# 长江河口浮泥形成机理及变化过程\*

李九发 何 青 徐海根

(华东师范大学河口海岸动力沉积和动力地貌综合国家重点实验室 上海 200062)

提要 1976年以来,在长江河口盐水楔和最大浑浊带活动的河道进行了 20 余次现场观 测。本文在现场观测资料基础上,确认长江河口浮泥由细颗粒泥沙组成,中值粒径在 8-11.5<sup>山</sup>m,小于 2<sup>山</sup>m 的粘土占 28 18% --36 39%。长江河口浮泥是悬沙在盐淡水混合环 境中絮凝沉降于近底和风暴潮再悬浮泥沙形成的高浓度浑水层。在成因类型上分为憩流浮 泥、盐水楔浮泥和风暴潮浮泥,第1种在涨或落潮转流期低流时形成,规模大,厚度薄;第2种 在盐水楔发育时形成,规模较小,厚度较大;第3种在大风后形成,规模大,范围广;若三者相 遇,则浮泥厚度和范围最大。浮泥具有洪枯季、大小潮和风暴周期变化规律。长江河口河道 宽浅,但河槽中动力作用较强,自然状态下浮泥层比较薄,在人工疏浚河槽中可以出现1.0m 多厚的浮泥层。浮泥层的变化与河口拦门沙的冲淤有良好的正相关。 关键词 长江河口,浮泥,盐水楔,絮凝

中图分类号 P736

在淤泥质海岸的河口,特别是在其疏浚航槽里,浮泥运动是一种比较普遍的自然 现象.在密西西比河口、泰晤士河口、纪龙德河口、瓯江口、椒江口和长江河口等都存 在此种现象,而浮泥层的存在是河口拦门沙形成的主要影响因素,对深水通海航槽构 成较大的威胁。所以引起了人们的广泛关注,并采用多种方法进行现场观测和试验, 对浮泥的成因、沉降速度、与河口拦门沙成因的关系进行了广泛的研究(Wellershaus, 1981; Schudel, 1968;张志忠等, 1977;周程喜, 1979;徐海根等, 1994; Leussen, 1988; Kirby, 1988。长江河口的浮泥运动研究,始源于70年代中期,交通航道部门疏浚开 通了南槽7m通海航道后才引起研究部门的重视。1977年杭州大学长江河口科研组 的研究认为,长江河口的浮泥主要是汛期上游带来含有大量粘土的细颗粒物质在咸 水环境中发生絮凝作用所致(张志忠, 1977)。任汝述等对长江河口粘性泥沙运动力 学规律进行了探讨(任汝述等, 1986)。周程喜对 1976—1977年上海航道局和华东师 范大学等单位现场调查的浮泥分布规律和变化过程进行通报(周程喜, 1979)。本研 究对大量的现场观测和试验资料进行了分析,其成果对进一步深入地认识河口浮泥 特性和拦门沙河槽冲淤变化过程,以及对河口深水航道治理工程提供科学依据均有 重要意义。

收稿日期: 1999-01-26; 收修改稿日期: 2000-10-29

<sup>\*</sup> 国家"九五" 攻关"典型河口冲淤灾害预测技术研究" 成果之一, 96-922-03-02 号。李九发, 男, 出生于 1949 年 9 月, 研究员, E-mail: liover@online.sh.cn

### 1 研究方法

1976 —2000 年作者先后与上海航道局等单位在长江河口北支和南北槽河道(图 1), 利用 FE-101(70 和 80 年代)和 Innerspace-449 热敏式(90 年代)双频道回声测深仪测 定水与浮泥上界面,河床与浮泥下界面,再用浊度仪和高浓度 ¥ 射线及HSDM 声学高密度 测沙仪观测水体含沙量、浮泥容重值,用 ASSM 声学(90 年代)泥沙剖面观测仪监测垂向 水体含沙量和近底浮泥剖面变化过程,用浮泥分层取样管采取浮泥样品,同时用 CDT 和 海流计等观测水流、盐度、温度、深度等。在室内利用 TA-II型库尔特计数器和 LS100Q 激光颗粒分析仪进行颗粒径分析,旋转粘度计测定浮泥流变特性;同时,利用水槽进行浮 泥层的泥沙起动试验。对所获取的数量进行了统计分析计算和研究。



图 1 长江河口和观测站位图 Fig. 1 The Changjiang River estuary, with sampling sites

## 2 研究成果

#### 2.1 浮泥的基本特性

2.1.1 浮泥容重 根据现场双频道测深仪测量浮泥厚度(高频频率为 208kHz 测出水 与浮泥上界面,低频频率为 5kHz 和 24kHz 测出河床与浮泥下界面),同时,用高浓度 ¥射 线和 HSDM 声学高密度测沙仪测出长江河口浮泥上界面容重为 1.04t/m<sup>3</sup> 左右,向河床 逐渐增大,近河床容重为 1.25t/m<sup>3</sup>,从浮泥容重垂向分布看(图 2),垂向分布曲线上也呈 两个比较明显的转折点,上折点相当水体与浮泥的上界面,下点相当于河床底板。

2.1.2 泥沙颗粒度组成 根据 A、F、M 站(A 站代表观测期间盐水楔入侵上界, F 站代 表盐水楔滞流点主要活动区, M 站代表盐水楔滞流点主要活动带下游区)(图1)的悬沙、 浮泥、底质样品颗粒度分析结果(表1)可以看出:(1)长江河口悬沙颗粒细,中值粒径在 5.2-8.3<sup>1</sup><sup>1</sup>m 左右, 悬沙中小于 2<sup>1</sup><sup>1</sup>m 的粘土含量大,占全沙的 34.31% -39.92%,向海方 向略有增加,分选性差。(2)浮泥物质比悬沙略粗,中值粒径在 8-11.5<sup>1</sup><sup>1</sup>m。浮泥中小于 2<sup>1</sup><sup>1</sup>m 的粘土占全沙的百分比为 28.18% -36.39%。对天然泥沙进行实验分析,经分散 (分散方法为;先对泥沙样品洗盐,再用偏磷酸钠浸泡,24h 后用超声波仪震动)处理的粒径



Fig. 2 Vertical distribution of specific weight of fluid mud water (September 1999, neaptide, South Passage) 确实比未经分散处理的粒径要小几倍,说明絮凝对泥沙粒 径增大是有影响的。(3)底质粒径向海变细,A站颗粒粗, 说明观测时悬沙主要是过境泥沙,细颗粒泥沙没有沉积,河 床表面也就没有浮泥层。F、M站的底质颗粒细,中值粒径 为7.7-11.5<sup>µ</sup>m。底质中小于 2<sup>µ</sup>m 的粘土占全沙的 21.30%-32.15%,F、M站悬沙不仅参与了浮泥消长过 程,而且也参与拦门沙河床造床过程。

2.1.3 浮泥的流变特性 利用 NXS-11型旋转粘度 计, 对长江河口浮泥进行流变试验, 按照浮泥定义(钱宁, 1989, 曹祖德等, 1994), 将其视为宾汉体, 其流变方程为:  $T = T_{B+} \eta \frac{du}{dy}$ ,  $T_{B}$  为宾汉极限剪切力(g/cm<sup>2</sup>),  $\eta$  为刚度系 数(g•s/cm<sup>2</sup>)。其试验结果表明,  $T_{B}$  和 $\eta$ 与含沙量有良好 关系,  $T_{B} = A e^{Kc}$ ,  $\eta = F e^{Pc}$ , c 为体积含沙量,  $A = 2.9 \times$  $10^{-5}$ , K = 28, F = 3.  $8 \times 10^{-6}$ , P = 20。随着细颗粒

(< 0.01mm)比例愈高,在相同的悬浮物浓度下 Ta、II 值愈大。

表1 悬沙、浮泥、底质粒度组成

T ab. 1 Grain size distributions of suspended, fluid mud and bed materials

站位	项目	> 63 <sup>µ</sup> m	63- 4 <sup>µ</sup> m	4- 2 <sup>µ</sup> m	≤2µm			
А	悬沙	6.12	46. 51	12.56	34. 81			
	浮泥		未观 测 到 浮 泥					
	底质	45.83	42.65	4.73	6. 79			
$\mathbf{F}$	悬沙	0.72	53. 58	10.38	34.31			
	浮泥	1.60	58.13	12.09	28.18			
	底质	1.61	74. 32	2.77	21.30			
Μ	悬沙	/	40. 43	19.45	39.92			
	浮泥	0.75	49.91	12.99	36.39			
	底质	0.15	49.36	18.34	32.15			

#### 2.2 浮泥形成及变化过程

从国内外现有的许多研究成果和长江河口现场观测资料看(Odd, 1988; Puls, 1984; Wolanski *et al*, 1988; Maynard, 1985; 张志忠等, 1995), 河口浮泥层的形成, 一般与细颗粒泥沙来源及特性, 径流与海潮流相互作用下水动力环境、细颗粒泥沙絮凝, 以及风浪和人类活动有关。

2.2.1 憩流浮泥形成过程 长江来沙丰富,多年平均(1953—1993年)输沙量为4.51 ×10<sup>8</sup>t,洪季输沙量占全年总沙量的87%,泥沙颗粒普遍较细。据统计占总悬浮物中 30%左右的悬沙在河口往复潮流的作用下作来回运动(Li *et al*,1998),同时,由于疏浚泥 沙处理不当,也有部分泥沙回到河槽,为河道浮泥的形成提供部分泥沙来源。此外,长江 河口盐水楔活动河道河床表层沉积物以粉砂质淤泥为主,中值粒径一般为.8—4.8<sup>LI</sup>m,根 据现场观测和理论推算及水槽试验,此类泥沙在近底潮流速大于 0.4m/s 就容易被再悬 浮。这些河道一般在涨潮或落潮后 0.5-1.0h 近底流速可超过 0.5m/s,转流后 2-3h 流 速出现最大值,此时水流紊动强,床面普遍发生冲刷,使整个垂线含沙量出现最大值,大潮 汛表层含沙量可达 1.0kg/m<sup>3</sup> 左右,小潮可达 0.5kg/m<sup>3</sup> 左右(图 3)。尔后随着流速减小, 泥沙颗粒发生快速絮凝沉降,大部分泥沙沉降河床,此时河床上形成 0.1-0.9m 厚的浮 泥层(表 2),在来沙较集中的洪季更为明显,称为憩流期浮泥层。如 1991 年 9 月 1 日实 测资料表明(图 4),一个潮周期内浮泥层变化明显,落憩、涨憩的浮泥面比涨急的浮泥面 高 0.18-0.30m,说明憩流时段,悬沙沉降,浮泥层变厚;涨落急时段,浮泥侵蚀,泥沙扬 起,浮泥层变薄。从中可以看出,浮泥与悬沙,浮泥与河床泥沙在浮泥出现的河段经常处 在频繁的交换之中(1997 和 2000 年洪季观测资料也有类似情况)。吉伦特河口的浮泥层 在潮周期内除厚度变化外,还有明显的纵向运动。

			·	,	
观测日期 (年.月.日)	潮汛	位置	浮泥厚度 (m)	中浚当日最高潮位 (m)	备注
1976.05.20-22	小潮	C-F	0.2-0.8	2.90-3.68	盐水楔浮泥
1976.07.06-13	小中潮	В-М	0.8-1.2	3. 24-4. 56	大风浮泥
1976.08.03-07	中小潮	D-E	0.2-0.6	3. 01-4. 26	盐水楔浮泥
1976.09.16-17	小潮	С-Е	0.6-1.0	3.93-4.52	大风浮泥
					盐水楔浮泥
1977. 06. 10	中潮	С-Е	0.2-0.4	3.23	憩流浮泥
1977.08.05-10	小中潮	G-M	0.4-0.8	2.67-3.97	盐水楔浮泥
1979.08.23-24	大潮	В-М	0.5-1.2	4.88	大风浮泥
1981.09.01	大潮	B - F	0.3-0.5	5.74	大风浮泥
1982.07.14	小潮	Ν	0.6-0.8	3.46	盐水楔浮泥
1983.09.18-20	小中潮	В-М	0.3-1.2	4.81	大风浮泥
1988. 08. 03	中潮	B-D	0.2-0.6	4.40	憩流浮泥 盐水楔浮泥
1991. 09. 01	小潮	В—F К- М	0.18-0.3	4.14	憩流浮泥
1997. 07. 26	中潮	F	0.2-0.5	4.01	憩流浮泥 盐水楔浮泥
1997.07.28	中小潮	Р	0.2-0.4	3.52	盐水楔浮泥
1997.08.18	大潮	D —К W—Р	0.2-0.3	5.69	大风浮泥
2000. 07. 19	中潮	v — v′	0.4-1.5	3.49 (北槽中站)	大风浮泥 (7月10日刮大风)
2000. 08. 16	中小潮	v — v′	1.14	3.59 (北槽中站)	大同浮泥 (8月10日刮大风)
2000. 08. 22	小潮	12	0.2-0.96	3.65 (北槽中站)	憩流浮泥 盐水楔浮泥
2000. 09. 04	寻常潮	VI—VÍ	0.17-0.73	5.92 (北槽中站)	大风浮泥 (8月31日刮大风) 憩流浮泥

表 2 长江河口历年浮泥观测资料总表 T ab. 2 Observed fluid mud occurrance, water level and salinity at stations B to W



图 3 含沙量潮周期剖面分布图(97.07 小潮)

Fig. 3 Vertical distribution of Suspended Sediment Concentration (July 1997, neap tide)



图 4 南槽实测浮泥层的纵向分布图(91.09 小潮)

Fig. 4 Longitudinal distribution of fluid mud in South Passage (September 1991, neap tide)

2.2.2 风暴潮浮泥 长江河口分布广阔的边滩和心滩,如南汇边滩、九段沙、横沙东滩 和崇明东滩,这些浅滩均在大潮高潮位以下,而-2m以上面积占该河段水域面积近1/3。 每年平均遭台风 1.3 次,强寒潮 2-3 次,6 级以上的大风有 27 次。1976年以来已发生过 多次因大风天引起河槽浮泥发育(表 2)。大风期间引起整个浅滩因水浅而被冲刷,大量 泥沙被潮流带入河槽,长江河口大风浮泥的发育和变化与来沙强度和潮汐性质及风浪特 性有关。

1983 年 9 月(小潮) 10 号台风, 当时风向 E 转 NE, 风力 8 级以上, 恰逢小潮汛中浚最 高潮位 4.81m, 最强的冲刷点在生长秧草脆弱的中潮滩, 使南汇边滩中潮滩面蚀低约 30cm(Li et al, 1991), 被侵物质由近底水流带向航槽(图 5), 大风过后在河槽内形成浮泥 层, 仅南槽航槽内发育的浮泥达 400 万 m<sup>3</sup>, 平均浮泥层厚度为 0.5m, 最大厚度达 1.2m。 由于恰逢小潮汛期, 河槽水流速较小, 难于将浮泥冲出河口, 静水实验证明, 8h 之后浮泥 成为容重达到 1.3t/ m<sup>3</sup> 以上的淤泥, 疏浚航槽出现严重淤积, 航行船只发生搁浅, 成为迫 使长江河口入海航道由南槽改为北槽出海的重要原因之一。2000 年"杰拉华"强台风与 此相类似, 引起北槽疏浚航槽浮泥充分发育(表 2)。

又如 1976 年 7 月 1 日前后连续 4 天吹起 5 — 6 级 NE 风, 风力不大, 正值小潮汛, 整 个河口中潮滩又被冲刷, 风后在河口河槽中观测到浮泥厚度 0.6m, 而在南槽人工挖槽中, 浮泥厚度可达 0.8-1.2m,浮泥透镜体纵长 28km,体积达到 1520 万 m<sup>3</sup>,图 6 是当时在南 槽用超声波回声测深仪观测到疏浚槽内清晰可辨的浮泥层。尽管本次风力不强,由于冲 刷带持续被冲,为河槽浮泥形成提供了丰富的泥沙来源。

但是大风期为大潮汛时,一般河槽浮泥层明显较薄,而且很快就会消失。如1997年 8月11号台风,风力在10级以上,河槽只观测到0.2一0.3m厚的浮泥层,并在1-2天内 消失,原因是大潮汛水位较高,加上风浪高,水位可达5m以上(当时中浚站最大水位为 5.69m),其水流和波浪的主要作用点都集中堤坝,而此时浅滩水深较大,冲刷能力较弱, 尽管有少量泥沙进入河槽,由于大潮汛河槽水流速很大,潮周期平均流速在1.5m/s以 上,不利浮泥的形成发育,故9711台风期,对长江河口入海疏浚航槽影响极小。1981年 14号台风(当时最大水位为5.74m)和2000年"派比安"强台风(当时北槽中潮位站位最 大水位为5.92m)与9711台风情况相类似,浮泥厚度较小(表2)。

可是, 1979 年 8 月 7909 号台风, 时逢大潮汛, 本次增水不明显, 最高水位为 4.88m (小于 5.0m), 对浅滩产生较大冲刷作用, 河槽来沙丰富, 使河槽浮泥得到充分发育, 而时 值大潮汛, 水流较强, 浮泥较快消失, 对疏浚航槽通航未构成威胁。故大风期河槽浮泥发 育与浅滩的冲刷强度有关, 而浅滩的冲刷点与大风时最高潮位有一定关系。

2.2.3 咸淡水混合的盐水楔动力环境下浮 泥形成过程 长江河口是径流和潮流两大 动力相互作用的地带,从实测资料和计算结 果看(沈焕庭等,1986;沈金山等,1983;李九 发等,2000),拦门沙以上河段以落潮流占优 势,向口门逐渐转化为涨潮作用占优势,中间 有一个优势动力相互转换的咸淡水混合的过 渡带(图7)。在此一方面可促进细颗粒泥沙 絮凝沉降,此外还可形成盐水楔,捕集来自陆 域和海域的泥沙,大量泥沙汇聚于此,浮泥层 得到充分发育(表2)。 Fig





优势沙输移图(1983.09.18)



凝沉降现象是明显的(张志忠等, 1983, 1995; 关许为等, 1992; 李九发等, 2000), 本水域的 悬沙颗粒组成较细, 以粘土和粉砂为主, 占泥沙组成的 95% 以上, 从理论上讲, 如此细的 泥沙颗粒(*D* 50=4-8.8<sup>μ</sup>m)不可能在动水中沉降。通过大量的静水和动水沉降试验及水 化学分析表明, 主要洪季期长江高度集中来沙, 具有促使细颗粒泥沙絮凝的良好条件: (1) 长江来沙期均集中在每年的 5-10 月, 占总输沙量的 87% 以上(沈焕庭等, 2000), 颗粒小 于 16<sup>μ</sup>m 的占 80% 左右, 为河口浮泥形成提供丰富的泥沙来源; (2) 长江河口咸淡水混合 区盐度变化基本在 2-20 之间, 为泥沙颗粒最佳絮凝值; (3) 长江河口有机物含量丰富, 洪 季一般 TOC 含量达到 11-48mg/L(张法高等, 1987), 由于有机链的作用, 使颗粒之间发 生絮凝, 在电镜下观测到有机絮凝颗粒直径比分散粒大 10 倍以上, 实测有机性颗粒占长 江河口悬沙总量的 65% -75%(李道季等, 2000); (4) 长江河口水体中含有丰富的粘土矿 物和电解质离子、高浓度的来沙水流和余环流等, 这些均为促使细颗粒泥沙快速絮凝的有



图 6 浮泥层纵剖面

Fig. 6 The fluid mud layer



图 7 南槽泥沙纵向输移

(a为1988年洪季,b为枯季)



利环境。所以, 作者曾采用洪季长江河 口拦门沙地带实测资料, 求得本水域有 效沉速(ω)在 0.02-0.15cm 左右, 比原 型泥沙单颗粒快 10-100 倍(Li et al, 1998), 这样大量的泥沙沉降下层, 成为 浮泥主要泥沙来源之一。与此同时, 当 洪水流量大又遇小潮差时出现弱混合 型, 盐水楔发育, 在纵向上出现上层净流 向海, 下层净流向陆的河口环流(图7), 这种环流不仅阻碍上游来沙向海排泄, 而且把海域上溯的泥沙也捕集起来, 同 时也把大量的絮凝后的泥沙颗粒汇集在 此, 从而在盐水楔滞流点附近含沙量增 大, 最大浑浊带发育(图3), 在近河底常 常出现高浓度的浮泥层, 1976 年 5 月

20-22 日、1976 年 8 月 3-7 日、1982 年 7 月 14 日、1988 年洪枯季(图7)、1997 年 7 月 26-28 日和 2000 年 8 月 22 日的观测资料均属于咸淡水混合的盐水楔浮泥(表 2),此类 浮泥对形成河口拦门沙的淤积影响很大。

2.3 浮泥的分布

长江河口浮泥分布与入海汊道分水分沙、盐淡水混合类型和汊道特性有关。

北港属分水多分沙少的河道,一般不利浮泥发育,至今未观测到河床有明显的浮泥 层。

北支属强混合类型,潮流作用强,而泥沙主要来自口外海域和邻近河道,由于水流含 沙量较高,河道下游较宽浅,在一些进水少进沙多的支汊常发现浮泥层。1982年在邻近 崇明岛的南支汊 N 测站观测到厚度在 0.30m 以上的浮泥层(表 2),而持续时间很长,与 崇明岛北岸浅滩不断淤涨一致。Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http:// 南槽目前分水少分沙多的河道,南靠南汇边滩,北邻九段沙浅滩,来沙量极为丰富,河 道属弱混合类型,故成为长江河口浮泥出现次数最多的河道(表 2)。

北槽与南槽相比分水多分沙少, 1972 年以来进行数十次观测, 均未发现明显的浮泥 层, 只有在北槽局部河段 P 测点观测到 0. 10 -0. 20m 的浮泥层。近年来, 由于北槽疏浚 航道至 8. 5m 水深, 在航道中浮泥开始出现(表 2)。

#### 3 结语

3.1 长江河口浮泥层主要分布在拦门沙区段。浮泥层最大厚度发生在滞流点附近,并向上、下游厚度减小。浮泥上层容重为 1.04 t/m<sup>3</sup>,浮泥底层容重为 1.25 t/m<sup>3</sup>。

3.2 浮泥由细颗粒泥沙组成, 平均粒径在 8-11.5<sup>µ</sup>m 左右, 小于 2<sup>µ</sup>m 的粘土颗粒占 28.18% --36.39%。

3.3 根据成因分析,长江河口浮泥可以分为三类:憩流浮泥、风暴潮浮泥和盐水楔浮泥。 若三者相遇,则形成的浮泥厚度最大,对入海航道的影响最为严重。

3.4 长江河口动力条件复杂,因此,长江河口浮泥具有洪枯季、大小潮潮周期和风暴周期 的变化规律,并反映了浮泥和悬沙、浮泥和河床泥沙交换频繁。从现场观测资料来看,长 江河口南槽和北槽浮泥发育条件最好,出现机率最高,北支次之,北港最少。

致谢 上海航道勘察设计研究院徐海涛工程师参与较多现场观测工作,谨此致谢。

#### 参考文献

任汝述,曾小川,1986. 长江河口粘性泥沙运动力学规律研究. 长江河口综合治理研究,3:247-258 李九发,何 青,张 琛,2000. 长江河口拦门沙河床淤积和泥沙再悬浮过程. 海洋与湖沼,31(1):101-109 李道季,李 军,陈吉余等,2000. 长江河口悬浮颗粒物研究. 海洋与湖沼,31(3):295-301 关许为,陈英祖,1992. 长江河口泥沙絮凝体的现场显微观测. 泥沙研究,3:54-59 张志忠,1977. 长江河口浮泥若干特性的初步研究. 杭州大学学报,1:83-94 张志忠,阮文杰,蒋国俊,1995. 长江口动水絮凝沉降与拦门沙淤积的关系. 海洋与湖沼,26(6):633-637 张志忠,王允菊,徐志刚,1983. 长江河口细颗粒泥沙絮凝若干特性探讨. 见:国际泥沙研究培训中心编. 第二次河流 泥沙国际学术讨论会论文集. 北京:水利电力出版社,286-295

张法高,杨光复,沈志良,1987. 三峡工程对河口水文、化学和沉积环境的影响. 见:中国科学院三峡工程生态与环境科

研项目领导小组编. 长江三峡工程对生态与环境影响及其对策研究论文集. 北京:科学出版社,369—402

沈焕庭,朱慧芳,茅志昌,1986. 长江河口环流及其对悬沙输移的影响. 海洋与湖沼,17(1):26-35

沈焕庭,张 超,茅志昌,2000. 长江入河口区水沙通量变化规律. 海洋与湖沼,31(3):288—294

沈金山,朱珍妹,张新琴,1983. 长江口南槽拦门沙的成因和演变. 海洋与湖沼,14(6):582-590

周程喜, 1979. 长江河口浮泥研究简况. 水运工程, 23-25

徐海根,徐海涛,李九发,1994. 长江河口浮泥层"适航水深"初步研究. 华东师范大学学报,2:91—97

钱 宁, 1989. 高含沙水流运动. 北京:清华大学出版社, 49

曹祖德,王运洪,1994. 水动力泥沙数值模拟. 天津:天津大学出版社,267

Kirby R, 1988. High Concentration suspension (Fluid Mud) layers in estuaries. In: Dronkers J, Leussesn W V ed. Physi-

cal Processes in Estuaries. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York, 463-487

Leussen W V, 1988. Aggregation of particles settling velocity of mud flocs a review. In: Dronkers J, Leussesn W V ed.

Physical Processes in Estuaries. Springer Verlag, Berlin Heidelberg New York, 347-402

Li J.F., Zhang C. 1998. Sediment resuspension and implications for turbidity maximum in the Changjiang River Estuary. © 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http:// Marine Geology, 148: 117-124

- Li J F, 1991. The rule of sediment transport on the Nanhui tidal flat in the Changjiang River Estuary. Acta Oceanologica Sinica, 1:117-127
- Maynard M N, 1985. Fluid mud accumulation processes in an estuary. Geo-Marine Letters, 4:171-176
- Odd N V M, 1988. Mathematical modelling of mud transport in estuaries. In: Dronkers J, Leussesn W V ed. Physical Processes in Estuaries. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York, 503-531

Puls W, 1984. Erosion characteristics of estuarine mud. Hydraul Res Rep, IT: 265

Schudel J, 1968. The turbidity maximum in the upper Chesapeake Bay. Science, 161: 1013-1015

Wellershaus S, 1981. Turbidity maximum and mud shoaling in the weser estuary. Arch Hydrobiology, 92: 161-198

Wolanski E, Chappal J, Ridd P et al, 1988. Fluidization of mud in estuaries. J Geophys Res, 93: C<sub>3</sub> 2351-2361

## THE FLUID MUD TRANSPORTATION PROCESSES IN CHANGJIANG RIVER ESTUARY

LI Jiu Fa, HE Qing, XU Hai-Gen

(State Key Laboratory of Estuarine and Coastal Research, East China Normal University, Shanghai, 200062)

**Abstract** In this observations since 1976, show that the fluid mud of the Changjiang River Estuary consists of fine sediment ranging from 8 to 11.51/m including 28.18 to 36.39 percent of day finer than 21/m. The composition of the clay is illite, chlorite, kaolinite and montmorillonite. The fluid mud in the Changjiang River Estuary is a layer of sediment with high concentrations near the bed, resulting from flocculation due to salt and fresh water mixing. There are three kinds of fluid muds according to the dynamic conditions. The first one was formed at slack water during flood and ebb tides with a large scale but small thickness. The second was formed at area of grows saltwater wedge with small scale and thick depth. The third was formed following a storm with large scale and thick depth. The fluid mud is generally thin, but at a dredging channel it can be up to 1 m. In general, fluid mud will change with the factors of spring and neaptides, flood and dry seasons, and storms. At the same time, the changing of fluid mud is related to erosion and deposition of the mouth bar in the Changjiang River Estuary. **Key words** Changjiang River Estuary, Fluid mud, Saltwater wedge, Flocculation