

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. DOI:10.3969/j.issn.1001-909X.2020.04.004.

PAN Cunhong, PAN Dongzi, ZHEN Jun, et al. Study on influence of typhoon on tidal bore in Qiantang River[J]. Journal of Marine Sciences, 2020, 38(4): 40-47. DOI:10.3969/j.issn.1001-909X.2020.04.004.

台风对钱塘江涌潮影响研究

潘存鸿^{1,2}, 潘冬子^{1,2}, 郑君^{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:钱塘江年最大涌潮几乎都发生在台风期间。基于实测潮汐资料,结合天文潮调和分析,研究台风对钱塘江河口涌潮起潮点下游河段潮汐的影响,探讨因潮汐变化间接引起的钱塘江涌潮变化。结果表明:台风引起低潮位、潮差、潮到时间、涨潮历时等变化,间接影响涌潮,造成涌潮高度、陡度、传播速度、到达时间和涌潮流速等变化。总体而言,台风期间盐官涌潮高度平均增大0.18 m,到达时间平均提早37 min;澉浦至盐官段涌潮传播速度平均增大8.9%,陡度变陡,流速有增有减,但单宽流量增大。

关键词:钱塘江;台风;涌潮高度;涌潮流速;涌潮传播速度

中图分类号:P731.23

文献标识码:A

文章编号:1001-909X(2020)04-0040-08

DOI:10.3969/j.issn.1001-909X.2020.04.004

0 引言

尽管世界上大约有450个河口存在涌潮^[1],但绝大多数涌潮较小,几乎没有欣赏价值。世界上涌潮最大的是亚马逊河涌潮和钱塘江涌潮,前者位于热带雨林,交通不便,观潮不易;后者涌潮潮景多变,且两岸交通方便,是世界上最具有欣赏价值的涌潮^[2]。钱塘江河口夏、秋季常受台风影响,在台风期间,受台风气压场和风场的影响,往往引起涌潮高度增加、涌潮流速加大、涌潮传播速度加快。钱塘江年最大涌潮几乎都发生在台风期间,此时涌潮最为壮观,同时对涉水工程的破坏力也最大。既要保护钱塘江涌潮资源,又要减少涌潮带来的灾害,因此,研究台风对钱塘江涌潮的影响,具有重要的学术意义和现实意义。

台风对涌潮的作用可分为直接和间接两个方面^[3],前者是台风期间较大的局地风场直接造成涌潮特征变化;后者是台风引起涌潮起潮点下游河段潮汐

变化,间接影响涌潮特征。最近几十年来,学者对涌潮水动力特性^[3-7],涌潮传播规律^[8-9],涌潮流速^[2,5-6,10],湍流特性^[11-12],涌潮作用力^[13-14],涌潮对河口盐度^[15-16]、泥沙输移^[17-18]和沉积^[19]的影响,涌潮景观影响评价^[20]等进行了多角度的研究,但台风对涌潮的作用研究罕见报道。张舒羽等^[21]应用二维涌潮数学模型在概化河道中计算分析了恒定风场对涌潮的直接影响,潘存鸿等^[22]应用FVCOM三维模型探讨了钱塘江涌潮对恒定顺风 and 逆风风场的直接响应。

本文重点研究台风对涌潮的间接影响。基于长时间序列实测潮位资料和台风资料,结合天文潮调和分析,研究台风对钱塘江河口涌潮起潮点下游河段潮汐的影响,进而探讨因潮汐变化引起的钱塘江涌潮高度、陡度、传播速度、到达时间和涌潮流速等变化。研究成果可为涌潮预报和涌潮防灾提供技术支撑。

收稿日期:2020-08-15

基金项目:国家自然科学基金项目(51779228,41876095);国家重点研发计划项目(2018YFC0407506)

作者简介:潘存鸿(1963—),男,浙江省宁波市人,博士,正高级工程师,主要从事河口海岸水动力学、泥沙、水环境研究。panch@zjwater.gov.cn

1 影响杭州湾的台风特征

杭州湾位于从湾顶澈浦至湾口南汇嘴—镇海断面的海域,长 98 km,湾口宽 98 km,湾顶宽 16.5 km,水域面积约5 500 km²^[2],见图 1。杭州湾属典型的亚热带季风气候区,大多数年份都受台风的影响。根据台风路径,对杭州湾有影响的台风主要可分为 3 类:第 1 类为浙江登陆的台风,也包括登陆上海的杭州湾北岸台风,其对杭州湾的影响最大;第 2 类为途经浙江沿海北上的台风,其对杭州湾的影响为其次;第 3 类为浙江以南登陆的台风,其对杭州湾的影响相对较小。

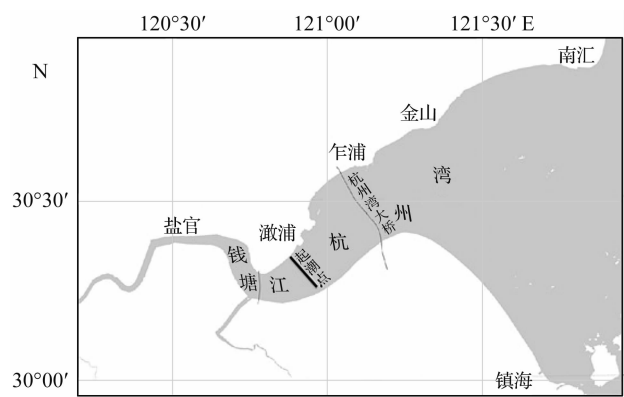


图 1 钱塘江河口及杭州湾示意图
Fig. 1 Sketch map of the Qiantang River and Hangzhou Bay

1950—2018 年台风每年发生次数统计结果(图 2)表明,西北太平洋台风发生次数(包括中国南海)存在明显年际变化,最多时为 40 次/a(1950 年),最少时为 11 次/a(1998 年)。台风发生次数的年代际变化趋势不明显,除 1950—1959 年次数较多,可达 319 次/10 a,其余均集中在 224~254 次/10 a(表 1)。由此表明最近 30 a 西北太平洋台风次数未出现增多现象。

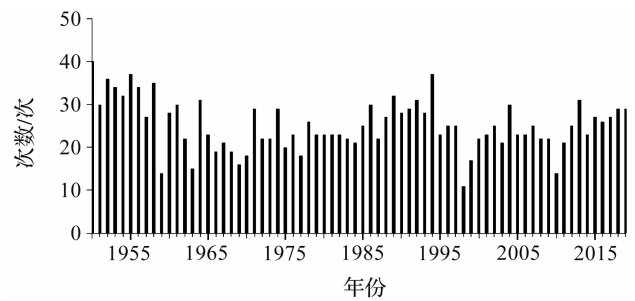


图 2 西北太平洋每年台风次数统计
Fig. 2 Number of typhoons per year in the Northwest Pacific Ocean

根据 1950—2018 年实测资料统计,以杭州湾出现 >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,占 23.4%;浙江沿海北上的有 70 次,占 56.5%;浙江以南登陆的有 25 次,占 20.2%(表 1)。由表可知,1950—1979 年影响杭州湾的台风次数较少,平均每年 1 次左右,20 世纪 80 年代以来台风次数明显增多,1990—2018 年的近 30 a 间,平均每年达到 2.6 次。

表 1 影响杭州湾的台风及西北太平洋台风统计

Tab. 1 Statistics of typhoons affecting the Hangzhou Bay and the Northwest Pacific

时间段	影响杭州湾的台风				西北太平洋台风/次
	浙江登陆/次	浙江沿海北上/次	浙江以南登陆/次	合计/次	
1950—1959 年	3	6	1	10	319
1960—1969 年	1	4	2	7	224
1970—1979 年	3	6	2	11	230
1980—1989 年	4	12	1	17	248
1990—1999 年	5	18	5	28	254
2000—2009 年	8	13	6	27	236
2010—2018 年	5	11	8	24	252
合计	29	70	25	124	1 762
占比/%	23.4	56.5	20.2	100	

图 3 为影响杭州湾的台风发生次数在年内的分布。由图可知台风发生在 5 月至 10 月之间,其中 8 月和 9 月最多,分别占 34.7%和 29.8%;其次为 7 月和 10 月,分别占 16.1%和 12.9%;最少的为 6 月和 5 月,分别占 5.6%和 0.8%。

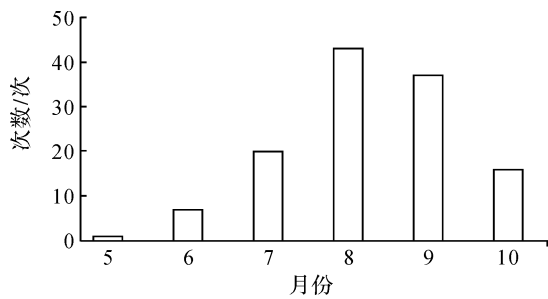


图 3 影响杭州湾台风的年内分布
Fig. 3 Monthly distribution of typhoons affecting the Hangzhou Bay

2 台风对钱塘江河口潮汐的影响

台风通过改变气压场和风场对潮汐产生影响,主要表现在:通过增减水抬高或者降低高、低潮位,引起潮差增大或减小;通过改变高、低潮位出现时间,引起涨、落潮历时变化;通过改变水深、潮动力,加上风生

流等作用改变潮波传播速度。从台风对涌潮影响角度,本文主要探讨台风对潮汐中的低潮位、潮差、潮到时间、涨潮历时等 4 个因素的影响。

澉浦潮位站有长时间序列的潮汐观测资料(资料来自浙江省水文管理中心),同时也是离钱塘江涌潮起潮点下游最近的潮位站,因此本文以澉浦潮位站为代表分析台风对潮汐的影响。选取 1950—2018 年间对杭州湾影响较大的 10 次典型台风为代表进行分析,台风的具体信息见表 2。10 次台风中,8 次在浙江登陆,1 次在福建福鼎登陆,1 次为浙江沿海北上(在台州外海转向);6 次发生在大潮期,1 次在中潮期,3 次在小潮期;按照台风强度,包括超强台风(1 次)、强台风(6 次)、台风(2 次)和强热带风暴(1 次)。虽然台风摩羯在浙江温岭登陆时只有强热带风暴强度,但恰遇天文大潮,澉浦站涨、落潮潮差分别达 9.10 m 和 9.15 m,均打破了澉浦站最大涨、落潮潮差的历史记录,并且高潮位仅次于历史最高潮位。

图 4 为台风温黛、温妮和摩羯期间实测潮位与天文潮潮位过程的比较,其中澉浦站天文潮根据澉浦站 1 a 完整的实测逐时潮位资料利用 100 多个分潮优化计算得到。由图 4 可知,台风期间大多数高、低潮位抬高,台风越强,潮位抬高越多,即增水越大,如超强台风温黛的增水大于台风温妮,后者增水又大于强热带风暴摩羯。

表 2 对杭州湾影响较大的 10 次台风
Tab. 2 Ten typhoons affecting greatly on the Hangzhou Bay

序号	台风名称及编号	登陆(转向)时间	登陆地点	台风强度
1	温黛 5612	8 月 1 日(六月廿五)	浙江象山	超强台风
2	玛丽 7413	8 月 20 日(七月初三)	浙江三门	台风
3	弗雷德 9417	8 月 21 日(七月十五)	浙江瑞安	强台风
4	温妮 9711	8 月 18 日(七月十六)	浙江温岭	台风
5	麦莎 0509	8 月 6 日(七月初二)	浙江玉环	强台风
6	海葵 1211	8 月 8 日(六月廿一)	浙江象山	强台风
7	菲特 1323	10 月 7 日(九月初三)	福建福鼎	强台风
8	灿鸿 1509	7 月 11 日(五月廿六)	浙江舟山	强台风
9	泰利 1718	9 月 15 日(七月廿五)转向	台州外海转向	强台风
10	摩羯 1814	8 月 12 日(七月初二)	浙江温岭	强热带风暴

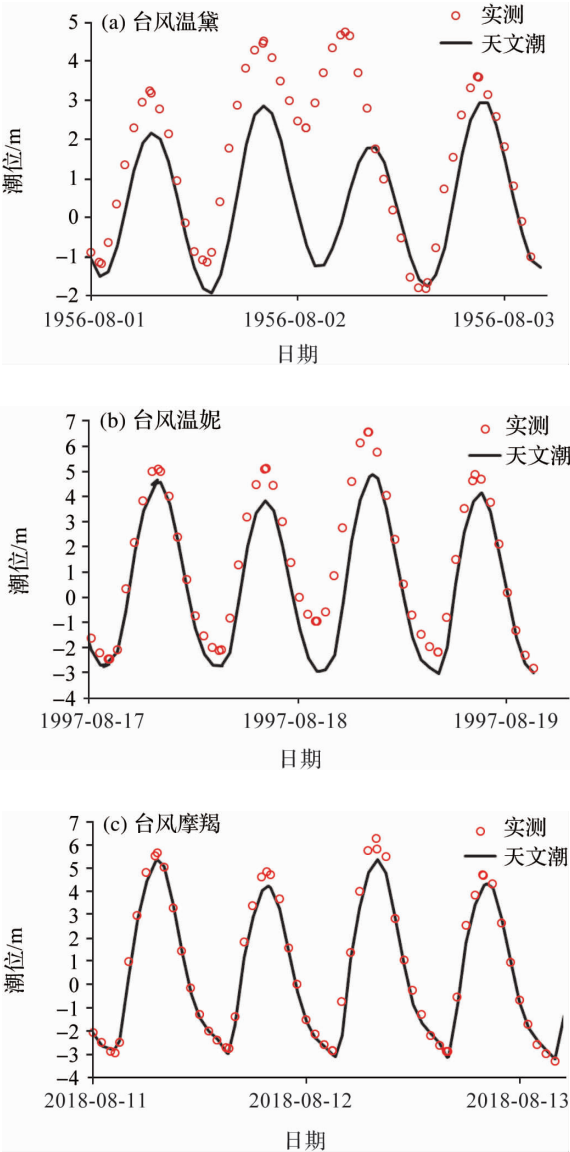


图4 3次台风期间激浦站实测潮位和天文潮对比
Fig. 4 Comparison between measured tidal level and astronomical tide at Ganpu station during three typhoons

图5展示了台风期间4个潮周期(台风登陆前或转向前2个、登陆或转向时段1个、登陆后或转向后1个)激浦站低潮位的变化(激浦实测低潮位与天文潮低潮位之差)。由图可知,在10次台风期间的40个潮周期中,只有2个潮周期的低潮位下降,出现在台风温黛期间最后1个潮周期(即台风登陆后)和台风摩羯期间第1个潮周期,下降值分别为0.05 m和0.12 m,其余38个潮周期低潮位均为抬高,其中抬高1~2 m的为5个,2~3 m的为2个,3 m以上的为1个(台风温黛)。10次台风期间激浦站低潮位平均抬高0.76 m。

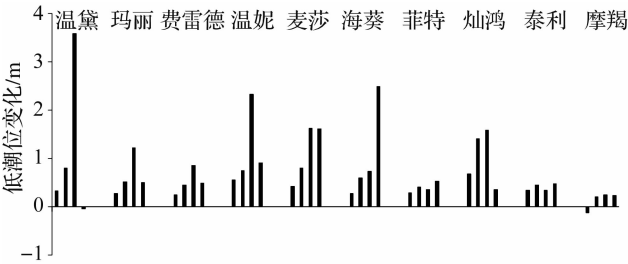


图5 台风期间激浦站低潮位变化
Fig. 5 Changes of low tide level at Ganpu station during typhoons

图6揭示了台风期间4个潮周期激浦站的潮差相对变化(激浦实测潮差与天文潮潮差的相对变化)。在10次台风期间(40个潮周期),潮差平均增大0.26 m,其中潮差增大占80%。其中5次台风期间,潮差均为增大;5次台风期间,潮差有增有减,但以增大为主。其中潮差绝对值增大、减小最多的分别达1.11 m(台风灿鸿)和1.73 m(台风海葵),这两个台风期间潮差相对值增大、减小也最多,分别达22.8%(台风灿鸿)和26.5%(台风海葵)。

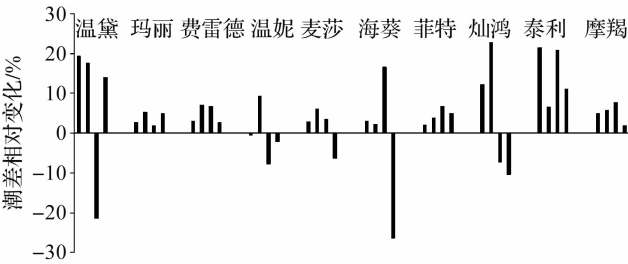


图6 台风期间激浦站潮差变化
Fig. 6 Changes of tidal range at Ganpu station during typhoons

图7为台风期间连续4个潮周期激浦站潮到时间(即激浦站实测潮到时间与天文潮潮到时间之差)变化图,负值表示实测潮到时间早于天文潮,正值表示实测潮到时间晚于天文潮。在10次台风期间,大多数潮的潮到时间提早,20%的潮期延迟,其中连续4个潮的潮到时间均提早的为3次,有提早也有延迟的为7次。从时间量值上看,在10次台风期间,有8次的潮到时间提早超过30 min,其中4次时间提早超过1 h,最大提早时间达1 h 34 min,出现在台风温妮发生期间;而潮到时间延迟最多仅为10 min,发生在台风麦莎和摩羯期间。10次台风期间激浦站潮到时间平均提早23 min。

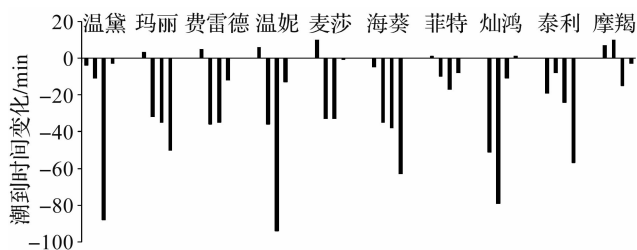


图 7 台风期间澉浦站潮到时间变化
Fig. 7 Changes of tidal arrive time at Ganpu station during typhoons

图 8 为台风期间连续 4 个潮周期的澉浦站涨潮历时相对变化(即澉浦站实测涨潮历时与天文潮涨潮历时之差),负值表示实测涨潮历时短于天文潮,正值表示实测涨潮历时长于天文潮。40 个潮周期的涨潮历时表现为有增有减,平均缩短 5 min,相对缩短为 1.2%。40 个潮周期中涨潮历时缩短的为 19 个,占 47.5%,最多缩短 94 min(台风温黛),相对缩短 25.8%。台风温妮期间,涨潮历时增长最多,为 46 min,相对增长 14.6%。在台风玛丽和菲特发生期间,连续 4 个潮周期的涨潮历时均增加。

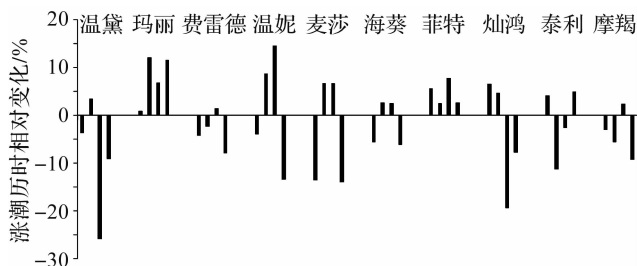


图 8 台风期间澉浦站涨潮历时变化
Fig. 8 Changes of duration of flood tide at Ganpu station during typhoons

综上所述,台风可导致澉浦站低潮位、潮差、潮到时间、涨潮历时等潮汐要素发生变化,而这些潮汐变化会间接影响涌潮。

3 台风对钱塘江涌潮的影响

根据以上分析可知,台风会对涌潮河段下游澉浦站的潮汐特征产生影响,下面探讨台风对涌潮河段上游盐官站的潮汐和涌潮的影响。盐官为知名的涌潮观赏胜地,同时建有潮位站,有长期的潮汐观测资料(本文观测资料来自浙江省水文管理中心),现以盐官站为例分析之。

3.1 对涌潮高度的影响

盐官站距离澉浦站约 51 km。涌潮在澉浦站上游形成后,沿着钱塘江向内逐渐增大,在盐官站涌潮达到最大,在盐官以上河段又逐渐减小。潮差是影响涌潮高度的最重要因素,在其它条件相同情况下,潮差越大,涌潮越强。根据 2010 年 10 月盐官站涌潮的实测资料(2010 年 10 月 1 日—30 日,资料来自浙江省河海测绘院),涌潮高度 Δh 与潮差 A_y 的相关关系为(相关系数为 0.98)^[5]

$$\Delta h = 0.95A_y - 2.24 \quad (1)$$

式中: A_y 为盐官站潮差,单位为 m; Δh 为涌潮高度,单位为 m。

在非洪水期,盐官和澉浦两站的潮汐特征具有很好的相关性,相关系数达 0.98(超过 99% 的置信度)。基于两站同步实测 1 个月的潮位资料,得到两站潮差的相关公式:

$$A_y = 0.72A_g - 0.51 \quad (2)$$

式中: A_g 为澉浦站潮差,单位为 m。

根据公式(1)和(2)得到盐官涌潮高度 Δh 与澉浦潮差 A_g 的关系式为

$$\Delta h = 0.68(A_g - 4.0) \quad (3)$$

上式表明,当澉浦站潮差大于盐官站产生涌潮的临界潮差 4 m 时,澉浦站潮差每增大 1 m,盐官站涌潮高度增大 0.68 m。前文对 10 次台风期间的分析结果表明,澉浦站潮差增大、减小最多分别为 1.11 m 和 1.73 m,由此得到盐官站涌潮高度相应增大 0.75 m 和减小 1.18 m。盐官的涌潮高度一般小于 2 m,在极端情况下(如台风灿鸿和台风海葵),台风对涌潮高度的影响显著。但就平均而言,台风期间澉浦站潮差平均增大 0.26 m,相应盐官涌潮高度增大仅 0.18 m,增大并不明显。

3.2 对涌潮陡度的影响

在涨潮量相同的情况下,涨潮历时越短,流量越大,水面涨率越大,水面坡降也越大,从而涌潮也越陡^[6]。盐官站的涨潮历时与澉浦站的涨潮历时密切相关,根据一个月同步实测资料(资料时间和来源同前)得到盐官涨潮历时 T_y 与澉浦涨潮历时 T_g 的关系如下

$$T_y = 0.48T_g + 15.19 \quad (4)$$

式中: T 的单位为 min。式(4)表明,澉浦站涨潮历时每减小 10 min,盐官站涨潮历时则相应减小 4.8 min。根据前文分析结果,在 10 次台风期间,澉浦站涨潮历时增大、减小最多分别为 46 min 和 94 min,根据式(4)得到盐官站涨潮历时相应增大 22 min(13.2%)和减小 45

min(25.0%)。目前有关涌潮陡度的实测资料极少,对它的认识还比较肤浅。假设涌潮陡度与涨潮历时成反比,则台风期间涌潮陡度最大可以增加25.0%。但平均而言,10次台风期间澉浦站涨潮历时平均缩短5 min,相对缩短仅为1.2%,盐官涨潮历时相应缩短2.4 min,与无台风期间的涨潮历时无明显差异。

3.3 对涌潮传播速度的影响

涌潮是涨潮波的前锋,在涌潮河段潮波的传播速度即为涌潮传播速度。影响涌潮传播速度的因素较多,在不考虑风场直接作用的条件下,潘存鸿等^[3]建立了涌潮传播速度 C 的解析计算公式:

$$C = u_u + \sqrt{gh_d \left(1 + \frac{\Delta h}{2h_u}\right)} \quad (5)$$

式中: u_u 为上游(潮前)落潮流速,单位:m/s; h 为水深,单位:m; Δh 为涌潮高度, $\Delta h = h_d - h_u$,其中 h_u 和 h_d 分别表示潮前(河侧)和潮后(海侧)水深,单位:m。在无涌潮河段,一般潮前落潮流速为零^[2],则式(5)可简化为浅水波速公式。

受台风影响,潮前流速、潮前和潮后水深均会发生变化,从而影响涌潮传播速度。一般情况下,受台风增水的影响,低潮位抬高,引起水深加大,从而涌潮传播速度加快。图9为10次台风期间连续4个潮周期澉浦—盐官段潮波(涌潮)传播速度变化。由于该段河道水深较浅,潮波传播相对较慢,大多数潮周期的潮波传播速度介于3~5 m/s。台风期间连续4个潮周期,澉浦—盐官段的潮波传播速度有增有减,40个潮周期中传播速度增大的占72.5%,增大10%以上的有13个,占32.5%。增大幅度明显大于减小幅度,其中增幅最大可达138.9%,发生在台风温黛期间;最大减小幅度发生在台风温妮期间,仅-10.2%。台风玛丽、麦莎和摩羯发生期间,连续4个潮周期的潮波传播速度均为增大。就平均而言,10次台风期间潮波传播速度平均为4.1 m/s,平均增大8.9%。

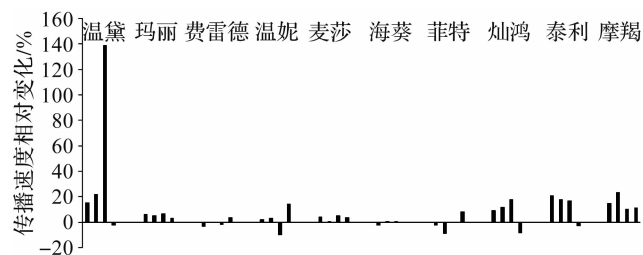


图9 台风期间澉浦—盐官潮波传播速度变化

Fig. 9 Changes of propagation speed of tide from Ganpu to Yanguan station during typhoons

3.4 对涌潮到达时间的影响

涌潮到达时间是涌潮预报中最重要的指标,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澉浦站潮到时间的影响,还受到澉浦至盐官段涌潮传播速度的影响。因此,盐官站涌潮到达时间的变化幅度要大于澉浦站潮到时间的变化幅度。就平均而言,台风期间40个潮周期中盐官站的涌潮到达时间平均提早37 min,比澉浦站的潮到时间平均提早14 min。图10为10次台风期间盐官站涌潮到达时间的变化,由图可知,40个潮周期中有32个潮周期(占80%)的涌潮到达时间提早,最多提早3 h 33 min。台风期间,涌潮到达时间延迟的仅占20%,且与提早时间相比,量值上也较小,延迟最多的为31 min。

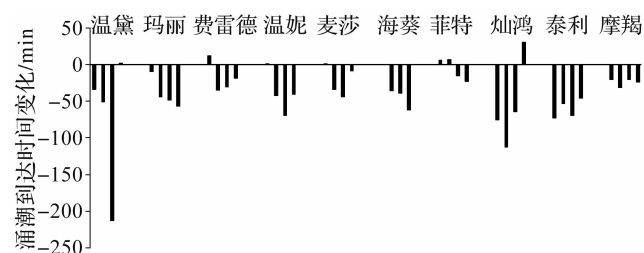


图10 台风期间盐官站涌潮到达时间变化

Fig. 10 Changes of arrival time of tidal bore at Yanguan station during typhoons

3.5 对涌潮流速的影响

若不考虑台风产生的风生流,涌潮流速 u_d 可表示为^[3]

$$\begin{aligned} u_d &= u_u + \sqrt{\frac{g}{2} \left(\frac{1}{h_u} + \frac{1}{h_d} \right) \Delta h} \\ &= u_u + \sqrt{\frac{g}{2} \left(\frac{1}{h_u} + \frac{1}{h_u + \Delta h} \right) \Delta h} \end{aligned} \quad (6)$$

式中符号意义同前。据前文分析,台风期间大多数情况下,一方面涌潮高度增大,另一方面低潮位抬高,即潮前水深增大。根据式(6),二者对涌潮流速的作用恰好相反,因此,在不考虑台风产生的风生流条件下,台风期间的涌潮流速可能增大也可能减小。但是,即使涌潮流速不变,由于水深加大,单宽流量增大,对涉水工程的作用力也会增大。

4 结论

本文重点探讨了台风对涌潮的间接影响,即台风引起涌潮起潮点下游澉浦站潮汐变化,间接影响盐官

站的涌潮特征。主要结论如下:

(1)台风对潮汐的影响非常复杂,台风造成涌潮起潮点下游澉浦站低潮位、潮差、潮到时间、涨潮历时等发生变化。台风期间澉浦站低潮位平均抬高 0.76 m,潮差平均增大 0.26 m,澉浦站潮到时间平均提早 23 min,涨潮历时平均缩短 5 min。

(2)台风通过影响澉浦站潮汐运动间接影响盐官涌潮,导致涌潮高度、陡度、传播速度、到达时间和流速等发生变化,且变化幅度较大。台风期间盐官站涌潮的高度平均增大 0.18 m,涌潮的到达时间平均提早 37 min,澉浦至盐官段涌潮传播速度平均增大 8.9%,涌潮的陡度变陡,流速有增有减,但单宽流量增大。

台风期间除上述台风对涌潮间接影响外,还有局部风场对涌潮的直接影响,这些因素共同作用造成涌潮更为壮观,对涉水工程的破坏力也更大,因而对观潮安全和涌潮防灾带来了更大的挑战。本研究成果有助于提高涌潮预报精度,并为涌潮防灾提供技术支撑。

参考文献(References):

- [1] CHANSON H. Current knowledge in tidal bores and their environmental, ecological and cultural impacts[J]. *Environmental Fluid Mechanics*, 2011, 11(1): 77-98.
- [2] 潘存鸿,潘冬子,鲁海燕,等. 钱塘江涌潮流速研究[J]. *海洋工程*, 2017, 35(5): 33-41.
PAN Cunhong, PAN Dongzi, LU Haiyan, et al. Study on velocity of tidal bore in Qiantang Estuary[J]. *The Ocean Engineering*, 2017, 35(5): 33-41.
- [3] 潘存鸿,鲁海燕,曾剑. 钱塘江涌潮特性及其数值模拟[J]. *水利水电工程学报*, 2008(2): 1-9.
PAN Cunhong, LU Haiyan, ZENG Jian. Characteristic and numerical simulation of tidal bore in Qiantang River[J]. *Hydro-Science and Engineering*, 2008(2): 1-9.
- [4] BONNETON P, BONNETON N, PARISOT J P, et al. Tidal bore dynamics in funnel-shaped estuaries[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2015, 120(2): 923-941.
- [5] 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*, 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.
- [6] 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.
- [7] 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 Wenhua, 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.
- [8] 许宝华,乔红杰. 长江口北支涌潮现状分析[J]. *长江科学院院报*, 2019, 36(5): 13-17.
XU Baohua, QIAO Hongjie. Current situation of tidal bore in North Branch of the Yangtze River Estuary[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2019, 36(5): 13-17.
- [9] 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.
- [10] LENG Xinqian, CHANSON H. Unsteady velocity profiling in bores and positive surges[J]. *Flow Measurement and Instrumentation*, 2017, 54: 136-145.
- [11] XIE Dongfeng, PAN Cunhong. A preliminary study of the turbulence features of the tidal bore in Qiantang River, China[J]. *Journal of Hydrodynamics*, 2013, 25(6): 903-911.
- [12] 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.
- [13] 李颖,潘冬子,潘存鸿. 强潮河口桥墩涌潮压力试验研究[J]. *海洋工程*, 2017, 35(4): 53-58.
LI Ying, PAN Dongzi, PAN Cunhong. Experimental study of tidal bore-induced pressures on piers in a macro-tidal estuary[J]. *The Ocean Engineering*, 2017, 35(4): 53-58.
- [14] 陈海军,严盛,徐长节,等. 直立方桩上涌潮压力动态测试及分析研究[J]. *水动力学研究与进展*, 2006, 21(3): 411-417.
CHEN Haijun, YAN Sheng, XU Changjie, et al. Dynamic measurement and study of the bore pressure on a vertical square cylinder in Qiantang River[J]. *Chinese Journal of Hydrodynamics*, 2006, 21(3): 411-417.
- [15] DOLGOPOLOVA E N. The conditions for tidal bore formation and its effect on the transport of saline water at river mouths[J]. *Water Resources*, 2012, 40(1): 16-30.
- [16] 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]. *Chinese Journal of Hydraulic Engineering*, 2014, 45(11): 1301-1309.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] FAN Daidu, CAI Guofu, SHANG Shuai, et al. Sedimentation processes and sedimentary characteristics of tidal bores along the north bank of the Qiantang Estuary[J]. Chinese Science Bulletin, 2012, 57(13): 1578-1589.
- [20] 李志永,程文龙,金建峰,等.堤线调整对九溪涌潮景观影响评价研究[J].海洋学研究,2019,37(3):79-85.
- LI Zhiyong, CHENG Wenlong, JIN Jianfeng, et al. Impact assessment of tidal bore landscape for dike line adjustment in Jiuxi reach of Qiantang River[J]. Journal of Marine Sciences, 2019, 37(3): 79-85.
- [21] 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.
- [22] 潘存鸿,汪求顺,潘冬子.钱塘江涌潮对风场响应的三维数值研究[J].水利水运工程学报,2019(6):77-85.
- PAN Cunhong, WANG Qiushun, PAN Dongzi. Three-dimensional numerical study on the Qiantang River tidal bore under winds[J]. Hydro-Science and Engineering, 2019(6): 77-85.

Study on influence of typhoon on tidal bore in Qiantang River

PAN Cunhong^{1,2}, PAN Dongzi^{1,2}, ZHENG Jun^{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: The annual greatest tidal bore in the Qiantang River almost occurs during typhoons. Based on the measured tidal data and combined with the harmonic analysis of astronomical tides, the influence of typhoon on tide downstream of the tidal bore formation section in the Qiantang River Estuary was studied, and then the tidal bore changes indirectly caused by tidal changes was discussed. The results show that typhoons cause the changes in low tide level, tidal range, tidal bore arrival time and duration of flood tide, and indirectly affect tidal bore through typhoons, resulting in the changes in tidal bore height, steepness, propagation speed, arrival time and flow velocity. In general, during a typhoon, the tidal bore height at Yanguan increases by 0.18 m on average, and the time of tidal bore arrives 37 min earlier on average, the propagation speed of tidal bore from Ganpu to Yanguan increases by 8.9% on average, the steepness of tidal bore increases, and the velocity of tidal bore increases or decreases, but the unit width flow rate increases.

Key words: Qiantang River; typhoon; tidal bore height; tidal bore velocity; propagation speed of tidal bore