

河口海岸浮泥观测技术、特性及运移规律研究进展

李为华¹, 时连强², 刘猛¹, 刘高峰¹

(1. 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;
2. 国家海洋局第二海洋研究所 国家海岛开发与管理研究中心, 浙江 杭州 310012)

摘要: 对近期国内外浮泥观测技术、特性及运移规律研究成果进行了系统综述。在此基础上提出今后需要进一步开展深入研究的课题包括: (1) 现场低频超声声强信号反演浮泥密度、流变特性的关键技术; (2) 风暴潮作用下的浮泥发育及运移机理; (3) 浮泥对港口、航道回淤的影响; (4) 异重流形式的浮泥坡面运移规律。

关键词: 浮泥; 观测技术; 特性; 运移规律; 研究进展

中图分类号: TV148 文献标识码: B 文章编号: 0468-155X(2013)01-0074-07

1 引言

20世纪50年代 Inglis 和 Allen^[1] 在研究 Thames 河口泥沙运动规律时首次将近底高含沙水体称为浮泥(Fluid Mud), 此后该名词逐渐为从事细颗粒泥沙运动研究的专家学者所接受, 特指理化性质有别于一般低浓度含沙水体的近底细颗粒泥沙、有机物和水的混合物, 是一种普遍存在于淤泥质沉积环境中悬沙落淤或土体液化起悬的中间产物, 其密度或含沙量变幅较大, 见诸报道的实测浮泥含沙量可从每立方米十千克至数百千克^[2]。

浮泥多见于淤泥质的河口、海岸、湖泊和水库中^[3], 内陆河流航道中亦偶有发现^[4], 且尤以人工浚深后的淤泥质港口、航道内最为普遍, 我国如天津港^[5]、连云港^[6]、长江口南槽铜沙航道^[2]、长江口北槽深水航道^[7]、象山港^[8]和广州港^[9]等。

当浮泥体量较大时, 可造成掩埋底栖生物、底泥富营养化和航道骤淤后碍航等生态、环境以及航行安全等问题^[10-13]。因此, 出于港口、航道管理及河、湖整治的需要, 自70年代开始, 上述问题已引起国内外诸多专家学者的广泛关注, 并取得了一系列重要研究成果。本文主要综述当前国内外关于浮泥特性及产生、运移规律方面研究所取得的代表性成果, 以为后续研究工作提供借鉴。

2 浮泥的观测技术

浮泥层厚度、密度垂向分布和流变特性等参数是浮泥现场观测中尤为关注的主要特征参数。对于这些特征参数, 自70年代以来产生了一系列接触式和非接触式的测量手段, 概括而言主要包括四类。其一为基于放射性射线强度在浮泥中传播沿程衰减原理的放射性非接触式浮泥密度测量手段, 如90年代以前广泛使用的 γ 射线密度计^[14]; 其二为基于超声波强度在浮泥中传播沿程衰减原理的声学非接触式浮泥密度测量手段^[15], 如广泛应用于航道浮泥监测的双频测深仪^[16]、曾应用于长江口浮泥测量的HSDM密度计^[17]、英国产AQUAscatter后向散射泥沙浓度剖面仪^[18]、中科院东海研究站研制的ASSM声学悬沙剖面仪^[2], 甚至亦有部分学者曾尝试采用ADCP流速剖面仪声强信号反演浮泥表层密度^[19]; 其三

收稿日期: 2011-08-19

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(50939003); 国家自然科学基金项目(40806038)

作者简介: 李为华(1982-), 男, 山东沂南人, 博士, 主要从事河口动力沉积与动力地貌研究。E-mail: liweihua0903@163.com

为基于处于谐振状态振子的共振频率在不同密度流体中存在差异原理的非接触式音叉密度测量手段^[20]，如荷兰产 Rheotune 音叉密度计^[8]；其四为基于密度不同的流体对同一物体所产生浮力亦不同的原理的测深砵类接触式浮泥厚度测量手段^[6]，如曾广泛应用于天津港适航水深测量作业的三爪砵^[21]。

出于操作人员安全问题的考量，上述第一类放射性测量手段目前已基本不再使用。而对于上述第二类超声原理的浮泥测量手段，情况相对较为复杂，此类测量手段可量测的参数、精度及测量效率各有千秋。其中双频测深仪测深精度较高，在将高、低频水深简单地对应为浮泥层上、下界面的前提下可直接得出浮泥层厚度，具有可船载非接触式快速测量的优点，该方法曾应用于长江口南槽铜沙航槽适航水深论证工作^[22]，但存在复杂动力沉积环境下测深仪数字化水深与浮泥层上下界面并非一一对应、高含沙水流条件下测深仪难于获得有效数字化水深的缺点^[23-24]；HSDM 密度计尽管与双频测深仪低频回波信号反演浮泥密度的原理相同，但由于其舍弃测量浮泥密度剖面的诉求，而重点关注发射与接收端间准空间点上的浮泥密度，从而精度较前者明显提高，配合压力探头亦可实现浮泥密度垂向剖面的准同步观测，但测量效率较低^[25]；AQUAscatter 后向散射泥沙浓度剖面仪与 ASSM 声学悬沙剖面仪是同类测量仪器，测量方式和成果形式与双频测深仪本质上大同小异，精度较高，但量程较低（一般为 $0.1 \sim 20 \text{kg/m}^3$ ）^[26]，仅可监测浮泥表层密度特征，更适合于水体悬沙浓度测量；ADCP 声强信号反演浮泥密度的局限性与 AQUAscatter 和 ASSM 相同，其原理和成果形式与双频回声测深仪基本一致^[27]，但追求垂向高密度分层流速测量的设计初衷导致 ADCP 发射的超声频率普遍较高，这与浮泥密度测量要求低超声频率、高穿透性的诉求相左，故一般仅用来反演低含沙水体密度（或含沙量），但精度普遍不高，甚至当水体中悬沙浓度较高时，其反演表层浮泥密度亦极为困难，加之船载方式 ADCP 垂向单元分层厚度为数十厘米量级，相应反演所得浮泥上界面位置精度亦较为粗糙，故总体而言，ADCP 反演浮泥密度、厚度特征并不合适；此外，因浮泥发育时，ADCP 底跟踪技术探测到的底床部分情况下为流动的浮泥层，通过求取 ADCP 底跟踪和 GPS 所得船体运动速度矢量和的方式可以获得上层浮泥运动速度，如吴中等^[28]即曾在长江口北槽内开展过类似尝试性研究，这对于浮泥运动规律的研究无疑是很有意义的。但必须指出，因 ADCP 声强信号在高含沙水体中易快速衰减的缘故，存在所得成果仅代表浮泥上部高含沙水体的运动速度的情况。故开展此类观测研究时，配合低频回声测深仪或浮泥密度测量设备对所得运动速度对应水深处的水体性质加以识别是极为必要的。

对于上述第三类基于谐振原理的音叉密度测量手段，其在使用方式及成果形式上与 γ 射线密度计和 HSDM 密度计是一致的，其稳定性和测量精度与 γ 射线密度计相仿，但明显高于 HSDM 密度计，且近年来部分生产厂商开始尝试探索基于音叉密度计反演浮泥流变特性以适应港口、航道适航水深测量的需要，如荷兰产 SILAS 适航水深监测系统即将 Rheotune 音叉密度计整合为标准组件，直接采用其密度、屈服应力和粘性系数测量结果作为低频回波信号的标定参考值^[29]。故总体上从测量精度、量程、稳定性以及可测量参数多寡方面而言，音叉密度计是目前最为先进的浮泥现场测量仪器，将其与双频测深仪配合使用，应用市场及发展前景均较好。

上述第四类以测深砵为代表的接触式浮泥厚度测量手段具有制作简单灵活、价格低廉和操作简便的优点，但其对测量环境和测量人员要求较高，其精度受到仪器制造过程、测量时的水动力情况、浮泥发育情况、测量员的感知和熟练程度综合影响，测量精度总体较低^[21]，加之其仅能大致获得浮泥层厚度，测量成果单一，在实际应用中目前已基本为音叉密度计所代替，仅在一些存在巨厚浮泥层的港口、航道内仍将其作适航水深快速监测的技术手段之一，如天津港^[21]。

3 浮泥特性

3.1 物质组成

见诸报道的浮泥粒度分析结果均表明^[3-5,7]，浮泥主要由明显具有粘滞性的粘土和粉砂类细颗粒泥沙组成，主要颗粒组成一般不超过 $63 \mu\text{m}$ （亦有 $74 \mu\text{m}$ 说法，即筛分法中泰勒筛的 200 目孔径），打散后的浮泥中值粒径一般不超过典型絮凝临界粒径—— $20 \sim 30 \mu\text{m}$ ^[30]，与相应区域悬沙粒度组成基本一致。

一般有机质含量较低的浮泥主要由粘土矿物和石英、云母等非粘土矿物组成，其中粘土矿物成分随

所处区域不同而有所差异。如法国 Gironde 河口浮泥中粘土矿物占 60% ~ 70% ,石英占 20% ~ 25% ,方解石占 5% ~ 10% ,其中粘土矿物约 75% 为蒙脱石和伊利石 ,高岭土和绿泥石等其他矿物含量较低 ,且当洪季河流来沙较多时 ,浮泥中以石英为主的较粗泥沙颗粒含量亦会有所增加^[31] ;美国莫比尔湾 (Mobile Bay) 疏浚浮泥中粘土矿物主要为高岭土和蒙脱石 ,而 James 河疏浚浮泥的粘土矿物则主要由伊利石和绿泥石组成^[32] ;巴西 Amapa 海岸浮泥中约 20% ~ 40% 为伊利石、蒙脱石和石英 ,少于 5% 为高岭土和长石^[33] ;长江口浮泥的粘土矿物中伊利石占据绝对优势(70% ~ 76%) ,高岭石和绿泥石含量次之约占 9% ~ 19% ,蒙脱石含量极低(约占 1%)^[34] 。

弱动力沉积环境的淤泥质湖泊、水库中发育的浮泥的往往富含有机质 ,如富营养化严重的美国大型浅水湖泊 Apopka 湖 ,波浪作用下形成的约 45cm 厚的浮泥中 ,固态物质中约 63% 为处于分解过程的藻类等有机质^[35] ;而较处于强动力沉积环境下的淤泥质河口、海岸以及海湾区域 ,通常浮泥的固态物质组成中有机质含量普遍较低 ,这与此类沉积环境中悬沙含量相对于有机质普遍占据绝对优势有关 ,如亚马逊河水体中的悬浮固体颗粒仅 2% 为有机质^[36] ,美国的 Eel 河^[37]、黄河口和长江口^[38] 等情况亦大抵如此。

3.2 流变特性

随浮泥理化特性及应力应变状态不同 ,浮泥可表现为伪塑性体、粘塑性体(宾汉体) 和粘弹性流体^[39] ,但多数情况下 ,浮泥通常表现为粘塑性体(宾汉体) 特征^[40] ,即浮泥剪应力满足如下流变方程

$$\tau = \tau_b + \eta_p \frac{dv}{dy} \quad (1)$$

式中 τ_b 为宾汉剪切应力 η_p 为刚度系数 $\frac{dv}{dy}$ 为流速梯度。

浮泥的流变特性直接决定船舶航行的效率和安全 ,近年来港口航道管理部门在确定适航水深时不仅参考浮泥的密度垂向分布特征 ,亦开始注重考虑浮泥的流变特性参数^[41] 。通常认为 ,密度是浮泥宾汉剪切应力和刚度系数的首要影响因素 ,浮泥的流变特性受水温、盐度的影响较小 ,宾汉剪切应力与刚度系数通常是密度的指数函数^[2, 40] 。

3.3 固结特性

浮泥自群体沉降阶段 ,经阻滞沉降阶段至固结排水阶段的历时长短 ,与其物质组成^[3]、初始含沙量关系密切。室内静水实验表明 ,长江口南槽浮泥初始密度 $1.15\text{g}/\text{m}^3$ 的浮泥沉降、固结至 $1.30\text{g}/\text{m}^3$ 密度需时约 8h^[42] ,而初始含沙量分别为 80、110 和 $140\text{g}/\text{cm}^3$ 的长江口北槽浮泥自开始群体沉降阶段至固结排水阶段所需时间分别为 8.5h、9.5h 和 10.0h^[41] 。

不同波浪、潮流动力条件和浮泥固结特性的组合下 ,往往导致浮泥消亡时间存在较大差异。如天津港浮泥产生后可以持续存在数月之久^[43] ,而长江口北槽深水航道内非特大强度的浮泥的持续周期则一般不超过 7 天。^①

4 浮泥的成因

本质上而言 ,浮泥是由于粘性细颗粒泥沙为主的固态颗粒处于群体沉降或阻滞沉降阶段时 ,水沙混合体排水速率小于水体内泥沙净输入速率而产生^[30, 44] ,是床面淤积过程或新淤淤泥发生液化的床面侵蚀过程的中间过渡产物^[3] 。

通常认为 ,至少在淤积环境中产生的浮泥与细颗粒泥沙絮凝密切相关^[7] ,且充足的细颗粒泥沙供给(如河口最大浑浊带内大量的细颗粒悬沙絮凝沉降^[22] ,新淤淤泥在强波浪作用下液化、起悬^[45] 亦或疏浚抛泥^[32] 等) 和较弱的水动力环境(如河口、海岸区域的减速和憩流阶段的潮汐水流)^[2, 46] 是浮泥产生的必要先决条件 ,即相应存在憩流浮泥、盐水楔浮泥、风暴潮浮泥和人工干预浮泥四种成因类型。但必须指出 ,与河口最大浑浊带浮泥发育密切相关的细颗粒泥沙絮凝机理问题的研究工作尚嫌不足 ,关于

① 李为华. 长江口北槽深水航道三期工程浮泥现场观测研究[R]. 上海: 上海河口海岸科学研究中心, 2011.

有机絮凝及盐絮凝机制在河口最大浑浊带细颗粒泥沙絮凝过程中所扮演的角色问题仍存在一定争议^[47]。

此外,亦有学者指出,在富营养化严重的淤泥质湖泊和海湾内,底泥中大量有机质的存在可有效地抑制浮泥的排水、固结过程,使得浮泥发育的概率和持续时间大幅增加^[3]。这一方面在于有机质密度相对较轻,可显著减小浮泥的有效重力;另一方面亦与有机物在厌氧分解过程中产生的大量 CO_2 、 NH_3 、 H_2S 和烷烃类气体可增加浮泥内部的紊动强度有关。

5 浮泥的运动

5.1 水流、波浪作用下的浮泥运动

曹祖德^[40]、罗肇森等^[48]认为,潮流作用下较小密度的浮泥具有很大的流动性,可作为塑性流体看待,当潮流大到一定程度时,浮泥面上将出现完全等同于异重流界面波现象的波动,随着潮流速度的加大,底层紊动强度也大大加强,浮泥界面波波峰加大,波形发生卷曲,最后浮泥面破碎,浮泥开始转化为悬移运动;而对于那些密度较大($1200\text{kg}/\text{m}^3$ 以上)的浮泥,其黏度较高,在潮流的作用下不再出现波动现象,而是被掀起扬入水中,随水流流速的大小或做蠕动、缕移或悬扬运动。即大量悬扬进入水体是密度较大的高强度浮泥的主要输移形式,且浮泥的悬扬量同水流速成正比,同密度成反比^[49,50],而近底剪切流动是密度较小的浮泥的主要输移形式^[48,49]。

浮泥悬扬起动流速是判定高密度浮泥上表破坏、消亡的重要临界水力条件。目前浮泥悬扬流速主要基于实验数据分析统计拟合结合量纲分析方法确定,且多将浮泥密度和流变特性参数作为浮泥悬扬流速的主要控制参数^[5,40,51,52]。

波浪与浮泥的相互作用尤为复杂,一方面波浪是浮泥发育的重要动力因子,另一方面浮泥则存在明显的消浪作用。该方面的研究主要基于室内水槽实验进行。曹祖德^[53,54]、赵子丹等^[55-60]的水槽实验结果均表明,在波浪的作用下,当浮泥密度较小时,浮泥界面将随表面波的振荡面做相应的起伏,此时是波高很小的界面波,只有当表面波出现破碎的时候,界面波才会发生局部破碎而引起浮泥中的泥沙悬浮;当浮泥密度较大,表面波发生作用时,浮泥松动,级配中细小的泥沙颗粒发生悬扬。随着波浪作用时间的加长或表面波的加大,浮泥界面波将发生破坏,泥沙悬扬,且浮泥界面波的尺度与波浪的大小和泥沙的特性有关。赵子丹^[57]研究成果表明,波浪作用不仅可以引起界面波,而且可以携带底部浮泥沿波浪前进方向输移,波浪作用下的浮泥切动层厚度与波浪角频率的0.5次方成正比,而与浮泥密度的0.5次方成反比,且波浪尺度越大,浮泥密度越小则浮泥层水平运动速度越大。

李九发等^[17]、张华等^[41]在长江口北槽的研究成果表明:潮流作用下的浮泥发育、运动存在潮周期性和洪、枯季变化。涨落憩前后,水流动力较弱,浮泥趋于增强;而涨落急时刻,水流动力转强,悬沙絮凝体破坏,浮泥面发生再悬浮,浮泥趋于消亡;洪季时浮泥强度明显大于枯季。

总体而言,目前国内外关于感潮区域波、流共同作用下浮泥(尤其是风暴潮作用产生的浮泥)运移规律的研究基本仍处于定性认识阶段,且多着眼于浮泥对应的水流挟沙力和输沙率等与港口、航道淤积相关的工程泥沙问题^[61-63],多为半经验性质理论成果,这主要与波流共同作用下浮泥室内机理性实验极为复杂,且在河口、海岸区域开展浮泥现场观测的难度较大有关。

5.2 异重流形式的浮泥运动

当床面存在一定坡度时,浮泥可以在重力作用下以浊流形式滑移运动,即异重流。坡面底床上的浮泥异重流是浊流沉积的一种普遍表现形式,广泛存在于国内外淤泥质河口、海岸区域。如意大利的Po河口^[64]、美国的Amazon河口^[65]、新几内亚的Fly河口^[65]、中国的黄河口^[66]、新西兰的Waiapu河口^[67]以及印度西南海岸^[68]等,其对于河口最大浑浊带内深槽以及航道挖槽的淤积存在一定贡献。

Wright^[66]认为,当缺乏足够强度的外界驱动力(水流或波浪)时,对于低密度的浮泥层(一般含沙量不超过 $200\text{kg}/\text{m}^3$),足够陡峭的床面坡度是浮泥形成异重流的先决条件,当床面坡度过缓时,浮泥的重力作用难以克服内部剪切阻力,从而无法产生稳定的异重流。一般而言,在没有潮流或波浪等外力作用下,当床面坡度超过临界抗剪坡度时,浮泥即可在自身重力作用下加速向低处流动;而对于坡度明显小

于临界抗剪坡度的底床上的浮泥,在缺乏波浪或潮流等外力驱动的情况下,一般难以形成持续的异重流,这种情况下的浮泥层内泥沙在坡面上流动的过程中会逐渐沉降淤积,沿程含沙量和运动速率均逐渐衰减,坡面流动难以为继。Ali^[69]、Traykovski^[45]等基于室内水槽实验及理论推导结果亦证实了上述结论,但当前已发表的理论推导结果多基于层流流态假定,而将其应用至现场情况时往往所得水流雷诺数极大,合理性不够。洪柔嘉等^[5]则认为浮泥层的临界抗剪坡度与浮泥的厚度、容重、宾汉极限剪应力、矿物组成和颗粒级配、水质及是否露出水面等因素有关,且其基于天津新港浮泥的试验结果表明,浮泥在露出水面时的抗剪坡度约为水下时的三分之一,抗剪坡度与浮泥密度呈指数关系,密度越大,相应抗剪坡度越大;抗剪坡度与宾汉极限剪切应力呈线性正相关关系,密度小于 $1\ 100\text{kg}/\text{m}^3$ 的水下浮泥抗剪坡度极小,不超过0.002,密度为 $1\ 200\text{kg}/\text{m}^3$ 的水下浮泥抗剪坡度则为0.0055。

当存在显著的波浪或潮流等外力驱动时,外力作用对浮泥异重流的贡献取决于作用力的方向与下坡方向是否一致,当两者一致时,有助于克服浮泥内部剪切阻力而加快浮泥异重流的形成,并有效减小浮泥异重流发生时的临界坡度,如Scully等^[70]曾在Eel河口观测到,强浪作用下,在坡度为 0.3° 的底床上存在约10cm厚度的浮泥层以异重流形式滑移运动,运动速率可达 $0.5\text{m}/\text{s}$ 。

6 结语

尽管当前国内外关于浮泥特性、产生及运移规律方面的研究已取得了一系列成果,但在以下几个方面的进展仍嫌不足,尚有待于进一步开展研究:

- (1) 低频超声声强信号反演浮泥密度、流变特性的关键技术。
- (2) 风暴潮作用下的浮泥发育及运移机理。
- (3) 浮泥对港口、航道回淤的影响。
- (4) 异重流形式的浮泥坡面运移规律。

参考文献:

- [1] Inglis C. C., Allen F. H. . The regimen of the Thames estuary as affected by currents, salinities, and river flow [C]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Maritime and Waterways Engineering Division Meeting, 1957: 827 - 868.
- [2] 李九发,何青,徐海根. 长江河口浮泥形成机理及变化过程[J]. 海洋与湖沼, 2001(3): 302 - 310.
- [3] McAnally W. H., Friedrichs C., Hamilton D. et al. . Management of fluid mud in estuaries, bays, and lakes. I: present state of understanding on character and behavior [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007, 133(1): 9 - 22.
- [4] Haydel J. F., McAnally W. H. . Sediment resuspension by tows [A]. Proc. 83rd Transportation Research Board [C], Washington, D. C. 2004: 1960.
- [5] 洪柔嘉, 应永良. 水流作用下的浮泥起动流速试验研究[J]. 水利学报, 1988(8): 49 - 55.
- [6] 中华人民共和国交通运输部. JTJ325 - 2006 淤泥质海港通航水深应用技术规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2006.
- [7] 李九发, 戴志军, 刘启贞, 等. 长江河口絮凝泥沙颗粒粒径与浮泥形成现场观测[J]. 泥沙研究, 2008(3): 26 - 32.
- [8] 许宝华, 王真祥. 象山港进港航道外干门浅段试挖槽浮泥观测研究[J]. 人民长江, 2009(22): 67 - 68.
- [9] 梅剑云, 孙月, 李占元. 国华台电煤港通航水深应用研究[J]. 水道港口, 2008(5): 314 - 317.
- [10] CTH. Estuarine navigation projects technical bulletin 17 [R]. Vicksburg, Miss: Corps of Engineers Committee on Tidal Hydraulics, 1971.
- [11] Parker W. R., Kirby R. . Time dependent properties of cohesive sediment relevant to sedimentation management - European experience [A]. Kennedy V. S. . Estuarine Comparisons. New York: Academic Press, 1982: 573 - 589.
- [12] Corselli C., Basso D. . First evidence of benthic communities based on chemosynthesis on the Napoli mud volcano (Eastern Mediterranean) [J]. Marine Geology, 1996, 132(1 - 4): 227 - 239.
- [13] Montserrat F., Suykerbuyk W., Al-Busaidi R. et al. . Effects of mud sedimentation on lugworm ecosystem engineering [J]. Journal of Sea Research, 2011, 65(1): 170 - 181.
- [14] 吴永进, 韦立新, 郭吉堂, 等. γ -射线测沙仪测量浮泥、淤泥容重的新进展[J]. 泥沙研究, 2009(6): 60 - 64.
- [15] 钱炳兴, 凌鸿烈, 孙跃秋, 等. 超声波浮泥重度测量仪[J]. 声学技术, 2001(1): 42 - 44.
- [16] 张俊, 顾亚平, 查雨, 等. 双频测深仪对淤泥层测定的研究[J]. 仪器仪表学报, 2002: 492 - 493.

- [17] 李九发,何青,向卫华,等.长江河口北槽浮泥消长过程的现场观测[J].长江流域资源与环境,2001,10(5):407-412.
- [18] Warrick J. A., Xu J., Noble M. A., et al. Rapid formation of hyperpycnal sediment gravity currents offshore of a semi-arid California river[J]. Continental Shelf Research, 2008, 28(8):991-1009.
- [19] Schrottko K., Becker M., Bartholomäus A., et al. Fluid mud dynamics in the Weser estuary turbidity zone tracked by high-resolution side-scan sonar and parametric sub-bottom profiler[J]. Geo-Marine Letters, 2006, 26(3):185-198.
- [20] 赵长庚. 音叉振动式密度计[J]. 仪表技术与传感器, 1989(6):30-31.
- [21] 牛桂芝,裴文斌. 三爪轮测量适航水深技术分析对策[J]. 水道港口, 2006(4):265-268.
- [22] 徐海根,徐海涛,李九发. 长江口浮泥层“适航水深”初步研究[J]. 华东师范大学学报(自然科学版), 1994(2):91-97.
- [23] 陈学良. 连云港浮泥测试及“适航深度”的确定[J]. 水运工程, 1998(8):29-32.
- [24] 奚民伟. 浮泥层测量及其应用[J]. 海洋测绘, 2001(3):55-57.
- [25] 郑乔雄,李纪元,章泳明. 水深测量的全新技术——适航水深测量[J]. 海洋测绘, 1997(3):35-41.
- [26] Aquatec Group Ltd. The AQUAscat 1000 Acoustic Backscatter System [EB/OL] 2011-7-20. http://www.fzk.uni-hannover.de/fileadmin/institut/Ausstattung/Messinstrumente/Suspensionsmessgeraete_-_ABS/AQUAscat1000.pdf.
- [27] Hoitink A., Hoekstra P. Observations of suspended sediment from ADCP and OBS measurements in a mud-dominated environment[J]. Coastal Engineering, 2005, 52(2):103-118.
- [28] 吴中,陈力平,游目林. 底部浮泥表层推移速度分布的 ADCP-GPS 估测方法[J]. 海洋工程, 2002(4):85-88.
- [29] 牛桂芝,沈小明,裴文斌. SILAS 适航水深测量系统测试研究[J]. 海洋测绘, 2003(5):24-27.
- [30] 钱宁,万兆惠. 泥沙运动力学[M]. 北京:科学出版社, 2003:76.
- [31] Granboulan J., Feral A., Villeroit M., et al. Study of the sedimentological and rheological properties of fluid mud in the fluvio-estuarine system of the Gironde estuary[J]. Ocean and Shoreline Management, 1989, 12(1):23-46.
- [32] Nichols M. M., Thompson G. S., Faas R. W. A field study of fluid mud dredged material. Its physical nature and dispersal: Technical Report D-78-40 [R]. Vicksburg, MS: US Army corps of Engineer Waterways Experiment Station, 1978.
- [33] Allison M. A., Nittrouer C. A., Kineke G. C. Seasonal sediment storage on mudflats adjacent to the Amazon River[J]. Marine Geology, 1995, 125(3-4):303-328.
- [34] 徐海根,李九发,周福根,等. 长江口浮泥若干特征研究[J]. 上海水利, 1999(2):34-41.
- [35] Bachmann R. W., Hoyer M. V., Canfield D. E. Internal heterotrophy following the switch from macrophytes to algae in Lake Apopka, Florida[J]. Hydrobiologia, 2000, 418(1):217-227.
- [36] Hedges J. I., Keil R. G. Organic geochemical perspectives on estuarine processes: sorption reactions and consequences[J]. Marine Chemistry, 1999, 65(1-2):55-65.
- [37] Leithold E. L., Hope R. S. Deposition and modification of a flood layer on the northern California shelf: lessons from and about the fate of terrestrial particulate organic carbon[J]. Marine Geology, 1999, 154(1-4):183-195.
- [38] Cauwet G., Mackenzie F. T. Carbon inputs and distribution in estuaries of turbid rivers: the Yang Tze and Yellow rivers (China) [J]. Marine Chemistry, 1993, 43(1-4):235-246.
- [39] 练继建,赵子丹. 波流与淤泥质海床相互作用[J]. 泥沙研究, 1995(3):40-50.
- [40] 曹祖德. 浮泥特性研究进展[J]. 水道港口, 1992(1):34-40.
- [41] 张华,阮伟. 长江口北槽深水浮泥的研究与应用[J]. 水运工程, 2002(10):98-102.
- [42] 周程喜. 长江口浮泥研究简况[J]. 水运工程, 1979(1):23-25.
- [43] 刘富强,孙建澎. 天津港适航水深资源的开发[J]. 水道港口, 2002(B10):161-169.
- [44] Ross M. A., Mehta A. J. On the transport of high concentration suspensions [A]. Moudgil B. M., Scheiner B. J. Flocculation and Dewatering [C]. New York: Engineering Foundation, 1988:529-538.
- [45] Traykovski P., Geyer W. R., Irish J. D., et al. The role of wave-induced density-driven fluid mud flows for cross-shelf transport on the Eel River continental shelf[J]. Continental Shelf Research, 2000, 20(16):2113-2140.
- [46] 李炎,夏小明,董礼先. 椒江河口浮泥的分布和调整[J]. 海洋学报, 1998(4):72-82.
- [47] 刘启贞,李九发,陆继昌,等. 河口细颗粒泥沙有机絮凝的研究综述及机理评述[J]. 海洋通报, 2006(2):74-80.
- [48] 罗肇森,罗勇. 浮泥挟沙力和输沙规律的研究和应用[J]. 泥沙研究, 1997(4):44-48.
- [49] 李浩麟. 新港淤泥运动特性试验研究[J]. 新港回淤研究, 1963(1):32-38.

- [50] 黄胜, 卢启苗. 河口动力学[M]. 北京: 水利电力出版社, 1995: 412.
- [51] Winterwerp J. C. . On the dynamics of high-concentrated mud suspensions [D]. Nederland: Delft University of Technology , 1999.
- [52] Ockenden M. C. , Delo E. A. . Laboratory testing of muds [J]. Geo-marine Letters ,1991 ,11(3) : 138 - 142.
- [53] 曹祖德. 日本熊本港的淤积分析 [J]. 港口工程 ,1990(3) : 28 - 36.
- [54] 曹祖德. 波浪作用下浮泥运动特性的研究 [J]. 水道港口 ,1987(2) : 8 - 14.
- [55] 赵子丹. 波浪与浮泥海床的相互作用问题 [J]. 海洋科学 ,1986(6) : 50 - 54.
- [56] 赵子丹, 李贺青, 郭美谊. 波浪在浮泥床面上的传播 [J]. 海洋通报 ,1993(1) : 1 - 9.
- [57] 赵子丹. 波浪作用下的浮泥输送 [J]. 海洋通报 ,1982(6) : 65 - 74.
- [58] 赵子丹, 李贺春, 郭美谊. 不规则波在浮泥床面上传播的实验研究 [J]. 海洋通报 ,1993(4) : 1 - 8.
- [59] 姜林, 赵子丹. 浮泥海床上孤立波的粘滞衰减 [J]. 水动力学研究与进展 ,1989(1) : 51 - 64.
- [60] 赵子丹. 论波浪与浮泥海床的相互作用 [J]. 海洋工程 ,1991(2) : 33 - 40.
- [61] 罗肇森. 波、流共同作用下的近底泥沙输移及航道淤积预报 [J]. 泥沙研究 ,2004(6) : 1 - 9.
- [62] 罗肇森, 罗勇. 浮泥挟沙力和输沙规律的研究和应用 [J]. 泥沙研究 ,1997(4) : 44 - 48.
- [63] 马进荣, 张行南. 浮泥水域水流挟沙力公式初探 [J]. 水利水运工程学报 ,2010(1) : 50 - 55.
- [64] Hsu Tian-Jian, Minwoo Son. A fine sediment transport modeling framework and its application to fluid mud processes [C]. Proceedings of Coastal Sediment '07. ASCE ,2007: 1669 - 1677.
- [65] Walsh J. P. , Nittrouer C. A. . Contrasting styles of off-shelf sediment accumulation in New Guinea [J]. Marine Geology , 2003 ,196(3 - 4) : 105 - 125.
- [66] Wright L. D. , Friedrichs C. T. , Kim S. C. , et al. . Effects of ambient currents and waves on gravity-driven sediment transport on continental shelves [J]. Marine Geology ,2001 ,175(1 - 4) : 25 - 45.
- [67] Friedrichs C. T. , Wright L. D. . Gravity-driven sediment transport on the continental shelf: implications for equilibrium profiles near river mouths [J]. Coastal Engineering ,2004 ,51(8 - 9) : 795 - 811.
- [68] Mathew J. , Baba M. , Kurian N. P. . Mudbanks of the southwest coast of India. I: Wave characteristics [J]. Journal of Coastal Research ,1995: 168 - 178.
- [69] Ali K. , Crapper M. , O'Connor B. . Fluid mud transport [J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Water Maritime and Energy ,1997 ,124(1) : 64 - 78.
- [70] Scully M. E. , Friedrichs C. T. , Wright L. D. . Application of an analytical model of critically stratified gravity-driven sediment transport and deposition to observations from the Eel River continental shelf ,Northern California [J]. Continental Shelf Research ,2002 ,22(14) : 1951 - 1974.

Review of estuarine and coastal fluid mud measurement technique , characteristics and transportation researches

LI Wei-hua¹ , SHI Lian-qiang² , LIU Meng¹ , LIU Gao-feng¹

(1. Key Laboratory of Estuarine & Coastal Engineering of Ministry of Transport , Shanghai Estuarine and Coastal Science Research Center , Shanghai 201201 , China; 2. State Research Center for Island Exploitation and Management , The Second Institute of Oceanography , Hangzhou 310012 , China)

Abstract: Researches on fluid mud measurement technique , its characteristics and transportation in the past forty years are reviewed in this paper. Four issues which need further systematic research are summarized as follows. (1) Key technique of emulating fluid-mud rheology and thixotropic characteristics with low-frequency signal strength of dual-frequency echo sounder; (2) storm-induced fluid mud generation and transportation processes under the influence of reciprocating tidal flow; (3) influence of fluid mud on the harbor and navigation channel siltation; (4) density driven laminar flow of fluid mud on sloping bed.

Key words: fluid mud; measurement technique; characteristics; transportation; review