

· 优秀论文二等奖 ·



创新设计、资源节约、环境友好和低碳发展的 长江口深水航道治理工程

周海^{1,2}, 季岚¹, 应铭¹

(1. 中交上海航道勘察设计研究院有限公司, 上海 200120;
2. 航道疏浚技术交通行业重点实验室, 上海 200120)

摘要: 介绍了长江口深水航道治理工程创新的治理理念、设计方案、施工技术和科学的动态管理方法, 同时还介绍了该工程在资源节约、环境友好及促进低碳发展方面采取的措施和取得的效果。

关键词: 长江口; 航道治理; 水工结构; 施工技术; 动态管理; 疏浚土有益利用

中图分类号: U 658.93

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2015)02-0044-09

Yangtze estuary deepwater channel improvement project in innovation design, resource saving, environment benefit and low-carbon development

ZHOU Hai^{1,2}, JI Lan¹, YING Ming¹

(1. Shanghai Waterway Engineering Design and Consulting Co., Ltd., Shanghai 200120, China;

2. Key Laboratory of Waterway Dredging Technology, Ministry of Transport, PRC, Shanghai 200120, China)

Abstract: The Yangtze estuary deepwater channel improvement project is an unprecedented, large-scale and extremely-complicated regulation project. The paper introduces the innovative regulation philosophy, structures, construction technology and scientific dynamic management during the research, design and construction process of the project. Meanwhile, the project has some achievements on the aspects of resource saving, environment benefit and low carbon development.

Keywords: Yangtze estuary; channel regulation; hydraulic structure; construction technology, dynamic management; beneficial use of dredged material

1 工程概况

为打通长期制约上海港和长江沿岸港口发展的长江口拦门沙航道水深瓶颈, 适应和促进长江三角洲乃至整个长江流域地区经济的快速发展, 历经几十年研究的长江口深水航道治理工程于1998年1月正式开工, 2010年3月完工, 2011年5月通过国家竣工验收。期间, 通过一、二、三期工程的分期建设, 实现了航道水深由7.0 m逐步加深到8.5 m, 10.0 m和12.5 m的治理目标, 5万吨级以上船舶从几乎无法进出长江口到平均每天达12艘次以上, 至2010年底已产生的直接经济效

益为837.6亿元, 是工程总投资的5倍多。

长江口深水航道治理工程位于南港北槽水域, 由整治建筑物工程(含分流口, 南、北导堤, 丁坝群等)和疏浚工程组成(图1)。在13 a的建设过程中, 共建造导堤、丁坝等整治建筑物约170 km, 完成基建疏浚土方约3.2亿m³。本工程具有水流和泥沙运动复杂、河床冲淤多变、地基承载力低及工况条件差等特点, 自然条件的复杂程度和工程的治理难度史无前例。为此, 创新的治理理念、创新的设计方案、创新的施工技术以及科学的动态管理为工程的成功启动、顺利实施

收稿日期: 2012-09-27

作者简介: 周海(1957—), 男, 博士, 教授级高级工程师, 主要从事河口航道整治方面研究。

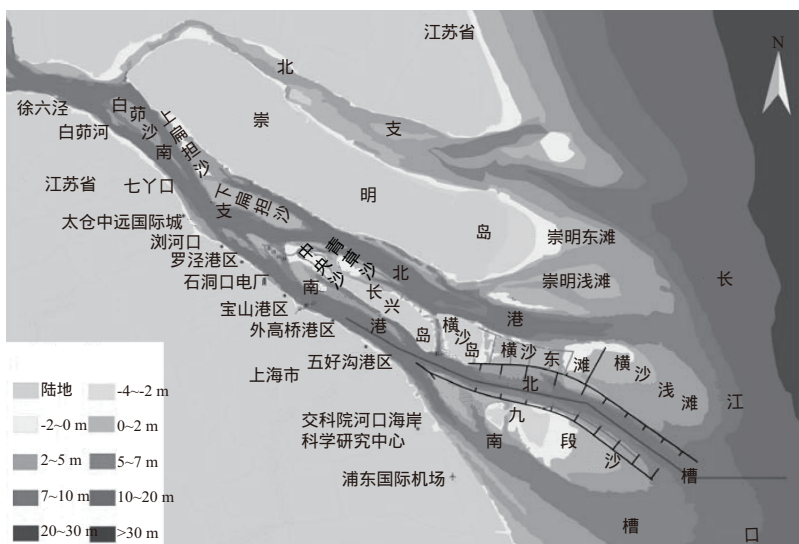


图1 长江口深水航道治理工程总平面布置

和高效完成提供了强有力的支持和保障。

长江口深水航道治理工程所在的水域水运、水利、环境、生态、渔业、国土资源等多功能交叉,北有横沙东滩促淤圈围工程区,南为九段沙国家级湿地保护区,自身为大型船舶进出长江口的唯一通道。在工程的实施过程中,利用深水航道疏浚土作为横沙东滩圈围区的吹填土,既解决了吹填土资源不足的问题,又实现了疏浚土资源的综合有益利用,达到互利共赢。在工程的建设过程中,制定了详细的环境监测制度,组织开展了科学的增殖放流,落实了相关环境保护措施,对长江口生态环境的有效保护起到了积极的作用。航道的逐步加深,提高了航道的通过能力,改善了船舶安全航行的条件,提升了大型船舶的营运水平,在各种运输方式中能源消耗量最小的水运得到长足发展。因此,长江口深水航道治理工程还是一个资源节约型、环境友好型和有利于低碳发展的工程。

2 创新设计

2.1 创新的治理理念和总平面设计

“茫茫无边的江面,冲淤不定的沙洲,动荡变化的河势”是长江口真实而形象的写照^[1]。长江口是巨型丰水多沙的分汊河口,治理工程前,北槽为长江口的通海主航道,依靠疏浚,按7.0 m(理论最低潮面下)的水深标准进行常年维护,年维护疏浚量约1 200万m³,仅可满足2万吨级船

舶乘潮双向通航的要求,5万吨级船舶几乎无法进出长江口。

为了解决长江口航道治理的关键技术问题,在几十年科学研究的基础上,1992年“长江口拦门沙航道演变规律研究(整治技术研究)”列入了国家“八五”科技攻关计划。攻关研究认为^[2]:1)经过长期治理和围垦,长江口已基本形成稳定的边界条件,三级分汊、四口入海的基本格局将长期稳定;2)上游河段河势的变化对北槽的影响较北港和南槽明显为小,在3条主要入海汊道中,北槽的河势稳定性最好;3)可以在上游河段(主要是南支河段)整治工程暂未稳定之前选择南港北槽先期进行拦门沙河段治理。其中第3)点突破了传统的自上而下的治河理念,该创新性论断使得我国得以在20世纪的技术经济条件下决策实施深水航道治理工程^[3]。

此外,攻关研究中提出的整治技术方案充分考虑了长江口多级分汊、径流和潮量巨大,且主要汊道落潮流明显占优势的特点,创新地提出了稳定南北槽分流口、采用中水位整治,以宽间距双导堤加长丁坝群稳定北槽南北边界,发挥“导流、挡沙、减淤”功能的整治建筑物总平面方案(图1),以调整北槽流场,利用落潮流挟沙入海,减少航道回淤量,辅以疏浚,形成深水航道。工程的前期研究,特别是通过“八五”攻关,解决了长江口拦门沙能否治理和总体上如何治理这一重大关键技术问题^[2]。

在工程的建设过程中,根据河床地形的变化情况以及航道回淤情况,对前期提出的总平面方案进行过几次动态调整,特别是三期工程减淤工程措施研究进一步丰富了对北槽拦门沙河段治理的认识:1)在河口地区可利用丁坝群有效地调整水流动力的断面分布和沿程分布,进而将河床地形由宽浅向窄深方向调整,形成有利于航道建设和维护的动力条件和地形条件;2)河口汉道的分流比变化与其河槽总容积有关,整治时更应关注治导线尤其是航槽附近一定范围内的河槽容积和潮流量变化;3)对于以悬沙落淤为主的北槽拦门沙航道,应重点关注涨落潮动力的沿程变化及其对悬沙落淤和起悬的影响。

上述创新的治理理念和总平面设计保证了工程治理效果的取得和治理目标的实现。

2.2 创新的结构形式和工程设计

长江口拟建整治建筑物处的河床滩面普遍分布着1~6 m厚的粉细砂层,极易起动和冲失。为确保整治建筑物的稳定,有效控制工程量和造价,在工程中成功开发和应用了2种创新的护底软体排及其组合形式:混凝土连锁块软体排和砂肋软体排,见图2。这些既能有效控制建筑物周边河床冲

刷、又能适应周边地形变化的保砂透水的护底结构成为工程成功建设的关键技术措施之一,同时作为实用新型专利得到推广使用。

为适应软基、大浪、工程量巨大、施工强度高、石料来源匮乏等特点,本工程采用了一批创新的整治建筑物的堤身结构,主要有:

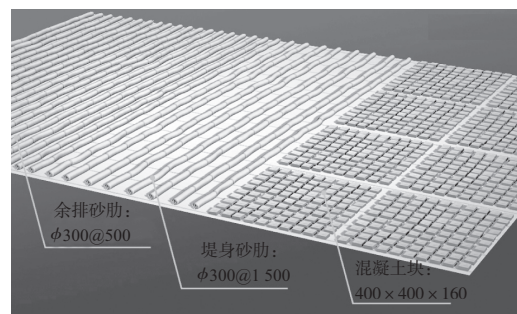


图2 护底软体排结构(单位:mm)

1)袋装沙堤心斜坡堤结构(图3),可就近取用长江口河床底部的粉细沙作为筑堤材料,共有约38.1 km的堤段采用了此结构。“土工织物充填砂袋”已获得实用新型专利。

2)新型半圆体结构,在日本相关结构技术的基础上自主开发了充砂半圆体结构(图4)和半圆体沉箱结构(图5),共有约51.4 km的堤段采用了此类结构。

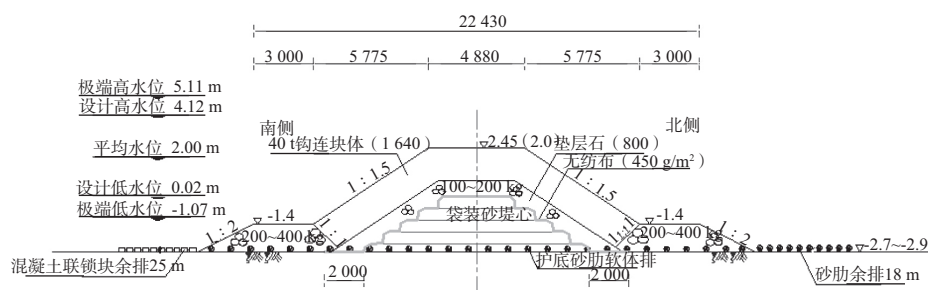


图3 袋装砂斜坡堤典型断面

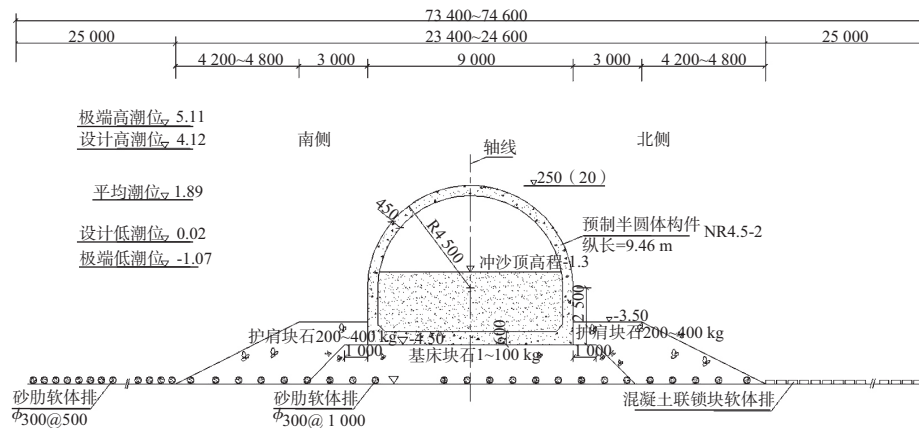


图4 充砂半圆体结构典型断面

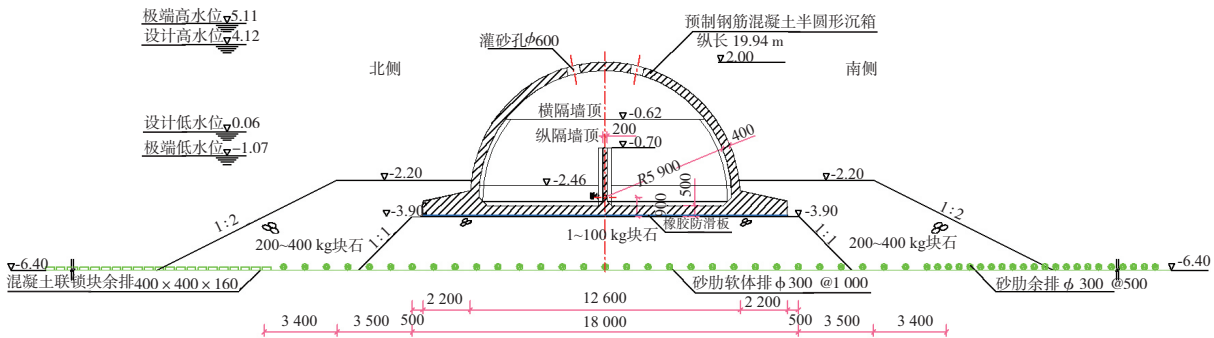


图5 半圆体沉箱结构典型断面

3) 新型空心方块斜坡堤结构(图6),主要用于地基条件最恶劣的北导堤堤头约2.6 km区段。“空心方块斜坡式防坡堤”已获得实用新型专利。

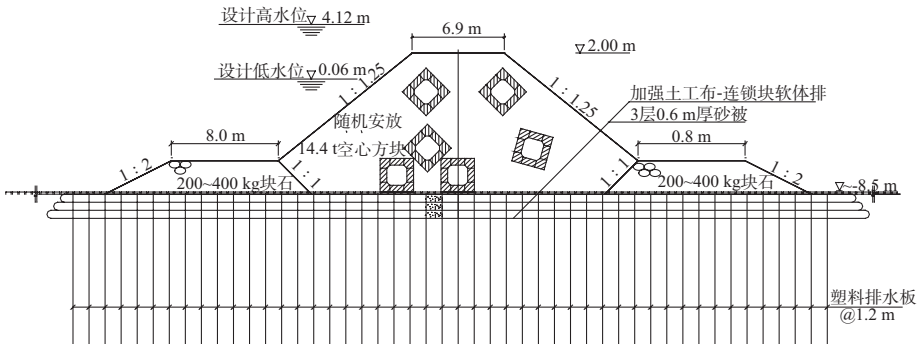


图6 空心方块斜坡堤典型断面

采用上述3种新型结构的堤坝总长约92.1 km,占整治建筑物总长一半以上。新型结构形式的研究及应用对于长江口深水航道治理工程的成功起到了至关重要的作用^[2]。

2.3 创新的专用施工设备和施工技术

本工程位于长江口北槽水域,距岸约50 km,现场作业既无陆基依托,又受大风大浪的影响,

同时施工强度极高。为此,开发了一套创新的专用施工设备和施工工艺、技术,主要有:

1) 长江口大范围长基线GPS控制网(图7),实现了实时、动态、高精度(±5~5 cm以内)平面控制,解决了在长江口开阔水域平面定位测控的关键技术。

2) 大型软体排加工铺设成套施工工艺与专用

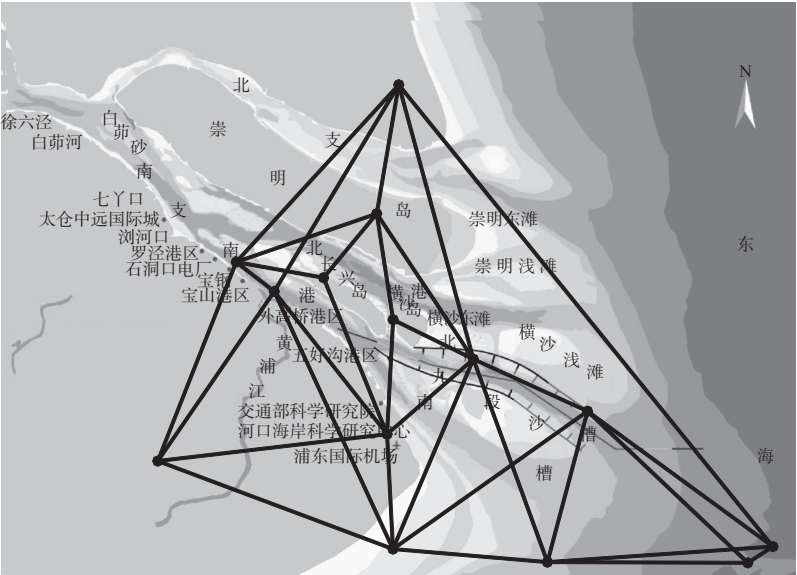


图7 GPS控制网布置

设备的开发(图8),大大提高了作业效率,单船日作业效率达到平均 $5\,000\text{ m}^2/(\text{艘}\cdot\text{日})$,最高实际铺排效率达 $10\,131\text{ m}^2/(\text{艘}\cdot\text{日})$,且全部软体排铺设分项工程的优良率高达100%,有效地保障了工程的顺利进展。



图8 专用软体排铺设船正在铺设混凝土联锁块软体排

3) 袋装砂堤心成形及砂被铺设、空心方块斜坡堤施工、水上抛石、基床抛石整平、半圆型沉箱安装和海上塑料排水板打设等都设计制造了相关的专用船机设备,采用了创新的施工工艺和技术,大大提高了施工效率,保证了工程质量。



图9 半圆型沉箱安装船“安定1号”

创新的大型专用作业船及施工工艺的成功开发和全面应用,解决了在长江口恶劣的自然条件下,安全、优质、快速施工的技术难题,全部水上作业实现了机械化、半自动化和智能化施工,创造了月均全断面建成堤坝 $2\,300\text{ m}$ 的高速度,在我国水运工程建设史上创下了一大批施工新纪录^[2]。

2.4 科学的河势监测和动态管理

长江口河势演变十分复杂,要在事先就完全

把握住在整治建筑物作用下河势的调整过程及结果是十分困难的,必须以动态的观点、科学的机制不断优化,使实施整治工程后的流场及河床冲淤调整向最有利于航槽水深增加的方向发展,确保航槽水深分期达到目标水深,疏浚量在预控的范围内。为此,长江口深水航道治理工程建立了严密的监测体系(制定了常态和突发问题的监测范围、内容、频度等)、科研体系(综合了二维三维潮流数模、泥沙数模、定床物模、动床物模、水槽试验和试验性工程等科研成果),使工程的决策在动态优化的科学机制(图10)下更趋完善、合理^[4]。一、二、三期工程总平面布置的调整和优化就是进行工程动态管理的实例。

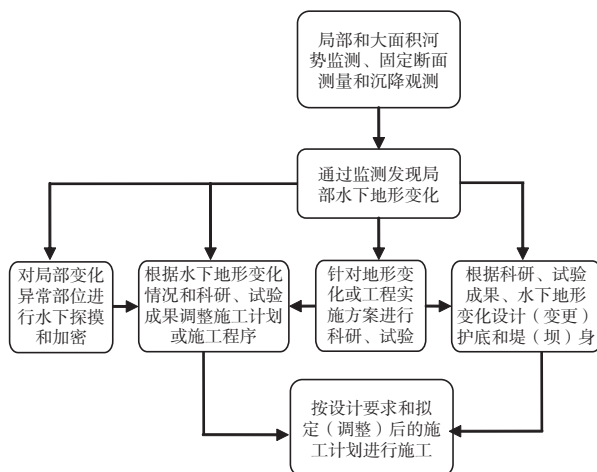


图10 动态管理基本程序

对工程实施动态管理,是在承认对自然规律尚不能做到事先全面准确把握的前提下,不断地以实践来检验并完善和优化设计施工方案的过程。正是由于坚持实施了科学的动态管理,才得以不断地、及时地解决了工程中出现的一系列重大关键技术问题,取得了治理工程的最终成功。

3 资源节约

按照国务院“一次规划,分期建设,分期见效”的要求,长江口深水航道治理工程分3期实施。一期工程航道实现 8.5 m 水深,航道底宽 300 m ,航道总长 51.8 km ,完成基建疏浚量 $4\,386\text{万 m}^3$;二期工程航道水深增至 10 m ,航道底宽 $350\sim 400\text{ m}$,航道

总长74.5 km,完成基建疏浚量5 921万m³;三期工程进一步加深至12.5 m,航道底宽350~400 m,航道总长92.2 km,完成基建疏浚量21 849万m³。一期工程因多方因素未实施吹泥上滩工程,二期工

程中约27%的疏浚土进行了吹填促淤,三期工程中吹泥上滩的比例进一步增加到约40%,共有近亿方长江口疏浚土已吹填至横沙东滩,成为横沙东滩造地成陆的重要资源(图11)。

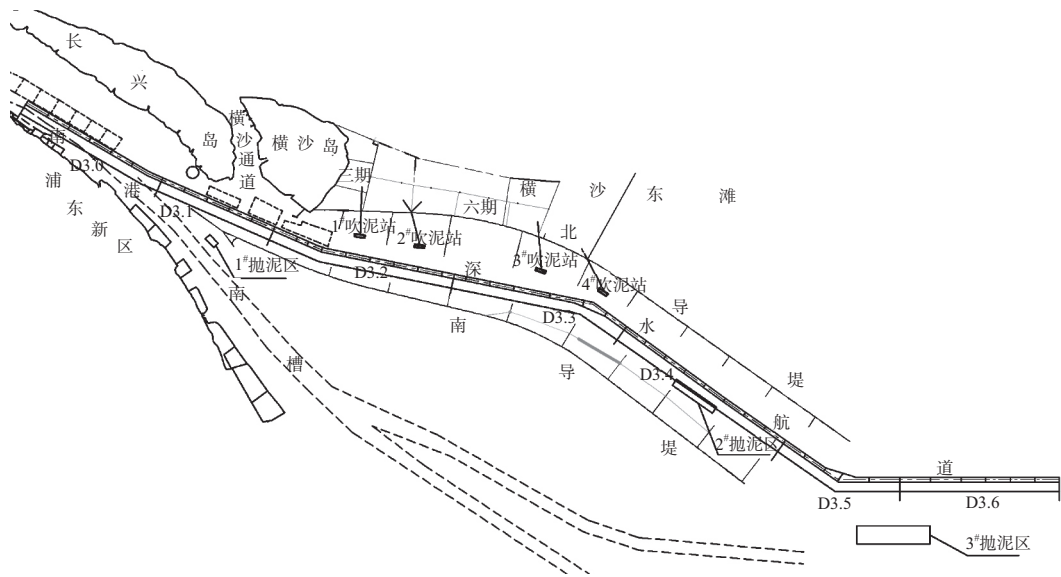


图11 长江口深水航道治理工程疏浚工程平面布置

疏浚土已不再是废弃物,而是一种可利用的资源,其价值正日益受到重视。2011年初完工的横沙三期吹填工程中疏浚土上滩量占吹填土总量50%以上。即将开工的横沙六期吹填工程也计划大幅利用长江口疏浚土,疏浚土上滩量占吹填土总量的比例有望提高到约75%。今后,长江口疏浚土还可利用于周边其它区域,如南汇东滩、崇明北滩等地的促淤圈围工程中,疏浚土的应用范围和应用比例将进一步增大。吹填工程与疏浚工程的有机结合,不仅解决了吹填土源问题,缓解了疏浚土外抛造成的资源浪费、环境污染等问题,且两类工程的综合投资最为节省,综合经济效益和社会效益最优,是节约资源,值得大力提倡的做法。

在流域来沙趋于减少、泥沙日益成为宝贵资源的大背景下,有益利用长江口深水航道疏浚土吹填造地,既符合创建“资源节约型、环境友好型社会”的国策,也为上海这样寸土寸金的国际化大都市扩大了发展空间,增加了土地供应。

4 环境友好

环境保护工作作为长江口深水航道治理工程建设的有机组成部分,一直受到高度重视。在工程建设期间,对长江口水质、沉积物、水生生物、渔业资源等进行了定期监测,对疏浚物临时海洋倾倒区和吹泥区及附近海域进行了动态监测,同时还在水环境保护、生态环境保护等方面采取了一系列的措施。

水环境保护方面的具体措施主要有:1)参加本工程的大中型施工船舶均安装油水分离器和垃圾粪便处理装置,严格按照“国际防止船舶污染海洋公约(MAPROL 73/78 公约)”中有关规定处理,而且大型船舶都具备《国际防止油污证书》。2)防止船舶超载,实施报港制度。加强对运输船只的管理,要求运送砂石的船只不得装载过满,同时要覆盖,减少砂石散落到水体的量。3)精选船机设备良好的疏浚船舶进行航道浚深作业,采用底部溢流,并严格控制溢流时间。4)防止疏浚土输送过程中的泄漏,并严格控制抛泥到位,限定抽舱地点。

生态环境保护方面的具体措施主要有：1) 合理安排施工进度，尽量避开鱼类繁殖期和休渔期，减少对鱼类和珍稀水生动物的影响。2) 加强对滩涂附近工程的管理，严格控制施工作业范围和作业时间，不伤害在滩涂栖息的鸟类。3) 积极实施生态修复，投放包括中华鲟幼鱼、底栖生物群落、中华绒螯蟹成蟹、长江口区域优势鱼种等在内的长江口特有品种水生生物。

工程建设期间的相关监测情况表明^[5]：1) 工程海域的水质环境质量变化不大，工程施工未给附近的生态敏感区造成明显的生态威胁。2) 整个工程海域表层沉积物质量总体状况良好，工程对长江口水域的沉积物未造成污染。3) 中华鲟增殖放流效果明显，利用丁坝和导堤建立的人工牡蛎礁初见成效，成为许多重要经济水生动物的栖息生境，并发挥了“人工鱼礁”的重要生态功能（图12）。4) 中华绒螯蟹和河口鱼类人工增殖取得成功，增长了相应的种群数量，并带来可观的直接经济效益。

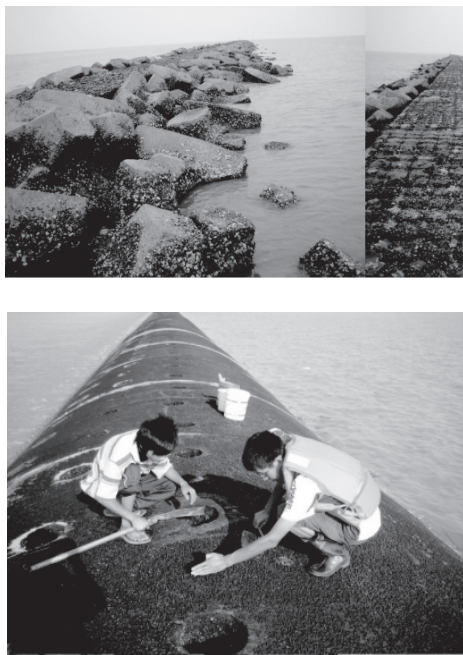


图12 利用丁坝和导堤建立的人工牡蛎礁

长江口深水航道治理工程严格按照国家有关法律法规执行环境影响评价制度，建立了系统的

环境保护管理体系，制订了严密详细的环境监测制度，组织落实相关环境保护措施，总体上做到了工程基本不产生负面影响。作为本工程生态保护措施的河口生态修复和生态补偿机制，促进了人与自然的和谐。渔业放流生态补偿工程对改善河口生态系统，加快恢复长江渔业资源和长江水生生物多样性具有重要意义。用导堤和丁坝混凝土模块作为硬底物，首次于国际上结合河口海岸大型工程建设构建了我国第一人工牡蛎礁系统，导堤人工牡蛎礁的形成，已成为多种重要经济水生动物的栖息与摄食场所，同时具备了一定的水质净化功能，对长江口的生态健康有一定的促进作用^[2]。

5 低碳发展

长江口航道水深从7 m增深到12.5 m，大大提高了大型船舶的通过能力，改善了航道通航条件，货物运输时间节约，运输成本大幅降低，船舶营运水平显著提高，极大地释放了长江口航道的运输潜能，促进了沿江地区经济社会的快速发展，产生了巨大的经济和社会效益，有力地促进了绿色水运的发展。

治理工程实施后，5万吨级以上船舶从几乎无法进出长江口到平均每天达12艘次以上；10 m以上吃水船舶从平均不到1艘次/d增加到近30艘次/d（图13）；船舶平均每航次可多载50%~110%；至2010年底已产生的直接经济效益为837.6亿元，是工程总投资的5倍多。

与其它运输方式比较，水运具有投资效率高、能耗少、占地少、成本低、运能大、污染轻等比较优势。运载相同质量的大宗货物，各种运输方式的能源消耗量的比较情况为：水运最低，铁路次之，汽车及航空最高。在面临资源和环境双重压力的情况下，实施长江口深水航道治理工程，加快发展长江航运，能够有效降低能源消耗、降低运输成本、满足环保要求，对促进经济

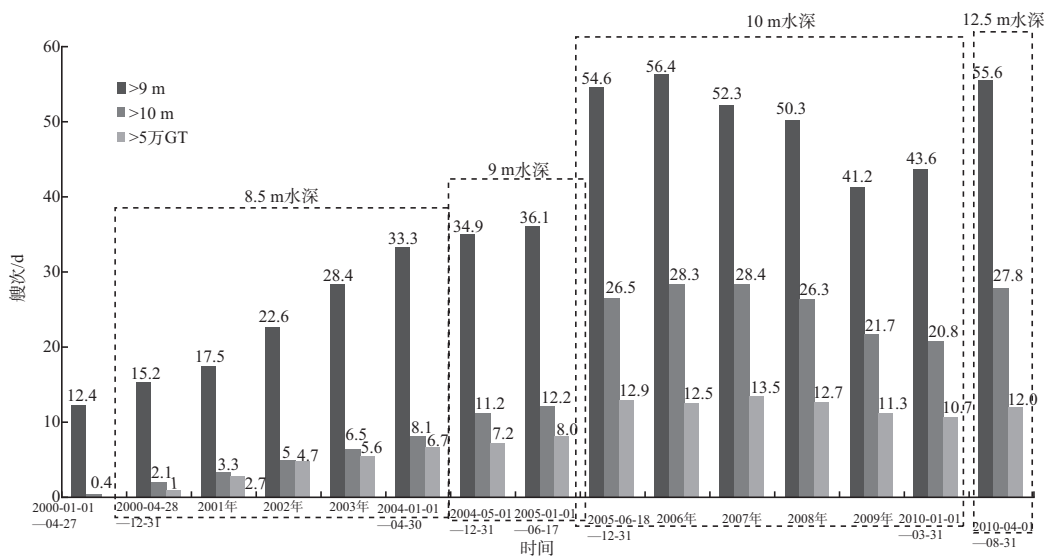


图13 长江口深水航道通航船舶统计

发展方式转变，建设资源节约型、环境友好型社会具有重要的现实意义。

长江口深水航道治理工程在两个层次上推动了节能减排和绿色经济发展^[2]。首先，长江口深水航道的增深，缩短了大型船舶航次周期，提高了单船的平均载质量、装载率和运输量，节约了运输费、中转费，减少了中转损失，大大促进了通过长江口水运货运量的增长。据统计，2000年以来，长江口深水航道治理工程累计受益船舶的增运量散货船为32 217万t，集装箱为42 519万t，油船为1 173万t。大量货物通过能耗最少的水运运输，对节能减排和绿色经济的促进是显而易见的。

其次，业界普遍认同，大型船舶是环保营运的模式之一，在经济规模效应下，每标箱货物消耗燃料量必然降低。早在20 a前，已有人研究分析2艘4 000 TEU型集装箱船和1艘8 000 TEU型集装箱船营运成本的差别，而现时若以2艘8000 TEU型集装箱船与1艘1.6万TEU型集装箱船作比较，后者资金成本将减少20%，燃料成本则减少40%。对于船舶能效设计指数（EEDI）而言，它是以二氧化碳排放量和货运能力的比值来表征船舶的能效。7.5万吨级油轮的EEDI为4.56左右，而30万吨级油轮的EEDI降到2.54左右，可见船舶大型化大大降

低单位运能的二氧化碳排放，符合低碳经济的要求。长江口深水航道的不断增深，有力地推动了船舶的大型化，在推动水运发展的同时，进一步降低了能耗，推动了节能减排和绿色经济发展。

6 结语

在创新治理理念的引领下，通过创新的设计方案、创新的施工技术和科学的动态管理，历经13 a的建设，长江口深水航道治理工程实现了预定的建设目标，在巨型河口航道治理研究及工程实践方面积累了丰富的经验和成套的技术。长江口深水航道治理工程“是我国河口治理和水运事业的伟大创举，是世界上巨型复杂河口航道治理的成功范例”，带动了国内水运工程全行业及其他相关工程领域的技术进步。

长江口深水航道治理工程的直接经济效益显著，并附带产生了多方面的综合社会效益。工程建设中，结合水利和城市规划，已部分利用航道疏浚土资源吹填造地，初步实现了航道和水土资源的综合开发利用；利用整治建筑物形成人工牡蛎礁，不仅净化了水质，还为水生动物创造了新的栖息生境；随着大型船舶数量的增加及船舶载质量的增长，能耗最少的水运运输得到大力

发展,推动了节能减排和绿色经济发展。因此,长江口深水航道治理工程还是资源节约、环境优化、低碳发展方面的示范性工程。

参考文献:

- [1] 上海航道局. 长江口深水航道治理工程成套技术—长江口深水航道治理工程总体治理方案的研究[R]. 上海: 上海航道局, 2006.
- [2] 长江口航道管理局. 长江口深水航道治理工程项目自我总结评价报告[R]. 上海: 长江口航道管理局, 2011.
- [3] 乐嘉钻, 周海, 郭豫鹏. 长江口深水航道治理工程前期研究工作综述和总体治理方案的确定[J]. 水运工程, 2006(12): 1-9.
- [4] 阮伟, 季岚. 整治与疏浚相结合的航道治理特色[J]. 水运工程, 2006(1): 47-52.
- [5] 环境保护部环境工程评估中心. 长江口深水航道治理工程三期工程竣工环境保护验收调查报告[R]. 北京: 环境保护部环境工程评估中心, 2011.

(本文编辑 武亚庆)

《水运工程》优秀论文评选

评委点评:

该论文提出稳定南北槽分流口、采用中水位整治,以宽间距双导流堤加长丁坝群稳定北槽南北边界,发挥“导流、挡沙、减淤”功能的总平面方案。通过护底软体排及组合,创建了即控制冲刷又保砂透水的护底结构。开发了长基线GPS控制网、大型软排加工铺设施工工艺与施工设备。建立科学的河势监测和动态管理。充分利用疏浚土,做到资源节约、生态恢复和环境友好。

通过创新的设计方案、创新的施工技术和科学的动态管理,实现了预期的建设目标。长江口深水航道治理工程是我国河口治理和水运事业的伟大创举,是世界上巨型复杂河口航道治理的成功范例,带动了中国水运工程全行业及其他相关工程领域的技术进步!

文立

2014年12月

评委简历:



文立,教授级高工,现任大连港集团副总工程师兼任大连港口建设监理有限公司总工程师。

先后主持和参加了多项国家重点工程和十几项基本建设、技术改造工程。承担工程分别获鲁班奖、中国土木工程(詹天佑)大奖。获国家科技进步二等奖一项,获省部级科技进步奖多项。享受国务院特殊津贴、辽宁省首批科技领军人才、优秀专家。