

长江河口最大浑浊带的悬沙输移特征*

贺松林 孙介民

(华东师范大学河口海岸研究所, 上海 200062)

提要 根据 1988 年洪、枯季在长江口南、北槽进行的最大浑浊带专项水文观测的资料, 对悬沙输移的分项因子进行研究。结果表明, 长江口最大浑浊带的悬沙输移过程存在明显的潮泵效应及强烈的悬沙、底沙双向交换; 长江口南、北槽之间存在一个大尺度的平面环向悬沙输移, 同时南、北槽自身还有次一级尺度的槽内平面环向悬沙输移。本文还探讨了最大浑浊带与拦门浅滩相互影响、彼此制约的关系。

关键词 长江河口 最大浑浊带 悬沙输移 潮泵效应

最大浑浊带是河口中的高含沙量区段, 在径流、潮流的共同作用和盐淡水混合作用下, 悬沙不仅在最大浑浊带富聚, 而且与床底物质产生强烈的泥沙交换, 从而对河口拦门浅滩的侵蚀、堆积产生重要影响。因此, 河口最大浑浊带引起了广泛的关注。80 年代以来, 关于长江口最大浑浊带的成因、变化规律及悬沙絮凝沉降等问题作了较深入的研究(沈焕庭等, 1985; 1986a; 1986b; 张志忠等, 1983)。由于长江口最大浑浊带位于口门附近, 其区位与航槽拦门浅滩吻合, 两者存在怎样的关系, 联系的机制是什么, 这是探索拦门沙发育这一河口学核心问题至关重要的方面。本文着重对长江河口最大浑浊带悬沙输移特征及槽底的泥沙交换问题进行讨论。

1 环境背景概述

河口是河流与海洋的交汇区域, 由于两大水体性质迥异, 因而在某些参量的过渡状态上出现量的跃变或质的突变, 在纵向上形成不同特性的界面, 如潮区界、潮流界、盐水入侵界、动力平衡带、盐淡水主混合带等。长江口南北槽即为动力平衡带和盐淡水主混合带所在。

长江口三级分汊、四汊入海, 南槽和北槽是南侧的两条汊道, 也是上海港的主要入海通道(图 1)。长江为世界级巨川, 水量充沛, 径流强, 但接近口门时, 因江面展宽、水流分汊和海水顶托, 径流作用渐趋减弱。同时河口外为中等潮差海区, 口门平均潮差为 2.67m, 潮流作用也颇强, 在潮波向河口传播过程中因受摩擦耗能, 潮流亦渐减弱。于是在径流控制段与潮流控制段之间出现径流与潮流均势相持的状态, 表现在径、潮流合成的往复涨落潮流的优势对比趋于接近, 优势流状态随空间(横向、垂向)而转换和随时间(洪枯季、大小潮)而变更。在这种动力背景下, 若流域泥沙在河口上游侧几乎是长驱直下或“进三步退一步”向海输运的话, 那么一旦进入动力平衡带, 泥沙就会不同程度地往返徘徊, 有一个相对较长的滞留期。在流域泥沙源源而至的情况下, 泥沙必然富聚, 形

* 国家自然科学基金重大项目, 9487005。贺松林, 男, 出生于 1941 年 10 月, 副教授。

收稿日期: 1992 年 7 月 27 日, 接受日期: 1994 年 3 月 29 日。

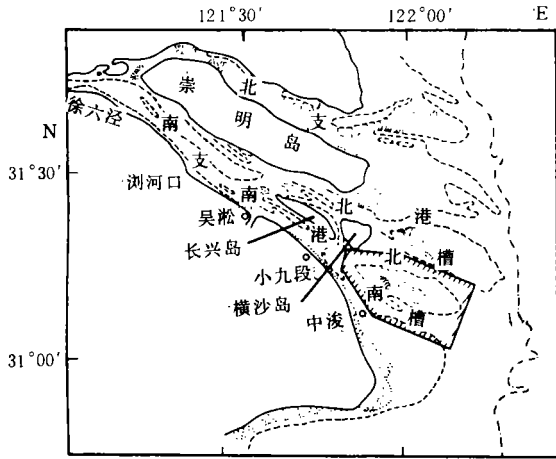


图1 长江口概图

Fig.1 The sketch map of the Changjiang River Estuary

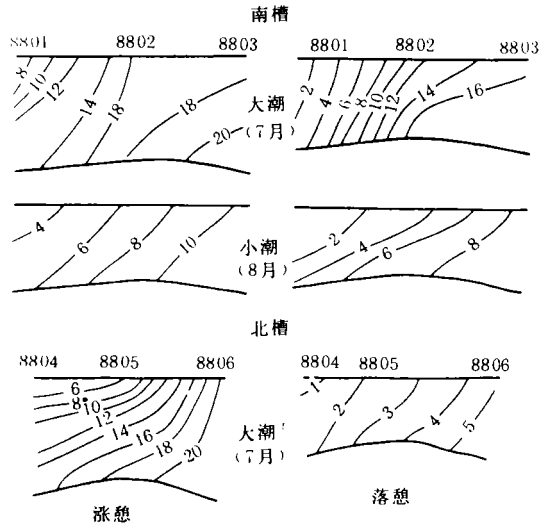


图2 南、北槽盐度纵向分布(1988年7—8月)

Fig.2 Longitudinal salinity distribution in the South and North Channels of the Changjiang River Estuary

成高含沙量的区段。

南、北槽环境的另一特点是盐度纵向梯度较大，盐度的潮周期变幅大(图2)，这是盐淡水主混合带的特征。纵向盐度梯度总是产生一个指向上游的密度梯度力，加强涨潮流，削弱落潮流。在涨潮流均势抗衡的情况下，附加的密度梯度力就会对优势流状态的变化产生影响，从而控制悬沙的净输移。此外，盐度是细颗粒泥沙絮凝沉降的主要因素之一。实验表明，盐度 $(3 - 15) \times 10^{-3}$ 的介质最适宜细颗粒泥沙的絮凝(沈焕庭等，1985；张志忠等，1983；邱佩英等，1988)。南、北槽盐度的时空分布恰好提供了适宜的介质环境。

2 观测和研究方法

现场观测在1988年7—8月和12月进行，所取资料分别代表洪、枯季的水情。测站沿南、北槽纵向布置，兼顾上、中、下段，分别作大、小潮的纵向同步观测。此外，在寻常潮中段布设测站作横向的同步观测。洪季观测12个站次，枯季20个站次。每次同步观测25h，每小时观测一次，采用六点法观测水深、流速、流向、含沙量和盐度。然后按通用的计算方法计算每个观测时刻的垂线平均流速 V 、流向 A 和含沙量 C ，代表该时刻测站位置单位水柱的运动状态和含沙状态。暂且不管水柱内不同层次的输沙差异和层间泥沙交换，将单位水柱视为一个单元，某时刻的单宽输沙率可写成：

$$\begin{aligned}
 T &= VCH = (\bar{V} + \Delta V)(\bar{C} + \Delta C)(\bar{H} + \Delta H) \\
 &= \bar{V}\bar{C}\bar{H} + \Delta V\Delta H \cdot \bar{C} + \Delta V\Delta C \cdot \bar{H} + \Delta C\Delta H \cdot \bar{V} \\
 &\quad + \bar{V}\bar{C} \cdot \Delta H + \bar{V}\bar{H} \cdot \Delta C + \bar{C}\bar{H} \cdot \Delta V + \Delta V\Delta C\Delta H
 \end{aligned}$$

式中， \bar{V} ， \bar{C} ， \bar{H} 分别为潮周期平均的垂均流速、含沙量和水深； ΔV ， ΔC ， ΔH 分别为某一时刻的垂均流速、含沙量、水深与 \bar{V} ， \bar{C} ， \bar{H} 的偏差。以潮周期为计算单元时， $\Sigma\Delta V = \Sigma\Delta C = \Sigma\Delta H = 0$ ，故潮周期平均单宽输沙率为：

$$T = \overline{VCH} + \overline{\Delta V\Delta H} \cdot \overline{C} + \overline{\Delta V\Delta C} \cdot \overline{H} + \overline{\Delta C\Delta H} \cdot \overline{V} + \overline{\Delta V\Delta C\Delta H}$$

$$(T_1) \quad (T_2) \quad (T_3) \quad (T_4) \quad (T_5)$$

T_1 项中, \overline{C} , \overline{H} 恒正, \overline{V} 正负两可。 T_1 符号仅取决于 \overline{V} 的正负, 即仅取决于涨落潮流的强度对比。 T_1 表征优势流对净输沙的贡献。 T_2 项反映斯托克斯漂流效应对净输沙的贡献, 在河口地区该项为负值。 T_3 项的符号依 $\Delta V\Delta C$ 正负而定, 后者既取决于流速过程线和含沙量过程线的相位关系, 还与涨落潮流掀沙效应的差异有关。涨潮含沙量大于落潮含沙量时, $\Delta V\Delta C$ 为负; 反之, $\Delta V\Delta C$ 为正。故 T_3 反映了涨落潮流挟沙强度对净输沙的贡献。 T_4 是含沙量与水深变化的相关项, 因研究区段处在动力平衡带, \overline{V} 的绝对值通常较小, 故 T_4 绝对值也很小。 T_5 项依赖于 V , C , H 的相关性, 其绝对值与前三项相比小得多。

上述 T_3 , T_4 , T_5 项中都包含 ΔC , 事实上, 在一个潮周期中流域来水的含沙量可近似地视为常量, ΔC 的变化主要归因于水体与槽底之间的泥沙双向交换。在潮汐涨落过程中, 水体含沙量有规律地变化, 泥沙颗粒在水体与槽底之间周期性地作上下扬沉的现象, Uncle (1985)形象地喻为潮泵效应(Tidal pumping)。 T_1 和 T_2 组成平流输移项; T_3 , T_4 , T_5 组成“潮泵效应”项。

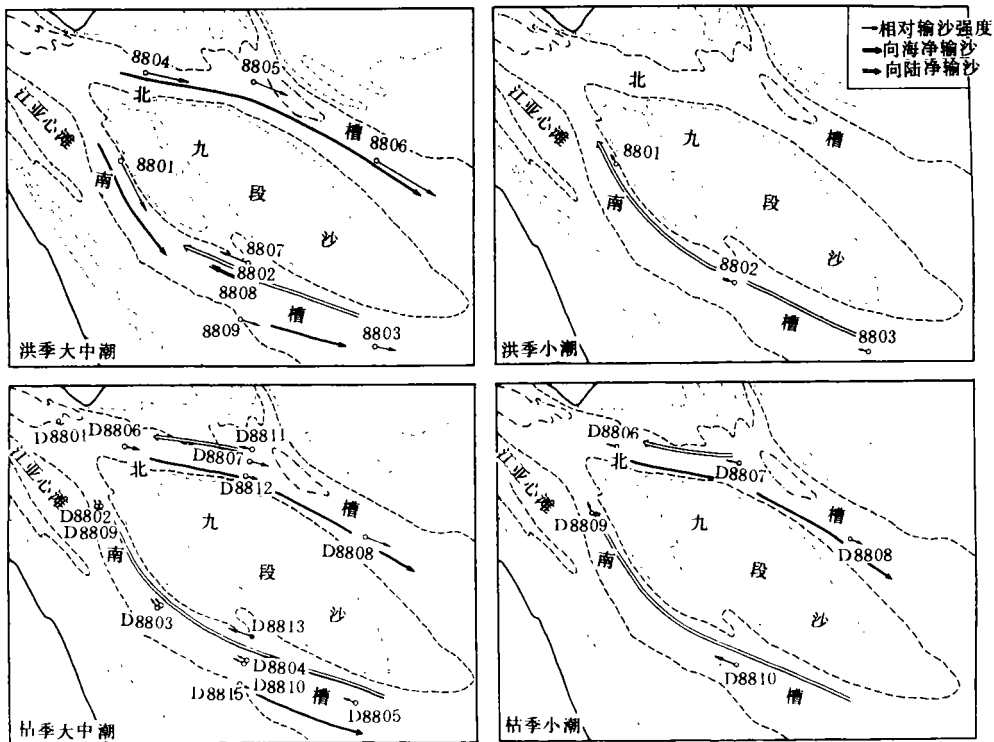


图3 长江口南、北槽悬沙净输移概图

Fig.3 Sketch map showing net transport of suspended sediment in the South and North Channels of the Changjiang River Estuary

3 结果与讨论

1988年洪、枯季观测的32个站次的潮周期平均单宽输沙率及诸分项值列于表1。

由表1可以看出:(1)在南、北槽内悬沙净输移主要由前3项构成,以绝对值大小排序, T_1 居首, T_3 其次, T_2 再次, T_4 最小。(2)在32个站次中有19个站次的 $|T_3+T_4+T_5|$ 值大于 $|T_1+T_2|$ 值,反映潮泵效应项在悬沙输移中占有重要地位,在分析拦

表1 长江口南、北槽测站单宽输沙率和分项值 [1988年, kg/(m·s)]

Tab.1 The measured unit width transport rate of suspended Sediment and its component items in the South and North Channels of the Changjiang River Estuary

观测日期 (月 日)	潮 汛	站 位	T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	T_1+T_2	$T_3+T_4+T_5$	T
7月 29—30日	大 潮	8801	2.49	-3.15	3.19	-0.09	-0.15	-0.66	2.95	2.29
		8802	-0.77	-1.31	0.08	0.05	-0.90	-2.08	-0.77	-2.85
		8803	3.39	-2.09	1.25	-0.01	-0.25	1.30	0.99	2.29
7月 30—31日	大 潮	8804	3.26	-2.02	1.36	-0.06	-0.50	1.24	0.80	2.04
		8805	3.02	-2.95	1.68	-0.16	0.21	0.07	1.73	1.80
		8806	8.87	-3.34	2.22	-0.21	-0.74	5.53	1.27	6.80
8月 3—4日	中 潮	8807	0.08	-0.79	-2.22	0.04	-0.09	-0.71	-2.27	-2.98
		8808	-1.69	-2.01	-3.26	-0.04	0.35	-3.70	-2.95	-6.65
		8809	2.34	-0.90	1.44	-0.13	-0.24	1.44	1.07	2.51
8月 6—7日	小 潮	8801	-0.02	-0.09	-0.44	0	-0.02	-0.11	-0.46	-0.57
		8802	-0.22	-0.07	-0.54	-0.01	-0.02	-0.29	-0.57	-0.86
		8803	-0.10	-0.05	-0.62	0	0.02	-0.15	-0.60	-0.75
12月 23—24日	大 潮	D8806	1.59	-0.34	-0.28	-0.02	-0.03	1.25	-0.33	0.92
		D8807	1.72	-0.72	0.53	-0.02	-0.10	1.00	0.41	1.41
		D8808	2.45	-0.83	-0.33	-0.02	-0.07	1.62	-0.42	1.20
		D8809	0.50	-0.27	-0.87	1.00	0.03	0.23	-0.83	-0.60
		D8810	0.83	-0.43	-0.10	0.01	-0.08	0.40	-1.07	-0.67
12月 29—30日	小 潮	D8806	0.20	-0.09	-0.12	0.01	-0.01	0.11	-0.12	-0.01
		D8807	0.15	-0.13	-0.86	0	0.03	0.02	-0.83	-0.81
		D8808	0.89	-0.17	-0.14	0	0.01	0.72	-0.13	0.59
		D8809	0.30	-0.07	-0.70	0.01	0.05	0.23	-0.64	-0.41
		D8810	-0.41	-0.14	-0.39	0	-0.01	-0.55	-0.40	-0.95
12月 19—20日	中 潮	D8811	-0.10	-0.25	-0.84	0	-0.01	-0.35	-0.85	-1.20
		D8812	1.89	-0.33	-1.55	0.06	-0.03	1.56	-1.52	0.04
		D8813	-0.86	-0.36	-1.23	-0.04	-0.23	-1.22	-1.50	-2.72
		D8814	-0.59	-0.36	-0.89	-0.02	-0.07	-0.95	-0.98	-1.93
		D8815	0.86	-0.27	0.12	0	-0.02	0.59	0.10	0.69
12月 27—28日	中 潮	D8801	1.11	-0.43	-1.13	0.01	0.02	0.68	-1.10	-0.42
		D8802	1.23	-0.40	-1.86	0.02	0	0.83	-1.84	-1.01
		D8803	1.98	-0.56	-1.61	0.01	0.04	1.42	-1.56	-0.14
		D8804	0.21	-0.22	-0.99	0.01	-0.06	-0.01	-1.04	-1.05
		D8805	0.35	-0.49	-0.55	0	-0.01	-0.14	-0.56	-0.70
平均绝对值			1.39	0.80	1.07	0.03	0.14	1.09	1.04	

门浅滩冲淤时必须考虑潮泵效应的贡献。(3) 比较洪枯季、大小潮的悬沙输移, 无论是平移输移项还是潮泵效应项, 绝对值一般洪季大于枯季, 大潮大于小潮, 说明洪季或大潮期间悬沙输移较大, 水体与槽底之间的泥沙双向交换也更强烈。(4) 从空间分布看, 北槽一般以平流输移占优势, 且除 D8811 外, $T_1 + T_2$ 均为正值, T 也多为正值, 悬沙向海输移为主; 而南槽则潮泵效应占优势, 20 个站次中有 14 个站次的 $|T_3 + T_4 + T_5|$ 大于 $|T_1 + T_2|$, 且 12 个站次的 $T_1 + T_2$ 为负值, 16 个站次的 T 为负值, 悬沙向陆输移为主, 这与水文计算得到的北槽分流量大于南槽的结论是一致的。(5) 除了南、北槽之间存在一个大尺度平面环状悬沙输移——北槽向海输移为主, 南槽向陆输移为主——之外, 南、北槽自身亦还存在次一级的槽内平面环状悬沙输移, 南侧向海输沙, 而北侧向陆输沙(图3)。

水体与槽底之间的双向泥沙交换一般是不平衡的, 亦即泥沙的上扬与下沉的主趋方向是随动力条件、来沙条件变化而改变的。洪季流域供沙多, 水体的背景含沙量较高,

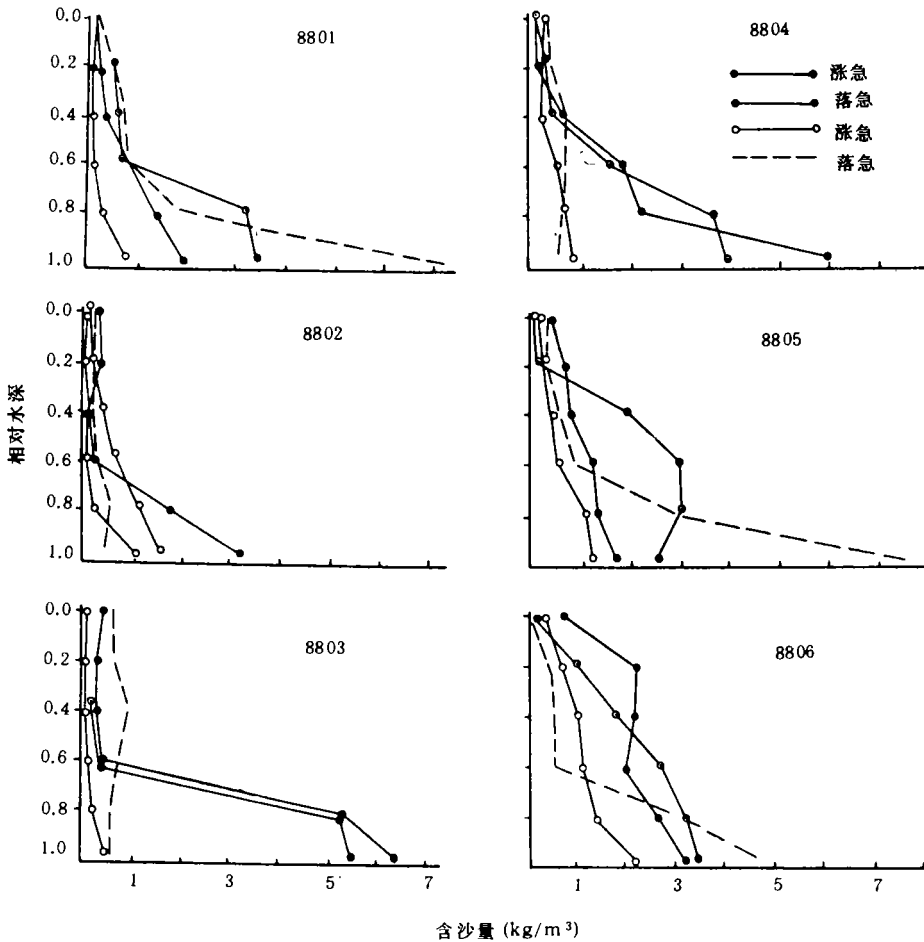


图4 含沙量垂线分布的潮周期变化

Fig. 4 Vertical distribution tidal change of sediment concentration in the South and North Channels of the Changjiang River Estuary

与背景含沙量较低的枯季相比, 憩流前后下沉的沙量相对较多, 当下沉沙量多于上扬沙量就发生槽底淤积。同样, 在供沙条件相同的情况下, 大潮的水流湍动强度大, 泥沙上扬盛于泥沙的下沉, 槽底趋于冲蚀。因而, 长江口南、北槽的拦门浅滩的淤积期在洪季, 尤其是在洪季小潮; 而冲蚀期在枯季, 特别是在枯季大潮。这与长江口拦门沙地区洪淤枯冲、大潮冲、小潮淤变化规律(徐海根等, 1983)是吻合的。

在上述讨论中, 我们把垂直水柱作为一个单元来考察其与槽底的泥沙交换。但是从含沙量垂线分布的变化(图 4)不难看出, 涨急或落急阶段水体含沙量的增大, 主要出现在中、下层, 而上层水体含沙量的变化甚小, 因此, 参与与槽底泥沙交换, 从而影响槽底冲淤变化的主要限于最大浑浊带水体的中、下层。

4 结论

长江口南、北槽处在河海交汇的动力平衡带和盐淡水主混合带, 发育典型的最大浑浊带, 同时又是航槽拦门浅滩所在, 这是长江口泥沙富聚和沉积的主要区段。

南、北槽存在复杂的悬沙净输移格局, 既有大尺度的槽间环向悬沙净输移, 也有次一级尺度的槽内环向净输移。

剖析单宽输沙率计算式的各分项因子并代入实测资料计算表明, 悬沙除随水流产生平流输移外, 还随水流强弱交替发生与槽底的泥沙交换, “潮泵效应”项在悬沙净输移构成中占有可与平流输移相比拟的重要性。

最大浑浊带与航槽拦门浅滩通过泥沙双向交换这一纽带相互影响、彼此制约。最大浑浊带水体的悬沙沉降是航槽拦门浅滩淤积的重要形式, 而拦门浅滩物质的重新悬扬则是河口最大浑浊带能够维持高含沙量状态的重要因素。

参 考 文 献

- 邱佩英等, 1988, 长江河口动力过程和地貌演变, 上海科学技术出版社(上海), 283 — 290。
沈焕庭等, 1985, 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。
沈焕庭等, 1986a, 海洋与湖沼, 17(1): 26 — 35。
沈焕庭等, 1986b, 泥沙研究, 1: 1 — 13。
张志忠等, 1983, 第二次国际河流泥沙学术讨论会论文集, 水利电力出版社(北京), 274 — 285。
徐海根等, 1983, 长江河口动力过程和地貌演变, 上海科学技术出版社(上海), 237 — 252。
Uncles, R. J. et al., 1985, *Estu. Coast Shelf Sci.*, 20: 147 — 167。

CHARACTERISTICS OF SUSPENDED SEDIMENT TRANSPORT IN THE TURBIDITY MAXIMUM OF THE CHANGJIANG RIVER ESTUARY

He Songlin, Sun Jiemin

(*Institute of Estuarine and Coastal Research, East China Normal University, Shanghai 200062*)

Abstract On the basis of data observed the turbidity maximum of the Changjiang River Estuary in rainy and dry seasons of 1988, the component items of suspended sediment transport are analyzed and studied. It comes to the conclusion that there exist significant tidal pumping effect and strong exchange between suspended load and bedload during the transport process of suspended matter in the turbidity maximum of the Changjiang River Estuary. A larger plane-looping net transport of suspended sediment between the South and the North Channels and secondary plane-looping net transport in respective channel are described. The relation that turbidity maximum and rivermouth bar are mutually impacted and conditioned is briefly discussed.

Key words Changjiang River Estuary Turbidity maximum Suspended sediment transport Tidal pumping effect