

南海北部陆架区内波的演变与耗散机制

刘志宇^{1,2}, 白晓林^{1,2}, 马家骏^{1,2}

(1. 厦门大学海洋与地球学院物理海洋学系, 福建 厦门 361102;
2. 近海海洋环境科学国家重点实验室(厦门大学), 福建 厦门 361102)

摘要: 海洋是多尺度强迫-耗散系统, 机械能主要在大尺度输入, 在小尺度耗散。在大、中尺度运动的能量向小尺度湍流传递过程中, 内波扮演着重要角色。内波的生成和破碎可打破海洋动力平衡, 而在陆架区, 内波(主要是内孤立波)的浅化演变与耗散则是驱动湍流混合的关键过程。通过长期的理论、观测与数值模拟研究, 目前已认识到内波浅化过程中主要发生如下演变: 波形调制、极性转变、裂变、破碎与耗散。相较于直接发生破碎, 浅化演变过程中的裂变及其引发的剪切不稳定和对流不稳定是内孤立波在陆架区的主要耗散机制, 显著调制陆架区的跃层混合。从能量串级的角度讲, 内孤立波浅化裂变为动力不稳定的高频内波是潮能串级的重要通道。本文简要回顾南海北部陆架区内波的研究历史, 并着重总结内波在陆架区演变与耗散机制的研究进展。

关键词: 内孤立波; 陆架区; 裂变; 耗散

中图分类号: P731

文献标志码: A

文章编号: 1671-6647(2022)04-0791-09

doi: 10.12362/j.issn.1671-6647.20220610001

引用格式: 刘志宇, 白晓林, 马家骏. 南海北部陆架区内波的演变与耗散机制[J]. 海洋科学进展, 2022, 40(4): 791-799.

LIU Z Y, BAI X L, MA J J. Evolution and dissipation mechanisms of shoaling internal waves on the northern continental shelf of the South China Sea[J]. Advances in Marine Science, 2022, 40(4): 791-799.

内波是海洋中普遍存在的、位于层化海洋内部的一种波动, 是海洋中的重要动力过程。内波参与海洋中的物质输运过程, 其破碎显著加强海水混合, 对海洋环境有重要影响。内波是能量与动量在上层海洋与相对稳定的深层海洋之间传播的重要载体, 在海洋能量串级中扮演着重要角色; 内波与内波及其他过程之间的非线性相互作用, 将能量从含能高的较大尺度运动传递到含能低的较小尺度运动, 直至产生湍流而黏性耗散, 并诱发海水混合。

相较于内潮(由潮流与地形相互作用产生的、具有潮周期的内波), 内孤立波具有强非线性、更高频率等特征, 其在传播过程中因非线性效应与频散作用平衡而维持波形的特点亦是吸引应用数学、物理学等领域关注的原因之一。内孤立波不仅在海洋动力学中扮演重要角色, 还会影响水下潜艇的航行、隐蔽以及鱼雷的发射等, 对海上石油和天然气勘探与开采设施的安全亦有潜在威胁。因此, 深入理解内孤立波的发生、演变过程与耗散机制, 具有重要的科学与现实意义。

陆架区位于海岸和大陆坡折之间, 是内波活跃、与人类生产生活息息相关的重要区域。虽然大多数陆架区宽广而地形平缓^[1], 但也散布着全球水深数据库中未分辨的复杂小尺度地形^[2], 再加上复杂的动力环境(强潮及中尺度与亚尺度运动等), 这使得陆架区的内波场异常复杂^[3]。本文简要回顾南海北部陆架区内孤立波的研究历史, 并着重总结内孤立波在陆架区演变与耗散机制的研究进展。

收稿日期: 2022-06-10

资助项目: 国家自然科学基金重大研究计划重点支持项目——西太平洋关键中小尺度过程能量串级与相互作用机理研究(91858201); 福建省自然科学基金重点项目——南海东北部陆架区内孤立波的浅化裂变及其潮能耗散效应研究(2021J02005)

作者简介: 刘志宇(1982—), 男, 教授, 博士, 博士生导师, 主要从事海洋混合与多尺度相互作用方面研究. E-mail: zylu@xmu.edu.cn

(李 燕 编辑)

1 南海北部陆架区内孤立波的研究回顾

南海是西太平洋面积最大的边缘海,内波活动非常活跃^[4]。南海的内孤立波虽然直到近二三十年来才引起广泛关注,但已成为物理海洋学领域的热门研究课题之一。大量的卫星遥感观测与现场调查表明,南海北部(尤其是东北部)是全球海洋内孤立波活动最为活跃的海域之一,近期的综述性文章^[4-6]对已有研究工作进行了系统的总结:随着2000—2001年亚洲海洋国际声学实验(Asian Seas International Acoustic Experiment, ASIAEX)的开展,南海内孤立波的研究取得一系列重要进展。Ramp等^[7]发现东沙附近的内孤立波可分为两类,并根据振幅和到达时间的差异分别命名为“a”波和“b”波。Duda等^[8]分析了ASIAEX观测区域内潮与内孤立波的统计特征,发现该区域内潮以全日内潮为主,且该区域的内潮有时会因强的非线性而生成内孤立波波包。随后,2005年4月到2006年6月,美国和我国台湾地区的科学家在南海北部进行了东沙岛孤立子实验(Windy Islands Soliton Experiment/Variability Around the Northern South China Sea, WISE/VANS),期间获得了从吕宋海峡到陆坡区的锚系潜标阵列观测资料。相关分析结果揭示了南海北部内孤立波的季节演化特征^[9]。而于2006—2007年执行的南海非线性内波实验(Nonlinear Internal Wave Initiative/South China Sea Oceanic Processes Experiment, NLIWI/SCOPE)则主要关注于吕宋海峡,对内孤立波生成过程与机制进行了针对性的研究。为进一步揭示大振幅内孤立波和内潮在吕宋海峡内的生成过程与机制,Alford等于2010—2011年在吕宋海峡和南海北部开展了海峡内波实验(Internal Waves in Straits Experiment, IWISE),对吕宋海峡内潮和内孤立波的生成、正压潮向内潮的能量转换以及局地内波破碎与耗散等问题进行了精细化观测与高分辨率数值模拟研究^[4,10]。我国则于近20a在南海先后立项并实施了国家高技术研究发展计划(“863”计划)重大项目“南海深水区内波观测技术与试验系统开发”与中国科学院知识创新工程重大项目“关键海域中尺度物理海洋过程的预报模式及关键技术研究”等专题研究,逐步加强了南海内波的现场观测研究^[11]。在国家重点基础研究发展计划(“973”计划)“南海关键岛屿周边多尺度海洋动力过程研究”等项目支持下,中国海洋大学田纪伟团队领衔构建了南海区域海洋潜标观测网,对内波生成-演变-消亡全过程机理有了较系统的认识,在南海内波、海洋(亚)中尺度运动等多尺度动力过程研究方面取得了诸多进展^[12-15]。

上述研究计划及相关研究工作的开展,显著推动了学界对南海北部陆架区内波的研究,对于认识内波在陆架区的传播、演变规律以及耗散过程与机制具有重要的科学意义,并且对我国南海的海洋石油开发、海上军事活动以及近海海洋生态环境保护等具有重要价值。

2 南海北部陆架区内孤立波的演变特征与机理

经过近二十多年的系统研究,学界对南海北部内孤立波的生成、传播和演变过程已有较为清晰的认识:吕宋海峡是内潮的主要生成源地,内潮生成后横跨南海北部海盆向陆坡、陆架区传播,一部分内潮在传播过程中经非线性变陡生成内孤立波,而内孤立波则由于陆架区的浅化效应而变形,最终在陆架上耗散。

具体来讲,内孤立波在从深水向浅水传播的过程中,由于受到变化的地形、层结以及背景剪切流场等环境因素的调制作用而发生变形。如图1所示,当非线性效应增强时,波面会逐渐变陡甚至发生破碎;当频散效应增强时,波动振幅会减小。通常,内孤立波在深水区呈现为下凹型波,而在浅水区为上凸型波。其中,在理想的两层流体概念模型中,将上层水体厚度小于下层水体厚度的区域定义为深水区,反之则为浅水区,而将二者交汇处命名为临界深度或极性临界点位置。内孤立波在浅化传播过程中从下凹型波转化为上凸型波的过程称为极性转变。利用合成孔径雷达图像,Liu等^[16]观测到内孤立波波面的陡升和极性转变,即一组内孤立波从下凹型波转变为上凸型波。这个过程在Orr和Mignerey^[17]现场观测中得以证实。锚定观测为内孤立波研究提供了更精细的数据,例如Fu等^[18]利用锚定资料观测到一组大振幅内孤立波的浅

化演变过程, 而 Lien 等^[19] 则观测到内孤立波在浅化过程中形成一个“约束流核”的结构, 并指出其可携带水团随波前行。这些工作丰富了我们对于内孤立波传播和演变特征的认识。

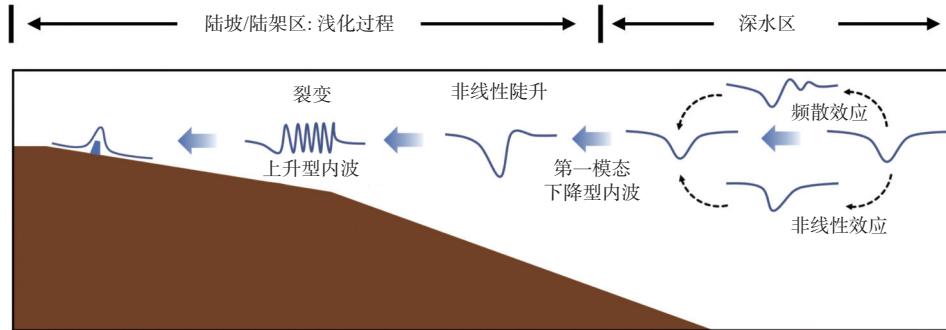


图 1 内孤立波浅化演变过程示意图

Fig. 1 Schematic illustration of a shoaling internal solitary wave

此外, 内孤立波从深水传播到陆架、陆坡区时会发生裂变, 生成强非线性的高频内波波包^[16,20]。为研究高频内波的生成机制, 前人主要从理论分析与数值模拟两方面开展了工作^[16,21-22]。这些工作所采用的理论框架主要是描述弱非线性条件下内孤立波传播与演化的简化模型 Korteweg-de Vries (KdV) 方程^[16,20,23-25]。考虑到内孤立波的强非线性特征, 一些学者对 KdV 方程进行了修正, 使其具备一定的模拟强非线性内孤立波的能力^[26-30]。也有学者利用高阶 KdV 方程研究了地转效应和背景流场对内孤立波传播、演变的影响^[27]。Zhou 和 Grimshaw^[31] 则基于变系数的 KdV 方程探讨了几种典型流场(地转流、潮流和惯性流)对内孤立波的影响。Fan 等^[32] 发现, 内孤立波在南海北部陆架区传播时具有涨、落潮间的差异, 并指出其主要原因是非线性效应的变化。基于线性理论, Cai 等^[33] 研究了背景流场对内孤立波波形的影响, 发现影响内孤立波波形的主要因素是流场曲率, 而非流速剪切。非线性效应的显著增强被认为是内孤立波浅化裂变的主要原因^[8,32]。Bai 等^[34] 研究指出南海陆架区的高频内波是由内孤立波浅化裂变产生的。锚定海流与湍流混合剖面观测结果表明, 跃层内流速剪切在内孤立波裂变为高频内波后显著增强, 流动因剪切不稳定产生强的湍流耗散与混合。

海洋是多尺度耦合的复杂系统, 内孤立波的传播演变同样受到大尺度环流、潮流、中尺度涡旋、亚中尺度锋面等的影响^[35]。Xie 等^[36] 在气候态上论述了南海北部环流结构, 尤其是黑潮入侵的不同流态, 对内孤立波传播及波形变化的影响。关于中尺度涡旋对内孤立波的影响, Xie 等^[37] 基于数值模拟从能量辐聚辐散的角度进行了阐释, 并比较了气旋涡和反气旋涡带来的不同影响; Huang 等^[13] 基于锚系阵列观测资料揭示了中尺度涡对内孤立波传播的影响, 指出涡旋通过加深跃层使内孤立波振幅减小。Zhang 等^[14] 观测到内孤立波的极性受内潮、涡旋以及背景层结的季节变化等过程的调制。Bai 等^[38] 强调了内孤立波浅化传播过程中潮流的调制作用, 指出内孤立波的极性临界点位置在跨陆架方向上的变化与潮流存在相位锁定关系, 其机制为潮流对等密度面起伏与流速剪切的调制。

破碎与耗散是内波演变发展的终点, 也是湍流产生与机械能转化为内能的能量耗散过程, 常常伴随着增强的海水混合。目前对内波破碎的大部分理解来自室内水槽实验^[39-40] 或数值模拟^[41-43], 这除了由于理论的局限性^[44], 还因为在实际海洋中难以通过定点或走航观测捕捉到这些波动向小尺度高频波动的退化与破碎过程。在简单地形及层结情况下(如恒定浮性频率的线性层结或两层流体), 内孤立波破碎情况可以分为骤降型、塌陷型、涌浪型及裂变四类^[42,45]。因内波破碎与地形及波形直接相关, 常用伊利瓦伦数(Iribaren number, $\xi_{in} = s/\sqrt{a/L_w}$)来指征内波破碎的类型, 其中 s 、 a 、 L_w 分别为地形坡度、波动振幅与波长。数值模拟实验^[42,45] 表明, 裂变是在伊利瓦伦数较小时内波的典型演变过程, 而大伊利瓦伦数对应的陡峭地形会造成内波的剧烈破碎; 后者在现实海洋中相对少见^[34]。相较于其他破碎类型, 骤降型破碎会造成最剧烈的翻

转, 伴随发生强湍流混合。裂变引起的湍流混合稍弱, 其在平缓的陆架区有足够长的时间来贡献混合; 相比之下, 塌陷型和涌浪型破碎造成的混合最弱^[46]。内波破碎所造成的湍流耗散与混合是海洋能量耗散的重要过程。

3 南海北部陆架区内孤立波的耗散机制

内波能量的耗散关系到海洋的能量平衡, 对气候模式的准确性也至关重要。目前已知的内波能量耗散的机制主要有: 内波破碎造成的向小尺度湍流的能量传递、底边界层内的能量耗散、临界层中内波能量向较大尺度运动(如平均流或低频内波)的传递等^[47]。其中, 内波破碎在内波能量耗散中占主导地位, 也是海洋内部跨密度面混合的主要能量来源^[48]。在陆架区, 内孤立波破碎的主要机制是剪切不稳定和对流不稳定。

3.1 剪切不稳定

剪切不稳定可由理查森数 $Ri = N^2/S^2$ 来进行量化判断, 其中 N 为浮性频率, S 为水平流速的垂向剪切。剪切不稳定发生的条件在实验室和数值模拟实验中已有系统性的研究, 并得到了 3 个判据: ①最小时理查森数; ②不稳定区域尺度; ③由线性稳定性分析得出的扰动振幅增长率。

Miles-Howard 定理指出, 平行、无黏、层化流动稳定的充分条件是理查森数处处大于 0.25^[49-50], 因此, 当存在一个区域 $Ri < 0.25$ 时即可能发生不稳定。由于内孤立波所致流动不是平行剪切流, 使用 $Ri < 0.25$ 来预测其不稳定时需谨慎^[51]。尽管有观测指出 $Ri < 0.25$ 对判断内孤立波不稳定可行^[52], 一般认为剪切不稳定的发生需满足 $Ri_{\min} < 0.1$ ^[53]。

剪切不稳定的发生除了要满足小理查森数的条件, 还需要不稳定区域足够大, 即 $L_x/\lambda > 0.86$, 其中 L_x 是 $Ri < 0.25$ 区域的水平长度, 此处 λ 定义为半波长^[54], 其中临界值 0.86 会因层结不同而变化^[55]。部分研究基于由 Taylor-Goldstein 方程预测的小扰动在 $Ri < 0.25$ 区域内的增长率和增长时间来确定不稳定判据^[53-54, 56]。当扰动的时空尺度远小于内波的时空尺度时, 可以忽略波致流场的时空变化, 将其作为平稳、水平均一的背景流来通过求解 Taylor-Goldstein 方程得到增长率^[55-57]。

大量观测^[42, 55-57]表明, 剪切不稳定对内孤立波能量耗散具有重要作用。Sandstrom 等^[58]给出了内孤立波中湍流的第一幅声学后向散射图像(强声学散射信号区域往往对应着湍流的发生, 图像结构可表征流场结构), 并指出该图像结构与所测温度精细结构相吻合。Moum 等^[59]观测到内孤立波后侧因剪切不稳定产生的强声学散射信号。对处于浅化过程中的内孤立波的追踪观测表明, 内孤立波在长距离传播过程中会发生剪切不稳定, 在波后方后向散射增强, 且湍流耗散率随着内孤立波浅化演变急剧增加^[60]。此外, 内孤立波发生剪切不稳定时还常伴随着开尔文-亥姆霍兹波(Kelvin-Helmholtz billow)的产生, 其产生后可向下游传播, 后续的不稳定可造成强烈的湍流。

3.2 对流不稳定

对流不稳定是由重力和浮力的不平衡所引发的不稳定过程。当密度较大的流体位于较轻的流体之上时, 会产生垂直对流和湍流混合。在内波中, 当沿波传播方向的最大水平流速($U_{\max}$)超过内波相速度(c)时^[51], 就会发生对流不稳定, 通常伴随着“约束流核”的形成, 造成显著的水平输运和湍流混合。约束流核一般不稳定且处于湍流状态, 通常与其边界相分离, 并在波后方泄漏流体^[51, 61]。基于示踪粒子的数值模拟实验表明, 环境流体可被带入流核^[62], 部分粒子可在流核内随着内波传播。观测结果表明, 对流不稳定能够造成内孤立波能量的强耗散并引发强湍流混合。例如, Lien 等^[19]观测到一个具有约束流核的大振幅内孤立波(其振幅约为 150 m)。该流核由 2 个反向旋转的涡旋组成, 伴随约 10~50 m 的水体翻转与强湍流, 湍动能耗散率和跨密度面混合率分别达 $O(10^{-4} \text{ W} \cdot \text{kg}^{-1})$ 和 $O(10^{-1} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$ 。Richards 等^[63]观测到, 在具有约束流核的

上升型内孤立波中湍动能耗散率高达 $5 \times 10^{-5} \text{ W} \cdot \text{kg}^{-1}$, 并推断随着浅化过程的发展会有湍流从其流核中流出。

对流不稳定与剪切不稳定关系复杂, 由于内波所致剪切始终存在, 内波中两种不稳定常常同时出现。当理查森数较大时, 对流不稳定占主导地位; 当 $Ri < 0.25$ 时, 剪切不稳定占主导; 当 $0.25 < Ri < 1$ 时, 2种不稳定共同作用产生强湍流混合^[64]。随着内孤立波的传播, 约束流核可出现在下凹型内孤立波的波谷上方或上凸型内孤立波的波峰下方, 并由于后续不稳定的发生而导致强能量耗散与湍流混合^[65]。例如, Chang 等^[66]在东沙群岛附近所开展的高分辨率内孤立波观测, 可分辨出开尔文-亥姆霍兹波和约束流核结构。其所观测到的所有内孤立波均满足对流不稳定的判据 $U_{\max} > c$, 但实测流核结构并不清晰, 推测是由于开尔文-亥姆霍兹波影响了对流核结构的观测。

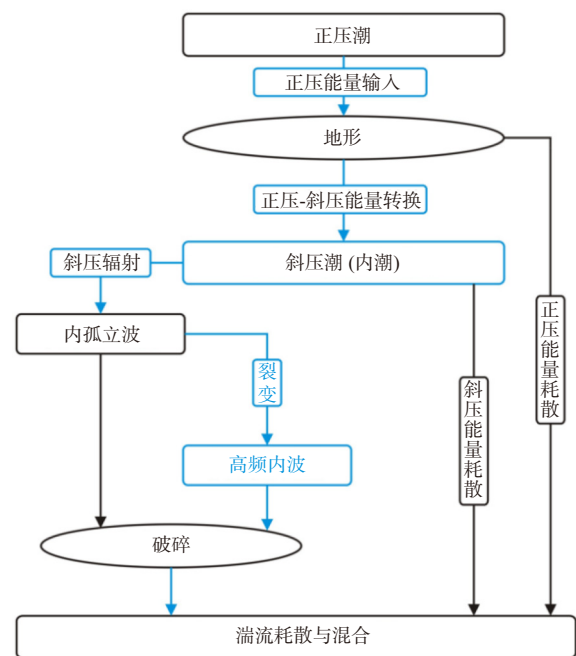
3.3 内孤立波浅化裂变的潮能串级效应

学界对内孤立波耗散机制最普遍的理解是: 内孤立波通过上述两种机制发生破碎而产生湍流(即图2中所示的“内孤立波→破碎”过程)^[67]。但我们近期的研究表明^[34]: 内孤立波在由深水向近岸传播过程中会因地形变浅的动力强迫作用发生裂变, 从而生成动力不稳定的高频内波, 而这些高频内波则由于剪切不稳定(或对流不稳定)过程产生湍流。观测结果显示, 南海东北部陆架区持续存在高频内波波包。机制性数值模拟结果表明, 这些高频内波的确是来自深水区的内孤立波的浅化裂变产生的; 内孤立波裂变为高频内波后, 跃层内流速剪切显著增强, 流动因剪切不稳定产生强的湍流耗散与混合。陆架区的高频内波与深水区的内孤立波存在显著的动力学差异, 表明相较于直接通过底摩擦或内孤立波自身的动力不稳定过程耗散, 内孤立波在陆架区的耗散可能主要通过裂变为动力不稳定的高频内波来实现。

因此, 我们提出了内孤立波能量耗散的一个新假说: “内孤立波裂变为高频内波是内孤立波能量耗散的关键过程”(即图2所示的潮能经由“正压潮→内潮→内孤立波→高频内波→湍流”的串级通道)。由于浅化地形是陆架区的普遍特征, 这一理论应同样适用于全球海洋的其他众多陆架区。Rippeth 和 Green 在随后的综述性文章中指出, 我们的这一发现对于理解内孤立波耗散机理具有重要意义, 内孤立波在陆架区浅化裂变为高频内波是潮能串级的重要通道^[68]。

4 总结与展望

内波是潮能串级与耗散的关键环节, 而潮能通过内波能量在海洋中的传播与耗散在很大程度上驱动了大洋子午翻转环流。具体来讲, 正压潮流与地形相互作用生成内潮, 内潮生成后除直接耗散外还可以通过波-波相互作用将能量传递到其他频率的内波, 或通过内潮非线性演化为内孤立波来实现能量的降尺度传递。



注: 图中蓝色箭头及文字所示为我们新近揭示的潮能串级通道^[34]。

图2 海洋中潮能串级与耗散过程示意图

Fig. 2 Schematic illustration of tidal energy cascade and dissipation

研究表明, 陆架区的内潮有近一半的能量会传递给内孤立波^[69], 但目前对内孤立波耗散机理的认识尚不充分。本文简述了内孤立波在陆架区演化与耗散的主要机制, 并特别强调了我们的新近提出的“内孤立波裂变为高频内波是内孤立波能量耗散的关键过程”之科学假说。

内波作为海洋机械能降尺度串级的重要桥梁, 尚存在诸多问题有待深入探讨, 比如内波的生成、非线性演化以及耗散如何为海洋机械能从中尺度运动向小尺度运动串级提供有效的途径; 此外, 尽管前人阐明了内孤立波破碎与耗散的若干机制^[70], 但多数研究仅考虑海洋动力系统中只有内波的理想情形, 很少考虑或仅考虑简化的动力环境影响, 但海洋是多尺度耦合系统, 蕴含多种动力过程, 多尺度地形及复杂动力环境场如何调制内波的演变与耗散等关键科学问题尚待回答。特别地, 内波与涡旋的相互作用与能量传递是近期海洋内波研究的热点问题, 也是全面理解与量化海洋能量学的关键环节, 应得到足够的重视。

参考文献 (References):

- [1] CACCHIONE D A, PRATSON L F, OGSTON A S. The shaping of continental slopes by internal tides[J]. *Science*, 2002, 296(5568): 724-727.
- [2] NASH J D, ALFORD M H, KUNZE E, et al. Hotspots of deep ocean mixing on the Oregon continental slope[J]. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34: L01605.
- [3] NASH J D, KUNZE E, TOOLE J M, et al. Internal tide reflection and turbulent mixing on the continental slope[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2004, 34(5): 1117-1134.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] GUO C C, CHEN X E. A review of internal solitary wave dynamics in the northern South China Sea[J]. *Progress in Oceanography*, 2014, 121: 7-23.
- [7] 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.
- [8] 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*, 2004, 29(4): 1105-1130.
- [9] 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.
- [10] ALFORD M H, MACKINNON J A, NASH J D, et al. Energy flux and dissipation in Luzon Strait: two tales of two ridges[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2011, 41(11): 2211-2222.
- [11] 蔡树群, 何建玲, 谢皆烁. 近10年来南海孤立内波的研究进展[J]. *地球科学进展*, 2011, 26(7): 703-710. CAI S Q, HE J L, XIE J S. Recent decadal progress of the study on internal solitons in the South China Sea[J]. *Advances in Earth Science*, 2011, 26(7): 703-710.
- [12] 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: 102716.
- [13] 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.
- [14] ZHANG X J, HUANG X D, ZHANG Z W, et al. Polarity variations of internal solitary waves over the continental shelf of the northern South China Sea: impacts of seasonal stratification, mesoscale eddies, and internal tides[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2018, 48(6): 1349-1365.
- [15] DONG J H, ZHAO W, CHEN H T, et al. Asymmetry of internal waves and its effects on the ecological environment observed in the northern South China Sea[J]. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 2015, 98: 94-101.
- [16] LIU A K, CHEN Y, MING-KUANG H, et al. Evolution of nonlinear internal waves in the East and South China Seas[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1998, 103: 7995-8008.
- [17] ORR M H, MIGNERREY 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: Oceans*, 2003, 108(C3): 1-16.
- [18] FU K-H, WANG Y-H, ST. LAURENT L, et al. Shoaling of large-amplitude nonlinear internal waves at Dongsha Atoll in the northern South China Sea[J]. *Continental Shelf Research*, 2012, 37: 1-7.

- [19] LIEN R C, D'ASARO E A, HENYEY F, et al. Trapped core formation within a shoaling nonlinear internal wave[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2012, 42(4): 511-525.
- [20] ZHAO Z X, VICTOR V K, ZHENG Q A, et al. Satellite observation of internal solitary waves converting polarity[J]. *Geophysical Research Letters*, 2003, 30(19), 1988: 1-4.
- [21] DJORDJEVIC V D, REDEKOPP L G. The fission and disintegration of internal solitary waves moving over two-dimensional topography[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 1978, 8(6): 1016-1024.
- [22] ZHENG Q A, KLEMAS V, YAN X H, et al. Nonlinear evolution of ocean internal solitons propagating along an inhomogeneous thermocline[J]. *Journal of Geophysical Research:Oceans*, 2001, 106(C7): 14083-14094.
- [23] OSBORN T R. Estimates of the local-rate of vertical diffusion from dissipation measurements[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 1980, 10(1): 83-89.
- [24] 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: 871-896.
- [25] STANTON T P, OSTROVSKY L A. Observations of highly nonlinear internal solitons over the continental shelf[J]. *Geophysical Research Letters*, 1998, 25(14): 2695-2698.
- [26] 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.
- [27] GRIMSHAW R H J, PELINOVSKY E, POLOUKHINA O. Higher-order Korteweg-de Vries models for internal solitary waves in a stratified shear flow with a free surface[J]. *Nonlinear Processes in Geophysics*, 2002, 9: 221-235.
- [28] ZHANG S W, FAN Z S. Effects of high-order nonlinearity and rotation on the fission of internal solitary waves in the South China Sea[J]. *Journal of Hydrodynamics*, 2013, 25(2): 226-235.
- [29] GRIMSHAW R, GUO C C, HELFRICH K, et al. Combined effect of rotation and topography on shoaling oceanic internal solitary waves[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2014, 44(4): 1116-1132.
- [30] 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: C12074.
- [31] ZHOU X, GRIMSHAW R. The effect of variable currents on internal solitary waves[J]. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, 1989, 14: 17-39.
- [32] FAN Z S, SHI X G, LIU A K, et al. Effects of tidal currents on nonlinear internal solitary waves in the South China Sea[J]. *Journal of Ocean University of China*, 2013, 12(1): 13-22.
- [33] CAI S Q, LONG X M, DONG D P, et al. Background current affects the internal wave structure of the northern South China Sea[J]. *Progress in Natural Science*, 2008, 18(5): 585-589.
- [34] 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.
- [35] LI Q, WANG B, CHEN X, 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.
- [36] XIE J S, FANG W D, HE Y H, et al. Variation of internal solitary wave propagation induced by the typical oceanic circulation patterns in the northern South China Sea deep basin[J]. *Geophysical Research Letters*, 2021, 48(15), e2021GL093969: 1-12.
- [37] XIE J S, HE Y H, CHEN Z W, 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.
- [38] BAI X L, LAMB K, HU J Y, et al. On tidal modulation of the evolution of internal solitary-like waves passing through a critical point[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2021, 51: 2533-2552.
- [39] SUTHERLAND B R, KEATING S, SHRIVASTAVA I. Transmission and reflection of internal solitary waves incident upon a triangular barrier[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2015, 775: 304-327.
- [40] CACCHIONE D, WUNSCH C. Experimental study of internal waves over a slope[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1974, 66(2): 223-239.
- [41] LEGG S, ADCROFT A. Internal wave breaking at concave and convex continental slopes[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2003, 33(11): 2224-2246.
- [42] AGHSAEE P, BOEGMAN L, LAMB K G. Breaking of shoaling internal solitary waves[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2010, 659: 289-317.
- [43] KLYMAK J M, ALFORD M H, PINKEL R, et al. The breaking and scattering of the internal tide on a continental slope[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2011, 41(5): 926-945.
- [44] SIMMONS H, CHANG M-H, CHANG Y-T, et al. Modeling and prediction of internal waves in the South China Sea[J]. *Oceanography*, 2011, 24(4): 88-99.

- [45] BOEGMAN L, IVEY G N, IMBERGER J. The degeneration of internal waves in lakes with sloping topography[J]. *Limnology and Oceanography*, 2005, 50(5): 1620-1637.
- [46] MASUNAGA E, ARTHUR R S, FRINGER O B. Internal wave breaking dynamics and associated mixing in the coastal ocean [M]//Encyclopedia of ocean sciences (Third edition). Oxford: Academic Press, 2019: 548-554.
- [47] 刘国涛, 尚晓东, 陈桂英, 等. 海洋内波破碎及其能量耗散的研究进展[J]. 中山大学学报:自然科学版, 2007, 46(增刊2): 167-172. LIU G T, SHANG X D, CHEN G Y, et al. The advance of internal waves breaking and energy dissipation in the ocean[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 2007, 46(Suppl.2): 167-172.
- [48] GARRETT C, KUNZE E. Internal tide generation in the deep ocean[J]. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 2007, 39(1): 57-87.
- [49] HOWARD L N. Note on a paper of John W. Miles[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1961, 10(4): 509.
- [50] MILES J W. On the stability of heterogeneous shear flows[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1961, 10(4): 496.
- [51] LAMB K G. A numerical investigation of solitary internal waves with trapped cores formed via shoaling[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2002, 451: 109-144.
- [52] MACKINNON J A, GREGG M C. Shear and baroclinic energy flux on the summer New England shelf[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2003, 33(7): 1462-1475.
- [53] BARAD M F, FRINGER O B. Simulations of shear instabilities in interfacial gravity waves[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2010, 644: 61-95.
- [54] FRUCTUS D, CARR M, GRUE J, et al. Shear-induced breaking of large internal solitary waves[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2009, 620: 1-29.
- [55] LAMB K G, FARMER D. Instabilities in an internal solitary-like wave on the Oregon shelf[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2011, 41(1): 67-87.
- [56] ALMGREN A, CAMASSA R, TIRON R. Shear instability of internal solitary waves in Euler fluids with thin pycnoclines[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2012, 710: 324-361.
- [57] TROY C D, KOSEFF J R. The instability and breaking of long internal waves[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2005, 543: 107-136.
- [58] SANDSTROM H, ELLIOT J A, CCHRANE N A. Observing groups of solitary internal waves and turbulence with BATFISH and echosounder[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 1989, 19(7): 987-997.
- [59] MOUM J N, FARMER D M, SMYTH W D, et al. Structure and generation of turbulence at interfaces strained by internal solitary waves propagating shoreward over the continental shelf[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2003, 33: 2093-2112.
- [60] MOUM J N, FARMER D M, SHROYER E L, et al. Dissipative losses in nonlinear internal waves propagating across the continental shelf[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2007, 37(7): 1989-1995.
- [61] HELFRICH K R, WHITE B L. A model for large-amplitude internal solitary waves with trapped cores[J]. *Nonlinear Processes in Geophysics*, 2010, 17(4): 303-318.
- [62] CARR M, KING S E, DRITSCHEL D G. Instability in internal solitary waves with trapped cores[J]. *Physics of Fluids*, 2012, 24(1): 016601.
- [63] RICHARDS C, BOURGAULT D, GALBRAITH P S, et al. Measurements of shoaling internal waves and turbulence in an estuary[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2013, 118(1): 273-286.
- [64] IVEY G N, BLUTEAU C E, GAYEN B, et al. Roles of shear and convection in driving mixing in the ocean[J]. *Geophysical Research Letters*, 2021, 48(3): e2020GL089455.
- [65] VENAYAGAMOORTHY S, FRINGER O. Examining breaking internal waves on a shelf slope using numerical simulations[J]. *Oceanography*, 2012, 25(2): 132-139.
- [66] 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): 1-10.
- [67] THORPE S A. Transitional phenomena and the development of turbulence in stratified fluids: a review[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1987, 92(C5): 5231-48.
- [68] RIPPETH T, GREEN M. Tides, the moon and the kaleidoscope of ocean mixing[M]//HAWKINS S J, ALLCOCK A L, BATES A E, et al. Oceanography and marine biology: an annual review. Boca Raton, FL, USA : Taylor & Francis, 2020: 319-349.
- [69] KANG D, FRINGER O. Energetics of barotropic and baroclinic tides in the Monterey Bay area[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2012, 42(2): 272-290.
- [70] LAMB K G. Internal wave breaking and dissipation mechanisms on the continental slope/shelf[J]. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 2014, 46(1): 231-254.

Evolution and Dissipation Mechanisms of Shoaling Internal Waves on the Northern Continental Shelf of the South China Sea

LIU Zhi-yu^{1,2}, BAI Xiao-lin^{1,2}, MA Jia-jun^{1,2}

(1. *Department of Physical Oceanography, College of Ocean and Earth Sciences, Xiamen University, Xiamen 361102, China;*

2. *State Key Laboratory of Marine Environmental Science (Xiamen University), Xiamen 361102, China*)

Abstract: The ocean is a multiscale forced-dissipative system where mechanical energy is input mainly at large scales and dissipated at small scales. Internal wave is the key process of energy cascade from large-scale and mesoscale motions to small-scale turbulence. The generation and dissipation of internal waves can break the dynamic equilibrium of oceanic flows and is an important pathway of ocean energy cascade. The evolution and dissipation of shoaling internal waves (especially internal solitary waves) on the continental shelf is a key mechanism driving offshore mixing. Recent decades of theoretical, observational and numerical studies revealed the critical evolution processes of the shoaling internal waves: wave deformation, polarity conversion, fission, breaking and dissipation. Compared with direct breaking, fission and its accompanying shear instability and convective instability are the main mechanisms of wave dissipation on the continental shelf and result in significant ocean mixing. From the viewpoint of energy cascade, fission of shoaling internal solitary waves into high-frequency waves is an important pathway of tidal energy cascade. Here we briefly review studies of internal waves on the northern continental shelf of the South China Sea, and highlight in particular recent advances in the study of the evolution and dissipation mechanisms of shoaling internal waves.

Key words: internal solitary waves; continental shelf; fission; dissipation

Received: June 10, 2022