

· 航道及船闸 ·



长江口北槽深水航道回淤量变化 宏观动力原因分析

刘 猛, 李为华

(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: 根据实测资料、物理模型试验结果和有关文献成果对影响长江口北槽深水航道回淤量的宏观动力原因进行了分析。取得新的认识: 1) 与枯季相比, 长江口拦门沙河段洪季波浪中的长周期波浪显著增多, 其中8.0 s及以上周期的波浪能量占总波能的比例由枯季的3.2%增加至洪季的40.6%; 2) 高能波浪运动对北槽航道回淤产生了显著的不利影响, 与北槽航道回淤量的增加息息相关; 3) 12.5 m航道开挖后, 北槽航道内水流冲刷能力沿程均有增强, 有利于槽内泥沙往两侧高滩运移; 4) 长江口拦门沙河段泥沙自身交换量远大于河口上游来沙, 洪水不是造成北槽航道回淤量发生显著变化的主导性宏观动力原因; 5) 波浪作用是长江口北槽航道回淤量发生显著变化的主导性宏观动力原因, “消浪”应成为今后北槽深水航道减淤工程以及长江口南槽、北港和北支下段航道整治工程设计研究工作中不可忽视的指导性原则之一。

关键词: 长江口深水航道治理工程; 波浪; 水流; 航道回淤

中图分类号: TV 148

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2013)03-0129-11

Analysis of macro dynamic reasons for change of back silting amount in deepwater channel project at north passage of the Yangtze estuary

LIU Meng, LI Wei-hua

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

Abstract: Based on experiment, observed in-situ data and results of the literature, the macroscopic dynamic reasons for change of back silting amount in the deepwater channel project at north passage of the Yangtze estuary are studied. The results show that: 1) Compared with the dry season, the long-period waves in the flood season increase significantly, the proportion of wave energy with the period range of 8.0s to higher in total wave energy increases from 3.2 % in the dry season to 40.6% in the flood season; 2) High-energy wave motion produces significant adverse effects on siltation in navigation channel at the north passage, it is closely related to the increase of back silting amount; 3) The current scouring capability in the north channel along the way increases after the channel depth dredged to 12.5 m, it is beneficial for the sediment in channel to move higher; 4) The quantity of own sediment exchange in the mouth bars of the Yangtze estuary is far more than that from upstream, flood is not the dominant macro power reason that causes significant change of back silting amount in the deepwater channel project at the north passage; 5) Wave is the dominant macro power reason that causes significant change of back silting amount in the deepwater channel project at the north passage, in the future “wave dissipation” should become one of the guiding principles that shall not be ignored in design research work of deposition reduction project of the deepwater channel project at the north passage and waterway regulation engineering at the south passage, the north channel and the north branch of the Yangtze estuary.

Key words: the Yangtze estuary deepwater channel project; wave; current; back silting in navigation channel

收稿日期: 2012-11-09

作者简介: 刘猛(1983—), 男, 助理研究员, 主要从事河口水沙运动及河口航道治理研究。

主体工程位于长江口北槽拦门沙河段的长江口深水航道治理工程是迄今为止国内规模最大的水运工程。其一期工程于1998年1月27日正式开工，至2000年3月完成，北槽内通航水深从不足7 m（理论基面，下同）增深到8.5 m；二期工程于2002年4月开工，至2005年3月完成，北槽内航道水深增深到10.0 m；三期工程于2006年9月开工建设，至2010年3月，全长92.2 km，宽350~400 m，深12.5 m的深水航道全面建成。但工程建设亦使得原本即极为复杂的河口拦门沙河段水沙运动过程和河势演变规律与工程作用相互角力，自8.5 m航槽建成伊始，长江口深水航道即开始面临航槽内浮泥频发、回淤严重等问题，并随着工程力度的增强而日趋严重。尤其是三期工程开工后，航道回淤量远超预期、回淤分布高度集中且洪枯季（5—10月为洪季，11月—次年4月为枯季，下同）差异明显的情况尤为凸显，2007和2008年仅维护10.0 m水深航道的回淤量即达到约5 000万m³/a，而2010年以后的12.5 m航道通航维护期内全槽年回淤方量已达7 000万m³以上^[1]。这一严峻局面使得通航安全保障的压力和航道维护成本剧增，已引起了相关管理机构和专家学者的关注^[1-2]。摸清北槽拦门沙河段航槽回淤机理、回淤问题治理的可行性以及相应工程措施指导原则已成为当前长江口深水航道再减淤工程论证工作中亟需解决的关

键基础问题。

本文拟基于现场实测资料、物理模型试验结果和有关文献成果，对有关长江口深水航道回淤的宏观动力（波浪和水流）原因展开探讨，以期抛砖引玉，为最终解决上述问题提供一定的借鉴或理论支撑。

1 波浪对北槽深水航道回淤量影响分析

1.1 数据与方法

本节分析主要涉及波浪、浮泥和冲淤量等实测数据，下面对主要数据及其观测方法简要说明。

牛皮礁平台站（图1）处于长江口拦门沙河段靠近口外的一侧，所处位置平均水深约12.5 m，数据分析采用了建站以来至2012年3月观测得到的全部有效数据，数据主要集中在2007年2月—2008年2月和2011年6月—2012年3月两个时段内，数据样本间隔为3 h，共4 097组，其中洪季数据2 066组，枯季数据2 034组，文中涉及的波高及周期均为有效波高和有效波周期。

浮泥厚度数据基于双频测深仪高低频水深差计算^[3]，研究区域为北槽深水航道E~W单元（纵向长约40 km），数据分析采用了各分析时段内的全部观测数据，共35组。航道冲淤量基于航道实际测图冲淤量和各测次之间的实际船方量计算所得。

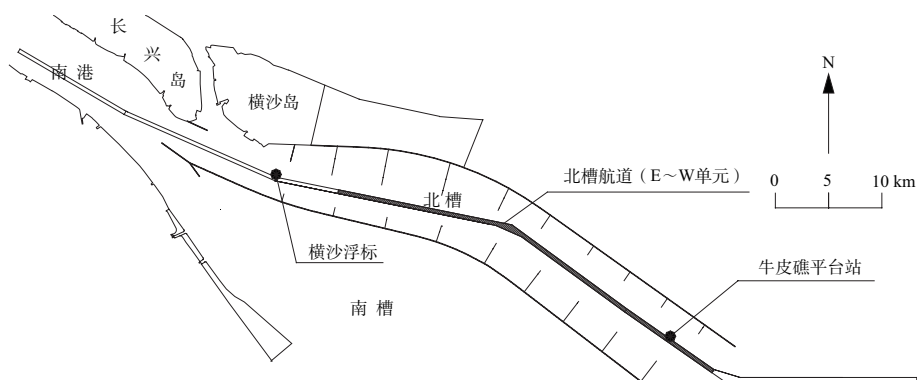


图1 长江口深水航道整治工程及定点水文站位置

1.2 长江口拦门沙河段波浪特征分析

牛皮礁平台站洪枯季实测波浪数据汇总分别见图2和图3，洪枯季平均有效波高、平均有效波周期及平均波能的统计见表1，其中波能的计算公

式^[4]为：

$$E = \frac{1}{8} \rho g H^2 L \tag{1}$$

式中： E 为一个波长范围内的波能； H 为有效波高； L 为有效波长。

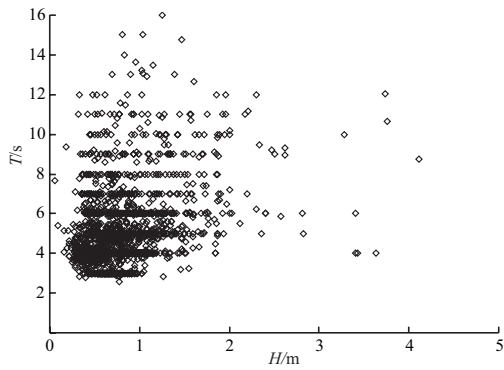


图2 洪季实测有效波高与有效波周期分布

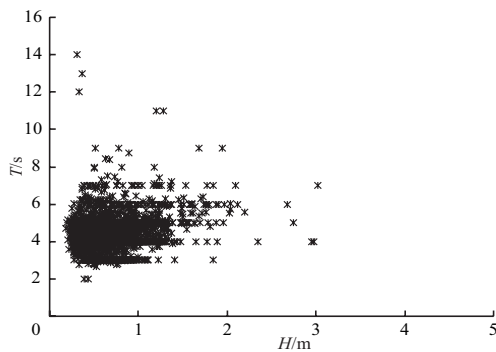


图3 枯季实测有效波高与有效波周期分布

表1 洪枯季平均有效波高、平均有效波周期及平均波能

季节	平均有效波高/m	平均有效波周期/s	平均波能/J
洪季	0.80	5.1	49 345
枯季	0.72	4.3	26 933

由图2、图3和表1可见：1) 从数据平均值看，长江口拦门沙河段波高和波周期洪枯季接近，但波能洪枯季差别较大，洪季平均波能约是枯季的1.83倍。2) 从数据分布看，长江口拦门沙河段波浪波高分布洪枯季差别虽然小，均主要集中在2.0 m以内，但波周期分布洪枯季差别大，洪季波周期主要分布范围较枯季广，8.0 s及以上周期的波浪数量显著增多。

从以上分析可见，长江口拦门沙河段波浪洪枯季差异主要反映在波周期分布上，而波周期分布的差异可能引起洪枯季波能的量值及其组成更为显著的差异，下面从波能随波周期分布洪枯季差异上进一步揭示长江口拦门沙河段的波浪特征。洪枯季长江口拦门沙河段波浪各周期波能占各季总波能比例及累积比例分别见图4和图5。

由图4和图5可见，洪枯季长江口拦门沙河

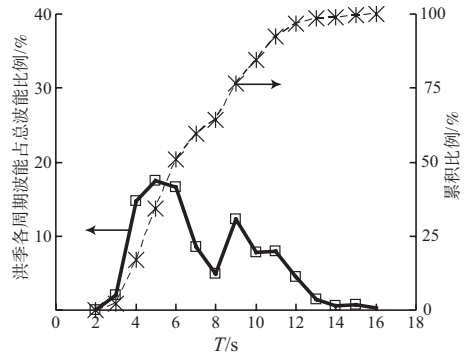


图4 洪季长江口拦门沙河段波浪波能随周期分布

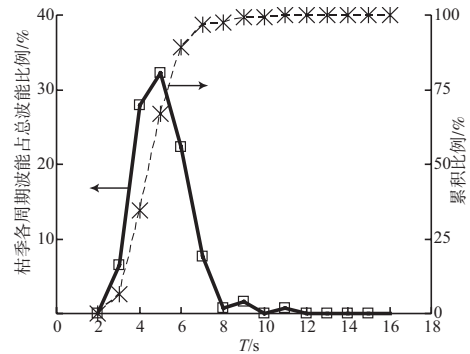


图5 枯季长江口拦门沙河段波浪波能随周期分布

段波浪的波能随周期分布存在显著差异，枯季波能随周期分布曲线只有一个峰值，峰值周期约为5.0 s，而洪季波能分布曲线有2个峰值，峰值周期分别约为5.0 s和9.0 s。在波能组成上，枯季主要由低能量的短周期波组成，其周期主要分布在3.0~7.0 s；而洪季则由低能量的短周期波和高能量的长周期波共同组成，其周期分别主要分布在4.0~7.0 s和8.0~12.0 s。

与枯季相比，在长江口拦门沙河段的波浪组成中，洪季长周期波浪发生频率及其波能所占总波能比例显著提高，8.0 s及以上周期的波浪发生频率由0.8%增加至10.5%，相当于由1.5 d增加至19.2 d；波能增加更为显著，8.0 s及以上周期的波浪波能占总波能比例由3.2%增加至40.6%。

根据长江口拦门沙河段地形、水深及实测风速资料，按海港水文规范^[5]有关深水风浪要素的计算结果表明：长江口拦门沙河段长周期波极少是局地产生的，主要是从口外传播进入的，周期越长的波浪，其中从口外传播进入的所占比例越高，如6.0 s及以上周期的波浪组成中至少占82.4%，7.0 s及以上周期的波浪组成中至

少占92.3%，8.0 s及以上周期波浪组成中至少占96.2%。

1.3 长江口拦门沙河段波浪对北槽航道回淤量影响机制分析

波浪在周期增长之后，波能更大，传播距离更远，作用水深更深，对床面泥沙的掀动能力也更强^[4]。程永舟等^[6]从波浪渗流力角度研究了波浪对泥沙起动的的影响，表明：渗流力的大小随着波浪周期的增大而增大，随着波高的变化不明显，在分析长周期非线性波浪作用下细颗粒泥沙起动规律时，更需考虑波浪引起的渗流力影响。因此长江口拦门沙河段波浪周期分布的洪枯季显著差异必将引起该河段床面泥沙运动的差异。

波浪作用反映在水流结构变化上最显著的亦为增加水体的紊动强度，波浪作用越强，水体紊动越强，而床面附近水体紊动越强，床面泥沙越易起动，同时水体紊动强度越大，水体中的悬沙亦不易沉降^[7-8]。迎岸向波浪作用下河口水体紊动强度纵向分布见图6，波浪作用下滩槽变化机制见图7。

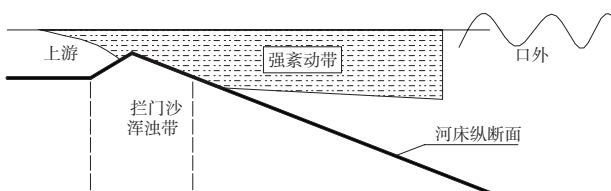


图6 迎岸向波浪作用下河口水体紊动强度纵向分布

由图6可见，当有迎岸向波浪向河口传播时，将在水体形成一个由表层往下逐渐减弱的强紊动带^[7]。口外由于水深深，强紊动带对床面泥沙运动无影响或影响甚微；在拦门沙河段，由于平均水深浅，相对口外与口内河床，拦门沙河段河床受强紊动带的影响显著，拦门沙河段河床泥沙易于起动；到了口内，由于波能的损失及水深的增加，强紊动带的影响基本消失或已大为减弱，强紊动带的这种纵向分布特征使拦门沙河段的床沙起动较口外及上游容易，促使了该河段水体含沙量的相对增高及床沙输移强度增加，有利于加剧滩槽泥沙的交换。

随着口外波浪强度的变化，传入波浪引起的

强紊动带厚度及向内传播的距离将随之变化。此外，强紊动带对拦门沙河段的作用受潮汐变化影响显著，同样的波浪作用下，大潮时，强紊动带作用的垂向距离大，换言之，其影响的拦门沙河段河床面积大，且潮流流速大、输沙能力强，滩槽变化相对剧烈；小潮时，强紊动带影响的拦门沙河段河床面积变小，且潮流流速小、输沙能力变弱，滩槽变化相对减弱。

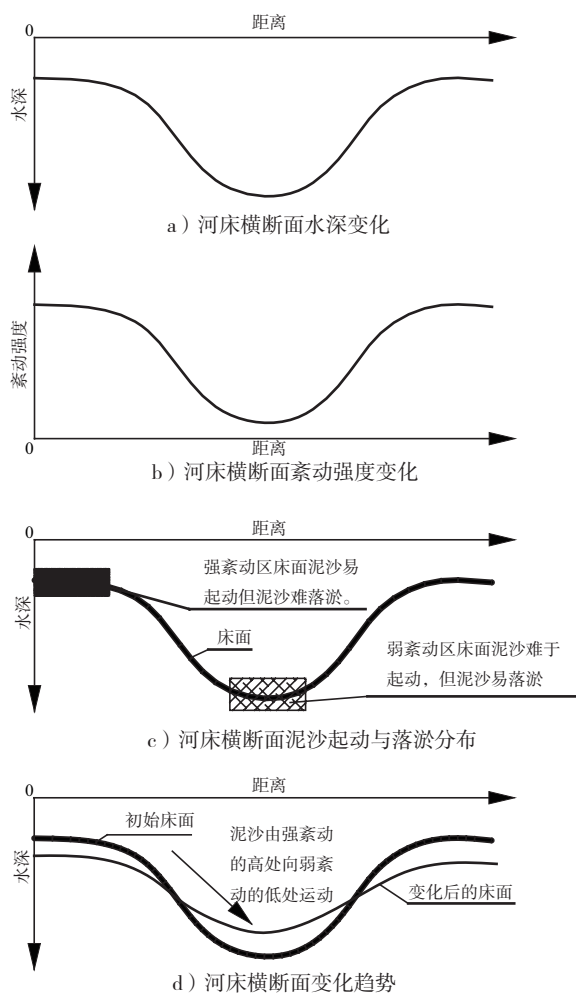


图7 波浪作用下滩槽变化机制

由图7可见，自然条件下波浪引起的床面附近水体紊动强度与水深变化趋势相反，即水深越深床面附近水体紊动强度越小，而水深越浅床面附近水体紊动强度越大。从床面附近水体紊动强度对泥沙的起动与落淤作用来看，水深浅的高滩区域由于紊动强度大，泥沙易于起动，但运移到该区域的悬沙却难于落淤，因此高滩区域相对易于

冲刷; 水深深的深槽区域由于紊动强度小, 泥沙难于起动而易于落淤, 因此深槽区域相对易于淤积。由滩槽的床面附近水体紊动强度分布特征及其对泥沙运动的影响可以判断, 在波浪作用下, 床面泥沙运动趋势总体上是由紊动强度大的高处向紊动强度小的低处运动, 滩槽变化趋势是槽淤积、滩冲刷。需要注意的是, 本文所说的冲刷和淤积均指宏观的总体趋势。

目前能较好反映长江口北槽航道回淤量变化情况的实测物理量有航道浮泥量和航道冲淤量, 一般情况下两者变化趋势是一致的, 即航道浮泥量多淤积量也多, 浮泥量少淤积量也少。下面分别从航道浮泥量和航道冲淤量两个方面揭示长江口拦门沙河段波浪变化对北槽航道回淤量的影响。

选取所有波浪和浮泥的同步观测数据进行分析比较(图8~10), 其中图8和图9为洪季浮泥最大厚度和波能变化, 观测时段分别为2007年6月—10月和2011年7月—10月, 浮泥观测共24次; 图10为枯季浮泥最大厚度和波能变化, 观测时段为2011年11月—2012年3月, 浮泥观测共11次。

由图8~10可见: 1) 长江口拦门沙河段出现波能显著增大现象(出现较大峰值)并非偶然事

件, 如统计波能峰值超过200 kJ的波浪发生次数, 在洪季统计时段内出现约15次, 平均约15 d就出现一次, 在枯季统计时段内出现约5次, 平均约27 d出现一次; 如统计波能峰值超过400 kJ的波浪发生次数, 在洪季统计时段出现约8次, 平均约28 d出现一次, 在洪季统计时段出现约0次。2) 航道内浮泥量显著增加(如最大浮泥厚度超过0.4 m)均出现在波能显著增大之后, 通常情况下, 波能增加越大且持续时间越长, 浮泥量也越大且持续存在时间也越长, 如2011年8月因台风梅花引起的高能波浪持续了近60 h(2011年8月4日23:00—8月7日11:00), 最大波能约为1 952 kJ, 北槽航道内观测到的最大浮泥厚度超过2.0 m, 最大浮泥厚度超过0.4 m的时间持续了约21 d(2011年8月5日—8月25日), 最大浮泥厚度超过1 m的时间持续了约10 d(2011年8月5日—8月14日)。3) 与枯季相比, 长江口拦门沙河段洪季波能显著增加的次数不仅多, 而且波能大且持续时间长; 同样与枯季相比, 洪季北槽航道内浮泥量显著增加的次数也多, 浮泥量大且持续存在时间长。根据图中观测数据统计, 洪季航道内平均浮泥厚度约0.57 m, 枯季约0.18 m, 洪季约是枯季的3.1倍。

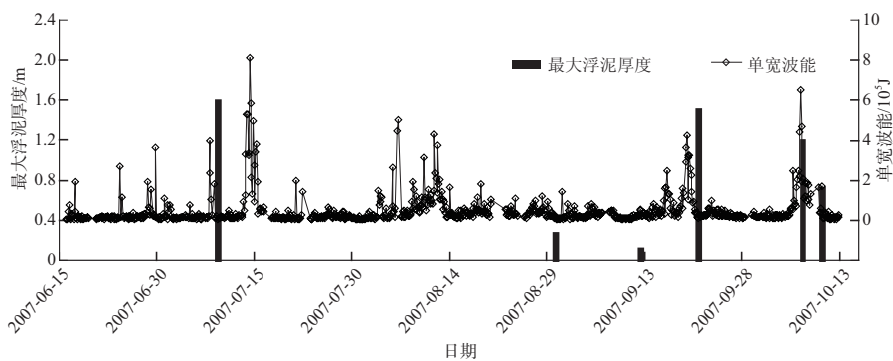


图8 2007年6月—10月北槽航道浮泥最大厚度和波能变化

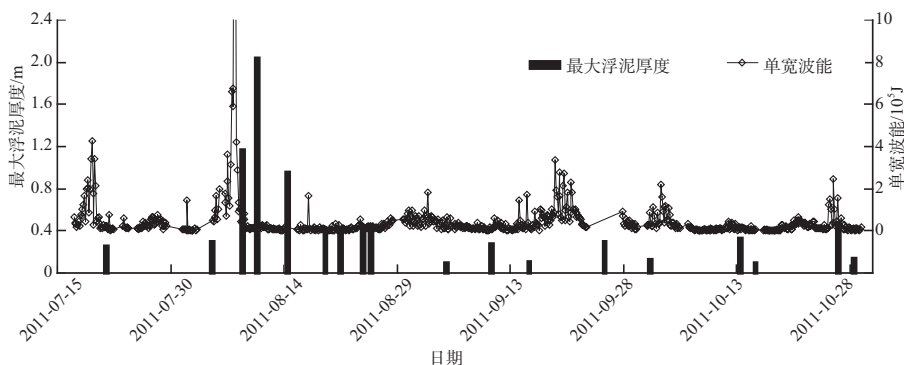


图9 2011年7月—10月北槽航道浮泥最大厚度和波能变化

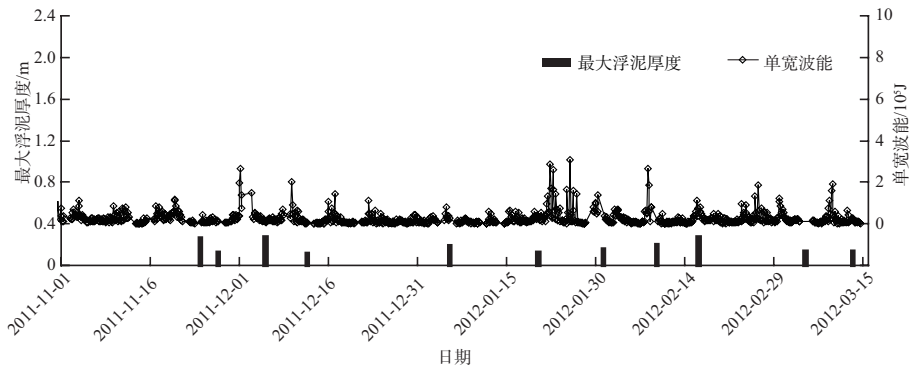


图10 2011年11月—2012年3月北槽航道浮泥最大厚度和波能变化(枯季)

2011年11月—2012年3月北槽航道冲淤量和航道水深变化见图11。

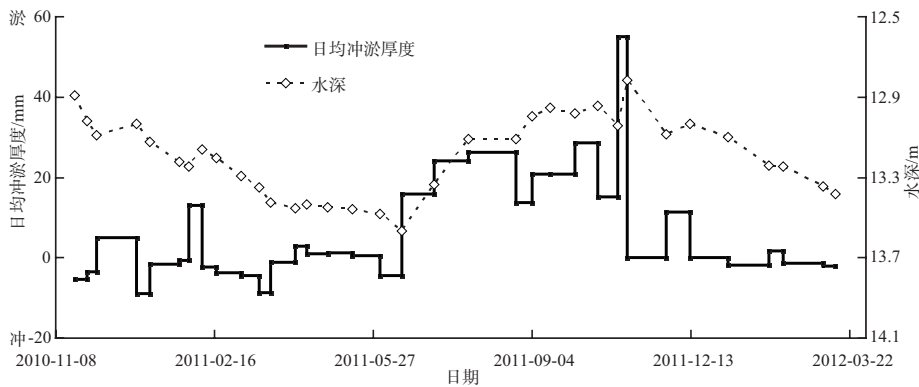


图11 北槽航道冲淤量和航道水深变化

从北槽航道冲淤量和航道水深变化可以看出：1) 北槽航道冲淤量变化洪枯季差异显著，枯季航道维护水深虽然较深，但航道淤积量反而少，而且经常出现连续冲刷的情况，对航道水深维护有利；洪季航道维护水深虽然较浅，但航道淤积量却显著增加，对航道水深维护不利，根据图中数据统计，洪季北槽航道平均淤积强度约为15.8 mm/d，而枯季仅约为1.0 mm/d，洪季约为枯季的15.8倍。2) 波浪对北槽航道冲淤量的影响不仅表现为短期的直接影响也表现为长期的间接影响。每次经过高能波浪作用后，北槽航道一般均会出现不同程度的骤淤现象，如2011年8月，在台风梅花引起的高能波浪作用后，北槽航道出现骤淤，骤淤量近千万方；南槽⁹⁾于1974年开辟为7.0 m人工航槽，1983年在10号台风引起的高能波浪作用后，长27.3 km航槽几乎全线淤平，虽经全力抢挖仍无法恢复，这些均表明了波浪的短期直接影响。每次经过高能波浪作用后，河床均会出

现不同程度的突变，这种突变不仅是地形的突变更是床面泥沙特征的突变，比如床面泥沙的密实度¹⁰⁾、垂向粒径分布等，这些变化对航道回淤将带来长期的间接影响，如台风梅花作用后，北槽航道淤积量连续数月偏高应与此有关。

截至10月13日的2012年12.5 m深水航道回淤量(全槽回淤量)统计见表2，同期牛皮礁平台站实测波浪波能及航道回淤量变化过程见图12。由于牛皮礁平台站观测数据不连续，故在图12中增加了长江口站(位于口外)有效波周期变化过程，对于口外传播进入长周期波，牛皮礁平台站与长江口站波浪周期较为接近且变化趋势相同，因此可以通过长江口站的长周期波浪数据变化特征定性分析牛皮礁平台站的长周期波浪变化特征。

由表2和图12可见：1) 2012年5月之前，口外传入的长周期波(如8 s及以上)频次少且数值小，与此同时，12.5 m航道回淤量亦少，且间或出现长时间的冲刷态势。2) 2012年5月之后，口

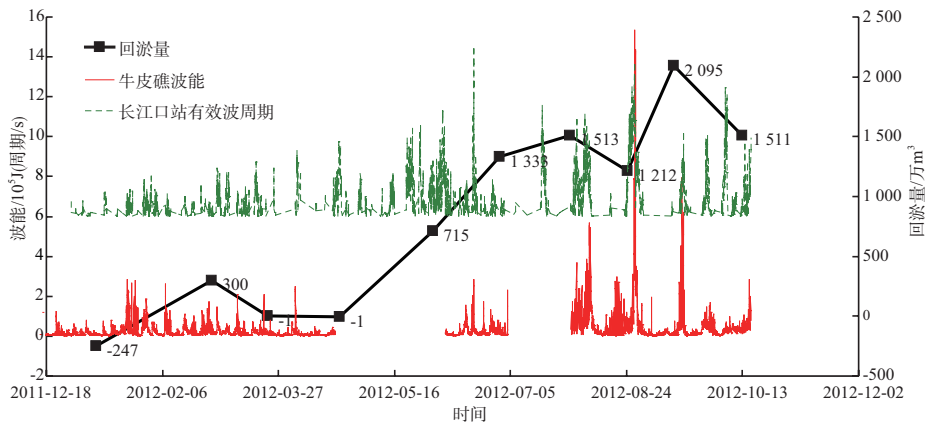


图12 2012年牛皮礁平台站实测波浪波能及航道回淤量变化过程

表2 2012年12.5 m航道回淤量

日期	回淤量/万m ³	统计天数/d	日均回淤量/万m ³
2012-01-08	-247		冲刷
2012-02-27	300	50	6
2012-03-22	-1	24	冲刷
2012-04-22	-1	31	冲刷
2012-06-01	715	40	18
2012-06-30	1 333	29	46
2012-07-30	1 513	31	49
2012-08-24	1 212	25	48
2012-09-13	2 095	20	105
2012-10-13	1 511	30	50

外传入的长周期波（如8 s及以上）频次增加且数值大，与此同时，12.5 m航道回淤量显著增加。3）从牛皮礁平台站波能数据上可以看出，在2012年5月之前的2012年1月8日—2012年2月27日时段内，由于波能相对明显增加，该时段内12.5 m深水航道出现了回淤，日回淤量约为6万m³，而其余时段航道均处于冲刷状态。4）2012年5月中旬以后，口外传入的长周期波（如8 s及以上）频次迅速增加且数值较大，与此同时12.5 m深水航道回淤量迅速抬升，由整体轻微冲刷变为日均回淤量约46万m³。5）在台风布拉万的影响下，口外传入的高能长周期波对长江口深水航道回淤量产生了强烈的影响，2012年8月24日—9月13日，深水航道平均回淤量约为105万m³，总回淤量约为2 095万m³。从上面分析可见，航道回淤量变化与口外传入的长周期波浪密切相关，不仅在长周期（洪枯季）上吻合，而且在短周期（如骤淤）上吻合良好。

2 水流对北槽深水航道回淤量影响分析

2.1 长江口拦门沙河段水流变化特征及其与北槽航道回淤量影响宏观关系分析

长江口从徐六泾到河口拦门沙河段，宽度由不足6 km逐渐增加至约90 km，径流影响逐渐减小，潮流作用逐渐增大，到了长江口拦门沙河段，水流运动主要受潮流控制，受径流变化影响微弱。

横沙浮标（图1）2009年1月—2010年6月实测流速（垂向平均）变化见图13，流向变化见图14。

从图13和图14可以看出，横沙浮标处水流运动洪枯季无明显趋势性变化，但水流运动随潮型周期性变化极为显著，大潮涨落急流速大，小潮涨落急流速小，无论洪枯季还是大中小潮，流向变化稳定。横沙浮标站处于长江口拦门沙河段靠近上游的一侧，因此其水流运动变化规律可以较好地反映出径流变化对整个长江口拦门沙河段水流运动的影响，可见长江口拦门沙河段水流运动洪枯季无明显趋势性变化，换言之，对拦门沙河段的泥沙运动而言，水流是一种稳定的周期性变化动力。

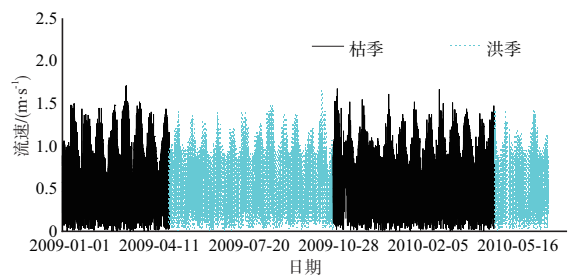


图13 横沙浮标处流速变化

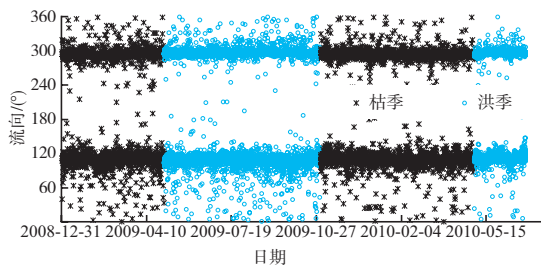


图14 横沙浮标处流向变化

假若长江口拦门沙河段水流运动是引起北槽深水航道回淤量变化的主要宏观动力原因，那么

表3 2010年和2011年洪季大通流量及洪季北槽航道回淤量特征值

年份	回淤量/ 万m ³	平均流量/ (m ³ ·s ⁻¹)	最大流量/ (m ³ ·s ⁻¹)	流量大于 60 000 m ³ /s 的天数/d	流量大于 50 000 m ³ /s 的天数/d	流量大于 40 000 m ³ /s 的天数/d	流量大于 30 000 m ³ /s 的天数/d
2010	4 628	45 892	65 400	36	58	127	165
2011	4 635	26 756	46 300	0	0	20	66

从表中的统计数据可见，2010年和2011年洪季大通流量差异显著，2010年是洪水年，2011年是枯水年，但这两年洪季航道回淤量持平，可见2010年的大洪水并没有使当年的航道回淤量显著增加。

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且不入大海，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2 a均超7 000万m³的全槽回淤量，当然上述假设也是不可能的，其给航道带来的回淤量将更小。此外现场观测研究成果表明^[11-12]，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，因此上游径流变化不是引起北槽航道回淤量洪枯季差异显著的主要宏观动力原因。

2.2 航槽开挖后北槽槽内流速变化情况

刘猛等^[13]研究了长江口北槽航槽开挖对水流的影响，结果表明：与径流河段不同，长江口北槽航槽开挖后槽内流速增加而并未减小。在类似长江口的巨型河口实施挖槽，由于挖槽的面积与潮流的过水面积相比可忽略不计，因此挖槽对潮位的影响也是可以忽略不计的，换言之，航槽开

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变化，事实并非如此，北槽航道回淤量主要集中在洪季。

径流量虽然洪枯季差异大，但其对长江口拦门沙河段水流运动的影响甚微，因此从水动力角度来说，径流变化不应对长江口深水航道回淤量变化产生显著影响。2010年和2011年洪季大通流量及洪季北槽航道回淤量（E~W单元，图1）特征值统计见表3。

挖对北槽水力坡度的影响可以忽略不计，挖槽对流速的影响主要取决于水流与挖槽的夹角及挖槽前后的水深比。当水流与航槽夹角较小时，水深越大流速也越大。

物模试验工程及测点布置见图15，水流试验所得航槽水深为10 m与12.5 m的条件下，北槽航中落急流速及其差值沿程分布见图16（口外潮差约4.1 m）。

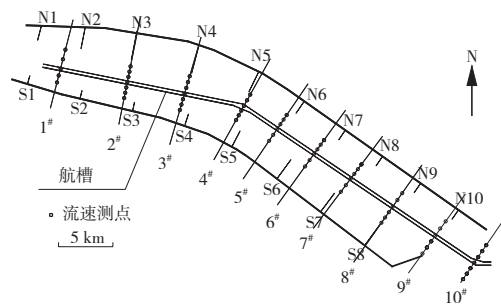


图15 工程及测点布置

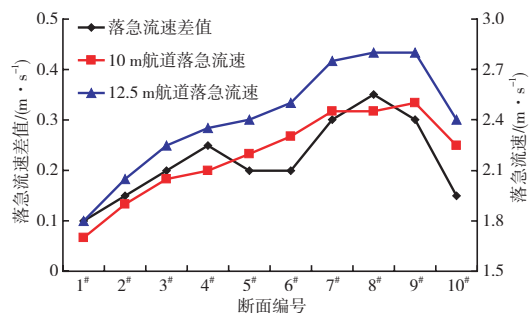


图16 航道中落急流速及其差值沿程分布

2.3 水流作用下长江口拦门沙河段滩槽变化机制分析及实证

2.3.1 机制分析

水流作用下长江口拦门沙河段滩槽变化机制见图17。自然条件下水流流速沿河床横断面分布与水深变化趋势一致，即水深深处流速大，浅处流速小。从流速对泥沙的起动与落淤作用来看，水深浅的高滩区域由于流速小，泥沙难于起动或不起动，但运移到该区域的悬沙容易落淤，因此高滩区域相对易于淤涨；水深深的深槽区域由于流速大，泥沙易于起动而难于落淤，因此深槽区域相对易于冲刷。由滩槽的流速分布特征及其对泥沙运动的影响可以判断，在水流作用下，床面泥沙运动结果总体上是由流速大的低处向流速小的高处运动，滩槽变化趋势是槽更深、滩更高，直至最终趋于稳定。

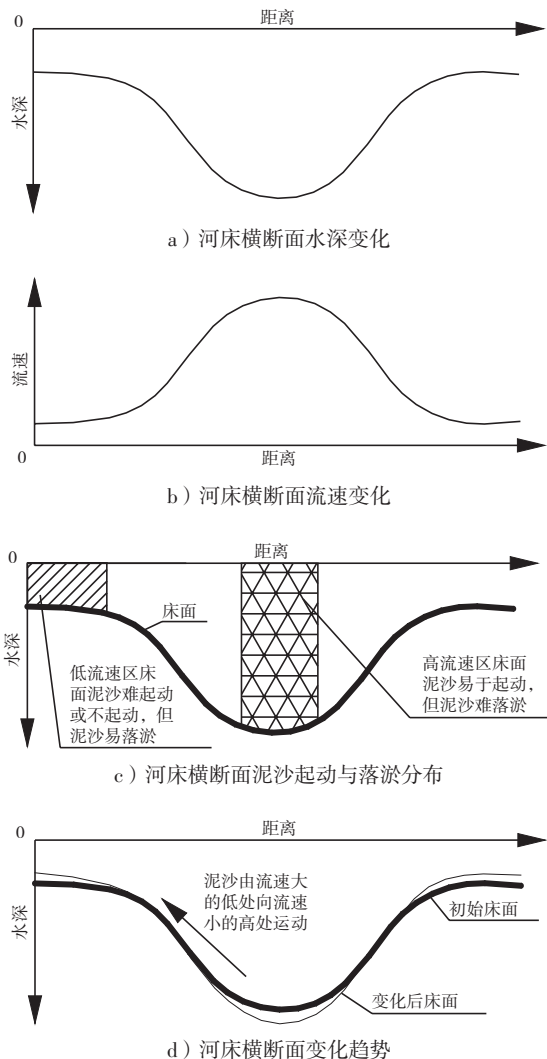


图17 水流作用下滩槽变化机制

由前文分析可知，长江口拦门沙河段流速洪枯季变化不明显，北槽若仅在水流运动的作用下，泥沙应该从流速大的主槽向流速低的高滩运移，即出现槽冲滩淤现象。

北槽12.5 m航道开挖后，槽内水流冲刷能力的变化可用下式近似表示：

$$\Delta = \frac{v_{2max}}{v_{2c}} \bigg/ \frac{v_{1max}}{v_{1c}} = \frac{v_{2max}}{v_{1max}} \cdot \frac{v_{1c}}{v_{2c}} = \left(\frac{h_1}{h_2}\right)^{0.2} \cdot \left[\left(\frac{h_2}{h_1}\right)\cos^2\theta + \left(\frac{h_1}{h_2}\right)^2\sin^2\theta\right]^{0.5} \quad (2)$$

其中，泥沙起动流速 v_c 采用沙玉清公式^[14]，挖槽后槽内平均流速变化 v_{2max}/v_{1max} 采用乐培九公式^[15]计算，各计算公式如下：

$$v_c = h^{0.2} \sqrt{1.1 \frac{(0.7 - \varepsilon)^4}{d} + 0.43d^{3/4}} \quad (3)$$

$$\frac{v_{2max}}{v_{1max}} = \left[\left(\frac{h_2}{h_1}\right)\cos^2\theta + \left(\frac{h_1}{h_2}\right)^2\sin^2\theta\right]^{0.5} \quad (4)$$

式中： Δ 为表示航槽内水流冲刷能力变化的参数，无量纲，大于1时表示航槽内水流冲刷能力增强，等于1时表示航槽内水流冲刷能力不变，小于1时表示航槽内水流冲刷能力减弱； v_{1max} 、 v_{2max} 分别表示挖槽前、后的急流速； v_{1c} 、 v_{2c} 分别表示挖槽前后的泥沙起动流速； h_1 、 h_2 分别表示挖槽前后的水深； θ 为水流与挖槽轴线夹角。

计算表明，在北槽航道由10 m开挖至12.5 m后，当水流与航道轴线夹角小于约30°时，槽内水流冲刷能力增强。12.5 m航道开挖后，北槽内航道轴线与急流速夹角均小于30°，因此其槽内水流冲刷能力沿程均有增强^[13]，有利于槽内泥沙往两侧高滩运移。

2.3.2 水流作用下滩槽变化实证

前文从机理上分析了水流作用下的长江口滩槽变化趋势，下面利用实证资料来进一步证实上述推论。

实证1：北槽主槽洪淤枯冲现象^[16]。

枯季长江口受波浪作用弱，河床变化以水流作用为主，故枯季北槽主槽出现了冲刷情况，而洪季长江口受波浪作用增强，波浪的冲淤滩槽作用超过了水流的冲槽淤滩作用，故洪季北槽主槽

出现了淤积情况。

实证2：枯季北槽航道淤积量小且间或出现长时间的冲刷情况（表3）。

枯季长江口受波浪作用弱，河床变化以水流为主，根据北槽挖槽对水流的作用可知，12.5 m航道开挖后，北槽航道内水流冲刷能力增强，故出现上述现象。

实证3：南槽现场观测结果^[17]。

华东师范大学根据南槽现场实测的时均流速及含沙量资料进行分析计算，结果表明：浅水区域泥沙基本上向高滩或近岸方向输送，而深水区和邻近河槽泥沙向外海输移。这样在一个潮周期中平面上形成一个浅水进沙深水出沙的输沙环流系统。有利于泥沙上滩及浅滩的淤涨发育。

实证4：九段沙滩顶高程观测结果^[12]。

上海河口海岸科学研究中心于2008年11月—2009年8月登滩采用桩点法观测了九段沙滩面高程变化（图18和图19），结果显示九段沙滩面枯季淤积，洪季冲刷，枯季淤积应是水流作用为主的结果。

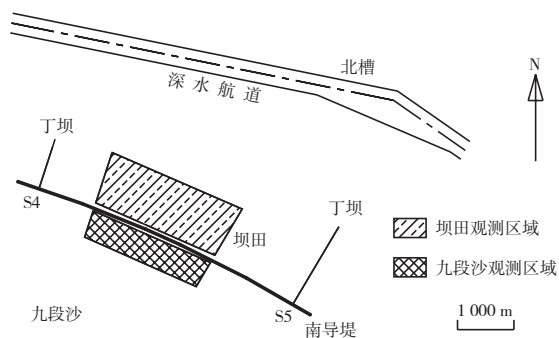


图18 九段沙高滩高程变化观测区域位置

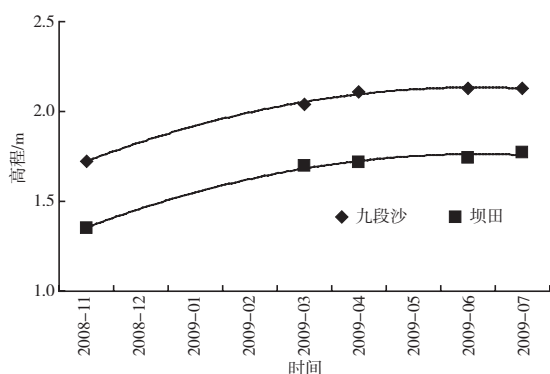


图19 九段沙高滩实测高程变化

实证5：物理模型试验结果^[13,16]。

2011年2月—2013年2月，在无新建工程影响下由物理模型试验得到的北槽河床变化（图20）表明：北槽内主槽及航道整体上均处于冲刷态势。

以上实证均支撑了文中对水流作用下的长江口滩槽变化趋势的观点。

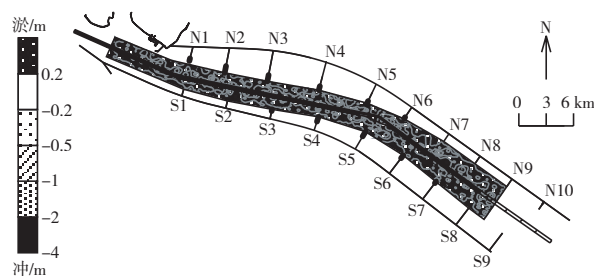


图20 2011年2月—2013年2月北槽河势变化模型试验结果

3 长江口北槽深水航道回淤量变化宏观动力原因分析

水流和波浪^[18]均可能是北槽航道回淤量增加的主要宏观动力原因。

1) 动力作用下滩槽变化机制。

水流单独作用下北槽航道总体表现为冲刷，波浪作用下北槽航道总体表现为淤积，而天然洪季条件下，北槽航道处于显著淤积的状态，从滩槽变化机制上来看，波浪作用下的滩槽变化机制与其吻合。

2) 动力洪枯季差异情况。

长江口拦门沙河段水流运动洪枯季无明显差异，是一种稳定的周期性变化动力，而波浪作用存在显著的洪枯季差异，因此仅从动力的洪枯季差异来看，波浪亦更具条件。

3) 动力变化与航道回淤量变化关系。

波浪作用与航道回淤量的变化不仅在长周期（洪枯季）上吻合，而且短周期（如骤淤）也吻合良好。水流作用与航道回淤量的显著变化无明显关系。

从上述的对比分析可见，波浪作用是长江口北槽航道回淤量发生显著变化的主导性宏观动力原因，“消浪”应成为今后北槽深水航道再减淤工程以及长江口南槽、北港和北支下段航道整治工程设计研究工作中不可忽视的指导性原则之一。

4 结语

1) 长江口拦门沙河段波浪洪枯季差异主要反映在周期分布上, 周期分布的差异引起了洪枯季波能的量值及其组成更为显著的差异。在波能组成上, 枯季主要由低能量的短周期波组成, 其周期主要分布在3.0~7.0 s; 而洪季则由低能量的短周期波和高能量的长周期波共同组成, 其周期分别主要分布在4.0~7.0 s和8.0~12.0 s, 与枯季相比, 洪季8.0 s及以上周期的波浪能量占总波能的比例由3.2%增加至40.6%, 长周期波主要是口外传入的。

2) 长江口拦门沙河段的高能波浪运动对北槽航道回淤产生了显著的不利影响, 与北槽航道回淤量的增加息息相关, 是引起北槽航道回淤的常规动力, 其对北槽航道回淤的影响既有短期的直接影响也有长期的间接影响, 波浪能量越大持续时间越长, 短期的直接影响越强烈, 长期的间接影响也越明显。

3) 长江口拦门沙河段水流运动主要受潮流影响, 受径流影响小, 洪枯季水流运动无明显变化, 是一种稳定的周期性变化动力。12.5 m航道开挖后, 北槽航道内水流冲刷能力沿程均有增强, 在水流单独作用下, 有利于槽内泥沙往两侧高滩运移势。

4) 长江口拦门沙河段泥沙自身交换量远大于河口上游来沙, 洪水不是造成北槽航道回淤量发生显著变化的主导性宏观动力原因。

5) 波浪作用是长江口北槽航道回淤量发生显著变化的主导性宏观动力原因。

6) “消浪”应成为今后北槽深水航道再减淤工程以及长江口南槽、北港和北支下段航道整治工程设计研究工作中不可忽视的指导性原则之一。

参考文献:

[1] 金镠, 虞志英, 何青. 深水航道的河势控制和航道回淤问题[J]. 中国港湾建设, 2012(1): 1-8.

- [2] 谈泽炜, 范期锦, 郑文燕, 等. 长江口北槽航道回淤原因分析[J]. 水运工程, 2011(1): 29-39.
- [3] 冯俊. 浮泥发育时双频回声测深误差及其对适航水深监测的影响[J]. 水运工程, 2011(8): 83-87.
- [4] 吴宋仁. 海岸动力学[M]. 北京: 人民交通出版社, 1999.
- [5] JTJ 213—1998 海港水文规范[S].
- [6] 程永舟, 蒋昌波, 潘昀, 等. 波浪渗流对泥沙起动的影响[J]. 水科学进展, 2012(2): 256-262.
- [7] 赵子丹. 波浪作用下的泥沙沉降速度[J]. 力学学报, 1978(3): 177-181.
- [8] 白玉川, 张彬, 张胤祺, 等. 波浪挟沙能力及航道淤积机理的研究[J]. 水利学报, 2007(6): 10-17.
- [9] 张栋梁, 姚金元. 长江口北槽挖槽段泥沙淤积特性研究[J]. 泥沙研究, 1993(3): 66-78.
- [10] 高亚军, 刘长辉, 郑巧红. 细颗粒煤粉的密实过程及其对起动流速的影响[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 1999(7): 54-59.
- [11] 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.
- [12] 上海河口海岸科学研究中心. 九段沙越堤流, 沙和北槽中段南滩地形变化观测[R]. 上海: 上海河口海岸科学研究中心, 2010.
- [13] 刘猛, 朱亮, 张宏伟, 等. 长江口北槽航槽开挖对水流及河势影响初步分析[J]. 水运工程, 2012(11): 107-111.
- [14] 沙玉清. 泥沙运动学引论[M]. 北京: 中国工业出版社, 1996.
- [15] 乐培九, 张华庆. 河口海湾地区航道挖槽回淤的估算方法[J]. 水道港口, 1993(3): 1-11.
- [16] 上海河口海岸科学研究中心. 长江口12.5 m深水航道减淤工程方案研究清水动床物理模型试验研究[R]. 上海: 上海河口海岸科学研究中心, 2011.
- [17] 李九发, 戴志军, 刘新成, 等. 长江河口南汇嘴潮滩圈围工程前后水沙运动和冲淤演变研究[J]. 泥沙研究, 2010(3): 31-37.
- [18] 杨华. 黄骅港外航道泥沙问题的治理及其效果[J]. 水道港口, 2009(4): 233-240.

(本文编辑 武亚庆)