



# 长江口水文要素时空分布特征

王淑楠<sup>1</sup>, 顾峰峰<sup>2</sup>, 李俊花<sup>1</sup>, 戚定满<sup>2</sup>

(1. 上海海事大学 海洋科学与工程学院, 上海 201306;

2. 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:** 搜集实测资料分析 2016—2019 年大通站流量、北槽中站流速等长江口水文要素变化特征。结果表明: 1) 近 4 年, 大通站径流年总量与往年平均值接近, 年内最大月均流量出现在 7—8 月, 最小值出现在 10 月—次年 2 月。2) 北槽高、低潮位和潮差月平均值年内呈单峰型分布, 峰值出现在 8—10 月; 3 个不同位置测站变化趋势基本一致, 南槽东月平均潮位最高且潮差最大。3) 北槽落急流速月平均值大于涨急且在 6—8 月达到峰值, 涨急流速在 6—8 月达到低谷; 落潮月平均流速大于涨潮, 涨潮月平均流速在 7 月份达到最小; 落潮历时月平均值大于涨潮且在 6—8 月达到峰值。4) 北槽中站水温年内变化规律明显, 8 月月平均气温可达 29.96 ℃, 2 月月平均气温为 7.51 ℃。5) 南槽东、牛皮礁、长江口月平均有效波高及周期整体变化规律基本一致; 从年内分布来看有效波高变化较大、波周期变化较小; 长江口站有效波高及波周期高于其他两站, 南槽东站与牛皮礁站有效波高及波周期差异较小; 3 站总波能南槽东站最小、长江口站最大。

**关键词:** 长江口; 流量; 潮位; 潮差; 有效波高; 波周期; 波能

**中图分类号:** TV 148; U 612

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1002-4972(2022)03-0085-08

## Spatial and temporal distribution characteristics of hydrological elements in the Yangtze River Estuary

WANG Shu-nan<sup>1</sup>, GU Feng-feng<sup>2</sup>, LI Jun-hua<sup>1</sup>, QI Ding-man<sup>2</sup>

(1. College of Ocean Science and Engineering, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China;

2. Shanghai Estuarine & Coastal Science Research Center, Key Laboratory of Ministry of Communications, Shanghai 201201, China)

**Abstract:** We Collected measured data and analyzed the variation characteristics of the hydrological elements in the Yangtze River Estuary, such as the discharge of Datong station and the velocity of the North Passage middle station from 2016 to 2019. The results show that: 1) The annual total runoff volume of Datong Station in recent four years is close to the average of previous years. The maximum monthly average flow occurs from July to August, and the minimum occurs from October to February. 2) The monthly averages of high and low tide, tidal level and tidal range in the North Passage middle station have a single-peak distribution during the year, and the peak occurs from August to October. The changing trends of the 3 different stations are basically the same. The monthly average tide level in the east of the South Passage station is the highest and the tidal range is the largest. 3) The monthly mean value of the ebb current is larger than that of the flood current in the North Passage middle station and reaches the peak from June to August. The flood current reaches the trough from June to August. The monthly average velocity of ebb tide is larger than that of flood tide. The average monthly velocity of flood tide reaches its minimum in July. The monthly average duration of low tide is larger than high tide and reaches the peak form June to August. 4) The water temperature in the North Passage middle station has an obvious change during the year. The monthly

**收稿日期:** 2021-05-17

**作者简介:** 王淑楠(1997—), 女, 硕士, 从事港口、近岸与海洋工程水动力学方面研究。

average temperature in August can reach 29.96 °C, and the monthly average temperature in February is 7.51 °C. 5) The monthly average effective wave height and period of the east of the South Passage station, Niupijiao and Yangtze River Estuary are basically the same. From the perspective of annual distribution, the effective wave height changes greatly and the wave period changes little. The effective wave height and wave period of the Yangtze River Estuary station are higher than those of the other two stations. The difference between the significant wave height and wave period of the east of the South Passage station and Niupijiao is small. The total wave energy of the three stations is the smallest at the east of the South Passage station and the largest at the Yangtze River Estuary.

**Keywords:** the Yangtze River Estuary; flow; tidal level; tidal range; effective wave height; wave cycle; wave energy

近半个世纪来,长江口动力变化及航道工程建设对长江口影响较为强烈,自 20 世纪 50 年代,长江流域开始建设一系列水库工程,以三峡水库为首的水库群在控制流量的同时也造成了很多问题,如航道淤积问题,造成淤积的主要原因就是长江口底部的“最大浑浊带”。“最大浑浊带”的存在与长江口的径流量、潮汐动力、波浪特征密切相关,因而研究长江口水文要素时空分布特征具有重要的科学价值。

许多学者对长江口水文要素变化特征进行了研究,在长江口潮汐变化特征<sup>[1-3]</sup>、上游径流变化特征<sup>[4-6]</sup>、口外波浪变化特征<sup>[7-8]</sup>等方面取得了有价值的研究成果。方娟娟等<sup>[9]</sup>综合采用 Mann-Kendall 趋势检验等研究方法,分析了长江大通站 1946—2009 年径流的变化趋势,结果发现月均流量变化趋势明显。汤宇<sup>[10]</sup>分析了深水航道治理工程对长江口潮波的影响,结果表明 1996—2009 年北槽潮汐特性发生了明显变化,即低潮位明显上升、潮差明显减小。关于长江口潮差变化的研究具有重要的现实意义,但目前对长江口北槽潮汐时空变化的研究较少,且缺乏对近期潮汐时间变化以及北槽附近水域空间变化的分析。在波浪方面,黄华聪等<sup>[11]</sup>分析了发生骤淤时刻的气象条件与对应波浪条件,发现牛皮礁站波能与骤淤具有较好的相关性。分析长江口波浪变化特征十分必要,但目前对于长江口波浪的研究数据集中在牛皮礁站与佘山站,缺乏对口外其他测站的波浪分析以及各站整体的空间比较分析。

综上所述,虽然已经开展关于河口潮汐、径流、波浪变化特征的大量研究,总体有一些定性与定量的认识,但在长江口涨落潮月平均流速及历时上相关资料与研究较少,缺少潮汐变化的系统性分析。因而,本文基于长江口上游大通水文站及长江口水文波浪观测系统的实测数据,分析 2016—2019 年大通站流量、北槽中站流速以及牛皮礁站波能等长序列的实测水文资料,开展长江口水文要素的时空变化特征分析。

## 1 研究区域概况

长江口共有北支、北港、北槽、南槽 4 个人海通道。北槽是长江口的主要入海通道,深水航道整治前维护水深为 7 m,一期工程于 2002 年完成,航道水深从 7 m 增至 8 m;二期工程于 2005 年完成,航道水深由 8.5 m 增至 10 m;三期工程于 2010 年完成,达到了全槽贯通 12.5 m 航道水深的目标<sup>[12]</sup>。近 20 a 来,长江口“三级分汊、四口入海”的河势格局和各汊道的滩槽格局保持稳定,没有大的汊道和沙体产生。目前长江口下段及口外呈南汇东滩-南槽-九段沙-北槽-横沙浅滩-北港-崇明东滩——北支拦门沙滩槽相间的格局<sup>[13]</sup>。长江口 12.5 m 深水航道减淤工程——南坝田挡沙堤加高工程,在 2015—2018 年先期实施了 3.5 m(吴淞基面)加高方案,工程位于南侧 S4~S9 丁坝之间的坝田;2019 年底开始实施 4.5 m 加高方案,即南坝田挡沙堤加高完善工程;于 2020 年 12 月 13 日完成全部建设内容。

本文研究分析的长江口水文要素位于河口段靠近口外海滨位置, 分析数据来自 5 个水文测站: 大通站、北槽中站、长江口站、牛皮礁站和南槽东站, 各站点位置见图 1。

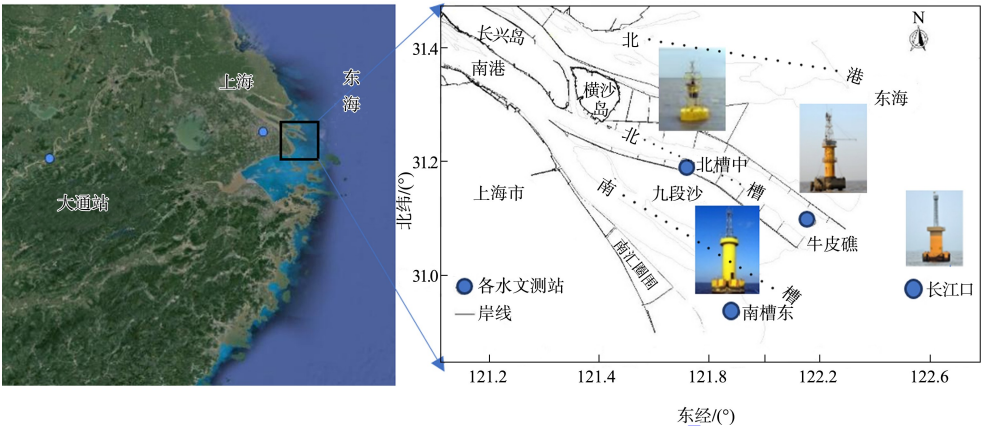


图 1 研究区域和水文测站位置

收集数据途径有两种: 1) 长江口上游潮临界区域水文站——大通站的流量, 通过水利主管部门的公开数据获取。2) 北槽中站和长江口站水温、潮位、流速, 牛皮礁站和南槽东站波高及其对应的长序列数据, 通过长江口水文波浪观测系统获取。其中北槽中站流速资料取自 ADCP 定点测流数据, 选取的是垂线平均流速。由于测量仪器问题导致 2018 年 8—10 月北槽中站流速、2018 年 12 月 24 日至年底的潮位以及 2018 年 8—9 月牛皮礁站波高及周期部分数据缺失, 资料分析时并未考虑。

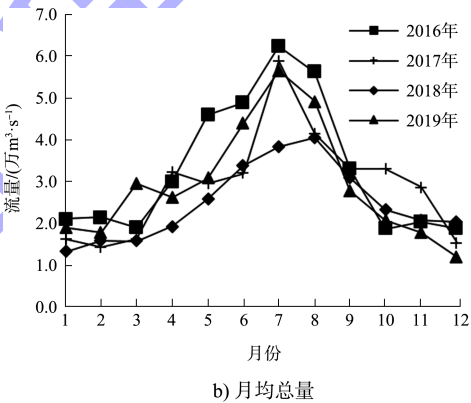
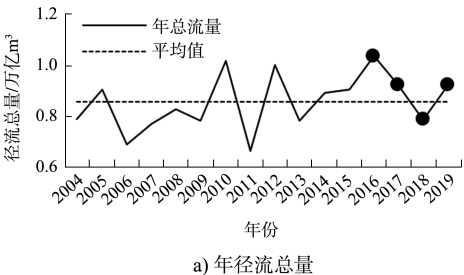


图 2 2004—2019 年大通站年径流总流量及 2016—2019 年大通站月均流量

2 长江口上游大通站流量条件

自 2003 年三峡大坝开始蓄水, 长江下游年径流总量变化总体平缓, 2004—2019 年大通站年径流总量见图 2, 年平均值约为 8 600 亿  $\text{m}^3$ , 其中 2016 年遭遇了长江流域大洪水, 径流总量最大, 约为 1 万亿  $\text{m}^3$ ; 2011 年为长江特枯水文年, 径流总量最小, 为 6 700 亿  $\text{m}^3$  左右; 2016—2019 年径流总量与往年平均值接近。



a) 年径流总量

分析 2016—2019 年大通站月均流量可知: 1) 最大月均流量出现在 7—8 月。近 4 a 来最大值和最小值分别出现在 2016 年 7 月和 2018 年 7 月, 分别为 6.238 4 万、4.057 7 万  $\text{m}^3/\text{s}$ 。2) 最小月均流量出现在 10 月至来年 2 月。其中 2019 年最小月均流量出现在 12 月, 为近 4 a 最小值, 约为 1.184 6 万  $\text{m}^3/\text{s}$ ; 2016 年最小月均流量出现在 10 月, 为近 4 a 最大值, 约为 1.866 8 万  $\text{m}^3/\text{s}$ 。3) 月均流量年内存在明显变化, 1—7 月为缓慢增加、8—12 月为减少。

3 长江口潮汐动力特征分析

3.1 北槽中潮位潮差特征分析

长江口属于中等潮差河口, 平均潮差为 2.67 m, 潮流界至江阴附近, 潮区界可达安徽大通。口外

东部水域属于正规半日潮流区。随着潮流进入河口，水深变浅，浅水分潮增强，潮流逐渐成为非正规半日潮。从近 4 a 北槽中站潮位变化过程线

(图 3)可以看出：高、低潮位存在明显的年内变化，其中最高潮位可达约 5.34 m(吴淞基面,下同)，最低潮位约为-0.03 m。

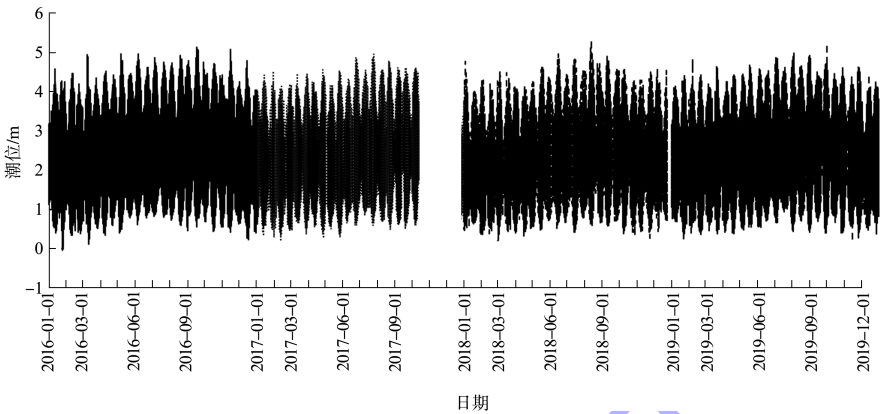


图 3 2016—2019 年北槽中站潮位过程线

高潮位与低潮位月平均值见图 4，其中月平均高潮位为 12 月至次年 2 月最低、低潮位为 8—10 月最大，月平均高潮位年内变化幅度总体上大于月平均低潮位。

时间上与月均流量变化趋势大致同步，基本都在 1—8 月增加、9—12 月减小。

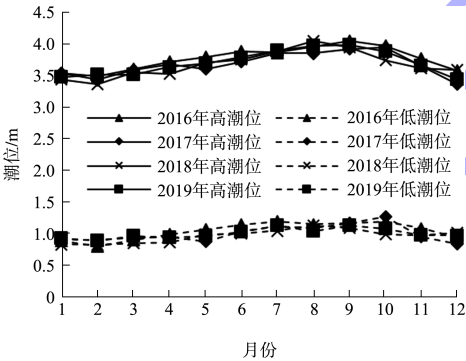


图 4 高、低潮位月平均值

月平均潮位年内变化见图 5，其与高、低潮位月平均值的变化趋势大致相同；2016—2019 年北槽的平均潮位总体呈现 2—8 月逐渐增大、9 月至次年 1 月逐渐减小的趋势，年际差异相对较小；2017 年平均潮位最大值出现在 10 月，为近 4 a 最大值，约为 2.61 m；2018 年平均潮位最小值出现在 2 月，为近 4 a 最小值，约为 2.09 m；根据史源<sup>[14]</sup>研究表明，长江口潮位存在明显的季节内变化特征，各潮位站都有洪季较高、枯季较低的规律，这与本文结论基本一致。长江口潮位在

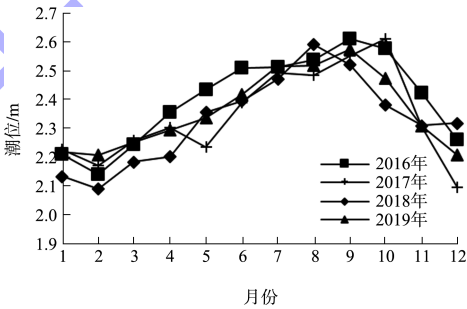


图 5 平均潮位月平均值变化

2016—2019 年北槽月平均潮差见图 6。由图 6 可知，其在年内总体呈单峰型变化，其中最大值出现在 8—10 月、最小值出现在 11 月至来年 3 月；近 4 a 最大值约为 2.92 m、最小值约为 2.54 m。胡方西等<sup>[15]</sup>认为沿岸水域月均潮差属于双峰型潮差变化区域，例如 2015 年余山站年内极大月均潮差出现在 3 月(258.9 cm)和 9 月(256.3 cm)、极小月均潮差出现在 6 月(242.5 cm)和 12 月(243.5 cm)，但由于受到工程建设等人为因素影响，北槽月均潮差呈现单峰型变化。潮差月均值在时间上呈现 1—8 月增加、9—12 月减少的趋势，与大通站月均流量具有同步的相关趋势，这与刘新成等<sup>[16]</sup>的结论基本一致。



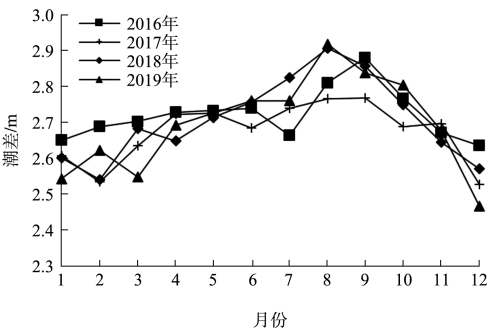


图6 月平均潮差

为获取长江口潮汐动力局部平面分布特征, 选取长江口、北槽中及南槽东 3 个站点 2019 年潮位及潮差月均值, 见图 7、8。由图可知, 3 站潮位和潮差的年内变化趋势大致相同, 其中南槽东月平均潮位最高、长江口站其次, 南槽东月平均潮差最大、北槽中其次; 另外, 由于长江口站位置靠外海, 潮差呈现一定的双峰特征。

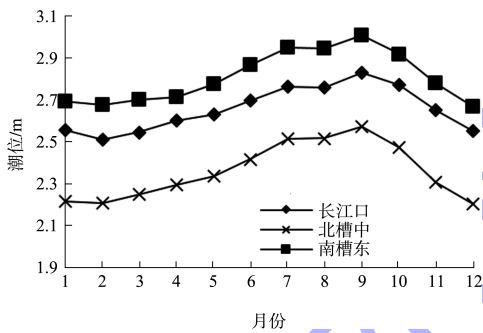


图7 不同站点的潮位月平均值

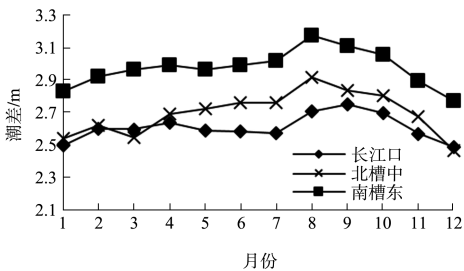


图8 不同站点的潮差月平均值

3.2 北槽流速及涨落潮历时特征分析

为分析北槽涨落潮流速情况, 统计北槽的涨、落急流速月平均值, 见图 9。从图 9 可知, 北槽的落急流速月平均值总体上大于涨急流速月平均值, 落急流速月平均值在 6—8 月达到最大值, 最大值约为 1.78 m/s, 年内变幅相对较小; 涨急流速月平均值变化幅度相对较大, 6—8 月达到低谷, 最

小值约为 0.64 m/s。

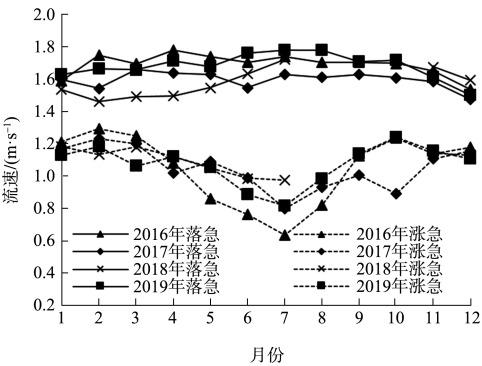
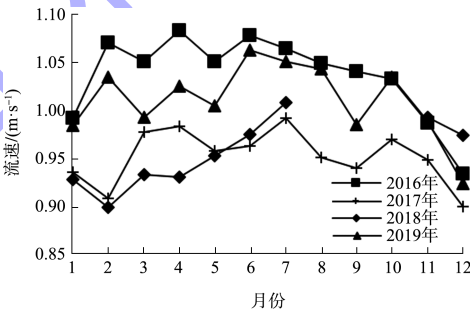
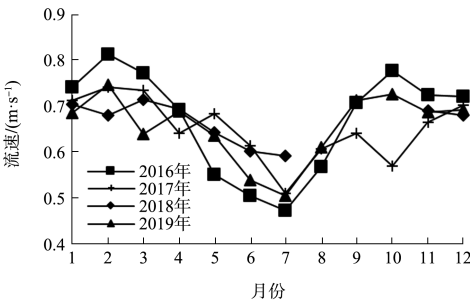


图9 北槽中站涨、落急流速月平均值

涨落潮月平均流速的变化见图 10。由图 10 可知, 近 4 a 落潮月平均流速明显大于涨潮, 落潮月平均流速年内变化规律相对不明显, 年际差异较大; 涨潮月平均流速年内变化规律较为明显, 7 月左右达到最小值, 年际差异相对落潮略小。



a) 落潮



b) 涨潮

图10 北槽中站涨落潮月平均流速

在涨落潮流速变化的同时, 历时也发生了明显的变化, 北槽的涨落潮月平均历时见图 11。由图 11 可知, 北槽落潮月平均历时总体上大于涨潮月平均历时, 落潮历时在 6—8 月可达到峰值, 相应的涨潮历时达到低谷, 在时间上与涨落潮月平均流速变化基本同步; 其中落潮月平均历时年内最大变幅约占涨落潮总历时的 20%。

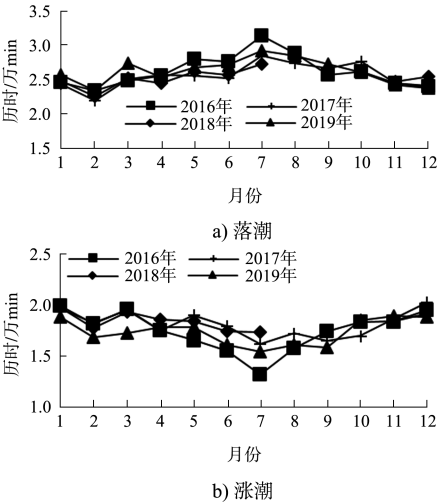


图 11 北槽中站涨落潮月平均历时

3.3 北槽水温分析

已有研究表明，长江口区域海水表面温度年变化趋势为：年最高温度 25~27℃，出现在 8 月中旬；年最低温度 8~10℃，出现在 3 月中旬；年较差约 15℃<sup>[17]</sup>。长江口北槽水温变化与上述结论基本符合，其过程相对稳定，年际差异不大，月平均水温见图 12。可知 7~9 月基本是年内水温最高时段。2016—2019 年月平均水温最高值均出现在 8 月，近 4 a 最高值约为 29.96℃；月平均水温最低值基本出现在 2 月，近 4 a 最低值约为 7.51℃。

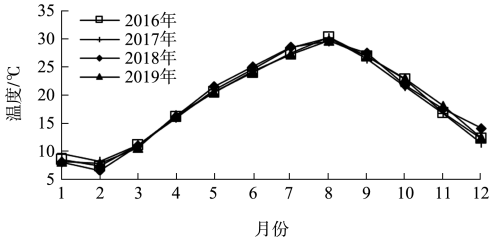


图 12 北槽中站月平均温度变化

3.4 牛皮礁、南槽东、长江口站波浪特征分析

3.4.1 有效波高及周期分析

牛皮礁站的波能与骤淤具有较好的相关性，2016—2019 年牛皮礁站的有效波高及波周期见图 13、14。由图可知：有效波高变幅主要在 0.10~4.37 m，最大值普遍出现在 8—10 月；其中 2016 年有效波高最大出现在 1 月，达到 4.37 m，其主要原因受寒潮影响，为近 4 a 最高；2017 年 10 月的“卡奴”台风导致有效波高达到约 3.16 m；2019 年 9 月的台风“塔巴”导致有效波高达到约 3.44 m。有效波周期与波高相似，变幅主要在 3~10 s；其中 2016 年最大波周期出现在 10 月，达到 11.67 s；2017 年出现在 7 月达到 11.7 s；2019 年出现在 10 月达到 11.7 s。

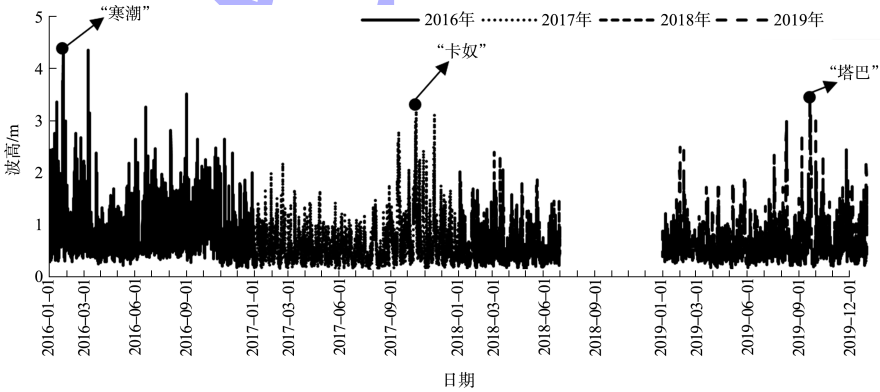


图 13 2016—2019 年牛皮礁站有效波高过程线

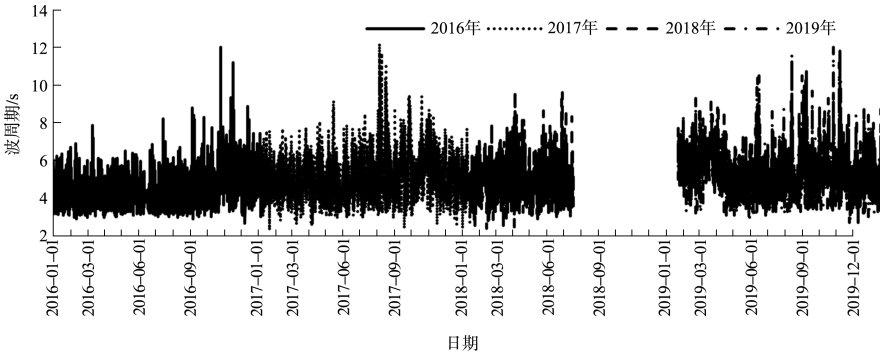


图 14 2016—2019 年牛皮礁站有效波周期过程线

对比 2019 年南槽东、牛皮礁、长江口这 3 站各月平均有效波高及周期, 由图 15、16 可知: 1) 3 个站点月平均有效波高在 0.5~1.2 m, 月平均周期在 4.2~6.1 s。2) 长江口站的有效波高及波周期总体上高于南槽东站和牛皮礁站, 尤其在 2 月和 9 月, 长江口站有效波高分别为 1.15、1.24 m, 而南槽东站及牛皮礁站有效波高分别为 0.67、0.71 m 及 0.69、0.84 m。3) 在 2—9 月, 长江口站有效波高降低幅度较大, 而南槽东与牛皮礁站有效波高降低幅度较小。4) 年内分布来看, 8 月至次年 3 月有效波高整体上较大, 波周期差异较小。这主要由于冬、春季受寒潮浪、气旋浪为主且作用时间较长, 故均值较高, 该特征符合长江口海域受东亚季风影响的特征。

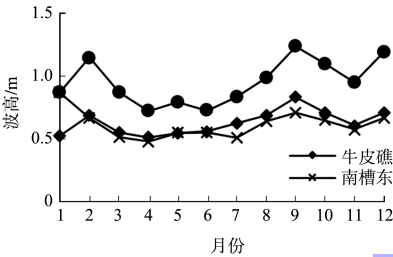


图 15 不同站点的有效波高月平均值

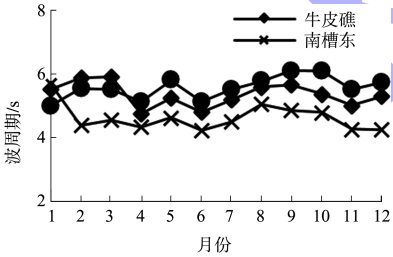


图 16 不同站点的波周期月平均值

3.4.2 波能分析

波能  $E$  是一个反映波浪能量的常用指标, 可以用来综合分析长江口波浪分布特征, 采用如下公式计算<sup>[18]</sup>:

$$E = \int_0^T \frac{1}{8} \rho g H^2 \frac{\sigma}{k} \cdot \frac{1}{2} \left[ 1 + \frac{2kh}{\text{sh}(2kh)} \right] dt \quad (1)$$

式中:  $H$  为波高(m);  $k$  为波数(个);  $h$  为水深(m);  $\sigma = \frac{2\pi}{T}$  为波浪圆频率( $\text{s}^{-1}$ );  $g$  为重力加速度( $\text{m}^2/\text{s}$ );  $\rho$  为水的密度( $\text{kg}/\text{m}^3$ );  $T$  为波周期(s)。

2016—2019 牛皮礁站波能计算结果见图 17,

月平均波能年内差异较为明显, 受台风和寒潮一定程度的影响, 月平均波能最高可达 329.6 GJ, 年内波能较大的月份主要出现在 8 月至次年 3 月, 与有效波高分布一致。

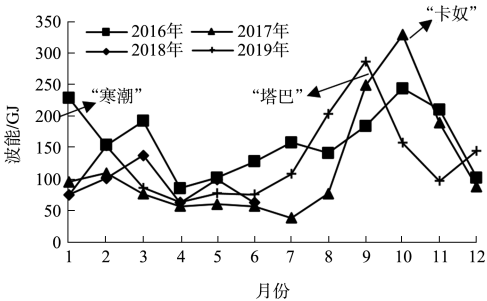


图 17 牛皮礁站波能月平均值

3 站年总波能见表 1。由表 1 可知, 2016—2019 年牛皮礁站总波能有所减小, 南槽东站与长江口站总波能有所增加; 从平面上来看, 长江口站由于位于北槽航道外最靠近入海口, 所以其总波能总体上为 3 站最大; 南槽东站靠近浅滩, 总波能为 3 站最小, 约为长江口站的 1/3; 牛皮礁站总波能介于二者之间。3 站总波能的差异基本与所处位置(图 1)和水深(表 2)的差异一致, 其中南槽东水深最浅、波能最小, 牛皮礁水深其次且受到工程掩护作用、波能亦其次。

表 1 各站年总波能

年份	年总波能/GJ		
	牛皮礁站	南槽东站	长江口站
2016	92.1	27.4	199.4
2017	61.1	29.8	210.0
2018	81.8	—	—
2019	60.7	42.2	223.1

表 2 2019 年各站水深情况

站点	长江口	南槽东	牛波礁
水深/m	11.85	4.45	10.40

4 结论

1) 大通站近 4 a 年径流总量与往年平均值接近(2004—2019 年总量平均值约为 8 600 万  $\text{m}^3$ ); 年内月均流量存在明显变化规律, 最大月均流量出现在 7—8 月, 最小出现在 10 月至次年 2 月。

2) 北槽高、低潮位及潮位和潮差月平均值的年际变化相对较小, 年内存在明显变化规律, 呈单峰型分布, 且峰值出现在 8—10 月; 长江口潮汐动

力局部平面特征为南槽东月平均潮位最高、长江口站其次，南槽东月平均潮差最大、北槽中其次。

3)北槽中落急流速月平均值总体上大于涨急，且在6—8月达到峰值，而涨急流速则在6—8月达到低谷；落潮月平均流速整体上大于涨潮且年际差异较大；涨潮月平均流速在7月达到最小；落潮历时月平均值总体上大于涨潮且在6—8月达到峰值。

4)北槽水温年内变化规律明显，近4 a 最大值约为29.96℃，最小值约为7.51℃，二者相差22.45℃。

5)南槽东、牛皮礁、长江口这3站月平均有效波高及周期整体变化规律基本一致；从年内分布来看，有效波高变化较大、波周期变化较小；长江口站有效波高及波周期高于其他两站，南槽东站与牛皮礁站有效波高及波周期差异较小；3站总波能总体上来看南槽东站最小、长江口站最大，3站总波能与水深和所处地形位置密切相关。

参考文献：

[1] 郭磊城,朱春燕,何青,等.长江河口潮汐时空特征再分析[J].海洋通报,2017,36(6):652-661.

[2] 路川藤,陈志昌,罗小峰.长江口北槽潮波传播变化特征研究[J].长江科学院院报,2015,32(8):9-14.

[3] 付桂.长江口近期潮汐特征值变化及其原因分析[J].水运工程,2013(11):61-69.

[4] 杜亚南,朱巧云,吕志钢,等.长江口历年入海水量月年变化特征分析[J].水利水电快报,2019,40(10):8-12,29.

[5] 王利花,路鹏.大通水文站水沙变化特征分析[J].水

保持通报,2017,37(4):266-270.

[6] 曾天山,黄峰,秦智雅,等.长江干流枯水期极端流量变化特征研究[J].人民珠江,2017,38(1):31-34.

[7] 任剑波,何青,沈健,等.远区台风“三巴”对长江口波浪动力场的作用机制[J].海洋科学,2020,44(5):12-23.

[8] 王岳峰.深水航道工程对长江口波浪影响研究及多年一遇波浪要素计算[D].上海:上海海洋大学,2017.

[9] 方娟娟,李义天,孙昭华,等.长江大通站径流量变化特征分析[J].水电能源科学,2011,29(5):9-12,193.

[10] 汤宇,付桂.长江口深水航道治理工程对潮汐特性的影响[J].水运工程,2016(11):151-156.

[11] 黄华聪,贾晓,路川藤.影响长江口深水航道骤淤的非常态天气过程 I:台风的路径特征及数值验证[J].河海大学学报(自然科学版),2017,45(5):432-438.

[12] 矫阳,陈彬.开黄金水道,展经济宏图:长江口深水航道治理工程报告[J].中国工程咨询,2011(10):4-9.

[13] 刘杰,程海峰,韩露,等.流域水沙变化和人类活动对长江口河槽演变的影响[J].水利水运工程学报,2021(2):1-9.

[14] 史源,陶建峰,龚政,等.基于 EOF 法的长江口高潮位时空变化特征研究:长时间序列的高潮位 EOF 分析[J].海洋通报,2019,38(3):296-303.

[15] 胡方西,谷国传.中国沿岸海域月平均潮差变化规律[J].海洋与湖沼,1989,20(5):401-411.

[16] 刘新成,沈焕庭,杨清书.长江河口段潮差变化研究[J].华东师范大学学报(自然科学版),1999(2):90-95.

[17] 王艳萍,张为宇,田志光,等.东海表层水温年变化规律及其海洋学机理[J].海洋技术,2009,28(2):28-32.

[18] 魏茂兴.基于频域模型和时域模型的波浪能评估计算[D].天津:天津大学,2012.

(本文编辑 武亚庆)

· 消 息 ·

上航局投资建造的 2 艘耙吸挖泥船下水

近日，上航局投资建造的 2 艘 4 500 m<sup>3</sup> 耙吸挖泥船“航浚 4017”轮、“航浚 4018”轮在上海黄浦文冲船厂龙穴厂区顺利下水。2 艘耙吸挖泥船均属于新一代中小型、智能化耙吸挖泥船，具有吃水浅、能耗低、泥浆装载效率高等特点。2 艘挖泥船充分运用智能疏浚技术和 DP 动力定位技术，可实现一人、精准、高效疏浚的作业目标，属于聚焦沿海港口、航道疏浚实际需求的高新技术船型，能更好地服务于国内外最新疏浚需求。