

综 述

# 印度尼西亚海潮致混合研究现状与展望

魏泽勋<sup>1,2</sup>, 徐腾飞<sup>1,2</sup>, 王永刚<sup>1,2</sup>, 李淑江<sup>1,2</sup>, 滕 飞<sup>1,2</sup>

(1. 自然资源部 第一海洋研究所, 山东 青岛 266061;

2. 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)

**摘 要:** 印度尼西亚海(简称印尼海)位于热带太平洋和印度洋交汇的海域,是全球最大的内潮生成海域。内潮耗散导致强烈的潮致混合,一方面将温跃层以下的海水卷入上层,降低印尼海海表温度,之后通过海气相互作用产生显著的天气和气候效应;另一方面对穿越印尼海的印度尼西亚贯穿流的物质与能量运输也有着重要影响。自 Arlindo 计划以来,人们对印尼海潮致混合的认识不断深化,并通过在海洋环流数值模式中考虑印尼海强潮致混合过程,提升了对印尼海和全球大洋环流的模拟效果。但由于缺乏现场观测资料和针对性的潮致混合参数化方案,印尼海潮致混合特征的定量描述及其在海洋环流与气候模式中的表达尚未完全解决。本研究对印尼海潮致混合及其在海洋环流和气候数值模式中的应用的最新研究成果进行了概述和展望,并对未来该海域混合观测方案和潮致混合参数化方案提出了针对性建议。

**关键词:** 印度尼西亚海;潮致混合;印度尼西亚贯穿流;数值模拟

**中图分类号:** P731

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1671-6647(2021)01-0001-08

**doi:** 10.3969/j.issn.1671-6647.2021.01.001

**引用格式:** WEI Z X, XU T F, WANG Y G, et al. Progress and prospect on the study of tidal mixing in the Indonesian Seas[J]. Advances in Marine Science, 2021, 39(1): 1-8. 魏泽勋, 徐腾飞, 王永刚, 等. 印度尼西亚海潮致混合研究现状与展望[J]. 海洋科学进展, 2021, 39(1): 1-8.

印度尼西亚海(简称印尼海)位于热带太平洋和印度洋交汇的海域,既是全球唯一发生在热带大洋间的海流——印度尼西亚贯穿流所在的海域,也是大气沃克环流上升支所在的海域,因而“处于更大尺度海气系统的关键位置”,对区域乃至全球海洋环境、生态系统和气候都有重要影响,是海洋和气候研究领域的主要热点之一<sup>[1-3]</sup>(图 1)。除了提供热带印太洋际输运通道,从而维持热带印太热盐平衡,并为全球大洋传送带(The Great Ocean Conveyor)提供热带回流通道之外<sup>[4-6]</sup>,印尼海的另外一个重要特征在于其活跃的垂向混合,能将温跃层以下的海水卷入混合层,显著降低海表温度,随后通过海气相互作用影响区域乃至全球海洋环境、生态系统和气候<sup>[3]</sup>。

迄今最大规模的印尼贯穿流国际观测计划 INSTANT 的发起者 Sprintall 等于 2019 年在《Frontiers in Marine Science》撰文指出,最近几年有关印尼海的最重要研究成果可能是对潮致混合在印尼贯穿流海水输运和对区域海表温度乃至全球气候中的重要作用的认识<sup>[3]</sup>。潮致混合是强的潮流遇到粗糙地形时的必然产物:正压潮一方面在底摩擦作用下引起海洋底层混合增强;另一方面在传播过程中遇到陡峭地形时激发内潮,内潮在耗散过程中为混合提供能量<sup>[7]</sup>。印尼海有着除大洋中脊外最为崎岖的海底地形,受到来自太平洋和印度洋潮波系统的共同影响,尤其是其几乎封闭的海盆导致潮能几乎都被限制在印尼海内部,这些因素使

**收稿日期:** 2020-04-07

**资助项目:** 国家重点研发计划项目——大气海洋耦合机制、同化方法与数值模式研究(2017YFC1404201);国家自然科学基金项目——印尼海强潮混合特征及其对印尼贯穿流的影响(42076024);国家电网公司科技项目——海底电缆工程高精度多元数据获取及分析技术研究(JYYKJXM[2017]003)

**作者简介:** 魏泽勋(1970—),男,研究员,博士,主要从事潮汐和环流动力学方面研究. E-mail: weizx@fio.org.cn

(李 燕 编辑)

得印尼海成为全球最大的内潮生成海域。全球约 10% 的内潮产生于此,从而引起剧烈的潮致混合<sup>[8]</sup>,并产生显著的天气和气候效应。

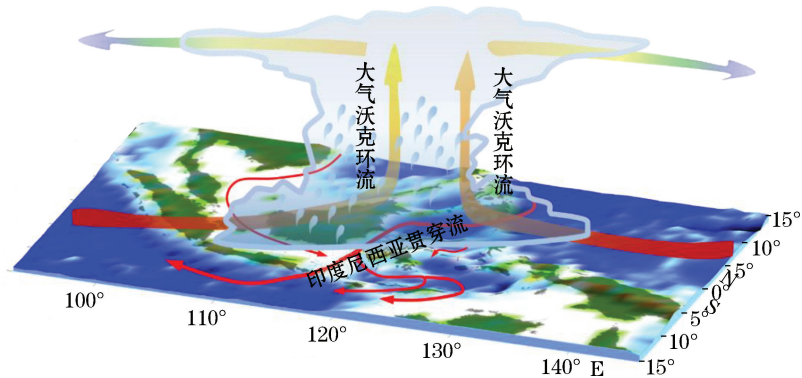


图 1 大气沃克环流和印度尼西亚贯穿流示意图

Fig.1 Schematic diagram of the Walker Circulation and the Indonesian Throughflow

尽管如此,谈到印尼海潮致混合及其产生的动力学和热力学效应,以及对海洋和气候的影响时,大家仍然认为:我们所知甚少,现有研究结论的不确定性很大<sup>[3,9-10]</sup>。我们所面临的困境主要有 2 个:一是缺乏足够的现场观测,难以准确给出印尼海潮致混合特征;二是缺乏针对性的潮致混合表达方式,难以在数值模式中有效刻画印尼海的潮致混合过程。事实上,自 Ffield 和 Gordon<sup>[11]</sup> 揭示印尼海潮致混合特征和 Schiller 等<sup>[12]</sup> 开始在海洋环流模式中考虑印尼海潮致混合效应以来,虽然科学家们做出了大量的尝试,这两个困境却至今仍未被完全解决。本文将对印尼海潮致混合及其在海洋环流和气候模式中的应用的最新研究成果进行概述和展望。

## 1 印尼海潮致混合特征

印尼海域强混合受到关注始于 20 世纪 90 年代的 Arlindo 计划。温盐剖面观测结果显示,太平洋水进入印度尼西亚海域后,北太平洋副热带水(North Pacific Tropical Water)和北太平洋中层水(North Pacific Intermediate Water)特征逐渐变弱,甚至消失,潮致混合在其中起到重要作用<sup>[13-15]</sup>。据估算,垂向扩散系数至少要达到  $10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ ,才能解释太平洋海水在印尼海发生的显著变性,远大于开阔大洋的垂向扩散系数<sup>[13]</sup>。Ffield 和 Gordon<sup>[11]</sup> 基于潮致混合可通过垂向热量输运导致海表周期性降温的观测事实,利用卫星遥感海表温度资料,描述了印尼海潮致混合的特征,指出班达海(Banda Sea)潮致混合最强,其次为塞兰海(Seram Sea)和马鲁古海(Maluku Sea)等印尼内海以及帝汶海(Timor Sea)。但是,随后 Alford 等<sup>[16]</sup> 在班达海的温盐微结构剖面观测结果却显示,班达海混合强度与开阔大洋相仿,远低于 Ffield 和 Gordon<sup>[11,13]</sup> 间接估算的结果。当然,Alford 等<sup>[16]</sup> 也指出,或许 Ffield 和 Gordon<sup>[11]</sup> 的估算方法是正确的,因为单次的个别站位观测可能无法体现班达海混合的全貌。Ffield 和 Robertson<sup>[17]</sup> 通过对抛弃式温度计(expendable bathythermographic, XBT)观测的温度剖面细结构(finestructure)分析,发现在小巽他岛链海峡附近潮致混合反而比班达海和帝汶海内部强。Ray 和 Susanto<sup>[18]</sup> 认为,很可能 Ffield 和 Gordon<sup>[11]</sup> 所使用的早期卫星遥感海表温度资料分辨率和精度太低(水平分辨率  $1^\circ \times 1^\circ$ , 时间分辨率 7 d),不足以准确捕捉约 14 d 的小潮周期,更无法分辨印尼诸多狭窄的海峡:如龙目(Lombok)、翁拜(Ombai)等,因而误导他们得出印尼海潮致混合在班达海等海洋内区最强的结论。于是,他们重新利用 Ffield 和 Gordon<sup>[11]</sup> 的方法,对新的高时空分辨率(水平分辨率  $0.01^\circ \times 0.01^\circ$ , 时间分辨率 1 d)卫星遥感海表温度进行了分析,结果显示,印尼海最强的潮致混合应该发生在海峡附近,特别是小巽他岛链(Lesser Sunda)的龙目(Lombok)、松巴(Sumba)、翁拜(Ombai)海峡,以及苏禄(Sulu)岛链和利法马托拉(Lifamatola)等通道,这与 INDOMIX 现场观测<sup>[19]</sup> 和潮汐数值模拟

的结果吻合<sup>[8,20-21]</sup>。

稀疏的观测无法刻画印尼海潮致混合的空间分布。因此,需要借助数值模拟的手段,一方面对印尼海潮致混合的动力过程与机制进行研究,另一方面获取印尼海潮致混合的时空分布。然而,现有的数值模拟研究多集中于潮能耗散和潮致混合分布特征的研究,缺乏对潮致混合时空特征的定量认识。尽管如此,研究表明,在海洋环流数值模式和气候模式中考虑印尼海强潮混合,仍然能够显著提升模式的模拟性能<sup>[12,22-23]</sup>。

如果能够清晰地揭示印尼海潮致混合的动力机制,显然对准确描述印尼贯穿流海域潮致混合有重要意义。三维斜压潮波数值模式是研究这一问题最为有力的工具。得益于数值模拟技术的发展和高性能计算能力的提升,以及卫星高度计资料同化技术的应用,我们对印尼海潮汐的模拟日渐准确<sup>[24-27]</sup>,基本摸清了印尼海正压潮主要分潮的潮汐分布和潮波传播特征<sup>[28-29]</sup>;开展了印尼海内潮生成、传播和耗散过程的研究,指出生成海域不同的内潮、不同周期的内潮分潮、内潮与正压潮之间均存在复杂的相互作用,因此单分潮和多分潮合成驱动的内潮模拟结果之间存在显著差异<sup>[26,30-31]</sup>。但是,Robsetson<sup>[32]</sup>也指出采用的水平分辨率为 5 km 的潮波数值模式虽然能够较为准确地模拟印尼海这样复杂地形情况下的内潮的生成和大致分布,但不足以准确模拟斜压潮流速,从而影响对潮致混合的估算。最近的研究建立了水平分辨率达  $0.01^\circ \times 0.01^\circ$  (约  $1.1 \text{ km} \times 1.1 \text{ km}$ ) 的印尼海潮波数值模式(MITgcm- $0.01^\circ$ ),能够再现约 95% 的  $M_2$  分潮的内潮能量,并研究了其在印尼海的传播和耗散,指出大约 70% 的正压潮能量转化为内潮(85.5 GW),其中约 96% 的能量在其生成海域耗散,仅 4% 的能量能够向外传播<sup>[21]</sup>。Nugroho 等<sup>[22]</sup>利用水平分辨率为 9 km 的 NEMO2.3/INDO12 印尼海业务化海洋数值预报模式<sup>[33]</sup>,分析了 4 个主要分潮( $M_2, K_1, S_2, O_1$ )第 1 和第 2 斜压模内潮的传播。刘谊等<sup>[34]</sup>建立了水平分辨率  $(1/24)^\circ \times (1/24)^\circ$  (约  $4.6 \text{ km} \times 4.6 \text{ km}$ ) 的印尼海三维正压潮和内潮数值模式,估算了印尼海  $M_2$  和  $K_1$  分潮的内潮能量分布、传播及不同海区能量收支情况。

基于这些模拟研究工作,我们对印尼海域内潮生成、传播及耗散过程有了一定的认识,但对潮致混合本身尚缺乏一致的认识,不同的模拟研究对耗散和混合率的估算存在显著差异<sup>[3]</sup>。仅依靠提高数值模式的空间分辨率,可能仍然无法完全决定定量并准确估算潮致混合这一问题。举例来说,使用 9 km 水平分辨率模式能够产生 75% 的内潮,当分辨率提高至 4 km 时,已经能够产生 90% 的内潮,但对混合估算的准确度提高却很有限<sup>[35-36]</sup>。同时,在耗散方面,NEMO2.3/INDO12 中大部分潮能通过水平动量耗散,而不是垂向过程,与实际观测不符。MITgcm- $0.01^\circ$  潮波模式和 NEMO2.3/INDO12 模式均产生了虚假的数值耗散而非物理耗散,两者分别产生了约 20% 和 40% 的虚假耗散<sup>[8,21]</sup>。此外,在远离内潮生成源地的海域,数值模式仍然表现为强混合,与 INDOMIX 的观测结果不符<sup>[3]</sup>。

## 2 印尼海潮致混合对海洋环境和气候的影响

印尼海地处热带,受强烈太阳辐射和降水的影响,形成了显著的跃层结构,当印尼贯穿流携带太平洋海水进入印尼海后,在潮致混合的作用下与局地海水充分混合<sup>[11,19]</sup>,海水性质发生显著改变后流入印度洋<sup>[15,37]</sup>。随后,大部分印尼贯穿流海水向南流动,作为厄加勒斯溢流(Agulhas Leakage)的主要来源(接近一半)流入大西洋<sup>[6]</sup>。在印尼海,潮致混合改变了印尼贯穿流入流海水的性质,北太平洋热带水和北太平洋中层水的盐度在进入印尼海之前相差约 0.55,这 2 个水团在印尼海充分混合,当流出印尼海进入印度洋时,两者仅相差 0.06<sup>[39]</sup>。

潮致混合不仅是印尼贯穿流水团(Indonesian Throughflow Water)在印尼海变性的主要驱动机制<sup>[9,20,37-38]</sup>,而且它通过改变海水层结,产生浮力效应,导致西太平洋-东印度洋海平面压力梯度,增强了印尼贯穿流<sup>[10]</sup>。此外,潮致混合将温跃层以下的海水卷入混合层,使得海表温度降低约  $0.3 \sim 0.8 \text{ }^\circ\text{C}$ <sup>[22,40-41]</sup>,海洋从大气吸收的热量因此增加  $20 \text{ W/m}^2$ ,大气深对流活动减弱,降水随之减少可达 20%<sup>[24,42]</sup>。由于印尼海及邻近海域大气风场和温跃层深度均对潮致混合有着不可忽视的响应,潮致混合间接地影响着该海域上层海洋热量充放,从而对包括大气季节内振荡(Madden Julian Oscillation, MJO)、季风、印度洋偶极子(Indian



Ocean Dipole, IOD) 和厄尔尼诺-南方涛动 (El Niño—Southern Oscillation, ENSO) 等热带印太气候异常事件均有着重要的调制作用。数值模拟研究也表明, 考虑印尼海的潮致混合能够显著提升气候模式对 MJO, IOD 和 ENSO 的模拟能力<sup>[24,43]</sup>。

### 3 印尼海潮致混合在海洋环流模式中的应用

已有研究表明, 考虑印尼海潮致混合能够大大提升海洋环流和气候模式的模拟预报能力<sup>[24,43]</sup>。因此, 如何在环流和气候模式中恰当地引入潮致混合成为准确模拟印尼贯穿流的关键。通常可以采用两种方法在海洋环流模式中体现潮致混合的作用, 即直接加入潮汐强迫或引入潮致混合参数化方案。

早期的海洋环流采用额外增加垂向混合系数来大致体现潮致混合的影响, 在一定程度上提高了印尼贯穿流的模拟<sup>[12,44]</sup>。如果不考虑潮致混合, 往往难以刻画印尼贯穿流自太平洋流入到印度洋流出过程中温盐性质的改变<sup>[37]</sup>。后来, Koch-Larrouy 等<sup>[20,39]</sup>通过在环流模式中引入 St Laurent 等<sup>[44]</sup>提出的内潮耗散参数化方案, 进一步提升了对印尼贯穿流海域水团性质和层结的模拟效果。Koch-Larrouy 等<sup>[24]</sup>在全球海气耦合模式中引入了内潮耗散参数化方案, 更为真实地体现了印尼海域强混合引起海表降温, 从而影响印尼海域降水的现象。

然而, 现有的潮致混合参数化方案只能在区域和时间平均的意义上取得和加潮汐强迫相当的效果(例如, 引入参数化方案和潮汐强迫模拟得到的区域多年平均温盐剖面是一致的)<sup>[22]</sup>, 缺乏对潮致混合时空变化特征的刻画, 而这些与潮波传播过程密切相关的时空变化恰恰是导致印尼海域上层海温高频变化(约 2 周)的直接原因。

随着计算机计算能力的提升, 开始有研究通过将环流模式与潮波模式耦合来引入正/斜压潮致混合<sup>[8,22,30,45-47]</sup>。引入潮汐强迫后, 印尼海的混合会显著增强, 从而提升对班达海密度层结和印尼贯穿流水团变性的模拟效果<sup>[46]</sup>。但由于在实际计算中, 该方式需要模式水平分辨率足够高(至少为 4 km), 才能模拟出合理的内潮生成与分布情况<sup>[37]</sup>, 理想的水平分辨率需要高达 1 km<sup>[8]</sup>, 时间步长则需要小于 10 s, 这对计算机性能是极大的挑战, 对于全球海洋环流模式和气候模式, 以目前的计算能力基本上是无法实现的。在法国和印尼合作开发的(1/12)°水平分辨率的印尼海业务化海洋模式中<sup>[34]</sup>, 在开边界加入潮汐强迫( $M_2, S_2, N_2, K_2, K_1, O_1, P_1, Q_1, M_f, M_m$  和  $M_4$  共 11 个分潮)的同时, 也加入了 Koch-Larrouy 等<sup>[20]</sup>所使用的内潮混合参数化方案, 一定程度上缓解了环流模式与潮波模式耦合计算时对模式水平分辨率要求过高的问题。

### 4 结论与展望

印尼海位于西太平洋和东印度洋之间的赤道地区, 该海域岛屿众多, 岸线复杂, 海底地形崎岖陡峭, 再加上从太平洋和印度洋传入的巨大潮汐能量, 使得印尼海成为世界上潮汐、潮流最复杂的海域之一。在印尼海域, 大量的潮能转化为内潮, 为混合提供能量来源, 导致印尼海域发生较强的潮致混合, 明显改变印尼贯穿流的温度、盐度以及流速的垂向结构, 从而影响印尼贯穿流流量和热量、淡水的运输; 此外, 印尼海域多个分潮之间存在相互作用和能量传递, 再加上强烈的潮致混合, 直接影响印尼海域的混合过程和海表温度。印尼贯穿流不仅是连接热带太平洋和印度洋的唯一海洋通道, 还是全球热盐环流的重要组成部分, 对维持大洋物质和能量平衡有着重要意义; 同时, 印尼海域是影响亚澳季风系统的关键海域, 其海温变化与亚澳季风爆发显著相关。因此, 研究印尼海域潮汐、潮流特征及潮致混合过程, 不仅有助于提高对印尼贯穿流的认识, 对区域和全球环流及气候变化也有重要的科学意义。

印尼海处于多国共同管制的政治局势下, 岛屿众多、地形复杂, 且渔业活动频繁, 在印尼海开展现场观测困难重重。尽管如此, 过去 20 余年间, 仍有数次较大规模的联合科学考察, 如美国和印度尼西亚(简称印尼)联合开展的 Arlindo 观测计划、美国、荷兰、澳大利亚、法国和印尼五国联合发起的 INSTANT(International

Nusantara Stratification and Transport) 国际观测计划等。2006 年,由我国主导的中-印尼国际合作项目 SITE(South China Sea-Indonesian Seas Transport/Exchange)启动<sup>[48-50]</sup>,于 2007 年至 2016 年在卡里马塔、巽他海峽布放海床基,开展海流剖面和底层温盐的定点连续观测<sup>[50]</sup>。但是针对印尼海混合的观测仍然极为有限,除 Alford 等<sup>[16]</sup>在班达海使用模块化微结构剖面仪(Modular Microstructure Profiler)开展的单站混合观测外,仅法国于 2010 年在印尼贯穿流流经海域开展了 5 个站位的流速微结构剖面(Velocity Microstructure Profiler, VMP6000)混合观测,即 INDOMIX 观测<sup>[19]</sup>。最近,我国与印尼在 TIMIT(The Transport, Internal waves and Mixing in the Indonesian Throughflow regions and impacts on seasonal fish migration)国际合作项目的支持下组织联合考察航次,利用 Turbomap 湍流仪获取了望加锡和龙目海峡 17 站的混合观测<sup>[50]</sup>;2019 年,中-印尼国际合作项目 TRIUMPH(Throughflow of Indonesian seas, Upwelling and Mixing Physics)启动,并于同年 11 月在望加锡、龙目海峡开展联合考察航次,利用 MSS60 湍流剖面仪获取了 18 个站位的湍流观测(图 2)。基于 TIMIT 和 TRIUMPH 湍流观测的初步分析显示,龙目海峡附近存在强烈的上层混合,破坏了原有的热力结构。在 100 m 以浅的上层,龙目海峡南部湍流混合强度比北部高 1 个数量级,为 Ray 和 Susanto<sup>[42]</sup>指出的龙目海峡南部混合强烈提供了佐证。但是,观测结果也表明,100 m 以下湍流混合强度在龙目海峡南北处于同一量级,这一深度是印尼贯穿流输运北太平洋热带水的主要水层,这与印尼贯穿流穿越龙目海峡后北太平洋热带水体性质的变化并不一致。可见,目前以离散站点瞬时测量为主的湍流观测存在很大的局限性和不确定性,需要在空间上开展加密观测,在时间上开展定点湍流的连续观测(至少一个大小潮周期),才能客观、准确地刻画印尼海潮致混合的时空分布特征。

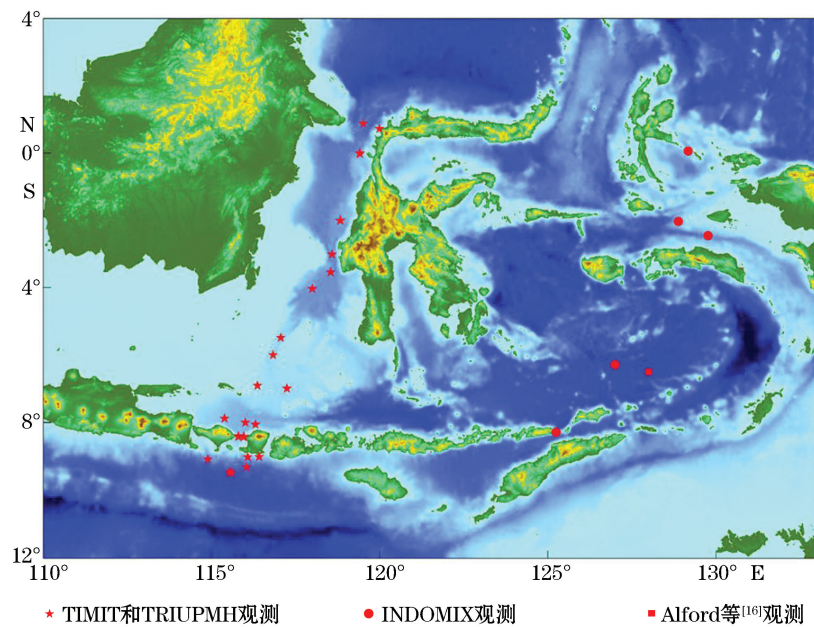


图 2 印尼海湍流混合现场观测站位

Fig.2 Stations of the in situ measurement of mixing in the Indonesian Seas

在潮致混合如何应用于海洋环流数值模式这一难题方面,最理想的解决方式是与潮波数值模式耦合,但其超高的水平分辨率要求所带来的计算量剧增对现有的计算能力仍是极大的挑战,如果对于全球海洋和气候模式而言则更加难以实现。Koch-Larrouy 等<sup>[20]</sup>提供的参数化方法只能取得平均意义下的潮致混合效果,无法刻画潮致混合应当具有与潮汐周期相联系的周期性变化这一特征。最近,Wei 等<sup>[51]</sup>基于调和分析方法,建立了潮致混合的调和参数化方案(Harmonic Analyzed Parameterization of Tide-induced Mixing, HAT),能够鲜明地刻画潮致混合与潮周期密切相关的周期性变化特征,并将其应用于黄海冷水团环流的模拟研究,取得了和与潮波数值模式耦合相当的模拟效果,且计算效率大大提高。但由于印尼海斜压

潮占主导地位,Wei 等<sup>[51]</sup>所建立的潮致混合参数化方案仅考虑了正压潮的情况,故有一定的局限性。

总体而言,目前印尼海的混合现场观测主要是瞬时的零星站点测量,在空间上未能覆盖印尼贯穿流主要入流和出流通道;在时间上缺少至少 1 个大小潮周期(15 d)的 24 h 连续观测。鉴于印尼海地形变化剧烈且存在强烈的潮致混合,这些观测无法客观准确地刻画该海域混合的时空特征;另一方面,现在广泛使用的潮致混合参数化方案和加潮强迫分别存在准确度刻画不足和计算效率太低的问题。这些问题在很大程度上制约了海洋模式对印尼海环流的模拟能力。因此,随着对印尼海海洋动力过程及其环境和气候效应研究的不断深入,迫切需要在时间和空间上加强对印尼海混合的观测,同时从印尼海潮致混合产生的原理出发,既要考虑正压潮引起的底层混合增强,也要考虑斜压潮引起的水体混合增强,结合观测事实,给出能够客观描述印尼海潮致混合的参数化方案,用于海洋环流和气候模式。此外,印尼贯穿流是全球大洋传送带的关键环节,而后者被认为是气候变化的触发器<sup>[5]</sup>,而且印尼海是大气沃克环流上升支发生的海域,海气相互作用活跃,印尼海潮混合如何通过影响印尼贯穿流和局地海气相互作用产生大尺度的气候效应,也需要进一步研究。

### 参考文献(References):

- [1] GORDON A L. Oceanography of the Indonesian Seas and their throughflow[J]. *Oceanography*, 2005, 18(4): 14-27.
- [2] DU Y, FANG G H. 2011. Progress on the study of the Indonesian Seas and Indonesian Throughflow[J]. *Advances in Earth Science*, 2011, 26(11): 1131-1142. 杜岩, 方国洪. 印度尼西亚海与印度尼西亚贯穿流研究概述[J]. *地球科学进展*, 2011, 26(11): 1131-1142.
- [3] SPRINTALL J, GORDON A L, WIJFFELS S E, et al. Detecting change in the Indonesian Seas[J]. *Frontiers in Marine Science*, 2019, 6: 257, DOI: 10.3389/fmars.2019.00257.
- [4] GORDON A L. Inter-ocean exchange of thermocline water[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1986, 91(C4): 5037-5046.
- [5] BROECKER W. The great ocean conveyor[J]. *Oceanography*, 1991, 4(2): 79-89.
- [6] DURGADOO J V, RUEHS S, BIASTOCH A, et al. Indian Ocean sources of Agulhas leakage[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2017, 122(4): 3481-3499.
- [7] GARRETT C. Internal tides and ocean mixing[J]. *Science*, 2003, 301(5641): 1858-1859.
- [8] NAGAI T, HIBIYA T. Internal tides and associated vertical mixing in the Indonesian Archipelago[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2015, 120(5): 3373-3390.
- [9] NAGAI T, HIBIYA T, BOURUET-AUBERTOT P. Nonhydrostatic simulations of tide-induced mixing in the Halmahera Sea: a possible role in the transformation of the Indonesian Throughflow waters[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2017, 122(11): 8933-8943.
- [10] SASAKI H, KIDA S, FURUE R, et al. An increase of the Indonesian Throughflow by internal tidal mixing in a high-resolution quasi-global ocean simulation[J]. *Geophysical Research Letters*, 2018, 45(16): 8416-8424.
- [11] FFIELD A, GORDON A L. Tidal mixing signatures in the Indonesian Seas[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 1996, 26(9): 1924-1937.
- [12] SCHILLER A, GODFREY J S, MCLINTOSH P C, et al. Seasonal near-surface dynamics and thermodynamics of the Indian Ocean and Indonesian Throughflow in a global ocean general circulation model[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 28(11): 2288-2312.
- [13] FFIELD A, GORDON A L. Vertical mixing in the Indonesian thermocline[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 1992, 22(2): 184-195.
- [14] GORDON A L, FFIELD A, ILAHUDE A G. Thermocline of the Flores and Banda Seas[J]. *Journal of Geophysical Research*, 99(C9): 18235-18242.
- [15] ILAHUDE A G, GORDON A L. Thermocline stratification within the Indonesian Seas[J]. *Journal of Geophysical Research*, 101(C5): 12401-12409.
- [16] ALFORD M H, GREGG M C, ILYAS M. Diapycnal mixing in the Banda Sea: results of the first microstructure measurements in the Indonesian Throughflow[J]. *Geophysical Research Letters*, 1999, 26(17): 2741-2744.
- [17] FFIELD A, ROBERTSON R. Indonesian Seas finestructure variability[J]. *Oceanography*, 2005, 18(4): 108-111.
- [18] RAY R D, SUSANTO R D. Tidal mixing signatures in the Indonesian Seas from high-resolution sea surface temperature data[J]. *Geophysical Research Letters*, 2016, 43(15): 8115-8123.

- [19] KOCH-LARROUY A, ATMADIPOERA A, VAN BEEK P, et al. Estimates of tidal mixing in the Indonesian archipelago from multi-disciplinary INDOMIX in-situ data[J]. *Deep-Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 2015, 106: 136-153.
- [20] KOCH-LARROUY A, MADEC G, BOURUET-AUBERTOT P, et al. On the transformation of Pacific water into Indonesian Throughflow water by internal tidal mixing[J]. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34(4): L04604, DOI: 10.1029/2006GL028405.
- [21] NUGROHO D, KOCH-LARROUY A, GASPAR P, et al. Modelling explicit tides in the Indonesian Seas: an important process for surface sea water properties[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2018, 131: 7-18.
- [22] KOCH-LARROUY A, LENGAINNE M, TERRAY P, et al. Tidal mixing in the Indonesian Seas and its effect on the tropical climate system[J]. *Climate Dynamics*, 2010, 34(6): 891-904.
- [23] LIANG L L, XUE H J, SHU Y Q. The Indonesian Throughflow and the circulation in the Banda Sea: a modeling study[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2019, 124: 3089-3106.
- [24] EGBERT G D, EROFEEVA S Y. Efficient inverse modeling of barotropic ocean tides[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2002, 19: 183-204.
- [25] RAR R D, EGBERT G, EROFEEVA S. A brief overview of tides in the Indonesian Seas[J]. *Oceanography*, 2005, 18(4): 74-79.
- [26] ROBERTSON R, FFIELD A. Baroclinic tides in the Indonesian Seas: tidal fields and comparisons to observations[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2008, 113: C07031, DOI:10.1029/2007JC004677.
- [27] ANSONG J K, ARBIC B K, BUJISMAN M C, et al. Indirect evidence for substantial damping of low-mode internal tides in the open ocean[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2015, 120: 6057-6071.
- [28] TENG F, FANG G H, WANG X Y, et al. Numerical simulation of principal tidal constituents in the Indonesian adjacent seas[J]. *Advances in Marine Science*, 2013, 31(2): 166-179. 滕飞, 方国洪, 王新怡, 等. 印度尼西亚近海潮汐潮流的数值模拟[J]. *海洋科学进展*, 2013, 31(2): 166-179.
- [29] WANG Y G, WEI Z X, FANG G H, et al. Numerical study of tides in the Indonesia Seas[J]. *Haiyang Xuebao*, 2014, 36(3): 1-8. 王永刚, 魏泽勋, 方国洪, 等. 印度尼西亚海域潮波的数值研究[J]. *海洋学报*, 2014, 36(3): 1-8.
- [30] ROBERTSON R, FFIELD A.  $M_2$  baroclinic tides in the Indonesian Seas[J]. *Oceanography*, 2005, 18: 62-73.
- [31] ROBERTSON R. Tidal currents and mixing at the INSTANT mooring locations[J]. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, 2010, 50(2): 331-373.
- [32] ROBERTSON R. Modeling internal tides over Fieberling Guyot: resolution, parameterization, performance[J]. *Ocean Dynamics*, 2006, 56: 430-444.
- [33] TRANCHANT B, REFFRAY G, GREINER E, et al. Evaluation of an operational ocean model configuration at 1/12 degrees spatial resolution for the Indonesian seas (NEMO2.3/INDO12)-Part 1: Ocean physics[J]. *Geoscientific Model Development*, 2016, 9(3): 1037-1064.
- [34] LIU Y, WANG X W, PENG S Q. On the generation and propagation of internal tides in the Indonesian Seas[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2018, 37(2): 1-96. 刘谊, 王晓玮, 彭世球. 印度尼西亚海内潮生成及传播过程研究[J]. *热带海洋学报*, 2018, 37(2): 1-96.
- [35] NIWA Y, HIBIYA T. Estimation of baroclinic tide energy available for deep ocean mixing based on three-dimensional global numerical simulations[J]. *Journal of Oceanography*, 2011, 67(4): 493-502.
- [36] NIWA Y, HIBIYA T. Generation of baroclinic tide energy in a global three-dimensional numerical model with different spatial grid resolutions[J]. *Ocean Modelling*, 2014, 80: 59-73.
- [37] HATAYAMA T. Transformation of the Indonesian throughflow water by vertical mixing and its relation to tidally generated internal waves[J]. *Journal of Oceanography*, 2004, 60(3): 569-585.
- [38] ATMADIPOERA A, MOLCARD R, MADEC G, et al. Characteristics and variability of the Indonesian Throughflow water at the outflow straits[J]. *Deep-Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 2009, 56(11): 1942-1954.
- [39] KOCH-LARROUY A, MADEC G, LUDICONE D, et al. Physical processes contributing to the water mass transformation of the Indonesian Throughflow[J]. *Ocean Dynamics*, 2008, 58: 275-288.
- [40] KIDA S, WIJFFELS S. The impact of the Indonesian Throughflow and tidal mixing on the summertime sea surface temperature in the western Indonesian Seas[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2012, 117: C09007, DOI: 10.1029/2012JC008162.
- [41] RAY R D, SUSANTO R D. A fortnightly atmospheric 'tide' at Bali caused by oceanic tidal mixing in Lombok Strait[J]. *Geoscience Letters*, 2019, 6, DOI: 10.1186/s40562-019-0135-1.
- [42] JOCHUM M, POTESMRA J. Sensitivity of tropical rainfall to Banda Sea diffusivity in the community climate system model[J]. *Journal of Climate*, 2008, 21(23): 6445-6454.
- [43] SPRINTALL J, GORDON A L, KOCH-LARROUY A, et al. The Indonesian Seas and their role in the coupled ocean-climate system



- [J]. *Nature Geoscience*, 2014, 7: 487-492.
- [44] ST LAURENT L C, SIMMONS H L, JAYNE S R. Estimating tidally driven mixing in the deep ocean[J]. *Geophysical Research Letters*, 2002, 29(23): 2106, DOI:10.1029/2002GL015633.
- [45] SCHILLER A. Effects of explicit tidal forcing in an OGCM on the water-mass structure and circulation in the Indonesian Throughflow region[J]. *Ocean modelling*, 2004, 6(1): 31-49.
- [46] KARTADIKARIA A R, MIYAZAWA Y, VARLAMOV S M, et al. Ocean circulation for the Indonesian Seas driven by tides and atmospheric forcings; comparison to observational data[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2011, 116: C09009, DOI: 10.1029/2011JC007196.
- [47] CASTRUCCIO F S, CURCHITSER E N, KLEYPAS J A. A model for quantifying oceanic transport and mesoscale variability in the coral triangle of the Indonesian/Philippines Archipelago[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2013, 118: 6123-6144.
- [48] FANG G H, SUSANTO R D, WIRASANTOSA S, et al. Volume, heat, and freshwater transports from the South China Sea to Indonesian Seas in the boreal winter of 2007-2008[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2010, 115: C12020, DOI: 10.1029/2010JC006225.
- [49] SUSANTO R D, FANG G H, SOESILO I, et al. New surveys of a branch of the Indonesian Throughflow[J]. *Eos Transactions AGU*, 2010, 91(30): 261-263.
- [50] WEI Z X, LI S J, SUSANTO R D, et al. An overview of 10-year observation of the South China Sea branch of the Pacific to Indian Ocean Throughflow at the Karimata Strait[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2019, 38(4): 1-11.
- [51] WEI Z X, SUN J C, TENG F, et al. A harmonic analyzed parameterization of tide-induced mixing for ocean models[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2018, 37(7): 1-7.

## Progress and Prospect on the Study of Tidal Mixing in the Indonesian Seas

WEI Ze-xun<sup>1,2</sup>, XU Teng-fei<sup>1,2</sup>, WANG Yong-gang<sup>1,2</sup>, LI Shu-jiang<sup>1,2</sup>, TENG Fei<sup>1,2</sup>

(1. *First Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Qingdao 266061, China;*

2. *Laboratory for Regional Oceanography and Numerical Modeling, Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology (Qingdao), Qingdao 266237, China)*

**Abstract:** The Indonesian Seas, which is located between the tropical Pacific and Indian Ocean, is one of the largest internal tide generation sites in global oceans. The dissipation of internal tides leads to strong tidal mixing, thereby reducing sea surface temperature in the Indonesian Seas and induce significant climate response through active air-sea interaction. Moreover, the tidal mixing also plays important roles in regulating the Indonesian Throughflow and related mass and energy transport from the Pacific to the Indian Ocean. Since the Arlindo Project, it is realized that the exceptionally strong tidal mixing in the Indonesian Seas is important for improving the simulation of the ocean circulation in numerical models. However, owing to insufficient in situ measurements of mixing and incomplete tidal mixing parametrization scheme, quantitative analysis on the distribution and variability of tidal mixing in the Indonesian Seas and sufficient consideration of tidal mixing in ocean and climate models are yet to be resolved. In this paper, the latest progress on the tidal mixing in the Indonesian Seas and its application in ocean and climate models are reviewed and the prospect of this topic is also proposed.

**Key words:** Indonesian Seas; tidal mixing; Indonesian Throughflow; numerical model

**Received:** April 07, 2020