

DOI: 10.3724/j.1007-6336.2024-x-0135

春季超强台风“美莎克”对西太平洋海温的影响 及热收支分析

孙冬晖¹, 韩树宗^{1,2}, 王若琪¹

(1.中国海洋大学 海洋与大气学院, 山东 青岛 266100; 2.海南热带海洋学院 崖州湾创新研究院, 海南 三亚 572025)

摘要:2015 年第 04 号台风“美莎克”是 70 年以来西太平洋 3 月最强台风, 具备典型研究意义。本文基于 COAWST 耦合模型, 模拟其过境期间的海气背景场, 并通过路径、风场和压强验证模型准确性。研究聚焦台风对海表温度的近惯性振荡影响, 重点分析路径右侧 (S1)、左侧 (S2) 和路径中心 (S3) 的最大降温效应, 发现弱台风区域振荡振幅减小、频率升高。通过热收支分析定量评估台风前后 24 h 及整个模拟期内温度变化的主导因素。结果表明, 台风前 0~65 m 深度温度变化受垂直扩散主导, 65~75 m 为扩散和平流共同作用, 75 m 以下主要由总平流控制。台风过境后垂直扩散影响深度变浅, 平流影响加深, 界限下移至约 48 m。研究揭示了春季超强台风对不同深度海水热结构的影响机制。

关键词:混合层温度; 近惯性振荡; 垂直扩散; 平流; 温度变化率

中图分类号: P731.11

文献标识码: A

文章编号: 1007-6336(2026)01-0125-11

The impact of a spring super typhoon on sea surface temperature and heat budget analysis in the Western Pacific

Sun Donghui¹, Han Shuzong^{1,2}, Wang Ruoqi¹

(1.College of Oceanic and Atmospheric Sciences, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 2.Yazhou Bay Innovation Institute, Hainan Tropical Ocean University, Sanya 572025, China)

Abstract: Typhoon Maysak (2015 No. 04), the strongest typhoon in the western North Pacific in March over the past 70 years, serves as a representative case for studying oceanic responses to typhoons. This study employs the COAWST coupled model to simulate the ocean-atmosphere background fields during Maysak's passage, with model validation through comparisons of the typhoon's track, wind field, and pressure. The research focuses on near-inertial oscillations in sea surface temperature (SST), particularly the maximum cooling effects observed at three points: the right side of the track (S1), the left side (S2), and the center (S3). Results indicate a reduction in oscillation amplitude and an increase in frequency in the weaker typhoon regions. A heat budget analysis quantitatively evaluates the dominant factors driving temperature changes 24 hours before and after the typhoon's passage, as well as over the entire simulation period. Findings show that, prior to the typhoon's passage, vertical diffusion dominates temperature variation at depths of 0–65 m, while both vertical diffusion and total advection contribute at 65–75 m, with total advection controlling below 75 m.

收稿日期: 2024-05-31, 修订日期: 2025-02-21

基金项目: 中电工程重大科技专项 (DG3-W01-2024)

作者简介: 孙冬晖 (1999—), 男, 山东烟台人, 硕士研究生, 主要研究方向为海气相互作用, E-mail: sundonghui@stu.ouc.edu.cn

通信作者: 韩树宗 (1970—), 男, 江苏南通人, 教授, 主要研究方向为海气相互作用, E-mail: hansz@ouc.edu.cn

After the typhoon, the depth of vertical diffusion's influence becomes shallower, while advection extends deeper, with the transition depth shifting to approximately 48 m. This study elucidates the depth-dependent thermal response of the ocean to a springtime super typhoon.

Key words: mixing layer temperature; near-inertial oscillations; vertical diffusion; advection; temperature change rate

台风是一类强烈而常见的热带气旋天气系统,严重影响沿岸地区的生产生活,甚至造成重大生命财产损失,台风过境可能会使沿岸国家受到巨大经济损失^[1-3]。与此同时,台风作为自然界周期性发生的过程,也会在一定条件下促进海气交换和生态过程^[4-5]。台风可以影响海-气界面质量、能量、动量等的输运和交换,促进加强海-气耦合和海-气间的相互作用^[6-7]。因此,深入研究台风对海洋及大气的影响,尤其是它们的理化性质变化,对于预测和减轻台风灾害、理解全球气候变化有着不可替代的价值^[8-9]。

在过去的几十年里,许多人就海洋对台风的响应进行了研究,主要结论包括:台风过境引起的 SST(sea surface temperature)降低及台风对海洋影响的右偏性等^[10]。海洋对台风响应的最显著特征就是海表面温度 SST 的变化^[11]。在开阔大洋,台风引起海表降温,通常范围为 1 °C ~ 6 °C,而且台风路径右侧的降温幅度大于左侧。Lin 等^[12]和 Shang 等^[13]发现,台风“Kai-Tak”和“Ling-Ling”在南海引起的最大降温甚至可达到 9 °C 和 11 °C。在近海浅水区,受岸线、地形以及边界流等因素影响,台风引起的 SST 变化与开阔大洋有所不同^[14]。这表现在海温异常最大值可能出现在台风路径左侧,以及台风过后出现海表升温的现象^[15]。

前人研究海洋对台风的响应多采用地转海洋学实时观测阵(array for real-time geostrophic oceanography, Argo)浮标数据,但 10 d 一次的 Argo 浮标数据很难满足研究的时间分辨率^[16-17]。同时,Argo 浮标在海洋中是移动的,在台风发生的时间、空间范围内,Argo 浮标在台风过境前后位置容易产生偏移,这样得到的前后数据无法代表同一位置来研究台风过境前后海洋的变化^[18-20]。近些年来,越来越多的学者采用海洋、大气模式来模拟台风期间海洋、大气的物理场

来研究海洋对台风的响应,如大气模式 WRF(weather research and forecasting model)、海洋模式 ROMS(regional ocean modeling system)等。单一模式着重于大气和海洋内部的相互影响,并不能准确地反映海气间的相互作用,LIU 等^[21]分析对比了 COAWST 海-气耦合模式和单一的 WRF 模式,发现耦合模式比单一模式对海气相互作用物理过程的描述更加合理。故本研究选取 201504 号台风“美莎克”作为案例,这是自 1949 年以来 3 月生成的最强台风,其罕见的强度和平稳的运动轨迹为研究提供了独特的机会。利用高分辨率的海-气-浪耦合模式 COAWST,本文旨在重现这一台风过程,并通过与实测数据的对比验证,深入分析西太平洋温度场对“美莎克”的响应。本文通过计算西太平洋海水在台风来临前后的热收支,进一步探讨了扩散和平流等过程对海水温度变化的贡献率及作用深度,旨在为预测和应对未来台风事件提供科学依据,增强我们对台风影响机制的理解。

1 材料与方法

1.1 卫星数据

台风路径采用 CMA 最佳路径数据集,该数据集来自中国气象局热带气旋资料中心。数据集包括台风强度、台风中心经纬度、中心最低气压、中心最大风速、平均风速等^[22-23],时间分辨率为 6 h,下载网址为 https://tcdata.typhoon.org.cn/zjljsjj_sm.html。JMA 最佳路径数据集来源于日本海上气象厅,该数据集包括台风中心经纬度、台风强度、中心最低气压、中心最大风速等数据,时间分辨率同样为 6 h,下载网址为 <https://www.data.jma.go.jp/>。

1.2 观测数据

Argo 是由许多海上工作的自动剖面浮标组成,大洋上广泛分布的 Argo 浮标就组成了覆盖

全球的实时海洋观测系统。Argo浮标能够进行深度约2000 m的连续温盐度测量,能够将测得的数据信息通过卫星传输到卫星地面接收站,Argo浮标带来了长时间、大范围、实时、连续的海洋剖面数据^[24]。本文所用的Argo浮标数据来自杭州全球海洋Argo系统野外科学观测研究站,网址为<http://www.argo.org.cn/>。

1.3 再分析数据

本文风场数据选用CCMP(cross calibrated multi-platform)海面风场数据,该数据由美国航空航天局NASA的物理海洋学分布式存档中心提供,以欧洲中期天气预报中心ECMWF的再分析和业务资料为背景场,通过变分同化法融合了SSM/I、QuikSCAT、ADEO-II、AMSR-E、WindSAT、ASCAT和TRMM/TMI等20多种卫星探测资料以及部分船舶和浮标观测资料,是一种通过对卫星微波遥感和仪器观测的海面风数据进行交叉校准和同化得到的合成风场资料^[25-26]。数据为海面10 m的风场,时间分辨率为24 h,空间分辨率为0.25°×0.25°,下载网址为<https://www.remss.com/>。

1.4 研究方法

海水温度变化本质上反映了海洋热含量的变化。本文所用的海洋热收支方程如下:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -u \frac{\partial T}{\partial x} - v \frac{\partial T}{\partial y} - w \frac{\partial T}{\partial z} + T_{DH} + T_{DV} + Q_S \quad (1)$$

式中: T 表示温度; u 、 v 和 w 分别表示速度在3个正交方向上的分量; z 表示垂向距离;等式左侧 $\frac{\partial T}{\partial t}$ 表示局部温度变化率项;等式右侧 $-u \frac{\partial T}{\partial x} - v \frac{\partial T}{\partial y}$ 表示水平平流项; $-w \frac{\partial T}{\partial z}$ 表示垂直对流项; T_{DH} 表示水平扩散项; T_{DV} 表示垂直扩散项; Q_S 表示表面净热通量项。

本文相关性分析部分选用Pearson相关系数,其用来衡量两个数据集是否在同一条线上,并用来衡量定距定量间的线性关系^[27-28]。Pearson相关系数用来衡量线性关系,若 $r=0$,说明 x 、 y 无线性相关关系。相关系数的绝对值越大,相关性越强;相关系数越趋近于1或-1,相关度越强,相关系数越趋近于0,相关度越弱^[29]。Pearson相关系数的计算公式如下:

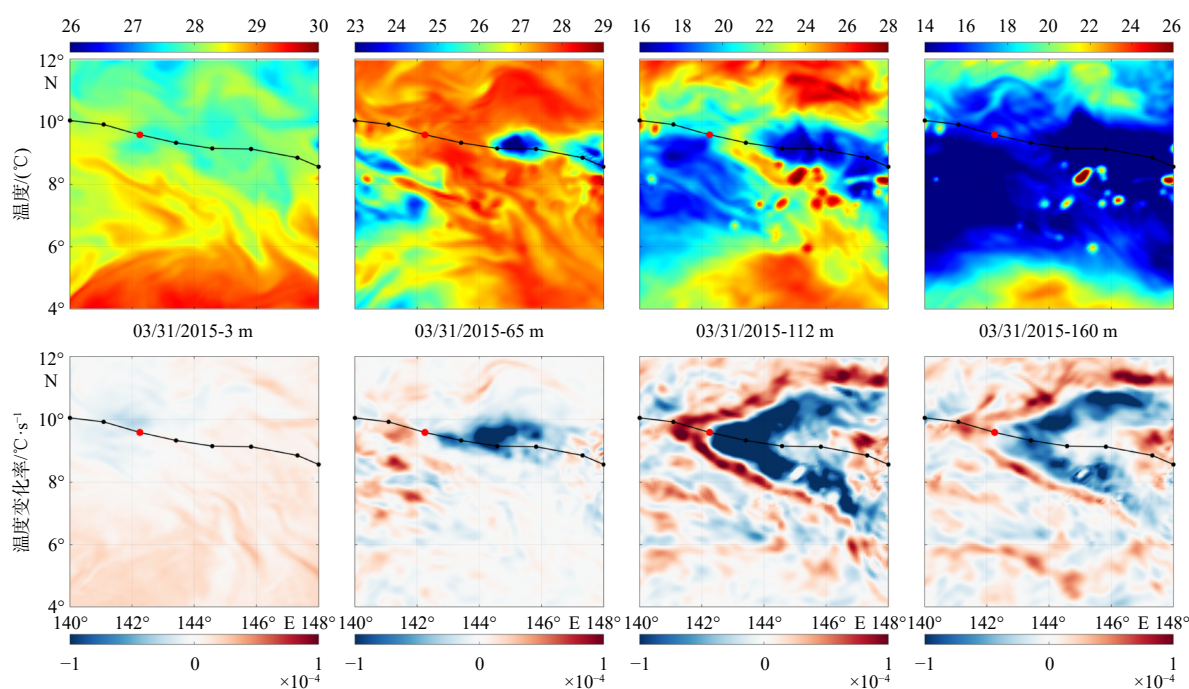
$$r = \frac{N \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{\sqrt{N \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \sqrt{N \sum y_i^2 - (\sum y_i)^2}} \quad (2)$$

式中: r 表示Pearson相关系数,用于衡量两个变量之间的线性相关程度,取值范围为 $[-1,1]$; N 表示样本数量; x_i 表示第 i 个样本点中变量 x 的取值; y_i 表示第 i 个样本点中变量 y 的取值。

2 结果与讨论

2.1 不同水层温度变化

为全面研究西太平洋海水温度对春季超强台风“美莎克”的响应,从海洋表层到次表层选取3 m、65 m、112 m、160 m作为研究代表面。春季超强台风“美莎克”在2015年3月31日0时从强台风增强为超强台风,在4月2日0时从超强台风减弱为强台风,“美莎克”在这两个时间点间均为超强台风,该段时间内“美莎克”强度最高,因此,本文选择2015年3月31日0时和4月2日0时作为研究时间点。如图1所示,从2015年3月31日0时3 m、65 m、112 m、160 m深度海洋温度和温度变化率的空间分布看出,在3 m深度,海水温度在台风逐渐靠近时出现了温度降低,台风右侧的温度变化率大于台风左侧的温度变化率,说明在表层附近,海水温度对台风的降温响应具有明显的右偏性;在65 m深度处,台风路径后侧出现明显的降温区,在台风当前中心前2~3个位置,从温度变化率上可以看出,台风逐渐接近目标海域时,会使台风前方海域的海水温度升高,台风过境后,会使海水温度降低,而每个台风中心位置间隔为6 h,可以认为台风来临前6 h至台风来临时,海洋次表层65 m附近海水温度小幅升高,在台风过境后18 h内,65 m附近海水温度大幅降低,台风后右方右侧降温区域大于左侧,同样具有右偏性;在112 m和160 m深度处,海水温度对台风“美莎克”的响应与65 m类似,台风前方出现海水温度小幅度升高,台风后方出现海水温度大幅度降低,右侧的降温区域稍大于左侧,台风过境后112 m和160 m深度处海水降温幅度与65 m深度处相差不大,但降温区域远大于65 m深度处。



注: 红色圆点代表台风中心当前的位置, 黑色线代表台风路径, 黑色圆点代表台风其他时刻的台风中心位置

图1 台风增强为超强台风时不同水层海水温度和温度变化率的空间分布

Fig. 1 Spatial distribution of sea surface temperature and temperature change rate at different depths during typhoon intensification to a super typhoon

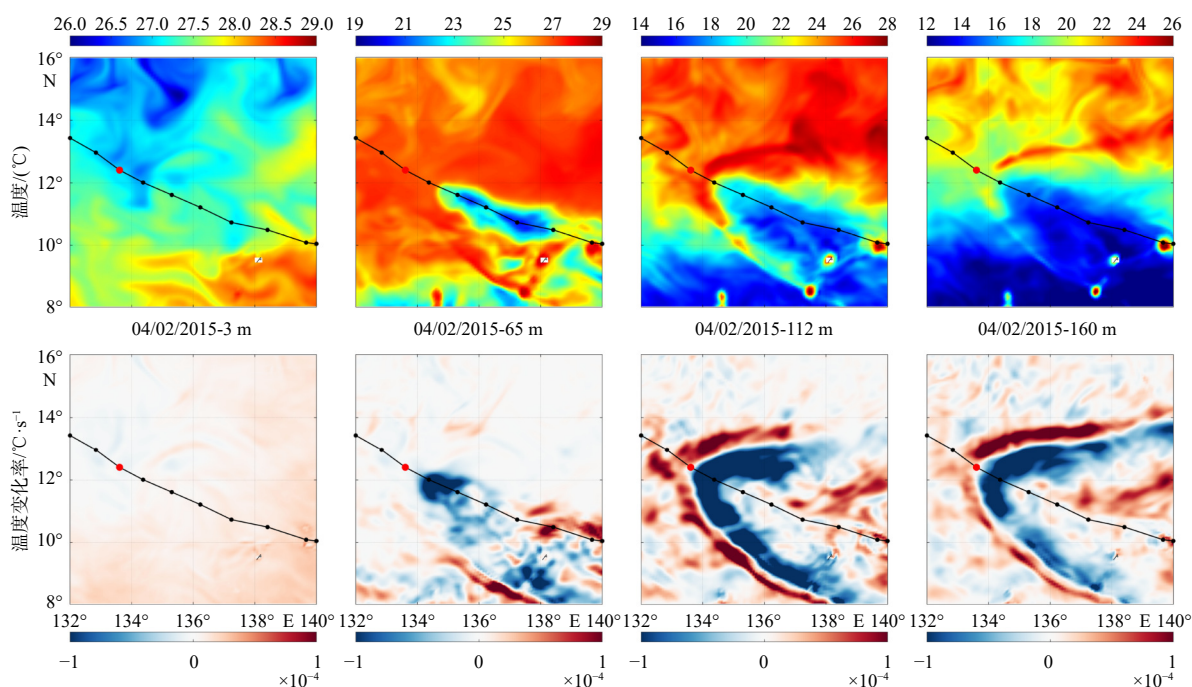
如图2所示, 台风“美莎克”从超强台风减弱为强台风时, 3 m、65 m、112 m、160 m 深度处的海水温度和温度变化率的分布与台风从强台风增强为超强台风形成对照, 此时为2015年4月2日0时。观察发现, 3 m 深度表层附近, 台风前方出现海水温度轻微下降现象。在65 m 深度处, 相较于增强阶段, 减弱时并未观察到前方升温现象, 但后方有较广泛的降温区域, 且未呈现右偏性。在112 m 和160 m 深度处, 随着台风的临近, 路径前方形成“弓”形升温区, 而后方则为“弓”形降温区, 未呈现显著右偏性。综合来看, 表层海水对台风响应的速度快于次表层, 次表层深水的降温反应时间长于表层, 达到最强降温约需台风过境后12 h。台风增强期间, 路径前方的海水温度略有升高, 而在减弱期, 前方温度变化不明显, 表明减弱阶段的海水混合和近惯性振荡作用小于增强阶段。台风增强阶段, 表层温度影响范围和幅度均大于减弱阶段, 说明此时的海-气热交换更为剧烈; 同时, 在增强阶段, 海

水温度影响呈现右偏性, 而减弱阶段的影响则相对均匀, 没有明显偏向。

2.2 垂直温度变化与混合层深度响应

借助模式数据来计算各个位置台风过境后的最大降温, 可以得到台风路径右侧的最大降温点和台风路径左侧的最大降温点。本研究选择右侧的最大降温点 S1(140.4682°E, 10.3875°N)和左侧的最大降温点 S2(135.4881°E, 11.5666°N), 同时选择 COAWST 模拟得到的第一个台风中心 S3(149.6306°E, 8.2164°N)作为研究点。在研究混合层深度变化时, 采用温差法进行判定, 即当某一深度的水温与表层水温的差值达到或超过0.5 °C 时, 可视为达到了混合层深度。

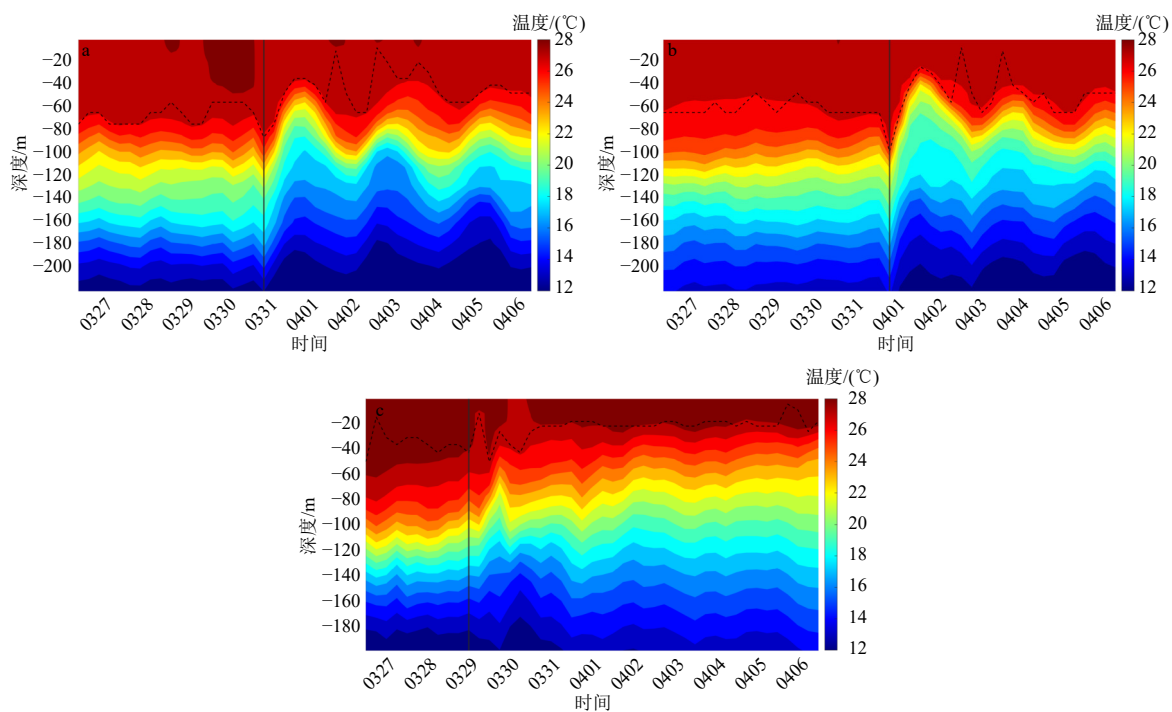
S1 点位于台风“美莎克”右侧的最大降温区, 图3a 为台风过境时40 m 浅层海水的上升动态。28 °C 等温线上升至海面, 而26 °C 等温线则从70 m 轻微下降至80 m, 随后快速上升至40 m。此外, 混合层从55 m 加深至大约85 m, 其温度降低约1 °C。在60~80 m 及以下深度, 由流场



注: 红色圆点代表台风中心当前的位置, 黑色线代表台风路径, 黑色圆点代表台风其他时刻的台风中心位置

图 2 台风减弱为强台风时不同水层海水温度和温度变化率的空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of sea surface temperature and temperature change rate at different depths during typhoon weakening to a strong typhoon



注: 黑色虚线表示混合层深度; a 为 S1; b 为 S2; c 为 S3

图 3 垂直温度分布变化

Fig. 3 Vertical temperature distribution change

近惯性振荡引起的冷暖交替现象明显,混合层的深度也随温度变化波动,80 m以下的海域出现了显著的冷异常现象。 26°C 等温线先降至80 m再升至40 m,表明台风在接近初期先将表层的温暖海水带至次表层,短期内使次表层海水温度升高,随后又将较冷的深层海水带至次表层,导致次表层海水温度迅速下降,等温线因此迅速上升。

S2点位于台风“美莎克”左侧的最大降温区,如图3b所示,台风到达前,S2周围的海水温度较为稳定,展现出小幅度周期性振荡。与S1点类似,台风到来时等温线首先轻微下降约10 m,随后迅速上升。 26°C 等温线从70 m下降至90 m,然后快速上升至40 m,混合层深度也从60 m下降至100 m,之后迅速上升至40 m。这表明,台风通过左侧最大降温区时,同样会先使表层的暖水下沉至次表层,导致等温线下降和混合层深度增加,之后通过将较冷的深层水上升至次表层,快速降低次表层海水温度并使等温线上升。

S3点是位于研究区域($0^{\circ}\text{--}20^{\circ}\text{N}$, $130^{\circ}\text{E--}150^{\circ}\text{E}$)内台风路径上的一个关键点,标记了“美莎克”路径上的第一个中心位置。当台风经过此点时,其强度为13级,相比之下,经过S1点和S2点时,台风的强度达到了17级。如图3c所示,在台风经过S3点时,等温线首先轻微上升,随后在6 h内显著上升,与S1点和S2点的明显冷暖交替现象不同,该点混合层深度在短期内小幅波动之后稳定下来。这表明,在S1点和S2点这样强度较高的区域,强台风促进了海水混合和辐射效应,引起上升流,导致表层温暖水体先被带入次表层,增强了混合层的混合作用,混合层深度随之增加。这导致次表层海水温度在台风到来时先暂时升高,等温线下降,随后较冷的深层水被带入次表层,使得次表层海水温度迅速下降,等温线上升。相反,强度较低的台风对海水的混合作用较弱,无法将表层的温暖水带到次表层,因此次表层海水的温度在台风到来时不会短暂升高。

2.3 热收支剖面变化

本研究旨在分析春季超强台风“美莎克”对西太平洋海水温度和热收支三维结构的影

响。选取了2015年3月31日18时的经向剖面A(位于 140°E , $9^{\circ}\text{N--}13^{\circ}\text{N}$)和4月2日0时的经向剖面B(位于 135°E , $9^{\circ}\text{N--}13^{\circ}\text{N}$)进行分析。剖面A和B分别位于台风路径的右侧和左侧最大降温点S1、S2附近。图4为台风过境后剖面A和B的垂直温度及热收支分布。在剖面A,与台风路径左侧相比,海水温度变化率明显更大,垂直扩散在右侧作用更深,导致30 m以浅水层温度下降,而30~50 m水层温度上升。总平流在台风右侧的影响超过左侧,导致表层水温微升,50 m以下水温显著降低,其对温度变化的主导作用明显大于垂直扩散。在剖面B,台风右侧的水温普遍低于左侧,混合层深度也大于左侧。与剖面A不同,剖面B总平流在台风右侧30 m以浅水层引起微小温度升高,在左侧则导致微小降温。在30 m以下水层,总平流的作用相反,致使右侧水温降低,左侧水温升高。垂直扩散在30 m以浅水层引起温度下降,并在30 m附近造成局部温度升高。剖面B的垂直扩散作用深度明显小于剖面A,约为其一半。在剖面B,总平流是温度变化的主要驱动因素,而垂直扩散的作用则相对较小。结合剖面A和B的观察结果以及台风强度在剖面A处较剖面B强的事实,可以得出以下结论:台风右侧的表层和次表层温度变化率及幅度均超过左侧,而且台风强度越大,左右两侧之间的温度变化率和幅度差异也越明显。垂直扩散主要作用于较浅的水域,但在台风强度较大的区域,其作用深度可达到近100 m水深,而在台风强度较弱的区域,作用深度大约为30 m。随着台风强度的增加,垂直扩散的影响加剧,并且作用范围扩大。垂直扩散降低了上层水体的温度,而增加了深层水体的温度。垂直扩散和总平流对温度的影响均显著偏向台风路径的右侧,且总平流对温度的影响可变,有时提升上层水体温度并降低下层水体温度,有时则相反,显示出总平流对温度影响的交替变化,以及其在上下层水体中的相反作用。从影响的幅度来看,总平流在上下层水体中对温度的影响幅度相似,而垂直扩散在上层水体的影响幅度小于下层。在0~200 m深度区域,总平流是温度变化的主要驱动力,其作用主要集中在50~200 m深

度区域,垂直扩散主要影响 50 m 以浅的水域, 对 50 m 以下深层水体的温度影响总体较小。

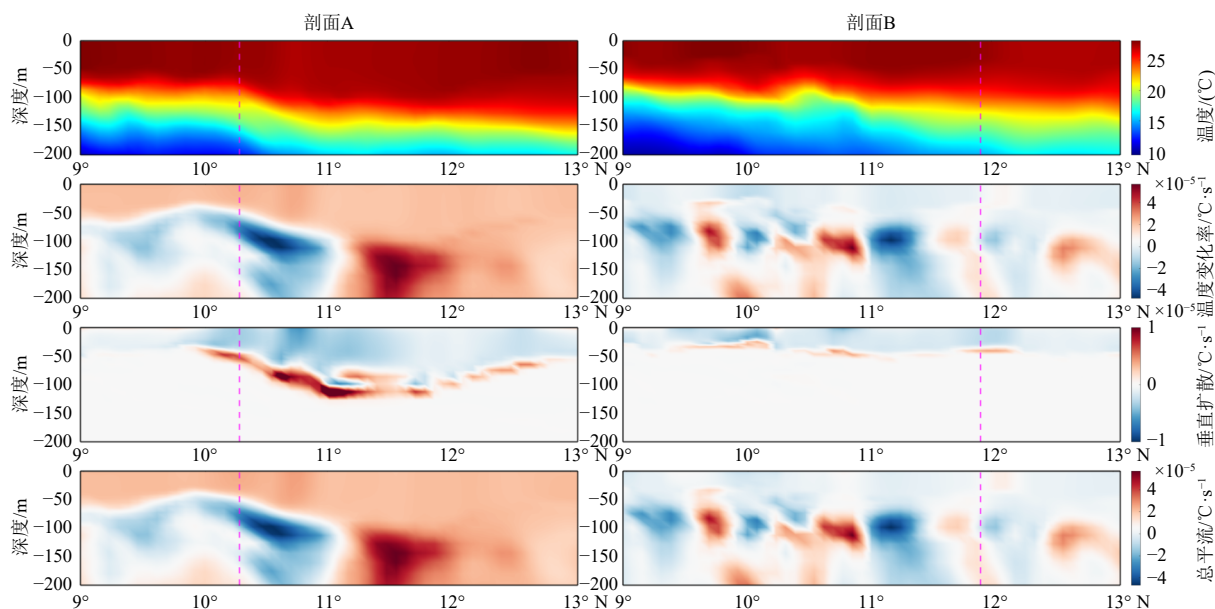


图 4 台风来临时 A、B 剖面海水温度和各热收支项垂向剖面分布

Fig. 4 Vertical profiles of sea surface temperature and heat budget components at the A and B sections during typhoon onset

通过分析发现,总平流是影响台风“美莎克”期间次表层温度变化的关键因素,而总平流本身是垂直对流和水平平流作用的结果。图 5 为台风过境后剖面 A 和 B 的垂直对流与水平平

流的分布情况。通过对垂直对流、水平平流以及总平流之间的对比,可以观察到以下现象:在 0 ~ 50 m 的上层次表层,台风路径左侧的海水温度变化主要受垂直对流影响,而台风路径右侧的

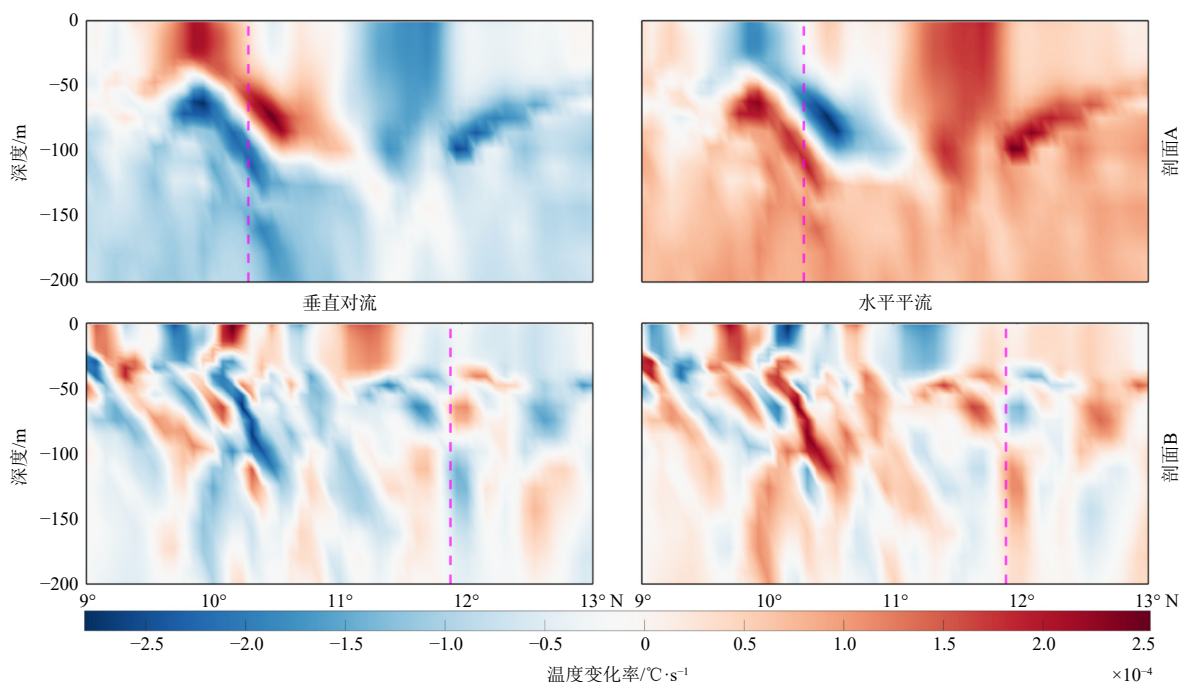


图 5 台风来临时 A、B 剖面垂直对流项和水平平流项垂向剖面分布

Fig. 5 Vertical profiles of vertical diffusion and horizontal advection terms at the A and B sections during typhoon onset

海水温度变化则主要受到水平平流的影响。在更深的 50 ~ 200 m 水层中,垂直对流在各个深度上普遍大于水平平流,这部分的温度变化主要受垂直对流的影响。垂直对流和水平平流在空间上的分布呈现出一种反向的格局,其中垂直对流导致的海水温度升高区域,水平平流往往导致温度下降,反之亦然。这两种流动方式的相互作用综合调节了次表层的温度变化。从纬度方向看,垂直对流和水平平流对温度的影响在台风路径两侧先增强后减弱,最强影响区域距离台风路径约 0.2°。出现这种现象的主要原因是台风路径即台风中心的移动轨迹,其中心区域即台风眼处于低压中心,风速较小,因此台风路径上的水平平流和垂直对流相对较弱。

2.4 台风过境后的温度变化机制

通过本研究,我们发现台风过境 24 h 内及整

个模拟时间段,垂直扩散和总平流的主要作用深度有显著差异,表明台风过境会改变原有的热收支结构,导致热收支各组成部分对温度的影响范围和幅度发生变化。因此,本文对 0 ~ 200 m 水深范围内各深度垂直扩散与温度变化率的相关性进行了计算,结果列于表 1。结果表明,在 S1、S2、S3 这 3 个位置,台风过境前,垂直扩散与温度变化率的相关性系数在 0 ~ 65 m 水深范围内随深度增加而缓慢降低,并从 65 m 开始急剧下降。台风过境后,这一转折点变为 35 m 水深附近,说明台风使垂直扩散的影响深度变浅,减小了约 30 m。此外,结合台风过境时各位置的中心最低气压(S1 位置 910 hPa, S2 位置 935 hPa, S3 位置 960 hPa),我们可以得出结论:在台风强度较高时,垂直扩散对上层水体温度变化率的影响增强;而在强度较低时,这种作用减弱。

表 1 S1、S2、S3 不同深度台风过境前、过境后垂直扩散与温度变化率的 Pearson 相关系数

Tab.1 Pearson correlation coefficients ($p < 0.05$) between vertical diffusion and temperature change rate at different depths before and after typhoon passage at locations S1, S2, and S3

深度	S1前	S1后	S2前	S2后	S3前	S3后
0 ~ 3 m	0.8560	0.9710	0.9437	0.9404	0.9357	0.8402
0 ~ 6 m	0.8635	0.9647	0.9419	0.9285	0.9302	0.8341
0 ~ 8 m	0.8680	0.9584	0.9391	0.9171	0.9206	0.8256
0 ~ 11 m	0.8707	0.9526	0.9360	0.9072	0.9135	0.8159
0 ~ 14 m	0.8731	0.9479	0.9332	0.8947	0.9104	0.8052
0 ~ 17 m	0.8760	0.9439	0.9307	0.8839	0.9084	0.7677
0 ~ 21 m	0.8799	0.9396	0.9285	0.8740	0.9067	0.6772
0 ~ 25 m	0.8843	0.9303	0.9266	0.8629	0.9025	0.6122
0 ~ 29 m	0.8888	0.9162	0.9248	0.8480	0.8963	0.5498
0 ~ 35 m	0.8934	0.8816	0.9218	0.8211	0.8756	0.4885
0 ~ 41 m	0.8967	0.7847	0.9137	0.7362	0.8179	0.4368
0 ~ 48 m	0.8922	0.6307	0.9020	0.5247	0.7475	0.3949
0 ~ 56 m	0.8811	0.4705	0.8836	0.3446	0.6987	0.3588
0 ~ 65 m	0.8414	0.3586	0.8618	0.2413	0.6283	0.3266
0 ~ 75 m	0.7023	0.2808	0.7882	0.1894	0.5371	0.2911
0 ~ 86 m	0.5726	0.2164	0.5951	0.1656	0.4148	0.2559
0 ~ 98 m	0.5759	0.1805	0.5264	0.1585	0.3003	0.2274
0 ~ 112 m	0.5095	0.1691	0.4813	0.1558	0.2199	0.2066
0 ~ 127 m	0.4820	0.1678	0.4622	0.1539	0.1716	0.1929
0 ~ 143 m	0.4701	0.1634	0.4398	0.1519	0.1490	0.1829
0 ~ 161 m	0.4535	0.1597	0.4208	0.1494	0.1398	0.1747
0 ~ 179 m	0.4321	0.1579	0.4080	0.1474	0.1362	0.1705
0 ~ 199 m	0.4184	0.1567	0.4004	0.1455	0.1351	0.1686

表 2 揭示了台风过境前后 0~200 m 水深内总平流与温度变化率之间相关性系数的变化趋势。数据显示,随着深度的增加,相关性系数普遍呈上升趋势。具体而言,台风过境前 S1 位置的相关性系数在 75 m 深度处达到 0.8,而台风过境后在 48 m 深度处达到同样的水平;S2 位置在台风过境前 86 m 深度处相关性系数达到 0.8,过境后在 48 m 深度处达到此值;S3 位置情况类

似,过境前在 86 m 深度处相关性系数达到 0.8,过境后在 35 m 深度处达到这一水平。相关性系数达到 0.8 代表二者之间存在高度相关性,这一现象表明台风的影响会导致总平流在更浅的水层内对温度变化率具有主导作用。在较浅的水层中,台风强度较高的区域,总平流受到台风的影响而减弱;而在台风强度较低的区域,总平流的影响相对增强。

表 2 S1、S2、S3 不同深度台风过境前、过境后总平流与温度变化率的 Pearson 相关系数

Tab.2 Pearson correlation coefficients ($P < 0.05$) between total advection and temperature change rate at different depths before and after typhoon passage at locations S1, S2, and S3

深度	S1前	S1后	S2前	S2后	S3前	S3后
0~3 m	0.6193	0.5725	0.2640	0.3014	0.0311	0.3718
0~6 m	0.6320	0.5904	0.2893	0.3174	0.0252	0.3960
0~8 m	0.6454	0.5921	0.3161	0.3375	0.0780	0.4202
0~11 m	0.6600	0.5913	0.3425	0.3650	0.1316	0.4497
0~14 m	0.6750	0.5879	0.3666	0.3800	0.1722	0.4835
0~17 m	0.6892	0.5894	0.3876	0.3916	0.1947	0.5290
0~21 m	0.7016	0.5904	0.4067	0.4093	0.2156	0.6029
0~25 m	0.7128	0.5818	0.4247	0.4237	0.2443	0.6802
0~29 m	0.7229	0.5810	0.4411	0.4396	0.2576	0.7453
0~35 m	0.7309	0.5958	0.4538	0.4826	0.2657	0.8047
0~41 m	0.7356	0.6924	0.4640	0.6233	0.2387	0.8455
0~48 m	0.7252	0.8329	0.4865	0.8351	0.3798	0.8751
0~56 m	0.7175	0.9109	0.5205	0.9297	0.4561	0.8974
0~65 m	0.7398	0.9487	0.5616	0.9661	0.5558	0.9154
0~75 m	0.8371	0.9698	0.7141	0.9795	0.6701	0.9333
0~86 m	0.9201	0.9819	0.8933	0.9844	0.7986	0.9487
0~98 m	0.9511	0.9874	0.9535	0.9857	0.8902	0.9597
0~112 m	0.9615	0.9887	0.9616	0.9862	0.9374	0.9668
0~127 m	0.9652	0.9891	0.9644	0.9866	0.9601	0.9711
0~143 m	0.9667	0.9896	0.9677	0.9869	0.9696	0.9741
0~161 m	0.9689	0.9901	0.9704	0.9873	0.9731	0.9764
0~179 m	0.9718	0.9903	0.9722	0.9877	0.9747	0.9776
0~199 m	0.9736	0.9904	0.9731	0.9880	0.9755	0.9781

综上所述,在没有台风影响的情况下,0~65 m 水层中的温度变化主要受到垂直扩散的决定性影响;而在 65~75 m 深度范围内,垂直扩散和总平流共同作用,对温度变化产生影响;75 m 以下的深水层温度变化则主要受到总平流的主导影响。台风过境显著改变了原有的热收支结构,使

垂直扩散的有效作用深度减小,而总平流的主导范围向更浅水层扩展,导致在台风过境期间,0~35 m 的水层温度变化主要受垂直扩散影响,35 m 以下深度的水层温度变化则由总平流主导。在台风过境 24 h 后,影响水深的分界线移至大约 48 m,此时 48 m 以上水层的温度变化主

要由垂直扩散引起,而48 m以下水层的温度变化则主要受到总平流的控制。与此相比,结合前人研究发现,夏季台风通常影响较浅的水层,其垂直扩散作用较为局限,主要集中在表层至大约30 m的深度^[22,30]。这导致夏季台风期间,表层水温下降较为显著,而深层水温受到的影响较小。

3 结论

(1)本文基于COAWST耦合模式,模拟了2015年春季超强台风“美莎克”过境期间西北太平洋(0—20°N, 120—160°E)海域的大气与海洋背景场。通过与Argo浮标温度剖面数据、CCMP风场再分析资料以及CMA和JMA提供的台风路径数据进行比对,验证了模拟结果的空间分布和强度变化高度吻合,表明所用模式在春季台风事件模拟中具有良好的适用性和准确性。

(2)“美莎克”台风对海水温度结构的扰动呈现出显著的空间差异和垂向特征。在台风路径右侧(S1点),近惯性振荡最为显著,导致混合层迅速加深、等温线上移,引起次表层温度周期性升高;左侧(S2点)和路径中心(S3点)的响应相对较弱。热收支剖面分析结果显示,0~50 m水层中,路径左侧温度变化主要受垂直对流控制,而右侧则主要受水平平流影响;在50~200 m的次表层中,垂直对流始终在各深度占主导地位,是驱动温度变化的主要机制。

(3)对热收支项与温度变化率的Pearson相关性分析表明,台风前,65 m以上水层的温度变化主要由垂直扩散控制,65~75 m深度受垂直扩散和平流共同影响,而75 m以下深水层则主要受总平流驱动。台风过境扰动改变了这一结构,24 h内,垂直扩散控制深度缩减至48 m,而总平流的主导作用向下延伸至海底,表明台风过程加剧了水体混合与能量输送。与已有的夏季台风研究相比,本研究发现春季超强台风对中层与深层水体具有更强的穿透性和扰动深度,揭示了其在不同季节背景下对海洋响应机制的差异性和典型性。

参考文献:

- [1] Xiao Y F, Duan Z D, Xiao Y Q, et al. Typhoon wind hazard analysis for southeast China coastal regions[J]. *Structural Safety*, 2011, 33(4/5): 286-295.
- [2] Chen Y, Duan Z D, Yang J, et al. Typhoons of western North Pacific basin under warming climate and implications for future wind hazard of East Asia[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2021, 208: 104415.
- [3] Hong X, Kareem A, Li J. Validation of the fast intensity model for typhoon and its application to the estimation of typhoon wind hazard for the southeast coast of China[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2020, 206: 104379.
- [4] Chen Y, Duan Z D. A statistical dynamics track model of tropical cyclones for assessing typhoon wind hazard in the coast of southeast China[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2018, 172: 325-340.
- [5] Wei M M, Fang G S, Zhao L, et al. Comparative study of typhoon wind hazard estimation in coastal region of China using different wind field parameter models[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2023, 236: 105398.
- [6] Chauhan A, Liou Y A. Influence of major typhoons on ocean, atmosphere and air quality of Northwest Pacific during August 2020[J]. *Atmospheric Environment*, 2022, 271: 118923.
- [7] Ji C X, Zhang Y Z, Cheng Q M, et al. Investigating ocean surface responses to typhoons using reconstructed satellite data[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2021, 103: 102474.
- [8] 胡冬, 毛科峰, 陈希, 等. 西北太平洋上层海洋对台风响应的合成分析研究[J]. *应用海洋学学报*, 2018, 37(4): 506-513.
- [9] 刘子龙. 基于台风“康森”和“暹巴”研究西太平洋上层海洋对台风的响应特征[C]/第32届中国气象学会年会S23第五届研究生年会. 天津: 中国气象学会, 2015: 24.
- [10] Stramma L, Cornillon P, Price J F. Satellite observations of sea surface cooling by hurricanes[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1986, 91(C4): 5031-5035.
- [11] 杨兵. 南海北部上层海洋对热带气旋的响应[D]. 青岛: 中国科学院研究生院(海洋研究所), 2016.
- [12] Lin I, Liu W T, Wu C C, et al. New evidence for enhanced ocean primary production triggered by tropical cyclone[J]. *Geophysical Research Letters*, 2003, 30(13): 1718.
- [13] Shang S L, Li L, Sun F Q, et al. Changes of temperature and bio-optical properties in the South China Sea in response to Typhoon Lingling, 2001[J]. *Geophysical Research Letters*, 2008, 35(10): L10602.
- [14] Zhang S W, Xie L L, Hou Y J, et al. Tropical storm-induced turbulent mixing and chlorophyll-*a* enhancement in the continental shelf southeast of Hainan Island[J]. *Journal of Marine Systems*, 2014, 129: 405-414.

- [15] Huang L W, Ge Y J. Numerical investigation of the upper ocean response to the Typhoon Winnie (1997) using an air-sea coupled model[J]. *Advanced Materials Research*, 2013, 726/727/728/729/730/731: 3443–3446.
- [16] Li H, Xu F H, Zhou W, et al. Development of a global gridded Argo data set with Barnes successive corrections[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2017, 122(2): 866–889.
- [17] Jha R K, Bhaskar T V S U. Generation and assessment of ARGO sea surface temperature climatology for the Indian Ocean region[J]. *Oceanologia*, 2023, 65(2): 343–357.
- [18] Giglio D, Roemmich D. Climatological monthly heat and freshwater flux estimates on a global scale from Argo[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2014, 119(10): 6884–6899.
- [19] Bhaskar T V S U, Jayaram C, Rao E P R. Comparison between Argo-derived sea surface temperature and microwave sea surface temperature in tropical Indian Ocean[J]. *Remote Sensing Letters*, 2013, 4(2): 141–150.
- [20] Chen X R, Liu Z H, Sun C H, et al. Comparison of TMI and AMSR-E sea surface temperatures with Argo near-surface temperatures over the global oceans[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2017, 36(3): 52–59.
- [21] Liu N, Ling T J, Wang H, et al. Numerical simulation of Typhoon Muifa (2011) using a Coupled Ocean-Atmosphere-Wave-Sediment Transport (COAWST) modeling system[J]. *Journal of Ocean University of China*, 2015, 14(2): 199–209.
- [22] 刘增宏, 许建平, 朱伯康, 等. 利用 Argo 资料研究 2001—2004 年期间西北太平洋海洋上层对热带气旋的响应 [J]. *热带海洋学报*, 2006, 25(1): 1–8.
- [23] 杨元建, 傅云飞, 孙 亮, 等. 基于多卫星和 Argo 浮标观测海洋上层对台风婷婷的响应 [J]. *中国科学技术大学学报*, 2010, 40(1): 1–7.
- [24] 孙朝辉, 刘增宏, 朱伯康, 等. 全球海洋中 Argo 剖面浮标运行状况分析 [J]. *海洋技术*, 2006, 25(3): 127–134.
- [25] 张 鹏, 陈晓玲, 陆建忠, 等. 基于 CCMP 卫星遥感海面风场数据的渤海风浪模拟研究 [J]. *海洋通报*, 2011, 30(3): 266–271.
- [26] 金铸钰, 刘 凯, 郭安博宇, 等. 基于 CCMP 的西北太平洋海面风场特征分析 [J]. *海洋预报*, 2022, 39(2): 20–33.
- [27] Baak M, Koopman R, Snoek H, et al. A new correlation coefficient between categorical, ordinal and interval variables with Pearson characteristics[J]. *Computational Statistics & Data Analysis*, 2020, 152: 107043.
- [28] Afyouni S, Smith S M, Nichols T E. Effective degrees of freedom of the Pearson’s correlation coefficient under autocorrelation[J]. *NeuroImage*, 2019, 199: 609–625.
- [29] Edelmann D, Móri T F, Székely G J. On relationships between the Pearson and the distance correlation coefficients[J]. *Statistics & Probability Letters*, 2021, 169: 108960.
- [30] 王同宇, 张书文, 陈法锦, 等. 西北太平洋上层海洋对连续多个台风的响应 [J]. *广东海洋大学学报*, 2019, 39(6): 62–74.
- (本文编辑: 曲丽梅)