

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2022.03.010

粤港澳大湾区风暴潮时空分布特征及影响因素

罗志发^{1,2,3,4,5}, 黄本胜^{1,2,3,4,5}, 邱静^{1,2,3,4,5}, 谭超^{1,2,3,4,5}, 黄广灵^{1,2,3,4,5}

(1. 广东省水利水电科学研究院, 广东 广州 510610; 2. 广东省水动力学应用研究重点实验室, 广东 广州 510610; 3. 河口水利技术国家地方联合工程实验室, 广东 广州 510610; 4. 广东省流域水环境治理与水生态修复重点实验室, 广东 广州 510610; 5. 南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海), 广东 珠海 519080)

摘要:基于1970—2018年珠江口潮位站历史潮位资料,结合风暴潮数值模拟结果,统计分析粤港澳大湾区风暴潮的时空分布特征并探讨了风暴潮增水影响机理。结果表明:在空间分布上,伶仃洋、狮子洋、前航道等区域出现较大增水的频率较高,与该区域特殊的地理位置及伶仃洋河口湾漏斗状形态产生的能量辐聚有关,增水极值与台风登陆地点和台风强度均有关系;风暴潮发生时间主要集中在7—9月,占全年总次数的74.4%;影响粤港澳大湾区的强台风以上级别的台风频次增加趋势明显,各站点历年最高潮位呈增加趋势,平均速率为0.02~0.03 m/a;台风路径对风暴潮增水的空间分布有较大影响,当台风在大湾区西岸登陆,距离台风登陆点约2.5倍最大风速半径的位置可产生较大的增水值;最大增水随着台风中心压强的降低而升高,中心压强每下降10 hPa,最大增水值上升0.4~1.1 m;当台风移动速度接近8.3 m/s,珠江口形成较为稳定的风暴潮水位梯度,产生较大的风暴潮增水。

关键词:风暴潮;时空分布;历史最高潮位;影响因素;粤港澳大湾区

中图分类号:P731.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2022)03-0072-08

Spatio-temporal distribution characteristics and influencing mechanisms of storm surge in Guangdong, Hong Kong and Macao Greater Bay Area // LUO Zhifa^{1,2,3,4,5}, HUANG Bensheng^{1,2,3,4,5}, QIU Jing^{1,2,3,4,5}, TAN Chao^{1,2,3,4,5}, HUANG Guangling^{1,2,3,4,5} (1. Guangdong Research Institute of Water Resources and Hydropower, Guangzhou 510610, China; 2. Guangdong Key Laboratory of Hydrodynamic Research, Guangzhou 510610, China; 3. State and Local Joint Engineering Laboratory of Estuarine Hydraulic Technology, Guangzhou 510610, China; 4. Guangdong Provincial Key Laboratory of Water Quality Improvement and Ecological Restoration for Watersheds, Guangzhou 510610, China; 5. Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Zhuhai), Zhuhai 519080, China)

Abstract: Based on historical tidal data from tide gauge stations in the Pearl River Estuary from 1970 to 2018 and the storm surge simulation results, the spatio-temporal distribution characteristics and influencing mechanisms of storm surge in the Guangdong, Hong Kong and Macao Greater Bay Area were analyzed. The results show that high surges frequently occurred in the Lingdingyang, Shiziyang, and front navigation route areas, which was related to the special geographical position of the region and energy convergence due to the funnel shape of the Lingdingyang Estuary. Surge extremes were affected by the landfall position and strength of typhoons. Storm surges mainly occurred in July, August and September, accounting for 74.4% of the total of the year. The frequency of severe typhoons affecting the Guangdong, Hong Kong and Macao Greater Bay Area increased significantly, and the extreme tide level at each station showed an increasing trend year by year, with an average rate of 0.02 to 0.03 m/a. The typhoon track greatly influenced the spatial distribution of storm surge, and the location about 2.5 times the radius of the maximum wind speed from the typhoon landfall position can produce a large storm surge value when the landfall position was on the west coast of the Guangdong, Hong Kong and Macao Greater Bay Area. The maximum surge value increased with the decrease of pressure at the typhoon center, with a rate of about 0.4 to 1.1 m surge increment for each 10 hPa decrease of pressure. When the typhoon speed was up to 8.3 m/s, a relatively stable

基金项目:广东省重点领域研发计划(2019B111101002);广东省软科学研究计划(2018B020207004);粤港水安全保障联合实验室基金(2020B1212030005);广东省水动力学应用研究重点实验室开放研究基金(gdsky[2018]001)

作者简介:罗志发(1988—),男,博士研究生,主要从事河口海岸动力学研究。E-mail: luozf_sky@foxmail.com

gradient of water level could be formed in the Pearl River Estuary, leading to a high storm surge.

Key words: storm surge; spatio-temporal distribution; historical highest tide level; influencing factor; Guangdong, Hong Kong and Macao Greater Bay Area

粤港澳大湾区包括香港特别行政区、澳门特别行政区和广东省广州市、深圳市、珠海市、佛山市、惠州市、东莞市、中山市、江门市、肇庆市,总面积 5.6 万 km²,总人口约 7 000 万人,是我国开放程度最高、经济活力最强的区域之一,以不足全国 1% 的土地面积和不足全国 5% 的人口,贡献了全国经济总量的 17%,在国家发展大局中具有重要战略地位。粤港澳大湾区位于中国大陆南端,濒临南海,地处珠江流域下游,河网水系发达,呈“三江汇流,八口入海”之势。由于特殊的地理位置和气候,大湾区台风风暴潮灾害易发频发,平均每年有 1.08 个热带气旋直接在大湾区登陆^[1],由此造成的人员伤亡、经济损失相当巨大,已经成为影响人民生活质量、制约国民经济高质量发展的重要因素。

风暴潮特征研究是开展风暴潮防灾减灾工作的基础。关于大湾区台风风暴潮特征的研究始于 20 世纪 80 年代,何洪钜^[2]采用 1949—1980 年的历史潮位资料,对珠江口风暴潮的特征及机理进行了初步探讨;此后,卢如秀等^[3-5]采用历史潮位资料对珠江口台风最大增水规律、珠江口风暴潮纵向增水特征进行了研究;还有不少学者对登陆大湾区的个例台风进行分析,讨论其风暴潮特征及影响^[6-8]。随着数值模拟技术的发展,风暴潮数值模型被广泛应用于风暴潮影响机理的分析^[9-12]。虽然对大湾区风暴潮特征已有了基本的认识,但近年来影响大湾区的强台风频次增加明显,河口潮位站屡次刷新历史最高潮位值,大湾区风暴潮呈现新的特征。面对日益严重的风暴潮灾害以及全球变化背景下风暴潮灾害的频率和强度变化趋势,开展粤港澳大湾区风暴潮研究具有重要意义。以往大湾区风暴潮特征研究大多基于 2000 年以前的潮位时间序列资料,缺少 2000 年以来的潮位资料分析。本文采用 1970—2018 年的河口潮位站历史潮位资料,统计分析大湾区台风风暴潮时空分布特征,并结合风暴潮数值模型进一步探讨大湾区风暴潮增水的影响机理,以期对粤港澳大湾区风暴潮灾害防御提供参考。

1 风暴潮时空分布特征

1.1 登陆热带气旋统计分析

采用中央气象台台风网(<http://typhoon.nmc.cn/web.html>)发布的热带气旋最佳路径,统计

1970—2018 年登陆粤港澳大湾区的热带气旋,结果表明,登陆的热带气旋共有 40 个,年均 0.8 个,热带气旋登陆点分布见图 1。按登陆时间统计,登陆热带气旋主要发生在 5—8 月,其中 8 月最多,共登陆 13 次,其次为 7 月 9 次,9 月 8 次。7—9 月登陆的热带气旋占总数的 61.2%。9 月登陆强度达到台风及以上等级的热带气旋次数最多,为 6 次,占 35.3%;其次为 8 月 5 次,7 月 3 次,分别占 29.4% 和 17.6%。将热带气旋登陆点分为大湾区西岸和东岸,在大湾区西岸登陆的有 24 次,占 60%,其中热带风暴、强热带风暴、台风和强台风分别为 3、9、9、3 次;在大湾区东岸登陆的 16 次,占 40%,其中热带风暴、强热带风暴、台风和强台风分别为 7、4、3、2 次。按登陆地市统计,在江门市登陆最多,为 14 次,占 35%;其次是珠海市和深圳市,均为 10 次,占 25%。按登陆强度统计,台风以上级别有 17 次,其中台风级别有 12 次,强台风级别有 5 次。登陆的强台风 2016 年以来出现过 3 次,分别是 201604 号强台风“妮妲”、201713 号强台风“天鸽”和 201822 号强台风“山竹”。

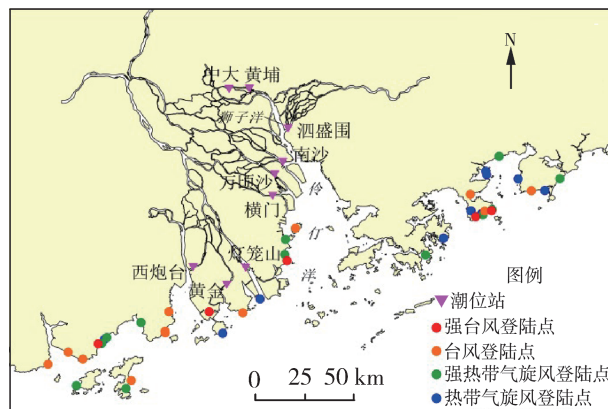


图 1 热带气旋登陆点及潮位站分布

Fig. 1 Distribution of tropical cyclone landfall locations and tidal gauge stations

1.2 风暴潮增水空间分布特征

选取 1970—2018 年登陆粤港澳大湾区的热带气旋过程,对中大、黄埔、泗盛围、南沙、万顷沙、横门、灯笼山、黄金、西炮台等 9 个潮位站(图 1)风暴潮过程的增水数据进行统计和分析(表 1)。风暴潮增水是由实测潮位减去天文潮预报潮位分离得出^[13]。

从增水的空间分布可看出(图 2),大于 3 m 的增水在泗盛围站出现 2 次,中大、黄埔、南沙、万顷沙、横门站均出现 1 次。2~3 m 的增水,在中大、黄

表 1 各潮位站潮位资料年限及设计潮位值

Table 1 Time series of water level data and design tide level at each tidal gauge station

潮位站	资料年限	各频率设计潮位值/m						
		0.1%	0.5%	1%	2%	5%	10%	20%
中 大	1974—2018 年	3.75	3.37	3.20	3.03	2.80	2.61	2.41
黄 埔	1970—2018 年	3.47	3.13	2.97	2.82	2.60	2.43	2.25
泗盛围	1970—2018 年	3.96	3.41	3.17	2.93	2.62	2.39	2.15
南 沙	1970—2018 年	4.04	3.46	3.21	2.96	2.63	2.38	2.14
万顷沙	1970—2018 年	4.00	3.41	3.16	2.91	2.58	2.33	2.08
横 门	1970—2018 年	4.11	3.48	3.20	2.93	2.58	2.32	2.06
灯笼山	1975—2018 年	3.67	3.17	2.95	2.73	2.44	2.21	1.97
黄 金	1970—2018 年	3.75	3.24	3.01	2.79	2.49	2.26	2.02
西炮台	1974—2018 年	4.00	3.41	3.16	2.91	2.58	2.33	2.08

注:设计潮位资料来源于《珠江河口综合治理规划修编主要测站设计潮位复核报告》。

埔站出现次数较多,均为 4 次。风暴潮增水与台风登陆地点和强度有关,各站点大于 2 m 的增水均产生于大湾区西岸登陆的台风,且台风风力均大于 12 级(表 2)。台风在大湾区西岸登陆,登陆时珠江口盛行的东南风有利于水体往伶仃洋输移,如果遇上风力较强的台风容易造成较大的增水。

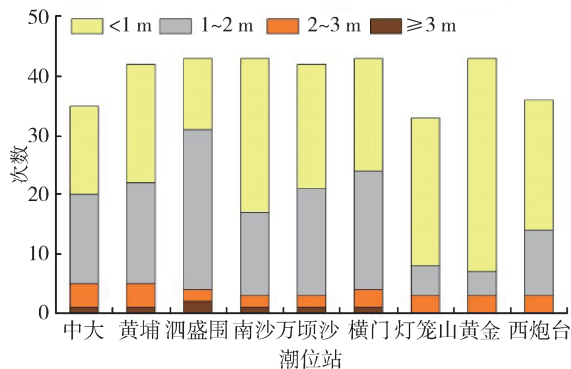


图 2 各潮位站增水统计

Fig. 2 Statistics of surge at each tidal gauge station

表 2 风暴潮增水与台风要素的关系

Table 2 Relationship between storm surge and typhoon elements

潮位站	不同增水的台风在 西岸登录比例/%		不同增水的台风强度	
	1~2 m	>2 m	1~2 m	>2 m
中 大	61.5	100	9~14 级	12 级以上
南 沙	64.3	100	8~14 级	12 级以上
灯笼山	100	100	12 级以上	12 级以上
西炮台	100	100	10~14 级	12 级以上

中大、黄埔、泗盛围、南沙、万顷沙、横门等位于伶仃洋、狮子洋、前航道区域的站点出现较大增水的频率较高,增水大于 1 m 的占比可达 40%~72%(图 2)。据统计,在大湾区西岸或东岸登陆的台风均可在该区域引起一定程度的增水,台风在西岸登陆后的东南风有利于增水;台风在东岸登陆后向西北行进,越过狮子洋后盛行的偏南风同样有利于增水。同时还与伶仃洋形态有关,伶仃洋是典型的漏

斗形河口湾,由湾外向里逐渐收窄,水深逐渐变小,当台风风暴潮波向里传入,波能逐渐集中,波高相对增大,并通过虎门沿河道上溯。

灯笼山、黄金、西炮台等站点出现较大增水的频率较低,增水大于 1 m 的占比仅为 26%~38%,只有在大湾区西岸登陆的台风才有可能引起该区域较大的增水(表 2)。同时与区域岸线地形、河道走向有关。磨刀门前缘三灶和横琴等岛屿的阻挡,影响风暴潮的涌入;黄金至白蕉一带自白藤堵海之后只由浅小的鸡啼门与外海相连,风暴潮难以上溯^[3]。

1.3 风暴潮增水时间分布特征

1.3.1 逐月分布

图 3 是各级增水出现次数的逐月分布图,可以看出,风暴潮主要集中在 7—9 月,占全年总次数的 74.4%;其次,6 月、10 月分别占 11.6%、7.0%;4、5、11 月最少,占 6.9%。1 m 以上最大增水在 7—9 月出现次数最多,远高于其他月份。2 m 以上最大增水则主要集中在 6—10 月。整体来看,6—10 月的风暴潮过程中,最大增水在 1 m 以上的比例超过 85%,3 m 以上最大增水出现在 8—9 月,比例超过 5%。

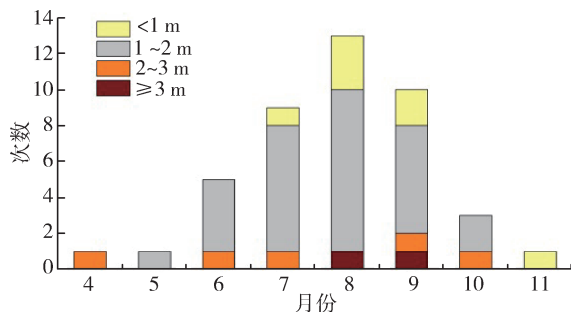


图 3 各级增水出现次数的逐月分布

Fig. 3 Monthly distribution of occurrence of surge in different levels

粤港澳大湾区风暴潮发生时间很大程度上由登陆热带气旋的时间分布特征所决定。据前文分析,

全年 61.2% 的热带气旋登陆发生在 7—9 月,明显多于其他月份。8—9 月登陆强度达到台风及以上等级的热带气旋的占比最大,达到 64.7%,其次是 7 月,占比为 17.6%。

1.3.2 逐年分布

各潮位站历史最高潮位和最大增水情况见表 3,中大、黄埔、泗盛围、南沙、万顷沙、横门以及黄金站历史最高潮位均出现在 2018 年“山竹”台风过程中,灯笼山站出现在 2017 年“天鸽”台风过程中,西炮台站出现在 2009 年“巨爵”台风过程中。一般认为,风暴潮出现时间恰逢天文大潮期或天文潮高潮时,可能引发严重的风暴潮灾害。如“天鸽”台风于 2017 年 8 月 23 日 13 时登陆珠海,恰逢天文大潮且接近高潮位,灯笼山站最高水位为 2.92 m,接近 100 年一遇设计水位。事实上,当台风登陆风力较强时,即使风暴潮发生在天文潮小潮时,同样也会引起巨大的风暴潮灾害。如“山竹”台风于 2018 年 9 月 16 日 17 时登陆江门时中心附近最大风力 14 级,风速超过 45 m/s。此时为天文潮的小潮平潮期,中大、黄埔、泗盛围、南沙、万顷沙、横门等站均出现超过 3 m 的历史高潮位。风暴潮历史最高潮位的出现也与台风路径有关,由表 2 可知,引起各潮位站历史最高潮位的台风过程如“山竹”“天鸽”“巨爵”等均由大湾区西岸登陆,并向西北方移动。这类台风登陆时,大湾区海域普遍盛行东南风,珠江口东南向的开口方向有利于水体向岸输运堆积,此时珠江口海域普遍达到增水的最大值。尤其是伶仃洋河口湾喇叭状的形态有利于水体向湾内聚集,“山竹”台风过程中泗盛围站最高水位达到 3.55 m,最大增水达 3.40 m。

图 4 给出了中大、南沙、灯笼山站历年最高水位的变化趋势,可见各潮位站历年最高潮位均呈增加趋势,平均速率为 0.02 ~ 0.03 m/a。据相关报道^[1],2010 年以来,影响大湾区的强台风以上级

别的台风次数增加趋势明显。尤其是近年来登陆粤港澳大湾区的超强台风“天鸽”“山竹”登陆时中心附近最大风力均超过 14 级,对大湾区造成了极大影响,大部分站点最高潮位和最大增水均超过

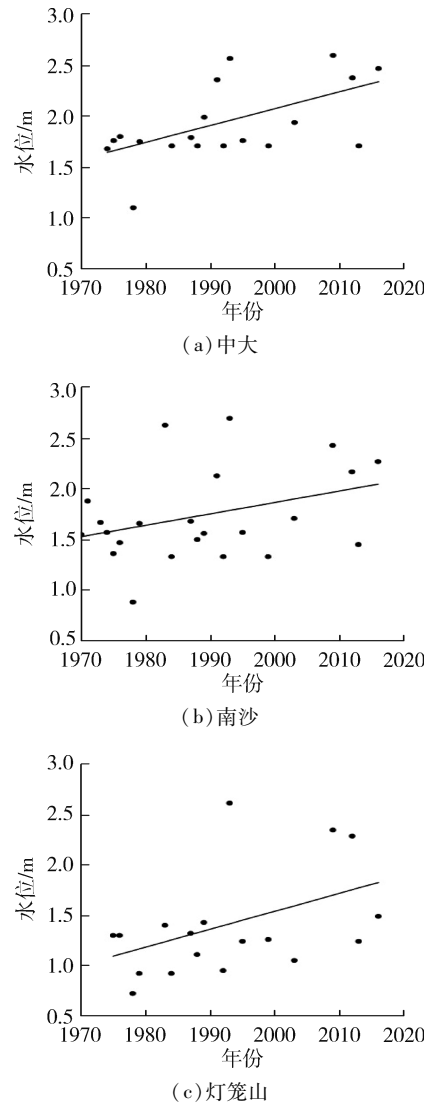


图 4 3 个潮位站历年最高水位变化趋势
Fig.4 Trend of highest water level over years at each tidal gauge station

表 3 各潮位站历史最高潮位和最大增水

潮位站	历史最高潮位					历史最大增水				
	潮位/m	出现年份	台风名称	强度	出现日期 (农历)	增水/m	出现年份	台风名称	强度	出现日期 (农历)
中 大	3.28	2018	山竹	14 级	八月初七	3.21	2018	山竹	14 级	八月初七
黄 埔	3.07	2018	山竹	14 级	八月初七	3.19	2018	山竹	14 级	八月初七
泗盛围	3.55	2018	山竹	14 级	八月初七	3.40	2018	山竹	14 级	八月初七
南 沙	3.19	2018	山竹	14 级	八月初七	3.20	2018	山竹	14 级	八月初七
万顷沙	3.32	2018	山竹	14 级	八月初七	3.37	2018	山竹	14 级	八月初七
横 门	3.36	2018	山竹	14 级	八月初七	3.43	2018	山竹	14 级	八月初七
灯笼山	2.92	2017	天鸽	14 级	七月初二	2.89	2018	山竹	14 级	八月初七
黄 金	2.59	2018	山竹	14 级	八月初七	2.74	2018	山竹	14 级	八月初七
西炮台	2.72	2009	巨爵	13 级	七月廿七	2.55	2018	山竹	14 级	八月初七

了3 m。同时,由于河口围垦带来的潮汐振幅增加、潮汐不对称性加剧和涨潮占优趋势加强,可能会加剧风暴潮灾害^[14]。

2 风暴潮影响因素分析

2.1 典型台风“山竹”风暴潮过程数值模拟

选取近年来对大湾区影响较大的超强台风“山竹”,对其风暴潮过程进行数值模拟。风暴潮模型选用基于非结构网格的海洋环流模式 SELFE (semi-implicit Eulerian-Lagrangian finite-element model),可精细化拟合复杂岸线和地形,提高网格分辨率。珠江口网格大小从河网区的 50 m 逐渐过渡到外海的 20 km。风场通过圆形台风风场与 ERA5 (the fifth generation ECMWF atmospheric reanalysis of the global climate)再分析风场合成的方式给出。为提高风暴潮模拟精度,建立南海-珠江口双重嵌套模型,由南海模型计算得到余水位,将余水位以及风场、气压场、天文潮作为珠江口模型的驱动条件,对大湾区风暴潮增水进行数值模拟。模型详细介绍及设置见文献^[15]。

选用珠江口门及河网区水文站(南沙、泗盛围、黄埔、中大)实测水位资料对风暴潮计算结果进行验证。由图 5 可知,计算结果水位变化过程与实测数据水位变化趋势一致,计算结果与实测结果吻合较好。最高潮位绝对误差为 0.05 ~ 0.30 m,相对误差控制在 9% 以内,最高潮位的相位误差均在 1 h 以内。综上分析,模型计算结果较为合理,所建立的模型能够较为准确地模拟珠江口的风暴潮过程,可为进一步分析珠江口的风暴潮影响机理提供基础。

2.2 台风路径的影响

不同台风路径引起的珠江口风暴潮增水并不相同。以“山竹”台风真实路径作为参考路径,将参考路径以 R 的间隔平移,其中 R 为台风登陆时的最大风速半径,经计算取 45 km,得到 8 条影响路径(图 6 中的试验 1 ~ 8,其中试验 1 为真实路径),运用风暴潮数值模型进一步探讨台风路径对风暴潮增水的影响。

图 7 为不同台风路径各站点风暴潮的增水过程。台风从不同地点登陆,其增水规律有所差异。从珠江口西岸登陆的台风(试验 1 ~ 4),风暴潮位对风场响应较快,台风登陆时水位迅速上升,存在明显的增水峰值,在台风登陆后 2 ~ 6 h (登陆时刻为第 5 h)可达到最大增水值。从珠江口东岸登陆的台风(试验 5 ~ 8)增水过程较为缓慢,台风登陆时首先产生较为明显的减水,而后增水缓慢增大,增水峰值较

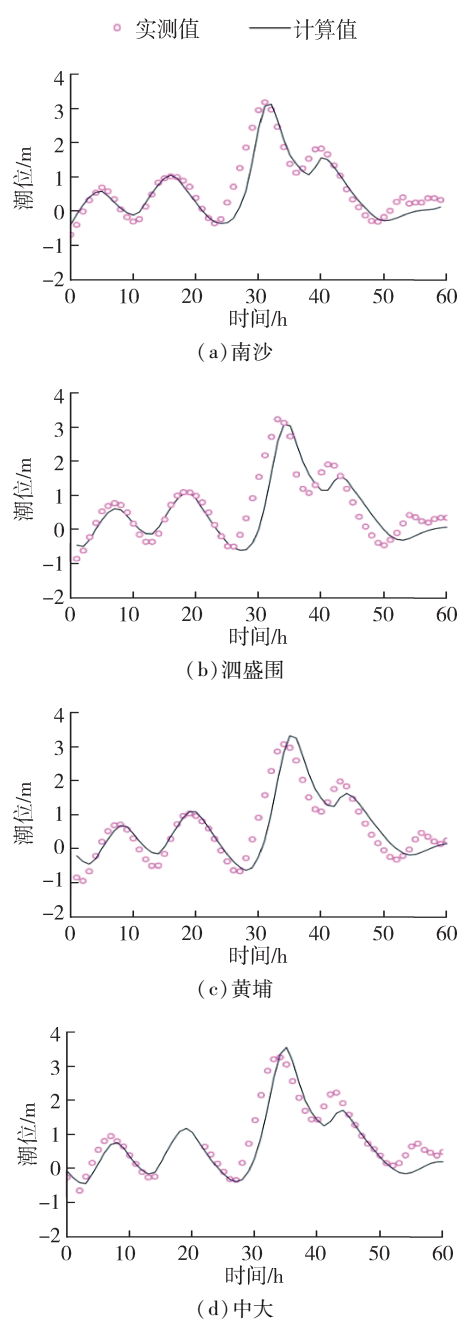


图 5 “山竹”台风过程潮位验证
Fig.5 Verification of tide level during typhoon Mangkhut

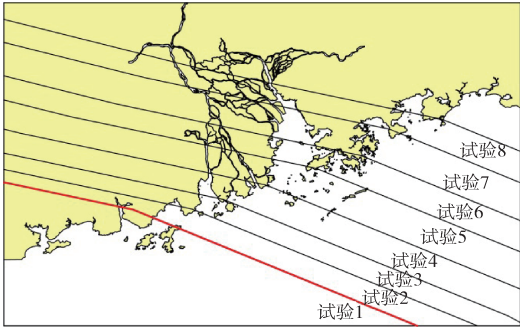


图 6 设置的台风路径
Fig.6 Schematic diagram of typhoon track

小,在台风登陆后约 8 ~ 10 h 达到最大增水值。珠江口西岸登陆台风的最大增水值均高于东岸登陆的

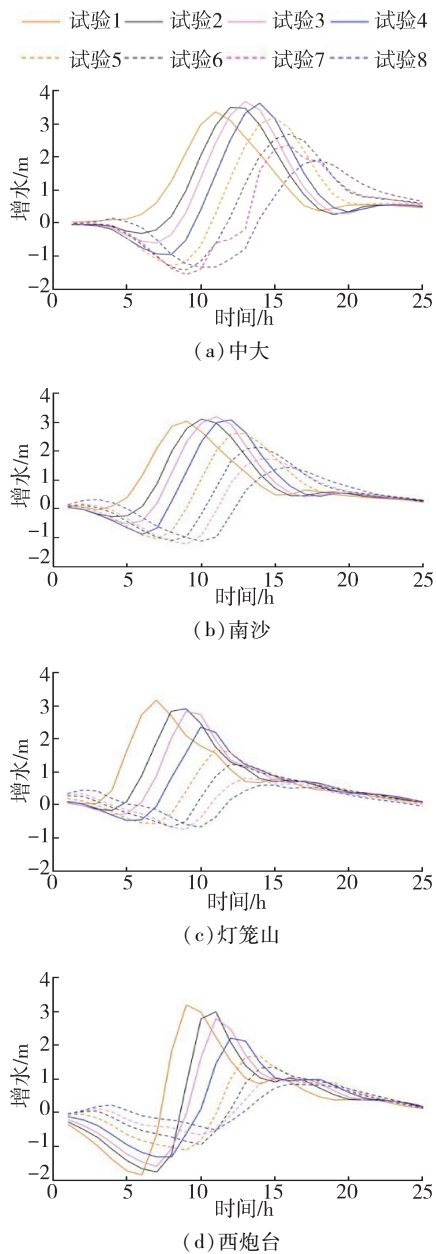


图7 不同台风路径的风暴潮增水过程

Fig. 7 Process of storm surge under different typhoon tracks

台风,这与台风登陆时的风向和伶仃洋河口湾的喇叭状形态有关,数值模拟结果与上文基于实测资料的分析结果一致。

台风登陆点对风暴潮增水的空间分布有较大影响,当台风从珠海登陆时(试验3),伶仃洋、前航道等区域增水值较大,中大、南沙最大增水可分别达到3.67 m和3.19 m;当台风从江门登陆时(试验1),黄茅海、磨刀门等区域增水值较大,灯笼山、西炮台最大增水可分别达到3.19 m、3.21 m。距离台风中心的位置不同,产生的最大增水也不同。Xie等^[16]认为最大增水出现在台风右侧最大风速半径处,而李健^[17]对粤西沿岸的研究显示台风引起最大增水的位置位于台风右侧2倍最大风速处。

根据本文计算结果,当台风在大湾区西岸登陆,距离台风登陆点约2.5倍最大风速半径的位置可产生较大的增水值。

2.3 台风强度的影响

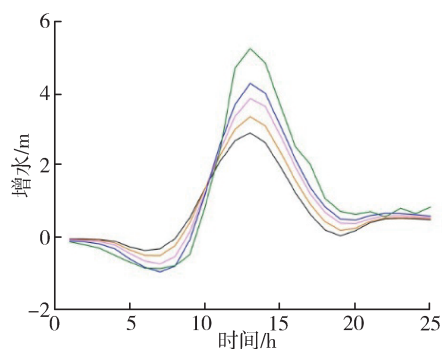
以“山竹”台风真实路径为基础,将台风的中心压强分别设置为980 hPa、960 hPa、940 hPa、920 hPa、900 hPa,分别对应台风强度为11~12级、13~14级、15~16级、17级、17级以上,探讨不同台风强度对大湾区风暴潮增水的影响。台风中心压强变化对风暴潮增水的影响分为两种:①由于台风中心低压的抽吸效应产生的增水,这种增水一般很小,中心气压每下降10 hPa,增水极值增加2%~3%^[9];②由于中心气压下降产生较大的梯度风场,风场驱动水体向岸搬运产生沿岸增水,增水值一般较大。本节主要讨论第二种增水情况。图8为各潮位站在不同强度台风的作用下风暴潮增水的过程,可见各潮位站最大增水随着台风中心压强的降低而升高,中心压强每下降10 hPa,最大增水值上升0.4~1.1 m。台风强度对不同站点最大增水的影响取决于该潮位站与台风中心的距离。在台风移动过程中,离台风中心距离较近的灯笼山、西炮台站,由中心压强降低导致的最大增水的变化相比其他潮位站更为显著,中心压强每下降10 hPa,灯笼山、西炮台最大增水上升0.80~0.84 m;距离台风中心较远的中大、南沙站,中心压强每下降10 hPa,最大增水上升0.59~0.62 m。

2.4 台风移动速度的影响

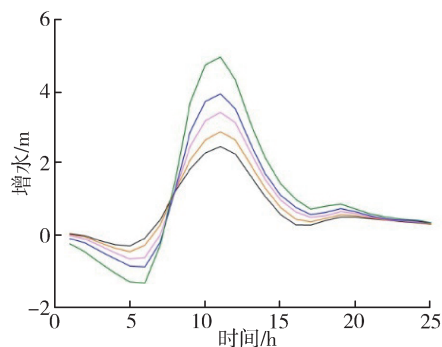
珠江口水体在台风风应力的作用下,水体向岸搬运,水位抬升,当产生的水位梯度与风应力平衡时,增水达到最大。该平衡过程并不是瞬间完成,而是需要风应力的持续作用,因此台风移动速度起到重要的作用。为研究台风移动速度对增水的影响,以“山竹”台风实际移动速度($v = 8.3 \text{ m/s}$)作为参考,设置5个数值试验,台风移动速度分别设置为 $2v$ 、 v 、 $v/2$ 、 $v/3$ 、 $v/4$,台风路径选用“山竹”实际路径。以南沙站为例,从不同台风移动速度下的风暴潮增水过程(图9)可以看出,当台风移动速度较大时(16.6 m/s),由于没有充足的时间建立水位梯度,最大增水值较小。随着台风移动速度由16.6 m/s减小至8.3 m/s,最大增水值明显增大,由2.42 m增大至3.03 m。当台风移动速度小于8.3 m/s时,最大增水值变化不大(其他站点的增水过程有相同的规律,图略)。

冯士筭^[18]认为,风暴潮位梯度的建立是由海面风应力建立了风生流,其水体的顺风搬运形成了风暴潮位的梯度,从而产生了反向的梯度流,它抑制了正向流量的发展,直至达到全流(垂向各层流速沿

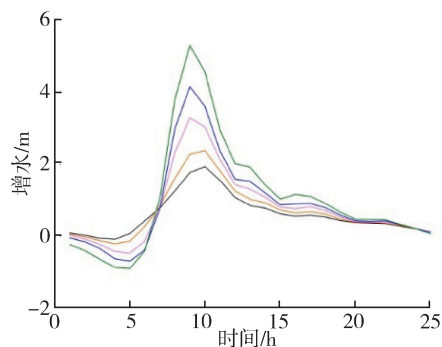
— 980 hPa — 960 hPa — 940 hPa — 920 hPa — 900 hPa



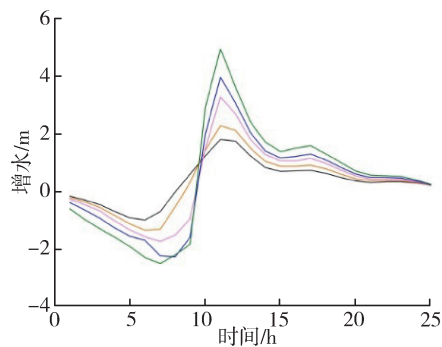
(a) 中大



(b) 南沙



(c) 灯笼山



(d) 西炮台

图8 不同强度台风的风暴潮增水过程

Fig.8 Process of storm surge with different typhoon intensities

垂向的积分)消失的定常状态。这个过程的时间尺度可表示为 $T = L^2\beta/\pi gh$, 其中 L 为河口湾的长度, β 为与湍流阻尼系数有关的量, g 为重力加速度, h 为海域平均水深。在珠江口可以取特征值 $L = 60$ km,

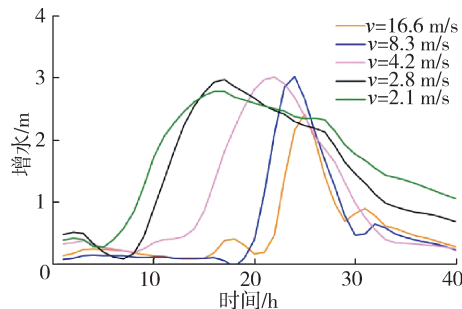


图9 不同台风移动速度下南沙站风暴潮增水过程

Fig.9 Process of storm surge at Nansha Station with different typhoon speeds

$h = 10$ m, $\beta = 7 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$, T 估算值为 2.3 h。对于移动速度分别为 16.6 m/s、8.3 m/s、4.2 m/s、2.8 m/s、2.1 m/s 的台风,其掠过珠江口的时间大致分别为 1.0 h、2.0 h、3.9 h、5.9 h 和 7.9 h。台风移动速度较快时 ($v = 16.6$ m/s),台风作用时间远小于 2.3 h,没有足够的时间建立水位梯度,因此最大增水值较小;当台风移动速度小于 8.3 m/s 时,台风作用时间接近或超过 2.3 h,台风对珠江口的影响时间较长,可形成较为稳定的水位梯度,最大增水值较大。

3 结 论

a. 从最大增水的空间分布特征来看,位于伶仃洋、狮子洋、前航道等区域的潮位站出现较大增水的频率较高,增水大于 1 m 的占比可达到 40% ~ 72%。在大湾区西岸或东岸登陆的台风均可在该区域引起一定程度的增水。伶仃洋河口湾由外向里逐渐收窄,水深逐渐变小,呈漏斗状形态,当台风风暴波向里传入,波能逐渐集中,波高相对增大,并通过虎门沿河道上溯。

b. 风暴潮发生时间很大程度上是由登陆热带气旋的时间分布特征决定的,风暴潮主要集中在 7—9 月,占全年总次数的 74.4%; 2 m 以上最大增水则主要集中在 6—10 月,其中 3 m 以上最大增水出现在 8—9 月,比例超过 5%。

c. 从各站点历史最高潮位来看,当风暴潮增水叠加天文大潮时比较容易出现突破历史记录的高潮位,如“天鸽”台风;当台风风力较大时,即使在小潮阶段也可引起较高的水位,如“山竹”台风;影响粤港澳大湾区风暴潮的台风主要为西岸登陆的台风,受北半球热带气旋风场逆时针旋转及珠江口岸线影响,往往出现较高的潮位值,各站点历史最高潮位均由大湾区西岸登陆的台风引起。近年来,影响粤港澳大湾区的强台风以上级别的台风次数增加趋势明显,各站点历年最高潮位呈增加趋势,平均速率为 0.02 ~ 0.03 m/a。

d. 台风登陆点对风暴潮增水的空间分布有较大影响,距离台风登陆点约 2.5 倍最大风速半径的位置,可产生较大的增水值。最大增水随着台风中心压强的降低而升高,中心压强每下降 10 hPa,最大增水值上升 0.4 ~ 1.1 m。在台风移动过程中,离台风中心距离较近的站点由中心压强降低导致的最大增水的变化相比其他站点更为显著。当台风移动速度接近 8.3 m/s,风应力作用于珠江口的时间接近 2.3 h,可形成较为稳定的风暴潮水位梯度,在大湾区可产生较大的风暴潮增水。

参考文献:

[1] 叶荣辉,戈军,张文明,等. 影响粤港澳大湾区的热带气旋统计分析[J]. 水利水电技术,2020,51(增刊1):37-43. (YE Ronghui, GE Jun, ZHANG Wenming, et al. Statistical analysis on impact from tropical cyclone on Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2020, 51 (Sup1):37-43. (in Chinese))

[2] 何洪钜. 珠江河口区的台风风暴潮及其分析[J]. 人民珠江,1981,2(4):34-51. (HE Hongju. Characteristics and analysis of storm surge in the Pearl River Estuary [J]. Pearl River, 1981,2(4):34-51. (in Chinese))

[3] 卢如秀,叶锦昭. 珠江河口台风最大增水规律的研究[J]. 中山大学学报(自然科学版),1982(2):28-31. (LU Ruxiu, YE Jingzhao. The research on the law of the maximum rising-stage due to the typhoon surge in the Pearl River Estuary [J]. Pearl River, 1982(2):28-31. (in Chinese))

[4] 史键辉,王永信,于斌,等. 珠江口纵深的风暴潮和增水特征[J]. 海洋预报,2000,17(4):47-51. (SHI Jianhui, WANG Yongxin, YU Bin, et al. Longitudinal characteristics of storm surge in the Pearl River Estuary [J]. Marine Forecasts, 2000, 17(4):47-51. (in Chinese))

[5] 王永信,史键辉,于斌,等. 台风风暴潮沿珠江河道上溯分析[J]. 海洋通报,1998,17(5):10-16. (WANG Yongxin, SHI Jianhui, YU Bin, et al. Analysis of the upstream-going tropical storm surge along the Pearl River [J]. Marine Science Bulletin, 1998, 17(5):10-16. (in Chinese))

[6] 陈绍华,冯永康. 8309 风暴潮初析[J]. 广东水电科技,1985(1):24-34. (CHEN Shaohua, FENG Yongkang. Analysis of storm surge (8309) [J]. Guangdong Water Resources and Hydropower, 1985(1):24-34. (in Chinese))

[7] 马经广,胡建华. 2003 年广东风暴潮分析和预报总结[J]. 海洋预报,2004,21(2):78-85. (MA Jingguang, HU Jianhua. Analysis and summary of storm surge in

2003 and their forecast [J]. Marine Forecasts, 2004, 21 (2):78-85. (in Chinese))

[8] 刘士诚,陈永平,谭亚,等. 珠江河口 1822 号台风“山竹”期间风暴增水模拟及特性分析[J]. 海洋预报,2021,38(2):12-20. (LIU Shicheng, CHEN Yongping, TAN Ya, et al. Storm surge simulation and characteristic analysis during typhoon “Mangkhut” 2018 in the Pearl River Estuary [J]. Marine Forecasts, 2021, 38(2):12-20. (in Chinese))

[9] 刘睿哲,朱庆勇,倪培桐. 珠江河口地区风暴潮增水过程数值模拟[J]. 广东水利水电,2018(4):6-10. (LIU Ruizhe, ZHU Qingyong, NI Peitong. Numerical simulation of storm surge process in Pearl River Estuary [J]. Guangdong Water Resources and Hydropower, 2018 (4):6-10. (in Chinese))

[10] 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 Ju, WU Xiuguang, et al. Research progress of ocean waves forecasting method [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2021, 49(5):394-400. (in Chinese))

[11] LUO Z, HUANG B, CHEN X, et al. Effects of wave-current interaction on storm surge in the Pearl River Estuary: a case study of Super Typhoon Mangkhut [J]. Frontiers in Marine Science. 2021,8:692359.

[12] 潘明婕,杨芳,荆立,等. 台风“纳沙”过境期间磨刀门水道咸潮上溯的动力机制[J]. 水资源保护,2019,35(4):42-48. (PAN Mingjie, YANG Fang, JING Li, et al. Dynamic mechanism of salinity intrusion in Modaomen Waterway during typhoon “Nesat” transit [J]. Water Resources Protection, 2019, 35(4):42-48. (in Chinese)).

[13] 王晶,卢美,丁骏. 浙江沿海台风风暴潮时空分布特征分析[J]. 海洋预报,2010,27(3):16-22. (WANG Jing, LU Mei, DING Jun. Temporal and spatial distribution characteristics of storm surge in Zhejiang coastal area [J]. Marine Forecasts, 2010, 27(3):16-22. (in Chinese))

[14] 王宗旭,乔煜,季小梅,等. 珠江河口岸线变化对潮动力的影响[J]. 科学技术与工程,2020,20(3):1171-1180. (WANG Zongxu, QIAO Yu, JI Xiaomei, et al. The influence of coastline changes on tidal dynamics in Pearl River Estuary [J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(3):1171-1180. (in Chinese))

[15] 罗志发,黄本胜,谭超,等. 粤港澳大湾区风暴潮数值模型的建立与应用[J]. 广东水利水电,2020(11):58-63. (LUO Zhifa, HUANG Bensheng, TAN Chao, et al. Development and application of the storm surges numerical model around Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area [J]. Guangdong Water Resources and Hydropower, 2020(11):58-63. (in Chinese))

(下转第 153 页)