



长江口12.5 m深水航道悬沙分布特征*

刘杰, 程海峰, 赵德招, 王珍珍

(上海河口海岸科学研究中心, 上海 201201)

摘要: 利用长江口12.5 m深水航道洪、枯季水文测验资料, 分析深水航道悬沙的时空分布特征。结果表明: 南港圆沙段含沙量小, 垂线分布相对均匀; 北槽中段含沙量大, 垂向分布不均匀。细颗粒泥沙絮凝、盐淡水分层与河口滞流点是北槽中段形成高含沙量且垂向分布不均匀的主要原因。北槽中段含沙量的时空分布特征, 与12.5 m深水航道的回淤变化特征具有一致性, 表明北槽中段的航道回淤可能以悬沙淤积为主; 而南港圆沙段含沙量低, 且垂向相对均匀, 表明该区段航道回淤受悬沙的影响较小。

关键词: 长江口; 12.5 m深水航道; 悬沙; 时空分布

中图分类号: U 611

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2013)11-0049-06

Spatial and temporal distribution of suspended sediment concentration in the Yangtze estuary 12.5 m deepwater channel

LIU Jie, CHENG Hai-feng, ZHAO De-zhao, WANG Zhen-zhen

(Shanghai Estuarine and Coastal Science Research Center, Shanghai 201201, China)

Abstract: Based on the hydrologic data of the Yangtze estuary 12.5 m deepwater channel in the flood season and dry season, we analyze the spatial and temporal distribution of suspended sediment concentration. The result reveals that suspended sediment concentration in the south channel & Yuanyuansha and the middle section of the north passage is small, and its vertical distribution is relatively uniform. But in the middle section of the north passage, the suspended sediment concentration is high and the vertical distribution is uneven. Fine sediment flocculation, fresh and salt water mixing and stagnation point may be the main reasons for the high suspended sediment concentration in the bottom of the middle section of the north passage and large differences in the vertical distribution of the flood season. The high suspended sediment concentration in the middle section of the north passage and in the flood season is consistent with the characteristic of temporal and spatial change of 12.5 m deepwater channel siltation, indicating that siltation in the north passage resulting from the suspended sediment's deposition. The suspended sediment concentration in the south channel & Yuanyuansha is significantly lower than that in the north channel, and the vertical distribution is relatively uniform, which indicates that the contribution of channel siltation from suspended sediment silting may be small.

Key words: Yangtze estuary; 12.5 m deepwater channel; suspended sediment concentration; spatial and temporal distribution

河口是陆海相互作用的区段, 存在着径流、潮流、风浪和盐淡水等复杂的动力条件和泥沙条

收稿日期: 2013-08-25

*基金项目: 上海市科学技术委员会科研计划项目(12231203103); 水利部公益性行业科研专项经费项目(201301020); 长江科学院开放研究基金(CKWV2012304/KY); 交通运输部科技项目(2011 328 A06 70); 交通运输部科技项目(2012-329-A06-040)

作者简介: 刘杰(1975—), 男, 博士, 副研究员, 主要从事河口海岸泥沙研究。

件，同时，在河口口门附近通常发育有地貌上向上隆起的拦门沙，并成为碍航“瓶颈”。航道疏浚开挖后，破坏了原有的输沙平衡，航道将产生回淤。航道淤积方式通常为悬移质淤积、推移质淤积或二者均起作用。

长江口是丰水多沙、中等强度的潮汐河口，口门附近发育有巨大的拦门沙系^[1]。经过40多年几代专家学者潜心研究，在基本掌握了拦门沙航道演变规律^[2]的基础上，自1998年起分阶段实施了长江口深水航道治理工程。2010年12.5 m航道贯通，实现了航道治理目标。然而，由于长江口水沙运动的复杂性和人们对航道回淤规律认识的局限性，12.5 m航道开通后，实际回淤量仍较预期大，回淤分布主要集中在上游的南港圆圆沙段和下游的北槽中段2个区段^[3]。

鉴于长江口为细颗粒泥沙含量较高的河口，推断悬移质对航道淤积的贡献可能较大。长江口

深水航道治理工程实施后，12.5 m深水航道处于新的水沙边界条件。目前，对长江口南港—北槽水沙运动规律的研究开展得较少，尤其是针对12.5 m深水航道悬沙浓度的时空变化特征方面的研究还没开展过。本研究不仅有助于加深对长江口12.5 m深水航道回淤原因的认识，为进一步减淤措施的制定提供技术参考，而且可进一步丰富河口海岸泥沙研究的进展。

1 研究区域

长江口平面呈“三级分汊、四口入海”的形势，深水航道治理工程选择在南港—北槽（图1），自1998年开始实施，采用整治和疏浚相结合的治理方案，分阶段将航道水深增至12.5 m。整治工程包括长约48 km和49 km的南、北两条双导堤和总长约30 km的19座丁坝，航道疏浚维护长度约92 km。主要航道分段见图1。

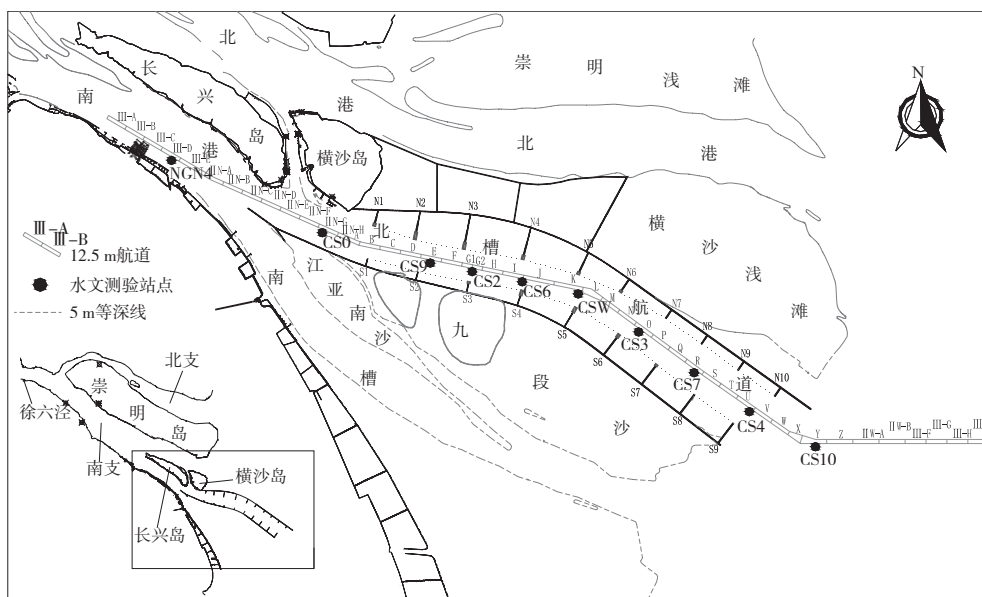


图1 长江口12.5 m深水航道与水文测验站点位置

北槽是长江口4条入海水道中最为年轻的河道，约形成于1954年，其拦门沙滩顶自然水深多年稳定在6 m左右。1984年开辟北槽航道作为进出长江口的主航道，年疏浚维护量约1 200万m³，维护水深7 m，底宽250 m的航道。北槽河槽表层沉积物主要由黏土和粉土构成，潮汐为半日潮，横沙站多年平均潮差约2.61 m。长江大通站（1950—2006年）多年平均径流量8 996亿m³，输沙量为

4.08亿t，流域来水来沙年内具有明显的季节性变化特征，5—10月为洪水期，其径流量约占年径流总量的71.7%，输沙量约占年输沙总量的85%。由于长江径流的下泄，北槽落潮流速大于涨潮流速，落潮历时略长于涨潮历时。洪季大潮时，表层最大落急流速达2.5~3.5 m/s。北槽盐淡水混合为缓混合型，但在洪季小潮和枯季大潮时分别存在弱混合和强混合现象。北槽内的波浪以风浪为主，

平均波高 1.0 m 左右。大风浪主要出现在冬季北方寒潮来袭和夏季台风入侵时, 最大波高可达 5 ~ 6 m。

2 资料与方法

从交通运输部长江口航道管理局收集了长江口 12.5 m 深水航道 2012 年 2 月 (枯季)、8 月 (洪季) 沿南港—北槽纵向布置的 10 条垂线的同步水文测验资料。各垂线均位于航道南侧, 距离航道底边线约 300 m, 垂线位置见表 1 和图 1, 测验期的径流与潮差情况见表 2。按河口动力学基本理论, 分别计算了各垂线含沙量垂向梯度、盐底分层系数、优势流和优势沙等。

表 1 测点位置及对应的航道区段

垂线号	所在航道区段	疏浚单元
NGN4S	南港及圆圆沙段	Ⅲ-D
CS0S		ⅡN-G
CS9S	北槽上段	E
CS2S		G2
CS6S	北槽中段	J
CSWS		K
CS3S		O
CS7S	北槽下段	R
CS4S		U
CS10S	北槽口外段	Y

表 2 2012 年水文测验期的径流与潮差情况

季节	潮型	测验日期	大通流量/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	北槽中潮差/m
枯季	小潮	2月17—18日	15 300	1.72
	中潮	2月20—21日	15 800	3.22
	大潮	2月23—24日	15 700	3.55
洪季	小潮	8月12—13日	56 900	1.36
	中潮	8月14—15日	56 250	2.40
	大潮	8月17—18日	57 350	3.57

3 含沙量分布的特征

3.1 含沙量的空间分布

1) 纵向变化。

从含沙量沿程变化来看, 南港圆圆沙段含沙量小, 北槽含沙量相对较大, 尤其是中段下段 (表 3)。以洪季大小潮为例, 南港圆圆沙段含沙量为 $0.04 \sim 0.34 \text{ kg/m}^3$, 而北槽中段含沙量为

$0.13 \sim 1.39 \text{ kg/m}^3$ 。北槽中段水体含沙量为南港圆圆沙段的 3.4 ~ 4.1 倍。

表 3 各站点垂线平均含沙量统计 kg/m^3

位置	垂线号	潮况	2012年8月(洪季)		2012年2月(枯季)	
			涨潮	落潮	涨潮	落潮
南港段	NGN4	大潮	0.20	0.19	0.52	0.47
		中潮	0.06	0.08	0.47	0.43
		小潮	0.04	0.06	0.16	0.16
圆圆沙段	CS0	大潮	0.25	0.34	0.51	0.43
		中潮	0.11	0.21	0.63	0.38
		小潮	0.04	0.09	0.16	0.16
北槽上段	CS9	大潮	0.29	0.37	0.58	0.45
		小潮	0.05	0.13	0.25	0.14
	CS2	大潮	0.35	0.44	0.73	0.48
		小潮	0.38	0.24	0.29	0.12
北槽中段	CS6	大潮	1.09	0.55	0.92	0.54
		小潮	0.46	0.20	0.30	0.18
	CSW	大潮	1.33	1.15	1.09	0.87
		小潮	0.68	0.20	0.46	0.22
CS3	大潮	1.39	0.79	0.97	0.99	
	小潮	0.25	0.13	0.39	0.18	
北槽下段	CS7	大潮	1.26	1.31	0.60	0.58
		小潮	0.21	0.10	0.23	0.22
	CS4	大潮	0.39	0.77	0.58	0.65
		小潮	0.24	0.09	0.41	0.17

2) 垂向变化。

含沙量沿垂向变化呈表层小、底层大的分布态势。深水航道沿程主要测点含沙量垂线分布见图 2, 3。由图可知, 南港圆圆沙段含沙量沿垂向变化小, 垂线分布相对均匀, 而北槽含沙量沿垂向变化大, 垂线分布很不均匀, 尤其是北槽中段几条垂线测点 (图 2)。以洪季大潮为例, 南港圆圆沙段含沙量垂向梯度 (底层/垂线平均) 为 1.4 ~ 1.6, 而北槽中段含沙量垂向梯度达 3.4 ~ 4.7。

3.2 含沙量的时间变化

1) 洪、枯季变化。

南港圆圆沙段含沙量年内季节性变化表现为洪季小、枯季大的特点 (图 2)。统计表明, 洪季大小中潮含沙量为 $0.04 \sim 0.34 \text{ kg/m}^3$, 平均值约 0.14 kg/m^3 ; 枯季为 $0.16 \sim 0.63 \text{ kg/m}^3$, 平均值约 0.37 kg/m^3 。南港圆圆沙段含沙量为枯季为洪季的 2.7 倍。

对应时段内的北槽中段含沙量则为洪季大、枯季小的变化特点, 洪季为 $0.13 \sim 1.39 \text{ kg/m}^3$, 平均值约 0.69 kg/m^3 ; 枯季为 $0.18 \sim 1.09 \text{ kg/m}^3$, 平均值约 0.59 kg/m^3 。北槽中段洪季含沙量为枯季的 1.2 倍。

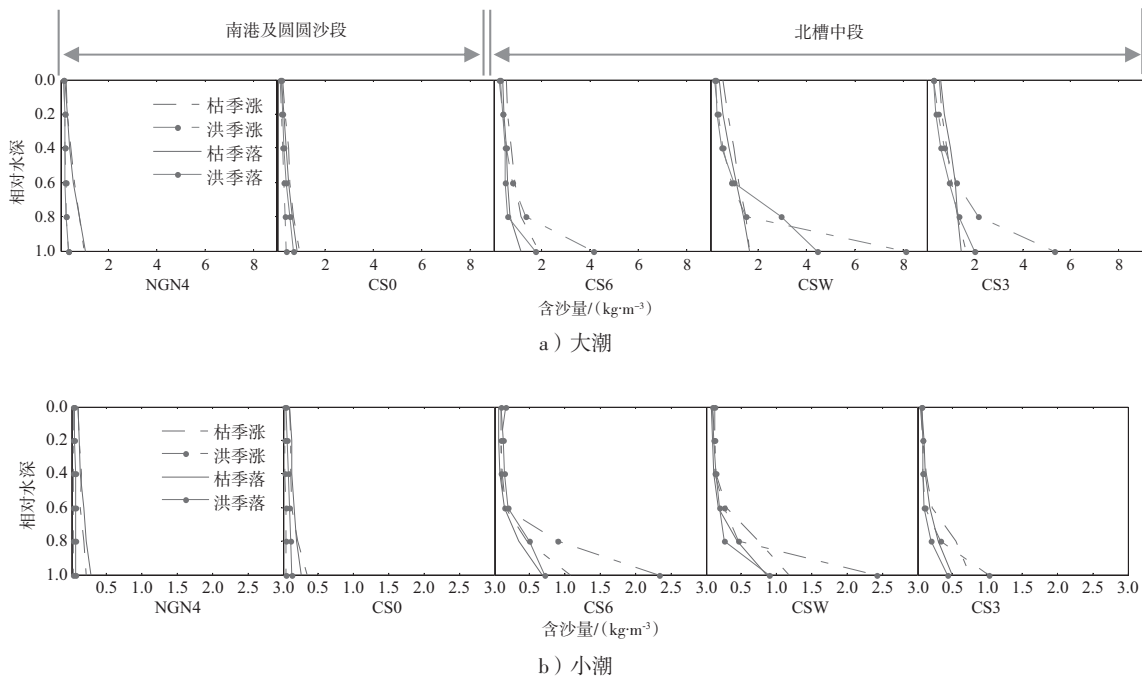


图2 南港—北槽主要站点含沙量的垂向分布

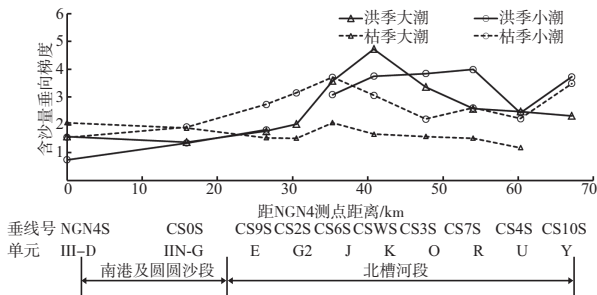


图3 南港—北槽主要站点含沙量垂向梯度的沿程变化

2) 大、小潮变化。

长江口含沙量整体表现为大潮含沙量大、小潮含沙量小的变化特征。以洪季为例，南港圆圆沙段大潮含沙量 $0.2 \sim 0.3 \text{ kg/m}^3$ ，小潮含沙量 $0.05 \sim 0.07 \text{ kg/m}^3$ ，大潮为小潮的4.3倍；北槽中段大潮含沙量 $0.82 \sim 1.24 \text{ kg/m}^3$ ，小潮含沙量 $0.19 \sim 0.50 \text{ kg/m}^3$ ，大潮为小潮的3.3倍。含沙量大潮大、小潮小的变化特性，表明水体悬沙在大、小潮周期内会发生明显的沉降与再悬浮过程。

3) 涨、落潮变化。

南港圆圆沙段洪季落潮含沙量大于涨潮，而枯季则为涨潮含沙量大于落潮。以大潮为例，洪季落潮含沙量为 $0.19 \sim 0.34 \text{ kg/m}^3$ ，涨潮为 $0.20 \sim 0.25 \text{ kg/m}^3$ ，落潮含沙量约为涨潮的1.2倍。而枯季，落潮含沙量为 $0.43 \sim 0.47 \text{ kg/m}^3$ ，涨潮为

$0.51 \sim 0.52 \text{ kg/m}^3$ ，涨潮含沙量则为落潮的1.2倍。

无论洪季还是枯季，北槽中段含沙量则均为涨潮大于落潮。统计表明，洪、枯季大潮期，北槽中段涨潮含沙量分别为落潮含沙量的1.6和1.3倍，而小潮期则分别为2.6和2.0倍。由此可见，北槽中段涨落潮含沙量的不对称性，洪季较枯季有所加剧，小潮较大潮有所加强。

4 讨论

4.1 北槽含沙量垂线分布形成原因

天然河流含沙量垂线分布通常为表层小、底层大。从深水航道所在的南港—北槽河段沿程变化看，南港及圆圆沙段含沙量垂向差异小，垂线分布相对均匀。而北槽河段，尤其是洪季的北槽中段，表层含沙量小，底层含沙量大，导致该区段含沙量垂向差异大，垂线分布很不均匀（图2）。造成洪季北槽中段底层含沙量大，含沙量垂线分布差异大的主要原因可能有：

1) 细颗粒泥沙絮凝，导致沉速加大。

北槽为盐淡水交汇处，其中段总体处于细颗粒泥沙最佳絮凝的盐度值 $7\text{‰} \sim 12\text{‰}$ 范围内（图4）。细颗粒泥沙絮凝成团后，沉速加大，中上层水体含沙量因此降低，相应地中下层水体含沙量有

所增大。随着中下层水体含沙量的升高, 进一步加大了泥沙沉降速度(沉降试验表明, 当含沙量小于 3 kg/m^3 , 泥沙沉降速度随着含沙量的升高而增大), 从而有利于底层水体出现了更高的含沙量。洪季较枯季更高的水温和背景水体含沙量, 使得洪季泥沙的沉降速度较枯季大, 从而导致洪季盐淡水交汇处的北槽中下段, 含沙量表层小、底层大的垂向差异更加明显。

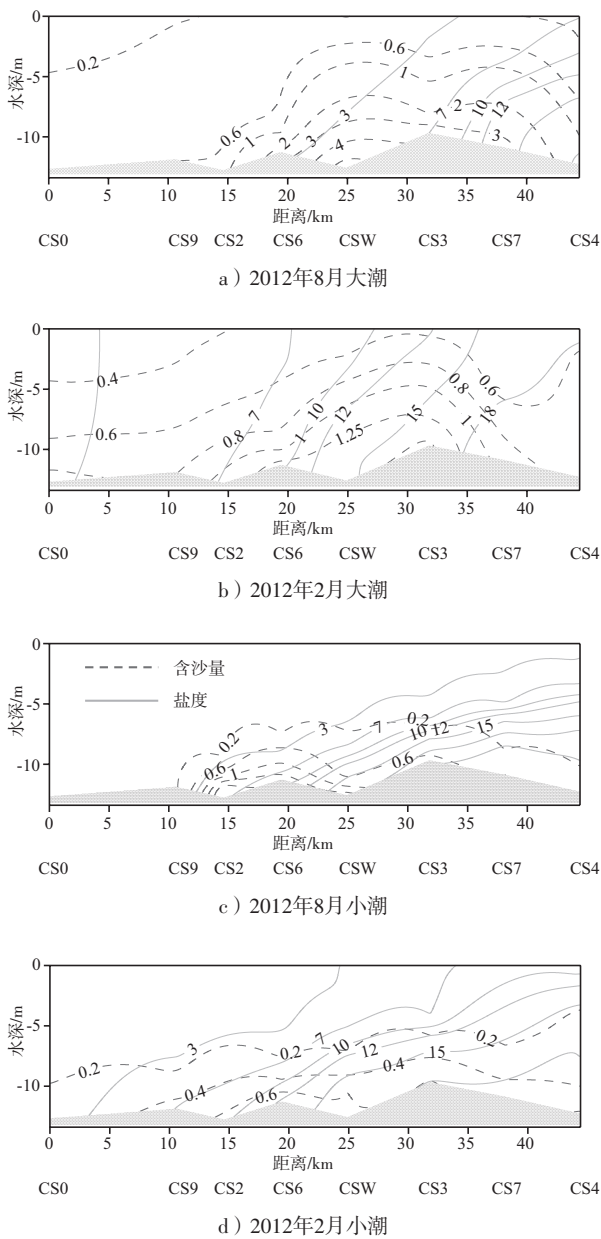


图4 北槽底层高含沙量区与盐度的关系

对于南港及圆圆沙段, 枯季含盐度通常小于 2‰ , 洪季甚至小于 0.2‰ 。盐度对细颗粒泥沙的絮凝影响微弱, 因此, 含沙量垂线分布的差异远

不如北槽明显。

2) 盐淡水分层, 不利于河床再悬浮泥沙向上扩散。

盐淡水由于密度差异在垂向形成分层。相对于枯季, 洪季由于径流的增大, 使得盐淡水分层, 尤其是北槽中下段的分层更加明显(图5)。盐淡水的分层将削弱水体的垂向紊动混合, 对河床起悬的泥沙向上扩散起到了抑制作用, 从而有利于再悬浮在底层集聚形成高沙量区。另外, 从水动来看, 洪季北槽中段落急流速较上下游大, 也较枯季大(图6), 表明该区段该时段具有更强的再悬浮能力, 这也为北槽中下段底层高沙量水体的形成提供更加丰富的物质来源。

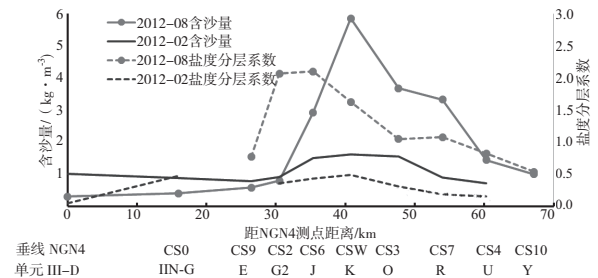


图5 盐度分层系数与底层含沙量的关系(大潮)

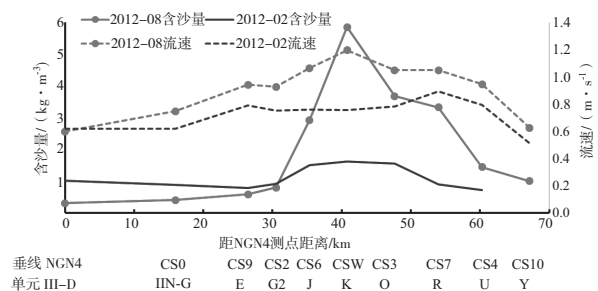


图6 底层落潮流速与底层含沙量的关系(大潮)

3) 北槽中下段为河口滞流点常驻部位, 上、下游泥沙易在此集聚。

北槽中下段因盐水楔形成的盐度密度流, 起到了增加涨潮流速、减小落潮流速的作用, 使得北槽中下段净向下输沙能力较上游明显下降。在中小潮时, 北槽中下段常常出现了上游净向下, 下游净向上的滞流点和滞沙点(图7), 促使上、下游泥沙在此集聚, 从而有利于该区段底层形成较高沙量区。枯季小潮期北槽的滞流点和滞沙点基本位于北槽中段, 洪季由于径流的加大, 其滞流点和滞沙点总体较枯季偏下, 基本北槽中下

段。以小潮含沙量与滞流点对比来看，北槽高含沙量区的核心位置均位于滞流点的上游。

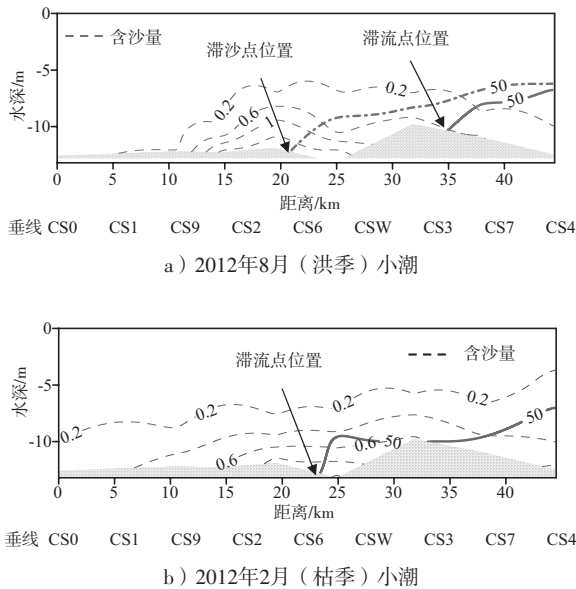


图7 最大浑浊带与滞流点、滞沙点的关系

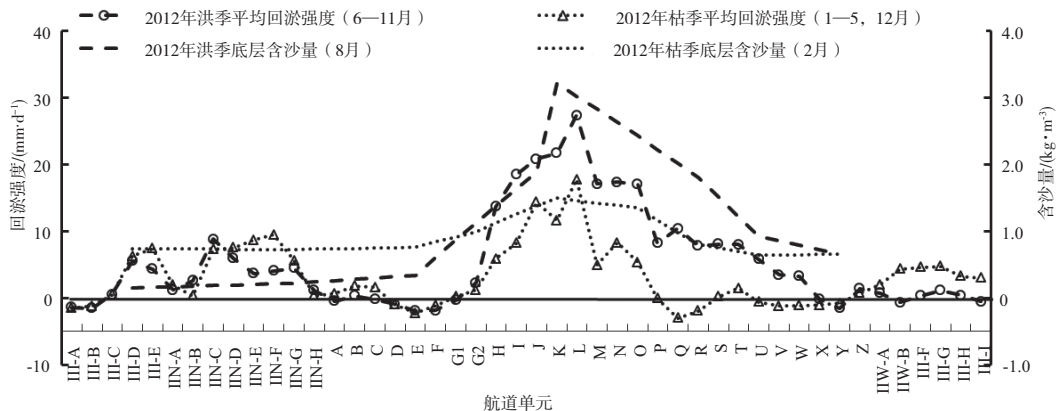


图8 洪、枯季航道回淤变化与底层含沙量变化的沿程比较

明，南港圆圆沙段含沙量小，含沙量垂线分布相对均匀；北槽中段含沙量大，含沙量垂向梯度大，垂向分布很不均匀。细颗粒泥沙絮凝、盐淡水分层、河口滞流点存在可能是洪季北槽中段底层含沙量大，含沙量垂线分布差异大的主要原因。

北槽含沙量呈中段较上、下游大，底层较表层明显大，洪季较枯季大的时空分布特征，与12.5 m深水航道回淤的时空变化特征具有一致性，表明北槽中段航道回淤可能以悬沙淤积为主。南港圆圆沙段含沙量较北槽明显低，且含沙量垂向分布相对较为均匀，表明该区段航道回淤受悬沙的影响可能很小。

4.2 含沙量与航道回淤沿程分布的关系

航道回淤通常由推移质和悬移质淤积造成的。悬移质引起的航道淤积，其回淤过程应与含沙量有一定的关系。图8是2012年航道回淤分布与含沙量分布的比较。由图可知，12.5 m航道所在的北槽河段，其含沙量呈明显的洪季高、枯季低，以及北槽中段高的分布特征。北槽中下段(L单元以下)洪季含沙量较枯季大的更加明显。北槽含沙量的时空变化特征与航道回淤的时空变化特征定性是一致的。而南港及圆圆沙河段，悬沙浓度低，含沙量与航道回淤变化之间的关系不明显。

5 结语

长92 km的深水航道跨越南港和北槽河段，航道回淤主要集中在南港圆圆沙航道和北槽中段航道两个区段。悬沙浓度的时空变化特征研究表

参考文献:

- [1] 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[J]. 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(6): 1-22.
- [2] 上海航道局. 长江口拦门沙航道演变规律研究[R]. 上海: 上海航道局, 1994.
- [3] 交通运输部长江口航道管理局. 关于长江口12.5 m深水航道维护疏浚和回淤原因研究有关情况的报告[R]. 上海: 交通运输部长江口航道管理局, 2013.
- [4] 上海河口海岸科学研究中心. 长江口泥沙特性室内试验[R]. 上海: 上海河口海岸科学研究中心, 2013.