

长江口南槽底沙输沙观测研究

丁宏伟, 韩玉芳, 胡国栋, 路川藤, 辛文杰, 赵日明, 谢至正

Observational study on bedload transport at the South Passage of the Yangtze Estuary

DING Hongwei, HAN Yufang, HU Guodong, LU Chuanteng, XIN Wenjie, ZHAO Riming, XIE Zhizheng

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12170/20240112001>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

山区河流河床形态对推移质输沙率影响的试验研究

Experimental study on the impact of bed forms on bed load transport in mountain streams

水利水电工程学报. 2021(6): 60 <https://doi.org/10.12170/20201208003>

流域水沙变化和人类活动对长江口河槽演变的影响

New trends of river channel evolution of the Yangtze River estuary under the influences of inflow and sediment variations and human activities

水利水电工程学报. 2021(2): 1 <https://doi.org/10.12170/20200313001>

近40年来长江口沉积物粒度变化及其对底床冲淤的响应

Analysis of sediment grain size change and its response to erosion and deposition pattern within the Yangtze River Estuary for the past 40 years

水利水电工程学报. 2021(5): 8 <https://doi.org/10.12170/20210628002>

径流量变化对长江口北槽最大浑浊带影响分析

Study on the effect of river inflow on estuarine turbidity maximum in the North Passage of the Yangtze Estuary

水利水电工程学报. 2021(5): 1 <https://doi.org/10.12170/20210422001>

地形变异条件下长江口南港河段水动力变化

Hydrodynamic changes in south channel of Yangtze River estuary under topographic variation conditions

水利水电工程学报. 2020(1): 51 <https://doi.org/10.12170/20181223001>

长江口盐和泥沙密度分层对垂向紊动扩散的影响

The impact of salt and sediment density stratification on vertical turbulent mixing in the Yangtze River Estuary

水利水电工程学报. 2024(1): 15 <https://doi.org/10.12170/20221027001>





扫码进入官网，阅读更多精彩文章

关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI:10.12170/20240112001

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 Hongwei, HAN Yufang, HU Guodong, et al. Observational study on bedload transport at the South Passage of the Yangtze Estuary[J]. Hydro-Science and Engineering, 2025(1): 47-57. (in Chinese))

长江口南槽底沙输沙观测研究

丁宏伟¹, 韩玉芳¹, 胡国栋², 路川藤¹, 辛文杰¹, 赵日明¹, 谢至正¹

(1. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029; 2. 长江水利委员会 长江口水文水资源勘测局, 上海 200136)

摘要: 为解决长江口底沙输沙无实测资料的问题、研究南槽的底沙输移特性, 基于坑测法原理开发了一套适用于长江口水沙环境的底沙观测系统, 取得了可靠的低扰动下南槽拦门沙段底沙输沙过程资料。观测结果显示, 在潮周期过程中(平均潮差 3.3 m), 输沙率与流速大小密切相关, 实测潮平均输沙率为 0.007 kg/(m·s), 输沙率最大值出现在涨急时刻, 为 0.045 kg/(m·s), 落急时刻输沙率最大值为 0.020 kg/(m·s)。涨落潮过程中, 同样流速条件下, 输沙率存在一定差异, 涨潮时段推移质输沙率大于落潮时段。根据窦国仁公式计算的单宽推移质输沙率与实测值变化规律基本一致, 但量级上存在差异, 潮平均计算输沙率为 0.004 kg/(m·s), 小于实测值, 涨急时刻最大计算输沙率为 0.031 kg/(m·s), 落急时刻为 0.028 kg/(m·s), 涨潮期间实测值大于计算值, 落潮期间则相反, 公式推荐的输沙综合系数取值需要进一步探索。

关键词: 长江口南槽; 推移质输沙率; 潮周期过程; 坑测法

中图分类号: TV856

文献标志码: A

文章编号: 1009-640X(2025)01-0047-11

底沙输沙规律的研究是泥沙基本理论的传统课题, 研究起始于 18 世纪末期, 在 20 世纪 50—80 年代有了长足的进展, 之后研究进展缓慢。这一方面是由于对推移质的运动规律了解得还不够透彻, 如在理论上悬沙底沙的划分、底沙推移质统计高度等泥沙基本问题尚存在争议; 另一方面是由于现场观测资料获取困难^[1-5]。中国涉水工程建设自 20 世纪 90 年代以来大规模开展^[6], 涉及水沙问题复杂, 近几年随着国家生态文明建设政策的实施, 河口生态系统中污染物迁移、水生植物和底栖生物研究^[7-8] 多涉及河床演变和泥沙迁移规律, 因此突破泥沙研究问题中的瓶颈, 对长江口综合治理对策和措施制定、港口航道等泥沙回淤严重的涉水工程的运行维护都至关重要。

在长江口地区, 悬沙和底沙常用来简称以悬移质形式运动的泥沙和以推移质形式运动的泥沙。与上游河流相比, 长江口区的泥沙粒径较细, 绝大部分泥沙在一定水流条件下可扬动成为悬沙, 悬移质输沙是河口河床长期演变的决定因素。受潮汐往复流影响, 河口地区悬移质和推移质交换频繁, 长江口底沙运动一般指近底区的泥沙运动, 包括推移质和悬移质中的较粗部分, 这部分泥沙运动往往对港口、航道回淤产生重要影响^[9]。

长江口底沙输沙量目前无实测资料, 根据大通站资料分析, 在悬移质输沙总量中床沙质约占 9%, 但长江口推移质泥沙运动主要是由滩槽变化而引起的局部泥沙搬运^[10], 该部分输沙量测量仍是难点。当前, 底沙运动测量主要有直接测量(坑测法^[11-12]、取样器法^[13])和间接测量(沙波运动测量^[14]、超声波法和光电法^[15])两类, 这些测量手段存在对河床底扰动大、口门淘刷严重及无法获取推移质随时间变化过程等问题, 无法实际应用于长江口地区。

收稿日期: 2024-01-12

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目(Y222001, Y222012)

作者简介: 丁宏伟(1994—), 男, 江苏常熟人, 工程师, 主要从事河口海岸水流泥沙研究。E-mail: hwding@nhri.cn

通信作者: 韩玉芳(E-mail: yfhan@nhri.cn)

因此,考虑到当前南槽底沙输沙强度资料获取困难,相关底沙输沙公式在本地区适用性缺乏研究,本文基于坑测法原理开发了一套现场观测系统,取得无扰动或小扰动情况下底沙输沙量随水动力的变化过程资料,为南槽的滩槽水沙输移特征和宽浅型河口拦门沙航道回淤机理提供实测数据。

1 研究区域

本文研究区域为长江口南槽河段(见图 1),研究重点则是南槽航道。作为长江口“一主、两辅、一支”航道体系的组成部分,南槽航道上起南北槽分流口圆圆沙灯船,下至口外南槽灯船,河段总长约 86 km。目前南槽河段已建设 6.0 m×600 m(口内段)/1 000 m(口外段)×1 250 m(水深×航宽×转弯半径)尺度的人工航道,能够满足 5 000 t 级船舶满载乘潮双向通航(同向多线),兼顾(1~2)万 t 级船舶减载乘潮通航和大型空载船舶下行乘潮通航。

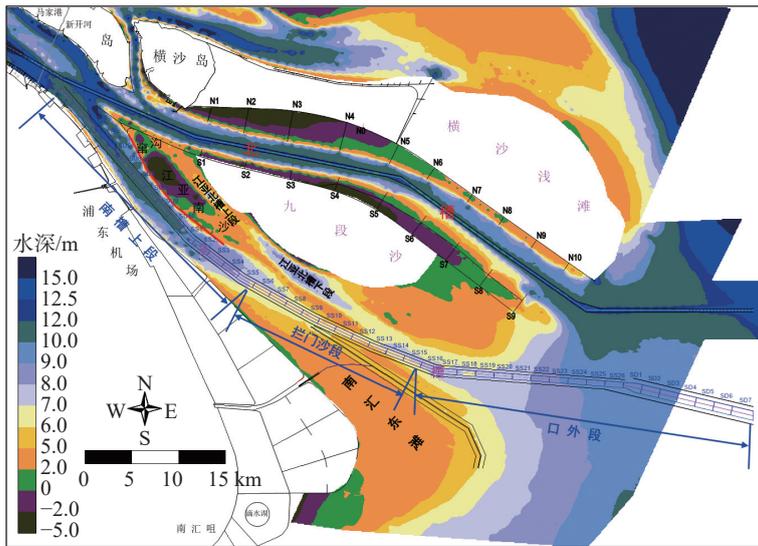


图 1 长江口南槽段河势图(红色堤线为南槽治理一期工程)

Fig. 1 River regime map of South Passage at the Yangtze Estuary (Red embankment lines represent the Phase I project for the regulation of South Passage)

不同于北槽窄深型航道,南槽航道为宽浅型航道,无论是水沙运动特性还是航道整治工程都有别于北槽航道。北槽航道内底质粒径为 0.01~0.03 mm,南槽航道内底质粒径为 0.02~0.25 mm。在北槽深水航道疏浚维护过程中,回淤原因分析及回淤对策研究还未涉及底沙推移对航道回淤的影响,主要原因在于北槽整治建筑物范围内没有成一定规模的活动砂体,航道回淤物特性也主要体现为悬沙淤积^[16-17]。根据南槽航道附近底质分布和航道回淤特征分析(图 2),南槽航道回淤物质及回淤特性与北槽以悬沙落淤为主航道的回淤特性有所不同,在某些区段以推移质运动进入航槽的底沙输移占比较高^[18]。

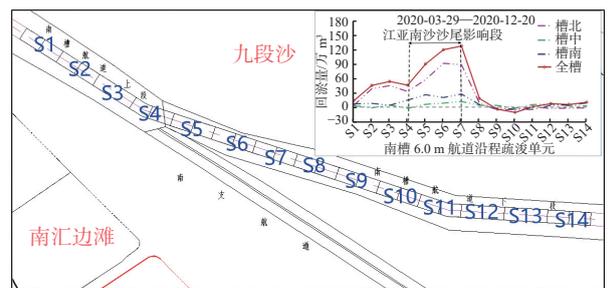


图 2 长江口南槽 6 m 航道回淤分布特征

Fig. 2 Distribution characteristics of siltation in the 6m deep-water channel at the South Passage of Yangtze Estuary

2 南槽河段近期水沙特征及地形变化

2.1 潮位及潮流特征

长江口受到上游径流与外海潮汐的共同影响, 对于南槽河段, 一般用大通站断面流量代表上游径流作用, 采用中浚潮位站的水位数据代表南槽河段的潮流动力。由表 1 近年历次水文测验的结果可知, 南槽洪季上游径流量波动显著, 但洪季潮差变化不大, 尤其是测验期间平均潮差, 均为 3.0 m 左右, 大潮潮差基本为 4.0 m。

表 1 历年南槽洪季水文测验期间大通流量及涨潮潮差

Tab. 1 Historical hydrological data during the flood season at the South Passage, including Datong discharge and tidal range

时间	大通站平均流量/(m ³ /s)	中浚站洪季涨潮平均潮差/m	中浚站洪季大潮涨潮平均潮差/m	时间	大通站平均流量/(m ³ /s)	中浚站洪季涨潮平均潮差/m	中浚站洪季大潮涨潮平均潮差/m
2018年8月	38 700	3.06	4.11	2020年8月	69 300	3.08	4.27
2019年8月	55 700	2.99	3.52	2021年8月	41 600	3.01	4.14

南槽航道位于九段沙和南汇边滩之间, 上段北侧有江亚南沙护滩堤作为边界, 南侧则有南汇东滩圈围工程作为边界, 航道沿程涨落潮平均流速约 1 m/s。如图 3 所示, 在航道中上段以往复流为主, 口外段则是旋转流, 净输移方向由北向南。

从涨落急平均流速沿程分布(图 4)看, 南槽上段, 即江亚南沙护滩堤附近的 NCH1、NCH2 位置涨、落急流速最大, 但涨潮平均流速近几年有降低的趋势。位于江亚南沙沙尾的 NCH5 测点流速表现为“两头小中间大”的特点, 但近几年涨急平均流速减小, 落急平均流速变化不大。

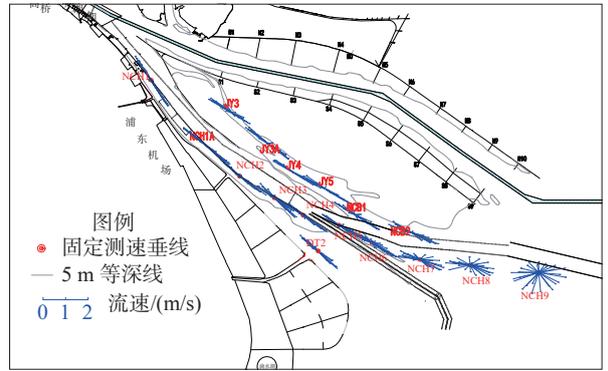
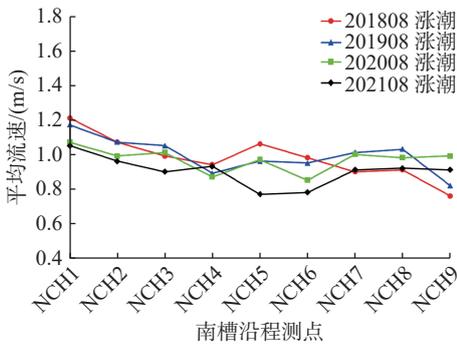
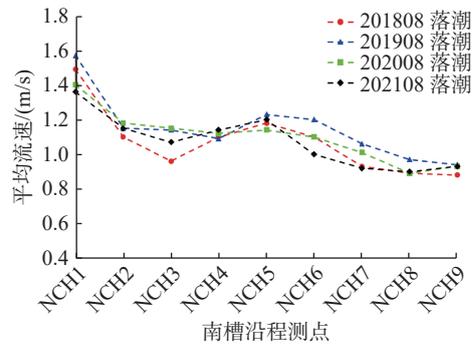


图 3 大潮垂线流速矢量

Fig. 3 Tidal current velocity vectors at spring tide



(a) 涨潮平均流速沿程分布



(b) 落潮平均流速沿程分布

图 4 南槽航道沿程涨落潮平均流速分布

Fig. 4 Distribution of average flow velocities during flood and ebb tides along the South Passage

2.2 含沙量分布

从南槽航道沿程潮平均含沙量分布看(图 5), 南槽中部拦门沙段 NCH3、NCH4 含沙量最大, 涨潮平均含沙量最大约 1.8 kg/m³, 落潮平均含沙量最大约 1.4 kg/m³。

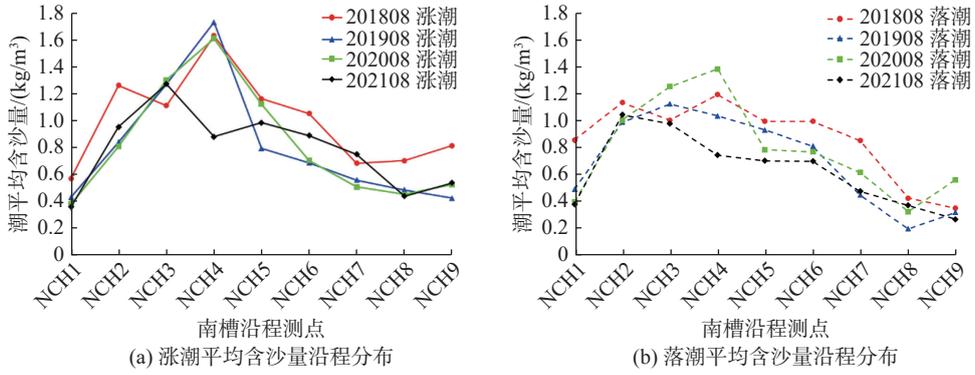


图 5 南槽航道沿程潮平均含沙量

Fig. 5 Average sediment concentration during tides along the the South Passage

南槽河床质历次采样结果(图 6)表明,南槽河床质总体呈“中上段北粗南细,下段两侧粗、中间细”分布。具体看,南槽中上段(大治河口以上)北侧主槽、江亚南沙、江亚北槽、九段沙,下段(大治河口以下)主槽两侧的南汇东滩和九段沙沙尾的河床质相对较粗,以粗粉砂、极细砂和细砂为主;其余区域河床质总体较细,以中粉砂、细粉砂为主。

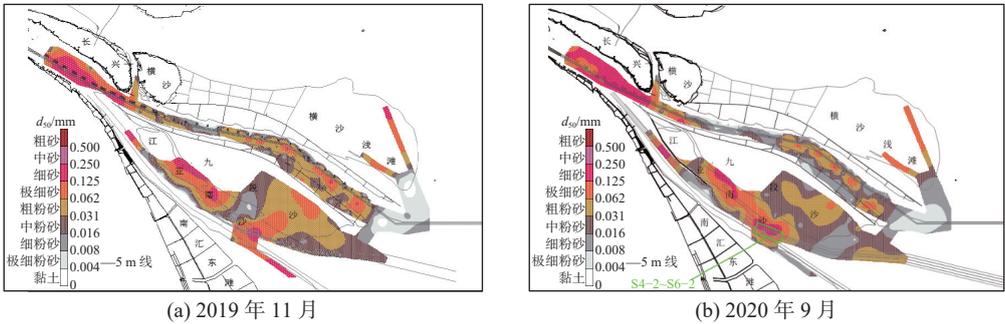
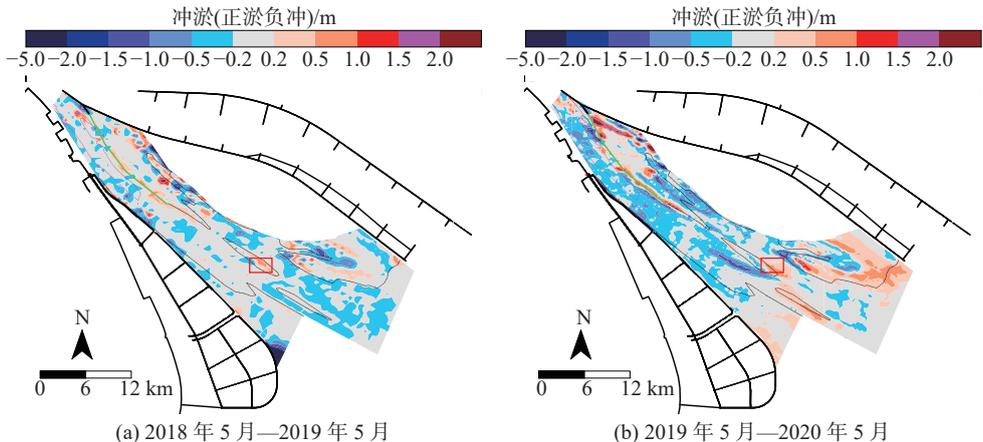


图 6 历次南槽河床质采样结果

Fig. 6 Results of the South Passage bed material sampling over various periods

2.3 南槽一期工程后地形变化

南槽航道一期工程于 2018 年 12 月开工,2020 年 3 月底 6.0 m 航道贯通,2020 年 6 月工程整体投入运行。南槽航道一期工程针对 6.0 m 航道水深目标,需要遏制江亚南沙头部窄沟的发展,为航道建设提供稳定的边界条件。2018—2021 年工程前后南槽地形变化见图 7。一期工程实施后,江亚南沙护滩堤发挥了预期效果。从江亚南沙护滩堤影响及周边河势变化分析,江亚南沙头部窄沟水域在一期工程实施后由冲刷环境变为淤积环境,头部窄沟发育趋势得到遏制,转为淤积趋势。2019 年 11 月开始江亚南沙头部窄沟水域有所淤积,2020 年后淤积强度增加。头部窄沟限流后,江亚南沙未出现新的窄沟,沙体保持稳定。



(a) 2018 年 5 月—2019 年 5 月

(b) 2019 年 5 月—2020 年 5 月

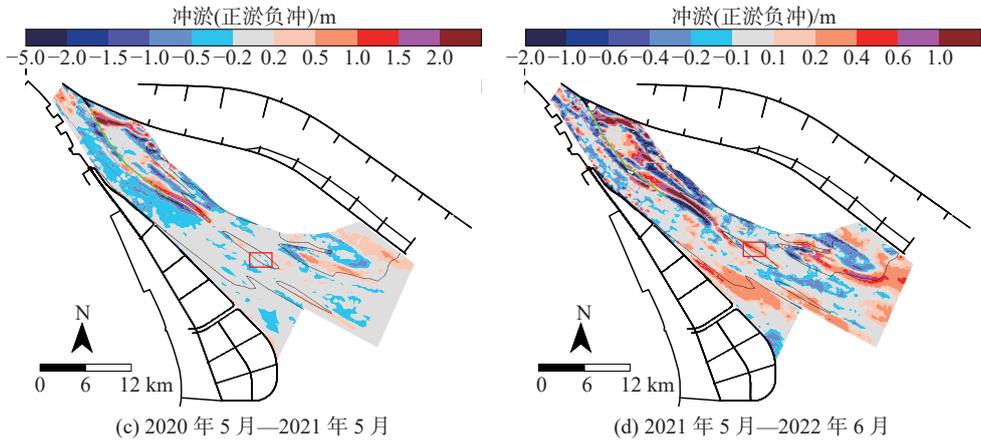


图 7 南槽河床冲淤

Fig. 7 Scouring and deposition of the South Passage riverbed

南槽航道一期治理工程建设对南槽拦门沙河段影响较小, 拦门沙位置和滩顶水深几乎没有变化, 位于拦门沙段的江亚南沙沙尾位置处于长期微淤环境中, 不断向下游输运, 影响南槽航道维护。

3 长江口南槽底沙现场观测

3.1 观测仪器及原理

根据坑测法的基本原理, 在南京水利科学研究院自主开发的第一代底沙监测系统^[12]基础上, 本文针对长江口水沙环境继续研发了第二代底沙监测系统(图 8), 通过设备底部的实时监测装置, 实现了推移质输沙量的长期精确测量。该坐底式泥沙运动实时监测系统, 主要由外桶、集沙内桶、监测传感器、称重系统组成。底床泥沙由河床进入仪器口门后, 在沉沙筒内沉积, 沉沙筒下方设置有称重装置, 可实时测量筒内泥沙的质量, 进而求得实时底沙输沙量。

根据推移质的单宽输沙率定义:

$$g_b = \frac{\Delta G_i}{b \Delta t_i} = \frac{G_i - G_{i-1}}{b(t_i - t_{i-1})} \quad (1)$$

考虑到水下测量时桶内水的影响, 将推移质输沙率公式推广为:

$$g_b = \frac{\Delta G_i}{b \Delta t_i} = \frac{G_i - G_{i-1}}{b(t_i - t_{i-1})} = \frac{W_i - W_{i-1}}{b(t_i - t_{i-1})} \frac{\gamma_s}{\gamma_s - \gamma_w} \quad (2)$$

式中: G_i 、 G_{i-1} 为相邻时刻沉沙筒内泥沙质量(kg); b 为内筒宽度(m); W_i 、 W_{i-1} 为水下称重系统相邻时刻的测量值(kg); γ_s 、 γ_w 分别为沙和水的重度(N/m^3); t_i 、 t_{i-1} 为与 W_i 、 W_{i-1} 对应的时间(s)。

相较于传统坑测法等底沙测量手段, 本装置在以下方面进行了改进: (1) 装置埋于河床底部, 桶口与河床齐平, 对水流结构影响较小; (2) 桶口边缘一定范围内铺设柔性护底, 确保桶口附近不会产生局部淘刷, 桶口始终与床面保持一致; (3) 通过在桶底设置压力传感器, 可以得到与水动力过程监测同步的推移质输沙过程, 研究潮周期内不同动力条件下的推移质输沙特点。

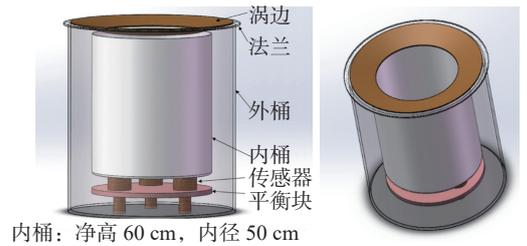


图 8 坐底式底沙实时监测系统

Fig. 8 Seated bedload sediment real-time monitoring system

3.2 设备可靠性检验

开展现场观测前,首先在水槽中对本文所开发的底沙输沙观测系统进行率定和监测。模型潮水箱前缘最深处可达 2 m 以上,测试现场照片如图 9 所示。从水下电信号传输效果及电压-质量线性关系可知,本文所研发的设备可用于水下质量实时监测,电信号与实际质量间线性关系良好。

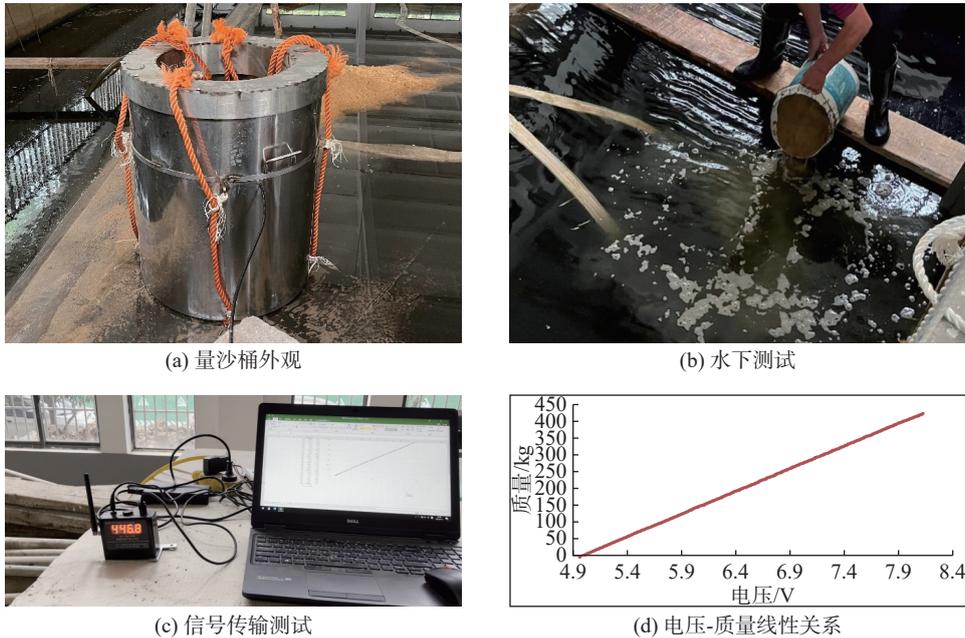


图 9 设备测试

Fig. 9 Equipment testing

3.3 现场观测

根据南槽 6 m 航道基建疏浚阶段南槽航道回淤特征及河床底质分布情况,南槽底沙运动规律现场观测点拟布置在 S4~S6 疏浚单元附近,根据观测需要和船舶航行情况布置合适的观测点。根据研究需要,长江口南槽洪季底沙输沙现场观测,除布置底沙观测设备外,同时布置坐底水沙监测系统和近底高浓度泥沙潮周期过程取样装置(26 仓取样器)。水文测量船负责多波束地形扫描和设备投放和回收,同时开展常规定点水文测验。现场观测布置见图 10。

观测桶施放过程中,潜水员利用高压水枪将河床冲出可放置沉沙桶的沙坑。将沉沙桶平稳放置于坑底后,在桶沿周围铺设砂肋软体排,防止出现冲刷坑,破坏河床平整度,从而影响测量结果。沉沙桶外接 1 根电缆直通至水面浮标船,浮标船上有无线信号发射装置,通过电磁波将桶内进沙情况实时传输至测量船;电缆另接 1 个船锚,确保测量系统的稳定性。水文船在测量水域进行多波束走航,监视测量范围内的床面变化。

本次观测时段选在南槽丰水期潮动力较大时期,具体时间为 2021 年 5 月 14—15 日,上游大通站来水量约为 $34\ 000\ \text{m}^3/\text{s}$,平均潮差约 3.3 m。水文测验从低潮前 1 h 开测,保证两涨两落,满足潮流闭合要求。

为了得到潮周期的底沙观测值,防止单个桶在观测期间淤满无法获得足够长时间数据,2021 年 5 月,在

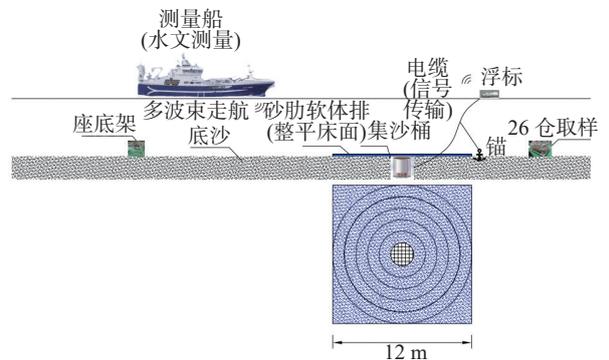


图 10 南槽底沙观测现场布置示意

Fig. 10 Schematic of the South Passage bedload sediment observation site arrangement

南槽 S6 单元北侧江亚南沙沙尾附近布置了 3 个观测桶进行底沙监测(位置即图 11 中 NCD1~NCD3)。3 个观测桶相邻位置贴近, 观测时顺序投放, 具体的投放和回收时点见图 12, 以保证取得潮周期过程底沙输沙量与潮动力关系, 研究潮汐非恒定过程中输沙率的变化, 同时关注潮周期过程中同样动力条件下加速减速过程输沙率差异。

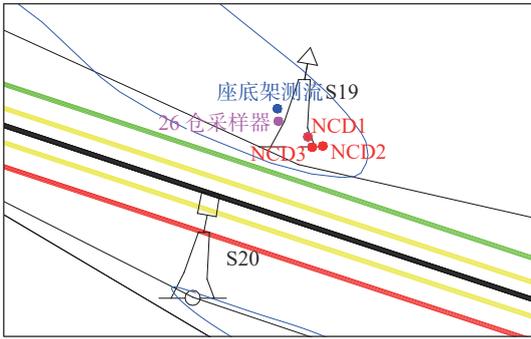


图 11 推移质输沙观测点位布置

Fig. 11 Arrangement of bedload sediment observation points

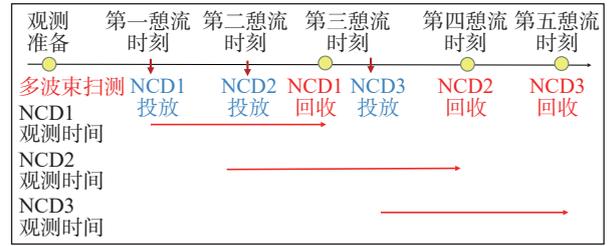


图 12 底沙输沙观测桶投放回收顺序

Fig. 12 Sequence of deployment and retrieval of the bedload transport observation buckets

在安放底沙采样桶前, 首先对测区本底进行多波束扫测, 扫测区域为拟观测点四周 300~800 m 范围, 从图 13(a)地形扫测结果看, 测区地形较平坦, 南槽航道北侧观测点河底高程约-6.0 m(85 高程)。

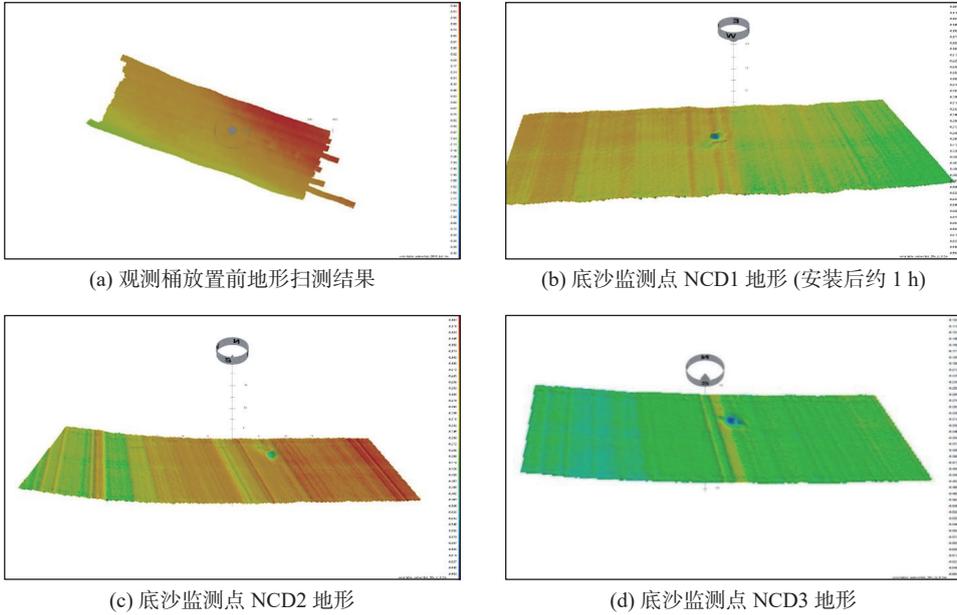


图 13 扫测期间河床地形变化

Fig. 13 Changes in riverbed topography during survey scanning

3 个测量桶周边在测量开始、结束及测量过程中, 多次监测桶周围地形。图 13 为扫测过程中桶周边地形变化。采样桶安放完成后再次测量桶周围的局部地形。结合潜水员的水下探摸情况, 可以确定在监测过程中, 桶周边局部冲淤变化较小, 桶口与床面保持齐平。

4 观测成果

4.1 ADCP 流场

图 14 为所观测的 2021 年 5 月 14—15 日一个完整潮周期内潮位、流速过程。观测期间为中大潮, 平均

潮差约 3.3 m, 底层最大涨潮流速为 1.19 m/s, 最大落潮流速为 1.12 m/s。

4.2 观测桶内底沙特征

南北两侧观测桶各观测约 25 h, 图 15 为观测期间桶内泥沙, 由于采样时段不同, 各桶内泥沙体积不同, NCD1 点桶内泥沙最多, 桶内泥沙深约 80 cm, NCD2 桶和 NCD3 桶内泥沙深约 50 cm。对桶内泥沙按 5 cm 分层, 每层样品分 4 区取样, 取得各桶泥沙样品, 对所有样品进行颗粒分析。由于观测点位置相近, 桶内泥沙性状相似, 大部分层为灰黄色粉细砂, 泥沙中径 d_{50} 为 0.13~0.17 mm, 中间夹杂少量泥质层和含泥质颗粒的细沙层(图 15), 泥质粒径约 0.01 mm。所有样品颗分结果见图 16。



图 15 底沙采样桶泥沙样品(NCD1)

Fig. 15 Sediment samples from the bedload sediment sampling bucket (NCD1)

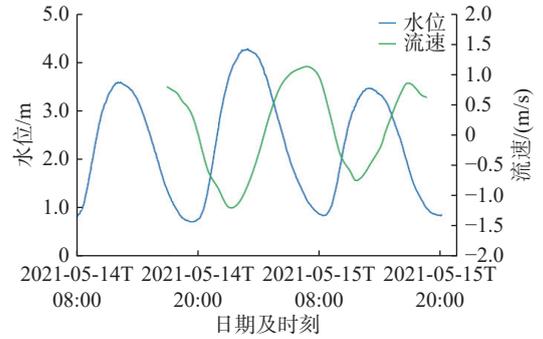


图 14 现场实测水位、流速过程

Fig. 14 Field measurements of water levels and flow velocities

Fig. 14 Field measurements of water levels and flow velocities

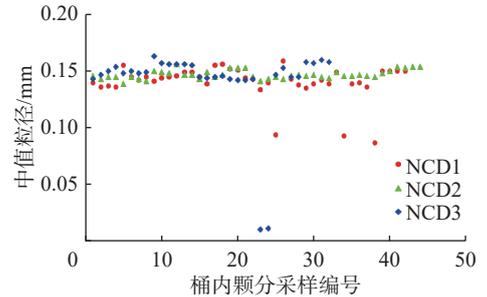


图 16 底质采样颗分成果

Fig. 16 Results of sediment particle size analysis from bed material sampling

4.3 底沙输沙率

在长江口泥沙问题的研究过程中, 窦国仁底沙输沙率公式应用最为广泛。该公式认为水流能量在运动过程中一部分用于克服河床阻力, 一部分通过脉动能量悬浮泥沙, 其余则用以输移底沙。窦国仁底沙输沙率公式原则上与拜格诺公式为同一类公式^[2], 其具体形式如下:

$$q_s = \frac{K_0}{C_0^2} \frac{\gamma_s \gamma}{\gamma_s - \gamma} (V - V_C) \frac{V^3}{g\omega} \quad (3)$$

$$V_C = 0.265 \ln \left(11 \frac{h}{\Delta} \right) \sqrt{\frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} gD + 0.19 \frac{\varepsilon_k + gh\delta}{D}} \quad (4)$$

$$\omega = 1.068 \sqrt{\frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} gD}, \quad C_0 = 2.5 \ln \left(11 \frac{h}{D} \right) \quad (5)$$

式中: K_0 为综合系数, 根据吉尔伯特(G. K. Gilbert)和冈恰洛夫水槽试验资料设定全部底沙的 K_0 为 0.1(根据长江部分水文站实测资料, 对于沙质推移质, K_0 为 0.01; 对于悬移质中底沙 K_0 为 0.09); C_0 为床面阻力系数; γ 为水的重度(N/m^3); γ_s 为沙的重度(N/m^3); ω 为泥沙沉速(m/s); g 为重力加速度(m^2/s^2); V_C 为起动流速(m/s); Δ 为床面糙率高度, 当 $D \leq 0.5 \text{ mm}$ 时, 取 $\Delta = 0.5 \text{ mm}$, 当 $D > 0.5 \text{ mm}$ 时, $\Delta = d_{50}$; $\varepsilon_k = 2.56 \text{ cm}^3/\text{s}^2$; δ 为薄膜水厚度, $\delta = 0.21 \times 10^{-4} \text{ cm}$; D 为推移质平均粒径, 本次测量期间推移质平均粒径取 0.15 mm。

经该公式估算, 本次测量时段内观测点附近的潮平均单宽底沙输沙率约为 0.004 $\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$, 潮周期内的计算输沙率过程如图 17 红色虚线所示。其中涨急时刻最大输沙率为 0.031 $\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$, 落急时刻最大输沙率

为 $0.028 \text{ kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$ 。同时,注意到输沙率近似与流速的3次幂成正比,前一个涨落急的输沙率计算值约为后一个涨落急输沙率的5~10倍,可见底沙输沙率对流速变化很敏感。

以此作为对比,本次南槽底沙现场观测也获得了一个潮周期过程的推移质输沙率时间序列(图17)。图中红色实线为推移质输沙率,蓝色实线为潮位过程线,绿色实线为流速过程线(落潮为正)。在一个潮周期过程中,潮平均输沙率为 $0.007 \text{ kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$,输沙率最大值出现在涨急时刻附近,为 $0.045 \text{ kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$,落潮期间输沙率最大值为 $0.020 \text{ kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$,涨落潮过程中,同样流速条件下,输沙率存在一定差异,涨潮时段推移质输沙率普遍大于落潮时段。两个涨落急过程中,流速大的时段最大输沙率也明显大于流速小的时段,其中涨急时段相差约7倍,落急时段相差约2倍。

从理论计算和现场实测的比较中可以看到,根据窦国仁公式计算的单宽推移质输沙率与实测输沙率过程在相位上虽有差异,但变化规律基本一致,输沙率峰值出现于涨落急时刻附近。而量级比较上,目前采用的计算公式在涨潮阶段的计算值明显小于实测值,落潮阶段则大于实测值,潮平均输沙强度上,计算值与实测值也存在约2倍的差距。分析输沙率计算公式结构可知,在水位流速过程、底质粒径等参数确定的条件下,底沙输沙率量级与 K_0 综合系数的选取密切相关, K_0 系数代表的是推移质输沙在全沙输沙中的比重;从实测结果与理论计算的对比来看,在涨落潮阶段 K_0 系数值存在差异,涨潮大于落潮。

后续仍将针对此次观测采集得到的长江口南槽底沙开展针对性水槽试验,以求找出适用于长江口南槽底沙输移的综合系数取值公式,为长江口全沙数模的精细化开发提供相应的数据支撑。

5 结 语

(1)根据长江口南槽水动力和河床特征,基于坑测法原理开发了一套现场底沙观测系统。现场底沙输移监测系统实现了对现场输沙量的称重,可同步取得底沙输沙量与周边水动力条件的监测数据,并探索取得无扰动或小扰动情况下底沙输沙率现场观测数据。

(2)根据南槽航道回淤特征及河床底质分布情况,在长江口南槽航道S4~S6疏浚单元附近开展了现场底沙输沙率观测,获得了南槽推移质输沙率随潮周期过程的变化规律,同时获取了观测时段的水动力过程。观测结果显示,在潮周期过程中,输沙率与水动力强度大小密切相关;平均潮差3.3 m条件下,潮平均输沙率为 $0.007 \text{ kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$,输沙率最大值出现在涨急时刻,为 $0.045 \text{ kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$,落潮时期输沙率最大值出现于落急时刻,为 $0.020 \text{ kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$ 。涨落潮过程中,同样流速条件下,输沙率存在一定差异,涨潮时段推移质输沙率普遍大于落潮时段。

(3)根据窦国仁公式计算的单宽推移质输沙率与实测值相比在变化规律上基本一致,但量级上存在数倍的差距,理论计算的潮平均输沙率约为 $0.004 \text{ kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$,涨急最大输沙率约 $0.031 \text{ kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$,落急最大输沙率约为 $0.028 \text{ kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$ 。天然测得的底沙输沙强度在涨潮阶段大于理论计算值,在落潮阶段则偏小,这与综合系数 K_0 的选取密切相关,有必要开展针对性水槽试验,获得适用于长江口南槽底沙输移的综合系数,为后续模型开发提供数据支撑。

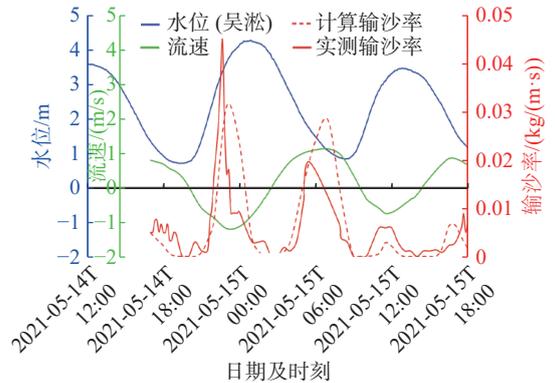


图17 南槽推移质输沙率随潮周期过程
Fig. 17 Bedload sediment transport rate variation during the tidal cycle in the southern channel

参 考 文 献:

- [1] 张植堂. 天然河流沙质河床上器测推移质输沙率含义的商榷[J]. 长江科学院院报, 1991, 8(3): 19-27. (ZHANG Zhitang. Discussion on the meaning of the bed load discharge measured by sampler in the sandy bed of natural rivers[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 1991, 8(3): 19-27. (in Chinese))
- [2] 张瑞瑾, 谢鉴衡, 陈文彪. 河流动力学[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2007. (ZHANG Ruijin, XIE Jianheng, CHEN Wenbiao. River dynamics[M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2007. (in Chinese))
- [3] 胡浩, 程和琴, 韦桃源, 等. 基于 ADCP 测量的长江口推移质运动速度研究[J]. 泥沙研究, 2015(5): 1-6. (HU Hao, CHENG Heqin, WEI Taoyuan, et al. Measuring bed load with an Acoustic Doppler Current Profiler in Changjiang Estuary[J]. Journal of Sediment Research, 2015(5): 1-6. (in Chinese))
- [4] 毛浩丞, 杨胜发, 张鹏, 等. 基于摄像法的运动卵石观测技术研究[J]. 泥沙研究, 2023, 48(4): 32-37. (MAO Haocheng, YANG Shengfa, ZHANG Peng, et al. Research on moving pebble observation technology based on camera method[J]. Journal of Sediment Research, 2023, 48(4): 32-37. (in Chinese))
- [5] MISSET C, RECKING A, LEGOUT C, et al. Combining multi-physical measurements to quantify bedload transport and morphodynamics interactions in an Alpine braiding river reach[J]. *Geomorphology*, 2020, 351: 106877.
- [6] 韩玉芳, 窦希萍. 长江口综合治理历程及思考[J]. 海洋工程, 2020, 38(4): 11-18. (HAN Yufang, DOU Xiping. The process and prospect of comprehensive control of Yangtze Estuary[J]. The Ocean Engineering, 2020, 38(4): 11-18. (in Chinese))
- [7] DA SILVA Y J A B, CANTALICE J R B, DO NASCIMENTO C W A, et al. Bedload as an indicator of heavy metal contamination in a Brazilian anthropized watershed[J]. *Catena*, 2017, 153: 106-113.
- [8] PLEDGER A G, RICE S P, MILLETT J. Bed disturbance via foraging fish increases bedload transport during subsequent high flows and is controlled by fish size and species[J]. *Geomorphology*, 2016, 253: 83-93.
- [9] 程海峰, 刘杰, 韩露, 等. 长江口泥沙运动形式分类及对深水航道淤积影响[J]. 水科学进展, 2022, 33(5): 754-765. (CHENG Haifeng, LIU Jie, HAN Lu, et al. Classification of sediment transport forms in the Yangtze Estuary and its influence on sedimentation in the deepwater navigational channel[J]. Advances in Water Science, 2022, 33(5): 754-765. (in Chinese))
- [10] 黄胜. 长江河口演变特征[J]. 泥沙研究, 1986(4): 1-12. (HUANG Sheng. The evolution characteristics of the Yangtze River Estuary[J]. Journal of Sediment Research, 1986(4): 1-12. (in Chinese))
- [11] 陈天觉. 几种推移质泥沙测验方法综述[J]. 水利水文自动化, 1994(4): 21-23. (CHEN Tianjue. Summary of several bedload sediment measurement methods[J]. Automation in Water Resources and Hydrology, 1994(4): 21-23. (in Chinese))
- [12] 左其华, 应强, 黄海龙, 等. 坐底式全天候推移质输沙量实时监测仪研制[J]. 泥沙研究, 2015(6): 1-5. (ZUO Qihua, YING Qiang, HUANG Hailong, et al. Study on real time field bed load monitor in any weather[J]. Journal of Sediment Research, 2015(6): 1-5. (in Chinese))
- [13] RACHLEWICZ G, ZWOLIŃSKI Z, KOCIUBA W, et al. Field testing of three bedload samplers' efficiency in a gravel-bed river, Spitsbergen[J]. *Geomorphology*, 2017, 287: 90-100.
- [14] 陆雪骏, 程和琴, 胡浩, 等. 基于 ADCP 的长江河口推移质运动特性研究[J]. 海洋通报, 2015, 34(4): 385-391. (LU Xuejun, CHENG Heqin, HU Hao, et al. Study on characteristics of bed-load transport in the Yangtze River Estuary with Acoustic Doppler Current Profiler[J]. *Marine Science Bulletin*, 2015, 34(4): 385-391. (in Chinese))
- [15] 刘明潇, 张晓华, 田世民, 等. 推移质泥沙输移研究回顾与展望[J]. 水运工程, 2013(5): 26-34. (LIU Mingxiao, ZHANG Xiaohua, TIAN Shimin, et al. Reviews and prospects of the research on bed load transport[J]. *Port & Waterway Engineering*, 2013(5): 26-34. (in Chinese))
- [16] 谈泽炜, 范期锦, 郑文燕, 等. 长江口北槽航道回淤原因分析[J]. 水运工程, 2009(6): 91-102. (TAN Zewei, FAN Qijin, ZHENG Wenyan, et al. Analysis of reasons for the siltation in North Passage of Yangtze Estuary[J]. *Port & Waterway Engineering*, 2009(6): 91-102. (in Chinese))
- [17] HAN Y F, LU C T. Process research on estuarine turbidity maximum and mouth bar of Yangtze Estuary after the improvement works[J]. *Procedia Engineering*, 2015, 116: 80-87.
- [18] LUO J J, DAI Z J, WANG J, et al. Effects of human-induced riverine sediment transfer on deposition-erosion in the South Passage of the Changjiang (Yangtze) delta[J]. *Journal of Hydrology*, 2023, 622: 129714.

Observational study on bedload transport at the South Passage of the Yangtze Estuary

DING Hongwei¹, HAN Yufang¹, HU Guodong², LU Chuanteng¹, XIN Wenjie¹, ZHAO Riming¹, XIE Zhizheng¹

(1. *Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China*; 2. *Yangtze Estuary Hydrology and Water Resources Survey Bureau, Changjiang Water Resources Commission, Shanghai 200136, China*)

Abstract: In order to address the issue of lacking measured data on bedload transport at the Yangtze Estuary and study the features of bedload transport at the South Passage, a sediment observation system based on the pit-measuring method was developed for the Yangtze Estuary hydrodynamic environment, which has obtained reliable data on the bedload transport process at the mouth bar of South Passage under low disturbance. The results showed that the bedload transport rate was closely related to the flow velocity. The measured average bedload transport rate during the tide (3.3-meter average tidal range) was 0.007 kg/(m·s), while the maximum bedload transport rate generally occurred at the time of maximum flood, which was 0.045 kg/(m·s), and the maximum bedload transport rate at maximum ebb was 0.020 kg/(m·s). On the same flow velocity conditions, there were some differences in bedload transport rate, that is, the bedload transport rate during flood tide was generally greater than that during ebb tide. The single-width bedload transport rate calculated according to Dou's formula was basically consistent with the measured value, but there were some differences in magnitude. The calculated average bedload transport rate during the tide was 0.004 kg/(m·s), which was smaller than the measured value. The calculated maximum bedload transport rate at maximum flood was 0.031 kg/(m·s), while that at maximum ebb was 0.028 kg/(m·s), which means the measured value during flood tide was greater than the calculated value and vice versa during ebb tide. Therefore, the applicability of the comprehensive coefficient recommended by the formula at the Yangtze Estuary requires further exploration.

Key words: Southern Passage of the Yangtze River Estuary; bed-load sediment transport rate; tidal cycle; pit-measurement method