

# 黄海对台风“利奇马”响应的观测研究

于博<sup>1,2</sup>, 葛勇<sup>1,2</sup>, 任殿军<sup>1,2</sup>, 冀承振<sup>1,2</sup>, 胡伟<sup>1,2</sup>

(1. 国家海洋局北海预报中心, 山东 青岛 266061; 2. 山东省海洋生态环境与防灾减灾重点实验室, 山东 青岛 266061)

**摘要:** 2019年8月台风“利奇马”经过黄海海域, 对海洋环境产生重要影响, 本文利用 QF103 和 QF111 浮标观测资料分析了黄海海洋对台风的响应。结果表明: 受台风影响, 海面温度明显下降, 海面水温降幅可达 5 °C; 海面生态要素响应明显, 海洋表层盐度、叶绿素 *a* 质量浓度(简称叶绿素 *a* 浓度)、溶解氧质量浓度(简称溶解氧浓度)均有明显升高, 盐度升高约 0.6, 叶绿素 *a* 浓度的最大值可达 1.4 mg/m<sup>3</sup>, 溶解氧浓度最大值超过 7.9 mg/L。台风过境时的强风应力使表层流速明显增强, 台风对海洋表层流的能量输入使得近惯性频带能量大幅增加, 台风激发的近惯性流速最大振幅为 0.15 m/s, 在垂直方向上具有第一斜压模态的特征; 在黄海海域近惯性振荡衰减的时间尺度约为 2.2 d。

**关键词:** 台风“利奇马”; 海面温度; 叶绿素; 近惯性振荡

中图分类号: P731 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2022)01-0034-10

DOI: 10.11759/hyxx20200616001

热带气旋是破坏性巨大的自然灾害, 西北太平洋是全球热带气旋活动最频繁的地区。台风携带狂风暴雨, 引发巨浪、风暴潮等, 往往造成严重的人员伤亡和经济损失。我国地处太平洋西岸, 海岸线漫长, 频繁遭受台风袭击。因此, 加强对台风过程的现场观测和理论研究, 提高应对台风灾害的能力, 是我国防灾减灾能力建设的必然要求。

海洋对台风响应的研究主要开始于 20 世纪 60 年代, 过去几十年间科研工作者通过现场观测和数值模式对此开展了大量研究工作。台风经过时会对海洋的动力学和热力学过程产生显著的影响<sup>[1-2]</sup>。台风引起的强烈混合会将海洋内部水体输送到海洋表层, 海面温度降低, 同时引起海面营养盐、叶绿素、溶解氧等要素发生变化, 对海洋生态系统有重要影响<sup>[3]</sup>; 台风的强风应力将大量的能量输入海洋, 在上层海洋产生强烈的近惯性振荡<sup>[4]</sup>; 风输入到海洋的能量一部分在局地耗散, 另一部分穿过温跃层向海洋深处传播<sup>[5]</sup>。近惯性振荡是一种波动频率接近局地惯性频率 *f* 的海洋内波, 通常受强风场的影响, 会在海洋混合层激发出近惯性振荡。模式模拟结果表明背景潮流会削弱台风激发的近惯性振荡强度, 同时会促进近惯性能量穿过跃层向下传播<sup>[6]</sup>。

马永贵等<sup>[7]</sup>利用潜标观测数据, 研究了南海西北部上层海洋对连续两个台风的响应, 发现两个台

风过境都产生了强烈的近惯性振荡, 且台风路径右侧的近惯性流速明显大于左侧; 朱大勇等<sup>[8]</sup>基于南海西北部的浮标观测数据, 对台风引起的近惯性振荡进行了研究, 结果表明近惯性振荡可持续 6~8 d; Guan 等<sup>[9]</sup>利用台风过境期间的潜标观测资料, 发现台风激发的近惯性流速最大振幅为 0.4 m/s, 近惯性能量的 *e* 折尺度(近惯性能量从最大值衰减到最大值的 1/*e* 所需的时间)小于 2 d, 且在台风路径右侧引起的海面降温为 3.6 °C; 冀承振等<sup>[10]</sup>基于黄海浮标观测资料, 发现台风引起的海面温度降幅在 2~4 °C, 近惯性流速最大振幅为 0.15 m/s, 近惯性能量的 *e* 折尺度约为 2 d; 孟庆军等<sup>[6]</sup>利用模式模拟了黄海对台风的响应过程, 结果表明台风过境会引起海面降温和近惯性振荡, 且近惯性流速在垂向上位相相差约 180°; Shan 等<sup>[11]</sup>、管守德<sup>[12]</sup>、牟平宇等<sup>[13]</sup>利用多源卫星遥感资料对台风进行研究, 结果表明台风经过

收稿日期: 2020-06-16; 修回日期: 2021-01-24

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC1401205); 山东省海洋生态环境与防灾减灾重点实验室项目(201903)

[Foundation: National Key Research and Development Program, No. 2016YFC1401205; Shandong Provincial Key Laboratory of Marine Ecology and Environment & Disaster Prevention and Mitigation, No. 201903]

作者简介: 于博(1991—), 男, 山东德州人, 工程师, 硕士, 主要从事海洋监测及防灾减灾工作, 电话: 0532-58750629, E-mail: yubo\_ouc@163.com; 胡伟(1980—), 通信作者, 男, 山东日照人, 教授级高工, 博士, 主要从事海洋环境监测及防灾减灾研究, E-mail: huwei@ncs.mnr.gov.cn

会引起明显的海面温度降低和叶绿素 *a* 质量浓度(简称叶绿素 *a* 浓度)的升高。

近年来,随着全球气候变暖,登陆我国台风的平均强度和强台风的数量显著增加<sup>[14]</sup>,因此加强对台风的观测和理论研究,减少台风登陆造成的损失十分必要。目前国内海洋对台风响应的研究主要集中在南海<sup>[15]</sup>,而关于黄海对台风响应的研究相对较少。本文基于布放在黄海的 2 套浮标现场观测数据,研究台风“利奇马”过境时,黄海海域对其响应的基本特征,并进一步分析台风引发的近惯性运动。

## 1 台风“利奇马”及数据介绍

### 1.1 研究海域和台风信息

黄海是太平洋西部的边缘海,平均深度约为 44 m,由北向南逐渐变深。黄海气候主要受季风影响,夏季盛行南风 and 东南风,冬季盛行西北风和北风;黄海气温 8 月份达到最高,夏季海水层化现象显著,在 7—8 月层化程度达到最大;黄海大部分海区为规则半日潮,且潮流流速较强,环流流速大约为最大潮流的 1/10<sup>[16]</sup>。

2019 年第 9 号台风“利奇马”生成于菲律宾吕宋岛以东的太平洋海域,由于良好的海温及辐聚辐散条件,生成后其强度渐增,发展为超强台风,中心最大风力达到 18 级(最大风速 62 m/s),并继续向西北方向移动,先于 8 月 10 日 1 时在我国浙江省温岭市登陆(中心风力 16 级,最大风速 52 m/s)后继续北上,8 月 11 日 12 时从江苏省连云港市进入黄海海域,后继续向北移动,11 日 20 时 50 分在山东省青岛市二次登陆(风力 9 级,最大风速 23 m/s),继续北上后进入渤海海域并最终消散(图 1);其陆上滞留时间长达 44 h。台风“利奇马”具有“登陆强度强、陆上滞留时间长、影响范围广”等特点,给我国沿海多个省份造成了非常严重的人员伤亡和经济损失。

### 1.2 浮标观测数据

QF103、QF111 浮标是自然资源部北海局布设在黄海海域的在线监测浮标,两台浮标均为锚式大型浮标(图 1 右上),浮标圆盘形标体直径为 10 m。QF103、QF111 浮标的局地水深分别为 32 m、30 m。两台浮标搭载传感器情况见表 1,利用这些传感器可实现对风、空气温度和相对湿度、气压、海水温度和盐度、全深度海流等水文气象要素的长时间定点观测,QF111 浮标上还搭载有水质传感器和能见度传

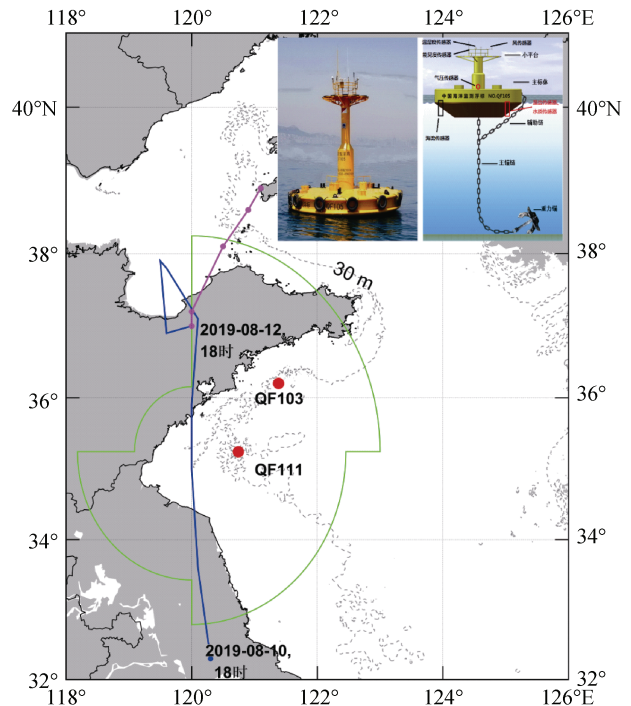


图 1 台风“利奇马”在黄海海域的移动路径

Fig. 1 Path of typhoon Lekima in the Yellow Sea

注:蓝色实线代表其强度为热带风暴级别,洋红色表示其消散过程,绿色圆弧为其经过黄海时的 7 级风圈半径。灰色虚线代表 30 m 水深等深线,红色圆点表示浮标站位,右上子图为浮标示意图与实景图。

表 1 浮标搭载传感器列表

传感器	温盐	海流	风	温湿度	气压	能见度	水质
QF103 浮标	有	有	有	有	有	无	无
QF111 浮标	有	有	有	有	有	有	有

感器,可以进行海水表层叶绿素、溶解氧质量浓度(简称溶解氧浓度)等海洋生态要素和海面水平有效能见度的观测。风和能见度传感器安装在距海面 10 m 高处的浮标小平台上,水质传感器和海流计安装在浮标水下设备井中,下打海流计的垂向采样间隔 2 m。浮标各要素的采样时间间隔均为 0.5 h。选取 8 月份浮标数据对台风进行分析,下文中台风过境前对应时间为 8 月 1 日至 8 日,为了更好地展示台风的影响,下文图中选取 8 月 6 日至 26 日数据,浮标观测的数据均经过相应的质量控制。

## 2 黄海对台风“利奇马”的响应

台风“利奇马”在西北太平洋活跃时间较长,对我国影响范围较大,本文主要关注其对黄海海域的影响。台风“利奇马”进入黄海海域时强度为热带

风暴级, 台风过境时在黄海海域的平均移动速度为 6.1 m/s, 台风中心与 QF103 浮标、QF111 浮标的最小距离分别为 122 km 和 68 km。

### 2.1 海气界面各要素的变化

图 2(a)给出了浮标观测到的海面风速和气压的变化, 图中黑色虚线分别代表台风进入黄海和离开黄海

的时间。台风经过时, 浮标处的风速迅速增大, QF103 浮标与 QF111 浮标处的最大风速分别为 19.7 m/s、17.9 m/s; 海面气压迅速下降, QF103 浮标与 QF111 浮标处的气压均在 8 月 11 日达到最低, 分别是 983 hPa、977 hPa, QF103 浮标处气压下降约 24.5 hPa, QF111 浮标处气压下降约 30.7 hPa。

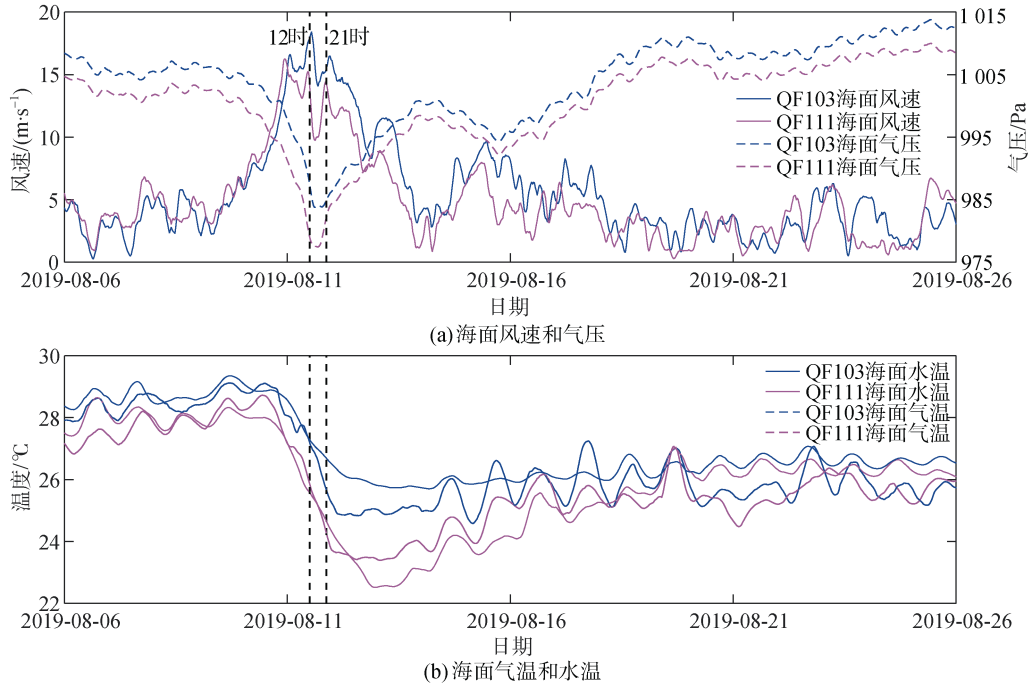


图 2 台风引起海面要素变化的浮标观测结果

Fig. 2 Typhoon-induced changes in sea surface elements observed by the buoys

注: 图(a)中实线代表海面风速, 虚线代表海面气压, 图(b)中实线表示海面水温, 虚线表示海面气温; 两个图中蓝色代表 QF103 浮标, 红色代表 QF111 浮标; 黑色虚线表示台风进入黄海和离开黄海的时间(下图均同此图)。

从图中可以看出在台风影响下, 两台浮标观测到的风速和气压变化趋势一致, 由于 QF103 浮标距离台风中心较近, QF103 浮标处的风速、气压变化均早于 QF111 浮标, 但 QF111 浮标处的最大风速和气压降低数值均大于 QF103 浮标, 说明在黄海海域, 台风强度降低的情况下, 台风结构变形、台风风力分布不均匀, 并非距离中心越近风力越大。

图 2(b)给出了浮标观测到的表层水温和海表面气温的变化曲线, 在台风过境之前黄海海域浮标处的水温和气温都呈缓慢上升趋势, 且水温略大于气温; 2019 年 8 月 10 日台风开始影响观测海域, 表层水温和海面气温迅速下降, QF103 浮标、QF111 表层水温均在 8 月 13 日到达最低值, 分别为 25.7 °C 和 22.5 °C, QF111 浮标处的表层水温降幅超过 5 °C, QF103 浮标处的表层水温降幅也超过了 3 °C; 台风

过境后, 在太阳辐射加热作用下, 表层水温有所回升, QF111 浮标处水温上升较快, QF103 浮标处水温上升缓慢, 在 8 月 20 日达到稳定状态, 但表层水温仍比台风过境前低约 2 °C。台风导致的海水垂向混合, 引起下层冷水上升, 使得海洋表层水温降低<sup>[17]</sup>。QF111 浮标与台风中心的距离较小, 附近海域对台风的响应更明显, 因而台风引起的表层水温降温幅度更大。

气温对台风的响应要快于水温, 水温降温的持续时间要长于气温。台风过境时 QF111 浮标处水温降幅超过气温, 表层水温低于海表面气温, 台风引起的垂向混合使得海面温度下降, 导致海洋向大气输送的热通量减少, 甚至反向输送热通量, 从而减弱台风的强度, 形成一个负反馈过程; 但 QF103 浮标处气温降幅超过水温, 表层水温与海表面气温温

差比台风之前增大, 导致海洋向大气输送的热通量增加。QF111 浮标处海表面温度降低主要由垂向混合引起, 而 QF103 浮标处海面温度降低由垂向混合和海气界面的潜热交换两方面引起。

## 2.2 海面生态要素的变化

图 3 给出了 QF111 浮标观测到的海面水平有效能见度(a)、海洋表层盐度(b)、叶绿素 *a* 质量浓度(c)、溶解氧质量浓度随时间的变化(d)。

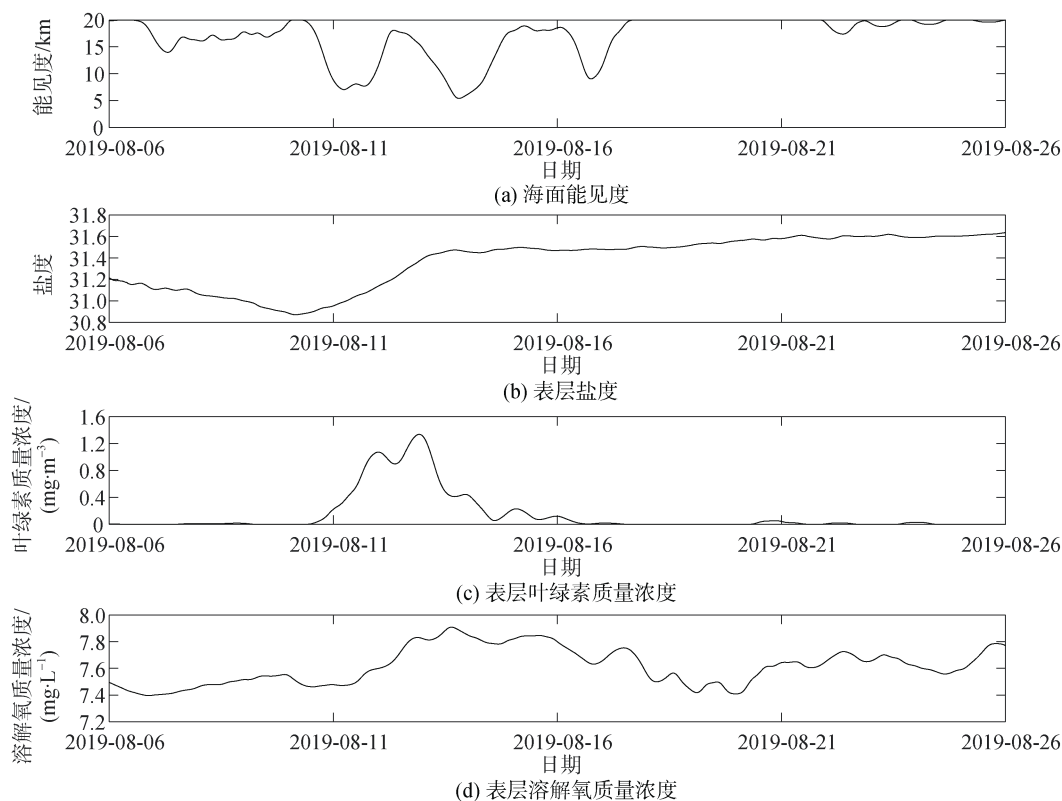


图 3 QF111 浮标观测台风引起的各要素变化

Fig. 3 Variation in parameters caused by the typhoon observed by buoy QF111

台风过境时, 海面水平有效能见度大幅度降低, 最低时不足 5 km, 这是因为台风过境带来大量的降水, 王冠琳等<sup>[3]</sup>通过卫星数据发现台风引起的最大降雨率可以达到 10 mm/h 以上; 鲍婧等<sup>[18]</sup>发现除雾以外, 稳定性弱降雨和短时强降雨对能见度的影响最大。

台风过境之前, 表层盐度呈下降趋势, 这是由于 7、8 月份为雨季, 海表降水和陆地径流输入增多使得表层盐度下降; 台风过境时表层盐度随之上升, 增幅约为 0.6; 台风过境后, 盐度基本保持稳定。根据 WOA(the World Ocean Atlas)气候态盐度数据, 浮标附近海域盐度随深度增加逐渐增大, 台风引发的强烈上升流使得下层高盐低温水体上升, 与表层海水混合造成盐度升高, 但是台风带来的强降雨引起的表层盐度降低不显著, 这说明台风引发的上升流对盐度的变化起主导作用。

台风过境之前, 表层海水叶绿素 *a* 浓度较低, 这是由于从春季到夏季, 海水层结逐渐显著, 水体垂直稳定性较强, 限制了营养盐的垂向运输, 上层海水中的营养盐几乎被浮游植物耗尽; 台风过境时表层叶绿素 *a* 浓度显著增加, 最大值为 1.4 mg/m<sup>3</sup>, 台风引起的水体垂向混合使得营养盐从下层输送到海洋表层, 促进海表的光合作用, 引起浮游植物增殖, 从而提高初级生产力<sup>[19]</sup>; 台风过境后由于表层海水中营养盐耗尽, 叶绿素 *a* 浓度恢复到之前的低值水平。

表层溶解氧浓度变化主要与表层水温变化负相关, 台风过境前随着表层水温逐渐升高, 溶解氧浓度逐渐降低, 最低值为 7.4 mg/L; 台风过境使得表层水温剧烈降低, 溶解氧浓度大幅上升, 最大值超过 7.9 mg/L, 台风过境后随着水温回升, 溶解氧浓度逐渐降低。

### 2.3 海流的变化

图 4 给出了 QF103 浮标观测到的台风“利奇马”过境前后东西方向和南北方向原始流速随深度和时间的变化。台风过境之前, QF103 浮标海域具有较强

的背景场流速, 流速振幅约为 0.5~0.7 m/s, 略小于冀承振等<sup>[10]</sup>的流速振幅, 在台风过境期间, 受台风强风应力的影响, 浮标观测到的流速明显增强, 流速振幅约为 0.8~1.0 m/s, 主要表现为半日潮和全日潮的特征。

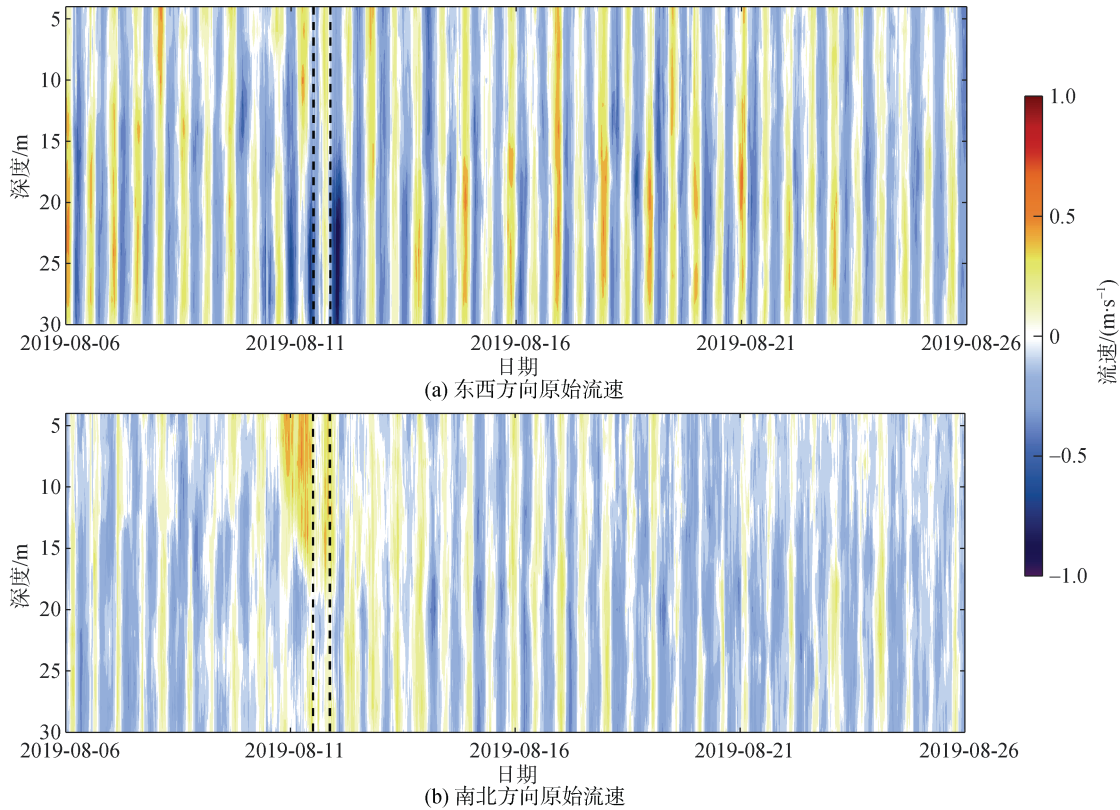


图 4 QF103 浮标观测的原始流速  
Fig. 4 Raw velocity observed by buoy QF103

功率谱分析可以用来诊断海流的运动特征, 本文对台风过境前、过境后观测到的流速做了功率谱分析, 图 5 给出了台风过境前(8 月 1 日—8 日)、过境后(8 月 10 日—24 日)QF103 浮标 20 m 以浅流速功率谱深度平均结果。结果表明, 台风过境前上层海洋的运动主要由半日潮流主导, 1/4 日和全日潮流也有明显的谱峰, 而惯性频带的运动很弱, 没有明显的能量谱峰。在台风“利奇马”过境后, 上层海洋的运动仍由半日潮流主导, 但近惯性频带出现了显著的能量谱峰, 其能量增强了约 6 倍。浮标处潮流特征与冀承振等<sup>[10]</sup>利用该位置浮标数据的分析结果一致, 且强背景潮流削弱了近惯性振荡的主导地位<sup>[6]</sup>。

### 2.4 台风向海洋输入的能量

风对海洋表层流做的功  $\pi$  通过下式计算得到<sup>[10]</sup>:

$$\pi = \bar{\tau} \cdot \bar{U}, \quad (1)$$

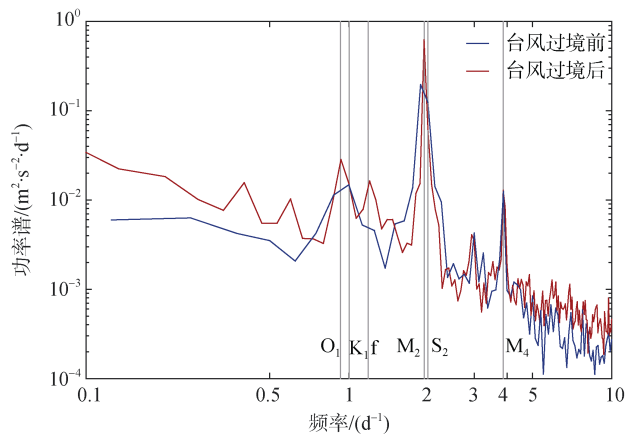


图 5 台风“利奇马”过境前、后 QF103 浮标观测的 20 m 以上原始流速功率谱的深度平均值

Fig. 5 Depth-averaged power spectra (top layer to 20 m) of the raw velocity before and after typhoon Lekima for buoy QF103

式中,  $\vec{\tau}$  为风应力,  $\vec{U}$  为海洋表层流速。风对海洋表层流的能量输入主要由风应力和海洋表层流速决定, 风应力的计算公式为:

$$\tau = \rho_a C_D |u_{10}| \vec{u}_{10}, \quad (2)$$

式中,  $\rho_a = 1.3 \text{ kg/m}^3$ , 是空气密度;  $u_{10}$  是 10 m 高度处风速;  $C_D$  是风应力拖曳系数, 计算公式<sup>[20]</sup>为:

$$C_D \times 1000 = \begin{cases} 1.2, & |u_{10}| < 11, \\ 0.49 + 0.065 |u_{10}|, & 11 < |u_{10}| < 19, \\ 1.364 + 0.0234 |u_{10}| - 0.00023158 |u_{10}|^2, & 19 < |u_{10}| < 100. \end{cases} \quad (3)$$

本文利用 QF103 浮标观测的风速和上 20 m 层深度平均流速数据, 计算了台风对海洋表层流输入的能量, 如图 6 所示。台风过境时, QF103 浮标处风应力随之增加, 最大值超过  $0.8 \text{ N/m}^2$ , 在强风应力的作用下表层流速明显增强, 风输入能量急剧增加, 其

功率通量最大值超过  $0.2 \text{ W/m}^2$ , 台风输入海洋表层流的总能量接近  $8 \text{ kJ/m}^2$ 。这些能量大部分进入 Ekman 流和潮频率运动中, 少部分以近惯性波动的形式不断向下和沿水平方向传播, 同时在局地引起强烈的混合耗散<sup>[5, 12]</sup>。

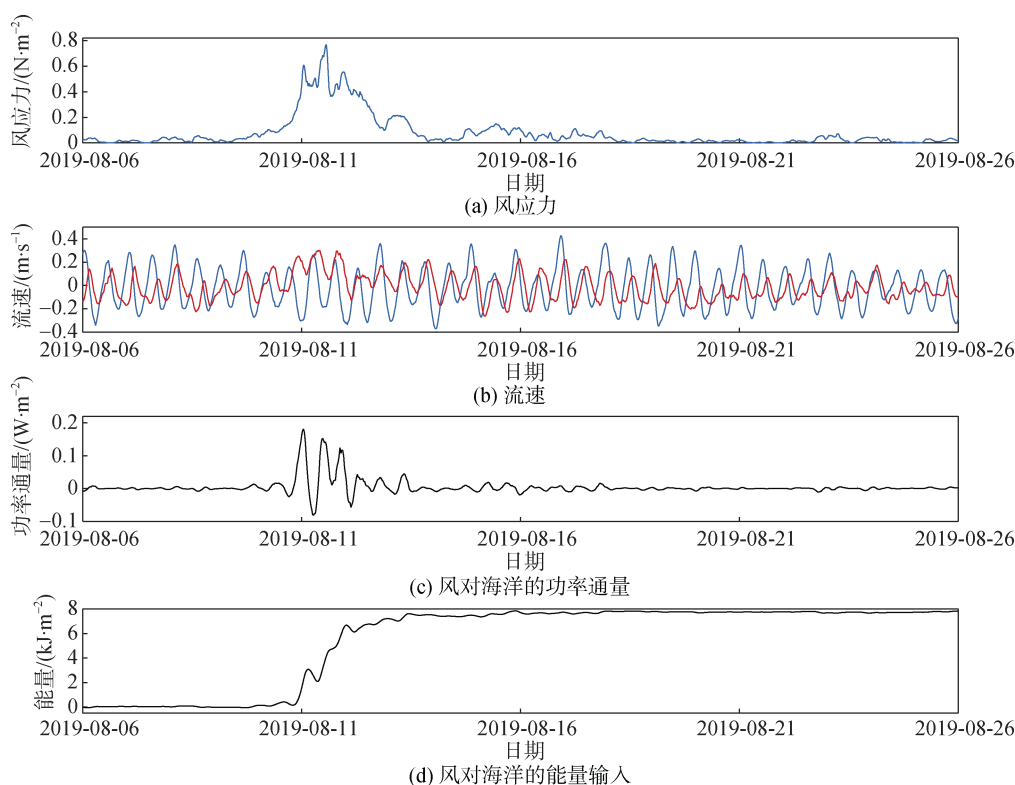


图 6 台风过境期间各要素的变化

Fig. 6 Parameters changes during a typhoon transit

注: (b)图中红线代表南北向流速, 蓝线代表东西向流速

## 2.5 近惯性振荡

根据功率谱分析结果, 在台风影响下近惯性频带出现了显著的能量谱峰, 为进一步对其进行分析, 本文利用 4 阶 Butterworth 带通滤波器, 分别对原始流速  $u$ 、 $v$  分量进行处理, 提取了 QF103 浮标处近惯性频带的流速(图 7)。为了最大限度地提取近惯性流速, 同时避免潮流信号的干扰, 若  $f$  是浮标所在位置的惯性频率, 则设滤波频带为  $0.95f \sim 1.3f$ 。

图 7 表明由于浮标处水深较浅, 台风可引起全水深近惯性振荡, 其流速最大值出现在台风过境期间, 约为  $0.15 \text{ m/s}$ , 与原始流速相比, 近惯性流速相对较小。在垂直方向上, 近惯性流速具有第一斜压模态的特征, 位相相差约  $180^\circ$ , 这种垂向特征与冀承振等<sup>[10]</sup>在陆架海域的观测结果、孟庆军等<sup>[6]</sup>的模式结果相近, 这种结构的形成主要是由于浅海地形和岸界的影响, 与大洋中台风激发的近惯性流速垂向特征不同。

根据下式计算台风引起近惯性频带流速的动能  
(图 8a):

$$E_f = \frac{1}{2} \rho_0 (u_f^2 + v_f^2), \quad (4)$$

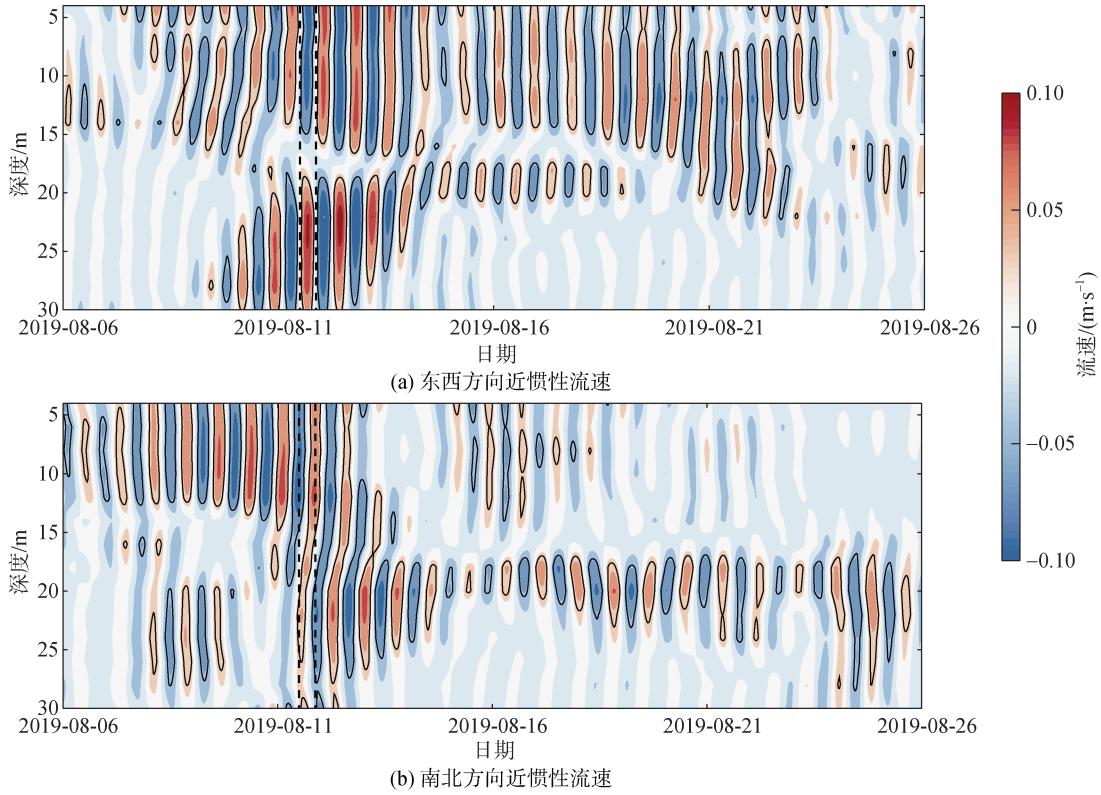


图 7 QF103 浮标近惯性流速

Fig. 7 Near-inertial current observed by the buoy QF103

注: 黑色实线标注的是±4 cm/s 流速等值线

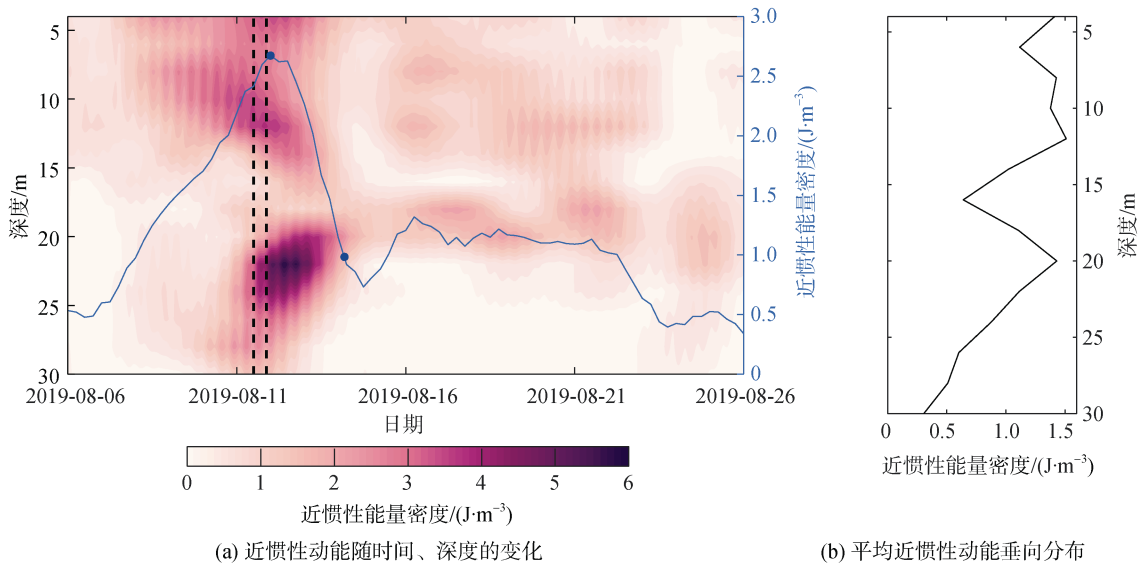


图 8 QF103 浮标近惯性动能

Fig. 8 Near-inertial wave kinetic energy for buoy QF103

注: a 图中蓝色实线表示上 20 m 层平均近惯性动能密度, 两个圆点分别为近惯性动能最大和 e 折的时刻

其中,  $\rho_0$  为常数, 取值  $1\ 024\ \text{kg/m}^3$ ,  $u_f$  和  $v_f$  分别是东西方向和南北方向的近惯性流速。本文取上 20 m 层的深度平均动能代表海洋表层的近惯性动能, 将 2019 年 8 月 6 日—24 日之间的动能逐层进行时间平均, 表示近惯性动能密度的垂向分布(图 8b)。

可以看出, 台风过境之前, 近惯性动能很小, 约为  $0.4\ \text{J/m}^3$ ; 台风过境时, 随着风对海洋的能量输入, 近惯性频带能量逐渐增加, 于 8 月 12 日达到最大, 最大值为  $2.7\ \text{J/m}^3$ ; 近惯性动能的垂向分布存在两个峰值, 一个在混合层约 12 m 处, 另一个在混合层以下约 20 m 附近深度, 这是因为台风输入海洋的能量除了在混合层和跃层耗散的部分外, 主要是通过近惯性振荡向跃层以下传播<sup>[9]</sup>, 而背景潮流可以促进近惯性能量的下传<sup>[6]</sup>。台风过后动能迅速衰减, 近惯性流速的 e 折时间尺度约为 2.2 d, 仅相当于 2.6 个惯性周期(浮标处的惯性周期为 20.26 h), 而马永贵等<sup>[5]</sup>及朱大勇等<sup>[6]</sup>的观测表明, 台风过后, 近惯性振荡在南海海域的影响可持续 5 d 以上, 相较而言, 台风“利奇马”在黄海海域引起的近惯性响应偏弱, 且近惯性振荡的衰减迅速。这一方面是由于浮标位置水深较浅且靠近岸界, 近惯性振荡破碎导致能量衰减; 另一方面是由于近惯性振荡与强背景内潮之间发生非线性相互作用, 近惯性能量向次级波动转移, 限制了混合层近惯性振荡的成长<sup>[12]</sup>。

### 3 结论

本文基于布放在黄海海域的 QF103、QF111 浮标观测数据, 分析了黄海对台风“利奇马”响应的基本特征。结果表明, 台风过境期间, 海面水温、气温、气压均会有明显下降, 气温对台风的响应要快于水温, 海面水温下降幅度可达  $5\ ^\circ\text{C}$ , 且距台风中心越近水温降幅越大; 受台风引起的垂向混合和海表降温的影响, 海表生态要素响应明显, 海洋表层盐度、叶绿素 *a* 质量浓度、溶解氧质量浓度均有明显升高, 盐度升高约 0.6, 叶绿素 *a* 质量浓度的最大值可达  $1.4\ \text{mg/m}^3$ , 溶解氧质量浓度最大值超过  $7.9\ \text{mg/L}$ 。这些要素变化可促进海表的光合作用, 从而提高初级生产力。

台风过境期间, 在强风应力的作用下, 海洋表层流速北向分量明显增强, 台风对海洋表层流的能量输入使近惯性频带能量大幅增加。台风可在全水深激发近惯性振荡, 台风激发的近惯性流速最大振幅为  $0.15\ \text{m/s}$ , 在垂直方向上, 近惯性流速具有第一

斜压模态的特征; 在黄海海域近惯性振荡的衰减速度较快, 其衰减的 e 折尺度仅约为 2.2 d。

#### 参考文献:

- [1] CHEN F, DU Y, WANG D, et al. Response of upper ocean current to typhoon at two ADCP moorings west of the Luzon Strait[J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 2010, 28(5): 1002-1011.
- [2] GREATBTCH R J. On the response of the ocean to a moving storm: The nonlinear dynamics[J]. Journal of Physical Oceanography, 1983, 13(3): 357-367.
- [3] 王冠琳, 李大伟, 徐腾飞, 等. 上层海洋对台风“凯萨娜”(2009)的响应特征[J]. 海洋科学, 2019, 43(9): 1-11.  
WANG Guanlin, LI Dawei, XU Tengfei, et al. Upper ocean responses to Typhoon Ketsana(2009)[J]. Marine Sciences, 2019, 43(9): 1-11.
- [4] SANFORD T B, PRICE J F, GIRTON J B. Upper-ocean response to hurricane Frances (2004) observed by profiling Em-Apex floats[J]. Journal of Physical Oceanography, 2011, 41(6): 1041-1056.
- [5] D'ASARO E A. The energy flux from the wind to near-inertial motions in the surface mixed layer[J]. Journal of Physical Oceanography, 2009, 15(8): 1043-1059.
- [6] 孟庆军, 李培良. 黄海在有无潮作用下对“布拉万”不同响应的数值模拟研究[J]. 海洋与湖沼, 2015, 46(6): 1241-1254.  
MENG Qingjun, LI Peiliang. A numerical study of the Yellow Sea reponses to Bolaven with and without tides[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2015, 46(6): 1241-1254.
- [7] 马永贵, 张书文, 齐义泉, 等. 南海西北部上层海洋对连续台风的近惯性响应[J]. 中国科学: 地球科学, 2019, 49(4): 125-134.  
MA Yonggui, ZHANG Shuwen, QI Yiquan, et al. Upper ocean near-inertial response to the passage of two sequential typhoons in the northwestern South China Sea[J]. Science China Earth Sciences, 2019, 49(4): 125-134.
- [8] 朱大勇, 李立. 台风 Wayne 过后南海北部陆架海域的近惯性振荡[J]. 热带海洋学报, 2007, 26(4): 1-7.  
ZHU Dayong, LI Li. Near inertial oscillations in shelf-break of northern South China Sea after passage of typhoon Wayne[J]. Journal of Tropical Oceanography, 2007, 26(4): 1-7.
- [9] GUAN S, ZHAO W, HUTHNANCE J, et al. Observed upper ocean response to typhoon Megi (2010) in the Northern South China Sea[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2014, 119(5): 3134-3157.
- [10] 冀承振, 葛勇, 李健, 等. 黄海海洋对台风“灿鸿”外



- 围过程响应的观测研究[J]. 海洋学报, 2020, 42(1): 46-53.
- JI Chengzhen, GE Yong, LI Jian, et al. Study of the Yellow Sea reponses to peripheral processes of Typhoon Chan-hom[J]. Haiyang Xuebao, 2020, 42(1): 46-53.
- [11] SHAN H X, GUAN Y P, HUANG J P. Investigating different bio-responses of the upper ocean to Typhoon Haitang using Argo and satellite data[J]. Chinese Science Bulletin, 2014, 59(8): 785-794.
- [12] 管守德. 南海北部近惯性振荡研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2014.
- GUAN Shoude. Near inertial oscillations in the Northern Southern South China Sea[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2014.
- [13] 牟平宇, 林霄沛. 台风“苏力”(2013)期间海洋上层温、盐及海平面异常变化特征[J]. 海洋湖沼通报, 2018(3): 1-11.
- MU Pingyu, LIN Xiaopei. Changes in upper ocean temperature, salt and sea level during Typhoon Soulik(2013)[J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2018(3): 1-11.
- [14] 陈志伟, 康建成, 顾成林, 等. 近30年西北太平洋热带气旋的时空变化及与海洋上层热状态的关系[J]. 海洋科学, 2017, 41(8): 122-133.
- CHEN Zhiwei, KANG Jiancheng, GU Chenglin, et al. Spatial and temporal variation of the Northwest Pacific tropical cyclone and its relation with the thermal status of upper ocean in the past 30 years[J]. Marine Sciences, 2017, 41(8): 122-133.
- [15] 陈大可, 雷小途, 王伟, 等. 上层海洋对台风的响应和调制机理[J]. 地球科学进展, 2013, 28(10): 1077-1086.
- CHEN Dake, LEI Xiaotu, WANG Wei, et al. Upper ocean response and feedback mechanisms to typhoon[J]. Advances in Earth Science, 2013, 28(10): 1007-1086.
- [16] 杨曦光. 黄海叶绿素及初级生产力的遥感估算[D]. 北京: 中国科学院大学, 2013.
- YANG Xiguang. Chlorophyll and primary productivity estimation based on remote sensing in Yellow Sea[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2013.
- [17] 朱超, 史剑, 陶爱风, 等. “苏拉”和“达维”双台风过程中台风浪和海温的数值模拟[J]. 海洋科学, 2019, 43(7): 1-11.
- ZHU Chao, SHI Jian, TAO Aifeng, et al. Numerical simulation of typhoon waves and sea temperatures during Typhoon “Saola” and “Damrey”[J]. Marine Sciences, 2019, 43(7): 1-11.
- [18] 鲍婧, 黄亮, 沈阳, 等. 江苏不同强度降雨对能见度影响分析[J]. 大气科学学报, 2018, 41(5): 702-709.
- BAO Jing, HUANG Liang, SHEN Yang, et al. Analysis of the influence of rainfall intensity on visibility in Jiangsu[J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 2018, 41(5): 702-709.
- [19] 姜德娟, 张华. 渤海叶绿素浓度时空特征分析及其对赤潮的监测[J]. 海洋科学, 2018, 42(5): 23-31.
- JIANG Dejuan, ZHANG Hua. Analysis of spatial and temporal characteristics of chlorophyll-a concentration and red tide monitoring in Bohai Sea[J]. Marine Sciences, 2018, 42(5): 23-31.
- [20] CHIANG T L, WU C R, OEY L Y. Typhoon Kai-Tak: An ocean's perfect storm[J]. Journal of Physical Oceanography, 2011, 41(1): 221-233.

# Observation of the Yellow Sea response to Typhoon Lekima

YU Bo<sup>1,2</sup>, GE Yong<sup>1,2</sup>, REN Dian-jun<sup>1,2</sup>, JI Cheng-zhen<sup>1,2</sup>, HU Wei<sup>1,2</sup>

(1. North China Sea Marine Forecasting Center of State Oceanic Administration, Qingdao 266061, China; 2. Shandong Provincial Key Laboratory of Marine Ecological Environment and Disaster Prevention and Mitigation, Qingdao 266061, China)

**Received:** Jun. 16, 2020

**Key words:** Typhoon Lekima; sea surface temperature; chlorophyll; inertial oscillations

**Abstract:** In August 2019, typhoon Lekima passed through the Yellow Sea, and the ocean response to typhoon was analyzed based on the data of the buoy QF103 and QF111. Affected by the typhoon, the sea surface temperature (SST) decreased significantly, and the SST decreased by up to 5 °C. The response of sea surface ecological elements was obvious. The sea surface salinity, the concentration of chlorophyll *a*, and the concentration of dissolved oxygen all increased significantly. The salinity increased by about 0.6, the maximum concentration of chlorophyll *a* reached 1.4 mg/m<sup>3</sup>, and the maximum concentration of dissolved oxygen exceeded 7.9 mg/L. The current increased forced by strong wind stress during the transit of the typhoon, the energy of the near-inertial increased significantly because of the energy flux induced by typhoon, and the maximum amplitude of the near-inertial velocity inspired by the typhoon was 0.15 m/s. The near-inertial velocities were characterized by a first baroclinic mode vertically. In the Yellow Sea, the damped timescale of the inertial oscillations was only about 2.2 d.

(本文编辑: 丛培秀)