

台风过程中浪致 Stokes 漂流对海洋上层温度影响的数值模拟*

史剑¹ 朱超² 刘经东¹ 刘振宇¹

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

摘要 Stokes 漂流对海洋上层温度变化具有重要影响。本文以“麦德姆(Matmo)”台风过程为例, 基于浪流耦合模型, 通过对比分析考虑和未考虑 Stokes 漂流的模拟结果, 研究了台风过程中浪致 Stokes 漂流及其效应对海洋上层温度变化的影响。研究表明 Stokes 漂流及其效应与海浪大小的分布密切相关, 海浪越大, Stokes 漂流、Stokes 输运和 Ekman-Stokes 数相对越大。Stokes 漂流在台风过程中起降低海表面温度的作用, 台风路径处的 Stokes 漂流及其效应较大, 降温较明显, 最大降温约 2°C。产生降温的原因是 Stokes 漂流造成海表流场改变, 以及 Stokes 输运引起海水辐散等作用加强了上下层海水质量和能量的交换。利用 Argo 资料进行验证, 发现考虑了 Stokes 漂流作用的海洋上层温度模拟结果与 Argo 测量结果更接近。

关键词 台风; 海浪; Stokes 漂流; 海洋上层温度

中图分类号 P731 doi: 10.11693/hyhz20190600114

海浪作为海洋中的典型小尺度现象, 无时无刻不存在于海面。近年来, 随着对海洋大尺度物理过程研究的逐渐深入, 研究者们发现海浪对海洋大尺度物理过程存在重要的作用。海浪主要以浪致搅拌混合、Stokes 漂流、辐射应力和波浪破碎等方式作用于上层海洋, 影响着海洋上层的温度、盐度、流速等海洋环境要素。

有限振幅波理论中提到, 在无旋、无粘条件下, 非线性作用会使波浪在传播方向上产生随深度变化的净位移, 并影响着上层海洋动力过程, 此净位移为 Stokes 漂流。Longuet-Higgins(1953)提出, 在海水有粘性的条件下, Stokes 漂流不仅会影响海洋上层流动, 而且会引起净质量输运。Weber(1983)通过研究发现, 真实的海洋存在粘性, 不管粘性多小, Stokes 漂流均会引起净质量输运。McWilliams 等(1999)在研究 Stokes 输运大小时发现, 高风速下的 Stokes 输运与风生环流输运具有相当的量级, 并发现 Ekman 输运的量值中 Stokes 输运最大可达 50%, Tamura 等(2012)、

毕凡(2013)在 Stokes 输运的研究中也得到了相同的结论。Hasselmann(1970)则提出在行星涡度的影响下, Stokes 漂流与涡度作用产生 Coriolis-Stokes 力, 虽然此力只穿透很浅的海洋深度, 但对海洋混合层的能量输入输出、剖面流场结构和海表流场分布具有一定的影响。Huang(1979)则证明了 Coriolis-Stokes 力能够改变混合层内 Ekman 平衡和流速剖面的现象。Lewis 等(2004)在经典的 Ekman 模型中加入了 Coriolis-Stokes 力项, 发现模拟的海洋动力过程与实际更加相符。Craik 等(1976)则提出在 Stokes 漂流与风生流作用过程中, 会产生 Stokes-Vortex 力, 该力是 Langmuir 环流的主要源动力。Li 等(1995)研究海洋上层环流结构时发现, Langmuir 环流通过增强上层环流的剪切不稳定性, 加剧了上层海洋的混合作用, Polton 等(2007)也得出了相同的结论。Li 等(2008)则利用 MY2.5(Mellor *et al.*, 1974)阶湍封闭模型进行数值模拟, 引入了参数化的 Stokes 漂流, 改变垂向混合系数, 结果表明, 相较于海浪破碎仅对海洋表层产生影响,

* 国家自然科学基金, 41676014 号。史剑, 副教授, E-mail: shijian.mil@163.com

收稿日期: 2019-06-14, 收修改稿日期: 2019-07-15

Stokes 漂流的影响可贯穿整个混合层。从 Stokes 漂流全球分布来说, 由于南北半球西风带的作用, 高纬度海域出现大浪区, 形成较大的 Stokes 漂流: 冬季北半球西风带的不断加强, 北半球高纬度海区产生了更大的 Stokes 漂流(Zhang *et al*, 2014; Wang *et al*, 2015)。

Stokes 漂流影响着海洋上层的动力过程, 对于海洋上层温盐场的分布具有重要作用。Deng 等(2012)在 Stokes 漂流的研究中, 将 Coriolis-Stokes 力加入 POM 模式的动量方程中, 发现考虑 Coriolis-Stokes 力作用后, 海表温度和混合层厚度更加符合实际。Zhang 等(2014)在 HYCOM(Hybrid Coordinate Ocean Model)模式的中加入 Stokes 漂流作用, 发现 Stokes 漂流对海洋上层温度的变化具有重要的贡献。基于 NEMO 环流模式, Breivik 等(2015)讨论了 Coriolis-Stokes 力作用对海洋混合层的影响, 发现 Coriolis-Stokes 力对减小海表面温度偏差具有重要的作用。

台风能够在海面产生台风浪, 这些剧烈的海浪会产生 Stokes 漂流, 显著地影响着海洋上层流场结构。国内外学者对于台风过程中海洋上层温度的变化做了大量的研究(Price, 1981; Shay *et al*, 1992; 刘增宏等, 2006; 杨晓霞等, 2010), 得出了台风过程中海水降温右偏性、延迟性等结论, 并从台风强度、移速、海洋上层环境等方面进行了降温因素的分析。然而, 针对台风过程中浪致 Stokes 漂流对海洋上层温度变化影响的研究较少, 因此研究台风过程中 Stokes 漂流对海洋上层温度的影响, 有利于深入了解台风过程中海洋上层温度变化的物理机制。本文在浪流耦合模式中考虑波浪产生的 Stokes 漂流作用, 分析研究 Stokes 漂流在台风过程中对海洋上层温度的影响。

1 模型介绍

1.1 耦合模型

文中采用的海洋环流数值模型为 FVCOM(The Unstructured Grid Finite Volume Community Ocean Model), 该模型采用了有限体积法, 结合了有限差分法和有限单元法的优点, 在数值计算方面具有高效性和稳定性。该模型已发展至第四代, 随着物理方案不断改进, 加入了浪流耦合模块、冰模块、水质模块、生物模块、泥沙模块、同化模块和河口分析模块等。本文以 FVCOM3.1.6 版本为基础, 采用浪流耦合模块(FVCOM-SWAVE)和环流模块进行海洋上层温度的数值模拟。

1.2 Stokes 漂流及其效应

目前计算 Stokes 漂流的公式主要分为两种, 一种是采用海浪谱计算 Stokes 漂流(Breivik *et al*, 2016), 另一种则采用海浪的波高、周期和波数等要素计算 Stokes 漂流。模型采用第二种方式计算 Stokes 漂流并与环境流场矢量叠加, 形成新的流场结构。Stokes 漂流的计算公式可表示为:

$$\overline{u_{st}}(z) = \overline{u_0} e^{2kz}, \quad (1)$$

$$\overline{u_0} = a^2 \omega k \cdot \overline{D}, \quad (2)$$

式中, $\overline{u_{st}}(z)$ 代表波浪产生的 Stokes 漂流, $\overline{u_0}$ 表示海表面 Stokes 漂流, ω 为频率, k 为波数, z 为海洋水深, \overline{D} 代表波浪传播方向, a 代表海浪的振幅。由式(1)、式(2)结合弥散关系 $\sigma^2 = kg \tanh(kh)$, g 表示重力加速度。最终可导出由有效波高 H_s 和平均波周期 T_m 表示的 Stokes 漂流形式, 具体表达形式如下:

$$\overline{u_{st}}(z) = \overline{u_0} e^{\frac{8\pi^2 z}{gT_m^2}}, \quad (3)$$

$$\overline{u_0} = \frac{2\pi^3 H_s^2}{gT_m^3} \cdot \overline{D}. \quad (4)$$

Stokes 漂流的存在引起了非零的净输移被称为 Stokes 输运, 对 Stokes 漂流在水深方向上进行垂向积分, 可得 Stokes 漂流产生的输运 $\overline{T_s}$, 具体表达形式如下:

$$\overline{T_s} = \int_{-D_s}^0 \overline{u_{st}}(z) dz = \pi \frac{a^2}{T_m} \cdot \overline{D}. \quad (5)$$

Stokes 输运能够促进海洋上层的质量输移和能量的传递, 在全球大洋中的输运过程具有不可忽略的作用。McWilliams 等(1999)为了比较 Stokes 输运与总输运的大小关系, 定义了 Ekman-Stokes 数 E_s , 其含义是海浪产生的输运在净 Ekman 输运中所占比例, 具体表达式为:

$$E_s = \frac{|\overline{T_s}|}{|\overline{T_E}|} = 0.39 \frac{f U_{10}}{C_D} \left(1 + \frac{C_D^{1/2} \ln 1.95}{\kappa} \right)^3, \quad (6)$$

其中, $\overline{T_E}$ 为净 Ekman 输运, $|\overline{T_E}| = \frac{\tau}{\rho_w f}$, τ 为风应力大小, ρ_w 为海水密度; f 为科氏力参数; U_{10} 代表距水平面 10m 处风速; κ 为卡曼常数, $\kappa = 0.4$; C_D 海面拖曳系数, 取表达式为(Wu, 1980):

$$C_D = (0.8 + 0.065 U_{10}) \times 10^{-3}. \quad (7)$$

2 资料介绍、模型设置

2.1 台风介绍

台风过程会使海洋上层温度发生变化, 本文选择的台风过程为 2014 年 9 号台风“麦德姆(Matmo)”, 其前一号和后一号台风的路径与“麦德姆”不同, 而且台风过程与“麦德姆(Matmo)”无重叠。台风“麦德姆

(Matmo)”于 2014 年 7 月 18 日左右在太平洋西岸海域生成, 20 日左右加强为强热带风暴, 23 日凌晨在台湾省台东县登陆, 之后穿越台湾海峡在福建省福清市再次登陆, 影响福建、江西、浙江、江苏等地区, 最后穿越山东半岛, 26 日凌晨从黄渤海域登陆朝鲜半岛, 此台风对我国影响时间长, 范围广。台风路径资料来源国家气象局(Ying *et al.*, 2014), 具体见图 1。

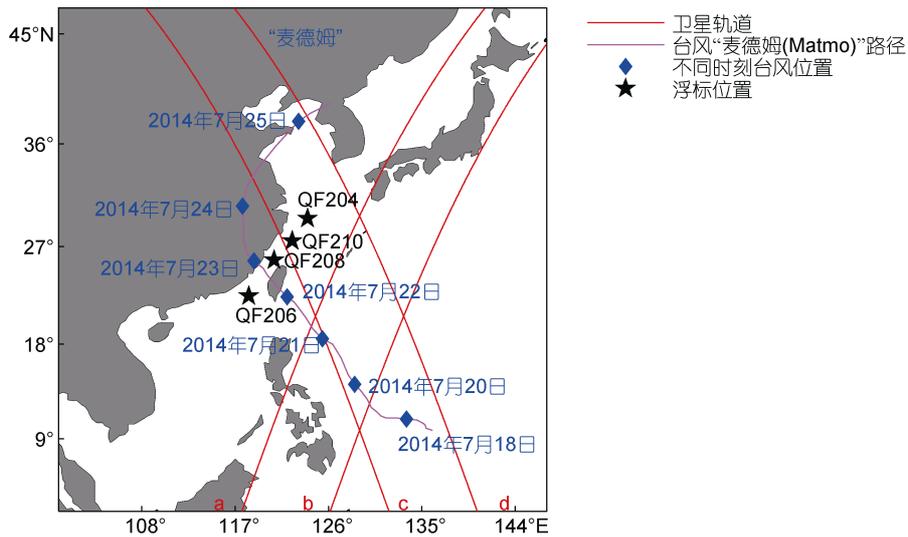


图 1 台风路径、高度计轨道和浮标位置图

Fig.1 The typhoon path, altimeter track and buoy location
注: a、b、c、d 为四个时刻卫星轨道的编号

2.2 资料介绍

本文模拟的区域涉及了中国海及其外海, 经纬度为 100°—147°E, 2°—47°N。研究区域较大, 包括了菲律宾群岛、台湾岛、日本岛、琉球岛链等众多复杂地形, 地形如图 2。本文采用高精度海岸线 GSHHS (Global Self-consistent Hierarchical High-resolution Shoreline)刻画研究区域, 并采用无结构化三角形网格贴合复杂的岸线和地形, 水深数据则采用 ETOPO1(1-Minute Gridded Global Relief Data Collection)高精度地形数据插值得到。

采用欧洲中期天气预报中心 ECMWF(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts)每 6h 一次, 分辨率为 0.125°×0.125°的风场驱动模型: 采用 HYCOM 资料作为温度初始场: 与风场精度一致的 NCEP(National Centers for Environmental Prediction)的热通量资料作为温度变化的源汇项: 本文主要采用 Argo 实测的浮标资料进行海洋上层温度的验证, 采用中国近海浮标 QF204、QF206、QF208、QF210 资料和 Jason-2 卫星高度计资料进行波高验证。

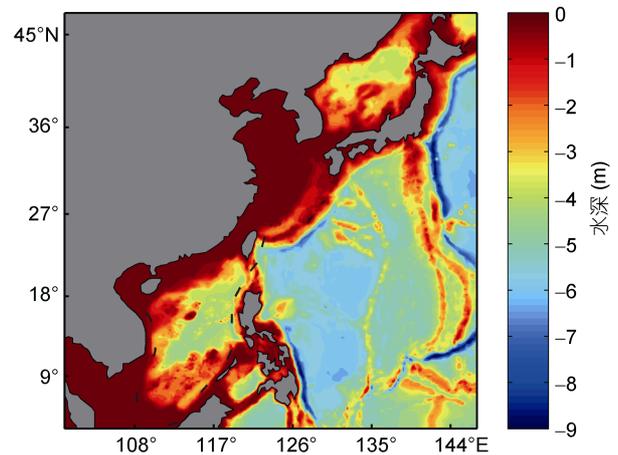


图 2 区域地形图

Fig.2 The regional topographic map

2.3 模型设置

由于本文着重考虑浪致 Stokes 漂流对温度场的影响, 因此, 在浪流耦合机制方面, FVCOM 模型中只考虑了浪致 Stokes 漂流的作用, 并将 Stokes 漂流作

用加在环流模块对应的动量方程中。模型区域水平方向采用非结构化的三角形网格, 分别包括 50244 个单元和 26073 个节点, 空间最小步长约 10km。模型设置了陆地、岛屿和海洋开边界, 海岸处采用干湿网格法, 当水深小于 0.05m 时定义为干点, 其速度为 0, 开边界设置为海绵边界条件。模型垂向上分为 40 层, 采用 $\sigma-S$ 混合坐标, σ 坐标用于水深较小处, 混合坐标适用于水深较大的区域。模型采用内外模算法, 内模时间步长为 3s, 用来计算湍动能、温盐 and 三维水流速度, 外模时间步长为 30s,

用来计算水位和平均流速。

3 台风浪的模拟及验证

3.1 台风浪的模拟

“麦德姆(Matmo)”台风过程中伴随着强烈的台风浪, 引起了浪致的 Stokes 漂流, 为了表明 Stokes 漂流模拟的可靠性, 需要进行台风浪的可靠性验证。模拟的台风过程时间段为 2014 年 7 月 18—26 日, 图 3 选择了期间 4 个典型时刻进行分析。

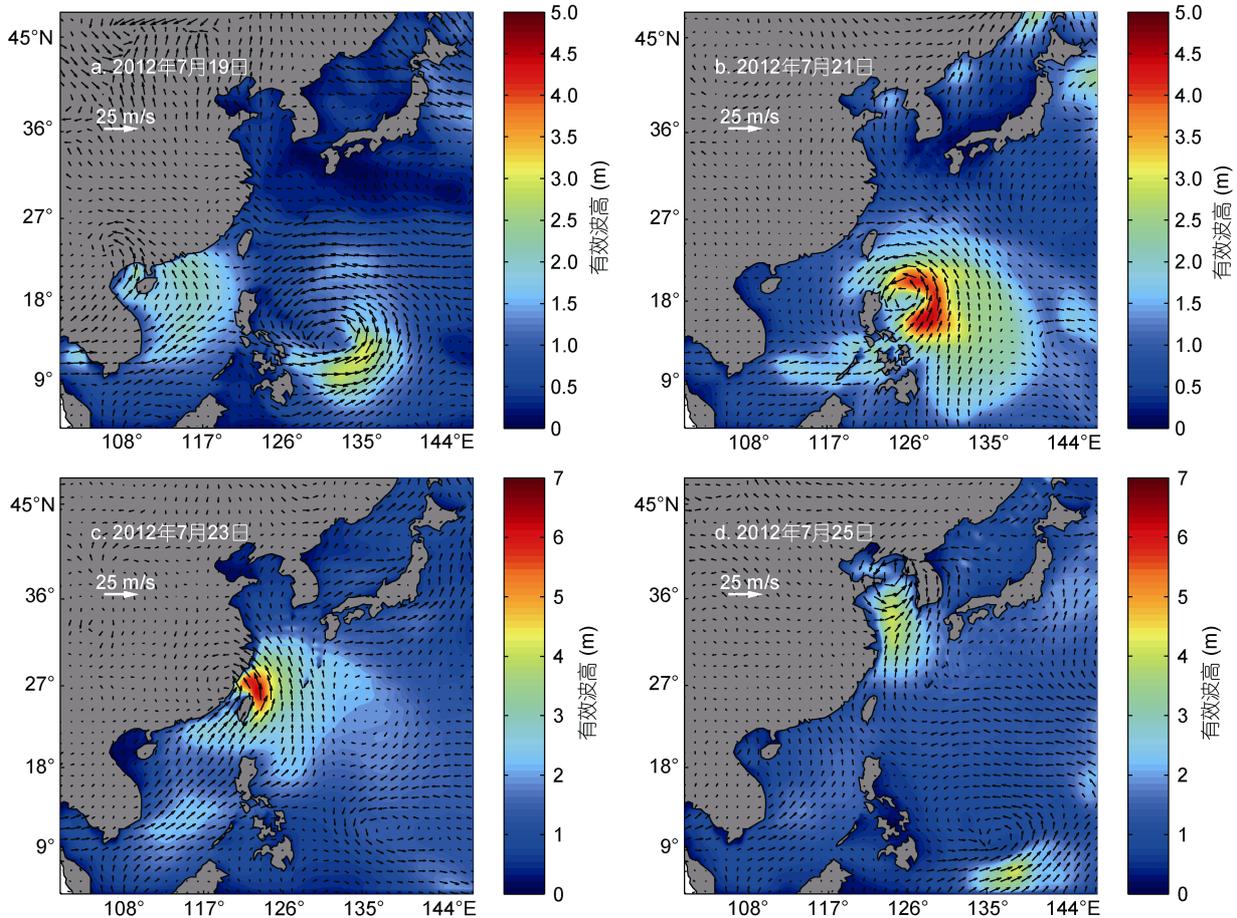


图 3 4 个典型时刻风场矢量和有效波高分布图

Fig.3 Distribution of wind field vectors and significant wave heights at four typical moments

由图 3a 可以看出, 7 月 19 日左右“麦德姆(Matmo)”就形成了较大的台风浪, 风场与浪场相对应, 大风区域对应着大浪区域, 有效波高值达 3.5m 左右。随着时间的推移, 台风的风场变强, 影响的海域变大, 台风浪表现出典型的右偏性, 台风中心右侧产生了约 4.5m 的大浪。如图 3c 所示, 7 月 23 日, “麦德姆(Matmo)”穿过台湾海峡在福建登陆, 地形作用导致波浪分布区域变小, 但在大风作用下, 台风的最

大有效波高达到了约 6.5m, 且总体表现出了台风浪的右偏性。7 月 25 日, “麦德姆(Matmo)”移向黄渤海域, 受陆地的影响, 台风风场相对减弱, 但在黄渤海域中依旧产生了 4.5m 左右的大浪, 影响了较大的海域范围。

3.2 台风浪的验证

为了进一步说明海浪数值模拟的准确性, 采用 Jason-2 卫星高度计和四个近岸浮标的有效波高值对模型模拟的海浪做进一步的验证。高度计 Ku 波段反

演的波高值优于 C 波段反演的波高值, 因此, 本文采用 Ku 波段反演的有效波高值验证外海的模拟波高。QF204、QF206、QF208 和 QF210 四个浮标以及卫星轨道的位置分布如图 1, 其中 a 轨道为 2014 年 7 月 20 日 8 时左右、b 轨道为 2014 年 7 月 26 日 5 时左右、c 轨道为 2014 年 7 月 23 日 6 时左右、d 轨道为 2014 年 7 月 20 日 18 时左右。岛屿、陆地等因素影响着高度计反演值的精度, 离岸越远, 有效波高值越准确(王娟娟等, 2016), 因此选取远离岸线的有效波高反演值进行验证, 不同轨道的取值范围以对比图的横坐标为准, 图 4 为反演值与模拟值的对比结果, 图 5 为浮标测量值与模拟值的对比结果。

通过与卫星高度计和近岸浮标资料的对比发现, 模型可以较准确的模拟出有效波高。通过比较相关系数(R), 平均误差(ME), 平均绝对误差(MAE)和均方根误差(RMSE)来衡量波高模拟结果的准确性, 具体公式如下:

$$ME = \bar{x} - \bar{y}, \quad (8)$$

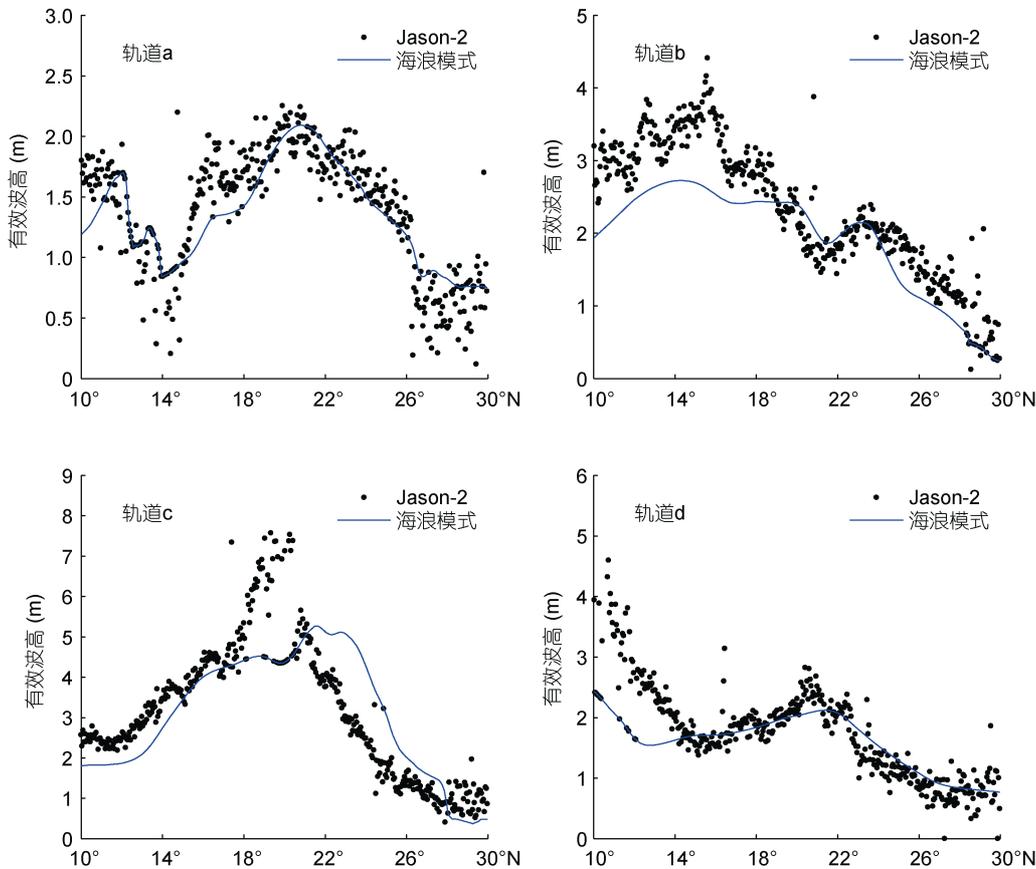


图 4 有效波高模拟值与高度计值比较

Fig.4 Comparison in significant wave heights between simulated and altimeter data

$$MAE = \frac{1}{N} \left| \sum_{i=1}^N (x_i - y_i) \right|, \quad (9)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - y_i)^2}, \quad (10)$$

$$R = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2}}, \quad (11)$$

式中, x_i 和 y_i 分别代表模拟值与实测值(反演值), \bar{x} 和 \bar{y} 分别代表两者的平均值, N 表示总统计数。计算结果见表 1, 总体上模拟值与浮标资料较为接近, 除了 QF206 浮标相关系数为 0.89 左右, 其他三个浮标相关系数更是达到 0.95, 均方根误差也都处于 0.3—0.5m 左右, 说明模型在近海有效波高模拟的较好; 而与高度计对比的结果看, 相关系数在 0.8 左右, 均方根误差除了 c 轨道达到 0.87m, 其他三个轨道的误差均在 0.6m 及以下, 从 4 个轨道平均误差为负可

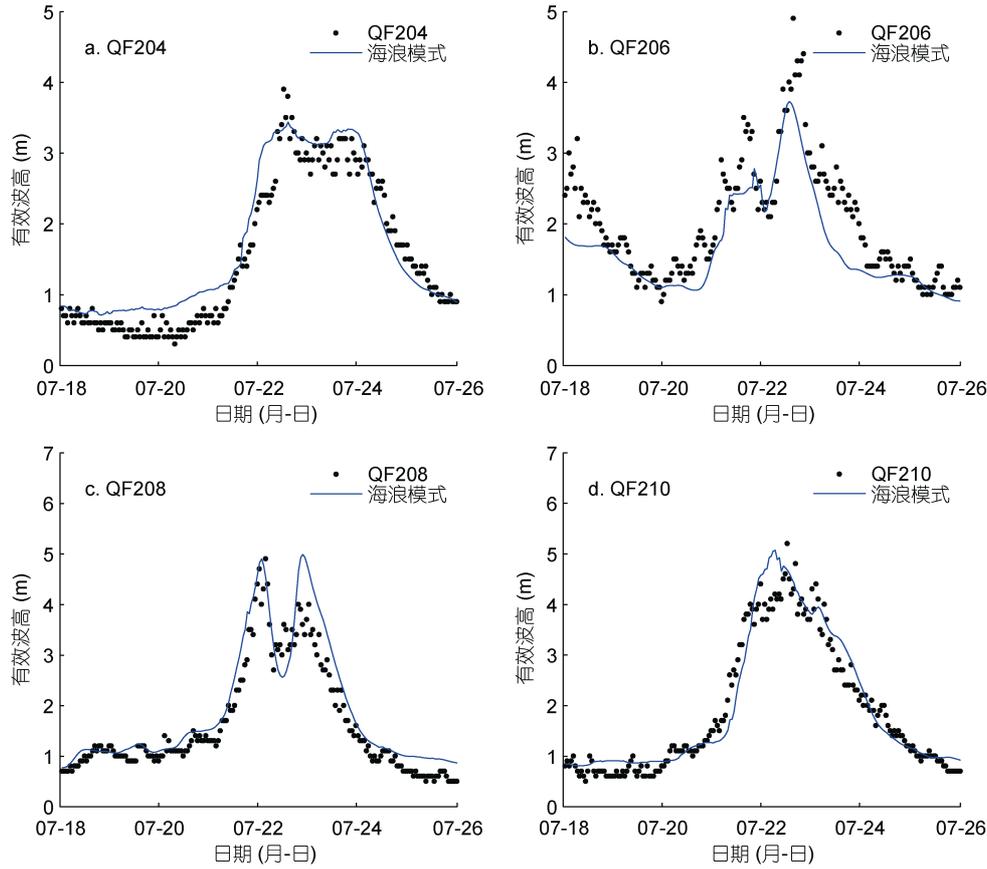


图5 有效波高模拟值与浮标实测值比较

Fig.5 Comparison in significant wave heights between simulated and measured data

表1 有效波高模拟值与高度计反演值、浮标观测值的误差统计表

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

浮标、轨道名称	个数 N (个)	相关系数 R	平均误差 ME(m)	平均绝对误差 MAE(m)	均方根误差 RMSE(m)
轨道 a	406	0.8160	-0.2494	0.2326	0.3863
轨道 b	406	0.8861	-0.3946	0.4806	0.5920
轨道 c	408	0.7828	-0.0417	0.6093	0.8781
轨道 d	402	0.7708	-0.1530	0.3391	0.4027
QF204	193	0.9622	0.1744	0.2767	0.4224
QF206	193	0.8933	-0.3237	0.3651	0.4956
QF208	193	0.9515	0.2596	0.3212	0.4247
QF210	193	0.9673	0.0759	0.2657	0.3520

以看出卫星反演的波高在中国海附近具有偏大趋势,王娟娟等(2016)在研究中也得出了相同的结论。

4 台风过程中 Stokes 漂流及其效应分布

4.1 台风过程中 Stokes 漂流的分布

通过对有效波高模拟精度的验证,保证了 Stokes 漂流模拟的可靠性,如图 6 是台风过程中 Stokes 漂流的时空分布。通过分析可以发现,Stokes 漂流的分布

总体上与风场强度、有效波高的分布呈正相关,风场强度越大,风能输入越大,引起的波浪相对较强,从而产生了较强的 Stokes 漂流。如图 6a,台风生成初期风浪场强度均较小,形成的 Stokes 漂流只有 0.1m/s 左右;如图 6b,随着波浪的成长,波浪引起的 Stokes 漂流也逐渐增大,由于台风浪的右偏性,使得 Stokes 漂流的分布也出现了右偏性,漂流最大值位于台风路径右侧,约为 0.15m/s;由图 6c、图 6d 可以看出,台

风登陆福建和朝鲜半岛时, 对我国东海、黄海、渤海海域均产生了较大的 Stokes 漂流, 漂流的速度在 0.10— 0.15m/s 不等, 而位于台风影响外的海域, Stokes 漂流流速较小, 仅为 0.05m/s 及以下。

从全球角度讲, 空间上 Stokes 漂流流速大小与纬度高低有关, 纬度越高, Stokes 漂流流速越大; 时间上, 西太平洋冬春秋季月平均 Stokes 漂流流速大于夏季的 Stokes 漂流(Zhang *et al*, 2014; Wang *et al*, 2015)。在南北半球西风带作用下, 高纬度海域出现大浪区, 形成较大的 Stokes 漂流; 冬季太阳直射南半球, 北半球副热带高压减弱, 温差变大, 西风带加强, 使得冬季长时间出现较大海浪, 冬季海域产生的 Stokes 漂流大于夏季的 Stokes 漂流。

我国海域及外海虽然位于中低纬度, 夏季受到西风带的影响较小, 但是会受到台风的影响, 台风过程伴随着剧烈的海浪作用, 从而产生较大的 Stokes 漂流, 其量值可达 0.15m/s 不等, 因此台风过程中的

Stokes 漂流在海洋研究中不应该被忽略。

4.2 台风过程中 Stokes 输运的分布

Stokes 漂流会产生输运现象, 这种现象对海洋上层环境的质量和能量交换具有重要的作用, 影响着台风过程中海洋上层温度的分布。通过式(5)计算台风过程中 Stokes 输运, 结果如图 7 所示。结合图 6、图 7 可以看出 Stokes 输运与 Stokes 漂流的分布特征具有一致性, Stokes 输运的高值区与漂流的高值区是吻合的, Stokes 输运分布的高值区主要在台风路径处。风场浪场越大, Stokes 漂流越大, 对于质量、能量的输运越大。台风过程初期, 如图 7a, Stokes 漂流较弱, 相应的 Stokes 输运也较小, 输运量在 $0.2\text{m}^2/\text{s}$ 左右。7 月 21 日随着浪场的加强, Stokes 漂流及输运都变大, 输运量达到了 $0.6\text{m}^2/\text{s}$, Stokes 输运与 Stokes 漂流分布一样呈现右偏性。在台风登陆福建时, Stokes 输运达到了最大值 $1\text{m}^2/\text{s}$ 左右, 出现在台湾海峡及东海海域。随着台风移动, Stokes 输运分布在东中国海海域。

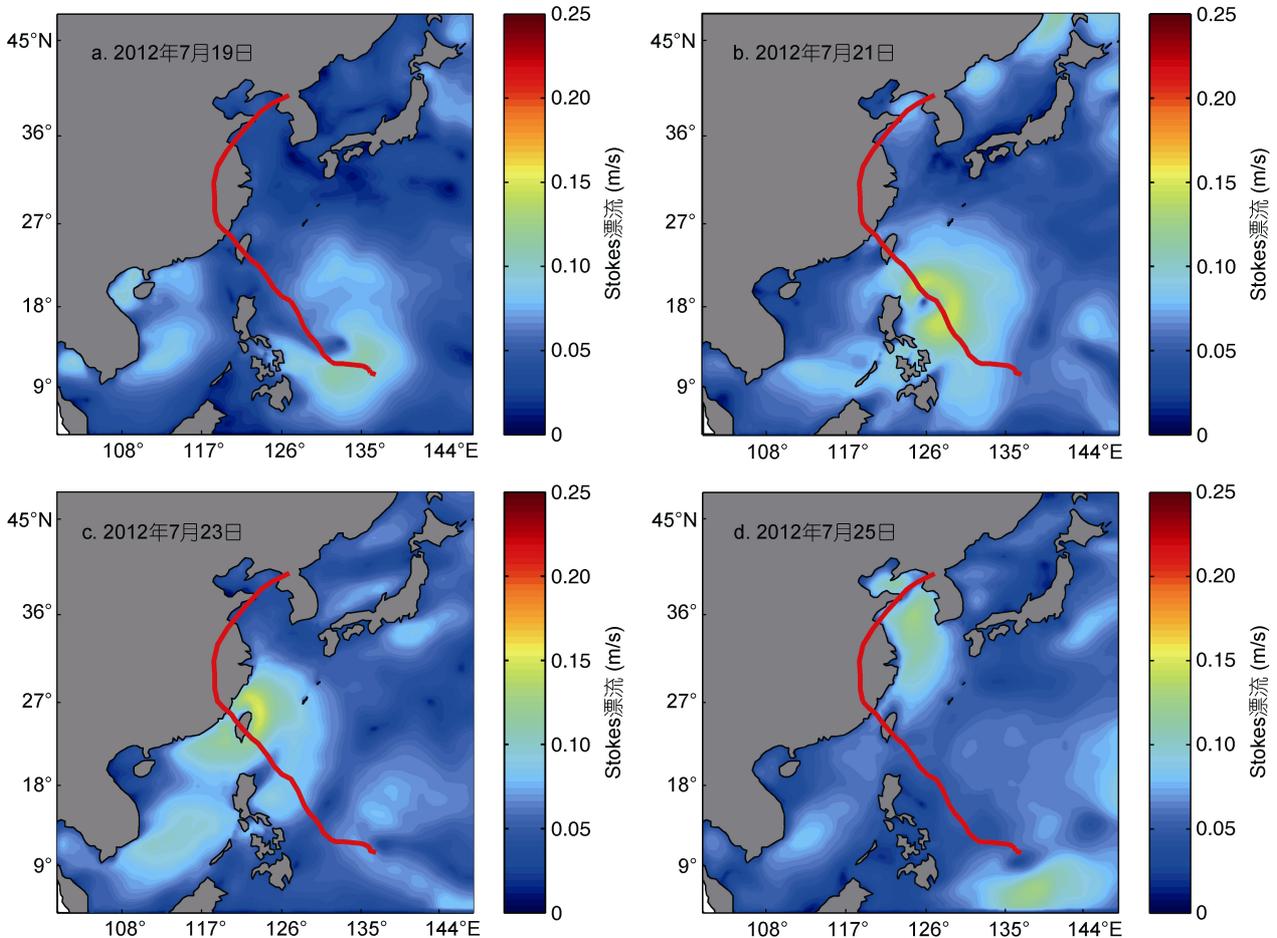


图 6 4 个典型时刻 Stokes 漂流分布图

Fig.6 Distribution of the Stokes drift at four typical moments
注: 红色曲线代表台风路径, 图 7、图 9、图 10 同

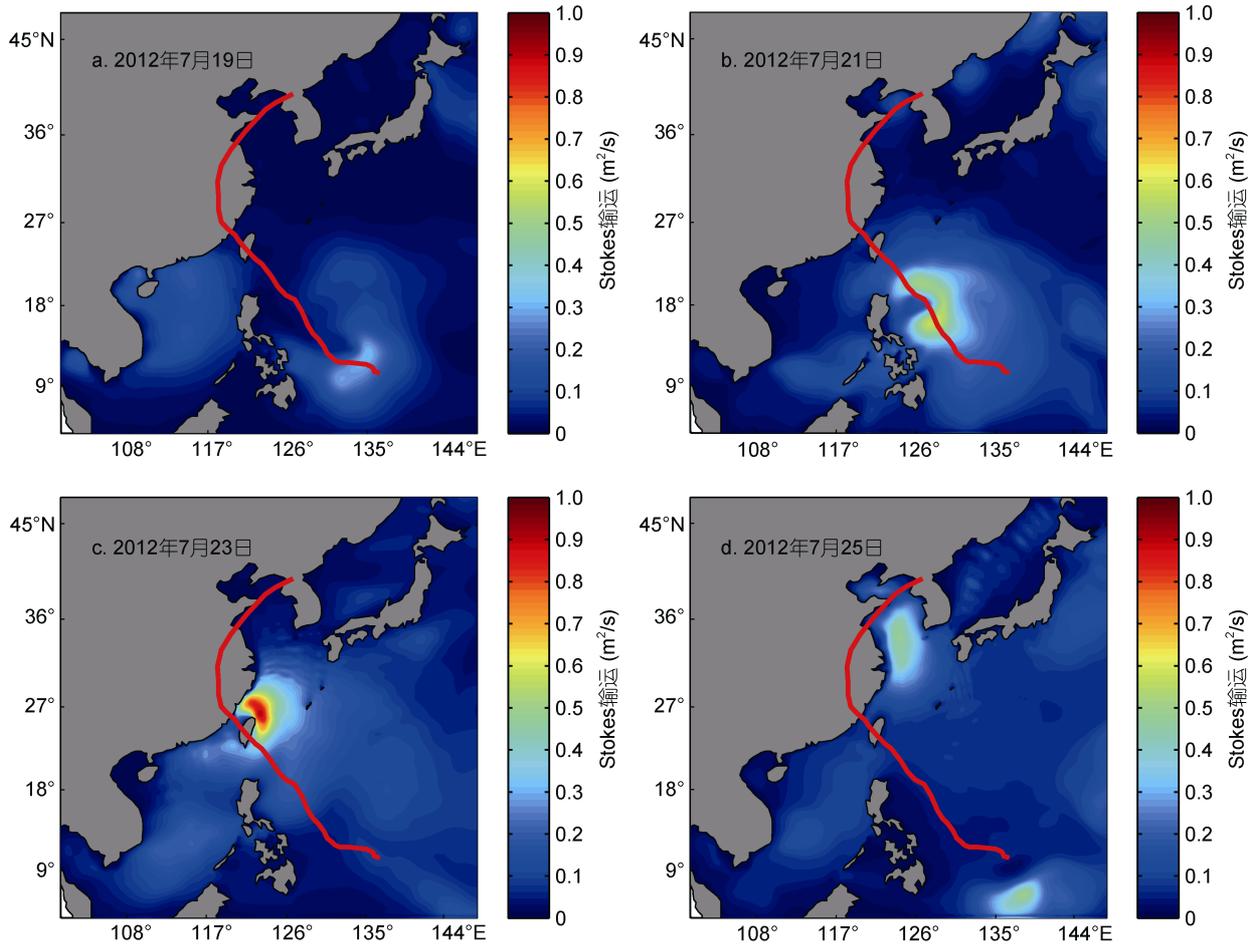


图 7 4 个典型时刻 Stokes 运输分布图

Fig.7 Distribution of the Stokes transport at four typical moments

4.3 台风过程中 Ekman-Stokes 数的分布

本文为了研究台风过程中 Ekman-Stokes 数的变化, 确定一条以台风路径为基础, 从“麦德姆 (Matmo)”生成海域, 经钓鱼岛海域延伸至东海、黄海、渤海的轨迹线, 分析台风过程中轨迹线上的 Ekman-Stokes 数变化。通过式(6)计算典型时刻的 Ekman-Stokes 数, 如图 8。从图 8a 可以看出, 台风初期位于低纬度时, 此时 Stokes 运输占净运输的比例为 25%左右; 随着台风的成长和移动, Stokes 运输占比逐渐增大, 7 月 21 日, 在 15°—20°N 附近其最大运输比例达到 32%, 运输比例明显的大于其他区域, 运输比值与运输量的大小呈正相关; 在台风 7 月 23 日登陆福建和 7 月 25 日登陆朝鲜半岛过程中, 如图 8c、图 8d, 台风附近产生的运输位于 25%—30%, 也大于其他海域的运输比值。台风过程中 Stokes 运输对海洋上混合层的影响集中在台风路径附近, 与 Stokes 漂流密切相关, Stokes 漂流越大, Stokes 运输以及

Ekman-Stokes 数相对越大。Stokes 运输在净运输中占比越大, 海浪对上层海洋的混合作用越强, 在运输方向后方易产生辐散, 致使下层海水上翻, 进而对海表温度场产生影响。

4.4 台风过程中 Stokes 影响深度分布

Stokes 漂流在垂向上是呈指数形式分布, 因此它影响着一定深度的上层海洋流场结构, 将此深度定义成 Stokes 漂流的影响深度 D_s , 表达形式如下:

$$D_s = \frac{1}{2k}, \quad (12)$$

其中, k 表示波数。通过式(12)求出台风过程中 Stokes 漂流的影响深度, 如图 9。台风过程中, 影响深度 D_s 的分布与 Stokes 漂流的大小分布一致, 在台风登陆前表现最明显, 最大影响深度达到了 12m 左右。随着影响深度的增大, Stokes 漂流越能促进海洋上层质量、能量的交换, 加强垂向的湍流作用, 使得下层冷水上翻, 从而降低了上层海水的温度。

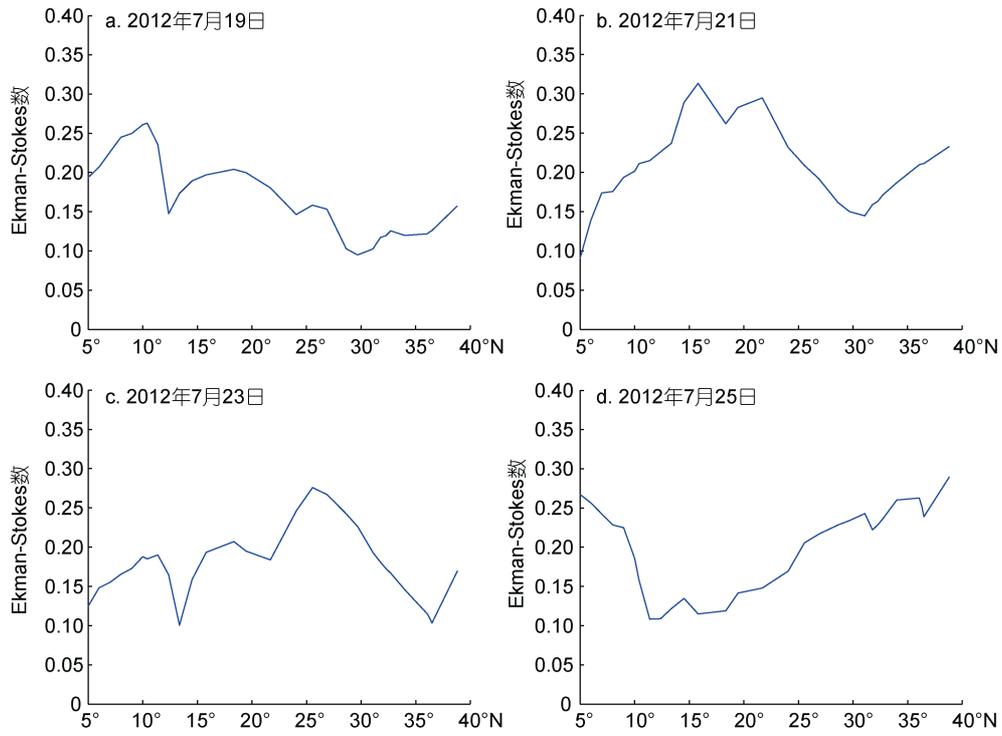


图 8 Ekman-Stokes 数随纬度变化
 Fig.8 Variation of Ekman-Stokes number with latitude

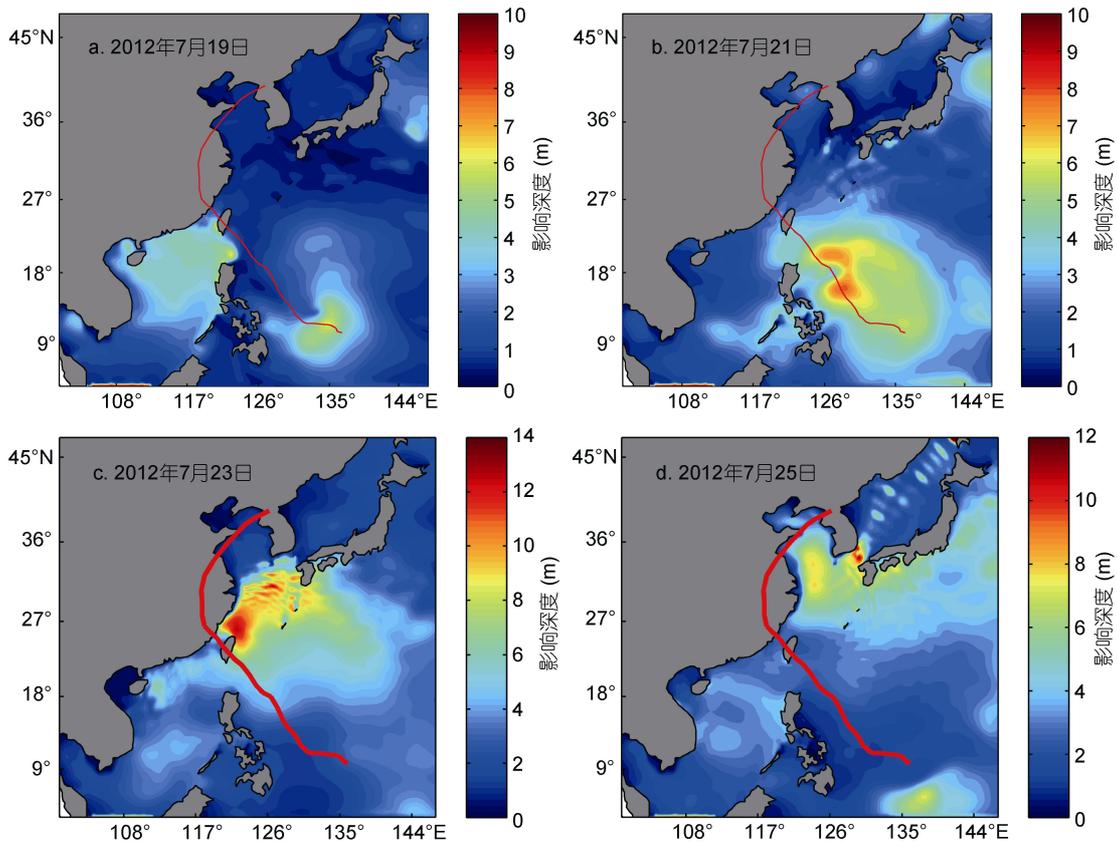


图 9 Stokes 漂流影响深度分布图
 Fig.9 Distribution of the Stokes drift affected depth

5 Stokes 漂流对海洋上层温度的影响及验证

5.1 考虑和未考虑 Stokes 漂流作用的温度对比分析

为了清晰的体现 Stokes 漂流在台风过程中对上层海水温度变化的影响,对考虑和未考虑 Stokes 漂流作用模拟的海表面温度(Sea Surface Temperature, SST)进行作差,使用水深约为 3m 处的模式数据作为海表面温度,定义改善量 α , 具体表达形式如下:

$$\alpha = SST_{Stokes} - SST_{no\ Stokes} \quad (13)$$

通过式(13)计算出的改善量见图 10, 其中, SST_{Stokes} 为考虑 Stokes 漂流影响的海表面温度, $SST_{no\ Stokes}$ 为未考虑 Stokes 漂流影响的海表面温度。从 α 的分布可以看出, 在考虑 Stokes 漂流后的海表面温度呈明显的降低趋势, 温度降低的区域与图 6 中 Stokes 漂流的分布具有一致性。台风过程初期, 风场浪场强度较小, 引起的 Stokes 漂流不明显, 从而产生

的降温现象不明显; 7 月 21 日, 随着台风的成长, Stokes 漂流速度变大, 达到 0.15m/s, 产生了明显的 Stokes 输运, 加大了影响深度, 加强了上下层水体的交换, 因此对海域内产生了较大的降温, 最大降温达到 2°C, 降温区域也逐渐变大, 遍布了整个菲律宾群岛的东部海域; 降温的区域随着台风的移动而变化, 7 月 23 日, 台风登陆福建, Stokes 漂流对福建、台湾海域产生了 2°C 左右的降温, 此时由于南海存在较大 Stokes 漂流, 南海区域也出现了较明显的温度降低现象。在随后台风移动的过程中, 降温区继续扩大, 延伸至整个中国海域。

结合图 6—图 10, 可以发现温度改善量 α 的分布与 Stokes 漂流、输运、影响深度以及 Ekman-Stokes 数都存在相关性。波浪诱导应力项之一的 Coriolis-Stokes 力会改变海洋上混合层的能量输入、流速剖面结构以及海表流场分布, 流场的变化又会直接对能量守恒方程产生影响, 进而影响海洋表层的温度。

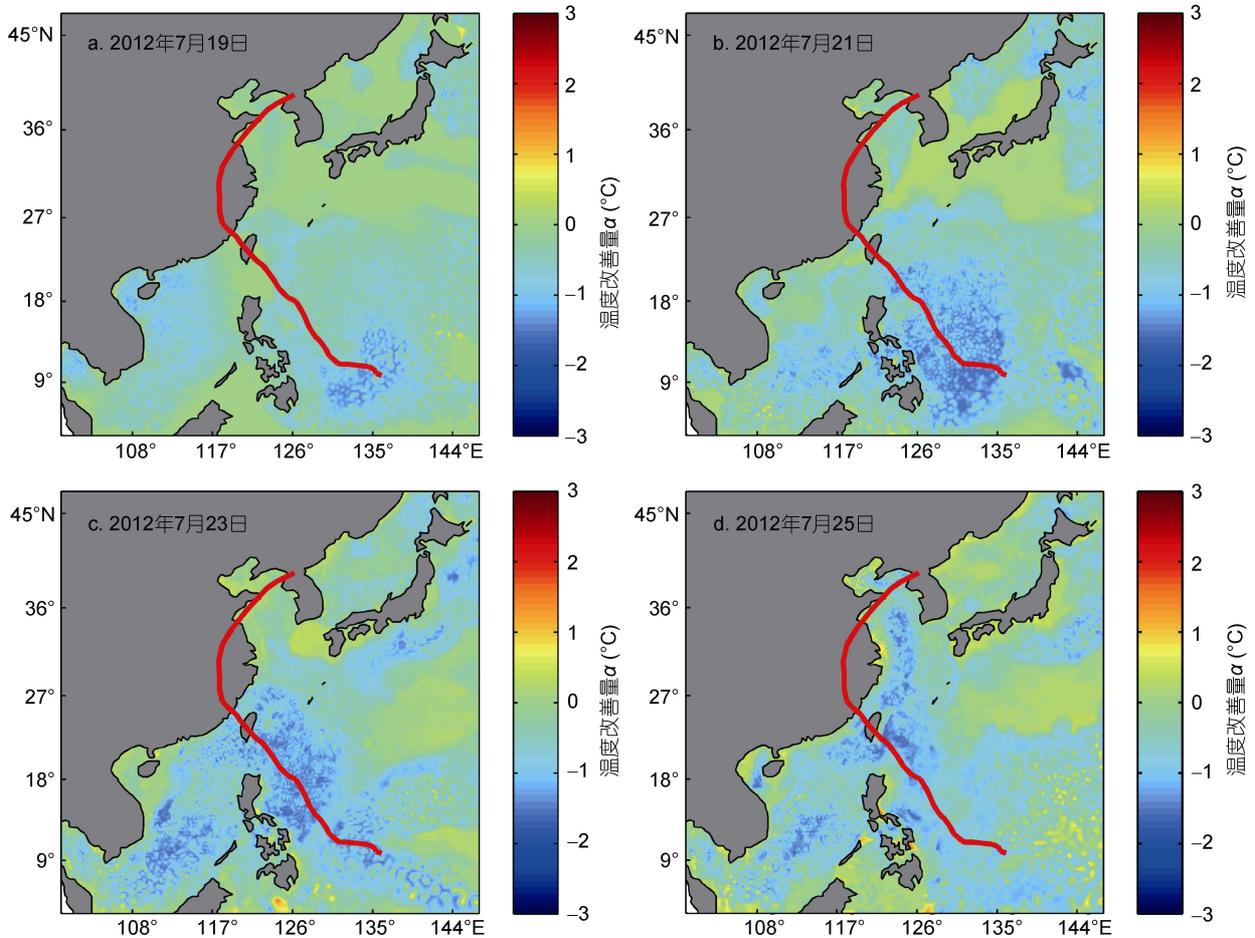


图 10 温度改善量 α 的分布
Fig.10 Distribution of the improvements α

Stokes 漂流则通过 Coriolis-Stokes 力使上层海洋的温盐 and 密度分布发生变化, 改变流速剪切项, 使得不稳定性增强并造成海表流场发生改变, 海表流场的改变导致输运变化, 在输运后方产生上升流并引起 SST 的减小。此外, Stokes 漂流与风驱水平流相互作用下, 会导致 Langmuir 环流, Langmuir 环流的存在改变了海洋上层的湍动能, 进而会影响 SST(王智峰, 2012), Stokes 漂流越大, Langmuir 湍效应占主导地位, 湍动能变大, 直接增强了海水的对流, 使得 SST 减小。为了能够进一步解释 Stokes 漂流对海表降温的影响, 以靠近台风路径(降温明显)和远离台风路径(降温不明显)的两个研究位置为例(如图 12 中所示红色圆点), 对比分析了考虑和未考虑 Stokes 漂流作用研究位置

处的上层垂向混合系数, 选择对比时刻为 7 月 21 日 12 时, 坐标分别为(128.35°E, 11.53°N)和(135.18°E, 27.18°N), 对比结果见图 11。由图 11 可知, 对比考虑和未考虑 Stokes 漂流作用的垂向混合系数发现, 考虑 Stokes 漂流作用模拟的垂向混合系数更大, 与 Stokes 漂流的理论影响深度 12m 相比, 其产生的垂向混合作用可以影响整个混合层, 有利于上层海水的混合。

台风过程中, 由于路径附近的 Stokes 漂流及其效应均较大, 使得路径附近处上层海水降温较明显, Stokes 漂流速度越大, 输运量及占净输运的比例越大、影响深度越深, 从而加快了上下层水体能量的交换, 温度降低的越明显。反之, 台风路径外侧海域受到 Stokes 漂流及其效应的影响较小, 所以温度降低的不明显。

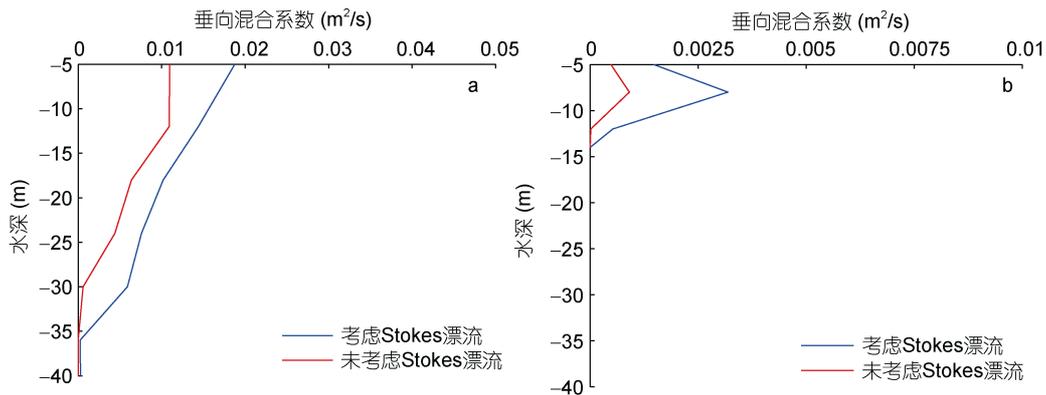


图 11 两个研究点处垂向混合系数分布

Fig.11 Vertical mixing coefficient in two research sites

注: a: 靠近台风路径的研究点; b: 远离台风路径研究点

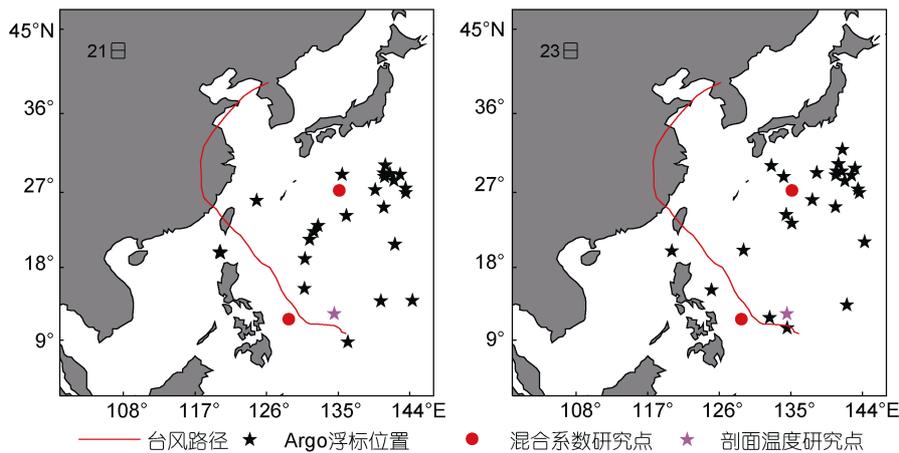


图 12 Argo 浮标和研究点位置

Fig.12 Locations of Argo buoys and research sites

5.2 台风过程中海洋上层温度的验证

为了分析在 Stokes 漂流作用下上层海水温度模拟的可靠性,对考虑和未考虑 Stokes 漂流的情况下模拟的温度进行验证。采用模拟区域内每天 Argo 浮标资料的表层温度数据与模拟的表层温度数据进行对比验证,通过比较实测值与模拟值的相关系数(R),平均误差(ME),平均绝对误差(MAE)和均方根误差(RMSE)来衡量模拟结果的准确性, R 越大,说明相关程度越好;ME 值越大,说明模拟温度出现偏高情况;MAE 和 RMSE 值越小,说明与实测值越接近。选择台风路径处一个代表性 Argo 浮标进行剖面温度比较,位置为(134.5°E, 12.28°N),利用该浮标处的实测温度与模拟温度进行比较,由于 Stokes 漂流对深层海水的影响较小,因此采用 Argo 浮标 100m 以内的温度数据,将模拟的温度插值到 Argo 剖面测量点上,取绝对误差的绝对值作为判断模拟结果的依据。图 12 中粉色星为进行剖面温度比较的 Argo 浮标研究点位置,红点为混合系数研究点位置,图 13 为考虑和未考虑 Stokes 漂流作用下温度绝对误差的绝对值随时间变化,表 2 为考虑和未考虑 Stokes 漂流情况下模拟值与 Argo 浮标第一层实测值的统计量分析。

由表 2 可知,在考虑 Stokes 漂流作用的误差统计量的均值 R 为 0.82, ME 为 0.26°C, RMSE 为 0.71°C, MAE 为 0.53°C,未考虑 Stokes 漂流作用的误差统计量的均值 R 为 0.72, ME 为 0.89°C, RMSE 为 1.12°C, MAE 为 1.06°C,通过对比发现,考虑了 Stokes 漂流

的作用,模拟与实测温度的相关系数更高、均方根更小,温度偏高现象得到了改善,模拟的温度与实际更加相符。在整个台风过程中,根据与实测浮标资料对比发现,随着模拟时间的增加,两种试验结果出现了相关系数降低、平均绝对误差和均方根误差增大的情况,并且模拟的温度具有升高的趋势,说明模拟时间越长,模型计算失真的可能性越大。图 13 中,随着时间的增加,虽然模拟温度的误差具有增加的趋势,但是对比未考虑 Stokes 漂流作用的模拟结果发现,考虑 Stokes 漂流作用后模拟温度的误差相对较小,说明模拟效果得到了改善。

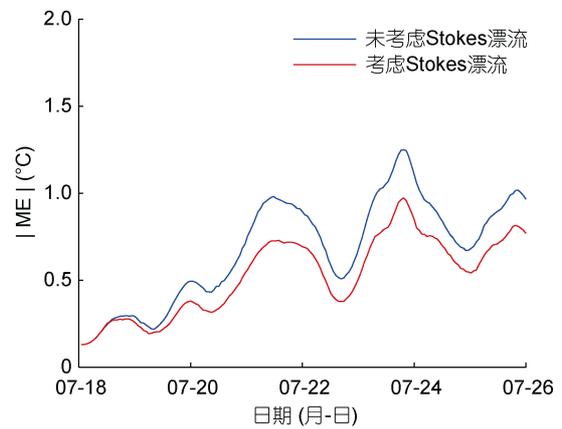


图 13 台风路径处代表性 Argo 浮标处模拟温度的平均误差(ME)绝对值随时间变化

Fig.13 The ME absolute value of simulated temperature at the representative Argo buoy along the typhoon path changes with time

表 2 模拟海表面温度与 Argo 实测海表面温度的比较
Tab.2 Comparison of simulated and measured sea surface temperature

日期(月-日)	浮标数(个)	R		ME(°C)		RMSE(°C)		MAE(°C)	
		考虑 Stokes 漂流	未考虑 Stokes 漂流						
07-18	20	0.8330	0.7928	0.3410	0.3548	0.5774	0.7884	0.4625	0.5213
07-19	29	0.9375	0.8785	-0.2307	0.3125	0.6995	0.7481	0.4069	0.5832
07-20	33	0.8137	0.7380	-0.3800	0.9395	0.6986	1.5339	0.5090	1.2512
07-21	30	0.8531	0.8553	0.6070	0.9289	0.5521	1.2702	0.3919	1.0507
07-22	24	0.8587	0.7316	0.5610	0.6719	0.7692	1.2060	0.4224	0.9616
07-23	24	0.8463	0.7006	0.3870	1.0995	0.6044	1.3349	0.4564	1.4021
07-24	23	0.8480	0.6706	0.3085	1.2499	0.6932	1.1117	0.5976	0.8691
07-25	23	0.7276	0.6305	0.6458	0.9886	0.8742	1.4485	0.7234	1.1950
07-26	26	0.6672	0.4486	0.8955	1.4200	0.8977	1.3385	0.7635	1.6818
均值	26	0.8206	0.7163	0.2576	0.8851	0.7074	1.1978	0.5260	1.0573

6 结论

浪致 Stokes 漂流是海洋上层不可忽视的物理过程。台风作用形成的台风浪会产生较大的 Stokes 漂流, Stokes 漂流则会引起 Stokes 输运, Stokes 漂流和 Stokes 输运最大值分别可达 0.15m/s 和 $1\text{m}^2/\text{s}$, 两者在台风过程中的分布与浪场的分布相对应。Stokes 漂流越大, Stokes 输运占净输运的比例越大, 通过计算 Ekman-Stokes 数表明 Stokes 输运在台风过程中总输运中占有很大比例。

基于浪流耦合模型, 将考虑和未考虑 Stokes 漂流作用的模拟结果进行对比发现, 台风过程中 Stokes 漂流、Stokes 输运等会使海洋上层温度的模拟值降低, 温度降低幅度与 Stokes 漂流等大小相关, Stokes 漂流越大, 温度降低幅度越大, 降温主要分布在台风路径附近, 最大降温约为 2°C 。采用了 Argo 实测资料与模拟的海洋上层海温进行对比发现, 考虑了 Stokes 漂流后, 模拟的海洋上层温度得到改善, 与实测温度更接近。

参 考 文 献

- 王娟娟, 高志一, 王久珂等, 2016. Jason-2 有效波高产品在中国海域的准确性评估. 海洋与湖沼, 47(3): 509—517
- 王智峰, 2012. Stokes_drift 对上层海洋的影响研究. 青岛: 中国海洋大学博士学位论文
- 毕 凡, 2013. 波浪对环流输运影响和涌浪传播耗散特征研究. 青岛: 中国海洋大学博士学位论文
- 刘增宏, 许建平, 朱伯康等, 2006. 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. 热带海洋学报, 25(1): 1—8
- 杨晓霞, 唐丹玲, 2010. 台风引起南海海面降温的位置变化特征. 热带海洋学报, 29(4): 26—31
- Breivik Ø, Bidlot J R, Janssen P A E M, 2016. A Stokes drift approximation based on the Phillips spectrum. Ocean Modelling, 100: 49—56
- Breivik Ø, Mogensen K, Bidlot J *et al*, 2015. Surface wave effects in the NEMO ocean model: forced and coupled experiments. Journal of Geophysical Research: Oceans, 120(4): 2973—2992
- Craik A D D, Leibovich S, 1976. A rational model for Langmuir circulations. Journal of Fluid Mechanics, 73(3): 401—426
- Deng Z A, Xie L A, Han G J *et al*, 2012. The effect of Coriolis-Stokes forcing on upper ocean circulation in a two-way coupled wave-current model. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 30(2): 321—335
- Hasselmann K, 1970. Wave-driven inertial oscillations. Geophysical Fluid Dynamics, 1(3-4): 463—502
- Huang N E, 1979. On surface drift currents in the ocean. Journal of Fluid Mechanics, 91(1): 191—208
- Lewis D M, Belcher S E, 2004. Time-dependent, coupled, Ekman boundary layer solutions incorporating Stokes drift. Dynamics of Atmospheres and Oceans, 37(2004): 313—351
- Li S, Song J B, Sun Q, 2008. Effect of Stokes drift on upper ocean mixing. Acta Oceanologica Sinica, 27(2): 11—20
- Li M, Zahariev K, Garrett C, 1995. Role of Langmuir circulation in the deepening of the ocean surface mixed layer. Science, 270(5244): 1955—1957
- Longuet-Higgins M S, 1953. Mass transport in water waves. Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences, 245(903): 535—581
- McWilliams J C, Restrepo J M, 1999. The wave-driven ocean circulation. Journal of Physical Oceanography, 29(10): 2523—2540
- Mellor G L, Yamada T, 1974. A hierarchy of turbulence closure models for planetary boundary layers. Journal of the Atmospheric Sciences, 31(7): 1791—1806
- Polton J A, Belcher S E, 2007. Langmuir turbulence and deeply penetrating jets in an unstratified mixed layer. Journal of Geophysical Research: Oceans, 112(C9): C09020
- Price J F, 1981. Upper ocean response to a hurricane. Journal of Physical Oceanography, 11(2): 153—175
- Shay L K, Black P G, Mariano A J *et al*, 1992. Upper ocean response to hurricane Gilbert. Journal of Geophysical Research: Oceans, 97(C12): 20227—20248
- Tamura H, Miyazawa Y, Oey L Y, 2012. The Stokes drift and wave induced-mass flux in the North Pacific. Journal of Geophysical Research: Oceans, 117(C8): C08021
- Wang Z F, Wu K J, Dong S *et al*, 2015. Effect of wave-induced Stokes drift on the dynamics of ocean mixed layer. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 33(1): 233—242
- Weber J E, 1983. Attenuated wave-induced drift in a viscous rotating ocean. Journal of Fluid Mechanics, 137: 115—129
- Wu J, 1980. Wind-stress coefficients over sea surface near neutral conditions-A revisit. Journal of Physical Oceanography, 10(5): 727—740
- 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
- Zhang X S, Wang Z F, Wang B *et al*, 2014. A numerical estimation of the impact of Stokes drift on upper ocean temperature. Acta Oceanologica Sinica, 33(7): 48—55

NUMERICAL SIMULATION OF INFLUENCE OF WAVE-INDUCED STOKES DRIFT ON UPPER OCEAN TEMPERATURE DURING TYPHOON

SHI Jian¹, ZHU Chao², LIU Jing-Dong¹, LIU Zhen-Yu¹

(1. College of Meteorology and Oceanography, National University of Defense Technology, Nanjing 211101, China;

2. Key Laboratory of Coastal Disaster and Defense, Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract The influence of Stokes drift on the temperature variation in the upper ocean is important. We investigated the course of typhoon Matmo of 2014. Based on a wave-current coupling model, the influence of wave-induced Stokes drift and its effect on the temperature variation in the upper ocean during the typhoon was simulated numerically and analyzed with or without considering the Stokes drift. It shows that Stokes drift and its effect are closely related to the distribution of waves. When waves were larger, Stokes drift, Stokes transport, and Ekman-Stokes number were larger. Stokes drift reduced sea surface temperature during the typhoon. Stokes drift and its effect at the path of the typhoon were large and the sea surface cooling was obvious. The maximum temperature drop was about 2°C, which was due to the change of current that caused by Stokes drift and the divergence of sea water caused by Stokes transport strengthen the exchange of mass and energy between the upper and lower layers in the ocean. It is found that the simulation results of upper ocean temperature considering the effect of Stokes drift are closer to the measurement results of Argo.

Key words typhoon; ocean wave; Stokes drift; upper ocean temperature