

# 印度尼西亚贯穿流及其周边海域季节内变化研究综述

## Progress on the study of oceanic intraseasonal variability in the Indonesian throughflow and its adjacent regions

曹国娇<sup>1,2</sup>, 魏泽勋<sup>1,2</sup>, 徐腾飞<sup>1,2</sup>, 李淑江<sup>1,2</sup>

(1. 国家海洋局第一海洋研究所, 山东 青岛 266061; 2. 青岛海洋科学与技术国家实验室区域海洋动力学和数值模拟功能实验室, 山东 青岛 266061)

中图分类号: P731.2 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2015)10-0125-09  
doi: 10.11759/hyxx20141211

印度尼西亚贯穿流(Indonesian Throughflow, ITF)是全球气候系统和热盐环流的一个重要组成部分,是太平洋与印度洋在低纬度进行水体及热量交换的唯一通道,对维持全球大洋物质、动量和能量平衡有重要作用<sup>[1]</sup>。最近的研究表明,ITF 还可能是热带印度洋年际异常信号进入赤道太平洋的重要海洋信号通道,对热带印-太气候变异有着显著影响<sup>[2]</sup>。此外,ITF 及其附近海域也是大气季节内振荡(Madden-Julian Oscillation, MJO)最为活跃的区域<sup>[3]</sup>。MJO 一方面引起表层海温的剧烈变化,影响印度季风的爆发及持续<sup>[4]</sup>,进而通过降水调节 ITF 及其周边海域海表温盐分布,引起 ITF 表层流速变化;另一方面,在季风转换期,赤道中印度洋 MJO 激发产生赤道 Kelvin 波继而向东传播,并在印度洋东边界以沿岸 Kelvin 波的形式沿苏门答腊-爪哇岛链继续传播,最远可以穿过龙目海峡抵达望加锡海峡,影响 ITF 在该海峡处的流量<sup>[5]</sup>。早先,由于缺乏 ITF 海域高时间分辨率的观测资料,针对 ITF 变化的研究多集中在季节到年际尺度,仅有少数数值模拟结果讨论了 ITF 海域的季节内变化。随着观测资料不断丰富,特别是 INSTANT(International Nusantara Stratification and Transport)国际计划的实施,积累了 ITF 海域大量的温盐及海流高时间分辨率的连续观测资料。对这些观测资料的分析显示,在 ITF 主要流经海峡(如龙目、翁拜、望加锡海峡),存在明显的海洋季节内信号,该信号在望加锡海峡处最大可以减弱 2 Sv(1 Sv=10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>/s)的南向海水输送<sup>[6]</sup>。印尼群岛海域地形复杂,在考虑印尼群岛部分海域水深较浅和群岛区域复杂的岸线形状这些客观条件情况下,短时间尺度的海流

波动对局地的海水混合以及 ITF 的水团输运产生的影响是不容小觑的,因此,加强这一区域季节内时间尺度的信号的研究是很有必要的。但是这一研究的开展也存在一定的困难,主要是因为这一海域季节内变化过程比较复杂,复杂性体现在以下几点:第一,这一区域存在 MJO,海洋表层有很强的风信号,大气的直接作用对我们观测得到的季节内信号的影响程度到底有多大,我们不得而知;第二,印尼群岛处在赤道波导和沿岸波导的传播路径上,因此海洋的环流不仅受制于局地的表层风,还会受到远处的表层风强迫的影响;第三,这一区域复杂的岸线形状,既能够调节流的波动也会加强季节内波段的流的波动信号<sup>[7]</sup>。经过几十年坚持不懈的努力,我们对于这一区域季节内信号的认识有了很大的提升,但是由于在一些关键海峡(巽他海峡、卡里马塔海峡)观测资料匮乏,使得我们对该区域季节内变化缺乏整体认识,季节内信号在进入印尼海后的传播特征和机制也尚未明晰。值得期待的是,正在进行中的 SITE(The South China Sea-Indonesian Sea Transport/Exchange)计划在巽他和卡里马塔海峡开展观测,

收稿日期: 2014-12-11; 修回日期: 2015-03-03

基金项目: 国家自然科学基金委员会-山东省人民政府联合资助海洋科学研究中心项目(U1406404); 国家自然科学基金青年基金项目—太平洋-印度洋贯穿流南海分支与印尼贯穿流的相互作用及气候效用(41306031); 中印尼海上合作基金项目-中印尼海洋与气候中心及联合观测站建设(YZ0114003); 中国博士后科学基金资助项目(2014M561883); 山东省博士后创新项目专项资金(201403019)

作者简介: 曹国娇(1990-),女,山东泰安人,硕士研究生,主要从事物理海洋学研究,电话: 15165286876, Email: caoguoqiao@fio.org.cn; 魏泽勋,通信作者,研究员,主要从事海洋环流、数值模拟和资料同化的研究,电话: 0532-88966225, Email: weizx@fio.org.cn

有望能对这一区域季节内信号的研究进行补充。

## 1 季节内变化特征

季节内变化不只在大气中,在海洋中也是极为普遍的现象。大气 MJO 不仅在 ITF 及其周边海域极为活跃,通过降水影响海表温度的季节内变化;而且由于地处太平洋与印度洋交汇海区,它同时受到来自两个大洋大尺度海洋波动过程的影响,是太平洋和印度洋波导汇聚的海区<sup>[8-9]</sup>。一方面,来自太平洋的 Rossby 波穿越班达海进入热带东南印度洋<sup>[10]</sup>;另一方面,起源于赤道中印度洋的季节内赤道 Kelvin 波沿苏门答腊-爪哇岛链沿岸向东传播,在岛链缺口处(如龙目、翁拜海峡等)进入印尼海并抵达班达海西部和望加锡海峡<sup>[11]</sup>。图 1 给出了过去基于现场观测资料分析所发现的海洋季节内信号出现的海域(相关参考文献见表 1),从中我们

可以看出,在赤道印度洋<sup>[12]</sup>、苏门答腊岛<sup>[13]</sup>以及爪哇岛沿岸<sup>[14-16]</sup>都探测到了明显的季节内信号,对于印尼群岛的几个出流海峡, Molcard 等<sup>[17]</sup>最早在 1996 年在帝汶通道发现了显著周期为 20~60 d 的季节内信号,之后 Chong 等<sup>[18]</sup>对东印尼群岛的五个出流海峡(龙目海峡、松巴海峡、萨武海峡、翁拜海峡、帝汶通道)的海洋变化进行研究,发现这些海峡处均存在 30~90 d 显著周期的季节内变化,随后关于这几个海峡季节内变化的研究也逐渐丰富起来<sup>[19-20]</sup>。Field 等<sup>[21]</sup>对海表温度资料的分析表明,印尼海大部分海域海表温度存在 60 d 左右的季节内振荡,并认为这是由月平均的潮汐变化或 MJO 引起的。验潮站水位资料的分析结果显示,爪哇南岸沿岸水位存在 40~60 d 的季节内振荡,并推测这一季节内变化可能与来自赤道中印度洋的季节内 Kelvin 波强迫有关<sup>[15]</sup>。

表 1 前人研究中在 ITF 及其周边海域观测到的海洋季节内信号

观测地点	显著周期	作者
帝汶通道	20~60 d	Molcard 等 <sup>[17]</sup>
爪哇岛沿岸	40~60 d	Arief 和 Murray <sup>[15]</sup>
爪哇岛南部海域	60 d	Bray 等 <sup>[14]</sup>
80°E 附近的赤道印度洋	15 d	Reppin 等 <sup>[12]</sup>
东印尼群岛的五个出流海峡	30~90 d	Chong 等 <sup>[18]</sup>
赤道 90°E 处	10~20 d 和 30~50d	Masumoto 等 <sup>[24]</sup>
苏门答腊岛和爪哇岛沿岸的四个验潮站以及印尼海的两个观测点	北方夏天时为 20~40 d 北方冬天时为 60~90 d	Iskandar 等 <sup>[13]</sup>
龙目海峡、望加锡海峡	45~90 d	Pujiana 等 <sup>[19]</sup>
龙目海峡、翁拜海峡和帝汶通道	表层和温跃层海流都有丰富的季节内变化,龙目和翁拜海峡 30~70 d 的周期最显著,帝汶通道 30~50 d 和 80 d 周期最显著	刘凯等 <sup>[20]</sup>
南爪哇流	季节内时间尺度的显著周期为 50 d 和 60 d	董玉杰等 <sup>[16]</sup>

前人利用现场定点观测资料仅给出了固定站位处海洋季节内变化频率特征,指出在 ITF 主要海峡通道存在约 20~90 d 的季节内变化,利用卫星高度计资料则可以看到海洋季节内变化在整个海域的分布情况。图 2 给出了 21~91 d 带通滤波的卫星高度计海表高度异常方差分布,所使用的海表高度异常数据来自 AVISO(Archiving, Validation, and Interpretation of Satellite Oceanography)周平均的延时更新全球海表面高度资料,水平分辨率为  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 。由图可见,在苏门答腊-爪哇岛链西南沿岸季节内变化方差较大,意味着这一海域海表高度异常存在显著的季节内变化,这与前人的研究结果是一致的;同时,在爪哇离岸处约  $9^\circ \sim 12^\circ \text{S}$  海表高度异常季节内变化也

具有较大方差,这可能与爪哇上升流的变化有关;另外,在巽他、卡里马塔、龙目和望加锡海峡的海表高度异常也存在显著的季节内变化。相比之下,海表高度异常季节内变化在爪哇海和班达海偏弱。

除了海表高度的季节内变化,海表温度也存在季节内时间尺度的变化。在研究 MJO 与印-太暖池之间相互作用的过程中,Shinoda 等<sup>[22]</sup>发现 MJO 会带来季节内时间尺度的海表温度变化,在印尼海区域这一变化的振幅为  $0.35^\circ \text{C}$ ,在印度洋为  $0.15^\circ \text{C}$ ,季节内信号东传的速度约为  $4 \text{ m/s}$ ,与 Iskandar 等<sup>[15]</sup>计算得到的海表高度异常东传速度在  $1.5 \sim 2.86 \text{ m/s}$  的结果是存在一定差异的,这意味着二者东传的方式不同。Wijffels 等<sup>[10]</sup>对抛弃式海水温度测量仪

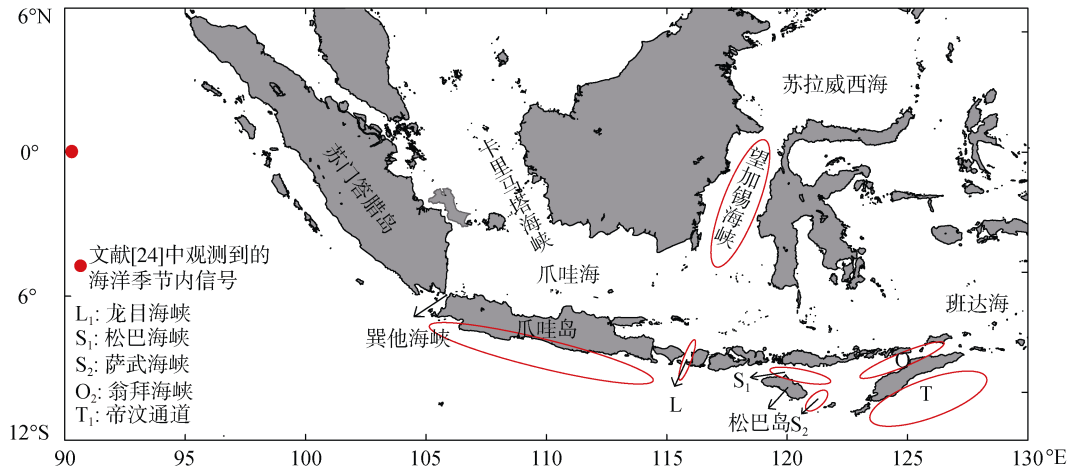


图1 观测到海洋季节内信号的海域

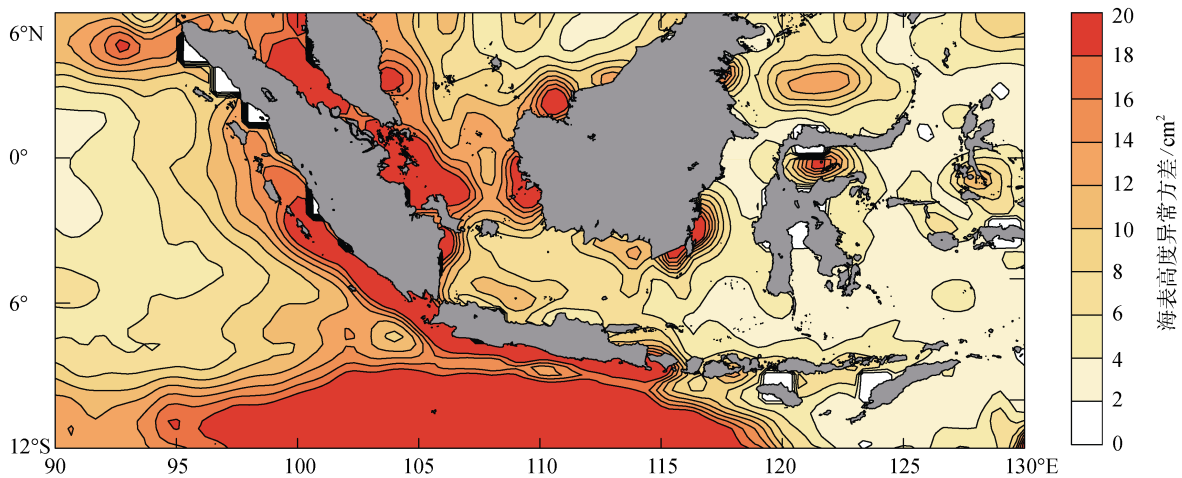


图2 ITF 及其周边海域 21~91 d 滤波后海表高度异常方差分布(1993~2012 年)(单位:  $\text{cm}^2$ )

(expendable bathythermography, XBT)断面资料的分析表明, ITF 出口处海温存在显著的季节内振荡。Hu 等<sup>[23]</sup>在 2013 年利用 Argo 观测资料对全球海洋温度的季节内波动进行了研究, 他们发现热带印度洋温跃层海温存在全球最大振幅的季节内变化, 最大值达到  $1.2^\circ\text{C}$ 。

在掌握了季节内信号的空间分布特征后, 前人又在垂直方向上进一步拓展了对于季节内信号的研究, 探究了它的垂向特征。Masumoto 等<sup>[24]</sup>采用  $90^\circ\text{E}$  赤道处连续 11 个月的定点观测资料, 对赤道东印度洋的纬向流与经向流分别进行研究, 给出了它们的垂向结构和周期。结果表明, 虽然纬向流的大部分能量只限于 120 m 以浅, 但从表层到 390 m 都存在 30~50 d 的显著周期, 经向流在 100 m 以浅的显著周期为 10~20 d。

此外, 季节内信号随时间的变化也是前人研究

的重点。Iskandar 等<sup>[13]</sup>从苏门答腊岛和爪哇岛沿岸以及印尼海内部的验潮站获得的海表面高度数据中发现苏门答腊岛和爪哇岛南部沿岸的海表高度信号存在明显的季节内变化, 并且这一季节内变化的显著周期还存在季节性的变动, 具体表现为: 在北半球夏天, 季节内信号的显著周期为 20~40 d; 在北半球冬天, 季节内信号的显著周期为 60~90 d。

众所周知, 印尼海是太平洋和印度洋的衔接海区, 同时受到两个大洋大尺度海洋波动过程的影响, 是太平洋-印度洋波导汇聚的海区, 存在明显的海洋季节内信号, 这些信号能够显著影响 ITF 的流量, Arief 等<sup>[15]</sup>对验潮站水位资料的分析显示爪哇岛南岸存在 40~60 d 的季节内信号, 这一信号对龙目海峡处 ITF 流量有直接影响。同时, 这一海域的季节内信号与大尺度海洋过程也有着密切的联系, 杜岩等<sup>[25]</sup>在研究 2006~2008 年期间的印度洋偶极子 (Indian

Ocean Dipole, IOD)事件时发现印尼海域季节内信号对IOD事件的演化至关重要。

目前所使用的观测资料大致有两个来源,一是来自卫星高度计,这种资料的优势在于它的实时性以及空间覆盖范围广。研究者可以利用卫星高度计的资料有效地追踪沿着赤道和苏门答腊岛、爪哇岛沿岸的季节内信号的传播。但是当信号传播到龙目海峡以东或者进入到印尼海以及沿着小巽他群岛传播时,卫星高度计由于受到岛屿的影响,很难再准确捕捉到季节内信号。二是定点观测或者走航观测资料,除了在之前的介绍中提到过的一些零星的观测之外,有一个观测项目我们不得不提,那就是INSTANT项目,它的实施很好地填补了定点观测的空白。该计划对ITF的主要入口和出口处的海流进行为期3a的全水深海流观测(2003年12月~2006年12月)。基于对这些数据的分析,ITF的主要出流海峡,如龙目海峡(Lombok Strait)、翁拜海峡(Ombai Strait)和帝汶通道(Timor Passage)以及作为太平洋和印度洋连通纽带的望加锡海峡(Makassar Strait)的季节内变化特征,特别是其垂直结构被进一步揭示。Pujiana等<sup>[19]</sup>指出望加锡海峡温跃层存在45~90d周期的季节内变化,而这一季节内变化是来自龙目海峡的在远处风强迫作用下产生的斜压波和来自苏拉威西海的季节内变化共同作用的结果。他又在之后从能量传播、能量均分以及非频散关系等方面论证了从龙目海峡传来的斜压波就是Kelvin波,它是沿着100m等深线从龙目海峡传播到望加锡海峡的<sup>[6]</sup>。Drushka等<sup>[26]</sup>还采用INSTANT取得的速度和温度数据来探究季节内Kelvin波的次表层结构,并且使用海表面高度数据来追踪Kelvin波的传播路径,发现它可以一直向东传播到达萨武海峡。

## 2 季节内信号的激发机制

Qiu等<sup>[7]</sup>在1999年研究发现苏门答腊岛和爪哇岛沿岸的季节内信号是受周期为50~85d的大气振动控制的。这些信号的发源地可以追踪到赤道中印度洋,那里的季节内风场波动有着相同的周期。并指出这种由远处的风诱发的季节内信号沿着苏门答腊岛和爪哇岛传播时会对龙目海峡产生很大的影响,但是对其东边的翁拜海峡和帝汶通道却没有直接的影响。除此之外,他们还发现帝汶通道表层存在显著周期为30~35d的波动,模式模拟结果显示它的功率谱还有另外一个峰值出现在85d附近。结果表明,这

一区域的季节内信号主要是由帝汶通道局地的、沿着海岸的风引起的,虽然帝汶通道处在上游苏拉威西海和沿着苏门答腊岛、爪哇岛沿岸的季节内信号的传播路径上,但是这些因素的影响远没有风的影响重要。Iskandar等<sup>[13]</sup>2005年采用由每日的风应力数据驱动的模式,实验结果也证实东赤道印度洋上空的风和苏门答腊岛、爪哇岛南部沿岸的风的强迫对于解释苏门答腊岛和爪哇岛的季节内变化是必不可少的。

总结上面由风的强迫产生季节内变化的区域可以发现,75°E以西的区域对于季节内变化的能量的贡献很小,75°~100°E的赤道印度洋上空的风是强迫产生季节内变化的主要区域,100°~115°E之间苏门答腊岛和爪哇岛的沿岸风对于在ITF区域观测到的季节内信号同样起到了重要的作用。

风强迫是上述区域季节内变化的主要生成机制,但并不是季节内信号唯一的激发机制,在苏拉威西海入口处观测到的强烈的50d的振动则是由Rossby波在这个海域的共振引起的,由于棉兰老流向东弯曲,流进了半封闭的苏拉威西海,这个气旋性涡旋衰弱的周期为50d,与半封闭的苏拉威西海盆的主要的Rossby波的周期相吻合,从而产生Rossby波共振。这种苏拉威西海的50d的振荡对于望加锡海峡和班达海的海流有重要的影响,但是对于龙目海峡和翁拜海峡的影响并不大<sup>[7]</sup>。

Iskandar等<sup>[13]</sup>使用TOPEX/Poseidon卫星高度计资料研究苏门答腊岛和爪哇岛沿岸的季节内变化时发现,这种季节内变化的产生机制存在很强的季节依赖性:在北半球夏季,沿着海岸的正的海表高度异常是由东赤道印度洋上空的大气季节内扰动激发的;在冬季,东赤道印度洋上空的风和研究区域局地的风都会在所研究区域产生正的海表高度异常。

我们所关注区域的季节内变化的产生机制不仅会随着水平位置和季节的变化而不同,对于同一地点它还会随着深度而变化,Schiller等<sup>[11]</sup>发现在龙目海峡和翁拜海峡深处的温度和速度在季节内时间尺度上做出的响应是由赤道东印度洋风的能量所控制的,然而在近表层处的响应却是由局地的季节内时间尺度的风所控制的。Iskandar等<sup>[13]</sup>在研究邻近爪哇岛海岸处的沿岸流和沿岸潜流的时候也得出了类似的结论,南爪哇沿岸流(South Java Coastal Current, SJCC)季节内信号的显著周期为90d,变化主要是受到中赤道印度洋较强的风的强迫;南爪哇次表层流

(South Java Coastal Undercurrent, SJCU)季节内信号的显著周期为 60 d, 主要是受到苏门答腊岛近岸处与 MJO 有关的大气季节内振荡的驱动。

另外还有一点需要特别说明, 季节内活动不仅发生在季风转换期, 它还可以发生在一年中的其它任何时间, 只是因为季节内信号的产生与风的作用紧密相关, 而在季风转换期间, 季节性变动的大尺度风场与季风在赤道地区相互作用联系在一起, 从而使得这一时期产生的季节内信号更加强劲而且向东传播也更加明显。

### 3 季节内信号的传播过程

Iskandar 等<sup>[13]</sup>在 2005 年研究季节内海表高度变化与东印度洋以及苏门答腊岛和爪哇岛南部海岸风的季节内扰动之间的关系时, 发现季节内时间尺度的海表高度异常信号传播的相速度介于 1.5~2.86 m/s 之间, 这一数值与海洋内部 Kelvin 波的理论解相吻合, 由此提出季节内信号在产生之后是以 Kelvin 波的形式进行传播的理论。而后 Pujiana 等<sup>[16]</sup>沿用前人关于 Kelvin 波传播路径的假设, 基于 INSTANT 国际合作计划于 2004~2006 年期间在望加锡海峡获得的观测数据, 从垂向传播特征、能量均分和频散关系三个方面详细论证了这一假说。下面我们垂向传播特征为例来简要介绍一下他们的论证过程, 将 2004~2006 年期间望加锡海峡两个潜标的海流观测资料分解为垂直和沿着海峡的两个分量, 对沿着海峡方向分量  $v$  进行 20~90 d 的滤波得到  $v'$ , 在 3 a 的观测中总共挑选出 17 次  $+v'$  (即为北向流) 事件, 发现这些事件呈现出在密度跃层有向上的位相倾斜的共同特征, 这一特性是与 Kelvin 波垂向传播的动力学特征相一致的。假定一个由风强迫的 Kelvin 波扰乱了层化海洋的表层, 引起这一扰动的能量不仅会从扰动点开始在水平方向传播, 也会向下传播形成一个水平的坡度:

$$\theta = \frac{\omega}{N} = \frac{dz}{dx} \quad (1)$$

其中,  $\omega$  是波的频率,  $N$  是层化频率,  $z$  是深度,  $x$  是水平距离, 坡度等式可以等价于公式(2)。

$$\frac{dz}{dt} = \frac{\omega \cdot c}{N} \quad (2)$$

其中,  $c$  为斜压波模态的理论相速度,  $t$  是时间。接下来就要检验从  $+v'$  事件中所推算出来的位相坡度与 Kelvin 坡度公式是否一致,  $\omega$  的取值介于  $2\pi/90$  d 与

$2\pi/20$  d 之间,  $c$  的取值范围为 1.2~2.5 m/s (这是第一和第二波模态的相速度),  $N=0.0068 \text{ S}^{-1}$  (在望加锡海峡实际观测得来的平均  $N$  值), 所以  $dz/dt$  会在 15~115 m/d 的范围内变动, 这一数值与从  $+v'$  事件中推算出来的位相坡度相当一致。因此他们得到在  $+v'$  事件中观测到的以 50 m/d 的速度向上移动的位相模式与线性 Kelvin 波是一致的结论。

Kelvin 波是由海洋上空的风的异常激发产生的, 西风异常产生的扰动使得温跃层降低, 激发产生下沉的 Kelvin 波, 温跃层的加深使得海盆东部海洋上层的温度升高<sup>[27]</sup>。在印度洋, 异常西风爆发的频率有半年和季节内两种<sup>[28]</sup>, 它们的作用机制也是完全不同的: 在季风转换的季节, 大致是在 5 月和 11 月, 印度洋中部上空的西风异常强迫产生半年时间尺度的 Kelvin 波<sup>[29]</sup>; 季节内时间尺度的西风异常是由 MJO 引起的, 下沉的 Kelvin 波产生是海洋对于这类季节内时间尺度大气活动做出的响应, Kelvin 波极向传播, 使得沿着苏门答腊岛和小巽他群岛波导路径上的海平面升高, 也可能会使得沿着小巽他群岛方向的气压梯度出现暂时性的反转<sup>[30]</sup>。董玉杰等<sup>[16]</sup>在 2013 年也利用观测资料证明了南爪哇流的季节内变化正是与从赤道印度洋传播而来的 Kelvin 波联系在一起。

在印尼群岛的定点观测很少能够捕捉到 Kelvin 波, 这些观测大多都用来研究在 5 月和 11 月这种季风转换期由风强迫产生的半年时间尺度的 Kelvin 波<sup>[31-32]</sup>, 这使得我们对于季节内时间尺度的 Kelvin 波的研究起步较晚。Horii 等<sup>[33]</sup>2008 年在东赤道印度洋定点观测了开阔大洋的 Kelvin 波的垂向速度和温度结构, 指出这一赤道 Kelvin 波是由周期性的印度洋风场激发的, 并通过赤道波动过程影响印度洋偶极子事件的演化过程。之后的 INSTANT 计划给出了 ITF 出流通道长时间序列的全水深海流观测, 首次获得了 Kelvin 波的次表层结构。

除了上面介绍的季节内信号的传播方式, 信号沿着苏门答腊-爪哇岛链的传播路径是另外一个我们重点关注的问题。Qiu 等<sup>[7]</sup>在 1999 年研究 ITF 及其周边海域季节内变化时指出季节内信号可以沿着岛链沿岸传至龙目海峡, 但是对翁拜海峡和帝汶通道的影响较小。传至龙目海峡处的 Kelvin 波进入龙目海峡和继续东传的能量分配问题也引起众多研究者的关注, Syamsudin 等<sup>[34]</sup>利用卫星高度计资料估算了流入的半年周期的 Kelvin 波的能量进入龙



目海峡的比例, 大概占到了 56%, 但是他没有对季节内 Kelvin 波能量进入龙目海峡的比例进行定量估算。定点观测的结果显示, 37%±9% 的 Kelvin 波能量能够跨过龙目海峡继续向东传播, 其余的能量则通过龙目海峡进入了印尼海、被地形反射或者耗散掉, 进入龙目海峡能量的比例是与传至此处 Kelvin 波潜入水层的深度紧密相关的, Kelvin 波在印度洋中产生于龙目海峡西方, 距离越远, 到达 ITF 区域时潜入水层的深度就越深, 300 m 以浅的部分会由于虹吸作用向北进入龙目海峡, 深层的 Kelvin 波信号则被龙目海峡下游的海底山脊所阻碍<sup>[26]</sup>。此外, 研究还显示季节内 Kelvin 波可以一直向东传播并最终抵达翁拜海峡<sup>[5, 35]</sup>, Qu 等<sup>[36]</sup>利用数值模式也得到了同样的结果, 所以目前比较一致的看法是: 有部分 Kelvin 波能够越过龙目海峡继续东传, 在位于龙目海峡下游继续向东传播的能量中, Kelvin 波被松巴岛分开, 大致为一半能量越过松巴岛北部一半能量越过松巴岛南部向东传播, 目前, Kelvin 波最远可在东部的班达海被探测到<sup>[37]</sup>。

我们在前面的介绍中已经指出, 赤道印度洋和印尼群岛区域的季节内海表高度异常是由赤道中印度洋的风强迫产生的, 我们借鉴之前 Schiller 等<sup>[11]</sup>

的研究经验, 选取 5°S~5°N, 70°~90°E 这一纬向风异常较为显著的区域作为整个关注区域(30°S~30°N, 30°~140°E)季节内时间尺度的海表高度异常的源区, 采用 AVISO 海表面高度数据和 NCEP(National Centers for Environmental Prediction, NCEP)风场资料, 经过 21~91 d 的滤波处理后得到整个关注区域的海表高度异常滞后。所选中的纬向风比较显著的区域的相关系数如图 3 所示, 这张图形象地再现了整个区域季节内时间尺度的海表高度异常信号的传播情况, 传播过程可以大致的描述为: 赤道印度洋异常风的爆发强迫产生了赤道 Kelvin 波, Kelvin 波在产生 7 d 后传播到达苏门答腊岛西岸, 然后分为南北两支极向传播的沿岸 Kelvin 波。接下来的 14 d 时间内向北传播的 Kelvin 波分支环游孟加拉湾, 向南传播的 Kelvin 波分支先是沿着苏门答腊-爪哇岛岛链南岸继续向东传播, 然后通过不同的海峡传入印尼海, 在这之后的 14 d 时间内信号逐渐减弱。

#### 4 展望

ITF 及其周边海域的海洋信号对局地 and 全球气候系统的影响都有着十分重要的作用, 其中对于季

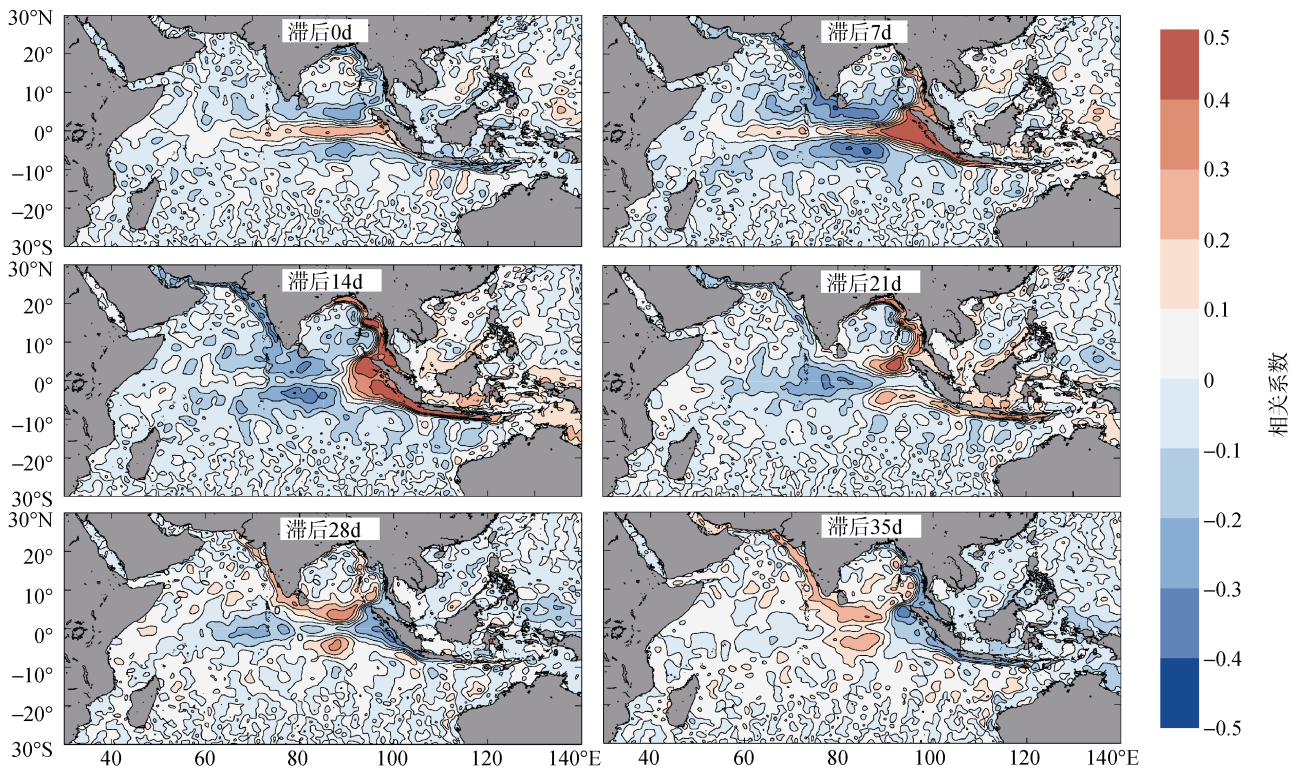


图 3 经过 21~91 d 滤波后 ITF 及其周边海域海表高度异常与赤道中印度洋(5°S~5°N, 70~90°E)纬向风异常的滞后相关系数

节内时间尺度信号的研究成为近来研究的热点。根据以上回顾和讨论,在未来关于 ITF 及其周边海域季节内变化的研究应关注以下几个方面的问题:

1) 季节内变化与其它时间尺度变化之间的关系。主要是季节内变化是怎样与季节变化和年际变化联系在一起,特别是怎样通过与南爪哇季节性反转的洋流系统的相互作用来与年变化联系在一起。为了解决这些问题,需要建立一个高分辨率并且与实际海底地形更加相符的海洋环流模式。

2) 在垂直方向上拓展对于季节内变化的研究。前人在对于赤道印度洋季节内变化的垂向特征的研究中发现,海水层化状况在水平方向的变化导致了这一研究区域季节内变化控制模态的改变,东赤道印度洋的垂向密度结构也呈现出随着时间的变化<sup>[38]</sup>,我们相信阐明这些变化对于研究高频海洋变化所起的作用也将会很有意义。Iskandar 等<sup>[39]</sup>通过计算由风强迫产生的流动的垂直特征函数,得到第一、第二、第三垂直模态的分布。垂直方向上每个斜压模态是怎样改变它的结构,以适应海水层化的时空变化,这一方面的研究将有助于人们全面理解季节内变化。

3) 进一步揭示季节内信号的产生机制。通过第三部分的介绍,我们知道赤道印度洋和印尼群岛的季节内变化的产生机制大致可以分为三种,分别为远程风的强迫、局地风的强迫以及宽阔海盆的共振作用<sup>[40-42]</sup>。鉴于前两种产生机制的研究已经有了一些成果,今后应更重视第三种产生机制的探索,比如赤道印度洋风强迫产生的海洋 Kelvin 波的共振效应是怎样对爪哇岛海岸附近的季节内变化作出贡献的。

4) 进一步开展几个主要海峡通道的观测。目前对 ITF 及其周边海域季节内变化的研究主要集中于 ITF 的几个主要通道(望加锡海峡、龙目海峡和翁拜海峡)。对于其西部海峡(巽他海峡、卡里马塔海峡),由于观测资料的限制,人们对其季节内变化还基本没有认识,这就需要加强这些海峡的观测,以理解这一区域季节内变化的特征。

#### 参考文献:

[1] 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.  
[2] Yuan Dongliang, Wang Jing, Xu Tengfei, et al. Forcing of the Indian Ocean Dipole on the Interannual Variations of the Tropical Pacific Ocean: Roles of the

Indonesian Throughflow[J]. Journal of Climate, 2011, 24: 3593-3608.  
[3] Madden R A, Julian P R. Observations of the 40-50 day tropical oscillation-A review[J]. Monthly Weather Review, 1994, 122(5): 814- 837.  
[4] Schiller A, Godfrey J S. Indian Ocean Intraseasonal Variability in an Ocean General Circulation Model[J]. Journal of Climate, 2003, 16: 21-39.  
[5] Sprintall J, Wijffels S F, Molcard R, et al. Direct estimates of the Indonesian Throughflow entering the Indian Ocean: 2004-2006[J]. Journal of Geophysical Research, 2009, 114: C07001.  
[6] Pujiana K, Gordon A L, Sprintall J. Intraseasonal Kelvin waves in Makassar Strait[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2013, 118: 2023-2034.  
[7] Qiu B, Mao M, Kashino Y. Intraseasonal Variability in the Indo-Pacific Throughflow and the Regions Surrounding the Indonesian Seas[J]. Journal of Physical Oceanography, 1999, 29: 1599-1618.  
[8] Clarke R A, Liu X. Observations and dynamics of semiannual and annual sea levels near the eastern equatorial Indian Ocean boundary[J]. Journal of Physical Oceanography, 1993, 23: 386-399.  
[9] Clarke R A, Liu X. Interannual sea level in the northern and eastern Indian Ocean[J]. Journal of Physical Oceanography. 1994, 24: 1224-1235.  
[10] Wijffels S, Meyers G. An intersection of oceanic waveguides: Variability in the Indonesian Throughflow region[J]. Journal of Physical Oceanography, 2004, 34: 1232-1253.  
[11] Schiller A, Wijffels S E, Sprintall J, et al. Pathways of intraseasonal variability in the Indonesian Throughflow region[J]. Dynamics of Atmospheres and Oceans, 2010, 50: 174-200.  
[12] Reppin J, Schott F A, Fischer J, et al. Equatorial currents and transports in the upper central Indian Ocean: Annual cycle and interannual variability[J]. Journal of Geophysical Research, 1999, 104: 15495-15514.  
[13] Iskandar I, Mardiansyah W, Masumoto Y, et al. Intraseasonal Kelvin waves along the southern coast of Sumatra and Java[J]. Journal of Geophysical Research, 2005, 110: C04013.

- [14] Bray N A, Wijffels S E, Chong J C, et al.Characteristics of the Indo-Pacific throughflow in the eastern Indian Ocean[J].Geophysical Research Letters, 1997, 24: 2569-2572.
- [15] Arief D, Murray S.Low-frequency fluctuations in the Indonesian throughflow through Lombok Strait[J]. Journal of Geophysical Research, 1996, 101(C5): 12455-12464.
- [16] 董玉杰, 王辉武, 刘延亮, 等. 南瓜哇流的季节内变化[J].海洋科学进展, 2013, 31(3): 326-331.
- [17] Molcard R, Fieux M, Ilahude A G.The Indo-Pacific throughflow in the Timor Passage[J].Journal of Geophysical Research, 1996, 101: 12411-12420.
- [18] Chong J C, Sprintall J, Hautala S, et al.Shallow throughflow variability in the outflow straits of Indonesia[J]. Geophysical Research Letters, 2000, 27: 125-128.
- [19] Pujiana K, Gordon A L, Sprintall J, et al.Intraseasonal variability in the Makassar Strait thermocline[J].Journal of Marine Research, 2009, 67: 757-777.
- [20] 刘凯, 孙照渤, 杜岩. 基于 INSTANT 数据对 ITF 流出海峡海流的功率谱分析[J]. 热带海洋学报, 2011, 6: 1-9.
- [21] Field A, Gordon A L. Tidal mixing signatures in the Indonesian seas. Journal of Physical Oceanography, 2, 1996, 6: 1924-1937.
- [22] Shinoda T, Hendon H H, Glick J.Intraseasonal Variability of Surface Fluxes and Sea Surface Temperature in the Tropical Western Pacific and Indian Oceans[J]. Journal of Climate, 1998, 11: 1685-1702.
- [23] Hu R J, Wei M.Intraseasonal Oscillation in Global Ocean Temperature Inferred from Argo[J].Advance in Atmospheric Science, 2013, 30(1): 29-40.
- [24] Masumoto Y, Hase H, Kuroda Y, et al.Intraseasonal variability in the upper layer currents observed in the eastern equatorial Indian Ocean[J]. Geophysical Research Letters, 2005, 32: L02607.
- [25] Du Yan, Liu Kai, Zhuang Wei, et al.The Kelvin Wave Processes in the Equatorial Indian Ocean during the 2006-2008 IOD Events[J]. Atmospheric and Oceanic Science Letters, 2012, 5(4): 324-328.
- [26] Drushka K, Sprintall J, Gille S T.Vertical Structure of Kelvin Waves in the Indonesian Throughflow Exit Passages[J]. Journal of Climate, 2010, 40: 1965-1987.
- [27] Giese B S, Harrison D E.Aspects of the Kelvin wave response to episodic wind forcing[J].Journal of Geophysical Research, 1990, 95, C5: 7289-7312.
- [28] Potemra J, Hautala S, Sprintall J, et al.Interaction between the Indonesian Seas and the Indian Ocean in observations and numerical models[J].Journal of Physical Oceanography, 2002, 32: 1838-1854.
- [29] Wyrtki K.An equatorial jet in the Indian Ocean[J].Science, 1973, 181: 262-264.
- [30] Quadfasel D R, Cresswell G.A note on the seasonal variability in the South Java Current[J].Journal of Geophysical Research, 1992, 97: 3685-3688.
- [31] Sprintall J, Gordon A, Murtugudde R, Susanto R D.A semiannual Indian Ocean forced Kelvin wave observed in the Indonesian seas in May 1997[J].Journal of Geophysical Research, 2000, 105, C7: 17217-17230.
- [32] Hautala S L, Potemra J, Sprintall J T, et al.Velocity structure and transport of the Indonesian Throughflow in the major straits restricting flow into the Indian Ocean[J].Journal of Geophysical Research, 2001, 106(C9): 19527-19546.
- [33] Horii T, Hase H, Ueki I, et al.Oceanic precondition and evolution of the 2006 Indian Ocean dipole[J]. Geophysical Research Letters, 2008, 35: L03607.
- [34] Syamsudin F, Kaneko A, Haidvogel D B.Numerical and observational estimates of Indian Ocean Kelvin wave intrusion into Lombok Strait[J].Geophysical Research Letters, 2004, 31: L24307.
- [35] Molcard R, Fieux M, Syamsudin F.The throughflow within Ombai Strait. Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers[J], 2001, 48: 1237-1253.
- [36] Qu T, Du Y, McCreary J J P, et al.Buffering effect and its related ocean dynamics in the Indonesian Throughflow region[J].Journal of Physical Oceanography, 2008, 38: 503-516.
- [37] Shinoda T, Hendon H H.Mixed Layer Modeling of Intraseasonal Variability in the Tropical Western Pacific



- and Indian Oceans[J].Journal of Climate, 1998, 11: 2668-2685.
- [38] Qu T, Meyers G. Seasonal variation of barrier layer in the southeastern tropical Indian Ocean[J].Journal of Geophysical Research, 2005, 110: C11003.
- [39] Iskandar I, Tozuka T, Sasaki H, et al. Intraseasonal variations of surface and subsurface currents off Java as simulated in a high- resolution oceangeneral circulation model[J].Journal of Geophysical Research, 2006, 111: C12015.
- [40] Cane M, Moore D W.A note on low-frequency equatorial basin modes[J].Journal of Physical Oceanography, 1981, 11: 1578-1584.
- [41] Fu L L.Intraseasonal variability of the equatorial Indian Ocean observed from sea surface height, wind and temperature data[J].Journal of Physical Oceanography, 2007, 37: 188-202.
- [42] Han W.Origins and dynamics of the 90-day and 30-60 day variations in the equatorial Indian Ocean[J].Journal of Physical Oceanography, 2005, 35: 708-728.

(本文编辑: 李晓燕)