

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2021.05.002

杭州湾年最高潮位时空变化及其抬升原因分析

潘存鸿^{1,2}, 郑君^{1,2}, 吴修广^{1,2}, 陈刚^{1,2}

(1. 浙江省水利河口研究院, 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: 基于杭州湾实测潮汐资料, 对杭州湾年最高潮位时空变化、成因及影响因素进行了系统分析。结果表明: 杭州湾年最高潮位呈波动式抬升, 上升速率为 0.95 ~ 1.84 cm/a, 且湾顶大于湾中, 湾中大于湾口; 年最高潮位出现在 8 月的次数最多, 其次是 7 月、9 月和 6 月; 乍浦站年最高潮位中受台风暴潮影响的占 59%, 出现在大潮期的占 95%; 治江缩窄一方面引起天文潮高潮位抬高, 另一方面引起增水增大; 20 世纪 80 年代以来, 影响杭州湾的台风强度增大和不利台风路径增多也引起增水增大; 平均海平面上升加剧了杭州湾年最高潮位的抬升。

关键词: 年最高潮位; 治江缩窄; 风暴潮增水; 海平面; 杭州湾

中图分类号: P731.23 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2021)05-0394-07

Spatiotemporal variation of annual maximum high tide levels and reason analysis for their uplifting in Hangzhou Bay

PAN Cunhong^{1,2}, ZHENG Jun^{1,2}, WU Xiuguang^{1,2}, CHEN Gang^{1,2}

(1. Zhejiang Institute of Hydraulics and Estuary, Hangzhou 310020, China;

2. Zhejiang Provincial Key Laboratory of Estuary and Coast, Hangzhou 310020, China)

Abstract: Based on the measured tidal data in Hangzhou Bay, the spatiotemporal variations, causes and influencing factors of the annual maximum high tide levels in Hangzhou Bay were systematically analyzed. The results showed that the annual maximum high tide levels in Hangzhou Bay rose in a fluctuating manner, with a rising rate of 0.95-1.84 cm/a, the raise value of the top of the bay was larger than the middle of the bay and the middle of the bay was larger than the mouth of the bay. The annual maximum high tide levels occurred most frequently in August, followed by July, September and June. In the annual maximum high tide levels at Zhapu station, 59% of them were affected by typhoon surge, and 95% of them were in spring tides. On the one hand, contracted river for regulation in the Qiantang estuary caused the elevation of the high tide level of astronomical tide, on the other hand, it caused the increase of storm surge. In the past 30 years, the increase of typhoon intensity and adverse typhoon path for Hangzhou Bay also caused the increase of storm surge and the elevation of the annual maximum tide level in Hangzhou Bay was exacerbated by rising mean sea level.

Key words: annual maximum high tide level; contracted river for regulation; storm surge; sea level; Hangzhou Bay

近几十年来, 因全球气候变化、海平面上升和近海高强度人类活动, 近海特别是河口海湾年最高潮位出现持续抬高的趋势^[1-3]。年最高潮位的上升不但直接导致涉海工程设计高潮位抬高^[4], 不利于海洋防灾, 同时还间接引起海岸侵蚀、涌潮和盐水入侵等其他海洋灾害^[5]。

许多学者研究了我国沿海地区最高潮位的变化。盛季达等^[6]研究了长江口可能的最高潮位; Xu 等^[7]采用 GEV 分布预测了吴淞站年最高潮位; 聂宇华等^[8]预估了 21 世纪末珠江口深圳最高潮位重现期值; 蔡永庆等^[9]预测了气候变化对港口极端高水位重现期的影响, 潘存鸿等^[10]分析了钱塘江支流曹娥江河口高水位成因及其影响因素; 尤爱菊等^[11]探讨了钱塘江河口年最高潮位的随机特性, 以及其抬高趋势^[2]。年最高潮位大多数由台风暴潮引起, 因此, 有关学者研究了气候、海平面变化等对台风暴潮的影响^[1,12-15]。

杭州湾是我国潮汐最强的河口湾, 澈浦最大潮差 9.15 m (出现在 2018 年), 年最高潮位主要受天文大潮

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFC0407506); 国家自然科学基金(51779228)

作者简介: 潘存鸿(1963—), 男, 教授级高级工程师, 博士, 主要从事河口海岸水动力学、泥沙、水环境研究。E-mail: panch@zjwater.gov.cn

引用本文: 潘存鸿, 郑君, 吴修广, 等. 杭州湾年最高潮位时空变化及其抬升原因分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2021, 49(5): 394-400.

PAN Cunhong, ZHENG Jun, WU Xiuguang, et al. Spatiotemporal variation of annual maximum high tide levels and reason analysis for their uplifting in Hangzhou Bay [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2021, 49(5): 394-400.

和台风暴潮双重作用。由于杭州湾平面呈喇叭形,对潮汐和增水具有聚集作用,年最高潮位远高于开敞式海岸;同时,杭州湾两岸人口众多,社会经济发达,已建秦山核电群、杭州湾大桥、东海大桥、嘉兴港、嘉兴电厂等重大工程,对防潮减灾提出了更高的要求。本文在文献[16]基础上,基于长系列实测潮位资料,分析杭州湾年最高潮位时空变化规律及其成因,探讨钱塘江河口大规模治江缩窄、台风变化和海平面上升对年最高潮位的影响。

1 杭州湾概况

杭州湾水域面积约 5 500 km²(图 1),在平面上从下游到上游急剧缩窄,湾口南汇嘴—镇海断面宽 98 km,上溯 98 km 至湾顶澉浦断面,宽度缩窄到 16.5 km,缩窄率达 0.83^[17]。

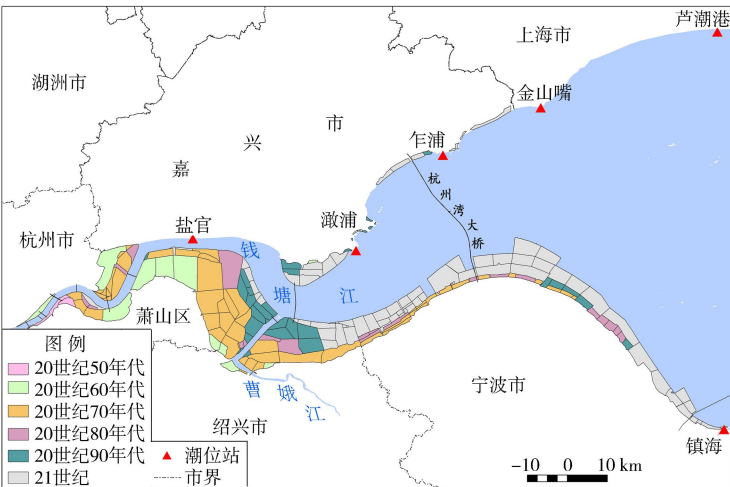


图 1 钱塘江河口杭州湾形势
Fig. 1 Qiantang Estuary and Hangzhou Bay

杭州湾存在两个重要的地貌单元,即杭州湾北岸深槽和南岸庵东滩地,其他水域湾口至乍浦地形相对平坦,水深一般在 10 m 以下。从乍浦向上,发育钱塘江水下沙坎,地形逐渐抬高,至湾顶澉浦水深小于 4 m。

杭州湾潮汐类型,除南岸甬江口附近为不正规半日潮型外,其余均为正规半日潮型。两岸设有澉浦、乍浦、金山嘴、芦潮港和镇海等 5 个长期潮位站,表 1 为 1988—2017 年潮汐特征统计资料^[16]。为便于比较,表 1 还列出了口外岱山站的潮汐特征。由表 1 可知,东海潮波进入杭州湾后,主要受杭州湾平面缩窄和地形抬升的影响,从口门芦潮港—镇海—湾顶澉浦高潮位抬高,低潮位下降,潮差增大,涨潮历时缩短。其中,湾口南岸镇海站高潮位最低,低潮位最高,潮差最小,涨潮历时最长。

表 1 杭州湾潮汐特征

Table 1 Tidal characteristics of Hangzhou Bay

站点	平均高潮位/m	平均低潮位/m	平均潮差/m	平均涨潮历时/h
口外岱山	1.24	-0.79	2.03	5.90
镇海	1.25	-0.77	2.02	6.33
芦潮港	1.97	-1.39	3.36	5.67
金山嘴	2.49	-1.93	4.42	5.55
乍浦	2.85	-2.15	5.00	5.48
澉浦	3.36	-2.49	5.85	5.13

2 年最高潮位时空变化规律及成因

2.1 杭州湾年最高潮位时空变化规律

由于杭州湾年最高潮位受台风影响随机性较大,为此对各站年最高潮位进行 5 年滑动平均,见图 2(图中“5 年滑动时间代号”1、2、3、…、63 分别代表“1952—1956 年”“1953—1957 年”“1954—1958 年”、…、“2014—2018 年”)。表 2 为 20 世纪和 21 世纪各年代各站年最高潮位平均值(表中上升速率为 20 世纪 80 年代至 21 世纪 10 年代的上升速率)。由图 2 和表 2 可知,无论是杭州湾还是口外岱山站,年最高潮位年际存在一定的波动,即使以年代作为平均仍然存在波动,但上升的总趋势明显。杭州湾澉浦、乍浦、金山嘴和镇海站资料系列最长,21 世纪 10 年代比 20 世纪 60 年代年最高潮位平均值分别抬升 0.85 m、0.82 m、0.62 m 和 0.55 m,湾口芦潮港和镇海、口外岱山站年最高潮位抬升明显小于湾中和湾顶,21 世纪 10 年代比 20 世纪 80 年

代年最高潮位平均值分别抬升 0.28 m、0.40 m 和 0.22 m,而同期澉浦、乍浦和金山嘴站分别抬升 0.53 m、0.45 m 和 0.42 m。各站年最高潮位波动规律基本一致,且历史最高潮位均发生在 1997 年,由 9711 台风造成。

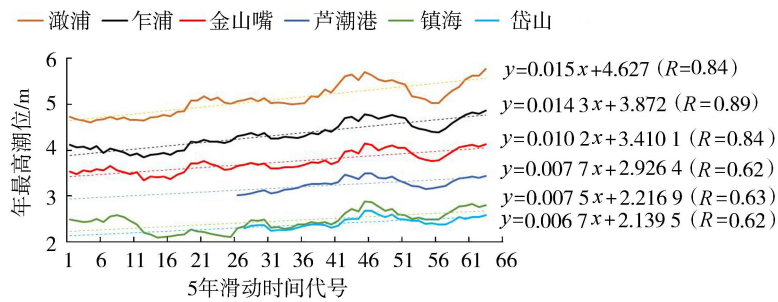


图2 年最高潮位 5 年滑动平均变化

Fig.2 5-year moving average variation of annual maximum high tide levels

表2 年最高潮位年代变化

Table 2 Annual maximum tide levels change with time

站名	年最高潮位平均变化/ m						上升速率/ (cm·a ⁻¹)	统计时间
	20 世纪 60 年代	20 世纪 70 年代	20 世纪 80 年代	20 世纪 90 年代	21 世纪 00 年代	21 世纪 10 年代		
澉 浦	4.72	5.06	5.04	5.42	5.32	5.57	1.84	1960—2018 年
乍 浦	3.94	4.17	4.30	4.54	4.61	4.75	1.55	1960—2018 年
金山嘴	3.46	3.64	3.66	3.85	3.95	4.05	1.46	1960—2018 年
芦潮港		2.99	3.12	3.33	3.29	3.40	0.95	1977—2018 年
镇 海	2.28	2.17	2.43	2.63	2.55	2.83	1.39	1960—2018 年
口外岱山		2.23	2.32	2.44	2.50	2.54	0.77	1978—2018 年

对各站年最高潮位 5 年滑动平均线进行线性拟合,湾顶澉浦、湾中乍浦和金山嘴站拟合的相关系数均在 0.84 以上,湾口芦潮港和镇海、口外岱山站拟合的相关系数也在 0.62 以上。

以资料系列较长的乍浦站为代表分析其年最高潮位各月出现次数,其中出现在 8 月的次数最多,占 39.4%,其次是 7 月、9 月和 6 月,5 月、10 月和 11 月出现次数较少,而 12 月至次年 4 月出现次数为 0,这与文献[18]的结果一致。

口外岱山站年最高潮位最低,至杭州湾口镇海站略有抬高,且湾口北岸芦潮港站高于南岸镇海站,向杭州湾上游年最高潮位持续提升,至澉浦站达到最高。以 21 世纪 10 年代为例,澉浦站年最高潮位平均值为 5.57 m,比湾口北岸芦潮港站高 2.17 m,比湾口南岸镇海站高 2.74 m。

2.2 杭州湾年最高潮位成因

杭州湾大多数年份都受到台风的影响。根据 1950—2018 年实测资料统计,以杭州湾出现大于 0.5 m 的风暴增水为标准,影响杭州湾的台风共有 124 次,平均每年 1.8 次,其中在浙江登陆的有 29 次,浙江沿海北上、外海转向和浙江以北登陆的有 70 次,浙江以南登陆的有 25 次。

年最高潮位由天文潮高潮位和增水叠加组成。台风过境时,常产生风暴增水,与天文潮发生非线性叠加产生非常高潮位。表 3 为各潮位站前 6 位年最高潮位发生日期及相应的台风情况,由表 3 可知:(a) 6 个潮位站的前 6 位年最高潮位均发生在台风期间,说明风暴增水是造成非常年最高潮位不可或缺的因素。(b) 澉浦、乍浦、金山嘴和芦潮港站潮汐强,天文大潮时比小潮高潮位高得多,前 6 位年最高潮位均发生在天文大潮期间,说明在强潮区天文潮大小对年最高潮位的贡献很大;而弱潮区,天文潮大小潮高潮位绝对值差异较小,风暴增水对造成年最高潮位的贡献增大,如镇海站排名第 4 的年最高潮位发生在 2012 年农历六月廿一的中潮期。典型的例子是 1956 年的 5612 超强台风,发生在农历六月廿六的小潮期,风暴增水为有记录以来最大,在强潮区乍浦站高潮位增水达 3 m 以上,但其造成的年最高潮位仅排名第 16,而弱潮区镇海站的年最高潮位排名为第 6。

以资料系列较长的乍浦站为代表分析杭州湾年最高潮位成因。根据实测乍浦站年最高潮位数据和相应的天文潮高潮位,结合历史台风资料,得到 1953—2018 年年最高潮位中有 39 年受台风暴潮影响,占 59%,其余 41% 由天文大潮或其他原因造成。统计还发现,年最高潮位出现在大潮期间的有 63 年,占 95%;出现在

表 3 各潮位站前 6 位年最高潮位发生日期及相应的台风

Table 3 Top 6 highest annual maximum tide levels and corresponding typhoons at each tide station

序号	澈浦(1951—2018 年)			乍浦(1953—2018 年)			金山嘴(1950—2018 年)		
	日期	台风号	登陆地点	日期	台风号	登陆地点	日期	台风号	登陆地点
1	1997-08-19 (农历七月十七)	9711	浙江温岭	1997-08-19 (农历七月十七)	9711	浙江温岭	1997-08-19 (农历七月十七)	9711	浙江温岭
2	2018-08-13 (农历七月初三)	1814	浙江温岭	2002-09-08 (农历八月初二)	0216	浙江苍南	2000-09-14 (农历八月十七)	0014	近海转向
3	2002-09-08 (农历八月初二)	0216	浙江苍南	2018-08-13 (农历七月初三)	1814	浙江温岭	2002-09-08 (农历八月初二)	0216	浙江苍南
4	1974-08-20 (农历七月初三)	7413	浙江三门	2014-10-12 (农历九月十九)	1419	近海转向	2018-08-13 (农历七月初三)	1814	浙江温岭
5	1994-08-22 (农历七月十六)	9417	浙江瑞安	1974-08-20 (农历七月初三)	7413	浙江三门	1974-08-20 (农历七月初三)	7413	浙江三门
6	1996-08-01 (农历六月十七)	9608	福建福清	2015-09-29 (农历八月十七)	1521	福建莆田	2014-10-12 (农历九月十九)	1419	近海转向

序号	芦潮港(1977—2018 年)			镇海(1951—2018 年)			岱山(1978—2018 年)		
	日期	台风号	登陆地点	日期	台风号	登陆地点	日期	台风号	登陆地点
1	1997-08-19 (农历七月十七)	9711	浙江温岭	1997-08-18 (农历七月十六)	9711	浙江温岭	1997-08-18 (农历七月十六)	9711	浙江温岭
2	2000-09-13 (农历八月十六)	0014	近海转向	2000-09-13 (农历八月十六)	0014	近海转向	2000-09-13 (农历八月十六)	0014	近海转向
3	2018-08-13 (农历七月初三)	1814	浙江温岭	1981-09-01 (农历八月初四)	8114	沿海北上	2014-10-12 (农历九月十九)	1419	近海转向
4	2002-09-07 (农历八月初一)	0216	浙江苍南	2012-08-08 (农历六月廿一)	1211	浙江象山	2018-08-12 (农历七月初二)	1814	浙江温岭
5	2014-10-12 (农历九月十九)	1419	近海转向	2018-08-13 (农历七月初三)	1814	浙江温岭	1981-08-31 (农历八月初三)	8114	沿海北上
6	1994-08-21 (农历七月十五)	9417	浙江瑞安	1956-08-02 (农历六月廿六)	5612	浙江象山	2004-08-29 (农历七月十四)	0417	近海转向

中潮期间的为 2 年;出现在小潮期间的仅有 1 年,即发生在 5612 超强台风期间。上述结果表明,天文大潮是引起杭州湾年最高潮位最重要的原因,其次为风暴增水。

3 年最高潮位影响因素及抬升原因

根据以上分析,20 世纪 60 年代以来杭州湾年最高潮位明显抬升,引起年最高潮位抬升的因素较多,如涉水工程建设等人类活动、海平面以及台风等因素。结合相关的研究成果^[2,16-17],探讨钱塘江河口治江缩窄、风暴潮增水和海平面抬升等因素对杭州湾年最高潮位的影响。

3.1 治江缩窄

钱塘江河口从 20 世纪 60 年代以来进行了大规模的治江缩窄^[17]工程建设,至 2017 年底,在钱塘江河口杭州湾的浙江水域共围涂约 1 350 km²,治江缩窄进展见图 1。江道缩窄后,江道容积减小,进而进潮量减小,引起河床淤积,造成潮汐变化;同时引起潮波反射加剧,进而影响潮汐特征^[16]。

为分析杭州湾年平均高潮位抬升对年最高潮位的影响,并考虑年最高潮位的随机性,图 3 给出了年最高潮位 5 年滑动平均值与年平均高潮位 5 年滑动平均值的相关图。由图 3 可知,除杭州湾口外岱山站的相关系数略差外(相关系数 0.66),其余各站的相关系数均在 0.84 以上,说明年平均高潮位抬升对年

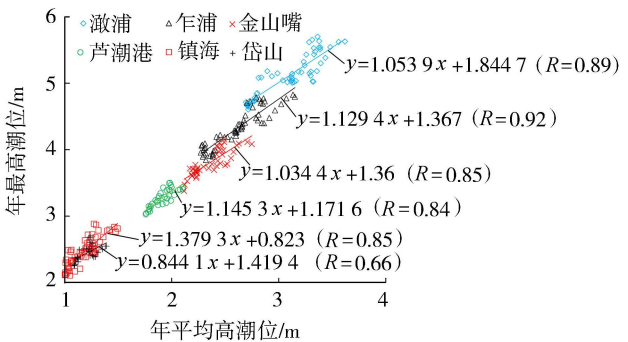


图 3 年最高潮位与年平均高潮位 5 年滑动平均值关系

Fig.3 Relationship chart between 5-year moving average of annual maximum high tide level and annual average high tide level

最高潮位抬升的作用很大。基于长系列实测潮汐资料分析,潘存鸿等^[16]得出了钱塘江河口治江缩窄是造成杭州湾年平均高潮位抬升的主要原因,间接说明了钱塘江河口治江缩窄对杭州湾年最高潮位有抬升作用。

杭州湾年最高潮位 5 年滑动平均值与围涂面积的相关性见图 4。从图 4 可知,靠近杭州湾湾顶的澉浦和乍浦站年最高潮位 5 年滑动平均值与围涂面积的相关性最好(相关系数在 0.82 以上),湾中金山嘴站相关性尚好(相关系数为 0.76),而湾口芦潮港和镇海站相关性较差(相关系数分别为 0.45 和 0.61),说明钱塘江河口治江缩窄对杭州湾年最高潮位抬升的影响从上游到下游逐渐减小,且南岸大于北岸,到杭州湾口影响已较小。这与钱塘江河口杭州湾缩窄主要位于金山上游及南岸、芦潮港还受到上海南汇嘴附近围涂影响等因素有关。根据图 4 中各站相关公式,得到钱塘江河口治江缩窄导致澉浦、乍浦和金山嘴站年最高潮位平均抬升值,分别为 0.84、0.79 和 0.75 m,这与谢亚力等^[19]的二维风暴潮数学模型计算结果基本一致。

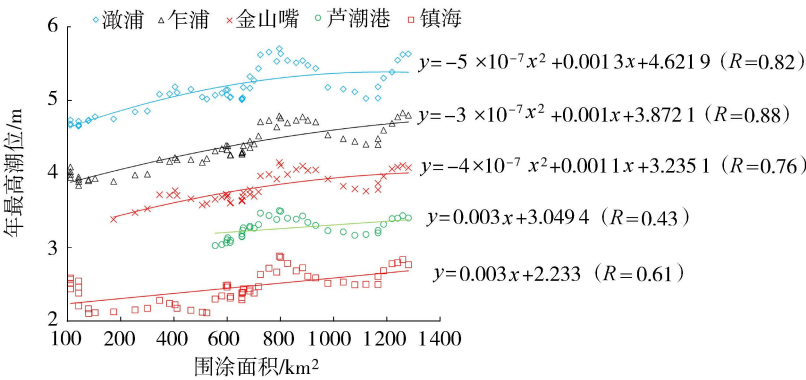


图 4 年最高潮位 5 年滑动平均值与围涂面积关系
Fig. 4 Relationship between polder area and 5-year sliding average of annual maximum high tide level

3.2 台风暴潮增水

对某一固定位置,台风暴潮增水大小主要取决于两个因素:一是天文潮潮位。在其他条件相同的情况下,由于天文潮与增水的非线性作用,一般是天文潮越高,增水越小;反之,天文潮越低,增水越大。因此,在台风条件相同的情况下,一般天文潮高潮位附近增水较小,天文潮低潮位附近增水较大。二是台风参数,包括台风路径、登陆地点、台风强度、风速半径、移动速度等^[20]。

以乍浦站为代表分析年最高潮位增水年际变化规律。根据浙江省水文中心实测年最高潮位和国家海洋中心《潮汐表》中相应的天文潮高潮位,分离出 1960—2018 年年最高潮位的增水值,见图 5。由图 5 可知,尽管拟合的增水趋势线相关性较差,但仍存在增水随时间增大的趋势。表 4 为不同年代年最高潮位、相应的天文潮高潮位和增水的年代平均值。从表 4 可以看出,增水年代平均值明显随年代增大而增大,21 世纪 10 年代增水年代平均值比 20 世纪 60 年代增大 0.49 m。出现年最高潮位的相应天文潮高潮位年代平均值也随年代增大而增大,说明 20 世纪 60 年代以来,因受钱塘江河口治江缩窄等人类活动以及海平面抬升的影响,天文潮高潮位也在不断提升,这与文献^[16]的结果一致。

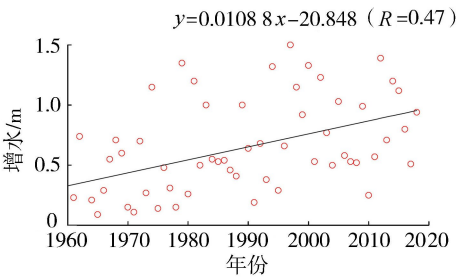


图 5 乍浦站年最高潮位增水
Fig. 5 Surge for annual maximum high tide levels at Zhapu

表 4 乍浦站年代平均值变化			
Table 4 Variation of decade-averaged values at Zhapu			
年代	年代平均值变化/m		
	年最高潮位	天文潮高潮位	增水
20 世纪 60 年代	3.94	3.60	0.34
20 世纪 70 年代	4.17	3.69	0.48
20 世纪 80 年代	4.30	3.66	0.64
20 世纪 90 年代	4.54	3.77	0.77
21 世纪 00 年代	4.61	3.81	0.80
21 世纪 10 年代	4.75	3.92	0.83

选取台风路径和强度两个最重要的台风参数分析台风参数对杭州湾年最高潮位增水的作用:(a)台风路径。对杭州湾有影响的台风大致可分成 3 类:一是在浙江登陆(包括上海的杭州湾北岸)的台风,往往对杭州湾影响最大;二是浙江沿海北上(包括浙江以北登陆和海外转向),对杭州湾影响次之;三是浙江以南登陆的台风,对杭州湾影响相对较小。根据其对杭州湾的影响程度,分别赋值 3、2 和 1 分。(b)台风强度。将台风强度分为 ≥ 14 级、12~13 级和 ≤ 11 级 3 级,同样分别赋值 3、2 和 1 分。这样,对杭州湾影响最大的台风最高分为 6 分。根据上述规则,统计乍浦站 1960—2018 年年最高潮位受台风影响的情况,结果见表 5。由表 5 可知,20 世纪 60 年代 10 个年最高潮位只有两次受台风影响,并且在浙江登陆为 0 次,总分只有 6 分;20 世纪 70 年代 10 个年最高潮位有 4 次受台风影响,并且有 1 次在浙江登陆,总分为 14 分,与 20 世纪 60 年代相比,增加了 1 倍多;20 世纪 80 年代以来,受台风影响次数大幅增加,介于 6~8 次之间,并且每个年代均有台风在浙江登陆,总分为 25~34 分。另外,因 21 世纪 10 年代统计缺少 2019 年的数据,可能造成总分略偏低。表 5 中的总分与表 4 的增水有很好的相关关系,相关系数达 0.88。上述结果表明,20 世纪 80 年代以来,造成杭州湾年最高潮位的台风次数及不利路径增多,并且强度也增大。

表 5 各年代年最高潮位受台风影响情况

Table 5 Influence of typhoon on annual maximum high tide levels at various decade

年代	受台风 影响次数	不同台风路径的影响次数			不同台风强度的影响次数			总分
		浙江登陆	浙江沿海北上	浙江以南登陆	≥ 14 级	12~13 级	≤ 11 级	
20 世纪 60 年代	2	0	1	1	1	1	0	6
20 世纪 70 年代	4	1	3	0	0	1	3	14
20 世纪 80 年代	8	1	6	1	1	4	3	30
20 世纪 90 年代	6	4	0	2	2	1	3	25
21 世纪 00 年代	8	2	4	2	3	4	1	34
21 世纪 10 年代	7	2	3	2	2	3	2	28

另外,杭州湾治江缩窄除影响高潮位外,还影响杭州湾上游段增水的大小。可应用格林定律来解释杭州湾缩窄后增水增大的机理,格林公式^[16]为

$$\Delta Z_x = \Delta Z_0 \left(\frac{h_0}{h_x}\right)^{1/4} \left(\frac{b_0}{b_x}\right)^{1/2}$$

(1)

式中: ΔZ ——增水; h ——水深; b ——河宽; 0 ——参考位置,取杭州湾口门处; x ——任意位置。

设 $\alpha = \left(\frac{h_0}{h_x}\right)^{1/4} \left(\frac{b_0}{b_x}\right)^{1/2}$, 则

$$\Delta Z_x = \alpha \Delta Z_0$$

(2)

由于格林公式没有考虑摩擦阻力等的影响,因此,直接应用格林公式计算增水结果偏大,并且越接近湾顶偏大越多。钱塘江河口杭州湾缩窄后,不但各断面河宽减小,同时因河床淤积水深也减小,沿程河宽缩窄率和河床抬升率更大,因此,缩窄后 α 比缩窄前增大。根据格林公式,在杭州湾口增水相同且不考虑局部风场的条件下,上游各断面增水缩窄后比缩窄前增大,且越往上游增大越多,金山、乍浦和澉浦断面缩窄后 α 比缩窄前分别增大 1.09、1.11 和 1.19 倍^[16]。该结果与文献[19]的二维风暴潮数学模型计算结果在定性上一致。

3.3 海平面上升对杭州湾年最高潮位的影响

20 世纪 80 年代以来,全球海平面呈波动上升趋势^[5,21]。根据《2018 年浙江省海洋灾害公报》^[22],1980—2018 年浙江沿海海平面平均上升速率为 3.4 mm/a,高于同期全国沿海平均速率 3.3 mm/a。浙江沿海海平面是根据浙江沿海 10 余个潮位站的海平面数据平均得到的,其既受大范围太平洋海平面抬升的影响,又受邻近海域特别是本海域气象因素及涉海工程建设的影响。杭州湾海平面作为浙江沿海平均海平面的一部分,两者呈较好的正相关关系,浙江沿海平均海平面的抬升必然引起杭州湾海平面以及高潮位的抬升^[16]。陈美榕等^[3]应用上海沿海 6 个潮位站(其中芦潮港和滩浒 2 个站位于杭州湾内)的长系列实测潮汐资料分析,认为平均高潮位与平均海平面呈正相关关系。根据杭州湾口及口外长系列实测潮位资料分析,年平均高潮位的抬升值大约是年平均海平面抬升值的 2 倍。据此估计,1980—2018 年浙江沿海平均海平面上升 12.9 cm,假设杭州湾口平均海平面上升值与此相同,则杭州湾年平均高潮位抬升 25.8 cm,进而造成年最

高潮位的抬升。事实上,由于杭州湾喇叭形的平面形状,杭州湾上游的抬升值要大于杭州湾口^[16]。

4 结 论

- a. 杭州湾年最高潮位时空变化。杭州湾年最高潮位存在湾口低、向上游逐渐增大、至湾顶澈浦站达到最大的平面分布规律。20 世纪 60 年代以来,杭州湾年最高潮位明显抬升。从 20 世纪 80 年代以来,杭州湾年最高潮位上升速率为 0.95 ~ 1.84 cm/a,且湾顶大于湾中,湾中大于湾口。年最高潮位出现在 8 月的次数最多,占 39.4%,其次是 7 月、9 月和 6 月。
- b. 杭州湾年最高潮位成因。基于乍浦站 1953—2018 年年最高潮位统计分析,有 39 年受台风暴潮影响,占 59%,其余 41% 由天文大潮或其他原因造成。年最高潮位出现在大潮期的有 63 年,占 95%;出现在中、小潮期的仅有 3 年。说明天文大潮是引起杭州湾年最高潮位最重要的因素,其次为风暴增水。潮汐越强,造成年最高潮位的天文大潮贡献越大,反之,风暴增水的贡献越大。历史排名前 6 位的杭州湾各站非常年最高潮位均受台风影响,说明风暴增水是造成非常年最高潮位不可或缺的因素。
- c. 影响杭州湾年最高潮位的因素。年最高潮位由天文潮高潮位和增水构成,治江缩窄一方面引起天文潮高潮位抬升,另一方面引起增水增大;20 世纪 80 年代以来,台风强度增大和不利台风路径增多也引起增水增大;平均海平面上升加剧了杭州湾年最高潮位的抬升。

参考文献:

[1] 孙志林,卢美,聂会,等. 气候变化对浙江沿海风暴潮的影响[J]. 浙江大学学报(理学版),2014,41(1):90-94. (SUN Zhilin,LU Mei,NIE Hui,et al. Impacts of climatological changes on storm surge in Zhejiang coastal water[J]. Journal of Zhejiang University (Science Edition),2014,41(1):90-94. (in Chinese))

[2] 尤爱菊,韩曾萃,何若英. 变化环境下的钱塘江河口潮位特性及其影响因素[J]. 海洋学研究,2010,28(1):18-25. (YOU Aiju,HAN Zengcui,HE Ruoying. Characteristics and effecting factors of the tidal level in the Qiantangjiang River Estuary under changing environment[J]. Journal of Marine Sciences,2010,28(1):18-25. (in Chinese))

[3] 陈美榕,吕忻,肖文军. 上海沿海潮汐特征响应海平面上升关系研究[J]. 海洋预报. 2014,31(1):42-48. (CHEN Meirong,LYU Xin,XIAO Wenjun. Study on the response of tidal characteristics to MSL rise in Shanghai coastal area[J]. Marine Forecast,2014,31(1):42-48. (in Chinese))

[4] 张锦文,王骥. 莱州湾海平面上升和潮差增大对工程设计标准的影响[J]. 海洋通报,1999,18(5):1-9. (ZHANG Jinwen,WANG Ji. Combined impacts of MSL rise and the enlarged tidal range on the engineering design standard in the areas around the Huanghe River Mouth[J]. Marine Science Bulletin,1999,18(5):1-9. (in Chinese))

[5] WANG Qiushun,PAN Cunhong,ZHANG Guangzhi. Impact of and adaptation strategies for sea-level rise on Yangtze River Delta [J]. Advances in Climate Change Research,2018,9:154-160.

[6] 盛季达,何金林. 长江口可能最高潮位研究[J]. 水文,1999(3):1-5. (SHENG Jida,HE Jinlin. A research on the probable maximum tidal level at the Yangtze River Estuary[J]. Hydrology,1999(3):1-5. (in Chinese))

[7] XU Sudong,HUANG Wenrui. Estimating extreme water levels with long-term data by GEV distribution at Wusong Station near Shanghai City in Yangtze Estuary[J]. Ocean Engineering,2011,38(2/3):468-478.

[8] 聂宇华,汤超莲,程泽梅. 21 世纪末珠江口深圳最高潮位重现期值预估[J]. 热带地理,2016,36(6):901-905. (NIE Yuhua,TANG Chaolian,CHENG Zemei. Projections of maximum sea level recurrence interval near Shenzhen at the end of the 21th century[J]. Tropical Geography,2016,36(6):901-905. (in Chinese))

[9] 蔡永庆,周春辉,文元桥,等. 气候变化时港口极端高水位重现期的预测分析[J]. 大连海事大学学报,2015,41(4):42-52. (CAO Yongqing,ZHOU Chunhui,WEN Yuanqiao,et al. Prediction analysis of return period of extreme high water level in port with climate change[J]. Journal of Dalian Maritime University,2015,41(4):42-52. (in Chinese))

[10] 潘存鸿,蔡军. 山溪性可冲性强潮河口曹娥江河口高水位初步研究[J]. 东海海洋,2001,19(1):11-18. (PAN Cunhong,CAI Jun. Preliminary study on high water level of Cao'e River, a hilly, fluvial and macro-tidal estuary[J]. Donghai Marine Science,2001,19(1):11-18. (in Chinese))

[11] 尤爱菊,余炯,俞婷婷. 钱塘江河口年最高潮位的随机特性[J]. 东海海洋,2003,21(1):37-44. (YOU Aiju,YU Jiong,YU Tingting. Stochastic characteristic of the maximum tide level in Qiantang River Downstream[J]. Donghai Marine Science,2003,21(1):37-44. (in Chinese))