

· 航道及通航建筑物 ·



长江口拦门沙河段航道回淤的 波浪动力环境Ⅲ：对航道回淤的影响*

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: 开展了长江口拦门沙河段波浪对北槽深水航道回淤的影响及特征研究。结果表明: 1) 北槽深水航道内的浮泥量变化与拦门沙河段的波浪密切相关, 航道内浮泥量的显著增加均出现在波能显著增大之后, 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; 2) 较强波浪荷载作用会引起大量细颗粒泥沙从河床内部渗出, 这些细颗粒泥沙就是形成航道内大量浮泥的主要物质基础; 3) 北槽深水航道的回淤量变化与长江口拦门沙河段的波浪变化在宏观上和微观过程上均吻合良好; 4) 在台风等因素引起的短期强烈波浪作用结束之后, 其对床面的影响并不是随之而结束的, 往往要持续相当长的时间。

关键词: 长江口拦门沙; 北槽深水航道; 波浪; 浮泥; 回淤量

中图分类号: U 611

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2016)07-0054-07

Wave dynamic environment of channel deposition in mouth bars of Yangtze River estuary III: Effect on channel siltation

LIU Meng

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

Abstract: This article researches the wave dynamic effect on back silting in the deep-water channel at north passage in the mouth bars of the Yangtze estuary. The results indicate that: 1) There is a close relation between the fluid mud in the deep-water channel at north passage and the wave in the mouth bars. The amount of fluid mud has positive correlation with the wave energy, the more wave energy, the larger amount of fluid mud; the longer the wave period, the longer the duration time. 2) Large amount of fine sediment will be dialyzed from the riverbed under the strong waves, which are the main part of fluid mud in the channel. 3) The variation of back silting in the deep-water channel shows a good agreement with the wave evolution in macroscopic and microscopic scale. 4) After the strong waves caused by typhoon, effects on the bed don't end right the moment and will last a period of time.

Keywords: mouth bars of the Yangtze River estuary; deep-water channel at north passage of the Yangtze estuary; wave; fluid mud; back silting amount

1 研究背景

波浪是岸滩演变、海港和海岸工程最重要的动力因素和作用力^[1]。长江口拦门沙河段空间尺

度非常庞大, 虽然受海洋动力和径流动力共同作用, 但相比而言, 海洋动力要强得多, 两者非同量级, 该河段的滩槽泥沙交换正是在这种动力

收稿日期: 2015-12-02

*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。

条件下进行的, 长江口拦门沙河段具有非常显著的海岸特性。长江口拦门沙河段波浪作用洪枯季差异非常显著, 洪季作用尤为强烈, 在大浪作用后, 北槽深水航道往往会发生巨量淤积, 且伴随大量近底高含沙水体的出现。因此, 在长江口拦门沙河段开发航道资源, 无法回避对其波浪动力环境的研究。目前能较好反映北槽深水航道回淤变化情况的实测物理量主要有航道浮泥量和航道冲淤量, 一般情况下两者变化的趋势是一致的, 即航道的浮泥量多时淤积量也多, 航道的浮泥量少时淤积量也少^[2]。在《长江口拦门沙河段航道回淤的波浪动力环境 I: 敏感性因素》^[3]和《长江口拦门沙河段航道回淤的波浪动力环境 II: 洪枯季作用差异》^[4]基础上, 依据现场波浪观测数据, 并辅以必要的理论分析手段, 进一步从航道内的浮泥量和冲淤量变化两个方面揭示长江口拦门沙河段波浪对北槽深水航道回淤影响及特征。

2 数据及方法

文中涉及的波浪数据均来自牛皮礁平台站, 其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, 具体位置见图 1。本文数据分析采用了 2 组波浪样本数据, 其中一组数据为建站初至 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 2 个时段内, 数据样本间隔为 3 h, 共 4 097 组, 其中洪季(5—10 月)数据 2 066 组, 枯季(11 月—次年 4 月)数据 2 034 组; 另一组数据为 2011 年 11 月—2013 年 12 月观测得到的全部有效数据, 数据样本间隔为 1 h, 共 18 762 组, 其中洪季数据 8 735 组, 枯季数据 10 027 组。文中涉及的波高及周期均为有效波高和有效波周期。

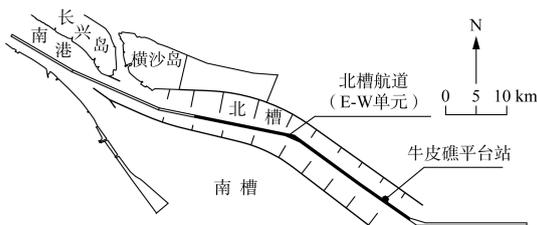
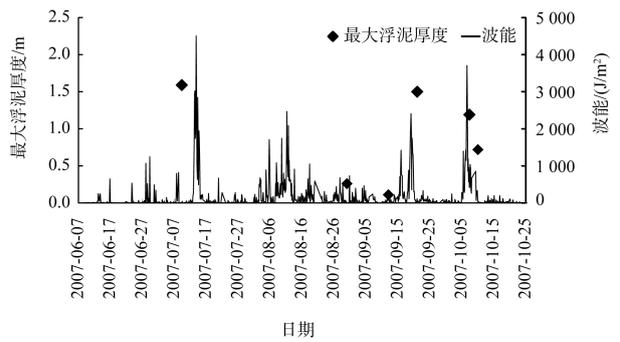


图 1 长江口拦门沙河段典型水文站点及航道位置

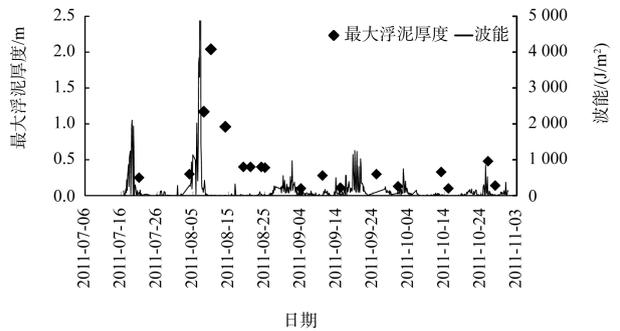
航道内浮泥的厚度数据是基于双频测深仪高低频水深差计算得出的^[5], 其研究区域为北槽深水航道 E-W 单元(纵向长约 40 km, 图 1), 数据分析采用了各分析时段内的全部观测数据, 共 35 组。北槽深水航道的冲淤方量是基于航道实际测图的冲淤量和各测次之间的实际船方量计算所得。

3 波浪与航道浮泥量变化的关系

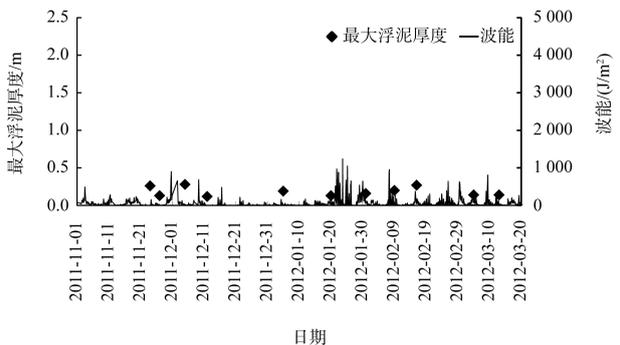
选取波浪和浮泥的同期观测数据进行分析比较(图 2)。



a) 2007年6月—10月(洪季)



b) 2011年7月—10月(洪季)



c) 2011年11月—2012年3月(枯季)

图 2 北槽航道浮泥最大厚度和波能变化

可见, 长江口拦门沙河段波浪与北槽航道内浮泥量的变化有以下特点:

1) 长江口拦门沙河段出现持续较长时间的高能波浪过程并非偶然事件,若统计波能峰值超过 400 J/m^2 且持续时间较长的波浪过程的发生次数,在洪季统计时段内出现约15次,平均约15 d就出现1次,在枯季统计时段内出现约5次,平均约27 d出现1次;若统计波能峰值超过 $1\ 000\text{ J/m}^2$ 且持续时间较长的波浪过程的发生次数,在洪季统计时段出现约8次,平均约28 d就出现1次,在枯季统计时段出现约0次。

2) 北槽深水航道内浮泥量的显著增加现象(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月因梅花台风引起的高能波浪持续了约80 h(2011年8月4—7日,最大波能约为 $11\ 000\text{ J/m}^2$,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—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—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。根据对图中观测数据的统计,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。

由以上分析可见,北槽深水航道内的浮泥量变化与拦门沙河段的波浪关系非常密切。其实对于北槽深水航道来说,如果没有较强的波浪作用,其浮泥问题就不会受到关注,比如,在枯季的多数时段内,虽然大中小潮往复变化,而且其流速的变化过程与洪季也无明显区别,但航槽内无明显的浮泥发生。因此仅仅由潮流流速的周期性变化引起水体挟沙力改变而生成的浮泥量相比波浪动力是微不足道的。

北槽深水航道内的浮泥量变化与拦门沙河段的波浪关系为何密切相关,主要有以下两点原因:

1) 浮泥的生成。

Tzang对河床“液化”模式进行过简要的描述^[6]。波浪加载以后,原始河床的泥线附近一薄层首先“液化”成流动状,由于孔压场的改变,河床内部的渗流场发生变化;波浪引起的孔隙水的渗流使细颗粒从组构连接薄弱区域向河床表面移动,同时大量细颗粒的流失在河床内部形成微孔结构;波浪引起的空隙水压力作用使孔洞逐渐变大贯通,这样又进一步加剧了细颗粒的流失和孔隙水的渗透作用,使“液化”区域逐步向下发展,直到固液二相之间新的平衡得以建立。

以上机理描述与长江口拦门沙河段的实际情况是非常吻合的,最为显著的现象就是每当长江口拦门沙河段受大浪(台风)作用后,北槽航道内就会有大量浮泥出现,形成这些浮泥的主要物质基础不可能是从拦门沙以外区域,如上游或口外深海区域迅速搬运过来的,应该正是河床中流失出来的细颗粒泥沙,这些细颗粒泥沙就好像被波浪引起的循环荷载从河床内部渗出一样。因此,拦门沙河段浮泥的生成首先与波浪现象密切相关。

2) 浮泥的运动。

试验结果表明^[7]:在长江口拦门沙河段近底高含沙水体的密度和厚度不需要达到很高的数值就可以在重力作用下以异重流的形式运动,而且随着密度和厚度的增加,近底高含沙水体的运动速度显著加快,即使密度高达 1.35 kg/L 时,近底高含沙水体的运动速度仍未转入下降区间,因此一旦在航道两侧边滩上形成近底高含沙水体,这些近底高含沙水体是极其容易进入航槽的。

长江口拦门沙河段形成近底高含沙水体的主要动力就是波浪,而近底高含沙水体一旦形成又将会“不遗余力”地往低处运动,其中北槽 12.5 m 航道又是拦门沙河段最显著的“低处”,所以航道内浮泥量的变化与波浪关系密切。在上述过程中,波浪是根本动力,没有波浪,就不会形成显著的近底高含沙水体,航道内就不会出现大量浮泥存在的现象。

长江口无风三尺浪，虽然低能波对深水河床无明显影响，但对泥沙粒径较粗的坝田、浅滩仍有较为明显的作用^[3]，比如会在浅滩区域渗出一定量的细颗粒泥沙，而这些细颗粒泥沙又会对形成近底高含沙水体有促进作用，从而达到增加航槽内的浮泥量或近底高含沙水体的效果。实际上，枯季北槽深水航道的微量浮泥仍有波浪的贡献作用，如果长江口拦门沙河段的波浪作用基本消失，航道内的浮泥数量将会进一步减少，此时的拦门沙河段水动力条件与长江口南支河段或更往上游的河段趋同，而浮泥在这些河段已不再是被关注的问题。因此，在分析浮泥或者近底高含沙水体对北槽深水航道回淤的影响时，实质上就是分析波浪对北槽深水航道回淤的影响，换言之，在长江口拦门沙河段脱离波浪动力分析近底高含沙水体对航道回淤的影响是不全面的，充其量是用现象解释现象而已。

4 波浪与航道冲淤量变化的关系

洪枯季北槽深水航道内的冲淤情况差异非常显著，在枯季，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，这对航道水深的维护是有利的，其实北槽深水航道枯季的这种水深深且淤积弱的现状正是航道整治所追求的一种理想目标；而到了洪季，航道维护水深虽然变浅，但航道内的淤积量却显著增加，这对航道水深的维护是不利的。

2011—2013年北槽深水航道的日均冲淤量(E单元至口外)与牛皮礁站波浪的长周期(6 s及以上)变化过程见图3。

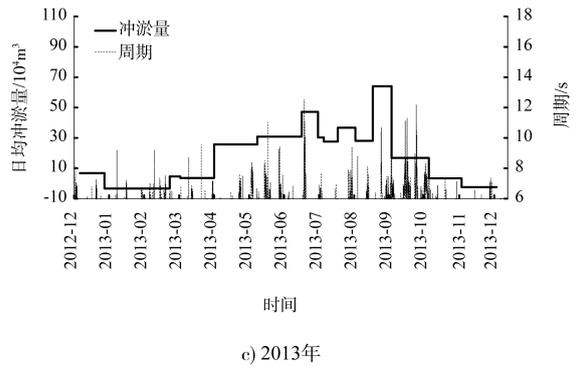
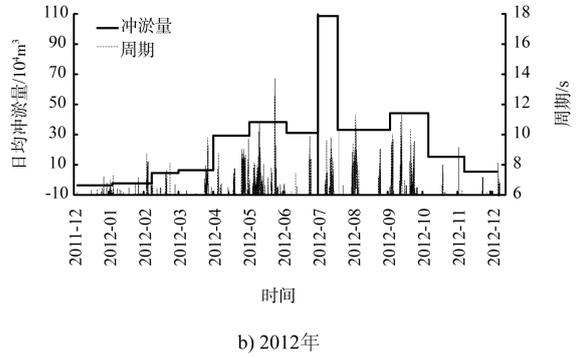
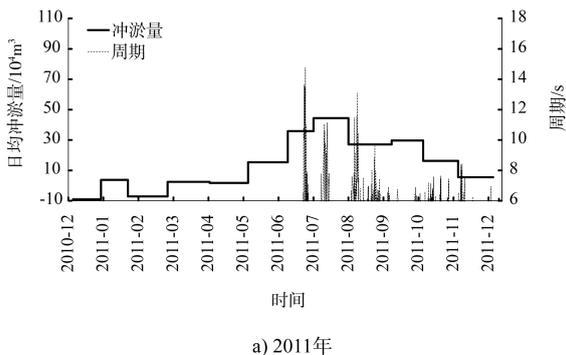


图3 北槽航道日均冲淤量与牛皮礁波浪长周期变化过程对比

北槽深水航道的日均冲淤量是根据现场测量时段内冲淤量取平均值计算所得，并不是实时变化的过程，但波浪的周期是实时变化的。该处选择长周期作为变量，因为长周期的波浪能量大，对航道冲淤变化影响较为明显，而且可以较好地反应波浪的传播反向。由图3可见，北槽深水航道的冲淤量变化与拦门沙区域的波浪关系密切，主要反应在以下2个方面：

1) 冲淤量与波浪变化在宏观上(洪枯季)对应关系好。

洪季期间长江口拦门沙区域的长周期波浪显著增多，北槽深水航道的日均回淤量同样也增多；枯季期间拦门沙区域的长周期波浪显著减少，北槽深水航道的日均回淤量同样也减少，可见北槽深水航道的冲淤量变化与拦门沙区域的波浪变化在宏观上有着良好的对应关系。

根据对图3中有关数据的统计，得出北槽深水航道在洪、枯季的总冲淤量与对应期间的牛皮礁站附近床面处的总波能之间的关系(图4)。

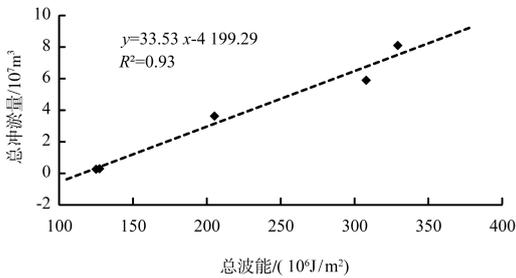


图4 北槽深水航道洪、枯季总冲淤量与对应期间牛皮礁站附近床面处总波能之间关系

北槽深水航道洪枯季总冲淤量 W (万 m^3) 与牛皮礁站附近床面处的总波能 \bar{E} (J/m^2) 具有良好的线性关系, 具体关系式如下:

$$W = 33.53\bar{E} - 4199.29 \quad (1)$$

综合以上分析可见, 北槽深水航道的回淤量变化与长江口拦门沙区域的波浪变化在洪枯季期间, 即宏观上具有良好的对应关系。

2) 冲淤量与波浪变化在微观过程上对应关系好。

每次北槽深水航道发生骤淤现象均是在大风浪以后, 这是航道的回淤量变化与拦门沙河段的波浪变化在微观过程上对应关系好最为有力的证据。比如在布拉万台风的影响下, 口外传入的高能波浪对北槽深水航道的回淤量变化产生了强烈影响, 2012年8月24日—9月13日, 航道的日平均回淤量高达约 105 万 m^3 , 总回淤量约为 2 095 万 m^3 ; 2011年8月, 在梅花台风引起的高能波浪作用后, 北槽深水航道亦出现了显著的骤淤现象, 骤淤量达千万方级; 长江口南槽于 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^[8]。

此外, 每年 5 月前后, 长周期的高能迎岸波浪逐渐开始增多, 此时北槽深水航道内的浮泥开始逐渐显著起来, 航道的回淤量也开始明显抬升; 同样每年 10 月前后, 长周期的高能迎岸波浪开始显著减少, 低能的离岸浪逐渐占主导地位, 北槽深水航道的回淤量开始明显下降, 航道内的浮泥也开始显著减少。这些现象均是航道的回淤量变化与拦门沙区域的波浪变化在微观过程上对应关

系好的事实证据。

综合以上分析可见, 北槽深水航道的回淤量变化与长江口拦门沙河段的波浪变化密切相关, 不仅在宏观上(洪枯季)吻合, 而且在微观过程上(如骤淤)也吻合。

5 波浪对拦门沙河床作用特点分析

北槽深水航道的回淤量变化与长江口拦门沙河段的波浪变化之间的密切关系, 实际上表明了拦门沙河段的河床泥沙运动与该区域波浪动力变化之间的密切关系。从土力学上讲, 波浪的循环荷载作用使得河床土中的孔隙水压力发生变化, 孔隙水压力的循环作用会导致土体中有效应力的降低, 使土样降低或丧失抵抗剪切的能力, 河床易发生“软化”或“液化”现象^[9-10], 其实北槽航道两侧边坡异常的平缓就是这种内在原因的生动体现。可见, 波浪循环荷载作用下的床面泥沙运动与单纯水流(比如潮流)作用下的运动规律有着质的区别, 这既表现在泥沙的输移强度上, 比如在床面泥沙被波浪荷载强烈作用时, 其土力学性质的变化加之水流紊动强度显著增强而引起的挟沙能力的显著增加, 必将引起泥沙的剧烈输移; 也表现在泥沙的输移规律上, 比如波浪作用引起的滩槽泥沙交换规律与水流作用相比多是相反的。这些区别必然将导致长江口拦门沙河段滩槽泥沙交换的规律及强度较纯水流作用条件下发生显著的改变。

此外, 在台风等因素引起的短期强烈波浪作用结束之后, 其对床面的影响并非随之而结束, 往往要持续相当长的一段时间, 主要表现为以下 3 点:

1) 河床抗剪切能力的不均匀变化所带来的影响。

波浪对长江口拦门沙河段河床的作用不是均匀的。一般来说, 随着水深的不断增加, 河床受到的波浪作用也不断减弱。从土力学的角度看, 随着水深的不断增加, 河床表层抗剪切能力下降的程度和厚度也必然逐渐减弱和变薄(图 5)。此

外, 由于波向的影响, 某些局部区域河床受到波浪的作用更加剧烈, 河床抗剪切能力的不均匀变化更加显著。在波浪的强烈作用结束之后, 河床抗剪切的能力显著变化并不是随着波浪的结束就很快恢复的, 而是要持续一段时间才能逐渐恢复。由于各处自身情况 (“软化” 程度和厚度) 和外部条件 (波浪、水压等) 的差异, 河床抗剪切能力恢复也不是同步的, 一般来说, 水深越大的河床恢复越快。当出现这种情况时, 水流作用下的滩槽泥沙交换规律也将改变, 比如, 原先在水流作用下泥沙起动少或者不起动的边滩区域, 此时其河床泥沙可能出现大量起动的现象。

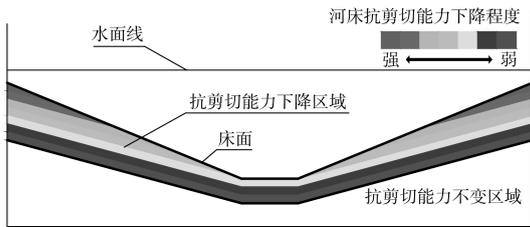


图5 强浪作用后河床抗剪切能力变化

2) 河床内部渗出的大量细颗粒泥沙所带来的影响。

每当长江口拦门沙河段受到大风浪作用时, 河床内部将会渗出大量的细颗粒泥沙, 这些细颗粒泥沙对河床的影响是长时间的。大量细颗粒泥沙很容易形成近底高含沙水体, 而一旦形成近底高含沙水体就会 “不遗余力” 地往低处运动, 容易进入北槽深水航道。这些细颗粒泥沙进入北槽深水航道之后, 其中一部分在水流、船舶扰动、疏浚作业等作用下再次扬动进入水体向周围扩散, 然后这些细颗粒泥沙中的一部分在憩流或低流速期间由于水流挟沙能力的降低再次于边滩形成近底高含沙水体, 这些近底高含沙水体又会再次 “不遗余力” 地往低处运动, 周而复始。

在上述运动的过程中, 细颗粒泥沙由于固结、沉积不断减少, 近底高含沙水体的数量也不断减少, 直至其影响逐渐结束为止。2011年8月, 在梅花台风引起的高能波浪强烈作用后, 最大浮泥厚度超过1 m的时间持续了约10 d, 最大浮泥厚

度超过0.4 m的时间持续了约21 d, 浮泥影响完全结束持续的时间则更长, 这个案例足以表明高能波对河床的影响是长期的。

3) 局部骤变后的河床形态所带来的影响。

长江口拦门沙河段的水流运动虽然是随着潮汐不断往复变化的, 但从长期来说是一种较为稳定的周期性变化的动力, 根据最小能耗原理, 拦门沙河床存在与之适应性较好的形态, 即相对平衡状态^[11]。

在枯季, 由于波浪作用的显著减弱, 长江口拦门沙河段的水流动力成为塑造河床的主要动力, 河床的形态及其变化规律与水流的适应性较好, 接近上述的相对平衡状态; 而到了洪季, 波浪塑造河床的能力非常显著, 常常引起河床发生局部骤变, 比如低流速区域显著冲深, 而高流速区域显著淤高, 这种局部骤变后的河床形态往往又与拦门沙河段较为稳定的周期性变化的水流动力不适应或适应性较差, 即偏离了上述的相对平衡状态。

按照最小能耗原理, 河床的演变是朝着其相对平衡状态不断发展和调整的^[11]。当波浪作用消失或减弱以后, 水流动力成了塑造长江口拦门沙河床形态的主要动力, 河床的形态必然往适应水流动力的方向发展和调整, 当然水流也会在一定程度上朝着适应新的河床形态发展, 在这个过程中, 河床泥沙的运动情况较波浪强烈作用之前往往是有很大变化的, 从而影响了拦门沙河段滩槽泥沙交换的强度和趋势, 这个适应过程也往往需要很长的一段时间。

综合以上分析可见, 在研究长江口拦门沙区域波浪对河床的作用时, 其短期影响与长期影响均应受到足够的重视, 这也是波浪与水流作用效果的差异所在, 造成这种差异的最根本原因就是波浪动力能够引起河床的土力学特性发生显著变化。

6 结语

1) 北槽深水航道内的浮泥量变化与拦门沙河

段的波浪关系非常密切,航道内浮泥量的显著增加现象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。

2) 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,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。

3) 大浪(台风)作用后,北槽航道内往往会有大量浮泥出现,形成这些浮泥的主要物质基础就是来自该河段河床中的细颗粒泥沙,这些细颗粒泥沙在波浪荷载作用下会从河床内部渗出。

4) 北槽深水航道的回淤量变化与长江口拦门沙河段的波浪变化密切相关,不仅在宏观上(洪枯季)吻合,而且在微观过程上(如骤淤)也吻合。

5) 在台风等因素引起的短期强烈波浪作用结束之后,其对床面的影响并不是随之而结束的,往往要持续相当长的一段时间。

6) 在研究长江口拦门沙区域波浪对河床的作用时,其短期影响与长期影响均应受到足够的重视,这也是波浪与水流作用效果的差异所在,造成这种差异的最根本原因就是波浪动力能够引起河床的土力学特性发生显著变化。

参考文献:

[1] 吴宋仁.海岸动力学[M].3版.北京:人民交通出版社,1999:15-16.

[2] 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.

[3] 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.

[4] 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.

[5] 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.

[6] 武伯甬.波浪荷载作用下砂质粉土床的液化研究[D].上海:同济大学,2009:26.

[7] 刘猛.长江口北槽深水航道回淤原因争议性问题分析[C]//左其华,窦希萍.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.

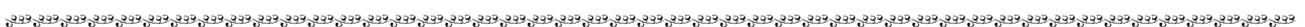
[8] 李九发,戴志军,刘新成,等.长江河口南汇嘴潮滩圈围工程前后水沙运动和冲淤演变研究[J].泥沙研究,2010(3):31-37.

[9] 王淑云,楼志刚.海洋粉质粘土在波浪荷载作用后的不排水抗剪强度衰化特性[J].海洋工程,2000(1):38-43.

[10] 吴梦喜,楼志刚.波浪作用下海床的稳定性与液化分析[J].工程力学,2002(5):97-102.

[11] 徐国宾,练继建.流体最小熵产生原理与最小能耗原理[J].水利学报,2003(5):35-40.

(本文编辑 郭雪珍)



(上接第31页)

[10] 李玉美,班睿.我国水环境中持久性有机污染物污染的现状与研究进展[J].贵州农业科学,2011,39(1):231-236.

[11] 韩方岸,陈钧,将兆峰,等.中国沿海三省主要饮用水源有机物监测[J].中国环境监测,2012,28(1):60-65.

[12] 许峰,祁士华.三峡库区水体有机氯农药污染特征[J].长江流域资源与环境,2012,21(10):1248-1253.

[13] 陈鑫,刘京,李东一,等.探讨适用于河流沉积物重金属污染程度的评价方法[J].环境与可持续发展,2014,39(3):37-40.

[14] 常旭,马迎群,杨晨晨,等.大辽河主要污染源重金属特征及污染评价[J].环境污染与防治,2015,37(5):32-38.

[15] Krishnan K, Paterson J, Williams D T. Health risk assessment of drinking water contaminants in Canada: The applicability of mixture risk assessment methods[J]. Regulatory Toxicology and Pharmacology, 1997, 26(2): 179-187.

[16] Barnes D G, Dourson M, Dourson M, et al. Reference dose (RfD): Description and use in health risk assessments[J]. Regulatory Toxicology and Pharmacology, 1988, 8(4): 471-486.

[17] 曾光.现代流行病学方法与应用[M].北京:北京医科大学协和医科大学联合出版社,1996:250-270.

(本文编辑 武亚庆)