# "苏拉"和"达维"双台风过程中台风浪和海温的数值模拟

# 朱 超<sup>1</sup>, 史 剑<sup>2</sup>, 陶爱峰<sup>1</sup>, 刘经东<sup>2</sup>

(1. 河海大学海岸灾害及防护教育部重点实验室, 江苏 南京 210098; 2. 国防科技大学 气象海洋学院, 江苏 南京 211101)

摘要:本文基于 FVCOM-SWAVE 耦合模型,以双台风"苏拉"和"达维"的台风过程为例,研究了台风过 程中海浪和海温的变化,通过与高度计和 Argo 资料的对比,发现耦合模型能较准确的模拟出有效波高 和海表面温度。由于双台风风场相互作用,风场结构和最大风速位置发生改变,影响着有效波高的分 布,台风"苏拉"产生的最大有效波高位于台风后侧。海表面温度的降低与风场、浪场分布密切相关,强 风强浪处的降温现象更明显,"苏拉"产生的降温区域位于路径附近,"达维"产生的降温区域位于路径右 侧。台风对海表面温度的降低与初始的混合层厚度、温跃层强度存在相关性,具体表现为初始的混合 层越薄、温跃层强度越大,降温越明显。

关键词: 双台风; 有效波高; 海表面温度 中图分类号: P731.11 文献标识码: A DOI: 10.11759/hykx20181205003

台风是典型的海洋灾害,是海洋上层环境与大 气相互作用的复杂过程。它能引起狂风巨浪,改变海 洋中流、温度、盐度等分布。双台风是指同时出现 两个达到热带风暴或以上强度的热带气旋,两者风 场相互作用。相比单个台风,双台风对海域的影响更 加严重。我国位于西北太平洋沿岸,盛行季风气候, 是全球遭受台风灾害最多的国家之一。研究双台风 过程中海洋环境的变化具有重大的意义。

目前,对双台风的路径、发展和降雨的研究较多, 而双台风过程中浪、流、温度和盐度变化的研究较 少。聂永强<sup>[1]</sup>利用 Holland 台风模型和背景风场叠加 的方法模拟了双台风下江苏沿海的波浪特性,指出 台风"布拉万"以风浪的形式影响江苏沿海,"天秤"的 影响以涌浪为主。丁维炜<sup>[2]</sup>利用海气浪耦合模型对西 北太平洋下双台风过程进行模拟,发现耦合模型能 够较为准确的预报出台风路径以及海浪的分布。

考虑到海洋环境的复杂性,单一研究浪和流的 模型已不能满足对模拟精度的要求。浪流相互作用 的概念最早由 Longuet-Higgins 和 Stewart<sup>[3]</sup>提出,经 过多年的发展,国内外已经对浪流耦合进行了大量 的研究。Moon<sup>[4]</sup>基于浪流潮耦合模型对东黄海区域 进行模拟,得出潮流、风暴潮和季节性环流都影响海 浪的分布。吴伦宇<sup>[5]</sup>基于 FVCOM-SWAVE 耦合模型 对长江口的浪,流,泥沙三者进行了耦合模拟,结果 文章编号: 1000-3096(2019)07-0001-11

显示耦合模型有利于提高浪、流、沙的模拟精度。 刘子龙<sup>[6]</sup>在对北太平洋海表面温度进行模拟时指出 考虑海浪作用的 sbPOM 耦合模式更能精确的模拟出 海表面温度的变化。

本文从 FVCOM-SWAVE 浪流耦合模型出发,以 双台风"苏拉"和"达维"的过程为例,研究双台风过程 中海浪的分布特点以及海洋表层温度的变化特征。

# 1 耦合模型介绍

有限体积海岸海洋模型 FVCOM(The Unstructured Grid Finite Volume Community Ocean Model)是 目前流行的海洋环流模型之一,它是由陈常胜及其 团队成功研发,并具有开源代码的模式。该模式基于 有限差分法和有限单元法的优点,采用有限体积法, 在计算中不仅具有计算编码效率高的特点,而且可 以精确的适应高度不规则的河口海岸边界。模式从 最初研发至今,不断进行修正和改进,加入了浪流

收稿日期: 2018-12-05; 修回日期: 2019-02-26

基金项目:国家自然科学基金(51579091,41676014)

<sup>[</sup>Foundation: The National Natural Science Foundation of China (No.51579091, No.41676014)]

作者简介:朱超(1993-),男,江苏省徐州人,硕士研究生,主要从事 海洋动力学与数值模拟方面的研究,电话:18362990002, E-mail: 59329104@qq.com; 史剑(1981-),通信作者,男,江苏省扬州人,副 教授,博士,主要从事海洋动力学与数值模拟方面的研究, E-mail: shijian.ocean@qq.com

耦合模块、河口模块、粒子追踪模块、同化模块以 及水质模块等。本文采用浪流耦合模块(FVCOM-SWAVE)<sup>[7-8]</sup>,利用波作用密度谱平衡方程计算耦合 模型中的海浪要素,温度等控制方程计算温度要素。

## 2 资料介绍及模型设置

### 2.1 "苏拉"、"达维"台风介绍

台风"苏拉"于 2012 年 7 月 28 日 08 时左右在菲 律宾东部海域生成, 29 日 14 时加强为强热带风暴, 8 月 2 日 3 时左右首次在台湾省花莲市登陆,中心最大 风速为 42 m/s,中心最低气压 950 百帕,而后继续向 西北方向移动,台风强度变化不大,最后于 3 日 6 时 在福建省福鼎市秦屿镇登陆,减弱为热带低压。台风 "达维"于 2012 年 7 月 28 日 20 时左右在日本东京东 南 1 330 公里的西北太平洋上生成,并于 8 月 1 日 8 时加强为强热带风暴, 2 日凌晨进入东海,一直向西 北移动,中心附近最大风速 35 m/s,最低气压 965 百 帕,当天晚上在江苏省响水县陈家港镇登陆,随后 向西北连云港市方向行进,逐渐减弱为热带风暴。台 风"苏拉"和"达维"是典型的双台风现象,对我国影 响时间长,范围广。台风路径资料来自国家气象局<sup>[9]</sup>, 具体移动路径如图 1。



Fig. 1 Path of typhoons "Saola" and "Damrey"

#### 2.2 资料介绍

本文模拟区域覆盖了东中国海及西北太平洋, 具体范围 100°E~147°E, 2°N~47°N。计算区域范围大, 地形错综复杂,包含日本岛、台湾岛和琉球群岛等。 海岸线采用美国国家地球物理资料中心 NGDC (National Geophysical Data Center)提供的海岸线资料 GSHHS(Global Self-consistent Hierarchical Highresolution Shoreline);海域水深数据由 NGDC 提供的 ETOPO5 地形数据插值得到。

采用欧洲中期天气预报中心 ECMWF(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts)提供的 风场资料,空间分辨率为 0.125°×0.125°,时间分辨 率为 6 小时。热通量资料采用 NCEP(National Centers for Environmental Prediction)提供的再分析数据,时间空间分辨率与风场资料一致。温度采用 HYCOM (Hybrid Coordinate Ocean Model)<sup>[10]</sup>的再分析数据,垂向分为 40 层,以 7 月 28 日资料作为模型的初始 资料。上述风场等资料通过前处理过程插值到网格中,并转化为 FVCOM 可识别的网格资料形式。本 文采用 Jason-2 卫星高度计反演的有效波高和 Argo 浮标实测的上层海水温度作为模拟结果的判别标准。

#### 2.3 模型设置

耦合模型水平采用非结构化的三角形网格,如 图 2, 网格包括 26 073 个节点和 50 244 个三角单元, 最大步长约为 70 千米,最小步长约为 10 千米。设置 了陆地边界、岛屿边界以及海洋开边界,海岸边界采 用干湿网格点法,干点处的速度为 0,开边界采用海 绵边界条件。模型在垂直方向分为 40 层,内外模的 时间步长分别为 90 s和 3 s,输出时间间隔取 60 分 钟。外模是二维,计算平均流速和水位;内模是三维, 计算湍动能、三维流速、温度和盐度等物理量,内外 模式的运输性保持一致。



图 2 计算网格图 Fig. 2 Grid of computation



# 3 台风浪的数值模拟

5

0⊾ 8°

9

8

7 6

3

0∟ 20°

有效波高/m 4 с

12°

有效波高/m

#### 3.1 有效波高的验证

波浪是台风过程中典型的表现形式,而有效波高作为衡量波浪大小的标准,在生产生活中具有重要的意义,为了说明模拟结果的准确性,对台风过程中的有效波高进行验证。本文采用 Jason-2 卫星高度计反演的有效波高进行波高验证,选取双台风过程期间 Jason-2 卫星高度计资料,轨道如图 3,图中a、b、c、d的轨道日期为 8月 2日 10 时左右、8月 1日 10 时左右、7月 30 日 21 时左右和 8月 1日 20 时左右。Jason-2 说明书中提到 Ku 波段数据精度为0.001 m,且观测结果优于c波段,所以采用 Ku 波段反演的有效波高作为验证标准。王娟娟等<sup>[11]</sup>研究Jason-2 有效波高产品在中国海域的准确性评估中指出有效波高的精度与离岸距离有关,离岸越远,精度越高。为了保证模拟的精度,取外海轨道反演的波高值作为验证标准,不同轨道有效波高的取值范围

以拟合结果的纬度坐标为准,如图 4。





采用均方根误差和相关系数两个统计量作为判 别有效波高准确性的标准,结果如表 1。由图 4 和

23°

表1可知,模拟出的有效波高相对偏小。从偏差角度 讲,王娟娟等<sup>[11]</sup>指出 Jason-2 有效波高产品在中国海

# 研究论文 • <u>┃\_\_\_\_\_</u> → ARTICLE

偏大,其中在东海偏差最大,而本文选用的高度计 轨道主要在东海及其外海,所以模拟结果偏小的原 因可能是高度计资料偏大。此外图 4c 计算出的 RMSE 偏大,可能是模型输出的时间与卫星高度计 反演时间具有很短的时间差,导致拟合结果出现一 个相位差。总体来讲,耦合模型能够准确的模拟出台 风浪大小。

#### 表1 有效波高模拟值与高度计值误差统计表

 Tab. 1
 Error statistics of significant wave heights between simulation and altimeter

轨道 统计量	а	b	С	d
CC	0.935 6	0.936 5	0.880 6	0.788 2
RMSE/m	0.334 6	0.488 4	0.592 0	0.428 0

#### 3.2 台风浪模拟结果分析

从模拟的过程中可以看出,双台风"苏拉"和"达 维"从生成到登陆减弱用了5天左右、与单个台风相 比, 它们的影响区域更广, 更具有危险性。如图 5a, 7月28日台风形成时,台风产生的海浪就具有明显 的分区,"苏拉"引起的海浪主要分布在台风前侧和后 侧, 后侧有效波高大于前侧有效波高; "达维"引起的 海浪主要分布在台风的右侧。29日台风"苏拉"和"达 维"分别向西北移动、台风的风场变强、影响的海域 变大。图 5c 可以看出, 30 日台风"苏拉"经过菲律宾 群岛向台湾岛移动,最大风速附近出现最大有效波 高, 值约为 5.5 米, 后侧波高值明显大于前侧波高 值。台风"达维"由太平洋向日本岛移动,"达维"虽然 具有较小的风场强度,产生的最大有效波高仅为 4 米左右,但依旧表现出大风对应大浪的特性,路径 右侧的风速大于左侧风速,右侧有效波高值大于左 侧有效波高值。31日,随着台风的发展,在两台风眼 处都出现了明显的海浪,有效波高接近2.5米。此时 由于水深较大,没有复杂岛屿的阻挡,台风"苏拉" 和"达维"出现了台风过程中的最大有效波高值,"苏 拉"后侧产生的最大有效波高约为7米、"达维"右侧 产生的最大有效波高约为 5.5 米, 如图 5d。8 月 1 日, 台风"苏拉"在台湾省登陆,风速达到最大值 42 m/s, 但受到台湾及其周围岛屿的影响,水深变浅、波浪破 碎、能量降低、有效波高减小,最大有效波高出现在 路径后侧的最大风速附近,波高值为6米左右。台风 "达维"经过日本,受到右侧地形的影响,右侧的最 大有效波高降低,最大波高值为 3.5 米左右,如图

5e。2日,由于地形影响和两台风风场相互作用的减弱,"苏拉"的最大风速出现在路径右侧,海浪呈现出右偏性。3日两台风分别在福建福鼎市秦屿镇和江苏省盐城市响水县登陆。

夏璐一等[12]在西北行路径台风浪的特性分析中 指出,西北向移动的台风产生的台风浪具有右偏性。 考虑到本次模拟结果与前者结论不符,通过分析双 台风与单个台风的不同之处,发现台风"苏拉"和"达 维"风场的相互作用对台风浪的分布产生一定的影 响。由图 5a—e 可知、台风"苏拉"的风场强度和最大 风速半径大于"达维"的风场强度和最大风速半径, 在两者风场的相互影响下,"苏拉"的外侧气流经过旋 转从东南方向进入达维风场中,"达维"的外侧气流经 过旋转从北方向进入"苏拉"风场中。"苏拉"的后侧与 前侧风场密度较大,出现最大风速,"达维"的右侧风 场密度较大,出现最大风速。波高对风速有很强的依 赖性, 台风"苏拉"产生的最大有效波高出现在路径 的后侧, 台风"达维"产生的最大有效波高出现在路 径的右侧。由图 5f 可知, 在台风"苏拉"和"达维"逐渐 靠近的过程,风场相互影响更加剧烈。在"苏拉"风场 的影响下, 台风"达维"的气旋性减弱, 产生的有效 波高没有明显的规律性。由于台风"达维"强度的减 弱、地形阻挡和水深变浅等因素, 台风"苏拉"的移动 路径发生转变,最大风速出现在台风路径的右侧, 最大有效波高出现在路径的右侧, 表现出台风浪典 型的右偏性。

由模拟的过程可以看出,台风浪的分布主要受 到台风系统的强度、台风移动路径以及地形因素的 影响;双台风过程中风场的相互作用影响着最大风 速的分布,也影响着台风浪的分布。

## 4 台风过程对海表面温度的影响

#### 4.1 台风过程中海表面温度的验证

台风的演变和海表面温度(Sea Surface Temperature,简称 SST)变化是一个双向的响应过程,温度高 的海水会蒸发出更多的水汽,加大海洋对大气的热 通量,影响着台风强度、路径的变化;台风过程引起 的上升流、混合层的夹卷、海浪搅拌混合等现象也 会对海水起到降温的作用。

温度模拟的时间范围为7月28日至8月4日,为 了说明模拟温度的可靠性,采用 Argo 浮标资料进行 海温的验证,图6为部分日期7月28日、31日 Argo

#### 研究论文・ 道明 ARTICLE

浮标在模拟区域内的位置分布情况,黑色五角星代 表浮标位置。采用 Argo 浮标资料的第一层温度数据 与模型模拟的第一层温度数据进行比较,图 7 为 28、 31 日模拟的温度与 Argo 浮标实测温度拟合图,黑色 曲线代表理想条件下模拟温度与实测温度完全相同 的拟合结果, 红色曲线则代表实际条件下浮标处模 拟温度与实测温度拟合结果, 其中理想条件指模拟 过程与真实海洋动力过程完全相同。采用相关系数 和均方根误差两个统计量作为判别模拟温度准确性 的标准, 统计结果见表 2。



Fig. 5 Distribution of wind field vectors and significant wave heights at six typical moments



图 7 模拟温度与 Argo 实测温度拟合图 Fig. 7 Fitting diagram of simulated and measured temperatures 注: △: 浮标位置处的模拟和实测温度; 黑线: 理想条件下拟合曲线; 红线: 实际条件下拟合曲线

表 2 温度模拟值与 Argo 浮标实测值误差统计表 Tab.2 Error statistics of temperature between simulation and measured data

日期统计量	7月28日	7月31日
CC	0.935 6	0.936 5
RMSE/m	0.334 6	0.488 4

由拟合结果可知,虽然个别区域模拟的温度偏 差较大,但总体上耦合模型模拟的海温较合理可靠, 为接下来分析台风过境后 SST 的变化提供了依据。

#### 4.2 台风过程中 SST 变化的分析

考虑到 SST 的变化对台风过程响应是一个较慢的过程,因此海温的模拟时间为 7 月 28 日至 8 月 4 日。本文研究以 7 月 28 日的 SST 为初始温度,将不

同模拟时段的 SST 与初始温度作差,结果见图 8。过 程初期,台风风场、海浪、流场强度较弱,引起的上 升流、辐散、辐聚、混合层夹卷作用较小,对 SST 的降低效果不够明显,从 7 月 30 日模拟结果可以看 出,"达维"经过的海域产生 0.5~1℃左右的降温,"苏 拉"产生的降温效果不明显。31 日,台风"苏拉"路径 附近开始出现降温,但台风"达维"附近降温更加明 显,出现较大冷斑现象,降温大约为 2.5℃。8 月 2 日, 两个台风路径附近的降温幅度和降温区域进一步增 大,"苏拉"路径附近最大降温约为 3℃,"达维"路径右 侧的最大降温约为 3.5℃左右,且台风"达维"产生的 降温区域更大。3 日,双台风引起了最大降温,降温 幅度达到 4.5℃,出现在靠近"达维"路径附近的东海。





图 8 模拟的海表面温度变化图 Fig. 8 Variation of simulated sea surface temperature

只有 1℃左右,而"达维"产生的降温依旧存在 3.5℃ 左右,回温较慢,这可能与下一号超强台风"海葵"的 影响密不可分。2 日,台风"海葵"已生成并产生了明 显的海浪,在"海葵"路径的右侧产生了较大的有效波 高,如图 5f,"海葵"产生的最大风速和最大有效波高 的区域与台风"达维"的降温区域大致相同,从而对该 区域的海水起到了降温作用,使该海域回温较慢。

整体可以看出, 台风对 SST 具有明显的降低作 用, 但降温过程具有延迟性, 延迟时间大约为两天。 台风过程中, 台风眼处由于上升流、海水辐散、海水 辐聚等作用,下层冷水上翻,冷热水混合,使得上层 海水温度降低。风眼外侧,在风场作用下海水产生切 应力,使得混合层夹卷下层冷水,降低了海水温度。 海浪作为海气过程中剧烈的表现,其不仅促进了海 洋向大气的热辐射通量,也促进了海洋上层的湍流 作用,间接的降低了上层海水温度。台风强度越大, 移速越慢,风场对海水的作用越强,降温效果越明 显。由于台风"达维"的最大风速和最大有效波高均位 于路径右侧,产生的混合层夹卷、海浪的搅拌作用相 对剧烈,使得右侧降温区域更明显,梁晓红<sup>[13]</sup>等人 研究台风对 SST 影响中也得出降温现象右偏性的结 论。在双台风风场的相互作用下,"苏拉"风场的最大 风速和最大有效波高均位于台风位置后侧,使得台 风后侧处的 SST 降低现象较明显,降温区域位于台 风路径处,没有表现出明显的右偏性。

通常情况下,台风引起的 SST 降温效果与台风的强度、移速、风场半径、最大风速等有着密切的关系。与"达维"相比,台风"苏拉"的强度、最大风速、最大风速半径等均较大,且"苏拉"的移动速度较慢,"达维"移动速度较快,从理论上来讲,台风"苏拉"产

#### 表 3 Argo 浮标的具体经纬度 Tab. 3 Specific latitudes and longitudes of the Argo buoy

生的降温幅度及降温区域应大于"达维"产生的降温 效果,但此次模拟有着不同的结果,考虑到台风过 境前海洋环境的影响,海洋上层初始的混合层厚度 和温跃层强度对 SST 变化具有不可忽略的影响。

## 4.3 初始混合层厚度对台风过程中 SST 变 化的影响

芦静等<sup>[14]</sup>利用 Argo 和 Levitus 多年资料研究得 出,混合层厚度从低纬度向高纬度呈现减小的趋势, 菲律宾,台湾岛东部海域混合层的厚度大于日本岛 太平洋沿岸地区混合层的厚度。为了分析初始混合 层厚度对于台风过程中 SST 降低的影响,采用模拟 初期7月28日和29日靠近台风"苏拉"和"达维"路径 的8个浮标资料以及台风过后8月2日和3日靠近 "苏拉"和"达维"的10个浮标资料进行对比,由于 Argo浮出水面传输数据的周期为10天左右,超过了 本次模拟周期,且 Argo浮标在一个周期内漂移的距 离为10~40公里不等,所以本文采用经纬度尽量相 差较小的 Argo浮标资料,这样有利于SST 降温对比 的准确性。表3为选取 Argo浮标的具体位置,图9 为 Argo浮标的实测剖面温度变化图。

日期	28	29 日	2	3 日
位置	经度/°E	纬度/°N	经度/°E	纬度/°N
	129.421	20.762	129.136	20.866
靠近台风"苏拉" 浮标位置	129.398	22.450	129.386	22.631
	129.381	20.830	129.048	20.865
	129.385	22.449	129.374	22.653
			140.150	28.076
靠近台风"达维" 浮标位置	146.072	29.934	146.285	30.008
	138.301	31.318	139.548	28.005
	146.118	29.951	146.315	30.046
	136.284	29.045	146.934	27.067
			140.341	31.069

混合层深度的定义:比海表面水温度低 0.5℃深 度以上的水层。由计算可得图 9a 的平均混合层深度 为 30 米, b 为 12 米, c 为 35 米, d 为 32 米,其中图 9a、 b 为台风过境前的混合层厚度,图 9c、d 为台风过境 后的混合厚度。从统计上看出,位于台风"苏拉"路径 附近海域的初始混合层厚度明显大于台风"达维"路 径附近海域的初始混合层厚度,两者差值大约 20 米, 这与芦静等<sup>[14]</sup>得出的全球大洋 7 月份混合层深度分 布图的结论一致。初始混合层厚度大,海洋上层恒温 水体相对较多。在台风风场的作用下,台风眼处的水 体辐散引起上升流,使下层冷水与上层水掺混,由 于上层具有较大体积的恒温水,掺混之后 SST 降低 幅度比较小。台风眼外侧最大风速处,混合层夹卷、 强浪的搅拌等作用使得混合层恒温水与下层冷水 进行掺混,混合层厚度越大,对深层低温海水的掺 混现象越不明显,SST 降低越小。初始混合层厚度小,

研究论文 · ┃:胍 ARTICLE

无论是在台风眼处还是在最大风速处均能引起较明显的海水降温现象。这也解释了强台风"苏拉"引

起的降温比台风"达维"引起的降温幅度小,降温区域小。



图 9 Argo 浮标的剖面温度变化图 Fig. 9 Section temperature variation of Argo buoy

台风过程后靠近"苏拉"、"达维"路径海域的混合 层厚度都有不同程度加深的趋势。台风"达维"附近处 的混合层加深幅度比较明显,从 12 米增加到 32 米, 主要是因为初始混合层厚度比较小,台风引起的上 升流、水体辐散、辐聚以及混合层对海水的夹卷作 用显著,使得深浅层海水的掺混现象明显,从而导 致混合层厚度变大。台风"苏拉"附近处的混合层加深 不明显,从 30 米增加到 35 米,其主要原因是观测浮 标的位置不是最大降温区域处,且初始混合层厚度 相对较大,所以台风"苏拉"过后引起观测浮标处混 合层加深不明显。

# 4.4 初始温跃层强度对台风过程中 SST 变 化的影响

从台风过程中可以看出,最大降温出现在"达 维"路径附近的东黄海海域。考虑到诸多因素影响着 台风对 SST 的降低效果,对比台风"达维"前后风场 强度、风速半径、最大风速、初始混合层厚度等条 件,发现温跃层的跃层强度同样对 SST 变化起着重 要的作用。在初始混合层厚度大致相等的情况下、温 跃层的强度越大,那么 SST 的降低现象越明显。葛 人峰[15]等人指出夏季东海黄海的温跃层强度较大, 整个东海黄海跃层强度在 2~4℃/m 不等, 远大于外 海约 0.1℃/m 的跃层强度, 温跃层的厚度普遍小于 20 米。由于前人对东黄海温跃层做了大量研究,得 出了相关结论,本节仅对"达维"路径的外海处温跃 层进行简要的计算,利用 Argo 浮标资料垂向分层的 特点,采用垂向梯度法对 28、29 日"达维"路径的外 海处 4 个浮标资料进行温跃层的强度和厚度计算, 当 跃层强度大于 0.05℃/m 时, 说明存在温跃层, 具体浮 标经纬度见表 3, 温跃层计算结果见表 4。从表中可以 看出, 浮标所在外海的温跃层强度大约为 0.1℃/m, 温跃层厚度大约为 70 米。温跃层强度越大, 厚度越 小、那么垂向海水温度变化梯度越大、下层冷水越

# 研究论文 • <u>linn</u> ARTICLE

靠近上层水体, 上升流、辐合、辐散、夹卷等现象容

易将下层冷水与上层水掺混, 令 SST 大大降低。

Tab. 4	Calculated the	rmocline strength and thickness based on 4 buoy of Argo
表 4	利用 4 个 Argo 湾	<sup>2</sup> 标资料计算出的温跃层强度和厚度

位置 计算量	浮标 1	浮标 2	浮标 3	浮标 4	平均值
温跃层强度/(℃/m)	0.146	0.073	0.138	0.090	0.111
温跃层厚度/m	50	92	52	85	69.75

# 5 结论

本文采用 FVCOM-SWAVE 耦合模型,模拟了 "苏拉"和"达维"的台风过程,着重分析了双台风过 程中台风浪和 SST 变化的特性。双台风过程中,由 于台风风场的相互作用,风场结构发生改变,影响 着台风浪的分布。海浪对风场具有很强的依赖性,最 大有效波高出现在最大风速附近。"苏拉"产生的最大 有效波高位于台风后侧,"达维"产生的最大有效波高 位于台风的右侧。

台风过程会引起 SST 降低, 降温对台风的响应 大约为2天, 降温区域的分布与海浪分布一致, 大风 强浪区降温幅度偏大。"苏拉"路径附近降温较明显, "达维"路径右侧降温较明显。通过"苏拉"和"达维" 台风过程的对比, 发现初始混合层厚度越大, 台风 过程对 SST 的降低效果越不明显。在混合层厚度相 等的基础上, 温跃层强度越大, 台风对 SST 的降低 效果越明显, 在浅海大陆架处表现更显著。

#### 参考文献:

- [1] 聂永强,陈鹏超.双台风下江苏沿海的波浪数值模 拟[J]. 水道港口, 2017, 38(2): 143-149.
   Nie Yongqiang, Chen Pengchao. Numerical simulation of the wave off Jiangsu coast under binary typhoons[J]. Journal of Waterway and Harbor, 2017, 38(2): 143-149.
- [2] 丁维炜,齐琳琳,汪汇洁,等.中尺度海气浪耦合模式对西北太平洋双台风影响下的海浪预报研究[J].海洋技术学报,2018,37(3):41-48.
   Ding Weiwei, Qi Linlin, Wang Huijie, et al. Study on

the wind wave prediction of typhoons over the Northwestern Pacific Ocean with mesoscale coupled atmosphere-ocean-wave model[J]. Ocean Technology, 2018, 37(3): 41-48.

- [3] Longuet-Higgins M S, Stewart R W. Changes in the form of short gravity waves on long waves and tidal currents[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1960, 8(4): 565-583.
- [4] Moon I J. Impact of a coupled ocean wave-tide-circulation

system on coastal modeling [J]. Ocean modelling, 2005, 8(3): 203-236.

- [5] 吴伦宇. 基于 FVCOM 的浪、流、泥沙模型耦合及应 用[D]. 青岛:中国海洋大学, 2010.
  Wu Lunyu. FVCOM-based Wave-Current-Sediment model coupling and its application[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2010.
- [6] 刘子龙, 史剑, 蒋国荣, 等. 海浪搅拌混合对北太平
   洋海表面温度模拟的影响[J]. 海洋科学, 2016, 40(12):
   131-137.

Liu Zilong, Shi Jian, Jiang Guorong, et al. Influence of wave-induced mixing on a sea surface temperature simulation of the North Pacific[J]. Marine Sciences, 2016, 40(12): 131-137.

- [7] Chen C S, Liu H D, Beardsley R C. An unstructured grid, finite-volume, three-dimensional, primitive equations ocean model: application to coastal ocean and estuaries[J]. Journal of atmospheric and oceanic technology, 2003, 20(1): 159-186.
- [8] Qi Jianhua, Chen Changsheng, Beardsley R C, et al. An unstructured-grid finite-volume surface wave model (FVCOM-SWAVE): Implementation, validations and applications[J]. Ocean Modelling, 2009, 28(1-3): 153-166.
- [9] Ying Ming, Zhang Wei, Yu Hui, et al. An Overview of the China Meteorological Administration Tropical Cyclone Database[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2014, 31(2): 287-301.
- [10] Hybrid Coordinate Ocean Model. HYCOM 温度资料 [EB/OL]. ftp: //ftp.hycom.org/datasets/GLBu0.08/expt\_ 91.1.html, 2018-05.
- [11] 王娟娟, 高志一, 王久珂, 等. Jason-2 有效波高产品 在中国海域的准确性评估[J]. 海洋与湖沼, 2016, 47(3): 509-517.
  Wang Juanjuan, Gao Zhiyi, Wang Jiuke, et al. Validation on JASON-2 significant wave height production for China seas[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2016, 47(3): 509-517.
- [12] 夏璐一, 栾曙光, 张超. 西北行路径台风浪的特性分析[J]. 大连海洋大学学报, 2014, 29(6): 654-658.
  Xia Luyi, Luan Shuguang, Zhang Chao. Wave characteristics of northwest moving path typhoon[J]. Journal of Dalian Fisheries University, 2014, 29(6): 654-658.



- [13] 梁晓红, 荣艳淑, 葛黎丽. 台风对海表温度的影响分析[J]. 海洋开发与管理, 2015, 32(4): 53-58.
  Liang Xiaohong, Rong Yanshu, Ge Lili. Analysis of Typhoon on sea surface temperature[J]. Ocean Development and Management, 2015, 32(4): 53-58.
- [14] 芦静, 乔方利, 魏泽勋, 等. 夏季海洋上混合层深度 分布研究[J]. 海洋科学进展, 2008, 26(2): 145-155.
  Lu Jing, Qiao Fangli, Wei Zexun, et al. Study on Distributions of mixed layer depth in the world ocean in

summer[J]. Advances in Marine Science, 2008, 26(2): 145-155.

[15] 葛人峰, 郭景松, 于非, 等. 黄、东海陆架海域温度 垂直结构类型划分与温跃层分析[J]. 海洋科学进展, 2006, 24(4): 424-435.

Ge Renfeng, Guo Jingsong, Yu Fei, et al. Classification of vertical temperature structure and thermocline analysis in the Yellow Sea and East China Sea shelf sea areas[J]. Advances in Marine Science, 2006, 24(4): 424-435.

# Numerical simulation of typhoon waves and sea temperatures during Typhoons "Saola" and "Damrey"

# ZHU Chao<sup>1</sup>, SHI Jian<sup>2</sup>, TAO Ai-feng<sup>1</sup>, LIU Jing-dong<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory of Coastal Disaster and Defense, Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. College of Meteorology and Oceanography, National University of Defense Technology, Nanjing 211101, China)

Received: Dec. 5, 2018

Key words: clouble typhoons; significant wave height; sea surface temperature

Abstract: Based on the FVCOM-SWAVE coupling model, in this paper, the variation of ocean wave and sea surface temperature during the typhoon process of double typhoons "saola" and "Damrey" is studied. By comparing al-timeter data with Argo data, it was found that the coupling model accurately simulated both parameters. Due to the interaction between the two typhoons' wind fields, the structure of the wind field, and the position of maximum wind speed change (which affected the distribution of significant wave heights), the maximum significant wave height generated by typhoon "Saola" was located behind the typhoon. The decrease in sea surface temperature was closely related to the distribution of the wind and wave fields; this cooling was apparent in the strong winds and waves. The cooling area generated by "Saola" was located near the path and cooling area generated by "Damrey" on the right side of the path. The decrease in sea surface temperature caused by the typhoons was correlated with the initial thickness of the mixed layer and the initial thermocline gradient. This manifested as a trend wherein the thinner the initial mixed layer and the stronger the gradient of thermocline, the more apparent the temperature drop.

(本文编辑:丛培秀)