



新型箱式采泥器研制 及在长江口航道回淤研究中的应用^{*}

程海峰，刘杰，韩露，王珍珍，叶婷婷

(上海河口海岸科学研究中心，河口海岸交通行业重点实验室，上海 201201)

摘要：为获取河床沉积物原状样品，研制一种新型箱式采泥器，并在长江口 12.5 m 深水航道回淤研究中开展应用。结果表明：新型箱式采泥器密封性好、适应性强、成功率高、样品量多且保持原状。新型箱式采泥器采集的原状样品揭示出长江口南港北槽河床沉积物包括沙、泥、沙泥混合、沙泥分层 4 类，沉积物类型及变化特征反映了泥沙来源和沉积过程。基于沉积物原状样品粒度参数，开展南港底沙输运趋势研究及底沙对深水航道淤积影响的定量估算。

关键词：新型箱式采泥器；沉积物；原状样品；航道回淤

中图分类号：U 61

文献标志码：A

文章编号：1002-4972(2021)02-0071-08

Development of new bottom sampler and its application in study of back-siltation in the Yangtze estuary channel

CHENG Hai-feng, LIU Jie, HAN Lu, WANG Zhen-zhen, YE Ting-ting

(Shanghai Estuarine and Coastal Science Research Center, Key Laboratory of Estuarine and Coastal Project,
Ministry of Transport, Shanghai 201201, China)

Abstract: In order to sample undisturbed riverbed sediments, a new type of bottom sampler is developed and applied to the study of back-siltation in the Yangtze estuary 12.5 m deep-water channel. The results show that the new bottom sampler has advantages in tightness, adaptability, success rate of sampling, quantity, and fidelity of sediment sample. The undisturbed sediment in the south channel (SC) and north passage (NP) includes sand, mud, mixed sand-mud, and layered sand-mud, and the types and variation characteristics of sediments reflect the sediment source and deposition process. Based on the grain size parameters of undisturbed sediment samples, the bedload transport trend in SC and the quantitative influence of bedload on back-siltation in the Yangtze estuary deep-water channel are studied.

Keywords: new bottom sampler; sediment; undisturbed sample; back-siltation of channel

河床沉积物采样是水文泥沙测量、地质调查、水底生物环境观测的一项重要工作内容，沉积物保真采样对河流、海洋相关科学研究非常重要，各种研究目标的实现与沉积物样品原位信息密切相关^[1]。传统的采泥器主要有拖曳式、抓斗式和箱式采泥器等。其中，拖曳式采泥器小巧轻便，以拖拉的方式采集一段距离上的沉积物混合样品，

取样位置精度不高^[2]，无法采集单点的原状样品；抓斗式采泥器结构简单、操作方便，能采集单点样品，但其密封性能较差，采样过程中沉积物样品易受水流冲刷破坏；传统箱式采泥器易操作、效率高，但因其两侧铲刀多采用交叉连杆的方式连接，铲刀侧面与箱体侧壁存在一定的间隙，底部密封性能差，存在漏水、漏沙的缺陷^[3]。

收稿日期：2020-05-13

*基金项目：国家重点研发计划资助项目(2017YFC0405400)

作者简介：程海峰(1983—)，男，副研究员，从事河口海岸泥沙及港口航道工程研究工作。

由于传统采泥器采集到的河床沉积物多数为受扰动破坏的样品，难以精确获取原状沉积物的颗粒级配和粒度参数，制约着工程泥沙研究实践的进步。长江口 12.5 m 深水航道回淤量大、泥沙来源复杂，受传统采样技术手段限制，航道回淤泥沙特性及来源研究进展滞后。为此，本文研究提出一种能减少箱体底部漏水、避免水流对箱体内泥沙样品洗刷、实现对河床沉积物原状样品采集的新型箱式采泥器，并在长江口南港北槽 12.5 m 深水航道回淤研究中开展了应用，掌握了沉积物原状样品特性、粒度特征、迁移趋势以及底沙对航道淤积的定量影响，为明确长江口 12.5 m 深水航道回淤泥沙来源和淤积形式提供技术支持。该新型箱式采泥器在沉积物采样研究领域具有推广价值。

1 新型箱式采泥器

1.1 构造及技术参数

为克服传统采泥器的缺陷，新型箱式采泥器主要设计采用齿轮拉把传动以及带密封条的弧形铲刀，可精确控制铲刀转动位置及其与箱体之间

的间隙，使采泥器具有较好的密封性能；采用更为灵敏的弹力脱钩，提高采样成功率；在箱体中上部增加泄水孔，避免上覆水对样品的扰动。

新型箱式采泥器主要构件包括自上而下设置的弹力脱钩、活动框、固定框、箱体和齿轮铲刀（图 1），主要技术参数见表 1。

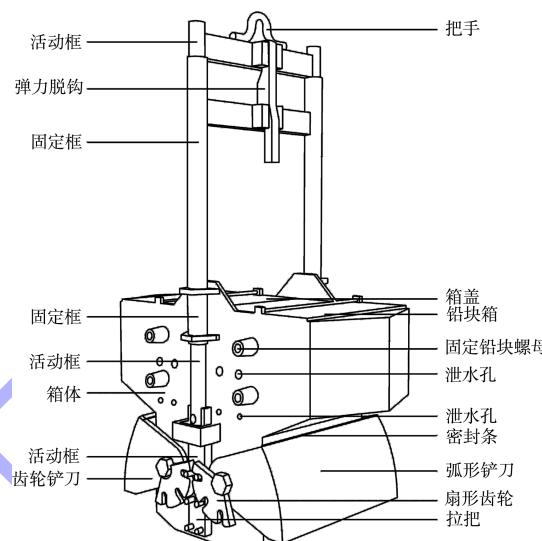


图 1 新型箱式采泥器构造

表 1 新型箱式采泥器技术参数

材质	箱体内尺寸 (长×宽×高)/ (cm×cm×cm)	箱体外尺寸 (长×宽×高)/ (cm×cm×cm)	采样面积 (cm×cm)	最大采样 厚度/cm	最大样品 质量/kg	箱体质量 (不含铅块)/kg	最大配重 (铅块)质量/kg	整备最大配重 (含铅块、样品) 质量/kg
不锈钢、铅	25×25×40	60×40×80	25×25	40	50	60	120	230

1.2 测试

新型箱式采泥器研制成型以来，在长江口南港北槽开展了 30 余次现场测试。结果表明，新型箱式采泥器性能稳定，可采集现场原状样品，适用于河流、河口及湖泊、水库、浅海水域黏土、粉砂及砂质河床沉积物的采集（图 2）。其主要特点如下：

1) 密封性好。①采用齿轮式铲刀，可精确控制铲刀转动位置及其与箱体之间的间隙，配合铲刀后侧设置的密封条，能够使铲刀在合拢时紧密贴合箱体，采泥器底部密封性能好，从而减少采泥器底部漏水，减弱水流对箱体内泥沙样品的洗刷和扰动，保证样品结构完整；②箱体中上部布置泄水孔，上大下小的排列能使采集样品的上覆

水自箱体两侧缓慢溢流，避免箱体打开时上覆水快速流出对样品的冲刷破坏，起到保护样品的作用；③在箱体顶部设置可关闭的箱盖，有效避免采泥器上提过程中箱体内、外水流交换流动对样品的影响。上述特点使得采泥器能采集到河床沉积物的原状样品。

2) 样品量多。采样厚度最大可达 40 cm，样品质量最大可达 60 kg，能实现细化分层取样，满足物理、化学、生物等指标测试对样本数量的要求。

3) 适应性强。长江口水动力强，河床沉积物包括黏土、粉砂、砂等多种类型。新型箱式采泥器能够采集到长江口不同类型的河床沉积物，尤其是较硬的砂质样。

4) 成功率高。采用弹力脱钩装置，解决了传

统箱式采泥器重力式脱钩装置灵敏度差的问题, 采样成功率达98%以上。

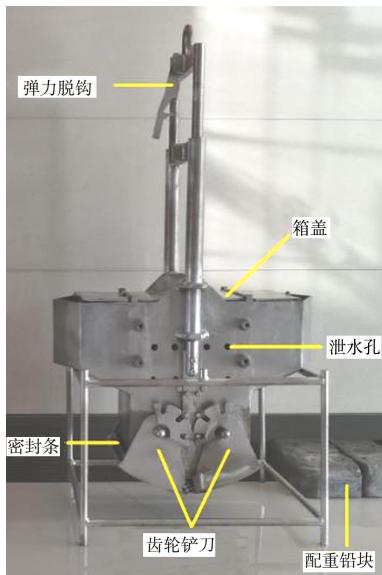


图2 新型箱式采泥器

2 在长江口航道回淤研究中的应用

长江口12.5 m深水航道位于长江口南港、北槽河段, 2010年开通之后, 深水航道存在航道回淤量大且分布集中的问题^[4]。统计结果显示, 2010—2012年长江口12.5 m深水航道主要回淤段位于南港—北槽进口段及北槽中下段(图3)。

掌握航道回淤泥沙来源和淤积形式是制定针对性航道减淤措施的关键, 而获取原状航道淤积物是分析弄清航道回淤泥沙来源和淤积形式最重要、最直接的依据。长江口水动力强劲, 局部河床底质坚硬, 过去由于传统采泥器难以采集到现场原状沉积物样品, 导致难以有效开展相关研究。2012年新型箱式采泥器研制成型以来, 在长江口南港北槽水域连续开展了30余次河床沉积物采样分析工作, 为获取原状河床沉积物和航道淤积物样品、精细化分析沉积物特性和航道回淤泥沙来源等提供了关键的技术支撑。

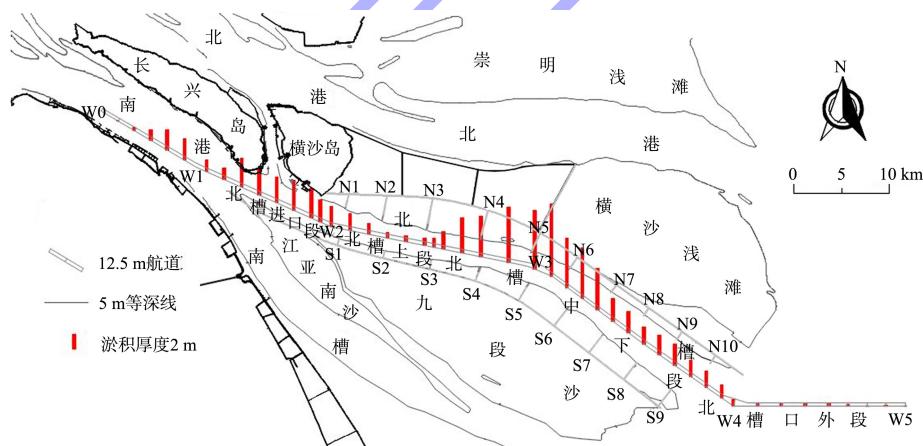


图3 2010—2012年长江口12.5 m深水航道年淤积厚度沿程分布

2.1 沉积物样品特性及分布

新型箱式采泥器采集的沉积物样品为具有一定厚度的原状样品(图4), 通过刀切横剖面可以观察到样品的垂向特性, 并进行细化分层取样。在长江口南港北槽河段采集的沉积物样品, 按目视特性可分为沙、泥、沙泥混合和沙泥分层4类。

其中, 沙样颗粒粗, 刀切面粗糙; 泥样颗粒细, 呈深灰色、硬块状, 整体性好, 刀切面平滑; 沙泥混合样品松软; 沙泥分层样品偏软, 整体性较好, 刀切面分层明显, 沙泥垂向交错排列, 单层沙或泥的厚度1~2 cm。



a) 沙样



d) 沙泥分层样



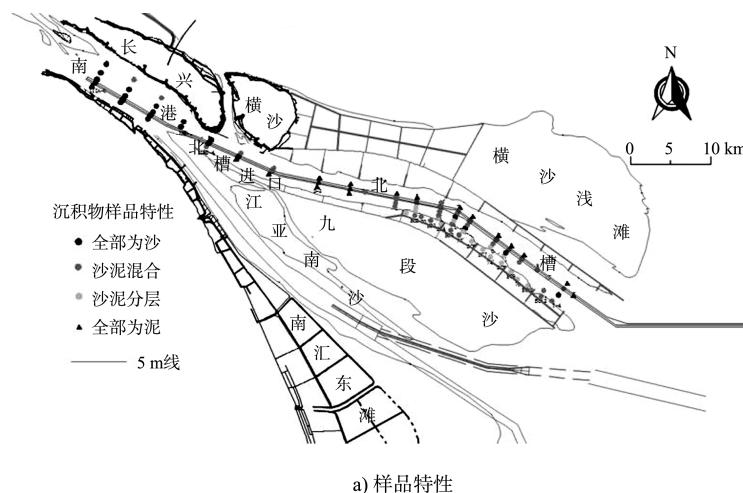
b) 泥样

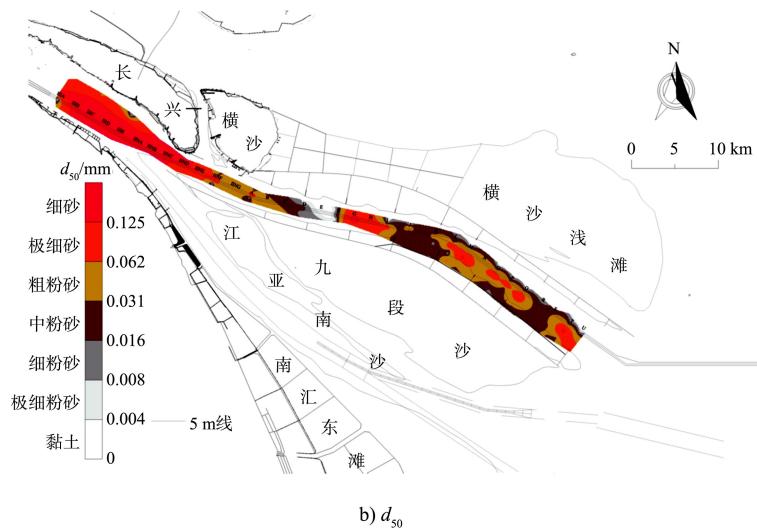
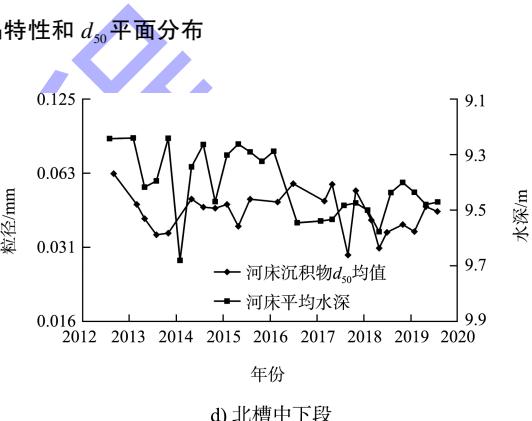
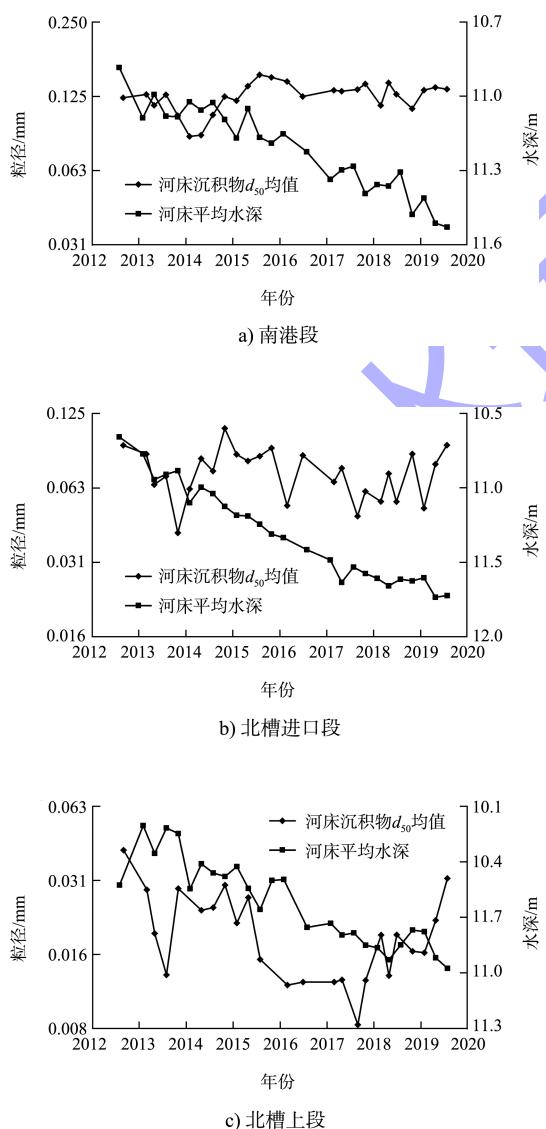


c) 沙泥混合样

图 4 长江口南港北槽河床沉积物样品

2012—2019 年采样结果(图 5、6)表明, 南港河床沉积物以粗颗粒沙样为主, 中值粒径(d_{50})均值在 0.086~0.153 mm 之间, 平均达 0.125 mm, 未出现明显粗化或细化趋势。北槽进口段主要为沙泥混合样品和泥样, d_{50} 均值在 0.041~0.109 mm 之间, 平均为 0.074 mm, 多年变化趋势亦不明显; 北槽上段以偏灰色、硬块状的泥样为主, 总体呈先细化(2012—2017 年)、后粗化(2017—2019 年)的变化态势, d_{50} 均值在 0.008~0.041 mm 之间, 平均仅 0.020 mm。北槽中下段航道及其南侧河床以沙泥混合样品为主, 同时有少量沙样和沙泥分层样品, 而北侧河床则以密实泥样为主, 北槽中下段沉积物 d_{50} 均值在 0.029~0.062 mm 之间, 平均为 0.044 mm, 年际变化趋势尚不明显。总的来看, 南港北槽河床沉积物自上而下呈南港段粗、北槽进口段较粗、北槽上段较细和北槽中下段较粗的分段特征。



图 5 2019 年南港北槽沉积物样品特性和 d_{50} 平面分布图 6 2012—2019 年南港北槽河床沉积物 d_{50} 均值及平均水深变化

沉积物分布特征对河床沉积物的泥沙来源、淤积形式具有一定的指示意义^[5]。南港落潮流优势明显^[6], 河床粗颗粒沉积物应与上游底沙输移下泄有关。北槽进口段主要为沙泥混合样品和泥样, 表明该段河床受到细颗粒悬沙落淤和上游粗颗粒底沙输移的共同影响。受长江口 12.5 m 深水航道治理工程影响, 北槽上段河床近期持续冲刷, 水深达历史最深^[7], 沉积物以偏灰色、硬块状的泥样为主, 应为较早时期沉积的密实底泥。北槽中下段航道及其南侧河床以沙泥混合和沙泥分层样品为主, 同时有少量沙样, 反映出该段河床及航道同时受到悬沙落淤和底沙输移的影响, 且在沉降密实过程中易出现分层现象; 北槽中下段航道北侧河床水深亦达历史最大, 沉积物为较早时

期沉积层的密实泥样。

南港段、北槽进口段河床 2012 年以来持续冲刷加深, 北槽中下段河床 2016 年 8 月以来较此前略深, 但对应区段沉积物总体均无明显粗化或细化趋势(图 6), 表明河床冲刷调整总体尚处于同一时期沉积层范围内, 沉积物泥沙颗粒组成未发生显著改变。北槽上段沉积物粒径与河床水深的变化过程存在一定的响应关系: 2012—2017 年随着河床不断冲深, 北槽上段沉积物逐渐变为较早时期沉积的密实底泥, 粒径呈细化态势; 而 2017—2019 年河床冲淤渐趋平衡, 沉积物有所粗化, 反映出该段沉积物特性对河床冲淤变化较为敏感。

2.2 南港沉积物运移趋势

沉积物的粒度参数常用于识别沉积环境类型

或判定物质运动方式^[8]。在满足沉积物样品属于同一个运输体系(或研究区处于堆积状态)、采样深度代表同一时间尺度河床沉积物、沉积物样品颗粒级配准确等条件下，可依据沉积物粒度参数空间变化计算出沉积物迁移趋势^[9]。

长江口 12.5 m 深水航道开通后的 2010—2012 年，南港航道北侧存在明显的纵向淤积区（图 7），淤积幅度多在 10 cm 以上，局部达 50 cm 以上，该区域沉积物样品采样深度在 5~30 cm 之间，且用于分析的样品为沉积物表面 1~3 cm 厚度范围取样样品，属于同一时间尺度的河床沉积物，同时新型箱式采泥器保证了沉积物样品的原状性和颗粒级配的精确性，可满足沉积物运移趋势分析的要求。

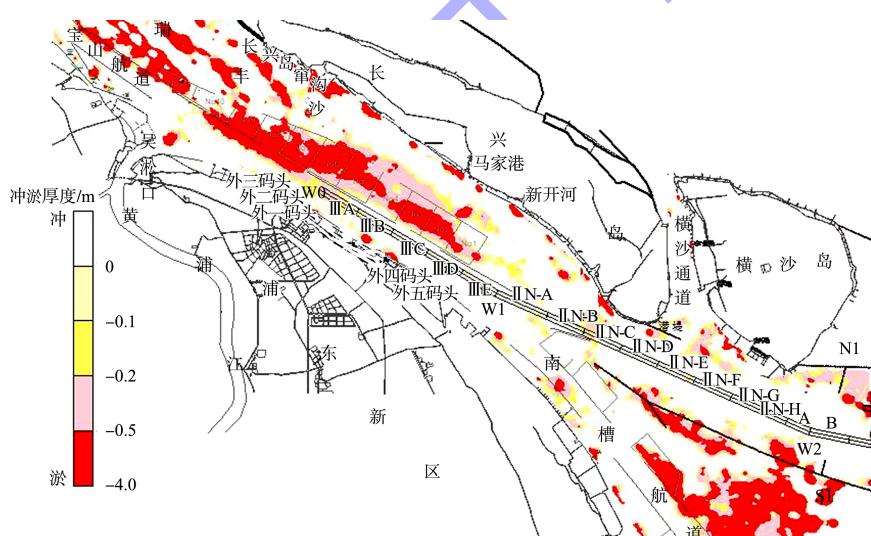


图 7 2010—2012 年南港河床淤积分布

笔者针对南港河段特性改进了 Gao-Collins 二维沉积物粒径趋势分析模型^[10-11]。优化模型计算结果表明, 南港航道北侧总体存在明显自上向下的运移趋势, 且部分采样点的沉积物运移方向指

向下游航道内(图8)。可见,南港河床沉积物主要来自上游,航道淤积受到上游及北侧底沙输移的影响。

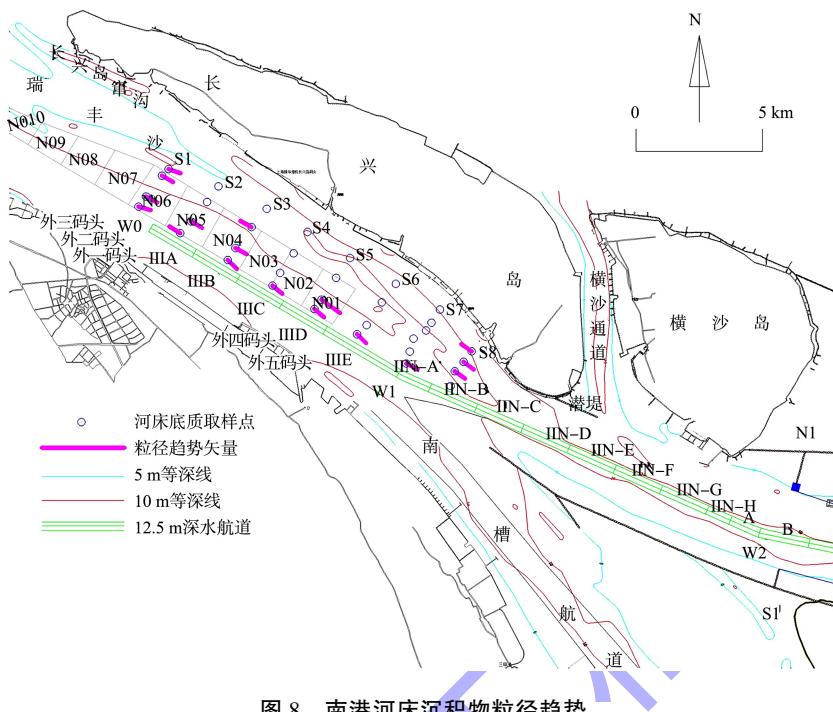


图8 南港河床沉积物粒径趋势

2.3 航道回淤底沙占比定量估算

前文沉积物样品特性分析结果表明长江口12.5 m深水航道不同区段悬、底沙回淤的影响不同。传统采泥器的样品原状性差, 难以精确获取航道淤积物的颗粒级配, 无法对航道回淤悬、底沙比例进行定量计算。笔者在新型箱式采泥器获取真实、准确的航道淤积物的基础上, 采用悬沙级配曲线上拐点法来确定悬、底沙的分界粒径, 进而计算悬、底沙在航道淤积物中的占比。

图9是典型潮情下底层悬沙样品级配曲线。由图9可知, 在级配曲线纵坐标90%~95% (粒径累积频率)附近, 级配曲线均出现明显的拐点, 表明泥沙运动形式发生质变^[12-13], 涨落急时刻底层悬沙级配曲线上拐点对应粒径可作为悬、底沙的分界粒径。依据上述方法计算得到的2012—2019年南港、北槽悬底沙分界粒径分别在0.100、0.075 mm左右。在此基础上, 针对深水航道淤积物颗粒级配计算出悬、底沙所占比例。结果表明, 南港航道以底沙淤积为主, 占比在60%~80%; 北槽进口段航道底沙淤积占比在40%~50%之间; 北槽航道以悬沙淤积为主, 其中上段底沙淤积占比仅20%, 中下段是深水航道淤积重点区段, 底沙淤积占比

在30%左右。总的来看, 底沙对深水航道回淤的影响自上而下逐渐减弱。

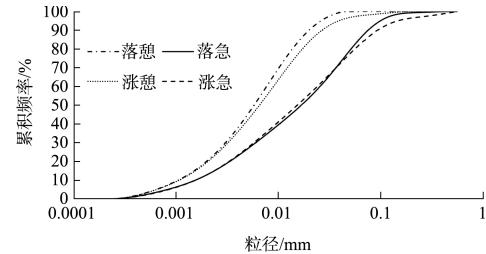


图9 典型潮情下底层悬沙级配曲线

3 结论

1) 新型箱式采泥器采用带密封条的齿轮铲刀、箱体上部泄水孔及弹力脱钩等新结构设计, 具有密封性好、适应性强、成功率高、样品量多的特点, 保证了沉积物样品的原状特性, 可为河床沉积物物理、化学、生物特性分析提供技术保障。

2) 新型箱式采泥器采集的原状样品揭示出长江口南港北槽河床沉积物存在沙、泥、沙泥混合、沙泥分层4种类型, 沉积物自上而下呈南港段粗、北槽进口段较粗、北槽上段较细和北槽中下段较粗的分段特征。2012—2019年, 南港段、北槽进口段和北槽中下段沉积物无明显粗化或细化趋势; 北槽上段沉积物先细化、后粗化, 沉积物粒径对

河床冲淤变化较为敏感。沉积物类型及变化特征反映出泥沙来源和沉积过程。

3) 基于沉积物原状样品粒度参数, 计算了南港底沙输运趋势及深水航道回淤底沙占比。南港航道底沙淤积占比达 60%~80%, 且航道北侧河床存在粗颗粒泥沙向下游及南侧输运的趋势; 北槽进口航道底沙淤积占比在 40%~50%; 北槽上段及中下段航道底沙淤积占比为 20%~30%。底沙对深水航道回淤影响自上而下逐渐减弱。

4) 新型箱式采泥器在长江口测试应用效果良好, 能够采集黏土、粉沙、沙等不同类型河床沉积物, 适用于河流、河口、湖泊、水库、浅海等水域。

参考文献:

- [1] 秦华伟, 陈鹰, 顾临怡, 等. 海底沉积物保真采样技术研究进展[J]. 热带海洋学报, 2009, 28(4): 42-48.
- [2] 冯建军, 朱承英. 厚壁取土器在底质取样中的改进应用[J]. 水运工程, 2012(12): 215-217, 224.
- [3] 耿雪樵, 徐行, 刘方兰, 等. 我国海底取样设备的现状与发展趋势[J]. 地质装备, 2009, 10(4): 11-16.
- [4] 刘杰, 程海峰, 赵德招. 长江口 12.5 m 深水航道回淤特征[J]. 水科学进展, 2014, 25(3): 358-365.

(上接第 37 页)

参考文献:

- [1] 陈浩. 激光雷达测量技术及其应用[J]. 电子技术与软件工程, 2017(3): 125-125.
- [2] 束庆波. 浅析机载激光雷达测量系统的误差检校方法[J]. 低碳世界, 2015(2): 304-305.
- [3] 吴端松. 机载激光雷达测绘技术矿山测量中应用研究[J]. 世界有色金属, 2019, 518(2): 21-22.
- [4] 吕潮峰. 激光雷达三维重建与测量系统关键技术研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2007.
- [5] 张传帅, 焦利国. 基于车载 LiDAR 系统的路面高程测量研究[J]. 中州煤炭, 2013(5): 20-22.
- [6] 易恒. 激光雷达测量技术的进展与应用[J]. 山西建筑,

- [5] 陈沈良, 严肃庄, 李玉中. 长江口及其邻近海域表层沉积物分布特征[J]. 长江流域资源与环境, 2009, 18(2): 152-156.
- [6] 王永红, 沈焕庭, 李九发, 等. 长江河口涨落潮槽沉积物特征及其动力响应[J]. 沉积学报, 2009, 27(3): 511-517.
- [7] 上海河口海岸科学研究中心. 2012—2019 年长江口航道养护河床质采样分析报告[R]. 上海: 上海河口海岸科学研究中心, 2019.
- [8] 高抒, Michael Collins. 沉积物粒径趋势与海洋沉积动力学[J]. 中国科学基金, 1998(4): 3-5.
- [9] 高抒. 沉积物粒径趋势分析: 原理与应用条件[J]. 沉积学报, 2009, 27(5): 826-836.
- [10] GAO S. A FORTRAIN program for grain-size trend analysis to define net sediment transport pathways[J]. Computers and geosciences, 1996, 22(4): 449-552.
- [11] 程海峰, 刘杰, 赵德招, 等. 2012 年枯季长江口南港河床沉积物空间分布及运移趋势研究[C]//中国海洋工程学会. 第十六届中国海洋(岸)工程学术讨论会论文集. 大连: 海洋出版社, 2013: 1237-1242.
- [12] 陈立, 明宗富. 河流动力学[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2001.
- [13] 陈槐, 朱立俊, 王建中, 等. 床沙质与冲泻质划分方法综述[J]. 泥沙研究, 2016(4): 74-80.

(本文编辑 郭雪珍)

2013, 39(20): 209-211.

- [7] 刘小兵, 黄飞. GPS PPK 技术在测量外业中的应用探讨[J]. 建材与装饰, 2017(19): 234-235.
- [8] 李哲, 高立, 乔辉. GPS PPK 技术在测量外业生产中的案例应用[J]. 测绘与空间地理信息, 2012, 35(4): 128-131, 134.
- [9] 王智, 曹庆磊, 张洪德, 等. PPK 动态后处理测量技术及精度分析[J]. 城市勘测, 2019, 170(2): 97-100.
- [10] 中交天津航道局有限公司. 水运工程测量规范: JTS 131—2012[S]. 北京: 人民交通出版社, 2012.

(本文编辑 郭雪珍)