响表现出一定规律。在南槽主槽拦门沙区域,方案 NCG4 落急流速最大增幅 0.41 m/s、涨急流速增加在 0.20 m/s 以内,影响略小于方案 NCG3;江亚北槽下段及九段沙自然保护区局部区域流速减小幅度在 0.50 m/s 内,与方案 NCG3 相近。此外,受九段沙护滩导流堤下段归流作用影响,北槽口门落潮流速略有增加,而下段流速略降,随着护滩导流堤缩短,其对北槽航道流速的影响较方案 NCG3 有所减弱。方案 NCG5 在南槽主槽的落急流速增幅为 0.38 m/s、涨急流速增加不超过 0.15 m/s,均低于方案 NCG3 和 NCG4,对江亚北槽的影响范围与方案 NCG3 相当。方案 NCG6 流速变化最小,落急最大增幅仅 0.28 m/s,涨急增幅 $\leq$ 0.15 m/s,江亚北槽流速

减小范围也明显收窄。

在南槽航道沿程流速变化方面,4 个方案影响趋势一致:落急流速上段略降、中段增大、下段基本不变;涨急流速则上段减小、中段略增、下段稍降,总体变化幅度较小。从落急流速增幅及影响范围看,方案 NCG3~NCG6 的最大增幅分别为 0.45、0.41、0.38 和 0.28 m/s,增幅超过 0.20 m/s 的区段长度依次为 10.3、9.4、8.3 和 5.7 km。相比而言,方案 NCG6 流速增幅和影响范围显著偏低,参照北槽治理经验,难以达到预期治理效果。

就南槽主槽落潮量提升而言,方案 NCG3~NCG5 均可满足治理要求,代表性断面落潮量分别增加 2.1 亿、2.0 亿和 1.8 亿  $m^3$ 。其中,方案 NCG3 与 NCG4 实施后将使得北槽下段流速有所降低,而方案 NCG5 对深水航道流速基本无影响。

综合航道治理效果、对通航安全以及相邻九段沙湿地保护区和北槽深水航道的影响,最终在长度比选中推荐采用对北槽和九段沙影响较小的方案 NCG5 作为推荐方案。

## 5 结论

1) 长江口南槽航道治理二期工程平面布置方案优化成效显著,护滩导流堤南移并取消北侧丁坝群的方案 NCG3,在不设南侧丁坝群前提下,仍使主槽落急流速最大增幅达 0.45 m/s,同时显著降低对南岸设施及九段沙生态敏感区的影响。

2) 护滩导流堤顶高程 2.0 m 方案在有效增强航道动力(落急流速增幅 0.45 m/s)的同时,将九段沙湿地流速变化控制在 0.50 m/s 以内。

3) 护滩导流堤堤长优化实现多目标协同,方案 NCG5(堤长 24.4 km)在提升南槽主槽落潮量(1.8 亿  $m^3$ )和航道流速(落急增幅 0.38 m/s)的同时,对北槽深水航道影响极小,综合效能最优。

4) 经比选推荐方案 NCG5 为长江口南槽航道治理二期工程整治建筑物工程方案。方案 NCG5 体现综合治理优势,在航道治理效果、以及对工程相关影响等方面综合较优,可为类似河口治理工程提供重要技术参考和实践范例。

## 参考文献:

- [1] 交通运输部长江口航道管理局. 长江口航道发展规划[R]. 上海: 交通运输部长江口航道管理局, 2010.  
Yangtze River Estuary Waterway Administration, MOT. Development plan for the Yangtze River estuary waterway [R]. Shanghai: Yangtze River Estuary Waterway Administration, MOT, 2010.
- [2] 郭凤萍. 长江口南槽航道一期工程试通航期经济社会效益分析[J]. 财经界, 2023(9): 24-26.  
GUO F P. Analysis of the economic and social benefits during the trial navigation period of Phase I of the Yangtze River estuary South Passage project [J]. Money China, 2023(9): 24-26.
- [3] ALEXANDER J S, WILSON R C, GREEN W R, et al. A brief history and summary of the effects of river engineering and dams on the Mississippi River system and delta[R]. Reston: US Geological Survey, 2012.
- [4] WINKLER G, DODSON J, BERTRANDET N, et al. Trophic coupling across the St. Lawrence River estuarine transition zone[J]. Marine ecology progress series, 2003, 251: 59-73.
- [5] KASSLING-NÄF I, KUKS S. The evolution of national water regimes in Europe: transitions in water rights and water policies[M]. Dordrecht: Springer Netherlands, 2004.
- [6] 陈语, 应铭. 长江口南北槽水沙输移特征异同的初步研究[J]. 水运工程, 2025(8): 108-117.  
CHEN Y, YING M. Preliminary study on similarities and differences of water and sediment transport characteristics between North Passage and South Passage of the Yangtze River Estuary [J]. Port & waterway engineering, 2025(8): 108-117.
- [7] MARDANI N, SUARA K, FAIRWEATHER H, et al. Improving the accuracy of hydrodynamic model predictions using Lagrangian calibration [J]. Water, 2020, 12 (2): 575-594.
- [8] 丁宏伟, 韩玉芳, 胡国栋, 等. 长江口南槽底沙输沙观测研究[J]. 水利水运工程学报, 2025(1): 47-57.  
DING H W, HAN Y F, HU G D, et al. Observational study on bedload transport at the South Passage of the Yangtze Estuary [J]. Hydro-science and engineering, 2025(1): 47-57.
- [9] 李波, 顾峰峰, 付桂, 等. 长江口南汇边滩大治河出海口航道整治工程数值模拟优化[J]. 水运工程, 2024(11): 79-85.  
LI B, GU F F, FU G, et al. Numerical simulation optimization of Dazhi River Estuary Channel regulation project in Nanhui Borderland of Yangtze Estuary [J]. Port & waterway engineering, 2024(11): 79-85.
- [10] TERMINI D. Bed scouring downstream of hydraulic structures under steady flow conditions: experimental analysis of space and time scales and implications for mathematical modeling [J]. Catena, 2011, 84 (3): 125-135.
- [11] 陈复奎. 长江口南槽河床演变特征及航道治理策略研究[J]. 水道港口, 2025, 46(3): 398-406.  
CHEN F K. Study on morphological evolution characteristics and navigation channel regulation strategies of the south passage in the Yangtze Estuary [J]. Journal of waterway and harbor, 2025, 46(3): 398-406.
- [12] 窦国仁. 河口海岸全沙模型相似理论[J]. 水利水运工程学报, 2001(1): 1-12.  
DOU G R. Similarity theory of total sediment transport modeling for estuarine and coastal regions [J]. Hydro-science and engineering, 2001(1): 1-12.
- [13] 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 (S1): 134-140.  
CHEN Z C, LUO X F. Physical model research result of Yangtze Estuary deepwater channel regulation project [J]. Port & waterway engineering, 2006(S1): 134-140.
- [14] 刘卓, 郭冬建, 朱江, 等. 长江口水流和泥沙冲淤的数值模拟的初步研究: I. 自适应网格的构造和流场计算[J]. 自然科学进展, 1999, 9(1): 64-70.  
LIU Z, GUO D J, ZHU J, et al. Preliminary study on numerical simulation of flow and sediment erosion/deposition in the Yangtze Estuary: I. construction of adaptive grid and flow calculation [J]. Progress in natural science, 1999, 9(1): 64-70.