

长江口浑浊带的形成机理与特点*

潘定安 沈焕庭 茅志昌

(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)

摘 要 泥沙积聚再悬浮是长江口浑浊地带形成的主要机理. 促使泥沙积聚有径流潮流相互作用和盐淡水交汇混合两种机制, 前者形成潮汐浑浊带, 后者形成盐水浑浊带. 长江口浑浊带是具有两种不同机制的盐潮复合浑浊带. 长江口浑浊带在不同时间、不同地点表现出不同的特点.

关键词 长江河口 浑浊带 泥沙积聚 泥沙再悬浮

1 引言

河口地区往往有一个地带, 水体的含沙量高于上、下河段, 此地带被称为浑浊带. 自 1983 年在法国纪龙德河口发现这一现象以后, 很长一段时间未深入研究, 直至本世纪 50 年代才引起研究者的广泛重视, 认识到浑浊带是河口中存在的普遍现象, 对河口沉积过程及河口环境起着重要的作用. 有关长江口浑浊带的研究, 自 60 年代以来, 对盐水异重流¹⁾、盐淡水混合^[1,2]、泥沙絮凝^{[3,4],2)}、河口环流及泥沙输移^[5-7]、浑浊带变化规律及浑浊带形成的动力条件^[8]等方面做了不少工作. 对于长江口浑浊带的形成原因主要以内部环流、滞流点、絮凝等盐淡水混合方面的论述为主, 至于长江口浑浊带形成的机理有待深入研究. 本文从长江口拦门沙地区的泥沙运动着手, 探讨长江口浑浊带形成的机理与特点, 从而加深对浑浊带的认识.

2 长江口拦门沙地区的泥沙运动

长江巨量径流带着大量的泥沙出口门后, 水流扩散消能, 泥沙落淤堆积. 由于口门附近水深较浅, 径流扩散过程中摩擦起主导作用, 泥沙落淤形成心滩汉道的堆积形态, 发育成崇明东滩、北港、横沙东滩、北槽、九段沙、南槽、南汇东滩等滩槽相间的拦门沙体 (见图 1). 长江口拦门沙地区的泥沙运动与河口其他地区有不同的特点, 泥沙输移和再悬浮表现出特殊的规律.

本文于 1998-04-25 收到, 修改稿于 1999-01-10 收到.

* 国家自然科学基金资助项目 (编号: 9487005).

第一作者简介: 潘定安, 男, 59 岁, 教授, 从事河口海岸水文和地貌研究.

1) 易家豪. 长江口铜沙、江亚地区盐水楔异重流初步分析. 南京水利科学研究所, 1963.

2) 张志忠, 王允菊, 徐志刚. 长江口细颗粒泥沙絮凝若干特性探讨. 长江口航道治理研究 (第二集), 1983.

2.1 泥沙输移

长江口的泥沙在输移过程中一部分被截留下来并积聚在拦门沙地区. 该地泥沙的截留和积聚主要有潮汐和盐水两个方面.

2.1.1 潮汐截留泥沙

长江口拦门沙地区的潮汐具有拦门沙前缘能量集中、潮差大、流速大等特点^[9]. 潮流过拦门沙前缘后, 由于流速向上游逐渐递减, 加之泥沙运动和水流运动之间存在沉降时差和冲刷时差, 泥沙运动有滞后现象, 泥沙向上游搬运^[10],

积聚在潮流作用为主转化为径流作用为主的过渡地带; 拦门沙地区水深较浅, 潮波发生变形, 涨、落潮过程不对称, 涨转落低流速的历时较长, 泥沙落淤和密实时间较长, 落转涨的低流速时间相对较短, 泥沙落淤和密实时间较短, 使涨潮流含沙量高于落潮流含沙量, 泥沙向上游搬运, 同样积聚在潮流作用为主向径流作用为主转化的过渡地带; 拦门沙地区水域宽广, 涨、落潮流路分离形成平面环流, 泥沙在平面上作循环逗留^[11], 妨碍泥沙向海输送, 截留部分泥沙.

2.1.2 盐水截留泥沙

长江口盐淡水混合具有以部分混合为主、内部环流发育良好、滞流点出现在拦门沙地区等特点^[8]. 因此, 下层水体的泥沙输移为上段向海、下段向陆, 泥沙在滞流点附近堆积; 在滞流点向海一侧, 在内部环流的作用下, 泥沙在垂直面上循环输移, 阻碍泥沙向海输送; 盐淡水混合细颗粒泥沙发生絮凝, 增加泥沙的沉速, 大量泥沙集中在下层, 并在床上淤积, 往往形成浮泥.

2.2 泥沙再悬浮

长江口拦门沙地区是河水和海水交汇的地带, 在一个潮周期中泥沙有可能出现3次或4次再悬浮的特殊现象, 除了像河口其他地区在涨、落急时段由流速切变造成的泥沙再悬浮外, 在落转涨或涨转落的转流时段, 由于水流垂向的作用还能促使泥沙再悬浮^[11]. 实测资料反映, 在盐淡水交锋地带, 一个潮周期中会出现4次沙锋, 转流时期泥沙再悬浮形成的沙锋甚至超过涨、落急时段的沙锋, 泥沙再悬浮的数量会超过涨、落急时段.

3 长江口浑浊带形成的机理

根据1987~1991年每年春、夏、秋、冬各一次共5a观测资料平均所得的表、中、底层含沙量, 外高桥(长江口内)附近分别为0.142、0.347和0.319 kg/m³, 拦门沙地区南槽九段灯船附近分别为0.399、1.066和3.011 kg/m³. 拦门沙地区含沙量高于口内的河段, 表、中层高出2~3倍, 底层高出9倍之多, 水体十分浑浊, 出现浑浊带. 该带长46 km. 形成如

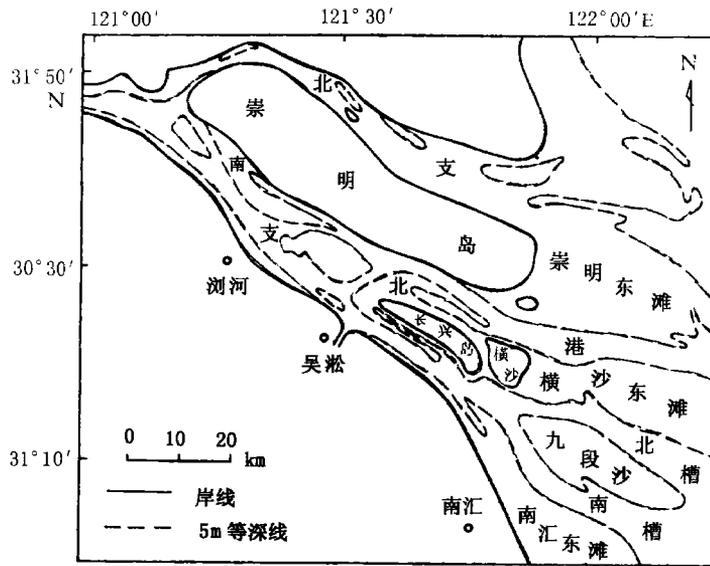


图1 长江口形势图

此宽广如此浑浊的水带, 与拦门沙地区泥沙运动的特殊性有着十分密切的关系.

3.1 泥沙积聚可悬浮物质十分丰富

潮汐和盐水截留的泥沙积聚在拦门沙地区, 这里汇集了大量的泥沙, 泥沙的颗粒组成以粉砂和淤泥为主. 悬沙的中值粒径为 $0.0088 \sim 0.0040$ mm, 优势粒径为 $0.032 \sim 0.004$ mm, 床沙中值粒径为 $0.0560 \sim 0.0098$ mm, 优势粒径为 $0.063 \sim 0.008$ mm. 悬沙和床沙的颗粒组成的差异不大, 两者交换频繁^[12]. 由于颗粒较细, 泥沙的沉降速度小, 在水中的悬浮时间长. 长江口拦门沙地区可悬浮泥沙十分丰富, 其数量高于上、下河段.

3.2 泥沙再悬浮在长江口浑浊带形成过程中起着十分重要的作用

在长江口浑浊带十分发育的南槽中游河段, 1988年7月30日和8月7日两次观测的含沙量相差甚大(表1). 30日涨潮垂线平均含沙量为 1.18 kg/m^3 , 落潮时为 1.55 kg/m^3 , 底层平均含沙量超过 2.7 kg/m^3 , 水体含沙相当高, 浑浊带明显. 8月7日垂线平均含沙量为 0.1 kg/m^3 , 底层平均含沙量也只有 0.18 kg/m^3 , 与口内河段相比水体并不浑浊, 无浑浊带可言.

表1 南槽中段含沙量统计

(单位: kg/m^3)

层次	表层		0.2		0.4		0.6		0.8		底层		垂线平均	
	涨	落	涨	落	涨	落	涨	落	涨	落	涨	落	涨	落
1988-07-30	0.49	0.33	0.48	0.38	1.03	0.50	1.27	1.79	1.69	3.70	2.70	4.13	1.18	1.55
1988-08-07	0.04	0.04	0.06	0.06	0.11	0.05	0.11	0.06	0.13	0.09	0.18	0.17	0.10	0.07

7月30日为大潮期, 此时平均盐度为 15.64, 表、底层盐度差别较小, 处于高度混合状态, 内部环流发育不好, 垂线平均涨、落潮流速在 1.5 m/s 以上, 底层涨、落急流速在 1.1 m/s 以上. 由流速和含沙量的时间变化等值线图可看出(见图 2a), 含沙量增高是由于涨、落潮强劲的水流冲刷床面引起的, 水体浑浊是泥沙再悬浮的结果.

8月7日为小潮期, 此时平均盐度为 5.81, 表、底层盐度差别较大, 处于部分混合状态, 内部环流应比 7月30日强烈, 但由于涨、落潮流速缓慢, 底层流速一般为 $0.1 \sim 0.2 \text{ m/s}$, 很少超过 0.3 m/s , 淤积在床上的泥沙再悬浮的数量极少, 即使在涨、落急时段水体也不浑浊(见图 2b).

上述两次观测表明, 在泥沙积聚的拦门沙地段, 如无足够的动力条件促使泥沙再悬浮, 难以形成明显的浑浊带. 这就表明, 长江口浑浊带的形成过程中, 泥沙再悬浮起着十分重要的作用.

3.3 长江口拦门沙地区泥沙再悬浮的数量和机率高于上、下河段

3.3.1 数量

拦门沙地区积聚了大量的泥沙. 由于沙量丰富, 与上、下游河段相比, 即使在相同的动力条件下, 泥沙再悬浮的数量也要多, 何况在拦门沙体的深槽中水流迅急, 垂线涨潮平均流速为 1.36 m/s , 测点最大流速为 3.45 m/s ; 垂线落潮平均流速为 1.35 m/s , 测点最大流速为 2.73 m/s (北槽中段, 1988年7月观测资料), 这里的水流速度比上、下河段要大. 因此, 泥沙再悬浮的数量比上、下河段多得多.

3.3.2 机率

长江口拦门沙地区由于在一个潮周期中泥沙有可能出现 3 次或 4 次再悬浮, 与上、下河段相比, 泥沙的再悬浮会增加 $1 \sim 2$ 次. 因此, 该地泥沙再悬浮的机率高于上、下河段, 在一个潮周期中泥沙总的悬浮量将会大幅度甚至成倍地增加, 不仅如此, 还使泥沙的持续沉降

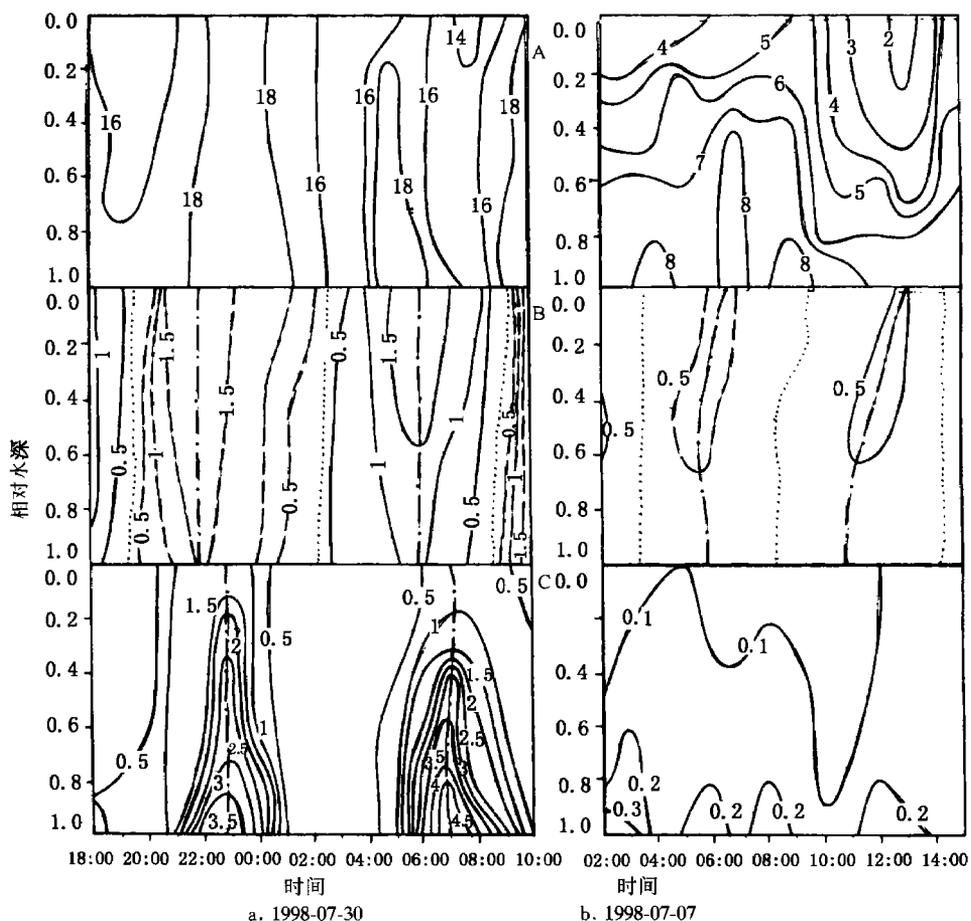


图2 南槽中段盐度、流速、含沙量时间过程等值线

A. 盐度 B. 流速 (m/s), 虚线为涨潮, 实线为落潮, 点线为0, 点划线为最大流速
C. 含沙量 (kg/m^3), 点划线为峰值.

时间缩短, 由6h左右减少为3h左右, 大大减少了泥沙的回淤量, 众多的泥沙悬浮在水中.

3.4 浑浊带形成的机理

以上分析表明, 泥沙积聚再悬浮是长江口浑浊带形成的主要机理, 其中泥沙积聚尤为重要, 因为积聚的可悬浮泥沙是浑浊带形成的物质基础. 长江口泥沙积聚有两种不同性质的机制, 因此长江口的浑浊带可分成两种基本类型.

3.4.1 潮汐截留泥沙形成潮汐浑浊带

潮汐截留的泥沙在强大的水动力作用下作再悬浮运动, 这里的水体含沙量比上、下河段均高, 这种浑浊带称为潮汐浑浊带. 潮汐浑浊带发生在径流占优势向潮流占优势转换的平衡带内. 由于潮汐向上游搬运的泥沙是潮水一潮水累进向前的, 泥沙最终积聚在靠近落潮流占优势的下侧地带, 浑浊带的核心部位发生在较上的河段.

3.4.2 盐水截留泥沙形成盐水浑浊带

河口地区在盐淡水交汇地带盐水截留了大量的泥沙, 这些泥沙在盐水异重流、垂向环流、潮流等水流的作用下浮沉频繁, 水体浑浊, 这种浑浊带称为盐水浑浊带. 盐淡水交锋带

随着潮汐的涨、落作进退摆荡, 浑浊带基本上发生在涨憩交锋带与落憩交锋带之间. 盐淡水交锋带发生在近海一侧, 因此盐水浑浊带的核心部位出现在较下的河段.

4 长江口浑浊带的特点

长江口浑浊带的形成有两种不同的机制, 它们相互交织在一起, 因此, 长江口浑浊带有其特点并表现出多样性和复杂性.

4.1 各汉道浑浊带的性质存在一定的差异

长江口北支、北港、北槽和南槽各个汉道由于水动力环境不同, 浑浊带的组成和特点存在着一定的差异. 北支径流作用甚弱, 潮汐作用强烈, 盐淡水高度混合, 这里出现的主要是潮汐浑浊带. 泥沙被潮汐截留并向上游搬送, 最终在北支上段近分汉口的河段积聚, 最大浑浊带发生在近北支上口的河段. 北港、北槽和南槽径、潮流的作用都比较大, 盐淡水混合以部分混合为主, 潮汐和盐水截留泥沙的能力均很大, 这里出现的浑浊带是由盐水浑浊带和潮汐浑浊带叠加而成的盐潮复合浑浊带. 3个汉道相对而言, 北港分入的径流最多, 盐淡水混合最弱, 内部环流发育最好, 盐水浑浊带所占的成分最多. 南槽分入的径流最少, 相对潮汐作用最强, 潮汐浑浊带所占的成分最多. 北槽介于北港和南槽之间. 这在浑浊带悬移质输移的计算中得到了证实^[13].

4.2 浑浊带宽广具有两个高泥沙浓度的核心

根据长江口的特点, 潮汐浑浊带的核心部位发生在较上游的河段, 盐水浑浊带的核心部位发生在较下游的河段, 两种浑浊带的核心部位不在同一个位置上. 因此, 由此复合而成的浑浊带比较宽广, 且具有两个高泥沙浓度的核心, 例如南槽中有江亚和铜沙两个航道浅滩. 江亚浅滩位于上游, 是潮汐截留泥沙形成的泥沙积聚中心, 应该是潮汐浑浊带核心的所在地. 铜沙浅滩位于下游, 是盐水截留泥沙形成的泥沙积聚中心, 常有浮泥出现, 这里应该是盐水浑浊带核心的所在地. 实测资料反映, 长江口北港、北槽等其他汉道的浑浊带中皆有二个高泥沙浓度的核心^[14].

4.3 潮汐浑浊带和盐水浑浊带表现的形式不同

潮汐浑浊带在一个周期中泥沙发生两次再悬浮, 含沙量出现两次峰值. 由于再悬浮之间的时间间隔较长, 前一次再悬浮的泥沙有较长的沉降时间, 在后一次再悬浮生成之前, 水中已有众多的泥沙落淤在河床上, 因此, 这种浑浊带表现为时而较清时而较浑的间歇型浑浊带 (见图 3a).

盐水浑浊带在一个潮周期中泥沙发生四次再悬浮, 一般潮流速度相对较小, 再悬浮的泥沙仅能影响到中、下层. 由于再悬浮的次数增加, 大大缩短了泥沙的持续沉降时间. 前一次再悬浮的泥沙大部分尚未落淤在河床上, 继而便出现后一次的再悬浮, 加上絮凝作用, 使得泥沙集中在下层, 因此下层始终保持着较高的含沙量, 水体十分浑浊, 而上层含沙量低且变化不大, 水体较清, 从而形成潜于水下的潜底型浑浊带 (见图 3b). 如果潮流初涨时有盐水楔上溯 (图 4, 1988年7月30日22:00时, 7月31日11:00时), 下泄的落潮流受到盐水楔的顶冲, 扰动淤积在床上的泥沙, 使泥沙悬浮在水中, 并随水流沿楔面直至表层, 此时潜于水下的浑水体有“冒顶”现象, 在水面上可见到泛起的浑水团.

4.4 浑浊带在不同地点、不同时间表现出不同的形成

长江口的浑浊带上段一侧以潮汐浑浊带为主, 表现为间歇型浑浊带; 下段一侧以盐水浑浊带为主, 表现为潜底型浑浊带.

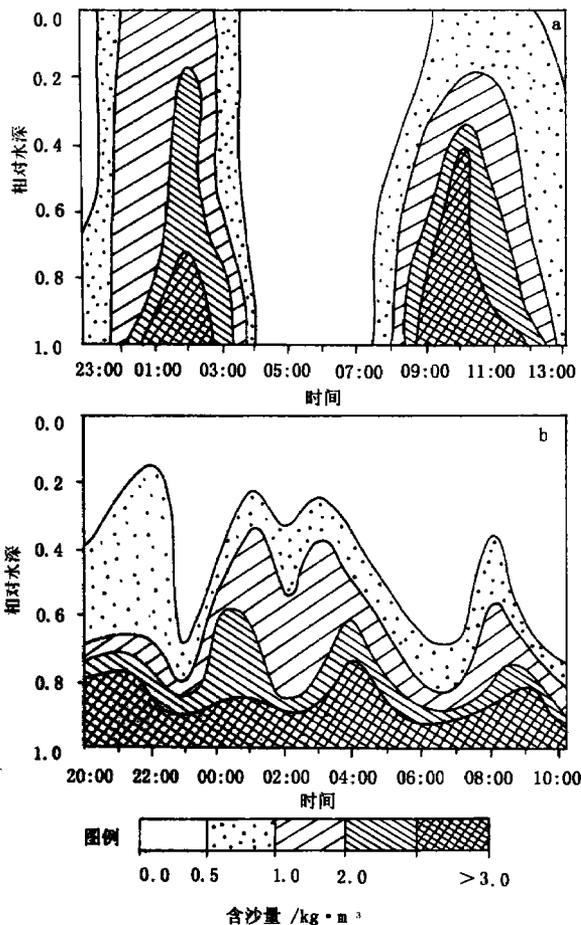


图3 含沙量的时间分布

- a. 间歇型(南槽中段, 1988-07-28~29)
b. 潜底型(南槽中段, 1988-08-03~04)

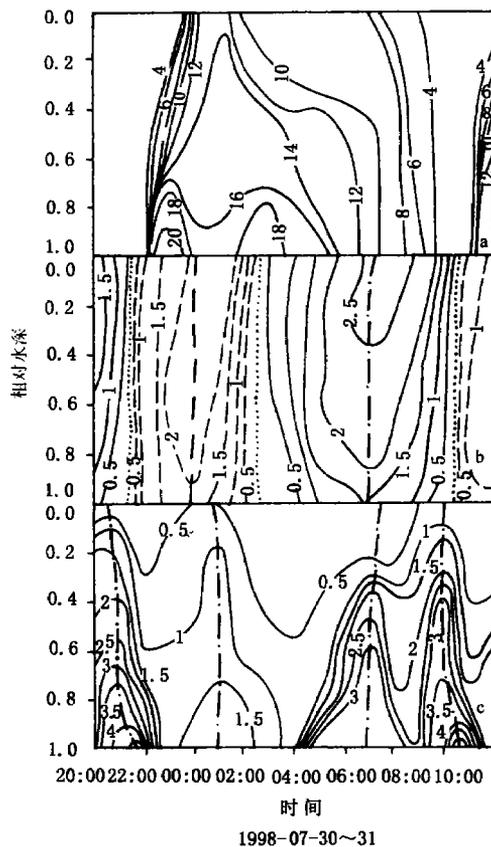


图4 北槽中段盐度、流速、含沙量时间过程等值线

- a. 盐度 b. 流速 (m/s), 虚线为涨潮, 实线为落潮, 点线为0, 点划线为最大流速
c. 含沙量 (kg/m^3), 点划线为峰值。

在盐淡水交锋地带, 浑浊带表现形式随径、潮流的变化而变化。当径流量小、潮汐作用强(枯水大潮)时, 盐淡水高度混合, 异重流的作用相对较弱, 表现为间歇型的浑浊带; 当径、潮流不十分强大但势力相当(平水寻常潮)时, 盐淡水呈部分混合, 泥沙发生4次再悬浮, 再悬浮的泥沙难以达到表层, 表现为潜底型的浑浊带; 当径流量大、潮汐作用弱(洪水小潮)时, 盐淡水出现高度分层, 有盐水楔, 浑浊带以盐水浑浊带为主, 在潮流初涨时有“冒顶”现象。

4.5 浑浊带不仅表现为含沙量高而且含沙量的变化比较复杂

长江口浑浊带含沙量的变化比上、下河段复杂得多。不同时期含沙量的变化有不同的规律。枯季大潮时含沙量的时间变化显著, 垂向变化较小。洪季小潮时含沙量的垂向变化显著而时间变化较小, 且伴有浮泥出现。含沙量的潮周期变化不仅具有河口普遍存在的涨、落急的两个峰值, 而且在转流时段也有可能出现峰值, 形成一个潮周期中有3个或4个峰值的特殊现象。在3峰或4峰出现时, 往往在转流时, 尤其是落转涨时的峰值影响的范围和量值比涨、落急时段还大。

5 结语

长江口拦门沙地区是长江口水体最浑浊的地带。浑浊带的形成与该地泥沙运动的特殊性有关。泥沙积聚再悬浮是长江口浑浊带形成的主要机理。根据泥沙的积聚机制, 浑浊带可分成潮汐浑浊带和盐水浑浊带两种类型。长江口浑浊带是具有两种不同机制的盐潮复合浑浊带。由于长江口潮汐作用较强, 盐淡水混合以部分混合为主, 两种性质的浑浊带均比较发育, 因此, 长江口浑浊带十分宽广并有自己的特点。通过长江口浑浊带形成机理的研究可以认识到, 强潮高度混合的河口, 浑浊带以潮汐浑浊带为主, 发生在较上的河段; 弱潮高度分层的河口, 浑浊带以盐水浑浊带为主, 发生在较下的河段; 潮汐作用较强、盐淡水部分混合的河口, 潮汐浑浊带和盐水浑浊带皆很重要。由于潮汐截留泥沙和盐水截留泥沙是两个系统、两种过程, 它们各有泥沙积聚的中心。如果两个积聚中心基本发生在同一部位, 则浑浊带较短, 浑浊带中出现一个高含沙量核心区; 如果两个积聚中心有一定距离, 则浑浊带比较宽广, 其中出现两个高含沙量核心区; 如果两个积聚中心相距较远, 则在河口形成两个浑浊带。浑浊带发生的部位、范围和悬沙浓度以及表现形式在很大程度上决定于径流、潮流的强弱和盐淡水交汇的状态。浑浊带的时空分布随径流、潮流和盐淡水交汇混合的变化而变化。

参考文献

- 1 张重乐, 沈焕庭. 长江口咸淡水混合及其对悬沙的影响. 华东师范大学学报.(自然科学版), 1988, (4): 83~88
- 2 潘定安, 胡方西, 周月琴等. 长江口夏季的盐淡水混合. 海岸河口研究. 北京: 海洋出版社, 1990, 24~40
- 3 陈邦林, 吴玲, 陆才治. 河口细颗粒泥沙的界面化学研究 I. 长江口北槽沉积物的界面电位研究. 上海城市污水排放背景文献汇编. 上海: 华东师范大学出版社, 1985, 232~244
- 4 陈邦林, 吴玲, 邱佩英. 河口细颗粒泥沙的界面化学研究 II. 长江口南港南槽地区悬移质絮凝机理研究. 上海城市污水排放背景文献汇编. 上海: 华东师范大学出版社, 1985, 245~251
- 5 沈焕庭, 朱慧芳, 茅志昌. 长江河口环流及其对泥沙输移的影响. 海洋与湖沼, 1986, 17 (1): 26~35
- 6 王康捷, 苏纪兰. 长江口南港环流及悬移物质输运的计算分析. 海洋学报, 1987, 9 (5): 627~637
- 7 Su Jilan, Wang Kangshan. The suspended sediment balance in Changjiang Estuary. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 1989, 23, 81~98
- 8 沈焕庭, 郭成涛, 朱慧芳等. 长江河口最大浑浊带的变化规律及其成因探讨. 海岸河口区动力、地貌、沉积过程论文集. 北京: 科学出版社, 1984, 76~89
- 9 陈吉余主编. 上海市海岸带和海涂资源综合调查报告. 上海: 上海科学技术出版社, 1988, 15~26
- 10 钱宁, 张仁, 周志德. 河床演变学. 北京: 科学出版社, 1987, 268~270
- 11 潘定安, 孙介民. 长江口拦门沙地区的泥沙运动规律. 海洋与湖沼, 1996, 27 (3): 279~286
- 12 李九发, 时伟荣, 沈焕庭. 长江河口最大浑浊带的泥沙特性和输移规律. 地理研究, 1994, 13 (1): 51~59
- 13 沈健, 沈焕庭, 潘定安等. 长江河口最大浑浊带水沙输运机制分析. 地理学报, 1995, 50 (5): 411~422
- 14 陈吉余. 长江口拦门沙及水下三角洲的动力沉积、演变和深水航道治理. 华东师范大学学报(长江口深水航道治理与港口建设专辑), 1995, 1~22

Formation mechanism and features of the turbidity maximum in the Changjiang River Estuary

Pan Ding'an,¹ Shen Huating,¹ Mao Zhichang¹

1. *State Key Laboratory of Estuarine and Coastal Research, East China Normal University, Shanghai 200062*

Abstract—The sediment accumulation and the accumulated sediment resuspension in the mouth-bar area under the hydrodynamic environment of the Changjiang Estuary are the major mechanism of the turbidity maximum formation. The sediment accumulation has both mechanisms of the runoff and the tidal current interaction and the salt- and fresh-water mixing, the former forms the tidal turbidity, and the latter forms the salt water turbidity maximum. The turbidity maximum of the Changjiang Estuary belongs to co-turbidity maximum with both tide and salt mechanisms.

Key words Changjiang Estuary, turbidity maximum, sediment accumulation, sediment resuspension