

· 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 II: 洪枯季作用差异\*

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河床作用的洪枯季差异及规律研究, 结果表明: 1) 长江口拦门沙河段波能随周期的分布曲线在洪季表现为“窄峰”特征, 波能主要集中在4.0~7.0 s, 而洪季表现为“宽峰”或“双峰”特征, 波能主要集中在4.0~12.0 s; 2) 与枯季相比, 洪季长周期的高能波发生频率及其波能所占年总波能的比例显著提高, 其中波能增加数十倍; 3) 长江口拦门沙区域的波浪按周期可分为3种类型, 即低能波、高能波以及过渡波, 其中低能波对拦门沙区域的深水河床基本无作用, 高能波对拦门沙区域的深水河床作用非常显著, 但过渡波对拦门沙区域的深水河床作用不确定, 视波向变化而定。

**关键词:** 长江口拦门沙; 航道; 洪枯季差异; 最大循环动水压差; 高能波; 低能波; 过渡波

**中图分类号:** TV 148; U 61

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1002-4972(2016)06-0110-06

## Wave dynamic environment of channel deposition in mouth bars of the Yangtze River estuary II: Differences between flood and dry seasons

LIU Meng

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

**Abstract:** This article researches the seasonal differences caused by wave dynamics impacting on the riverbed during the flood and dry seasons in the mouth bars of the Yangtze River estuary. Some perceptions are as follows: 1) For the distribution curve of wave energy, during the dry season, wave energy is focused on the range of 4.0~7.0 s, waveform presents a narrow peak, while during the flood season, the energy concentrates in the 4.0~12.0 s, waveform appears broad or double peaks; 2) Compared with the dry season, the long period waves occurring in the flood season are more frequent, and the proportion of energy to the overall increases significantly, the quantity reaches dozens of times; 3) In the mouth bars, according to different periods, waves can be divided into 3 types, i. e. low-energy wave, high-energy wave and transitional wave. Low-energy waves almost unchange the riverbed in deep water while high-energy waves are completely reverse, but the influence of transitional waves on the mouth bar area is uncertain, and it is determined according to the change of the wave direction.

**Keywords:** the mouth bars of the Yangtze River estuary; channel development; seasonal difference; maximum circular hydrodynamic pressure difference; high-energy wave; low-energy wave; transition wave

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。

## 1 研究背景

长江口北槽深水航道回淤的最显著特点就是洪枯季(5月至10月为洪季,11月至次年4月为枯季)的巨大差异,洪季期间航道回淤量显著增加,占年总回淤量的90%左右,而枯季期间不仅回淤总量少,且间或发生长时间的总体冲刷情况<sup>[1]</sup>。早前,很多学者认为水流(潮流和径流的叠加)动力是引起长江口拦门沙河段航道回淤的主要原因,但这与事实是不相符的。在长江口拦门沙河段,水流是一种长期存在且相对稳定的周期性变化动力,洪枯季无明显差别,且水流动力主要是引起“冲槽淤滩”现象<sup>[1]</sup>。刘猛等<sup>[2-3]</sup>研究结果表明,在长江口拦门沙河段开通12.5 m航槽后,槽内特征流速不减反增,槽内水流冲刷能力明显增强,动床试验和现场观测均证明了这种动力变化结果。此外,一些学者在分析长江口12.5 m深水航道的回淤问题时,为了能够合理地利用水流运动来解释其洪季严重回淤的现象,往往直接采用长江径流的洪枯季变化来泛泛解释北槽深水航道的洪季回淤问题,实际上上游径流对长江口12.5 m深水航道冲淤变化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,径流变化所能引起的拦门沙河段水流运动在洪枯季的差异并不明显<sup>[1]</sup>。事实上,上游径流对河口拦门沙水流运动的影响在许多小河口是非常明显的,比如苏北沿海许多小的入海口,这些河口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淤积的有效办法<sup>[4-6]</sup>。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。

长江口北槽深水航道发生显著回淤必然有其动力基础,在长江口拦门沙河段,水流和波浪是该河段控制泥沙运动的两种基本动力,如果水流动力不是引起北槽深水航道发生显著回淤的动力原因,那么就应该聚焦于波浪动力的作用上。如果波浪动力确是引起北槽深水航道发生显著回淤

的动力原因,根据北槽深水航道回淤的特点可知,长江口拦门沙河段波浪对河床的作用在洪枯季期间必然存在非常显著差异。在《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》<sup>[7]</sup>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,本文进一步对长江口拦门沙河段航道开发的波浪动力环境进行深入研究,探究长江口拦门沙河段波浪对河床作用的洪枯季差异及规律。

## 2 数据及方法

从建站之初至2011年6月期间,牛皮礁平台站(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)的波浪测量数据断续不完整,但之后的数据连续性良好。本文分析涉及了2组波浪样本数据(表1),文中涉及的波高及周期数据均为有效波高和有效波周期。

表1 波浪样本数据说明

组别	样本数/个	时间间隔/h	时间段
1	4 097 (洪季 2 066, 枯季 2 034)	3	2007年2月— 2012年3月
2	18 762 (洪季 8 735, 枯季 10 027)	1	2011年11月— 2013年12月

为了更好地反映波浪对河床所产生的作用,拟采用能量的概念来表达。一个波长范围内,单宽波峰线长度的平均总波能( $J/m^2$ )的计算公式<sup>[8]</sup>如下:

$$E = 0.125\rho gH^2 \quad (1)$$

式中: $\rho$ 为密度; $H$ 为波高; $g$ 为重力加速度。

若直接将表层的波高代入上式来反映波浪对河床的影响显然是不合理的,比如在深海区域,虽然表层有波浪,但对床面无影响。可见,若想客观反映波浪对河床所产生的作用,必须对上述波能的计算公式进行合理的改进,使理论计算结果与现场实际情况更加相符。

表层波浪对水体的影响往下是逐渐减弱的,只有传播到河床的能量才对河床有作用,故拟采用床面附近的最大循环动水压差<sup>[7]</sup>来代替式(1)中

的波高  $H$ 。可以这样理解，波浪往下是逐渐衰减的，到了床面附近就等效成一个新的波浪，该波浪直接作用于床面，波高值等于表层波浪在床面附近的最大循环动水压差值，周期保持不变。下文所述波浪均换算为这种等效的床面附近的波浪。

### 3 长江口拦门沙河段波浪对河床作用的洪枯季差异

将牛皮礁平台站实测的波浪数据按照前文方法分别进行计算并统计整理，得到了洪枯季各周期波浪的波能占年总波能的比例情况，见图 1~3。

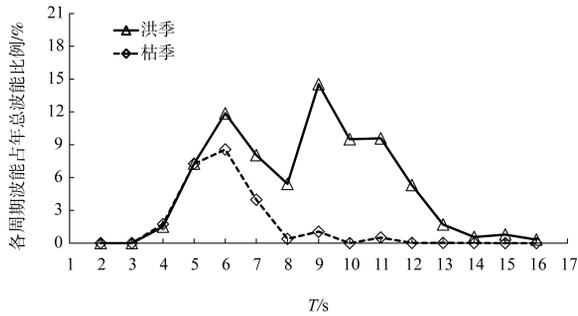


图1 2007年2月—2012年3月洪枯季各周期波能占年总波能比例（第1组样本数据）

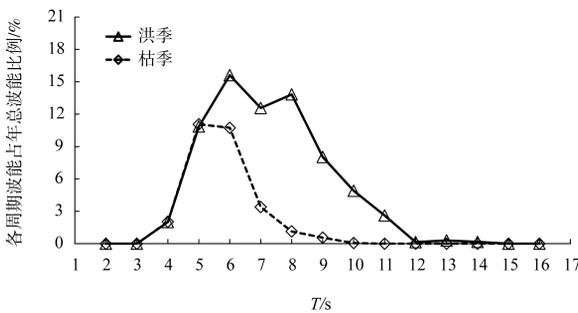


图2 2011年11月—2012年10月洪枯季各周期波能占年总波能比例（第2组样本数据）

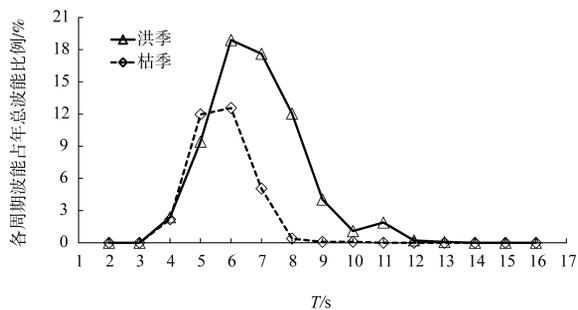


图3 2012年11月—2013年10月洪枯季各周期波能占年总波能比例（第2组样本数据）

从床面附近的波浪影响来看，洪枯季牛皮礁平台站附近的波能随周期分布存在显著差异，主要表现为以下3点：

1) 枯季牛皮礁平台站附近的波能随周期的分布曲线表现为“窄峰”特征，波能主要集中在4.0~7.0 s，长周期波的能量少，这与枯季长江口拦门沙河段以吹离岸风浪为主、台风显著减少的事实是吻合的，枯季长江口拦门沙河段以短周期波为主。

2) 洪季牛皮礁平台站附近的波能随周期的分布曲线表现为“宽峰”或“双峰”特征，波能主要集中在4.0~12.0 s，长周期波的能量显著增多，这也与洪季长江口拦门沙河段迎岸风显著增多、台风频发的事实是吻合的，洪季长江口拦门沙河段长周期波显著增多。

3) 洪季牛皮礁平台站附近的总波能显著大于枯季总波能，根据图中数据统计，洪季总波能约是枯季总波能的2.6倍。值得注意的是，短周期波浪多为非迎岸向的风浪，由于波形多是尖陡、散碎的，其能量较理论计算值要小得多，而长周期波浪多为迎岸向的涌浪，波形相对较为圆滑、整齐，其能量与理论计算值较为接近，因此洪枯季牛皮礁平台站附近的总波能差异实际上较上述统计结果更加显著。

以上结果均是基于牛皮礁平台站的波浪、水深条件计算得出的，该结果虽然不能全面定量反映长江口拦门沙河段河床受波浪作用的整体情况，但其变化的规律是基本一致的，尤其能较好地代表北槽南北两侧丁坝坝头连线以内的广阔深水河床所受波浪作用的情况，因此采用牛皮礁平台站附近河床处的等效波浪来定性分析长江口拦门沙河段河床受波浪作用的情况是较为科学合理的，是有代表性的。

2007年2月—2012年3月洪季各周期波能占洪季总波能比例及洪季各周期波发生频率见图4。

由图4可见，能量分布曲线与频率分布曲线差异极为明显，短周期波(6.0 s以内)虽然发生频

率显著占优, 但能量所占比例很小; 长周期波 (6.0 s 以上) 虽然发生频率低, 但其能量所占比例大, 这表明长周期波单个波浪的波能高。

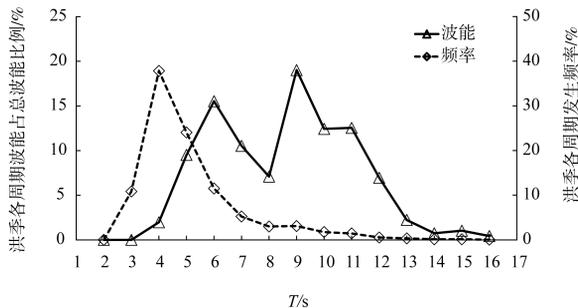


图4 2007年2月—2012年3月洪季能量分布及频率分布曲线 (第1组样本数据)

#### 4 基于周期变量对长江口拦门沙河段波浪的分类

根据图1~3对应的数据统计得出的洪枯季各周期单个波浪平均波能见表2。

由表2可见, 各周期单个波浪的平均波能相差非常大, 根据波能大小及对北槽12.5 m深水航道的影响情况, 可以大致将长江口拦门沙区域的波浪按周期分为3种类型, 即低能波、高能波以及过渡波。各种波的特点如下:

##### 1) 低能波。

低能波是指波周期在5 s以内的波浪, 以风浪为主, 是长江口拦门沙区域发生频率最高的波浪, 其年内发生频率约占80%。

表2 洪枯季各周期单个波浪平均波能  $E$  统计

周期/s	单个波浪平均波能 $E/(J/m^2)$						平均
	2007年2月—2012年3月		2011年11月—2012年10月		2012年11月—2013年10月		
	洪季	枯季	洪季	枯季	洪季	枯季	
3	0	0	0	0	0	0	0
4	9	10	11	9	12	9	10
5	70	64	70	56	62	57	63
6	240	230	195	161	244	241	218
7	358	399	329	198	475	553	385
8	420	266	666	255	894	496	500
9	1 092	997	950	357	1 014	162	762
10	1 269		1 663	427	946	716	1 004
11	1 536	1 212	2 267		1 634		1 662
12	2 322	93	1 126		1 722		1 316

低能波的最大特点就是拦门沙区域的深水河床 (如北槽南北两侧丁坝坝头连线以内的广阔区域) 基本无作用, 比如不仅不会引起床沙发生“液化”或抗剪能力下降<sup>[9-11]</sup>等土力学现象的发生, 甚至对河床附近的水动力情况已不再产生影响。当长江口拦门沙区域长期受到低能波的作用时, 北槽深水航道不仅无明显淤积现象出现, 而且常常呈整体冲刷的态势, 如枯季的浪况常常接近于上述条件。

统计数据表明, 周期为5 s的波浪的平均波能约为  $63 J/m^2$ ; 周期为4 s的波浪的平均波能仅为约  $10 J/m^2$ ; 周期为3 s的波浪已对深水河床无任何影响, 实际上计算所涉及的公式若是能考虑低能波的实际波形特点, 或者能够在河床附近直接测量相关参数, 上述的统计结果可能都趋近于零。

##### 2) 高能波。

高能波是指波周期在7 s以上的波浪, 以涌浪为主, 该部分波浪虽然年发生频率较低, 约为10%, 但其总能量非常高, 占年总波能的60%以上。高能波在洪枯季的分布是极不均匀的, 主要集中在洪季发生, 其中洪季发生频率占80%以上, 波能占90%以上。

高能波的最大特点就是拦门沙区域的深水河床作用非常显著, 不仅会引起床沙抗剪能力下降或“液化”等土力学现象的发生, 而且对河床附近的水动力情况产生显著影响, 比如显著增加其紊动强度, 使其挟沙能力大幅度增加, 这两方面因素将共同导致河床泥沙的运动情况较无波浪作用条件下要强烈得多。当长江口拦门沙区域长期受到高能波的作用时, 北槽深水航道将会发生

显著淤积的现象,如台风引起的浪况往往接近于上述条件。

统计数据表明,在深水河床附近,高能波单个波浪的平均波能非常高,一般在数百至一千焦每平方米左右,其中最高的超过 $2\,000\text{ J/m}^2$ ,高出低能波约1~2个数量级。

### 3) 过渡波。

过渡波是指周期为6 s左右的波浪,其组成较为复杂,既有风浪也有涌浪,该部分波浪年发生频率约为10%,占年总波能的20%左右。

过渡波的最大特点就是阻拦门沙区域的深水河床作用不确定,作用效果介于低能波与高能波之间,有时趋向于高能波,也有时趋向于低能波。6 s的周期基本上是长江口拦门沙区域风浪周期的上限,只有在非常强劲的风力条件下才能吹起这种风浪,同样6 s的周期也基本是涌浪能对拦门沙区域深水河床产生明显作用的下限周期。与高能波的传播方向是基本确定的不同,过渡波的传播方向是不确定的,既可能是迎岸向的,也可能是非迎岸向的,根据前文有关波浪传播方向变化对河床的作用分析可知,过渡波对河床的作用差异很大,其中迎岸向的波浪对深水河床作用要显著得多,而离岸向的波浪对深水河床作用要小得多<sup>[7]</sup>。

当长江口拦门沙区域长期受到过渡波的作用时,北槽深水航道淤积情况可以根据浪向来初步判断,当波浪传播方向是离岸的,航道不会出现明显的淤积现象,如枯季离岸风向的寒潮引起的

浪况往往接近于该条件;当波浪传播方向是迎岸的,航道往往会出现明显的淤积现象,如一般风力强度的迎岸向常风所引起的浪况往往接近于该条件。统计数据表明,过渡波单个波浪的平均波能约为 $200\text{ J/m}^2$ ,其值显著大于低能波,但也同样显著小于高能波。

由以上分析可见,3种波浪的划分虽然是按照波周期进行的,实际上它们与波浪传播方向的关系也是非常紧密的,从统计的概率来说,高能波主要是迎岸向的,低能波主要是非迎岸向的,过渡波方向是不确定的。需要注意的是,本文所涉及的浪向均为拦门沙深水区域的,如牛皮礁平台站附近区域的波浪传播方向。

采用能量的概念来反映水面传播的波浪对河床作用虽然较为合理,但仍有许多目前难以克服的缺陷,如等量的长周期波能与短周期波能对床面作用效果并不是相同的。等量的长周期波能时间上相对集中,作用强度大,现象显著,如一些台风引起的北槽深水航道的骤淤现象;而等量的短周期波能时间上分散,作用强度弱,现象不明显。此外,除非直接在床面附近测量波参数,如果采用表层测量得到的波浪参数进行计算,又涉及到波形问题,如长江口枯季短周期波的波形一般较为尖陡、散碎,采用理论计算值较实际严重偏大。以上两点是采用能量的概念来反映水面传播的波浪对河床作用时必须予以注意的。

2007年2月—2012年3月主要高能波发生频率及其波能占年总波能比例统计结果见表3。

表3 主要高能波发生频率及其波能占年总波能比例统计结果

洪季、枯季	$T \geq 7\text{ s}$			$T \geq 8\text{ s}$			$T \geq 9\text{ s}$		
	发生频率/%	天数/d	波能占年总波能比例/%	发生频率/%	天数/d	波能占年总波能比例/%	发生频率/%	天数/d	波能占年总波能比例/%
洪季	15.73	28.71	55.79	10.50	19.17	47.74	7.50	13.69	42.32
枯季	3.15	5.75	5.99	0.84	1.53	2.02	0.49	0.90	1.63
洪季/枯季	5.0		9.3	12.5		23.6	15.3		26.0
洪季、枯季	$T \geq 10\text{ s}$			$T \geq 11\text{ s}$			$T \geq 12\text{ s}$		
	发生频率/%	天数/d	波能占年总波能比例/%	发生频率/%	天数/d	波能占年总波能比例/%	发生频率/%	天数/d	波能占年总波能比例/%
洪季	4.40	8.04	27.78	2.66	4.86	18.28	1.21	2.21	8.69
枯季	0.25	0.45	0.58	0.25	0.45	0.58	0.15	0.27	0.06
洪季/枯季	17.6		47.9	10.6		31.5	8.1		144.8

与枯季相比,在长江口拦门沙河段的波浪组成中,洪季长周期的高能波发生频率及其波能所占年总波能比例显著提高。比如8 s及以上周期的高能波发生频率由0.84%增加至10.50%,相当于由1.53 d增加至19.17 d,增加了10倍多,达到了11.5倍;波能增加更为显著,占年总波能的比例由2.02%增加至47.74%,增加超过20倍,达到了22.6倍。

## 5 结语

1) 枯季长江口拦门沙河段的波能随周期的分布曲线表现为“窄峰”特征,波能主要集中在4.0~7.0 s,长周期波的能量少;洪季长江口拦门沙河段的波能随周期的分布曲线表现为“宽峰”或“双峰”特征,波能主要集中在4.0~12.0 s,长周期波的能量显著增多;洪季牛皮礁平台站附近的总波能显著大于枯季总波能。

2) 洪季的能量分布曲线与频率分布曲线差异极为明显,短周期波虽然发生频率显著占优,但能量所占比例很小;长周期波虽然发生频率低,但其能量所占比例大。与枯季相比,在长江口拦门沙河段的波浪组成中,洪季长周期的高能波发生频率及其波能所占年总波能比例显著提高,其中波能增加数十倍。

3) 各周期单个波浪的平均波能相差非常大,根据波能大小及对北槽12.5 m深水航道的情况,可以大致将长江口拦门沙区域的波浪按周期分为3种类型,即低能波、高能波以及过渡波。

4) 低能波是指波周期在5 s以内的波浪,以风浪为主,是长江口拦门沙区域发生频率最高的波浪,其年内发生频率约占80%。低能波的最大特点就是拦门沙区域的深水河床基本无作用。

5) 高能波是指波周期在7 s以上的波浪,以涌浪为主,该部分波浪虽然年发生频率较低,约为10%,但其总能量非常高,占年总波能的60%

以上。高能波在洪枯季的分布是极不均匀的,主要集中在洪季发生,其中洪季发生频率占80%以上,波能占90%以上。高能波的最大特点就是拦门沙区域的深水河床作用非常显著。

6) 过渡波是指周期为6 s左右的波浪,其组成较为复杂,既有风浪也有涌浪,该部分波浪年发生频率约为10%,占年总波能的20%左右。过渡波的最大特点就是拦门沙区域的深水河床作用不确定,其中迎岸向的波浪对深水河床作用要显著得多,而离岸向的波浪对深水河床作用要小得多。

## 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,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.
- [3] 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,2014:274-277.
- [4] 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(1):73-76.
- [5] 徐和兴,徐锡荣.潮汐河口闸下淤积及减淤措施试验研究[J].河海大学学报,2001(6):30-35.
- [6] 陈静.射阳河口挡潮闸闸下淤积分析与治理开发研究[D].南京:南京水利科学研究院,2006:9-10.
- [7] 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.
- [8] 吴宋仁.海岸动力学[M].3版.北京:人民交通出版社,1999:15-16.
- [9] 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.
- [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] 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,2009:34-39.

(本文编辑 武亚庆)