

# 印尼贯穿流源区环流的多尺度变异及其科学重要性\*

袁东亮<sup>1, 2, 3</sup> 周慧<sup>1, 2</sup> 王铮<sup>1, 2</sup> 李翔<sup>1, 2</sup>

(1. 中国科学院海洋研究所海洋环流与波动重点实验室 青岛 266071; 2. 青岛海洋科学与技术国家实验室海洋动力过程与气候变化实验室 青岛 266235; 3. 中国科学院大学 北京 100049)

**摘要** 印尼贯穿流源区指的是苏拉威西海东部、马鲁古海北部以及棉兰老岛以东和巴布亚新几内亚岛以北的海域, 其海洋环流的结构和变异对全球大洋环流的物质和能量平衡以及气候变化有重要影响, 但是却缺乏大规模的现代海洋观测。本文总结近几年来基金委西太平洋开放共享航次、全球变化研究国家重大科学研究计划项目以及中科院海洋先导专项项目——“主流系与西太平洋暖池变异机制及其气候效应”等项目在低纬度西太平洋和印尼贯穿流源区的观测成果, 初步刻画了印尼贯穿流源区海洋环流的多尺度结构特性, 阐明这一海区环流对厄尔尼诺与南方涛动(ENSO)动力学、季节内振荡研究以及全球变暖减缓和加速的重要性。介绍了项目团队在过去几年里, 通过国际合作, 促成中国科学院海洋研究所与印尼科学院海洋研究中心达成战略合作伙伴关系。目前, 双方已经在印尼海和印尼贯穿流关键海峡进行了卓有成效的合作观测, 建成了有史以来最大规模的印尼海同步潜标观测网, 为探讨印尼贯穿流变异及其在全球气候变化的作用问题和服务国家“一带一路”倡议提供了坚实的数据基础。

**关键词** 印尼海; 印尼贯穿流源区; 西太平洋; 海洋观测网; 多尺度变异; ENSO 动力学; 全球变暖减缓

中图分类号 P731 doi: 10.11693/hyhz20170800217

印尼贯穿流是西太平洋经过印度尼西亚群岛海域流向东南印度洋的一支洋流, 英文名称是 Indonesian Throughflow, 简称 ITF。它是全球海洋大输送带的热带回流分支, 对全球大洋之间质量、热量和盐量输运以及全球气候具有重要作用(Godfrey 1996; Schneider 1998; Wajsowicz *et al.*, 2001)。印尼贯穿流由太平洋向印度洋输送的热量可达 0.5—1.0PW(1PW= $10^{15}$ W)(Godfrey, 1996; Gordon 2001; Vranes *et al.*, 2002), 相当于整个西太平洋暖池的海面净热通量(Webster *et al.*, 1992), 不仅强烈影响着印度

洋和太平洋的上层热量和淡水平衡, 并通过它们影响着印太海盆的海气耦合过程和气候变化(Lee *et al.*, 2002)。印尼贯穿流还通过厄加勒斯回流向大西洋的甩涡过程, 影响北大西洋深层水的形成(Gordon, 2005), 并与南极绕极流共同形成横跨南大西洋、南印度洋和南太平洋的南半球副热带超级环流(Super Gyre), 这一环流与大西洋经向翻转环流的相互作用决定了全球海洋热量的输送和分配, 关系全球变暖的减缓或者加速。

作为全球大洋中唯一一支热带海域的洋际洋流,

\* 中国科学院战略性先导科技专项(A类)项目, XDA11010205号; 国家自然科学基金创新群体项目, 41421005号; 国家自然科学基金面上项目, 41376032号; 国家自然科学基金重点国际合作项目, 41720104008号; 西太平洋开放共享航次项目(航次编号 NORC2015-09)。青岛海洋科学与技术国家实验室“鳌山科技计划”项目, 2016ASKJ04号; 全球变化研究国家重大科学研究计划项目, 2012CB956001号; 中国气象局行业专项项目, GYHY201306018号; 国家海洋局专项项目, GASI-03-01-01-05号; 山东省联合基金项目, 2014GJSS0101号, U1406401号。袁东亮, 博士生导师, 研究员, Email: dyuan@qdio.ac.cn

收稿日期: 2017-08-30, 收修改稿日期: 2017-10-26

印尼贯穿流与全球大洋中唯一一支向赤道流动的西边界流——棉兰老流相连, 后者发源于菲律宾东岸的北赤道流分叉的南支。太平洋北赤道流大约在北纬  $7^{\circ}$ — $21^{\circ}$ N 之间的广袤海域受热带信风强迫向西流动, 流量不断增加, 在遭遇菲律宾阻挡后分叉, 形成两支强劲的西边界流——向北的黑潮和向南的棉兰老流(Nitani, 1972; Toole *et al*, 1988, 1990)。西边界流的形成是由于地球自转效应引起的大洋环流西向强化的结果, 其流速和单位宽度流量比大洋内区环流高一至两个数量级。太平洋北赤道流的平均流量在  $60\text{Sv}$  ( $1\text{Sv}=10^6\text{m}^3/\text{s}$ ), 流速在  $0.1$ — $0.2\text{m/s}$  左右, 而黑潮和棉兰老流的流量分别大约在  $20$ — $30\text{Sv}$  左右, 流幅宽度约  $100$ — $200\text{km}$ , 平均流速经常接近  $1.0\text{m/s}$ 。

通过以上环流路径, 印尼贯穿流与北太平洋的西边界流以及内区环流相联系(图 1)。在苏拉威西海以东海域, 棉兰老流与来自南半球的西边界流——新几内亚沿岸流和新几内亚沿岸潜流相遇后, 部分水体进入苏拉威西海成为印尼贯穿流的源头, 部分水体向东汇入北赤道逆流(Gordon, 1986; Toole *et al*,

1990; Lukas *et al*, 1991)。西边界流在苏拉威西海东部海域因失去陆地的支持, 形成了复杂的环流和涡旋结构。北赤道逆流是热带北太平洋一支逆风流动的洋流, 具有强烈的非线性特征, 在源区北纬  $3^{\circ}$ — $7^{\circ}$ N 之间, 其流径呈现大弯曲结构, 一直到  $150^{\circ}$ — $165^{\circ}$ E 以东才变为相对稳定向的东向纬向流。

苏拉威西海的最东边是桑义赫群岛, 其与棉兰老岛之间的海域是苏拉威西海与菲律宾海的交界, 南部的岛链则是苏拉威西海与马鲁古海的交界。桑义赫群岛的桑吉尔岛和塔劳岛连线以南是马鲁古海, 以北是菲律宾海, 塔劳岛和莫罗泰岛连线代表北部马鲁古海与菲律宾海的交界。因此, 印尼海的苏拉威西海东部, 马鲁古海北部海域以及西太平洋北纬  $8^{\circ}$ N 以南和新几内亚以北之间的西边界流交汇区, 是印尼贯穿流形成及其与太平洋西边界流相互作用的关键海域, 被称为印尼贯穿流源区。该海域既连接太平洋和印度洋, 又连接南、北太平洋, 处于 ENSO 的发源地, 其环流的变异直接影响和调制暖池的变异及其海洋-大气相互作用过程, 从而对印太海洋和南北

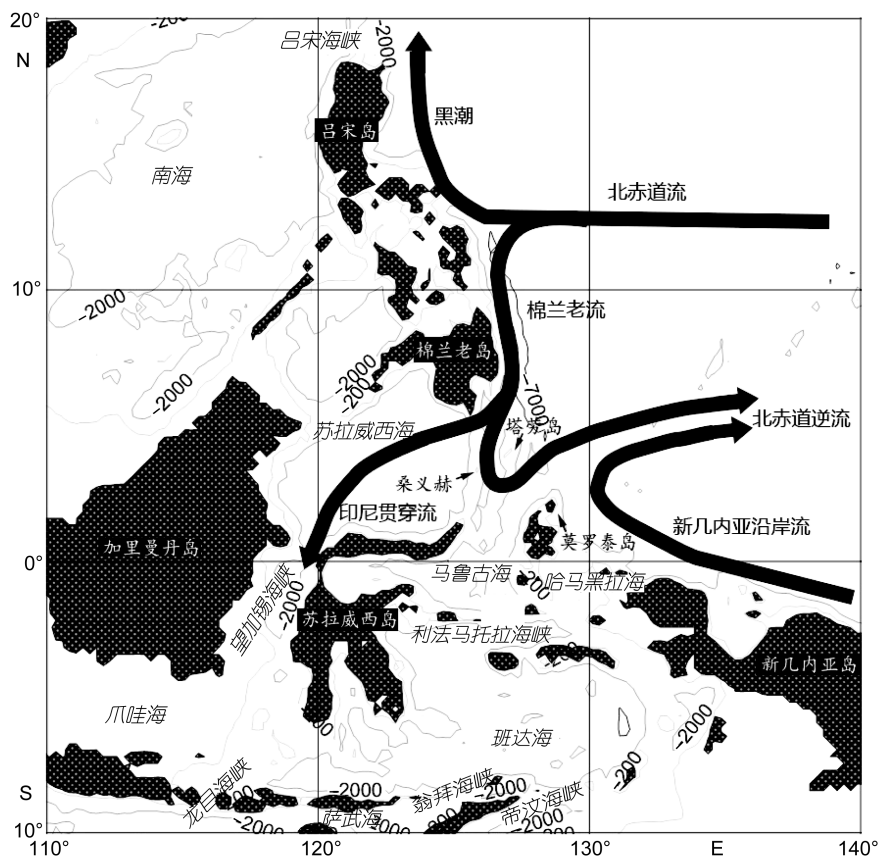


图 1 西太平洋和印尼贯穿流源区海洋环流示意图

Fig.1 Schematic ocean circulation at the Pacific entrance of the Indonesia Throughflow

半球的热量和质量输送起关键作用,并通过季风系统对我国的气候变化、特别是旱涝灾害等重大气候灾害的形成具有极为重要的影响。

## 1 印尼贯穿流的发现和研究历史

20 世纪中叶以前,印度尼西亚是荷兰殖民地,关于印尼海的研究主要由荷兰科学家开展(van Aken 2005),代表性的观测计划有 Snellius I(1929—1930)。尽管荷兰皇家海军的海流图显示望加锡海峡的海流在不同的季风季节都向南流动(van de Stoke, 1987),但是这支海流的海洋学意义并未得到重视。二战以后,美国科学家 Klaus Wyrski 担任了印尼科学院海洋研究所的第一任所长,他通过综合分析历史资料结合少量新的调查数据,发现西太平洋海水通过印尼东部海域到达了南部的帝汶海峡(Wyrski, 1961),因此提出了贯穿流的概念(Wyrski, 2005)。但是,他大大低估了印尼贯穿流的流量,而且也没有认识到印尼贯穿流的主体流经望加锡海峡。随后美国的 INDOPAC 计划(1976—1977)(Broecker, 1986)、荷兰的 Snellius II 计划(1982—1987)(van Aken *et al.*, 1988; Murry *et al.*, 1988; Cresswell *et al.*, 1993)、法国的 JADE 计划(1989—1995)(Molcard *et al.*, 1994, 1996)和东盟与澳大利亚经济合作计划(ASEAN)(1993—1995)(Cresswell *et al.*, 1998; Aung, 1998)等等,对印尼海的各个出口海峡和东部海域进行了一些观测,但是在印尼贯穿流的主要通道——望加锡海峡一直没有开展潜标连续观测,所以对印尼贯穿流的主流路径和流量等科学问题,国际上一直没有清晰的认识。

进入 20 世纪 90 年代,以美国哥伦比亚大学 A. L. Gordon 和 W. S. Broecker 为代表的国际海洋学家意识到全球海洋大输送带的重要作用,开始进一步重视印尼贯穿流的研究。1993—1994 年,美国和印尼合作开展了 ARLINDO 观测计划,主要针对望加锡海峡的海流开展了为期 1 年半的观测研究,首次观测到了印尼贯穿流主流的垂向结构和季节变异,确认了望加锡海峡是印尼贯穿流的主流通道(Gordon, 1998; Gordon *et al.*, 1999)。2003—2006 年间,美国和印尼以及澳大利亚、法国和荷兰进一步开展了 INSTANT 观测计划(Sprintall *et al.*, 2004, 2009, 2014; Gordon *et al.*, 2010),针对望加锡海峡、龙目海峡、翁拜海峡和帝汶海峡等印尼贯穿流的出口海峡进行了连续 3 年(不超过 10 套)的同步潜标观测,确定了印尼贯穿流的主要路径和总流量及其季节变化。之后,该项目在望加锡

海峡的潜标观测,除了在 2011—2013 年间中断以外,基本维持了下来(Gordon *et al.*, 2012),被称为 MITF 计划。

以上研究,初步揭示了印尼贯穿流在全球海洋大输送带中的重要作用,但是由于缺乏印尼贯穿流源区的同步观测,其对西太平洋暖池变异和气候异常事件的影响,目前还缺乏认识。

位于苏拉威西海东部和马鲁古海北部附近的印尼贯穿流源区环流,历史上的观测研究几乎是空白。东盟与澳大利亚经济合作计划期间,曾经在马鲁古海峡西侧 2°N 的位置布放过深海潜标,但是该潜标所有 740m 以浅的仪器全部损坏,只测得深层海流数据(Luick *et al.*, 2001)。1999 年 2 月,日本调查船曾经在苏拉威西海和马鲁古海峡进行过走航测量(Kashino *et al.*, 2001),但是没有连续时间序列数据。INSTANT 期间,位于利法马托拉(Lifamatola)海峡的潜标,由于强潮流,主浮球经常被下压到深海,造成上层海流缺测(Gordon *et al.*, 2010)。因此,马鲁古海温跃层以上的海流,之前从未很好地进行过潜标连续海流测量。

历史上,西太平洋海洋环流研究计划(WEPOCS)和世界大洋环流实验(WOCE)期间的西太平洋调查,大都止步于印尼海的入口,只有 WEPOCS III 曾经紧靠着棉兰老岛南部海岸进行过测量(Bingham *et al.*, 1994)。WOCE 计划期间,日本曾经在马鲁古海北部的塔劳岛和莫罗泰岛之间的海峡,布放过两个深海潜标(Kashino *et al.*, 1999),测得 1994—1995 年之间的北赤道逆流源头变化。但是,由于缺乏其它同步测量,这些测量无法给出印尼贯穿流的流量信息。

2012 年以来,中国科学院海洋研究所与印尼科学院海洋研究中心合作,实施了西太平洋海洋环流和印尼贯穿流(WPOC-ITF)观测实验计划,自 2012 年开始,在印尼贯穿流源区开展了长期潜标观测,首次获得了马鲁古海峡上层海流的长时间序列测量。目前,潜标数量已经扩大到 10 套,占据马鲁古海峡、哈马黑啦海、利法马托拉海峡、望加锡海峡、萨武海峡和帝汶海峡。使得国际上首次实现了印尼贯穿流入口和出口海峡海流的同步观测(图 2)。2016 年该观测计划的印尼海综合调查航次是迄今为止在印尼海进行的最大规模的中-印尼联合调查航次,建成了国际上有史以来最大规模的印尼海潜标观测网。该项目完全由中国科学家主导,开展完全自主创新的科学研究,在国际上取得了令人瞩目的观测数据和科研成果,同时使得我国的西太平洋海洋环流和印尼贯穿流研究步入国际领先行列。

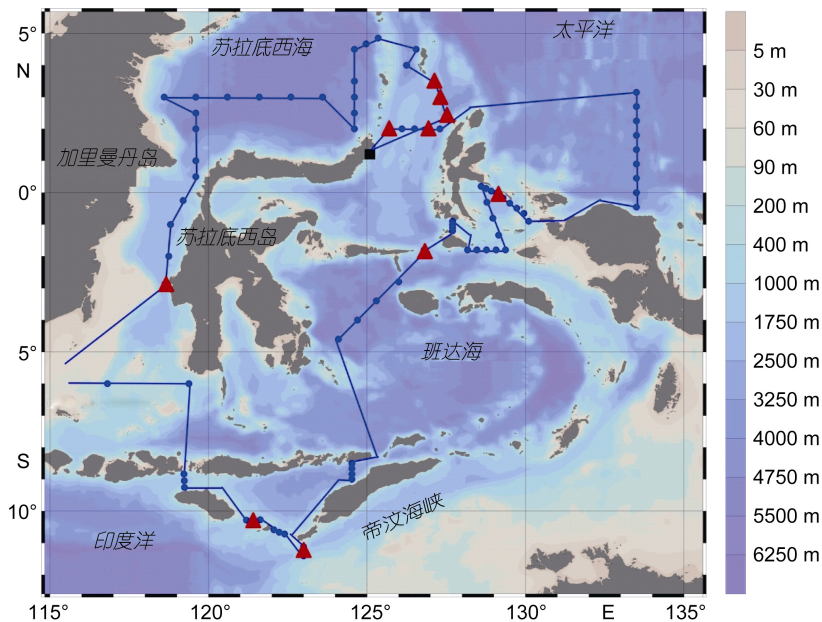


图2 中国科学院海洋研究所 2016 年印尼海航次航线和潜标阵列位置

Fig.2 The cruise track and the mooring array of the 2016 IOCAS-RCO/LIPI joint cruise in the Indonesian seas

## 2 印尼贯穿流源区环流的多尺度变异

棉兰老流在苏拉威西海以东海域失去了陆地边界的支持后形成复杂多变的环流形态和涡旋结构。它与来自南半球的新几内亚沿岸流相遇后, 向东汇入北赤道逆流, 形成棉兰老涡和哈马黑啦两个中尺度涡旋(Gordon, 1986; Toole *et al*, 1990; Lukas *et al*, 1991), 环流的多尺度特征突出。遗憾的是, 目前所有的遥感手段, 都无法有效地观测这一海域的环流路径, 加上这一海区少的可怜的现场观测数据, 因此西边界流在印尼贯穿流源区的路径和变异规律, 目前还是一个谜。

图3显示的是2010年至2016年, 印尼贯穿流源区的漂流浮标轨迹。这些漂流浮标是中国科学院海洋研究所利用基金委西太平洋开放共享航次项目、全球变化研究国家重大科学研究计划项目和中科院海洋专项项目—“主流系与西太平洋暖池变异机制及其气候效应”的西太平洋航次在印尼贯穿流源区布放的, 采用的我国自主研发的表层漂流浮标。浮标配备GPS跟踪自由漂流设备, 浮球直径28cm, 下面连着一个桶状拖伞, 直径约1m, 长度约6m, 拖伞的表面积与浮球的表面积之比大于40, 保证浮球跟随海流移动, 而较少受海面风漂移的影响, 因此依据浮标轨迹计算的表层海流路径具有较好的代表性。

由图3的漂流浮标轨迹可以看出, 西太平洋印尼

贯穿流源区环流的一个突出特征是棉兰老流入侵苏拉威西海, 一部向西进入望嘉锡海峡, 其余大部在马鲁古海北部形成回流, 流回西太平洋, 其与新几内亚沿岸流交汇于哈马黑拉岛东北角, 并形成接近正北向流动的急流, 该急流从北纬3°N大距离跨越行星涡度等值线, 在接近北纬7°N时转向, 形成北赤道逆流源区的大弯曲结构。虽然在不同的年份, 各个海流的形态和路径存在巨大的差异, 但是哈马黑拉岛东北角向北的急流几乎每年都在, 显示其重要动力学意义。2012年, 漂流浮标轨迹显示棉兰老流在苏拉威西海东部出现了中尺度涡剥离的现象, 这是国际上首次观测到棉兰老流在苏拉威西海的甩涡现象, 表明印尼贯穿流源区环流受强烈的非线性动力过程控制。2014年和2015年, 漂流浮标轨迹显示, 棉兰老流主流没有侵入苏拉威西海, 而是在其以东海域与新几内亚沿岸流一起形成阻塞。这些现象过去从未观测到, 其对2014年夭折厄尔尼诺和2015—2016年强厄尔尼诺的影响, 是下一步研究的重要方向。值得一提的是, 浮标是否进入望嘉锡海峡与其初始位置和苏拉威西海的环流有关, 一般不作为印尼贯穿流流量大小的判断依据。

从以上观测事实不难看出, 印尼贯穿流源区环流有突出的多尺度结构, 受控于强烈的非线性动力过程。事实上, 依据传统的线性动力机制, 无法解释印尼贯穿流的水团来源问题。观测显示印尼贯穿流上

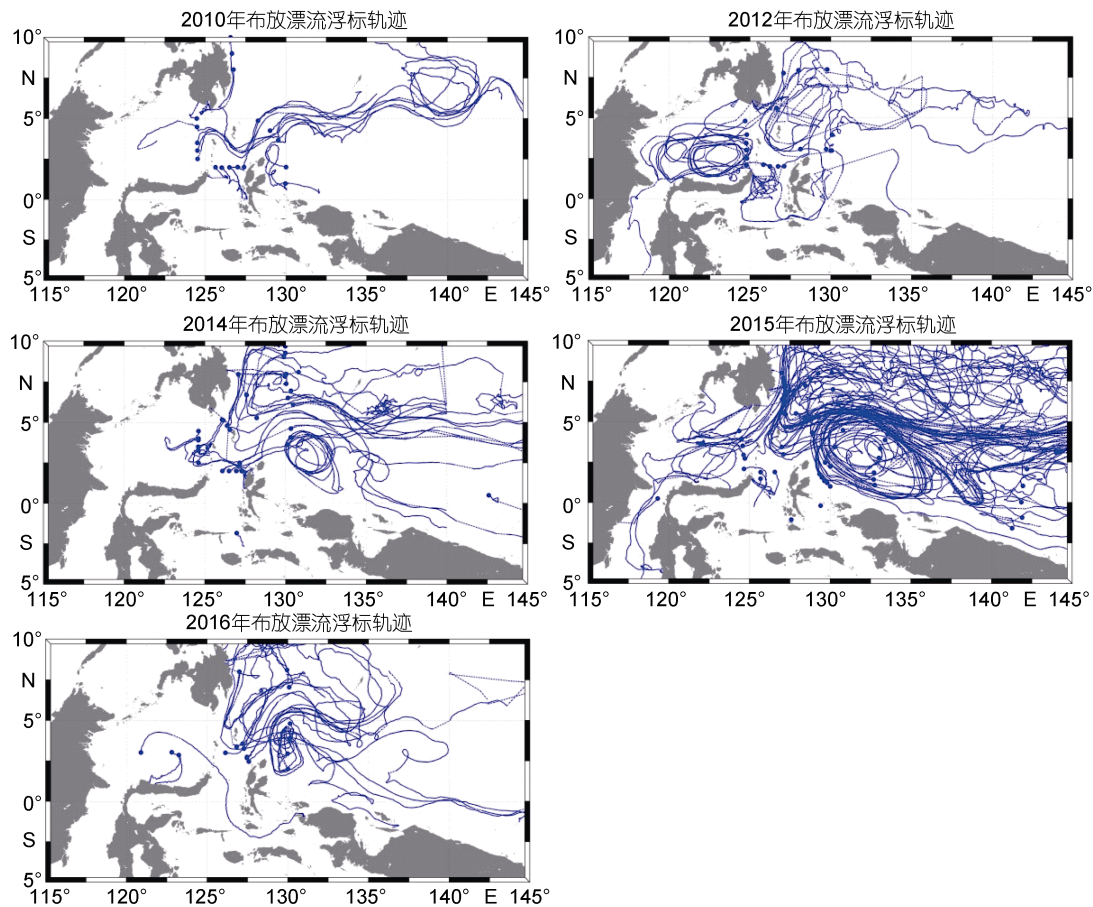


图3 中国科学院海洋研究所近几年在热带西太平洋布放的表层漂流浮标轨迹

Fig.3 Trajectories of surface drifters deployed by IOCAS in recently years in the western tropical Pacific Ocean  
注: 实心圆点代表漂流浮标的起始位置。2012年轨迹首次观测到棉兰老流在苏拉威西海的甩涡现象

层水主要来源于北太平洋(Wyrtki 1961; Gordon 1986), 表明北太平洋水一定是通过西边界流到达了印尼海源区。而线性动力学理论分析显示, 印尼贯穿流只能来源于南太平洋环流(Godfrey *et al.*, 1993; Godfrey, 1996), 这主要是由于北太平洋平均风应力旋度在北纬 $2^{\circ}$ — $4^{\circ}$ N附近为零, 依据经典的大洋环流 Sverdrup 线性动力学理论, 北太平洋内区环流无法穿越该纬度到达印尼贯穿流源区。由于北太平洋基本是一个封闭海盆, 因此其流入印尼海的流量必须由南太平洋水来补充, 即通过新几内亚沿岸流等西边界流来补充。这一补充过程的形式和路径目前还不清楚。

本研究显示, 印尼贯穿流源区的西边界流交汇过程受较强的非线性动力机制控制, 存在非线性分岔和迟滞变异过程(图4, Wang *et al.*, 2012, 2014)。观测到的棉兰老流甩涡现象证实了我们理论的真实性的。我们还通过诊断分析最新的 Argo 观测资料, 比较了北太平洋经向地转运输与 Sverdrup 理论的契合度,

发现西太平洋包括印尼贯穿流源区的热带海域存在着强非线性过程驱动的非 Sverdrup 环流结构(图5, Yuan *et al.*, 2014), 这些非线性过程表现为印尼贯穿流源区突出的赤道不稳定波和中尺度涡旋现象等等, 表明北太平洋水团到达印尼海源区以及南北半球水交换等过程有新的动力机制。北太平洋水还可以通过吕宋海峡, 经南海贯穿流进入印尼海, 汇入印尼贯穿流(Wyrtki, 1961; Qu *et al.*, 2005), 而吕宋海峡海流的强非线性动力过程和南海强烈的涡旋与多尺度结构都是非常突出的。

印尼贯穿流所经过的海域存在强烈的季节内-季节-年际-年代际多尺度海气耦合动力过程, 这些变化对印尼贯穿流源区的多尺度变异和水团性质与输运通量等有重要影响, 是关系到全球气候变化进程的重要动力过程之一。

印尼海内部存在非常强烈的潮混合和内波混合, 它们共同作用形成上层海洋热含量向中深层海洋输

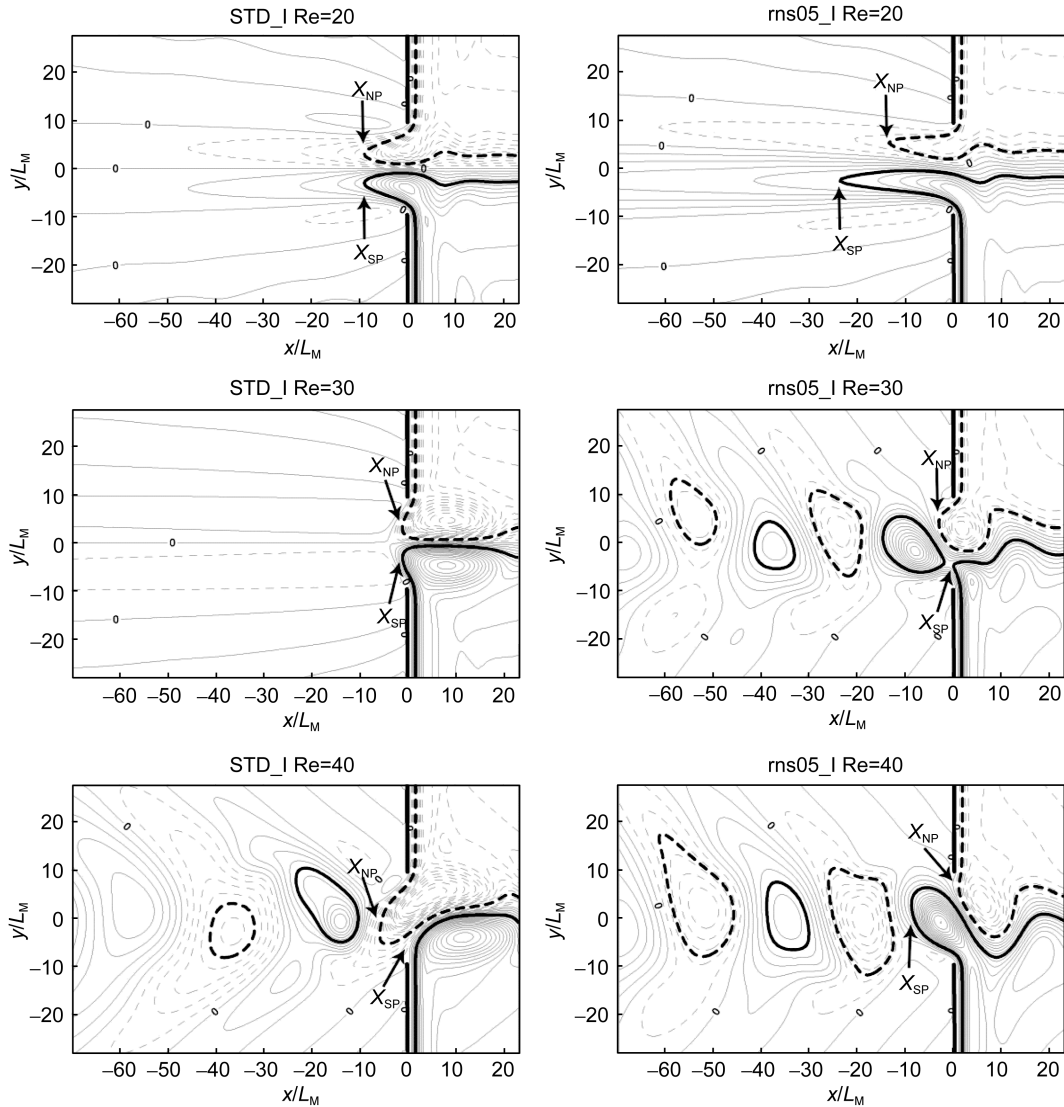


图 4 理想地形实验中, 交汇的西边界流在缺口附近的流态依赖雷诺数(Re)变化的情况(摘自 Wang *et al*, 2014)

Fig.4 WBC paths in the vicinity of the gap associated with different Reynolds numbers in an experiment with idealized geometry (From Wang *et al*, 2012)

注: 其中西边界流的甩涡现象得到 2012 年苏拉威西海漂流浮标轨迹的印证。图中左列两西边界流强度相等, 右列南支西边界流是北支流量的两倍

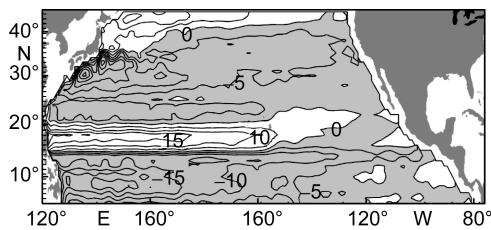


图 5 Argo 绝对地转流函数与 Sverdrup 减去艾克曼流函数之差, 显示印尼贯穿流源区强烈的中尺度涡旋驱动环流结构(摘自 Yuan *et al*, 2014)

Fig.5 The difference between the Argo absolute geostrophic streamfunction and the Sverdrup-minus-Ekman streamfunction, showing significant ocean circulation driven by eddy activities at the entrance of the Indonesian seas (From Yuan *et al*, 2014)

送的有效途径(Sprintall *et al*, 2014a), 这一过程是上层海洋向下输送热量的重要途径之一, 其对印尼贯穿流水团的变异和物质能量的输运有重要影响, 这方面的研究才刚刚开始。

### 3 印尼贯穿流源区环流研究的科学意义

#### 3.1 对全球海洋大输送带研究的重要意义

菲律宾和印尼之间的苏拉威西海以东海域是南、北太平洋几个重要水团的交汇地, 关于印尼贯穿流源区的上层环流结构, 历史观测很少。零星的数据显示, 棉兰老流所携带的北太平洋温跃层水在苏拉威

西海东部产生回流,大部分流回西太平洋(van Aken *et al.*, 1988),一小部分通过苏拉威西海和望嘉锡海峡向南流动(Ffield *et al.*, 1992; Gordon *et al.*, 1994; Nof, 1996; Gordon *et al.*, 1996; Wajsowicz, 1996),并通过龙目、翁拜和帝汶等海峡流出印尼海域,进入东印度洋。

由于印尼贯穿流源区是南、北半球水交换的十字路口(Fine *et al.*, 1994),是北赤道逆流的发源地,两支经向的西边界流交汇形成东、西向的两支重要海流——印尼贯穿流和北赤道逆流,以及与之相关的棉兰老涡和哈马黑拉涡,环流结构异常复杂。在次表层,观测表明,棉兰老流之下有一支与表层流逆向的海流,称之为棉兰老潜流(Hu *et al.*, 1989);在新几内亚沿岸流之下,有一支流称之为新几内亚沿岸潜流(Linstrom *et al.*, 1989);在赤道次表层有一支称为赤道潜流的海流。我们的研究还发现,在北赤道逆流之下,有一支向西的海流,平均流量超过 3Sv(Yuan *et al.*, 2014)。这些潜流的主体基本都在大洋主温跃层以内,有的甚至到达距海面 100—200m 水深处,显示这些潜流与上层海流之间可能有密切的联系和相互作用。强烈的斜压结构以及海流之间的相互作用决定印尼贯穿流的水团结构。

观测显示,印尼贯穿流水团比印度洋水团暖而淡(You *et al.*, 1993),其上 300 m 的水团主要由北太平洋温跃层水和流经望嘉锡海峡的中层水构成(Fine, 1985; Ffield *et al.*, 1992; Bingham *et al.*, 1994; Fieux *et al.*, 1994; Gordon *et al.*, 1994; Ilahude *et al.*, 1996; Gordon *et al.*, 1996),其中最主要的水团就是北太平洋热带水(NPTW),该水团形成于北太平洋副热带环流的中部海域(Cannon, 1966; Tsuchiya, 1968),那里过量的蒸发形成了 NPTW 的高盐特征。随着北太平洋副热带环流,大部分 NPTW 在潜沉之后向西南方向流动并加入了向西流动的北赤道流的次表层。作为次表层的盐度极大值, NPTW 被北赤道流携带进入菲律宾海。一部由棉兰老流携带沿菲律宾东岸南下进入印尼海。NPTW 在向南运输的过程中,其水团性质经历了显著的变化,最显著的就是其盐度下降(Qu *et al.*, 1999; Suga *et al.*, 2000; Xie *et al.*, 2009)。另外,棉兰老流温跃层之下(250—1500m)的中层水(除潜流以外)来自东北太平洋副极地海域,称之为北太平洋中层水(NPIW),表现为低盐的特征(Reid, 1965; Talley, 1993)。

在巴布亚新几内亚东岸,新几内亚沿岸流和潜流将高盐的南太平洋热带水(SPTW)和低盐的南极中层水(AAIW)带到苏拉威西海东侧的海域(Lindstrom

*et al.*, 1987; Tsuchiya *et al.*, 1989; Tsuchiya, 1991; Fine *et al.*, 1994; Qu *et al.*, 2004),它们与 NPTW 和 NPIW 交汇,一部入侵印尼海东部海域,构成印尼贯穿流下温跃层和深层水(van Aken *et al.*, 1988; Hautala *et al.*, 1994; Gordon, 1995; Ilahude *et al.*, 1996; Gordon *et al.*, 1996)。印尼海内部,由于强烈的潮流和内波混合,水团性质趋于垂向均匀(Ffield *et al.*, 1992; Gordon, 2005; Sprintall *et al.*, 2014a)。

印尼海内部中深层环流和水团的结构和运移路径,历史上数据极少,目前猜测为南太平洋深层水流入马鲁古(Molucca)海和哈马黑啦(Halmahera)海,并有可能进入印尼海。印尼贯穿流中层水(多为北太平洋水团)则通过马鲁古海和哈马黑啦海进入班达(Banda)海(Luick *et al.*, 2001; Cresswell *et al.*, 2001),进而通过 Timor 海峡流入东印度洋(Molcard *et al.*, 1996)。

印尼贯穿流是全球海洋大输送带的热带回流分支,仅仅了解其出口海峡的水团性质显然是远远不够的,必须对其源区和入口海峡的水团性质加以研究,才能有效地揭示印尼贯穿流在全球海洋物质能量平衡和气候变化中的重要作用。

### 3.2 对季节内至年际、年代际气候变化研究的意义

厄尔尼诺和南方涛动(简称 ENSO)是全球最强的年际气候异常事件,与热带太平洋海气耦合动力过程密切相关,并且对东亚季风和全球气候有显著的影响。研究表明厄尔尼诺事件起源于印尼贯穿流源区,其中西太平洋暖池热含量的变异与 ENSO 的发生、发展紧密相关(Rasmusson *et al.*, 1982; Wang *et al.*, 1999)。由于缺乏观测,太平洋西边界流和印尼贯穿流的多尺度过程在西太暖池热力冲放中的作用,目前还不清楚。ARLINDO 观测初步显示,1997—1998 年强厄尔尼诺初期,望嘉锡海峡印尼贯穿流流量减弱(Gordon *et al.*, 1999; Susanto *et al.*, 2005, 2012; Gordon *et al.*, 2008)。遗憾的是 ARLINDO 计划的潜标观测截止于 1997 年秋季,没有覆盖整个 1997—1998 强厄尔尼诺事件。

近期关于全球变暖减缓的研究表明,全球变暖减缓的机制主要有两个假设:(1)大气中的水汽或者气溶胶增减引起太阳辐射到达海表面的部分有增加或者减少(Solomon *et al.*, 2011; Kaufmann *et al.*, 2011);(2)到达海表面的净热辐射由于温室气体增加的确有所增加,但是太平洋年代际变化(如 PDO、IPO 等)伴随上层海洋向中深层海洋的热量输送有所变化,引

起赤道太平洋的类拉尼娜和类厄尔尼诺等事件 (Meehl *et al.*, 2011; Kosaka *et al.*, 2013; England *et al.*, 2014)。实际情况, 可能两者兼而有之。近 15 年的大量海洋观测证据表明, 自 20 世纪末开始的全球变暖减缓的确伴随海洋中深层热含量的增加, 表明第二个假设是成立的。其中 2005 年以前全球以大西洋次表层热含量增加为主, 2005 年以后主要是印太海域的南半球副热带和南大洋次表层热含量增加为主 (Chen *et al.*, 2014)。很可能这一转换与大西洋经向翻转环流的变化以及印太环流的变化等等有密切关系。近 10 年来的 Argo 浮标观测显示, 热带太平洋和印度洋以及北半球太平洋热含量增加量远小于南半球印太海洋热含量的增加 (Roemmich *et al.*, 2015), 表明温室气体增加所引起的海面热通量增加被海洋环流大量的输运到了南半球海洋, 因此连接热带太平洋和印度洋环流的印尼贯穿流被认为是产生这一现象的核心动力过程 (Lee *et al.*, 2015)。

印尼海及其周边海洋大陆的上空是热带大气季节内振荡传播的主要路径, 观测表明, 热带大气 Madden-Julian 振荡 (简称 MJO) 在热带印度洋生成, 通过海洋大陆上空传播到热带太平洋, 并继续向东传播。MJO 等季节内振荡所引起的赤道西太平洋西风波, 据信可以诱发厄尔尼诺等强烈年际气候异常事件的发生, 因此对气候变化研究和短期气候预报有重要意义。

然而, 近期的高分辨率数值模拟研究显示, 海洋

大陆上空的海陆风等强烈的日变化会阻断 MJO 的传播, 这方面的研究内容是目前正在进行的海洋大陆年 (Year of Maritime Continent, 简称 YMC) 的核心研究内容 (Years of Maritime Continent Science Plan at [http://www.jamstec.go.jp/ymc/ymc\\_pubs.html](http://www.jamstec.go.jp/ymc/ymc_pubs.html)), 该计划的实施目标是揭示海洋大陆上空季节内振荡传播的动力过程, 从而提高短期气候预测和预报提供依据。主要依靠热带印度洋和太平洋的协同观测, 目前印尼海上空的海气相互作用观测还是空白。

太平洋 ENSO 和印度洋偶极子都是热带海洋大气的强年际气候异常事件, 它们之间的相互作用, 以往的研究多关注大气桥过程, 而忽视了海洋通道的作用。我们在国际上首次提出印度洋偶极子通过印尼贯穿流影响太平洋 ENSO 演变的“海洋通道”机制 (图 6, Yuan *et al.*, 2011a, 2013)。研究表明, 偶极子强迫约一半的东太平洋冷舌区海面温度年际变率, 其异常事件可以提前两年预报, 表明海洋动力过程为 ENSO 预报跨越春季障碍提供了关键的信息通道 (Yuan *et al.*, 2011a, 2013; Xu *et al.*, 2013; Yuan *et al.*, 2017)。随着全球气候变化, 印度洋偶极子和 ENSO 的前兆因子关系也发生变化 (Xu *et al.*, 2015)。这一“海洋通道”机制的有效性, 还需要印尼贯穿流源区海流观测的支持。我们目前已经在马鲁古海峡积累了长达 5 年的时间序列测量数据, 将通过分析这些数据库, 证明“海洋通道”机制的有效性。

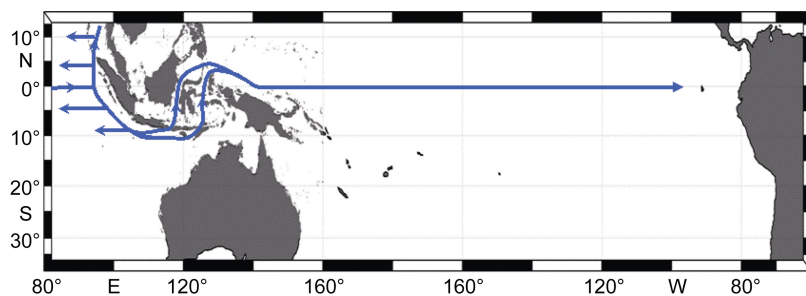


图 6 印太“海洋通道”机制示意图 (摘自 Yuan *et al.*, 2013)

Fig.6 The schematic of the Indo-Pacific “Oceanic Channel” dynamics (from Yuan *et al.*, 2013)

#### 4 总结与展望

海上丝绸之路自秦汉时期开通以来, 一直是沟通东西方经济文化交流的重要桥梁, 而东南亚地区自古就是海上丝绸之路的重要枢纽和组成部分。2013 年 10 月习近平总书记访问东盟国家时提出建设“21 世纪海上丝绸之路”, 为进一步深化中国与东盟国家

的合作, 谋取双方人民的福祉提出了战略构想。之后 2014 年 3 月 5 日的政府工作报告上, 李克强总理提出抓紧规划建设“21 世纪海上丝绸之路”。“21 世纪海上丝绸之路”是我国在世界格局发生复杂变化的当前, 主动创造合作、和平、和谐的对外合作环境的有力手段, 为我国全面深化改革创造了良好的机遇和外部环境。



印尼海处于海洋大陆的中心地带和海上丝绸之路的十字路口,是新海丝战略的首要发展目标之一。印尼海多个海峡连通从太平洋进入印度洋的洋流,衔接西太平洋和东印度洋的暖池,是影响热带气候变异的关键海域,对维持全球大洋热盐分布和平衡起关键的作用,影响全球大洋环流的结构及长期的气候变化。开展印尼贯穿流研究,符合国家战略需求,不仅可以从海洋环境保障和防灾减灾等方面,为我国国家战略和东盟经济发展服务,而且可以成为“一带一路”科技与人文交流的重要组成部分,可以很好地满足国家重大战略需求。

随着人类消耗化石能的不断增加,大气中二氧化碳的浓度不断增高,造成地球表面气温不断增加,严重地影响着人类社会的可持续发展。这一现象已经引起国际社会的广泛关注,其中开始于20世纪末的全球变暖减缓现象,以及该背景下,极端气候异常事件发生的变化等等,成为过去十几年以来气候变化研究的热点科学问题。最近几年,连续几个厄尔尼诺事件发生,其中包括器测记录历史以来第二强的2015—2016厄尔尼诺事件,以及随后出现的全球变暖加速趋势,成为新的国际研究热点。最新的研究显示,印尼贯穿流在全球变暖减缓过程中对全球热量储备和输运起了重要的作用,其在强厄尔尼诺事件中的角色以及其热量输运的多尺度动力过程还有待新的研究揭示。

印尼贯穿流研究的重要性得到国际学术界的一贯重视,体现在历史上一系列针对其流量和变异的国际观测计划的实施。国际CLIVAR(气候变化与预测)计划对印尼贯穿流的观测研究给予了高度重视,专门成立了以美国Scripps海洋研究所Janet Sprintall博士为首的印尼贯穿流任务小组,负责协调CLIVAR太平洋委员会(PP)和印度洋委员会(IOP),以推进印尼贯穿流的进一步观测研究。CLIVAR计划是国际气象组织(WMO)下设的国际气候研究组织(WCRP)的重要科学研究计划之一,代表国际气候变化研究最前沿和最高水平的方向。2010年,CLIVAR设立了NPOCE(西北太平洋海洋环流与气候实验)国际合作研究计划,将印尼贯穿流的观测研究列为其重点研究内容之一。NPOCE计划由中国科学家发起,得到8个国家、19个研究机构的参与,取得了巨大成功。目前,已经分别获得菲律宾东部沿岸西边界流和赤道主流系连续四年多的潜标观测数据,在印尼海里,通过与印尼科学院合作,

袁东亮课题组获得了2012年以来的印尼贯穿流源区连续四年的海流观测序列和三次印尼海大规模综合普查数据。所有的观测计划还在不断进行中,在今后几年里有望积累较长的海流连续观测时间序列,为开展印尼贯穿流多尺度变异研究提供宝贵的现场观测资料。

以袁东亮为学术带头人的中国科学院海洋研究所的“西太平洋海洋环流动力过程”创新研究群体在西太平洋和印尼贯穿流源区环流与气候方面开展了卓有成效的研究,他们揭示了热带印度洋热带正、负偶极子演变的赤道波滞后负反馈机制,建立起IOD影响太平洋ENSO演变的“海洋通道”机制理论:指出偶极子期间的印度洋赤道开尔文波可以穿过印度尼西亚海域进入赤道西太平洋,再通过太平洋海气耦合加以放大,进而影响ENSO以及其它热带气候演变过程。使用P-vector方法计算得到一套全球绝对地转流流场数据,据此发现了全球热带大洋海域存在着显著地由非线性过程驱动的非Sverdrup环流结构,还发现了北太平洋低纬度海域的一支潜流,命名之为北赤道次流(NESC,图7),该潜流对印尼贯穿流源区次表层环流和物质能量平衡有重要影响(Yuan *et al.*, 2014)。揭示不连续西边界附近西边界流存在多平衡态、Hopf分岔和迟滞变异等现象的非线性动力机制(Yuan *et al.*, 2011b; Wang *et al.*, 2012, 2014),为开展印尼贯穿流源区海洋环流动力学研究提供了理论基础。这些原创性动力学理论成果标志着本群体的研究已经处于国际领先地位。

“西太平洋海洋环流动力过程”创新研究群体依据大量西太平洋和印尼贯穿流源区的观测结果,不断揭示新的环流变异规律,并在新的观测和理论研究基础上,改进了一个以中国科学院海洋研究所冠名的中等复杂耦合模式(IOCAS ICM),并对2015—2016年的强厄尔尼诺事件进行成功模拟和实时预报(Zhang *et al.*, 2016, 2017b),深化了对次表层上卷海水温度、热带不稳定波、北赤道逆流源区等对厄尔尼诺事件的调制影响等物理过程和机制的认知(Gao *et al.*, 2017; Zhang, 2016; Zhang *et al.*, 2017a)。他们将不断深入分析已经获取观测的数据,瞄准国际前沿科学问题,继续引领国际西太平洋和印尼贯穿流研究的新的方向。

致谢 感谢“科学一号”和“科学号”船长和全体船员与中国科学院海洋研究所工程技术部的通力协作。

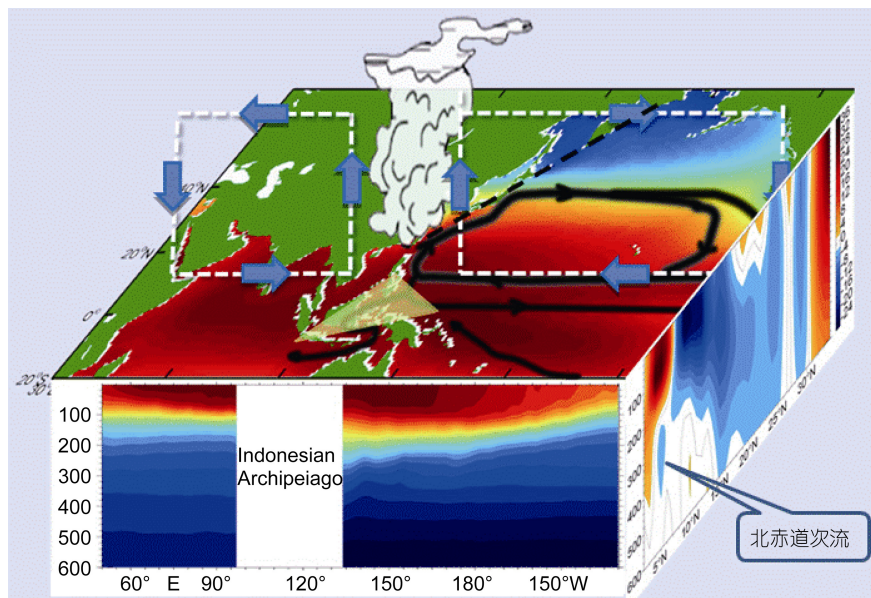


图7 北太平洋暖池与纬向环流示意图

Fig.7 The schematic of the warm pool and zonal currents in the North Pacific Ocean

注: 上界面和正面红色代表暖池, 蓝色代表冷水。东侧界面红色代表向东的海流, 由南往北分别是北赤道逆流、副热带逆流和黑潮延伸体; 蓝色代表向西的海流, 主要有北赤道流。新发现的北赤道次流位于北赤道逆流下面

### 参 考 文 献

- Bingham F M, Lukas R, 1994. The southward intrusion of North Pacific Intermediate Water along the Mindanao coast. *Journal of Physical Oceanography*, 24(1): 141—154
- Cannon G A, 1966. Tropical waters in the western Pacific Ocean, August–September 1957. *Deep Sea Research and Oceanographic Abstracts*, 13(6): 1139—1148
- Chen X Y, Tung K K, 2014. Varying planetary heat sink led to global-warming slowdown and acceleration. *Science*, 345(6199): 897—903
- Cresswell G, Frische A, Peterson J *et al*, 1993. Circulation in the Timor Sea. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 98(C8): 14379—14389
- Cresswell G R, Luick J L, 2001. Current measurements in the Halmahera Sea. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 106(C7): 13945—13951
- Cresswell G, Wells N, 1998. The ASEAN-Australia Regional Ocean Dynamic Experiment Expedition 1993—1995. *Proceeding of symposium, Lombok, Indonesia, June 1995*. Canberra: Amsat Ltd
- England M H, McGregor S, Spence P *et al*, 2014. Recent intensification of wind-driven circulation in the Pacific and the ongoing warming hiatus. *Nature Climate Change*, 4(3): 222—227
- Ffield A, Gordon A L, 1992. Vertical mixing in the Indonesian thermocline. *Journal of Physical Oceanography*, 22(2): 184—195
- Fioux M, Andrié C, Delecluse P *et al*, 1994. Measurements within the Pacific-Indian oceans throughflow region. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 41(7): 1091—1130
- Fine R A, 1985. Direct evidence using tritium data for throughflow from the Pacific into the Indian Ocean. *Nature*, 315(6019): 478—480
- Fine R A, Lukas R, Bingham F M *et al*, 1994. The western equatorial Pacific: A water mass crossroads. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 99(C12): 25063—25080
- Gao C, Zhang R H, 2017. The roles of atmospheric wind and entrained water temperature ( $T_e$ ) in the second-year cooling of the 2010—12 La Niña event. *Climate Dynamics*, 48(1—2): 597—617
- Godfrey J S, 1996. The effect of the Indonesian throughflow on ocean circulation and heat exchange with the atmosphere: A review. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 101(C5): 12217—12237
- Godfrey J S, Wilkin J, Hirst A C, 1993. Why does the Indonesian throughflow appear to originate from the North Pacific? *Journal of Physical Oceanography*, 23(6): 1087—1098
- Gordon A L, Sprintall J, Van Aken H M *et al*, 2010. The Indonesian throughflow during 2004—2006 as observed by the INSTANT program. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, 50(2): 115—128
- Gordon A L, Susanto R D, Ffield A *et al*, 2008. Makassar Strait throughflow, 2004 to 2006. *Geophysical Research Letters*, 35(24): L24605
- Gordon A L, 1986. Interocean exchange of thermocline water. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 91(C4): 5037—5046
- Gordon A L, 1998. Western Weddell sea thermohaline stratification. In: Jacobs S S, Weiss R F eds. *Ocean, Ice, and Atmosphere: Interactions at the Antarctic Continental*

- Margin. Washington, D C: American Geophysical Union, 215—240
- Gordon A L, 2001. Chapter 4.7 Interocean exchange. *International Geophysics*, 77: 303—314
- Gordon A L, 2005. The Indonesian seas. *Oceanography*, 18(4): 80—87
- Gordon A L, Ffield A, Ilahude A G, 1994. Thermocline of the Flores and Banda seas. *Journal of Geophysical Research*, 99(99): 18235—18242
- Gordon A L, Fine R A, 1996. Pathways of water between the Pacific and Indian oceans in the Indonesian seas. *Nature*, 379(6561): 146—149
- Gordon A L, Huber B A, Metzger E J *et al*, 2012. South China Sea throughflow impact on the Indonesian throughflow. *Geophysical Research Letters*, 39(11): L11602
- Gordon A L, Susanto R D, Ffield A, 1999. Throughflow within Makassar Strait. *Geophysical Research Letters*, 26(21): 3325—3328
- Hautala S L, Roemmich D H, Schmilz W J Jr, 1994. Is the North Pacific in Sverdrup balance along 24°N? *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 99(C8): 16041—16052
- Hu D X, Cui M C, 1989. The western boundary current in the far-western Pacific Ocean. In: *Proceedings of Western International Meeting and Workshop on TOGA COARE*. New Caledonia, 123—134
- Ilahude A G, Gordon A L, 1996. Thermocline stratification within the Indonesian Seas. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 101(C5): 12401—12409
- Kashino Y, Firing E, Hacker P *et al*, 2001. Currents in the Celebes and Maluku seas, February 1999. *Geophysical Research Letters*, 28(7): 1263—1266
- Kashino Y, Watanabe H, Herunadi B *et al*, 1999. Current variability at the Pacific entrance of the Indonesian Throughflow. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 104(C5): 11021—11035
- Kaufmann R K, Kauppi H, Mann M L *et al*, 2011. Reconciling anthropogenic climate change with observed temperature 1998—2008. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 108(29): 11790—11793
- Kosaka Y, Xie S P, 2013. Recent global-warming hiatus tied to equatorial Pacific surface cooling. *Nature*, 501(7467): 403—407
- Lee S K, Park W, Baringer M O *et al*, 2015. Pacific origin of the abrupt increase in Indian Ocean heat content during the warming hiatus. *Nature Geoscience*, 8(6): 445—449
- Lee T, Fukumori I, Menemenlis D *et al*, 2002. Effects of the Indonesian throughflow on the Pacific and Indian Oceans. *Journal of Physical Oceanography*, 32(5): 1404—1429
- Lindstrom E, Lukas R, Fine R *et al*, 1987. The western equatorial Pacific Ocean circulation study. *Nature*, 330(6148): 533—537
- Luck J L, Cresswell G R, 2001. Current measurements in the Maluku Sea. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 106(C7): 13953—13958
- Lukas R, Firing E, Hacker P *et al*, 1991. Observations of the Mindanao Current during the western equatorial Pacific Ocean circulation study. *Journal of Geophysical Research*, 96(4): 7089—7104
- Meehl G A, Arblaster J M, Fasullo J T *et al*, 2011. Model-based evidence of deep-ocean heat uptake during surface-temperature hiatus periods. *Nature Climate Change*, 1(7): 360—364
- Molcard R, Fioux M, Ilahude A G, 1996. The Indo-Pacific throughflow in the Timor Passage. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 101(C5): 12411—12420
- Molcard R, Fioux M, Swallow J C *et al*, 1994. Low frequency variability of the currents in Indonesian channels (Savu-Roti and Roti-Ashmore Reef). *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 41(11—12): 1643—1661
- Murray S P, Arief D, 1988. Throughflow into the Indian Ocean through the Lombok Strait, January 1985—January 1986. *Nature*, 333(6172): 444—447
- Nitani H, 1972. Beginning of the Kuroshio. In: *Kuroshio: Physical Aspects of the Japan Current*. Tokyo: University of Tokyo Press, 129—163
- Nof D, 1996. What controls the origin of the Indonesian throughflow? *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 101(C5): 12301—12314
- Qu T D, Lindstrom E J, 2004. Northward intrusion of Antarctic Intermediate Water in the western Pacific. *Journal of Physical Oceanography*, 34(9): 2104—2118
- Qu T D, Du Y, Meyers G, Ishida A, Wang D, 2005. Connecting the tropical Pacific with Indian Ocean through South China Sea. *Geophys Res Lett*, 32(24), 348—362
- Qu T D, Mitsudera H, Yamagata T, 1999. A climatology of the circulation and water mass distribution near the Philippine coast. *Journal of Physical Oceanography*, 29(7): 1488—1505
- Rasmusson E M, Carpenter T H, 1982. Variations in tropical sea surface temperature and surface wind fields associated with the Southern Oscillation/El Niño. *Monthly Weather Review*, 110(5): 354—384
- Reid J L Jr, 1965. Intermediate Waters of the Pacific Ocean. In: *Johns Hopkins Oceanographic Studies*, No. 2. Baltimore, Maryland: Johns Hopkins Press
- Roemmich D, Church J, Gilson J *et al*, 2015. Unabated planetary warming and its ocean structure since 2006. *Nature Climate Change*, 5(3): 240—245
- Schneider N, 1998. The Indonesian Throughflow and the global climate system. *Journal of Climate*, 11(4): 676—689
- Solomon S, Daniel J S, Neely R R *et al*, 2011. The persistently variable “background” stratospheric aerosol layer and global climate change. *Science*, 333(6044): 866—870
- Sprattall J, Gordon A L, Koch-Larrouy A *et al*, 2014a. The Indonesian seas and their role in the coupled ocean-climate system. *Nature Geoscience*, 7(7): 487—492
- Sprattall J, Révelard A, 2014b. The Indonesian Throughflow response to Indo-Pacific climate variability. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 119(2): 1161—1175
- Sprattall J, Wijffels S, Gordon A L *et al*, 2004. INSTANT: A

- new international array to measure the Indonesian Throughflow. *EOS*, 85(39): 369—376
- Sprintall J, Wijffels S E, Molcard R *et al*, 2009. Direct estimates of the Indonesian Throughflow entering the Indian Ocean: 2004–2006. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 114(C7): C07001
- Suga T, Kato A, Hanawa K, 2000. North Pacific Tropical Water: its climatology and temporal changes associated with the climate regime shift in the 1970s. *Progress in Oceanography*, 47(2–4): 223—256
- Susanto R D, Ffield A, Gordon A L *et al*, 2012. Variability of Indonesian throughflow within Makassar Strait, 2004–2009. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 117(C9): C09013
- Susanto R D, Gordon A L, 2005. Velocity and transport of the Makassar Strait throughflow. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 110(C1): C01005
- Talley L D, 1993. Distribution and formation of North Pacific intermediate water. *Journal of Physical Oceanography*, 23(3): 517—537
- Toole J M, Zou E, Millard R C, 1988. On the circulation of the upper waters in the western equatorial Pacific Ocean. *Deep Sea Research Part A: Oceanographic Research Papers*, 35(9): 1451—1482
- Toole J M, Millard R C, Wang Z *et al*, 1990. Observations of the Pacific North Equatorial Current bifurcation at the Philippine coast. *Journal of Physical Oceanography*, 20(2): 307—318
- Tsuchiya M, 1968. Upper waters of the intertropical Pacific Ocean. In: *The Johns Hopkins Oceanographic Studies*, No. 4. Baltimore: The Johns Hopkins Press
- Tsuchiya M, 1991. Flow path of Antarctic Intermediate Waters in the western equatorial South Pacific Ocean. *Deep Sea Research Part A: Oceanographic Research Papers*, 38(SI), 273—279
- Tsuchiya M, Lukas R, Fine R A *et al*, 1989. Source waters of the Pacific equatorial undercurrent. *Progress in Oceanography*, 23(2): 101—147
- Van Aken H, Punjawan J, Saimima S, 1988. Physical aspects of the flushing of the east Indonesian basins. *Netherlands Journal of Sea Research*, 22(4): 315—339
- van Aken H M, 2005. Dutch oceanographic research in Indonesia in colonial times. *Oceanography*, 18(4): 30—41
- Vranes K, Gordon A L, Ffield A, 2002. The heat transport of the Indonesian Throughflow and implications for the Indian Ocean heat budget. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 49(7–8): 1391—1410
- Wajsowicz R C, 1996. Flow of a western boundary current through multiple straits: An electrical circuit analogy for the Indonesian throughflow and archipelago. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 101(C5): 12295—12300
- Wajsowicz R C, Schneider E K, 2001. The Indonesian throughflow's effect on global climate determined from the COLA coupled climate system. *Journal of Climate*, 14(13): 3029—3042
- Wang Z, Yuan D L, 2012. Nonlinear dynamics of two western boundary currents colliding at a gap. *Journal of Physical Oceanography*, 42(11): 2030—2040
- Wang Z, Yuan D L, 2014. Multiple equilibria and hysteresis of two unequal-transport western boundary currents colliding at a gap. *Journal of Physical Oceanography*, 44(7): 1873—1885
- Webster P J, Lukas R, 1992. TOGA COARE: The coupled ocean—atmosphere response experiment. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 73(9): 1377—1416
- Wyrtki K, 1961. *Physical oceanography of the Southeast Asian waters*. In: *Scripps Institution of Oceanography*. La Jolla, California
- Wyrtki K, 2005. Discovering the Indonesian Throughflow. *Oceanography*, 18(4): 28—29
- Xu T F, Yuan D L, 2015. Why does the IOD-ENSO teleconnection disappear in some decades? *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 33(2): 534—544
- Xu T F, Yuan D L, Yu Y Q *et al*, 2013. An assessment of Indo-Pacific oceanic channel dynamics in the FGOALS-g2 coupled climate system model. *Advances in Atmospheric Sciences*, 30(4): 997—1016
- You Y, Tomczak M, 1993. Thermocline circulation and ventilation in the Indian Ocean derived from water mass analysis. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 40(1): 13—56
- Yuan D L, Wang J, Xu T F *et al*, 2011a. Forcing of the Indian Ocean dipole on the interannual variations of the tropical Pacific Ocean: roles of the Indonesian throughflow. *Journal of Climate*, 24(14): 3593—3608
- Yuan D L, Wang Z, 2011b. Hysteresis and dynamics of a western boundary current flowing by a gap forced by impingement of mesoscale eddies. *Journal of Physical Oceanography*, 41(5): 878—888
- Yuan D L, Xu P, Xu T F, 2017. Climate variability and predictability associated with the Indo-Pacific Oceanic channel dynamics in the CCSM4 coupled system model. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 35(1): 23—38
- Yuan D L, Zhang Z C, Chu P C *et al*, 2014. Geostrophic circulation in the tropical North Pacific Ocean based on Argo profiles. *Journal of Physical Oceanography*, 44(2): 558—575
- Yuan D L, Zhou H, Zhao X, 2013. Interannual climate variability over the tropical Pacific Ocean induced by the Indian Ocean dipole through the Indonesian Throughflow. *Journal of Climate*, 26(9): 2845—2861
- Zhang R H, 2016. A modulating effect of tropical instability wave (TIW)-induced surface wind feedback in a hybrid coupled model of the tropical Pacific. *Journal of Geophysical Research*, 121(10): 7326—7353
- Zhang R H, Gao C, 2016. The IOCAS intermediate coupled model (IOCAS ICM) and its real-time predictions of the 2015–16 El Niño event. *Science Bulletin*, 66(13): 1061—1070
- Zhang R H, Gao C, 2017a. Processes involved in the second-year

warming of the 2014—15 El Niño event as derived from an intermediate ocean model. *Science China Earth Sciences*, 60(9): 1601—1613

Zhang R H, Tao L J, Gao C, 2017b. An improved simulation of

the 2015 El Niño event by optimally correcting the initial conditions and model parameters in an intermediate coupled model. *Climate Dynamics*, <http://dx.doi.org/10.1007/s00382-017-3919-z>

## THE MULTI-SCALE VARIABILITY OF THE OCEAN CIRCULATION AT THE PACIFIC ENTRANCE OF THE INDONESIAN THROUGHFLOW AND ITS SCIENTIFIC IMPORTANCE

YUAN Dong-Liang<sup>1,2,3</sup>, ZHOU Hui<sup>1,2</sup>, WANG Zheng<sup>1,2</sup>, LI Xiang<sup>1,2</sup>

(1. *Key Laboratory of Ocean Circulation and Waves, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China*; 2. *Laboratory for Ocean and Climate Dynamics, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266235, China*; 3. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

**Abstract** The Pacific entrance of the Indonesian Throughflow refers to the area composed of the eastern Sulawesi Sea, northern Maluku Sea, and the western Pacific Ocean southeast of Luzon and north of Papua New Guinea. The ocean circulation in this area is very important to global ocean mass and heat balances and to climate changes, but is least observed historically. Based on a review of historical studies in the area and the latest observations during the multiple cruises in the western Pacific Ocean conducted by the Institute of Oceanology of the Chinese Academy of Sciences (IOCAS) since 2010, we give a preliminary description of the multiple-scale characters of the regional ocean circulation, the importance of which on the dynamics study of El Niño and the Southern Oscillation, on the intraseasonal variability, and on the hiatus and expedition study of the global warming are discussed. These western Pacific cruises are supported by the National Science Foundation of China Share Cruise Project, the National Basic Research Program of Global Change Project, and the Strategic Priority Project of the Chinese Academy of Sciences under its first theme “Dynamics and climatic effects of the western Pacific main ocean currents and warm pool variability”. In the past few years, we have worked with the Research Center for Oceanography of the Indonesian Institute of Sciences (RCO/LIPI) to launch multiple oceanographic surveys in the Indonesian seas and conduct time series measurements in key channels of the Indonesian Throughflow. A mooring array of the largest scale in history has been constructed in the Indonesian seas. Based on the international cooperation, strategic partnership between IOCAS and the RCO/LIPI has been established. The oceanographic data obtained through the international cooperation will provide valuable information to support the study of the variability of the Indonesian Throughflow and its role in climate changes, and to serve the “One Belt and One Road” national policy.

**Key words** Indonesia Sea; The Pacific entrance of the Indonesian Throughflow; Western Pacific Ocean; Ocean observation array; Multi-scale variability; ENSO dynamics; global hiatus