

泰利台风对台湾东北黑潮入侵 东海陆架影响的研究*

何源首^{1,2} 胡 珀^{1,3,4} 殷玉齐^{1,3,4} 侯一筠^{1,2,3,4}

(1. 中国科学院海洋研究所 海洋环流与波动重点实验室 青岛 266071; 2. 中国科学院大学 北京 100049; 3. 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; 4. 中国科学院海洋大科学中心 青岛 266071)

摘要 本文利用卫星高度计数据和分析数据,并结合同时期现场深水潜标的流速观测数据,研究了超强台风泰利过境前后台湾东北附近海域流场、位势密度场、位势涡度场以及黑潮入侵东海陆架强度的变化。分析结果表明,泰利台风通过改变台湾东北陆坡附近海域的流场、位势密度场,显著地削弱(增强)了西段(东段)陆坡附近的位势涡度梯度,从而使得西段(东段)陆坡黑潮入侵东海陆架的强度显著增强(减弱)。此外,本文还区分了台湾东北西部陆坡附近表层的跨陆坡“上凸型”位势涡度分布与次表层的跨陆坡“下凹型”位势涡度分布,并认为次表层的跨陆坡“下凹型”位势涡度分布也应作为台湾东北西部陆坡附近“位势涡度障碍”的重要组成部分。本文的研究结果揭示了大气中的台风过程对台湾东北黑潮入侵东海陆架产生显著影响的关键过程及机制,相关结论可为台湾东北黑潮入侵东海陆架变化规律的研究提供有价值的参考。

关键词 台湾东北; 黑潮入侵; 泰利台风; 位势涡度; 水体层结; 陆坡逆流

中图分类号 P722.6 **doi:** 10.11693/hyhz20190900166

黑潮是太平洋中最强劲的一支大洋西边界流,其携带丰富的营养盐将低纬度海域的高温高盐海水北向输运至日本东部的高纬度海域,并对流经海域的海洋环境和气候产生显著影响(Hu *et al.*, 2015)。黑潮经台湾东部水道北上进入东海后,在台湾东北附近海域显著入侵东海陆架并形成东海陆架上的黑潮分支流(Oey *et al.*, 2010; Yang *et al.*, 2011, 2012, 2018a; Xu *et al.*, 2018),进而对整个东海的海洋环境产生显著影响(王玉衡等, 2017; 杨德周等, 2017; 宋金明等, 2017; Yang *et al.*, 2018b; Zhou *et al.*, 2018; Zhao *et al.*, 2019),因此研究台湾东北附近海域黑潮入侵东海陆架的变化规律对于理解和预测东海海洋环境的变化具有重要意义。

历史研究表明,台湾东北黑潮入侵东海陆架存

在显著的季节变化特征(何源首等, 2019; Liu *et al.*, 2014, 2016; Wu *et al.*, 2014, 2017)。夏季,台湾东北黑潮的主轴偏东,黑潮主体主要与台湾东北纬向走势的东部陆坡(D2—D3, 图 1a)发生碰撞(Wong *et al.*, 2000; Wu *et al.*, 2008),东部陆坡的黑潮跨陆坡入侵较强,而西部陆坡的黑潮跨陆坡入侵较弱,并且主要表现为次表层水体的入侵(Liu *et al.*, 2014; Xu *et al.*, 2018; Zhou *et al.*, 2018)。台湾东北附近海域夏季(6—8月)气候态平均的地转流场分布如图 1a 所示,台湾东北东部陆坡(D2—D3, 图 1a)的跨陆坡地转流速较强,而西部陆坡(D1—D2, 图 1a)的跨陆坡地转流速较弱,并且西部陆坡大洋一侧的次表层存在一支较强的沿陆坡西南向流动的逆流(Chuang *et al.*, 1993; Tang *et al.*, 2000; He *et al.*, 2019),而在西部陆坡陆架一侧的彭佳

* 国家自然科学基金, 41630967 号, 41476018 号, 41776020 号; 国家海洋局“全球变化与海气相互作用专项”, GASI-IPOVAI-01-06 号; 国家自然科学基金委员会-创新研究群体科学基金, 41421005 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, U1606402 号。何源首, 博士研究生, E-mail: hysiocas@163.com

通信作者: 侯一筠, 博士生导师, 研究员, E-mail: yjhou@qdio.ac.cn

收稿日期: 2019-09-04, 收修改稿日期: 2019-10-13

屿、棉花屿、花瓶屿附近则存在以海表低温为显著特征的台湾东北冷水块(Cheng *et al.*, 2009; Shen *et al.*, 2011; Yin *et al.*, 2019a)。冬季, 台湾东北黑潮的主轴偏西, 黑潮强的反气旋式分支流主要通过西部陆坡(D1—D2, 图 1a)入侵陆架(Oey *et al.*, 2010; Liu *et al.*, 2014, 2016), 该分支流主体在钓鱼岛东北附近海域又重新汇入黑潮主流。此外, 台湾东北黑潮入侵东海陆架还存在显著的季节内变化。Vélez-Belchi 等(2013)、Yin 等(2017)的研究表明台湾以东抵达的气旋式(反气旋式)中尺度涡旋会显著地减弱(增强)黑潮强度, 并使得台湾东北黑潮西(东)偏, 黑潮在台湾东北入侵陆架的特征也发生显著的变化。

考虑到实际海洋过程的复杂性, 台湾东北黑潮还受到其它多种因素的显著影响, 如过境的台风等。历史研究表明, 过境的台风会对黑潮流速结构等产生十分显著的影响(Chang *et al.*, 2010; Zheng *et al.*, 2014)。因此, 台湾东北黑潮及黑潮入侵东海陆架对过境台风的影响特征及响应机制也应作为台湾东北黑潮入侵东海陆架变化规律的重要研究内容。以往的研究表明, 台风对其过境海域的海表流场(Morimoto *et al.*, 2009; Zheng *et al.*, 2014)、温度场(Liu *et al.*, 2015; Liu *et al.*,

2019a, b)、混合层深度(黄立文等, 2007; Wu *et al.*, 2012)以及生物化学过程(Siswanto *et al.*, 2008; Chen *et al.*, 2009)等均会产生显著的影响。针对台湾东北附近海域, Liu 等(2019b)研究了台风导致的台湾东北附近海域海表的降温效应, Xu 等(2017)研究了台风对台湾东北附近海域海表叶绿素浓度的影响, López-López 等(2012)探讨了过境台风与台湾东北附近海域浮游生物丰度的关系, Zheng 等(2014)研究了台风对台湾以东黑潮流轴及流量的显著改变, Tsai 等(2013)则探讨了台湾东北冷水块在台风影响下的变化, Morimoto 等(2009)利用陆基雷达的遥感数据研究了台湾东北黑潮流轴在台风影响下发生明显移动的案例。这些前人的研究都表明过境台风对台湾东北附近海域存在十分显著的影响, 但是目前关于台风对台湾东北黑潮入侵东海陆架强度产生影响的研究尚未见报道。

本文利用卫星高度计数据和分析数据资料, 并结合台湾东北附近海域陆坡上同期的定点深水流速观测数据研究了 2017 年 9 月超强台风泰利过境期间台湾东北黑潮入侵东海陆架强度发生显著变化的案例。泰利台风是 2017 年西北太平洋记录的第 18 号台风, 于 2017 年 9 月 9 日在西北太平洋 145.2°E, 14.9°N

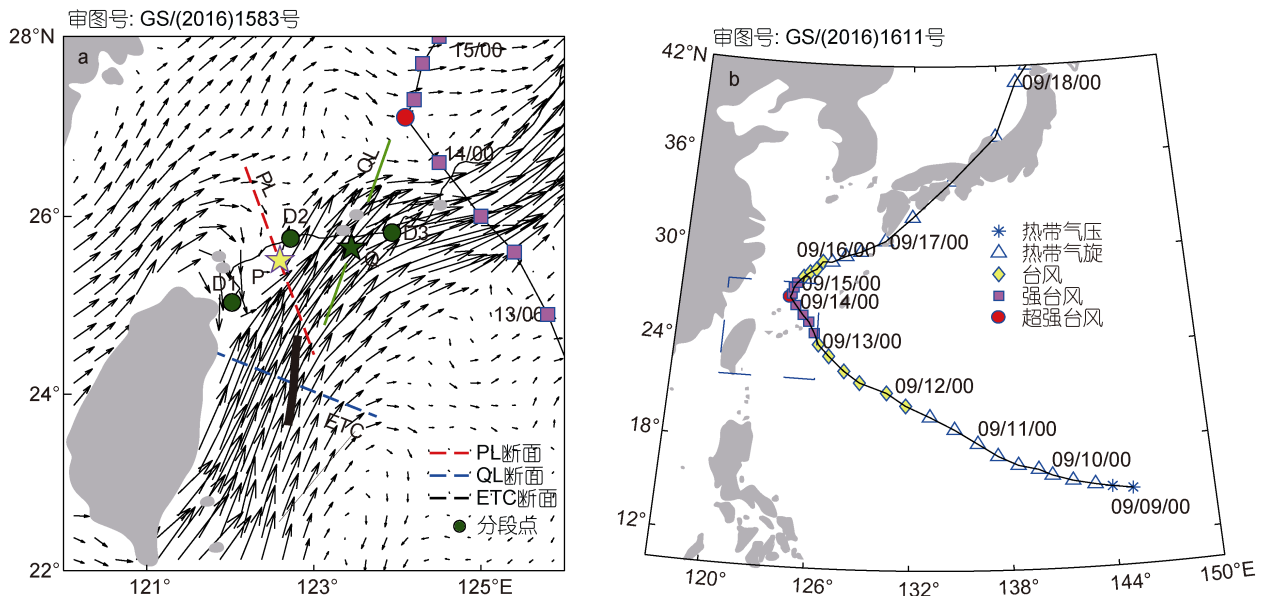


图 1 台湾东北夏季(6—8 月)气候态平均的水平地转流速分布和现场流速观测站点位置(a)以及泰利台风最佳路径(b)

Fig.1 Distribution of horizontal geostrophic velocity in climatology mean off northeastern Taiwan during the summer and the deployment of submerged buoys (a) and the best track of super typhoon Talim (b)

注: a: 地转流速来源于卫星高度计数据(1993—2018 年); 黑色实线为 200m 等深线; 黄星标记的 P 点处为深水潜标布放位置(25.51°N, 122.59°E); 绿星标记的 Q 点处为分析数据中用于东部陆坡数据分析的站点; D1、D2、D3 为 200m 等深线(HYCOM 地形数据)上的分段点; PL: 跨西部陆坡断面; QL: 跨东部陆坡断面; ETC: 台湾东部水道断面; b: 台风数据来源于中国台风网, 台风强度依据中国气象热带气旋等级分类标准标注, 台风路径时间节点(日期格式: 月/日/时)标注在台风路径附近, 蓝色虚线方框区域为图 1a 所示台湾东北附近海域

附近海域生成后西北向移动; 9 月 13 日 06 时, 在 125.8°E, 24.9°N 附近海域加强至强台风级别(Severe Typhoon, STY), 尔后继续西北向进入台湾东北附近海域, 并且移动速度显著减缓; 9 月 14 日 06 时, 泰利在台湾东北 124.1°E, 27.1°N 附近海域发展为超强台风(Super Typhoon, Super TY)并折向东北方向移动; 9 月 16 日 00 时, 在 126.1°E, 29.4°N 附近海域减弱为热带风暴(Tropical Storm, TS)后东北向快速移动, 并于 9 月 20 日 18 时转化为热带低压(Tropical depression, TD), 泰利台风的最佳路径如图 1b 所示。

1 数据和方法

1.1 数据

1.1.1 台风最佳路径数据 泰利台风的数据资料来源于中国气象局热带气旋数据集(China Meteorological Administration Tropical Cyclone database, CMA TC database), 该数据集由上海台风研究所收集整理, 并由中国台风网公开发布。CMA TC database 提供自 1949 年以来有记录的西北太平洋(含南海, 赤道以北, 180°E 以西)海域热带气旋每 6h 的强度, 中心位置, 中心气压和最大风速等数据(Ying *et al.*, 2014)。

1.1.2 现场流速观测数据 现场深水流速观测数据则通过布放在棉花峡谷(Mien-hwa Canyon, MHC)和北棉花峡谷(North Mien-hwa Canyon, NMHC)之间陆坡上的声学多普勒流速剖面仪(acoustic Doppler current profiler, ADCP)获取。该观测站点位于台湾东北西部陆坡(D1—D2)上, 西部陆坡与正东向的夹角约为 30°(图 1a)。2017 年 5 月 23 日—9 月 18 日, ADCP 观测水深为 483.5m 至海表, 2017 年 9 月 19 日—2018 年 5 月 19 日, ADCP 观测水深为 478m 至海表; ADCP 记录的水平流速观测数据的垂直分辨率为 8m(共 62 层, 最顶层的 6 层流速数据由于受到反射信号的干扰, 在本文的数据处理中已被剔除), 时间分辨率为 1h, 本文用到的流速数据均经过了 36h 的低通滤波处理去除了主要的潮汐信号和其他高频信号。

1.1.3 卫星高度计数据 本文采用的网格化卫星高度计数据集(Archiving, Validation, and Interpretation of Satellite Oceanographic dataset, AVISO)融合了全球主要海洋动力卫星的观测数据, 该数据集提供自 1993 年以来的海表动力高度(absolute dynamic topography, ADT)、海表高度异常(sea level anomaly, SLA)、地转流速(geostrophic velocity, GV)以及地转流速异常(geostrophic velocity anomaly, GVA)等变量。数据时间

分辨率为 1d, 空间分辨率为 0.25°×0.25°。本文利用台湾东北附近海域的卫星高度计数据研究了泰利台风过境前后水平地转流场的变化, 并提取了黑潮强度, 黑潮流向以及黑潮主轴位置等信息。

1.1.4 分析数据 本文利用美国海军混合坐标海洋模式(Hybrid Coordinate Ocean Model, HYCOM)分析数据资料研究了台风过境前后台湾东北附近海域的流场、位势密度场、位势涡度场等的变化。HYCOM 分析数据的时间分辨率为 1d, 空间分辨率为 0.08°×0.08°, 何源首等(2019)、Yin 等(2017)的研究表明, HYCOM 数据能较好地反映台湾东北附近海域的流场结构及黑潮入侵东海陆架的变化。图 3、图 5 分别对比了台风过境前后, HYCOM 分析数据和现场观测数据在观测站点处沿陆坡和跨陆坡的流速剖面, 次表层陆坡逆流(Tang *et al.*, 2000; He *et al.*, 2019)强度以及台湾东北陆坡分区段的黑潮跨陆坡入侵陆架强度等信息, 对比结果同样显示了台风过境前后 HYCOM 分析数据的可靠性。

1.2 方法

Yin 等(2017)的研究表明, 台湾东北陆坡附近水体的位势涡度(potential vorticity, PV)是研究台湾东北黑潮入侵陆架变化的重要变量。本文研究了泰利台风过境前后, 台湾东北陆坡附近海域水体位势涡度分布的变化, 水体位势涡度 q 的计算公式如下:

$$q = \frac{f + \zeta}{\rho} \cdot \frac{\partial \rho}{\partial z}, \quad (1)$$

其中, ρ 表示位势密度, f 表示科式力参数, ζ 表示水体流速的相对涡度, z 为水体深度。

为了定量评估上游黑潮的状态, 我们利用卫星高度计数据计算了台湾以东 ETC 通道的黑潮强度(Kuroshio intensity, KIN)、黑潮流向(Kuroshio axis angle, KAA)、黑潮流轴位置(Kuroshio axis position, KAP)等三个参数。KIN、KAA、KAP 分别通过以下公式给出:

$$KIN = \int_{x_w}^{x_E} v_g(x) dx, \quad (2)$$

$$KAA = \frac{\int_{x_w}^{x_E} v_g(x) \theta dx}{\int_{x_w}^{x_E} v_g(x) dx}, \quad (3)$$

$$KAP = \frac{\int_{x_w}^{x_E} v_g(x) x dx}{\int_{x_w}^{x_E} v_g(x) dx}, \quad (4)$$

其中, v_g 表示选取断面的法向地转流速, θ 表示地转流速矢量的流向(正东向为 0 度, 正北向为 -90 度), x 表示

地转流速矢量距离断面左端的距离, x_w 、 x_E 则分别表示断面左端及右端地转流速矢量距离断面左端的距离。

为了定量计算台湾东北黑潮入侵陆架强度的变化, 本文分别利用分析数据跨陆坡水体运输的垂直积分和卫星高度计数据跨断面法向地转流速的水平积分得到台湾东北黑潮入侵强度(Kuroshio intrusion, KI)以及表层黑潮入侵强度(surface Kuroshio intrusion, SKI)等两个参数。KI 和 SKI 分别通过以下公式给出:

$$KI = \int_{s_1}^{s_n} v(s)ds, \quad (5)$$

$$SKI = \int_{x_w}^{x_E} v_g(x)dx, \quad (6)$$

其中, v 表示垂直于 200m 等深线断面的法向水平流速, s 表示 200m 等深线断面上数据单元的面积, n 为断面上数据单元的个数, v_g 表示选取断面上(D1—D2, D2—D3)的法向地转流速, x 表示地转流速矢量距离选取断面最左端的距离, x_w 、 x_E 则分别表示断面左端及右端地转流速矢量距离断面最左端的距离。

2 台湾东北附近海域流场及黑潮跨陆坡入侵东海陆架的变化

台湾东北附近海域地转流速及地转流速异常的水平分布如图 2 所示, 泰利台风过境后, 台湾东北附

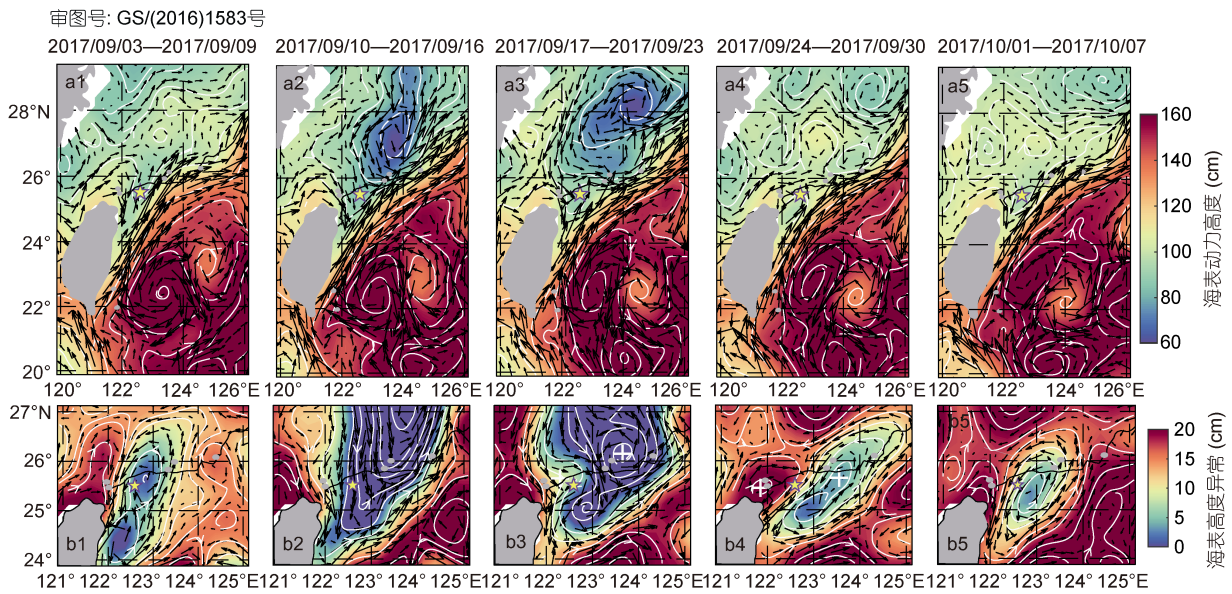


图 2 台湾东北附近海域海表高度、地转流速、海表高度异常、地转流速异常的水平分布

Fig.2 The horizontal distribution of the ADT, SLA, GV, and GVA off the northeastern Taiwan

注: a1—a5 中黑色箭头: 地转流速矢量; b1—b5 中黑色箭头: 地转流速异常矢量; 白色实线: 流线; 黄色星号标注处: 潜标布放位置; 白色“+”: 关键气旋式及反气旋式涡旋的中心位置; 每张图均为 7 天平均的结果; 白色区域: 无数据区域

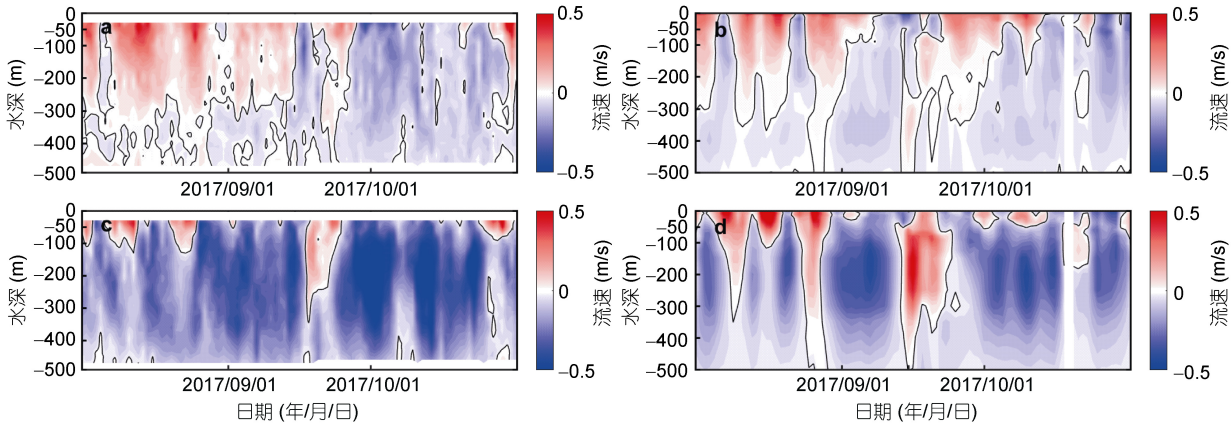


图 3 流速观测数据与分析数据在观测站点 P 处流速剖面

Fig.3 The velocity distribution as a function of time and depth at site P derived from the in situ observations and analysis data

注: a: 垂直陆坡方向的实际观测, 红色: 向岸方向, 蓝色: 离岸方向; b: 垂直陆坡方向的分析数据; c: 沿陆坡方向的实际观测, 红色: 东北方向, 蓝色: 西南方向; d: 沿陆坡方向的分析数据; 黑色实线: 0m/s 等值线

近海域的流场发生显著改变。东部陆坡附近陆架一侧出现强的气旋式涡旋, 东部陆坡向洋一侧的黑潮流速矢量则明显东向偏离台湾东北陆坡(图 2a, 图 4b, d), 西部陆坡则被表层的反气旋式涡旋覆盖(图 2b, “+”标注); 台湾东北附近海域流场的这一显著变化特征自 9 月 14 日泰利台风入境, 持续到东部陆坡陆架一侧的气旋式涡旋完全消亡的 9 月 30 日。此外, 位于台湾东北西部陆坡上的深水流速观测数据则显示, 台风过境后沿西部陆坡(D1—D2)西南向流动的陆坡逆流的强度在此期间也显著减弱(图 3c, d;

图 5c)。

台湾东北附近海域流场发生显著改变的同时, 台湾东北跨陆坡入侵陆架的强度也发生了显著变化。自 9 月 14 日泰利台风入境台湾东北附近海域后, 台湾东北东部陆坡的黑潮入侵强度显著减弱, 并产生负的极值, 从图 5a 中可以发现该极值几乎接近 0 值, 而台湾东北西部陆坡的黑潮入侵则显著增强, 产生正的极值。台湾东北陆坡附近黑潮入侵强度的这一显著变化特征在海表地转流速数据(图 5b)和分析数据(图 5a)的结果中均有较一致的体现。

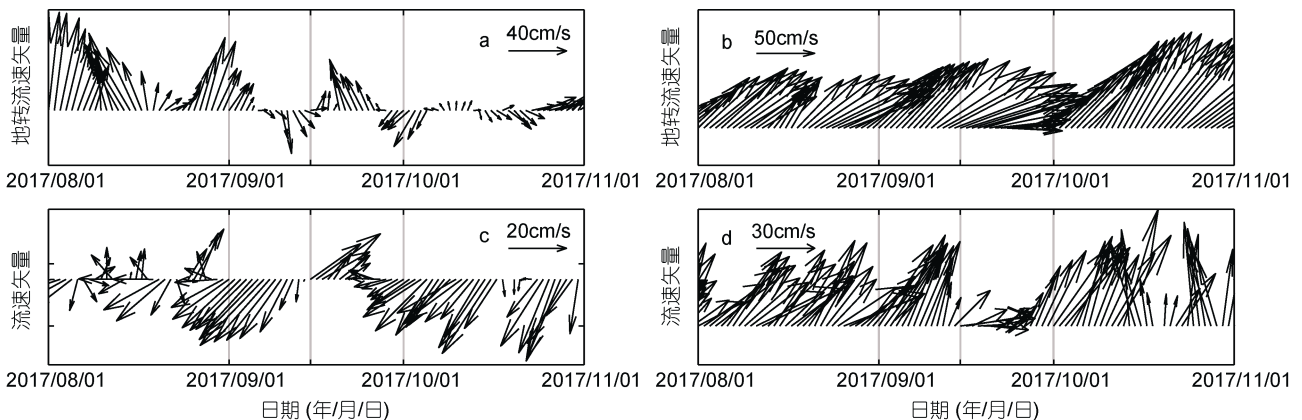


图 4 西部陆坡 P 点处、东部陆坡 Q 点处地转流速矢量和流速矢量

Fig. 4 The geostrophic velocity and velocity at the site P and site Q

注: a: P 点处地转流速矢量; b: Q 点处地转流速矢量; c: P 点处流速矢量; d: Q 点处流速矢量; 地转流速矢量取自卫星高度计数据, 流速矢量则为分析数据的水平流速垂直积分按深度平均的结果

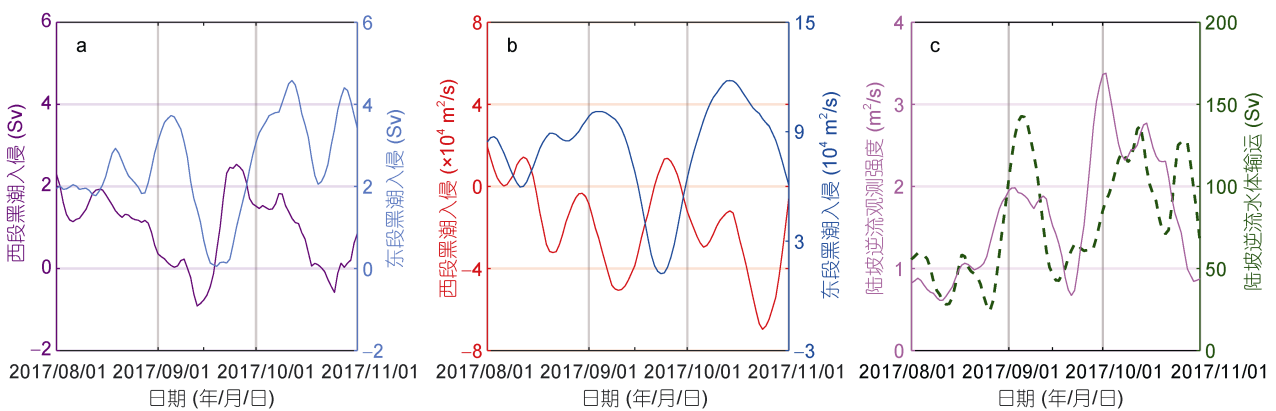


图 5 台湾东北黑潮跨陆坡入侵强度及陆坡逆流强度的变化

Fig. 5 The Kuroshio intrusion intensity through the continental slope off the northeastern Taiwan and the counterflow intensity

注: a: 分析数据跨陆坡水体输运积分结果, 西段 KI 为 D1—D2 区段, 东段 KI 为 D2—D3 区段; b: 海表高度计数据地转流速积分结果, 西段 SKI 由 D1—D2 区段地转流速计算得到, 东段 SKI 由 D2—D3 区段地转流速计算得到; c: 观测站点 P 处 ADCP 现场观测流速剖面西南向水平流速的垂直积分结果(实线)及分析数据 PL 断面陆坡逆流水体输运垂直积分结果(虚线)

3 台湾东北附近海域跨陆坡位势涡度的变化

Yin 等(2017)的研究表明, 台湾东北西部陆坡附近的位势涡度是研究台湾东北西部陆坡黑潮入侵东

海陆架强度变化的重要变量。图 6 对比了台风过境前后台湾东北西部陆坡附近水体的位势涡度沿 PL 断面(图 1)的变化, 表层(0m—50m)和次表层(50m—100m)垂直平均的位势涡度沿 PL 断面的分布分别如图 6a

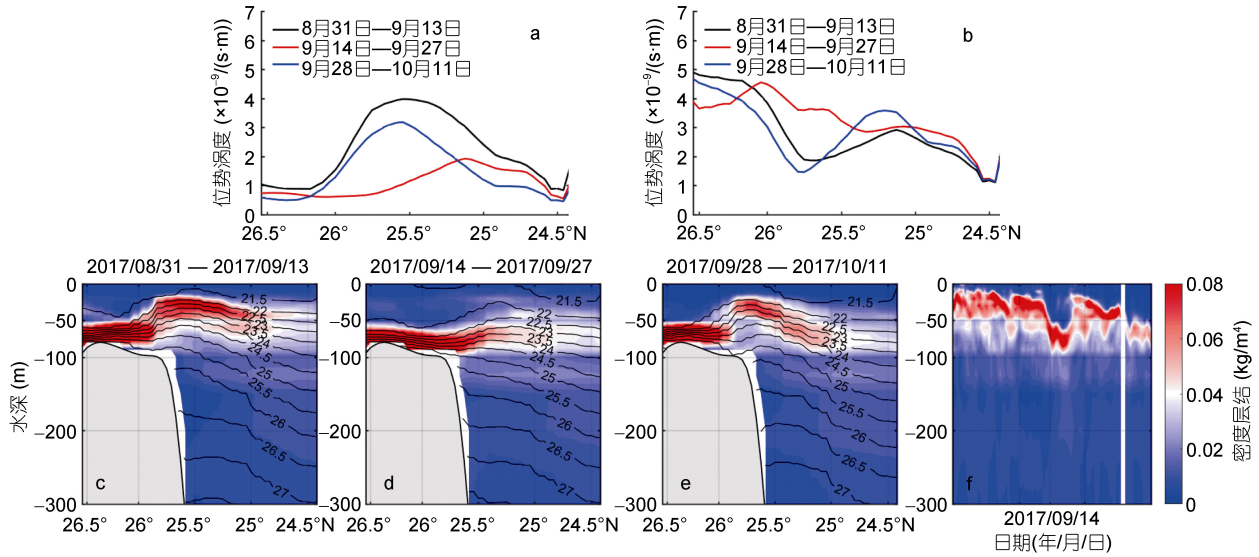


图6 垂直平均的表层(0—50m)和次表层(50—100m)位势涡度沿 PL 断面分布的变化(a, b)、水体层结($\partial\rho/\partial z$)及位势密度(ρ , 单位: kg/m^3)沿 PL 断面分布(c—e)、P 点处水体层结随时间的变化(f)

Fig.6 The depth averaged potential vorticity in the surface layer (0—50m) and subsurface layer (50—100m) along the section PL (a,b); the vertical stratification ($\partial\rho/\partial z$) and potential density (ρ , unit: kg/m^3) distribution along the section PL (c—e); and vertical stratification distribution as a function of time and depth at the site P (f).

注: a: 表层位势涡度分布; b: 次表层位势涡度分布; c—e 中黑色等值线: 水体位势密度

和图 6b 所示。泰利台风过境前, 西部陆坡附近表层水体位势涡度的跨陆坡分布为上凸特征, 泰利台风过境后, 台湾东北西部陆坡附近海域表层水体(0—50m)的层结显著减弱(图 6f), 减弱了西部陆坡附近表层的位势涡度, 进而削弱了西部陆坡表层水体跨陆坡方向的位势涡度梯度(图 6a), 利于黑潮表层水体在西部陆坡入侵东海陆架。与表层明显不同, 台风过境前, 西部陆坡附近次表层水体位势涡度的跨陆坡分布为下凹特征, 即次表层水体在西部陆坡附近的位势涡度较小(西部陆坡附近次表层存在较强的陆坡逆流, 且为低位涡水体), 泰利台风过境后, 台湾东北西部陆坡附近次表层水体的层结显著增强(图 6f), 增加了西部陆坡附近次表层的位势涡度, 进而削弱了西部陆坡次表层水体跨陆坡方向的位势涡度梯度(图 6b), 利于黑潮次表层水体在西部陆坡入侵东海陆架。台湾东北陆坡附近表层水体和次表层水体位势涡度梯度的显著减弱合理地解释了图 5 中西部陆坡黑潮跨陆坡入侵强度显著增强的现象。

针对台湾东北东部陆坡黑潮入侵东海陆架强度显著减弱的现象(图 5), 我们采用与西部陆坡同样的分析方法给出了台风过境前后沿 QL 断面的位势密度分布及位势涡度分布。从图 7 中可以发现, 虽然台风过境前, 东部陆坡的跨陆坡位势涡度分布特征与西部陆坡存在较大差异, 但是台风过境后东部陆坡附

近水体层结的变化趋势与西部陆坡相似: 表现为表层水体层结的显著减弱和次表层水体层结的显著增强。表层水体层结的显著减弱, 降低了东部陆坡附近表层特别是陆架一侧的位势涡度, 但却并未明显减弱东部陆坡附近表层跨陆坡方向的位势涡度梯度, 而东部陆坡陆架一侧表层的强气旋式涡旋(图 2b)则不利于黑潮表层水体在东部陆坡入侵东海陆架。次表层水体层结的显著增强(图 7f)则显著增强了东部陆坡次表层的跨陆坡位势涡度梯度(图 7b), 同样不利于东部陆坡附近黑潮次表层水体入侵东海陆架。因此, 台湾东北东部陆坡次表层黑潮入侵陆架强度显著减弱的现象也和跨陆坡方向位势涡度梯度的显著增强关系密切。

值得一提的是, 虽然流场涡度(ξ)项的变化也对水体位势涡度(q)存在一定的贡献, 但是陆坡附近水体相对涡度项的显著变化相对于台湾东北局地的科式项(f)较小, 流场涡度的变化对位势涡度变化的贡献并不显著。水体层结项($\partial\rho/\partial z$)的变化在台湾东北陆坡附近跨陆坡位势涡度分布的变化中占据主导地位。

4 讨论

近期的研究(Vélez-Belchí *et al.*, 2013, Yin *et al.*, 2017, 2019b)表明, 台湾以东抵达的大洋中尺度涡旋会显著地影响黑潮强度, 黑潮流轴和黑潮水体的位势涡

度, 并使得台湾东北黑潮入侵东海陆架的特征发生改变。具体表现为: 台湾以东抵达的气旋式(反气旋式)中尺度涡旋会减弱(增强)黑潮强度, 使得黑潮主轴西(东)偏, 并减弱(增强)台湾东北跨西部陆坡的位势涡度梯度, 进而增强(减弱)台湾东北西部陆坡黑潮入侵东海陆架的强度。因此, 台湾以东中尺度涡旋极性的转变的和上游黑潮状态的显著变化可能是此次泰利台风过境前后黑潮入侵陆架发生显著变化的原因。为了讨

论这一可能性, 我们给出了泰利台风过境前后 3 个月内 ETC 通道的黑潮强度(KIN)、黑潮流向(KAA)、黑潮流轴位置(KAP)的时间序列。图 2 和图 8 的结果表明: 泰利台风过境前后的一个月时间内, 台湾以东均受反气旋式中尺度涡旋的影响, 并未发生中尺度涡旋极性的转变, 并且 ETC 通道的黑潮强度, 黑潮流向和黑潮流轴位置也均未发生明显的改变。因此可以基本排除台湾以东中尺度涡旋和上游黑潮状态的因素。

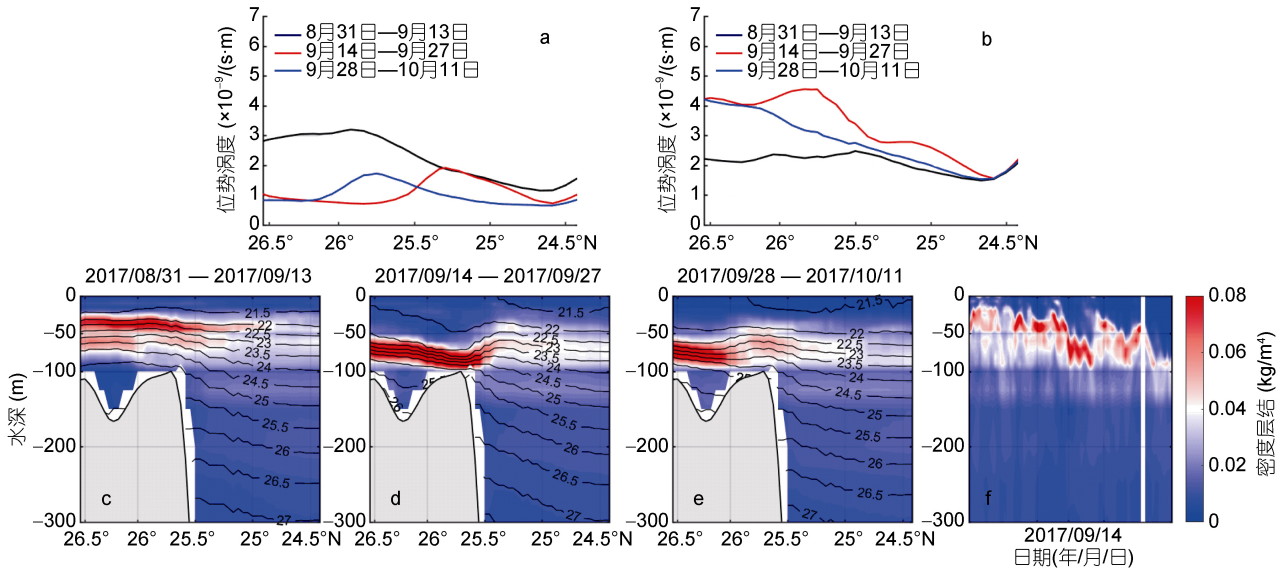


图 7 垂直平均的表层(0—50m)、次表层(50—100m)位势涡度沿 QL 断面分布的变化(a, b); 水体层结($\partial\rho/\partial z$)及位势密度(ρ , 单位: kg/m^3)沿 QL 断面分布(c—e)、Q 点处水体层结随时间的变化(f)

Fig.7 The depth averaged potential vorticity in the surface layer (0—50m) and subsurface layer (50—100m) along the section QL (a,b); the vertical stratification ($\partial\rho/\partial z$) and potential density (ρ , unit: kg/m^3) distribution along the section QL (c—e); and vertical stratification distribution as a function of time and depth at the site Q (f).

注: a: 表层位势涡度分布; b: 次表层位势涡度分布; c—e 中的黑色等值线: 水体位势密度

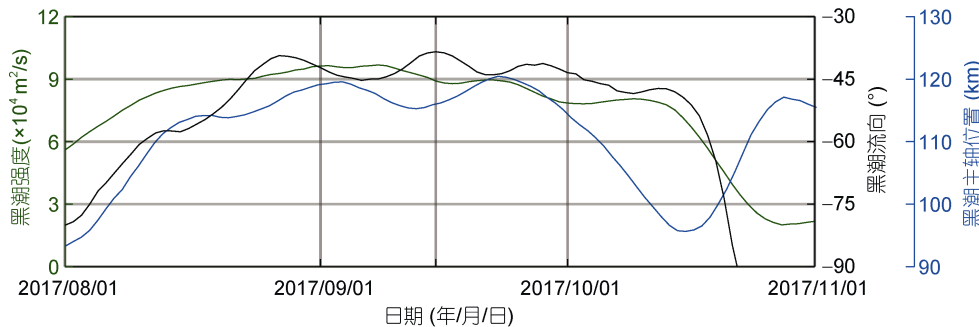


图 8 ETC 通道(图 1)黑潮强度、黑潮流向、黑潮流轴位置的时间序列

Fig.8 The KIN, KAA, and KAP through the section ETC (Fig.1)

以往的研究还表明, 台风会加强其过境附近海域海水的混合, 显著加深混合层深度(黄立文等, 2007; Wu *et al*, 2012)并改变海表流场的流速结构(Zheng *et al*, 2014)。图 2、图 6、图 7 的结果也表明: 2017 年 9 月中旬过境的超强台风泰利的强混合作用显著加深

了混合层深度, 并改变了台湾东北附近海域的水体层结(表层水体层结显著减弱, 次表层水体层结显著增强)和流场的涡度, 从而显著改变了台湾东北陆坡附近海域跨陆坡方向水体位势涡度的分布, 进而导致台湾东北黑潮入侵东海陆架强度发生显著变化。需

要注意的是, 台风风场的强混合作用(黄立文等, 2007; Wu *et al.*, 2012)和局地流场显著变动后覆盖至西部陆坡附近海域的反气旋式涡旋(图 2b)以及陆坡逆流的显著减弱(图 3, 图 5c)均可能使得台湾东北西部陆坡附近的水体层结发生显著改变, 区分它们对西部陆坡附近水体层结改变的贡献也是较有价值的研究内容, 但本文对此不作展开论述。考虑到这三个因素中, 只有台风风场的强混合作用才能同时造成台风过境后西部陆坡和东部陆坡附近水体层结表层减弱、次表层加强的变化特征, 本文认为超强台风泰利的强混合作用导致的水体层结的变化应为主导作用。

本文的研究虽然为单个案例, 但是研究结果揭示的台风对台湾东北黑潮入侵陆架产生影响的關鍵过程及机制却具有积极的推广意义。夏半年, 台湾东北黑潮主轴偏东, 黑潮主体主要与纬向的东部陆坡发生碰撞, 使得黑潮在东部陆坡显著入侵陆架, 并在次表层产生了沿西部陆坡西南向流动的一支较强的陆坡逆流(Hsueh *et al.*, 1993; Tang *et al.*, 2000; Wong *et al.*, 2000; Wu *et al.*, 2008; He *et al.*, 2019), 从而形成了西部陆坡附近等位势密度线上凸的结构(Yin *et al.*, 2017), 并进一步形成了西部陆坡表层的跨陆坡“上凸型”位势涡度分布和次表层的跨陆坡“下凹型”位势涡度分布, 不利于黑潮水体在台湾东北西部陆坡入侵东海陆架。需要指出的是, 西部陆坡表层的跨陆坡“上凸型”位势涡度分布及其对黑潮水体入侵陆架的阻碍作用已在 Yin 等(2017)的研究中指出, 在此不再赘述, 而本文则提出了西部陆坡次表层的跨陆坡“下凹型”位势涡度分布, 并认为西部陆坡附近次表层的跨陆坡“下凹型”位势涡度分布与表层的跨陆坡“上凸型”位势涡度分布同样起到加强台湾东北西部陆坡跨陆坡位势涡度梯度的作用, 从而共同组成了台湾东北西部陆坡附近的“位势涡度障碍”, 不利于夏半年西部陆坡黑潮水体的跨陆坡入侵。与西部陆坡不同, 东部陆坡附近的次表层不存在沿陆坡流动的陆坡逆流, 因此不会形成等位势密度跃层上凸的结构, 从而不存在西部陆坡附近那样强的跨陆坡“位势涡度障碍”。夏半年, 台湾东北附近海域过境的台风则会显著地加强其下界面海水的混合, 加深其过境海域的混合层深度(黄立文等, 2007; Wu *et al.*, 2012), 从而显著改变其下界面海水的层结: 表层水体层结减弱, 次表层水体层结则加强。这一变化将使得台湾东北西部陆坡附近隆起的位势密度跃层下沉, 进而分别削弱了西部陆坡附近表层和次表层的“位势涡度障碍”, 利于黑

潮水体在西部陆坡入侵东海陆架; 而东部陆坡次表层的层结也会相应地显著加强, 从而形成强的跨陆坡位势涡度梯度, 不利于黑潮次表层水在东部陆坡入侵陆架。最后需要指出的是, 泰利台风路径的位置仍存在一定的特殊性, 所以台风诱导台湾东北黑潮, 特别是表层黑潮水体入侵东海陆架强度发生显著变化的特征还有待更多台风案例研究的总结和确认。此外, 台风对台湾东北黑潮入侵陆架产生显著影响的机制在不同季节、台湾以东黑潮受不同中尺度涡旋影响等背景条件下的区别, 以及台风诱导台湾东北黑潮入侵陆架强度发生的显著变化对东海陆架上黑潮分支流的影响等也会是将来值得探讨和研究的内容。

5 结论

本文利用卫星高度计数据和分析数据并结合同时期现场深水潜标的流速观测数据研究了 2017 年 9 月台湾以东黑潮受反气旋式中尺度涡旋影响的条件下, 过境的泰利台风诱导台湾东北附近海域黑潮入侵东海陆架的强度发生显著变化的案例。泰利台风过境后, 台湾东北附近海域的流场, 位势密度场, 以及黑潮入侵东海陆架的强度均发生了明显的变化。东部陆坡附近黑潮流速发生东向偏离陆架的现象, 而沿西部陆坡西南向流动的陆坡逆流强度则显著减弱。台湾东北附近海域更为重要的变化则是陆坡附近位势密度层结和黑潮入侵东海陆架强度的显著改变, 泰利台风过境后, 陆坡附近表层水体的层结显著减弱, 而次表层水体的层结则显著增强; 台湾东北西部陆坡(D1—D2)黑潮入侵陆架的强度显著增强, 而东部陆坡(D2—D3)黑潮入侵陆架的强度则显著减弱。

超强台风泰利的强混合作用加深了台湾东北附近海域的混合层深度, 使得台风入境后的一段时间内, 台湾东北附近海域表层水体的层结显著减弱, 次表层水体的层结显著加强, 同时局地流场的变化也有利于维持甚至加强这一变化。特别是在西部陆坡, 表层反气旋式涡旋的覆盖和次表层陆坡逆流的减弱均有利于西部陆坡附近位势密度跃层下沉, 从而利于减弱表层水体的层结并加强次表层水体的层结。需要指出的是, 本文的研究并没有更深入探讨和区分台风的混合作用和流场的变化对台湾东北西部陆坡附近水体层结显著变化的贡献。考虑到只有台风风场的强混合作用才能同时造成西部陆坡和东部陆坡附近水体层结表层减弱、次表层加强的变化特征, 本文认为台风的强混合作用导致的混合层加深应为主导作用。

台湾东北陆坡附近水体层结发生显著变化更为重要的作用则是改变了陆坡附近水体的位势涡度分布,削弱了西部陆坡原本存在的跨陆坡位势涡度梯度,利于黑潮水体在西部陆坡入侵东海陆架,同时加强了东部陆坡次表层的跨陆坡位势涡度梯度,不利于黑潮次表层水体在东部陆坡入侵东海陆架,最终导致台湾东北黑潮水体入侵陆架的强度在西部陆坡显著增强,而在东部陆坡显著减弱。此外,本文还区分了台湾东北西部陆坡附近表层的跨陆坡“上凸型”位势涡度分布与次表层的跨陆坡“下凹型”位势涡度分布,并认为次表层“下凹型”位势涡度分布也应作为台湾东北西部陆坡附近“位势涡度障碍”的重要组成部分,在夏半年起到阻碍黑潮水在台湾东北西部陆坡入侵陆架的作用。

致谢 本文用到的台风最佳路径数据可通过中国台风网官方网站 <http://www.typhoon.org.cn/> 下载,分析数据可通过 HYCOM 官方网站 <https://hycom.org/> 下载,卫星高度计数据可通过 AVISO 官方网站 <http://www.avisocnes.net> 下载,ADCP 现场测流数据的获取则通过自然资源部第一海洋研究所船队的东海共享航次(航次编号: NORC2017-02 & NORC2018-01)完成。在此,对以上机构、船队和参与各航次的船员表示感谢!此外,课题组杨兵博士,胡放,赵新华,王凯等也全程参与了各个航次潜标的回收与布放工作,一并表示感谢!于楠也参与了本文文稿格式的编辑和修改,十分感谢!最后,本文的研究工作还要感谢中国科学院海洋研究所以及中国科学院海洋环流与波动重点实验室的支持。

参 考 文 献

- 王玉衡,赵亮,沈家葳,2017. 黑潮营养盐输入对东海陆架浮游生态系统影响的模型研究. *海洋与湖沼*, 48(6): 1346—1354
- 何源首,胡珀,侯一筠,2019. 台湾东北黑潮入侵东海陆架强度的变化规律: 持续一年的 ADCP 现场流速观测. *海洋与湖沼*, 50(6): 1201—1208
- 杨德周,尹宝树,侯一筠等,2017. 黑潮入侵东海陆架途径及其影响研究进展. *海洋与湖沼*, 48(6): 1196—1207
- 宋金明,袁华茂,2017. 黑潮与邻近东海生源要素的交换及其生态环境效应. *海洋与湖沼*, 48(6): 1169—1177
- 黄立文,邓健,2007. 黄、东海海洋对于台风过程的响应. *海洋与湖沼*, 38(3): 246—252
- Chang Y C, Tseng R S, Centurioni L R, 2010. Typhoon-induced strong surface flows in the Taiwan Strait and Pacific. *Journal of Oceanography*, 66(2): 175—182
- Chen Y L L, Chen H Y, Jan S *et al*, 2009. Phytoplankton productivity enhancement and assemblage change in the upstream Kuroshio after typhoons. *Marine Ecology Progress Series*, 385: 111—126
- Cheng Y H, Ho C R, Zheng Z W *et al*, 2009. An algorithm for cold patch detection in the sea off northeast Taiwan using multi-sensor data. *Sensors*, 9(7): 5521—5533
- Chuang W S, Li H W, Tang T Y *et al*, 1993. Observations of the countercurrent on the inshore side of the Kuroshio Northeast of Taiwan. *Journal of Oceanography*, 49(5): 581—592
- He Y S, Hu P, Yin Y Q *et al*, 2019. Vertical Migration of the Along-Slope Counter-Flow and Its Relation with the Kuroshio Intrusion off Northeastern Taiwan. *Remote Sensing*, 11(22): 2624.
- Hsueh Y, Chern C S, Wang J, 1993. Blocking of the Kuroshio by the continental shelf northeast of Taiwan. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 98(C7): 12351—12359
- Hu D X, Wu L X, Cai W J *et al*, 2015. Pacific western boundary currents and their roles in climate. *Nature*, 522(7556): 299—308
- Liu X H, Chen D K, Dong C M *et al*, 2016. Variation of the Kuroshio intrusion pathways northeast of Taiwan using the lagrangian method. *Science China Earth Sciences*, 59(2): 268—280
- Liu X H, Dong C M, Chen D K *et al*, 2014. The pattern and variability of winter Kuroshio intrusion northeast of Taiwan. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 119(8): 5380—5394
- Liu X, Wei J, 2015. Understanding surface and subsurface temperature changes induced by tropical cyclones in the Kuroshio. *Ocean Dynamics*, 65(7): 1017—1027
- Liu X, Wei J, Zhang D L *et al*, 2019a. Parameterizing sea surface temperature cooling induced by tropical cyclones: 1. Theory and an application to typhoon Matsa (2005). *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 124(2): 1215—1231
- Liu X, Zhang D L, Guan J, 2019b. Parameterizing sea surface temperature cooling induced by tropical cyclones: 2. Verification by ocean drifters. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 124(2): 1232—1243
- López-López L, Molinero J C, Tseng L C *et al*, 2012. Effects of typhoons on gelatinous carnivore zooplankton off northern Taiwan. *Cahiers de Biologie Marine*, 53(3): 349—355
- Morimoto A, Kojima S, Jan S *et al*, 2009. Movement of the Kuroshio axis to the northeast shelf of Taiwan during typhoon events. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 82(3): 547—552
- Oey L Y, Hsin Y C, Wu C R, 2010. Why does the Kuroshio northeast of Taiwan shift shelfward in winter? *Ocean Dynamics*, 60(2): 413—426
- Shen M L, Tseng Y H, Jan S, 2011. The formation and dynamics of the cold-dome off northeastern Taiwan. *Journal of Marine Systems*, 86(1—2): 10—27
- Siswanto E, Ishizaka J, Morimoto A *et al*, 2008. Ocean physical and biogeochemical responses to the passage of Typhoon Meari in the East China Sea observed from Argo float and multiplatform satellites. *Geophysical Research Letters*, 35(15): L15604
- Tang T Y, Tai J H, Yang Y J, 2000. The flow pattern North of Taiwan and the migration of the Kuroshio. *Continental Shelf*

- Research, 20(4—5): 349—371
- Tsai Y, Chern C S, Jan S *et al*, 2013. Numerical study of cold dome variability induced by typhoon Morakot (2009) off northeastern Taiwan. *Journal of Marine Research*, 71(1—2): 109—131
- Vélez-Belchí P, Centurioni L R, Lee D K *et al*, 2013. Eddy induced Kuroshio intrusions onto the continental shelf of the East China Sea. *Journal of Marine Research*, 71(1—2): 83—107
- Wong G T F, Chao S Y, Li Y H *et al*, 2000. The Kuroshio edge exchange processes (KEEP) Study — an introduction to hypotheses and highlights. *Continental Shelf Research*, 20(4—5): 335—347
- Wu C R, Hsin Y C, Chiang T L *et al*, 2014. Seasonal and interannual changes of the Kuroshio intrusion onto the East China Sea shelf. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 119(8): 5039—5051
- Wu C R, Lu H F, Chao S Y, 2008. A numerical study on the formation of upwelling off northeast Taiwan. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 113(C8): C08025
- Wu C R, Wang Y L, Lin Y F *et al*, 2017. Intrusion of the Kuroshio into the South and East China Seas. *Scientific Reports*, 7, 7895
- Wu Q Y, Chen D K, 2012. Typhoon-induced variability of the oceanic surface mixed layer observed by Argo Floats in the western North Pacific Ocean. *Atmosphere-Ocean*, 50(S1): 4—14
- Xu F H, Yao Y, Oey L *et al*, 2017. Impacts of pre-existing ocean cyclonic circulation on sea surface Chlorophyll-a concentrations off northeastern Taiwan following episodic typhoon passages. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 122(8): 6482—6497
- Xu L J, Yang D Z, Benthuisen J A *et al*, 2018. Key dynamical factors driving the Kuroshio subsurface water to reach the Zhejiang coastal area. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 123(12): 9061—9081
- Yang D Z, Yin B S, Liu Z L *et al*, 2011. Numerical study of the ocean circulation on the East China Sea shelf and a Kuroshio bottom branch northeast of Taiwan in summer. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 116(C5): C05015
- Yang D Z, Yin B S, Liu Z L *et al*, 2012. Numerical study on the pattern and origins of Kuroshio branches in the bottom water of southern East China Sea in summer. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 117(C2): C02014
- Yang D Z, Huang R X, Yin B S *et al*, 2018a. Topographic beta spiral and onshore intrusion of the Kuroshio current. *Geophysical Research Letters*, 45(1): 287—296
- Yang D Z, Yin B S, Chai F *et al*, 2018b. The onshore intrusion of Kuroshio subsurface water from February to July and a mechanism for the intrusion variation. *Progress in Oceanography*, 167: 97—115
- Yin W B, Huang D J, 2019a. Short term variations in the surface upwelling off northeastern Taiwan observed via satellite data. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 124(2): 939—954
- Yin Y Q, Lin X P, He R Y *et al*, 2017. Impact of mesoscale eddies on Kuroshio intrusion variability northeast of Taiwan. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 122(4): 3021—3040
- Yin Y Q, Lin X P, Hou Y J, 2019b. Seasonality of the Kuroshio intensity east of Taiwan modulated by mesoscale eddies. *Journal of Marine Systems*, 193: 84—93
- Ying M, Zhang W, Yu H *et al*, 2014. An overview of the China meteorological administration tropical cyclone database. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 31(2): 287—301
- Zhao Y, Yu R C, Kong F Z *et al*, 2019. Distribution patterns of picosized and nanosized phytoplankton assemblages in the East China Sea and the Yellow Sea: implications on the impacts of Kuroshio intrusion. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 124(2): 1262—1276
- Zheng Z W, Zheng Q A, Lee C Y *et al*, 2014. Transient modulation of Kuroshio upper layer flow by directly impinging typhoon Morakot in East of Taiwan in 2009. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 119(7): 4462—4473
- Zhou P, Song X X, Yuan Y Q *et al*, 2018. Intrusion of the Kuroshio subsurface water in the southern East China Sea and its variation in 2014 and 2015 traced by dissolved inorganic iodine species. *Progress in Oceanography*, 165: 287—298

THE INTENSITY OF KUROSHIO INTRUSION OFF NORTHEASTERN TAIWAN UNDER THE INFLUENCE OF SUPER TYPHOON TALIM

HE Yuan-Shou^{1,2}, HU Po^{1,3,4}, YIN Yu-Qi^{1,3,4}, HOU Yi-Jun^{1,2,3,4}

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

Abstract Based on satellite altimeter and analysis data, in conjunction with mooring observations, we studied the variations of the flow field, potential density field, potential vorticity (PV) field and Kuroshio intrusion intensity off the northeastern Taiwan under the influence of super typhoon Talim. The results suggest that super typhoon Talim significantly weakened (enhanced) the potential vorticity gradient across the western (eastern) slope off northeastern Taiwan by changing the flow field and potential density field, thus, resulting in the enhancement (weakening) of the Kuroshio intrusion through the western (eastern) slope. In addition, this study distinguished the “downward concave” crossshelf PV distribution in the subsurface layer from the “upward convex” crossshelf PV distribution in the surface layer near the western slope. At last, we proposed the mechanisms of typhoons in the atmosphere affecting the Kuroshio intrusion off the northeastern Taiwan.

Key words northeastern Taiwan; Kuroshio intrusion; typhoon Talim; potential vorticity; vertical stratification; counter-flow