



“十二五”国家重点图书出版规划项目
长江黄金水道建设关键技术丛书

WATERWAY SEDIMENTATION MECHANISMS AND
NEAR-BOTTOM WATER AND
SEDIMENT MONITORING TECHNIQUES
IN THE YANGTZE ESTUARY

长江口航道淤积机理及 近底水沙监测技术

戚定满 顾峰峰 王元叶 著



人民交通出版社股份有限公司
China Communications Press Co., Ltd.



“十二五”国家重点图书出版规划项目
长江黄金水道建设关键技术丛书

长江口航道淤积机理 及近底水沙监测技术

戚定满 顾峰峰 王元叶 著



人民交通出版社股份有限公司
China Communications Press Co., Ltd.

内 容 提 要

本书依托长江口深水航道整治工程,采用资料分析、近底水沙观测、数值模拟等研究手段,针对长江高浊度河段航道淤积机理及水沙监测技术等关键技术问题开展了深入、广泛的探索和研究。书中系统介绍了长江口高浊度河段大量的实测水沙基础资料和资料数据的分析处理方法、近底水沙监测的技术和方法、三维悬沙数值模拟技术和方法,并记述了相关研究成果在长江口航道近底层泥沙输运及回淤影响因素等研究分析中的应用实例。

本书可作为河口海岸工程、航道工程治理技术人员的参考书,也可供相关专业院校的师生学习参考。

Abstract

Based on deep waterway regulation engineering in the Yangtze Estuary, taking data analysis, near-bottom water and sediment observation and numerical simulation as research methods, this book profoundly explores and researches key techniques as waterway sedimentation mechanism and water and sediment monitoring techniques of the Yangtze River reaches with high turbidity, that is, it systematically introduces massive measured basic water and sediment data and their analysis and processing methods, near-bottom water and sediment monitoring techniques, numerical simulation of three-dimensional suspended sediment in high turbidity reaches of the Yangtze Estuary, it also records and narrates applications using related achievements in near-bottom sediment transport in the Yangtze Estuary and sedimentation influencing factors analysis.

Thanks to the sturdy researches and available achievements, this book can serve as reference for estuary, coast and waterway engineering technicians, as well as teachers and students of related specialties in colleges and universities.

图书在版编目(CIP)数据

长江口航道淤积机理及近底水沙监测技术 / 戚定满, 顾峰峰, 王元叶著. —北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2015.12

(长江黄金水道建设关键技术丛书)

ISBN 978-7-114-12567-6

I. ①长… II. ①戚… ②顾… ③王… III. ①长江口-淤积 ②长江口-含沙水流-监测 IV. ①TV882.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 255424 号

长江黄金水道建设关键技术丛书

书 名: 长江口航道淤积机理及近底水沙监测技术

著 者: 戚定满 顾峰峰 王元叶

责任编辑: 韩亚楠 丁润铎

出版发行: 人民交通出版社股份有限公司

地 址: (100011) 北京市朝阳区安定门外外馆斜街3号

网 址: <http://www.ccpres.com.cn>

销售电话: (010) 59757973

总 经 销: 人民交通出版社股份有限公司发行部

经 销: 各地新华书店

印 刷: 北京盛通印刷股份有限公司

开 本: 787×1092 1/16

印 张: 14.25

字 数: 320 千

版 次: 2015 年 12 月 第 1 版

印 次: 2015 年 12 月 第 1 次印刷

书 号: ISBN 978-7-114-12567-6

定 价: 45.00 元

(有印刷、装订质量问题的图书由本公司负责调换)

《长江黄金水道建设关键技术丛书》

审定委员会

主 任 赵冲久

副主任 胡春宏

委 员 (按姓氏笔画排列)

王义刚	王前进	王 晋	仇伯强	田俊峰	朱汝明
严新平	李悟洲	杨大鸣	张 鸿	周冠伦	费维军
姚育胜	袁其军	耿 红	蒋 千	窦希萍	裴建军

《长江黄金水道建设关键技术丛书》

主要编写单位

交通运输部长江航务管理局
交通运输部水运科学研究院
南京水利科学研究院
交通运输部长江口航道管理局
交通运输部天津水运工程科学研究院
中交第二航务工程勘察设计院有限公司
武汉理工大学
重庆交通大学
长江航道局
长江三峡通航管理局
长江航运信息中心
上海河口海岸科学研究中心

《长江黄金水道建设关键技术丛书》

编写协调组

组 长 杨大鸣（交通运输部长江航务管理局）
成 员 高惠君（交通运输部水运科学研究院）
裴建军（交通运输部长江航务管理局）
丁润铎（人民交通出版社股份有限公司）

序

(为《长江黄金水道建设关键技术丛书》而作)

河流，是人类文明之源；交通，推动了人类不同文明的碰撞与交融，是经济社会发展的重要基础。交通与河流密切联系、相伴而生。在古老广袤的中华大地上，长江作为我国第一大河流，与黄河共同孕育了灿烂的华夏文明。自古以来，长江就是我国主要的运输大动脉，素有“黄金水道”之称。水路运输在五大运输方式中，因成本低、能耗少、污染小而具有明显的优势。发展长江航运及内河运输符合我国建设资源节约型、环境友好型社会以及可持续发展战略的要求。目前，长江干线货运量约 20 亿 t，位居世界内河第一，分别为美国密西西比河和欧洲莱茵河的 4 倍和 10 倍。在全面深化改革的关键期，作为国家重大战略，我国提出“依托长江黄金水道，建设长江经济带”，长江黄金水道又将被赋予新的更高使命。长江经济带覆盖 11 个省(市)，面积 205.1 万 km²，约占国土面积的 21.4%。相信长江经济带的建设将为“黄金水道”带来新的发展机遇，进一步推动我国水运事业的快速发展，也将为中国经济的可持续发展提供重要的支撑。

经过 60 余年的努力奋斗，我国的内河航运不断发展，内河航道通航总里程达到 12.63 万 km，航道治理和基础设施建设不断加强，航道等级不断提高，在我国的经济社会发展中发挥了不可估量的作用。长江口深水航道工程的建成和应用，标志着我国水运科学技术水平跻身国际先进行列。目前正在开展的长江南京以下 12.5m 深水航道工程的建设，积累了更多的先进技术和经验。因此，建设长江黄金水道具有先进的技术积累和充足的实践经验。

《长江黄金水道建设关键技术丛书》围绕“增强长江运能”这一主题，从前期规划、通航标准、基础研究、航道治理、枢纽通航，到码头建设、船型标准、安全保障与应急监管、信息服务、生态航道等方面，对各项技术进行了系统的总结与著述，既有扎实的理论基础，又有具体工程应用案例，内容十分丰富。这套丛书是行业内集体智慧之力作，直接参与编写的研究人员近 200 位，所依托课题中的科研人员超过 1 000 位，参与人员之多，创我国水运行业图书之最。长江黄金水道的建设是世界级工程，丛书涉及的多项技术属世界首创，技术成果总体处于国际先进水平，其中部分成果处于国际领先水平。原创性、知识性

和可读性强为本套丛书的突出特点。

该套丛书系统总结了长江黄金水道建设的关键技术和重要经验，相信该丛书的出版，必将促进水运科学领域的学术交流和技術传播，保障我国水路运输事业的快速发展，也可为世界水运工程提供可资借鉴的重要经验。因此，《长江黄金水道建设关键技术丛书》所总结的是我国现代水运工程关键技术中的重大成就，所体现的是世界当代水运工程建设的先进文明。

是为序。

南京水利科学研究所所长
中国工程院院士
英国皇家工程院外籍院士



2015年11月15日

长江口深水航道治理工程是我国水运建设事业的伟大壮举。“治理长江口，打通拦门沙”，充分发挥长江黄金水道优势，是伟大革命先行者孙中山先生的治国理想，也是几代科技工作者、仁人志士长达 50 多年孜孜以求的抱负和夙愿。2010 年 3 月 14 日，作为国家“十一五”期重点工程，长江口深水航道治理三期工程正式交工验收。长江口实现了 12.5m 深水航道全槽贯通并开始试验通航。这项历时 12 年、几代领导人均十分关注的世界级大型河口整治工程将全面发挥其整体效益，成为长三角地区经济发展及经济带形成的助推器。但是长江口航道由于同时受到流域来沙和本地滩涂泥沙的不断补给和海域涨潮流输沙的影响，宽阔的河口区域水体含沙量通常较大，形成较为明显的泥沙浓度高于上下游区域的浑浊带，使得河口航道淤积明显，并呈现较为明显的中段“集中”特征，需常年疏浚维护。航道淤积问题是长江口深水航道维护乃至长江口沿岸经济发展的瓶颈性问题。针对长江口航道回淤泥沙以悬移质泥沙占主体，最大浑浊带含沙量高、泥沙粒径细和垂线分布随潮汐动力变化极不均匀、底部出现几十倍于垂线平均值的高浓度特点，开展长江口航道淤积机理及近底水沙监测技术研究具有十分重要的意义。

本书主要内容依托于长江口深水航道整治工程，采用资料分析、近底水沙观测、数值模拟等研究手段开展长江口航道淤积机理及近底水沙特性研究。书中系统介绍了长江口大量的近底水沙观测基础资料和资料数据的分析处理方法、近底水沙特性、长江口三维水沙盐数学模型及其长江口航道淤积机理研究成果。

本书各章节编写分工如下：前言、第 1 章、第 2 章由戚定满编写，第 3 章～第 6 章由王元叶编写，第 7 章～第 10 章由顾峰峰编写，第 11 章由戚定满编写。本书的编写得到交通运输部西部项目管理中心的关心和帮助，得到了长江航道局的大力支持和协助，同时也得到行业内有关专家的热情帮助与指导，在

此谨向各级领导和专家表示衷心感谢！

本书列举了长江口航道治理工程阶段大量、翔实的实测资料，提供了长江口航道治理工程研究的实例，书中内容科研扎实、成果可靠，可作为河口海岸航道工程治理技术人员的参考书。热忱欢迎专家学者和读者对本书的缺点、不足甚至错误提出宝贵的指正意见。

作 者

2015 年 8 月

1	概述	1
1.1	长江口航道淤积问题提出	1
1.2	长江口近底水沙监测技术研究现状	2
1.3	长江航道淤积机理研究现状	3
2	长江口深水航道治理工程介绍	8
2.1	长江口深水航道工程建设情况	8
2.2	长江口深水航道工程地形调整情况	13
2.3	长江口深水航道工程航道回淤情况	14
3	长江口近底水沙特性监测技术与方法	18
3.1	近底水沙监测仪器	18
3.2	近底水沙监测内容	20
3.3	近底水沙监测数据分析方法	21
3.4	近底水沙监测数据处理方法	22
4	长江口近底水沙特性监测成果与分析	26
4.1	长江口近底水流剪切应力观测	26
4.2	长江口近底床面冲淤特征观测	27
4.3	长江口近底河床冲刷淤积速率观测	30
4.4	长江口近底临界冲刷应力观测	31
5	长江口北槽四侧水沙通量监测技术与方法	32
5.1	长江口北槽四侧水沙通量观测	32
5.2	长江口北槽四侧水沙通量观测采用的平面、高程控制系统	33
5.3	长江口北槽四侧水沙通量观测采用的仪器设备	33
5.4	长江口北槽四侧水沙通量现场观测情况	35
5.5	长江口北槽四侧水沙通量资料整编与内业计算	42

6 长江口北槽四侧水沙通量成果与分析 46

6.1 北槽四侧水沙通量现场观测成果和数模比较 46

6.2 北槽四侧水沙通量现场观测水量平衡分析 49

6.3 南导堤越堤含沙量校核 51

6.4 南北导堤越堤潮量和高潮位关系 53

6.5 南北导堤越堤流观测结果 55

6.6 北槽上下口断面观测结果 74

6.7 北槽四侧断面潮通量和沙通量分析 98

6.8 北槽四侧断面水沙通量洪枯季比较分析 104

6.9 北槽四侧断面涨落潮含沙量及输沙比较 109

6.10 北槽四侧断面通量四次观测小结 113

7 长江口水沙盐三维数模介绍 115

7.1 三维浅水流动模型控制方程 115

7.2 控制方程离散求解 117

7.3 三维浅水控制方程的数值求解过程 118

7.4 对流项和水平项的 ELM 离散求解 120

7.5 三维物质输运控制方程 120

7.6 三维物质输运控制方程的亚循环离散求解 120

7.7 边界条件 121

7.8 泥沙主要计算参数选取 122

7.9 计算范围、地形、网格及计算参数 132

8 长江口三维潮流泥沙数学模型验证 134

8.1 数值试验验证 134

8.2 长江口固定测点水文资料验证 137

8.3 长江口北槽水动力分布特征验证 137

9 长江口北槽内水沙输移特性分析 149

9.1 长江口北槽内水体纵向输运能力分析 149

9.2 长江口北槽盐度入侵的斜压力影响分析 150

9.3 长江口北槽近底层泥沙水平输运能力分析 153

9.4 长江口北槽泥沙垂向运动分析 154

9.5 盐度斜压力和垂线密度制紊影响的数模分析 156

9.6 南导堤越堤横向输运泥沙影响分析 157

9.7 长江口北槽近底高含沙量场形成原因初步分析 158

10 长江口航道回淤影响因子定量分析 160

10.1 泥沙沉速因子影响计算分析 160

10.2 大通流量因子影响计算分析 162

10.3 潮差因子影响计算分析 165

10.4 潮位因子影响计算分析 168

10.5 回淤影响因子分析总结 172

11 主要结论及成果应用 173

11.1 主要结论 173

11.2 成果应用 175

附录 A：长江口北槽航道主要工程布置、潮位站及水文测点示意图 182

附录 B：三维数值模型验证结果 185

附录 C：北槽及周边水域涨落急垂线平均流速矢量分布 209

参考文献 210

索引 213

1.1 长江口航道淤积问题提出

长江口是典型的多沙高浊度河口，呈多级分汊型态势，受中等强度潮汐影响，径流潮流作用明显，泥沙运动特性复杂，河口动力过程和地形地貌演变过程在世界众多河口中显现出独特的运动规律。经过几代人近 50 多年艰苦的科研攻关和 12 年的系统治理，举世瞩目，也是迄今为止我国最大的水运工程——长江口深水航道治理工程（图 1-1）于 2010 年 3 月成功实现长 92.2km、宽 350 ~ 400m、水深 12.5m 航道的顺利贯通，并通过了交通运输部组织的交工验收。经过为期一年的试通航，长江口深水航道已进入正式通航阶段。

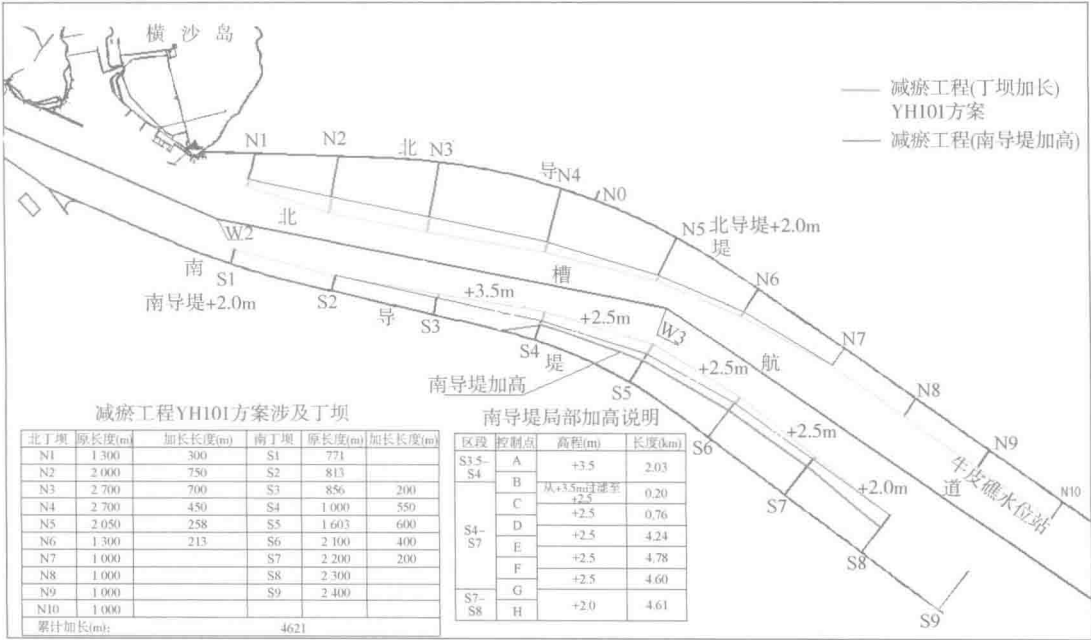


图 1-1 北槽航道减淤工程措施平面示意图

注：图中粉红色和蓝色线分别为三期工程中的 YH101 和南导堤加高工程。

长江口深水航道治理工程建设中，解决了一系列重大技术难题，形成了一整套的技术创新成果，是国内外大型河口治理的成功典范，为国内水运工程及其他相关工程领域的

技术进步起到巨大的示范和推动作用。目前,长江口总体河势较为稳定;已建整治建筑物保持稳定,持续发挥着“导流、拦沙、减淤”的功能;深水航道航槽稳定、回淤量可控。2010年3月交工验收以来,成功经受了洪季长时间大流量和“圆规”等台风的考验,到目前为止,长江口12.5m航道水深保持了100%的通航深度保证率。今后,长江口深水航道还将为我国经济社会的可持续发展发挥日益巨大的保障和促进作用。

长江口航道由于同时受到流域来沙和本地滩地泥沙的不断补给和海域涨潮流输沙的影响,宽阔的河口区域水体含沙量通常较大,明显形成泥沙浓度高于上下游区域的浑浊带,使得长江口航道淤积明显,并呈现较为明显的中段“集中”特征,需常年疏浚维护。

根据试通航期现场监测和数学模型计算,深水航道三期工程12.5m航道贯通后,航道年回淤量仍维持在6000万 m^3 以上,加上台风的骤淤,每年需投入的疏浚费用在10亿元以上。同时,台风和洪水还有可能造成航道一度淤浅,影响航道畅通,不利于上海国际航运中心和长江黄金水道的建设。因此,航道淤积问题是长江口深水航道维护乃至长江口沿岸经济发展的关键性问题。针对长江口航道回淤物质以悬移质泥沙占主体、最大浑浊带含沙量高、泥沙粒径细和垂线分布随潮汐动力变化极不均匀、底部出现几十倍于垂线平均值的高浓度等特点,开展长江口航道淤积机理及近底水沙监测技术研究具有重要意义,其研究成果可丰富工程泥沙、港口航道工程治理的理论与实践,也是开展航道减淤技术研究的基础。本书在总结前人研究成果的基础上,系统分析长江口深水航道治理工程实施以来10多年丰富的现场水文、地形、航道回淤实测资料,研究长江口航道回淤原因及机理、建立符合长江口特点的三维水沙盐数值模型、研究径流、潮流、整治建筑物对北槽航道回淤的影响,并在此基础上结合近底水沙观测技术,开展长江口现场水文泥沙调查,获取近底水沙资料,弄清床面冲淤变化规律,为国内外类似河口航道治理与开发提供经验。

1.2 长江口近底水沙监测技术研究现状

相对于使用传统海流计观测水流流速,使用声学多普勒流速剖面仪(ADCP)可做到高分辨率、无扰动的高效水流流速观测,且现场操作及数据处理均十分简便,故该类型的设备在河川、海洋水文观测中已得到了广泛应用。考虑到ADCP测流的声学原理,一些学者很早就意识到它具有观测水体悬沙浓度剖面的潜力,并开始了相关的理论研究及应用尝试^[1, 2]。

ADCP接收到的回声强度并不能直接用于反演悬沙浓度,由于声信号在水体中运行的过程中能量会发生损耗及吸收(包括水体吸收、泥沙吸收、能量扩散等),故在应用时需要回声强度进行能量损耗补偿,推算出各水层的声学后向散射强度,然后才能使用声学后向散射强度反演悬沙浓度。而声学能量损耗与环境因素及仪器参数有关,例如悬沙浓度、水体含盐度、水体温度、水压以及仪器功率、换能器体积、频率等。早期的研究多数只考虑水体吸收、声束扩散造成的能量损耗,而忽略了泥沙吸收、换能器近场能量扩散等损耗项,故补偿结果并不理想。

Jay等^[13]在研究中引入考虑换能器近场能量扩散的补偿方法,以期得到更好的计算结

果；而 Holdaway^[14] 则在利用 ADCP 估测悬沙浓度时引入了泥沙吸收补偿，并对 ADCP 及透射式浊度计的悬沙浓度测量结果进行了比较，认为 ADCP 的测量结果与浊度计结果相近，具有直接测量悬沙浓度的潜力；Hill 等^[15] 在研究中同时考虑了近场能量扩散及泥沙吸收补偿。前期这些研究仅针对短期悬沙浓度估测，Gartner^[16] 在美国加州旧金山湾应用此技术开展中长期悬沙浓度估测，将 ADCP 观测得到的悬沙浓度与光学后散射探头的结果进行比较，偏差为 8%~10%。国内研究方面，为了探讨低悬沙浓度条件下使用宽幅 ADCP 走航观测悬沙浓度的可行性，汪亚平等^[17] 在胶州湾口门进行了相关现场观测研究，所得悬沙浓度的相对误差为 32%，与目前的测沙手段相当，故可认为在走航状态和低悬沙浓度条件下，用 ADCP 测定悬沙浓度是可行的。高建华等^[18] 将 ADCP 悬沙浓度观测技术应用于长江口，借此分析得到了长江口悬沙输运的一般规律。由于目前的研究表明声学能量损耗受悬沙粒径的影响较大，兰志刚等^[19] 利用现场粒径分析仪 LISST-100 结合 ADCP 观测，提出了基于现场粒径观测的修正计算方法。原野等^[20] 在其研究的基础上，讨论了 LISST-100 结合 ADCP 观测方法在黄河口的应用及观测成果的相关影响因素。

在理论计算模型方面，Thorne 和 Hanes^[21] 根据多年的 ADCP 测沙研究结果，提出随机相位声学后散射模型 (random phase acoustic backscatter model)，用于建立后散射强度与悬沙浓度的关系。Merckelbach^[22] 发现将随机相位声学后散射模型应用于强流环境时测得的悬沙浓度偏大，故其在该模型的基础上发展，提出了高频 ADCP 在强流环境下的转换模型。

1.3 长江航道淤积机理研究现状

长江口航道淤积的动力机理的描述，包括了水、沙运动的基本运动规律等研究内容，即复杂的泥沙起动、水流挟沙力、床面形态和阻力等研究。在现阶段，常用的主要理论和公式都是在恒定均匀流条件下建立起来的，而实际上泥沙都是在非恒定非均匀流中输运、输移的，人们往往只能通过采用经验关系估算泥沙起动、悬移质输沙率、推移质输沙率、水流挟沙力、泥沙沉速、阻力系数等，这些参数的选择又必须要把微观运动力学与宏观河床演变的关系进行结合才能把握准确的方向，进而使得这类河口航道淤积的动力机理研究比较复杂。

1.3.1 河口航道淤积动力机理的数值模拟方法

研究河口航道淤积的动力机理，往往需要在对水沙运动规律进行深入研究的基础上发展和完善非恒定非均匀不平衡泥沙输移数学模型；通过数值模型对动力机理进行验证和反演，分析和评价影响高浊度航道淤积的动力指标。数值模拟的过程实际就是对水沙动力机理的认识、研究和描述的过程，所以深入开展基础理论研究、资料分析研究以及提高数值模拟技术，对高浊度河口航道淤积的动力机理研究、发展水流泥沙基本理论研究和解决工程实际问题都具有重要的意义。

现有航道泥沙回淤数值模拟技术，无论是利用经验公式计算还是实际泥沙场模拟来计

算泥沙回淤情况,基本都是建立在描述泥沙输运的对流扩散方程的基础上,其中包括了水平 x 、 y 和垂线 z 三个方向的泥沙运动。在利用泥沙输运模型开展的泥沙数学模拟研究方面,目前工程上由于考虑计算量,所以基本以二维模型为主;但随着计算机水平和研究技术的发展,三维泥沙数值模拟也逐步得到运用。

在以单向流为主的内河航道中,流量变化相对较小,纵向水面坡降接近水流能坡,水流接近均匀流,水体含沙量基本接近饱和平衡输沙状态,水平方向的泥沙交换相对垂线泥沙输运来说是个小量,因此,通常可以利用忽略水平输运的垂线泥沙运动方程来控制垂线泥沙分布。但对于长江口这样的河口地区来说,潮汐和径流双重作用下的水流和泥沙纵向分布差异较大,纵向断面流速分布偏离均匀流,存在明显的水沙水平方向的净输运,因此必须同时考虑泥沙的水平及垂线输运。

在水平方向上,二维泥沙输运以垂线平均流速和含沙量来计算泥沙水平运动交换,建立在水流和泥沙的垂线分布基本符合一定规律的基础之上;其中流速垂线分布一般可以用对数及指数分布来描述,并假设泥沙垂线分布应与流速分布相对应。在黄骅港区域内,由于平均流速较小,使得水沙的水平输运较小,从而使得航道泥沙回淤的问题和泥沙垂线交换密切相关。在长江口,水平流速较大且纵向分布差异较大,水、沙净输运较为明显,而且潮汐河口的水沙的垂线分布瞬时变化剧烈,使得泥沙水平输运计算的运用局限性也较为明显。对于不符合泥沙垂线分布一般规律的底部泥沙,以底部高浓度或底沙来单独考虑是较为常用的一种方法。

在垂线方向,计算泥沙的悬浮和沉降可从能量守恒的角度得到理论计算公式,也可以从底部切应力出发得到常用的经验公式,即通常所说的挟沙力及切应力两种模式。两者分别以挟沙力^[23~26]及临界起动、止动剪应力^[23, 24]来判断泥沙冲刷、落淤及动态平衡状态;前者国内应用较为普遍,如黄骅港^[23, 24, 27];后者国外应用较多,包括 MIKE21 及 Delft3D 等国外成熟商业软件也采用这种模式。这两种计算模式中的计算参数及计算公式,如泥沙沉速,临界底部起、止动(淤积)剪应力,挟沙力公式,恢复饱和系数等的确定较为关键。

当采用由挟沙力控制的泥沙底边界计算模式时:首先,由于特定区域的潮汐、径流及波浪特征不同,通常需要率定本区域适用的水流挟沙力公式^[28~34];其次,长江口的泥沙中值粒径较细,易起悬、难落淤,适用非平衡输沙理论描述。非平衡输沙过程中含沙量沿程恢复饱和问题较为复杂,韩其为通过实测资料及理论推导平衡时的恢复饱和系数介于 0.02 与 1.78 之间^[30],其余学者研究推荐的值也基本在 0.45 ~ 1.5 范围之内^[31~33]。关于泥沙沉速的取值,长江口泥沙静水沉速根据中值粒径通常取值在 0.0005m/s 左右,但由于北槽地区受到盐度及水温的影响,絮凝沉速不容忽视,根据泥沙垂线分布曲线推算^[35~37],洪、枯季的泥沙沉速的比值可达 1.5^[38],因此,窦国仁院士的全沙模型对北槽深水航道一期工程的回淤进行预测时,对洪、枯两季选取不同沉速来进行计算。

当采用切应力控制时:首先,冲刷系数取值较为关键,通常采用试验室或现场冲淤平衡计算来率定,取值一般在 $2.0 \times 10^{-4} \sim 4.0 \times 10^{-3} \text{kg/m}^2/\text{s}$ ^[39]之间,但按杭州湾的资料显示 m 取值为 $0.30 \times 10^{-4} \text{kg/m}^2/\text{s}$ ^[40]。其次,临界底部起、止动(淤积)剪应力的确定一

般采用试验的方法,如曹祖德对黄骅港不同细颗粒泥沙进行的环形水槽试验^[23];对于启动剪应力,窦国仁院士^[42]通过理论推导了考虑水头的泥沙启动应力理论公式,其结果和万兆惠^[43]的试验发现一致。

天然情况下水流一般都是处于非恒定非均匀流条件,不同区域水流非均匀性的不同对泥沙参数取值有所影响。相对均匀流来说,针对非恒定非均匀流的水流及泥沙运动的国内外研究成果相对较少,目前的研究理论也还很成熟。然而,非恒定非均匀流回淤数值模拟研究是河口航道必须面对的难题之一。近年来,随着水沙数值模拟研究的发展,非恒定非均匀流条件下,床面剪应力、糙率系数,及冲刷和淤积的临界剪应力等值的选取与计算方法的研究受到越来越多学者的重视。例如:非恒定非均匀流条件下河口地区水体,受潮汐作用下的流速或盐度梯度的影响,垂向上动量交换较之均匀流有明显差异,从而造成床面剪应力的变化;根据荷兰水利研究院的相关研究,落潮时和在最大浑浊带,这种效应尤为突出:落潮时床面剪应力将减小约40%。实际床面剪应力的减小将会导致计算淤积量的增加,其中包括了浮泥对航槽回淤影响的增加。但一般水深平均的数学模型中,并不能直接考虑流速或是盐度的垂向梯度所引起的水流结构的变化,因此,在应用切应力 Partheniades 和 Krone 公式时,需要改变冲刷和淤积的临界剪应力。乐培九^[45-46]的研究结果也表明:恒定非均匀流条件下实际床面剪应力的计算以及垂向流速分布,可分解为均匀流和垂向环流带来的“次生流”两者的综合;这种非均性可解释潮汐河口的某些现象,如涨水时冲、落水时淤、流量变率愈大冲淤幅度也愈大;海滩上的航槽,当其与潮流有一定夹角时,涨潮流的迎水坡受涨潮及逆坡双重加速影响,冲刷加剧,落潮流的背水坡受落潮及水流扩散双重减速影响,淤积加剧。宋志尧^[47]从曼宁系数的差异出发,考虑潮流垂线分布的不均匀性,对二维潮流运动方程的非恒定非均匀流的底床摩阻系数进行了修正,考虑了河床组成、水深分布、水面升降和流向等对糙率的影响。

1.3.2 河口航道淤积特有的底部高浓度泥沙特征分析

从笼统的概念上来说,底沙为在底部输运的泥沙,既为底部就不会与上层泥沙进行交换;一般认为是在河床上跳跃移动,但又无法进入上层参与悬浮的泥沙为底沙。对于内河来说,动力纵向变化相对均匀,底沙只在底部输移,可以利用专门针对底沙的输移方程,可参见窦国仁院士推导的底沙输运公式。

然而,对于长江口来说,存在底沙吗?显然也有,沙粗不足以被悬浮的泥沙总是存在的。但拦门沙航段航道中淤积物是主要底沙输移的结果吗?实测资料显示:不是。长江口的潮汐动力足以使航道淤积泥沙中绝大部分粒径的泥沙悬浮,以悬浮的泥沙输移的形式运动,这种悬浮运动和水体移动一样快速。因此,在长江口,存在任何时刻都无法被悬浮的较粗底沙输移,其本身相对悬浮泥沙的输运的量占比很小。在长江口,任何计算以底沙回淤为航道主要回淤原因之一的结果,均不很妥当。

那底部高浓度泥沙是从哪里来的?必然是上下左右输运来的,但是以什么形式输运过来的,学者意见不一。长江口细颗粒泥沙的来源必然是水平输移形成,但现有的实测资料并不足以说明底部高浓度较细颗粒泥沙的贴底输运,更可能的是由于垂线泥沙运动而形成。