

长江口动水絮凝沉降与拦门沙 淤积的关系*

张志忠 阮文杰 蒋国俊

(杭州大学河口与港湾研究室, 杭州 310028)

提 要 根据1982年4月—1983年3月长江口南槽3个站位全年逐月大潮的水化学成分、悬沙粒度与粘土矿物资料, 1984—1992年在环形水槽中获得的近百个组次的动水絮凝沉降试验研究资料, 以及长江口细颗粒泥沙、浮泥与底质研究成果, 对拦门沙形成过程及其机理进行综合研究。结果表明, 长江口拦门沙为最年轻的活动三角洲, 汛期集中输水输沙与台湾暖流同期相遇, 为动水絮凝沉降最强和浮泥最为发育时期; 涨潮期当盐度为 $(9-13) \times 10^{-3}$ 时, 伊利石、高岭石在盐水楔顶部发生动水絮凝沉降, 而落潮期当盐度在 $(19-24) \times 10^{-3}$ 时, 蒙脱石在盐水楔尾部发生动水絮凝沉降, 揭示了拦门沙水平淤积的基本规律; 半月周期的浮泥透镜体所残积的中、粗粉沙形成钻孔中常见的透镜体与薄层理, 则揭示了拦门沙的垂直加积的基本规律, 为拦门沙综合治理与深水航道的开发利用提供科学依据。

关键词 长江口 拦门沙 细颗粒泥沙 动水絮凝沉降

长江为我国第一大河, 以其水沙丰沛而著称, 当流经江苏省徐六泾后, 便进入长江口, 在入海外形成复合型的拦门沙堆积体, 其自然水深约6.5 m。因此, 长江口拦门沙便成了扼海河联运的咽喉, 抑制上海港和长江航运的发展。为研究该拦门沙的形成过程与通航航道, 作者对南槽3个站位进行了逐月大潮的调查与分析, 并在环形水槽中做了近百个组次的动水絮凝沉降试验研究。根据上述资料, 并综合长江口悬沙、浮泥与底质的专项研究成果, 阐述拦门沙水平与垂直淤积的基本规律及其机理, 为长江口综合治理、深水航道的规划与设计提供科学依据。

1 环境概述

长江口为由陆向海的过渡环境, 受到流域与海域来沙的相互影响, 形成复杂多变的现代河口环境。

1.1 边界环境 徐六泾节点处仅宽6 km, 入海河宽超过90 km, 河口段全长170余公里, 放宽率为17, 呈现三级分汊四口入海的河口形势(陈吉余等, 1984)。长江口拦门沙, 系由启东与南汇两个边滩、崇明与横沙两个岛滩以及铜沙与九段两个浅滩构成复合型的堆积体, 其总面积近 $5 \times 10^3 \text{ km}^2$, 10 m等深线约以50 m/a的速率向东南延伸, 而南北两大边滩的延伸速率较前值为小, 它们未能对岛滩、浅滩起到掩护作用, 抑制了垂向加积强度, 形成凸向东南的扇形拦门沙堆积体。

* 国家自然科学基金资助项目, 0924号。张志忠, 男, 出生于1935年4月, 教授。
收稿日期: 1993年3月8日; 接受日期: 1993年5月5日。

1.2 动力环境 长江径流总量为 9 250 亿 m^3 , 泥沙以悬移质和推移质形式输移, 前者输沙量达 4.86 亿 t; 后者约有 0.53 亿 t。这些水沙既有每隔 7—8 a 轮流出现丰水期与枯水期的长周期变化, 又有年内水沙分配的规律, 汛期水沙高度集中则是长江口动力沉积的重要特征(张志忠, 1979)。长江口的进潮量达 $26.64 \times 10^4 m^3/s$, 与流域的平均流量约成 4:1, 造床流量与涨潮潮量的比值为 0.1(钱宁等, 1964), 导致粗颗粒推移质泥沙在拦门沙区的淤积, 这是拦门沙淤积的原因之一。尽管长江口为中等潮差, 而它年内不同季节的大潮与小潮的潮量净差均为 $29 \times 10^3 m^3$, 足见其纳潮量之大, 每潮的输沙量要以千万 t 来计。这些水沙处于悬浮、沉降与再悬浮的往复之中。

1.3 水化学环境 长江口水化学环境条件, 以往未作系统观测, 表 1 列出了 1982 年 4 月至翌年 3 月间, 逐月大潮期采样的分析结果(王允菊, 1988)。可知, 盐水楔几乎占据了整个南槽, 水体中 $Na^+ > Mg^{2+} > Ca^{2+}$ 的序列则揭示出该槽主要受海水所制约。但是, H_{45} 站洪季时呈现 $Na^+ > Ca^{2+} > Mg^{2+}$ 与 $Cl^- > SO_4^{2-} > HCO_3^-$ 的序列, 我们称其为海河过渡型水质。长江口优势流分析表明(张志忠等, 1983 a), 北港以落潮优势流为主, 南槽则反之, 且形成顺时针的水沙倒灌, 而北槽则介于两者之间, 由此导致诸水道化学环境的差异。值得指出的是, 前述汛期高度集中输水输沙, 恰和高温高盐的台湾暖流同期相遇, 细颗粒泥沙则发生动水絮凝沉降, 这导致拦门沙区淤积的另一重要原因。

表 1 长江口南槽水化学成分及其变化

Tab. 1 The water chemical composition and their changes in the Changjiang River Estuary South Channel

项目	H_{46} 站 (45km)			H_{24} 站 (27km)			H_{11} 站 (0km)		
	枯季	洪季	年均值	枯季	洪季	年均值	枯季	洪季	年均值
酸碱度 (pH)	7.91	7.70	7.81	7.92	7.53	7.73	7.34	7.51	7.68
盐度 ($\times 10^{-3}$)	<2	<<2	<2	9.97	8.73	9.35	21.32	11.27	16.75
比重 (g/cm^3)	1.0037	0.9994	1.0016	1.0079	1.0045	1.0062	1.0123	1.0068	1.0123
Ca^{2+} (mg/L)	80.39	32.77	56.58	140.98	128.83	134.91	262.15	156.45	209.3
Mg^{2+} (mg/L)	157.66	7.09	82.38	369.44	341.63	355.54	713.29	436.16	574.73
K^+ (mg/L)	47.69	2.23	24.96	116.92	101.50	109.21	255.33	135.08	195.57
Na^+ (mg/L)	1 218.56	68.33	643.47	3 145.50	2 786.36	1 965.93	6 695.07	3 770.50	5 232.79
Cl^- (mg/L)	2 217.67	44.64	1 131.16	5 358.47	4 809.95	5 084.21	11 010.73	6 302.34	9 106.54
SO_4^{2-} (mg/L)	238.22	19.59	128.91	556.84	704.79	630.82	918.12	721.66	819.89
HCO_3^- (mg/L)	126.41	116.88	121.65	134.42	131.06	132.74	141.39	132.40	136.90

2 研究方法

1982 年 4 月至翌年 3 月, 对长江口南槽上口 H_{45} 站、南槽滩顶 H_{24} 站与入海处的

H₁₁ 站,进行逐月大潮的定点调查,并用双光束原子吸收仪、TAII 型库特计数器与 X 衍射仪等对水样与悬沙样品作了水化学与悬沙粒度成分分析与悬沙粘土矿物的鉴定。1984—1992 年底开展了细颗粒泥沙动水絮凝试验研究。在设定的条件下,在环形水槽中共获得了近百个组次的试验研究资料。根据这些资料,结合长江口悬沙、浮泥与底质的专项研究成果,对长江口拦门沙形成过程及其机理进行了综合研究,现将研究结果阐述于后。

3 研究结果

关于长江口拦门沙形成的机理,众家提出不少有益的观点,如山潮水比值说(钱宁等,1964),滞流点说(黄胜等,1980),水平环流说(沈焕庭等,1985),泥沙搬运零点说¹⁾,我们则提出了动水絮凝沉降说(张志忠等,1983 b),它与拦门沙的淤积关系阐述如下。

3.1 拦门沙的基底环境与沉积结构 长江口拦门沙为河口三角洲中的活动三角洲,其基底环境在 1.1 万年前为平原湖泊沼泽环境,冰后期洋面抬升后则成了海湾环境,约在 7 千年前后才开始接受流域来沙(秦蕴珊等,1987),故拦门沙地区的地层层序应为平原湖泊相→海湾相→现代河口相,而拦门沙堆积体是最晚才形成的堆积地貌,其沉积结构,下部为细砂、极细砂的砂层,中、上部分别为粉砂质粘土层和粉砂质淤泥层,均有砂质与粉砂质的透镜体和层理存在,上细下粗,垂直梯度清晰 (Chen et al., 1982)。

3.2 拦门沙区现代沉积 长江流域下泄的泥沙,若以 32 μm 划分成粗、细两种性质不

表 2 长江口拦门沙区航槽底部沉积类型与沉积特性

Tab. 2 Sediment types and depositional characteristics in waterway bottom in the Changjiang River Estuary Mouth Bar Area

项目		北 港			铜沙串沟	北 槽			南 槽			
		细砂	极细砂	粗粉砂	极细砂	极细砂	粗粉砂	粗粉砂	中粉砂	细粉砂	极细粉砂	
粒 度 成 分 (%)	0.25											
	0.125	56.00	12.30			21.00		10.00				
	0.063	39.71	58.20	38.52	78.94	60.55	32.21	24.83	19.84	10.25	21.36	
	0.016	1.25	17.75	43.53	11.81	15.26	37.14	36.94	40.90	39.17	24.69	
	0.004	0.92	5.37	8.87	3.95	1.63	10.29	13.59	18.23	24.62	21.12	
	0.001	1.22	1.82	4.11	3.19	0.44	8.67	5.39	8.74	11.01	13.81	
	<0.001	0.90	4.52	4.97	2.11	1.16	11.63	9.25	12.29	14.93	10.03	
粒 度 参 数	MdΦ	2.97	3.60	4.33	3.46	3.48	4.72	4.62	5.26	6.01	6.33	
	M2Φ	2.98	4.00	4.72	3.70	3.49	5.67	5.28	5.94	6.66	6.92	
	σ1Φ	0.50	1.46	1.67	0.98	0.77	2.59	2.62	2.52	2.60	3.03	
	SK1Φ	0.06	0.63	0.55	0.82	0.14	0.59	0.52	0.44	0.40	0.30	
	KGΦ	2.02	1.93	1.65	4.04	0.65	1.09	1.47	1.17	1.07	0.88	

1) 周华君, 1992, 长江口最大混浊带特性研究和三维水流泥沙数值模拟, 河海大学博士论文。

同的泥沙¹⁾,它们之比约为 2:8。这些泥沙在拦门沙区的沉积见表 2。

由表 2 可知,拦门沙区共有 6 类沉积物,它们横向分布具有北粗南细的特征,且揭示了北港为粗颗粒泥沙的输沙通道,南槽则是细颗粒泥沙的排沙通道,而北槽兼而有之。

3.3 细颗粒泥沙的沉降 细颗粒泥沙动水絮凝沉降试验表明,它的沉降受到动水絮凝临界流速的控制,且小于该值后才真正发生细颗粒泥沙的沉降(阮文杰,1991 a)。长江口悬沙平均中径为 8.6 μm ,其静水沉速仅为 0.0079 cm/s,而拦门沙区的平均潮流速在 1m/s 左右,憩流时间甚短,足以使悬沙处于扬动状态。对长江口天然水流中的絮凝作用研究结果表明(阮文杰,1991 b),絮凝使长江口泥沙运动出现竖向分层流,改变了垂线泥沙浓度梯度;天然水流中也存在絮凝临界流速,只有当流速小于该值时,絮凝泥沙的竖向运动才得以体现,且垂线不同高程处的絮凝条件受水流切应力制约。总之,细颗粒泥沙的落淤均系动水絮凝作用引起的。

3.4 动水絮凝沉降与拦门沙水平淤积关系 小于 32 μm 的细颗粒泥沙的表面电荷量,占全沙的 92.3%,其中粘土矿物的表面电荷量达 46.6% (王允菊等,1983)。这些带有电荷的细颗粒泥沙,在所述适宜的介质、动力条件时,发生动水絮凝沉降。这一沉降特性与粗颗粒泥沙有根本的区别,后者只发生物理变化。综合分析室内试验与现场观测资料后发现,涨潮期当盐度在 9×10^{-3} — 13×10^{-3} 时,悬沙中的伊利石、高岭石絮凝最佳,其淤积部位在盐水楔头部稍上的位置;落潮期当盐度在 19×10^{-3} — 24×10^{-3} 时,蒙脱石絮凝最佳,其淤积部位在盐水楔的尾部。现再给出表 3,上述结论得到表 1 与表 3 中盐度与粘土矿物的纵向分布规律的佐证。伊利石占粘土矿物的 65%—70% 之多,同时它在盐度 10×10^{-3} 时,其沉速约比蒙脱石大 9 倍,因此在盐水楔头部稍上位置是细颗粒泥沙落淤最强的部位,也是浮泥最为发育的位置,这与拦门沙的滩顶位置基本吻合。综上所述,细颗粒泥沙纵向动水絮凝沉降的基本模式,也就揭示了长江口拦门沙区的水平淤积的基本规律。

表 3 长江口南槽枯洪季悬沙粘土矿物成分 (%)¹⁾

Tab. 3 Clay mineral components (%) of suspended sediments during flood and drought seasons in the Changjiang River Estuary South Channel

站位 矿物 ²⁾	H ₁₆				H ₂₄				H ₁₁			
	I	M	ch	K	I	M	ch	K	I	M	ch	K
枯季	64.4	13.4	15.5	6.7	66.9	9.8	16.1	7.3	67.0	9.6	16.4	7.0
洪季	66.5	10.9	15.7	6.9	70.4	6.9	15.3	7.5	69.8	6.2	16.6	7.4
平均	65.4	12.3	15.6	6.8	68.5	8.5	15.7	7.4	68.1	3.3	16.5	7.1

1) 9 月份缺测; 2) I 为伊利石, M 为蒙脱石, ch 为绿泥石, K 为高岭石。

3.5 浮泥消长与拦门沙垂直淤积关系 长江口汛期高度集中输水输沙与高温高盐的台湾暖流入侵同期相遇,不仅是拦门沙区细颗粒泥沙动水絮凝的最活跃时期,也是浮泥频频出现的时期,这在南槽最为典型(张志忠等,1977)。表 4 中浮泥的粘土含量明显高于悬沙与底质。浮泥往往在洪季大潮至小潮时形成,反之消失。因此,长江口浮泥的形成与消

1) 张志忠, 1992, 长江口细颗粒泥沙基本特性研究, 全国泥沙基本理论学术讨论会论文集, 第一集, 369—375。

失,直接受制于流域丰富的细颗粒泥沙的补给、高温高盐的介质环境与动力条件,其周期仅为半个月,为一活动的透镜体,导致拦门沙区悬沙、浮泥与底质之间的频繁交换,故该区悬沙已不属于冲泻质,而要参与造床过程。根据法国对吉伦特河口浮泥(半年周期的静止透镜体)用 ^{45}Cr 测定结果,约有20%较粗的泥沙要残积在河床上(Allen, 1976)。据此推测,长江口拦门沙区浮泥在汛期不断消长过程中,其蚀余残积较粗的泥沙数量较之该河口要多,导致汛期河床底质的粗化,形成难于疏浚的“铁板沙”,其后再覆盖上较细的泥沙,便构成钻孔中常见的粉砂质层理与透镜体,它们与径流所推移的砂质层理与透镜体还是易于区别的。总之,拦门沙区浮泥消长过程和淤积过程的基本模式,则是拦门沙垂向加积的基本规律。

表 4 长江口南槽悬沙、浮泥与底质特性

Tab. 4 The characteristics of suspended sediments, fluid mud and bed sediments in the Changjiang River Estuary South Channel

项 目	取样日期 (年·月)	样品个数	中值粒径 (mm)		优势粒级 (mm)	<0.004(mm) 百分含量	
			平均值	极 值		平均值	极 值
悬 沙	1978.8	16	0.0114	0.0051—0.0138	0.003—0.016	17.1	4.5—31.0
浮 泥	9	7	0.0198	0.0057—0.0330	0.003—0.016	27.8	6.5—47.2
底 质	8	10	0.0327	0.0054—0.0630	0.016—0.063	19.9	2.0—32.8

3.6 动水絮凝的随潮变化 在一个潮周期里,细颗粒泥沙动水絮凝沉降有其变化规律,且主要发生在涨潮期。当落潮憩流后,随着涨潮流速逐渐接近絮凝临界流速时,含沙量不仅没有随之增大,反而略有减小趋势,这一现象正是动水絮凝沉降所致。当涨潮峰值流速过后,在临界流速附近再次出现含沙量的急骤降低,此无法用动力学加以解释,只能是动水絮凝沉降的结果。但在落潮期里,流速与含沙量的关系,就不如涨潮期那样清晰,这是因为落潮期的泥沙补给,除表层为流域来沙外,主要靠临底层高含沙量和已着床的絮凝泥沙再悬浮供给的,而这些泥沙表面所带的电荷在涨潮期动水絮凝时已趋于中和,这样落潮期即使有絮凝作用的发生,也远较涨潮期减弱。上述动水絮凝的随潮变化,与在动水絮凝模拟中的基本规律相似,所不同的是前者的动水絮凝临界流速较后者约大1倍,这可能跟天然水深比试验水深为大而使絮凝体得到充分发育有关。长江口动水絮凝的随潮变化规律,与 Nichols (1986) 在论述河口细颗粒泥沙再悬浮影响时所揭示的现象基本一致。

4 结论

4.1 长江口为由陆向海的过渡环境,冰后期在两种水流、两种介质与两种泥沙来源的作用下,在入海处形成复合型的拦门沙堆积地貌,每年约以 50 m/a 的速率向东南延伸,为长江三角洲中最为年轻的活动三角洲。

4.2 长江流域汛期集中输水输沙与高温高盐的台湾暖流在拦门沙区同期相遇,涨潮期当盐度为 9×10^{-3} — 13×10^{-3} 时,伊利石、高岭石在盐水楔头部稍上部位发生动水絮凝沉降;落潮期当盐度为 19×10^{-3} — 24×10^{-3} 时,蒙脱石则在盐水楔尾部才发生动水絮凝沉降,揭示了拦门沙水平淤积的基本规律。半月周期的浮泥活动透镜体,其每一消长过程中

残积的中、粗粉砂,后期再覆盖细颗粒泥沙,则与钻孔中常见的粉砂质透镜体和薄层理基本吻合,且与径流形成的砂质透镜体和层理有明显的区别,揭示了拦门沙垂直加积的基本规律。

4.3 长江口细颗粒泥沙动水絮凝沉降特性与规律,特别是动水絮凝临界流速,在拦门沙综合治理与深水航槽规划、设计中应充分考虑,在确定导堤的间宽与导堤轴的走向时,既要考虑强淤部位,又要考虑扩散方向,可望达到整治工程的防淤、减淤的工程效益。

参 考 文 献

- 王允菊等, 1983, 长江口南槽水化学特性与悬沙粘土矿物, 长江口综合治理研究, 4: 189—198。
王允菊, 1988, 长江口悬浮泥沙的电荷特性, 东海海洋, 1(4): 23—29。
阮文杰, 1991a, 细颗粒泥沙动水絮凝机理分析, 海洋科学, 5: 46—49。
阮文杰, 1991b, 长江口天然水流中细颗粒泥沙的絮凝作用, 海洋科学, 6: 39—43。
陈吉余等, 1984, 两千年来长江河口发育模式, 长江口航道治理研究, 1: 87—93。
张志忠, 1979, 长江口南槽沉积特性研究, 长江口航道治理研究, 1: 49—61。
张志忠等, 1983a, 长江口悬沙及其运移, 海洋科学, 5: 6—11。
张志忠等, 1983b, 长江口细颗粒泥沙絮凝若干特性探讨, 第二次河流泥沙国际学术讨论会论文集, 水利电力出版社(北京), 274—289。
张志忠等, 1977, 长江口浮泥若干特性的初步研究, 杭州大学学报, 1: 83—96。
沈焕庭等, 1985, 长江口最大混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, 科学出版社(北京), 76—89。
钱宁等, 1964, 钱塘江河口沙坎的近代过程, 地理学报, 30(2): 124—141。
秦蕴珊等, 1987, 晚更新世以来长江口水下三角洲的沉积结构与环境变迁, 沉积学报, 5(5): 105—111。
黄胜等, 1980, 长江口拦门沙淤积分析, 第一次河流泥沙国际学术讨论会论文集, 水利电力出版社(北京), C-5。
Allen, G. P., 1976, Transport and Deposition of Suspended Sediment in the Gironde Estuary, Estuarine Processes, Vol. II, Academic Press (New York), pp. 63—81。
Chen Ji yu et al., 1982, Description of the Morphology and Sedimentary Structures of the River Mouth Bar in the Changjiang River Estuary, Estuarine Comparisons, Academic Press (New York), pp. 667—675。
Nichols, M. M., 1986, Effects of Fine Sediment Resuspended in Estuaries, Estuarine Cohesive Sediment Dynamics, Springer-Verlag (Beilin), pp. 5—42。

THE RELATIONSHIP BETWEEN FLOCCULATING SETTLEMENT IN FLOWING WATER AND DEPOSITION IN THE CHANGJIANG RIVER ESTUARY MOUTH BAR AREA

Zhang Zhizhong, Ruan Wenjie Jiang Guojun

(*Estuary And Harbor Research Division, Hangzhou University, Hangzhou 310028*)

ABSTRACT

Based on the water chemical components, the suspended grain size and clay minerals data in the Changjiang River Estuary South Channel, every springtide from April, 1983 to March, 1984, and about a hundred flocculating settlement test data on flowing water, which were undertaken in the circle water channel from 1984 to 1992, and the results of study on the fine sediments, fluid mud and bottom sediments, the forming process and mechanism of mouth bar were comprehensively studied. It was shown that the mouth bar is the youngest active delta in the Changjiang River Estuary during the flood season, while the area where the Changjiang runoff and Taiwan warm current meet off the Changjiang Estuary was the strongest flocculating settlement and most active fluid mud development. The illites and kaolinites are flocculated and deposited at the salt water wedgehead where the water salinity is about 9×10^{-3} — 13×10^{-3} during flood time and the montmorillonites are flocculated and deposited in the salt water wedgetail where the water salinity is about 19×10^{-3} — 24×10^{-3} during the ebb time, which show the essential regularities of the horizontal deposition in the mouth bar area. The fluid mud lens which grows and declines in a semi-month cycle produces a coarse and medium silt relic lens and beddings, which show the essential regularities of vertical accumulation in Changjiang River Estuary mouth bar area. The above findings provide the scientific base for the comprehensive management and deep waterway desing and uses of mouth bar.

Key words Changjiang River Estuary Mouth bar Fine sediments Flocculation settlement in flowing water