南海内波研究前沿与热点

郑全安[1], 陈 亮[2,3,4], 熊学军[2,3,4*], 胡筱敏[2], 杨光兵[2,3,4]

（1. 马里兰大学 大气海洋科学系，美国马里兰州 学院市 20742；
2. 自然资源部 第一海洋研究所，山东 青岛 266061；
3. 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 266237；
4. 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：内波为发生在层结海洋内部的亚中尺度波动，是物理海洋学研究，特别是海洋混合及能量级串研究，不可或的缺环节。孤立内波的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，实现实时监测与预报海洋内波具有重大现实意义。南海是全球海洋中超强内波多发海区之一。长期现场观测表明，吕宋海峡以西海域内孤立波振幅高达 150～200 m，且终年发生。因此，南海是目前海洋内孤立波观测与研究热点海域。本文以 2015 年至 2021 年间发表的论文为依据，评述南海内波研究新进展，认为 7 a 来研究成果取得质的提升。第一，实现了由卫星为主要手段 2D 观测到以卫星与潜标同步 3D 观测为主要手段的提升。由此催生出振幅 240 m 超强内孤立波、中尺度涡对内波的调制作用、重现周期 23 h 内孤立波、浅海内孤立波裂变现象、深海盆内波及动能级串等创新成果。第二，研究区开始呈现向中部深海盆扩展趋势。迄今为止，南海内波观测与研究集中在吕宋海峡以西和北部陆架，现已出现向中部深海盆扩展趋势。第三，海洋探测高新技术应用于南海内波观测与研究，取得了突破性成果。由卫星高度计沿轨海面高度场二维平面波分解技术得出的南海 M_2 内潮辐射图，解决了多年争论不休的南海北部内波生成机制和生成源地问题。人工智能技术成功应用于建立南海邻近的边缘海内波传播预报模式。模式预报的一个潮周期之后内波波峰线位置与后续卫星图像上显示的位置之间的平均相关系数达 95%，平均距离均方根差为 3 km。快速深潜剖面浮标技术应用于南海北部深海盆，得出 0～3 500 m 全水深内波波段（周期为 0.1～1.8 d）波动引起的水温起伏幅度垂直分布。高分辨水下声成像技术，包括人工地震技术和回声探测仪，成功应用于南海北部陆架内波观测与研究。其中回声探测仪图像空间分辨率达 10 cm，清楚显示出内孤立波波包精细结构，可精确测得水平尺度仅为 2 m 的孤立波特征半宽度。可以预期，大量科学研究成果的积累，特别是采用人工智能技术建立内波传播预报模式的成功实例，必将为开发南海内波精准预报模式奠定基础。

关键词：内波；孤立波裂变；内潮辐射图；水下声成像；南海

中图分类号：P731.1 **文献标志码：**A **文章编号：**1671-6647（2022）04-0564-17

doi：10.12362/j.issn.1671-6647.20220513002

引用格式：郑全安, 陈亮, 熊学军, 等. 南海内波研究前沿与热点[J]. 海洋科学进展, 2022, 40(4)：564-580. ZHENG Q A, CHEN L, XIONG X J, et al. Research frontiers and highlights of internal waves in the South China Sea[J]. Advances in Marine Science, 2022, 40(4)：564-580.

本文主题关键词“内波”系指发生在层结海洋内部、以约化重力为恢复力的亚中尺度波动，其特征尺度为：波锋线水平尺度 O（10～200）km，波长尺度 O（0.5～5.0）km，时间尺度 O（3×10^2～8.64×10^4）s，速度尺度 O（0.5）m/s，以波长为水平长度尺度，20°N 为特征纬度时，罗斯贝数则为 2～10。内波广泛分布于全球海洋，尤以陆架浅海和边缘海最集中[1-2]。内波研究的意义概括为 3 方面：①物理海洋学研究。内波的时间

收稿日期：2022-05-13

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

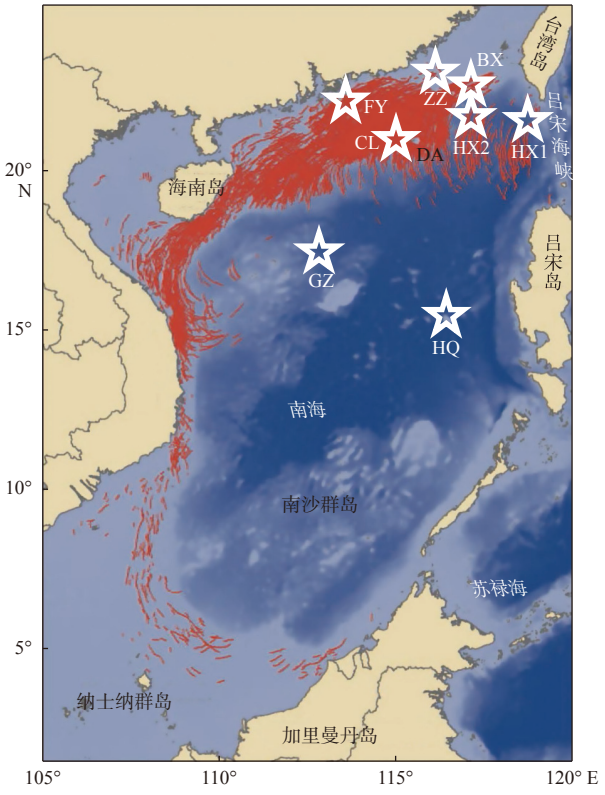
作者简介：郑全安（1943—），男，资深研究员，博士，主要从事卫星海洋学和物理海洋学方面研究. E-mail: qzheng2@umd.edu

*** 通信作者：**熊学军（1976—），男，研究员，博士，主要从事区域海洋动力学及调查技术方面研究. E-mail: xiongxj@fio.org.cn

（陈 靖 编辑）

尺度处于亚中尺度过程最底端，是海洋能量级串研究不可逾越的重要环节。内波引起的湍流混合研究，对更好地理解上层海洋动力学和海洋内部热结构具有重要意义。内波通过向下热量输送，对维持大尺度、深层环流发挥重要作用。内波高度非线性演化为非线性流体力学和孤立波理论提供独特应用领域。②跨学科研究。内波引起的海水垂直运动将富含溶解氧和二氧化碳的表层水输送到深水层，同时将富含营养盐的深层水输送到真光层，有助于提高海洋生物生产力和固碳作用。内波一方面引起海洋沉积物再悬浮，另一方面孤立内波具备物质水平输运功能，从而对陆架生态环境产生影响。由此可见，内波与海洋生物学、沉积学、生物地球化学以及生态环境研究等密切相关。③应用研究。内波的传播直接破坏海水物理场的连续性，扰乱水下声波传播，从而导致声呐信号紊乱、水下声导航运动物体偏航甚至失联等严重后果。特别是超强孤立内波, 在 10～20 min 很短时间内可将海水等密度面下压 100～200 m，其巨大能量和动量冲量对所有海洋工程设施和水下航行载体都是灾难性的存在[3]。因此，大力开展海洋内波研究、提供局地实时精准内波预报服务，是所有海洋产业开发、保障水下航行活动安全必须重视的课题。

南海是全球海洋中内波最活跃的海区之一。如图 1 所示，南海内波集中分布在北部大陆架和大陆坡（以下简称陆架）。究其原因可归结为：①陆架宽广、边缘海底地形陡变为内波生成与演化提供了有利条件；②季风气候条件下，海区层结得以季节性强化；③海区东部和东北部分别与吕宋海峡和台湾海峡相连，发源于两海峡的内潮波直接传入海区，在海底地形与海水层结分布作用下，演化成超强孤立内波波包，最近布放在吕宋海峡西口的锚系观测发现，孤立内波振幅高达 240 m，为世界之最[4]。



注：本图改自 Wang 等[15]。红色线条为由卫星图像提取的内波波锋线分布[15]；白色五角星为本文评述的新发现和新进展观测概位；DA 为东沙环礁概位。

图 1　南海略图、内波波锋线分布及本文评述相关的观测概位

Fig. 1　Outline chart of the South China Sea, internal wave crest line distribution and positions approximate of study areas

见之于报道的南海内波观测发端于卫星遥感图像。Fett 和 Rabe[5] 最早利用卫星可见光图像观测了内波在南海北部东沙环礁附近发生的反射现象。通过卫星图像，可以准确确定内波发生的位置和时刻，反演估算内波振幅、波速、波向、半波宽度以及流速等信息[6-7]，研究内波生成的动力学机制[8]。近年来，卫星图像被广泛用于研究南海内波时空分布统计特征和传播特征[9-14]。Wang 等[15] 从南海 2 500 张多源遥感卫星图像中提取了 3 500 个内波，系统分析了南海内波的分布和传播方向特征（图 1）。Zheng 等[8] 采用扰动 Korteweg–deVries（PKdV）方程分析 1995 年至 2001 年的合成孔径雷达（SAR）图像，证明趋浅温跃层为南海东北部内孤立波波包的产生和增强提供有利条件。

现场观测是研究海洋内波最直接和最有效的手段。南海内波现场观测直到 20 世纪 90 年代初才起步。Ebbesmeyer 等[16] 通过分析布放在广东陆丰近海的声学多普勒海流剖面仪（Acoustic Doppler Current Profile，ADCP）测得的现场数据和卫星图像，推断陆丰近海的内孤立波可能起源于吕宋海峡潮汐强迫。特别值得一提的是，2000 年至 2001 年期间实施的“亚洲海国际声学实验”（Asian Seas International Acoustic Experiment，ASIEX）项目，在南海北部内波研究上取得一系列的突破性成果。例如，Ramp 等[17] 发现了重现周期分别为

24 h 和 25 h 的 2 种内孤立波，并将其分别命名为 a 波和 b 波；Yang 等[18] 首次在南海北部发现了第二模态内波[17,19-20] 等。该项目推动南海成为内波研究热点海区，至今热度不减[21-29]。中国海洋大学 2010 年至 2014 年期间在吕宋海峡以西海域开展了“南海内波实验（SCS Internal Wave Experiment，SIWE）”，通过阵列锚系观测得到总计 4 771 个内波波包，建立了迄今为止南海内波最大实测数据库，并不断有分析成果问世[4]。自然资源部第一海洋研究所于 2016 年至 2017 年期间，在南海北部东沙环礁西侧陆坡海域开展锚系内波观测，填补了当地内波实测数据空缺，发现了重现周期为 23 h 的新型内波[30-31]。

近年来，数值模拟方法广泛应用于南海内波的生成、传播和演变过程研究[32]。Liu 等[33] 采用 KdV（Kortweg-deVries）方程数值模型，研究中国东海和南海的内孤立波在陆坡上的传播与演变过程，数值计算结果与卫星 SAR 图像数据一致。Cai 等[34] 利用改进 eKdV 方程，建立内孤立波规范化长波传播方程两层模式（Regularized Long Wave, RLW）模拟南海陆坡处的内孤立波，发现耗散作用和海底地形对传播过程有显著影响。Kadomtsev-Petviashvili（KP）方程也被用来研究南海东北部内孤立波的非线性相互作用[35-36]。

前人对南海内波研究进展多有评述[37]。本文旨在以 2015 年为时间节点，评述 2015 年以来南海内波研究发展前沿和研究热点，着重介绍现场锚系观测获得的新发现和高新技术应用成果，以期为读者洞察该研究领域发展状况打开一扇窗。

1 南海内波研究新发现

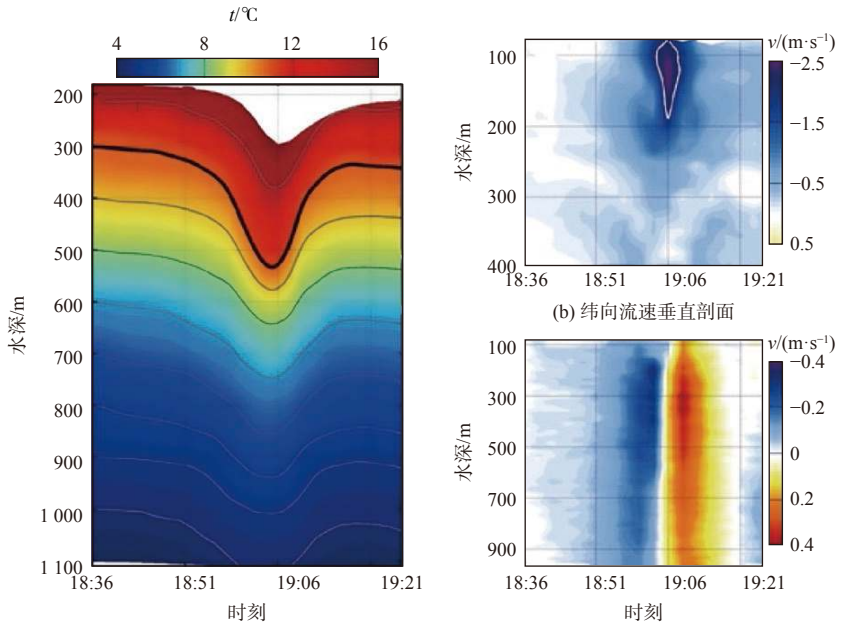
南海略图如图 1 所示。红色线条代表由多种卫星历史图像提取的内波波锋线分布[15]。由图 1 可见，南海内波集中分布在北部陆架、陆坡以及西部陆坡，南部和西南部陆坡有稀疏分布。由于卫星图像仅对海面信息敏感，而海洋深层扰动的海面信息可能较弱，不利于卫星成像，因此该图并不代表深水区不存在内波。图中白色五角星代表新发现和新进展观测概位，本文将以发表年限为序逐一概略评述。例如，五角星 HQ 代表将在 1.5 节评述的深海内波观测实例锚系站概位。

1.1 振幅 240 m 超强内孤立波

南海以超强内波闻名于世。以观测到的内孤立波最大振幅为指标，全球海洋可对标实例为：地中海西部直布罗陀海峡以东，测得内孤立波最大振幅为 50～100 m[38]；爪哇海东南部龙目海峡以北，由回声探测仪测得线性内波波峰至波谷振幅达 100 m[39]。在南海，Ramp 等[17] 在 2001 年 5 月 9 日 ASIEX 项目锚系观测期间，于东沙环礁东北陆坡（117°17′E，21°37′N）水深 350 m 处测得内孤立波最大振幅为 142 m。这曾引起广泛关注。Chang 等[40]2006 年 6 月利用锚系观测，在东沙环礁东北陆坡（117°20′45″E，21°04′48″N）水深 600 m 处测得内孤立波最大振幅为 130 m。Lien 等[41]2011 年 6 月 4 日利用锚系观测，在东沙环礁东北陆坡（117°13′12.6″E，21°04′14.4″N）水深 450 m 处测得内孤立波最大振幅为 173 m。

2010 年至 2014 年，中国海洋大学在吕宋海峡以西海域开展“南海内波实验”，建立了迄今为止南海内波最大实测数据库。其中包括 2013 年 12 月 4 日在吕宋海峡西侧 M10（图 1 中 HX1）潜标站（120°13′12″E，20°34′12″N）水深 3 847 m 处，测得内孤立波最大西向峰值流速 2.55 m/s、最大振幅 240 m，这是迄今为止见于报道的全球海洋观测到的内孤立波最大振幅值，如图 2 所示[42]。由垂直温度剖面可见，该孤立波为下压型（depression wave）。当 18:36 UTC 孤立波前沿到达测站前，12 ℃ 水温等温线位于 300 m 水深；而当 19:04 UTC 孤立波波峰通过测站时该等温线下压至 540 m，即在 28 min 时间内等温线下压了 240 m。该孤立波的扰动达水深 1 000 m 以下，在 900 m 水深处振幅仍达 110 m，200～1 000 m 水深的平均振幅高达 173 m，与此前 Lien 等[41] 在东沙环礁东北陆坡测得的内孤立波最大振幅持平。对布设在巴坦岛附近的潜标同步观测数据分析揭示，这一超强内孤立波的产生似与吕宋海峡超强半日内潮相联系。对数模产品分析表明，由黑潮增强

引起的吕宋海峡层结强化对超强内孤立波生成也有贡献[42]。这一新发现不仅对南海内波动力学和区域海洋学研究具有重要意义，而且对沿海水等密面航行的水下潜航器规避灭顶之灾独具特殊意义。



(a) 水温垂直剖面　(b) 纬向流速垂直剖面　(c) 垂向流速垂直剖面

注：本图来源于 Huang 等[42]。数据由中国海洋大学 2013 年 12 月 4 日于布放在南海吕宋海峡西侧的潜标站（120°13′12″E，20°34′12″N）测得，潜标站水深为 3 847 m。图 a 中由 12℃ 等温线下压深度测得内孤立波最大振幅为 240 m。图 b 纬向流速垂直剖面显示最大西向峰值流速为 2.55 m·s^{-1}。图 c 垂向流速垂直剖面中可见与孤立波前沿对应的水体下降运动和与后沿对应的上升运动，垂直流速达 $O(\pm 0.4)$ m·s^{-1}，属海洋超强垂向运动。

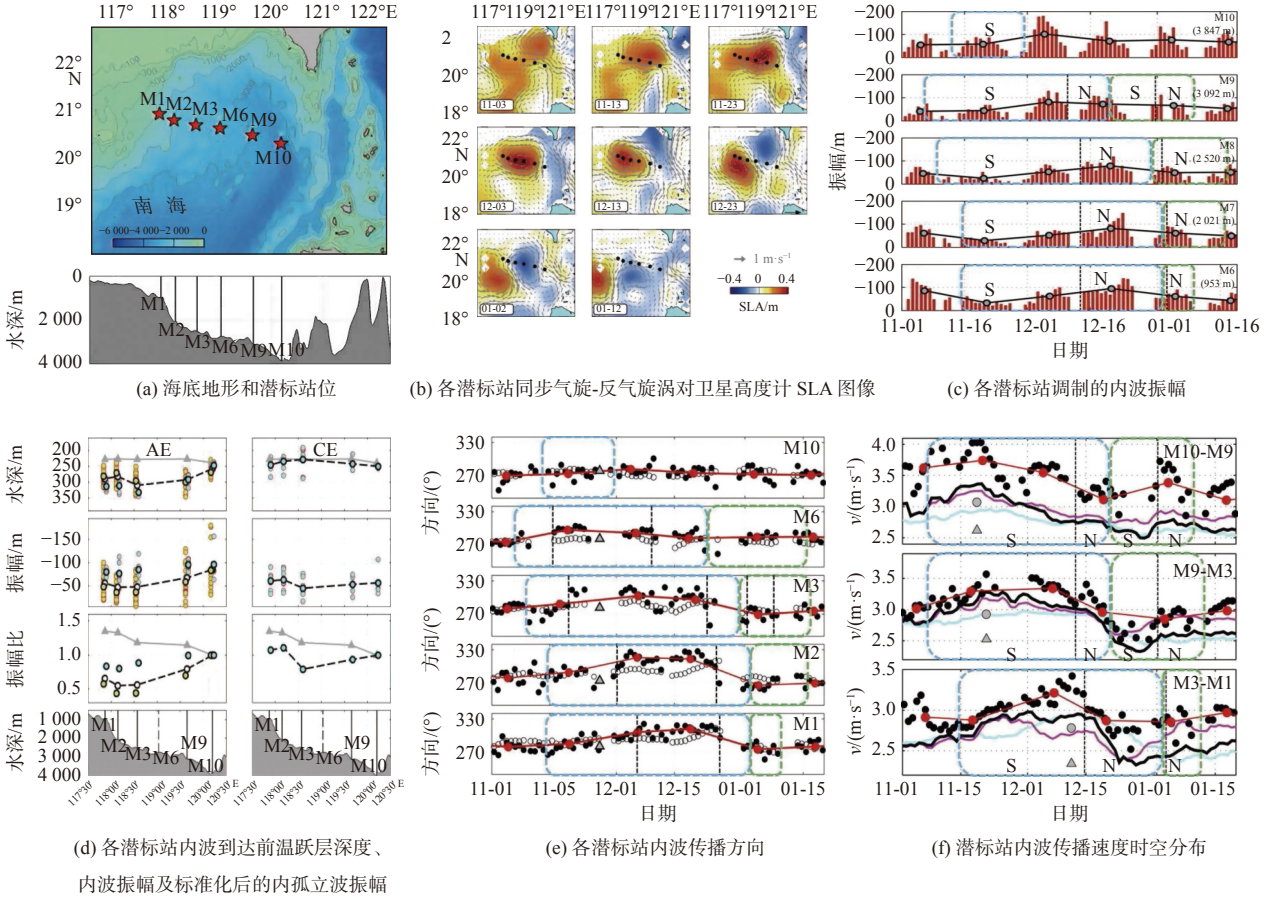
图 2　全球海洋最大振幅内孤立波水温和流速剖面分布

Fig. 2　The greatest amplitude internal solitary wave in the global ocean

1.2　中尺度涡对内波的调制

Huang 等[43] 利用 2013 年 11 月至 2014 年 1 月南海吕宋海峡以西（图 1 中 HX2）潜标阵列数据（图 3a）和同步卫星高度计海面高度异常（Sea Level Anomaly, SLA）图像（图 3b），分析气旋-反气旋涡对高频内波的调制作用，得出内波振幅、传播速度和传播方向的调制量。这是迄今为止有关南海中尺度涡与内波相互作用研究最完整、详尽的研究成果。

由图 3c 可见，深水区内波向下平均振幅可达 100 m（图 3 中用负值表示），浅水区为 20 m。振幅明显受涡旋调制。反气旋涡过境时，各潜标站位均显示内波平均振幅减小，减小幅度为 14%～67%；气旋涡过境时减小幅度为 14%～40%。图 3d 为在 2 种极性中尺度涡控制下温跃层和内波振幅一维断面分布。可见，反气旋涡过境时，温跃层平均深度由 230 m 下压至 300 m，并呈由深水至浅水加深的反常分布。内波振幅则跟随温跃层厚度变化。而气旋涡的影响不显著。图 3e 显示，传入反气旋涡核心区的内波波向由西向（270°）转向西北向（310°），最大北偏达 40°，而在气旋涡核心区内则南偏可达 20°。图 3f 示出中尺度涡对内波传播速度调制过程实测结果。总体规律是反气旋涡过境时，波速增大，深水区最大增幅可达 30% 以上，即由 3 m/s 增大至 4 m/s，浅水区增幅略小，约 10%～25%；而气旋涡过境时，深水区最大增幅约 10%，浅水区增幅不显著。上述依据潜标-卫星联合观测数据分析得出的研究成果，为认识南海深海盆内波动力学特征，特别是认识中尺度涡对内波的调制与能量级串过程，具有重要意义。



(a) 海底地形和潜标站位 (b) 各潜标站同步气旋-反气旋涡对卫星高度计 SLA 图像 (c) 各潜标站调制的内波振幅

(d) 各潜标站内波到达前温跃层深度、内波振幅及标准化后的内孤立波振幅 (e) 各潜标站内波传播方向 (f) 潜标站内波传播速度时空分布

注：本图来源于 Huang 等[43]。图 b 中黑点对应图 a 中潜标站位；图 c 中黑线为各大潮期间内波平均振幅（灰色圆点）的连线，N 和 S 分别代表当时潜标站位位于中尺度涡的北部和南部，3 874 m 等数值为站位水深，蓝虚线框和绿色虚线框分别代表反气旋和气旋中尺度涡经过站位的时段；图 d 黄色和蓝绿色填充的红色线圈分别代表潜标站位于中尺度涡南部和北部的情况，黄色、蓝绿色及白色填充的黑色线圈分别代表潜标站位于中尺度涡南部和北部以及整个过程中的平均值，左侧为反气旋中尺度涡期间、右侧为气旋中尺度涡期间；图 e 中黑色圆点、红色圆点和灰色三角形分别代表整个观测期间、各大潮期间及不存在中尺度涡时内孤立波的平均传播角度，白色圆点代表采用射线追踪法计算得到的内孤立波传播方向，方向是以正北为 0°顺时针旋转的度数。图 f 中黑色和红色圆点代表观测到的内孤立波传播速度和个大潮期间的平均传播速度，灰色圆点代表没有中尺度涡时内波的平均振幅，黑色曲线代表考虑层结和背景流场变化基于 Taylor-Goldstein 方程计算得到的内波波速变化，青色和品红色曲线分别代表仅考虑层结或背景流场中一个条件时基于 Taylor-Goldstein 方程计算得到的波速变化，灰色三角形代表在没有中尺度涡情况下基于 Taylor-Goldstein 方程采用平均浮力频率计算得到的波速值。

图 3 南海吕宋海峡以西 2013 年 11 月至 2014 年 1 月观测得出的气旋-反气旋涡对对高频内波的调制作用

Fig. 3 Modulation of cyclonic-anticyclonic eddy pair to high frequency internal waves observed in west of the Luzon Strait of the South China Sea from November 2013 to January 2014

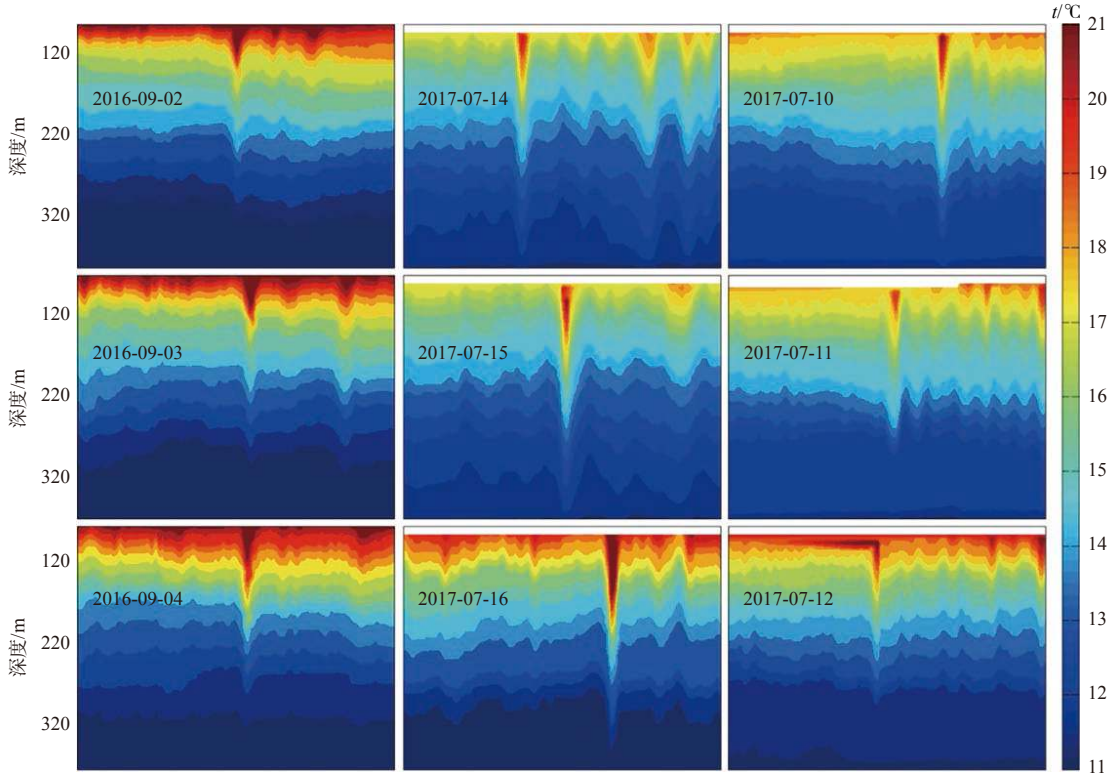
1.3 重现周期 23 h 内孤立波

自然资源部第一海洋研究所 2016 年至 2017 年在南海北部东沙环礁西侧陆坡海域（115°30′00″E，20°31′12″N）（图 1 中 CL 站，水深约 397 m）开展锚系内波观测，建立了局地内波实测数据库。通过数据分析，获得对局地内波动力特征重要新认识，其中最突出的是发现了重现周期为 23 h 的新型内孤立波[30-31]。

Ramp 等[17]根据南海北部陆坡海域内孤立波重现周期，将其分成 a 波和 b 波两种类型。a 波以每天同一时刻出现在观测站位，即重现周期为 24 h 为特征；而 b 波每天推迟 1 h 出现在观测站位，即重现周期为 25 h。Ramp 等[25]确定 2 种内波在深水区和陆坡海域的统计传播速度分别为（3.23±0.31）m/s 和（2.22±0.18）m/s。Huang 等[44]将在吕宋海峡西侧海域观测到的 137 个内孤立波分成了 81 个 a 波和 56 个 b 波，并发现在大多数

情况下，a 波产生的内波水平流速要比 b 波的大。

Chen 等[30] 通过分析温盐链逐日观测到的水温剖面图，分析内孤立波重复出现规律。如图 4a 和图 4b 所示，2016 年 9 月 2 日至 4 日，每天当地时间上午 8:00 均出现了一个内孤立波，即重现周期约为 24 h，此系 a 波内孤立波。2017 年 7 月 14 日至 16 日，逐日推迟约 1 h 出现一个内孤立波，即重现周期约为 25 h，此系 b 波内孤立波。除这 2 种内孤立波外，图 4c 则示出一种新型内孤立波。从 2017 年 7 月 10 日至 12 日，逐日提前 1 h 左右出现一个内孤立波，即重现周期约为 23 h。这种新发现的重现周期约为 23 h 的内孤立波定义为 c 波（Type-c ISW）。



(a) a 波信号 (2016 年 9 月 2 日至 4 日)　(b) b 波信号 (2017 年 7 月 14 日至 16 日)　(c) 新发现的重现周期为 23 h c 波信号 (2017 年 7 月 10 日至 12 日)

注：本图来源于 Chen 等[30]。

图 4　南海北部东沙环礁西侧陆坡海域潜标温度链观测到的 3 种重现周期内孤立波温度剖面分布

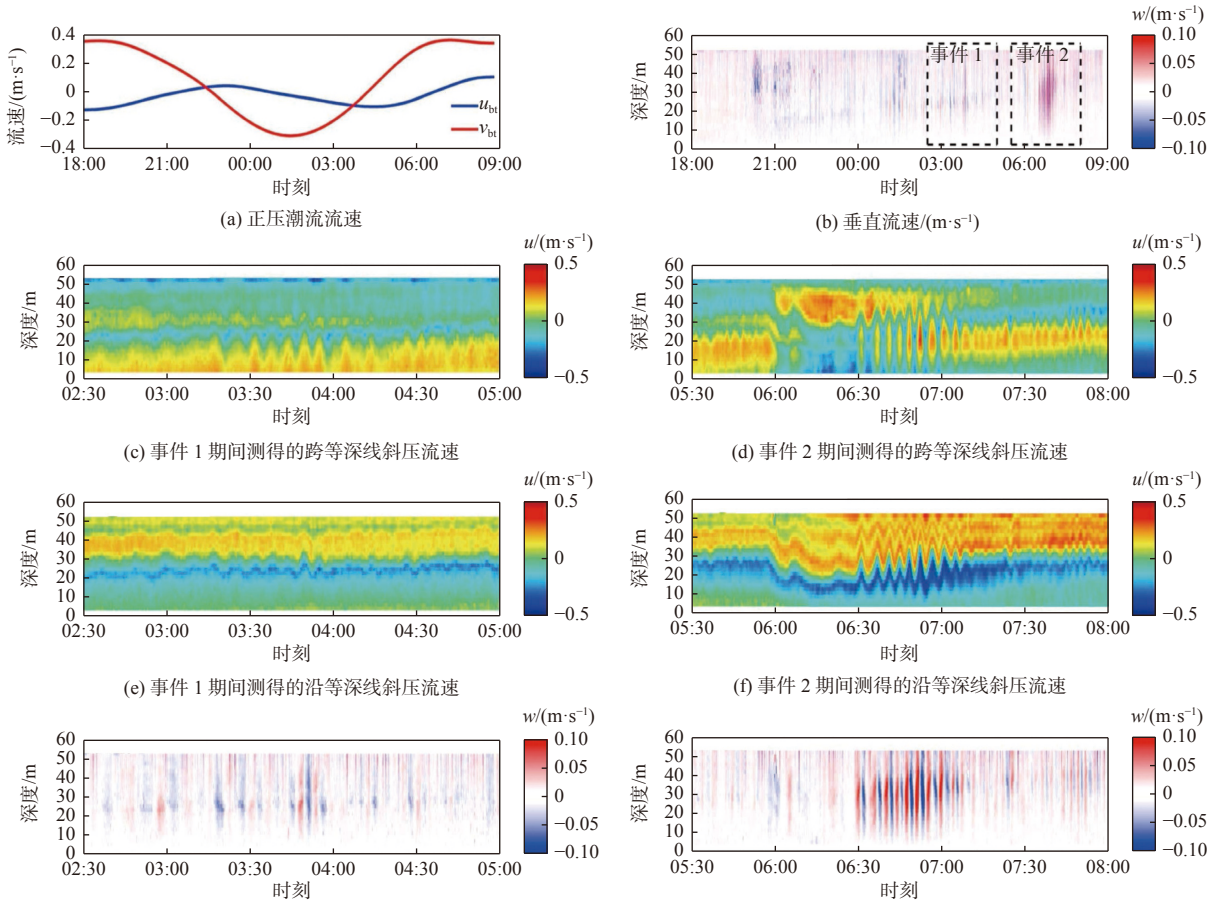
Fig. 4　Water temperature profiles of internal solitary waves with three types of re-appearance periods observed by mooring thermal chain deployed on continental slope west of Dongsha Atoll in the northern South China Sea

观测期间共发现了 8 组 c 波，共包括 30 个内孤立波。平均重现周期为（23.04 ± 0.29）h，即每天提前约 1 h 出现在观测站位。平均振幅为（45 ± 17）m，最大振幅为 91 m，其平均振幅与 a 波（平均重现周期为（24.20 ± 0.14）h）的平均振幅（44 ± 8）m 接近，但比 b 波（平均重现周期为（25.08 ± 0.49）h）的平均振幅（54 ± 19）m 小。这些内孤立波均可以单波或波包形式出现。关于 a 波和 b 波的生成机制，Zhao 和 Alford[45] 以及 Ramp 等[17] 提出，吕宋海峡潮汐强迫变化是主要因素，即 a 波产生于潮汐日不等现象较强时，而 b 波则产生于较弱时。对 c 波的生成机制迄今无定论。

1.4　内孤立波裂变现象

Bai 等[46]2011 年 7 月在南海东北部台湾海峡南口陆架海域开展了水文 CTD 断面和潜标 ADCP 观测，潜

标站位为(118°10′12″E，22°22′51.6″N)(图 1 中 BX，水深 60 m)。其中 7 月 13 日至 14 日的测量数据(图 5)显示，在 15 h 测量期间高频内波连续出现，与通常的潮汐激发机制不一致。为解释这一现象，作者提出连续出现的高频内波是由内孤立波在变浅海底地形扰动下发生裂变(fission)而生成的假说。理论分析和数值模拟结果均证明该假说是合理的。该项研究的意义在于，以现场实测实例证明，内波的孤立波动力学性质，对认识内波波包的形成与演化、内波不均匀地理分布以及内波在海洋混合与能量级串中的作用至关重要。



(a) 正压潮流流速 (b) 垂直流速/(m·s⁻¹)

(c) 事件 1 期间测得的跨等深线斜压流速 (d) 事件 2 期间测得的跨等深线斜压流速

(e) 事件 1 期间测得的沿等深线斜压流速 (f) 事件 2 期间测得的沿等深线斜压流速

(g) 事件 1 期间测得的垂直流速 (h) 事件 2 期间测得的垂直流速

注：本图来源于 Bai 等[46]。图 b 中虚线框示出 2 次高频内波连续出现事件。

图 5 2011 年 7 月 13 至 14 日南海东北部台湾海峡南口陆架海域高频内波潜标观测结果

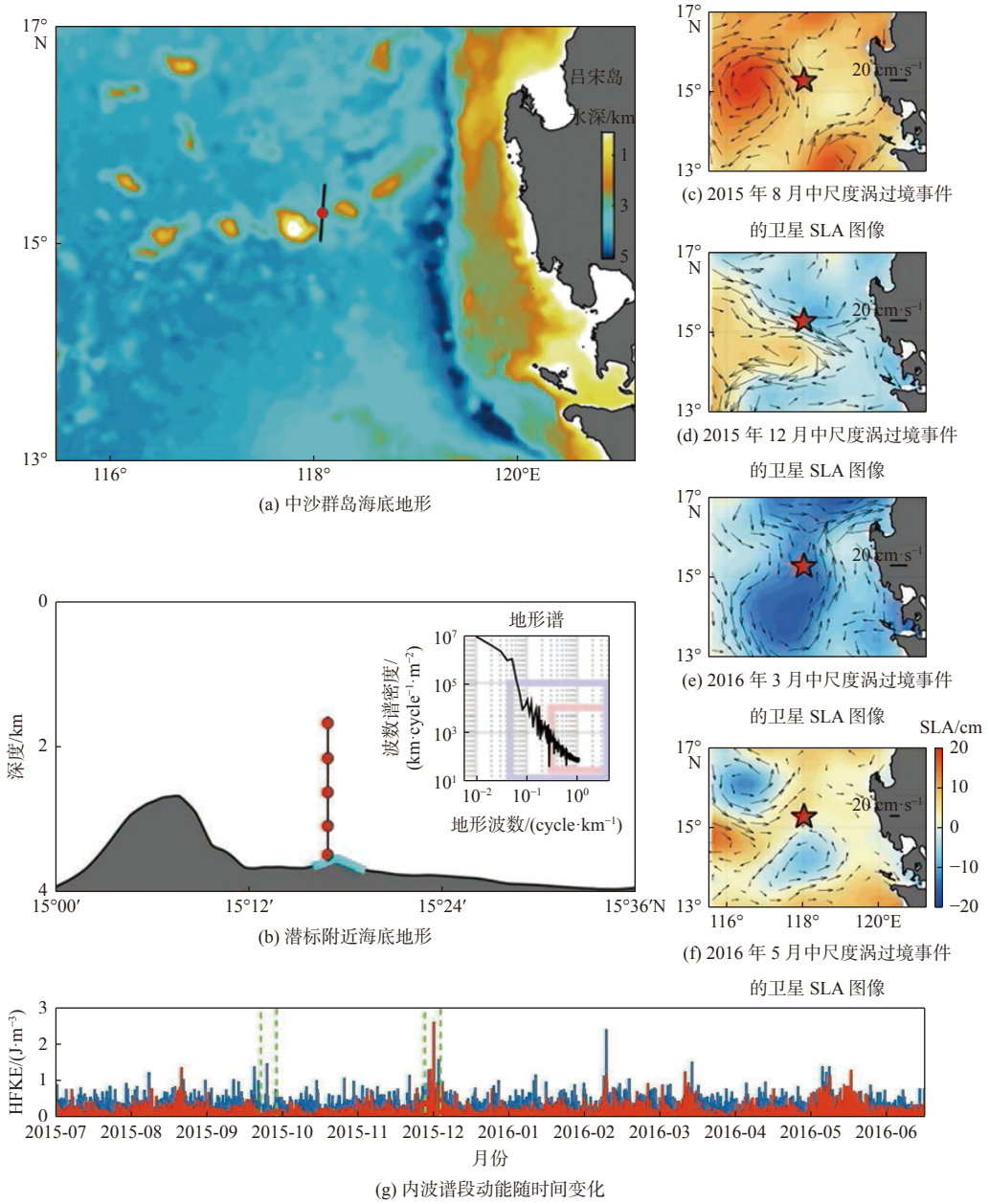
Fig. 5 Mooring-observed high frequency internal waves on the continental shelf of southern outlet of Taiwan Strait in the northeastern South China Sea on 13-14 July 2011

1.5 深海盆内波及动能级串

迄今为止，南海内波的研究区域集中在吕宋海峡以西和南海北部陆架和陆坡海域。南海中部深海盆和南部陆架海域内波研究几乎为空白。Hu 等[47]2015 年至 2016 年在南海海盆中部中沙群岛海域(118°01′E, 15°16′N)(图 1 中 HQ，水深 3 790 m)布设潜标观测底层环流变化以及动能级串，其中包括对时长 1 a 的内波信息提取及分析。这是南海内波研究的标志性进展。

Hu 等[47] 的观测方案设计和部分成果如图 6 所示。其中高频内波谱段(High Frequency Internal Wave, HFIW)(＞1.3f)动能随时间变化如图 6h 所示。由图 6h 中曲线可见，高频内波动能(High Frequency internal wave Kinetic Energy, HFKE)对中尺度涡过境响应十分强烈。以图中红线所示的 3 790 m 测量结果为例，2015 年 11 月 28 日至 12 月 3 日反气旋涡过境期间(图 6d)，HFKE 最大值异常高达 2.56 J/m^3，约是正常平均值(0.07 J/m^3)

的 37 倍。观测结果显示，HFKE 陡增脉冲与近惯性动能（Near Inertial Kinetic Energy, NIKE）陡增脉冲同步发生。这说明二者都是中尺度涡与海底地形碰撞后，能量向亚中尺度运动级串而发生。



注：本图来源于 Hu 等[47]。图 a 中红点为潜标站位，黑线代表底层流方向。

图 6　南海深海盆底层环流观测方案和部分成果

Fig. 6　Observation design and part of results of bottom layer circulation in the South China Sea deep basin

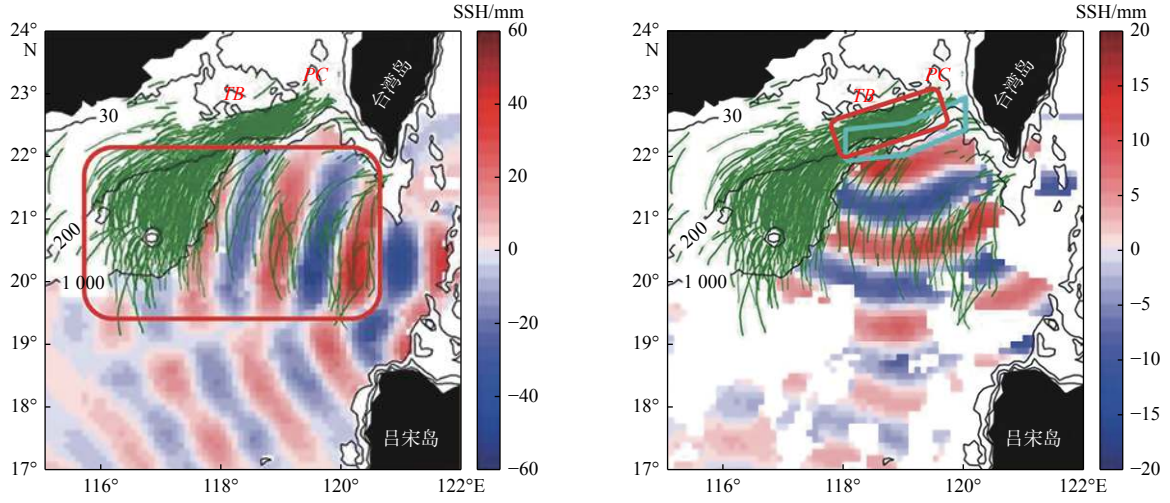
2　南海内波研究高新技术应用

2.1　卫星海面高度平面波分解技术

卫星高度计沿轨海面高度场（Sea Surface Height, SSH）二维（2D）平面波分解技术是 2010 年以来开发的卫

星高度计海面高度数据信息提取新技术。Zhao[22] 利用该技术成功提取了吕宋海峡 2D 内潮辐射图，直观显示出内波与内潮辐射的依存关系，成为南海北部内波动力机制和起源研究节点性成果。

Zhao[48] 利用该技术提取了台湾海峡（图 1 中 ZZ）南向内潮 2D 辐射图，填补了信息空白。图 7 示出源自吕宋海峡和台湾海峡的内潮主分量 M_2 内潮 2D 辐射场与内波波锋线分布复合图[48]。图 7 中红蓝相间粗条带代表以 SSH 为特征量的 M_2 内潮波峰-波谷水平分布，绿细线代表由卫星图像提取的内波波锋线水平分布。从图 7 可直接提取 2 项重要动力学信息：①关于内潮。南海 M_2 内潮场由源自吕宋海峡和台湾海峡 2 束独立近线性 2D 平面波辐射共同组成。两辐射共同特征为波长相同，均约 140 km，以及辐射强度（SSH）随辐射距离平方衰减。差异是吕宋海峡波束强度是台湾海峡的 3 倍（60∶20）；吕宋海峡波束仅有单向西传波束；而台湾海峡波束具有南、北双向传播波束，其中南传波束强，北传波束弱，图 7 中未显示，但现场观测确认其存在[49]。②关于内波。按水平 2D 分布特征看，南海北部内波可以划分为南（图 7a 中大红框）、北（图 7b 中小红框）两部分。南部内波依存于吕宋海峡 M_2 内潮波束[22]，总体来看向西传播，数量约为海区总量的 80%。其中以 1 000 m 等深线为界，以东深水区为单体强孤立波分布区，以西则为在陆坡地形扰动下强孤立波分裂生成的波包密集分布区。北部内波依存于台湾海峡 M_2 内潮北向波束，总体向北传播，数量约为海区总量的 20%。由于海底地形陡然变浅，内潮波迅速裂变耗散，形成细碎内波密集分布。南向内潮波束沿水深变深（相应温跃层也变深）方向传播，不存在内潮波非线性裂变、演化成内孤立波的动力条件[8]。因而，除图 7b 中小红框示出的台湾海峡南口海域之外，台湾海峡 M_2 内潮南向波束对南海内波的生成与演化几无影响。上述成果表明，卫星海面高度平面波分解技术应用推动了南海内潮和内波研究产生突破进展。对长期争论不休的南海内波产生机制和原生地问题给出了确切答案。同时为研究更细节动力学问题以及开发局地内波预报模式奠定了基础。



(a) 吕宋海峡　　(b) 台湾海峡

注：本图来源于 Zhao[48]。*TB*、*PC* 分别代表台湾浅滩和澎湖水道；红框区域指示南海北部内波划分的 2 个部分；图 b 中浅蓝色框为内潮发源地；等深线单位为 m。

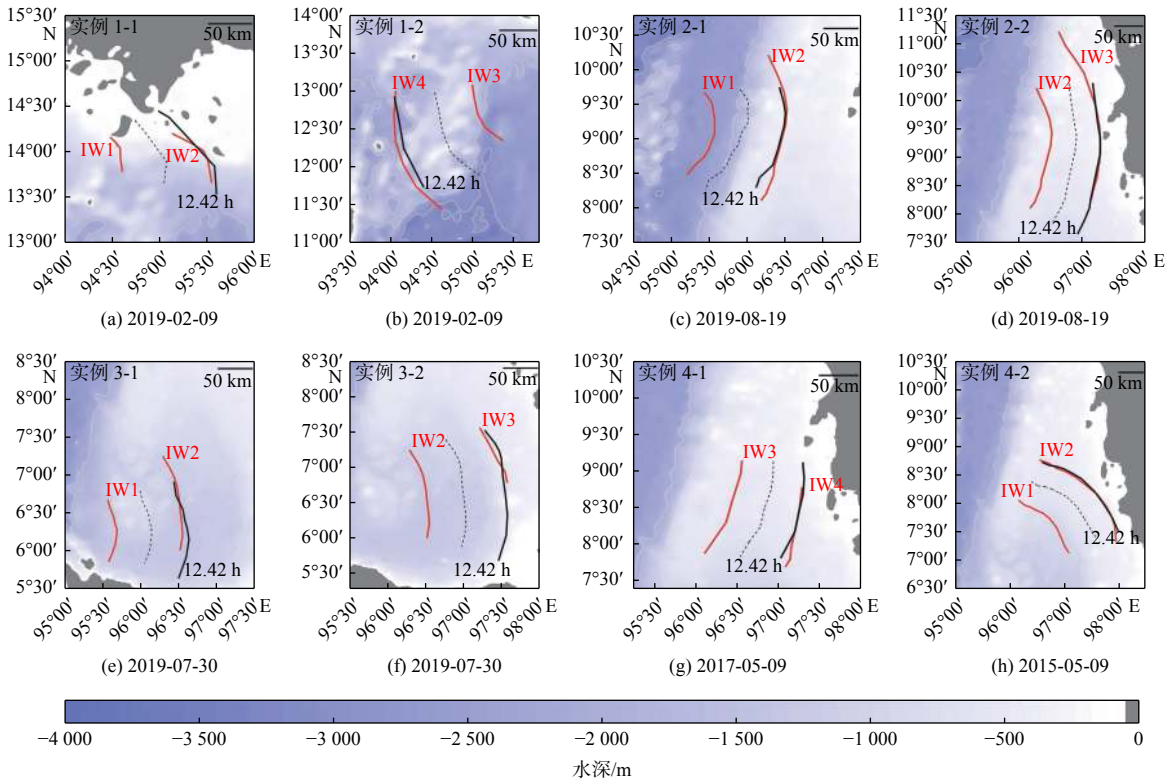
图 7　南海北部由卫星高度计沿轨海面高度场 2D 平面波分解技术得出的 M_2 内潮 2D 辐射场（红蓝条带）与卫星观测内波波锋线（绿细线）分布复合图

Fig. 7　Composite images of satellite observed internal wave crest lines (green lines) and 2D M_2 internal tide radiation beams (red and blue bands) in the northern South China Sea derived from satellite altimeter along track sea level fields by 2D plane wave decomposition techniques

2.2　人工智能技术

巨量的海洋内波卫星图像积累和分辨率越来越高的海洋动力环境数据产品全球共享，为开发人工智能（AI）技术对重要海区内波开展分析和建立预报模式提供了基础资源。AI 技术已经成功应用于南海周边边缘海内波研究中，例如苏禄海（Sulu Sea）、苏拉威西海（Celebes Sea）[50] 以及安达曼海（Andaman Sea）[51]。尚未见到南海内波 AI 应用成果问世。本节评述 Zhang 等[51] 应用 AI 技术建立安达曼海内波预报模式成果，以资借鉴。

安达曼海系东北印度洋边缘海，周边与海底地形复杂，在强潮汐作用下，成为内波多发海域。卫星图像显示，该海域内波场呈多源激发、多向传播（甚至背向传播）以及多波交叉等特点，信息丰富。为预报安达曼海内波传播，Zhang 等[51] 基于后向传播神经网络（back-propagation neural network）发展了一种机器学习模式。利用从安达曼海 2015 年至 2019 年间 123 幅中分辨率成像光谱辐射计（Moderate Resolution Imaging Spectroradiometers，MODIS）和 33 幅海洋陆地水色仪卫星图像中提取的 1 189 个内波样本（包括波峰线长度和峰-峰距离）以及与之对应的海洋环境参数作为模式训练样本，在此基础上建立内波传播预报模式。预报操作时，以卫星图象实时观测到的内波波包先导波波锋线位置为输入信息，再输入预报时刻，模式自动输出预报时刻的内波将出现的位置。对多次预报结果统计分析表明，模式预报的一个潮周期之后内波波峰线位置与后续卫星图像上显示的位置之间的平均相关系数达 95%，平均距离均方根差为 3.21 km。这些结果远远优于 KdV 方程能够达到的预报水平。图 8 示出 8 次预报实例。



注：本图来源于 Zhang 等[51]。红线为从 MODIS 图像提取的内波先导波波锋线，黑虚线和黑实线分别为模式预报的 6.71 h 和 12.42 h（半日潮周期）之后的波锋线位置。

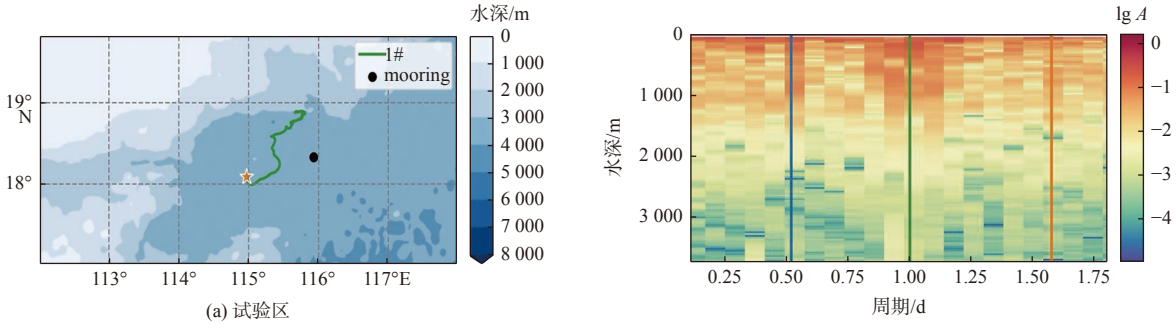
图 8　安达曼海内波传播人工智能预报模式应用实例

Fig. 8　Cases of AI prediction model application to internal wave propagation in the Andaman Sea

2.3 快速深潜剖面浮标技术

水下潜航剖面浮标测量技术是自 21 世纪发展起来的海洋观测高新技术。该项技术已广泛应用于全球大洋，推动大洋环流研究不断取得突破性进展[52]。但是，现有的水下潜航剖面浮标产品，例如 Argo 浮标，技术指标有两点关键局限性。一是水深测量范围为海面至 2 000 m，即该项技术不能用于测量深海环流。而深海环流研究对认识全球气候变化机制等重大科学问题至关重要，必将成为全球海洋界研究重点。二是重复测量周期为 10 d。这使得该项技术对观测海洋环流高频分量，例如近惯性振荡、内潮和内波等亚中尺度过程，效果不彰。而亚中尺度过程是陆架浅海和边缘海研究重要课题。正是科学研究的迫切需要，催生快速深潜剖面浮标（Rapid-Sampling Deep Profiling Floats，RDPF）技术发展。

中国海洋大学等单位已于 2019 年成功设计制造了 10 台 RDPF 样机，最大工作水深为 4 000 m，重复测量周期为 1 d。样机已在南海、菲律宾海、马里亚纳海沟和黑潮延伸区进行了投放试验，RDPF 样机工作正常，取得首批科学数据[53]。南海 RDPF 样机试验投放位置为（114°58′48″E, 18°06′00″N），居南海深海盆北部（图 1 中 GZ），浮标潜航范围为（114°58′12″～115°36″E, 17°59′24″～18°54′00″N），水深 3 500～4 000 m（图 9a）。投放时间为 2019 年 5 月 11 日，结束时间为同年 8 月 11 日，共计完成 122 测量循环周期。对测温数据的分析结果表明，测温传感器灵敏度和精确度高，系统稳定性好。由南海快速深潜剖面浮标投放试验数据计算得出的 0.1～1.8 d 内波波段波动引起的水温起伏幅度垂直分布如图 9b 所示。可见，该谱段对水温的扰动总趋势为随水深增加而减弱，1 500 m 以上较强，3 000 m 以下微小，唯全日潮扰动直达海底。



(a) 试验区

(b) 试验中浮标测得的 0.1~1.8 d 波段波动引起的水温起伏幅度 (对数尺度)

注：本图来源于 Gao 等[53]。图 a 中绿线为浮标潜航路径。图 b 中 A 表示水温起伏幅度 (℃)；蓝、绿和橙色竖线分别为半日潮、全日潮和近惯性振荡位置。

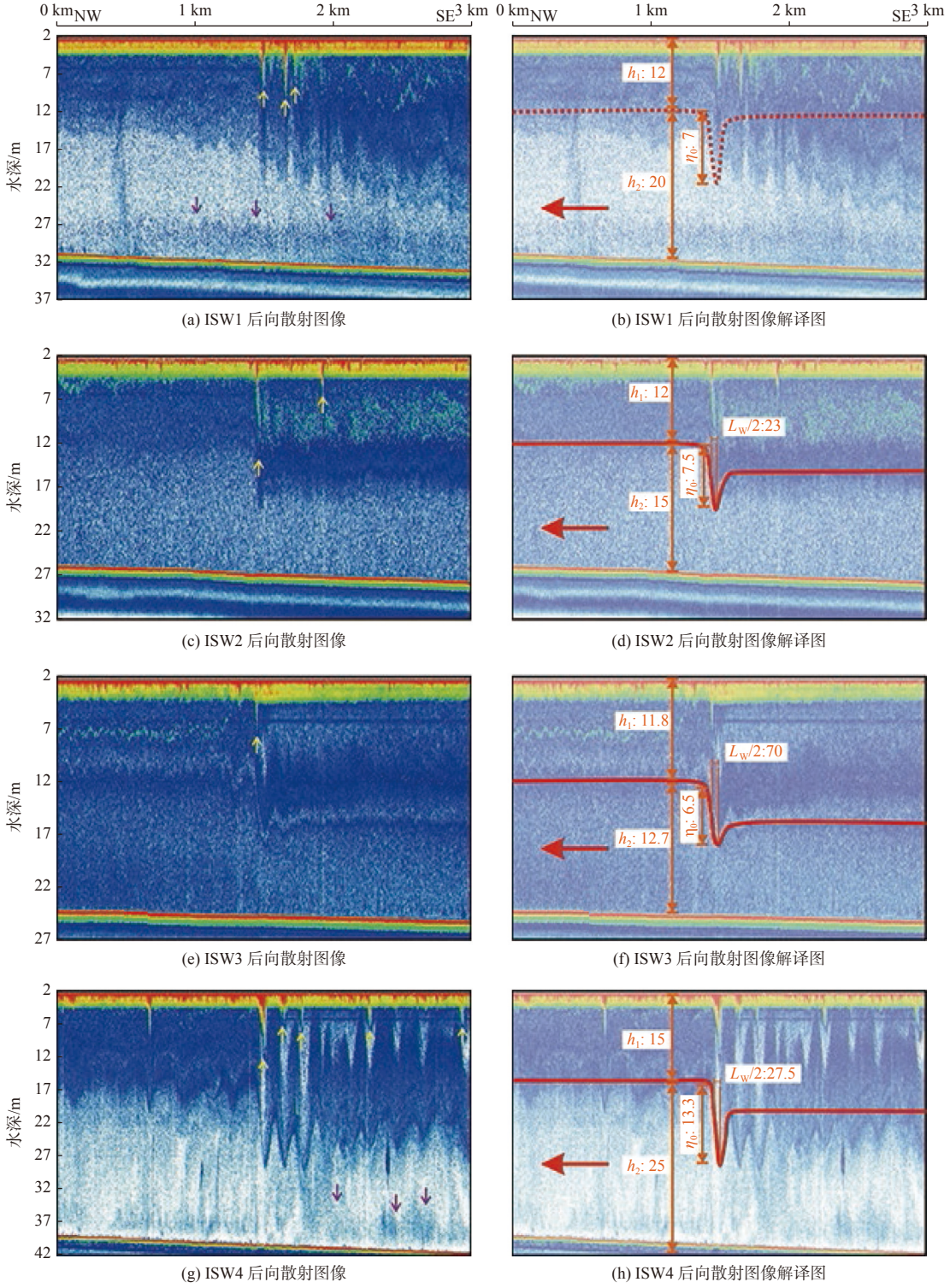
图 9 南海快速深潜剖面浮标投放试验

Fig. 9 Deployment test of rapid-sampling deep profiling float in the South China Sea

2.4 高分辨水下声成像技术

声波在水中传播具有很强的穿透能力，用于水下探测和信息传递历史久远，为海洋资源开发和航行特别是水下航行安全保障发挥了独特作用。声波传播对水体物理性质变化反应敏感，例如温度、盐度、密度、悬浮物、叶绿素、溶解氧和光照等的空间分布变化会引起声波散射。因此，从水下声波仪器接收到的声回波信号中，可以提取多种海洋信息[54-56]。为探测海洋内部精细结构而开发的高分辨水下声成像技术，适用于海洋内波探测[19,57-58]。海洋多通道地震波成像技术（marine multichannel seismic imaging technique）是高分辨水下声成像新技术，像元空间分辨率达 O（10）m，已引入南海北部陆架内波研究[59-61]。

Feng 等[62] 于 2020 年 7 月将 100 kHz 回声探测仪（Innomar SES2000 Light parametric sub-bottom profiler），用于探测南海北部陆架靠近珠江口（图 1 中 FY）的浅水（20～50 m）内波。该仪器的图像空间分辨率达 10 cm，比上述地震波成像技术高 2 个量级。图 10 中左列图 10a、图 10c、图 10e 和图 10g 示出该仪器测得的声波后



(a) ISW1 后向散射图像　(b) ISW1 后向散射图像解译图

(c) ISW2 后向散射图像　(d) ISW2 后向散射图像解译图

(e) ISW3 后向散射图像　(f) ISW3 后向散射图像解译图

(g) ISW4 后向散射图像　(h) ISW4 后向散射图像解译图

注：本图来源于 Feng 等[62]。左列图中显示内孤立波波包，黄、紫箭头分别指示气泡云和沉积物再悬浮影像。右列图中红箭头代表内波传播方向[62]。

图 10　高频回声探测仪测得的南海北部陆架浅水声波后向散射图像和对应的解译图

Fig. 10　Acoustic backscattering images of continental shelf shallow waters in the northern South China Sea taken by Innomar SES2000 Light parametric sub-bottom profiler, including internal solitary wave packets

向散射图像，右列图 10b、图 10d、图 10f 和图 10h 为解译图。图像清楚显示了 4 个内孤立波波包 ISW1-ISW4 的精细结构，从中可确定孤立波极性，测定波包内孤立波个数、间距和扰动深度等。特别是相当精确地测得了孤立波特征半宽度。例如，从图 10e 中测得 ISW3 的特征半宽度为 2 m。同时，图像还显示内波与环境相互作用信息，例如泡沫云形成与海底沉积物再悬浮等。这些信息是测温链、CTD 和 ADCP 等传统内波测量技术难以达到的。图 10b～图 10h 解译图中给出了海水上下 2 层厚度、内波传播方向（向北或向岸）和利用 KdV 方程孤立波解拟合得出的内孤立波振幅（6.5～13.3 m）。这些结果表明，高分辨率回声探测仪是海洋内波探测技术中可探测参数最多、精度最高的一种高新技术，值得重视。

3 结 语

本文以 2015 年至 2021 年间在国际知名学术期刊上发表的论文为依据，评述南海内波研究取得的新进展。对具有代表性的亮点成果稍作展开，以期为有兴趣做进一步了解的读者打开一扇窗。从评述的研究前沿和热点来看，本文认为过去 7 a 南海内波研究成果取得质的提升，表现在如下方面：

1）从水平 2D 观测研究发展为 3D 立体观测研究

南海内波观测与研究，多年来主要依靠海面水平 2D 卫星图像为信息来源，分析内波时空分布统计特征、波包结构和传播特征，通过线性波动理论和 KdV 方程孤立波解提取部分动力参数。而从本文评述的 2015 年至 2021 年之间取得的 5 项代表性新成果可以看出，百分之百亮点成果都是采用潜标或潜标阵列与卫星构成的 3D 立体观测体系取得的。实现了由卫星观测为主要手段到以潜标现场观测为主要手段的质的提升，在此前提下催生出振幅 240 m 超强内孤立波（1.1 节）、中尺度涡对内波的调制作用（1.2 节）、重现周期 23 h 内孤立波（1.3 节）、内孤立波裂变现象（1.4 节）以及深海盆内波及动能级串（1.5 节）等创新成果。

2）研究区开始呈现向南海中部深海盆扩展趋势

南海内波观测与研究的海区分布此前主要集中在吕宋海峡以西和北部陆架，近年来出现向中部深海盆扩展趋势。例如，2015 年至 2016 年间的南海深海盆底层环流观测（1.5 节）和 2019 年的快速深潜剖面浮标技术试验（2.3 节）都是在中部深海盆进行的，取得填补空白的成果。南海作为一个整体，南部深海盆、西部和南部陆架内波观测与研究尚待发展。

3）高新技术应用助推科学研究突破

海洋探测高新技术应用于南海内波观测与研究，取得突破性成果。如本文第 2 节所评述，由卫星高度计沿轨海面高度场 2D 平面波分解技术得出的南海 M_2 内潮辐射图，解决了多年争论不休的南海北部内波生成机制和生成源地问题。人工智能技术成功应用于建立南海邻近的边缘海内波传播预报模式。模式预报的 1 个潮周期之后内波波峰线位置与后续卫星图像上显示的位置之间的平均相关系数达 95%，平均距离均方根差为 3 km。快速深潜剖面浮标技术应用南海北部深海盆，得出 0～3 500 m 全水深内波波段（0.1～1.8 d）波动引起的水温起伏幅度垂直分布。高分辨水下声成像技术，包括人工地震技术和回声探测仪，已成功应用于南海北部陆架内波观测与研究。其中回声探测仪图像空间分辨率达 10 cm，清楚显示内孤立波波包精细结构，特别是精确测得水平尺度仅为 2 m 的孤立波特征半宽度。这是此前内波测量技术难以达到的精度。

如前所述，内波研究的科学意义在于，内波的时间尺度处于亚中尺度过程最底端，是海洋能量级串研究不可逾越的重要环节。特别是内波引起的湍流混合对上层海洋动力学和海洋内部热结构研究以及跨学科研究具有重要意义。但是，从能量谱角度来看，内波并不是对局地海洋环流具有重大影响的能量分量。而内波研究的重要性在于应用或工程领域。因为其巨大能量（恰当地说应为功率）和动量冲量对所有海洋工程设施和水下航行载体都是灾难性的存在。因此，在积累大量科学研究成果基础上，开发局地实时精准内波预报服务，是所有海洋产业开发、保障水下航行活动安全必须重视的课题。本文评述的采用人工智能技术建立内波传播预报模式的成功实例，可供建立南海内波实时精准预报模式所借鉴。

参考文献 (References):

[1] ZHENG Q A. Satellite SAR Detection of Sub-mesoscale Ocean Dynamic Processes[M]. London: World Scientific, 2017: 121-178.

[2] ZHENG Q A, XIE L L, XIONG X J, et al. Progress in research of submesoscale processes in the South China Sea[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2020, 39(1): 1-13.

[3] 郑全安. 卫星合成孔径雷达探测亚中尺度海洋动力过程[M]. 谢玲玲, 叶小敏, 译. 北京: 海洋出版社, 2018: 132-133. ZHENG Q A. Satellite SAR detection of sub-mesoscale ocean dynamic processes[M]. XIE L L, YE X M, trans. Beijing: China Ocean Press, 2018: 132-133.

[4] HUANG X D, HUANG S W, ZHAO W, et al. Temporal variability of internal solitary waves in the northern South China Sea revealed by long-term mooring observations[J]. Progress In Oceanography, 2021, 201(7550): 102716.

[5] FETT R, RABE K. Satellite observation of internal wave refraction in the South China Sea[J]. Geophysical Research Letters, 1977, 4(5): 189-191.

[6] HONG D B, YANG C S, OUCHI K. Estimation of internal wave velocity in the shallow South China Sea using single and multiple satellite images[J]. Remote Sensing Letters, 2015, 6(6): 448-457.

[7] 杨劲松, 许明光. 合成孔径雷达图像内波参数提取方法研究[J]. 遥感技术与应用, 2000, 15(1): 6-9. YANG J S, XU M G. A mehtod study for retrieval of internal wave parameters from synthetic aperture radar[J]. Remote Sensing Technology and Applications, 2000, 15(1): 6-9.

[8] 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, 2007, 112(C3): C03021.

[9] HSU M K, LIU A K. Nonlinear internal waves in the South China Sea[J] Canadian Journal of Remote Sensing, 2000, 26(2): 22-26.

[10] ALPERS W, HE X M, ZENG K, et al. The distribution of internal waves in the China Seas studied by multi-sensor satellite images[C]//Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2006.

[11] JACKSON C. Internal wave detection using the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS)[J]. Journal of Geophysical Research, 2007, 112(C11): C11012.

[12] ZHAO Y, LIU A K, HSU M K. Internal wave refraction observed from sequential satellite images[J]. International Journal of Remote Sensing, 2008, 29(21): 6381-6390.

[13] HUANG X D, TIAN J W, ZHAO W. The behaviors of internal solitary waves near the continental shelf of South China Sea inferred from satellite images[J]. Advanced Materials Research, 2012, 588/589: 2131-2135.

[14] LIU B Q, YANG H, DING X W, et al. Tracking the internal waves in the South China Sea with environmental satellite sun glint images[J]. Remote Sensing Letters, 2014, 5(7): 609-618.

[15] WANG J, HUANG W G, YANG J S, et al. Study of the propagation direction of the IWs in the South China Sea using satellite images[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2012, 32(5): 42-50.

[16] EBBESMEYER C C, COOMES C A, HAMILTON R C, et al. New observation on internal wave (solitons) in the South China Sea using an acoustic Doppler current profiler[C]//Marine Technology Society 91 Proceedings, New Orleans, 1991: 165−175.

[17] 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.

[18] YANG Y J, TANG T Y, CHANG M H, et al. Solitons northeast of tung-sha island during the ASIAEX pilot studies[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2004, 29(4): 1182-1199.

[19] ORR M H, MIGNEREY P C. Nonlinear internal waves in the South China Sea: Observation of the conversion of depression internal waves to elevation internal waves[J]. Journal of Geophysical Research, 2003, 108(C3): 3064.

[20] DUDA T F, LYNCH J F, IRISH J D, et al. Internal tide and nonlinear internal wave behavior at the continental slope in the northern South China Sea[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2005, 29(4): 1105-1130.

[21] 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]. Geophysical Research Letters, 2004, 31(6): 1-4.

[22] ZHAO Z X. Internal tide radiation from the Luzon Strait[J]. Journal of Geophysical Research, 2014, 119(8): 5434-5448.

[23] KLYMAK J M, PINKEL R, LIU C T, et al. Prototypical solitons in the South China Sea[J]. Geophysical Research Letters, 2006, 33(11): 1-4.

[24] ALFORD M H, LIEN R C, SIMMONS H, et al. Speed and evolution of nonlinear internal waves transiting the South China Sea[J]. Journal Physical Oceanography, 2010, 40(6): 1338-1355.

[25] RAMP S R, YANG Y J, BAHR F L. Characterizing the nonlinear internal wave climate in the northeastern South China Sea[J]. Nonlinear Processes in Geophysics, 2010, 17(5): 481-498.

[26] XU Z H, YIN B S, HOU Y J, et al. A study of internal solitary waves observed on the continental shelf in the northwestern South China Sea[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2010, 29(3): 18-25.

[27] HUANG X D, WANG Z Y, ZHANG Z W, et al. Role of mesoscale eddies in modulating the semidiurnal internal tide: observation results in the northern South China Sea[J]. Journal of Physical Oceanography, 2018, 48(8): 1749-1770.

[28] LIEN R C, TANG T Y, CHANG M H, et al. Energy of nonlinear internal waves in the South China Sea[J]. Geophysical Reserch Letters, 2005, 32(5): L05615.

[29] CHANG M H, CHENG Y H, YANG Y J, et al. Direct measurements reveal instabilities and turbulence within large amplitude internal solitary waves beneath the ocean[J]. Communications Earth & Environment, 2021, 2: 15.

[30] 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.

[31] 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.

[32] 蔡树群. 内孤立波数值模式及其在南海区域的应用[M]. 北京: 海洋出版社, 2015: 1-2. CAI S Q. Numerical Models of Internal Solitary Waves and Applications to the South China Sea[M]. Beijing: China Ocean Press, 2015: 1-2.

[33] LIU A K, CHANG Y S, HSU M K, et al. Evolution of nonlinear internal waves in the East and South China Seas[J]. Journal of Geophysical Research, 1998, 103(C4): 7995-8008.

[34] CAI S Q, LONG X M, GAN Z J. A numerical study of the generation and propagation of internal solitary waves in the Luzon Strait[J]. Oceanologica Acta, 2002, 25(2): 51-60.

[35] CAI S Q, XIE J S. A propagation model for the internal solitary waves in the northern South China Sea[J]. Journal of Geophysical Research:Oceans, 2010, 115(C12): C12074.

[36] CHEN G Y, LIU C T, WANG Y H. Interaction and generation of long - crested internal solitary waves in the South China Sea[J]. Journal of Geophysical Research:Oceans, 2011, 116(C6): C06013.

[37] CAI S Q, XIE J S, HE J L. An overview of internal solitary waves in the South China Sea[J]. Surveys in Geophysics, 2012, 33(5): 927-943.

[38] FARMER D M, ARMI L. The flow of Atlantic water through the Strait of Gibraltar[J]. Progress in Oceanography, 1988, 21(1): 1-105.

[39] SUSANTO R D, MITNIK L, ZHENG Q A. Ocean internal waves observed in the Lombok Strait[J]. Oceanography, 2005, 18(4): 80-87.

[40] CHANG M H, LIEN R C, YANG Y J, et al. Nonlinear internal wave properties estimated with moored ADCP measurements[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2011, 28(6): 802-815.

[41] LIEN R C, HENYEY F, MA B, et al. Large-amplitude internal solitary waves observed in the northern South China Sea: Properties and energetics[J]. Journal of Physical Oceanography, 2014, 44(4): 1095-1115.

[42] HUANG X D, CHEN Z H, ZHAO W, et al. An extreme internal solitary wave event observed in the northern South China Sea[J]. Scientific Reports, 2016, 6(1): 30041.

[43] 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.

[44] HUANG X D, ZHAO W, TIAN J W, 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.

[45] ZHAO Z X, ALFORD M H. Source and propagation of internal solitary waves in the northeastern South China Sea[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2006, 111(C11): C11012.

[46] BAI X L, LIU Z Y, ZHENG Q A, et al. Fission of shoaling internal waves on the northeastern shelf of the South China Sea[J]. Journal of Geophysical Research:Oceans, 2019, 124(7): 4529-4545.

[47] HU Q W, HUANG X D, ZHANG Z W, et al. Cascade of internal wave energy catalyzed by eddy - topography interactions in the deep South China Sea[J]. Geophysical Research Letters, 2020, 47(4): e2019GL086510.

[48] ZHAO Z X. Southward internal tides in the northeastern South China Sea[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2020, 125(11): e2020JC016554.

[49] BAI X L, LIU Z Y, LI X F, et al. Generation sites of internal solitary waves in the southern Taiwan Strait revealed by MODIS true color image observations[J]. International Journal of Remote Sensing, 2014, 35(11/12): 4086-4098.

[50] ZHANG X D, LI X F. Combination of satellite observations and machine learning method for internal wave forecast in the Sulu and Celebes Seas[J]. IEEE Transaction of Geoscience and Remote Sensing, 2020, 59(4): 2822-2832.

[51] ZHANG X D, LI X F, ZHENG Q A. A machine-learning model for forecasting internal wave propagation in the Andaman Sea[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2021, 14: 3095-3106.

[52] ROEMMICH D, ALFORD M H, CLAUSTRE H, et al. On the future of Argo: a global, full-depth, multi-disciplinary array[J]. Frontiers in Marine Science, 2019, 6: 439.

[53] GAO Z Y, CHEN Z H, HUANG X D, et al. Internal wave imprints on temperature fluctuations as revealed by rapid-sampling deep profiling

floats[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2021, 126(12): e2021JC017878.

[54] MASUNAGA E, HOMMA H, YAMAZAKI H, et al. Mixing and sediment resuspension associated with internal bores in a shallow bay[J]. Continental Shelf Research, 2015, 110: 85-99.

[55] CASCÃO I, DOMOKOS R, LAMMERS M O, et al. Persistent enhancement of micronekton backscatter at the summits of seamounts in the Azores[J]. Frontiers in Marine Science, 2017, 4: 25.

[56] KLEVJER T A, MELLE W, KNUTSEN T, et al. Vertical distribution and migration of mesopelagic scatterers in four North Atlantic Basins[J]. Deep Sea Res Part Ⅱ: Topical Studies in Oceanography, 2020, 180: 104811.

[57] FARMER D, ARMI L. The generation and trapping of solitary waves over topography[J]. Science, 1999, 283(5399): 188-190.

[58] REEDER D B, MA B B, YANG Y J. Very large subaqueous sand dunes on the upper continental slope in the South China Sea generated by episodic, shoaling deep-water internal solitary waves[J]. Marine Geology, 2011, 279(1/4): 12-18.

[59] TANG Q S, WANG C X, WANG D X, et al. Seismic, satellite and site observations of internal solitary waves in the NE South China Sea[J]. Scientific Reports, 2014, 4: 5374.

[60] TANG Q S, HOBBS R, WANG D X, et al. Marine seismic observation of internal solitary wave packets in the northeast South China Sea[J]. Journal of Geophysical Research:Oceans, 2015, 120(12): 8487-8503.

[61] TANG Q S, XU M, ZHENG C, et al. A locally generated high-mode nonlinear internal wave detected on the shelf of the northern South China Sea from marine seismic observations[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2018, 123(2): 1142-1155.

[62] FENG Y C, TANG Q S, LI J, et al. Internal solitary waves observed on the continental shelf in the northern South China Sea from acoustic backscatter data[J]. Frontiers in Marine Science, 2021, 8: 734075.

Research Frontiers and Highlights of Internal Waves in the South China Sea

ZHENG Quan-an[1], CHEN Liang[2,3,4], XIONG Xue-jun[2,3,4], HU Xiao-min[2], YANG Guang-bing[2,3,4]

(1. *Department of Atmospheric and Oceanic Science*, *University of Maryland*, College Park 20742, USA;

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

3. *Laboratory for Regional Oceanography and Numerical Modeling*, *Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology (Qingdao)*, Qingdao 266071, China;

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

Abstract: The internal waves are a type of sub-mesoscale wave motions occurring in the interior of stratified ocean, which is an indispensable component for physical oceanographic research, particularly for ocean mixing and energy cascade studies. The huge shock momentum suddenly generated by internal solitary waves may lead to catastrophic threats to underwater navigations and ocean engineering facilities. Thus, implement of real time monitoring and forecast for ocean internal waves is of great significance for operational applications. The South China Sea is one of ocean areas in the global ocean, which are characterized by frequent occurrence of super intensive internal waves. Long-term mooring observations show that the internal solitary wave amplitudes reach as high as 150−200 m in west of the Luzon Strait, occurring all year round. Therefore, the South China Sea is a hotspot ocean area for observation and research of ocean internal solitary waves. Based on the literature published from 2015 to 2021, this overview paper aims to review recent advances in the research of internal waves in the South China Sea. It is recognized that the research results have gained a qualitative rise during the 7 years. First, it is implemented that major observation technologies have been raised from 2D satellite observation to 3D simultaneously combined observation of satellite and mooring technologies. This technologic advance has promoted a series of innovative results, such as super intensive internal solitary wave with the amplitude as high as 240 m, mesoscale eddy modulation to the internal waves, the internal solitary waves with the re-appearance period of 23 h, fission phenomenon of internal solitary waves in the shallow waters, internal waves in the deep basin and their energy cascade.

Second, the study areas have appeared an expanding trend to the central deep basin. Up to now, the study areas of observation and research of internal waves in the South China Sea have been concentrated in west of the Luzon Strait and on the northern continental shelf. Fortunately, there is a trend to expand the study areas to the central deep basin. Third, applications of cutting-edge technologies for ocean detection to the observation and research of internal waves in the South China Sea have promoted innovative results. The M_2 internal tide radiation beam images derived from satellite altimeter along track sea level fields by 2D plane wave decomposition techniques solved the issues on generation mechanisms and source regions of internal waves in the northern South China Sea, which have been debated for many years. AI technology has been successfully applied to develop forecast models for internal wave propagation in the adjacent marginal seas of the South China Sea. The average root−mean-square difference between the model-forecasted and satellite-observed internal wave leading crest lines after one tidal cycle was 3.21 km. The corresponding averaged correlation coefficient was 0.95. Rapid-sampling deep profiling float technology has been tested in the northern deep basin of the South China Sea. The test obtained vertical distribution of water temperature fluctuation amplitude induced by 0.1−1.8 d band wave motions of full depth from 0 to 3 500 m. High-resolution underwater imaging technologies, including marine multichannel seismic imaging technique and acoustic backscattering technologies, have been successfully applied to the observation and research of internal waves on the northern continental shelf of the South China Sea. The spatial resolution of acoustic backscattering images reaches 10 cm. The images clearly show fine structures inside the internal solitary wave packet, including the characteristic half width with a horizontal scale of 2 m only. It is expectable that abundant accumulation of research results, particularly successful application cases of AI technology to set up forecast models for internal wave propagation, would certainly establish a solid base for development of accurate forecast models for internal waves in the South China Sea.

Key words: internal waves; fission of solitary waves; internal tide radiation beams; underwater acoustic imaging; South China Sea

Received: May 13, 2022