

江门海域增水特征分析

秦钰¹, 邢会斌^{1,2*}, 张娟¹

(1. 自然资源部南海预报减灾中心, 广东 广州 510310; 2. 自然资源部海洋环境探测技术与应用重点实验室, 广东 广州 510310)

摘要: 基于2020—2021年江门市下川岛、上川岛等5个海洋观测站点的海洋和气象观测数据, 对江门海域增水的季节特征进行分析, 并进一步探究江门海域异常增水在台风期和非台风期的驱动来源。结果表明: 江门海域各站点增水变化一致, 且有显著的季节差异, 即冬春季增水振幅变化大而夏秋季(非台风影响期间)相对稳定。增水变化特征主要与纬向风有关, 东风增强(减弱)时水位升高(降低), 西风期间则呈现出相反的特征。经向风和气压在某些典型过程中对增水也有一定的贡献。台风和副热带高压是引起江门海域纬向风和气压变化的驱动因子, 非台风期主要受副热带高压南支气流控制, 台风期主要受两者引起的纬向风和气压变化的共同影响。

关键词: 江门; 增水; 纬向风; 副热带高压

中图分类号: P731.22 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2025)02-0018-12

0 引言

增水是气象潮^[1]的一种, 其变化主要受台风、波浪、天文潮和河流等诸多因素影响^[2-4], 在近海海域更显著。台风对增水的作用尤为明显, 台风风暴潮会造成沿岸水位骤升^[5], 极易发生漫滩漫堤, 从而威胁沿岸居民的生产和生活^[6-7]。

广东省是台风多发且受风暴潮影响严重的地区之一^[8-12], 风暴潮期间沿岸的港口、码头、航船和养殖区极易受到严重破坏。随着广东省城市化进程加快和海洋经济发展, 风暴潮引起的损害日趋严重, 2012—2021年因风暴潮造成的直接经济损失达269.37亿元^[13]。江门市是粤港澳大湾区西岸城市群的重要一员, 辖区内水系发达, 海洋资源丰富。江门市河口地区呈特殊的“喇叭型漏斗状”结构, 风暴增水极易积聚和上溯, 如果遭遇天文大潮和珠江水系洪峰, 引起的灾害将十分严重。2020年江门市因风暴潮造成的直接经济损失高达4 773.20万元, 占广东省的97.03%^[14]。随着粤港澳大湾区发展的推进, 江门市海洋经济蓬勃发展, 临海建设日新月异,

沿岸生产活动对海洋观测预报和防灾减灾服务的需求越来越迫切, 但江门市海洋观测基础建设和相关研究能力仍较为薄弱, 尤其是针对威胁沿岸海域生产生活的潮汐作用和增水影响缺乏深入研究。因此, 厘清江门海域增水变化及影响机制对江门市海洋防灾减灾和海洋资源开发具有重要的科学意义和显著的应用价值。

基于观测资料统计分析和数值模拟诊断等手段, 不少学者对广东省沿岸风暴增水的变化特征和影响因子进行了探讨, 发现其风暴增水强度和分布与台风的强度、路径、移动速度及登陆位置有关。叶荣辉等^[10]研究发现热带气旋在粤港澳大湾区以西的登陆频次远大于以东, 前者的占比达73%。张海燕^[11]统计了南海北部沿岸25个验潮站的潮位资料, 发现粤西和珠江口岸段风暴潮最为频发, 特别是雷州半岛东部。王燕妮等^[15]基于珠江口区域天文潮和风暴潮模型, 发现珠三角风暴增水极值主要分布在珠江口西侧和珠江口内。魏晓宇等^[16]基于闸坡站的潮位观测结果, 得出阳江海域的风暴增水类型与台风路径和登陆地点关系密切。张敏等^[17]通过模型定

收稿日期: 2023-08-07。

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(52071350); 自然资源部海洋环境探测技术与应用重点实验室项目(MESTA-2022-D010)。

作者简介: 秦钰(1993-), 男, 工程师, 硕士, 主要从事海滨观测及数据分析工作。E-mail: qinyu@tju.edu.cn

*通信作者: 邢会斌(1991-), 男, 工程师, 博士, 主要从事表层流研究和海上搜救预测等工作。xhb@hyhb.org

量研究了台风移动方向和速度对湛江市沿海风暴潮的影响,发现西向移动的台风登陆湛江后产生的增水最大。杨玄阁等^[18]认为琼州海峡的增水极值与台风强度有关,增水分布与台风路径有关。高娜等^[19]基于赤湾站的水位资料,发现珠江口风暴增水强度与台风强度呈线性关系,与台风中心距离呈指数关系。罗志发等^[20]利用珠江口的历史潮位资料和风暴潮数值模型,研究得出风暴增水极值主要受台风登陆点和强度影响,增水的空间分布主要受台风路径影响。除台风本身外,风暴增水与波浪和潮汐作用也有一定的联系。张敏等^[21]通过风暴潮-海浪耦合漫滩数值模型计算得出波浪对雷州市沿海海域风暴增水的贡献达0.26 m,考虑波浪影响后的风暴增水值更接近实测。罗志发等^[2]研究得出,珠江河口受波浪影响的最大增水值约为10~20 cm,占比约为6.5%。天文潮与风暴潮之间的非线性作用以及浅水区的潮汐作用对风暴增水也有一定影响^[3,22]。

综上所述,以往对广东省沿岸增水的研究主要集中于珠江口和粤西岸段,江门是广东省受风暴潮灾害影响最严重的地区之一,但由于观测资料匮乏,江门附近海域增水的变化特征和机理尚缺乏进一步研究。近年来,得益于江门市政府对海洋观测的重视和投入,积累了连续的、高分辨率的水文气象观测数据,这也为江门增水的特征研究提供了可靠的数据基础。分析江门海域的增水变化是本文的主研方向之一。此外,以往研究多关注台风期间风暴增水的特征、变化及影响机制,对于非台风期间增水的变化还缺乏进一步认识,因此台风期和非台风期江门海域增水变化的对比研究是本文的另一个主研方向。

本文利用江门市5个海洋观测站点连续两年(2020—2021年)的潮位和风场实测数据,揭示江门海域增水的变化特征和机理,并进一步阐明台风期和非台风期增水变化的影响机制。本研究对加强江门海域增水变化特征基础研究和提高江门市防灾减灾能力建设具有重要意义。

1 数据和方法

本文数据来源于2020—2021年江门市新会港航、新会双水、银洲湖、下川岛和上川岛5个海洋观

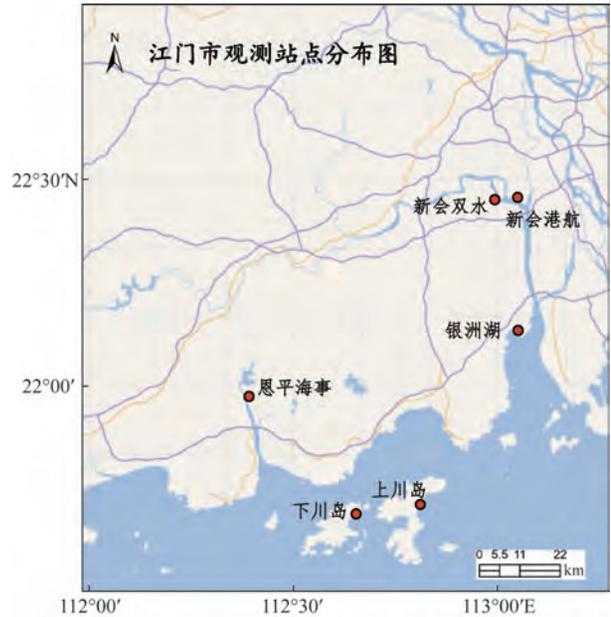


图1 江门海洋观测站点分布图

Fig.1 Locations of ocean stations in Jiangmen

测站的逐时水文气象数据,其中,下川岛站点包含风速、风向、气压和潮位数据,上川岛站点包含风速、风向数据,其他海洋站点仅有潮位数据。因下川岛站部分风速、风向数据缺失,依据海洋站位置就近原则,上川岛站风速、风向的基本特征与下川岛在大部分时间段一致(图略),因此,采用上川岛的部分风速、风向数据替代下川岛的缺测数据,时间段为2020年8月1日—9月23日,2021年10月11—13日。

本文基于江门海域站点2020—2021年连续的逐时潮位观测数据,利用T_TIDE工具进行调和与分析,得到新会港航、新会双水、银洲湖和下川岛观测站点的天文潮值,增水值由站点实测潮位减去天文潮潮位得到^[23-24]。增水计算公式为:

$$\gamma(t) = \delta(t) - A_0 - \sum_{i=1}^m R_i \cos(\sigma_i t - \theta_i)$$

式中: $\delta(t)$ 为逐时观测潮位; A_0 为观测期间的平均海平面; $\gamma(t)$ 为增水; R_i 为调和与分析得到的天文潮分潮振幅; σ_i 为分潮角速度; θ_i 为分潮初相位。

通过比较,各站点调和与分析后得到的逐时回报潮位与实测潮位的大小和变化趋势基本一致(图略),表明利用T_TIDE进行调和与分析继而计算的增水值具有一定的可靠性。

本文采用美国国家环境预报中心(National Centers for Environmental Prediction, NCEP)2020—2021年的风场和位势高度逐日再分析资料(网址: <https://psl.noaa.gov/>)分析江门增水变化的影响机制,数据空间分辨率为 $1^{\circ}\times 1^{\circ}$ 。

2 江门增水特征分析及其与风的关系

2.1 江门海域增水季节特征

从江门海域2020年和2021年增水的季节变化可以看出(见图2),各站点增水变化特征较为一致,日均增水值基本在 $-30\sim 80$ cm。

2020年1—4月,江门海域增水值基本处于 $-40\sim 30$ cm,增水变化范围大,变化频率快;5—7月,增水变化范围变小,变化频率降低;受台风影响,8月部分时期增水变化范围较大,但变化过程相对平缓;从9月开始,增水变化愈发剧烈,频率增快。

2021年1—4月,江门海域增水值基本处于 $-30\sim 30$ cm,增水变化过程剧烈,变化频率较快;5月—9月上旬,不考虑台风影响,增水范围大部分保持在 $-20\sim 10$ cm,变化过程相对平缓;自10月中上旬开始,增水变得十分剧烈,波动范围较大,最大增水值超过75 cm;10月末—11月中旬增水出现短期稳定,但11月下旬—12月底,增水变化频率再次加快,波动范围也逐渐增大。

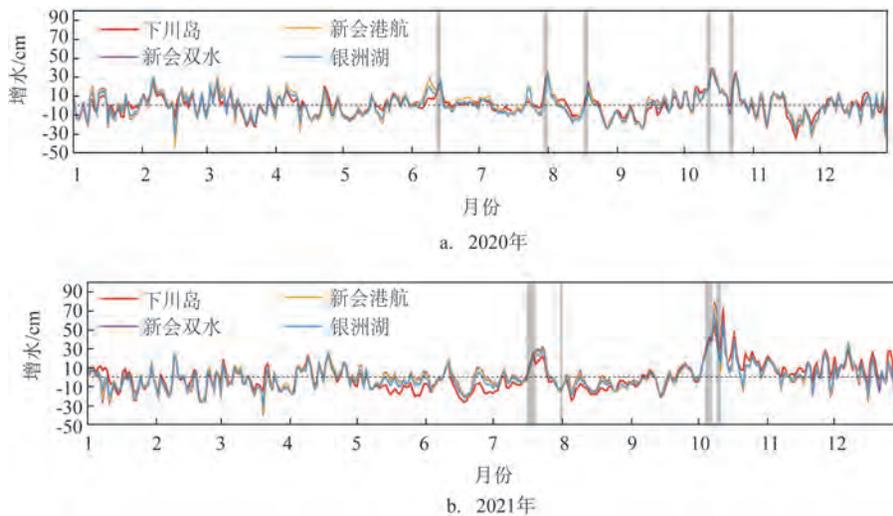
整体而言,2020—2021年江门海域增水变化呈现出明显的季节性特征,即冬春季增水波动范围大、频率快,而夏秋季(非台风影响时期)增水波动范围小且变化平缓。

江门海域受台风影响明显,台风风暴潮作用剧烈。统计分析发现,2020年和2021年共有9场台风影响江门海域(见表1)。值得注意的是,除台风风暴潮外,在非台风期间(如2021年10月2—5日、2021年10月16—20日等),江门海域仍会出现较强的增水变化过程,增水值甚至高于部分台风风暴潮

表1 2020—2021年影响江门海域的台风信息

Tab.1 Typhoons information affecting the Jiangmen Sea area in 2020—2021

台风编号	台风名称	影响江门海域时间范围
2002	“鸚鵡”	2020年6月13—15日
2003	“森拉克”	2020年7月31日—8月2日
2007	“海高斯”	2020年8月18—20日
2016	“浪卡”	2020年10月12—14日
2017	“沙德尔”	2020年10月22—24日
2107	“查帕卡”	2021年7月18—22日
2109	“卢碧”	2021年8月2—3日
2117	“狮子山”	2021年10月6—9日
2118	“圆规”	2021年10月11—13日



注:灰色阴影为台风影响期

图2 江门海洋观测站点日均增水演变图

Fig.2 Evolution of daily-averaged residual water level variations at each station

增水。因此,除台风风暴潮外,非台风期间的增水变化及影响机制也要重点关注。

江门海域各站点的增水变化较为一致(见图2),下川岛观测站点与江门海域其他观测站点的日均增水具有较高的相关性(见表2)。由于下川岛站点远离河流,其增水变化受上游径流等因素影响较小,因此,综合各观测站点位置及观测数据质量,本文以下川岛站点为代表,探究江门海域增水变化特征和影响机制。

表2 下川岛站点与江门海域其他观测站点的增水相关性

Tab.2 Correlation of residual water level variations between Xiachuan Island station and other stations

年份	新会双水	新会港航	银洲湖
2020年	0.87	0.88	0.76
2021年	0.82	0.85	0.85

2.2 江门海域增水影响机制

以往研究表明,增水变化主要受风的影响^[19, 25-26]。下川岛站点2020年和2021年的风速、风向玫瑰图表明(见图3),该站点以东风为主、西南风和西北风为辅,东风风速相对较大且存在时间较长。本文将75°~105°的风向标记为东风,245°~335°的风向标记为西风,分析两种风向影响下江门海域的增水变化。

本文以下川岛站2020—2021年增水值的两倍

标准差(约25.8 cm)为依据,筛选出5个增水变化较为显著的典型过程时段,分别为2020年7月29日—8月6日(见图4a)、2020年10月12—26日(见图4b)、2021年7月15—28日(见图4c)、2021年10月1—9日(见图4d)和10月16—20日(见图4e)。为避免极低风速对增水的影响,本文清除了风速低于0.2 m/s的样本。5个过程中风速和增水的相关性统计样本量在东风期间依次为103、240、80、177、51,西风期间依次为18、71、111、217、29,相关性系数均通过99%置信度检验。

通过分析发现,下川岛站点的增水变化与风向和风速的变化关系明显。全东风时期(见图4a、4b、4d),下川岛站点分别受2003号台风“森拉克”、2016号台风“浪卡”、2017号台风“沙德尔”和2117号台风“狮子山”等影响,主要呈现东风特征,增水变化与风速变化较为一致,台风过境期间整体增水均呈现先增后降的变化特征,且增水和风速的正相关关系明显。东风强西风弱时期(见图4c),受2107号台风“查帕卡”影响,下川岛站点前期的增水和风速呈现明显的上升趋势且东风占据主导,台风过境后,下川岛海域呈现西风特征,风力减小,增水变化逐渐回落并趋于稳定,整个过程中增水与风速的变化特征明显,二者相关性系数为0.42,其中东风期为0.66,西风期为-0.39。东西风变化时期(见图4e),下川岛站点的增水变化呈短暂上升后波动下降,期间虽无台风影响,但部分时期的增水值超过60 cm;

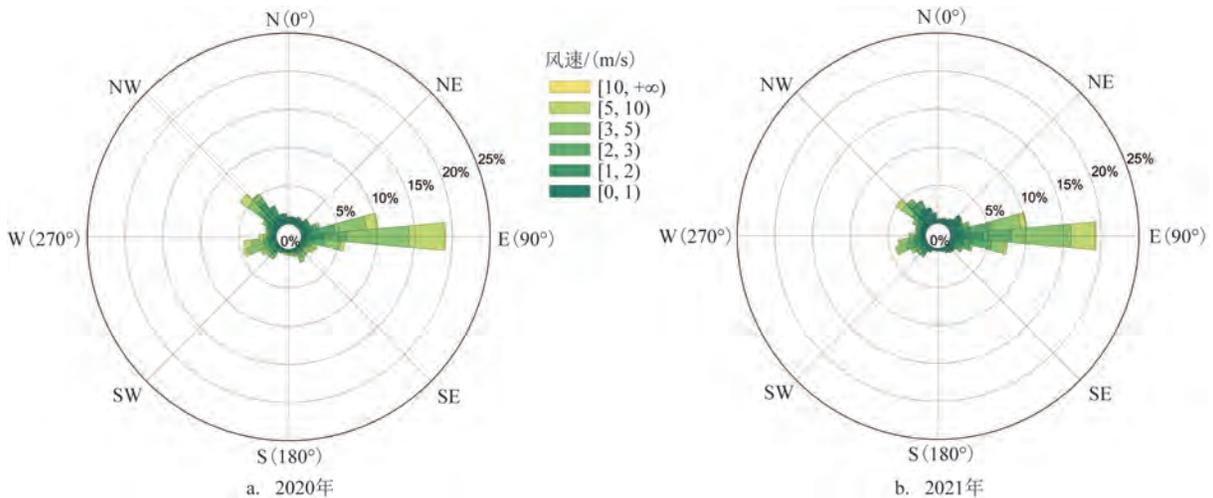
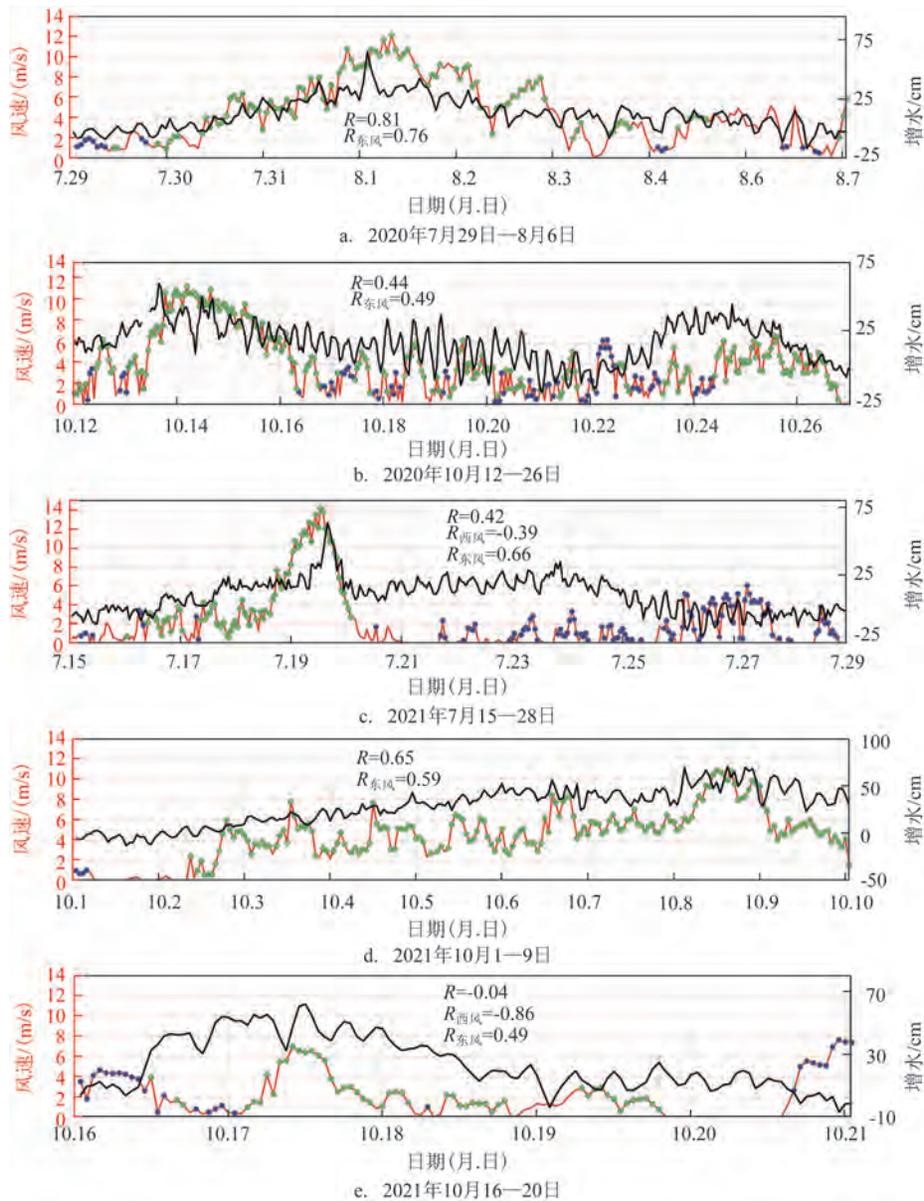


图3 下川岛站点风速、风向玫瑰图

Fig.3 Rose diagram of wind speed and direction at Xiachuan Island station



注:黑色(红色)实线表示下川岛站点增水(风速)变化,绿色(蓝色)圆点表示东风(西风)风速

图4 增水变化显著期间下川岛站点增水和风速逐时演变图

Fig.4 Diagram of hourly evolution of residual water level and wind speed at Xiachuan Island station during periods of significant residual water level variation

整个过程中风速变化不明显,增水与风速基本无相关性,但可以通过阈值区分风向,东风期(10月17—19日)风速缓慢降低,增水和风速的相关性系数为0.49,而西风期前期(10月17日前)风速缓慢降低,后期(10月20日午后)风速逐渐增强,增水和风速的相关性系数达-0.86。整体而言,东风时期,下川岛的增水与风速呈现正相关关系;西风期间,增水变化与风速变化相反,但两者变化幅度有着明显的相关性。

进一步采用下川岛站点的日均观测数据分析长时间尺度下风与增水的关系。结果表明(见图5),2020—2021年纬向风与增水关系明显,风速 U 分量与增水的相关性系数为-0.5。2020年1—4月、8—12月和2021年1—4月、7月、9—12月以东风为主,变化频率较快,但与增水的高频变化一致。2020年5—7月和2021年5—6月、8月以西风为主,西风的加强抑制了增水的上涨。对于经向风而言,

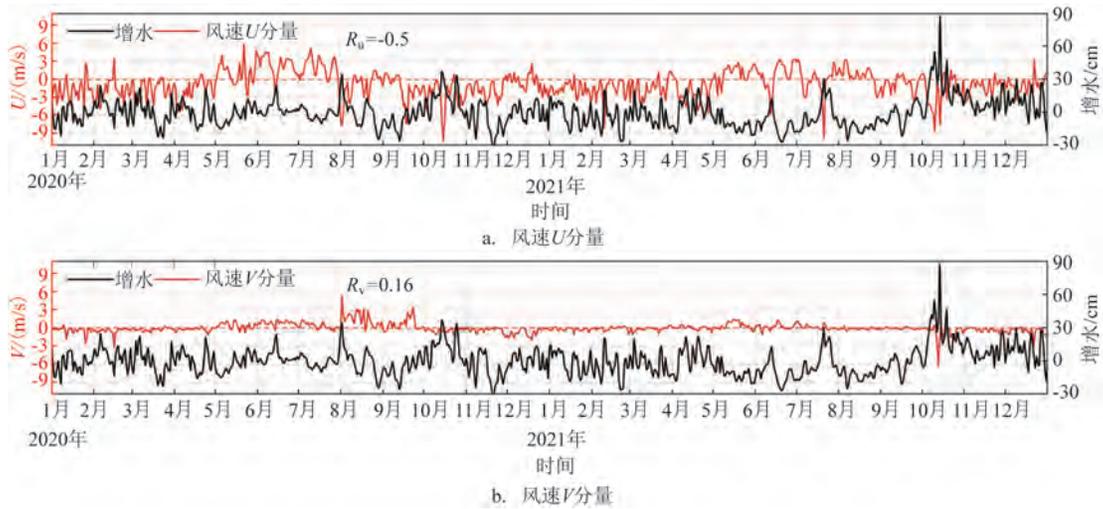


图5 2020—2021年下川岛站点风 U 、 V 分量和日均增水关系

Fig.5 Evolution of daily-averaged zonal and meridional winds and residual water level variation at Xiachuan Island station for 2020—2021

由于下川岛海域两年的风速 V 分量偏小,对增水变化的作用较小,二者相关性系数仅为 -0.15 ,在长时间尺度下,经向风对该海域增水的影响不大。因此,江门海域增水的季节变化特征主要与纬向风有关,纬向风的变化是引起冬春季江门海域增水高频率变化的驱动因子。

2.3 典型过程分析

从下川岛增水和风速的季节变化可以发现,2021年10月1—15日的增水呈现出“缓慢上升—缓慢下降—急速上升—急速下降”的特征,最大日均增水变化超过 70 cm (见图2),且存在较长时间尺度风向特征明显的强风过程(见图4d)。由于本文重点分析此海域风向、风速和增水的变化特征,我们发现风向主要以北风和东风为主(见图6a)。基于此,本文将 $5^\circ\sim 25^\circ$ 的风向标记为北风、 $75^\circ\sim 135^\circ$ 的风向标记为东风,进一步定量分析该时期风和增水的关系。10月1—10日和13—15日以东风为主,风和增水变化的相关性明显,相关性系数为 0.46 ;11—12日呈现北风特征,二者相关性较低。这表明该时期增水的异常变化主要受东风影响,当风向转变时,风力作用已无法维持增水变化。10月13—14日风速和增水的变化关系不明显,通过后续分析发现,此时江门海域正值台风“圆规”过境(见图7),增水可能还受到气压等因素的影响,本文不作详细

论述。

从 1000 hPa 风场和 850 hPa 位势高度来看,10月3—5日(见图7a—7c),江门海域受西太平洋东风的影响,风速逐渐增大;10月6日(见图7d),2117号台风“狮子山”在南海西沙群岛海域生成并逐渐向西北移动,台风北部偏东气流叠加由西太平洋而来的东风,进一步加强了江门海域的纬向风力;10月7日(见图7e),2118号台风“圆规”由菲律宾东侧向西进入南海并逐渐增强;10月10日(见图7g)其西北部外围的北风开始影响江门海域;10月13日(见图7j),台风“圆规”经过江门海域,风力增大且风向逐渐转变成东风,随后在海南省登陆,期间风力减弱,江门海域不再受其影响;10月14—15日(见图7k—7l),台风过境后江门海域再次受到西太平洋方向的东风影响。

为探究 1000 hPa 西太平洋的东风来源,本文继续分析了 500 hPa 层风场和位势高度的时间演变过程。10月3—5日(见图8a—8c),副热带高压占据了 $20^\circ\sim 30^\circ\text{N}$ 、 $100^\circ\sim 160^\circ\text{E}$ 并逐渐向东北收缩,江门海域风速增大,且维持东风特征;10月6日(见图8d),副热带高压收缩至 $110^\circ\sim 150^\circ\text{E}$,对江门海域的影响变弱,但台风“狮子山”对东风风力进行了补充;10月7—13日(见图8e—8j),副热带高压加强西伸,影响面积进一步扩大;与此同时,从10月7日开始,受副热带高压 5880 gpm 等值线南侧边缘的引

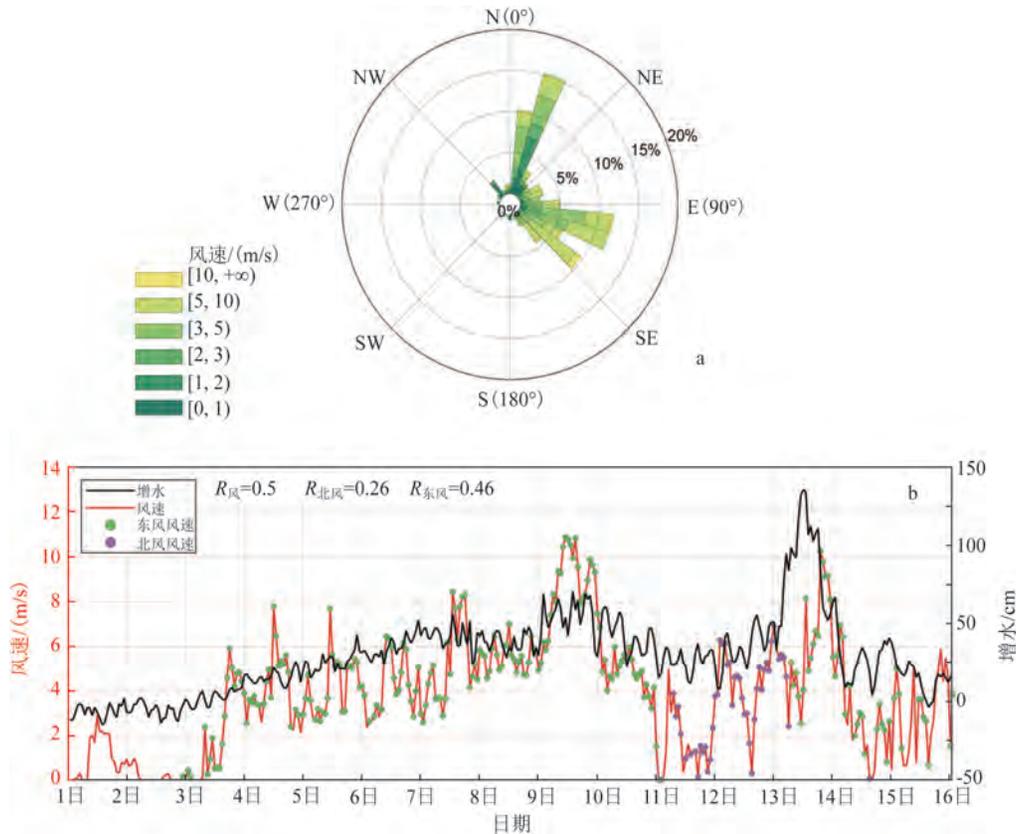


图6 2021年10月1—15日下川岛站点风速、风向玫瑰图(a)以及风和增水演变图(b)

Fig.6 Rose diagram of wind speed and direction and evolution of zonal winds and residual water level variation at Xiachuan Island station for October 1–15, 2021

导气流影响,台风“圆规”向西北移动并逐渐加强,随后副热带高压等值线呈现明显的“凹状”,其对江门海域的作用受到了台风“圆规”的阻隔;10月14—15日(见图8k—8l),台风“圆规”登陆后对江门海域的影响逐渐减弱,副热带高压逐渐向西北收缩稳定,受其影响江门海域再次呈现东风特征。

因此,2021年10月1—15日,江门海域整体受副热带高压驱动,呈现较强的东风特征。整个过程前后该海域受2117号台风“狮子山”和2118号台风“圆规”的影响,前者增强了副热带高压的东风风力,后者阻断了副热带高压的影响,东风减弱,部分时间呈现北风特征。

2.4 其他因素探讨

江门海域经向风存在时间短且风速较小(见图5),但在某些时期,其对局地增水也有一定的影响。为探讨这个问题,基于2020—2021年影响江门海域

的台风(见表1),本文推断台风路径及其与江门的相对位置也会导致增水出现显著差异。通过对比两个台风影响期间江门海域下川岛站点风和增水的关系可以发现,在2002号台风“鹦鹉”影响期间(见图9a),该站点呈现东风和南风特征,风速 V 分量和增水的变化较为一致,相关性系数可达0.49,风速 U 分量也存在一定影响。在此过程中,南风 and 东风对海域增水具有正向作用,且南风占据主导。而在台风“圆规”影响期间(见图9b),下川岛站点主要呈现东风特征,风速 V 分量偏低,对增水的影响较小,风速 U 分量的增水作用较大,相关性系数高达 -0.74 。由此可见,在此台风过程中,江门海域增水的驱动力主要以东风为主。总的来说,纬向风主导了江门海域的增水变化,经向风在部分时期也对增水有一定的补充作用。

此外,气压对近岸海域的增水也具有一定影响^[1]。本文选取2021年10月的气压和增水数据进

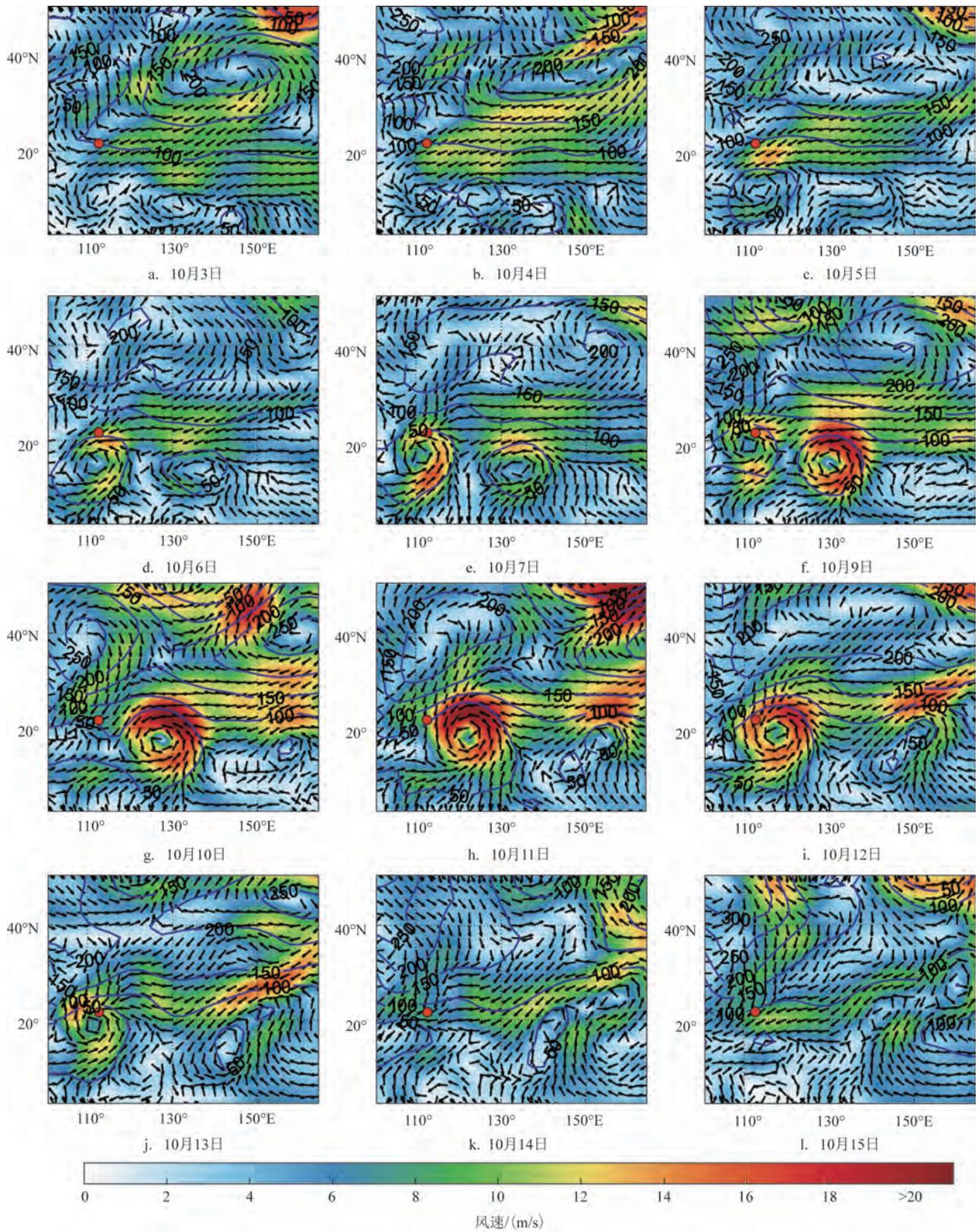
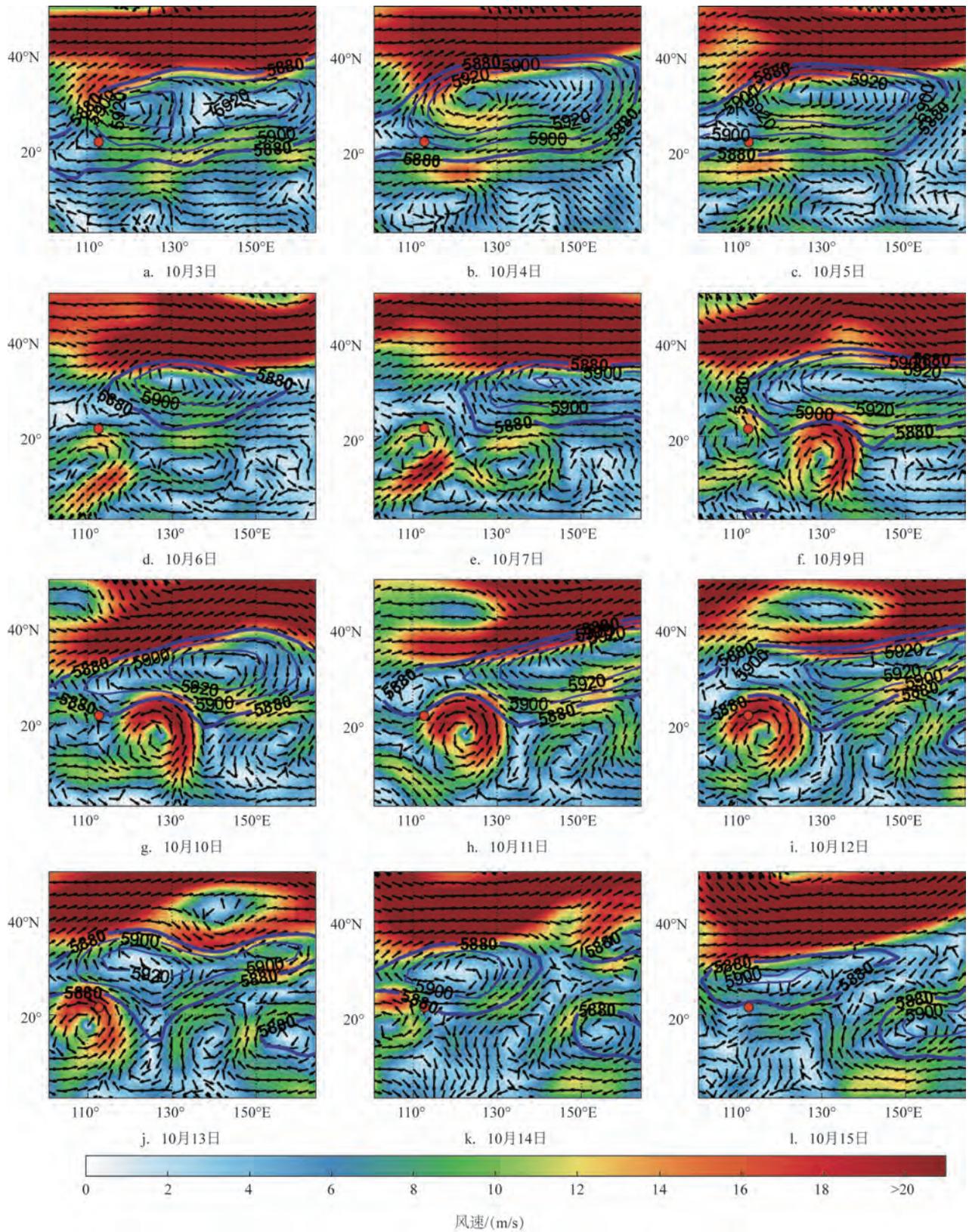


图7 2021年10月3—15日850 hPa位势高度和1 000 hPa风场分布图

Fig.7 Daily evolution of 1 000 hPa wind vectors and 850 hPa geopotential height during October 3 to 15, 2021



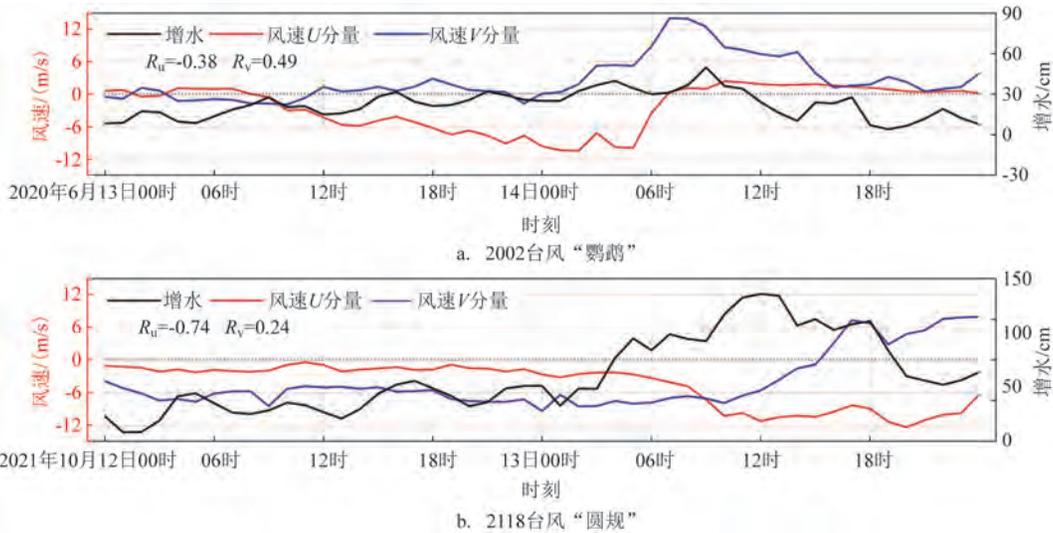
注: 蓝色等值线为位势高度, 红色圆点为下川岛站点

图8 2021年10月3—15日500 hPa位势高度和风向分布图

Fig.8 Daily evolution of 500 hPa wind vectors and geopotential height during October 3 to 15, 2021

行分析(见图10)。受台风“狮子山”和“圆规”影响,上半月(10月1—15日)该地区气压变化较大,增水与气压变化呈明显的负相关,相关性系数为-0.74;而下半月(10月16—31日)由于无台风等剧烈天气过程影响,气压和增水基本不存在相关性。本文进一步

比较了2020—2021年日均气压与增水的关系,二者的相关性系数仅为0.16。由此可见,在气压变化较为剧烈的极端天气下,增水和气压的相关性较为显著,但在气压平稳以及长时间尺度下,二者相关性不显著。



注: R_u 和 R_v 分别为风速U分量、V分量和增水的相关性系数

图9 两个台风期间下川岛站点风速和增水关系图

Fig.9 Relation diagram of wind speed and residual water level at Xiachuan Island station during two typhoon periods

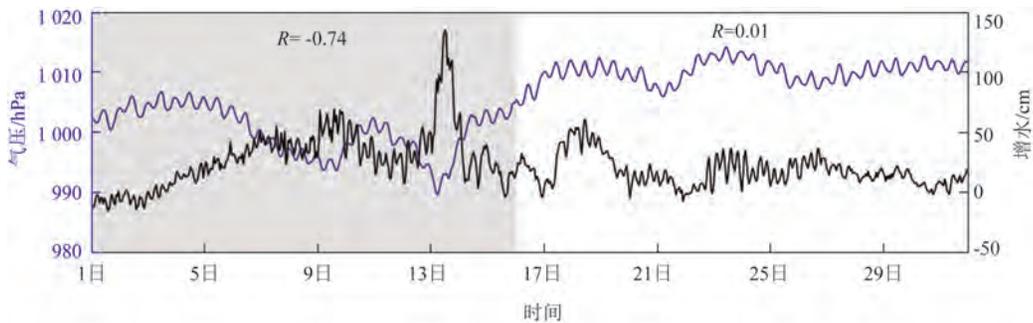


图10 2021年10月下川岛站点气压和增水关系图

Fig.10 Relationship between atmosphere pressure and residual water level at Xiachuan Island station in October 2021

3 结论

本文基于江门海域5个海洋站的水文气象观测资料,对该海域2020年和2021年的逐月增水变化进行了分析,进一步探究了该海域增水的影响机制,并重点针对2021年10月1—15日异常增水的影响机制进行了探讨。主要结论如下:

- ①江门海域2020年和2021年各站点的增水变化较为一致,且季节性明显,均呈现冬春季增水变化范围大且变化频率高、夏秋季(非台风影响期间)增水变化相对稳定的特征。
- ②江门海域主要呈现东风为主、西南风和西北风为辅的风力特征,增水变化和风速、风向的变化关系明显。东风增强(减弱)时水位升高(降低),西风

增强(减弱)时水位降低(升高)。在长时间尺度下, 纬向风是江门海域增水异常变化的主要驱动力, 经向风在部分时期也对增水有一定的补充作用。

③除台风外, 副热带高压也是海域增水一个不可忽视的强大驱动来源, 它的持续作用增强了江门海域的纬向风力, 从而影响局地增水变化。此外, 当副热带高压叠加台风作用时, 风暴增水更加剧烈。

④在台风等剧烈天气时期, 气压变化较大, 增水与气压的负相关明显, 但在气压平稳以及长时间尺度下, 二者相关性不显著。

参考文献:

- [1] SOLDANI M, FAGGIONI O. Observing meteorological tides: fifteen years of statistics in the port of La Spezia (Italy)[J]. *Applied Sciences*, 2022, 12(23): 12202.
- [2] 罗志发, 黄本胜, 谭超, 等. 珠江河口波浪-风暴潮耦合数值模拟[J]. *广东水利水电*, 2021(7): 1-6.
LUO Z F, HUANG B S, TAN C, et al. Coupled numerical simulation on wave and storm surge around Peral River Estuary[J]. *Guangdong Water Resources and Hydropower*, 2021(7): 1-6.
- [3] 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 Z F, HUANG B S, TAN C, 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.
- [4] WEBB B, ARNELL N W, ONOF C, et al. Hydrology: Science and Practice for the 21st Century[C]//Proceedings of the British Hydrological Society International Conference. British Hydrological Society, 2004.
- [5] 冯士筭. 风暴潮导论[M]. 北京: 科学出版社, 1982.
FENG S Z. An introduction to storm surge[M]. Beijing: Science Press, 1982.
- [6] 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 S C, CHEN Y P, TAN Y, 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.
- [7] 韩晶. 台风山竹和天鸽对珠海沿海风暴潮增水影响[J]. *吉林水利*, 2019(8): 47-49.
HAN J. Effect of typhoon “Hato” and “Mangkhut” on rainfall of storm surge in Zhuhai coastal area-taking Sanzao Hydrological Station as an Example[J]. *Jilin Water Resources*, 2019(8): 47-49.
- [8] LI A L, GUAN S D, MO D X, et al. Modeling wave effects on storm surge from different typhoon intensities and sizes in the South China Sea[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2020, 235: 106551.
- [9] 英晓明, 赵明利. 广东省风暴潮海洋灾害特征及风险防控对策研究[J]. *海洋开发与管理*, 2020, 37(6): 30-33.
YING X M, ZHAO M L. The characteristics of storm surge marine disaster and counter measures in Guangdong Province[J]. *Ocean Development and Management*, 2020, 37(6): 30-33.
- [10] 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(S1): 37-43.
YE R H, GE J, ZHANG W M, 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(S1): 37-43.
- [11] 张海燕. 南海区台风风暴潮时空分布特征[J]. *海洋预报*, 2019, 36(6): 1-8.
ZHANG H Y. Spatio-temporal distribution of typhoon storm surge along the South China Sea coast[J]. *Marine Forecasts*, 2019, 36(6): 1-8.
- [12] GAO Y, WANG H, LIU G M, et al. Risk assessment of tropical storm surges for coastal regions of China[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2014, 119(9): 5364-5374.
- [13] 中华人民共和国自然资源部. 2021年中国海洋灾害公报[EB/OL]. (2022-04-08) [2024-08-07]. http://gi.mnr.gov.cn/202205/t20220507_2735508.html.
Ministry of Natural Resources of the People's Republic of China. China marine disaster bulletin in 2021[EB/OL]. (2022-04-08) [2024-08-07]. http://gi.mnr.gov.cn/202205/t20220507_2735508.html.
- [14] 广东省自然资源厅. 2020年广东省海洋灾害公报[EB/OL]. (2021-06-10) [2024-08-07]. http://nr.gd.gov.cn/zwgknew/sjfb/sjs/content/post_3316132.html.
Department of Natural Resources of Guangdong Province. Guangdong marine disaster bulletin in 2020[EB/OL]. (2021-06-10) [2024-08-07]. http://nr.gd.gov.cn/zwgknew/sjfb/sjs/content/post_3316132.html.
- [15] 王燕妮, 吕晓凤, 郝嘉凌, 等. 珠江口沿岸极值增水的空间分布[J]. *海洋预报*, 2017, 34(5): 74-82.
WANG Y N, LYU X F, HAO J L, et al. Spatial distribution of extreme water enhancement along the Pearl River Estuary[J]. *Marine Forecasts*, 2017, 34(5): 74-82.
- [16] 魏晓宇, 刘雪峰. 闸坡站风暴潮增水与热带气旋登陆点及路径的关系[J]. *台湾海峡*, 2010, 29(1): 122-127.
WEI X Y, LIU X F. Relation between storm surge and elements of landing location and path of tropical cyclone at Zhapo station[J]. *Journal of Oceanography in Taiwan Strait*, 2010, 29(1): 122-127.
- [17] 张敏, 陈钰祥, 赵雪, 等. 台风移动方向和速度对湛江市沿海风暴潮影响的数值分析[J]. *海洋预报*, 2015, 32(5): 45-52.
ZHANG M, CHEN Y X, ZHAO X, et al. Numerical analysis of the impacts of the moving direction and speed of typhoon on Zhanjiang coastal storm surge[J]. *Marine Forecasts*, 2015, 32(5): 45-52.

- [18] 杨玄阁, 朱良生. 琼州海峡台风风暴潮增水过程的数值分析[J]. 人民珠江, 2017, 38(1): 43-47.
YANG X G, ZHU L S. Numerical simulation and analysis of storm surge in the Qiongzhou Strait[J]. Pearl River, 2017, 38(1): 43-47.
- [19] 高娜, 赵明利, 马毅, 等. 台风对珠江口风暴增水的影响分析[J]. 热带海洋学报, 2023, 42(1): 32-42.
GAO N, ZHAO M L, MA Y, et al. Effect of typhoon on storm surge in the Pearl River Estuary[J]. Journal of Tropical Oceanography, 2023, 42(1): 32-42.
- [20] 罗志发, 黄本胜, 邱静, 等. 粤港澳大湾区风暴潮时空分布特征及影响因素[J]. 水资源保护, 2022, 38(3): 72-79.
LUO Z F, HUANG B S, QIU J, et al. Spatio-temporal distribution characteristics and influencing mechanisms of storm surge in Guangdong, Hong Kong and Macao Greater Bay Area[J]. Water Resources Protection, 2022, 38(3): 72-79.
- [21] 张敏, 罗军, 胡金磊, 等. 雷州市沿海风暴潮淹没危险性评估[J]. 热带海洋学报, 2019, 38(2): 1-12.
ZHANG M, LUO J, HU J L, et al. Inundation risk assessment of storm surge along Lei Zhou coastal areas[J]. Journal of Tropical Oceanography, 2019, 38(2): 1-12.
- [22] PARK Y H, SUH K D. Variations of storm surge caused by shallow water depths and extreme tidal ranges[J]. Ocean Engineering, 2012, 55: 44-51.
- [23] 王慧, 刘克修, 范文静, 等. 中国沿海增减水的变化特征及与海平面变化的关系[J]. 海洋学报, 2017, 39(6): 10-20.
WANG H, LIU K X, FAN W J, et al. Characteristics of residual water level variation along China coast and its relation to sea level change[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2017, 39(6): 10-20.
- [24] 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 J, LU M, DING J. Analysis of the spatial and temporal distribution of characteristics of typhoon storm surge in Zhejiang coastal waters[J]. Marine Forecasts, 2010, 27(3): 16-22.
- [25] 陈升, 甘敏, 孙丽, 等. 上海沿海风暴潮历史特征分析[J]. 海洋学研究, 2021, 39(4): 101-108.
CHEN S, GAN M, SUN L, et al. Historical characteristics of the storm surges along Shanghai coast[J]. Journal of Marine Sciences, 2021, 39(4): 101-108.
- [26] 李希彬, 张秋丰, 牛福新, 等. 天津沿海一次非典型台风风暴潮分析[J]. 海洋开发与管理, 2014, 31(12): 36-39.
LI X B, ZHANG Q F, NIU F X, et al. Analysis of an atypical storm surge along the coast of Tianjin[J]. Ocean Development and Management, 2014, 31(12): 36-39.

Features and mechanism of residual water level variations in the Jiangmen Sea area

QIN Yu¹, XING Huibin^{1,2*}, ZHANG Juan¹

(1. South China Sea Marine Forecast and Hazard Mitigation Center, Ministry of Natural Resources, Guangzhou 510310, China; 2. Key Laboratory of Marine Environmental Survey Technology and Application, Ministry of Natural Resources, Guangzhou 510310, China)

Abstract: Based on high resolution hydrometeorology observations (2020—2021) at 5 marine observation stations including Xiachuan and Shangchuan in the Jiangmen Sea area, the seasonal variation feature of residual water levels and its driving mechanism are explored and categorized by typhoon-affecting and non-typhoon-affecting periods. Results show that: Jiangmen residual water level variations exhibit consistent changes and significant seasonal differences at each station, in which the amplitude of residual water level variations is large in winter–spring, and small in summer–autumn (non-typhoon-affecting period). Zonal winds variability dominates residual water level variations, in which the residual water level rises (declines) when the easterlies enhances (weakens), and vice versa during the westerlies. Meridional winds and pressure changes also contribute to residual water level variations during some representative processes. Typhoon and subtropical high are the driving factors regulating zonal winds and pressure changes in the Jiangmen coast. The residual water levels are controlled by the easterlies south of subtropical high during non-typhoon-affecting period, and by zonal winds and pressure changes during typhoon-affecting period.

Key words: Jiangmen; residual water level; zonal winds; subtropical high