

· 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I：敏感性因素*

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: 对引起长江口拦门沙河段波浪作用在洪枯季期间发生显著变化的敏感性因素及其影响机理开展了研究, 结果表明: 1) 波周期与波向是两个敏感性因素, 其变化对长江口拦门沙河段泥沙运动的影响极为显著; 2) 在长江口拦门沙河段, 短周期波浪对河床的影响主要集中在浅水区域, 长周期波浪对浅水区和深水区的河床泥沙运动均有显著影响; 3) 通常情况下, 相同级别的正向向岸风与正向离岸风所引起的长江口拦门沙河段总波能消耗相差至少1个数量级; 4) 枯季以吹离岸风为主, 拦门沙河段波浪的周期较短且波形多是尖陡、散碎的, 能量低; 洪季吹向岸风的频率显著增加, 在向岸风的条件下, 波周期增长, 波形多是圆滑、整齐的, 波能高。

关键词: 长江口拦门沙; 航道; 波浪; 敏感性因素; 周期; 波向

中图分类号: TV 148; U 61

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2016)05-0063-07

Wave dynamic environment of channel deposition in mouth bars of the Yangtze River estuary I : Sensitive factors

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 sensitive factors, which influence the wave dynamics impacting on the channel development during the flood and dry season, and the influence mechanism in the mouth bars of the Yangtze River estuary. Some perceptions are as follows: 1) the wave period and direction are two sensitive factors and their changes play a significant part in the sediment movement; 2) for the short-period waves, the impact on the riverbed is mainly in the shallow water, while for the long-period waves, the influence occurs both in the shallow water and the deep water; 3) usually, the total wave energy dissipation in the mouth bars caused by on-shore wind and off-shore wind differs in an order of magnitude at least; 4) during the dry season, the off-shore wind is primary, and the wave characteristics are short-period, steep, scattered and low-energy; while during the flood season, the on-shore wind is prior, and the waves show long-period, rounded, regular and high-energy.

Keywords: mouth bars of the Yangtze River estuary; channel; wave; sensitive factor; period; wave direction

1 研究背景

从根本上说, 长江口拦门沙河段的滩槽泥沙交换属于波流共同作用下的泥沙运动问题范畴,

水流(潮流和径流的叠加)和波浪是该河段控制泥沙运动的两种基本动力, 这两种基本动力的强弱变化及力量对比决定着该河段滩槽交换的强度

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。

和趋势^[1]。但由于早年认识水平的局限，大多认为水流动力在决定长江口拦门沙河段泥沙运动中居主导地位，而波浪动力是次要因素，甚至可以忽略其作用，因此一直以来，人们在长江口拦门沙河段深水航道的治理过程中主要聚焦于对水流动力作用的认识和研究，亦取得了大量成果^[2-3]，然而却对波浪动力作用的认识显著不足，研究成果甚少。

随着长江口深水航道整治开发进程的不断推进，航道回淤等问题愈发突出，诸多现象已无法从单纯水流动力角度进行回答，波浪动力的作用已无法回避，为此，近年来一些学者逐渐开始关注波浪动力对长江口拦门沙河段航道回淤的作用。正是在此背景之下，笔者对长江口拦门沙河段航道回淤的波浪动力环境进行了深入研究，取得了大量新的认识。本文主要探究引起长江口拦门沙河段波浪作用在洪枯季期间显著变化的敏感性因素，并从对河床的作用角度揭示这些敏感性因素的影响机理。

2 数据及方法

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。牛皮礁平台站所处位置及水深条件不仅可以使其能较好地反映长江口拦门沙河段局地风浪的情况，而且从口外相连洋面上传播过来的涌浪也很难于此处破碎，可见牛皮礁平台站实测波浪资料具有良好的代表性，因此可以利用其分析长江口拦门沙河段的波浪特性。

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(5 月—10 月，下同)数据 2 066 组、枯季(11 月—次年 4 月，下同)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。

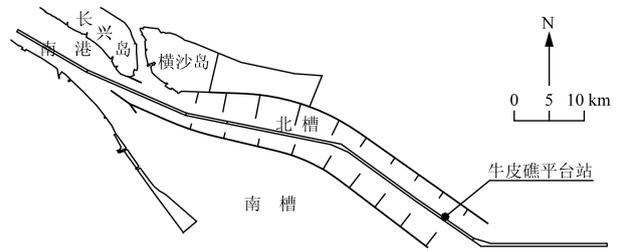


图 1 长江口拦门沙河段典型水文站点及航道位置

3 洪枯季长江口拦门沙河段波浪的统计差异

2007 年 2 月—2012 年 3 月期间，牛皮礁平台站洪枯季实测波浪数据情况见图 2，洪枯季平均有效波高和平均有效波周期的统计结果见表 1。

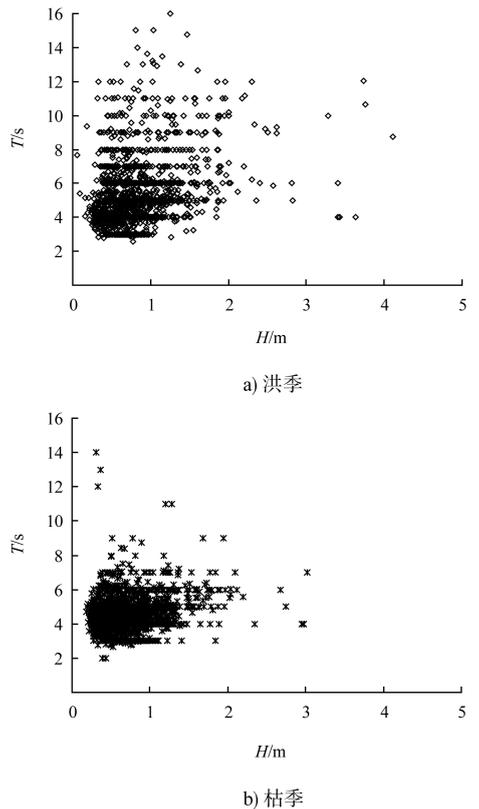


图 2 实测有效波高与有效波周期的分布

表 1 洪枯季平均有效波高和平均有效波周期

季节	平均有效波高/m	平均有效波周期/s
洪季	0.80	5.1
枯季	0.72	4.3

根据图 2 和表 1 的统计数据可知，洪枯季长江口拦门沙河段的波浪在统计上有以下两个特征：

1) 从统计数据平均值看，洪季长江口拦门沙河段波浪的波高与周期较枯季略大，但差别不明显。

2) 从统计数据分布情况看, 虽然洪枯季长江口拦门沙河段波浪的波高分布差别较小, 均主要集中在 2.0 m 以内, 但洪枯季波浪周期分布的差别较为显著, 洪季波周期的主要分布范围较枯季明显扩大, 如周期在 7.0 s 及以上的波浪数量显著增多。

洪枯季长江口拦门沙河段波浪周期的分布差异实质上反映了两个季节波浪组成的变化, 洪季长江口吹向岸风的频率明显增加, 尤其是口外相连洋面上的台风频发, 因此传播到拦门沙河段的涌浪, 即长周期的波浪显著增多; 而到了枯季, 长江口吹向岸风的频率明显减少, 而且口外相连洋面上的台风基本消失, 因此又导致了拦门沙河段长周期的波浪显著减少。

文献 [1] 结果表明: 长江口拦门沙河段长周期波极少是当地风吹所产生的, 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波浪数量所占比例越高, 如在 6.0 s 及以上周期的波浪组成中至少占 82.4%, 在 7.0 s 及以上周期的波浪组成中至少占 92.3%, 在 8.0 s 及以上周期波浪组成中至少占 96.2%。

综合以上分析结果可见, 洪枯季长江口拦门沙河段波浪的统计差异主要反映在波浪的周期分布与传播方向上, 实际上这两个因素正是引起长江口拦门沙河段波浪作用强度在洪枯季期间发生显著变化的关键原因, 即为敏感性因素。

4 波浪周期变化对河床的作用分析

当波浪在河床上传播时, 河床土体会受到波浪产生的循环荷载作用, 这种波浪压力传到河床中时会存在时间和空间上的差异, 即存在压力梯度, 以致孔隙水和泥沙颗粒之间存在有明显的相对运动, 从而在河床中产生渗流。孔隙水流动过程中受到泥沙颗粒的阻力作用, 反过来泥沙颗粒也会受到渗透水流施加给它的作用力, 这个力就是渗流力, 也称为孔隙水压力。

程永舟等^[4]采用物理模型试验方法从波浪渗流力的角度研究了波浪对泥沙起动的影响, 结果

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。

Okusa 等^[5]观测了水深 1.2 m、距床面 1.5 m 处的粉砂质沉积物中的孔隙水压力变化, 结果表明: 短周期波引起的孔隙水压力衰减比长周期要快, 后者相位滞后明显。根据不同沉积物类型所得到的观测结果, Okusa^[6]总结短周期波引起的孔隙水压力更容易衰减, 现场测试得到的孔隙水压力衰减量比理论值要大。Maeno 等^[7]提出了一种通过测量海底沉积物中孔隙水压力来预估其物理和力学性质的方法, 结果表明床面波压力的低频部分更容易透过河床而向下传播, 河床内部孔隙水压力和表面波压力的相位滞后随着频率的减少而增加。

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^[8-10], 从而导致河床泥沙在同样水流作用下的起动情况存有巨大的差异。

从以上分析可见, 波周期与孔隙水压力(渗流力)密切相关, 而孔隙水压力又与床面泥沙运动直接相关, 因此波周期变化对床面泥沙运动有着重要影响。实际上, 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。

近期研究结果^[11]已清楚地表明, 与 20 世纪 60 年代的“波浪底床模型”相反, 表面波浪能使 120~180 m 水深处较外部的大陆架上的泥沙运动。Komar 等所给的曲线表明, 在 60 m 水深处, 周期 15 s、波高 1 m 的波浪, 以及在 140 m 水深处, 周期为 15 s、波高 4 m 的波浪条件下粉砂均开始运动。Sternberg 等发现在华盛顿大陆架上, 167 m 水深处, 底部浑浊度显著地随着波浪强度的变化而变化。

武伯弢^[12]研究表明, 在水深 42 m、周期 16 s、波长 289 m 的条件下, 波高 $H \geq 8$ cm 时, 砂质粉

土河床出现“液化”。随着波高的增大，“液化”的深度也增加。

以上从模型试验和现场观测两个方面阐明了波浪周期对床面泥沙运动的影响，下面将从理论方面进一步分析其内在的原因。根据二阶斯托克斯波压力理论可知，波动水体任一点 (x, z) 处的压力 (P_z) 可表示如下^[13]：

$$P_z = -\rho g z + \frac{1}{2} \rho g H \cdot \frac{\cosh [k(z+h)]}{\cosh(kh)} \cos(kx - \sigma t) + \frac{3\pi}{4} \rho g H \cdot \left(\frac{H}{L}\right) \frac{1}{\sinh(2kh)} \left\{ \frac{\cosh [2k(z+h)]}{\sinh^2(kh)} - \frac{1}{3} \right\} \cos [2(kx - \sigma t)] - \frac{\pi}{4} \rho g H \left(\frac{H}{L}\right) \frac{\cosh [2k(z+h) - 1]}{\sinh(2kh)} + O(H^3) \quad (1)$$

式中：h 为水深；H 为波高；k 为波数。

以牛皮礁平台站所处位置为例，该站平均水深约为 12.5 m，当波高为 1.0 m 时，不同周期及不同水深条件所对应的最大循环动水压差理论计算值见图 3。

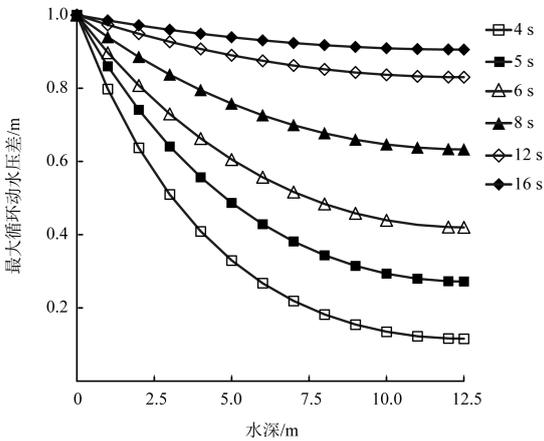


图 3 不同周期最大循环动水压差理论计算值

由图 3 可见，波浪对水体的影响往下是逐渐减弱的，水面处的最大循环动水压差最大，其值等于波高值，越往深处的最大循环动水压差就越小。最大循环动水压差随水深增加而减小的速度与波周期密切相关，主要表现为以下两个特征：

1) 周期越短，表面波浪所引起的最大循环动水压差随水深增加而衰减越快。如波周期为 4 s，当水深为 8.0 m 时，最大循环动水压差仅剩余 0.18 m，衰减超 80%；当水深为 12.5 m 时，最大循环动水压差仅剩余 0.12 m，衰减近 90%。

2) 周期越长，表面波浪所引起的最大循环动水压差随水深增加而衰减越慢。如波周期为 12 s，当水深为 8.0 m 时，最大循环动水压差剩余 0.85 m，仅衰减约 15%；当水深为 12.5 m 时，最大循环动水压差仍剩余 0.83 m，其衰减程度与 8.0 m 水深处差别不大。

长江口北槽南北两侧丁坝的坝头连线处平均水深一般超过 8.0 m，对于长江口拦门沙河段最为一般的风浪 (T=3~5 s) 来说，在丁坝坝头连线以内的广阔河床区域，该部分波浪所产生的最大循环动水压差衰减极为显著，如周期为 5 s 的波浪衰减约 70%，周期为 4 s 的波浪衰减超过 80%。以上计算均是按照理想波形 (如正弦波) 进行的，实际上长江口拦门沙河段短周期风浪的波形大多是尖陡、散碎的，其引起的影响程度要远小于理论情况，现场测试结果^[6]也证明了这点。可见，这些在长江口拦门沙河段最为一般的风浪对北槽丁坝坝头连线以内河床区域的影响是非常有限的，其影响主要集中在浅水区域，如坝田、高滩等；但对于长周期的波浪来说，它们所产生的最大循环动水压差在北槽丁坝坝头连线以内的广阔河床区域衰减很少，这种长周期的波浪对浅水区和深水区的泥沙运动均有显著影响，特别是对促进航槽和与其紧邻的深水边滩之间的泥沙交换有着直接而重要的作用。

综合以上分析可见，物理模型试验结果、现场观测结果以及理论计算结果是一致的，均表明波周期的变化显著影响了波浪对河床的作用。

5 波浪传播方向对河床的作用分析

长江口拦门沙河段的波浪组成较为复杂，既有当地风引起的风浪，也有外海传入的涌浪，其中涌浪的成因又有多种情况，如向岸的常风 (除台风、寒潮之外所有类型风的统称，下同)、寒潮在深海区域吹起并传入长江口的涌浪，以及外海洋面上台风引起并传入长江口的涌浪等。若不考虑台风的影响，长江口拦门沙河段波浪的传播方向与当地风向是基本一致的。在常风、寒潮作用

下, 研究长江口拦门沙河段波浪传播方向变化对河床的作用实际上就是研究该区域的风向变化对河床的作用。下面仅对常风作用引起的波浪及其传播方向开展研究, 暂不考虑台风、寒潮影响的情况。

风对河床的作用并不是直接的, 而是间接的。当风通过摩擦力作用于水面后, 表层水质点将产生运动, 其中最主要的运动形式就是水面的波浪运动。表层波浪运动再通过水体介质将其影响往下传播, 这种影响作用不是无限水深的, 而是局限在一定的水深范围内 (不超过 $1/2$ 波长的深度), 并且是随着水深的增加而不断衰减的, 当河床处于其影响的深度范围内时, 风的作用才能最终影响到河床。

如果从能量角度来观察风对河床的影响过程, 首先是风能主要转化为表层水体的波能, 然后这些波能绝大部分随着波浪向前传播而传播, 少部分通过水体往下传播, 这种往下传播的波能又主要转化为底部水质点的紊动动能, 最后再作用于床面。实际上波动本身就是一种紊动, 因此可以直接认为, 风作用于水体后, 在水体内部形成一个非均匀的紊动流场, 该紊动流场表层紊动强度最大, 往下逐渐减弱, 波浪与河床的作用实质上就是该紊动流场与河床的作用。

直接定量研究风对长江口拦门沙河段河床的作用目前难以实现, 但该区域波浪能量的消耗主要是在与河床的相互作用上, 因此可以通过研究长江口拦门沙河段 (包括水体与河床) 消耗的总波能来定性分析风对该区域河床作用的大小。

为了便于分析风向变化对长江口拦门沙河段总波能消耗的影响, 现假设两种理想风况, 如下:

1) 第1种风况, 长江口拦门沙河段吹正向 (与长江口拦门沙垂直的方向) 向岸风 (ENE), 风速为 9 m/s (5级风), 持续时间为 24 h , 风场均匀且无限大, 见图4。

2) 第2种风况, 长江口拦门沙河段吹正向离岸风 WSW, 风速为 9 m/s , 持续时间为 24 h , 风场均匀且无限大, 见图4。



图4 长江口拦门沙河段及研究区域划分

长江口拦门沙河段消耗的总波能主要是由两个部分组成, 其中一部分是来自于拦门沙区域内水面形成的波浪, 另一部分是来自于拦门沙以外区域水面形成并传播至拦门沙区域的波浪。在长江口拦门沙河段吹正向向岸风的情况下, 其总波能的消耗由上述两部分能量组成; 但在长江口拦门沙河段吹正向离岸风的情况下, 总波能的消耗则主要是来自于拦门沙区域内水面形成的波浪。

按照海港水文规范^[14]进行计算可知, 在风速为 9 m/s 的情况下, 水深较深且风区较大的地方可以产生周期约为 5.9 s 的波浪, 该波浪在深水区的传播速度约为 9.2 m/s , 24 h 内传播距离约为 800 km , 这个传播距离约为长江口拦门沙纵向尺度 (约 50 km) 的 16 倍。

基于上述分析结果, 将风持续的总时间 24 h 分为 16 个研究时段, 每个研究时段均为 1.5 h 。同样, 将长江口拦门沙河段及以外区域空间上依次分为 16 个研究区域 (图4), 每个研究区域的面积相同, 宽度均为 50 km , 总宽度约为 800 km , 最远处邻近于日本的西海岸, 其中第1个研究区域为长江口拦门沙区域, 该区域陆地及高滩较多, 水域面积仅占总面积的 70% 左右, 而其它研究区域 (第2个~第16个) 基本全部为水域面积。

当有风速为 9 m/s 的均匀风场作用时, 16 个研究区域的水面均受到风的摩擦作用, 风能转化为波能, 1.5 h 内每个研究区域产生的总波能基本上与水域面积成正比, 因此每个研究时段 (1.5 h) 内, 第1个研究区域, 即长江口拦门沙区域转化的总波能最少, 设为 A (单位: J), 其它区域转化

的总波能相同,均设为 B (单位: J , $B \approx 1.43A$, A 所对应的面积约是 B 所对应的面积的 70%)。

当长江口拦门沙河段吹正向离岸风时,波浪往外传播,因此只有第 1 个研究区域产生的其中一部分波能可以消耗在拦门沙河段,设为 C (单位: J , $C < A$), 还有相当一部分波能通过波浪传播到外海,该部分波能对长江口拦门沙河段的河床没有作用。因此,在风持续的 24 h 内,长江口拦门沙河段消耗的总波能为 $16C$ 。

当长江口拦门沙河段吹正向向岸风时,波浪往内传播,16 个研究区域产生的波能均可以消耗在拦门沙河段,暂且假设拦门沙河段以外深水区域不消耗波能^[15],其中第 1 个研究区域全部 16 个研究时段内生成的波能均消耗在长江口拦门沙河段,总能耗为 $16A$;第 2 个研究区域有 15 个研究时段生成的波能消耗在长江口拦门沙河段,总能耗为 $15B$;第 3 个研究区域有 14 个研究时段生成的波能消耗在长江口拦门沙河段,总能耗为 $14B$,以此类推,第 16 个研究区域有 1 个研究时段生成的波能消耗在长江口拦门沙河段,总能耗为 $1B$ 。因此,在风持续的 24 h 内,长江口拦门沙河段消耗的总波能为 $16A+120B$ 。

根据以上分析可知,在正向向岸风与正向离岸风两种情况下,长江口拦门沙河段总波能消耗的比值计算如下:

$$\frac{16A+120B}{16C} \approx \frac{187.6A}{16C} > 10 \quad (2)$$

由于 $C < A$, 上式计算结果其实远大于 10, 可见正向向岸风与正向离岸风两种条件下的长江口拦门沙河段总波能消耗相差至少 1 个数量级, 即使考虑长江口拦门沙河段以外深水区域的波能在传播过程中的消耗, 这种差异也是极为显著的。如果考虑风速增大情况, 上述差异则更大。

从以上的定性分析可见, 风向变化对长江口拦门沙区域影响极为显著, 因此, 不同传播方向的波浪对长江口拦门沙河段的河床作用是不同的。实际上, 上述定性分析的结果与现场实际情况是非常吻合的, 每年枯季长江口拦门沙河段以吹离岸风为主, 波浪的周期较短且波形多是尖陡、散

碎的, 能量低; 而到了每年的洪季, 长江口拦门沙河段吹向岸风的频率大大增加, 在向岸风的条件下, 拦门沙区域的波浪形态与枯季差异显著, 波周期不仅增长, 而且波形多是圆滑、整齐的, 波能高。离岸风与向岸风所引起的周期和波形的巨大差异其实就是两种条件下长江口拦门沙河段总波能消耗显著差异的一种外在表现。此外, 现场观测也表明, 洪季长江口拦门沙河段河床附近水体的紊动强度总体上也较枯季明显增大, 尤其是当有大的向岸浪作用时, 河床附近的紊动强度增加显著, 水体的含沙量也随之大幅度增加, 这些也是两种风向条件下波能差异的一种表现。

综合以上分析可见, 在长江口拦门沙河段, 波浪传播方向是影响波浪对河床作用的一个非常重要的因素, 通过波浪的传播方向, 如向岸向或离岸向, 可以初步判断波浪对河床作用的强弱情况。

其实上述分析结果对于台风、寒潮等情况也是适应的。判断台风对长江口拦门沙河段的影响如何, 可以依据台风引起的波浪在拦门沙区域的传播情况, 如果波浪传播方向是向岸向的, 其影响一般就比较显著; 但如果波浪传播方向不是向岸向的, 即使台风强度较大且风暴中心距离拦门沙很近, 如 2014 年横穿长江口的“凤凰”台风, 其影响很不明显。对于寒潮的影响来说, 其判断标准也是相同的, 如果寒潮引起的波浪传播方向不是向岸向的, 即使寒潮强度很大且持续时间很长, 其影响也是不会明显的, 但如果寒潮引起的波浪是向岸向的, 其影响也一定会是很明显的。如 2010 年 10 月 18 日—28 日的寒潮, 其风向绝大部分时间是向岸向的 (图 5), 此次寒潮给北槽深水航道带来了非常显著的影响。当然了, 绝大部分寒潮到了长江口, 其风向都是离岸的, 所以人们往往就形成了一种较为固定的认识, 即认为寒潮对北槽深水航道回淤无明显影响, 所以在遇到了 2010 年 10 月的那场寒潮时, 很多人就不知道如何解释了, 透过现象看本质, 其实就是风向改变所引起的。

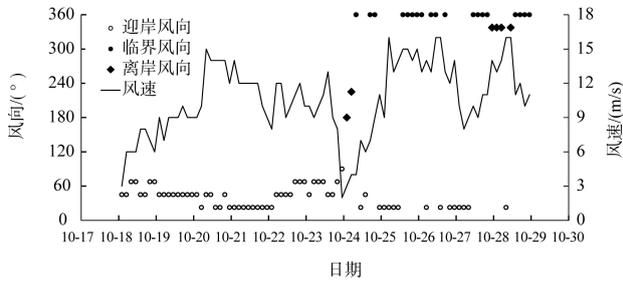


图5 2010年10月18日—28日寒潮期间
长江口风速风向变化过程

6 结语

依据现场波浪观测数据和国内外已有研究成果,并辅以必要的理论分析手段,本文探究了引起长江口拦门沙河段波浪作用在洪枯季期间显著变化的敏感性因素,并从对河床的作用角度揭示这些敏感性因素的影响机理,取得以下认识:

1) 波浪的周期与传播方向是引起长江口拦门沙河段波浪作用强度在洪枯季期间发生显著变化的两个敏感性因素。

2) 波周期的变化显著影响了波浪对河床的作用,周期越短,表面波浪所引起的最大循环动水压差随水深增加而衰减越快;周期越长,表面波浪所引起的最大循环动水压差随水深增加而衰减越慢。

3) 长江口拦门沙河段的短周期波浪对北槽南北两侧丁坝坝头连线以内的广阔河床区域泥沙运动影响非常有限,其影响主要集中在浅水区域,但长周期的波浪对浅水区和深水区的泥沙运动均有显著影响。

4) 波向变化对长江口拦门沙区域影响极为显著,通常情况下,相同级别的正向向岸风与正向离岸风所引起的长江口拦门沙河段总波能消耗相差至少1个数量级,其外在表现就是两种条件下的波周期和波形有巨大差异,通过波浪的传播方向可以初步判断波浪对河床作用的强弱情况。

5) 每年枯季长江口拦门沙河段以吹离岸风为主,波浪的周期较短且波形多是尖陡、散碎的,能量低;而到了每年的洪季,长江口拦门沙河段吹向岸风的频率大大增加,在向岸风的条件下,拦门沙区域的波浪形态与枯季差异显著,波周期

不仅增长,而且波形多是圆滑、整齐的,波能高。

6) 2010年10月那场寒潮(18日—28日)之所以能给北槽深水航道带来非常显著的影响,究其原因就是其风向与通常的寒潮不同,其风向绝大部分时间是向岸向的。

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] 窦国仁.长江口深水航道泥沙回淤问题的分析[J].水运工程,1999(10):34-39.
- [3] 陈志昌,乐嘉钻.长江口深水航道整治原理[J].水利水电工程学报,2005(1):1-7.
- [4] 程永舟,蒋昌波,潘昀,等.波浪渗流对泥沙起动的的影响[J].水科学进展,2012(2):256-262.
- [5] Okusa S, Uchida A. Pore-water pressure change in submarine sediments due to waves[J]. Marine Georesources & Geotechnology, 1980, 4(2): 145-161.
- [6] Okusa S. Measurements of wave-induced pore pressure in submarine sediments under various marine conditions[J]. Marine Georesources & Geotechnology, 1985, 6(1): 119-144.
- [7] Maeno Y, Hasegawa T. In-situ measurements of wave-induced pore pressure for predicting properties of seabed deposits[J]. Coastal Engineering in Japan, 1987, 30(1): 99-115.
- [8] 王淑云,楼志刚.海洋粉质黏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.
- [9] 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.
- [10] 邵龙潭,洪师,郑卫锋.循环孔隙水压力作用下饱和砂土变形的试验研究[J].岩土工程学报,2006(4):428-431.
- [11] Wells J T, Kemp G P, 汤君久.表面波浪与淤泥质底沙的相互作用—现场观测和地质意义[J].河海大学科技情报,1988(S2):30-42.
- [12] 武伯弢.波浪荷载作用下砂质粉土海床的液化研究[D].上海:同济大学,2009:73.
- [13] 吴宋仁.海岸动力学[M].3版.北京:人民交通出版社,1999:29.
- [14] JTJ 213—1998 海港水文规范[S].
- [15] 李家星,赵振兴.水力学下册[M].南京:河海大学出版社,2001:253.