

# 台风过境对黄海冷水团及其环流结构的影响\*

孙凡<sup>1,2,3</sup> 于非<sup>1,2,3,4,5</sup> 司广成<sup>1,2,3</sup> 王建丰<sup>1,2,3</sup> 唐瑛<sup>1,2,3</sup>

(1. 中国科学院海洋研究所 青岛 266071; 2. 中国科学院大学 北京 100049; 3. 中国科学院 海洋环境与波动重点实验室 青岛 266071; 4. 中国科学院大科学研究中心 青岛 266071; 5. 青岛海洋科学与技术试点国家实验室 海洋动力过程与气候功能实验室 青岛 266237)

**摘要** 台风能够对黄海的水文结构及人民群众的生产生活产生重要的影响, 严重威胁了人们的生命财产安全。利用 ROMS(regional ocean modeling system)模式, 分析了台风“灿鸿”在过境黄海期间对黄海温度及环流结构的影响过程。结果表明, 台风期间强烈的风致混合能够使温跃层的深度增大, 强度减弱, 同时, 使得近岸的底层温度迅速升高, 推动底层的温度锋面向黄海内区移动。台风过境也会对黄海冷水团环流产生重要的影响, 台风过境前, 混合层中的北向流会迅速加深增强, 同时伴随着混合层及温跃层的下移, 从而使得黄海冷水团环流的流核下移至跃层以下。当台风过境时, 黄海上空的气旋式风场会加剧黄海上层的气旋式环流, 导致黄海冷水团环流的流幅及流量迅速增加。当台风登陆后, 黄海上层的温度及黄海冷水团环流的结构开始逐渐恢复。

**关键词** 台风; 黄海; 温跃层; 锋面; 黄海冷水团环流

**中图分类号** P731 **doi:** 10.11693/hyhz20210200056

黄海是位于西北太平洋的半封闭边缘海(图 1), 平均水深 44 m, 最大水深超过 100 m, 其西北部与渤海相接, 南部与东海相连, 东岸及北岸分别为朝鲜半岛与辽东半岛, 西岸为山东半岛及苏北浅滩, 特殊的地理位置使得黄海受季风的影响十分显著。

冬季, 在西北季风的影响下, 海表的强混和及冷却作用使得黄海整层水体混合均匀, 同时, 北风驱使黄海及朝鲜沿岸流向南流动, 由此在黄海中部产生向北的补偿流, 即黄海暖流(Isobe, 2008; Lin *et al.*, 2011; Tak *et al.*, 2016)。黄海暖流携带高温高盐水沿黄海海槽西侧向黄海入侵, 对黄海的温盐分布及生态环境具有重要的影响。春季, 温跃层逐渐形成, 至夏季温跃层强度达到最强, 温跃层的存在阻止了上层热量的下传, 使得冬季的冷水在跃层以下得以保留(赫崇本等, 1959), 由此在黄海底层形成了海盆尺度的低温高盐水体, 即黄海冷水团, 此为黄海夏季最典

型的水文现象之一。

伴随着黄海冷水团, 在夏季黄海上层存在着海盆尺度的气旋式环流, 即黄海冷水团环流, 其对黄海上层的物质及能量运输具有重要的作用。Beardsley 等(1992)利用漂流浮标观测到了夏季黄海上层的气旋式环流, 流速为 2—6 cm/s; Yanagi 等(1993)发现夏季黄海上层及中层为气旋式环流, 底层为反气旋式环流; Xia 等(2006)基于三维数值模式提出了夏季黄海环流的三层结构, 即在表层(0—4 m)为南风主导的北向流, 上层(4—40 m)为海盆尺度的气旋式环流, 底层(40 m 以下)在黄海海槽附近存在微弱的南向流。Naimie 等(2001)利用数值模式发现黄海冷水团环流的流量约为  $0.2 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$ ; 此外, 最近的一些研究发现在黄海上层的气旋式环流内部, 还存在着若干更小尺度的反气旋式环流(汤毓祥等, 2000; Tang *et al.*, 2004; Pang *et al.*, 2004)。

\* 国家重点研发计划项目, 2017YFC1403400 号; 国家重点研发计划项目, 2016YFC1402501 号; 国家自然科学基金项目, 41806164 号; 国家自然科学基金委员会-山东省人民政府联合资助海洋科学研究中心项目, U1406401 号。孙凡, 博士研究生, E-mail: sunfaniocas@163.com

通信作者: 于非, 研究员, E-mail: yuf@qdio.ac.cn

收稿日期: 2021-02-25, 收修改稿日期: 2021-04-08

前人对黄海冷水团环流的生成机制也做了大量的探讨,赵保仁(1987)发现黄海冷水团环流是沿锋面流动的地转流。Moon等(2009)提出潮汐强迫,特别是潮致余流对南黄海西侧环流的形成起到了重要作用。Naimie等(2001)指出黄海冷水团环流是对黄海冷水团的斜压响应;其中,斜压项,科式力项,海表面压强梯度等对环流的结构及强度具有重要的影响(Xing *et al.*, 2005),此外,表层锋面也会对环流的垂向结构产生重要影响(Davies *et al.*, 2006)。最新的研究表明,夏季的经向风速也会通过调整黄海的海表面高度进而影响黄海冷水团环流的强度。

近几年来,台风过程对黄海温盐结构的影响愈发引起人们的重视。作为西北太平洋的边缘海,在夏秋两季,部分台风在西北太平洋生成后经东海入侵至黄海,对黄海的水文结构及人们的生产生活产生重要的影响。当台风过境时,伴随着强烈的海气相互作用,台风将大量能量输入海洋,海洋上层的温盐结构遭到破坏,强烈的垂向混合使得温跃层明显加深(Yang *et al.*, 2017),同时伴随着海洋上层叶绿素与溶解氧浓度的改变(Huang *et al.*, 2011)。

台风过境使得黄海海表面温度(sea surface temperature, SST)迅速降低而底层温度迅速升高(Lee *et al.*, 2016; Li *et al.*, 2019; Yang *et al.*, 2019),其中,黄海中部 SST 的降温幅度大于近岸海区(Yang *et al.*, 2019)。Lee等(2016)发现台风 Muifa 过境时,黄海 SST 的最大降幅达到  $8^{\circ}\text{C}$ ,同时黄海底层的升温幅度达到  $4^{\circ}\text{C}$ ,在此期间,台风引起的海洋上层强烈的垂向混合是表层温度升高而底层温度降低的主要原因。冀承振等(2020)亦发现当台风“灿鸿”过境时,黄海 SST 明显下降,降温幅度在  $2\text{—}4^{\circ}\text{C}$  之间。

台风不仅能够改变黄海的温盐结构,也能对黄海的流场、海表面高度等产生重要的影响。台风能在近岸激发出 Kelvin 波沿陆架传播(Ding *et al.*, 2011)。Li等(2019)指出台风能在黄海上层激发出  $0.3\text{ m/s}$  的向岸流,同时在黄海底层形成离岸流,进而驱动黄海冷水团向黄海中部移动(Yang *et al.*, 2017)。Ding等(2011)发现在台风事件中,近岸的增水主要是由风场控制的,而大洋中海表面高度的变化主要受到气压场的影响。在台风“布拉万”期间,朝鲜半岛西岸的增水幅度最大超过  $160\text{ cm}$  (Kim等, 2014)。同时,受气旋式风场的影响,台风过境期间黄海的波浪及流场均呈现出旋转特性,但与台风的气旋式风场有一定延迟(杨静思等, 2013)。

近期的研究表明,台风还会对长江冲淡水的路径产生重要的影响,2012年,台风“达维”,“海葵”相继过境我国黄东海,期间持续的东风及东南风产生的 Ekman 流驱使长江冲淡水入侵至黄海中部(Oh *et al.*, 2014)。当台风过境后,强烈的北风驱动长江冲淡水向闽浙沿岸流动,使得闽浙沿岸海表面盐度明显降低,初级生产力明显提高(Zhang *et al.*, 2018)。

前人的工作主要集中在台风对黄海 SST 及黄海冷水团的影响,而对黄海冷水团环流的影响鲜有研究,本文在前人研究的基础上,结合观测资料及数值模式,对台风过境期间黄海的温度结构及黄海冷水团环流的响应过程做了初步的分析。

## 1 数据和方法

### 1.1 台风“灿鸿”

台风“灿鸿”是 2015 年在太平洋台风季生成的第 9 号台风,其于 6 月 25 日左右在西北太平洋海域生成,6 月 30 日升级为热带风暴,7 月 3 日升级为台风,其最大风速达到  $58\text{ m/s}$ ,中心最低气压达到  $925\text{ hPa}$ 。“灿鸿”生成后沿西北方向穿过西北太平洋入侵至东海,于 7 月 11 日 16:40 分许在浙江省舟山市朱家尖镇登陆,登陆时最大风力达到 14 级,随后转向北偏东方向于 7 月 12 日过境我国黄海南部海域,7 月 13 日,台风“灿鸿”在朝鲜西南部再次登陆,并减弱为热带低压。

台风过境期间的风场数据采用了欧洲中期天气预报中心(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF)的再分析资料 ECMWF Reanalysis-Interim(ERA-Interim),水平分辨率为  $0.25^{\circ}\times 0.25^{\circ}$ 。

### 1.2 观测数据

海温数据由 2015 年 8 月航次调查搭载的 SeaBird 911 温盐深仪(conductivity-temperature-depth, CTD)获得,测量精度  $0.001^{\circ}\text{C}$ ,CTD 站位基本沿纬向分布(如图 1b),除大连-成山头断面外,CTD 纬向站位间隔约为  $0.5^{\circ}$ ,经向站位间隔约为  $1^{\circ}$ ,CTD 所测原始海温数据按照标准程序进行了订正。

海流数据由位于黄海西部( $36^{\circ}\text{N}$ ,  $121.5^{\circ}\text{E}$ )的坐底式声学多普勒流速剖面仪(acoustic doppler current profiler, ADCP)获得(如图 1b),锚系所在水深  $44\text{ m}$ ,观测时间从 2015 年 4 月 8 日—2015 年 10 月 19 日,采样间隔为  $30\text{ min}$ ,垂向分辨率为  $2\text{ m}$ ,在此期间成功观测到台风“灿鸿”过境黄海前后流场的变化过程。

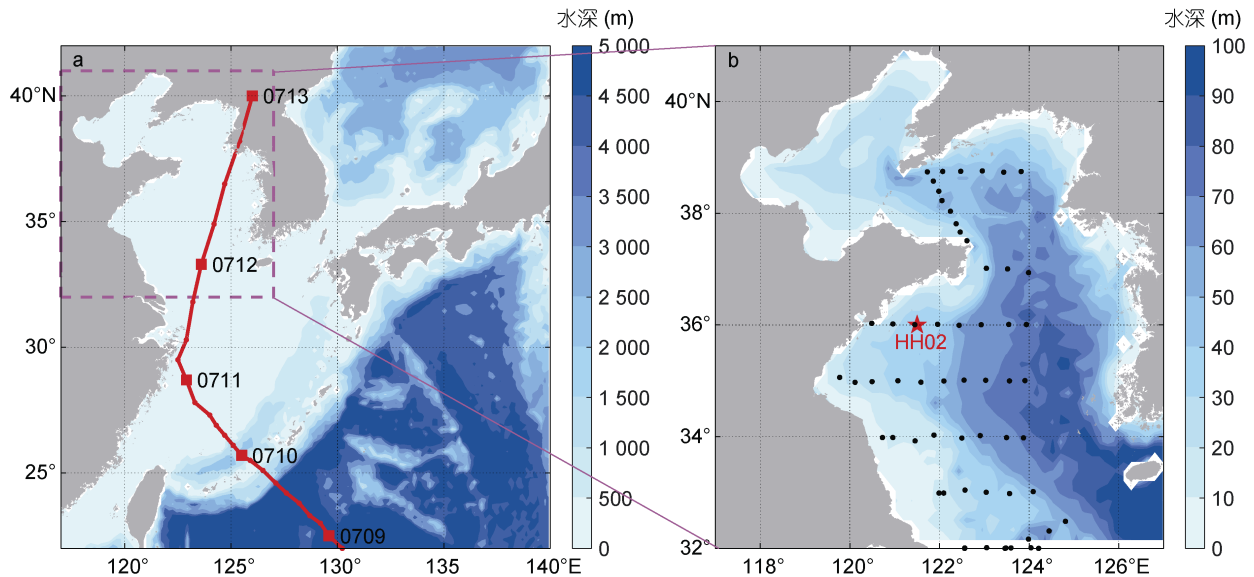


图 1 模式范围及台风路径(红色实线) (a)和坐底式 ADCP(acoustic doppler current profiler)站位(红色五角星)及 2015 年 8 月断面调查站位(黑色圆点) (b)

Fig.1 The model domain and typhoon track (red solid line) (a) and the location of the mooring station (red star) and the survey station (black dots) in August 2015 (b)

### 1.3 模式配置

为更好地研究台风过境期间黄海流场的响应过程, 本文采用 ROMS (Regional Ocean Modeling System) 模式, 模式计算区域为  $22^{\circ}$ — $42^{\circ}$ N,  $117^{\circ}$ — $140^{\circ}$ E (图 1a), 水平分辨率为  $1/18^{\circ} \times 1/18^{\circ}$ , 模式采用地形跟随的  $\sigma$  坐标系, 垂向分层 32 层。模式最小水深设为 10 m, 最大水深 5 000 m, 内模步长为 360 s, 外模步长 12 s。模式中垂向湍流黏性及扩散系数采用 Mellor-Yamada (Mellor *et al.*, 1982) 的参数化方案。

模式中 6 h 平均的风场、大气温度、短波辐射、长波辐射、大气压强、降水率、相对湿度等强迫场数据采用了 ECMWF 的再分析资料(ERA-interim), 日平均的 SST 数据采用了美国国家海洋和大气管理局 (National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA) 提供的 OISST v2.1 资料, 海表面盐度(sea surface salinity, SSS)采用 World Ocean Atlas 2013 (WOA13) 的气候态 SSS 资料, 以上资料的空间分辨率均为  $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ , 并在此基础上插值到模式格点中。模式中的净热通量、淡水通量由块体公式计算得到(Fairall *et al.*, 2003)。月平均的长江径流采用了长江大通站的实测资料(<http://www.cjw.gov.cn/>)。

开边界场的温度, 盐度, 流速, 水位采用 SODA3.4.1 (simple ocean data assimilation) 数据集的月平均数据, 模式边界场引入  $M_2$ ,  $S_2$ ,  $K_1$ ,  $O_1$  四个分

潮, 分潮的振幅, 迟角和潮流流速等信息由 TPX07 数据集获得。模式的计算时间范围为 2010 年 1 月 1 日—2015 年 12 月 31 日。

## 2 模式验证

利用 2015 年 8 月份的航次调查数据对模式结果进行验证, 图 2 为  $36^{\circ}$ N 断面的温度分布, 可以看出夏季黄海上层水体混合相对均匀, 最高温度超过  $26^{\circ}\text{C}$ 。在次表层, 温跃层将混合层中的高温水体与底层的低温水体分隔开来, 阻碍了混合层中热量的下传。在黄海底层存在着由前冬残留下来的低温水体, 即黄海冷水团, 其最低温度低于  $8^{\circ}\text{C}$ , 近岸的高温水体与黄海冷水团之间存在着强锋面结构, 其与温跃层共同形成了黄海冷水团的边界。

同时, 从黄海底层温度的分布(图 3)可以看出, 黄海冷水团占据了夏季黄海底层的大部分区域, 其最低温度低于  $8^{\circ}\text{C}$ 。翁学传等(1989)发现了黄海冷水团的三冷核结构, 分别位于北黄海, 南黄海东侧及南黄海西侧, 其中, 北黄海及南黄海东侧的冷核比黄海西侧的冷核温度更低且更稳定(于非等, 2006)。

通过与观测数据比较可以看出, 模式结果较好地体现了黄海夏季的温度分布特征, 但依然存在一些不足, 比如混合层的深度较浅, 青岛外海底层温偏低等, 这可能是由于 ROMS 对表层波致混合的模拟不足, 进而导致上述问题。

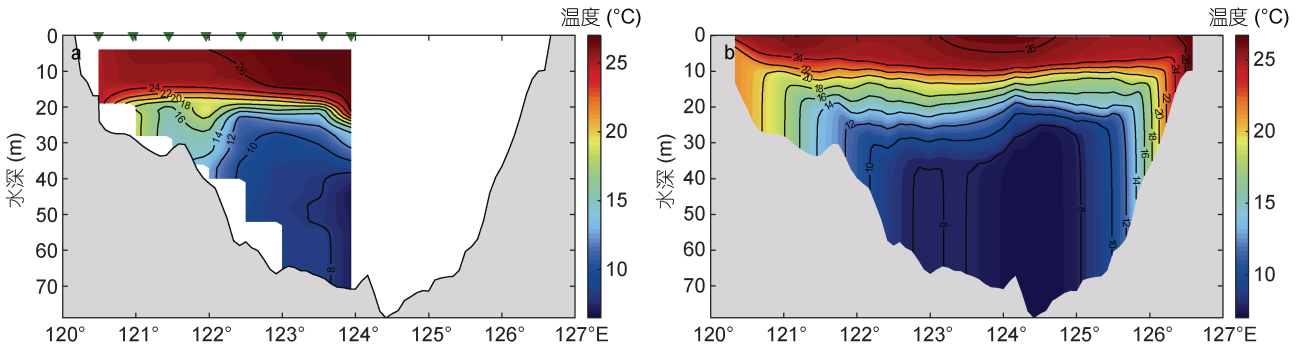


图2 2015年8月36°N断面(a)观测温度分布以及模式温度分布(b)

Fig.2 Temperature distributions of in situ observations (a) and model results along the 36°N section (b) in August 2015  
注: 空白处表示无观测数据

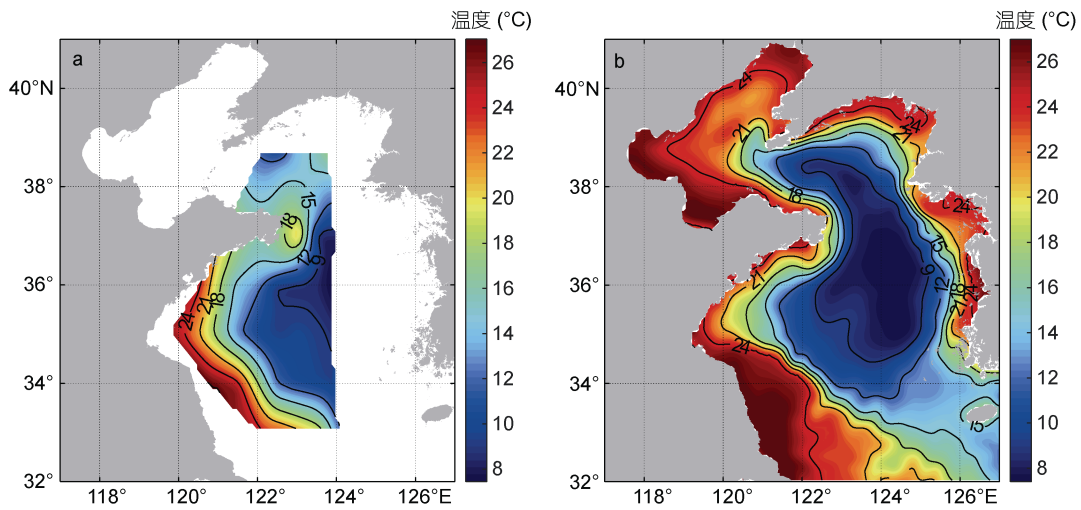


图3 2015年8月底层观测温度(a)以及底层模式温度(b)

Fig.3 Bottom temperature distribution of in situ observations (a) and model results (b) in August 2015  
注: 空白区域表示无观测数据

进一步地, 利用台风过境期间 HH02 站的剖面流速对模式流场进行进一步的验证(图 4—5), 可以看出, 夏季黄海上层基本以北向流为主(图 4a, 5a), 而次表层以南向流为主。当台风过境时, HH02 站的南向流出现全水深的加深加强, 最大流速超过 0.3 m/s, 而纬向流速显示在台风过境期间, HH02 站上层出现明显的向岸流, 最大流速超过 0.1 m/s, 而底层为离岸流, 最大流速超过了 0.08 m/s (图 4b, 5b)。通过流场的比较可以看出, 模式结果基本体现了台风过境期间黄海流场的变化特征, 可以在此基础上进行下一步的研究。

### 3 台风“灿鸿”对黄海温度及环流结构的影响

#### 3.1 温跃层对台风的响应过程

台风过境前后黄海温跃层强度及深度的变化如

图 6 所示。在近岸海区, 由于风致混合及潮汐混合的共同作用, 黄海整层水体垂向混合比较均匀(Qiao *et al.*, 2006), 而从近岸到黄海中部, 温跃层强度呈现出先迅速增大再逐步减小的特征(图 6e), 最大的跃层强度超过 2.5 °C/m, 主要分布于山东半岛, 辽东半岛及朝鲜半岛外海, 而黄海中部的温跃层强度相对较小, 强度在 0.5—1.5 °C/m 之间。与此同时, 温跃层的深度呈现出近岸区域浅而黄海中部深的特征(图 6i), 在近岸海区跃层深度小于 10 m, 而在黄海中部最大超过 20 m。以上特征与葛人峰等(2006)的调查结果相似。

7月11日0时, 台风中心移动至浙江外海(图 6b), 此时, 黄海南部及东海北部的温跃层强度逐渐减弱而深度迅速加深(如图 6f, j), 最大深度超过 25 m。7月12日0时, 台风过境黄海(图 6c), 在强烈的风应力作用下, 浅水区域的混合加剧, 原位于山东半岛外海

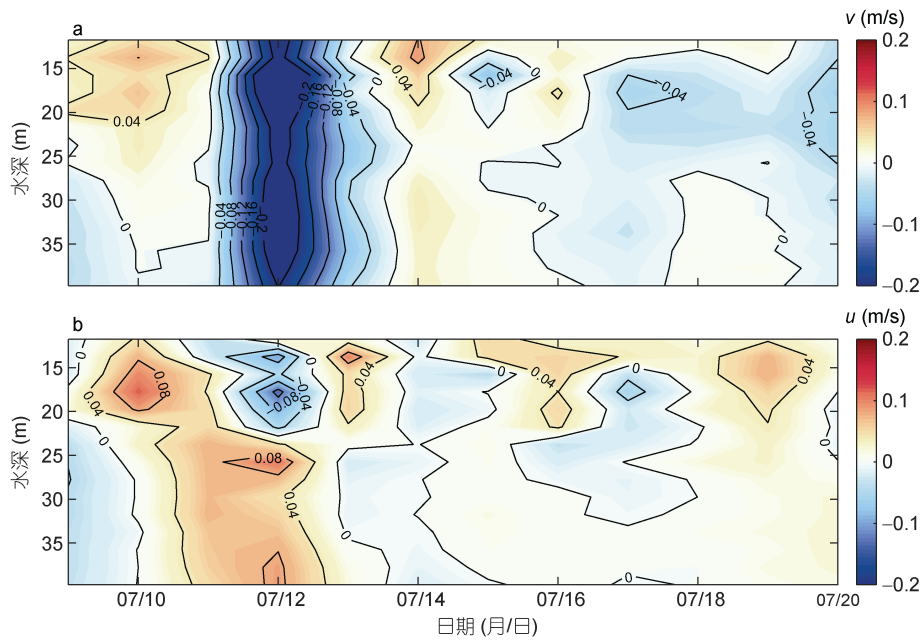


图 4 台风“灿鸿”期间 HH02 站观测到的径向流速  $v$  (向北为正) (a) 以及纬向流速  $u$  (向东为正) (b)

Fig.4 The observational meridional velocity  $v$  (northward positive) (a) and zonal velocity  $u$  (eastward positive) (b) in HH02 during typhoon Chan-hom

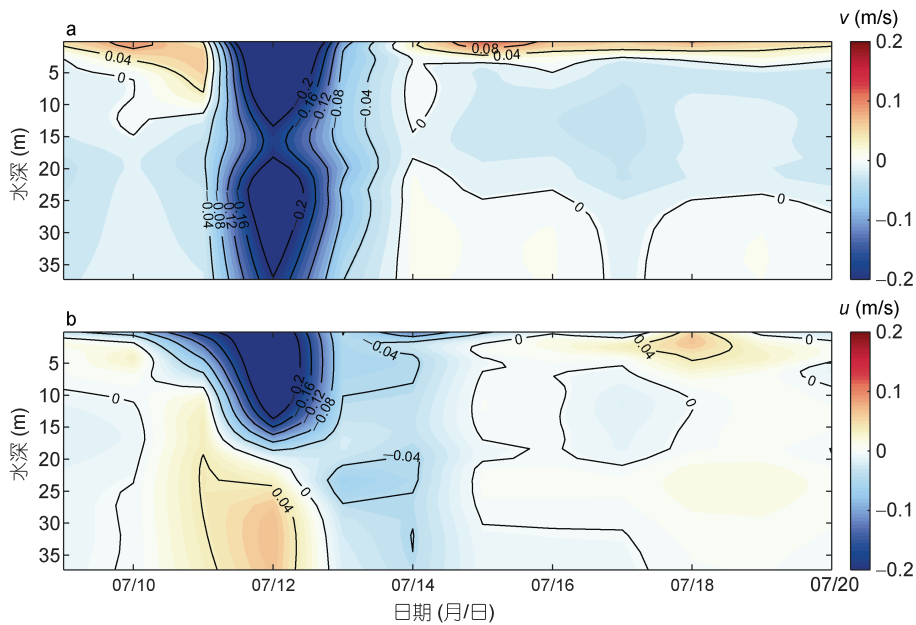


图 5 台风“灿鸿”期间模式模拟的径向流速  $v$  (向北为正)(a)以及纬向流速  $u$  (向东为正) (b)

Fig.5 The model results of meridional velocity  $v$  (northward positive) (a) and zonal velocity  $u$  (eastward positive) (b) in HH02 during typhoon Chan-hom

的强跃层被破坏, 近岸海区更大范围的海水被混合均匀(图 6g), 与此同时, 黄海南部及东部的温跃层有所增强, 整个黄海区域的跃层深度进一步加深(图 6k)。7月13日, 台风在朝鲜半岛登陆, 黄海海区以偏西风为主, 最大风速依然超过 10 m/s (图 6d), 此时, 黄海南部及东部的温跃层强度继续增强(图 6h), 温跃

层深度继续加深, 南黄海大部分区域的跃层深度超过 20 m (图 6l)。

由此可以看出, 台风过境会对黄海温跃层的强度及深度产生重要的影响, 大风产生的强混和会使跃层的深度增加, 同时破坏了浅水区的跃层结构, 使更大范围的近岸水体垂向混合均匀。

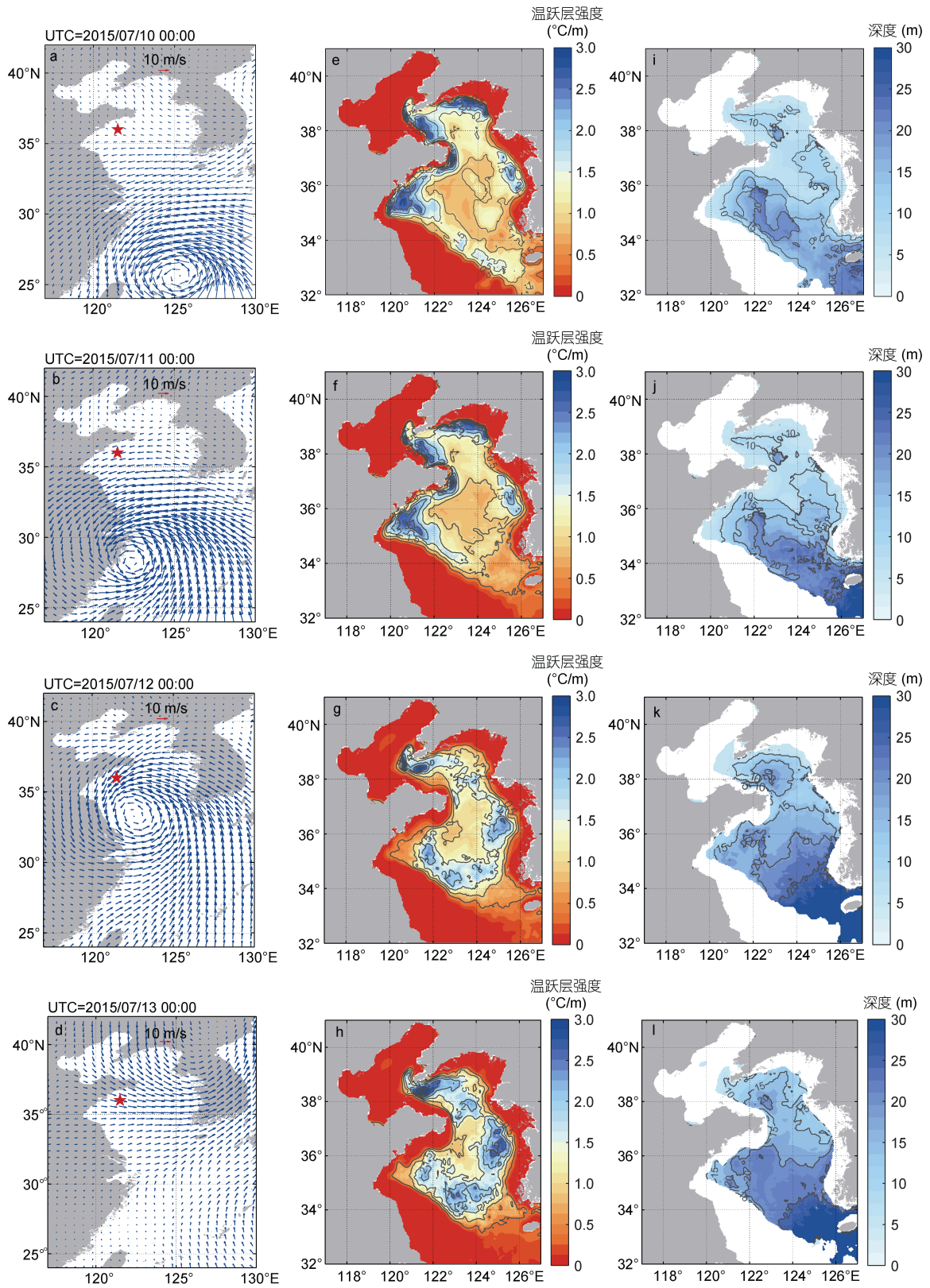


图 6 台风“灿鸿”过境期间黄海温跃层强度及深度的分布

Fig. 6 The horizontal distribution of the thermocline strength and the thermocline depth during typhoon Chan-hom  
 注: a—d 为 7 月 10 日 0 时—7 月 13 日 0 时台风过境期间的风场分布, 红色五角星代表 HH02 站所在位置; e—h 为温跃层强度; i—l 为温跃层深度, 单位: m

对黄海全域温跃层的强度及深度做空间平均后发现, 台风“灿鸿”过境时, 黄海的温跃层强度逐渐减弱(图 7), 最大减弱幅度约为  $0.3\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{m}$ , 这是因为当台风过境时, 强烈的垂向混合使得表层海水迅速降温而底层海水明显升温, 由此造成垂向温度梯度的减小, 跃层强度随之减弱(Lee *et al.*, 2016; Yang *et al.*, 2019)。同时, 台风“灿鸿”过境时温跃层的深度迅速增加, 增幅约为  $7\text{ m}$ , 而台风在朝鲜半岛登陆后, 跃层深度逐渐恢复。

### 3.2 温度锋面对台风的响应过程

台风不仅会影响温跃层的深度和强度, 其对底层温度锋面的分布也会产生重要的影响。在台风过境黄海前(7月9日), 黄海底层的温度梯度如图 8a 所示,

可以看出底层温度锋面主要位于  $20\text{--}40\text{ m}$  等深线之间, 最大梯度超过  $5\times 10^{-4}\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{m}$ 。赵保仁(1985, 1987)指出该温度锋面主要是由潮汐混合而形成的浅水陆架架锋, 其不仅会控制黄海冷水团的边界, 也会对冷水团环流的边界产生影响。而当台风过境后(7月13日), 近岸海区的锋面强度减弱, 而离岸海区的锋面强度增强(图 8b), 说明底层温度锋面的位置整体向黄海深水区移动, 结合图 6 可以看出, 当台风过境时, 大风产生的强混和使得近岸混合区域范围扩大, 底层温度升高, 进而推动锋面向深水区移动。

从台风过境期间  $36^{\circ}\text{N}$  断面底层温度的变化可以看出, 当台风过境时, 黄海西部近岸海区的底层温度明显升高(图 9), 升温幅度超过  $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 同时, 近岸的暖

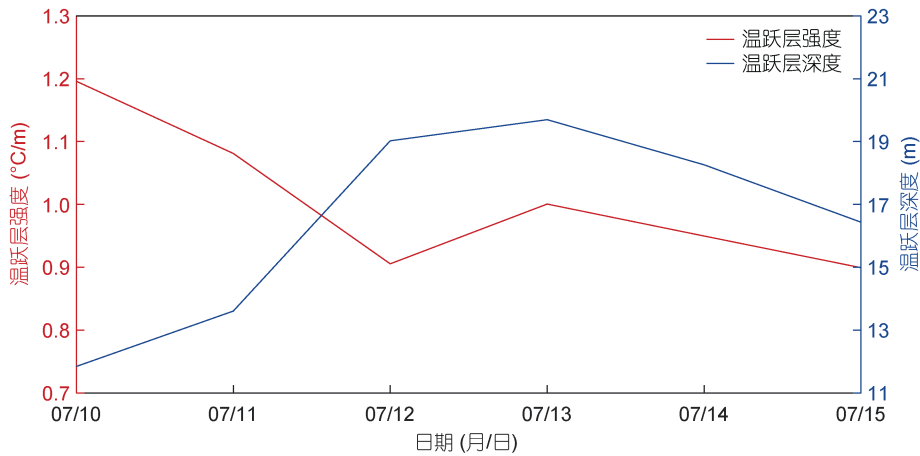


图 7 台风过境期间黄海温跃层平均强度及平均深度的时间序列

Fig.7 The time series of the average thermocline strength and thermocline depth of the Yellow Sea during typhoon Chan-hom

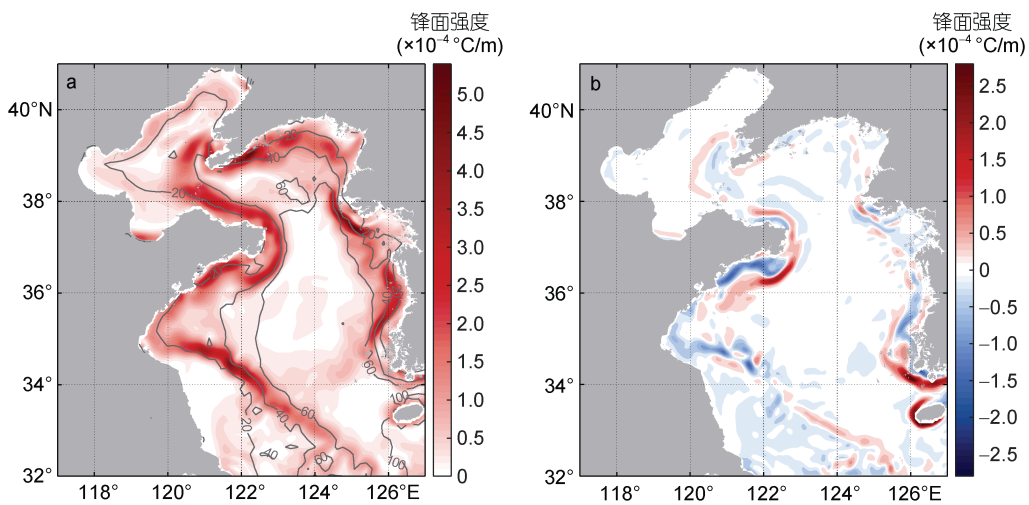


图 8 台风过境前(7月9日)黄海底层温度锋面强度分布(a)以及台风过境前后(7月9—13日)黄海底层温度锋面强度之差(b)  
Fig.8 Distribution of bottom temperature fronts before the typhoon (July 9) (a) and the difference of bottom temperature fronts between July 13<sup>th</sup> and July 9 (b)

注: 灰色实线: 模式地形

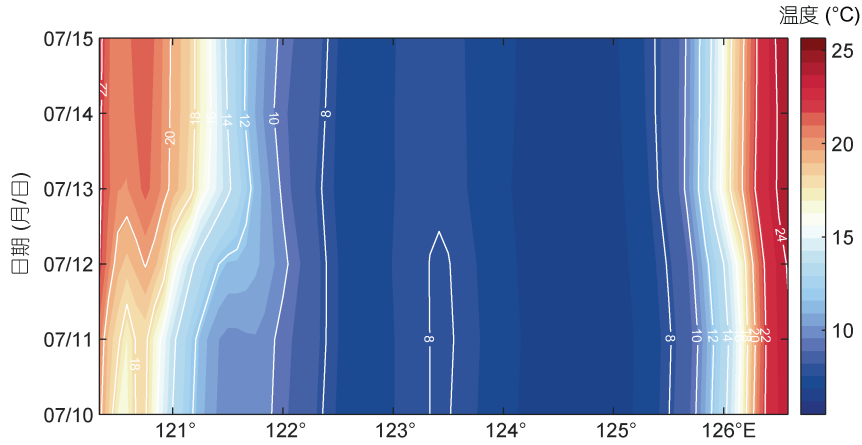


图 9 在台风过境期间 36°N 断面底层温度随时间变化

Fig.9 The variation of bottom temperature along 36°N section during typhoon Chan-hom passing

水逐渐向黄海中部推移, 底层的温度锋面随之向深水区移动, 以 20 °C 等温线为例, 台风过境后其向内区推移了近 60 海里。相对于黄海西岸, 黄海东岸底层温度的升温幅度及锋面位置的变化相对较小。

### 3.3 台风对黄海冷水团环流结构及强度的影响

黄海冷水团环流是存在于夏季黄海上层的气旋式环流, 平均流速小于 0.1 m/s(图 10a), 然而, 当 7 月 13 日台风过境后, 黄海冷水团环流的强度迅速增加, 最大流速超过 0.3 m/s(图 10b), 其中以成山头, 苏北浅滩及朝鲜半岛外海的增幅最为明显, 同时, 环流的宽度也有了大幅度的增加(图 10c)。

为定量地探究台风过境对黄海冷水团环流强度的影响, 以 36°N 断面为例, 对黄海冷水团环流西侧段(120°—124°E)的流量( $T_c$ )及流幅( $S_c$ )进行计算, 计

算公式为

$$T_c = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n k V_{i,j} S_{i,j}, \quad (1)$$

$$S_c = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n k S_{i,j}, \quad (2)$$

其中,  $m$  为模式中 36°N 断面西侧(120°—124°E)的水平格点数;  $n$  为模式的垂向层数。由此将 36°N 断面西侧划分为  $m \times n$  个网格, 每个网格的面积为  $S_{i,j}$ , 与之对应的经向流速为  $V_{i,j}$ , 由于黄海冷水团环流在黄海西岸为南向流, 因此在计算时只考虑了 36°N 断面西侧南向流( $V_{i,j} < 0$ )的流量及流幅, 即当  $V_{i,j} < 0$  时,  $k=1$ , 当  $V_{i,j} \geq 0$  时,  $k=0$ 。进而得到了 36°N 断面西侧黄海冷水团环流流量及流幅的时间序列(图 11), 可以看出, 在台风过境前, 断面西侧的冷水团环流流量约为  $0.1 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$ , 当台风过境时, 环流流量迅速增加至

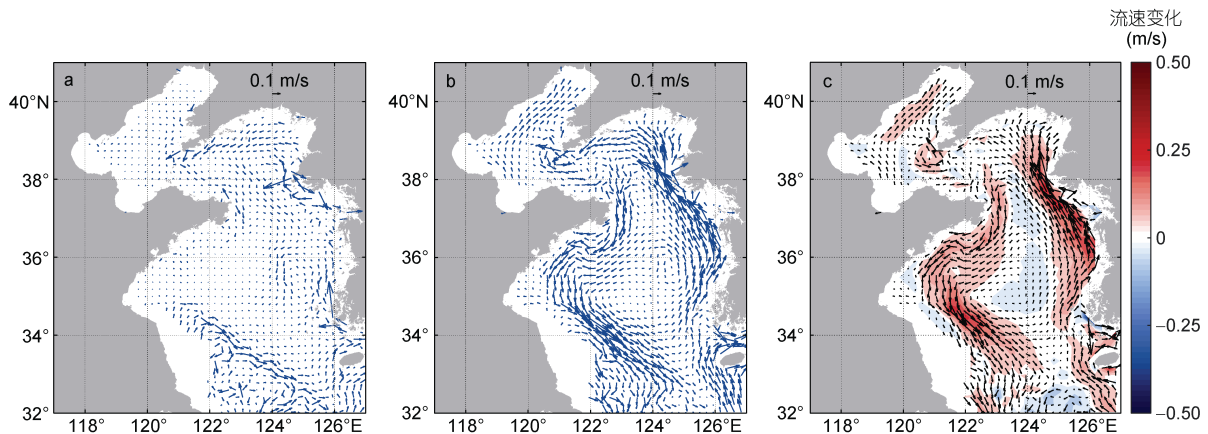


图 10 台风过境前后黄海 15 m 层黄海冷水团环流的分布

Fig.10 The distribution of the Yellow Sea Cold Water Mass Circulation at depth of 15 m

注: a: 台风过境前(7月 9 日)黄海 15 m 层环流的分布; b: 台风过境后(7月 13 日)黄海 15 m 层环流分布; c: 7 月 13 日黄海冷水团环流相对于 7 月 9 日的异常分布



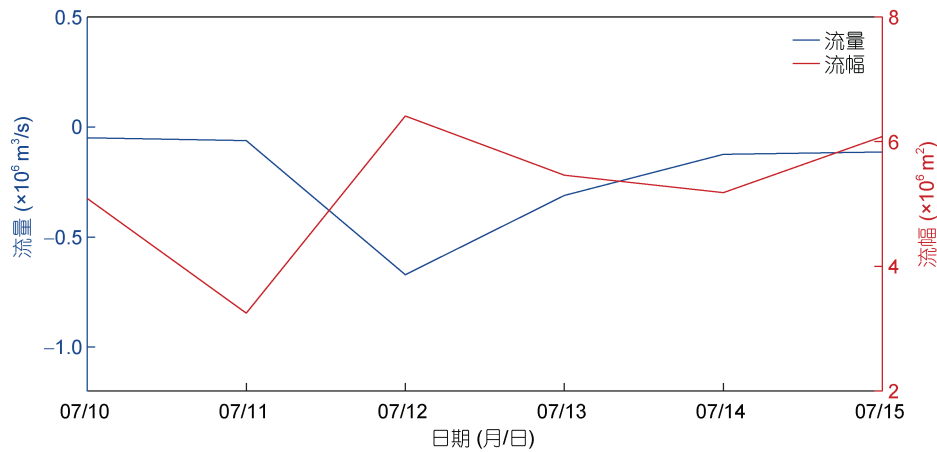


图 11 36°N 断面西侧黄海冷水团环流的流量及流幅时间序列

Fig. 11 The time series of the transport and the area of the Yellow Sea Cold Water Mass Circulation in the western part of 36°N section

$0.7 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$ , 当台风登陆后, 流量逐渐减小至台风过境前的水平。与此同时, 在台风过境黄海的过程中, 黄海冷水团环流的流幅也呈现出先微弱减小, 后迅速增大的特征, 当台风于朝鲜半岛登陆后黄海冷水团环流的流幅也随之减小。

进一步地, 以 36°N 断面为例, 探究台风过境时黄海冷水团环流垂向结构的变化, 当无台风时(图 12a), 黄海表层以北向流为主, 次表层及深层为沿锋面流动的南向流, 最大流速超过  $0.06 \text{ m/s}$ 。当台风中心移动至黄海南部时, 36°N 断面上空以偏东风为主(图 6b), 此时, 混合层中的北向流加深加强(图 12b), 温跃层开始明显下移, 黄海冷水团环流开始向黄海深层收缩。7月12日, 台风过境黄海, 此时, 南黄海上空被气旋式风场覆盖(图 6c), 在黄海西岸为强劲的北风而东岸以偏南风为主, 由此造成黄海西侧整层水体的南向流迅速增强(图 12c), 其中, 表层流速明显大于底层; 与此同时, 在风应力的搅拌与冷却下, 混合层温度明显降低。

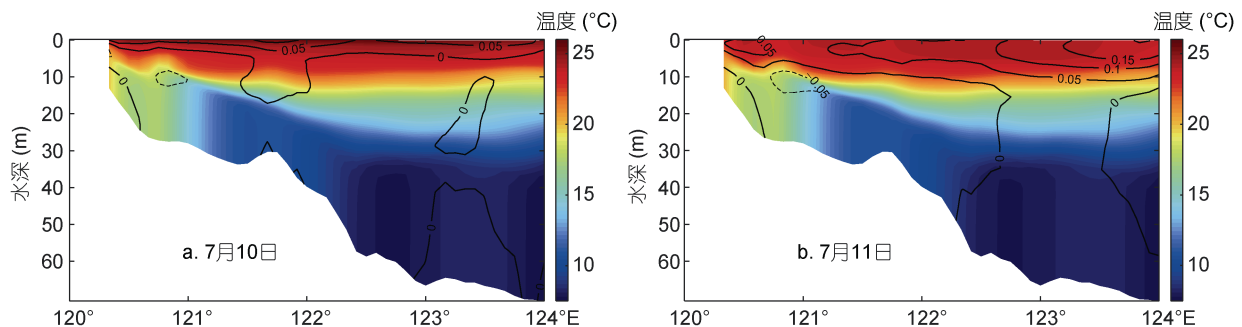
当台风在朝鲜半岛登陆后, 黄海西侧的南向流开始减弱, 但依然以南向流为主(图 12d)。至 7月14日(图 12e), 黄海表层温度逐渐升高且开始出现层化,

此时黄海的温度及环流结构基本恢复到台风过境之前的状态, 次表层的南向流明显减弱, 且表层开始出现北向流。至 7月15日(图 12f), 表层的北向流及温度层结进一步加强, 台风对温度及环流结构的影响基本消失。

由此可以看出, 台风能够对黄海冷水团环流产生重要的影响。当台风过境前, 混合层中的北向流会迅速增强, 同时伴随着混合层及温跃层的下移, 从而使得黄海冷水团环流的流核下移至跃层以下。当台风过境时, 黄海上空的气旋式风场会加剧黄海上层的气旋式环流, 黄海冷水团环流由此加强, 流幅及流量迅速增加, 该过程能够持续 1—2 d。当台风过境后, 黄海上层的温度及黄海冷水团环流的结构开始逐渐恢复, 在台风登陆后的 2—3 d, 黄海冷水团环流的结构基本恢复到台风过境前的状态。

#### 4 结论

本文利用 ROMS 模式, 分析了台风“灿鸿”过境黄海前后黄海温度及环流结构的响应过程。结果表明, 台风会对黄海的温度及环流结构产生重要的影响, 主要表现为: (1) 台风期间强烈的风致混合使得混合



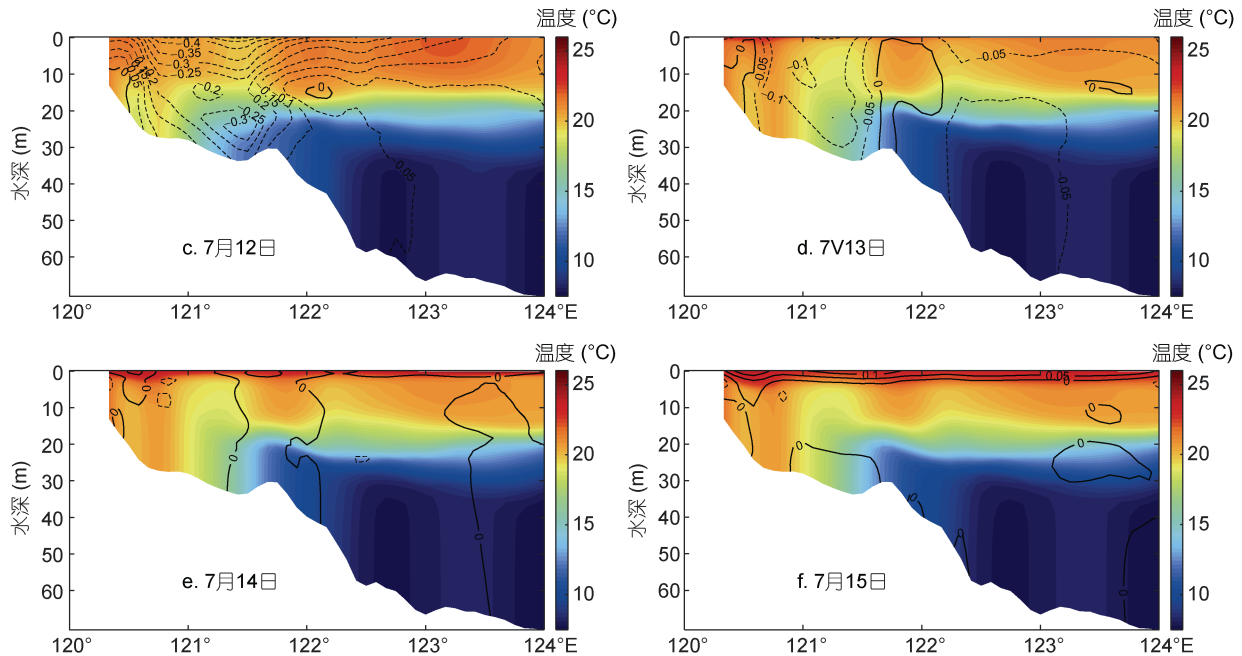


图 12 台风过境期间 36°N 断面西侧温度及黄海冷水团环流的分布

Fig. 12 The distribution of temperature and the Yellow Sea Cold Water Mass Circulation along the western part of 36°N section during typhoon Chan-hom

注: 实线代表北向流, 虚线代表南向流, 单位: m/s

层加深, 同时使温跃层的深度增加, 强度减弱。(2) 台风能够使近岸更大范围的水体充分混合, 使得近岸水体的底层温度迅速升高, 范围增大, 进而造成底层的温度锋面向黄海内区移动。(3) 台风过境对黄海冷水团环流也会产生重要的影响, 在台风过境前, 混合层中的北向流迅速加深加强, 从而使得黄海冷水团环流的流核下移, 流幅减小。当台风过境时, 黄海上空的气旋式风场会加剧黄海上层的气旋式环流, 黄海冷水团环流由此增强, 流幅及流量迅速增加。当台风过境后 2 d 左右, 黄海上层的温度及黄海冷水团环流的结构开始逐渐恢复至过境前的状态。

### 参 考 文 献

- 于 非, 张志欣, 刁新源等, 2006. 黄海冷水团演变过程及其与邻近水团关系的分析. 海洋学报, 28(5): 26—34
- 汤毓祥, 邹娥梅, 季兴宰等, 2000. 南黄海环流的若干特征. 海洋学报, 22(1): 1—16
- 杨静思, 张庆河, 张金凤等, 2013. “韦帕”台风过程中南黄海海域流场研究. 水道港口, 34(3): 225—231
- 赵保仁, 1985. 黄海冷水团锋面与潮混合. 海洋与湖沼, 16(6): 451—460
- 赵保仁, 1987. 南黄海西部的陆架锋及冷水团锋区环流结构的初步研究. 海洋与湖沼, 18(3): 217—226
- 翁学传, 张以恩, 王从敏等, 1989. 黄海冷水团的变化特征. 青岛海洋大学学报, 19(1): 119—131
- 葛人峰, 郭景松, 于 非等, 2006. 黄、东海陆架海域温度垂直

结构类型划分与温跃层分析. 海洋科学进展, 24(4): 424—435

- 赫崇本, 汪圆祥, 雷宗友等, 1959. 黄海冷水团的形成及其性质的初步探讨. 海洋与湖沼, 2(1): 11—15
- 冀承振, 葛 勇, 李 健等, 2020. 黄海海洋对台风“灿鸿”外围过程响应的观测研究. 海洋学报, 42(1): 46—53
- Beardsley R C, Limeburner R, Kim K *et al*, 1992. Lagrangian flow observations in the East China, Yellow and Japan Seas. *La Mer*, 30(3): 297—314
- Davies A M, Xing J X, 2006. Effect of topography and mixing parameterization upon the circulation in cold water domes. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 111(C3): C03018, doi: 10.1029/2005jc003066
- Ding Y, Yu H M, Bao X W *et al*, 2011. Numerical study of the barotropic responses to a rapidly moving typhoon in the East China Sea. *Ocean Dynamics*, 61(9): 1237—1259, doi: 10.1007/s10236-011-0436-1
- Fairall C W, Bradley E F, Hare J E *et al*, 2003. Bulk parameterization of air-sea fluxes: updates and verification for the COARE algorithm. *Journal of Climate*, 16(4): 571—591, doi: 10.1175/1520-0442(2003)016<0571:BPOASF> 2.0.CO;2
- Huang W R, Mukherjee D, Chen S S, 2011. Assessment of Hurricane Ivan impact on chlorophyll-a in Pensacola bay by MODIS 250 m remote sensing. *Marine Pollution Bulletin*, 62(3): 490—498, doi: 10.1016/j.marpolbul.2010.12.010
- Isobe A, 2008. Recent advances in ocean-circulation research on the Yellow Sea and East China Sea shelves. *Journal of Oceanography*, 64(4): 569—584, doi: 10.1007/s10872-008-0048-7

- Kim C S, Lim H S, Jeong J Y *et al*, 2014. Responses of coastal waters in the Yellow Sea to Typhoon Bolaven. *Journal of Coastal Research*, 70(S1): 278—283, doi: 10.2112/si70-047.1
- Lee J H, Pang I C, Moon J H, 2016. Contribution of the Yellow Sea bottom cold water to the abnormal cooling of sea surface temperature in the summer of 2011. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 121(6): 3777—3789, doi: 10.1002/2016JC011658
- Li J C, Li G X, Xu J S *et al*, 2019. Responses of Yellow Sea cold water mass to typhoon Bolaven. *Journal of Ocean University of China*, 18(1): 31—42
- Lin X P, Yang J Y, 2011. An asymmetric upwind flow, Yellow Sea Warm Current: 2. Arrested topographic waves in response to the northwesterly wind. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 116(C4): C04027, doi: 10.1029/2010JC006513
- Mellor G L, Yamada T, 1982. Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems. *Reviews of Geophysics*, 20(4): 851—875
- Moon J H, Hirose N, Yoon J H, 2009. Comparison of wind and tidal contributions to seasonal circulation of the Yellow Sea. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 114(C8): C08016, doi: 10.1029/2009jc005314
- Naimie C E, Blain C A, Lynch D R, 2001. Seasonal mean circulation in the Yellow Sea—a model-generated climatology. *Continental Shelf Research*, 21(6/7): 667—695, doi: 10.1016/S0278-4343(00)00102-3
- Oh K H, Lee J H, Lee S *et al*, 2014. Intrusion of low-salinity water into the yellow sea interior in 2012. *Ocean Science Journal*, 49(4): 343—356, doi: 10.1007/s12601-014-0032-7
- Pang C G, Liang J X, Hu D X *et al*, 2004. Surface circulation patterns observed by drifters in the Yellow Sea in summer of 2001, 2002 and 2003. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 22(3): 209—216, doi: 10.1007/BF02842550
- Qiao F L, Ma J, Xia C S *et al*, 2006. Influences of the surface wave-induced mixing and tidal mixing on the vertical temperature structure of the Yellow and East China Seas in summer. *Progress in Natural Science*, 16(7): 739—746
- Tak Y J, Cho Y K, Seo G H *et al*, 2016. Evolution of wind-driven flows in the Yellow Sea during winter. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 121(3): 1970—1983, doi: 10.1002/2016jc011622
- Tang X H, Wang F, Chen Y L *et al*, 2004. Current observations in the southern Yellow Sea in summer. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 22(3): 217—223, doi: 10.1007/BF02842551
- Xia C S, Qiao F L, Yang Y Z *et al*, 2006. Three-dimensional structure of the summertime circulation in the Yellow Sea from a wave-tide-circulation coupled model. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 111(C11): C11S03, doi: 10.1029/2005jc003218
- Xing J X, Davies A M, 2005. A model study of spin-down and circulation in a cold water dome. *Ocean Dynamics*, 55(3/4): 199—212, doi: 10.1007/s10236-005-0007-4
- Yanagi T, Takahashi S, 1993. Seasonal variation of circulations in the East China Sea and the Yellow Sea. *Journal of Oceanography*, 49(5): 503—520, doi: 10.1007/BF02237458
- Yang Y, Li K P, Du J T *et al*, 2019. Revealing the subsurface Yellow Sea cold water mass from satellite data associated with typhoon Muifa. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 124(10): 7135—7152, doi: 10.1029/2018JC014727
- 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, doi: 10.1016/j.csr.2017.09.006
- Zhang Z W, Wu H, Yin X Q *et al*, 2018. Dynamical response of Changjiang River plume to a severe typhoon with the surface wave-induced mixing. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 123(12): 9369—9388, doi: 10.1029/2018JC014266

## INFLUENCE OF TYPHOON ON TEMPERATURE AND CURRENT STRUCTURE OF THE YELLOW SEA

SUN Fan<sup>1,2,3</sup>, YU Fei<sup>1,2,3,4,5</sup>, SI Guang-Cheng<sup>1,2,3</sup>, WANG Jian-Feng<sup>1,2,3</sup>, TANG Ying<sup>1,2,3</sup>

(1. *Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China*; 2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*; 3. *CAS Key Laboratory of Ocean Circulation and Waves, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China*; 4. *Center for Ocean Mega-Science, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China*; 5. *Laboratory for Ocean Dynamics and Climate, Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology (Qingdao), Qingdao 266237, China*)

**Abstract** Using the regional ocean modeling system (ROMS), the effect of typhoon Chan-hom on temperature and current structure of the Yellow Sea was analyzed. The result shows that, the typhoon induced strong wind-induced mixing, which significantly deepened and weakened the thermocline. Furthermore, bottom temperature in coastal regions was increased rapidly, which pushed the bottom temperature fronts towards the offshore region. Moreover, the typhoon affected remarkably the current structure of the Yellow Sea cold water mass circulation (YSCWMC). When the typhoon approaching, the northward velocity was strengthened and deepened, which deepened the velocity core and shrank the area of the YSCWMC. When Chan-hom passing the Yellow Sea, the cyclonic circulation in the upper layer of the Yellow Sea was enhanced, which intensified the YSCWMC and notably increased its transport. After Chan-hom landed on the Korean Peninsula, the influence of the typhoon gradually attenuated and disappeared.

**Key words** typhoon Chan-hom; Yellow Sea; thermocline; fronts; Yellow Sea cold water mass circulation