

南海北部反气旋涡对内孤立波传播的影响研究

邓林青¹, 许培鹏^{2,3}, 郭延良^{2,4,5}, 陈 亮^{2,4,5*}, 熊学军^{2,4,5}

(1. 中海石油(中国)有限公司深圳分公司深水工程建设中心, 广东 深圳 518000;

2. 自然资源部第一海洋研究所, 山东 青岛 266061;

3. 山东科技大学 测绘与空间信息学院, 山东 青岛 266590;

4. 青岛海洋科学与技术试点国家实验室 区域海洋动力学与数值模拟功能实验室, 山东 青岛 266061;

5. 自然资源部 海洋环境科学与数值模拟重点实验室, 山东 青岛 266061)

摘 要:海洋内波具有振幅大、流速强和周期短等特点, 可对海上施工和水下作业安全造成严重威胁。南海北部陆坡海域是内孤立波和中尺度涡频发的海域之一, 研究中尺度涡对内孤立波传播的影响对深入了解南海北部内孤立波在反气旋涡过境时的传播特征、提高该海域内波预报准确性具有重要意义。基于此, 本文利用布放于南海北部东沙群岛西侧陆坡海域的潜标观测数据, 针对 2017 年 3 月一个反气旋中尺度涡经过潜标站位的过程, 探讨了中尺度涡对内孤立波传播的影响。结果表明: ①受反气旋涡影响, 内孤立波的平均振幅减小 28.6%, 其主要原因是中尺度涡导致等温线下压, 进而对内孤立波的振幅产生抑制作用, 其影响过程可用趋浅温跃层理论描述。②反气旋涡影响期间, 内孤立波的平均波速由 1.26 m/s 增大到 1.47 m/s, 增幅约 16.7%, 反映了反气旋涡对内孤立波波速的强化作用, 这种强化作用主要是由中尺度涡边缘流场引起背景流场变化所致, 而中尺度涡引起的温盐场变化对内孤立波波速的影响相对较小。

关键词:南海北部; 中尺度涡; 内孤立波; 潜标观测; 波速

中图分类号: P731.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-3682(2022)02-0136-08

doi: 10.12362/j.issn.1002-3682.20220102001

引用格式: 邓林青, 许培鹏, 郭延良, 等. 南海北部反气旋涡对内孤立波传播的影响研究[J]. 海岸工程, 2022, 41(2): 136-143. DENG L Q, XU P P, GUO Y L, et al. Study of the influence of anticyclonic mesoscale eddy on internal solitary wave propagation in the northern South China Sea[J]. Coastal Engineering, 2022, 41(2): 136-143.

海洋内孤立波是发生在层结海洋内部的一种非线性波动。海洋内波与表面波同属界面波, 但不同的是, 表面波发生在海洋与大气的界面, 由于空气密度远小于海水的密度, 其恢复力可近似为重力; 而内波发生在不同密度的海水层结之间, 其恢复力是约化重力(即上下两层海水的重力差), 其大小与表面波的恢复力相比要小 2~3 个量级。当海水质点由于扰动离开其平衡位置后, 其恢复力越小, 振幅越大。因此, 表面波的振幅通常为 $O(0\sim 10)\text{m}$, 而海洋内波的振幅则可达 $O(100\sim 200)\text{m}$ 。内孤立波的持续时间大约在几分钟至几小时之间, 其突发性巨大冲击能量可对水下航行和工程设施构成灾难性威胁^[1]。

南海北部内孤立波发生频繁^[1-3], 是国际公认的优良的天然内波试验场^[4-6]。现场观测和数值模拟的研究结果表明, 南海北部内孤立波的生成机制复杂多样, 如 Lee-wave 机制^[7]、内潮释放机制^[8]、混合区塌陷机制^[7]、黑潮剪切不稳定机制^[9]以及内潮非线性变陡机制^[10-13]等。同时, 南海油气资源十分丰富, 素有第二个“波斯湾”之称^[14], 目前在南海北部陆坡海域已规模开发的大型油田有陆丰、流花和荔湾等油田群, 这些油田群的建设对于完善我国具有自主知识产权的深水油气开发工程技术体系、保障国家能源安全和助力粤港澳大湾区

收稿日期: 2022-01-02

资助项目: 国家科技重大专项科研任务——南海北部内波流监测、预报、预警系统研究及应用(2016ZX05057015); 海洋工程装备科研项目——500 米水深油田生产装备 TLP 自主研发—内波流预警方案研究及内波流监测系统研制

作者简介: 邓林青(1986—), 男, 工程师, 主要从事海洋油气开发方面研究. E-mail: denglq3@cnooc.com.cn

*通信作者: 陈 亮(1990—), 男, 博士, 主要从事物理海洋学及海洋调查技术方面研究. E-mail: chenliang@fio.org.cn

(王 燕 编辑)

发展具有重要意义。据现场施工经验和相关研究报道^[15], 陆丰、流花和荔湾等油田群的开发过程均受到了内孤立波不同程度的影响。以 LH16-2 油田群开发项目为例, 仅在 2019 年至 2020 年间共监测并发布的内波流预警信息就高达 450 次, 监测到的最大内波流流速达 163.95 cm/s, 发生深度为 92 m。即使是在现场作业接到内波流预警并提前采取应对措施的情况下, 内波流对施工船造成轻度、中度和重度影响的情况分别占比 44.5%、4.6% 和 5.2%。可见, 海洋内波已成为海上油气资源开发过程中必须着重考虑的重要风险之一^[15-16]。

中尺度涡是指海洋中水平直径为 10~500 km、持续时间为数天至数月的水平旋转水体^[17]。南海平均水深 1 000 多 m, 面积为 350 万 km², 为中尺度涡的生成、传播和演化提供了良好的条件。大量的观测和研究^[18-23]表明, 南海是中尺度涡多发、频发的海域, 且南海的中尺度涡会对内波产生影响, 如: 林宏阳等^[18-19]利用卫星高度计海面高度数据对南海及其邻近海域中尺度涡的分析结果表明, 南海年平均涡旋总数为 (21±4) 个, 其中, 气旋涡为 (10.3±2.4) 个, 反气旋涡为 (10.7±2.4) 个; Chen 等^[20]利用 1992 年 10 月至 2009 年 10 月共计 17 a 的卫星高度计数据的分析结果表明, 南海北部海域是中尺度涡分布相对集中的海域, 其存在的时间达到 35%~60%; Zhang 等^[21]利用现场观测数据、卫星和再分析数据研究出现在南海的一对气旋涡和反气旋涡, 发现反气旋涡和气旋涡过境产生的最大表层流速分别可达 1 m/s 和 0.5 m/s, 产生的温度距平分别可达 7.5 °C 和 -3.0 °C, 可见中尺度涡的出现能够引起流场和温度场的改变。而这些改变对内孤立波的传播有明显的调制作用, 例如, Huang 等^[22]基于布放在吕宋海峡深水区的潜标阵列数据, 研究一对中尺度涡对内孤立波的影响, 发现中尺度涡对内孤立波的振幅、波速等均有非常重要的调制作用; Xu 等^[23]基于潜标观测数据研究东沙群岛东侧海域反气旋涡对内孤立波的影响发现, 当内孤立波穿过中尺度涡中心后, 内孤立波的振幅增大了 50%, 而中尺度涡引起的流场变化对内孤立波振幅的影响则与其位置有关, 中心流场具有削弱作用, 边缘流场具有增强作用。

总体而言, 以往关于南海中尺度涡对内孤立波的影响研究相对较少, 且都集中在吕宋海峡至东沙群岛东侧的深水海域, 针对油气田聚集的东沙群岛西侧陆坡海域的研究目前尚未见报道。基于此, 本文拟利用布放于东沙群岛西侧流花油田群海域的 1 套潜标观测数据, 研究 2017 年 3 月至 4 月观测发现的一个反气旋涡对内孤立波的振幅、波速的影响, 以期更好地了解在反气旋涡过境时内孤立波的变化, 为内孤立波预警模型提供参考, 并为海上油气开发应用等安全保障提供重要依据。

1 数据与方法

1.1 数据

1.1.1 潜标观测数据

潜标布放于水深为 400 m 的南海东沙群岛西侧流花油田群海域(图 1), 包括温盐观测和海流观测两部分。温盐剖面由美国 SeaBird 公司生产的 SBE37 SM 型温盐深测量仪 (Conductivity Temperature Depth system, CTD) 和 SBE56 型温度传感器 (Temperature Sensor, T) 交替连接组成的温盐链进行观测, 其中每隔 50 m 安装 1 台 CTD、每隔 10 m 安装 1 台 T (有 CTD 处则不安装), 观测水深为 60~370 m。海流剖面采用美国 TRDI 公司生产的 WHLR-75 型 75 kHz 声学多普勒流速剖面仪 (Acoustic Doppler Current Profiler, ADCP) 进行观测, ADCP 换能器朝上, 安装于水深 370 m 的近底层主浮体内, 垂向观测间隔为 8 m 一层。温盐和海流均为每 3 min 同步采样一次。本文所使用的观测数据时段为 2017 年 2 月 1 日至 5 月 15 日, 其中由于 ADCP 故障, 缺少 2017 年 2 月 1 日至 20 日的海流观测数据。

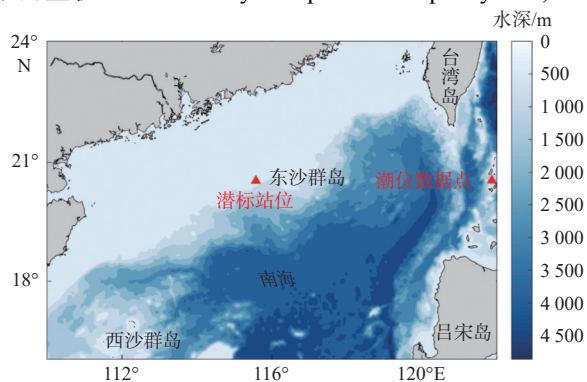


图 1 南海北部海域地形和潜标观测站位

Fig. 1 Seafloor topography and location of the mooring station in the Northern South China Sea

1.1.2 SLA 数据

采用卫星高度计海平面异常(Sea Level Anomalies, SLA)数据分析南海中尺度涡的出现和传播情况,数据来自于哥白尼海洋服务中心(Copernicus Marine Service, CMEMS)网站(<https://marine.copernicus.eu/>)。卫星测高数据包括准实时(Near Real Time, NRT)和延时(Deleyed Time, DT)两种数据。前者为近几天的数据产品;而后者一般在数据测量2个月后才会有可用产品,相对于NRT数据更加精准。本文选用2017年2月至5月DT数据,包括海平面异常和表层地转流经向和纬向分量数据,其空间分辨率为 $(1/4)^\circ$,时间分辨率为1 d^[16]。

1.1.3 潮位数据

本文采用的潮位数据来源于利用美国地球与空间研究中心(Earth & Space Research)提供的TMD(Tide Model Driver)工具包所得到的预报数据(<http://www.esr.org/research/polar-tide-models/tmd-software/>)。选用位于吕宋海峡中部($121^\circ 51' 53.28''\text{E}$, $20^\circ 32' 53.88''\text{N}$)点位(图1)的数据,数据时段为2017年2月6日至5月7日,分辨率为1 h。

1.2 方法

基于潜标观测数据,采用KdV理论,对内孤立波的振幅、波速等动力学要素进行提取和计算,并通过分析内波过境过程中振幅、波速的变化探讨中尺度涡对其传播的影响。

在连续流体中,KdV方程可以写为^[24]:

$$\frac{\partial \eta_n}{\partial t} + c_n \frac{\partial \eta_n}{\partial x} + \alpha_n \eta_n \frac{\partial \eta_n}{\partial x} + \beta_n \frac{\partial^3 \eta_n}{\partial x^3} = 0, \quad (1)$$

式中: η_n 为第 n 模态内波位移; t 为时间; c_n 为第 n 模态内波的线性波速; x 和 z 分别为水平方向和垂直方向的位移; α_n 、 β_n 分别为第 n 模态内波的非线性系数和频散系数, $\alpha_n = \frac{3}{2} \int_{-H}^0 (c_n - U(z))^2 \frac{d^3 \Phi_n}{dz^3} dz / \int_{-H}^0 (c_n - U(z)) \frac{d^2 \Phi_n}{dz^2} dz$, $\beta_n = \frac{1}{2} \int_{-H}^0 (c_n - U(z))^2 \Phi_n^2 dz / \int_{-H}^0 (c_n - U(z)) \frac{d^2 \Phi_n}{dz^2} dz$,其中, $U(z)$ 为背景的剪切流速,可以通过ADCP观测到的内孤立波发生前30 min的每层流速取平均得到, Φ_n 为第 n 模态内孤立波的垂向位移,可以通过求解Taylor-Goldstein(T-G)方程 $\frac{d}{dz} \left[(c_n - U(z))^2 \frac{d \Phi_n}{dz} \right] + N^2(z) \Phi_n = 0$ (式中, $\Phi(-H) = \Phi(0) = 0$, $N^2(z)$ 为浮力频率,且 $N^2(z) = -\frac{g}{\rho} \frac{d\rho}{dz}$, g 为重力加速度, ρ 为海水密度)得到^[25-26]。

方程(1)存在单个孤立波解:

$$\eta_n(x, t) = \eta_{0,n} \text{sech}^2 \left(\frac{x - C_n t}{\Delta_n} \right), \quad (2)$$

式中, $\eta_{0,n}$ 为内孤立波的最大振幅; C_n 为内孤立波的非线性波速,且 $C_n = c_n + \frac{\alpha_n \eta_{0,n}}{3}$; Δ_n 为内孤立波的水平特征宽度,且 $\Delta_n = \sqrt{\frac{12 \beta_n}{\alpha_n \eta_{0,n}}}$ 。本文用17℃等温线的垂向最大位移变化量表示内孤立波的最大振幅,即:

$$\eta_{0,n} = h_{\max} - h_0, \quad (3)$$

式中, $h_{\max}$ 为内波发生期间17℃等温线波谷所在的水深值, h_0 为内波发生前30 min 17℃等温线所在的平均水深。

2 结果与分析

2.1 中尺度涡过境过程

由南海北部中尺度涡经过观测潜标的SLA和表层地转流过程分布(图2)可见:2017年2月20日开始,观测站受到中尺度涡边缘强流场的影响。3月20日前主要以西北向或北向流为主,3月20日以后则主要以东向流为主,4月1日开始,潜标观测站才逐渐摆脱中尺度涡的影响。中尺度涡影响期间,潜标观测到的温度及海流剖面如图3所示,可以看出,从2月26日开始,观测海域受中尺度涡的影响,温跃层开始下潜,上层流速逐渐增强,至4月4日左右,温跃层和流速幅值恢复到原来的深度和强度。

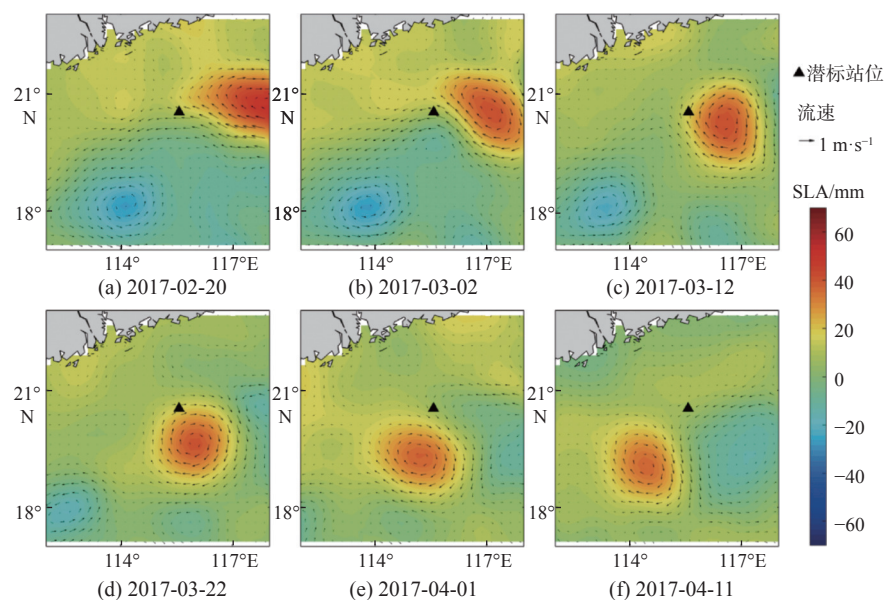
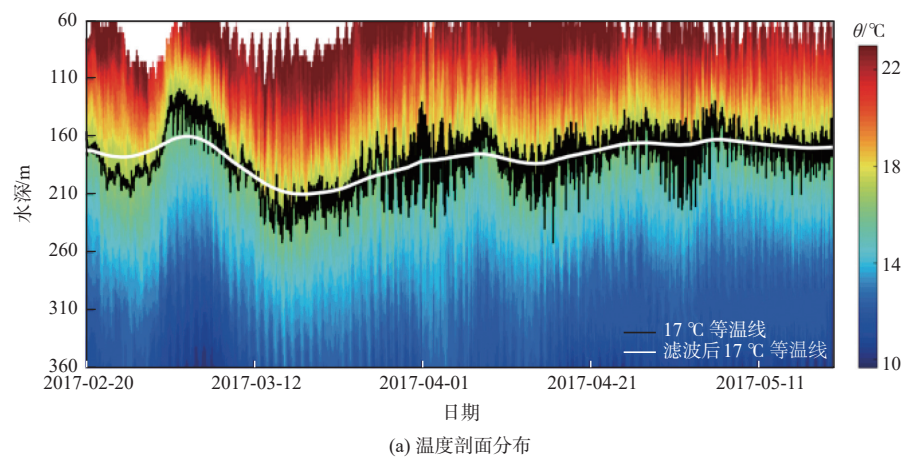
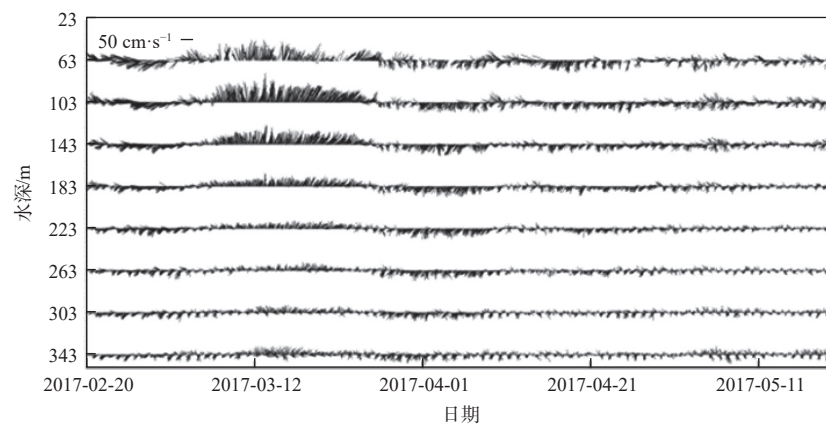


图 2 南海北部中尺度涡经过观测潜标的 SLA 和表层地转流过程分布

Fig. 2 Distributions of SLA and geostrophic current process when mesoscale eddy passing through the mooring station in the northern South China Sea



(a) 温度剖面分布



(b) 海流矢量分布

图 3 中尺度涡影响期间潜标观测温度剖面和海流矢量分布

Fig. 3 The temperature profiles and current vector distribution at the mooring station during the influence of the mesoscale eddy

2.2 中尺度涡对内孤立波振幅的影响

2017年2月10日至5月10期间内孤立波的发生频次和振幅的结果如图4a所示。该海域内孤立波的频发周期与吕宋海峡的大潮期(图4b)对应,说明该海域内孤立波主要来源于吕宋海峡。从对应的时间来看,内波从吕宋海峡传播至该海域的时间为3 d左右。3月9日至23日观测站位受中尺度涡的影响最大,该周期内的内孤立波平均振幅为20.7 m,与无中尺度影响情况下的平均振幅(29.0 m)相比,减小了28.6%,说明该反气旋中尺度涡对内孤立波的振幅具有明显的抑制作用。其次,该周期内的内孤立波发生频次明显少于其他周期,说明该中尺度涡调制后的背景温盐场和流场不利于内孤立波的生存。这与Xu等^[23]观测发现的一个约180 m振幅的内孤立波穿越中尺度涡后,振幅变得很小且内孤立波结构不再明显的结论一致。

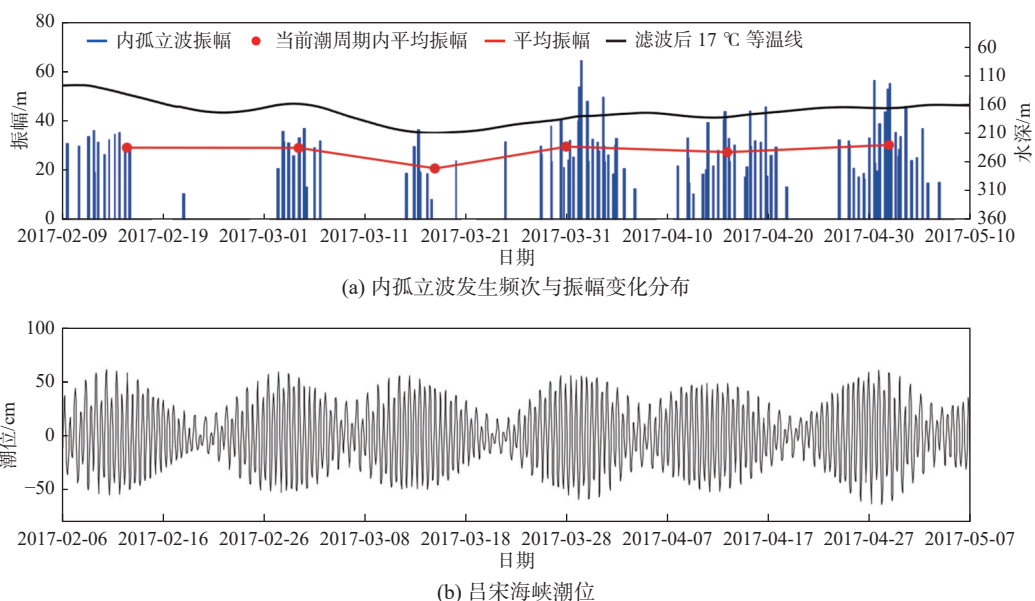


图4 中尺度涡影响期间内孤立波发生频次和振幅变化与吕宋海峡潮位对比

Fig. 4 Comparison of the occurrence frequency and amplitude variation of the internal solitary wave with the tide level in the Luzon Strait during the influence of the mesoscale eddy

内孤立波传播进入中尺度涡受温跃层变化影响的过程可以近似地看作“趋浅温跃层”^[6]的逆过程。即内孤立波由温跃层较浅的海域传播至由中尺度涡影响导致温跃层变深的海域。根据趋浅温跃层理论^[5],内孤立波的振幅增长率(Soliton Amplitude Growth Ratio, SAGR)可以表示为:

$$\text{SAGR} = \left(\frac{h_0}{h_e} \right)^{\frac{3}{2}}, \quad (4)$$

式中, h_0 为没有中尺度涡时等温线的深度, h_e 为中尺度涡存在时等温线的深度。若 $\text{SAGR} > 1$, 则说明变化的温跃层有利于内孤立振幅的增长; 若 $\text{SAGR} = 1$, 则说明温跃层变化对振幅没有影响; 若 $\text{SAGR} < 1$, 则说明变化的温跃层对内孤立波的振幅有抑制作用。3月9日至23日受中尺度涡影响导致的温跃层变化明显。图5给出了SAGR理论计算结果, 可以看出, 内孤立波的振幅变化与SAGR理论计算值的变化趋

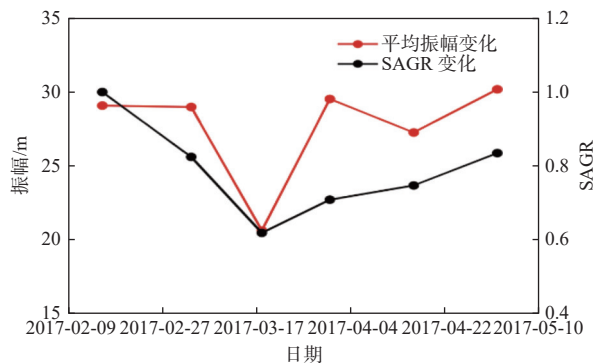


图5 内孤立波平均振幅变化与SAGR理论计算值的对比
Fig. 5 Comparison between the change of average amplitude of internal solitary wave and the calculated values of SAGR

势基本一致, 其中, 受中尺度涡影响最大的 3 月 9 日至 23 日潮周期内的内孤立波振幅明显减小, 对应的 SAGR 值为 0.6, 说明中尺度涡导致温跃层下潜对内孤立波振幅产生了较强的抑制。

2.3 中尺度涡对内孤立波波速的影响

根据 KdV 理论, 基于观测到的温盐剖面和海流剖面计算得到 2017 年 2 月 20 日至 5 月 10 日期间内孤立波的波速值(图 6 中黑色圆点), 可以看出, 在未受到中尺度涡影响的情况下, 内孤立波的波速为 1.26 m/s。2017 年 3 月 9 日至 25 日期间, 受中尺度涡的影响, 波速值明显增大, 平均为 1.47 m/s, 增大约 16.7%, 最大波速达到 1.54 m/s。

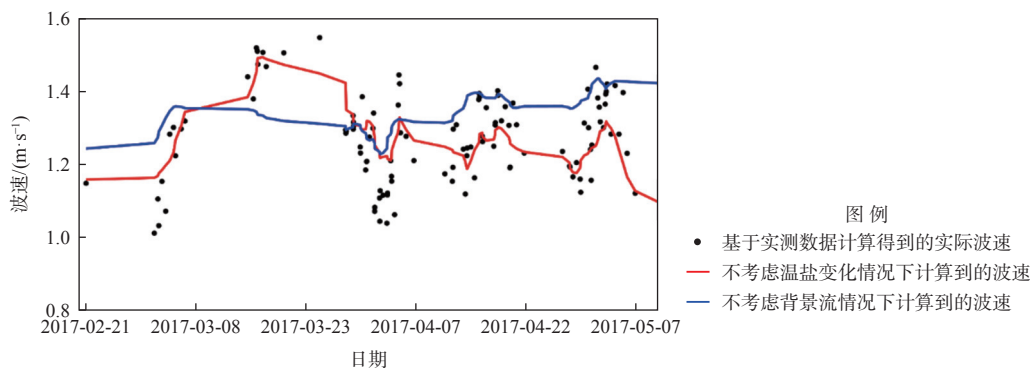


图 6 中尺度涡影响期间内孤立波的波速分布

Fig. 6 Distribution of the wave speeds of internal solitary waves during the influence of the mesoscale eddy

根据波速的计算公式, 内孤立波波速应随着振幅的增大而增大, 但在中尺度涡过境期间, 内孤立波的波速却随着振幅减小而增大, 说明了中尺度涡对内孤立波波速具有增强作用。为进一步确认是何种因素导致波速的增强, 我们采用控制变量法, 分别针对层结和背景流的变化对波速的影响进行了数值计算分析: 1) 不考虑背景流, 计算在层结变化下的波速值(图 6 中蓝色曲线), 结果表明, 其波速变化不大; 2) 以 2 月 20 日平均温盐剖面作为背景温盐场并保持不变, 计算在流场变化下的波速值(图 6 中红色曲线)。从图 6 可以看出, 在受中尺度涡影响较大的 2017 年 3 月 9 日至 25 日期间, 由于流场的变化, 计算出的波速值明显较大。综合结果表明, 该反气旋中尺度涡导致的背景流场的变化, 对内孤立波的波速具有增强作用。

3 结 论

针对南海北部陆坡海域内孤立波和中尺度涡频发对海上施工和水下作业安全造成严重威胁这一背景, 本文基于布放在南海北部东沙群岛西侧陆坡海域的一套潜标观测数据, 选取 2017 年 3 月一反气旋中尺度涡经过潜标站位的过程, 探讨了中尺度涡对内孤立波传播的影响。主要结论如下:

1) 受反气旋中尺度涡的影响, 潜标站位等温线明显下凹, 跃层深度变深, 导致内孤立波的平均振幅减小 28.6%, 说明内孤立波传播过程中, 该反气旋中尺度涡对其振幅起抑制作用, 其振幅抑制过程可采用趋浅温跃层理论进行描述。

2) 受反气旋中尺度涡的影响, 内孤立波的平均波速由 1.26 m/s 增大到 1.47 m/s, 增幅约 16.7%。说明内孤立波传播过程中, 反气旋中尺度涡对其波速起增强作用。利用 KdV 理论分析表明, 该强化作用主要是由反气旋中尺度涡的边缘流场改变了内孤立波过境时的背景流场所致, 而与中尺度涡引起的层结变化关系较小。

研究成果对提高该海域内孤立波预警模型的准确度具有重要参考意义, 同时也可为该海域海上油气开发应用等安全保障提供重要依据。

参考文献 (References):

- [1] 方欣华, 杜涛. 海洋内波基础和中国海内波[M]. 青岛: 中国海洋大学出版社, 2005. FANG X H, DU T. Fundamentals of oceanic internal waves and internal waves in the China Seas[M]. Qingdao: Ocean University of China Press, 2005.
- [2] CHEN L, ZHENG Q A, XIONG X J, et al. A new type of internal solitary waves with a re-appearance period of 23 h observed in the South China Sea[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2018, 37(9): 116-118.
- [3] CHEN L, ZHENG Q A, XIONG X J, et al. Dynamic and statistical features of internal solitary waves on the continental slope in the northern South China Sea derived from mooring observations[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2019, 124(6): 4078-4097.
- [4] CHEN L, XIONG X J, ZHENG Q A, et al. Mooring observed mode-2 internal solitary waves in the northern South China Sea[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2020, 39(11): 44-51.
- [5] ZHENG Q A, SUSANTO R D, HO C R, et al. Statistical and dynamical analyses of generation mechanisms of solitary internal waves in the northern South China Sea[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2007, 112(C3): C03021-1-C03021-16.
- [6] WANG J, HUANG W G, YANG J S, et al. Study of the propagation direction of the internal waves in the South China Sea using satellite images[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2013, 32(5): 42-50.
- [7] MAXWORTHY T. A note on the internal solitary waves produced by tidal flow over a three-dimensional ridge[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1979, 84(C1): 338-346.
- [8] BUIJSMAN M C, KANARSKA Y, MCWILLIAMS J C. On the generation and evolution of nonlinear internal waves in the South China Sea[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2010, 115(C2): C02012-1-C02012-17.
- [9] YUAN Y L, ZHENG Q A, DAI D J, et al. Mechanism of internal waves in the Luzon Strait[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2006, 111(C11): C11S17-1-C11S17-9.
- [10] ZHAO Z X, KLEMAS V, ZHENG Q A, et al. Remote sensing evidence for baroclinic tide origin of internal solitary waves in the northeastern South China Sea[J]. *Geophys Reserch Letters*, 2004, 31(6): L06302-1-L06302-4.
- [11] FARMER D, ALFORD M, LIEN R C, et al. From Luzon Strait to Dongsha Plateau: stages in the life of an internal wave[J]. *Oceanography*, 2011, 24(4): 64-77.
- [12] LIEN R C, TANG T Y, CHANG M H, et al. Energy of nonlinear internal waves in the South China Sea[J]. *Geophys Reserch Letters*, 2005, 32(5): L05615-1-L05615-5.
- [13] LAMB K G, WARN-VARNAS A. Two-dimensional numerical simulations of shoaling internal solitary waves at the ASIAEX site in the South China Sea[J]. *Nonlinear Processes in Geophysics*, 2015, 22(3): 289-312.
- [14] 钟广见, 金庆焕, 张宝金, 等. 南海北部陆坡深水盆地特征及其油气勘探潜力[J]. *地球科学前沿*, 2013, 3(1): 64-72. ZHONG G J, JIN Q H, ZHANG B J, et al. The structure characteristics and petroleum exploration potential of deep-water basins in northern South China Sea[J]. *Advances in Geosciences*, 2013, 3(1): 64-72.
- [15] 王火平, 陈亮, 郭延良, 等. 海洋内孤立波预警监测识别技术及其在流花16-2油田群开发中的应用[J]. *海洋工程*, 2021, 39(2): 162-170. WANG H P, CHEN L, GUO Y L, et al. Observing, identification and early warning technology of internal solitary wave and its application in Liuhua 16-2 oilfield group development project[J]. *The Ocean Engineering*, 2021, 39(2): 162-170.
- [16] 原庆东, 冒家友, 冯丽梅, 等. 南海孤立内波对海上安装作业的影响及预防[J]. *石油工程建设*, 2013, 39(6): 27-29. YUAN Q D, MAO J Y, FENG L M, et al. Effect of internal soliton in South China Sea on offshore installation operation and its prevention[J]. *Petroleum Engineering Construction*, 2013, 39(6): 27-29.
- [17] 郑全安, 谢玲玲, 郑志文, 等. 南海中尺度涡研究进展[J]. *海洋科学进展*, 2017, 35(2): 131-158. ZHENG Q A, XIE L L, ZHENG Z W, et al. Progress in research of mesoscale eddies in the South China Sea[J]. *Advances in Marine Science*, 2017, 35(2): 131-158.
- [18] 林宏阳, 胡建宇, 郑全安. 吕宋海峡附近中尺度涡特征的统计分析[J]. *海洋学报*, 2012, 34(1): 1-7. LIN H Y, HU J Y, ZHENG Q A. Statistical analysis of the features of meso-scale eddies near the Luzon Strait[J]. *Haiyang Xuebao*, 2012, 34(1): 1-7.
- [19] 林宏阳, 胡建宇, 郑全安. 南海及西北太平洋卫星高度计资料分析: 海洋中尺度涡统计特征[J]. *台湾海峡*, 2012, 31(1): 105-113. LIN H Y, HU J Y, ZHENG Q A. Satellite altimeter data analysis of the South China Sea and the northwest Pacific Ocean: statistical features of oceanic mesoscale eddies[J]. *Journal of Oceanography in Taiwan Strait*, 2012, 31(1): 105-113.
- [20] CHEN G X, HOU Y J, CHU X Q. Mesoscale eddies in the South China Sea: mean properties, spatiotemporal variability, and impact on thermohaline structure[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2011, 116(C6): C06018-1-C06018-19.
- [21] ZHANG Z W, LI Y R, TIAN J W. A modified method to estimate eddy diffusivity in the North Pacific using altimeter eddy statistics[J]. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 2013, 31(4): 925-933.
- [22] HUANG X D, ZHANG Z W, ZHANG X J, et al. Impacts of a mesoscale eddy pair on internal solitary waves in the northern South China Sea revealed by mooring array observations[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2017, 47(7): 1539-1554.

- [23] XU J X, HE Y H, CHEN Z W, et al. Observations of different effects of an anti-cyclonic eddy on internal solitary waves in the South China Sea[J]. *Progress in Oceanography*, 2020, 188: 102422-1-102422-13.
- [24] RIMSHAW R H J. Solitary waves in fluids[M]. UK: WIT press, 2007.
- [25] GRIMSHAW R, PELINOVSKY E, TALIPOVA T, et al. Simulation of the transformation of internal solitary waves on oceanic shelves[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2004, 34(12): 2774-2791.
- [26] HOLLOWAY P E, PELINOVSKY E, TALIPOVA T, et al. A nonlinear model of internal tide transformation on the Australian North West Shelf[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 1997, 27(6): 871-896.

Study of the Influence of Anticyclonic Mesoscale Eddy on Internal Solitary Wave Propagation in the Northern South China Sea

DENG Lin-qing¹, XU Pei-peng^{2,3}, GUO Yan-liang^{2,4,5}, CHEN Liang^{2,4,5}, XIONG Xue-jun^{2,4,5}

(1. CNOOC China Limited, Shenzhen Branch, Deepwater Engineering & Construction Center, Shenzhen 518067, China;

2. First Institute of Oceanography, MNR, Qingdao 266061, China;

3. College of Geodesy and Geomatics, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China;

4. Laboratory for Regional Oceanography and Numerical Modeling, Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology (Qingdao), Qingdao 266061, China;

5. Key Laboratory of Marine Science and Numerical Modeling, MNR, Qingdao 266061, China)

Abstract: Ocean internal wave is characterized with large amplitude, strong velocity, and short period and can cause a serious threat to the safety of offshore construction and underwater operations. The continental slope of the Northern South China Sea is one of the areas where internal solitary waves (ISW) and mesoscale eddies occur frequently. Therefore, the study on the influence of mesoscale eddy on internal solitary wave propagation is of great significance for understanding further the characteristics of internal solitary wave propagation during the anticyclonic eddy transit and improving the accuracy of the internal wave prediction model in the Northern South China Sea. For this purpose, the data obtained at a mooring station located in the west slope area of the Dongsha Islands in the Northern South China Sea during the transit of an anticyclonic mesoscale eddy in March 2017 are used for studying the influence of the mesoscale eddy on the internal solitary wave propagation. The results show that: ① Due to the influence of mesoscale eddy the average amplitude of the ISWs decreases by about 28.6%, for which the main reason is that the mesoscale eddy causes a depression of isotherm and then leads to an inhibitory action to the amplitude of ISW. Such an influence process can be described by the shallow thermocline theory; ② During the influence of mesoscale eddy the average wave speed of ISW increases from 1.26 m/s to 1.47 m/s and has an increasing range of about 16.7%, reflecting that the mesoscale eddy can strengthen the wave velocity of the ISW. This strengthening effect is mainly attributed to the change in background flow field caused by the edge flow field of the mesoscale eddy. However, the changes of temperature and salt fields caused by the mesoscale eddy have relatively little effect on the ISW speed.

Key words: the northern South China Sea; mesoscale eddy; internal solitary wave; mooring observation; wave velocity

Received: January 2, 2022