

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2017.06.19

# 长江感潮河段潮汐变化特征

王文才<sup>1,2</sup>, 李一平<sup>1,2</sup>, 杜薇<sup>1,2</sup>, 曾伟峰<sup>1,2</sup>, 许益新<sup>1,2</sup>

(1. 河海大学环境学院, 江苏 南京 210098;

2. 河海大学浅水湖泊综合治理与资源开发教育部重点实验室, 江苏 南京 210098)

**摘要:**基于2011年长江下游大通水文站的逐日流量以及南京、镇江、江阴、天生港、徐六泾、共青圩6个潮位站的逐日高潮、低潮资料,研究海洋潮汐从河口向河段上游传播过程中的潮汐特征变化规律。结果表明,各潮位站25 h滑动平均的潮位变化与流量呈现相同的变化趋势,南京和镇江两个潮位站的水位变化最为明显,江阴、天生港、徐六泾的水位变化相对较小,共青圩潮位站的潮位基本不随径流发生相应的变化趋势;各潮位站之间均有一定的相关性,且相邻两个潮位站之间的水位相关性较高;随着潮位站之间距离的增大,水位的相关性呈现出明显的下降趋势;低水位的传播延迟时间均大于高水位的传播延迟时间;随着站点与入海口距离的增大,涨潮历时出现逐渐减小、落潮历时逐渐增大的变化趋势。

**关键词:**径流;潮汐;感潮河段;预报

中图分类号:P333

文献标志码:A

文章编号:1004-6933(2017)06-0121-04

## Tidal variation features of tidal reach of Changjiang River

WANG Wencai<sup>1,2</sup>, LI Yiping<sup>1,2</sup>, DU Wei<sup>1,2</sup>, ZENG Weifeng<sup>1,2</sup>, XU Yixin<sup>1,2</sup>

(1. College of Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Key Laboratory of Integrated Regulation and Resource Development on Shallow Lakes of Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract:**Based on the daily discharge of Datong station in the downstream of the Yangtze river and the high and low tidal water level of Nanjing, Zhenjiang, Tianshenggang, Xuliujing, Gongqingwei stations in 2011, this paper studied the tidal characteristics of ocean tides from the estuary to the upper reaches of the river. The results show that the tidal mean change of 25h sliding average of each tidal station shows the same trend as the discharge, the water level changes of two tide stations in Nanjing and Zhenjiang are the most obvious. Water level change of Jiangyin, Tianshenggang, Xuliujing stations is relatively small. The tidal water level of Gongqingwei station does not change with the runoff. There is a certain correlation between the tidal stations, and the correlation between the water level of the two adjacent tidal stations is higher. With the increase of the distance between tidal stations, the correlation of water levels shows a significant downward trend. Propagation delay time of low tidal level is greater than high tidal water level. Furthermore, with the increase of distance between the tidal stations and the estuary, flood tide duration displays the trend of gradual decrease while ebb tide duration presents the trend of gradual increase.

**Key words:** runoff; tide; tidal reach; forecast

基金项目:国家自然科学基金(51579071);创新研究群体科学基金(51421006);2016年度江苏省普通高校专业学位研究生实践创新计划项目(SJZZ16\_0089);江苏省“创新团队计划”;江苏高校优势学科建设工程资助项目

作者简介:王文才(1992—),男,硕士研究生,研究方向为环境科学。E-mail:591069468@qq.com

通信作者:李一平,教授。E-mail:liyiping@hhu.edu.cn.

地球上数量众多的河流与海洋直接相连,这些河流在靠近河口的区段受到下游海洋天文潮汐和上游径流量的共同作用,水动力变化过程比一般的内陆河流更加复杂<sup>[1-3]</sup>。潮波在感潮河段向上游传播时会受到底部摩擦,因河道地形宽深发生变化以及上游径流作用而发生改变<sup>[4-7]</sup>。揭示和理解外海潮汐通过河口向河流上游传播过程中的水动力变化规律,对感潮河段区间内的潮汐预报及河道、河口生态系统的管理具有重要意义<sup>[8-9]</sup>,也可以为区域内的防洪、灌溉、航运、引排水等提供决策支持。

长江下游是典型的感潮河段,且该河段主流上并没有阻隔水流的大型水利设施,故可以很好地让人们研究潮汐沿河口向上游传播过程中的变化特征。国内有众多的学者通过各种方法分析长江下游各潮位观测站的潮位变化规律,并给出观测站所在位置的潮位预测方法。林勋励<sup>[10]</sup>对1948—1980年大通水文站的流量以及长江下游江阴、天生、吴淞各潮位站的水位资料进行分析,发现江阴和天生港受径流影响而存在高水位期和低水位期,并通过建立大通水文站月平均流量与各潮位站月平均水位的相关关系,对各潮位站逐月、逐旬的潮汐预报进行了修正。李国芳等<sup>[11]</sup>基于长江口天生港、徐六泾、杨林3个潮位站的潮位以及上游大通站的日均流量资料,建立了各潮位站日均增水与大通流量增量之间的关系,并利用所得关系式,根据上游流量的大小,对潮汐预报模型计算的过去若干年的潮位进行校正,使日均潮位的预报精度得到了明显的提高。宋正逵等<sup>[12]</sup>采用传统的海洋潮汐调和分析方法对长江下游天生港潮位站的潮位进行预报,发现精度不高,经分析后建立了潮位预报误差与同期流量差值的关系,为天生港站潮位实时预报修正提供了依据。但这些研究大多注重对相关站点的潮位预测结果,而缺乏对潮汐沿程及潮汐本身特征的细致分析。本

文以2011年长江下游大通水文站的逐日流量以及南京、镇江、江阴、天生港、徐六泾、共青圩6个潮位站的逐日高潮、低潮资料为基础,细致研究海洋潮汐从河口向河段上游传播过程中的潮汐特征变化规律,以期为下游潮汐预报提供参考,为水利工程的优化调度提供决策支持。

### 1 研究区域概况

长江的感潮段通常指大通至入海口这一河段,其受上游径流和下游潮汐的共同作用(图1)。一般认为潮区界(水位随潮汐涨落的上界)在大通附近,并随着径流量、潮汐的变化而有所变化<sup>[13]</sup>,潮流界(水流所能达到的上界)位置随径流的变化而出现较大的摆动<sup>[14-16]</sup>。大通水文站作为下游流量控制站,流量随季节发生变化,多年平均流量为28 700 m<sup>3</sup>/s,历年最大径流量为92 600 m<sup>3</sup>/s,最小径流量4 260 m<sup>3</sup>/s<sup>[17]</sup>。下游南京、镇江、江阴、天生港、徐六泾、共青圩6个潮位站与大通水文站的距离分别为220、320、405、458、490、586 km<sup>[18]</sup>。本文通过这几个站的潮位资料来研究潮汐变化特征。

### 2 材料与方法

基于2011年大通水文站逐日的日均径流量以及下游南京、镇江、江阴、天生港、徐六泾、共青圩6个潮位站的高潮、低潮潮位及发生时刻的资料,采用cubic插值方法得到逐时潮位,另外考虑到一个太阴日为24 h 50 min,计算25 h滑动平均潮位,这可以过滤M2、K2等高频潮波,从而保留一些相对低频、周期较长的潮波<sup>[19]</sup>。这样处理有助于反映径流影响下的水位变化特征。计算各潮位站滑动平均水位之间的相关系数,就可得到相应的相关系数矩阵,以便分析各潮位站之间的关联程度。笔者以主要受潮汐影响的共青圩潮位站为参考,统计分析潮差、高低潮

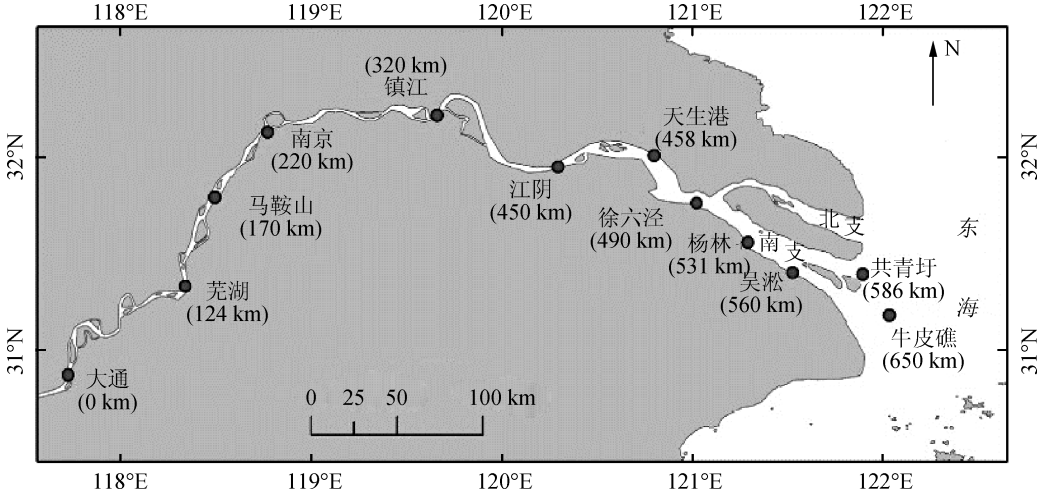


图1 研究区域

延时等的沿程变化,并给出相应的拟合公式。

3 结果与讨论

3.1 径流及水位特征

2011 年全年呈现出偏枯情况,大通年初径流量为 15300 m<sup>3</sup>/s。前 5 个月径流量基本稳定在 15 000 m<sup>3</sup>/s 左右,从六月份开始径流量呈现逐渐增大的趋势,并于 6 月 22 日达到峰值 46 000 m<sup>3</sup>/s,之后径流量逐渐下降至年末的 12 400 m<sup>3</sup>/s,当年平均径流量为 21 143 m<sup>3</sup>/s (图 2)。各潮位站 25 h 滑动平均的潮位变化与流量呈现相同的变化趋势,南京和镇江两个潮位站的水位变化最为明显,江阴、天生港、徐六泾的水位变化相对较小,共青圩潮位站的潮位基本不随径流发生相应的变化趋势(图 3)。

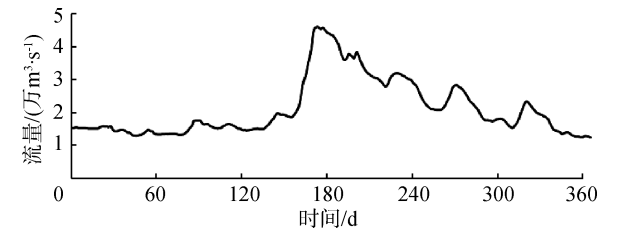


图 2 2011 年逐日的日均流量变化过程

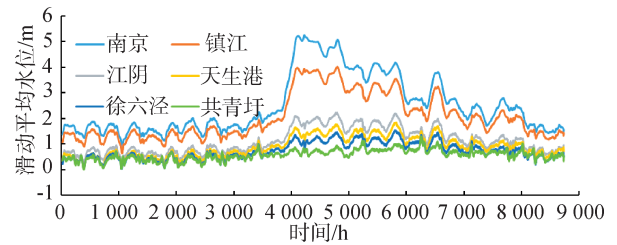


图 3 各潮位站滑动平均水位变化过程

分析各潮位站之间 25 h 滑动平均水位之间的相关性,分析结果见表 1。从表 1 可以看出,各潮位站之间均有一定的相关性,满足显著性检验  $p < 0.05$ ,且相邻两个潮位站之间的水位相关性较高;随着潮位站之间距离的增大,水位的相关性呈现出明显的下降趋势;共青圩潮位站与各潮位站水位之间的相关性均小于 0.9。

表 1 各潮位站滑动平均水位相关系数矩阵

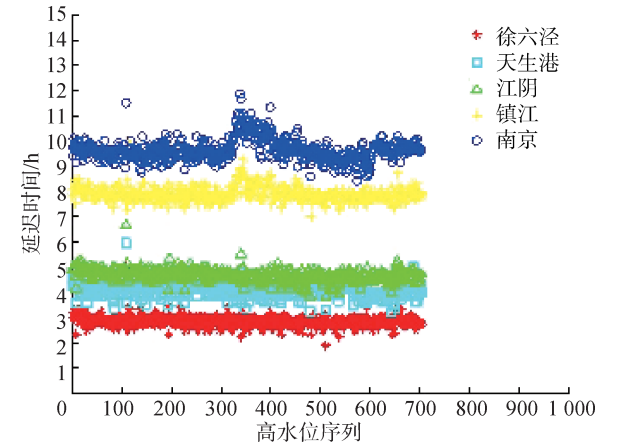
| 站点名称 | 南京 | 镇江    | 江阴    | 天生    | 徐六泾   | 共青圩   |
|------|----|-------|-------|-------|-------|-------|
| 南 京  | 1  | 0.996 | 0.956 | 0.915 | 0.888 | 0.664 |
| 镇 江  |    | 1     | 0.978 | 0.946 | 0.922 | 0.711 |
| 江 阴  |    |       | 1     | 0.990 | 0.979 | 0.813 |
| 天生港  |    |       |       | 1     | 0.991 | 0.862 |
| 徐六泾  |    |       |       |       | 1     | 0.894 |
| 共青圩  |    |       |       |       |       | 1     |

3.2 潮位延时特征

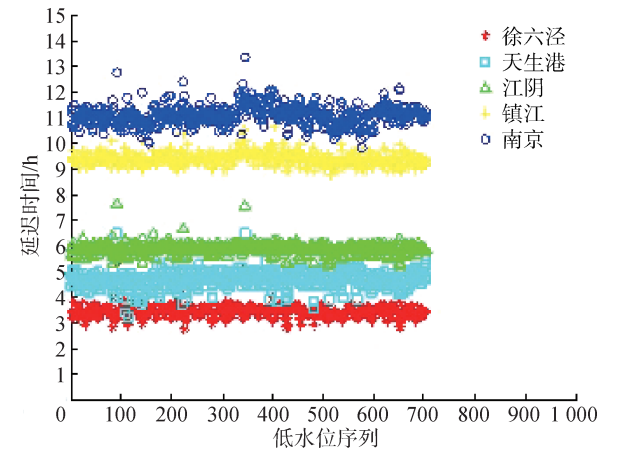
以共青圩为参考潮位站,统计各潮位站高潮位、低潮位到达时间,并计算高潮位、低潮位从共青圩站传播到相应站点所需要的时间,以此作为高低潮位

的延迟时间。从结果(图 4)可以看出,低水位的传播延迟时间均大于高水位的传播延迟时间;除南京和镇江潮位站外,其他潮位站的水位延迟并不随径流量的变化而呈现显著的变化。

计算全年的高水位、低水位传播的平均延时,计算结果见表 2。从表 2 可以发现,与共青圩相比,徐六泾、天生港、江阴、镇江、南京的低水位延时分别为 3.46、4.71、5.89、9.42 和 11.09h,高水位的延时分别为 2.87、4.05、4.68、7.91 和 9.65h。采用二次多项式进行拟合,得到高、低水位传播延时与相应站点距共青圩距离的拟合公式,其具有较好的效果,可以反映高、低水位沿程传播的过程(图 5)。



(a) 高水位传播延时



(b) 低水位传播延时

图 4 高、低水位从共青圩向上游传播到相应站点的延时

表 2 高、低水位从共青圩传播至相应点位的平均延时

| 站点名称 | 距离/km | 低水位平均延时/h | 高水位平均延时/h |
|------|-------|-----------|-----------|
| 共青圩  | 0     | 0         | 0         |
| 徐六泾  | 96    | 3.46      | 2.87      |
| 天生港  | 128   | 4.71      | 4.05      |
| 江 阴  | 181   | 5.89      | 4.68      |
| 镇 江  | 266   | 9.42      | 7.91      |
| 南 京  | 366   | 11.09     | 9.65      |

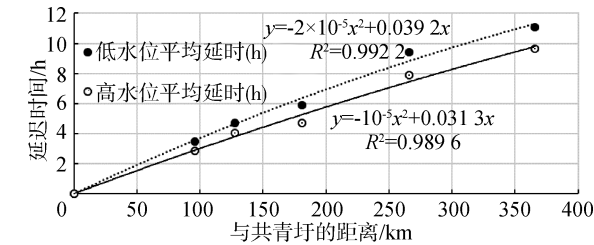


图 5 高低水位传播的平均延时随传播距离的变化

3.3 涨落潮历时及潮差特征

统计潮位站的涨落潮平均历时,可以发现随着站点与入海口距离的增大,涨潮历时出现逐渐减小,落潮历时逐渐增大的变化趋势(表 3),这也符合河口地区潮汐的变化特征<sup>[20]</sup>。其中,到最上游南京站与到镇江站相比,涨潮历时并没有减小,反而出现微弱上升。这与俞慕耕<sup>[21]</sup>对长江下游潮汐的统计结果基本一致,但目前并没有相关研究来揭示其原因。与前人的统计结果对比,本研究发现各潮位站的平均潮差要偏大,这是因为 2011 年为偏枯水年,径流量较小,潮汐动力作用较强,造成平均潮差相对较大。

表 3 各潮位站涨落潮平均历时与平均潮差的情况

| 站点名称 | 距离/km   | 涨潮平均<br>历时/h | 落潮平均<br>历时/h | 平均潮差/<br>m |
|------|---------|--------------|--------------|------------|
| 共青圩  | 0.000   | 5.020        | 7.399        | 2.311      |
| 徐六泾  | 96.000  | 4.421        | 7.998        | 2.151      |
| 天生港  | 128.000 | 4.364        | 8.054        | 1.974      |
| 江 阴  | 181.000 | 3.811        | 8.608        | 1.865      |
| 镇 江  | 266.000 | 3.505        | 8.913        | 1.093      |
| 南 京  | 366.000 | 3.574        | 8.844        | 0.738      |

对各站潮位进行归一化处理后建立的相对潮差与站点距共青圩潮位站距离的二次拟合关系,可以较好地反映潮差的变化,可以在一定程度上根据共青圩的潮位预测其上游给定位置的潮差情况(图 6)。

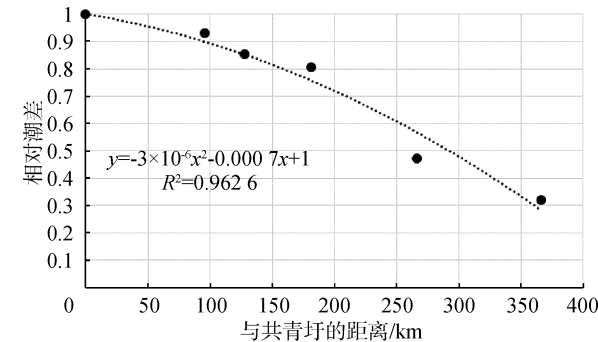


图 6 相对潮差随距离的变化关系

4 结 论

a. 潮汐从共青圩向上游传播的过程中,高水位的延迟小于低水位延迟,高、低水位各自的平均延迟时间可以通过二次多项式建立其与相应位置距共青圩距离的函数关系,用于预测河段不同位置的高、低

潮到达时间。

b. 南京、镇江的高、低水位的延迟时间受到径流增大影响而相应增长,江阴及下游潮位站的高、低水位延迟受径流影响较小。

c. 镇江以下,长江下游河段沿入海口向上游的涨潮历时逐渐缩短、落潮历时逐渐增加;镇江以上,涨落潮历时与下游相比并不出现明显的缩短和增加,具体原因还需进一步研究。

d. 上游各站的相对潮差可以和其与共青圩的距离建立二次拟合关系,用于预测沿程的相应潮差变化。

本文主要是基于 2011 年水文资料对长江感潮段的潮位变化特征进行分析研究,结果可能存在一定的局限性,后续还需要进行更深入完整的研究。

参考文献:

[ 1 ] DRONKERS J J. Tidal computations in rivers and coastal waters[ M]. Amsterdam:North-Holland Pub. Co. ,1964.

[ 2 ] LEBLOND P H. On tidal propagation in shallow rivers [ J]. Journal of Geophysical Research: Oceans ( 1978-2012 ),1978,83( C9 ):4717-4721.

[ 3 ] JAY D A. Green’s law revisited: tidal long-wave propagation in channels with strong topography [ J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 1991, 96( C11 ):20585-20598.

[ 4 ] FRIEDRICHS C T, AUBREY D G. Tidal propagation in strongly convergent channels [ J]. Journal of Geophysical Research:Oceans (1978-2012), 1994,99( C2 ):3321-3336.

[ 5 ] HORREVOETS A C,SAVENIJE H,SCHUURMAN J N,et al. The influence of river discharge on tidal damping in alluvial estuaries [ J]. Journal of Hydrology, 2004, 294( 4 ):213-228.

[ 6 ] 王远坤,王栋. 基于样本熵理论的长江干流径流序列复杂性分析[ J]. 河海大学学报( 自然科学版),2015,43( 3 ):203-207. ( WANG Yuankun,WANG Dong. Analysis of complexity of runoff series based on sample entropy in Yangtze River[ J]. Journal of Hohai University ( Natural Sciences ),2015,43( 3 ):203-207. ( in Chinese) )

[ 7 ] 田威,邱利,李一平. 基于 EFDC 模型的感潮江段溢油事故风险预测[ J]. 水资源保护,2015,31( 6 ):98-102. ( TIAN Wei,QIU Li,LI Yiping. Prediction of oil spill risk on tide sect of Yangtze River based on EFDC model [ J]. Water Resources Protection,2015,31( 6 ):98-102. ( in Chinese) )

[ 8 ] KUKULKA T, JAY D A. Impacts of Columbia River discharge on salmonid habitat: 1. a nonstationary fluvial tide model [ J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres,2003,108( C9 ):351-378.

[ 9 ] KUKULKA T, JAY D A. Impacts of Columbia River discharge on salmonid habitat:2. Changes in shallow-water habitat [ J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2003,108:351-378.

( 下转第 132 页)

- [ 6 ] 陈建标,钱小娟,朱友银,等.南通市引江调水对河网水环境改善效果的模拟[J].水资源保护,2014,30(1):38-42. ( CHEN Jianbiao, QIAN Xiaojuan, ZHU Youyin, et al. Simulation of improvement of water environment in river network of Nantong City by water diversion from Yangtze River[J]. Water Resources Protection, 2014, 30(1): 38-42. (in Chinese))
- [ 7 ] 陈浩,王飞,施巍巍.苏州古城区水环境改善方案研究:自流活水之配水工程[J].水利规划与设计,2015(7):86-89. ( CHEN Hao, WANG Fei, SHI Weiwei. Planning research of water environment improvement in Suzhou ancient city: the water distribution project[J]. Water Resources Planning and Design, 2015(7): 86-89. (in Chinese))
- [ 8 ] 吴浩云.大型平原河网地区水量水质耦合模拟及联合调度研究[D].南京:河海大学,2006.
- [ 9 ] 丁一,贾海峰,丁永伟,等.基于 EFDC 模型的水乡城镇水网水动力优化调控研究[J].环境科学学报,2016,36(4):1440-1446. ( DING Yi, JIA Haifeng, DING Yongwei, et al. Hydrodynamic optimization of urban river network of water towns based on EFDC model[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2016, 36(4): 1440-1446. (in Chinese))
- [ 10 ] 殷洪,钱新,姚红,等.基于水质模型的河流水环境调控方案效果评估:以太浦河为例[J].环境保护科学,2015,41(2):48-52,66. ( YIN Hong, QIAN Xin, YAO Hong, et al. Effect evaluation of the river water environmental risk prevention and control based on WASP by taking Taipu River as an example[J]. Environmental Protection Science, 2015, 41(2): 48-52, 66. (in Chinese))
- [ 11 ] 郭鹏程,轩晓博,闫大鹏.基于 EFDC 模型的人工湖水质保最佳运行方式研究[J].水资源保护,2014,30(1):53-56. ( GUO Pengcheng, XUAN Xiaobo, YAN Dapeng. Optimal scheme of water quality assurance in artificial lakes based on EFDC model[J]. Water Resources Protection, 2014, 30(1): 53-56. (in Chinese))
- [ 12 ] 国家环境保护总局. GB 3838—2002 地表水环境质量标准[S].北京:中国环境科学出版社,2002.
- [ 13 ] 中华人民共和国住房和城乡建设部,中华人民共和国环境保护部.城市黑臭水体整治工作指南[R].北京:中华人民共和国住房和城乡建设部,中华人民共和国环境保护部,2015.
- [ 14 ] 江苏省环境保护委员会.黑臭河道治理标准[R].南京:江苏省环境保护委员会,2014.
- [ 15 ] 太湖流域管理局.太湖流域综合规划(2012-2030)[R].上海:太湖流域管理局,2013.
- [ 16 ] 江苏省太湖水利规划设计研究院有限公司.七浦塘拓浚整治工程可行性研究报告[R].苏州:江苏省太湖水利规划设计研究院有限公司,2011.

(收稿日期:2016-11-20 编辑:彭桃英)

(上接第 124 页)

- [ 10 ] 林勋勋.长江口天文潮预报修正的一种方法[J].海洋预报,1985(1):38-46. ( LIN Xunli. A method of updating the astronomical tide forecast in the Yangtze River Estuary[J]. Marine Forecast Service, 1985(1): 38-46. (in Chinese))
- [ 11 ] 李国芳,谭亚,张秀菊.感潮河段上游流量对潮位预报的影响[J].河海大学学报(自然科学版),2006,34(2):144-147. ( LI Guofang, TAN Ya, ZHANG Xiuju. Influence of upstream discharge in tidal level prediction for tidal reaches[J]. Journal of Hohai University( Natural Sciences), 2006, 34(2): 144-147. (in Chinese))
- [ 12 ] 宋正逵,黄利亚,仇娟娟.长江上游径流对天生港站潮位影响浅析[J].水文,2010,30(4):56-58. ( SONG Zhengkui, HUANG Liya, QIU Juanjuan. Influence of runoff from upper reaches of Yangtze River on tidal level at Tianshenggang Station[J]. Journal of Chinese Hydrology, 2010, 30(4): 56-58. (in Chinese))
- [ 13 ] 徐汉兴,樊连法,顾明杰.对长江潮区界与潮流界的研究[J].水运工程,2012(6):15-20. ( XU Hanxing, Fan Lianfa, GU Mingjie. On tidal mark and tidal current mark in the Yangtze River[J]. Port & Waterway Engineering, 2012(6): 15-20. (in Chinese))
- [ 14 ] 侯成程,朱建荣.长江河口潮流界与径流量定量关系研究[J].华东师范大学学报(自然科学版),2013(5):18-26. ( HOU Chengcheng, ZHU Jianrong. Study on the quantitative relationship of the location of the tidal current limit and the river discharge in the Changjiang Estuary[J]. Journal of East China Normal University( Natural Science), 2013(5): 18-26. (in Chinese))
- [ 15 ] 杨云平,李义天,韩剑桥,等.长江口潮区和潮流界面变化及对工程响应[J].泥沙研究,2012(6):46-51. ( YANG Yunping, LI Yitian, HAN Jianqiao, et al. Variation of tide limit and tidal current limit in Yangtze Estuary and its impact on projects[J]. Journal of Sediment Research, 2012(6): 46-51. (in Chinese))
- [ 16 ] 宋兰兰.长江潮流界位置探讨[J].水文,2002,22(5):25-26. ( SONG Lanlan. Research on the location of tidal current limit of Yangtze River[J]. Journal of Chinese Hydrology, 2002, 22(5): 25-26. (in Chinese))
- [ 17 ] 夏云峰,闻云呈,梁婷.长江下游典型代表性潮型选择研究初探[C].//水道与港口工程国际学术研讨会论文集.天津:交通运输部天津水运工程科学研究院,2011:501-505.
- [ 18 ] GUO L, WEGEN M V D, JAY D A, et al. River-tide dynamics: exploration of nonstationary and nonlinear tidal behavior in the Yangtze River estuary: river tidal dynamics[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2015, 120(5): 3499-3521.
- [ 19 ] GODIN G. The analysis of tides[M]. Toronto, Buffalo: University of Toronto Press, 1972: 1005-1012.
- [ 20 ] 陈宗镛.潮汐学[M].北京:科学出版社,1980.
- [ 21 ] 俞慕耕.我国沿海潮汐的特点[C].//第一届潮汐与海平面学术讨论会论文集.天津:海洋局海洋科技情报研究所,1986.

(收稿日期:2017-01-09 编辑:彭桃英)