

孙丽娜, 张杰, 孟俊敏, 等. 基于遥感的南海北部中尺度涡对内孤立波传播的影响[J]. 海洋学报, 2022, 44(7): 137–144, doi:10.12284/hyxb2022106

Sun Li'na, Zhang Jie, Meng Junmin, et al. Influence of mesoscale eddy on internal solitary wave propagation in the northern South China Sea based on remote sensing[J]. Haiyang Xuebao, 2022, 44(7): 137–144, doi:10.12284/hyxb2022106

基于遥感的南海北部中尺度涡对内孤立波传播的影响

孙丽娜^{1,2}, 张杰^{1,2}, 孟俊敏^{1,2*}, 崔伟^{1,2}

(1. 自然资源部第一海洋研究所, 山东 青岛 266061; 2. 自然资源部海洋遥测技术创新中心, 山东 青岛 266061)

摘要: 海洋内孤立波和中尺度涡是南海北部常见的中尺度动力过程。本文利用 2010–2015 年的 Terra/Aqua-MODIS、ENVISAT ASAR 和多源卫星高度计资料开展了南海海洋内孤立波和中尺度涡遥感探测研究, 分析了中尺度涡对内孤立波传播方向的影响。结果表明, 中尺度涡和内孤立波主要在南海东北部海域共存, 当二者共存时, 气旋(冷涡)促使内孤立波偏离原来的传播方向, 向西偏南方向传播; 反气旋(暖涡)促使内孤立波向西偏北方向传播, 气旋与反气旋改变的内孤立波传播方向刚好相反。内孤立波和中尺度涡共存时间主要集中在 3–9 月, 其中, 3 月受气旋和反气旋的共同作用, 内孤立波传播方向几乎无变化; 4 月和 5 月, 主要受气旋影响, 内孤立波偏离原来传播方向向南传播; 6–9 月, 主要受反气旋影响, 内孤立波偏离原来的传播方向向北传播。本文利用遥感手段探索了海洋中尺度涡对内孤立波传播方向的影响, 结果与现场观测结果一致。

关键词: 内孤立波; 中尺度涡; 遥感; 南海北部

中图分类号: P731.24; P722.7

文献标志码: A

文章编号: 0253–4193(2022)07–0137–08

1 引言

海洋内孤立波是发生在海水密度稳定层化的海洋内部的波动现象, 是海水运动的重要形式之一, 具有较强的随机性。大振幅内孤立波促使等密度面发生快速上下起伏, 严重威胁水下潜艇航行安全, 在跃层处产生的垂向剪切流对海上石油平台等设施具有一定的破坏力。同时, 海洋内孤立波在传播过程中引起的能量交换对海洋动力学过程有决定性影响。纵观全球海洋内孤立波的分布, 南海是内孤立波发生最活跃的海区之一^[1–4], 该海域内孤立波振幅最大可达 240 m^[5], 传播速度超过 2 m/s^[6], 波峰线长度可达上百千米, 是典型的大尺度内孤立波频发海域。

海洋中尺度涡是指叠加在海洋平均流场上、时间尺度在数天至数月之间、空间水平尺度在几十千米

至几百千米之间的涡旋, 主要发生在海洋内部, 尺度较大, 并且处在不停的运动状态之中。按照中尺度涡自转方向可将其分为两种类型, 一种是反气旋式涡旋(北半球为顺时针旋转), 也称为暖涡; 另一种是气旋式涡旋(北半球为逆时针旋转), 又称冷涡。南海北部的中尺度涡存在季节内周期现象, 一般持续 1~2 个月, 自东向西移动, 空间尺度一般几十千米至几百千米, 大都产生于 2 000 m 以深海域^[7]。大量高能量的中尺度涡在南海东北部海域产生, 向西传播, 生命周期可持续 1~2 个月^[8]。

中尺度涡和内孤立波是广泛存在于海洋内部的重要中尺度动力过程, 它们共存的现象最早由 Fu 和 Holt^[9] 报道, 他们从 Seasat 卫星 SAR 图像中发现, 在纽芬兰大浅滩南部的一个气旋涡附近有长的、弯曲的条纹, 这些条纹可能是内孤立波在 SAR 图像中成

收稿日期: 2021–06–23; 修订日期: 2021–12–19。

基金项目: 国家自然科学基金(42006164)。

作者简介: 孙丽娜(1985—), 女, 吉林省桦甸市人, 主要从事海洋内波遥感探测的研究。E-mail: sunln@fio.org.cn

* 通信作者: 孟俊敏, 男, 研究员, 主要从事海洋微波遥感方面的工作。E-mail: mengjm@fio.org.cn

的像。Joyce 和 Stalcup^[10] 在一次海上调查中发现, 在湾流附近的反气旋涡 82 B 内部观测到了向涡心传播的内孤立波。随后, 大量学者又基于遥感图像发现了不同海域都存在海洋中尺度涡和内孤立波共存的现象, Alpers 和 Holt^[11] 通过分析 SIR-X 波段 SAR 图像发现, 湾流北侧的反气旋涡外部存在内孤立波。Lyzenga 和 Wackerman^[12] 基于机载和 ERS-1 SAR 图像发现, 挪威外海一个反气旋涡边缘存在向窝心传播的内孤立波, 同年 Kirby 等^[13] 基于 SAR 图像也报道了墨西哥特万特佩克湾的一个反气旋涡外部存在内孤立波。之后, 开始逐步研究中尺度涡和内孤立波的相互作用, 中尺度涡和内孤立波相遇时会引起海水温度垂向变化^[14]。当内孤立波经过中尺度涡存在的海域时, 它的波峰线会发生扭曲, 能量发生耗散^[15]。在南海北部海域, 受黑潮入侵和中尺度涡移动的共同作用, 内孤立波的传播路径不仅会发生一定的变化^[16], 而且内孤立波振幅会减小, 传播速度会增加^[17-18]。利用现场观测数据统计分析发现, 中尺度涡对内孤立波的振幅和传播路径具有重要的影响, 气旋涡比反气旋涡更有利于内孤立波振幅的增加, 反气旋涡的存在可以使内孤立波的振幅降低 67%, 反气旋使内孤立波偏离原来的方向向北传播, 气旋反之^[19-20]。Xu 等^[21] 利用现场观测追踪了反气旋涡对内孤立波在传播过程中振幅变化的影响, 当内孤立波经过反气旋涡中心时, 内孤立波振幅减小趋于 0, 当内孤立波继续传播经过反气旋涡边缘时, 振幅逐渐增加至原来振幅的 50%。

海洋中尺度涡和内孤立波的共存现象在 20 世纪 80 年代已有研究, 随后学者们逐渐开始利用现场观测和数值模拟手段研究两者的相互影响, 但利用遥感手段大范围研究中尺度涡对内孤立波的影响还鲜有报道。本文利用 2010–2015 年的 Terra/Aqua-MODIS、ENVISAT ASAR 和多源卫星高度计资料开展了南海内孤立波和中尺度涡遥感探测, 分别提取了中尺度涡和内孤立波位置信息, 分析了南海内孤立波和中尺度涡的空间分布特征。在此基础上, 进一步分析了南海东北部中尺度涡对内孤立波传播方向的影响。本文利用遥感手段研究中尺度涡对内孤立波传播的影响, 为探测海洋中尺度动力现象的相互作用提供新手段。

2 数据与方法

2.1 数据

海洋内孤立波信息提取所用的遥感数据为光学遥感图像和 SAR 遥感图像, 其中, 获取光学遥感图像采用的是分辨率为 250 m 的太阳反射波段 Terra/Aqua-

MODIS 数据, 其共有两个波段 band 1 (0.620~0.670 μm) 和 band 2 (0.841~0.876 μm), 刈幅宽度为 2 330 km。Terra 与 Aqua 搭载的 MODIS 在时间更新频率上相配合, 可以得到每天最少 2 次白天和 2 次黑夜的更新数据。MODIS 具有时间分辨率高、空间覆盖范围广、数据可免费获取等优点, 已成为研究海洋内孤立波的重要数据源。ENVISAT ASAR 采用 150 m 空间分辨率的 VV/HH 极化方式的 WSM 模式数据, 刈幅宽度约为 400 km。SAR 具有全天时、全天候以及能够穿透云雾等优势, 可以弥补光学遥感成像的不足。中尺度涡信息提取所用的多源卫星高度计资料是 AVISO (Archiving, Validation, and Interpretation of Satellite Oceanographic Data) 分发的多源高度计海面高度异常值 (Sea Level Anomaly, SLA) 融合数据, 其空间分辨率为 0.25°, 时间分辨率为 1 d。

2.2 内孤立波识别方法

本文所用的遥感数据包括光学遥感图像和 SAR 遥感图像。首先对原始遥感图像进行筛选和预处理, 其中, SAR 遥感图像要进行入射角校正和几何校正等常规预处理, 光学遥感图像要进行几何校正预处理。然后对内孤立波遥感图像进行均衡化处理, 找到内孤立波在图像中的位置。根据内孤立波判别标准, 建立感兴趣区, 利用人机交互式方法提取内孤立波位置信息。内孤立波在遥感图像中的判别标准为内孤立波呈现明暗交替的条带形式, 或直或弯曲, 大多数是弯曲的; 内孤立波沿传播方向大多以波包的形式传播, 每个波包包含有几个或多个孤立子; 沿内孤立波传播方向, 最前沿的内孤立波即前导波一般最大, 后面的内孤立波依次减小; 波峰线一般为几千米到几百千米。

2.3 中尺度涡识别方法

本文采用 Winding-Angle 方法进行中尺度涡识别。首先要对数据进行质量控制, 利用高度计自带数据编辑标准, 剔除观测或校正数据不准确的高度计数据。不同高度计卫星采用的参考椭球和参考框架不相同, 且各校正项所使用的方法也不同。因此, 在联合使用多星测高数据前, 必须进行基准统一。根据从各高度计的地球物理数据集 (Geophysical Data Records, GDR) 中读取出的有关参数, 利用如下公式计算出高度计沿轨观测点的 SLA。具体计算公式为

$$\text{SLA} = \text{SSH} - \text{MSS} - \text{TE} - \text{IB} - \text{HF}, \quad (1)$$

式中, SSH (Sea Surface Height) 为海面高度; MSS (Mean Sea Surface) 为平均海平面; TE (Tide Effects) 为潮汐校正, 包括海洋潮汐、固体潮和极潮等潮汐校正值; IB (Inverse Barometer) 为大气逆压; HF (High Frequency

Wind Response)为风和气压变化引起的海面高频振荡。

基于处理后的高度计数据,利用 Winding-Angle 涡旋探测方法提取中尺度涡位置信息。该方法首先在一个 $1^\circ \times 1^\circ$ 经-纬度移动窗口内通过寻找内部 SLA 最小(最大)值的极值来判断可能的气旋涡(反气旋涡)中心。之后,对于每一个可能的气旋涡(反气旋涡)中心,从其内部以 1 cm 的增幅(减幅)向外寻找 SLA 的等值线。最外侧包含着涡旋中心的等值线即为涡旋的外边缘。基于 SLA 等值线的中尺度涡识别与探测,具体判别条件为海面高度异常等值线闭合;涡的中心位置水深大于 200 m;中心与最外层闭合等值线的高度差不小于 8 cm;中尺度涡的直径不小于 100 km。中尺度涡类型判别条件为 SLA 等值线高中心的为暖涡,低中心的为冷涡。

3 结果与讨论

3.1 空间分布

基于 2010–2015 年的 Terra/Aqua-MODIS、ENVISAT ASAR 和多源卫星高度计资料提取的南海中尺度涡和内孤立波的空间分布如图 1 所示。从图 1 可以看出,中尺度涡主要发生在深海海域,大部分集中在越南以东、吕宋岛以西和南海东北部,南海西北部和东南部中尺度涡分布较少。气旋涡和反气旋涡的空间

分布存在一定差异,在吕宋岛以西,气旋涡和反气旋涡皆分布较多,越南东部海域气旋涡分布稍多于反气旋涡,尤其是越南东南部海域。本文探测的中尺度涡分布结果与国内外学者的探测结果一致^[22–26]。内孤立波主要分布在南海北部海域、越南沿岸以及纳土纳群岛附近海域,遥感未探测到南海中部海域的内孤立波。南海北部海域的内孤立波主要是由吕宋海峡附近的潮汐与海底地形相互作用产生,向西或西北方向传播,内孤立波在传播到东沙岛后发生反射、绕射等现象。内孤立波经过东沙岛后分为两部分:一部分向西北方向传播,一部分向西南方向传播。南海西部海域,大部分内孤立波向西(越南沿岸)传播;南海西南部的纳土纳群岛附近海域,内孤立波主要向西南方向传播。

综上所述,南海内孤立波主要分布在大陆架浅海海域,深海内孤立波分布较少,南海中部海域没有探测到内孤立波。中尺度涡主要分布于南海中部深海海区,大陆架海域分布较少,同时气旋涡和反气旋涡的分布存在一定差异。内孤立波和中尺度涡在南海分布范围都很广泛,但二者相遇范围很小,主要集中在南海东北部海域,这也是本文研究中尺度涡对内孤立波传播方向影响的区域。

3.2 南海内孤立波和中尺度涡月分布

将获取的内孤立波和中尺度涡空间位置按月叠加,得到 1–12 月的内孤立波和中尺度涡空间分布(图 2)。从图 2 中可以看出,南海内孤立波分布呈现很明显的月际变化,其中,5–8 月遥感探测到的内孤立波较多,11 月至翌年 2 月遥感探测到的内孤立波较少。这主要是因为夏季较浅的密度跃层有利于第一模态内孤立波的产生,而冬季较深的密跃层不利于第一模态内孤立波的产生。3–5 月是密度跃层形成并逐渐发展的时期,随着时间的推移,跃层的强度开始增强,范围增大,跃层深度由深海向沿岸的陆架区逐渐减小。6–8 月南海北部海域跃层达到强盛时期,在近岸陆架水域内,跃层的范围较 3–5 月有所扩大,强度增加,跃层深度在 10~35 m 范围内变化,跃层的厚度也有所加强。9–11 月南海北部海域密度跃层开始减弱,这一时期,跃层的范围大幅度缩小,跃层的深度有所加深但其厚度较小,较 6–8 月的强盛期有明显减弱的趋势。12 月至翌年 2 月,南海北部海域混合层变厚,密度跃层变深,不利于产生第一模态内孤立波。

南海中尺度涡分布也呈现明显的季节变化,其中,5–9 月的反气旋涡较多,明显多于同时期的气旋涡。反气旋涡主要分布在越南东南和吕宋岛西北海

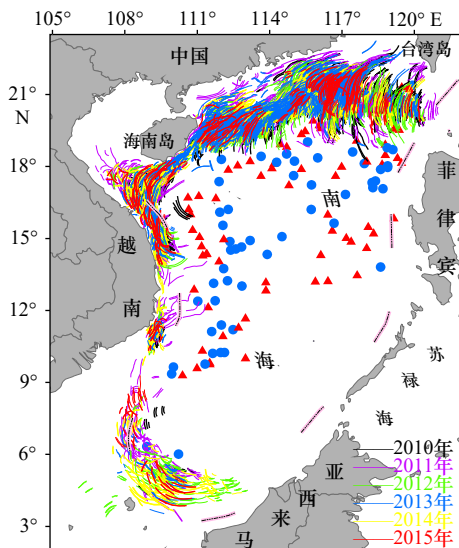


图 1 南海中尺度涡和内孤立波空间分布

Fig. 1 Spatial distribution of mesoscale eddy and internal solitary wave in the South China Sea

不同颜色的曲线代表不同年份的内孤立波波峰线;红色三角代表反气旋涡的中心位置;蓝色圆圈代表气旋涡的中心位置
The curves with different colors represent the internal solitary wave peak lines in different years; the red triangles represent the center of anticyclone eddy; the blue circles represent the center of cyclone eddy

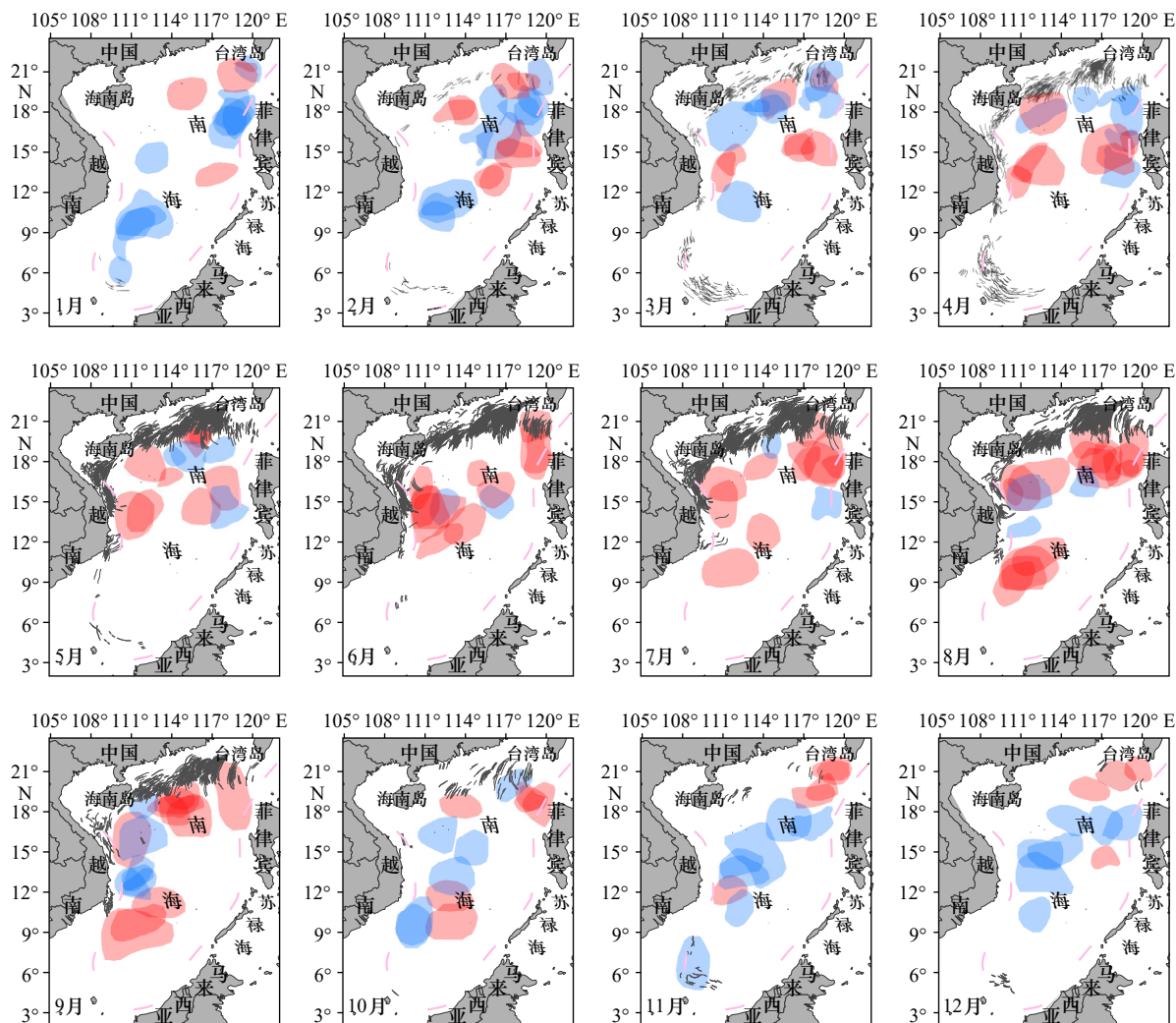


图2 南海中尺度涡和内孤立波位置月分布

Fig. 2 Monthly distribution of mesoscale eddy and internal solitary wave in the South China Sea

黑色曲线代表内孤立波波峰线;红色块代表反气旋涡的位置;蓝色块代表气旋涡的位置

The black curve represents the internal solitary wave peak line; the red block represents the position of the anticyclone eddy;
the blue block represents the position of the cyclone eddy

域,而气旋涡主要分布在越南以东海域。这主要是因为夏季风引起了西边界流和海盆尺度的反气旋式环流,并且该环流可以抵制黑潮入侵,所以容易形成反气旋涡。气旋涡主要发生在11月至翌年2月,这期间,气旋涡主要分布在越南沿岸,反气旋涡则主要分布在南海东北部。这是因为冬天在东北季风的驱动下,海域内形成了海盆尺度的气旋式环流异常,加上正的风应力旋度、南向西边界流以及海盆中央气旋式环流的存在,所以容易产生气旋涡。

根据南海中尺度涡和内孤立波的时空分布可知,空间上,内孤立波和中尺度涡在南海分布范围都很广泛,但二者相遇范围很小,主要集中在南海东北部海域。时间上,内孤立波和中尺度涡的分布具有一定的月际变化。因此,下面以南海东北部海域为研究区

域,开展中尺度涡对内孤立波传播方向的影响研究。

3.3 中尺度涡对内孤立波传播方向的影响

图3中红色方框为中尺度涡对内孤立波传播方向影响的研究范围,内孤立波和中尺度涡主要于3-9月在南海东北部(18°~21°N, 117°~120°E)有共存现象。其中,3月气旋涡和反气旋涡与内孤立波同时存在;4月和5月,仅有气旋涡与内孤立波共存;6-9月,只有反气旋涡与内孤立波共存。下面分析了3-9月内孤立波与中尺度涡共存时内孤立波传播方向的变化情况,其中黄色箭头表示内孤立波波峰线的传播方向。

南海北部的内孤立波主要是在吕宋海峡附近产生,由内潮与海底地形相互作用激发,向西传播进入南海北部^[26]。从图3可以看出,当只有气旋涡存在

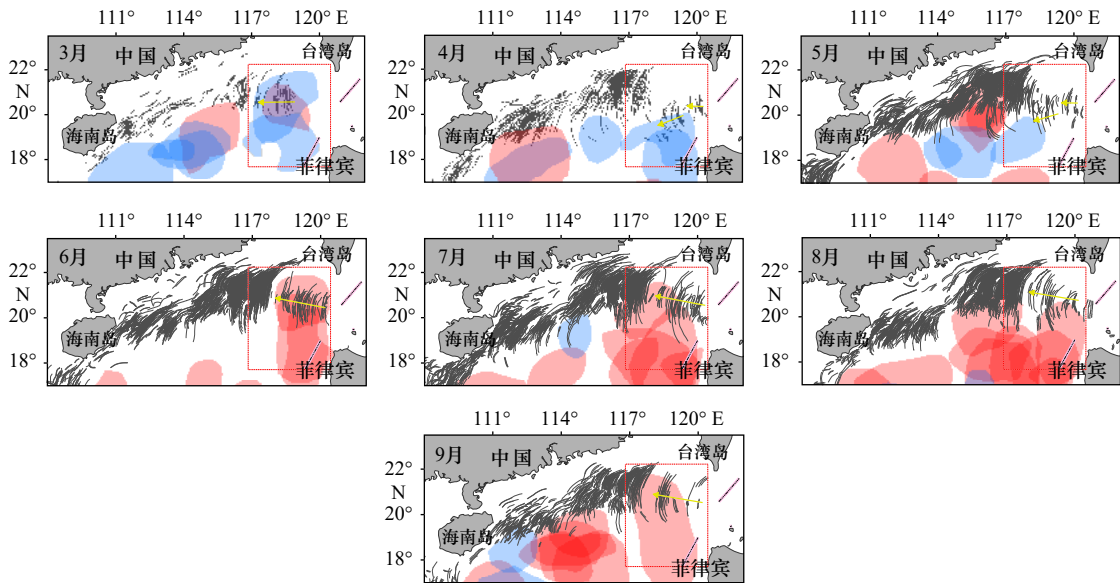


图3 南海东北部中尺度涡和内孤立波传播方向示意图

Fig. 3 Schematic diagram of mesoscale eddy and propagation direction of internal solitary wave in northeast South China Sea

黑色曲线代表内孤立波波峰线; 红色块代表反气旋涡的位置; 蓝色块代表气旋涡的位置

The black curve represents the internal solitary wave peak line; the red block represents the position of the anticyclone eddy;

the blue block represents the position of the cyclone eddy

时, 内孤立波向西偏南方向传播(4月和5月)。内孤立波在吕宋海峡附近海域产生后向西传播进入南海东北部, 当遇到气旋涡时, 内孤立波偏离了原来的传播方向, 向西偏南约 15°的方向传播。当只有反气旋涡存在时, 内孤立波向西偏北约 11°的方向传播(6-9月); 当气旋涡和反气旋涡同时存在(3月)时, 内孤立波仍然保持着原来的传播方向向西传播, 传播方向与没有中尺度涡时的方向一致。从而可以得出, 气旋涡和反气旋涡都会改变内孤立波的传播方向, 气旋涡使内孤立波偏离原来的传播方向向南传播, 反气旋涡促使内孤立波偏离原来的方向向北传播, 气旋涡对内孤立波传播的影响更大一些。

内孤立波的生命周期较短, 一般为几个小时到几天, 中尺度涡的生命周期相对于内孤立波长一些, 为几十天甚至上百天。因此, 一个固定的气旋涡或反气旋涡对内孤立波传播的影响比较显著。4月, 研究区域存在的涡旋主要为气旋涡, 6月, 研究区域存在的是反气旋涡。图4列举了反气旋涡和内孤立波共存时的分布图, 中尺度涡的背景流速是利用多源高度计海面高度异常融合数据获取的, 内孤立波的卫星遥感图像为 RADARSAT-2 SAR 图像, 获取时间为 2013年6月25日 10:16:43 UTC。从图4可以看出, 卫星 SAR 遥感图像中有两个明显的内孤立波波包, 位于反气旋涡的北部。内孤立波在向西传播的过程中, 受反气旋涡影响, 向西偏北 11.4°方向传播。

图5为2012年4月11日的气旋涡背景流速和内

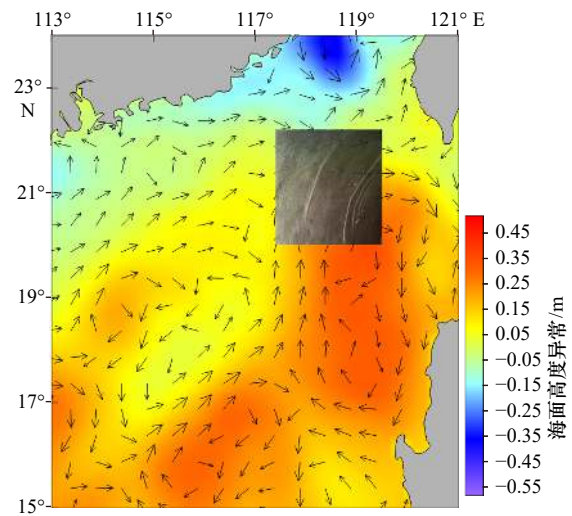


图4 RADARSAT-2 图像

Fig. 4 Radarsat-2 image

对应的中尺度涡所用的数据为同一天 AVISO 分发的多源高度计海面高度异常融合数据; 箭头代表地转流速

The data used for the corresponding mesoscale eddy is multi-source altimeter sea surface height anomaly fusion data distributed by AVISO on the same day; the arrow represents the geostrophic velocity

孤立波分布图, 其中内孤立波遥感图像来自 Aqua 卫星的 MODIS 传感器, 获取时间为 2012年4月11日 05:10 UTC。卫星光学遥感图像中有两个内孤立波波包, 向西传播进入南海北部, 受气旋涡影响, 内孤立波的波峰线发生了明显的形变, 内孤立波向西偏南约 15.9°方向传播。

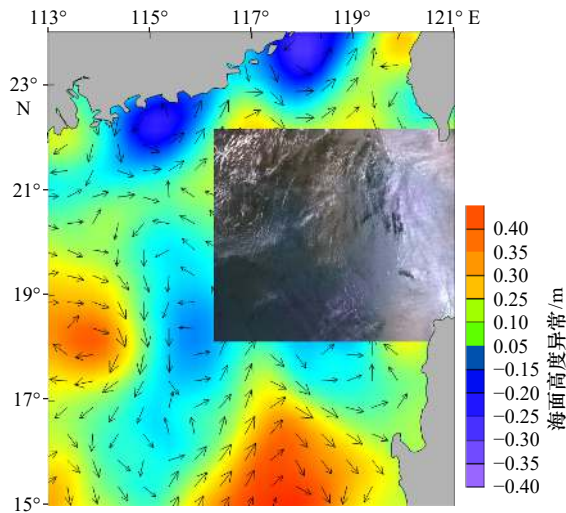


图 5 MODIS 图像
Fig. 5 MODIS image

对应的中尺度涡所用的数据为同一天的 AVISO 分发的多源高度计海面高度异常融合数据; 箭头代表地转流速
The data used for the corresponding mesoscale eddy is the multi-source altimeter sea surface height anomaly fusion data distributed by AVISO on the same day; the arrow represents the geostrophic velocity

基于卫星遥感数据分析发现, 中尺度涡对内孤立波的传播方向具有显著影响。在北半球, 科氏力与压强梯度力平衡作用的结果下, 气旋涡逆时针旋转, 反气旋涡与之相反。在南海东北部海域, 内孤立波主要在吕宋海峡附近海域受内潮与海底地形相互作用产生, 向西传播进入南海北部。由于吕宋海峡至东沙群岛之间海域的水深较深, 海底地形变化不明显, 内孤立波传播方向主要是自东向西传播。内孤立波在向西传播过程中, 当遇到逆时针旋转的气旋涡时, 气旋涡向南产生的切向流会带动水质点向南移动, 因此, 内孤立波传播方向会偏离原来的方向向南传播。当遇到顺时针旋转的反气旋涡时, 反气旋涡产生向北方向的切向流带动水质点向北移动, 内孤立波会偏离原来的方向向北传播; 当内孤立波与气旋涡和反气旋涡同时存在时, 内孤立波的传播方向变化不大。

已有现场观测表明, 内孤立波与中尺度涡相遇时, 内孤立波的垂向结构会发生剧烈变化, 内孤立波传播速度受背景流场和密度场变化的影响很大^[20]。传播速度是内孤立波波前形变的主要诱导因素, 中尺度涡带来的流场和密度场的变化, 直接影响内孤立波波前的传播速度, 进而导致波前畸变和传播路径的改变。在卫星遥感图像中, 经常会发现内孤立波波峰线

参考文献:

- [1] Hsu M K, Liu A K, Liu Cheng. A study of internal waves in the China seas and Yellow Sea using SAR[J]. Continental Shelf Research,

扭曲、变形或增宽等现象, 这主要是受不同背景环境的影响, 如地形、跃层或背景流场等。Xie 等^[18]采用实际的地形、流场和分层模拟分析了南海北部 1 景 SAR 图像中内孤立波波前形变的原因, 证明这是由 1 个反气旋涡引起的, 而不是海底地形或跃层变化引起的。本文的研究区域位于南海东北部深海区, 通常内孤立波的传播速度和波前形态都比较稳定。内孤立波在向西传播遇到中尺度涡时, 中尺度涡改变了内孤立波原来的背景流场, 进而改变了内孤立波的传播速度和波前畸变, 促使内孤立波传播方向发生一定的改变。由于气旋涡和反气旋涡的旋转方向不同, 因此, 它们引起的内孤立波波前畸变和传播方向存在一定差异。同时, 根据中尺度涡和内孤立波的时间分布特征, 中尺度涡对内孤立波传播方向的影响存在着一定的季节变化。

4 结论

现场观测资料与卫星观测资料均显示南海的中尺度涡和内孤立波活动都十分活跃。本文利用 2010–2015 年的多源卫星光学遥感图像、SAR 遥感图像和高度计数据资料, 探测出南海中尺度涡主要发生在深海海域, 大多集中在越南以东、吕宋岛以西和南海东北部, 南海西北部和东南部中尺度涡产生较少。内孤立波主要集中在南海北部、越南沿岸大陆架和纳土纳群岛附近海域。中尺度涡和内孤立波主要在南海东北部海域共存, 共存时间集中在 3–9 月, 其中 3 月受气旋和反气旋的共同作用, 内孤立波传播方向几乎无变化; 4 月和 5 月, 受气旋的作用, 内孤立波偏离原来的传播方向向南传播; 6–9 月, 受反气旋的影响, 内孤立波偏离原来的传播方向向北传播。总之, 当内孤立波与中尺度涡在南海东北部共存时, 中尺度涡可以改变内孤立波的传播方向, 但气旋和反气旋的影响不同。气旋促使内孤立波偏离原来的传播方向, 向西偏南方向传播; 反气旋促使内孤立波向西偏北方向传播, 气旋与反气旋改变的内孤立波传播方向刚好相反。本文结果与现场观测所得结论一致^[20], 将为以后利用遥感手段探测中尺度涡与内孤立波的相互作用提供基础资料。

致谢: 感谢 NASA 网站提供的 MODIS 数据; 感谢 AVISO 提供多源卫星高度计 SLC 融合数据。

- 2000, 20(4/5): 389–410.
- [2] Ramp S R, Tang T Y, Duda T F, et al. Internal solitons in the northeastern South China Sea. Part I: sources and deep water propagation[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2004, 29(4): 1157–1181.
- [3] Alford M H, Lien R C, Simmons H, et al. Speed and evolution of nonlinear internal waves transiting the South China Sea[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2010, 40(6): 1338–1355.
- [4] Huang Xiaodong, Zhao Wei, Tian Jiwei, et al. Mooring observations of internal solitary waves in the deep basin west of Luzon Strait[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2014, 33(3): 82–89.
- [5] Huang Xiaodong, Chen Zhaohui, Zhao Wei, et al. An extreme internal solitary wave event observed in the northern South China Sea[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6(1): 30041.
- [6] Zhao Zhongxiang, Liu Bingqing, Li Xiaofeng. Internal solitary waves in the China seas observed using satellite remote-sensing techniques: a review and perspectives[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2014, 35(11/12): 3926–3946.
- [7] 崔凤娟, 匡晓迪, 王玉, 等. 南海中尺度涡年际变化特征及动力机制分析[J]. *海洋与湖沼*, 2015, 46(3): 508–516.
Cui Fengjuan, Kuang Xiaodi, Wang Yu, et al. The analysis on interannual variation characteristics of eddy activities and its dynamic mechanism in the South China Sea[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2015, 46(3): 508–516.
- [8] Chen Gengxin, Hou Yijun, Chu Xiaoqing. 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.
- [9] Fu L L, Holt B. Some examples of detection of oceanic mesoscale eddies by the SEASAT synthetic-aperture radar[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1983, 88(C3): 1844–1852.
- [10] Joyce T M, Stalcup M C. An upper ocean current jet and internal waves in a Gulf Stream warm core ring[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1984, 89(C2): 1997–2003.
- [11] Alpers I, Holt B. Imaging of ocean features by SIR-C/X-SAR: an overview[C]//Proceedings of 1995 International Geoscience and Remote Sensing Symposium on Quantitative Remote Sensing for Science and Applications. Firenze, Italy: IEEE, 1995: 1588–1590.
- [12] Lyzenga D, Wackerman C. Detection and classification of ocean eddies using ERS-1 and aircraft SAR images[R]. Ann Arbor: ESA, 1997: 1267
- [13] Kirby D S, Barton E D, Mitchelson-Jacob E G, et al. SAR remote sensing of wind-driven circulation in the Gulf of Tehuantepec, Mexico[C]//Proceedings of the 3rd ERS Symposium on Space at the service of our Environment. Florence, Italy: European Space Agency, 1997: 1273.
- [14] 司广成, 于非, 刁新源. 南海北部中尺度涡与内波相遇的特征分析[J]. *海洋科学*, 2014, 38(7): 89–94.
Si Guangcheng, Yu Fei, Diao Xinyuan. Characteristics of encounter between a mesoscale eddy and internal waves in the northern South China Sea[J]. *Marine Sciences*, 2014, 38(7): 89–94.
- [15] Xie Jieshuo, He Yinghui, Chen Zhiwu, et al. Simulations of internal solitary wave interactions with mesoscale eddies in the northeastern South China Sea[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2015, 45(12): 2959–2978.
- [16] Park J H, Farmer D. Effects of Kuroshio intrusions on nonlinear internal waves in the South China Sea during winter[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2013, 118(12): 7081–7094.
- [17] Liao Guanghong, Yang Chenghao, Xu Xiaohua, et al. Effects of mesoscale eddies on the internal solitary wave propagation[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2012, 31(5): 26–40.
- [18] Xie Jieshuo, He Yinghui, Lü Haibin, et al. Distortion and broadening of internal solitary wavefront in the northeastern South China Sea deep basin[J]. *Geophysical Research Letters*, 2016, 43(14): 7617–7624.
- [19] Li Qiang, Wang Bing, Chen Xu, et al. Variability of nonlinear internal waves in the South China Sea affected by the Kuroshio and Mesoscale eddies[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2016, 121(4): 2098–2118.
- [20] Huang Xiaodong, Zhang Zhiwei, Zhang Xiaojiang, 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.
- [21] Xu Jiexin, He Yinghui, Chen Zhiwu, 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.
- [22] Hwang C, Chen S A. Circulations and eddies over the South China Sea derived from TOPEX/Poseidon altimetry[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2000, 105(C10): 23943–23965.
- [23] Wang Liping, Kobalinsky C J, Howden S. Mesoscale variability in the South China Sea from the TOPEX/Poseidon altimetry data[J]. *Deep-Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 2000, 47(4): 681–708.
- [24] 程旭华, 齐义泉, 王卫强. 南海中尺度涡的季节和年际变化特征分析[J]. *热带海洋学报*, 2005, 24(4): 51–59.
Cheng Xuhua, Qi Yiquan, Wang Weiqiang. Seasonal and interannual variabilities of mesoscale eddies in South China Sea[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2005, 24(4): 51–59.
- [25] 林鹏飞, 王凡, 陈永利, 等. 南海中尺度涡的时空变化规律 I. 统计特征分析[J]. *海洋学报*, 2007, 29(3): 14–22.
Lin Pengfei, Wang Fan, Chen Yongli, et al. Temporal and spatial variation characteristics on eddies in the South China Sea I. Statistical analyses[J]. *Haiyang Xuebao*, 2007, 29(3): 14–22.
- [26] Alford M H, Peacock T, MacKinnon J A, et al. The formation and fate of internal waves in the South China Sea[J]. *Nature*, 2015, 521(7550): 65–69.

Influence of mesoscale eddy on internal solitary wave propagation in the northern South China Sea based on remote sensing

Sun Li'na^{1,2}, Zhang Jie^{1,2}, Meng Junmin^{1,2}, Cui Wei^{1,2}

(1. *First Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Qingdao 266061, China*; 2. *Technology Innovation Center for Ocean Telemetry, Ministry of Natural Resources, Qingdao 266061, China*)

Abstract: The internal solitary wave and mesoscale eddy are common mesoscale dynamic processes in the northern South China Sea. In this paper, we use the Terra/Aqua-MODIS, ENVISAT ASAR and multi-source satellite altimeter data from 2010 to 2015 to realize remote sensing of isolated waves and mesoscale eddy in the South China Sea, and analyze the influence of mesoscale eddy on the propagation direction of internal solitary wave. The results show that the mesoscale eddy and the internal solitary wave coexist mainly in the northeastern part of the South China Sea. When the two coexisted, the cyclone (cold eddy) caused the internal solitary wave to deviate from the original propagation direction and propagation and spread to the west-south direction. The anticyclonic (warm eddy) causes the internal solitary wave to spread westward to the north, and the cyclone and the anticyclone change the direction of the internal solitary wave propagation is just opposite. The coexistence time of internal solitary wave and mesoscale eddy is mainly concentrated from March to September, and the propagation direction of internal solitary wave is almost unchanged in March due to the interaction of cyclone and anticyclone. In April and May, the internal solitary wave deviated from its original propagation direction and propagated southward mainly due to cyclone. From June to September, the internal solitary wave deviated from its original direction and propagated northward, mainly under the influence of anticyclone. In April and May, the internal solitary wave deviated from its original propagation direction and propagated southward mainly due to cyclone. From June to September, the internal solitary wave deviated from its original direction and propagated northward, mainly under the influence of anticyclone. The effect of mesoscale eddy on the propagation direction of internal solitary wave is investigated by remote sensing, and the results are in agreement with the field observation.

Key words: internal solitary wave; mesoscale eddy; remote sensing; northern South China Sea