



长江南京以下 12.5 m 深水航道 演变特征及养护策略研究

黄蓓蓓¹, 符育文²

(1. 长江航道局, 湖北 武汉 430010; 2. 长江航道规划设计研究院, 湖北 武汉 430040)

摘要: 针对长江南京以下 12.5 m 深水航道在福姜沙、口岸直等典型水道存在的年回淤显著、航槽不稳等碍航问题, 基于 2022—2024 年实测地形与水沙数据, 采用多波束测深技术与二维水沙数学模型, 分析航道演变特征, 评估动态养护疏浚的成效。重点阐述“测—析—疏—评”一体化动态养护方法的实施流程与技术优势。结果表明: 近年来, 通过引入多波束高频地形扫描与模型预测相结合的动态疏浚策略, 实现了对重点淤积区域的精准识别与及时疏浚, 航道养护效率提高约 15%。福姜沙水道整体疏浚量从 2022 年的 1 026.7 万 m³ 降至 2024 年的 730.1 万 m³, 降幅达 28.8%; 口岸直水道整体疏浚量从 2022 年的 579.8 万 m³ 波动至 2024 年的 709.6 万 m³, 其中鳊鱼沙段受特殊水文条件影响显著增加。模型预测值与实测值的误差小于 15%, 验证了预测方法的可靠性。融合智能监测与精准疏浚的主动养护策略, 可有效提升航道通航稳定性与养护经济性, 为长江黄金水道高效养护提供技术支撑。

关键词: 深水航道; 航道演变; 养护策略; 碍航特性; 多波束测深

中图分类号: U657.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2026)05-0145-08

Evolution characteristics and maintenance strategies of 12.5-m deep-water channel below Nanjing in the Yangtze River

HUANG Beibei¹, FU Yuwen²

(1. Changjiang Waterway Bureau, Wuhan 430010, China;

2. Yangtze River Waterway Institute of Planning and Design, Wuhan 430040, China)

Abstract: Addressing navigation-obstructing problems of significant annual siltation and unstable navigation channels in key waterways like Fujiangsha and Kouanzhi along the 12.5-m deep-water channel below Nanjing in the Yangtze River, we utilize the field topographic and sediment data from 2022 to 2024, multibeam bathymetry, and a two-dimensional sediment transport model to analyze channel evolution characteristics and evaluate dynamic maintenance dredging effectiveness. We elaborate on the implementation process and technical advantages of the integrated “monitoring-analysis-dredging-evaluation” dynamic maintenance approach. The results indicate that the introduction of a dynamic dredging strategy, which combines multibeam high-frequency scanning with model predictions, enables precise identification and timely dredging of critical sedimentation zones, enhancing maintenance efficiency by about 15%. The total dredging volume in Fujiangsha waterway decreases from 10.267 million m³ in 2022 to 7.301 million m³ in 2024, a reduction of 28.8%, while Kouanzhi waterway’s volume fluctuates from 5.798 million m³ to 7.096 million m³, with a significant increase in the Manyusha section due to special hydrological conditions. The error between the predicted values of the model and the measured values is less than 15%, verifying method reliability. Integrating intelligent monitoring with precision dredging in a proactive maintenance strategy effectively enhances navigation stability and maintenance cost-effectiveness, providing technical support for efficient maintenance of the Yangtze River’s golden waterway.

Keywords: deep-water channel; channel evolution; maintenance strategy; navigation hazard characteristic; multibeam bathymetry

收稿日期: 2025-08-28 录用日期: 2025-12-03

作者简介: 黄蓓蓓(1984—), 女, 硕士, 高级工程师, 从事长江干线航道的科研、设计、养护与管理工作。

长江经济带的高质量发展是我国区域协调战略的重要组成部分，构建现代化综合交通运输体系则是实现区域协同发展的核心任务。长江干线深水航道建设作为该战略布局的重要支撑性工程，对于打通沿江黄金水道主动脉、构建横贯东西辐射南北的航运网络具有基础性作用^[1]。2019年5月，随着长江下游南京—浏河口段深水航道整治二期主体工程竣工，该河段12.5 m深水航道工程全面建成，标志着长江航运干线关键航段的通航能力实现整体跃升^[2]。航道演变特征和养护疏浚情况对深水航道的通航保畅具有重要意义。为此，众多学者进行大量的研究，如闻云呈等^[3]、刘杰等^[4]和夏云峰等^[5]通过研究长江下游福姜沙水道、长江口分汊段及三沙水道的河床演变规律，揭示了水沙条件、断面形态与河槽冲淤的动态机制，为深水航道的治理与优化提供了科学依据；唐晓暄等^[6]采用德尔菲法-熵权法混合模型确立关键绩效参数、权重分配模型及量化评估准则，创新构建融合动态优化理论的养护决策支持系统；余治均^[7]、杜德军等^[8]和张璠^[9]分别从优化疏浚方案与航标系统、通过模型试验比选整治方案，以及基于水沙变化分析提出精准养护与综合治理策略等角度，为航道的整治与养护提供了具体的技术方案和实施路径；汤宇^[10]基于长江口航道观测研究，发现洪季浮泥厚度与回淤量正相关，建议优先在洪季实行精细化疏浚。

然而，现有研究在动态疏浚实施效果量化评

估、多源数据融合分析及养护策略系统性优化方面尚存不足。本文以2023、2024年度深水航道养护疏浚项目为依托，综合利用多波束测深与二维水沙数学模型，从流量、输沙量及地形演变等方面，分析关键航道部位的冲淤特征及碍航机制，量化评估动态疏浚结合多波束技术的养护成效，并提出养护策略优化建议，以期为后续航道精准、高效养护提供参考。

1 研究区域

长江干线南京新生圩—浏河口段航道全长约306 km，水流平缓，河道开阔，航行条件优越。以江阴（鹅鼻嘴）为界分为上、下两段，江阴以上长178 km的河道以分汊河型为主，河床形态为宽窄相间的藕节状，窄深河段一般受山丘矾头控制而河槽稳定，宽浅河段则江宽流缓而多洲滩而有两个或多个汉道；江阴以下128 km河道总体自上而下呈喇叭形展宽，江心洲滩发育，主要洲滩有福姜沙、浏海沙、通州沙、白茆沙等水道^[11]。

长江南京—浏河口段自上而下分为南京河段（龙潭水道）、镇扬河段（仪征水道、丹徒直（和畅洲）水道）、扬中河段（口岸直水道、泰兴水道、江阴水道）、澄通河段（福姜沙水道、浏海沙水道、南通水道、通州沙水道）、白茆沙水道和浏河水道。其中，口岸直水道（含落成洲和鳊鱼沙段）和福姜沙水道（含福中、福南、福北段）为养护疏浚重点水道。南京以下河段河道形势及水道分布情况见图1^[12-13]。



图1 长江南京以下12.5 m深水航道跟踪观测分析重点水道分布(单位:km)

Fig. 1 Key waterway distribution for tracking and monitoring analysis of 12.5-m deep-water channel below Nanjing in the Yangtze River (unit: km)

2 典型水道近期航道演变特征与养护情况分析

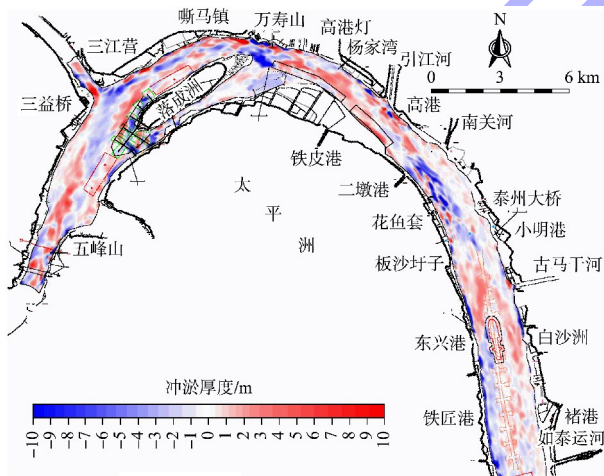
系统梳理福姜沙、口岸直两个典型水道的河床演变规律及其引发的碍航问题, 并结合 2022—2024 年疏浚数据, 分析各水段的维护压力与变化趋势, 为后续动态养护策略的制定提供依据。

2.1 口岸直水道

口岸直水道全长约 40 km, 上起五峰山、下至褚港, 为反 S 形河道。2024 年下半年, 该水道在整体“微冲为主”的格局下, 冲淤空间分异显著, 碍航特征主要表现为上段边滩淤积缩窄航宽与下段心滩活动导致航槽不稳。

2.1.1 落成洲段(上段)

该段为弯曲多汊河型, 落成洲左汊为主汊。2024 年, 五峰山进口及三益桥边滩持续淤积, 反映上游来沙在展宽段易淤特性; 三江营对开处有大规模淤积体入侵航槽, 对航道构成潜在威胁。碍航主要表现为三益桥边滩淤积向河心挤压, 导致航宽不足。航道演变情况见图 2。



注: 淤积为正, 冲刷为负。

图 2 2024 年 6—11 月口岸直水道冲淤云图
Fig. 2 Sedimentation and erosion cloud map in Kouanzhi Waterway from June to November 2024

2022—2024 年全年疏浚量分别为 361.3 万、262.4 万和 169.6 万 m^3 。该水道常年施工, 主要疏浚量集中在第 2~4 季度。其中 2022 年, 受汛期来流量大幅下降影响, 养护疏浚量高于往年同期。疏浚情况见图 3。该段近 3 a 疏浚量逐步减少, 反映出养护措施的有效性及其段维护压力趋于缓解。

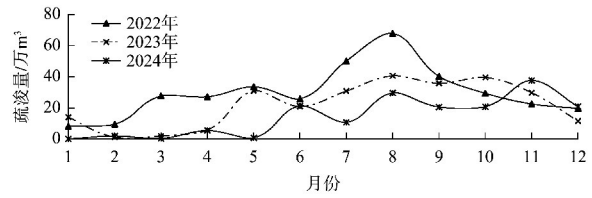


图 3 落成洲水道月疏浚量分布
Fig. 3 Monthly distribution of dredging volume in Luochengzhou Waterway

2.1.2 鳊鱼沙段(下段)

该段为顺直河型, 鳊鱼沙心滩将河槽分为左右两槽。2024 年, 受高港码头挑流作用, 主流右趋, 导致鳊鱼沙头部及右汊大幅淤积。碍航核心在于退水期心滩淤长明显, 导致左右两槽冲淤交替、航槽位置不稳。

鳊鱼沙段 2022—2024 年全年疏浚量分别为 218.5 万、246.5 万和 540.0 万 m^3 。从近 3 a 疏浚量分布看, 疏浚量峰值主要集中在 6—8 月。其中 2024 年 7 月, 由于上游来水来沙迎来峰值, 回淤明显, 第 3、4 季度养护量高于往年同期。疏浚情况见图 4。该段近 3 a 疏浚量持续增加, 主因是 2024 年洪期流量超 7 万 m^3/s , 泥沙大量落淤, 致使维护压力陡增。

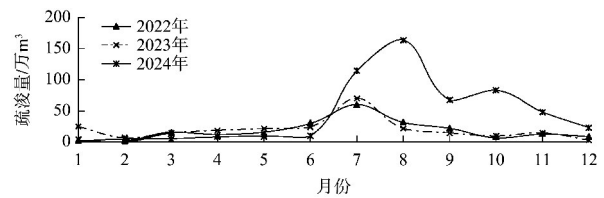


图 4 鳊鱼沙水道月疏浚量分布
Fig. 4 Monthly distribution of dredging volume in Manyusha Waterway

2.2 福姜沙水道

福姜沙水道全长约 45 km, 为多级分汊河道。2024 年, 水道整体冲淤交替, 但碍航问题高度集中于福北水道。

该水道碍航特性主要是上游靖江边滩(三季度丹宁港以上边滩冲刷幅度 1~2 m)在周期性冲刷下移过程中, 为福北水道提供了持续的泥沙来源。这些泥沙在福北水道中上段因流路不畅而大量落淤(淤积幅度 2~4 m), 导致航槽年内回淤强度大, 构成主要维护压力^[14]。冲淤情况见图 5。

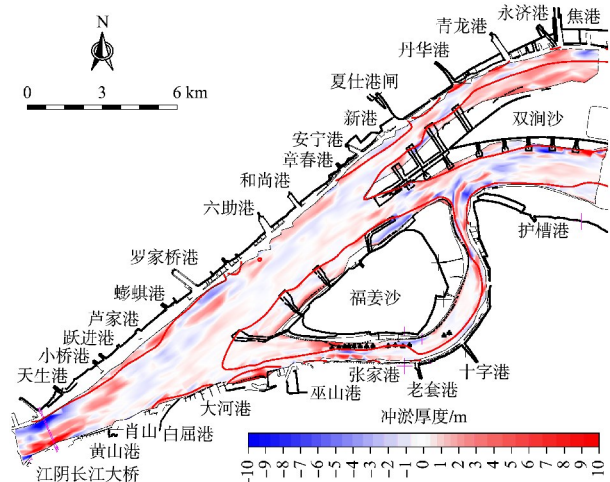
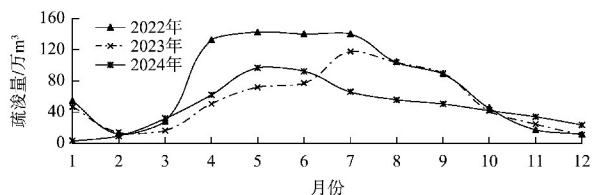
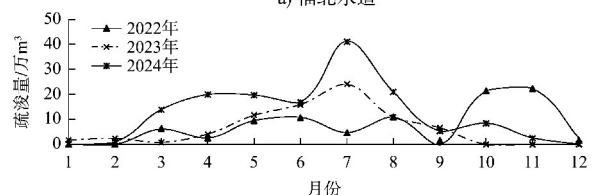


图5 2024年6—11月福姜沙水道冲淤云图
Fig. 5 Sedimentation and erosion cloud map in Fujiangsha Waterway from June to November 2024

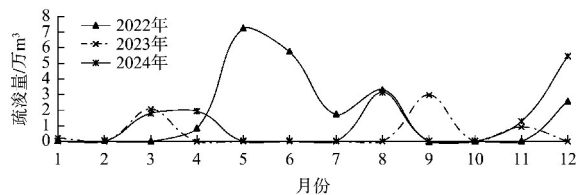
福北水道 2022—2024 年全年疏浚量分别为 915.1 万、664.2 万和 566.5 万 m^3 。该水道常年施工，主要疏浚量集中第 2、3 季度。其中，2022 年受上游来沙量偏大及福北水道作为主输沙通道的特性影响，航道淤积较为严重，为近 3 a 最高值。福北水道疏浚情况见图 6a)。福中水道 2022—2024 年全年疏浚量分别为 90.6 万、78.0 万和 150.0 万 m^3 。2024 年福中水道疏浚量高于前两年，主要由于张靖皋过江通道施工导致的显著淤积，疏浚作业主要集中在局部浅区，维护量相对平稳。福中水道疏浚情况见图 6b)。福南水道 2022—2024 年全年疏浚量分别为 21.4 万、6.2 万和 13.6 万 m^3 。从近 3 a 分月疏浚情况来看，福南水道 1—7 月整体疏浚量较少，疏浚量主要集中于第 3 季度，该水道受来流量影响较大。福南水道疏浚情况见图 6c)。



a) 福北水道



b) 福中水道



c) 福南水道

图6 福姜沙水道月疏浚量分布
Fig. 6 Monthly distribution of dredging volume in Fujiangsha Waterway

福北水道是深水航道养护重点水道，其年疏浚量 3 a 来降幅达 38.1%，但体量仍远高于其他水道。福中水道疏浚量增加，主要受张靖皋过江通道施工影响。福南水道疏浚量最小，近 3 a 均值仅为 13.7 万 m^3 ，维护压力相对较轻。

3 航道动态养护策略研究

在明确典型水道碍航特征的基础上，重点介绍以多波束高频地形扫描与二维水沙数学模型为核心的动态养护方法，系统评估该方法的实施成效与预测精度，并据此提出针对性的养护策略优化建议。

3.1 动态养护方法

为应对上述碍航问题，构建并实践了“测—析—疏—评”一体化动态养护技术体系，其核心流程如下。

1) 测(高频监测): 采用多波束测深系统对福北水道、鳊鱼沙等重点区域进行每月 1~2 次的地形扫描，获取高精度、高频次的河床地形数据，为动态决策提供实时数据支撑。

2) 析(趋势预测): 将实测地形数据与二维水沙数学模型耦合，模拟并预测未来短期内(如 1 个月)航道的冲淤趋势与淤积部位，精准识别即将碍航的浅区。

3) 疏(精准调度): 依据预测结果，动态调配疏浚船机力量，实现对重点淤积区域的“按需疏浚”和“精准清除”，取代了传统的固定周期疏浚模式。

4) 评(效果闭环): 疏浚后通过多波束测深进行效果检验，并将实测数据反馈至数学模型，用

于校准模型参数、优化后续预测,形成一个持续改进的闭环管理流程。

该技术体系将养护模式从“被动响应”转变为“主动干预”,是其提升效率的关键。

3.2 疏浚量预测模型验证

养护疏浚量预测拟采用大小嵌套的二维潮流泥沙数学模型。大模型上游边界取大通潮流界给定径流,下游取80 m等深线给定外海潮汐;小模型上游大通流量边界条件采用近5 a最大流量过程(2016年)和5 a平均过程进行计算;下游分北支、北港和南港分别给定潮位过程线,由大模型计算给定。

3.2.1 基本方程

笛卡尔坐标系二维水深积分水流运动基本方程中的连续方程为:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial(H\bar{u})}{\partial x} + \frac{\partial(H\bar{v})}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

动量方程为:

$$\frac{\partial(H\bar{u})}{\partial t} + \frac{\partial(H\bar{u}^2)}{\partial x} + \frac{\partial(H\bar{u}\bar{v})}{\partial y} = -gH\frac{\partial \zeta}{\partial x} + fH\bar{v} - \frac{\tau_{b,x}}{\rho} + \nabla \cdot (H\nu_t \nabla \bar{u}) \quad (2)$$

$$\frac{\partial(H\bar{v})}{\partial t} + \frac{\partial(H\bar{u}\bar{v})}{\partial x} + \frac{\partial(H\bar{v}^2)}{\partial y} = -gH\frac{\partial \zeta}{\partial y} - fH\bar{u} - \frac{\tau_{b,y}}{\rho} + \nabla \cdot (H\nu_t \nabla \bar{v}) \quad (3)$$

式中: ζ 为浓度; t 为时间; H 为水深; \bar{u} 、 \bar{v} 分别为 x 、 y 方向的垂向平均流速; f 为地转偏向力参数; $\tau_{b,x}$ 、 $\tau_{b,y}$ 分别为底部切应力在 x 、 y 方向上的分量; ρ 为水的密度; ∇ 为梯度算子; ν_t 为湍流黏性系数; $\nabla \cdot (H\nu_t \nabla \bar{u})$ 为湍流扩散项。

笛卡尔坐标系二维泥沙输运方程中的悬沙不平衡输运方程为:

$$\frac{\partial(HS_i)}{\partial t} + \frac{\partial(HuS_i)}{\partial x} + \frac{\partial(HvS_i)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(H \frac{\nu_t}{\sigma_s} \frac{\partial S_i}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(H \frac{\nu_t}{\sigma_s} \frac{\partial S_i}{\partial y} \right) + \Phi_s \quad (4)$$

推移质不平衡输移方程为:

$$\frac{\partial(HN_b)}{\partial t} + \frac{\partial(uHN_b)}{\partial x} + \frac{\partial(vHN_b)}{\partial y} = \beta \omega_s (N_b^* - N_b) \quad (5)$$

对于非均匀沙,推移质不平衡输移方程采用如下形式:

$$\frac{\partial(HN_i)}{\partial t} + \frac{\partial(HuN_i)}{\partial x} + \frac{\partial(HvN_i)}{\partial y} = \beta_i \omega_{s_i} (N_i^* - N_i) \quad (6)$$

式中: S_i 为第 i 组泥沙单位水体垂线平均含沙量; σ_s 为Schmidt数; Φ_s 为源汇项; ω_s 为泥沙沉速; β 为沉降影响系数; N_b^* 为推移质泥沙的平衡浓度; u 、 v 为 x 、 y 方向上的速度; N_b 为平均推移质浓度; N_i 为第 i 组推移质泥沙的单位水体垂线平均浓度; N_i^* 为第 i 组推移质泥沙的平衡浓度; β_i 为第 i 组推移质泥沙的沉降影响系数; ω_{s_i} 为第 i 组推移质泥沙颗粒的沉速。

由悬移质冲淤引起的河床变形方程为:

$$\gamma_0 \frac{\partial \eta_{s_i}}{\partial t} = \alpha_i \omega_{s_i} (s_i - s_i^*) \quad (7)$$

由推移质冲淤引起的河床变形方程为:

$$\gamma_0 \frac{\partial \eta_{b_i}}{\partial t} = \beta_i \omega_{s_i} (N_i - N_i^*) \quad (8)$$

式中: η_{s_i} 为第 i 组粒径悬移质泥沙引起的冲淤厚度; γ_0 为床面泥沙干重力密度; α_i 为悬移质恢复饱和系数; ω_{s_i} 为第 i 组粒径悬移质的沉降速度; s_i 为第 i 组粒径悬移质的实际浓度; s_i^* 为第 i 组粒径悬移质的平衡浓度; η_{b_i} 为第 i 组粒径推移质泥沙引起的冲淤厚度; β_i 为推移质泥沙恢复饱和系数; ω_{s_i} 为第 i 组粒径推移质泥沙的沉降速度; N_i 为第 i 组粒径推移质泥沙的实际浓度; N_i^* 为第 i 组粒径推移质的平衡浓度。

则河床总的冲淤厚度:

$$\eta = \sum_{i=1}^n \eta_{s_i} + \sum_{i=1}^m \eta_{b_i} \quad (9)$$

3.2.2 模型结果

模型计算结果显示,2024年第4季度各水道主要的出浅养护位置如下:口岸直水道落成洲进口段三益桥边滩以及高港边滩淤积,鳊鱼沙心滩段左槽进口及出口、右槽出口局部区域淤积挤压航槽;福北水道在进口及中段出现淤积,福中水道中下段边滩有所淤积挤压航槽,基本符合冲淤图6体现的情况。2024年10—12月养护总量分别为

85万~190万 m^3 、75万~150万 m^3 、35万~85万 m^3 。

3.2.3 模型验证

为评估养护疏浚的精准性，将2024年模型预测疏浚量与实际疏浚量进行对比，结果见表1。可以看出，福北水道模型预测与实测误差小于15%，鳊鱼沙段误差约18%，说明模型具备较好的预测能力。动态疏浚策略有效控制了回淤强度，避免了过度疏浚。

表1 各水道预测疏浚量与实际养护量对比结果
Tab.1 Comparison results of predicted and actual maintenance volumes for each waterway

时间	落成洲水道 疏浚量/万 m^3		鳊鱼沙水道 疏浚量/万 m^3		福姜沙水道 疏浚量/万 m^3	
	预测	实际	预测	实际	预测	实际
2024年10月	10~30	21	70~100	83	45~80	50
2024年11月	30~40	38	40~50	48	35~60	37
2024年12月	10~20	21	20~30	23	20~45	24

进一步分析表明，动态疏浚结合多波束技术不仅在总量控制上成效显著，还在疏浚时机与区域选择上体现出明显优势。例如，福北水道在2024年疏浚量进一步下降至566.5万 m^3 ，较2022年降幅达38.1%，反映出该方法的持续优化效果。

3.3 动态养护策略成效分析

3.3.1 整体养护效率提升

通过应用“测—析—疏—评”一体化动态养护体系，航道整体养护效率提升约15%。福姜沙水道总疏浚量从2022年的1 026.7万 m^3 降至2024年的730.1万 m^3 ，降幅显著，达28.8%，体现了该策略在主要淤积区的有效性。尽管口岸直水道2024年总疏浚量因异常水文条件回升至709.6万 m^3 ，但动态方法确保了在巨大泥沙输入压力下航道尺度的及时保障。

3.3.2 疏浚作业的精准性与时效性增强

动态疏浚结合多波束技术不仅在总量控制上成效显著，更在疏浚时机与区域选择上体现出明显优势。例如，福北水道在2024年疏浚量进一步下降至566.5万 m^3 ，较2022年降幅达38.1%，反映出该方法的持续优化效果。该方法有效避免了

传统周期性疏浚的盲目性与滞后性，实现了养护资源的高效配置。

3.4 养护策略优化

基于前述分析，为提升未来养护工作的精准性与经济性，提出以下优化建议。

1) 推动监测预警体系前瞻化：建议将水位、流量预报系统与多波束地形扫描数据更深层次融合，发展航道回淤中短期预报技术，实现对重点水道淤积趋势的早期预警，为疏浚资源调配赢得提前量。

2) 实现疏浚调度决策精细化：依据水沙数学模型的预测结果，进一步优化“先重点后一般”的疏浚原则。对福北水道进口段等关键回淤区域需提前储备船机；对鳊鱼沙段等易变区域，则需提高监测频率，建立更灵活的应急疏浚机制。

3) 构建智能化养护管理平台：长远来看，应构建一个集“实时监测—模型预测—动态决策—效果评估”于一体的智能化养护管理平台，系统性提升长江南京以下深水航道的通航保障能力、养护经济效益与长期可持续性。

4 结语

1) 口岸直水道的碍航主因在于鳊鱼沙心滩活动导致的航槽冲淤交替与位置不稳，以及落成洲进口段边滩淤积对航宽的挤压；福姜沙水道的碍航问题则高度集中于福北水道，其根本机制是上游靖江边滩周期性冲刷下移为其提供了持续的泥沙来源。

2) 通过融合多波束测深技术与二维水沙数学模型，航道整体养护效率提升约15%。福姜沙水道总疏浚量从2022年的1 026.7万 m^3 降至2024年的730.1万 m^3 ，降幅显著，达28.8%，证明了该策略在主要淤积区的有效性。

3) 本文模型对福北水道和鳊鱼沙段等重点区域的回淤预测与实测值误差分别小于15%和约18%，为精准预判疏浚需求、优化船机调度提供了有效的技术支撑。

4) 未来航道养护应从被动响应向主动调控转型,核心是构建融合智能监测、精准预报与动态决策的智能化养护管理体系,以实现重点水道淤积趋势的早期预警和疏浚资源的高效调配,从而系统性提升航道的通航保障能力与养护经济性。

参考文献:

- [1] 夏云峰,徐华,闻云呈,等.长江福姜沙、通州沙和白茆沙河段深水航道整治关键技术[M].北京:人民交通出版社股份有限公司,2015.
- XIA Y F, XU H, WEN Y C, et al. Key technologies for deep waterway regulation of in the reach of Fujiang Sand Shoal, Tongzhou Sand Shoal and Baomao Sand Shoal in the Yangtze River [M]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2015.
- [2] 刘松杉,栾华龙,渠庚,等.长江下游南京至浏河口段2019年度航道维护疏浚后评价[J].中国水运,2022(15): 103-105.
- LIU S S, LUAN H L, QU G, et al. Post-implementation evaluation of channel maintenance dredging in the Nanjing to Liuhekou Reach of the lower Yangtze River in 2019[J]. China water transport, 2022(15): 103-105.
- [3] 闻云呈,徐华,夏云峰,等.新水沙条件下靖江边滩演变特性及影响因素研究[J].人民长江,2018,49(S1): 6-10.
- WEN Y C, XU H, XIA Y F, et al. Evolution characteristics and influencing factors of Jingjiang foreshore under new water and sediment conditions [J]. Yangtze River, 2018, 49(S1): 6-10.
- [4] 刘杰,陈吉余,徐志扬.长江口深水航道治理工程实施后南北槽分汉段河床演变[J].水科学进展,2008,19(5): 605-612.
- LIU J, CHEN J Y, XU Z Y. River-bed evolution in the braided reach of the south and north passage after implementing Yangtze estuary deepwater navigational improvements [J]. Advances in water science, 2008, 19(5): 605-612.
- [5] 夏云峰,曹民雄,陈雄波.长江下游三沙(福姜沙、通州沙、白茆沙)水道演变分析及深水航道整治设想[J].泥沙研究,2001(3): 57-61.
- XIA Y F, CAO M X, CHEN X B. Formation analysis and regulation plan for dredging channel of the three sand shoals (Fujiang Sand Shoal, Tongzhou Sand Shoal, and Baimao Sand Shoal) on the lower Yangtze River [J]. Journal of sediment research, 2001(3): 57-61.
- [6] 唐晓暄,雷潘,陈奕超.江苏省干线航道养护科学决策体系研究[J].中国水运,2025(4): 9-11.
- TANG X X, LEI P, CHEN Y C. Research on scientific decision-making system for maintenance of trunk waterways in Jiangsu Province [J]. China water transport, 2025(4): 9-11.
- [7] 余治均.促进水运可持续发展的航道维护策略研究[J].珠江水运,2024(14): 138-140.
- YU Z J. Research on channel maintenance strategies for promoting sustainable development of water transport [J]. Pearl River water transport, 2024(14): 138-140.
- [8] 杜德军,夏云峰,吴道文,等.通州沙和白茆沙12.5 m深水航道整治方案试验研究[J].水利水运工程学报,2013(5): 1-9.
- DU D J, XIA Y F, WU D W, et al. Experimental studies on 12.5 m deep waterway regulation of Tongzhou Shoal and Baimao Shoal [J]. Hydro-science and engineering, 2013(5): 1-9.
- [9] 张璠.汛期反枯水情下长江上游航道养护对策[J].水运工程,2023(8): 157-162.
- ZHANG F. Maintenance countermeasures in upper reaches of the Yangtze River under flood season drought[J]. Port & waterway engineering, 2023(8): 157-162.
- [10] 汤宇.长江口深水航道浮泥运移规律及精细化维护疏浚[J].水运工程,2024(7): 89-95.
- TANG Y. Movement law of floating mud and fine maintenance dredging in deep water channel of Yangtze River Estuary [J]. Port & waterway engineering, 2024(7): 89-95.
- [11] 徐华,王晓俊,张帆一,等.2024年度长江南京以下深水航道维护量预测分析报告[R].南京:南京水利科学研究所,2023.
- XU H, WANG X J, ZHANG F Y, et al. Forecast and analysis report on the maintenance volume of the deep-

water channel downstream of Nanjing in the Yangtze River for 2024 [R]. Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute, 2023.

[12] 长江航道规划设计研究院, 长江航道勘察设计院(武汉)有限公司, 长江南京航道局, 等. 长江南京以下 12.5 m 深水航道养护跟踪观测分析报告(2023 年度) [R]. 武汉: 长江航道规划设计研究院, 2024.

Yangtze River Waterway Planning Design and Research Institute, Changjiang Waterway Survey, Design and Research Institute (Wuhan) Co., Ltd., Changjiang Nanjing Waterway Bureau, et al. Analysis report on maintenance tracking observation of the 12.5 m deep-water channel downstream of Nanjing in the Yangtze River (2023) [R]. Wuhan: Yangtze River Waterway Planning Design and Research Institute, 2024.

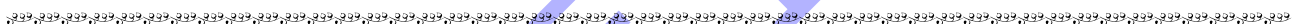
[13] 长江航道规划设计研究院, 长江航道勘察设计院(武汉)有限公司, 长江航道局, 等. 长江南京以下

12.5 m 深水航道养护跟踪观测分析报告(2024 年度第 3 季度) [R]. 武汉: 长江航道规划设计研究院, 2024. Yangtze River Waterway Planning Design and Research Institute, Changjiang Waterway Survey, Design and Research Institute (Wuhan) Co., Ltd., Changjiang Waterway Bureau, et al. Analysis report on maintenance tracking observation of the 12.5 m deep-water channel downstream of Nanjing in the Yangtze River (Q32024) [R]. Wuhan: Yangtze River Waterway Planning Design and Research Institute, 2024.

[14] 刘高峰, 王统泽. 福姜沙河段输沙、边滩输移特征和动力机制研究[J]. 水运工程, 2020(11): 94-99.

LIU G F, WANG T Z. Characteristic and dynamic mechanism of sediment and beach transport in Fujiangsha reach [J]. Port & waterway engineering, 2020 (11): 94-99.

(本文编辑 王璁)



(上接第 144 页)

[19] 张雨润, 石重托, 姚伟, 等. 融合电力系统知识的预想扰动下频率指标智能预测方法[J]. 电力自动化设备, 2025, 45(6): 148-155, 163.

ZHANG Y R, SHI Z T, YAO W, et al. Intelligent prediction method of frequency indicators under anticipated disturbances integrated with power system knowledge [J]. Electric power automation equipment, 2025, 45(6): 148-155, 163.

[20] 爱丽丝·郑, 阿曼达·卡萨丽. 精通特征工程[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2019.

ZHENG A, CASARI A. Feature engineering for machine learning [M]. Beijing: Posts & Telecom Press, 2019.

[21] 安德里亚斯·穆勒, 莎拉·吉多. Python 机器学习基础教程[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2018.

MÜLLER A, GUIDO S. Introduction to machine learning with Python [M]. Beijing: Posts & Telecom Press, 2018.

[22] 国家发展和改革委员会. 中华人民共和国国民经济和

社会发展第十四个五年规划和 2035 年远景目标纲要 [EB/OL]. (2021-03-13) [2025-09-20]. http://www.gov.cn/xinwen/2021-03/13/content_5592681.htm.

National Development and Reform Commission. Outline of the 14th Five-Year Plan (2021-2025) for national economic and social development and the long-range objectives through the year 2035 [EB/OL]. (2021-03-13) [2025-09-20]. http://www.gov.cn/xinwen/2021-03/13/content_5592681.htm.

[23] 长江勘测规划设计研究院. 三峡水利枢纽水运新通道和葛洲坝水利枢纽航运扩能工程项目建议书[R]. 武汉: 长江勘测规划设计研究有限责任公司, 2018.

Changjiang Institute of Survey, Planning, Design and Research. Proposal for the new water transport channel of the Three Gorges water conservancy hub and the navigation capacity enhancement project of the Gezhouba Water Conservancy Hub [R]. Wuhan: Changjiang Institute of Survey, Planning, Design and Research, 2018.

(本文编辑 王传瑜)