

# 基于 HYCOM 再分析数据的浙江近海 对台风“灿鸿”(2015)的响应研究\*

潘云鹤<sup>1</sup> 陆诗铭<sup>1</sup> 曹安州<sup>1</sup> 范鲁腾<sup>2</sup> 李培良<sup>1</sup> 刘兴传<sup>3</sup>

(1. 浙江大学海洋学院 舟山 316021; 2. 舟山市科技交流与创业服务中心 舟山 316012;

3. 中国海洋大学海洋与大气学院 青岛 266100)

**摘要** 基于混合坐标海洋模型(Hybrid coordinate ocean model, HYCOM)再分析数据研究浙江近海对 2015 年第 9 号台风“灿鸿”的动力学和热力学响应,并利用卫星遥感的海表面温度(sea surface temperature, SST)数据验证了 HYCOM 再分析数据的合理性。结果显示,“灿鸿”在浙江近海引起了较强的近惯性运动,最大流速约为 0.4 m/s。台风“灿鸿”引起的近惯性能量在 300 m 以深海域较强,其衰减的 e 折时间尺度约为 4—12 d。“灿鸿”所引起的 SST 变化约-3—-1 °C,降温过程持续约 7 d;同时近岸海底引起了增温,最大温度变化幅度为 10 °C 左右,持续时间也约为 7 d(浙江近岸)。经过分析,本文认为近岸海底的增温是由台风引起的次级环流和台风引起的强混合共同导致的。

**关键词** 浙江近海; HYCOM 再分析数据; 海表面温度数据; 台风“灿鸿”; 动力学响应; 热力学响应; 近惯性波

中图分类号 P731 doi: 10.11693/hyhz20210400100

作为一种强大且深厚的天气系统,台风在经过海面时会对海洋产生强烈的动力和热力影响。在动力方面,台风通过海气界面的动量交换,在短时间内将大量的能量输入到海洋,激发强烈的近惯性波和湍流混合。该过程可分为“强迫阶段”和“松弛阶段”(管守德, 2014): 在“强迫阶段”,台风的风应力较强,局地的停留时间大约为半天到一天,会激发出较强的流场(Shay *et al.*, 1998; Sanford *et al.*, 1987, 2007, 2011),其中主要是近惯性流;“松弛阶段”是指台风经过之后引起的近惯性波(Geisler, 1970; Gill, 1984)向海洋深层传播(Brooks, 1983; Shay *et al.*, 1987; D'Asaro, 1995a, b)。在热力方面,台风影响海洋的一个显著特征是海表面温度(sea surface temperature, SST)的下降。台风经过导致 SST 冷却的三个主要过程:湍流混合、平流(主要是上升流)和海气热交换。观测和数值研究都表明,近 75%—90%的台风引起的 SST 冷却归因于混合层底部

的湍流混合,将地下冷水带到海面(Guan *et al.*, 2021)。

上层海洋对热带气旋的响应研究始于 20 世纪 60 年代。前人主要是通过走航式的海洋调查和浮标资料进行研究分析(Jordan, 1964; Wright, 1969; Fedorov *et al.*, 1979),或者利用海洋数值模式对上层海洋的动力学和热力学响应特性进行分析研究(Price, 1981, 1983; Greatbatch, 1983; Bender *et al.*, 1993)。近年来,随着海洋观测技术的进步和观测手段的日益增加,卫星遥感、APEX 型剖面浮标、深海潜标、投弃式温盐深仪(airborne expendable conductivity temperature depth, AXCTD)、飞机投放的抛弃式温度测量仪(airborne expendable bathy thermograph, AXBT)、水下滑翔机等仪器,逐步应用于上层海洋对台风的响应观测中,极大的促进我们对上层海洋响应的进一步研究(Black *et al.*, 1988; Shay *et al.*, 1992, 1998; Price *et al.*, 1994; D'Asaro *et al.*, 1995; D'Asaro, 2003; Jaimes *et al.*, 2009;

\* 国家重点研发计划, 2019YFD0901305 号; 浙江省自然科学基金项目, LY21D060005 号; 舟山市-浙江大学联合项目, 2019C81060 号。潘云鹤, 硕士研究生, E-mail: 18716037312@163.com

通信作者: 曹安州, 讲师, E-mail: caoanzhou@zju.edu.cn

收稿日期: 2021-04-20, 收修改稿日期: 2021-07-11

Guan *et al.*, 2021)。虽然上述观测手段可以从多个侧面加深我们关于海洋对台风响应的认识,但如果要在台风期间获得大片海域的观测资料,仍然存在着风险大、难度大、成本高的问题。而数值模式的发展则为我们全面系统地研究海洋对台风的响应提供了可能(Bender *et al.*, 1993)。Cao 等(2021)利用混合坐标海洋模型(Hybrid coordinate ocean model, HYCOM)再分析数据,分析了南海北部海域对台风鲑鱼的动力学响应,并与现场观测结果进行了对比。结果表明 HYCOM 再分析数据能够合理地刻画海洋对台风的响应过程。Li 等(2019)也利用 HYCOM 再分析数据研究了台风近惯性风应力与南海近惯性能量的相关性。然而,在台风影响期间,该海域的实测数据相对较少,在一定程度上限制了我们关于浙江近海对台风响应的认识和研究。因此,本文将基于 HYCOM 的再分析数据研究浙江近海对台风“灿鸿”的动力学和热力学响应,以期加深对该问题的初步认识。本文第一节介

绍了 HYCOM 再分析数据及其相应的数据分析方法,第二节分析了浙江近海对台风“灿鸿”的动力学和热力学响应,第三节对结果进行了总结。

## 1 数据和方法

### 1.1 台风“灿鸿”

“灿鸿”是 2015 年西北太平洋第 9 号台风,其东西和南北方向的螺旋云带覆盖范围直径 1 500—2 000 km 左右;台风核心区的直径有 1 000 km(中国气象局, [http://www.cma.gov.cn/2011xwzx/2011xqxxw/2011xqxyw/201507/t20150710\\_287606.html](http://www.cma.gov.cn/2011xwzx/2011xqxxw/2011xqxyw/201507/t20150710_287606.html)),于 11 日 16 时 40 分左右在浙江舟山市朱家尖镇沿海登陆,登陆时中心附近最大风力有 14 级(45 m/s),成为 1949 年以来 7 月登陆浙江的最强台风;12 日 23 时 50 分在朝鲜再次登陆。台风“灿鸿”在浙江近海的路径如图 1 所示,其信息来源于中国气象局热带气旋资料中心([http://tcdata.typhoon.org.cn/zjljsjj\\_zlhq.html](http://tcdata.typhoon.org.cn/zjljsjj_zlhq.html))。

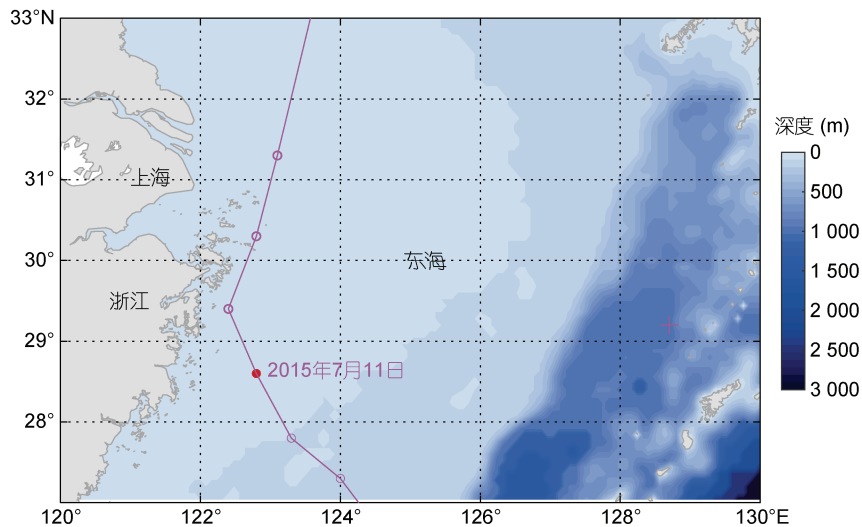


图 1 浙江近海水深及台风“灿鸿”的路径

Fig. 1 The water depth (in m; see the color bar) and the path of typhoon Chan-hom (the magenta line)

注: 品红色曲线: 台风路径; 空心圆点: 台风中心每隔 6 h 的位置; 实心圆点: 2015 年 7 月 11 日 0 时台风中心的位置; 品红色十字: 采样点位置(29.2°N, 128.7°E)

### 1.2 HYCOM 模式和数据下载

本文基于 HYCOM 再分析数据对浙江近海对台风“灿鸿”的响应开展研究。HYCOM 数值模式是一个全球海洋环流模式,它的最大特点是采用由等深坐标( $z$ -level)、sigma 坐标(terrain-following coordinate)和等密度坐标(isopycnic coordinate)相结合的垂向混合坐标,即在开阔的海域采用等密度坐标,在近岸海域采用 sigma 坐标,而在混合层和层结不稳定的海域

采用等深坐标。它的另一个特点是模式嵌入了多种湍流混合模块以供选择。近年来,该模式被广泛地用于大洋和区域海洋的研究。

为了研究浙江近海对于台风“灿鸿”的响应,本文下载了 HYCOM 再分析数据(版本号: expt\_53.X)在 27°—30°N 和 120°—130°E 海域的海水流速和温度数据,时间范围是 2015 年 7 月 1—31 日,空间分辨率为 1/12.5°,时间分辨率均为 3 h。具体数据的下载地址为:

https://www.hycom.org/dataserver/gofs-3pt1/reanalysis。需要说明的是, 该版本(expt\_53.X)的 HYCOM 再分析数据不包含潮汐强迫。

### 1.3 SST 数据

此外, 我们还下载了台风“灿鸿”期间浙江近海的 SST 遥感数据, 用于 HYCOM 再分析数据的对照。卫星遥感 SST 数据的时间范围是 2015 年 7 月 1 日至 7 月 31 日, 空间分辨率为  $1/4^\circ$ , 时间分辨率为 1 d, 具体数据下载地址为: http://www.remss.com。

### 1.4 数据分析方法

为了确定 HYCOM 再分析数据抓住了浙江近海对台风“灿鸿”的响应, 我们首先对 HYCOM 再分析数据在 2015 年 7 月(29.2°N, 128.7°E)处的流速进行功率谱分析。基于谱分析的结果, 本文采用 4 阶 Butterworth 带通滤波器对全场的流速进行滤波处理以提取近惯性信号。其中, 带通滤波频率为  $0.79f-1.05f$ , ( $f$  为局地科氏频率)。为了估计近惯性波的强度, 我们对近惯性波的能量  $E$  进行计算:

$$E = \frac{1}{2} \rho (u^2 + v^2), \quad (1)$$

其中,  $\rho$  为海水密度, 本文取为  $1024 \text{ kg/m}^3$ ,  $u$  和  $v$  为东西和南北方向的近惯性流速。在此基础上, 我们还计算了深度积分的近惯性能量, 并基于此计算了近惯性波衰减的  $e$  折时间尺度, 即深度积分的近惯性能量从最大峰值衰减至其  $1/e$  所用的时间。

由于 HYCOM 模式不提供垂向速度, 为了估计海水的垂向速度, 我们利用不可压缩流体连续性方程进行计算水平辐散。不可压缩流体连续性方程为

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0, \quad (2)$$

转换后,

$$\frac{\partial w}{\partial z} = -\left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y}\right), \quad (3)$$

其中,  $u$ 、 $v$  和  $w$  分别为东西向、南北向、垂向的运动速度, 单位是  $\text{m/s}$ 。我们假设海底的  $w$  为 0, 所以可以根据水平辐散的垂向变化近似推算垂向速度的方向进而判断上升流和下降流的出现。

## 2 结果与分析

### 2.1 浙江近海对台风“灿鸿”的动力学响应

台风在通常情况下都具有较强的风应力, 会引起海气界面强烈的动量交换, 从而向上层海洋输送能量, 形成较强的近惯性波, 如 Sanford 等(2011)发现了大西洋飓风 Frances 所引起的近惯性波的流速振幅在  $1.6 \text{ m/s}$  以上。

图 2a 和 2c 展示了(29.2°N, 128.7°E)处台风过境前后的原始流速图。在台风经过之前, 东海上层海洋背景场流速较平缓, 流速振幅约为  $0.5 \text{ m/s}$  以下; 在台风“灿鸿”过境期后, 上层海洋流速逐渐增强并出现明显的波动信号, 在 7 月 15 日左右, 流速振幅约为  $0.6-1 \text{ m/s}$ 。

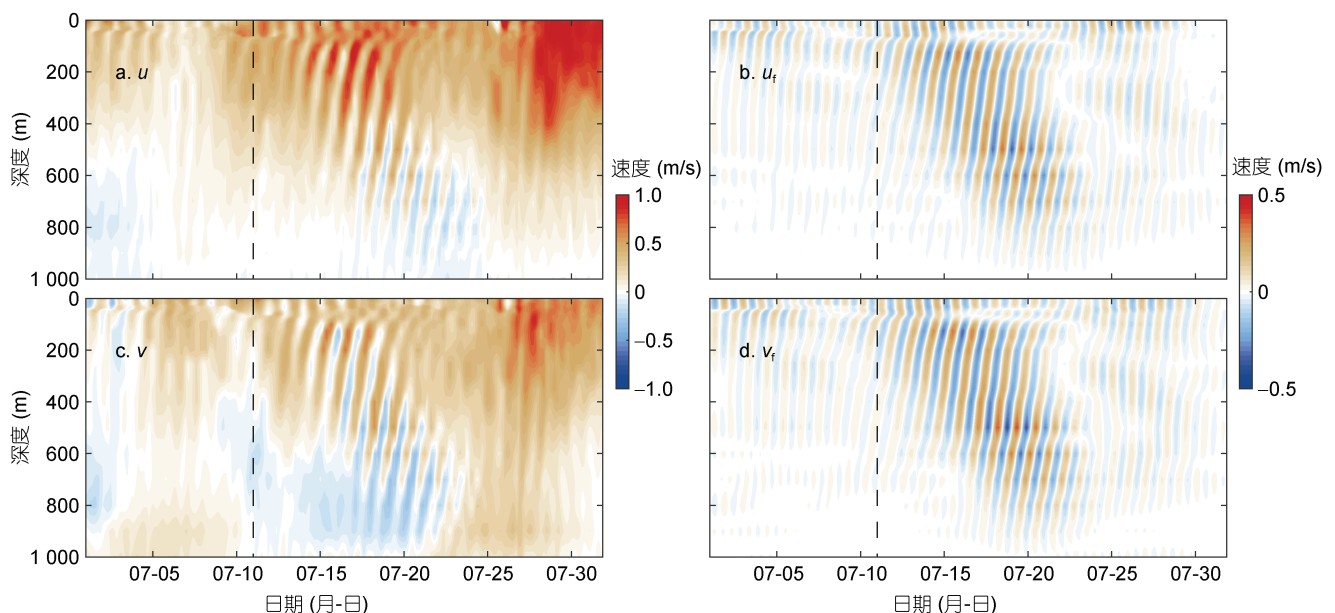


图 2 基于 HYCOM 结果的速度方向为  $u$  和  $v$  的原始流速图(a, c)和带通滤波后的  $u$  和  $v$  ( $u_f$  和  $v_f$ )的流速深度图(b, d)

Fig.2 Original velocity plots (a, c) of  $u$  and  $v$  based on HYCOM results and depth plots (b, d) of  $u$  and  $v$  after bandpass filtering

注: 黑色虚线为台风“灿鸿”登陆时刻, 2015 年 7 月 11 日

为了确定图 2a 和 2c 中的波动信号为近惯性波, 本文对所取的点(29.2°N, 128.7°E)的原始流速进行功率谱分析, 图 3 展示的是该点处深度平均的结果。在该点处, 近惯性频率和全日潮频率相近, 但是我们采用的数据是 HYCOM 再分析数据(版本号: expt\_53.X), 其数据里没有潮汐强迫的结果, 所以功率谱全日频段附近为近惯性能量产生的谱峰应为近惯性运动引起的, 这表明台风“灿鸿”过境引起较强的近惯性运动。于是我们使用带通滤波器提取上层海洋近惯性频带的流速。近惯性流速的滤波频带为  $0.79f-1.05f$ , 滤波频带也在图 3 中相应阴影部分标出, 滤波频带的选取标准是既能最大限度地提取该频带的流速, 又能

避免临近频带其他信号的污染。

如图 2b 和 2d 所示, 7 月 11 日, 台风“灿鸿”在(29.2°N, 128.7°E)处引发近惯性波, 并逐渐增大, 在 7 月 19 日左右近惯性流速达到最大, 流速约为 0.4 m/s。此外, 台风“灿鸿”激发的近惯性流速的相位具有明显的上传趋势, 则表示其垂向群速度的方向朝下, 向海水深处继续传播, 当传播到水深 600 m 附近, 7 月 18 日开始近惯性能量有增强的反应, 并一直传播到水下 900 m 左右。通过对单点(29.2°N, 128.7°E)的分析, 我们可以知道台风“灿鸿”引起了较强烈的近惯性波, 接下来我们对整片海域进行分析来观察台风“灿鸿”引起的近惯性波的传播和持续时间。

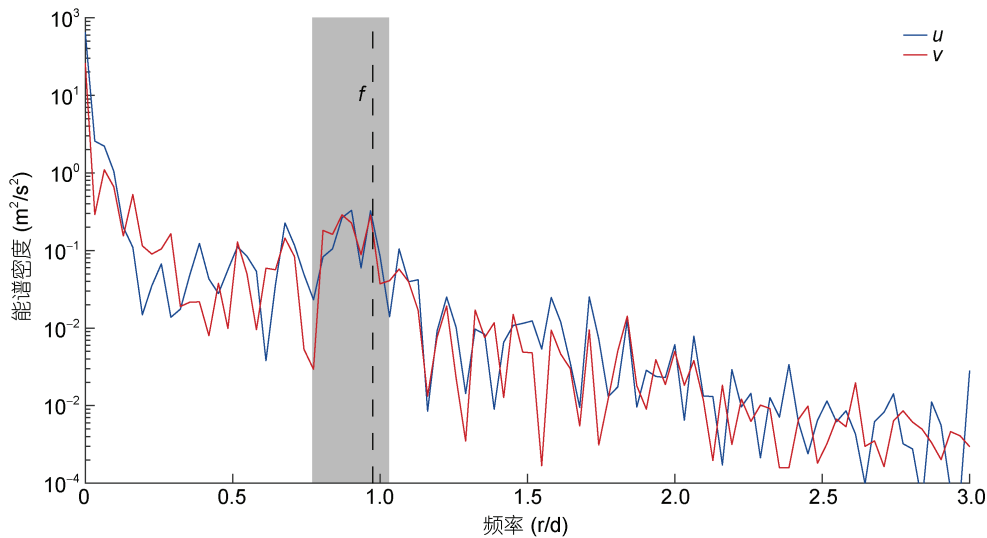


图 3 流速方向为  $u$  和  $v$  的深度平均功率谱

Fig.3 Average depth power spectrum of flow velocity direction  $u$  and  $v$

注: 虚线为近惯性频率  $f$ , 阴影部分为近惯性滤波频带

图 4 展示的是 7 月 8 日至 22 日每隔 2 d 的 0 时的浙江近海深度积分的近惯性能量。从图中可以看出, 7 月 10 日, 在台风“灿鸿”进入这片海域之前, “灿鸿”引起的近惯性能量已经进入这片海域。7 月 12 日, 台风“灿鸿”已经离开这片海域, 但是近惯性能量却在不断增加, 近惯性能量最大可达  $25 \text{ kJ/m}^2$ , 一直到 7 月 22 日左右才逐渐消散。此外, 台风“灿鸿”引起的近惯性能量在 300 m 以深海域较强。

近惯性能量的衰减是台风引起的近惯性波的一个重要特征。为了研究台风“灿鸿”引起的近惯性能量的衰减过程, 本文对其所引起的近惯性能量衰减的  $e$  折尺度进行了研究, 结果如图 5 所示。我们选取这片海域中近惯性能量大于  $5 \text{ kJ/m}^2$  的区域进行  $e$  折尺度

的绘制, 台风“灿鸿”引起的近惯性能量衰减的  $e$  折尺度较多为 4 d 内, 最高可达 12 d 左右。 $e$  折尺度较大的地方主要分布在 300 m 以深的地方。

由图 4 可知, 台风灿鸿所引起的近惯性能量在 300 m 以深的海域较强, 于是我们选取  $28^\circ\text{N}$  断面对近惯性能量进行观察分析, 时间范围为 7 月 8 日 0 时到 7 月 19 日 0 时, 如图 6 所示, 台风灿鸿在未进入这片海域之前, 已经引起了上层海洋的近惯性能量, 在 7 月 11—13 日, 表层能量最大, 从 11 日开始有向下传播的趋势, 一直到 15 日, 表层近惯性能量几乎全部传播进入深度为 800 m 左右的海洋。台风灿鸿所引起的近惯性能量没有向 200 m 以浅的地方进行传播, 而是向更深的海域进行传播, 直至耗散。

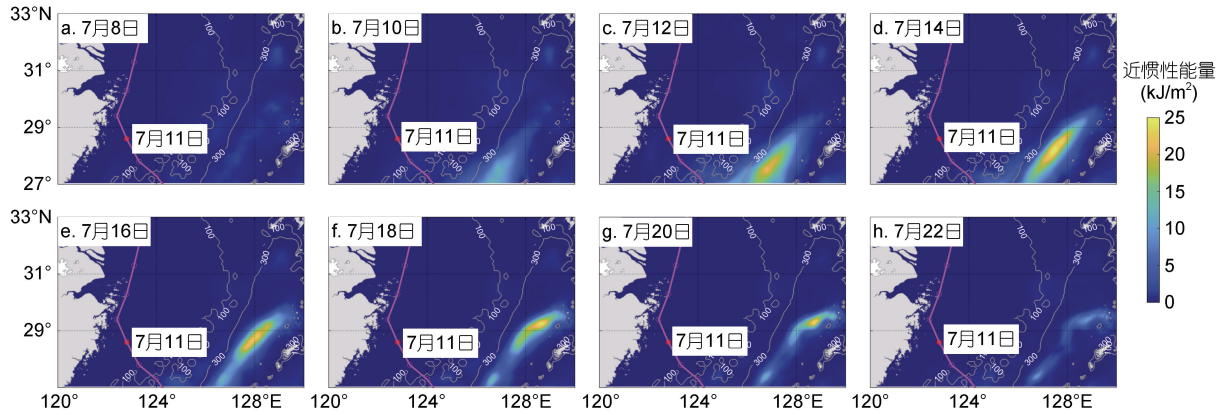


图 4 台风“灿鸿”所引起的近惯性能量图

Fig.4 The near-inertial energy caused by typhoon Chan-hom  
注: 品红色的线为台风轨迹; 白色实线分别为 100 和 300 m 的等深线

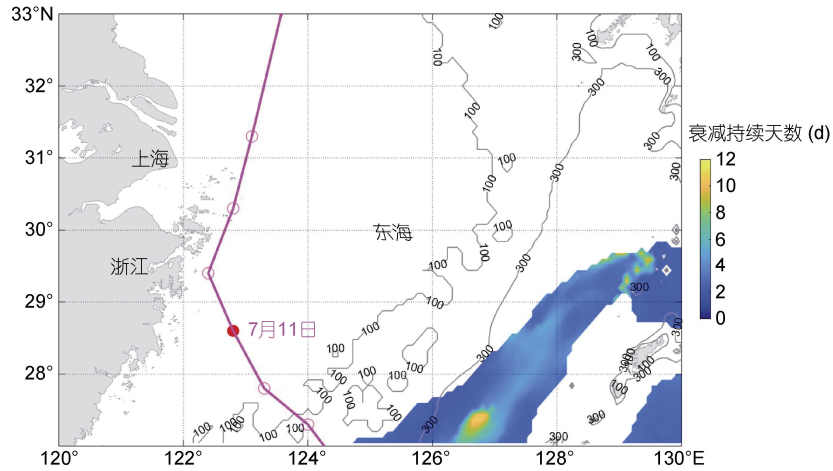


图 5 近惯性能量衰减的 e 折尺度图

Fig.5 The e-fold scale diagram of near-inertial energy attenuation  
注: 灰色曲线为等深线

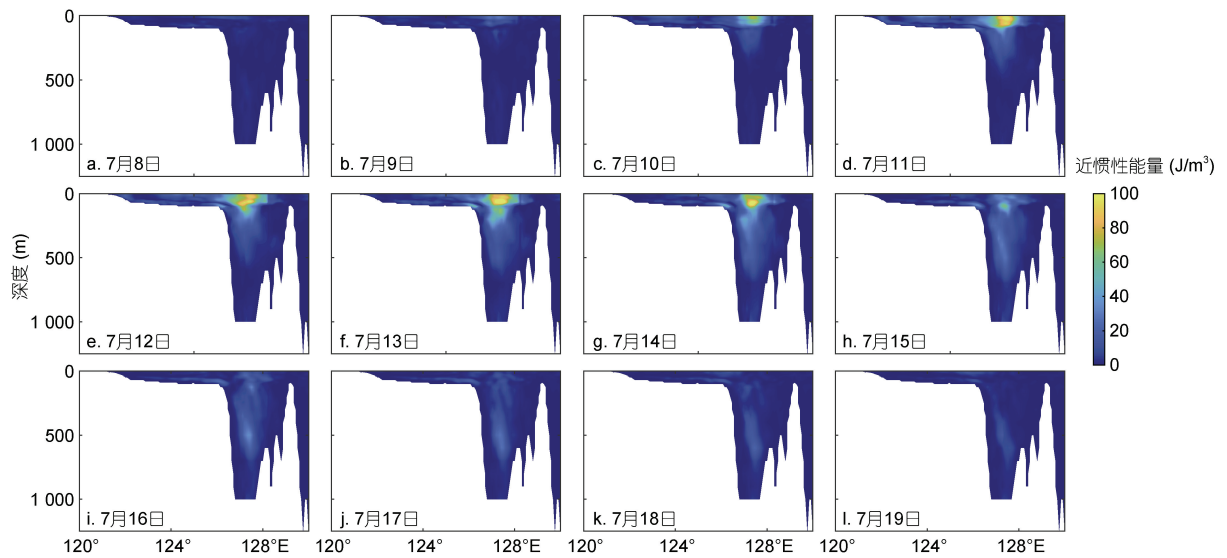


图 6 在 28°N 近惯性能量传播的纵剖面图

Fig.6 Longitudinal profile of near-inertial energy propagation at 28°N

## 2.2 浙江近海对台风“灿鸿”的热力学响应

海洋对台风不仅存在动力学响应,也存在热力学响应(Yang *et al.*, 2017),本文首先对台风“灿鸿”所引起的海表面降温进行分析。图7显示了7月8—19日的浙江近海的 SST 的演变的过程。在台风“灿鸿”进入这片海域之前,浙江附近海域的 30°N 以南具有较高的 SST, SST 最大值约为 30°C, 30°N 以北的 SST 较低, SST 最小值约为 20°C 左右, 自南向北呈现温度

降低的趋势。7月10日,当台风“灿鸿”进入这片海域时,引起了 SST 的下降,可以较明显地看出在 124°—128°E、27°—29°N 的区域和 124°—126°E、31°—33°N 的区域出现明显的温度下降,温度变化范围约-3—-1°C。7月14日左右,浙江近海的 SST 逐渐恢复,至7月17日浙江近海 SST 已与台风“灿鸿”过境前相似。实际上,本次台风“灿鸿”带来的 SST 的降低只持续了 7 d 左右。

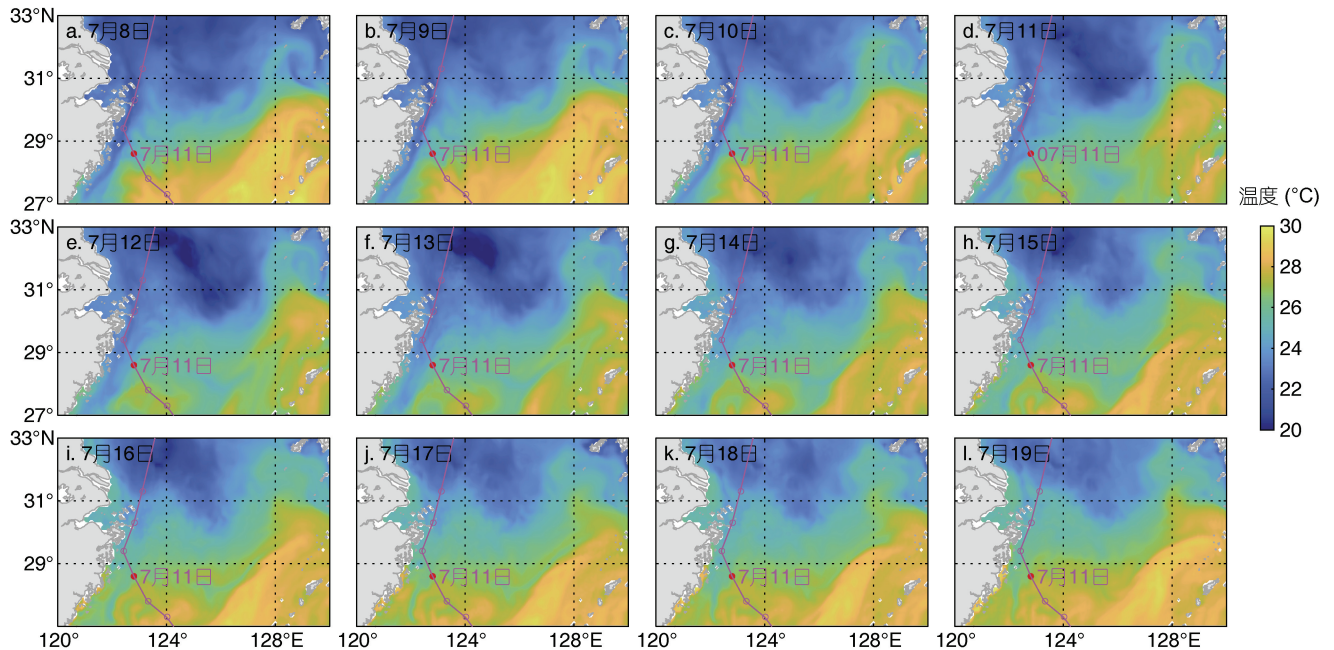


图7 浙江近海的海表温度图

Fig.7 SST over the coastal area of Zhejiang

图8显示了7月8—19日的浙江近海的海底温度的演变的过程。本文取 HYCOM 温度数据中海底最底层的数据进行作图。在台风“灿鸿”进入这片海域之前,浙江附近海域的海底温度与海水深度有关,海水深度较浅的地方海底温度普遍较高,为 20°C 以上,某些近岸区域温度几乎达到 25°C 以上,而深海区域的海底温度则为 10°C 以下。7月10日台风“灿鸿”进入该海域,引起了部分区域海底温度的上升,尤其是浙江和上海沿岸的区域,存在较明显的温度上升趋势。同 SST 变化类似,7月14日左右,浙江近海的海底温度逐渐恢复,至7月17日浙江近海 SST 已与台风“灿鸿”过境前相似。实际上,本次台风“灿鸿”带来的海底温度的升高只持续了 7 d 左右。

由于从图7和图8中不能看出海表海底温度的精确变化,本文取每个网格点的最高温度和最低温度的差绘制了海表最大降温和海底最大升温的图,如

图9所示。从图9a可以看出,海洋表层最大温度变化为-3°C左右。如图9b所示,台风“灿鸿”过境后引起的浙江和上海沿岸的海底温度提高,浙江沿岸最大温度变化为 10°C,上海沿岸则为 3—5°C 左右, Yang 等(2017)在长江以北地区也发现台风过境引起的海洋底层温度升高。本文对每日的海底温度与7月8日0时的温度做差以观察每日的温度变化,如图10所示。7月11日开始浙江沿岸的海底升温明显,温度变化达到 7°C 左右,7月12日和13日升温达到最大,温度变化在 10°C 左右,7月14日海底温度开始呈现下降趋势,温度逐渐降低。在 29°—32°N 和 122°—126°E 海域的海底温度则从7月11日开始一直升高,并持续到19日,温度变化在 5°C 左右。

为了进一步验证 HYCOM 再分析数据分析结果的合理性,我们利用 SST 数据绘制了海表最大降温图,并将其与利用 HYCOM 再分析数据绘制的最大

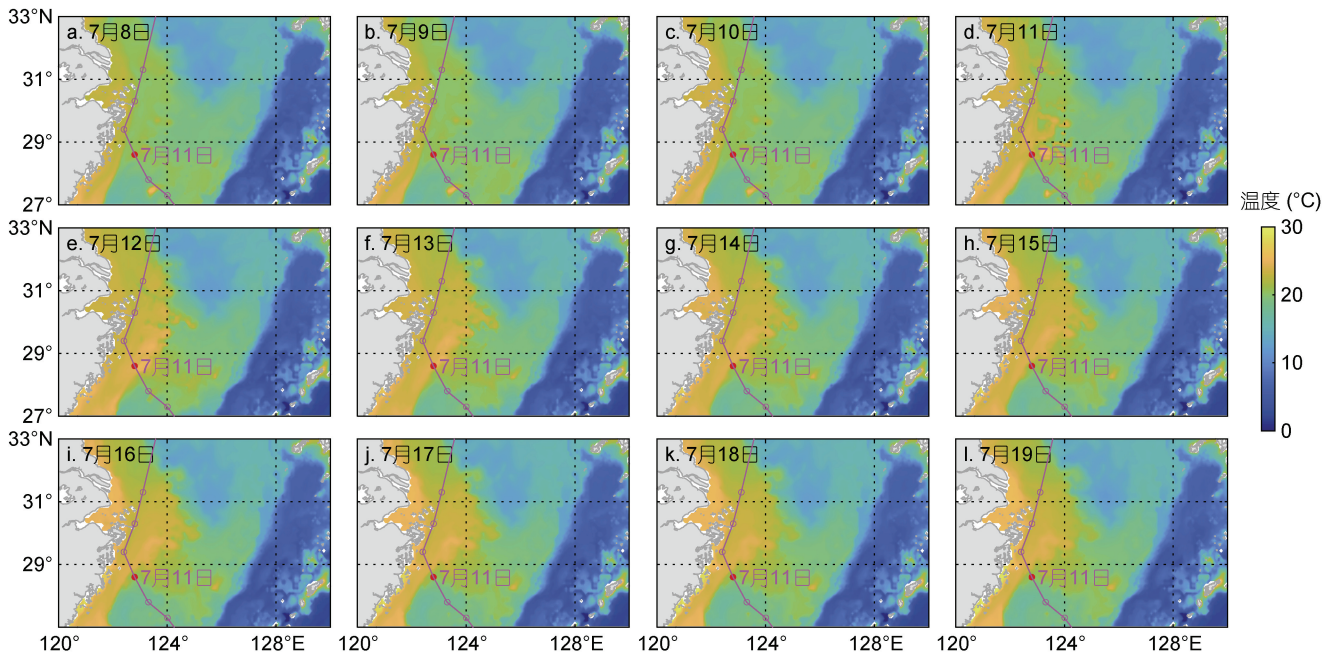


图 8 浙江近海的海底温度图

Fig.8 Seabed temperature distribution of Zhejiang offshore

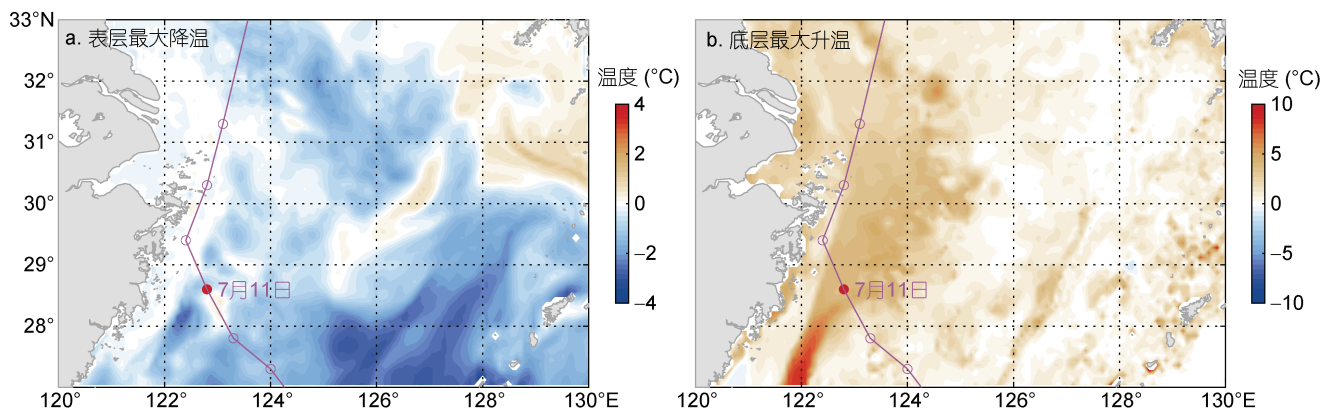


图 9 浙江近海海洋表层每天 0 时的温度与 7 月 7 日 0 时刻做差的最大降温(a)以及海洋底层每天 0 时的温度与 7 月 7 日 0 时刻作差最大升温(b)图

Fig.9 The maximum temperature drop of the surface (a) layer and the maximum temperature rise (b) of the bottom layer at 0 o'clock every day and the difference between 0 o'clock on July 7, in offshor of Zhejiang

海表降温图进行对比,如图 11 所示。从整体上看,两者的空间分布具有一定的一致性。计算得到的海表最大降温的空间分布也具有一定的一致性。

### 2.3 台风“灿鸿”引起的浅水区域海底增温现象的机制探讨

本文取海底增温较大的点(28°N, 122°E)并利用不可压缩流体连续性方程对其进行水平辐散的计算,如图 12 所示。本文发现 7 月 10 日开始其水平辐散为正,几乎一直持续到 20 日左右,25 日存在更大的水平辐散,

25 日及其以后与本次研究无关,故不进行探讨。根据不可压缩流体连续性方程,可以推导得出 7 月 10 日开始,  $\partial w/\partial z$  为负数,由于海底的垂向速度为 0,可以得出 7 月 10 日此点的垂向速度向下。我们可以推导得出 7 月 10 日至 7 月 20 日左右此点存在一个下降流。

以同样的方式对点(28°N, 123.1°E)处的水平辐散进行估算,如图 13 所示。同理推导发现台风路径下的点(28°N, 123.1°E)在 7 月 11 日左右出现较强的上升流,且一直持续到 25 日左右。

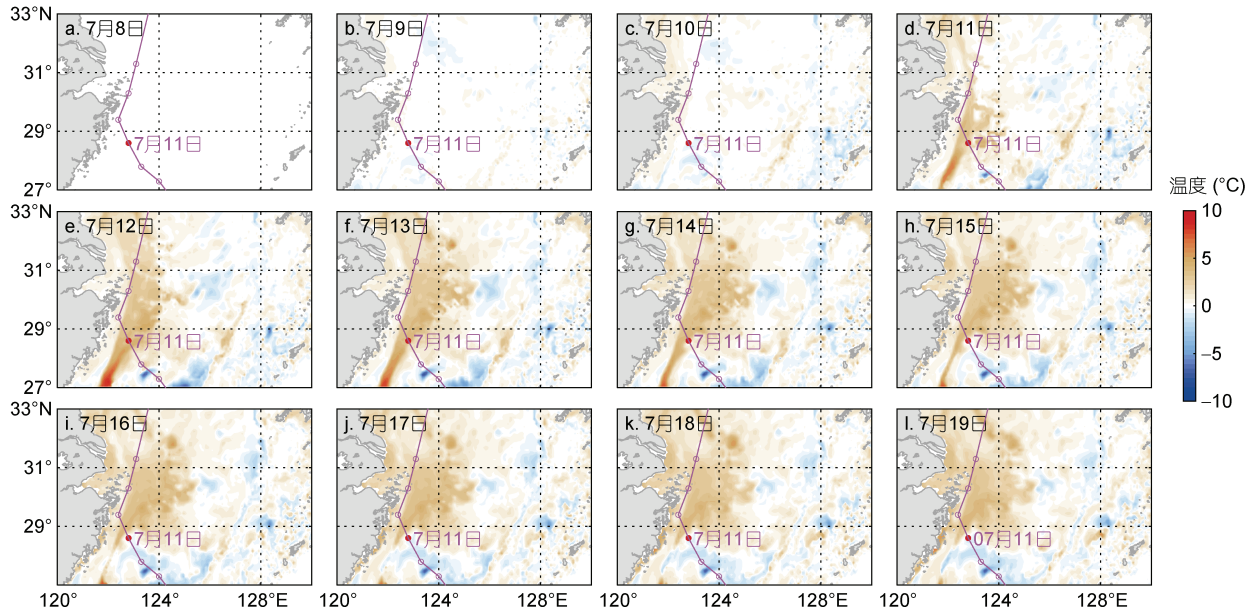


图 10 浙江近海海底每日 0 时刻温度与 7 月 8 日 0 时刻对比的温度变化图

Fig.10 Comparison in daily temperature change at sea bottom at 0 o'clock everyday with that at 0 o'clock on July 8 of Zhejiang offshore

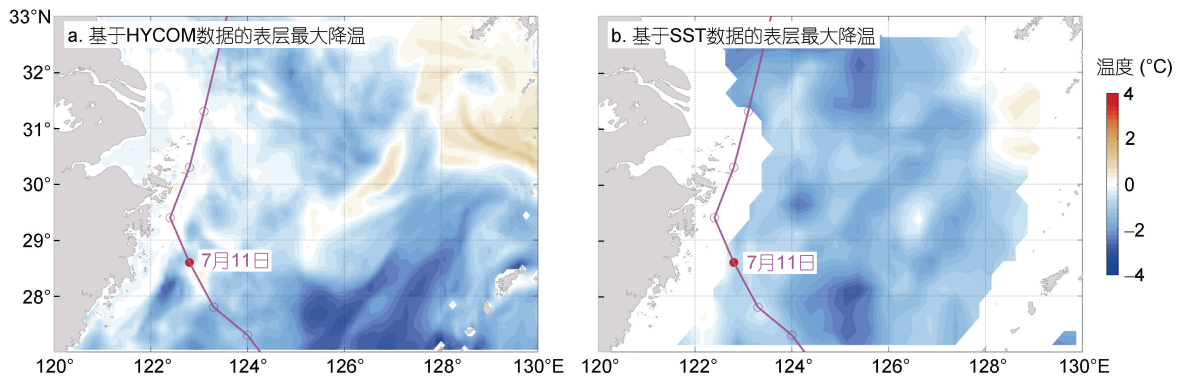


图 11 基于 HYCOM 数据和 SST 再分析数据的海表最大温差图

Fig.11 The maximum difference in SST temperature based on SST data and HYCOM reanalysis data

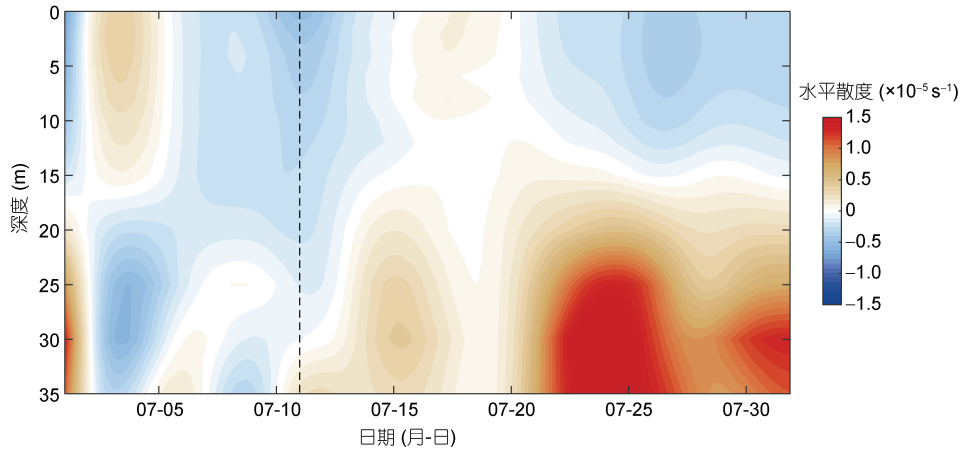


图 12 点(28°N, 122°E)水平辐散图

Fig.12 Horizontal divergence at points (28°N, 122°E)

注: 黑色虚线为 7 月 11 日台风“灿鸿”登陆点的水下垂直延伸线



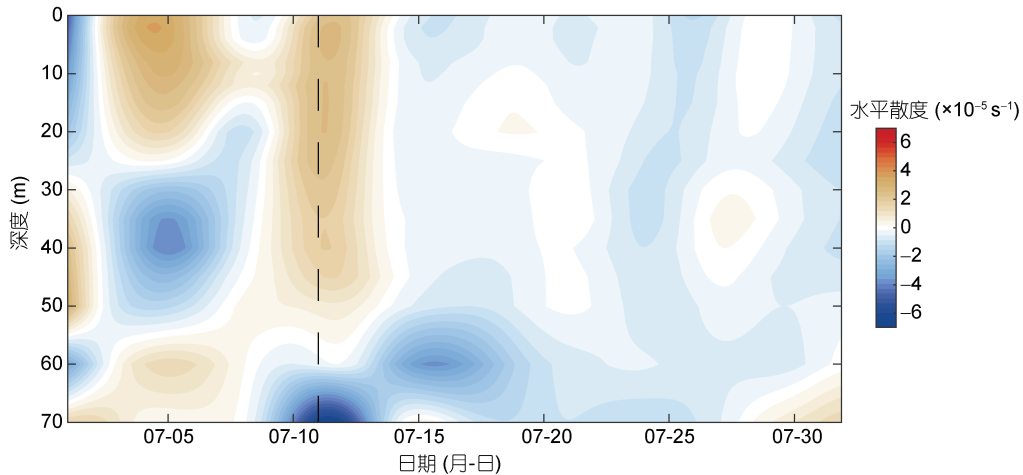


图 13 点(28°N, 123.1°E)处的水平辐散

Fig.13 Horizontal divergence at points (28°N, 123.1°E)  
注: 黑色虚线为 7 月 11 日台风“灿鸿”登陆点水下垂直延伸线

基于上述分析结果, 我们认为台风过程引起的海洋上层的次级环流是造成浅海区域海底增温的一个可能原因, 该过程的示意图如图 14 所示。根据 Ekman 理论, 台风经过时会引发 Ekman 抽吸, 从而在台风路径下方引起上升流; 该上升流会在海洋上层引起次级环流, 在远离台风路径的位置激发下降流, 进而将海洋表层温度较高的海水往下带。在近岸区域, 水深较浅, 该下降流可直达海底, 进而引起近岸区域海底的海水增温; 而在深水区域, 受下降流强度的影响, 无法将 SST 较高的海水带到海底, 也就无法引起深水区域海底的海水增温。

造成浅海区域海底增温的另一个可能原因是台

风引起的上层海洋混合。台风会在上层海洋引起强烈的混合, 由于海洋表层的温度比海洋底层的温度高, 所以强烈的混合会导致表层的海水温度下降和底层海水的温度上升, 该过程可以持续几天到十几天 (Guan *et al.*, 2021)。

### 3 结论

本文利用 HYCOM 再分析数据, 分析了浙江近海的海域(27°—33°N、120°—130°E)对台风“灿鸿”的动力学和热力学响应。经初步研究得到如下结论:

- (1) 台风“灿鸿”所引起的近惯性能量在 300 m 以深海域较强。

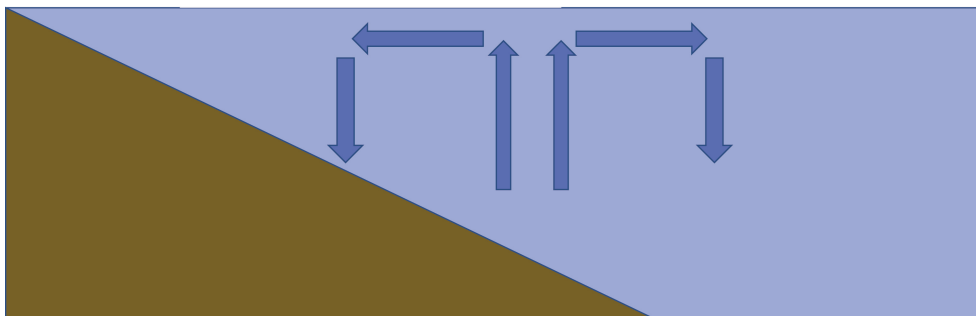


图 14 台风过境引起的次级环流示意图

Fig.14 Diagram of secondary circulation of seabed momentum and typhoon-induced heat exchange

(2) 台风“灿鸿”在浙江近海所引起的近惯性震荡并没有向浅海进行传播,而是直接向下,向深海进行传播,一直传播到深度为 800 m 左右。

(3) 台风“灿鸿”引起的近惯性能量衰减的  $e$  折尺度较多为 4 d 内,最高可达 12 d 左右, $e$  折尺度较大区域主要集中于 300 m 深海域。

(4) 台风“灿鸿”引起浙江近海的海洋表层降温,温度变化幅度约  $-3 \sim -1$  °C,同时引起近岸海底温度上升,最大温度变化幅度为 10 °C 左右(浙江近岸)。根据 Ekman 理论,台风经过引发 Ekman 抽吸引起台风路径下方的上升流,上升流在海洋上层引发次级环流,在远离台风路径的地方引起下降流,将表层温度较高的海水带到海底引起增温;此外,台风“灿鸿”在海洋上层引起的混合也是导致浙江近海浅水区域海底增温的一个重要原因。

### 参 考 文 献

- 管守德, 2014. 南海北部近惯性振荡研究. 青岛: 中国海洋大学博士学位论文, 27—44
- Bender M A, Ginis I, Kurihara Y, 1993. Numerical simulations of tropical cyclone-ocean interaction with a high-resolution coupled model. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 98(D12): 23245—23263
- Black P G, Elsberry R L, Shay L K *et al*, 1988. Atmospheric boundary layer and oceanic mixed layer observations in hurricane Josephine obtained from air-deployed drifting buoys and research aircraft. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 5(6): 683—698
- Brooks D A, 1983. The wake of hurricane Allen in the western Gulf of Mexico. *Journal of Physical Oceanography*, 13(1): 117—129
- Cao A Z, Guo Z, Song J B *et al*, 2018. Near-inertial waves and their underlying mechanisms based on the South China Sea internal wave experiment (2010-2011). *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 123(7): 5026—5040
- Cao A Z, Guo Z, Pan Y H *et al*, 2021. Near-inertial waves induced by typhoon Megi (2010) in the South China Sea. *Journal of Marine Science and Engineering*, 9(4): 440
- D'Asaro E A, 1995a. Upper-ocean inertial currents forced by a strong storm. Part II: modeling. *Journal of Physical Oceanography*, 25(11): 2937—2952
- D'Asaro E A, 1995b. Upper-ocean inertial currents forced by a strong storm. Part III: interaction of inertial currents and mesoscale eddies. *Journal of Physical Oceanography*, 25(11): 2953—2958
- D'Asaro E A, 2003. The ocean boundary layer below hurricane Dennis. *Journal of Physical Oceanography*, 33(3): 561—579
- D'Asaro E A, Eriksen C C, Levine M D *et al*, 1995. Upper-ocean inertial currents forced by a strong storm. Part I: data and comparisons with linear theory. *Journal of Physical Oceanography*, 25(11): 2909—2936
- Fedorov K N, Varfolomeev A A, Ginzburg A I *et al*, 1979. Thermal-reaction of the ocean on the passage of the hurricane Ella. *Okeanologiya*, 19: 992—1001
- Geisler J E, 1970. Linear theory of the response of a two layer ocean to a moving hurricane. *Geophysical Fluid Dynamics*, 1(1/2): 249—272
- Gill A E, 1984. On the behavior of internal waves in the wakes of storms. *Journal of Physical Oceanography*, 14(1): 1129—1151
- Greatbatch R J, 1983. On the response of the ocean to a moving storm: the nonlinear dynamics. *Journal of Physical Oceanography*, 13(3): 357—367
- Guan S D, Zhao W, Sun L *et al*, 2021. Tropical cyclone-induced sea surface cooling over the Yellow Sea and Bohai Sea in the 2019 Pacific typhoon season. *Journal of Marine Systems*, 217: 103509
- Jaimes B, Shay L K, 2009. Mixed layer cooling in mesoscale oceanic eddies during hurricanes Katrina and Rita. *Monthly Weather Review*, 137(12): 4188—4207
- Jordan C L, 1964. On the influence of tropical cyclones on the sea surface temperature. In: *Proc. Symp. Tropical Meteorology*. Wellington: New Zealand Meteorological, 614—622
- Li J, Xu J X, Liu J L *et al*, 2019. Correlation of near-inertial wind stress in typhoon and typhoon-induced oceanic near-inertial kinetic energy in the upper South China Sea. *Atmosphere*, 10(7): 388
- Price J F, 1981. Upper ocean response to a hurricane. *Journal of Physical Oceanography*, 11(2): 153—175
- Price J F, 1983. Internal wave wake of a moving storm. Part I: scales, energy budget and observations. *Journal of Physical Oceanography*, 13(6): 949—965
- Price J F, Sanford T B, Forristall G Z, 1994. Forced stage response to a moving hurricane. *Journal of Physical Oceanography*, 24(2): 233—260
- Sanford T B, Black P G, Haustein J R *et al*, 1987. Ocean response to a hurricane. Part I: observation. *Journal of Physical Oceanography*, 17(11): 2065—2083
- Sanford T B, Price J F, Girtton J B *et al*, 2007. Highly resolved observations and simulations of the ocean response to a hurricane. *Geophysical Research Letters*, 34(13): L13604
- Sanford T B, Price J F, Girtton J B, 2011. Upper-ocean response to hurricane Frances (2004) observed by profiling EM-APEX floats. *Journal of Physical Oceanography*, 41(6): 1041—1056
- Shay L K, Elsberry R L, 1987. Near-inertial ocean current response to hurricane Frederic. *Journal of Physical Oceanography*, 17(8): 1249—1269
- Shay L K, Black P G, Mariano A J *et al*, 1992. Upper ocean response to hurricane Gilbert. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 97(C12): 20227—20248
- Shay L K, Mariano A J, Jacob S D *et al*, 1998. Mean and near-inertial ocean current response to hurricane Gilbert. *Journal of Physical Oceanography*, 28(5): 858—889
- Wright R, 1969. Temperature structure across the Kuroshio before and after Typhoon Shirley. *Tellus*, 21(3): 409—413
- Yang G B, Lü L G, Zhuang Z P *et al*, 2017. Cruise observation of shallow water response to typhoon Damrey 2012 in the Yellow Sea. *Continental Shelf Research*, 148: 1—8

## THE RESPONSE TO TYPHOON CHAN-HOM (2015) OFF ZHEJIANG BASED ON HYCOM RESULT

PAN Yun-He<sup>1</sup>, LU Shi-Ming<sup>1</sup>, CAO An-Zhou<sup>1</sup>, FAN Lu-Teng<sup>2</sup>, LI Pei-Liang<sup>1</sup>, LIU Xing-Chuan<sup>3</sup>

(1. *Ocean College, Zhejiang University, Zhoushan 316021, China*; 2. *Zhoushan Technology Exchange and Entrepreneurship Service Center, Zhoushan 316012, China*; 3. *College of Oceanic and Atmospheric Sciences, Ocean University of China, Qingdao 266100, China*)

**Abstract** Based on the HYCOM reanalysis data, dynamical and thermodynamical responses to typhoon Chan-hom (2015) off Zhejiang, China was studied. The sea surface temperature (SST) data from remote sensing systems were used to validate the HYCOM reanalysis data. Results show that Chan-hom caused strong near-inertial waves in Zhejiang offshore with the maximum velocity of 0.4 m/s. The near-inertial energy caused by Chan-hom was stronger in the regions of depth >300 m. The e-folding time of the near-inertial energy was 4—12 days. Chan-Hom also caused significant surface temperature cooling (−3 — −1 °C) and bottom temperature heating (maximum 10 °C), which lasted for approximate 7 days. Through analysis, we speculated that the bottom temperature heating was caused by the secondary circulation and mixing induced by typhoon Chan-Hom.

**Key words** Zhejiang offshore; Hycom reanalysis data; sea surface temperature; typhoon Chan-hom; dynamic response; thermodynamic response; near-inertial waves