



长江口拦门沙河段航道回淤的水流动力环境*

刘 猛, 韩 露, 胡志锋

(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: 对长江口拦门沙河段航道回淤的水流动力环境进行了研究, 结果表明: 1) 长江口拦门沙河段的水流动力是引起北槽深水航道冲刷的基本动力, 在长江口 12.5 m 深水航道贯通后, 航槽内的水流冲刷能力沿程普遍增强; 2) 径流变化与北槽深水航道回淤无明显关系; 3) 在长江口拦门沙河段, 水流是一种相对稳定的周期性变化动力, 洪枯季无明显差别; 4) 天然情况下长江口拦门沙河段的河床时刻处于一种动态平衡中, 决定这种平衡关系的是水流和波浪两种动力, 当仅有水流动力作用时, 长江口拦门沙河段的河床形态就不再处于平衡状态, 主槽将往冲深方向发展。

关键词: 长江口拦门沙; 航道回淤; 水流条件; 平衡; 径流

中图分类号: U 612; TV 148+.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2016)08-0082-07

Hydrodynamic condition in channel siltation at the mouth bars of the Yangtze estuary

LIU Meng, HAN Lu, HU Zhi-feng

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

Abstract: This article researches the hydrodynamic condition in channel siltation at the mouth bars of the Yangtze estuary. From the research results, some perceptions are as follows: 1) In the mouth bars, flow dynamic is the main power of erosion in the deep-water channel of north passage, and the erosion power generally enhances in the channel, after the 12.5 m channel at the Yangtze estuary being through. 2) The correlation between the change of runoff and the siltation in the deepwater channel of north passage is not distinct. 3) At the mouth bars of the Yangtze estuary, water flow is a kind of relatively stable power with periodic change; there is no obvious difference between flood season and dry season. 4) Under the natural condition, the riverbed at the mouth bars of the Yangtze estuary is in a dynamic equilibrium which is resulted from the flow dynamic and wave dynamic. When it is only under the action of flow dynamic, the riverbed at the mouth bars of the Yangtze estuary is not in an equilibrium state any more, and the scouring depth tends to further develop in the main channel.

Keywords: the mouth bars of the Yangtze estuary; channel siltation; flow condition; equilibrium; runoff

文献[1-3]研究结果表明, 长江口北槽深水航道的冲淤变化是长江口拦门沙河段滩槽泥沙交换的一种结果(或现象)。波浪和水流(潮流和径流的叠加)是引起长江口拦门沙河段滩槽泥沙交换的两种基本动力, 波浪动力主要引起冲滩淤槽变化, 是北槽深水航道回淤的动力基础; 水流动力

主要引起冲槽淤滩变化, 是北槽深水航道冲刷的动力基础。这两种基本动力的强弱变化及力量对比决定着北槽深水航道冲淤变化的强度和趋势。文献[4-6]深入研究了长江口拦门沙河段航道回淤的波浪动力环境、揭示了长江口拦门沙河段波浪变化特征及其对航道回淤的作用机制等问题, 在

收稿日期: 2016-02-22

***基金项目:** 上海市自然科学基金(16ZR1415800)

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

此基础上, 本文依据现场观测资料及相关研究成果, 以北槽深水航道为例, 进一步阐述引起长江口拦门沙河段滩槽泥沙交换的另一种基本动力——水流的变化特征及其对航道回淤的作用机制等问题。

1 数据和方法

本文涉及的长江口拦门沙河段的天然潮位、流速资料均来自于长江口自动水沙、波浪监测系统。该系统在长江口拦门沙河段设置了大量的平台站和浮标 (图 1)。航道冲淤方量是基于航道实际测图冲淤量与各测次之间的实际船方量计算所得。

2 长江口拦门沙河段挖槽水动力特性

物理模型试验结果表明^[7-8], 在长江口拦门沙河段开挖航槽, 只要航道轴线与涨落急流线之间的夹角不大, 航槽内的流速就会有比较明显的增

加, 比如在北槽 12.5 m 水深航槽开挖之后, 航槽内的流速沿程均有明显的增加。这种认识也可以从现场观测结果得到验证 (图 2 中的 AD1~AD7 断面, 槽中流速明显凸出); 但过了拦门沙, 越往上游, 海岸特性迅速减弱、河流特性凸显, 这种挖槽后槽内流速增加的水动力特性就会逐渐减弱、消失直至逆转 (图 2 中的 AD0 断面)。

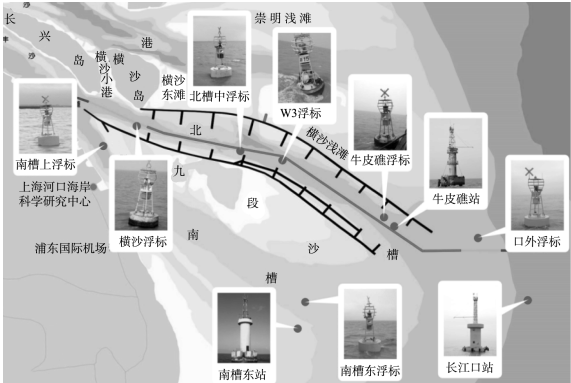


图 1 长江口自动水沙、波浪监测系统浮标和平台站的分布位置

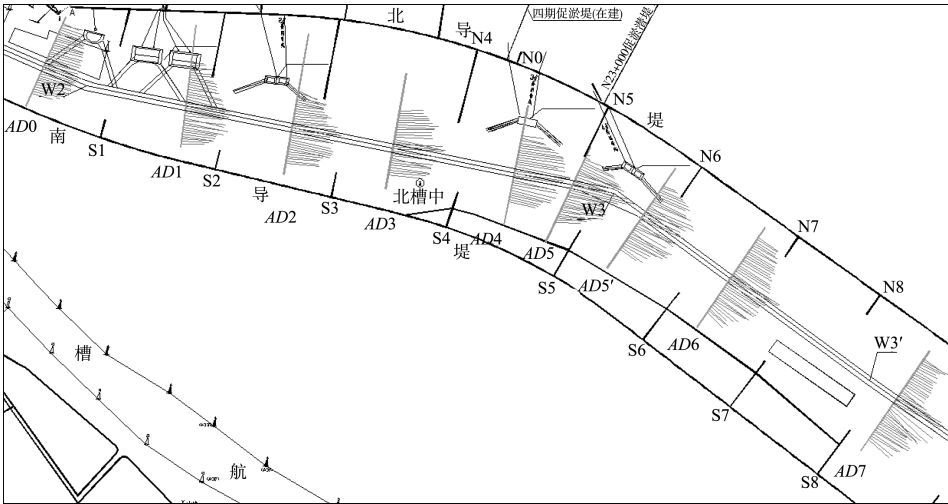


图 2 2010 年 8 月落急流速现场观测结果

以上现象可以从理论方面进行解释。在 10 m 水深航道的条件下, 落急时刻航槽内的横断面平均流速 v_1 可以近似表示如下^[9]:

$$v_1 = \frac{1}{n} H_1^{2/3} J_1^{1/2} \tag{1}$$

同样, 在 12.5 m 水深航道的条件下, 落急时刻航槽内的横断面平均流速 v_2 可以近似表示如下:

$$v_2 = \frac{1}{n} H_2^{2/3} J_2^{1/2} \tag{2}$$

式中: H_1 、 H_2 分别为 10 m 及 12.5 m 航道条件下落急时刻的槽内水深(m); J_1 、 J_2 分别为 10 m 及 12.5 m 航道条件下落急时刻的水力坡度; n 为河床糙率。

在类似长江口的巨型河口顺水流方向实施挖槽, 当挖槽的面积与周围潮流的过水面积相比很小时, 挖槽对潮位过程的影响也很小。假设一种极限情况, 航槽开挖对落急流速时刻的水力坡度 J

及潮位的影响忽略不计, 即 $H_2 = H_1 + 2.5 \text{ m}$, $J_2 = J_1$, 则有:

$$\frac{v_2}{v_1} = \left(1 + \frac{2.5}{H_1} \right)^{2/3} > 1 \quad (3)$$

可见, 随着航槽深度的增加, 其槽内的流速也相应增大, 直至当挖槽的面积与周围潮流的过水面积相比达到一定数值时, 即挖槽对潮位过程的影响达到一定程度时, 槽内流速的增加趋势才会停止。以上认识也可从乐培九公式^[10]得到证实。

实际上, 北槽 12.5 m 深水航道开通后, 不仅槽内流速明显增加, 槽内水流的冲刷能力也明显增强。相比 10 m 航道, 在北槽 12.5 m 航道贯通后, 落急时刻的槽内水流冲刷能力的变化可用下式近似表示:

$$\Delta = \frac{v_2/v_{2c}}{v_1/v_{1c}} = \frac{v_2}{v_1} \cdot \frac{v_{1c}}{v_{2c}} = \left(\frac{H_1}{H_2} \right)^{0.2} \left[\left(\frac{H_2}{H_1} \right) \cos^2 \theta + \left(\frac{H_1}{H_2} \right) \sin^2 \theta \right]^{0.5} \quad (4)$$

式中: 泥沙起动流速(v_c)采用沙玉清公式^[11]计算, 挖槽前后槽内落急时刻流速变化(v_2/v_1)采用乐培九经验公式计算; Δ 为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_{1c} 、 v_{2c} 分别表示挖槽前后的泥沙起动流速(m/s); θ 为水流流向与挖槽轴线之间的夹角。

计算结果表明, 在北槽航道底高程由 -10.0 m 开挖至 -12.5 m 后, 当水流流向与航道轴线之间的夹角约小于 30° 时, 槽内的水流冲刷能力均有增强。结合天然实际情况可知, 在长江口 12.5 m 深水航道贯通后, 北槽内的航道轴线与涨、落急流速的夹角普遍小于 30° , 因此其槽内的水流冲刷能力理应沿程普遍增强, 这种认识不仅在动床物理模型试验(洪季径流条件)中得到验证, 而且在现场观测(枯季径流条件)中也得到证实, 比如枯季期间北槽深水航道往往出现长时间的整体冲刷情况。

长江口北槽挖槽后的水动力变化特性及其作

用效果从根本动力上揭示了一个重要事实: 长江口拦门沙河段的水流动力是引起北槽深水航道冲刷的基本动力。

3 径流对北槽深水航道回淤的影响

从前文研究结果可以看出, 在长江口拦门沙河段, 无论洪季还是枯季, 水流动力均是长江口北槽深水航道冲刷的基本动力, 但有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^[12], 这种认识与事实是不符的。

1) 从根本动力上来说, 长江口拦门沙河段挖槽水动力特性及作用效果已经表明: 水流动力是长江口北槽深水航道冲刷的主要动力, 而不是引起其回淤的主要动力。

从徐六泾到长江口拦门沙河段, 河宽由不足 6 km 逐渐增加至约 90 km, 径流作用逐渐减弱, 潮流作用逐渐增强。潮流作用相比径流作用要强得多, 占绝对主要地位(拦门沙河段潮量占水体总量约 90%, 洪季略有降低, 枯季略有增加), 这也是径流变化所引起的拦门沙河段水流运动在洪枯季差异不明显的根本原因。

2) 从实践经验来看, 径流增大对河口拦门沙的作用是冲深主槽, 对航道维护是有利的。

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, 增大径流量也是解决这些河口主槽淤积的有效办法^[13]。可见径流量增加的效果应该是冲深拦门沙的主槽, 而不是淤浅它, 这恰恰与将洪季流量增大归结为北槽深水航道洪季显著回淤的原因是矛盾的。

3) 从北槽深水航道回淤特征来看, 径流变化对航道回淤无明显影响。

长江口拦门沙河段的水流运动洪枯季变化不明显, 其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。如果引起长江口 12.5 m 深水航道回淤的主要原因是水流运

动的变化,那么航道回淤量的变化规律应该首先表现为随潮型的周期性变化而不是随洪枯季的显著变化,然而事实却是北槽深水航道的回淤量主

要集中在洪季期间。
长江口 12.5 m 深水航道贯通后,2010—2013 年洪季大通流量与洪季航道回淤量见表 1。

表 1 2010—2013 年洪季大通流量与航道年回淤总量

年份	回淤量/万 m ³	平均流量/ (m ³ /s)	最大流量/ (m ³ /s)	流量大于某值时间/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		
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

由表 1 中的统计数据可见,2010 年是一个大洪水年,2011 年与 2013 年是枯水年,长江径流流量的差异非常显著,但是 3 a 的航道回淤总量极为接近,并未出现显著的差异。2012 年的径流量较 2010 年显著减弱,较 2011 年和 2013 年又明显增强,但其航道的回淤总量却异常增加,又一次表明了北槽深水航道的回淤量变化与长江径流流量的变化无明显关系。

长江口 12.5 m 深水航道贯通后,航道水深定期监测,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的变化情况见图 3。

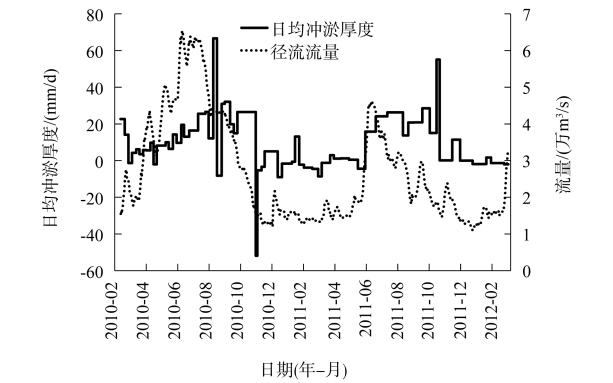


图 3 2010 年 3 月—2012 年 3 月北槽深水航道(E~W 单元)日均冲淤厚度及径流流量变化

由图 3 可见,若仅宏观上泛泛而谈,洪季径流流量的增加与洪季航道回淤强度的增加总体上确有一致性,但从两者的微观变化过程来看,航道回淤强度的变化与径流流量的变化并非同步的,比如年内航道回淤强度最大的时段往往并非对应于年内径流流量最大的时段。图 4 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的对应关系,航道回淤强度与径流流量之间并未表现出明显的趋势性关系。

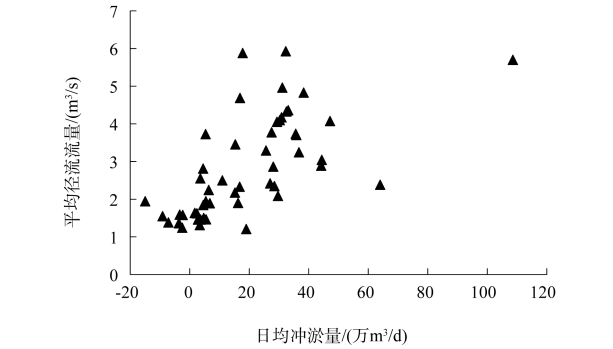


图 4 2010—2013 年各测次长江口 12.5 m 深水航道日均冲淤量与平均径流流量对应关系

关于上游来沙对北槽深水航道回淤的影响,文献[3]已进行过深入阐述,表明了上游来沙与北槽深水航道回淤无直接关系。上游来沙对北槽深水航道回淤的影响可以分为两个过程,即外部积累过程和内部分配过程,其中外部积累与上游来沙有直接关系,但内部分配由拦门沙河段滩槽泥沙交换动力机制决定。退一步说,任何河口,径流的增加必然均伴随着上游来沙的增加,长江河口并不是特例。

4 长江口拦门沙河段的潮位变化特征

文献[1]初步提出了一个新观点:在长江口拦门沙河段,水流是一种相对稳定的周期性变化动力,洪枯季无明显差别。以下两节将依据大量现场实测资料进一步深入对这种观点的认识,以便

更好地了解长江口拦门沙河段航道开发的水流动力环境。

长江口拦门沙河段的潮位变化在空间分布上虽然有所差异,但各处潮位洪枯季变化的总体趋势是一致的。以南槽东平台站(图 1)为例,从 2011 年 1 月—2013 年 12 月,该站实测潮位及其月平均值的变化过程见图 5,洪枯季特征潮位值的统计结果见表 2。

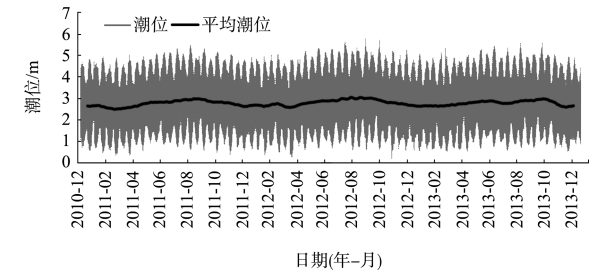


图 5 2011—2013 年南槽东平台站潮位及月平均值变化过程

表 2 2011—2013 年南槽东浮标站特征潮位统计						
累积 频率/%	洪季 潮位/m	枯季 潮位/m	洪枯季 潮位差/m	与枯季相比,洪季 航道水深变化率/%		
				12.5 m	10.0 m	8.0 m
10	0.98	0.83	0.15	1.1	1.4	1.7
30	1.46	1.32	0.14	1.0	1.2	1.5
50	2.85	2.65	0.20	1.3	1.6	1.9
70	4.23	3.99	0.24	1.5	1.7	2.0
90	4.90	4.58	0.32	1.9	2.2	2.5

依据图 5 和表 2 统计数据可知,在长江口拦门沙河段,潮位变化的最大特点就是相对稳定,主要反映在以下两个方面:

- 1) 动的相对稳定。长江口拦门沙河段大中小潮更替、潮起潮落运动始终按照相对固定的时间周期循环变化、永不停止。
- 2) 静的相对稳定。虽然长江口拦门沙河段洪枯季潮位特征值有所变化,但相比其不变部分所占的比例来说,变的部分所占的比例要小得多,洪枯季潮位是基本稳定的。以洪枯季潮位变化引起航道水深的变化为例,与枯季相比,洪季 12.5 m 航道水深变化率不足 2%,10.0 m 航道水深变化率不超过 2.2%,8.0 m 航道水深变化率也在 2.5% 以内。
- 以上两个方面也是长江口拦门沙河段与内河

水位变化规律最为显著的不同之处,内河的水位变化与径流密切相关,流量大时水位升高,流量小时水位降低,流量与水位之间有着较为确定的关系(图 6)。

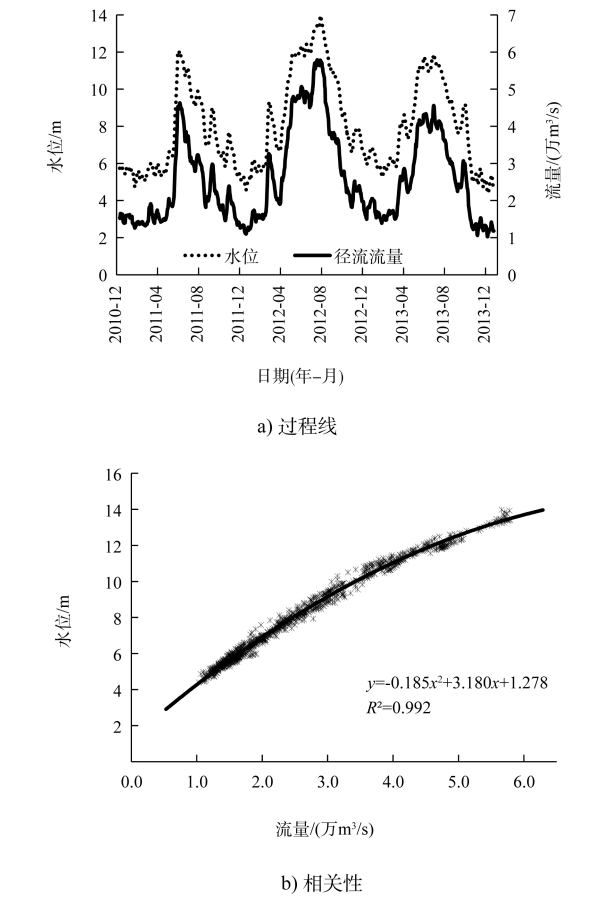


图 6 2011—2013 年大通水位与流量变化关系

长江口地区的潮位变化主要是受相对稳定且周期性变化的天体引潮力作用,径流、气压、风力、风向等多为次要因素,对潮位变化也有不同程度的影响,其中一些因素的影响程度往往又与河口的形态有关。以径流影响为例,由于长江河口的特殊形态,径流到了拦门沙河段对潮位的影响已大大减弱,如 2011 年是枯水年,2012 年是洪水年,两年的洪季流量差别非常显著,但长江口拦门沙河段潮位变化过程并未出现明显的差别(图 5)

潮差是潮位变化过程中的重要参数,其大小主要由天体引潮力决定,潮差的变化与潮流流速的变化密切相关。2011—2013 年南槽东平台站潮差的变化过程见图 7,期间特征潮差值的统计结果见表 3。

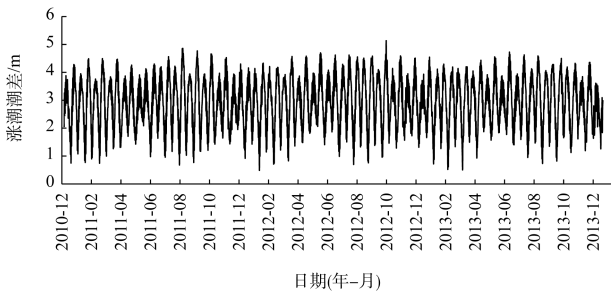


图 7 2011—2013 年南槽东平台站潮差的变化过程

表 3 2011—2013 年南槽东浮标站特征潮差值统计

累积 频率/%	洪季 潮差/m	枯季 潮差/m	洪枯季潮 差差/m	与枯季相比, 洪季潮差变化率/%
10	1.81	1.68	-0.13	-7.2
30	2.49	2.34	-0.15	-6.0
50	3.03	2.93	-0.10	-3.4
70	3.61	3.45	-0.16	-4.4
90	4.17	3.95	-0.22	-5.3

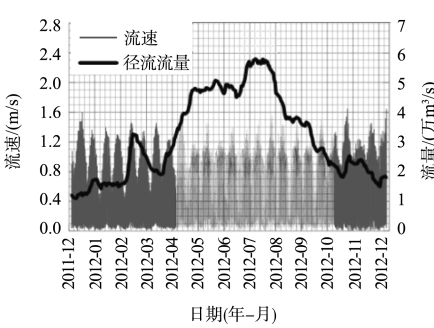
根据图 7 和表 3 统计数据可见, 在长江口拦门沙河段, 潮差变化主要有以下两个特点:

- 1) 长江口拦门沙河段潮差变化不仅有大中小潮相对较短周期的变化, 而且存在明显的以约半年为周期的相对较长周期的变化。这种长周期的变化主要与天体引潮力的变化有关, 总体而言, 每年 3 月和 9 月前后潮差较大, 12 月与 6 月前后潮差较小。
- 2) 长江口拦门沙河段潮差洪枯季无显著差别, 50% 累积频率的潮差洪枯季相差仅约 0.10 m, 与枯季相比, 洪季各累积频率潮差变化率均在 8% 以内。

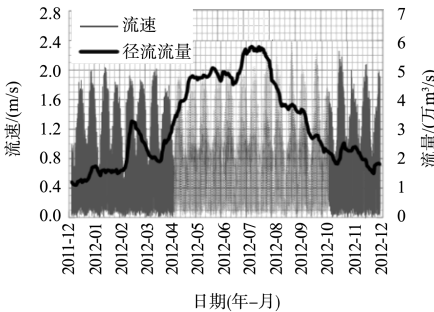
5 长江口拦门沙河段的流速变化特征

2012 年是洪水年, 洪季大通平均流量约为 43 366 m³/s(洪季多年平均流量约为 36 100 m³/s, 枯季多年平均流量约为 16 700 m³/s), 其中超过 50 000 m³/s 的天数约为 42 d, 洪、枯季流量差别大。2012 年长江口拦门沙河段典型浮标站点(横沙浮标、北槽中浮标、W3 浮标、牛皮礁浮标、口外浮标及南槽东浮标)的流速变化过程见图 8, 各浮标站点位置见图 1。

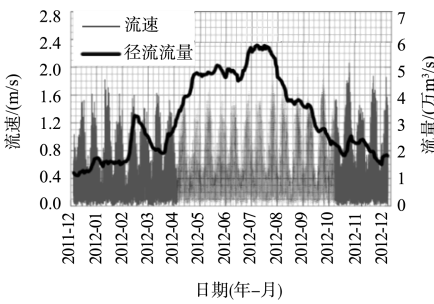
由图 8 可见, 长江口拦门沙河段流速变化特征与潮位变化特征较为一致, 也表现出非常明显的相对稳定特征, 长江口拦门沙河段的流速随潮型周期性变化, 大潮的涨落急流速大, 小潮的涨落急流速小, 周而复始、永不停止, 但在洪枯季无明显的趋势性变化。



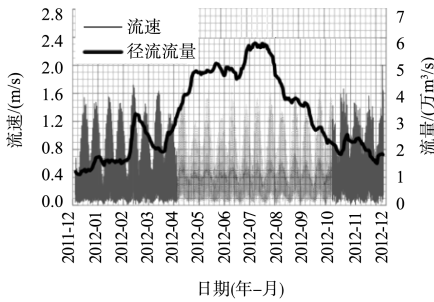
a) 横沙浮标



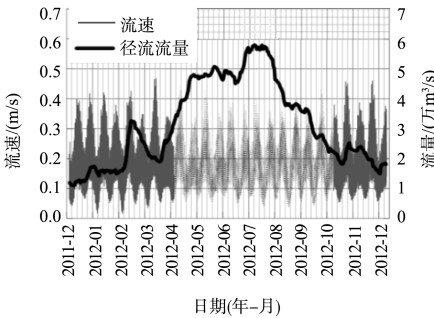
b) 北槽中浮标



c) W3浮标



d) 牛皮礁浮标



e) 口外浮

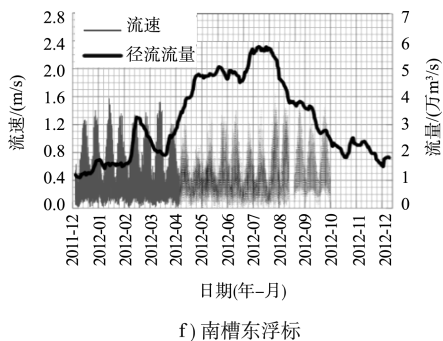


图8 2012年长江口拦门沙河段典型浮标站点流速变化

综合以上分析可见,长江口拦门沙河段的水流动力是一种相对稳定的周期性变化动力,洪枯季无明显差异,这种动力对拦门沙河段的各主槽及北槽深水航道来说均是冲刷动力。

需要说明的是,本文所表达的长江口拦门沙河段水流动力的稳定是针对航道开发来说的,且是一种相对的稳定,径流等因素的变化所带来的影响是客观存在的,但相比长江的其它河段、河流、以及沿海的其它小河口来说,这种变化要弱得多,因此对于航道的开发,特别是深水航道的开发,稳定比变化更加适合用于表达长江口拦门沙河段水流动力的变化特征,这其实也是长江口拦门沙河段海岸特性特别突出、河流特性微弱的一种体现。

实际上,天然情况下长江口拦门沙河段的河床时刻处于一种动态平衡中,决定这种平衡变化的动力不仅仅是水流动力,还有波浪动力。与水流动力不同,波浪动力是一种洪枯季变化非常显著的动力,其对河床的作用主要是引起主槽(及航道)的淤积。因此,当仅仅考虑水流动力的作用时,长江口拦门沙河段的河床形态就不再处于平衡状态,必然往适应相对稳定的水流动力方向变化,即主槽发生冲深现象,这也可以解释动床物理模型试验中主槽持续冲深现象和枯季期间北槽深水航道往往出现长时间的冲刷现象发生的原因。

6 结语

1) 在长江口 12.5 m 深水航道贯通后,北槽内的航道轴线与涨、落急流速的夹角普遍小于 30° ,其槽内的水流冲刷能力沿程普遍增强,长江口拦门沙河段的水流动力对北槽深水航道来说是冲刷

动力。

2) 由于长江河口的特殊形态,径流变化所引起的拦门沙河段水流运动在洪枯季的差异并不明显,径流变化与北槽深水航道回淤无明显关系。

3) 对长江口拦门沙河段的航道开发而言,水流是一种相对稳定的周期性变化动力,洪枯季无明显差别。

4) 天然情况下长江口拦门沙河段的河床时刻处于一种动态平衡中,决定这种平衡关系的是水流和波浪两种动力,当仅考虑水流动力的作用时,长江口拦门沙河段的河床形态就不再处于平衡状态,主槽将往冲深方向发展。

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.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.
- [3] 刘猛.长江口北槽深水航道回淤相关问题分析[J].水运工程,2016(2):104-113.
- [4] 刘猛.长江口拦门沙河段航道开发的波浪动力环境 I:敏感性因素[J].水运工程,2016(5):63-69.
- [5] 刘猛.长江口拦门沙河段航道开发的波浪动力环境 II:洪枯季作用差异[J].水运工程,2016(6):110-115.
- [6] 刘猛.长江口拦门沙河段航道开发的波浪动力环境 III:对航道回淤影响[J].水运工程,2016(7):54-60.
- [7] 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.
- [8] 刘猛,胡志锋,张宏伟,等.长江口北槽挖槽水力学问题研究[C]//第九届全国泥沙基本理论研究学术讨论会论文集.北京:中国水利水电出版社,2014.
- [9] 李家星,赵振兴.水力学[M].南京:河海大学出版社,2001.
- [10] 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.
- [11] 沙玉清.泥沙运动学引论[M].北京:中国工业出版社,1996.
- [12] 刘杰.长江口深水航道河床演变与航道回淤研究[D].上海:华东师范大学,2008.
- [13] 张文渊.苏北沿海挡潮闸下淤积的原因及其对策[J].泥沙研究,2000,2(1):73-76.