



长江口北槽深水航道回淤相关问题分析

刘 猛

(上海河口海岸科学研究中心 河口海岸交通行业重点实验室, 上海 201201)

摘要: 从滩槽泥沙交换角度对长江口北槽深水航道回淤热点问题进行分析。取得新的认识: 1) 对长江口拦门沙河段滩槽泥沙交换而言, 温度、盐度以及上游来水来沙均是独立存在的因素, 但都不能独立起作用或作用很弱, 对北槽深水航道回淤影响也非常有限; 2) 在长江口拦门沙河段滩槽泥沙交换中, 拦门沙浑浊带、近底高含沙水体、南导堤越堤输沙、坝田淤积、边滩坡度及河床密度变化以及层化和制紊效应等均是伴随而生的过程, 这些现象的变化具有很好的一致性, 但均不是独立存在的, 不能独立对北槽深水航道回淤产生影响; 3) 波浪作用是引起长江口拦门沙河段滩槽泥沙交换往“冲滩淤槽”方向发展的根本动力, 在北槽深水航道回淤原因分析及减淤研究中应抓住这个关键。

关键词: 北槽深水航道; 回淤影响因素; 回淤过程; 波浪作用

中图分类号: TV 148

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2016)02-0104-010

Analysis of some controversial issues concerning back-silting phenomenon in deep-water channel project at north passage of the Yangtze River

LIU Meng

(Key Laboratory of Estuarine & Coastal Engineering, Ministry of Transport, PRC,
Shanghai Estuarine and Coastal Research Center, Shanghai 201201, China)

Abstract: Based on a series of observation data, experimental results and literature achievements, this paper systematically explores some controversial issues concerning the back-silting phenomenon in the Yangtze estuary deep-water channel, and proposes some new viewpoints of the swale sediment exchange in the mouth bar: 1) The impacts come from three aspects, i. e. temperature, salinity and upstream runoff-sediment conditions, which exists separately but works dependently. These factors have little influence on back-silting of the north deep-water channel; 2) There are several processes related to the back-silting including the mouth bar turbidity zone, high sand content near the bottom, the sediment transport overtopping the north dikes, dam fields siltation, marginal bank slope, river bed compactness, stratification and turbulence effect. They are well consistent but dependently exists, so they can't influence the siltation independently; 3) The wave action is still the basic dynamical cause of the siltation, which aims at guiding the swale sediment exchange development to the direction of "beach-erosion and channel-siltation".

Keywords: the Yangtze estuary deep-water channel; back-silting influential factor; back-silting processes; wave action

在长江口 12.5 m 深水航道贯通后, 北槽深水航道发生了严重回淤现象, 为此很多学者开展了大量研究工作, 并取得了一些认识。本文基于现场实测资

料、物理模型试验结果、相关文献成果以及理论分析方法从滩槽泥沙交换角度对有关长江口北槽深水航道回淤的一些热点问题进行分析, 取得了新的认识。

收稿日期: 2015-06-17

作者简介: 刘猛 (1983—), 男, 硕士, 副研究员, 从事河口泥沙运动及河口航道治理研究。

1 上游来水来沙对北槽深水航道回淤的影响

1.1 上游来水对北槽深水航道回淤的影响

一些学者在分析北槽深水航道的回淤问题时，直接采用长江径流的洪枯季变化来泛泛解释航道的洪季回淤问题，本文对此有不同看法。

长江口拦门沙河段流速变化洪枯季不明显，最显著的变化是大小潮的差异，这种变化是周期性的，基本周期约为 15 d，如果引起北槽深水航道回淤的原因是水流运动的变化，那么航道回淤规律应该首先表现为随潮型周期性的显著变化而不是随洪枯季的变化，然而事实却是航道回淤量主要集中在洪季^[1]。

径流对北槽深水航道的影响必须通过它对拦

门沙河段水流运动的改变来间接实现，但由于长江河口的特殊形态，径流对拦门沙河段的水流影响洪枯季差异不明显。事实上，径流对河口拦门沙影响在许多小河口是非常明显的，如苏北沿海许多小的入海口，它们拦门沙的河势变化与径流变化密切相关，径流增大时，拦门沙的主槽就会冲深，增大净流量也是解决这些河口淤积的有效办法。可见径流量增加的效果应该是冲深拦门沙主槽，而不是淤浅它，这恰恰与将洪季流量增大归为深水航道洪季显著回淤的原因是矛盾的。

长江口 12.5 m 深水航道贯通后，2010、2011、2012、2013 年洪季大通流量与洪季航道回淤量见表 1。

表 1 2010—2013 年洪季大通流量与洪季航道回淤量

年份	回淤量/ (10 ⁴ m ³)	平均流量/ (m ³ ·s ⁻¹)	最大流量/ (m ³ ·s ⁻¹) ¹	流量大于某值的天数/d			
				60 000 m ³ /s	50 000 m ³ /s	40 000 m ³ /s	30 000 m ³ /s
2010	8 389	45 892	65 400	36	58	127	165
2011	7 956	26 756	46 300	0	0	20	66
2012	10 435	43 366	57 900	0	42	112	160
2013	8 193	32 780	45 600	0	0	56	113

从表 1 的数据可见，2010 年是一个大洪水年，2011 年与 2013 年是枯水年，长江径流流量差异显著，但是这 3 年的航道回淤量极为接近，并未出现显著差异。2012 年流量较 2010 年显著减弱，较 2011 年和 2013 年增强，但其航道回淤量却异常增加，这又一次表明了航道回淤与长江径流流量无明显关系。

2010 年 3 月—2012 年 3 月北槽深水航道 E ~ W 单元日均冲淤厚度及径流流量变化见图 1。

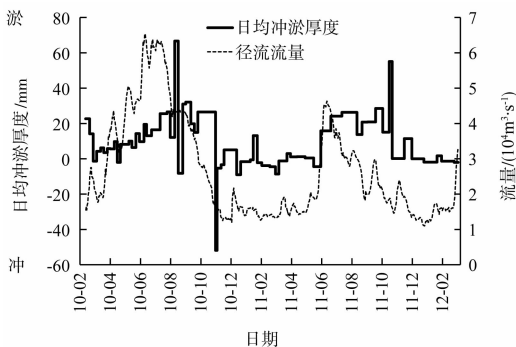


图 1 2010 年 3 月—2012 年 3 月北槽深水航道 E ~ W 单元日均冲淤厚度及径流流量变化

若仅泛泛而谈，洪季流量增加与洪季航道回淤强度增加总体上确有一致性，但从两者的具体变化过程来看，航道回淤强度变化与径流流量变化并非同步的，如年内航道回淤强度最大时段往往并非对应于年内流量最大时段。图 2 是 2010—2013 年各测次长江口 12.5 m 深水航道日均冲淤量与平均径流流量对应关系，航道回淤强度与径流流量之间未表现出明显的趋势性关系。

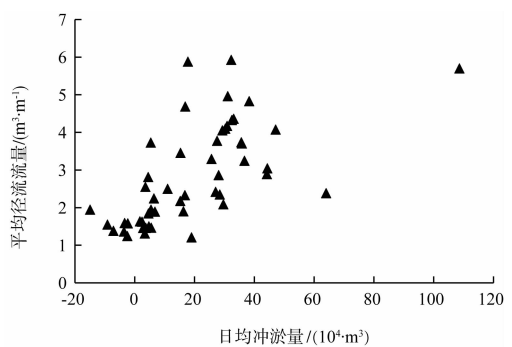


图 2 2010 年—2013 年各测次长江口 12.5 m 深水航道日均冲淤量与平均径流流量对应关系

此外,在关注航道回淤的同时,也应该注意到航道每年都出现了较长时段的冲刷现象,而且均发生在枯季,这说明了12.5 m深水航道建成后不仅仅会发生淤积,也会出现冲刷。难道认为径流减小是航道出现冲刷的原因?可见北槽深水航道回淤与长江径流流量无明显关系。

1.2 上游来沙对北槽深水航道回淤的影响

有些学者试图用径流输沙量来解释北槽航道洪季大量回淤问题。2010年和2011年大通站年输沙量分别为1.85亿t和0.71亿t,若按长江口各叉分沙比计算,北槽分沙比约占20%,即使大通来沙沿程不落淤、不入大海且不在北槽广阔的边滩落淤,全部进入长江口12.5 m深水航道,其给航道带来的回淤量也远小于两年均超 $7 \times 10^7 \text{ m}^3$ 的全槽回淤量。当然上述假设也是不可能的,因此其给航道带来的回淤量将更小。

现场观测结果表明^[2-3],长江口拦门沙河段泥沙自身交换量远大于上游来沙量,仅南导堤越堤进入北槽的泥沙量每年就有数亿吨。但有一个事实是确定的,那就是长江口拦门沙的泥沙归根结底都是径流带下来的,为什么又说上游来沙与北槽深水航道回淤量变化无明显直接关系呢?这个问题具体分析如下:

1) 相比每年随径流下泄的泥沙总量,长江口拦门沙河段多年已积累的泥沙总量要多得多。根据近期地形数据初步估算,长江口拦门沙河段-10 m等深线以上泥沙总量为数亿吨。长江口拦门沙河段滩槽泥沙交换的主体就是已有的拦门沙泥沙,因此其滩槽泥沙交换的物质基础是非常庞大且相对稳定的。

2) 研究表明^[1,4-5],在没有波浪或者波浪作用较弱时,长江口拦门沙河段滩槽泥沙交换的结果表现为“冲槽淤滩”,上游来沙到了该区域也要遵循这个基本规律,这些泥沙主要往低流速的高滩区域输移,当有了波浪的强烈作用时,这些泥沙才可能大量进入航槽并引起航道的淤积,因此上游来沙想进入北槽深水航道并引起航道淤积是有条件的。

从以上分析可见,上游来沙对北槽深水航道回淤的影响可以分为两个过程,即外部的积累和内部的分配。认为上游来水来沙是直接造成北槽深水航道回淤的原因是不科学的,这也是为什么上游来沙与北槽深水航道回淤量变化无明显直接关系的内在根据。

2 温度、盐度对北槽深水航道回淤的影响分析

近年来,有些学者认为洪枯季温度、盐度等因素的变化是造成北槽深水航道洪季显著回淤的重要原因,主要出发点就是在温度、盐度等作用下,洪季悬沙沉速明显增快^[6-7]。

温度、盐度等因素的变化对长江拦门沙河段悬沙沉降速度是有明显影响的,在各种因素的综合作用下,洪季悬沙沉降速度较枯季明显加快数倍^[8-10]。

2.1 温度、盐度等因素对长江口拦门沙河段滩槽泥沙交换的影响

滩槽泥沙交换过程就是大量床沙的搬运过程,每一粒泥沙在搬运过程中都要经历“起动-输移-停止”过程。在长江口拦门沙河段,泥沙输移的形式主要有3种,即推移质运动形式、悬移质运动形式以及近底高含沙水体异重流运动形式。

对于悬移质运动形式而言,任何一粒泥沙在从床面起动到降落床面的过程中,起动是因,沉降是果,没有泥沙的起动就没有泥沙的沉降。温度、盐度等因素主要对细颗粒泥沙的沉降过程有较为明显的影响,但对其起动是无影响的。在长江口拦门沙河段,泥沙的起动主要由水流和波浪两种起动动力控制。因此,长江口拦门沙河段滩槽泥沙交换发生与否以及发生的强度均是由水流和波浪两种起动动力决定的,但不可否认的是,温度、盐度等因素可以通过影响细颗粒泥沙的絮凝沉降而对参与悬移质运动形式的泥沙沉降结果有一定影响,比如影响其淤积分布。

在长江口拦门沙河段,由于温度、盐度等因素的综合影响,洪季悬沙沉降速度较枯季明显加快数倍,但实际情况是洪季拦门沙河段水体的含沙量较枯季反而显著增加数倍,这只能说明一点,

那就是洪季拦门沙河段河床泥沙起动更加剧烈和频繁。所以，洪季拦门沙河段水体含沙量发生显著增高的现象，其根本原因就是该河段的滩槽泥沙交换强度在洪季更加剧烈，水体含沙量的显著增高就是滩槽泥沙交换强度加剧的一种外在表现而已。实际上，温度、盐度等因素反而是削弱这种外在表现的，如果温度、盐度等因素在洪季没有差异，那么长江口拦门沙河段水体含沙量的洪枯季差异将更加明显。

从以上分析可见，温度、盐度等因素在长江口拦门沙河段的滩槽泥沙交换过程中只是一个影响因素，不是决定因素，而且其影响只限于参与悬移质运动形式的细颗粒泥沙的沉降过程，对长江口拦门沙河段滩槽泥沙交换过程的发生与否以及发生的规模是没有影响的。

2.2 温度、盐度等因素对北槽深水航道回淤的影响

北槽深水航道的回淤是长江口拦门沙河段滩槽泥沙交换的结果，也就是说，航道回淤发生与否及回淤强度的变化主要与拦门沙河段滩槽泥沙交换的总体趋势及强度有关。当长江口拦门沙河段滩槽泥沙交换的总体趋势为“冲滩淤槽”时，北槽深水航道就会出现整体的淤积态势，滩槽泥沙交换的强度越剧烈，航道的回淤情况也就越严重。

波浪、水流两种动力的相对变化决定着长江口拦门沙河段滩槽泥沙交换的总体趋势及强度，也就是说，在一定的动力条件下，一段时间内从河床起动并参与到悬移质运动形式的细颗粒泥沙的数量是基本确定的，而这些细颗粒泥沙要想对航道回淤产生影响必定是要落淤的。在细颗粒泥沙的落淤过程中，温度、盐度等因素的变化所带来的影响将会有所显现，如洪季会促使细颗粒泥沙沉降加快，从而在一定程度上影响悬沙落淤的空间分布，进而可能对北槽深水航道中悬沙落淤所引起的回淤分布产生一定影响，但据此就认为一定会增加航道回淤总量显然是不妥的。

引起北槽深水航道回淤的泥沙运动形式主要有 3 种，从航道回淤泥沙粒径、回淤量的横断面分布来看，能够引起泥沙从航道两侧入槽的推移质运动形式和近底高含沙水体的异重流运动形式可能作

用更大^[11]。从这点来看，温度、盐度等因素的变化对北槽深水航道回淤的影响是更加有限的。

综合以上分析可见，认为长江口拦门沙河段温度、盐度等因素的变化是引起北槽深水航道洪季显著回淤的重要原因显然是有失偏颇的。在分析温度、盐度等因素的变化对长江口拦门沙河段滩槽泥沙交换或北槽深水航道回淤的影响时，一定要将其置于完整的滩槽泥沙交换物理过程中来分析，不能片面、局部地看问题，否则会带来错误的认识。

3 长江口拦门沙浑浊带的产生的主要动力原因

长江口拦门沙河段往往存在一个含沙量高于上下游的浑浊带，浑浊带的位置、范围、含沙浓度及垂直分布等随着长江口拦门沙河段动力条件的变化而不断变化（图 3）。

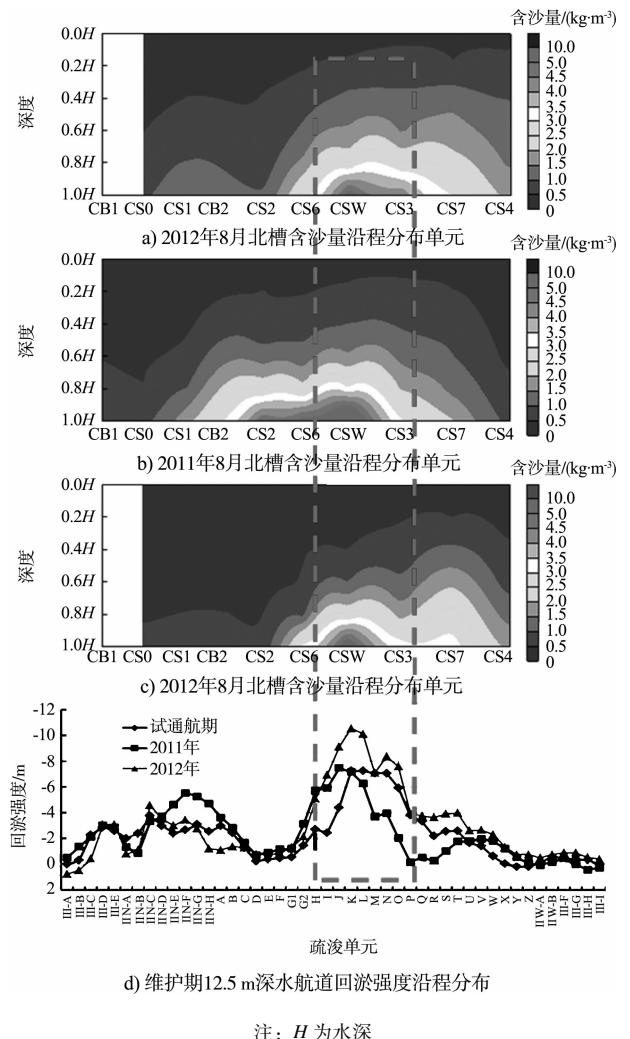


图 3 拦门沙河段含沙量纵向分布与北槽深水航道回淤强度分布对比

对于拦门沙浑浊带产生的主要动力原因，文献[1]进行过深入分析，结果表明作用在河床（不是水面）上的波浪动力的不均匀分布是引起拦门沙浑浊带存在的根本原因。由于拦门沙河段水浅面广，河床受到波浪的作用相比其上下游河段要强烈得多。在强烈波浪作用下，河床泥沙易于起动，而且还有大量细颗粒泥沙能从河床内部渗出^[12]，这些泥沙构成了浑浊带存在的主要物质基础，此外由于拦门沙河段水浅，波浪作用能够引起水体的紊动强度沿垂向均有增加，有利于提高拦门沙河段水体的挟沙能力。

潮流动力对水体含沙量的变化也有作用，但相比波浪作用要弱得多，不是引起长江口拦门沙河段水体含沙量变化的主要动力。可以举两个例子予以证明：一个是在波浪作用不明显的河段，比如在南支河段，大潮时水体含沙量较小潮会有所增加，但其数值很小，含沙量一般比波浪作用强烈的拦门沙浑浊带的含沙量相差约一个数量级^[13]；此外，还有一个有力的证据就是长江口拦门沙河段水流动力在洪枯季无明显差异，但水体含沙量却有显著差异，洪季水体含沙量较枯季要高得多。

图4是天然河床在波浪作用下的试验结果。试验很好地模拟了天然现象，在波浪作用下，床沙大量起动，引起了水体含沙量的显著增高，而且含沙量的垂向分布特征与图3是一致的，底部出现了高浓度悬沙水体层。实际上不仅在河口，含有丰富细颗粒泥沙的河床只要能够受到波浪的强烈作用，水体的含沙量就会显著增高，如果作用在河床上的波浪动力的分布是不均匀的，就会形成局部的相对浑浊区域，比如在海岸或海岛附近浅水区域往往会形成一条（片）显著的浑水带^[14]（或浑水区），见图5。长江口拦门沙浑浊带与上述浑水带在本质上是相同的，其产生的动力基础都是波浪，其含沙浓度、范围以及位置也都是随着波浪的变化而不断变化，说到底长江口拦门沙浑浊带的存在就是其海岸特性的表现。

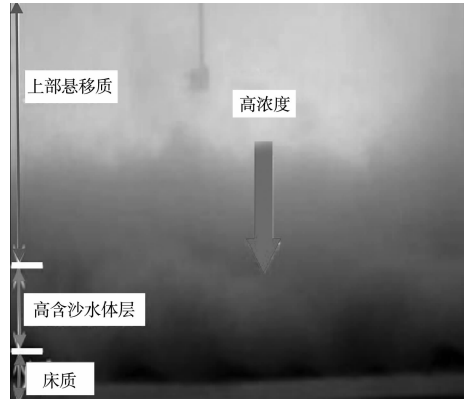


图4 天然河床在波浪作用下的试验结果

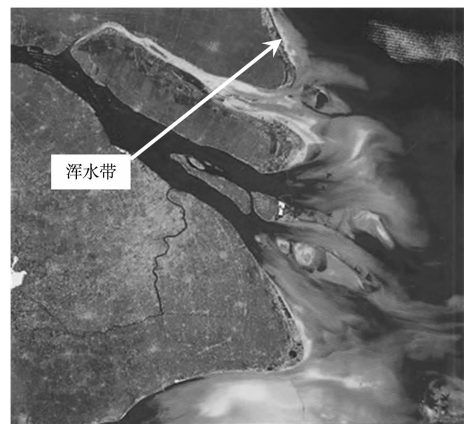


图5 长江口附近区域水体表层含沙量分布

当然目前也有一些关于长江口拦门沙浑浊带存在原因的其它假说^[15-16]，主要观点认为重力环流、潮流冲刷以及絮凝作用等是引起浑浊带的原因。关于潮流冲刷和絮凝作用的影响已在前文进行过分析，结果表明这些因素均不是引起浑浊带的主要原因，重力环流强度比潮流强度要弱得多，不属于同一量级，更不可能引起床面泥沙起动的巨大变化。判断这些因素是不是引起浑浊带的主要原因，最为简单的方法就是对比这些因素作用的特点与拦门沙浑浊带变化的特点，这些因素作用的最大特点就是显著的规律性，但现场拦门沙浑浊带变化恰恰就缺少同样的规律性。此外，以上这些观点虽然已提出多年，但时至今日，从未见到像图4那样能在试验中成功证实上述假说的案例报道。

拦门沙浑浊带的存在实质上是滩面泥沙活性强^[17]的一种外在表现，换言之，长江口拦门沙

浑浊带是一个“源”的扩散现象，而不是一个“汇”的聚集现象。以图3为例，如果其含沙量的分布是一个“汇”的聚集过程所引起的结果，那么这个“汇”也是短暂的，该物理过程是不可持续的，因为从垂向上看，物质通量往上是逐渐减少的，并不是守恒或增加的，但如果将这个含沙量的分布看成一个“源”的扩散过程所引起的结果，那么它就是一个可持续存在的物理过程，这与现场实际情况才是吻合的。

4 长江口拦门沙浑浊带对北槽深水航道回淤的影响

基于长江口拦门沙浑浊带分布与北槽深水航道回淤强度分布之间的位置关系，许多学者认为拦门沙浑浊带的存在是引起北槽深水航道回淤的主要原因^[18-20]，笔者对此有不同看法。

认为拦门沙浑浊带的存在是引起北槽深水航道回淤的主要原因实质上与认为悬沙落淤是引起北槽深水航道回淤的主要泥沙运动形式是等同的，文献[12]已从航道回淤泥沙粒径、回淤量的横断面分布等5个方面对北槽深水航道的回淤模式进行了深入分析，结果表明悬沙落淤不是引起北槽深水航道回淤的主要泥沙运动形式。

长江口拦门沙浑浊带的变化之所以与北槽深水航道回淤现象密切相关，就是因为长江口拦门沙浑浊带与北槽深水航道回淤都同属长江口拦门沙河段滩槽泥沙交换的表象（或结果）而已，引起这些表象发生的根本动力是相同的，一旦根本动力发生变化，它们都将随之而变。当波浪动力作用较强时，长江口拦门沙浑浊带的浓度及范围就会出现增加的现象，北槽深水航道也就会出现淤积现象；与之相反，当波浪动力作用显著减弱，水流动力作用相对较强时，长江口拦门沙浑浊带的浓度及范围就会出现减小现象，北槽深水航道也就会出现冲刷现象。可见对于长江口拦门沙河段的滩槽泥沙交换而言，长江口拦门沙浑浊带不是独立存在的因素，不能独立对北槽深水航道的回淤产生影响。

长江口拦门沙浑浊带浓度最高的区段之所以

与北槽航道回淤强度最大的区段位置对应关系好，其合理的物理过程应该是这样的：在北槽深水航道回淤强度大的地方，也就是在滩槽泥沙交换剧烈的地方，其滩面泥沙活动性强，有大量细颗粒泥沙“扩散”进入挟沙力相对较强（紊动强度较大）的水体，从而引起了水体含沙量的显著增高，也就形成了浑浊带浓度最高区段。

5 南导堤越堤输沙对北槽深水航道回淤的影响

南导堤越堤输沙是长江口拦门沙河段滩槽泥沙交换过程中的一个典型现象，也是目前北槽深水航道减淤研究重点关注的问题，其变化情况与决定长江口拦门沙河段滩槽泥沙交换的动力对比情况紧密相关。主要表现为以下3点：

1) 当波浪作用较强，也就是其在长江口拦门沙河段的滩槽泥沙交换中起主要作用时，滩面泥沙的活动性将显著增强，南导堤越堤水体的含沙量将显著升高，其越堤输沙量也将显著增多。举两个例子：①洪季期间，由于拦门沙河段的波浪作用较枯季显著增强，南导堤越堤净输沙量显著增加，洪季的越堤净输沙量约占年均越堤净输沙量的60%以上；②现场观测曾经遇到一个特别现象，在洪季期间，由于中潮赶上了大浪的作用，其越堤输沙量超过大潮期间的越堤输沙量。

2) 当波浪作用显著减弱，也就是水流动力在长江口拦门沙河段的滩槽泥沙交换中起主要作用时，滩面泥沙的活动性将大幅度减弱，南导堤越堤水体的含沙量将大幅度降低，其越堤输沙量也将大幅度减少。现场观测表明，枯季期间南导堤越堤水体的含沙量总体上较洪季要低得多。

3) 南导堤越堤输沙强度的变化与北槽内部滩槽泥沙交换强度的变化具有良好一致性。当南导堤越堤输沙强度显著增大时，北槽内部的滩槽泥沙交换强度也显著增大，主要表现为河床泥沙的活动性显著增强，水体的含沙量显著增高，北槽深水航道的淤积强度也将显著增加；当南导堤越堤输沙强度显著减小时，北槽内部的滩槽泥沙交换强度也显著减小，主要表现为

河床泥沙的活动性显著减弱,水体的含沙量显著降低,北槽深水航道的淤积情况也将显著减弱,甚至冲刷。

由以上分析结果可见,南导堤越堤输沙量的变化与北槽深水航道的回淤情况密切相关,这是因为南导堤越堤输沙运动本身就是长江口拦门沙河段滩槽泥沙交换的组成部分和现象,其变化与同样作为滩槽泥沙交换结果(或现象)的北槽深水航道回淤现象自然存在很好的相关性。从定性上说,南导堤越堤输沙对北槽深水航道的回淤有作用是肯定的,但不能就此认为南导堤越堤输沙就是北槽深水航道回淤的主要原因。下面从3个方面予以分析:

1) 南导堤越堤输沙是北槽与同属长江口拦门沙河段其它区域之间泥沙交换的一个重要组成部分。北槽深水航道的回淤是长江口拦门沙河段滩槽泥沙交换的综合结果,它不仅与南导堤越堤输沙有关,还与北槽和同属拦门沙河段的其它区域,如口外的广阔浅滩、北港等之间的泥沙交换有关,更与北槽内部的滩槽泥沙交换密切相关。2011年的“梅花”台风和2015年的“灿鸿”台风对长江口的作用均发生在小潮期间,这两场台风均引起了北槽深水航道的严重骤淤,浮泥现象极为显著。根据有关南导堤越堤水沙运动的研究结果可知,南导堤越堤输沙运动主要发生在大潮和中潮期间,小潮期间近乎略而不计。因此,可以判断上述两场台风期间的航道严重回淤与南导堤越堤输沙关系不大,换言之,即使没有南导堤越堤输沙运动,北槽深水航道仍旧可以发生显著的回淤现象。

2) 虽然洪季期间的南导堤越堤输沙量显著大于枯季,但枯季期间的越堤输沙量也是非常庞大的,在1亿t左右。根据北槽深水航道的回淤情况可知,航道在枯季期间的回淤量很少,而且很多时段还是冲刷。可见,不能简单地直接用越堤输沙量的多少来解释北槽深水航道的回淤原因。

3) 洪季期间南导堤越堤输沙量显著增加,在

这些越堤泥沙中,能够直接一次性进入北槽深水航道内的必然是少数,而绝大部分,特别是与航道回淤泥沙粒径接近的较粗颗粒的泥沙仍然需要进一步通过北槽内部的滩槽泥沙交换才能对北槽深水航道的回淤产生影响,最终影响情况还是要取决于基本动力条件。

对于北槽来说,南导堤越堤输沙每年为其提供了大量的泥沙,这些泥沙对北槽河床维持目前的平衡状态是有客观作用的。如果缺少了这部分泥沙,北槽河床必然会调整进入另一种平衡状态,至于河床调整后航道回淤情况如何?关键还是取决于其自身的动力条件。

6 其他因素对北槽深水航道回淤的影响

6.1 南坝田淤积对北槽深水航道回淤的影响

文献[21]研究表明,枯季期间南坝田高滩由于显著淤积,吸纳了部分朝北槽方向输移的(过境)泥沙,一定程度上减少了进入北槽的泥沙数量,对减弱北槽深水航道的回淤有利。由于洪季南坝田高滩冲刷,特别台风后的显著冲刷,释放了大量的滩面泥沙,一定程度上增加了朝北槽输移的泥沙数量,对减弱北槽深水航道的回淤不利。因此对于北槽来说,南坝田高滩犹如一个“仓库”,枯季蓄存泥沙、洪季释放泥沙。

与南导堤越堤输沙一样,南坝田淤积变化也是长江口拦门沙河段滩槽泥沙交换的过程现象,均不是能够独立对北槽深水航道回淤产生影响的因素,其对北槽深水航道回淤的影响与决定滩槽泥沙交换的动力对比情况密切相关。当波浪动力主导的“冲滩淤槽”的滩槽泥沙交换机制作用占据主导地位时,坝田就会出现冲刷现象,北槽深水航道就会出现淤积现象,而当水流动力主导的“冲槽淤滩”的滩槽泥沙交换机制作用占据主导地位时,坝田就会出现淤积现象,北槽深水航道也就会出现冲刷现象。

6.2 边滩坡度及河床密实度变化对北槽深水航道回淤的影响

在长江口12.5 m深水航道开通后,北槽内部

航槽两侧的滩面坡度很小, 远远小于设计坡度。为什么会出现这种情况呢? 下面从两个方面予以分析:

1) 内在原因。河床坡度的变化实际上是其内部抗剪能力变化的反映。在航槽开挖后, 航槽两侧河床是倾斜的, 在土体自重及外力的作用下, 坡体内将产生切向应力, 当切应力大于土的抗剪强度时, 坡面将失去稳定, 坡度就会减小。因此, 北槽内部航槽两侧的边滩坡度很小是有其内在原因的, 这只能说明北槽内部河床的抗剪能力很弱或者每年至少一段时间(如洪季或强浪作用期间)内的抗剪能力很弱。

2) 外在原因。波浪荷载的往复作用对改变河床的抗剪能力有着显著作用, 当波浪作用较强时, 河床的抗剪切能力就会显著下降, 即出现河床“软化”现象, 甚至出现“液化”现象(抗剪能力为零)。当河床的抗剪切能力下降到小于其受到的切向应力时, 河床就会发生变形, 河床坡度也就会变小。根据文献[1]研究结果可知, 长江口拦门沙河段受波浪作用非常显著, 洪季期间尤甚, 波浪动力的强烈作用就是北槽内部航槽两侧的边滩坡度很小的外在原因。

关于航道两侧边滩坡度的洪枯季变化情况, 可以大概从长江口拦门沙河段的河势变化特点得以知晓。长江口拦门沙河段高滩的总体演变特点为“洪冲枯淤”, 深槽的总体演变特点为“洪淤枯冲”, 因此边滩坡度的总体变化特征应为“洪缓枯陡”, 即洪季期间边滩坡度相对变缓、枯季期间边坡坡度相对变陡。

从对北槽深水航道回淤的影响来看, 当边滩坡度变缓时, 必对应着河床抗剪切能力的下降, 不利于床面泥沙的稳定, 对航道水深维护是不利的, 也可以这样理解, 当边滩坡度变缓时, 边滩上就会流失一部分泥沙进入航槽。反之可知, 当边滩坡度变陡时, 将对应着河床抗剪切能力的增强, 有利于床面泥沙的稳定和继续淤高, 对航道水深维护是有利的, 也可以这样理解, 当边滩坡

度变陡时, 边滩上就会储存泥沙, 有利“冲槽淤滩”现象的发生。

目前尚未发现有关长江口拦门沙河段河床密实度洪枯季变化的观测成果, 但从长江口拦门沙河段的波浪特征及其作用特点可以初步判断该区域河床密实程度的变化情况。长江口拦门沙河段河床的密实度在洪季应该有所下降、枯季有所增加。根据 Tzang 的研究结果^[12]可知, 波浪加载以后, 由于大量细颗粒泥沙从河床内部渗出, 会在河床内部形成微孔结构, 这必然会降低河床的密实度。其实, 洪季期间, 拦门沙浑浊带浓度显著增加以及近底高含沙水体现象突出的物质基础主要是这些来自河床内部流失的大量细颗粒泥沙, 尤其在每次大浪作用后, 拦门沙河段深槽内往往会出现巨量的近底高含沙水体, 此时的河床密实度应该下降非常明显。根据文献[21]研究结果可知, 与枯季相比, 洪季九段沙滩面与坝田滩面泥沙存在较为明显的粗化现象, 这也可以从侧面反映河床的密实度在洪季有所下降、在枯季有所增加。

从以上分析结果可见, 由于长江口拦门沙河段河床密实度的变化, 在分析该区域的河势变化, 特别大浪作用后的河势变化时, “体积守恒”定律的应用需慎重。

实质上, 边滩坡度及河床密实度的变化均是长江口拦门沙河段滩槽泥沙交换过程中的现象, 它们对北槽深水航道回淤的影响均与决定滩槽泥沙交换的动力对比情况密切相关。当波浪动力作用较强时, 滩面坡度就会变缓, 河床密实度也会下降, 均对航道水深维护不利; 而当波浪动力显著减弱后, 水流动力作用相对占优时, 滩面坡度就会变陡, 河床密实度也会升高, 均对航道水深维护有利。

6.3 层化和制紊效应对北槽深水航道回淤的影响

文献[22]研究表明, 在北槽内, 近底的高含沙量导致垂向水体层化加强进而抑制水流的紊动, 产生泥沙对水流结构的“制紊效应”; 近底紊动强

度的减弱抑制泥沙扩散悬扬并促进泥沙沉降；又导致层化加强；反过来促进泥沙沉降；形成泥沙集聚的“雪球效应”。关于层化和制紊效应对北槽深水航道回淤的影响情况，可以从以下3个方面进行把握：

1) 层化和制紊效应是一种现象，其发生是有条件的。在水体含沙量增高后，层化和制紊效应逐渐显现，含沙量越高，层化和制紊效应越明显，比如在洪季期间，特别大风浪刚结束以后非常明显；而到了枯季，由于水体含沙量的显著下降，层化和制紊效应不再明显。可见，水体的含沙量是引起层化和制紊效应的物质基础和前提条件，换言之，是水体含沙量的升高引起了层化和制紊效应的发生，而不是层化和制紊效应引起了水体含沙数量的增加。

2) 层化和制紊效应影响作用有限。与温度、盐度等影响情况相似，层化和制紊效应仅对悬沙的落淤过程有所影响，但对悬移质运动过程是否发生及其强度变化是没有影响的。对于北槽深水航道回淤来说，泥沙入槽模式有多种，悬沙落淤仅是其中作用相对较弱的一种，因此，层化和制紊效应对北槽深水航道回淤影响非常有限。

3) 层化和制紊效应不能单独对北槽深水航道回淤起作用。层化和制紊效应也是长江口拦门沙河段滩槽泥沙交换过程中的现象，它不是独立因素，更不能对北槽深水航道的回淤单独起作用，其对航道回淤的影响最终仍取决于决定滩槽泥沙交换的动力对比情况。当波浪动力作用较强时，水体含沙量会显著增高，层化和制紊效应显著；而当波浪动力作用显著减弱后，水体含沙量显著降低，层化和制紊效应不再明显。

6.4 近底高含沙水体对北槽深水航道回淤的影响

在长江口拦门沙河段，近底高含沙水体的产生主要有两种形式：第1种是潮流流速的周期性变化引起水体挟沙力的周期性变化而造成的；第2种是波浪变化引起水体挟沙力变化而造成的。第1种形式引起的近底高含沙水体有着非常明显

的规律性，比如一般发生在憩流期，潮差越大越明显，但总量很少，一般不被关注。第2种形式引起的近底高含沙水体在波浪作用较强时往往非常显著，比如在一场大浪平息之后，航槽内将会出现大量的近底高含沙水体，对航道回淤产生显著的不利影响，这是长江口拦门沙河段近底高含沙水体的主要产生形式。可见，波浪是长江口拦门沙河段产生显著近底高含沙水体的基础性动力，没有波浪的强烈作用，就不会形成显著的近底高含沙水体，航道内也就不会出现浮泥大量存在的现象，可见在分析近底高含沙水体对北槽深水航道回淤的影响时，实际上已经承认了波浪动力的基础性作用。因此，在长江口拦门沙河段，近底高含沙水体运动也仅是滩槽泥沙交换过程中的一个现象，不是一个能够独立对北槽深水航道回淤产生影响的因素。

7 结语

1) 对于长江口拦门沙河段的滩槽泥沙交换而言，温度、盐度以及上游来水来沙均是独立存在的因素，但都不能独立起作用，或者作用很弱。温度、盐度主要是通过影响悬沙落淤过程而对北槽深水航道的回淤产生影响，影响作用很弱；上游来沙主要是给拦门沙河段增加沙源，但这些泥沙进入拦门沙后对北槽深水航道的影响情况仍由当地动力条件决定；上游来水主要通过其对拦门沙河段的水流运动的微弱改变而对滩槽泥沙交换产生非常有限的作用，且未必是引起北槽深水航道淤积的作用。

2) 对于长江口拦门沙河段的滩槽泥沙交换而言，拦门沙浑浊带、近底高含沙水体、南导堤越堤输沙、坝田淤积、边滩坡度及河床密实度变化以及层化和制紊效应等均是伴随而生的过程现象，这些现象的变化情况与决定滩槽泥沙交换的动力对比情况密切相关，当波浪动力作用较强时，就会出现浑浊带浓度及范围增加、近底高含沙水体现象突出、南导堤越堤输沙量显著增加、坝田冲

刷、边滩坡度变缓、河床密实度降低以及层化和制紊效应明显等现象,北槽深水航道也就会出现淤积现象;与之相反,当波浪动力作用显著减弱、水流动力作用相对较强时,就会出现浑浊带浓度及范围减小、近底高含沙水体现象显著减弱或消失、南导堤越堤输沙量显著减少、坝田淤积、边滩坡度变陡、河床密实度增加、层化和制紊效应不再明显等现象,北槽深水航道也就会出现冲刷现象。说到底,这些现象(包括北槽深水航道冲刷现象)的变化之所以具有很好的一致性,就是因为它们都是同一个物理过程的各种表象(或结果),引起这些表象发生的根本动力是相同的,一旦根本动力发生变化,它们都将随之而变。对于长江口拦门沙河段的滩槽泥沙交换而言,这些因素均不是独立存在的因素,均不能独立对北槽深水航道的回淤产生影响。

3) 在评价各种因素对北槽深水航道回淤的影响时,一定要将其置于完整的滩槽泥沙交换物理过程中来分析,不能片面、局部地看问题,否则会带来错误的认识。波浪作用是引起长江口拦门沙河段滩槽泥沙交换往“冲滩淤槽”方向发展根本动力,在北槽深水航道回淤原因分析及减淤研究中应抓住这个关键。

参考文献:

- [1] 刘猛,李为华.长江口北槽深水航道回淤量变化宏观动力原因分析[J].水运工程,2013(3):129-139.
- [2] 刘猛,吴华林,李为华,等.长江口深水航道工程南导堤越堤水沙运动观测研究[J].海洋工程,2011(2):129-134.
- [3] 刘猛,吴华林,李为华,等.长江口北槽南导堤越堤输沙运动的时空变化特征研究[J].海洋学报,2013(2):161-167.
- [4] 刘猛,朱亮,张宏伟,等.长江口北槽航槽开挖对水流及河势的影响[J].水运工程,2012(11):107-111.
- [5] 刘猛,朱亮,李为华,等.增强长江口北槽航道内水流冲刷能力的工程措施探讨[J].水运工程,2013(11):102-107.
- [6] 陈庆强,孟翊,周菊珍,等.长江口细颗粒泥沙絮凝作用及其制约因素研究[J].海洋工程,2005(1):74-82.
- [7] 沈淇,顾峰峰,万远扬,等.长江口洪季北槽深水航道区域悬沙沉降速度估算[J].海洋工程,2013(2):88-93.
- [8] 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[C]//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,1983:274-285.
- [9] 陈邦林,吴玲,邱佩英.长江口南港南槽地区悬输质絮凝机理研究[C]//陈吉余,沈焕庭,恽才兴.长江河口动力过程和地貌演变.上海:上海科学技术出版社,1988:274-282.
- [10] 关许为,陈英祖,杜心慧.长江口絮凝机理的试验研究[J].水利学报,1996(6):70-74.
- [11] 刘猛.长江口北槽深水航道回淤原因争议性问题分析[C]//第十七届中国海洋(岸)工程学术讨论会论文集.北京:海洋出版社,2015:862-870.
- [12] Tzang S Y. Water wave-induced soil fluidization in a cohesionless fine-grained seabed[D]. USA: University of California at Berkeley, 1992.
- [13] 倪培桐,吴超羽.河口最大浑浊带研究进展[J].人民珠江,2000(3):19-23.
- [14] 李大山.波浪作用下异重流运动特性研究[J].海洋工程,1996(4):53-58.
- [15] 沈焕庭,贺松林,潘定安,等.长江河口最大浑浊带研究[J].地理学报,1992(5):472-479.
- [16] 沈焕庭.我国河口最大浑浊带研究的新认识[J].地球科学进展,1995(2):210-212.
- [17] 赵冲久.近海动力环境中粉砂质泥沙运动规律的研究[D].天津:天津大学,2003.
- [18] 周海,季岚,应铭.长江口南港—北槽深水航道常态回淤原因研究总报告(2013年度)[R].上海:中交上海航道勘察设计研究院有限公司,2014.
- [19] 刘杰,程海峰,赵德招.长江口12.5 m深水航道回淤特征[J].水科学进展,2014(3):358-365.
- [20] 周海,张华,阮伟.长江口深水航道治理一期工程实施前后北槽最大浑浊带分布及对北槽淤积的影响[J].水运工程,2005(5):58-65.
- [21] 刘猛,马恒力,胡志锋,等.长江口北槽南导堤两侧高滩变化及影响分析[J].泥沙研究,2014(6):58-62.
- [22] 徐俊杰.基于底边界层研究的航道回淤机制分析[D].上海:华东师范大学,2009.