

西北太平洋超强台风 Tembin(2012)引起的 海表面降温与强混合研究*

管守德^{1, 2, 3} 侯一筠^{2, 4}

(1. 中国海洋大学 物理海洋教育部重点实验室/海洋高等研究院 青岛 266100; 2. 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; 3. 中国海洋大学 三亚海洋研究院 三亚 572000; 4. 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)

摘要 鉴于台风等极端海洋环境下现场观测资料的匮乏, 本文综合了多源卫星遥感和 Argo 浮标剖面观测资料分析了西北太平洋和南海上层海洋对超强台风 Tembin(2012)的响应。Tembin 引起了较强的海表面温度降低, 降温主要集中在台风路径附近, 最大降温为 10.3°C, 出现在朝鲜半岛南部的近岸海区; 微波+红外遥感融合观测海表面温度数据可以弥补单一微波遥感观测在近岸海区缺测的不足, 但观测海表面降温比单一微波遥感观测偏小; 基于 Argo 观测的垂向高分辨率温盐剖面 and 混合参数化方法, 发现台风后上层海洋混合明显增强, 其混合率增强可达 10 倍以上。

关键词 超强台风 Tembin; 海表面温度; 微波遥感海表面温度数据; 微波+红外遥感融合海表面温度数据; Argo 浮标; 混合率

中图分类号 P733 doi: 10.11693/hyhz20191200276

热带气旋, 西北太平洋称之为台风, 是发生在热带副热带海洋的一种强烈的灾害性天气系统。通过海-气界面的热量交换, 热带气旋从温暖的上层海洋吸收热量和水汽来维持自身强度或继续强化(Emanuel, 1986; 陈大可等, 2013)。台风经过海洋时, 通常在上层海洋引起复杂而剧烈的海流和温盐变化: 热带气旋强烈的风应力可在混合层激发较强的近惯性流(Sanford *et al*, 2007), 振幅约为 $O(1\text{m/s})$; 强流的剪切不稳定效应可引起混合层和温跃层顶的混合和卷夹, 进而降低海表面温度(sea surface temperature, SST), 其降温幅度可达 1—6°C(Price, 1981)。海表面温度的降低, 可减小海洋向大气的热通量并抑制热带气旋的强度发展, 通常称之为海洋的负反馈作用(Chang *et al*, 1978)。因此, 准确描述上层海洋对热带气旋的响应并分析其物理机制, 可以加深对海-气界面相互作用的理解, 并对改进热带气旋模式预报具有重要

作用(Guan *et al*, 2017)。

前人研究结果表明, 台风引起的海表面降温具有很强的不对称性, 路径右侧降温明显大于左侧; 这主要是由于热带气旋路径右侧的局地风旋转向为与近惯性流速的旋转方向一致(在北半球均为顺时针方向), 因此产生共振效应, 导致近惯性流速不断加强, 而左侧则刚好相反, 因此台风路径右侧近惯性流明显比左侧强(Price, 1981); 台风路径右侧较强的近惯性流, 导致了更强的剪切不稳定效应和混合, 使得右侧降温更大。同时, 上层海洋对台风响应明显受到台风之前海洋背景场(如中尺度涡、内潮等)的调制(Lin *et al*, 2005; Jaimes *et al*, 2009; 周慧等, 2017)。例如, Jaimes 等(2009)利用多源现场观测资料, 比较分析了墨西哥湾冷涡和暖涡在飓风 Rita(2005)期间的海表面降温, 发现暖涡的降温不到 1°C, 而冷涡的降温则达到了 4—5°C。另外, 台风中心的风应力旋度为正, 可

* 国家重点研发计划, 2017YFC1404101 号; 国家自然科学基金, 41876011 号, U1706216 号; 印-太海洋环境变异与海气相互作用, GASI-IPOVAI-01-03 号。管守德, 副教授, E-mail: guanshoude@ouc.edu.cn

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

收稿日期: 2019-12-26, 收修改稿日期: 2020-02-20

在混合层底和温跃层中引起较强的上升流; Guan 等 (2014) 利用潜标数据观测到超强台风 Megi(2010) 下的温跃层抬升可达 50m; 台风引起的上升流可以加强甚至主导海洋中尺度气旋涡的生成, 甚至进而改变大尺度环流结构(Sun *et al.*, 2009)。

西北太平洋是世界上热带气旋发生频率最高, 平均强度最大的海域(D'Asaro *et al.*, 2011), 平均每年经过西太平洋海域的台风为 16 次, 约是发生在大西洋和墨西哥湾的飓风频次的 2 倍(Webster *et al.*, 2005)。Guan 等(2018)发现随着全球变暖, 西北太平洋台风经过海区的上层海洋热含量逐年升高, 台风强度近四十年来也呈现长期增长趋势。然而, 与北大西洋、墨西哥湾和东北太平洋海域相比, 目前西北太平洋和南海海域关于台风-海洋相互作用的研究相对较少。本文基于微波辐射计、高度计和 Argo 浮标等资料研究了西北太平洋和南海上层海洋对 2012 年超强台风 Tembin 的响应。超强台风 Tembin 是 2012 年西北太平洋第 15 号台风, 其具有强度大、移动路径复杂, 生命周期长, 且台风前的海洋背景场较为复杂等特点(图 1), 因此本文选择 Tembin 作为案例来分析上层海洋对台风的响应。

1 台风 Tembin 与数据介绍

由于台风强烈的风应力, 台风过境期间常常伴随着狂风、巨浪和强流, 使得台风期间针对上层海洋的现场观测极为困难和危险。因此, 本文利用多源卫星遥感观测的海表面数据和 Argo 浮标观测的海洋内部温盐剖面数据, 综合分析上层海洋对 2012 年超强台风 Tembin 的响应。

1.1 超强台风 Tembin

超强台风 Tembin 是 2012 年西北太平洋第 15 号台风。台风路径数据来源于美国联合台风警报中心 (Joint Typhoon Warning Center, JTWC); JTWC 提供了西太平洋台风的中心位置、中心气压、最大风速及最大风速半径等参数信息, 时间分辨率为 6h。如图 1 所示, 超强台风 Tembin 于 2012 年 8 月 19 日在西北太平洋洋面上生成, 其强度逐渐加强并向北移动, 20 日夜 18 时左右升级为超强台风(4 级, 根据 Saffir-Simpson 热带气旋强度分级方法)并继续向北移动, 21 日后其强度逐渐降低并转而向西移动, 23 日晚间穿过台湾南部区域, 24 日其强度降级为台风(1 级)并进入中国南海北部海域, 之后在南海转了一个逆时针的圈, 27 日再度经过台湾东部海域后, 沿北偏东方向快

速移动, 最终于 30 日在韩国登陆。

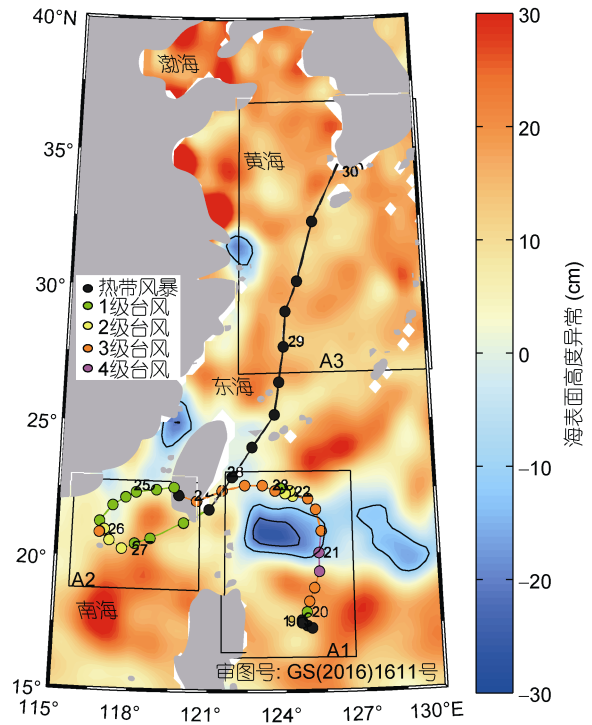


图 1 超强台风 Tembin 路径和强度示意图

Fig.1 The track and intensity of super typhoon Tembin in the western north Pacific and South China Sea
注: 彩色点划线代表不同台风强度; 重点关注海域 A1、A2 和 A3 用黑色方框标出

1.2 观测数据介绍

微波信号能够穿透云层, 即使在台风期间的强降雨等极端天气条件下, 携带微波传感器的卫星仍然可以获得可靠的 SST 网格化数据。本文利用了 Remote Sensing Systems (www.remss.com) 提供的客观插值网格化 SST 数据 MW OI, 该数据由热带降雨测量卫星 (Tropical Rainfall Measuring Mission, TRMM) 搭载的微波成像仪 (Microwave Imager, TMI) 和 EOS 卫星搭载的高级微波扫描辐射计 (Advanced Microwave Scanning Radiometer, AMSR-E) 观测数据融合而成。该数据产品时间分辨率为 1d, 空间分辨率约为 25km。由于 MW OI 的 SST 空间分辨率仅为 25km, 而且在近岸及岛屿周边会有较多缺测, 因此本文还对比分析了 Remote Sensing Systems 提供的微波+红外遥感融合的 MW+IR 的 SST 数据, 其时间分辨率也是 1d, 空间分辨率是 9km, 有效弥补了 MW 数据空间分辨率不足及近岸或岛屿附近缺测的缺点。

海表面高度异常数据来源于法国 AVISO

(Archiving, Validation and Interpretation of Satellite Oceanographic Data)计划, 该数据融合了多个卫星包括 TOPEX/Poseidon, ERS-1、ERS-2 等的测高数据, 空间分辨率约为 25km, 时间分辨率包括 1d。高度计数据下载网址为: <http://www.aviso.oceanobs.com/en/data>。图 1 显示, 在超强台风 Tembin 生成及影响西北太平洋之前, 吕宋海峡以东有一较强的中尺度冷涡位于台风路径左侧。

鉴于卫星遥感观测数据只能提供海表面信息, 本文还利用了 Argo 浮标观测的高分辨率温度、盐度剖面来分析上层海洋对超强台风 Tembin 的响应, Argo 数据来源于中国 Argo 实时资料中心 (<http://www.argo.org.cn/>)(陈大可等, 2008)。在本文中, 主要利用了 3 对(共 6 个)台风前后的 Argo 观测剖面观测资料, 这些剖面均发生在台风经过观测海域的

前后 3 天之内, 详细时间等信息见表 1。

2 海表面温度响应

如图 1 所示, 为更好地分析上层海洋对超强台风 Tembin 的响应, 依据台风路径和台风前不同海域的海洋背景场特征, 首先将研究海域分为 A1, A2 和 A3 三个海区, 并分别分析各海区对超强台风 Tembin 的响应及海-气相互作用特征。A1 海区为菲律宾、吕宋海峡和台湾岛东部海域, 超强台风 Tembin 在此生成并加强为超强台风; Tembin 在加强到最大强度(4 级台风)后转向西移动, 在台湾岛南部短暂登陆后进入 A2 海区, 即中国南海, Tembin 在 A2 海区转了一个直径约 200km 的圈并徘徊了 4d 之久; 之后, 超强台风 Tembin 再次擦过台湾岛南部后再度进入西北太平洋, 即图 1 所示的 A3 海区, 影响中国东海和黄海后在韩国登陆。

表 1 Argo 数据信息汇总
Tab.1 The information of Argo profiles used in Fig. 6

站位	Argo 编号	台风	台风经过日期 (月/日)	Argo 观测日期 (月/日)	平均混合率(m ² /s)	
					台风前	台风后
P1	2901494	Tembin	08/21	08/20 08/22	2.7×10 ⁻⁵	2.7×10 ⁻⁴
P2	2901530	Tembin	08/19	08/18 08/20	2.5×10 ⁻⁵	5.8×10 ⁻⁵
P3	2901530	Kai-Tak	08/14	08/13 08/15	6.1×10 ⁻⁶	7.9×10 ⁻⁵

微波遥感海表面温度数据(Microwave Optimally Interpolated SST, MW OI SST)是在分析台风引起海表面降温时最常用到的数据。图 2 所示为微波遥感观测的超强台风 Tembin 经过期间及之后海表面温度的变化, 其中图 2i 为 Tembin 引起的最大海表面降温。本文中最大海表面降温定义为, 以 8 月 16—18 日平均海表面温度为初始场, 8 月 19 日—9 月 4 日各个网格点的最低海表面温度减去相应的台风前初始海表面温度即为最大海表面降温。在 8 月 16—18 日(图 2a), 即 Tembin 形成之前, 西北太平洋及南海的海表面温度普遍高于 27°C, 特别是在 A1 海区, SST 高于 28°C 且水平分布比较均匀, 为超强台风 Tembin 生成和发展提供了必要的热量和水汽来源。Tembin 在 A1 海区生成之后, 强度迅速得到加强, 在不到两天的时间内迅速由热带风暴(19 日 0 时)升级为 4 级台风(20 日 18 时), 在 21 日之前由于台风强度较弱, 经过海区的海表面降温并不明显, 只有较小部分海域降温大于 1°C

且主要集中在 Tembin 路径右侧(图 2b 和 i); 8 月 21 日, Tembin 开始转向西移动, 引起了较强的降温, 其最大降温约为 5.3°C, 且降温主要集中在台风路径附近; 由于此时台风达到其生命史的最大强度, 在此海区引起的海表面降温亦为热带海区的最大降温, 另外, 台风前此海区处于一个较大中尺度冷涡的边缘, 在一定程度上增大了海表面降温(图 1)。

8 月 24 日, Tembin 进入 A2 海区, 也引起了较强的降温, 最大降温为 3.3°C, 降温区域主要集中在台风路径附近; 南海区域的降温比台湾岛以东海区弱了 40%, 主要是台风进入南海后强度减弱为 1 级强度导致的。台风路径在南海形成了直径约 200km 的逆时针圈, 虽然台风圈中心部位的相对影响时间更长, 然而在逆时针圈的中心部位则未观测到明显降温, 其主要原因是圈中心位于台风路径左侧, 而台风降温不对称性决定了左侧降温较小(Price, 1981); 值得注意的是, 28 日 Tembin 再次经过台湾东部海区(A1

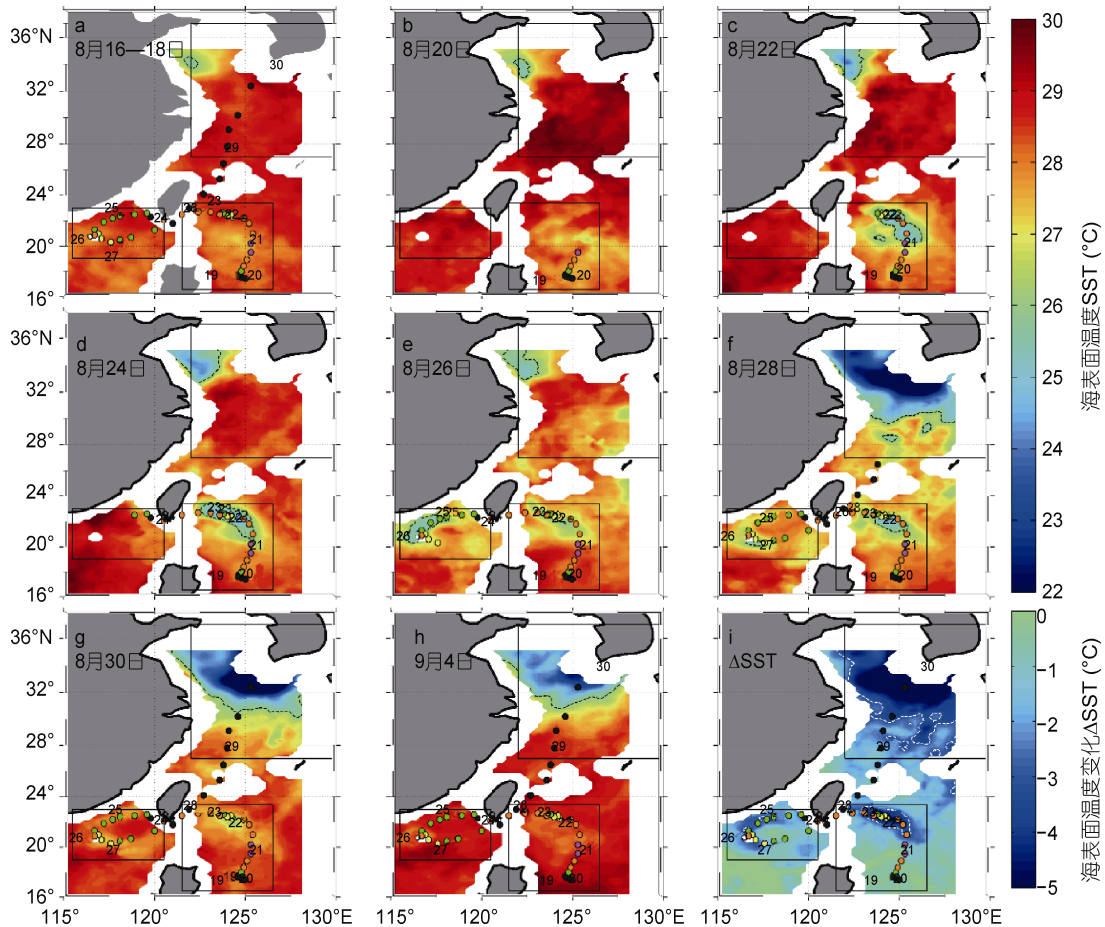


图 2 微波遥感(MW)观测超强台风 Tembin 引起的海表面降温

Fig.2 SST cooling induced by super typhoon Tembin based on MW OI SST

注: a—h: 超强台风 Tembin 经过之前、期间及之后海表面温度的演变特征; 虚线为 26°C 等温线; i: 相对于 8 月 18 日的初始场, 超强台风 Tembin 引起的最大海表面降温; 白色虚线: -3°C 等最大降温线(图 3 同)

海区), 引起了 A1 海区已逐渐恢复的海表面温度再次降低, 减缓了台风后海表面温度的恢复速度, 9 月 4 日时在台风路径附近仍存在较为明显的低温特征(图 2h)。值得注意的是, 在台湾岛东部海区, 虽然海洋的背景混合层深度比南海要厚, 但其降温幅度比南海要大, 主要是由于台风前在路径左侧中尺度冷涡的影响(图 1), 使得该海区混合层变浅, 冷水更容易被卷挟到表层(Guan *et al.*, 2017)。

8 月 28 日夜, 台风进入 A3 海区。由于台风空间范围较大, 在进入 A3 海区之前, 台风外围风力已经在 A3 海区造成了较大的海表面降温(图 2f), 台风风眼到达后又进一步加剧了该海区降温。超强台风 Tembin 在 A3 海区造成了幅度最大、范围最广的海表面降温, 最大降温出现在朝鲜半岛南侧(125.9°E, 32.6°N), 最大幅度达到 10.3°C, 在台风导致海表面

降温的相关报导中仅次于台风 Kai-Tak 在南海造成的 10.8°C 的海表面降温(Chiang *et al.*, 2011)。超强台风 Tembin 在 A3 海区引起海表面降温的另一个显著特点是降温范围广, 3°C 以上海表面降温的范围直径在 700km 以上。超强台风 Tembin 在 A3 近岸海区造成了幅度大、范围广的海表面降温, 参考 Glenn 等(2016)研究, 主要原因有两点: (1) 该海区夏季垂向温度梯度大, 容易把更多冷水卷挟到表层; (2) 由于浅水地形影响, 近岸海区台风引起的近惯性内波表层和底层流速方向相反, 流速垂向剪切大, 诱发剪切不稳定导致强混合。

微波+红外遥感(MW+IR OI SST)可以很好地弥补 MW SST 数据在近岸缺测的不足, 且具有更好地空间分辨率。与图 2 类似, 图 3 所示为微波+红外遥感观测的超强台风 Tembin 经过期间海表面温度的变

化。MW+IR 观测结果显示, 在中国近海, 超强台风 Tembin 也引起了 1—3°C 的海表面降温; 而在朝鲜半岛近岸海区, 降温更为剧烈, 在 5°C 以上。相对来说, 在 MW 和 MW+IR 都有观测值的陆坡与深海海区, MW+IR 观测到的海表面降温比 MW 观测结果稍小。例如, MW+IR 观测的最大降温虽然与 MW 数据出现在同一位置, 但最大降温幅度为 9.7°C, 小于 MW 的 10.3°C。这可能是由于红外遥感观测容易受到台风期间云的阻碍影响, 其观测的海表面降温相对较低 (Haakman *et al*, 2019); 同时红外遥感海表面温度数据空间分辨率远高于微波遥感观测数据 (9km vs 25km), 在利用客观插值方法融合时占的比重更大, 因此微波和红外遥感融合的海表面温度数据一定程度上低估了超强台风 Tembin 引起的海表面降温。图 4 为在台风路径的每一个路径点, 引起的最大海表面

降温在台风中心 100km 以内的平均值。在绝大多数时刻, MW 观测到的海表面降温比 MW+IR 要大。

超强台风 Tembin(2012)引起的较大降温主要出现在近岸陆架海区, 其中最大降温位于朝鲜半岛南侧海区, 台风经过该海区的时间为 8 月 29 日 18 时, 图 5 显示了台风中心 100km 以内风速和海表面温度平均值的时间序列, 最大降温值约 8°C。近年来, 近岸海区海表面温度对台风的响应受到了广泛关注, 海表面降温幅度变化范围也比深海海区要大。例如, 谢玲玲等(2017)通过针对台风期间南海琼东上升流海区海表面温度变化的研究指出, 降温幅度与地形、台风自身参数、台风入射角度等多种因素有关, 极少数情况下甚至会出现增温现象; Shi 等(2019)则发现在南海一次较大的降温事件中, 最大降温(约 4°C)发生在台风后 12d, 由台风后一次冷锋过境引起的再次降温

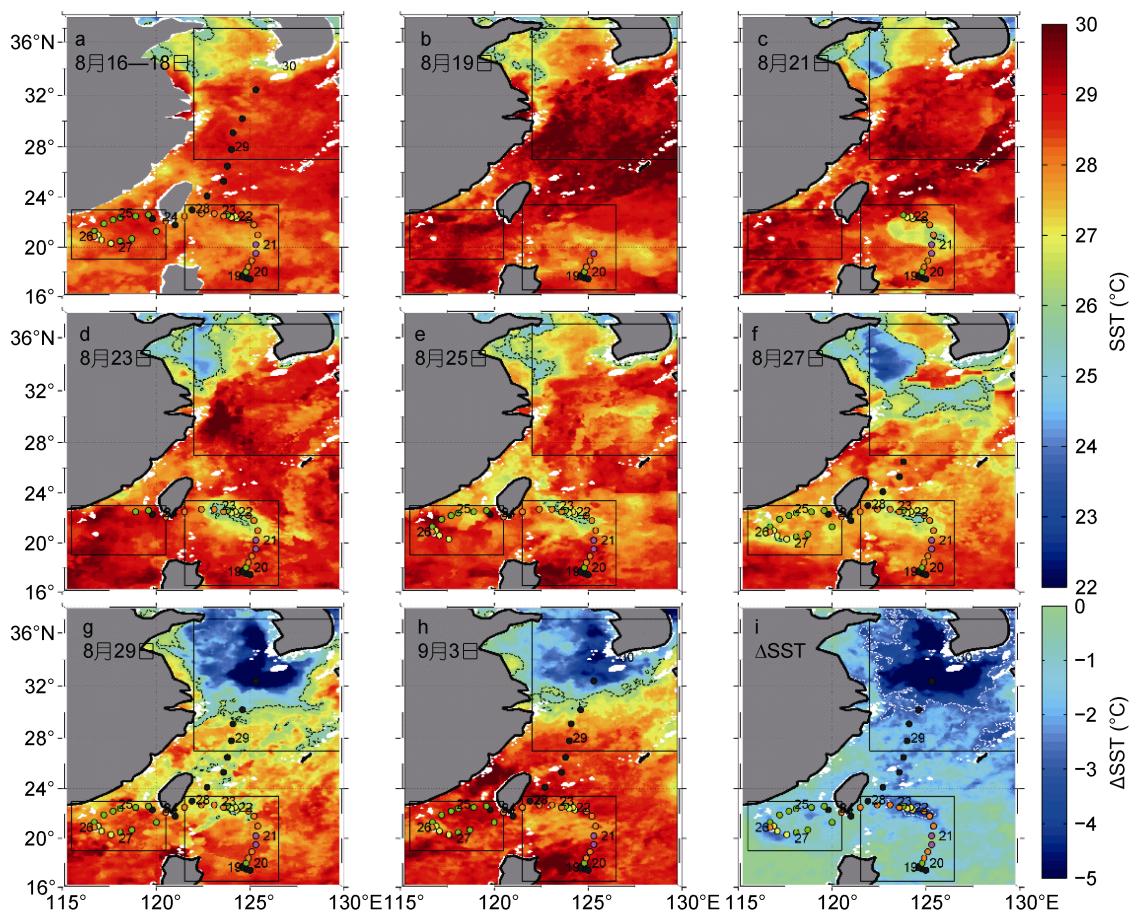


图 3 微波+红外遥感(MW+IR)观测超强台风 Tembin 引起的海表面降温
Fig.3 SST cooling induced by super typhoon Tembin based on MW OI SST

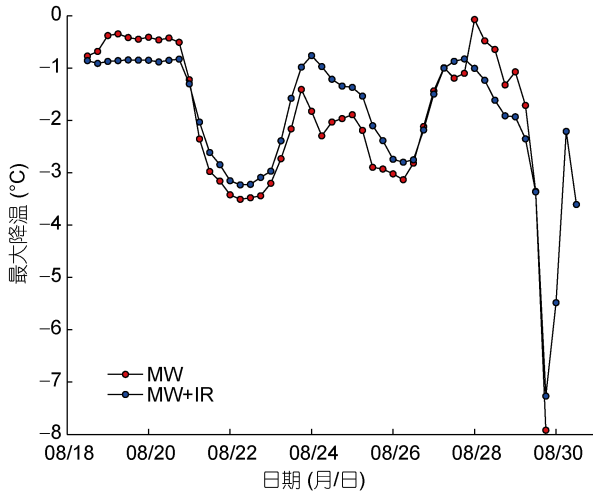


图4 MW 和 MW+IR 观测的超强台风 Tembin 在其路径的各个中心位置处引起的海表面降温

Fig.4 Comparison of maximum SST cooling induced by super typhoon Tembin at each typhoon track points based on MW and MW+IR observations

注: 该海表面降温为台风中心 100km 以内最大降温的平均值

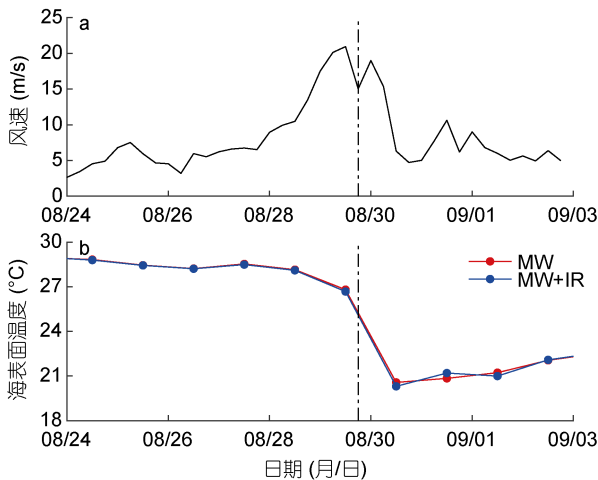


图5 8月29日18时台风中心位置处(125.9°E, 32.3°N)的风速和海表面温度时间序列

Fig.5 Time series of wind speed and SST at the typhoon center at 1800 UTC, 29 August

注: a: 10m 高度风速; b: MW 和 MWIR 观测海表面温度; 风速和海表面温度为台风中心 100km 以内网格点的平均值

导致的。本文在朝鲜半岛南部近岸海区观测到的降温比在南海观测到的更大, 且最大降温发生在台风后 1d, 因此主要是由台风自身强风引起的海洋混合卷挟导致的, 这与 Lee 等(2016)在黄海观测到的台风 Muifa(2011)后近 8°C 的海表面降温是一致的。

3 台风诱发强混合

台风引起的海表面降温, 主要是由期间的垂向湍流混合加强导致的。台风过境期间常常伴随着狂风、巨浪等恶劣海洋环境, 这使得利用 TurboMap 湍流剖面仪等船载仪器来观测上层海洋混合率极为危险和困难。本文基于 Gregg 等(2003)提出的混合参数化方法, 利用 Argo 浮标观测高分辨率温盐剖面来估算超强台风 Tembin 过境前后的混合率并进行对比分析。该参数化方法是基于内波能量通过波-波相互作用向小尺度过程传递理论提出的, 混合率 K 的参数化公式为:

$$K = K_0 \left(\frac{\langle \xi_z \rangle^2}{\text{GM} \langle \xi_z \rangle^2} \right) h(R_w) j(f/N), \quad (1)$$

其中,

$$h(R_w) = \frac{1}{6\sqrt{2}} \frac{R_w(R_w+1)}{\sqrt{R_w-1}}, \quad (2)$$

$$j(f/N) = \frac{f \cosh^{-1}(N/f)}{f_{30} \cosh^{-1}(N_{30}/f_{30})}, \quad (3)$$

其中, N 为浮频率, f 为局地惯性频率, 下标 GM 表示理论谱, $N_0 = 5.2 \times 10^{-3} \text{ rad/s}$, $K_0 = 0.05 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$, $f_{30} = f(30^\circ\text{N})$,

拉伸 $\langle \xi_z \rangle^2 = (N^2 - \bar{N}^2) / \bar{N}^2$, R_w 为剪切拉伸比, 在只有温盐剖面观测的情况下, Kunze 等(2006)建议 R_w 的取值为 7, 这一取值在大洋混合率观测与相关研究中得到了验证和广泛应用(Wu *et al*, 2011; 李敏等, 2014)。

为合理评估台风对上层海洋混合的影响, 我们首先对台风前后相关海区所有 Argo 剖面进行了筛选, 筛选标准如下: (1) Argo 浮标在台风经过之前和之后的 3d 之内各有一个观测剖面; (2) 台风前后两个剖面的位置距离台风路径 100km 以内, 以使观测位置受到台风的显著影响; (3) 温盐剖面具有较高的垂向分辨率(约 2m)。在本文中, 我们分析了 2012 年 8 月在西北太平洋及南海的所有 Argo 剖面数据, 其中 3 对观测剖面(P1, P2 和 P3)符合上述筛选标准, 剖面观测时间、位置及影响台风请详见表 1 及图 5。其中, 剖面 P2 和 P3 来自于同一个 Argo 浮标(编号: 2901530), 但剖面 P3 受到了 Tembin 之前台风 Kai-Tak(台风 Kai-Tak 路径见图 6)的影响。

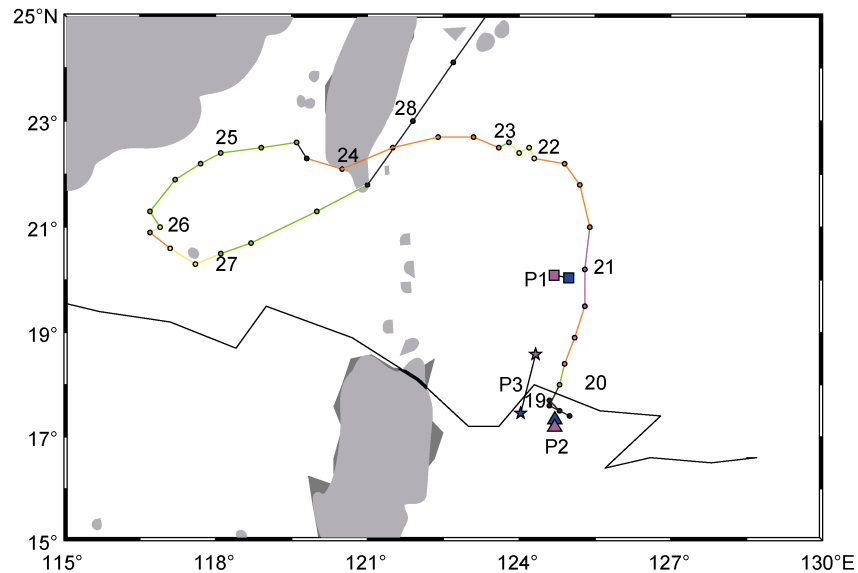


图 6 超强台风 Tembin(彩色点线)和台风 Kai-Tak(黑色实线)路径及三对 Argo 剖面位置

Fig.6 Tracks of super typhoon Tembin (colored dot line) and typhoon Kai-Tak (black solid line) and locations of Argo pairs
注: 蓝色代表台风之前剖面位置, 玫红色代表台风之后剖面位置

图 7a、c 和 e 显示了台风前后的三对 Argo 温度剖面观测结果。三对剖面一致表明, 台风在海表面和混合层造成了不同程度的降温, 并显著改变了上层海洋的层结。混合率的计算需要现场层结, 而混合层内的密度分布比较均匀, 因此我们在计算混合率时从混合层底部开始计算, 即 P1 和 P3 剖面则从 50m 开始, 而 P2 剖面从 80m 开始向下计算; 将每一个温盐剖面从最上层向下分成 160m 长且有 80m 重叠的小段; 本文主要关注台风引起的上层海洋混合率变化, 因此向下只计算到了 450m; 三个 Argo 剖面对的计算结果如图 7b、d 和 f 所示。台风之后上层海洋的混合率在上 400m 均明显得到加强, 特别是在 100m 深度以上, 最强混合率可达 $8.0 \times 10^{-4} \text{m}^2/\text{s}$ 。台风之前 P1、P2 和 P3 站位的上层海洋平均混合率分别为 2.7×10^{-5} 、 2.5×10^{-5} 和 $6.1 \times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$, 而台风之后三个剖面的平均混合率则分别加强到了 2.7×10^{-4} 、 5.8×10^{-5} 和 $7.9 \times 10^{-5} \text{m}^2/\text{s}$ 。由于台风后强近惯性流导致的剪切不稳定, P1 和 P3 剖面观测的上层海洋平均混合率增强了约 10 倍; 与 P1 和 P3 剖面相比, P2 剖面混合率的增强幅度较小(约 2 倍), 与来自同一个 Argo 浮标且地理位置更为接近的 P3 剖面相比, 其可能原因有: (1) 台风之前的背景混合率已经较强, 比 P3 剖面强了约 4 倍, 可能是收到了 Tembin 之前另一个台风 Kai-Tak 的影响(图 6); (2) P2 剖面位于 Tembin 路径左侧且

Tembin 经过 P2 时强度很弱(热带风暴), 因此引起的近惯性流动及其剪切不稳定效应较弱(P1 虽也位于 Tembin 路径左侧, 但 Tembin 其时台风强度较强(4 级), 因此同样引起了很强的混合)。

4 结论

本文综合了多源卫星遥感观测资料和 Argo 浮标剖面观测资料分析了西北太平洋和南海上层海洋对超强台风 Tembin(2012)的响应。结果表明, Tembin 引起了较强的 SST 降低, 降温主要集中在台风路径附近, 最大降温为 10.3°C , 出现在朝鲜半岛南部海区; 另一个降温较大海区出现在台湾岛东部海区, 最大降温 5.3°C ; 微波+红外遥感海表面温度数据有效弥补了单一微波遥感观测在近岸缺测不足, 观测到朝鲜半岛近岸大范围海表面降温, 降温幅度在 5°C 以上; 基于 Gregg 等(2003)提出的细尺度混合参数化方法, 利用 Argo 观测的高分辨率垂向温盐剖面, 估算了台风前后的混合率, 发现台风后上层海洋混合率明显增强, 这是由台风激发的强惯性流致剪切不稳定效应引起的, 3 对剖面中有 2 对剖面的台风后混合率增强了 10 倍以上, 证明了台风后强混合的存在。需要注意的是, 细尺度混合参数化方法在台风等极端环境下的误差可能较大, 台风后强混和的定量评估有赖于微尺度湍流混合长期连续现场观测技术的进一步发展。

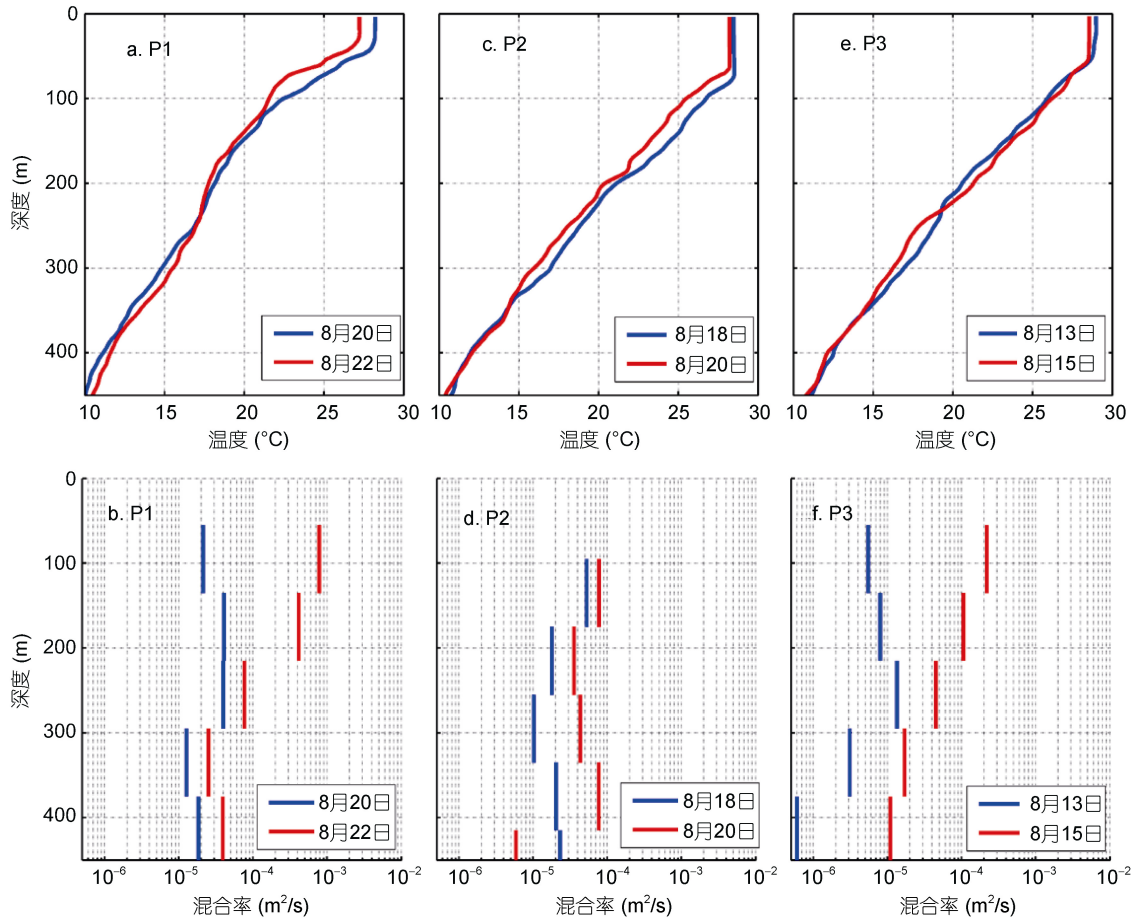


图7 三个 Argo 观测的台风前后温度剖面 P1, P2 和 P3 (a, c, e)以及 P1、P2 和 P3 温盐剖面估计的混合率(b, d, f)
Fig.7 Temperature profiles before (blue) and after (red) typhoon at stations P1 (a), P2 (c), and P3 (e), and profiles of estimated diapycnal diffusivity K before (blue) and after (red) typhoon at stations P1 (b), P2 (d), and P3 (f)

注: 蓝色和红色分别代表台风经过观测位置之前和之后

参 考 文 献

- 李 敏, 谢玲玲, 杨庆轩等, 2014. 湾流区涡旋对海洋垂向混合的影响. 中国科学: 地球科学, 44(4): 744—752
- 陈大可, 许建平, 马继瑞等, 2008. 全球实时海洋观测网(Argo)与上层海洋结构、变异及预测研究. 地球科学进展, 23(1): 1—7
- 陈大可, 雷小途, 王 伟等, 2013. 上层海洋对台风的响应和调制机理. 地球科学进展, 28(10): 1077—1086
- 周 慧, 杨文龙, 刘恒昌等, 2017. 台风“海马”对吕宋海峡附近暖涡的影响及其动力机制. 海洋与湖沼, 48(6): 1276—1288
- 谢玲玲, 何超凤, 李明明等, 2017. 琼东上升流区海表温度对台风过境的响应. 海洋科学进展, 35(1): 8—19
- Chang S W, Anthes R A, 1978. Numerical simulations of the ocean's nonlinear, baroclinic response to translating hurricanes. *J Phys Oceanogr*, 8(3): 468—480
- Chiang T L, Wu C R, Oey L Y, 2011. Typhoon Kai-Tak: An Ocean's Perfect Storm. *J Phys Oceanogr*, 41: 221—233
- D'Asaro E, Black P, Centurioni L *et al*, 2011. Typhoon-ocean interaction in the western North Pacific: Part 1. *Oceanography*, 24(4): 24—31
- Emanuel K A, 1986. An air-sea interaction theory for tropical cyclones. Part I: steady-state maintenance. *J Atmos Sci*, 43(6): 585—605
- Glenn S M, Miles T N, Seroka G N *et al*, 2016. Stratified coastal ocean interactions with tropical cyclones. *Nat Commun*, 7(1): 10887
- Gregg M C, Sanford T B, Winkel D P, 2003. Reduced mixing from the breaking of internal waves in equatorial waters. *Nature*, 422(6931): 513—515
- Guan S D, Li S Q, Hou Y J *et al*, 2018. Increasing threat of landfalling typhoons in the western North Pacific between 1974 and 2013. *Int J Appl Earth Obs Geoinf*, 68: 279—286
- Guan S D, Liu Z, Song J B *et al*, 2017. Upper ocean response to Super Typhoon Tembin (2012) explored using multiplatform satellites and Argo float observations. *Int J Remote Sens*, 38(18): 5150—5167
- Guan S D, Zhao W, Huthnance J *et al*, 2014. Observed upper ocean response to typhoon Megi (2010) in the Northern South China Sea. *J Geophys Res: Oceans*, 119(5): 3134—3157
- Haakman K, Sayol J M, van der Boog C G *et al*, 2019. Statistical characterization of the observed cold wake induced by North

- Atlantic Hurricanes. *Remote Sens*, 11(20): 2368
- Jaimes B, Shay L K, 2009. Mixed layer cooling in Mesoscale Oceanic eddies during hurricanes Katrina and Rita. *Mon Wea Rev*, 137(12): 4188—4207
- Kunze E, Firing E, Hummon J M *et al*, 2006. Global abyssal mixing inferred from lowered ADCP shear and CTD strain profiles. *J Phys Oceanogr*, 36(8): 1553—1576
- Lee, J H, Pang I, 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. *J. Geophys. Res. Oceans* 121: 3777—3789
- Lin I I, Wu C C, Emanuel K A *et al*, 2005. The interaction of Supertyphoon Maemi (2003) with a warm ocean eddy. *Mon Wea Rev*, 133(9): 2635—2649
- Price J F, 1981. Upper ocean response to a hurricane. *J Phys Oceanogr*, 11(2): 153—175
- Sanford T B, Price J F, Girtan J B *et al*, 2007. Highly resolved observations and simulations of the ocean response to a hurricane. *Geophys Res Lett*, 34(13): L13604
- Shi Y X, Xie L L, Zheng Q N, 2019. Unusual coastal ocean cooling in the northern South China Sea by a katabatic cold jet associated with typhoon Mujigea (2015). *Acta Oceanol Sin*, 38(5): 62—75
- Sun L, Yang Y J, Fu Y F, 2009. Impacts of typhoons on the Kuroshio Large Meander: observation evidences. *Atmos Ocean Sci*, 2(1): 40—45
- Webster P J, Holland G J, Curry J A *et al*, 2005. Changes in tropical cyclone number, duration, and intensity in a warming environment. *Science*, 309(5742): 1844—1846
- Wu L X, Jing Z, Riser S *et al*, 2011. Seasonal and spatial variations of Southern Ocean diapycnal mixing from Argo profiling floats. *Nat Geosci*, 4(6): 363—366

SUPER TYPHOON TEMBIN (2012) INDUCED SEA SURFACE COOLING AND ENHANCED DIAPYCNAL MIXING IN THE NORTHWEST PACIFIC OCEAN

GUAN Shou-De^{1,2,3}, HOU Yi-Jun^{2,4}

(1. *Physical Oceanography Lab/LAOS, Ocean University of China, Qingdao 266100, China*; 2. *Laboratory for Ocean and Climate Dynamics, Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology (Qingdao), Qingdao 266237, China*; 3. *Sanya Oceanographic Institution, Ocean University of China, Sanya 572000, China*; 4. *Key Laboratory of Ocean circulation and waves, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China*)

Abstract To the issue of lacking field observations under typhoon conditions, the upper ocean response to super typhoon Tembin (2012) was examined in the western North Pacific and South China Sea using remote-sensing sea surface temperature from multiplatform satellites and upper ocean temperature and salinity profiles observed by Argo floats. Significant sea surface temperature (SST) drop was induced by Tembin and was mainly located along the track of Tembin with a maximum drop of 10.3°C occurred south of the Korea peninsula. Compared to the MW OI SST product, MW+IR OI SST product could capture the dramatic SST cooling in coastal waters, but underestimate the typhoon-induced SST cooling along the typhoon track. Based on the temperature and salinity profiles in high vertical resolution by Argo floats and fine-scale parameterization method, the diapycnal diffusivity before and after typhoon was estimated. It was found that the diapycnal diffusivity was significantly enhanced for more than 10 times after typhoon.

Key words super typhoon Tembin; sea surface temperature; MW OI SST; MW+IR OI SST; Argo floats; diapycnal diffusivity