

南海东北部陆架区台风“卡努”的近惯性振荡响应

刘同木^{1,2,3}, 余建星¹, 孟强^{2,3}, 王研^{2,3}, 张新文^{2,3}

(1. 天津大学水利工程仿真与安全国家重点实验室, 天津 300072; 2. 国家海洋局南海调查技术中心, 广东 广州 510310; 3. 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2017年10月南海东北部陆架区的潜标观测资料, 分析了南海东北部陆架区海洋对台风“卡努”的近惯性响应特征, 研究了近惯性内波生成、传播和消亡等演变规律。研究结果表明: 在动力学响应方面, 台风过境期间全水深流速显著增强, 表层最大流速达到145 cm/s; 近惯性流速在垂向上存在的两个高值区分别位于表层和中层, 中层近惯性振荡影响时间最长超过12 d; 近惯性振荡e折时间尺度大约为7.6 d。近惯性内波的垂向群速度为0.042 cm/s; 近惯性内波会引起波-波相互作用、近惯性波与全日内波的耦合波; 在台风“卡努”作用期间存在显著的频率“蓝移”现象。在热力学响应方面, 台风会引起表层水温下降, 底层水温上升。

关键词: 南海东北部; 近惯性振荡; 近惯性内波; 台风“卡努”

中图分类号: P444 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2022)06-0083-07

1 引言

近惯性内波是频率接近局地惯性频率的海洋内部波动, 广泛存在于全球海洋的不同深度中, 海面非稳定风力驱动是其生成的主要原因^[1-2]。热带气旋过境能够激发显著的近惯性振荡^[3]。近惯性内波对海洋内部动力、热力和生态环境的影响巨大, 对全球海洋能量收支平衡起着十分重要的作用, 对认识海洋环境变化、改善热带气旋的预报以及防灾减灾都具有重要意义^[4]。因此, 近惯性振荡的生成、演变规律及其作用机理一直是海洋学领域研究的热点问题。

众多学者对热带气旋引起的近惯性振荡进行了大量研究^[5-8]。LEAMAN^[9]研究了近惯性波的垂直极化和能量通量观测, 发现随着压力的增加, 近惯性波以顺时针方向极化, 并具有净向下的能量通量。JAROSZ等^[10]利用1997年4月—1998年3月期间海流和风的观测资料, 研究了德索托峡谷(Desoto Canyon)海域的近惯性海流, 发现近惯性内

波的振幅可高达40 cm/s。SILVERTHORNE等^[11]研究了近惯性运动的季节性动能变化, 发现其具有明显的季节周期, 近惯性动能的季节信号在垂直波长大于100 m的运动中最为突出。MUKHERJEE等^[12]研究了印度东海岸附近的近惯性洋流, 发现该区域的惯性能量都很弱。KIM等^[13]研究了上层分层变化对海岸近惯性流的影响, 发现夏季对单位风强迫的响应比冬季强20%~70%, 这与混合层深度和振幅的季节模式相反。GOUGH等^[14]研究了墨西哥湾东北部的共振近表面惯性振荡, 发现该海域的日振荡主要是由2010年6月风强迫引起的惯性振荡。研究表明台风引起的近惯性流速在全球平均约为10 cm/s, 最大可达2 m/s。近惯性内波的水平尺度一般为几百千米, 而垂向尺度一般为几十到几百米^[15]。台风引起的近惯性内波能量在垂向以下传为主, 其衰减周期一般为7 d至十几天。近惯性振荡频率会出现“蓝移”或“红移”现象。此外, 还有学者研究了内潮波和近惯性振荡波之间的相互作用和参数次谐波不稳定作用(Parametric Subharmonic

收稿日期: 2021-11-14; 修回日期: 2022-02-11。

基金项目: 自然资源部海洋环境探测技术与应用重点实验室自主设立课题(MESTA-2021-C001)。

作者简介: 刘同木(1980-), 男, 高级工程师, 硕士, 主要从事海洋观测技术、物理海洋学等研究。E-mail: liutongmu@smst.gz.cn

Instability, PSI)以及中尺度涡旋对近惯性振荡的调制等^[16-18]。

南海是世界上台风最频繁的海域之一,平均每年约有15个台风影响^[19],因此南海的近惯性内波十分普遍。目前对南海的近惯性研究主要基于卫星遥感数据、数值模拟及少量现场观测数据进行分析^[20]。李娟等^[20]利用数值模拟研究了台风“康森”产生的海洋近惯性海流,发现近惯性动能高值主要集中在台风路径的右侧,持续时间超过4 d。张骞等^[17]利用潜标观测数据,研究得出海洋近惯性海流的纬向流速可达1.20 m/s,40~250 m深度的最大增温幅度接近1℃。于璐莎等^[21-22]分析了中尺度暖涡对近惯性频率的调制及其对近惯性动能分布与传播的影响。虽然前人对南海的近惯性振荡研究取得不少成果,但是由于现场观测资料的缺乏,研究仍不充分,特别是南部北部陆架区180 m左右水深海域的近惯性振荡研究尚未见报道。本文利用在南海北部陆架区布放的潜标和浮标观测资料,通过对比分析台风“卡努”影响前后海流的变化情况,研究了该海域对台风“卡努”的动力学和热力学响应特征。

2 数据和方法

2.1 台风“卡努”

2017年10月11日12时(世界时,下同),在菲律宾以东洋面形成一个热带低压,而后强度不断增强成为热带风暴,并被命名为台风“卡努”(国际编号1720),台风最大风速为18 m/s;台风于13日19时加强为强热带风暴级,14日14时加强为台风级,15日04时继续加强为强台风级,登陆时台风中心附近最大风力达10级(28 m/s),中心最低气压为988 hPa;15日19时台风登陆广东省徐闻县;此后台风强度逐渐减弱,16日09时台风停止编号。

2.2 观测数据

观测数据来源于国家海洋局南海调查技术中心在南海北部布放的潜标(114°54.4'E,20°15.2'N),站位水深为186 m,局地惯性周期为34.57 h。潜标观测时间为2017年8月31日—2018年1月3日。潜标上搭载两台声学多普勒流速剖面仪(Acoustic Doppler Current Profiler, ADCP)用于观测剖面海

流。我们在水深158 m处布置1台150k ADCP进行向上测量,垂向分辨率为8 m,时间分辨率为3 min;在水深164 m处布置1台600k ADCP进行向下观测,垂向分辨率为0.5 m,时间分辨率为10 min。风速和表层水温数据来自潜标站位东南约71 km处自然资源部南海局MF14003站浮标(115°27'E,19°52'N)的观测数据。2017年9月1—30日为研究海洋对台风“卡努”的近惯性响应时间段。

3 结果分析

3.1 流速响应

图1a和图1b分别为MF14003站浮标观测的风速和潜标观测的海流分量时间变化序列,图中黑色虚线表示台风中心距离潜标站位最近的时刻(10月15日09时)。为分析台风对海流的影响,本文分别选取水深15 m、100 m和180 m代表海洋表层、中层和底层。在台风“卡努”经过前,海洋表层流速为5~88 cm/s,中层流速为13~49 cm/s,底层流速为3~43 cm/s。台风期间,整个海洋的剖面流速明显增强,表层最大流速达到145 cm/s,中层最大流速达到88 cm/s,底层最大流速达到66 cm/s。台风引起了海洋的近惯性振荡。

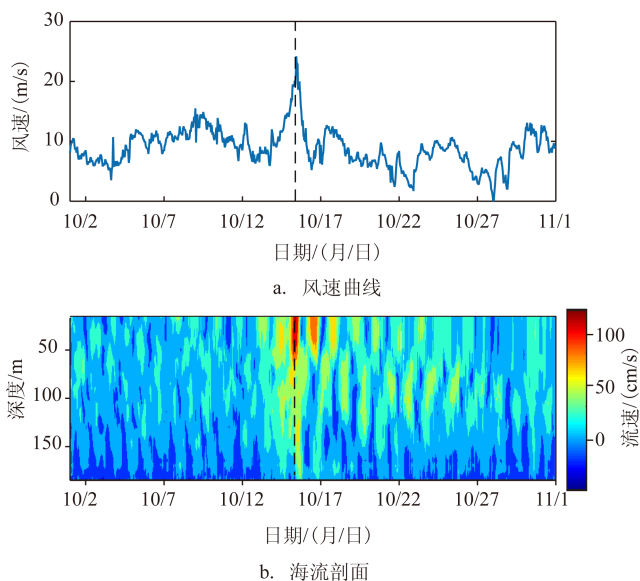


图1 台风“卡努”作用期间风过程曲线和海流剖面
Fig.1 Wind process curve and current profile during typhoon "Kanu"

3.2 近惯性流速特征

为了进一步分析台风“卡努”引起的近惯性振荡特征,本文采用四阶巴特沃斯滤波带通滤波^[23]提取近惯性流速,带通滤波频率取 $0.85 \sim 1.15f$, f 为局地惯性频率。图2为台风“卡努”作用前后纬向和经向近惯性流速的时间序列。从图中可以看出,台风先在海洋表层激发近惯性振荡,增幅约为 18 cm/s ;台风作用之后(从10月18日开始),海洋表层和中层近惯性流速明显增加。和纬向时间序列类似,近惯性流速在经向上存在两个高值区,分别位于海洋表层和上层。以经向流为例,海洋表层近惯性流速在10月22日达到最大值 40.8 cm/s ,然后逐渐减小,29日其影响基本消失;在 $50 \sim 60 \text{ m}$ 水深处存在一个过渡带,近惯性流速较小; $60 \sim 130 \text{ m}$ 水深区域的近惯性流速较大,振幅在 25 cm/s 左右,影响时间最长,一致持续到11月;底层近惯性流速最小,振幅在 13 cm/s 左右,影响时间为10月19—23日。

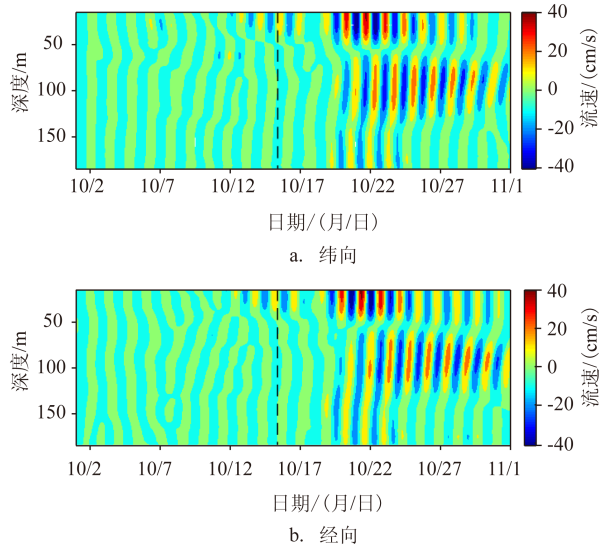


图2 台风“卡努”作用前后近惯性流速的时间序列

Fig.2 Time series of near-inertial velocity before and after typhoon "Kanu"

3.3 风对近惯性能量的输入

海面风力驱动是近惯性波穿透混合层并向下传播的主要能量来源。风能的输入取决于热带气旋的风力与海面表层流动之间的耦合,可通过计算两者矢量的乘积求得^[24]。公式如下:

$$\pi = \vec{\tau} \cdot \vec{\mu} \quad (1)$$

式中: π 为风对海洋上混合层所做功率; $\vec{\tau}$ 为风应力; $\vec{\mu}$ 为混合层海流,这里取水深 15 m 处的近惯性海流。风应力 $\vec{\tau}$ 可由式(2)估算:

$$\vec{\tau} = \rho_a C_d |U_{10}| \vec{U}_{10} \quad (2)$$

式中: ρ_a 为空气密度,取 1.3 kg/m^3 ; $|U_{10}|$ 为 10 m 海面风速,取自MF14003站浮标测量数据; \vec{U}_{10} 为 10 m 高海面风速的矢量表达形式; C_d 为拖曳系数,可由式(3)进行估算:

$$C_d \times 1000 =$$

$$\begin{cases} 1.2 & , U_{10} \leq 11 \\ 0.49 + 0.065 U_{10} & , 11 < U_{10} \leq 19 \\ 1.364 + 0.0234 U_{10} - 0.00023158, 19 < U_{10} \leq 100 \end{cases} \quad (3)$$

台风“卡努”对近惯性能量的输入如图3所示。由图3a和3b可见,台风作用期间风应力迅速增大,风对近惯性能量的输入功率最大达 3.6 mW/m^2 ,这比南海平均近惯性能量通量 1.7 mW/m^2 大^[25]。台风作用之后,风对近惯性能量的输入功率迅速变小,在 $-0.3 \sim 0.5 \text{ mW/m}^2$ 之间波动。从图3c可以看出,台风作用期间风输入海洋的能量积分最大达 136.2 kJ/m^2 ,台风作用之后风能的输入减小约 25 kJ/m^2 ,随后持续缓慢增加。风能输入减小是因

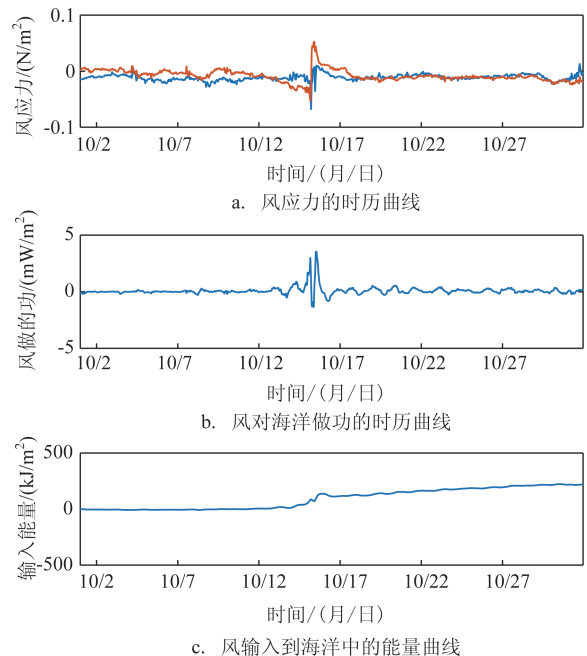


图3 台风“卡努”对近惯性能量的输入

Fig.3 Input of near-inertial energy by typhoon "Kanu"

为观测站位在台风路径的左侧,风应力旋转方向与近惯性流方向不一致^[26]。风能进入海洋内部后,能量会通过海洋内部波动过程水平或垂直传播至海洋深处,剩余能量在局地耗散^[27]。

3.4 近惯性动能

为研究台风引起的近惯性动能的变化,我们采用以下公式计算近惯性动能:

$$E_f = \frac{1}{2} \rho_0 (\mu_f^2 + \nu_f^2) \quad (4)$$

式中: μ_f 和 ν_f 分别为通过带通滤波后得到的近惯性流东西和南北方向的流速分量; ρ_0 为海水密度,取为常数 $1\,024\text{ kg/m}^3$ 。

图4a为近惯性动能随时间和水深的变化过程图。由图可见,在台风“卡努”的影响下,海洋近惯性动能显著增加。台风的最大直接影响深度约为50 m,并在50 m以浅激发出近惯性内波,然后向下传播。在垂向上,近惯性动能存在两个高值区域,分别位于海洋表层和中层。表层近惯性动能在10月22日00时左右达峰值 99 J/m^3 ,中层近惯性动能在10月24日08时左右达到最大值 36 J/m^3 。通过能量高值中心在各深度层之间传播的迟滞时间^[17],可以计算得到近惯性振荡的垂向群速度约为 0.042 cm/s ,这一结果略小于张骞等^[17]计算的 0.046 cm/s 。图4b为水深100 m以浅近惯性动能的平均过程曲线。曲

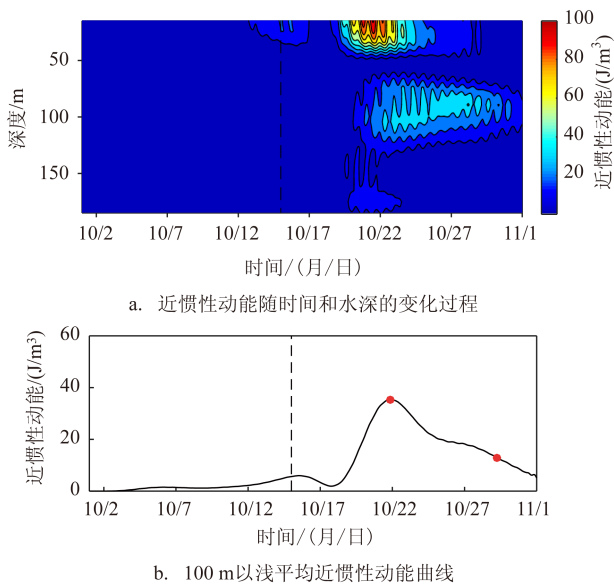


图4 近惯性动能时间分布

Fig.4 Time distribution of near-inertial kinetic energy

线上的两个红点分别代表能量最大值的位置和能量衰减至最大能量的 $1/e$ 的位置。根据近惯性动能的时间序列,可以计算得到 e 折时间尺度(近惯性动能由最大值减少到最大值的 $1/e$ 所用的时间)大约为 7.6 d 。

3.5 能谱特征

图5为台风“卡努”作用前后海洋表层、中层、底层和全水深的功率谱曲线。由图可见,在惯性频率 f 附近,台风作用后各水深的能量谱都显著增大,且谱峰频率比 f 略大,即存在“蓝移”现象。台风发生前,海洋表层和中层的惯性频率也存在谱峰,这是由于台风进入南海而未到达观测海域前,已经产生近惯性振荡。台风作用后,在全日潮($K1$)和半日潮($M2$)的频率上均存在谱峰,全日潮频率能谱比半日潮大;海洋表层和中层的全日潮频率能谱略有增加,底层变化较少;各水深的半日潮频率能谱基本不变。此外,在近惯性频率和全日潮频率($f+K1$)上存在显著能量谱峰,即存在近惯性波与全日内波的耦合波。根据张骞等^[17]的方法,将不同频率的谱密度在全水深上进行积分,计算得出的能量谱密度比值(Power Spectrum Density Ratio, PSDR)为不同频率能量谱密度的比例系数(见图5)。台风发生前, f 、 $K1$ 和 $M2$ 频率上的PSDR约为 $2:2:1$,台风后约为 $15:4:1$,说明台风后近惯性运动显著增强。

利用近惯性海流的时间序列,通过最小二乘法拟合,计算得出精确的近惯性谱峰频率。计算公式如下:

$$U(t) = a_0 + a_1 \cos(2\pi f_p t) + b_1 \sin(2\pi f_p t) + E(t) \quad (5)$$

式中: $U(t)$ 为近惯性海流纬向和经向方向的分量 u 、 v ; a_0 、 a_1 、 b_1 和 f_p 为拟合系数; $E(t)$ 为残差。结果表明,近惯性海流的 u 、 v 拟合结果类似。在垂向上,从海洋表层到底层的谱峰频率随深度增加略有增大。表层谱峰频率为 $1.015f$,对应惯性周期为 $34.13h$;中层谱峰频率为 $1.026f$,对应惯性周期为 $33.78h$;底层谱峰频率为 $1.029f$,对应惯性周期为 $33.67h$ 。平均谱峰频率约为 $1.022f$,整体表现为“蓝移”。

3.6 热力学响应

图6为台风“卡努”作用前后海洋表层(2 m)和底层(158 m)水温的时间序列。表层水温为

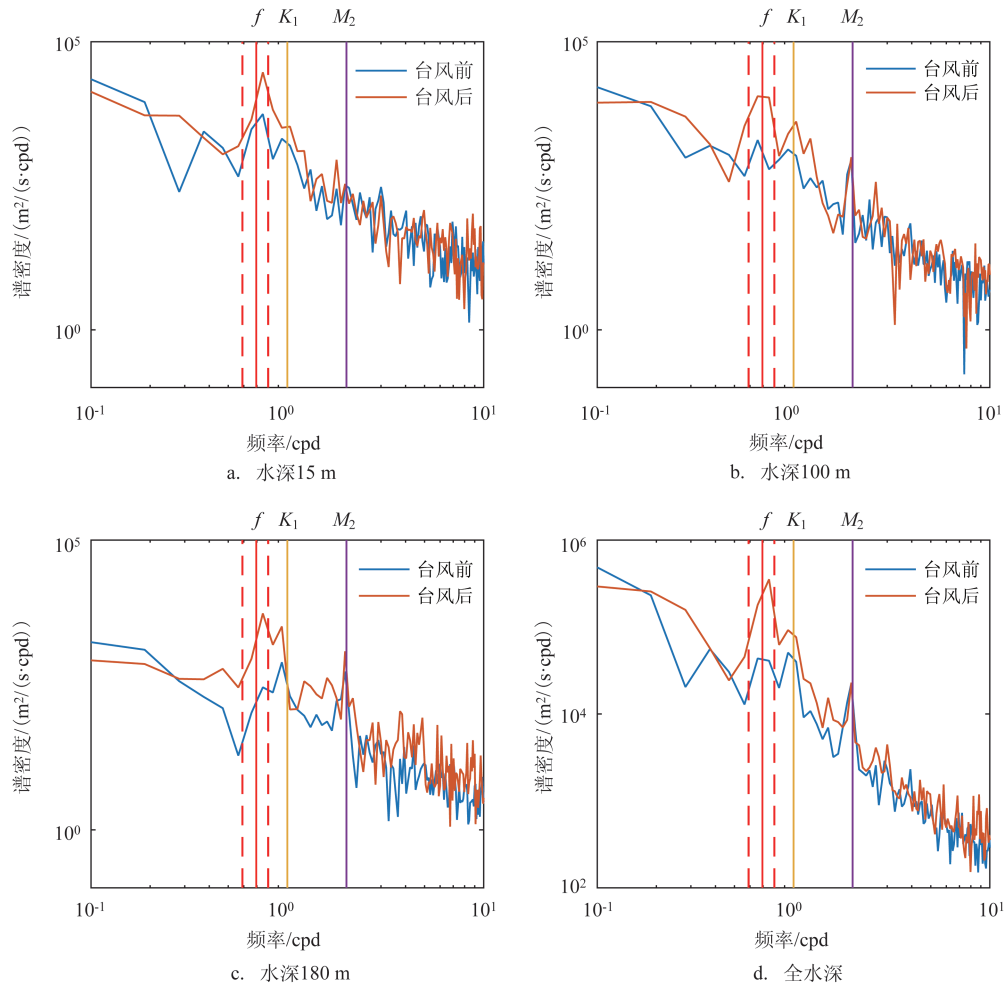


图5 台风“卡努”作用前后经向流速的能谱曲线

Fig.5 Energy spectrum curve of meridional velocity before and after typhoon "Kanu"

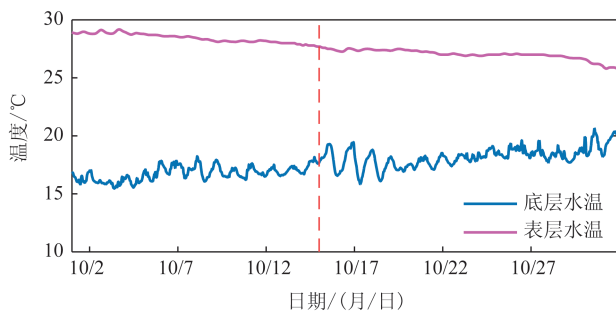


图6 台风“卡努”作用前后表层和底层水温时间序列

Fig.6 Time series of surface and bottom water temperature before and after "Kanu"

MF14003站浮标的测量数据,底层水温由锚系潜标上150 kHz ADCP的温度传感器测量得到。由图6可见,10月期间海洋表层水温在25.8~29.2℃之间

变化;台风作用之后表层水温略有降低,降幅最大约0.4℃。底层水温在15.5~20.7℃之间变化;台风作用之后底层水温变化与表层相反,存在增温现象,最大增幅为1.6℃。

4 结论

本文基于2017年10月南海东北部陆架区的潜标观测资料,采用带通滤波和谱分析方法,研究了由台风“卡努”激发产生的近惯性振荡运动响应和热力响应。结论如下:

(1)南海东北部陆架区在台风“卡努”的影响下,产生强烈的近惯性振荡,并影响到整个剖面深度。台风过境期间海水流速显著增强,表层最大流

速达到 145 cm/s, 中层流速达到 88 cm/s, 底层流速达到 66 cm/s。

(2) 近惯性流速在垂向上存在两个高值区, 分别位于海洋表层和中层; 底层近惯性流速最弱。从近惯性振荡影响的持续时间来看, 中层影响时间最长, 超过 12 d; 表层次之, 约 10 d; 底层影响时间最短, 约 4 d。

(3) 风对海洋做功的计算表明风对近惯性能量输入的最大功率为 3.6 mW/m^2 。海洋表层近惯性动能最大达 99 J/m^3 , 近惯性内波的垂向群速度为 0.042 cm/s , e 折时间尺度约为 7.6 d。

(4) 在台风作用下, 近惯性频率出现明显的“蓝移”现象, 海洋表层谱峰频率为 $1.015f$, 中层谱峰频率为 $1.026f$, 底层谱峰频率为 $1.029f$, 平均谱峰频率约为 $1.022f$ 。近惯性内波会引起波-波相互作用以及近惯性波与全日内波的耦合波($f+K1$)。

(5) 台风之后海洋表层水温略有降低, 降幅最大约 0.4°C , 底层水温变化与表层相反, 存在增温现象, 最大增幅为 1.6°C 。

参考文献:

- [1] 钱奇峰. 西北太平洋热带气旋对海洋的影响[D]. 南京: 南京大学, 2010.
QIAN Q F. Ocean response to tropical cyclones in Northwest Pacific[D]. Nanjing: Nanjing University, 2010.
- [2] 王东晓, 王强, 蔡树群, 等. 南海中深层动力格局与演变机制研究进展[J]. 中国科学: 地球科学, 2019, 49(12): 1919-1932.
WANG D X, WANG Q, CAI S Q, et al. Advances in research of the mid-deep South China Sea circulation[J]. Scientia Sinica Terrae, 2019, 49(12): 1919-1932.
- [3] 万云娇. 热带气旋在南海西沙上层海洋激发的近惯性振荡特征研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2015.
WAN Y J. Study on the characteristics of near inertial oscillation excited by tropical cyclones in the upper ocean of Xisha, South China Sea[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2015.
- [4] 江森汇, 吴泽文, 舒懿俊. 南海西边界急流影响下的近惯性振荡特征分析[J]. 地球科学进展, 2018, 33(3): 270-280.
JIANG S H, WU Z W, SHU X J. Characteristics of near-inertial oscillation influenced by western boundary current of South China Sea[J]. Advances in Earth Science, 2018, 33(3): 270-280.
- [5] 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 D Y, LI L. 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.
- [6] 高大鲁, 王新怡, 李秉天, 等. 南海北部海域对台风尼格的响应特征分析[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2016, 46(6): 8-13, 28.
GAO D L, WANG X Y, LI B T, et al. On the response of the upper ocean of Northern South China sea to typhoon Nalgae[J]. Periodical of Ocean University of China, 2016, 46(6): 8-13, 28.
- [7] CHEN S L, CHEN D Y, XING J X. A study on some basic features of inertial oscillations and near-inertial internal waves[J]. Ocean Science, 2017, 13(5): 829-836.
- [8] KAWAGUCHI Y, WAGAWA T, IGETA Y. Near-inertial internal waves and multiple-inertial oscillations trapped by negative vorticity anomaly in the central Sea of Japan[J]. Progress in Oceanography, 2020, 181: 102240.
- [9] LEAMAN K D. Observations on the vertical polarization and energy flux of near-inertial waves[J]. Journal of Physical Oceanography, 1976, 6(6): 894-908.
- [10] JAROSZ E, HALLOCK Z R, TEAGUE W J. Near-inertial currents in the DeSoto Canyon region[J]. Continental Shelf Research, 2007, 27(19): 2407-2426.
- [11] SILVERTHORNE K E, TOOLE J M. Seasonal kinetic energy variability of near-inertial motions[J]. Journal of Physical Oceanography, 2009, 39(4): 1035-1049.
- [12] MUKHERJEE A, SHANKAR D, G APARNA S, et al. Near-inertial currents off the east coast of India[J]. Continental Shelf Research, 2013, 55: 29-39.
- [13] KIM S Y, KURAPOV A L, KOSRO P M. Influence of varying upper ocean stratification on coastal near-inertial currents[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2015, 120(12): 8504-8527.
- [14] GOUGH M K, RENIERS A J H M, MACMAHAN J H, et al. Resonant near-surface inertial oscillations in the northeastern Gulf of Mexico[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2016, 121(4): 2163-2182.
- [15] 蒋晨. 南海北部上层海洋对热带气旋的响应研究[D]. 湛江: 广东海洋大学, 2020.
JIANG C. Upper ocean response of the northern south China sea to tropical cyclone[D]. Zhanjiang: Guangdong Ocean University, 2020.
- [16] 毛华斌, 陈桂英, 尚晓东, 等. 西沙海域内潮与近惯性内波的相互作用[J]. 地球物理学报, 2013, 56(2): 592-600.
MAO H B, CHEN G Y, SHANG X D, et al. Interaction between internal tides and near-inertial waves at Xisha area[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2013, 56(2): 592-600.
- [17] 张骞, 廖光洪, 蔺飞龙, 等. 南海西北部上层海洋对台风“杜苏芮”的响应分析[J]. 海洋学报, 2019, 41(7): 22-35.
ZHANG Q, LIAO G H, LIN F L, et al. Analysis of upper ocean response to Typhoon Doksuri in the northwest South China Sea [J]. Haiyang Xuebao, 2019, 41(7): 22-35.
- [18] 江森汇, 吴泽文, 舒懿俊. 基于观测的南海西沙海域深层近惯性振荡特征分析[J]. 海洋通报, 2019, 38(5): 543-552.

- JIANG S H, WU Z W, SHU X J. Evolvement analyses of near-inertial motion in deep oceans by submarine observations of Xisha Island in the South China Sea[J]. *Marine Science Bulletin*, 2019, 38(5): 543-552.
- [19] SUN Z Y, HU J Y, ZHENG Q A, et al. Comparison of typhoon-induced near-inertial oscillations in shear flow in the northern South China Sea[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2015, 34(11): 38-45.
- [20] 李娟, 刘军亮, 蔡树群. 台风“康森”产生的海洋近惯性能量的数值模拟研究[J]. *热带海洋学报*, 2020, 39(2): 35-43.
- LI J, LIU J L, CAI S Q. Numerical simulation of oceanic near-inertial energy induced by Typhoon Conson[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2020, 39(2): 35-43.
- [21] 于璐莎, 翟荣伟, 鲁远征, 等. 南海北部台风和中尺度暖涡对近惯性振荡的影响[J]. *海洋学报*, 2020, 42(1): 1-11.
- YU L S, ZHAI R W, LU Y Z, et al. Effects of typhoon and the mesoscale warm eddy on the near-inertial oscillations in the northern of the South China Sea[J]. *Haiyang Xuebao*, 2020, 42(1): 1-11.
- [22] 于璐莎. 罗弗敦海盆和南海北部典型涡旋特性研究[D]. 广州: 中国科学院南海海洋研究所, 2019.
- YU L S. Study on the characteristics of typical vortices in the Lovetown basin and the northern South China Sea[D]. Guangzhou: South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, 2019.
- [23] 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): 731-740.
- MA Y G, ZHANG S W, QI Y Q, et al. Upper ocean near-inertial response to the passage of two sequential typhoons in the northwestern South China Sea[J]. *Scientia Sinica Terrae*, 2019, 49(4): 731-740.
- [24] 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 C Z, GE Y, LI J, et al. Study of the Yellow Sea responses to peripheral processes of Typhoon Chan-hom[J]. *Haiyang Xuebao*, 2020, 42(1): 46-53.
- [25] 张茜, 张小将, 孙惠, 等. 南海混合的能量源研究[J]. *中国海洋大学学报*, 2018, 48(4): 9-15.
- ZHANG Q, ZHANG X J, SUN H, et al. Energy source of mixing in the south China Sea[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2018, 48(4): 9-15.
- [26] 张翰. 上层海洋对热带气旋的动力学响应机制[D]. 厦门: 厦门大学, 2017.
- ZHANG H. Dynamical mechanisms of upper oceanic response to tropical cyclones[D]. Xiamen: Xiamen University, 2017.
- [27] 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 S D. Near inertial oscillations in the Northern Southern South Chinas Sea[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2014.

Near-inertial oscillation response of typhoon "Kanu" in the northeastern continental shelf of the South China Sea

LIU Tongmu^{1,2,3}, YU Jianxing¹, MENG Qiang^{2,3}, WANG Yan^{2,3}, ZHANG Xinwen^{2,3}

(1. State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. South China Sea Marine Survey and Technology Center of State Oceanic Administration, Guangzhou 510310, China; 3. Key Laboratory of Marine Environmental Survey Technology and Application, Ministry of Natural Resources, Guangzhou 510310, China)

Abstract: Based on the submersible observations in the northeastern continental shelf of the South China Sea in October 2017, the characteristics of the near-inertial response of the oceans in the northeastern continental shelf to typhoon "Kanu" are analyzed, and the evolution pattern of the near-inertial internal wave generation, propagation and extinction is studied. The results show that, in terms of dynamic response, the current velocity throughout the water column increases significantly during the typhoon transit, and the maximum surface velocity reaches 145 cm/s. The two high value areas of the near-inertial velocity vertically are located in the surface layer and the middle layer, and the influence time of near-inertial oscillation in the middle layer is longer than 12 d. The e-folding time scale of the near-inertial oscillations is about 7.6 d. The vertical group velocity of the near-inertial internal wave is 0.042 cm/s. The near-inertial internal wave could cause wave-wave interaction and coupled wave between of the near-inertial wave and the all-day internal wave. During typhoon period, there is a significant frequency "blue-shift" phenomenon during typhoon "Kanu". In terms of thermodynamic response, the typhoon causes the surface water temperature decrease and bottom water temperature increase.

Key words: northeastern South China Sea; near-inertial oscillation; near-inertial internal wave; typhoon "Kanu"