

杭州湾天文潮长周期变化对涌潮的影响

鲁海燕^{1,2}, 潘存鸿^{1,2}, 陈刚^{1,2}

(1. 浙江省水利河口研究院(浙江省海洋规划设计研究院), 浙江 杭州 310020;
2. 浙江省河口海岸重点实验室, 浙江 杭州 310020)

摘要:基于长系列实测潮汐资料 and 调和分析方法, 分析了涌潮起潮点下游杭州湾实测潮汐和天文潮长周期变化, 进而分析了天文潮变化对钱塘江涌潮的影响。结果表明: 乍浦站实测潮汐每年八月初三和八月十八同日同潮实测潮差、潮到时间和涨潮历时变化幅度很大, 最大变幅分别为 1.95 m、102 min 和 122 min; 乍浦站天文潮每年八月初三和八月十八同日同潮潮差、潮到时间和涨潮历时最大变幅分别为 1.52 m、93 min 和 46 min。天文潮变化对涌潮影响很大, 盐官站同日同潮涌潮高度最大相差 1.12 m, 涌潮到达时间最大相差 93 min, 涌潮流速最大相差 2.05 m/s, 涌潮陡度最大相差 18.1%。

关键词:天文潮; 涌潮; 潮差; 潮到时间; 涨潮历时; 调和分析方法; 杭州湾

中图分类号:P731.23 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2023)04-0025-06

Influence of long-period variation of astronomical tide on tidal bore in Hangzhou Bay//LU Haiyan^{1,2}, PAN Cunhong^{1,2}, CHEN Gang^{1,2} (1. Zhejiang Institute of Hydraulics and Estuary (Zhejiang Institute of Marine Planning and Design), Hangzhou 310020, China; 2. Zhejiang Provincial Key Laboratory of Estuary and Coast, Hangzhou 310020, China)

Abstract: Based on long series of measured tidal data and the harmonic analysis method, the long-period variation of the measured tide and astronomical tide downstream of the starting point of tidal bore in Hangzhou Bay were analyzed, and then the influence of astronomical tidal changes on the tidal bore in the Qiantang River was analyzed. The results show that the measured tidal range, tidal arrival time and flood tidal duration of the Zhapu station at the same day and the same tide on 3rd and 18th in lunar August each year vary greatly, with the maximum amplitudes of 1.95 m, 102 min and 122 min, respectively. The maximum variation of tidal range, tidal arrival time and duration of high tide on the same day and the same tide on the 3rd and 18th in lunar August each year at the Zhapu station are 1.52 m, 93 min and 46 min, respectively. The variation of astronomical tide has great influence on the tidal bore. The maximum difference of tidal bore height, arrival time, velocity and steepness of tidal bore at the Yanguan station on the same day and the same tide are 1.12 m, 93 min, 2.05 m/s and 18.1%, respectively.

Key words: astronomical tide; tidal bore; tidal range; tidal arrival time; flood tidal duration; harmonic analysis method; Hangzhou Bay

涌潮是潮波的前端, 东海潮波传入杭州湾后, 受喇叭形岸线约束和浅水效应影响, 沿程潮波能量聚集, 潮差增加, 潮波变形加剧, 在杭州湾湾顶澉浦上游约 5 km 处形成闻名于世的钱塘江涌潮, 其后逐渐增强, 至曹娥江口—盐官河段达到最大, 向上游逐渐减弱, 最远可上溯至闻堰与富阳之间, 从涌潮的生成至最后消失, 全长超过 120 km, 如图 1 所示。钱塘江河口两岸社会经济活动密集, 人类活动频繁, 钱塘江

涌潮保护和涌潮预报的需求较大。杭州湾潮汐特性对涌潮高度、涌潮陡度、涌潮到达时间等要素产生重要影响, 分析其与涌潮的响应关系以及对涌潮的影响, 关系到涌潮预测、预报的准确性。根据已有研究成果, 影响涌潮的主要因素有天文潮、河床地形、径流和气象因素等, 其中天文潮是影响涌潮最重要的因素。因此, 研究天文潮变化对涌潮的影响既有较大的学术价值, 又对涌潮预报等具有重要的实际意义。

基金项目:国家自然科学基金项目(42276176); 浙江省水利联合基金重点项目(LZJWZ22E090002, LZJWZ23E090006)
作者简介:鲁海燕(1976—), 女, 正高级工程师, 硕士, 主要从事水沙数值模拟研究。E-mail: luh902@sina.com
通信作者:潘存鸿(1963—), 男, 正高级工程师, 博士, 主要从事河口海岸水沙研究。E-mail: panch@zjwater.gov.cn

近几十年来,许多学者采用现场观测^[1-3]、理论研究^[4]、数值模型^[5-6]和物理模型^[7-8]等研究手段,围绕涌潮保护和防灾,开展了涌潮水动力特性^[1-3]、水力学结构^[7,9]、传播规律^[10]、涌潮成因^[4,11-12]、涌潮作用下的泥沙输移^[13-14]和盐水入侵^[15]、涌潮与工程相互作用^[16]等多角度的涌潮研究。由于受外海潮汐(天文潮)^[1]、河床地形^[17]、径流^[18]和气象因素^[19]等的影响,钱塘江涌潮存在半月、年内、年际等多周期变化。在上述涌潮影响因素中,尤以潮汐最为重要。强涌潮基本上都发生在天文大潮期,实际的海洋潮汐,大潮发生在朔望后2~3 d,即每月农历的初二、初三、十六、十七、十八的涌潮为当月最大。基于实测潮汐资料,周黔生^[20]定性分析了钱塘江杭州段涌潮到达时间、涌潮高度和传播速度等规律;谢东风等^[1]基于实测潮汐和涌潮资料建立了钱塘江盐官河段6个站的涌潮高度与当地潮差的关系;曾剑等^[21]建立了钱塘江盐官站涌潮影响因素的神经网络模型,分析了盐官站涌潮高度与下游澉浦站实测潮汐的关系。

已有研究大多针对耦合了天文潮、气象、人类活动等各因素的实测潮汐对涌潮的综合影响,对于杭州湾潮汐天文潮对涌潮的影响尚未见报道。本文基于钱塘江涌潮起潮点下游的杭州湾乍浦站 1971—2008 年长周期时间系列实测潮汐资料,分析了以秋季大潮期八月初三和十八两天为典型代表的潮汐变化特点,并采用调和分析方法预报了 1971—2008 年的乍浦天文潮,探讨其潮差、潮到时间和涨潮历时等变化规律,应用实测资料建立乍浦站潮汐特性与盐官站涌潮要素的响应关系,进而分析杭州湾天文潮变化对涌潮的影响。

1 影响涌潮特征的杭州湾潮汐实测资料分析

为分析涌潮起潮点下游杭州湾潮汐变化对涌潮的影响,选取具有长系列、数据可靠的实测潮汐资料的乍浦站作为代表站,该站位于目前涌潮起潮点下

游约 35 km,见图 1。考虑到月球白道面与地球黄道面之间的夹角,其变化周期为 18.61 a,即最长的分潮周期为 18.61 a,称之为长周期,同时为尽量减少钱塘江河口治江缩窄的影响,考虑钱塘江涌潮往往在农历八月初三和十八为最大,因此,选取 1971—2008 年(两个 19 年)每年农历八月初三和八月十八分析潮汐变化。鉴于潮汐中的潮差、潮到时间和涨潮历时对涌潮影响最大,重点分析这 3 个因素的变化。



图1 钱塘江河口形势

表 1 为 1971—2008 年八月初三和八月十八日潮和夜潮潮差、潮到时间和涨潮历时统计表。由表可知:①八月初三日潮和夜潮最大潮差分别为 7.12 m 和 7.58 m,最小潮差均为 5.63 m,最大与最小潮差之差分别为 1.49 m 和 1.95 m;八月十八日潮和夜潮最大潮差分别为 7.07 m 和 6.97 m,最小潮差分别为 5.45 m 和 5.26 m,最大与最小潮差之差分别为 1.62 m 和 1.71 m。受人类活动等影响,潮差有增大趋势^[22],后 19 年(1990—2008 年)比前 19 年(1970—1989 年)平均增大 0.21 m,这与已有研究成果是一致的。②八月初三日潮潮到时间最早和最迟分别为 8:40 和 9:47,两者相差 67 min;夜潮潮到时间最早和最迟分别为 20:00 和 21:42,两者相差 102 min;八月十八日潮潮到时间最早和最迟分别为 8:32 和 10:10,两者相差 98 min;夜潮潮到时间最早和最迟分别为 20:20 和 21:57,两者相差 97 min。后

表 1 乍浦站实测潮汐特征长周期变化

潮汐	时间	潮差/m			潮到时间			涨潮历时/min		
		平均	最小	最大	平均	最早	最迟	平均	最小	最大
八月初三日潮	1971—1989 年	6.04	5.63	6.53	9:16	8:48	9:47	297	265	324
	1990—2008 年	6.33	5.76	7.12	9:09	8:40	9:45	306	277	322
	1971—2008 年	6.18	5.63	7.12	9:13	8:40	9:47	301	265	324
八月初三夜潮	1971—1989 年	6.33	5.84	7.21	20:49	20:00	21:28	307	257	375
	1990—2008 年	6.46	5.63	7.58	21:16	20:42	21:42	308	278	328
	1971—2008 年	6.39	5.63	7.58	21:03	20:00	21:42	308	257	375
八月十八日潮	1971—1989 年	6.18	5.45	6.82	9:17	8:48	10:10	305	270	358
	1990—2008 年	6.47	5.91	7.07	9:10	8:32	9:52	301	236	325
	1971—2008 年	6.32	5.45	7.07	9:13	8:32	10:10	303	236	358
八月十八夜潮	1971—1989 年	6.00	5.43	6.72	20:57	20:20	21:50	303	277	350
	1990—2008 年	6.13	5.26	6.97	21:15	20:43	21:57	312	282	367
	1971—2008 年	6.06	5.26	6.97	21:06	20:20	21:57	307	277	367

19 年与前 19 年相比,日潮潮到时间提前,夜潮潮到时间推迟。③八月初三日潮和夜潮涨潮历时最大分别为 324 min 和 375 min,最小分别为 265 min 和 257 min,最大与最小涨潮历时之差分别为 59 min 和 118 min;八月十八日潮和夜潮涨潮历时最大分别为 358 min 和 367 min,最小分别为 236 min 和 277 min,最大与最小涨潮历时之差分别为 122 min 和 90 min,后 19 年与前 19 年相比,平均相差在 5 min 以内。

综上所述,无论是潮差、潮到时间,还是涨潮历时,实测数据年际之间变幅都很大。但对于潮到时间,后 19 年与前 19 年相比,日潮和夜潮的潮到时间均在相对固定的范围内变化,如八月初三乍浦站的日潮基本在 8:40~9:47 的时间区间到达,而夜潮基本在 20:00~21:42 的时间区间到达,八月十八的潮到时间也有类似的特点;对于涨潮历时,后 19 年与前 19 年相比,平均的涨潮历时变幅在 5 min 以内。上述潮汐特性给涌潮预报带来了希望和挑战。

2 杭州湾天文潮长周期变化

鉴于实测资料受气象等因素影响较大,采用潮汐调和和分析方法探讨乍浦站天文潮的长周期变化。考虑到最长的分潮周期为 18.61 a,故选用 19 年的潮位数据进行调和和分析。为尽量减少人类活动导致的岸线及地形变化对潮汐的影响,选取人类活动影响较小的乍浦站 1971—1989 年逐时潮位数据进行调和和分析。

基于 19 年资料长度的调和常数,对乍浦站 1971—1989 年和 1990—2008 年连续 38 年的潮汐数据进行预报,统计每年八月初三及八月十八两次大潮的潮差、潮到时间和涨潮历时等影响涌潮的特征

参数,分析潮汐特征值的差异和变化规律,以分析乍浦站天文潮长周期变化特性。表 2 和表 3 为 1971—1989 年与 1990—2008 年潮差、潮到时间和涨潮历时的对比。

由表 2 和表 3 可知:

a. 通过对潮差、潮到时间和涨潮历时等特征值的对比分析,可以看出两个 19 年潮汐特征值表现出较好的周期性。前、后 19 年八月初三日潮和夜潮的平均潮差差值分别为-0.02 m 和 0.00 m,平均潮到时间的差异分别为 1 min 和-1 min(“-”表示提早),涨潮历时的差异分别为-4 min 和 2 min。前、后 19 年八月十八日潮和夜潮潮差的差异分别为-0.03 m 和-0.05 m,潮到时间的差异均为 4 min,涨潮历时的差异分别为-2 min 和 2 min。

b. 前、后 19 年的八月初三日潮和夜潮最大潮差分别为 6.58m 和 6.73m,最小潮差分别为 5.06 m 和 5.54 m,最大与最小潮差之差分别为 1.52 m 和 1.19 m;八月十八日潮和夜潮最大潮差分别为 6.73 m 和 6.52 m,最小潮差分别为 5.21 m 和 5.32 m,最大与最小潮差之差分别为 1.52 m 和 1.20 m。

c. 前、后 19 年的八月初三日潮潮到时间最早和最迟分别为 8:21 和 9:33,两者相差 72 min;夜潮潮到时间最早和最迟分别为 19:41 和 21:02,两者相差 81 min;八月十八日潮潮到时间最早和最迟分别为 8:31 和 9:50,两者相差 79 min;夜潮潮到时间最早和最迟分别为 20:00 和 21:33,两者相差 93 min。

d. 前、后 19 年的八月初三日潮涨潮历时最短与最长分别为 319 min 和 345 min,两者之差为

表 2 乍浦站天文潮前、后 19 年特征值变化

潮汐	潮差变化/m	潮到时间变化/min	涨潮历时变化/min	潮汐	潮差变化/m	潮到时间变化/min	涨潮历时变化/min
八月初三日潮	-0.02	1	-4	八月十八日潮	-0.03	4	-2
八月初三夜潮	0	-1	2	八月十八夜潮	-0.05	4	2

表 3 乍浦站天文潮潮汐特征长周期变化

潮汐	时间	潮差/m			潮到时间			涨潮历时/min		
		平均	最小	最大	平均	最早	最迟	平均	最小	最大
八月初三日潮	1971—1989 年	5.85	5.29	6.58	8:57	8:36	9:33	334	321	345
	1990—2008 年	5.83	5.06	6.54	8:58	8:21	9:32	330	319	338
	1971—2008 年	5.84	5.06	6.58	8:58	8:21	9:33	332	319	345
八月初三夜潮	1971—1989 年	6.19	5.62	6.73	20:32	20:13	20:54	330	314	343
	1990—2008 年	6.19	5.54	6.72	20:31	19:41	21:02	332	320	360
	1971—2008 年	6.19	5.54	6.73	20:32	19:41	21:02	331	314	360
八月十八日潮	1971—1989 年	6.09	5.21	6.69	8:59	8:31	9:41	333	313	344
	1990—2008 年	6.06	5.44	6.73	9:03	8:33	9:50	331	315	346
	1971—2008 年	6.08	5.21	6.73	9:03	8:33	9:50	332	313	346
八月十八夜潮	1971—1989 年	5.93	5.32	6.52	20:39	20:00	21:21	331	322	338
	1990—2008 年	5.88	5.32	6.30	20:43	20:05	21:33	333	315	345
	1971—2008 年	5.91	5.32	6.52	20:41	20:00	21:33	332	315	345

26 min;八月初三夜潮涨潮历时最短与最长分别为 314 min 和 360 min,两者之差为 46 min。八月十八日潮涨潮历时最短与最长分别为 313 min 和 346 min,两者之差为 33 min;八月十八夜潮涨潮历时最短与最长分别为 315 min 和 345 min,两者之差为 30 min。

e. 38 年的八月初三日潮和夜潮的平均潮差分别为 5.84 m 和 6.19 m,夜潮平均潮差比日潮大 0.35 m,38 年中有 35 年数据夜潮潮差大于日潮潮差;八月十八日潮和夜潮的平均潮差分别为 6.08 m 和 5.91 m,夜潮平均潮差比日潮小 0.17 m,38 年中只有 10 年数据夜潮潮差大于日潮潮差。

3 杭州湾天文潮变化对涌潮的影响

3.1 对涌潮高度的影响

观潮胜地盐官位于乍浦上游约 76 km,在非洪水期,盐官和乍浦两站的潮汐特征具有很好的相关性。基于两站同步实测潮位资料,得到盐官站潮差 A_y 与乍浦站潮差 A_z 的关系式为

$$A_y = 0.78A_z - 0.29 \quad (1)$$

两者相关系数达 0.98,见图 2。潮差是影响涌潮高度的最重要因素,在其他条件相同情况下,潮差越大,涌潮越强。根据 2010 年 10 月盐官站涌潮实测资料,盐官站涌潮高度 Δh 与盐官站潮差的关系式为(相关系数为 0.98)^[1]

$$\Delta h = 0.95A_y - 2.24 \quad (2)$$

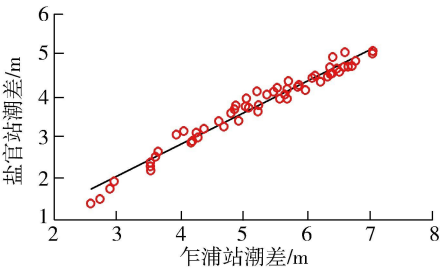


图 2 盐官站潮差与乍浦站潮差关系

根据式(1)(2)得到盐官站涌潮高度与乍浦站潮差的关系式为

$$\Delta h = 0.74A_z - 2.52 \quad (3)$$

根据前文分析,乍浦站潮差八月初三日潮、夜潮最大相差分别为 1.52 m 和 1.19 m,八月十八日潮、夜潮最大相差分别为 1.52 m 和 1.20 m。根据式(3),得到盐官涌潮高度八月初三日潮、夜潮最大分别相差 1.12 m 和 0.88 m,八月十八日潮、夜潮最大分别相差 1.12 m 和 0.89 m。而大潮期盐官的涌潮高度一般小于 2 m,说明天文潮变化对盐官涌潮高度的影响很大。

3.2 对涌潮到达时间的影响

涌潮到达时间是涌潮预报最重要的指标,其对

观潮具有非常重要的意义。在涌潮河段,涌潮到达时间即为潮到时间。盐官站涌潮到达时间既受下游乍浦站潮到时间的影响,也受乍浦站至盐官站涌潮传播速度的影响。若不考虑乍浦站至盐官站涌潮传播速度变化,则盐官站涌潮到达时间完全取决于乍浦站潮到时间。根据前文分析,乍浦站八月初三日潮、夜潮潮到时间最大分别相差 72 min 和 81 min,八月十八日潮、夜潮潮到时间最大分别相差 79 min 和 93 min。因此,盐官站涌潮到达时间最大也相差 93 min。

3.3 对涌潮流速的影响

涌潮过境时,潮位陡涨,流速迅速从落潮流转变为涨潮流,并在数分钟至数十分钟内流速达到极值,即为涌潮流速。涌潮流速与当地潮差成正相关关系,基于盐官站 2010 年 10 月 10—17 日(农历九月初三至初十)连续 8 天的潮位、流速同步观测资料(图 3),得到盐官站涌潮流速 v_y 与当地潮差 A_y 的关系式为(相关系数为 0.98)

$$v_y = 1.35A_y - 1.5 \quad (4)$$

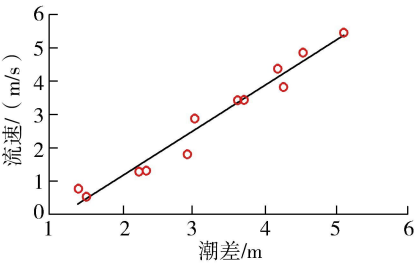


图 3 盐官站涌潮流速与潮差关系

根据前文分析,乍浦站同日同潮潮差最大相差 1.52 m,由式(4)得到涌潮流速最大相差 2.05 m/s。

3.4 对涌潮陡度的影响

关于涌潮陡度的研究成果较少。一般认为,潮差相同条件下,涨潮历时越短,水面涨率越大,水面坡降也越大,从而涌潮也越陡^[7]。盐官站涨潮历时与乍浦站涨潮历时密切相关,根据 2010 年 10 月 1—31 日盐官站与乍浦站同步实测资料(图 4)得到盐官站涨潮历时 T_y 与乍浦涨潮历时 T_z 的关系式为(相关系数为 0.695)

$$T_y = 0.597T_z - 43.594 \quad (5)$$

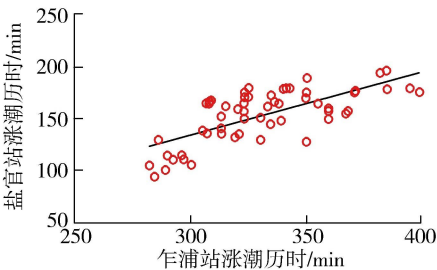


图 4 盐官站涨潮历时与乍浦站涨潮历时关系

式(5)表明,乍浦站涨潮历时每减小 10 min,盐

官站涨潮历时则相应减小 6 min 左右。根据前文分析,乍浦站八月初三日潮、夜潮涨潮历时最大分别相差 26 min 和 46 min,八月十八日潮、夜潮涨潮历时最大分别相差 33 min 和 30 min。根据式(5),得到盐官站涨潮历时最大相差 28 min。盐官站平均涨潮历时 154 min,则盐官站涨潮历时相对变化最大为 18.1%。鉴于涌潮陡度与涨潮历时成反比,因此,因天文潮引起的涌潮陡度最大可相差 18.1%。

4 结 论

- a. 杭州湾乍浦站 1971—2008 年的八月初三和八月十八的潮差、潮到时间和涨潮历时变化幅度较大。
- b. 采用调和分析,统计分析了乍浦站 1971—2008 年共 38 年的八月初三和八月十八天文潮资料,前、后 19 年潮汐特征值表现出较好的周期性,但同日同潮的潮差、潮到时间和涨潮历时变化幅度仍较大。前两者与实测潮汐资料相比,变化幅度有一定程度减小,涨潮历时之差变化幅度减小很多。
- c. 天文潮变化对涌潮影响很大,盐官站同日同潮涌潮高度最大相差 1.12 m,涌潮到达时间最大相差 93 min,涌潮流速最大相差 2.05 m/s,涌潮陡度最大相差 18.1%。

参考文献:

[1] 谢东风,潘存鸿,陆波,等. 基于实测资料的钱塘江涌潮水动力学特性研究[J]. 水动力学研究与进展: A 辑, 2012,27(5):501-508. (XIE Dongfeng, PAN Cunhong, LU Bo, et al. A study on the hydrodynamic characteristics of the Qiantang tidal bore based on field data[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2012, 27 (5): 501-508. (in Chinese))

[2] 刘文虎,朱小华,张钟哲,等. 钱塘江涌潮观测及其动力学特性研究[J]. 大连海洋大学学报,2015,35(5):567-572. (LIU Wenhui, ZHU Xiaohua, ZHANG Zhongzhe, et al. Observation and dynamic characteristics of tidal bore in Qiantang River, China [J]. Journal of Dalian Ocean University,2015,35(5):567-572. (in Chinese))

[3] 张巍,贺治国,谈利明,等. 基于定点连续观测的钱塘江涌潮特性研究[J]. 水动力学研究与进展: A 辑,2017, 32 (2): 253-259. (ZHANG Wei, HE Zhiguo, TAN Liming, et al. Dynamic characteristics of Qiantang tidal bore based on field observations at a fixed location[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2017, 32 (2): 253-259. (in Chinese))

[4] BONNETON P, FILIPPINI A G, ARPAIA L, et al. Conditions for tidal bore formation in convergent alluvial estuaries[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science,2016,

172;121-127.

[5] 潘存鸿. 浅水间断流动数值模拟研究进展[J]. 水利水电科技进展, 2010, 30 (5): 77-84. (PAN Cunhong. Advances in numerical simulation of discontinuous shallow water flows [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2010,30(5):77-84. (in Chinese))

[6] 程文龙,潘存鸿,吴修广. FVCOM 模型关键参数的处理及其在涌潮模拟中的应用[J]. 海洋学研究,2017,35 (1): 33-40. (CHENG Wenlong, PAN Cunhong, WU Xiuguang. Processing on key parameter in FVCOM and its application on tidal bore simulation[J]. Journal of Marine Sciences,2017,35(1):33-40. (in Chinese))

[7] HUANG Jing, PAN Cunhong, KUANG Cuiping, et al. Experimental hydrodynamic study of the Qiantang River tidal bore[J]. Journal of Hydrodynamics,2013,25(3):481-490.

[8] ZENG Jian, CHEN Gang, PAN Cunhong, et al. Effect of dike line adjustment on the tidal bore in the Qiantang Estuary, China[J]. Journal of Hydrodynamics,2017,29 (3):452-459.

[9] TU Junbiao, FAN Daidu. Flow and turbulence structure in a hypertidal estuary with the world's biggest tidal bore [J]. Journal of Geophysical Research: Oceans,2017,122 (4):3417-3433.

[10] 谢东风,潘存鸿,鲁海燕,等. 钱塘江河口涌潮传播速度研究[J]. 浙江大学学报(工学版),2012,46(6):1128-1134. (XIE Dongfeng, PAN Cunhong, LU Haiyan, et al. Study on propagation speed of tidal bore on Qiantang River [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science),2012,46(6):1128-1134. (in Chinese))

[11] 陈沈良,谷国传,刘勇胜. 长江口北支涌潮的形成条件及其初生地探讨[J]. 水利学报,2003 (11): 30-36. (CHEN Shenliang, GU Guochuan, LIU Yongsheng. Formation conditions and initial site of tidal bore in the north branch of Yangtze River Estuary [J]. Journal of Hydraulic Engineering,2003(11):30-36. (in Chinese))

[12] 张静怡,胡震云,黄志良. 近年长江口北支涌潮变化及其成因分析[J]. 水科学进展,2007,18 (5): 724-729. (ZHANG Jingyi, HU Zhenyun, HUANG Zhiliang. Analysis of the changes and formation causes of tidal bore at the north bayou of the Yangtze River Estuary in recent years [J]. Advances in Water Science,2007,18(5):724-729. (in Chinese))

[13] PAN Cunhong, HUANG Wenrui. Numerical modeling of suspended sediment transport affected by tidal bore in Qiantang Estuary [J]. Journal of Coastal Research,2010, 26(6):1123-1132.

[14] REUNGOAT D, LENG Xinqian, CHANSON H. Turbulence and suspended sediment processes in the Garonne River tidal bore in November 2016 [J]. International Journal of Sediment Research,2019,34(5):496-508.

- [15] 潘存鸿,张舒羽,史英标,等. 涌潮对钱塘江河口盐水入侵影响研究[J]. 水利学报,2014,45(11):1301-1309. (PAN Cunhong, ZHANG Shuyu, SHI Yingbiao, et al. Study on saltwater intrusion in Qiantang Estuary affected by tidal bore[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2014,45(11):1301-1309. (in Chinese))
- [16] 张芝永,肖厅厅,戚蓝,等. 涌潮水流作用下桩柱表面压强及受力分析[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版),2020,53(6):573-581. (ZHANG Zhiyong, XIAO Tingting, QI Lan, et al. Analysis of the surface pressure and force of piles under tidal bore[J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology),2020,53(6):573-581. (in Chinese))
- [17] 张舒羽,潘存鸿,程文龙. 钱塘江涌潮对地形变化的响应研究[J]. 海洋工程,2020,38(1):130-139. (ZHANG Shuyu, PAN Cunhong, CHENG Wenlong. Response of tidal bore in Qiantang River to topographical changes[J]. The Ocean Engineering,2020,38(1):130-139. (in Chinese))
- [18] 张舒羽,潘存鸿. 径流和风对涌潮影响的数值模拟[J]. 海洋工程,2013,31(3):54-62. (ZHANG Shuyu, PAN Cunhong. Effect of runoff and wind on tidal bore using numerical model[J]. The Ocean Engineering,2013,31(3):54-62. (in Chinese))
- [19] 潘存鸿,潘冬子,郑君,等. 台风对钱塘江涌潮影响研究[J]. 海洋学研究,2020,38(4):40-47. (PAN Cunhong, PAN Dongzi, ZHENG Jun, et al. Study on influence of typhoon on tidal bore in Qiantang River[J]. Journal of Marine Sciences,2020,38(4):40-47. (in Chinese))
- [20] 周黔生. 钱塘江(杭州段)涌潮潮时规律分析与预报[J]. 海洋预报,1993,10(1):53-58. (ZHOU Qiansheng. Analysis and forecast of tidal bore reaching time on Qiantang River (Hangzhou section)[J]. Marine Forecast,1993,10(1):53-58. (in Chinese))
- [21] 曾剑,熊绍隆,潘存鸿,等. 运用神经网络理论研究钱塘江涌潮的影响因素[J]. 长江科学院院报,2006,23(5):14-16. (ZENG Jian, XIONG Shaolong, PAN Cunhong, et al. Analysis of influence factors for Qiantang bore based on neural network theory[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute,2006,23(5):14-16. (in Chinese))
- [22] 潘存鸿,郑君,曾剑,等. 杭州湾年最大潮差分析[J]. 水动力学研究与进展:A辑,2021,36(2):201-209. (PAN Cunhong, ZHENG Jun, ZENG Jian, et al. Analysis of annual maximum tidal range in Hangzhou Bay[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics,2021,36(2):201-209. (in Chinese))

(收稿日期:2022-08-30 编辑:俞云利)

(上接第14页)

- [12] 王洪德,曹英浩. 基于改进变权物元可拓模型的围岩稳定性评价[J]. 中国安全科学学报,2013,23(8):23-29. (WANG Hongde, CAO Yinghao. Evaluation of surrounding rock stability based on improved matter-element extension model with variable weight[J]. China Safety Science Journal,2013,23(8):23-29. (in Chinese))
- [13] 张晶晶,马传明,匡恒,等. 青岛市土壤重金属污染的物元可拓评价[J]. 中国环境科学,2017,37(2):661-668. (ZHANG Jingjing, MA Chuanming, KUANG Heng, et al. Assessment of heavy metals pollution in soil of Qingdao based on matter-element extension model[J]. China Environmental Science,2017,37(2):661-668. (in Chinese))
- [14] 赵杰,罗志军,赵弯弯,等. 基于改进物元可拓模型的鄱阳湖区耕地土壤重金属污染评价[J]. 农业环境科学学报,2019,38(3):521-533. (ZHAO Jie, LUO Zhijun, ZHAO Wanwan, et al. Assessment of heavy metal pollution in arable soils in the Poyang Lake area based on the improved matter-element extension method[J]. Journal of Agro-Environment Science,2019,38(3):521-533. (in Chinese))
- [15] 万炳彤,鲍学英,赵建昌,等. 区域水生态文明建设绩效评价及障碍诊断模型的建立与应用[J]. 环境科学,2021,42(4):2089-2100. (WAN Bingtong, BAO Xueying, ZHAO Jianchang, et al. Establishment and application of performance evaluation and obstacle diagnosis model for regional water ecological civilization construction[J]. Environmental Science,2021,42(4):2089-2100. (in Chinese))
- [16] 黄晨璐,陈军武,黄维东,等. 渭河上游水利水保措施的减水减沙效应分析[J]. 冰川冻土,2020,42(3):965-973. HUANG Chenlu, CHEN Junwu, HUANG Weidong, et al. Analysis of water and sediment reducing effects of water conservation measures in the upstream of the Weihe River[J]. Journal of Glaciology and Geocryology,2020,42(3):965-973. (in Chinese))
- [17] 左旭刚,杨涛,王立社,等. 基于综合区划的渭河流域自然资源动态变化特征分析[J/OL]. 地质通报:1-13. (2022-09-29) [2022-10-26]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.4648.P.20220928.1519.006.html>. (ZUO Xugang, YANG Tao, WANG Lisha, et al. Analysis on the characteristics of natural resources dynamic changes in Weihe River Basin based on comprehensive regionalization[J/OL]. Geological Bulletin of China:1-13. (2022-09-29) [2022-10-26]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.4648.P.20220928.1519.006.html>. (in Chinese))

(收稿日期:2022-08-26 编辑:俞云利)