



新时期长江口航道建设深化研究方向的探讨

金 镠¹, 楼 飞², 张赛赛²

(1. 交通运输部长江口航道管理局, 上海 200003; 2. 中交上海航道勘察设计研究院有限公司, 上海 200120)

摘要: 长江口航道的建设与管理面临着河势背景深刻变化的新情况和生态优先等新要求。为了进一步提高航道的综合通过能力, 分析近几十年来长江口河势的主要变化, 归纳长江口深水航道的治理(设计)思路。基于对长江口在盐、淡水交汇和潮汐环境中的黏性细颗粒泥沙运动物理过程和航道回淤机理的认识, 包括盐度和含沙量的层化、紊动抑制、悬沙斜压效应以及纵向及横流输沙、悬沙近底高浓度层的类推移输运、浮泥的重力流输运以及非黏性沙的层移输运等, 提出长江口航道建设、维护需要注意的问题和进一步的研究方向, 以及开展河口开敞边界泥沙收支、生物对河床稳定性影响等研究的建议。分析结论和工作建议可作为深化长江口航道治理的参考。

关键词: 长江口; 航道建设; 新时期; 深化方向

中图分类号: U 61

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)02-0095-05

Discussion on deepening research direction of waterway construction at the Yangtze River Estuary in the new era

JIN Liu¹, LOU Fei², ZHANG Sai-sai²

(1. Yangtze Estuary Waterway Administration Bureau, Ministry of Transport, Shanghai 200003, China;

2. Shanghai Waterway Engineering Design and Consulting Co., Ltd., Shanghai 200120, China)

Abstract: The construction and management of the waterways at the Yangtze River Estuary are facing a new situation of profound changes in the river regime and new requirements such as ecological priority. To further improve the comprehensive carrying capacity of the waterways, we analyze the main changes in the river regime of the Yangtze River Estuary in recent decades and sum up the regulation(design) ideas for the deep waterways at the estuary. The physical process of viscous fine-grained sediment movement in fresh and salt water mixing and tidal environments and the mechanism of waterway siltation at the Yangtze River Estuary are sorted out, including the stratification of salinity and sediment concentration, turbulence suppression, baroclinic effect of suspended sediment, longitudinal and cross flow sediment transport, bedload like transport of suspended sediment near the bottom of the high concentration layer, gravity flow transport of floating mud, and laminar transport of non-cohesive sediment. On this basis, we point out some noteworthy problems in the construction and maintenance of the waterways at the Yangtze River Estuary and further research directions. We also put forward suggestions for studies of the sediment budget at the open boundary of the estuary and the influence of organisms on the stability of the riverbed. The conclusions and suggestions can serve as a reference for deepening waterway regulation at the Yangtze River Estuary.

Keywords: Yangtze River Estuary; waterway construction; new era; deepening direction

长江口 12.5 m 深水航道整治工程(1998—2012 年)和南槽航道治理一期工程(2018—2020 年)均已建

成运行, 大大提升了长江口航道的通过能力。当前, 长江三角洲和长江经济带发展国家战略的实

收稿日期: 2021-03-31

作者简介: 金镠(1940—), 男, 教授级高级工程师, 从事港口航道工程的建设管理及研究工作。

施,要求进一步提高长江口航道通过能力,为此,进一步梳理河势背景变化下航道治理面临的问题,深入探讨如何进一步贯彻生态优化、绿色发展理念等是必要的。

1 新时期长江口航道的河势背景

对河势背景的分析是长江口航道研究和科学建、管的基础。近几十年来,长江口河势发生了极为深刻的变化,标志着长江口发育模式演替进入了新阶段,具体表现为:

1)流域来沙持续减少,1997年起长江口进入普遍冲刷的新阶段。1958—1986年,河口普遍淤积;1986—1997年,总体冲淤平衡;1997年起普遍冲刷,其中2003年后冲刷趋势更加明显^[1]。

2)近20年来,除北支外,各主要汉道河槽容积、平均水深均呈趋势性增加,江中洲滩的潮下带体积呈趋势性缩小,口门外水下三角洲前缘(-20~-10 m)大面积冲刷加深。以北槽为例,主槽-5 m以深断面平均水深和过水断面积,1999年5月分别为7.90 m和5 800 m²,2019年5月达到9.34 m和8 300 m²(不包括航道疏浚断面),主槽加深和扩宽均十分明显^[2];水下三角洲前缘(-20~-10 m),1997—2016年间,冲刷区面积达700~900 km²,累计冲刷量16.8亿 m³,累计平均冲刷深度约2.0 m^[3]。

3)通过实施一系列治理、开发工程,河口内岛岸边界基本稳定,长江口基本实现由自然河口向人工河口的转化,河床演变从动荡无序逐渐变得有序和可预测。南北槽、南北港、南北支3个分汉口河段的治理以及上游通州沙—徐六泾河段的治理,使河口内岛、岸边界和深泓线基本稳定。

4)流域来沙的持续减少和水下三角洲前缘的冲刷,使水下三角洲由流域来沙的“汇”转化成为河口拦门沙区域泥沙补给的“源”^[4]。这种“源汇转换”的新形态使拦门沙区域泥沙运动、地形变化和航道回淤产生了新变化,例如崇明东滩淤泥质潮滩上部的盐沼湿地在对冲海平面上升影响

后仍持续向海扩展和淤高,而剖面下部(中、低潮滩)则冲刷后退^[5],横沙浅滩也有类似情况。

盐沼湿地的向海拓展速度将随流域来沙的进一步减少和水下三角洲前缘冲刷区老沉积物出露而变慢,因此湿地的扩展具有时限性。有限的统计资料显示,当大通站年输沙量约为100 Mt/a时,崇明东滩湿地的扩展将停止(图1)。

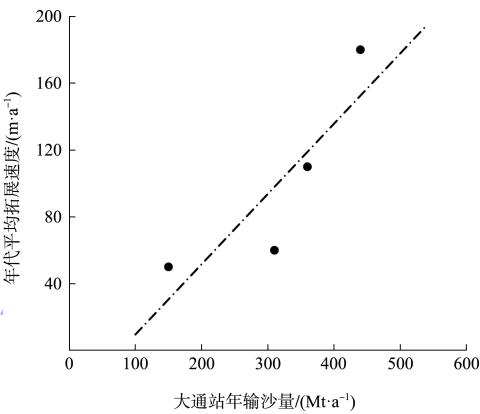


图1 崇明东滩盐沼湿地向海扩张与流域来沙的关系

河口拦门沙区域由于接纳水下三角洲前缘和中低滩冲刷泥沙的补给,在2012年之前洪季含沙量仍维持在1.0~1.5 kg/m³的水平,之后则趋势性下降(图2)。

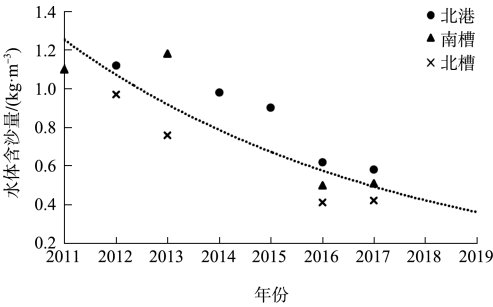


图2 长江口拦门沙汉道洪季水体含沙量变化

根据窦国仁平原潮汐河流河相关系理论,多年平均落潮、平均流量对维持河槽容积和平均水深的能力将随来沙减少而加强。分析表明,虽然整治工程使北槽落潮分流比从60%大幅下降至42%左右,但由于含沙量降低,北槽河势仍然稳定,河槽平均水深显著增加^[6]。换言之,随着含沙量趋势性降低,分流比对汉道稳定性的敏感性下降。

5)局部河势仍不稳定,主要表现为:扁担沙西侧受南支主槽主流冲刷后退,主流线相应偏移

和滩面横向串沟发育，冲刷泥沙在扁担沙下段和沙尾淤积。沙尾延伸使新桥通道轴线偏转，引起北港进流条件改变。扁担沙尾部横向串沟的发育可导致切滩产生活沙包。

作为河口外边界的滨海沙洲(崇明东滩、顾园沙、横沙浅滩、九段沙下沙、南汇东滩)和 水下三角洲前缘潮滩构成长江口尚未得到控制的开敞边界。这一边界因流域来沙持续减少，海平面上升和极端水文气象事件增多而发生复杂的水沙和冲淤动态的变化，如崇明东滩和横沙浅滩盐沼湿地扩展和中低潮滩蚀退等。

新时期航道建设、运管还必须考虑一系列约束条件，主要有国家批准的保护 区生态红线、桥梁的主通航孔、隧道及管廊顶板埋置深度、长兴岛岸线及长兴水道等重要通航水域的水深以及青草沙水源地安全等。

2 长江口航道工程治理(设计)思想

长江口已建航道治理工程包括北槽 12.5 m 深水航道治理、南槽一期航道治理、12.5 m 深水航道向上游延伸工程等，这些工程在前期工作阶段和实施过程中进行了大量的观测，试验研究和科研、设计、工艺的 工程验证，航道治理设计思想得以逐步完善。

1)深水航道的疏浚维护应在稳定的自然深泓中进行。通过整治建筑物稳定北槽进口及两侧边界，在北槽形成有一定宽度、上下贯通且与上下游深泓顺畅连接的稳定深泓，是确保航道轴线和水深稳定的基础。

2)整治建筑物采用宽间距双导堤加丁坝群的布置形式，坝头连线形成的导治线向海方向按一定放宽率均匀放宽。双导堤采用宽间距，便于设计顺直微弯的蜿蜒型中水河床以及较宽的河漫滩，以提供充足的泄洪和滞沙能力。向海放宽的导治线使纵向净输沙通量的梯度为正。导堤采用半潮堤形式，与整治后北槽潮波为驻波，最大流速出现在中潮位附近相适应。

3)航道治理在分汊河段的一支汉道上进行，

整治工程使该汉道的分流比减少，又可能引起该汉道萎缩。但工程开工以来，20 多年的河势观测表明北槽落潮流输沙优势未变，由于流域来沙趋势性下降，河槽稳定性逐步提高。

4)长江口泥沙运动形态与潮汐水流、盐淡水交汇和泥沙以黏性细颗粒为主有关。近底边界层水沙观测及分析显示在河口最大浑浊带高流速阶段的泥沙再悬浮为憩流阶段泥沙沉降提供了背景含沙量，憩流阶段黏性泥沙的絮凝及制约沉降以及高含沙量对紊动的抑制导致垂向泥沙密度层化和近底高浓度悬沙及浮泥生成。因此，整治工程总体设计要避免因水动力过高带来高背景含沙量和水动力过低带来过长的憩流历时，以减小近底高浓度悬沙和浮泥的生成规模。

5)河口由于盐、淡水交汇而出现纵向环流，使含沙量相对较高的近底水体向上游输运，上部含沙量较低的水体向下游输运，从而导致向陆的净输沙。在最大浑浊带还叠加了近底高浓度悬沙层在近底剪切流驱动下的运输。导治线设计要求挟沙水团在主槽内的停滞时间即“水龄”尽量缩短，以减少其对航道维护的不利影响。

6)长江口是由多个浅滩及深槽间隔出现的多级分汊巨型河口，各滩槽间存在动力、盐度、含沙浓度和层化/混合状态的差异。横向越滩流和主槽内的横向环流对泥沙输运和航道回淤具有十分重要的影响。越滩流和主槽横向环流强度与导堤的阻隔程度和断面形态(断面宽深比)有关，在一定的水沙条件下，存在某种有利于主槽内产生含沙量密度层化的断面宽深比。导治线及导堤断面设计应避免形成这种宽深比形态^[7]。

7)航道回淤是包括悬沙、底沙、浮泥等多种泥沙运动的综合结果^[8]，河口最大浑浊带近底高浓度悬沙层由于紊动抑制而保持成层的类推移质输运形态。近底高浓度悬沙层在自重作用下脱水形成浮泥，浮泥以“重力流”方式运移。在某些特定环境(例如半封闭水域)下，泥沙还可以以密度流(异重流)方式输运。此外，在南港下段及北槽上段航道，还存在非黏性泥沙的推移质输沙，

它们以沙尾延伸、活动沙包迁移以及层移等方式影响航道。整治工程的设计应对泥沙回淤物理过程进行分析,并通过建立数值模拟平台加以预测。

8)长江口口门及口门外的浅水区、潮流流速相对较低,但台风大浪侵袭引起黏性海床软化和海床液化,导致土体抗冲刷能力大幅下降和大面积的体积冲刷、近底高浓度悬沙层及浮泥生成^[9]、由此导致的航道骤淤是影响航道运营的重要不利因素。整治工程的平面布置应注意减轻台风骤淤的影响。为及时清除台风骤淤而开发的装仓吹抛、扰动驱赶和适航水深利用相结合的航道清淤工艺、利用三维泥沙模型以及 AI 技术,以及研发的航道回淤精准预报技术等,都证明是行之有效的措施。疏浚工艺改进的根本措施是疏浚土的资源化利用。疏浚土吹填横沙东滩,节约了建设维护成本,提升了东滩湿地质量,取得了明显的综合效益。

3 关于进一步贯彻生态优化、绿色发展方针的考虑

贯彻生态优先、绿色发展方针,除生物多样性调查和环境保护,以及守住生态红线外,针对长江口航道工程的环境特点和工程要求,还应考虑以下方面。

1)新河势背景下长江口淤泥质潮滩的泥沙收支和盐沼湿地生存时限的量化估计。关于长江口盐沼湿地扩展的时限性,以崇明东滩为例,并参考文献[5],可估计如下:现代长江口水下三角洲面积为 2 万 km²,每年因补偿相对海平面上升 10 mm/a 造成的面积损失需要有 2 亿 m³/a 的流域来沙沉积加以平衡。2003 年之前年输沙量大于 2.6 亿 m³,2003 年起则有不足,若无另外的泥沙补给来源,则湿地将逐年减损。水下三角洲前缘平均冲刷速率 70 mm/a,以岸滩坡度 1/400 计,潮间带将以 30 m/a 的速率冲刷后退,盐沼湿地后退到 1990 年即早期盐沼边界约仅需 20 a。即使存在水下三角洲前缘和潮滩下部冲刷泥沙的补给以及自重密实和植被根系固沙、植被消浪等因素作用,盐沼湿地后退速度会有所减缓,但对浅滩湿地的防护、疏浚土外抛而导致的水土资源流失应有足

够的重视。利用横沙浅滩容纳疏浚土是可行的,但应通过工程有效拦截上滩泥沙经大型串沟等输沙通道入海流失。

2)淤泥质潮滩生物稳定性效应。迄今长江口岸滩冲刷计算均未考虑潮滩的生物稳定性效应,包括植被的消浪滞流、根系的固沙作用、微生物的稳定作用,以及底栖生物对底床的稳定或减稳等。

①植被消浪、滞流、拦沙作用的量化估计。植被消浪国内外已有不少试验和数值模型研究成果^[10-11]。在海滩水深为 6 m,海草高度为 0.5 m、叶宽 1 cm、海草叶片密度为 50 片/m²等概化条件下, $H_0=3$ m 的来浪,按 Asanno 计算模型,传播距离 500 m 时波高将衰减殆尽。滞流的效应可通过流场数值模拟给出。

植被根系对岸滩侵蚀的影响还表现在改变土的物理力学特性上,主要是根土复合体在外界因素作用下发生变形时根土之间通过摩擦作用使应力重分布,限制了土体侧向变形,显著提高了复合体的抗剪、抗拉强度,即根系起到了加筋的作用。国内外已有若干根系加筋计算模型^[12],但未见有关根土复合体泥沙起动切应力的研究。

②有机质对黏性泥沙沉降和沉积特性的影响。例如有机质包裹泥沙,改变泥沙的絮凝特性,底栖生物(为贻贝、泥螺、泥蚬、牡蛎、蛤蜊等)排泄物对泥沙沉积率的影响等。

③淤泥质潮滩小型底栖生物对床面稳定性(抗剪、抗冲刷特性)的季节性影响,例如硅藻分泌的黏液包裹泥沙颗粒,使泥沙不易起动。硅藻在春季生长而在夏季消失,引起床面起动切应力的季节性变化。

④海岸一些大型动物的机械扰动,以及吞食硅藻、细菌等使海床稳定性下降。如钻穴活动和吃排泥沙等。

上述内容在长江口动力地貌研究中尚开展不多。

4 整治建筑物生态化

整治工程设计中护岸、护滩及导堤等结构的

生态化方面，南京以下 12.5 m 深水航道工程开展了大量试验和工程应用研究^[13]。长江口深水航道建设工程中研发的开孔半圆体结构以及传统的抛石基床有利于底栖和浮游动物、鱼蟹的生长繁育，在整治建筑物的整体布置上也尽量注意了减少对河口生态环境的不利影响。

5 结语

1) 长江口演变模式随着流域来沙减少和一系列治理开发工程实施而出现重大变化，主要表现在：①河口进入普遍冲刷，河槽容积和平均水深增加，拦门沙区段含沙量降低，分流比对河势稳定性影响的敏感性下降；②河口外边界出现泥沙的“源汇转换”，崇明东滩和横沙浅滩淤泥质潮滩上部(盐沼湿地)缓慢淤涨，中低潮滩冲刷后退，上部淤涨具有时限性；③河口在内部岛、岸边界和主流流路基本稳定的同时还存在不稳定因素。

2) 通过长江口整治工程实践提高了对回淤机理和治理(设计)思想的认识，主要包括：①平面上应形成顺直微弯并与上下游顺畅连接的稳定的自然泓泓；②潮汐余沙通量纵向梯度应 ≥ 0 以维持整治汉道的稳定；单宽输沙率沿程应均匀分布以减少横流输沙；③应注意减少由于咸淡水交汇引起的纵向环流的近底向陆净输沙；④应减少横向越滩流和滩槽间横向密度差斜压效应导致的横向环流的强度和垂向泥沙密度层化，削弱横向环流输沙；⑤流场设计应注意峰值流速对背景含沙量的影响和憩流历时对泥沙沉降的影响二者之间的平衡，削弱垂向泥沙密度层化、近底高浓度悬沙和浮泥层生成条件；⑥风浪引起沉积物抗剪强度和冲刷起动切应力下降以及液化，也导致近底高浓度泥沙和浮泥的生成以及航道骤淤，应通过工程措施减少台风波浪侵袭的不利影响和改进疏浚工艺，并充分重视疏浚土的资源化利用；⑦应在深入认识航道回淤机理的基础上完善方案比选的综合评价体系。

3) 航道建、管应深化对生态影响和生态修复的研究。结合工程特点，进一步开展河口开敞边

界泥沙收支及岸滩冲淤预测、扁担沙与主支汉道的互动关系和泥沙运动形态的分析。开展生物对海床稳定性影响的观测研究，以及深化整治建筑物结构生态化和总体布置的生态影响研究。

参考文献：

[1] 栾华龙.长江河口年代际冲淤演变预测模型的建立及应用[D].上海:华东师范大学,2017.

[2] 上海河口海岸科学研究中心.2019 年度长江口河势跟踪分析总报告[R].上海:上海河口海岸科学研究中心,2020.

[3] 中交上海航道勘察设计研究院.长江口北槽中下段及相邻水域水沙输移过程初步研究综合分析报告[R].上海:中交上海航道勘察设计研究院,2018.

[4] 刘红,何青,WELTJE G J,等.长江入海泥沙的交换和输移过程:兼论泥质区的“泥库”效应[J].地理学报,2011,66(3):291-304.

[5] YANG S L, LUO X X, TEMMERMAN S, et al. Role of delta-front erosion in sustaining salt marshes under sea-level rise and fluvial sediment decline[J].Limnology and oceanography, 2020(3):1990-2009.

[6] 金镠,楼飞.长江口深水航道分流比与汉道稳定性评估[J].水运工程,2021(2):53-57.

[7] 陈语.分汊河口横向环流及其格局转化研究[D].上海:华东师范大学,2020.

[8] 金镠.长江口深水航道回淤物理过程分析及减淤思路探讨[J].水道港口,2018,39(4):395-401.

[9] 金镠,虞志英,何青.淤泥质海岸波致液化及航道骤淤问题初步研究[J].水运工程,2018(12):104-109.

[10] KOBAYASHI N, RAICHE A W, ASANO T. Wave attenuation by vegetation[J]. Journal of waterway, port, coastal and ocean engineering, 1993, 119: 30-48.

[11] 曹海锦,冯卫兵.人工柔性植被场中波浪衰减特性研究[J].海洋工程,2014,32(3):36-44.

[12] 邓珊珊,夏军强,宗全利,等.下荆江典型河段芦苇根系特性及其对二元结构河岸稳定的影响[J].泥沙研究,2020,45(5):13-19.

[13] 吴澎,姜俊杰,曹凤帅.土工合成材料在水运工程中的应用技术进展[J].水运工程,2017(6):16-22.