

热带风暴天鹰期间南海西北部海域内部响应的观测分析

徐振华^{1,2,3}, 尹宝树^{1,2}, 侯一筠^{1,2}

(1. 中国科学院 海洋研究所, 山东 青岛 266071; 2. 中国科学院 海洋环流与波动重点实验室, 山东 青岛 266071; 3. 中国科学院 研究生院, 北京 100049)

摘要: 2005年7月28日热带风暴天鹰(Washi)在南海东沙群岛西南海域生成,并向西北偏西推进,在7月29日增强为一个热带风暴,于7月30日在海南岛登陆。布放在南海西北部大陆架海域的锚系测站记录了天鹰过境期间温度和海流的响应过程。分析结果表明,伴随着热带风暴的强风应力引起强烈的垂向混合作用,使海表面温度下降2℃,混合层加深20 m,并且8 m以下各水层也都有明显的降温过程,但降温幅度低于8 m层,降温开始的时间也随着深度的增加而延后。台风过后,观测海域的近惯性内波显著,其频率为 8.1×10^{-6} Hz,略高于当地的惯性振荡频率(7.75×10^{-6} Hz)。滤波后的海流数据分析显示,近惯性波动是从海面向深海处传播的,其影响大约持续了10 d。本研究丰富了南海在台风期间响应过程的认识,可为近海海洋工程设计提供科学依据。

关键词: 南海; 热带气旋; 近惯性波动; 内波

中图分类号: P731

文献标识码: A

文章编号: 1000-3096(2010)06-0081-05

热带气旋是发生在热带亚热带海区的强烈的天气过程,是一种灾害性天气系统。热带气旋产生的海面气旋式风应力及强烈的混合过程,会使海洋和大气间产生大量的动量、能量和物质交换,从而引起上层海洋强烈的响应过程,因此海洋对热带气旋的响应也引起了许多研究者的关注^[1-3]。海洋对热带气旋的响应可分为两个不同的阶段:强迫过程和松弛过程^[4]。强迫过程即为海洋受强风应力作用和强气压变化作用阶段,发生在热带气旋过境期间,主要是海洋的局地响应,包括湍流引起的海洋表层的暖水和次表层的冷水混合、垂向混合和混合层底卷吸加强引起的海面和混合层的降温等。松弛过程发生在热带气旋过境之后,在此阶段,海洋对于台风响应的重要特征是台风引发的近惯性波动现象。Brooks等^[5]分析了台风Allen期间的实测数据,发现在台风的作用下产生了顺时针旋转的近惯性波动,运动轨迹近似椭圆形。台风过后3 d,近惯性流的流速显著增强,持续了大约5 d左右的时间。近惯性波动的周期为当地惯性周期的85%左右,在垂直方向上可以影响到整个水层。松弛过程主要是海洋对风应力旋度的非局地的斜压响应,强风输入到混合层的能量以近惯性波动的形式向温跃层传播,惯性波动的频率有时候略高于当地的惯性频率^[6],该过程可持续5~10 d^[7]。并且在强风应力的强迫作用下,海洋对热带

气旋的响应具有明显的右偏性,Church等^[8]发现在台风的强迫作用下,最大流速发生在台风路径右侧80 km处,可达1 m/s,路径右侧混合层加深的范围和幅值都远远高于路径左侧。

南海是热带气旋活动频繁的海区,因此研究南海海域对于热带气旋的响应特征具有重要的意义。由于在极端天气情况下进行船舶观测比较困难,所以在该海域热带气旋天气下的观测资料较少,朱大勇和李立^[9]根据海南岛东部陆架上的锚系浮标资料分析了台风中心过境前后风和近表层的海流响应特征,但该研究由于资料所限,并没有讨论海洋混合层和跃层对台风的响应过程。在南海文昌内波实验(WCIWE)中,中国科学院海洋研究所从2005年4月到2005年10月,在南海西北部的文昌海域布设了单站锚系对温、盐、流进行观测,为研究南海海洋对台风的响应提供了宝贵的实测资料。作者主要采用2005年7月到2005年8月的观测数据,研究南海西北部海洋上层温度和海流对热带风暴(Washi)的响应

收稿日期: 2009-05-26; 修回日期: 2009-06-15

基金项目: 中国科学院知识创新工程重大项目(KZCX1-YW-12); 国家863资助项目(2006AA09A109-2)

作者简介: 徐振华(1980-),男,山东青岛人,博士研究生,主要从事海洋环境数值模拟和内波动力学研究,电话: 0532-82898931, E-mail: xuzhenhua@qdio.ac.cn; 尹宝树,通信作者, E-mail: bsyin@qdio.ac.cn

过程。

1 热带风暴天鹰

2005年7月28日天鹰在南海东沙群岛西南约320 km处发展成为一个热带低气压,并向西北偏西推进(表1)。在7月29日天鹰增强为一个热带风暴,于29~30日穿过观测平台海域,在29日12时左右,

具有中心低压992 hPa和20 m/s表面风速的天鹰经过测站南部约80 km左右的海域,通过QuikSCAT/NCEP混合风场发现测站在天鹰过境过程中最高风速达到15 m/s,对测站的资料分析发现该海域对热带风暴天鹰有明显的响应。天鹰于7月30日5时25分在海南省琼海县长坡镇登陆,并于7月31日在越南北部沿岸登陆,翌日凌晨在老挝北部消散。

表1 天鹰位置及强度

Tab. 1 Locations and intensities of Washi

时间	天鹰位置	最低中心气压(hPa)	估计最高风速(m/s)
7月28日	12:00	18.5°N, 114.6°E	998
	18:00	18.7°N, 113.2°E	996
7月29日	00:00	18.6°N, 112.5°E	996
	06:00	18.6°N, 112.0°E	996
	12:00	18.6°N, 111.7°E	992
	18:00	18.8°N, 111.3°E	988
	7月30日	00:00	19.4°N, 110.2°E
7月30日	06:00	19.5°N, 109.3°E	988
	12:00	19.5°N, 108.3°E	984
	18:00	19.8°N, 107.9°E	984
7月31日	00:00	19.8°N, 107.0°E	984
	06:00	20.3°N, 106.0°E	988
	12:00	20.4°N, 104.4°E	992
	18:00	20.5°N, 103.2°E	996

2 观测和数据

南海文昌内波实验的测站位于南海西北部海南岛以东,水深120 m左右的大陆架海域(19°35' N, 112°E),见图1,图中黑色实线表示等深线,单位为m。海流观测装置采用的是声学多普勒剖面仪

(ADCP), 取样间隔为10 min, 采样区间为14~116 m, 垂向采样间隔为2 m。温度观测使用的仪器是24个温度传感器和5个温盐传感器, 取样间隔为1 min, 采样区间为4~75 m, 在跃层附近加密观测, 垂向间隔为1~2 m。本文采用的数据从7月22日00:00到8月10日24:00。

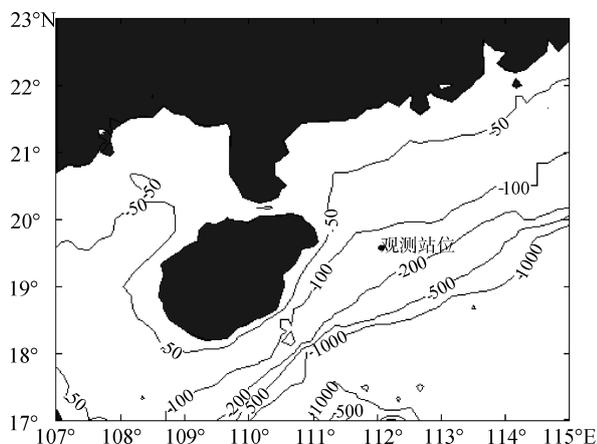


图1 南海西北部地形图

Fig. 1 Topography of the northwestern South China Sea

3 结果与分析

3.1 海洋混合层的响应

台风引发的强混合将直接影响当地的海水层化状况。2005年7月22日~8月10日的温度梯度分布见图2。在29日之前,海水上混合层的深度为10 m左右,在20~30 m水深之间海水存在较强的温度梯度,最强温跃层梯度超过0.3°C/m。在29日之后,海水上混合层加深到30 m左右,其中最强烈温跃层分布在40~50 m之间。而从8月4日开始,该海域出现了一个双跃层的现象,但是在15~30 m之间,混合层的梯度较小,低于0.1°C/m,这明显是由于天鹰引起的强剪切流导致的。

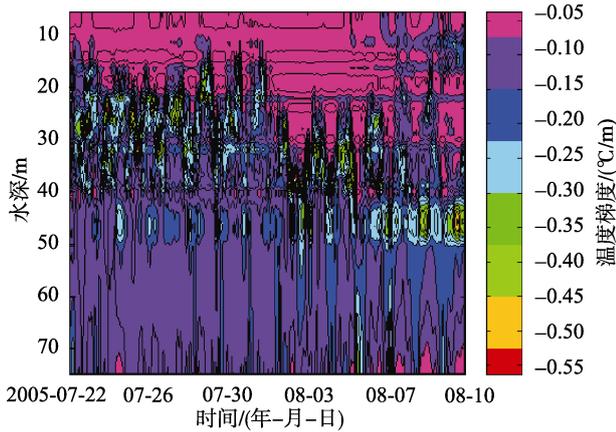


图 2 2005 年 7 月 22 日~8 月 10 日的温度梯度图

Fig. 2 Temperature gradients from 22 July to 10 August

3.2 不同水层温度的响应

为了滤除潮流的影响,对温度观测数据作了一天的平滑处理,用处理后的数据绘制出温度时间序列图,如图 3 所示,可以清晰地看出,在 7 月 29~30 日,热带风暴天鹰经过前后,观测站水温发生明显的变化。29 日之前,各层海水都有一个明显的升温过程,8 m 以上水层,水温一致保持在 30 左右,而 20 m 以浅的上混合层水温也都在 29 以上(图 4)。25~75 m 水层,水温在 20~28 之间。从 29 日开始,天鹰开始影响到观测海域,8 m 水层的水温下降达 2

左右。而 8 m 以下各水层也都有明显的降温过程,但是除了降温幅度低于 8 m 层之外,降温开始的时间也随着深度的增加而延后,并且次表层(40 m)和深层(75 m)海水都表现出了明显的近惯性振荡的信号,这说明台风具有极强的混合降温作用,台风引起的抽吸和夹卷作用是温度下降的主要原因,并且惯性振荡在垂直方向上具有逐渐向下传播的特征。总体上来看,8 m 层表层海水在热带风暴天鹰的作用下产生了一个降温 and 回温的过程,在 7 月 31 日

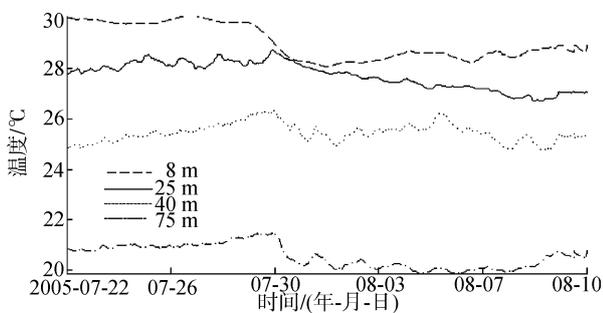


图 3 不同水深处温度的时间序列图

Fig. 3 Temperature series from 22 July to 10 August

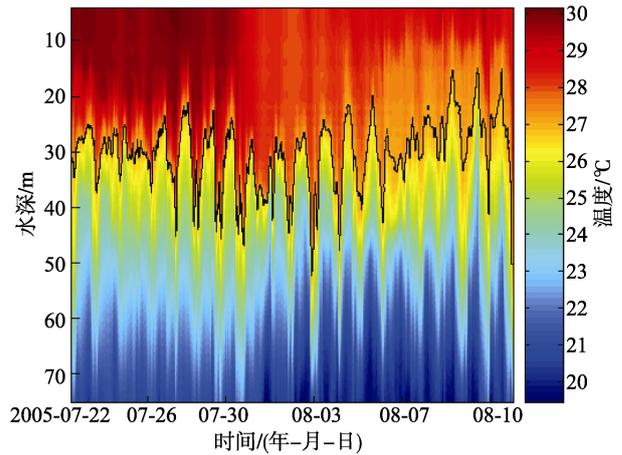


图 4 温度等温线的时间序列图

Fig. 4 Temperature isotherms from 22 July to 10 August

水温迅速下降至最低温度,最大降温幅度超过 2°C,然后温度开始逐渐回升,但是至 8 月 10 日,表层温度仍比台风作用前的表层温度低 1°C 左右。而表层以下水层的温度在天鹰过后一直是降温的过程。

由图 4 可以看出,在台风前后,观测点的内波都是活跃的。在 29 日之前,内波以全日内潮为主,与观测站其他时段内相似^[10],其最大振幅在 20 m 左右。在陆架海域通常内潮强盛,惯性内波较弱,此与深水大洋的情况不同。当台风天鹰过境时,情况发生变化,惯性内波的能量超过内潮,因为风场的强迫作用是生成惯性内波的主要机制^[11]。该海域惯性内波频率为 30 h 左右,且最大振幅可达 30 m。

3.3 海流的响应

图 5 给出了观测站位从 7 月 22 日至 8 月 10 日,各水层东西向流速和南北向流速的时间变化序列。可以看出,在天鹰到达之前,流速较小,流速的剪切也较弱。但是从 29 日开始,受到台风引起的强混合的影响,流速开始表现出近惯性的波动,随着深度的加深,流速减弱,最大流速出现在上混合层,可达 0.8 m/s。从相位上看,混合层内流速与深层流速方向反向。剪切层在 40~50 m 之间,与作者通过观测温度分析的最强温跃层的位置是一致的。对天鹰过境期间的表层流速作旋转谱分析(图 6),分析发现近惯性波动的频率为 8.1×10^{-6} Hz,略高于当地的惯性振荡频率 7.75×10^{-6} Hz,属于自由近惯性内波,并且以顺时针方向分量为主,这与 Brooks 等^[5]的研究结果是一致的。

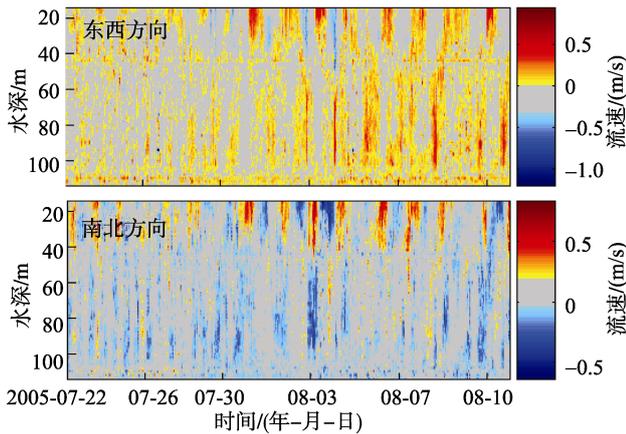


图5 2005年7月22日~8月10日的流速剖面图

Fig. 5 Profiles of current series from 22 July to 10 August

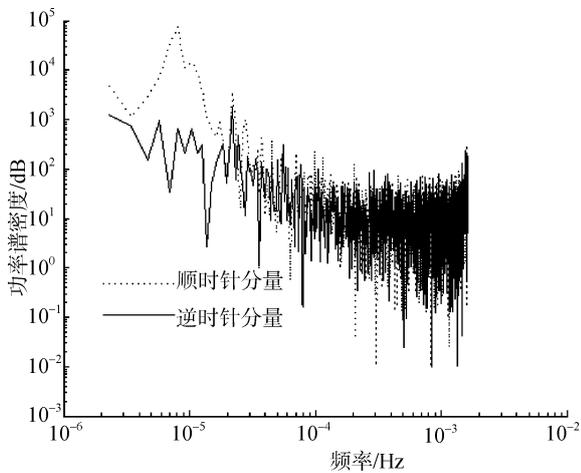


图6 2005年7月22日~8月10日的表层海流旋转谱分布图

Fig. 6 Rotary spectra of surface current speed

上述分析说明了测站观测海流中存在着显著的惯性振荡信号,为更清晰地研究近惯性运动过程,对各层流速观测资料进行滤波得到近惯性波段(30~40 h)的流速值,图7为带通滤波后得到的流速剖面分布图。可以看出,东西方向和南北方向流速信号相当,从7月29日开始,受热带风暴天鹰的影响,近惯性运动的信号逐渐出现且加强。表层最先出现近惯性波动的信号,并且上混合层的近惯性波动明显要强于海水深层,这表明近惯性运动是受天鹰带来的强风引起的,并且是从海面往深海处传播的。近惯性运动的流速值在8月3日左右达到最大值,约为0.3 m/s,这一段时间在40~50 m强温跃层上下位置存在明显的流向剪切,由上述分析,这明显是由近惯性内波引起的,该过程持续近10 d,然后慢慢消减,与Price等^[7]的研究结果也是基本一致的。

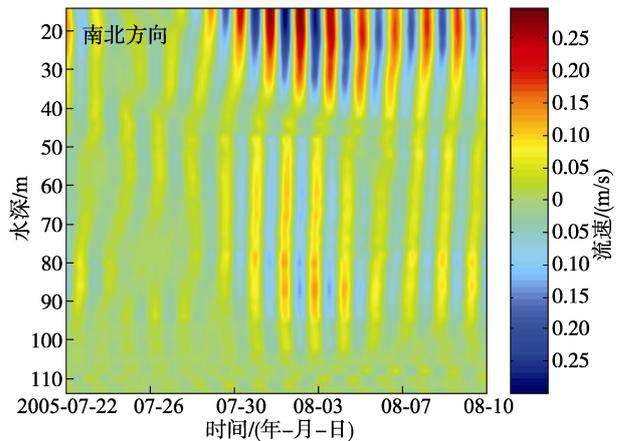
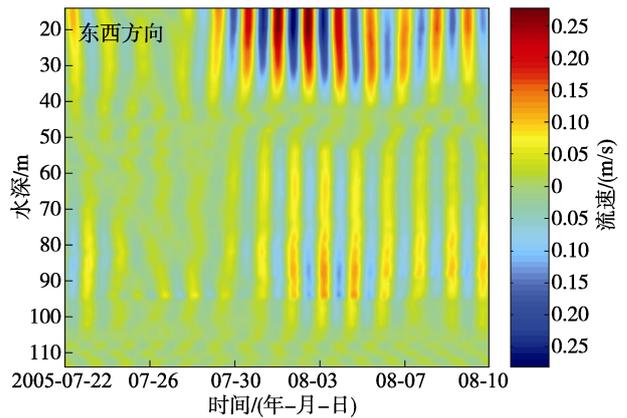


图7 2005年7月22日~8月10日的近惯性波动流速剖面图

Fig. 7 Profiles of inertial current series from 22 July to 10 August

4 小结

根据布放在南海西北部大陆架海域的锚系测站的观测资料分析该海域对热带风暴天鹰的响应过程,得到以下结论:(1)热带风暴引发的强混合将直接影响当地的海水层化状况,强风应力引起强烈的垂向混合作用,使海表面温度下降 2°C ,混合层加深20 m,而8 m以下各水层也都有明显的降温过程,但降温幅度低于8 m层,降温开始的时间也从随着深度的增加而延后,并且此表层和深层海水都表现出了明显的近惯性振荡的信号。(2)在7月29日之前,内波以全日内潮为主,与观测站位其他时段内相似,其最大振幅在20 m左右。当台风经过时,情况发生变化,惯性内波的能量超过内潮,因为风场的强迫作用是生成惯性内波的主要机制。该海域惯性内波周期为30 h左右,且最大振幅可达30 m。(3)海流也表现出近惯性的波动,并且从海面往深海处传播,随着深度的加深,流速减弱,最大流速出现在上混合

层, 可达 0.8 m/s。混合层内流速与深层流速方向反向, 剪切层在 40 ~50 m 之间, 近惯性波动的频率为 8.1×10^{-6} Hz, 略高于当地的惯性振荡频率 7.75×10^{-6} Hz, 属于自由近惯性内波, 并且以顺时针方向分量为

参考文献:

- [1] Price J F, Mooers C, Leer J. Observation and simulation of storm-induced mixed-layer deepening[J]. *J Phys Oceanogr*, 1978, 8: 582-599.
- [2] Price J F. Upper ocean response to a hurricane[J]. *J Phys Oceanogr*, 1981, 11: 153-175.
- [3] Hearn C J, Holloway P E. A three-dimensional barotropic model of the response of the Australian North west shelf to tropical cyclones[J]. *J Phys Oceanogr*, 1990, 20: 60-80.
- [4] Price J F, Sanford T B, Forristall G Z. Forced stage response to a moving hurricane[J]. *J Phys Oceanogr*, 1994, 24: 233-260.
- [5] Brooks D A. The wake of Hurricane Allen in the western Gulf of Mexico[J]. *J Phys Oceanogr*, 1983, 13: 117-129.
- [6] Shay L K, Elsberry R L. Near-inertial ocean current response to a Hurricane Frederic[J]. *J Phys Oceanogr*, 1987, 17: 1249-1269.
- [7] Price J F. Internal wave wake of a moving storm. Part I: scales, energy budget and observations[J]. *J Phys Oceanogr*, 1983, 13: 949-965.
- [8] Church J A, Foyce T M, Price J F. Current and density observations across the wake of Hurricane Gay[J]. *J Phys Oceanogr*, 1989, 19: 259-265.
- [9] 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.
- [10] Xu Zhenhua, Yin Baoshu, Hou Yijun, *et al.* A study of internal solitary waves observed on the continental shelf in the northwestern South China Sea[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2010, 29(3): 18-25.
- [11] 范植松. 海洋内部混合研究基础[M]. 北京: 海洋出版社, 2002. 130.

Response of the interior water column over the northwestern South China Sea during Washi

XU Zhen-hua^{1,2,3}, YIN Bao-shu^{1,2}, HOU Yi-jun^{1,2}

(1. Institute of Oceanology, the Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China; 2. Key Laboratory of Ocean Circulation and Waves, the Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China; 3. Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Received: May., 26, 2009

Key words: the South China Sea; tropical cyclone; near-inertial wave; internal wave

Abstract: In July 2005, tropical storm Washi, which originated from the southwest of Dongsha Island in the South China Sea, moved towards northwest by west, intensified into a tropical storm on July 29, and finally landed on the Hainan Island on July 30. A mooring buoy deployed over the northwest shelf of the South China Sea recorded the response of temperature and current during this period. The results revealed strong vertical mixing induced by strong wind force, making the sea surface temperature decreased by 2°C and depth of mixed layer deepened by 30 m. The layer below 8 m also displayed apparent cooling phenomenon, with less decreasing amplitude. The beginning of the cooling feature lagged with the increase of the depth. After the passage of Washi, the motions of internal waves were dominated by inertial oscillations, with the frequency around 8.1×10^{-6} Hz, which was higher than the local inertial frequency (7.75×10^{-6} Hz). Band-filtered currents indicated that inertial oscillation propagated from the sea surface to the deep layer and lasted about 10 days. This study offers more understanding about response of ocean to typhoons in the South China Sea and can provide scientific basis for ocean engineering.

(本文编辑: 刘珊珊)