

晚中新世以来印度洋-太平洋暖池水体交换过程及其气候效应

李铁刚^{1,2}, 熊志方^{1,2}, 贾奇^{1,2}

(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 海洋地质过程与环境功能实验室, 山东 青岛 266237)

摘要:以印尼海道或印尼穿越流连接的印度洋-太平洋暖池之间的水体交换不仅控制了印-太热带海区的物质、热量和淡水收支,也通过反馈和遥相关机制对高纬海区产生影响,因而在调控区域和全球气候中功不可没。本文综述了晚中新世以来印尼海道或印尼穿越流的演化历史及其对热带和高纬海区气候的影响过程与机制。千年和轨道尺度上,印尼穿越流在冰期为表层流主导;在间冰期温跃层流得到强化;在冰消期为表层流主导向温跃层流主导过渡,其转换模式与海平面、温盐环流、类 ENSO 和东亚季风等密切相关,但其中的作用机制异常复杂。构造尺度上,印尼海道呈多期次逐渐关闭的趋势,但其相对开合、张缩的时间存在争议。印尼海道或印尼穿越流的演化改组了印度洋暖池和西太平洋暖池之间热量、营养物、水团和洋流的分布,对暖池的形成与发展以及类 ENSO 特别是上新世晚期永久类 El Niño 产生重要影响。印尼海道的关闭被认为触发了北半球大冰期,然而切断向北半球高纬海区热量的输送是由通过印尼海道关闭引起的大洋环流还是大气环流效应所致,目前还没有定论。印-太暖池水体交换对热带和高纬海区气候影响机制的诸多假说还只停留在模型模拟的阶段,缺乏高质量古海洋记录的实证检验。针对本文提出的科学问题和阐述的未来研究方向,在印-太暖池印尼海道两侧设计站位,并获取高分辨率或长时间跨度的岩芯,实施综合对比的全水层古海洋学研究,是加深该领域研究的当务之急。

关键词:印尼海道;印尼穿越流;ENSO;北半球大冰期;热量与水汽

中图分类号:P532

文献标识码:A

文章编号:1671-6647(2020)03-0377-13

doi:10.3969/j.issn.1671-6647.2020.03.001

引用格式:LI T G, XIONG Z F, JIA Q. Water exchange between western Pacific warm pool and Indian warm pool and its climatic effects since the late Miocene[J]. Advances in Marine Science, 2020, 38(3): 377-389. 李铁刚, 熊志方, 贾奇. 晚中新世以来印度洋-太平洋暖池水体交换过程及其气候效应[J]. 海洋科学进展, 2020, 38(3): 377-389.

印度洋-太平洋暖池(以下简称印-太暖池)以其巨厚的表层暖水覆盖大范围的热带西太平洋和热带东印度洋,是全球面积最大的表层暖水聚集区,也是世界上最重要的热量和水汽源区之一^[1-2]。印-太暖池的热引擎和蒸汽源角色决定其上层水体结构和表层温度的较小变化很可能引起全球气候系统明显的反馈效应^[3-5],因而其在全球气候变化中的驱动地位举足轻重。从地理位置上看,尽管印-太暖池被印度尼西亚群岛阻隔为西太平洋暖池(简称西太暖池)和印度洋暖池,然而这两个暖池存在着紧密的联系^[6-7]。这其中,印尼海道的开关、张缩以及印尼穿越流的强弱控制了从西太暖池向印度洋暖池的水体输送和热量传输,因而在印-太暖池水体交换中扮演主导角色^[8-10]。另外,印尼穿越流作为全球温盐环流的关键环节,直接将印-太暖池的热带气候效应放大或遥相关到高纬海区,对高纬海区的气候也产生重要影响^[11-12]。因此,查明不同时间尺度

收稿日期:2019-11-28

资助项目:国家自然科学基金项目——晚中新世以来印度洋-太平洋暖池水体交换过程及其气候效应(41830539),上新世-更新世过渡期西太平洋暖池 ENSO 式变化及其对北半球大冰期成因的启示(41906063),中布容期热带西太平洋深部[CO₃²⁻]变化:碳循环过程与气候效应(41806084)和上新世以来热带西太平洋深部呼吸碳库的演化及其与大气 pCO₂ 冰期旋回的关联(91858106);泰山学者工程专项——泰山学者特聘专家计划(ts20190963)

作者简介:李铁刚(1965-),男,研究员,博士,主要从事古海洋学与古环境方面研究. E-mail: tgli@fio.org.cn

(陈靖 编辑)

上印-太暖池水体交换的演化过程并揭示其对区域或全球气候的影响机理与反馈效应,对于理解过去气候变化的驱动机制非常重要。

近年来,随着国际大型科考航次在印-太暖池取得的高质量沉积物岩芯及其随后开展的广泛国际合作,使得在该区域的古海洋学研究取得了长足的进展^[13-15]。本文首先总结晚中新世以来印尼海道或印尼穿越流在千年、轨道和构造时间尺度上的演化特征或趋势,并进一步综述印-太暖池水体交换对热带和高纬海区气候的影响过程与机理,然后指出该领域相关古海洋学研究存在的问题,最后展望该领域可以拓展的研究方向,以为国内学术同行提供参考与借鉴。

1 国内外研究现状

1.1 印尼海道或印尼穿越流的演化

1.1.1 千年和轨道尺度上印尼穿越流的演化

印-太暖池的水体交换必须以印尼海道或印尼穿越流的演化作为外在表征。千年和轨道尺度上,印尼穿越流相关的古海洋学研究比较薄弱,但是也取得了一些进展。冰期,印尼穿越流主要为高温高盐的表层流;间冰期,印尼穿越流作为温跃层流得到强化^[16-17];而在冰消期,印尼穿越流从表层流主导向温跃层流主导过渡^[17-19]。尽管各气候模态下印尼穿越流的主导层流查明得比较清楚,然而其控制因素还没有很好地确定,众说纷纭。例如,冰消期印尼穿越流从表层流主导转变为温跃层流主导可能是响应海平面上升的结果^[17-19]。冰期或北大西洋冷事件期间,印尼穿越流随着全球温盐环流的减弱而减弱^[20]。Xu^[21]提出印尼穿越流的通量、水体性质和垂向层化受到类 ENSO 和东亚季风的影响,认为早全新世增加的东亚季风降雨和盛行的类 La Niña 抑制了印尼穿越流的表层流属性,从而导致其作为温跃层流得以加强。因此,在千年和轨道尺度上,印尼穿越流发生了显著的变化,并与海平面、全球温盐环流、类 ENSO 和东亚季风密切相关,然而其中的作用机制盘根错节。

1.1.2 构造尺度上印尼海道或印尼穿越流的演化

与千年和轨道等短时间尺度上的印尼穿越流演化相比,构造尺度上的印尼海道或印尼穿越流演化及其长期趋势研究就少之甚少。总体而言,晚中新世以来印尼海道处于阶段性逐渐关闭的状态,相关证据来自于构造地质学与古海洋学两个方面。通过综合分析印尼海区的构造地质活动资料,周祖翼等^[22]提出印尼海道演化的两度关闭模式,认为印尼海道在 11—9 Ma 时第一次关闭,9—6 Ma 为关闭第一间歇期;6—1 Ma 时第二次关闭,1.0—0.2 Ma 为关闭第二间歇期。Hall^[23]通过构造运动分析,发现 10 Ma 时澳大利亚西北部的侏罗系洋壳开始发生俯冲,引起上覆板块的形变;5 Ma 前后,板块运动发生重要变化,其中马尼拉海沟俯冲加速,澳大利亚-太平洋板块汇聚引起新几内亚进一步抬升;这一系列构造活动最终引起印尼海道的逐渐收缩(图 1)。此外,最近研究表明,印尼海区在 6 Ma 和 3 Ma 时发生的 2 次阶段性构造变形都使印尼海道逐渐关闭^[24]。然而,由于印尼海道的长期演化受到构造地质发育历史的控制^[25],印澳-欧亚-太平洋板块相互碰撞的许多证据已遭后继的板块俯冲等构造活动所破坏^[23],因此要从构造演化角度准确重建印尼海道演化历史是相当困难的。

研究人员将研究方向转向了古海洋学分析。基于有孔虫生物地理分布的研究,Kennett 等^[26]认为西太暖池形成于印尼海道关闭之后距今约 8 Ma 期间;而 Srinivasan 和 Sinha^[27]则认为印尼海道完全关闭不过在 5.2 Ma 前后。Gallagher 等^[28]指出印尼穿越流的长期演化呈阶段性变化:在 10.0—4.4 Ma,印尼穿越流减弱,在 4.4—4.0 Ma,印尼穿越流增强,在 4.0—1.6 Ma,印尼穿越流再次减弱,在 1.6—0.8 Ma,印尼穿越流又有所增强,而到 0.8 Ma 之后,印尼穿越流再次受到抑制。此外,Martin 和 Scher^[29]利用印度洋 ODP 757B 站鱼牙 Nd 同位素(ϵ_{Nd})与太平洋多站位铁锰结壳 $\epsilon_{\text{Nd(T)}}$ ^[30-31]对比发现,11.0—5.5 Ma,印尼海道处于相对打开的状态,5.5—3.4 Ma 时通过印尼海道的洋流受阻,而 3.4 Ma 之后印尼海道可能再次打开或者通过印尼海道

的水团来源发生改变;Singh 和 Gupta^[32] 对 ODP 757B 站微体古生物学分析同样表明,在约 11 Ma,底栖有孔虫 *Nuttallides umbonifera* 丰度快速增加,表明太平洋深层水向印度洋的传输增强,然而在 3.0—2.8 Ma, *N. umbonifera* 丰度降低,表明太平洋与印度洋之间通过印尼海道的中深层水交换减弱或完全中断(图 2)。由此可见,古海洋学视角确实能提供丰富的长尺度印尼海道或印尼穿越流演化信息。

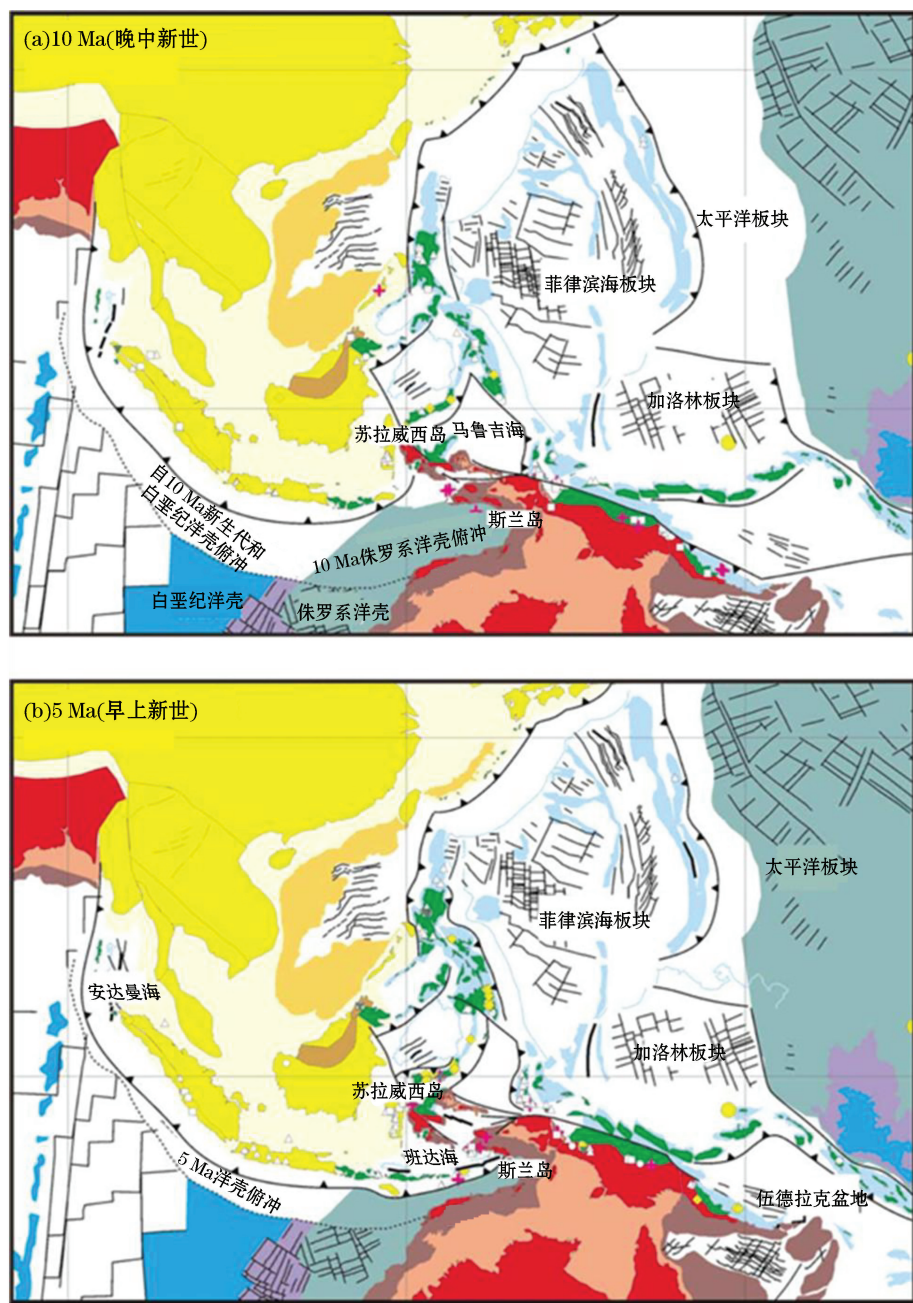


图 1 10 Ma 和 5 Ma 时东南亚构造活动指示的印尼海道演化^[23]

Fig.1 Evolution of the Indonesian seaway at 10 and 5 Ma, based on the tectonic activity in Southeast Asia^[23]

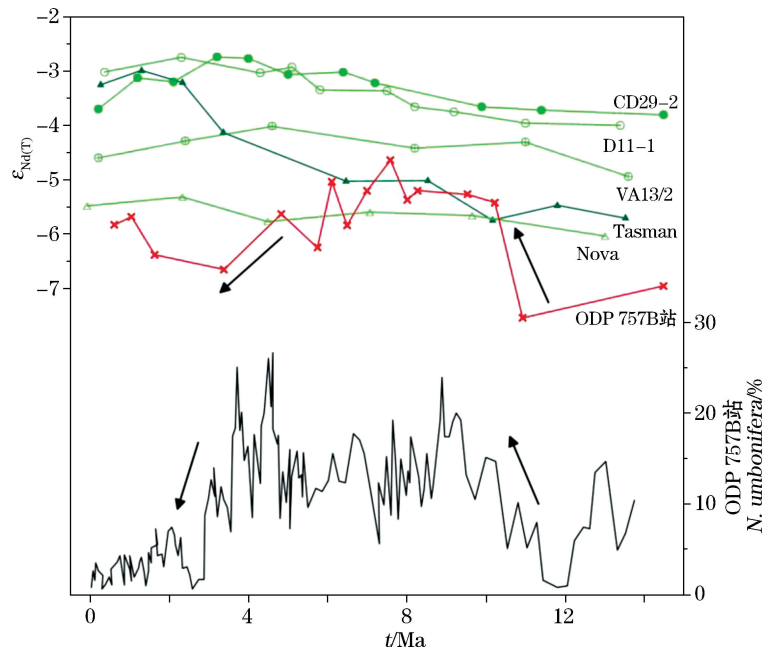


图2 印度洋 ODP 757B 站鱼牙 $\epsilon_{\text{Nd(T)}}$ ^[29]、*Nuttallides umbonifera* 丰度^[32]与太平洋 CD29-2^[30]、D11-1^[30]、VA13/2^[30]、Tasman^[31]和 Nova^[31]铁锰结壳 $\epsilon_{\text{Nd(T)}}$ 记录的对比

Fig.2 Comparison of fish teeth ϵ_{Nd} ^[29] and *Nuttallides umbonifera* abundances^[32] in ODP Site 757B with ferromanganese crust ϵ_{Nd} in sites CD29-2^[30], D11-1^[30], VA13/2^[30], Tasman^[31] and Nova^[31] of Pacific Ocean

1.1.3 南海穿越流对印尼穿越流的影响

南海穿越流从吕宋海峡进入南海,经由民都洛岛海峡和卡里马塔海峡,最终汇入印尼穿越流^[33]。南海穿越流作为淡水传送带,其强弱变化对印尼穿越流产生重要影响^[34]。在年际时间尺度上,由于受到大尺度风应力的影响,印尼穿越流和南海穿越流总是表现出反相位的变化特征^[35]。在 El Niño 年,南海穿越流增强,淡水侵入望加锡海峡,抑制了印尼穿越流表层海水的向南流动,从而导致印尼穿越流表层流显著减弱^[36-39]。目前对于地质历史时期南海穿越流对印尼穿越流影响的研究相对较少。在千年和轨道时间尺度上,冰阶和冰期时,由于北半球冰体积增大,海平面降低,巽他陆架和爪哇海的大面积出露,南海穿越流被阻断,从而使得印尼穿越流表层流增强^[18-9,25,40-41]。构造时间尺度上,最近研究发现在约 3.54 Ma,构造作用引起印尼海道关闭的同时,南海穿越流对印尼穿越流的影响增强^[42]。由此可见,在探讨地史时期印尼穿越流演变时,有必要将南海穿越流对其的影响加以考虑。

1.2 印-太暖池水体交换对热带海区气候的影响

1.2.1 对印度洋暖池气候的影响

印尼海道或印尼穿越流演化导致的印-太暖池水体交换对区域和全球气候产生重要影响。对热带海区而言,印尼海道的开关或张缩通过直接改变印尼穿越流来影响印-太暖池的洋流组成和水体性质^[43-44]。模拟结果表明,5—3 Ma 时澳大利亚与新几内亚处于现在位置以南约 2°~3°处,太平洋与印度洋之间存在一个相对宽且深的海道,之后由于印尼海道收缩引起的洋流改组,使印度洋表层海水温度降低^[44]。印尼海道收缩引起的洋流和水体变化也在古海洋学记录中得到证实,例如 DSDP 214 站浮游有孔虫 $\delta^{18}\text{O}$ 与 Mg/Ca 记录表明,在 3.50—2.95 Ma 热带东印度洋次表层温度降低,表层盐度降低,可能响应于印尼海道收缩重组导致的印尼穿越流水体来源由南太平洋水(高温高盐)变为北太平洋水(低温低盐)^[45](图 3)。另外,在 6.5—3.0 Ma,特别是在 5 Ma 左右,中印度洋中层水低氧带显著扩张,可能与印尼穿越流受限导致向印度洋输送的温

暖贫养水团显著减少,从而使生物生产力增加有关^[46-48]。此外,在 14—3.5 Ma,印尼海道的逐渐关闭导致中新世印度洋赤道喷射流的形成,这一由东向西的上-中层洋流对整个印度洋环流系统产生重要影响^[49]。而后,在 4.0—2.5 Ma,印尼海道的继续收缩导致了中新世印度洋赤道喷射流的减弱与消亡,最终演化为现代印尼穿越流^[39]。

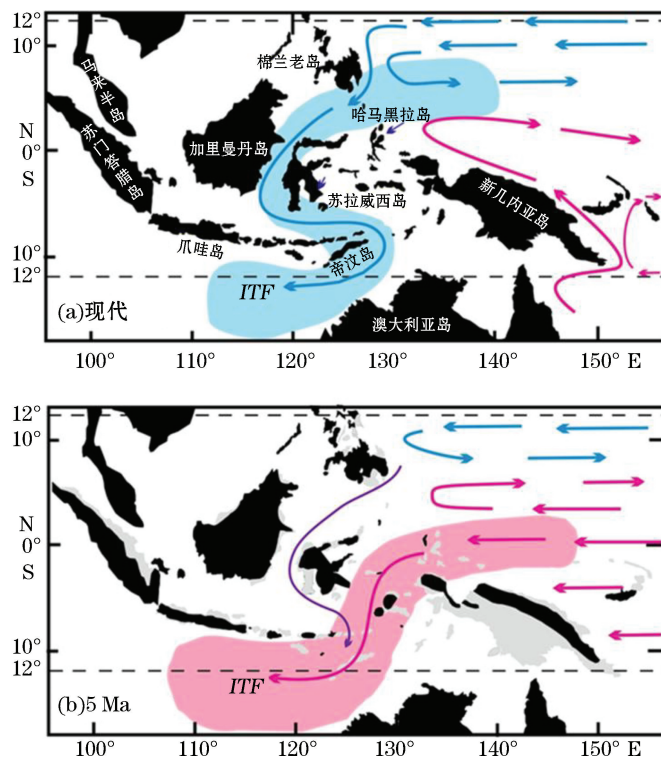


图3 现代与 5 Ma 时印尼穿越流(ITF)演化^[23,34,45]

Fig.3 Styles of the Indonesian throughflow at present and 5 Ma^[23,34,45]

1.2.2 对西太平洋暖池气候的影响

印-太暖池的核心是西太暖池,其范围广,是印-太暖池水体交换的源头,在全球气候中有重要地位。越来越多的研究已经证实,以西太暖池为代表的热带过程对全球气候的影响不亚于以北大西洋经向翻转环流为代表的北半球高纬过程^[50-51]。同上述印度洋暖池 DSPD 214 站记录相对应,西太暖池南部边缘 DSDP 590B 站古海洋学记录表明,3.5 Ma 之后印尼海道的收缩导致东澳大利亚流的扩张,致使西南太平洋表层盐度和温度升高,减小了西南太平洋与热带西太平洋的海表温度梯度^[52]。另外,Cane 和 Molnar^[44]通过数值模拟显示,4—3 Ma 时印尼海道关闭引起的洋流改组还会导致西太暖池上层水温度的升高。然而,赤道西太平洋 ODP 806 站重建的表层和次表层温度记录并不支持模拟结果在 4—3 Ma,热带西太平洋上层水体温度并没有升高的现象^[53-54]。因而,Jochum 等^[55]指出,印尼海道的关闭对热带太平洋的影响可能是更加复杂的过程。

印-太暖池水体交换不仅对西太暖池的上述单个水文、环境因子有重要作用,还对西太暖池的热带系统影响深刻。这其中,西太暖池的形成演化和类 ENSO 是热带过程绕不开的科学命题。古海洋记录表明晚中新世印尼海道的逐渐关闭是原始西太暖池形成和演化的主要原因^[56-57]。但是对于原始西太暖池的形成时间,目前的报道说法不一^[26,56,58-60]。微体古生物学证据显示原始西太暖池形成于 8 Ma^[26];浮游有孔虫氧同位素证据显示,9.9—7.5 Ma 暖水在赤道西太平洋的堆积导致温跃层加深,表明原始暖池可能在该阶段形成^[58];而 Jian 等^[56]则表明原始西太暖池形成于 11.5—10.6 Ma。另外,ODP 806 站浮游有孔虫 $\delta^{18}\text{O}$ 记录表明,当印尼海道收缩或海平面降低时,西太暖池扩张得以发展;当印尼海道相对打开时,西太暖池的发展受到

抑制^[57]。然而, Von Der Heydt 和 Dijkstra^[61] 却认为印尼海道的打开并不能阻止西太暖池的发展, 只是使暖池的位置向印度洋方向移动。可见, 古海洋学家在印尼海道演化对西太暖池形成与发展的影响问题上也存在争议。

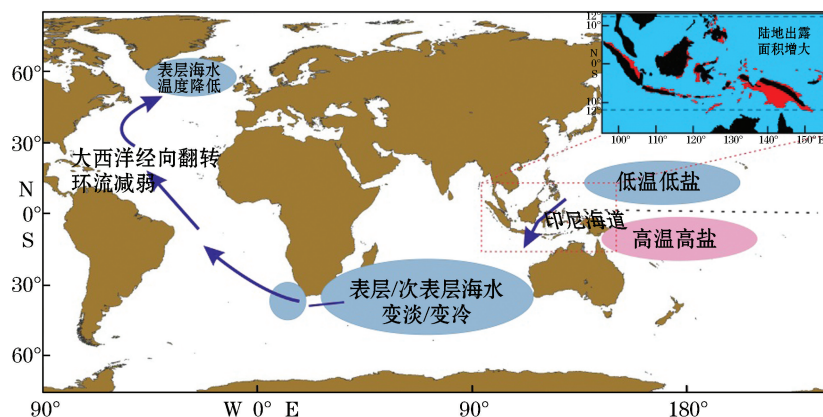
印尼海道或印尼穿越流演化对西太暖池类 ENSO 的影响研究主要体现在数值模拟计算方面。模拟结果表明, 印尼海道的开、关以及引起的印尼穿越流改变对类 ENSO 的频率、强度和长期演化有重要影响^[55, 62-63]。例如, Jochum 等^[55] 认为印尼海道在相对扩张状态下, 伴随着中太平洋表层温度的升高以及类 ENSO 活动的减弱。然而问题是, 除特殊 ENSO 式过程(详见下述永久类 El Niño)外, 缺乏古海洋记录去证实这些有关印尼海道或印尼穿越流演化对(普通)类 ENSO 影响的数值模拟研究结论。但这些数值模拟结果恰恰说明从古海洋学视角研究印尼海道或印尼穿越流对类 ENSO 的影响行之有效。

印尼海道或印尼穿越流演化对西太暖池 ENSO 式过程的影响研究集中于上新世暖期(4.5—3 Ma)的永久类 El Niño。永久类 El Niño 是被推断发生在早上新世区别普通 ENSO 式变化的一种长期气候状态, 也被认为是导致该时期全球温度升高的主要因素^[53]。与现代显著的热带太平洋带状温度梯度不同, 上新世暖期东西太平洋温度梯度仅有 1.5 °C, 沃克环流减弱, 仅相当于现今 El Niño 发生时的状态, 因而被称为永久类 El Niño^[64-67]。然而, 对于上新世暖期永久类 El Niño 的成因目前有多种解释(如亚热带海洋混合增强、低云反照率减小和大气 p_{CO_2} 升高等), 但没有哪一种能单独圆满答复^[68]。这其中, 印尼海道的张缩被认为在永久类 El Niño 的形成与转化中扮演主要角色。印尼海道在相对打开的条件下, 有利于西太暖池处于永久类 El Niño 状态, 而印尼海道的变窄阻挡了温暖的南太平洋海水进入到印度洋, 从而使太平洋带状温度梯度增大, 沃克环流增强, 有利于气候从永久类 El Niño 转变为正常的类 ENSO 模式^[44]。进一步, 上新世暖期永久类 El Niño 是否存在, 不少研究也提出异议^[69-72]。早上新世菲律宾珊瑚 $\delta^{18}\text{O}$ 和 SST 记录显示其变化特征与现代正常 ENSO 式变化相似, 不存在永久类 El Niño^[69]。Zhang 等^[70-71] 基于 TEX₈₆ 反演的东-西太平洋海表温度梯度为 3 °C, 同样不支持早上新世存在永久类 El Niño。更富戏剧性的是, 几个研究表明上新世暖期东-西太平洋温跃层倾斜度增大, 可能处于超强类 La Niña 状态^[73-74]。

1.3 印-太暖池水体交换对高纬海区气候的影响

印-太暖池水体交换不但调控区域热带气候过程, 也对全球重大气候转型或事件产生重要影响。其中, 约 2.75 Ma 时, 北半球大冰期启动, 标志着上新世暖期的结束, 全球平均温度下降约 3 °C, 全球气候发生重大转折^[75-78]。国际学术界对北半球大冰期的形成机制进行了广泛的探讨, 但争议一直未断。太阳辐射量^[76]、大气 p_{CO_2} ^[69]、大洋温盐环流^[66, 79]、热带太平洋带状温度梯度^[80]和构造隆升^[81]等都被认为是导致北半球大冰期的重要因素。其中, 热带太平洋东西两侧海道(即巴拿马地峡和印尼海道)的关闭被认为可能是导致北半球大冰期的先决条件^[44, 82]。但是, 最近的几个研究表明巴拿马地峡关闭对大洋环流的影响时间(4.6—4.0 Ma)要早于北半球大冰期大约 1 Ma^[79, 83]; 而且模拟结果也证实巴拿马地峡关闭可能不足以撼动北半球大冰期的启动^[84]。由于巴拿马地峡关闭假说对解释北半球大冰期成因的失效, 这就不得不促使我们将目光转向印尼海道的演化。

目前, 印尼海道的关闭及其引起的印尼穿越流水团来源的改变可能通过 4 种方式影响北半球大冰期的启动(图 4): 1) 使暖水路径上南大西洋次表层盐度降低, 导致大西洋经向翻转环流减弱^[45, 79, 85]; 2) 使从印度洋向极地和南大西洋输送的热量减少, 从而产生一连串气候效应(如锋带的极向移动), 促进北半球大冰期增强^[45, 52, 86-87]; 3) 导致印尼海区陆地出露面积增大 60%, 可能通过影响沃克环流和大气 p_{CO_2} 对北半球大冰期产生影响^[81]; 4) 导致新几内亚阻挡, 使南太平洋暖水不能进入印度洋, 导致太平洋带状温度梯度增大, 沃克环流增强, 通过热带东太平洋向北半球高纬区域的大气热传输减少, 从而促进北半球冰盖扩张, 触发了北半球大冰期^[44]。



注:小图出自文献[81]

图4 印尼海道关闭影响北半球大冰期启动的作用方式^[79]

Fig.4 The ways influencing the initiation of Northern Hemisphere Glaciation, resulting from closure of Indonesian seaway^[79]

2 存在的问题

2.1 构造尺度上印尼海道或印尼穿越流的演化历史存在分歧

无论是构造地质学还是古海洋学证据都表明,晚中新世以来,印尼海道或印尼穿越流的演化呈现阶段性变化特征,但具体的演化历史仍存在分歧。造成该问题的主要原因有2个:1)前期的研究没有对印尼海道两侧印-太暖池关键研究区进行精细刷选和整体考虑,而且也缺乏长时间序列的岩芯材料;2)前期的研究只注重上层水体的对比,忽略了中、深层水体也能提供有效而且很可能更有价值的长期演化信息。正是这2个问题导致目前推断的印尼海道或印尼穿越流长期演化信息过于分散而失去权威性。因而,挑选印尼海道两侧印-太暖池关键靶区并获取高质量的长柱状岩芯,实施综合对比的全水层古海洋学研究,是解决印尼海道或印尼穿越流长期演化问题的关键。

2.2 原始西太暖池的形成时间及其发展对印尼海道演化的响应模式存在争议

目前,有关印尼海道或印尼穿越流对西太暖池形成演化的影响研究多是片段式的,没有形成时间序列上的系统认识。首先,原始西太暖池的形成时间,目前并没有定论,处在11.5—7.5 Ma范围内^[26,56,58-60]。这些推断的原始西太暖池形成时间上的差异到底是分析误差导致的,还是表明西太暖池的原始形成过程在空间尺度上本来存在差异,亦或还存在其它未知原因?其次,在印尼海道相对开启的大背景下,地质记录显示西太暖池的发展得到抑制;而数值模拟结果表明西太暖池的发展并没有被抑制,只是向印度洋方向发展。如何调和古海洋记录与模拟结果之间的矛盾?这些问题的解决都需要长时间跨度或高分辨率岩芯记录来加强印尼海道对西太暖池演化的影响研究。

2.3 上新世暖期类 El Niño 的存在及其对印尼海道演化的响应机制没有定论

对于所谓的中上新世永久类 El Niño,到底是由于暖池向印度洋方向移动导致的误判^[47]还是替代指标不确定性引起的错觉^[55],亦或真正存在类 El Niño 仍需进一步研究。假若上新世暖期确实存在永久类 El Niño,那么印尼海道张缩引起的何种作用效应对永久类 El Niño 起主导作用?目前仍不清楚。或许,印尼海道的演化及相关印尼穿越流的研究将是打开西太暖池正常类 ENSO 长期演化模式和永久类 El Niño 作用机

制之谜的一把钥匙。

2.4 印尼海道关闭促进北半球大冰期的作用方式还未明确

印尼海道关闭是触发北半球大冰期的关键一环,但其具体通过何种作用来启动或促进北半球大冰期,依然是一个亟待解决的科学问题。印尼海道收缩可以通过引起大洋环流效应或大气环流效应导致向北半球高纬区域的热量输送减弱,从而触发北半球大冰期。这其中,是以一种作用效应为主还是多种作用效应并存,目前无法确定。行之有效的方法是在印-太暖池上述相关大洋环流和大气环流路径上采集多个沉积物岩芯样本,开展北半球大冰期时的古海洋学对比研究,通过有效替代指标获取印尼海道演化对北半球大冰期形成的影响机制。

3 研究展望

3.1 从中、深层水视角研究印-太暖池水体的交换

印尼海道演化过程中,西太暖池与印度洋暖池之间存在中、深层水交换的阶段^[32],这表明只从上层水体研究印尼海道或印尼穿越流的演化并不能全面刻画印-太暖池的水体交换过程。建议分析印尼海道两侧印-太暖池中、深层水深度站位底栖有孔虫 $\epsilon_{\text{Nd(T)}}$ 、底栖-浮游有孔虫 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 差值以及底栖有孔虫种属,以确定印尼海道两侧印-太暖池中、深层水的来源、流通状况和微体古生物信息。在此基础上,比较西太暖池和印度洋暖池中、深层水的来源、流通状况和微体古生物信息差异,分析印尼海道两侧中、深层水的连通状况,示踪印尼海道的开关和张缩,从而查明印-太暖池水体的交换过程。

3.2 印-太暖池水体交换对普通类 ENSO 影响的研究

由模型模拟计算可知,印尼海道或印尼穿越流的演化能影响现代 ENSO 和上新世暖期永久类 El Niño。然而,没有现代过程研究表明印尼穿越流能控制 ENSO 的变率,但一些观测研究表明现代 ENSO 能控制印尼穿越流的流量、温度和深度^[88-89]。既然模拟结果显示印尼海道的开、关能影响永久类 El Niño 与普通类 ENSO 之间的转换,那么可以尝试探索地质历史时期印尼海道或印尼穿越流演化对普通 ENSO 式过程的影响。古海洋学家对中更新世以前的类 ENSO 研究集中于上新世暖期永久 El Niño 存在与否的验证上,较少关注普通类 ENSO 的演化特征与模式。今后,应该加强构造尺度上西太暖池类 ENSO 活动的重建,因为这是开展印-太暖池水体交换对普通类 ENSO 影响研究的前提。

3.3 引入新兴替代指标研究印-太暖池水体交换

早期的研究主要依靠有孔虫等微体古生物学手段,通过印-太暖池印尼海道两侧有孔虫等生物地理学演化差异,推断印尼海道的张缩或印尼穿越流的强弱。随后,通过印尼海道两侧有孔虫 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 组成所反映的水文信息差异,恢复印尼穿越流的组成(表层流/温跃层流)。然而印尼穿越流的来源(北太平洋水/南太平洋水)还未能有效示踪,穿过印尼海道的中、深层水体演化研究几乎没有开展。这些古海洋信息非常重要,因为联合它们可以在时空上再造印-太暖池水体交换的全水层结构模式,这对于全面理解印-太暖池水体交换对区域和全球气候的驱动机制非常重要。近年来发展起来的新兴地球化学指标可以弥补这方面的不足。例如,分析印-太暖池浮游有孔虫 $\epsilon_{\text{Nd(T)}}$,并对比其与潜在来源水体 $\epsilon_{\text{Nd(T)}}$ 组成的亲源性,可以确定 ITF 的来源;分析印-太暖池底栖有孔虫壳重和 B/Ca,确定中、深层水体碳酸盐系统化学组成,并对比其在印尼海道两侧的差异,很可能从中、深层水视角揭示丰富的印-太暖池水体交换信息。

4 结 语

晚中新世以来的印尼海道或印尼穿越流,在多种时间(千年-轨道-构造)尺度上发生了显著的变化;然而,印尼海道开关、张缩的时间节点以及印尼穿越流演化的历史多是片段式的且存在争议。印尼海道或印尼穿越流演化对印-太暖池的温盐、上层水体结构、水团等水文参数以及暖池和类 ENSO 等热带系统有重要影响,同时也是北半球大冰期等高纬过程的触动力。这其中,提出的有关印-太暖池水体交换对区域和全球气候影响机制的假说往往只得到模拟结果的验证,还缺乏古海洋记录的实证检验。问题的关键是目前缺乏合适的沉积物材料,以致对印尼海道或印尼穿越流的演化研究很不系统,这种情况在构造尺度和长期演化趋势方面更为突出。解决上述问题的有效方法是在印-太暖池印尼海道两侧精心设计调查站位,并对应获取高分辨率或长尺度的沉积物岩芯,然后开展古海洋学的对比集成分析。

参考文献(References):

- [1] YAN X H, HO C R, ZHENG Q, et al. Temperature and size variabilities of the Western pacific warm pool[J]. *Science*, 1992, 258 (5088): 1643-1645.
- [2] DE DECKKER P. The Indo-Pacific warm pool: critical to world oceanography and world climate[J]. *Geoscience Letters*, 2016, 3(1): 1-12.
- [3] WEVSTER P J. The role of hydrological processes in ocean-atmosphere interactions[J]. *Reviews of Geophysics*, 1994, 32(4): 427-476.
- [4] TUDHOPE S, COLLINS M. The past and future of El Nino[J]. *Nature*, 2003, 424(6946): 261-262.
- [5] CANE M, CLEMENT A C. A role for the tropical Pacific coupled ocean-atmosphere system on Milankovitch and millennial timescales. Part II: global impacts[J]. *Mechanisms of global climate change at millennial time scales*, 1999, 112: 373-383.
- [6] KIM S T, YU J Y, LU M M. The distinct behaviors of Pacific and Indian Ocean warm pool properties on seasonal and interannual time scales[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2012, 117(D5)[2019-11-01]. <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2011JD016557#support-information-section>. DOI: 10.1029/2011JD016557.
- [7] LIN C Y, HO C R, LEE Y, et al. Thermal variability of the Indo-Pacific Warm Pool[J]. *Global and Planetary Change*, 2013, 100: 234-244.
- [8] GORDON A L, FINE R A. Pathways of water between the Pacific and Indian Oceans in the Indonesian Seas[J]. *Nature*, 1996, 379 (6561): 146-149.
- [9] MURTUGUDDE R, BUSALACCHI A J, BEAUCHAMP J. Seasonal-to-interannual effects of the Indonesian throughflow on the tropical Indo-Pacific Basin[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1998, 103(C10): 21425-21441.
- [10] LEE T, FUKUMORI I, MENEMENLIS D, XING Z F, et al. Effects of the Indonesian Throughflow on the Pacific and Indian Oceans [J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2002, 32(5): 1404-1429.
- [11] BROECKER W S. The great ocean conveyor[J]. *Oceanography*, 1991, 4(2): 79-89.
- [12] 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(7): 487-492.
- [13] KROENKE L W, BERGER W, JANECEK T, et al. Ocean drilling program leg 130 scientific prospectus: ontong Java Plateau[M/OL]. [2019-11-01]. <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.220.9213&rep=rep1&type=pdf>.
- [14] KHIDER D. Paleooceanography of the Indonesian Seas over the past 25 000 years[M]. [S.L.]: ProQuest Dissertations Publishing, 2011.
- [15] GALLAGHER S J, FULTHORPE C S, BOGUS K, et al. Expedition 356 preliminary report: Indonesian Throughflow[J]. *International Ocean Discovery Program*, 2017. [2019-11-01]. <http://dx.doi.org/10.14379/iodp.pr.356.2017>.
- [16] CAPPELLI E L G, HOLBOURN A, KUHN T W, et al. Changes in Timor Strait hydrology and thermocline structure during the past 130 ka[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2016, 462: 112-124.
- [17] LINSLEY B K, ROSENTHAL Y, OPPO D W. Holocene evolution of the Indonesian Throughflow and the western Pacific Warm Pool [J]. *Nature Geoscience*, 2010, 3(8): 578-583.
- [18] XU J, KUHN T W, HOLBOURN A, et al. Changes in the vertical profile of the Indonesian Throughflow during Termination II: evidence from the Timor Sea[J]. *Paleoceanography*, 2006, 21(4): Doi: 10.1029/2006PA001278.

- [19] XU J, HOLBOURN A, KUHN W, et al. Changes in the thermocline structure of the Indonesian Outflow during Terminations I and II [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2008, 273(1-2): 152-162.
- [20] HOLBOURN A, KUHN W, XU J. Indonesian Throughflow variability during the last 140 ka: the Timor Sea outflow[J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 2011, 355(1): 283-303.
- [21] XU J. Change of Indonesian Throughflow outflow in response to East Asian monsoon and ENSO activities since the Last Glacial[J]. *Science China Earth Sciences*, 2014, 57(4): 791-801.
- [22] ZHOU Z Y, JIN X C, WANG L L, et al. Two closures of the Indonesian seaway and its relationship to the formation and evolution of the Western Pacific warm pool[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2004, 24(1): 7-14. 周祖翼, 金性春, 王嘹亮, 等. 印尼海道的两度关闭与西太平洋暖池的形成和兴衰[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2004, 24(1): 7-14.
- [23] HALL R. Cenozoic geological and plate tectonic evolution of SE Asia and the SW Pacific: computer-based reconstructions, model and animations[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2002, 20(4): 353-431.
- [24] SAQAB M M, BOURGET J, TROTTER J, et al. New constraints on the timing of flexural deformation along the northern Australian margin: implications for arc-continent collision and the development of the Timor Trough[J]. *Tectonophysics*, 2017(696-697): 14-36.
- [25] KUHN W, HOLBOURN A, HALL R, et al. Neogene history of the Indonesian Throughflow[J]. *Geophysical Monograph*, 2004, 149: 299-320.
- [26] KENNETT J P, KELLER G, SRINIVASAN M S. Miocene planktonic foraminiferal biogeography and paleoceanographic development of the Indo-Pacific region[J]. *Geological Society of America Memoir*, 1985, 163(1): 197-236.
- [27] SRINIVASAN M S, SINHA D K. Early Pliocene closing of the Indonesian seaway: evidence from north-east Indian Ocean and Tropical Pacific deep sea cores[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 1998, 16(1): 29-44.
- [28] GALLAGHER S J, WALLACE M W, LI C L, et al. Neogene history of the West Pacific Warm Pool, Kuroshio and Leeuwin currents [J]. *Paleoceanography*, 2009, 24(1): Doi: 10.1029/2008PA001660.
- [29] MARTIN E E, SCHER H. A Nd isotopic study of southern sourced waters and Indonesian Throughflow at intermediate depths in the Cenozoic Indian Ocean[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2006, 7(9): Doi: 10.1029/2006GC001302.
- [30] LING H F, BURTON K W, ONIONS R K, et al. Evolution of Nd and Pb isotopes in central Pacific seawater from ferromanganese crusts [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1997, 146(1): 1-12.
- [31] VAN DE FLIEDT T, FRANK M, HALLIDAY A N, et al. Deep and bottom water export from the Southern Ocean to the Pacific over the past 38 million years[J]. *Paleoceanography*, 2004, 19(1): Doi.org/10.1029/2003PA000923.
- [32] SINGH R K, GUPTA A K. Deep-sea benthic foraminiferal changes in the eastern Indian Ocean (ODP Hole 757B): their links to deep Indonesian (Pacific) flow and high latitude glaciation during the Neogene[J]. *Episodes*, 2010, 33(2): 74-82.
- [33] QU T, DU Y, MEYERES G, et al. Connecting the tropical Pacific with Indian Ocean through South China Sea[J]. *Geophysical Research Letters*, 2005, 32(24): Doi.org/10.1029/2005GL024698.
- [34] QU T, DU Y, SASAKI H. South China Sea Throughflow: a heat and freshwater conveyor[J]. *Geophysical Research Letters*, 2006, 33(23): Doi.org/10.1029/2006GL028350.
- [35] LIU Q, HUANG R, WANG D, et al. Interplay between the Indonesian Throughflow and the South China Sea Throughflow[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2006, 51(S2): 50-58.
- [36] GORDON A L, SUSANTO R D, VRANES K. Cool Indonesian Throughflow as a consequence of restricted surface layer flow[J]. *Nature*, 2003(425): 824-828.
- [37] QU T, SONG Y T, YAMAGATA T. An introduction to the South China Sea Throughflow: its dynamics, variability, and application for climate[J]. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, 2009, 47(1-3): 3-14.
- [38] TOZUKA T, QU T, YAMAGATA T. Dramatic impact of the South China Sea on the Indonesian Throughflow[J]. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34(12):
- [39] TOZUKA T, QU T, MASUMOTO Y. Impacts of the South China Sea Throughflow on seasonal and interannual variations of the Indonesian Throughflow[J]. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, 2009, 47(1-3): 73-85.
- [40] DE DEKKER P, TAPPER N J, VAN DER KAARS S. The status of the Indo-Pacific Warm Pool and adjacent land at the Last Glacial Maximum[J]. *Global and Planetary Change*, 2002, 35(1-2): 25-35.
- [41] PETRICK B, MARTINEZ-GARCIA A, AUER G, et al. Glacial Indonesian Throughflow weakening across the mid-Pleistocene climatic transition[J]. *Scientific Reports*, 9(1): 1-13.
- [42] AUER G, DE VLEESCHOUWER D, SMITH R A. Timing and pacing of Indonesian Throughflow restriction and its connection to Late Pliocene Climate Shifts[J]. *Paleoceanography and Paleoclimatology*, 2019, 34(4): 635-657.
- [43] RODGERS K B, LATIF M, LEGUTKE S. Sensitivity of equatorial Pacific and Indian Ocean water masses to the position of the Indone-

- sian Throughflow[J]. Geophysical Research Letters, 2000, 27(18): 2941-2944.
- [44] CANE M A, MOLNAR P. Closing of the Indonesian seaway as a precursor to east African aridification around 3—4 million years ago [J]. Nature, 2001, 411(6834): 157-162.
- [45] KARAS C, NUMBERG D, GUPTA A K, et al. Mid-Pliocene climate change amplified by a switch in Indonesian Subsurface Throughflow[J]. Nature Geoscience, 2009, 2(6): 434-438.
- [46] DICKENS G R, OWEN R M. Late Miocene-Early Pliocene manganese redirection in the central Indian Ocean: Expansion of the Intermediate Water oxygen minimum zone[J]. Paleoceanography, 1994, 9(1): 169-181.
- [47] RAI A K, SINGH V B. Response of eastern Indian Ocean (ODP Site 762B) benthic foraminiferal assemblages to the closure of the Indonesian seaway[J]. Oceanologia, 2012, 54(3): 449-472.
- [48] RAI A K, PATHAK V K, SHARMA L K, et al. Pliocene Indonesian Throughflow change and planktic foraminiferal diversity in the eastern subtropical Indian Ocean[J]. Current Science, 2017, 113(5): 955-959.
- [49] GOURLAN A T, MEYADIER L, ALLEGRE C J. Tectonically driven changes in the Indian Ocean circulation over the last 25 Ma: Neodymium isotope evidence[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2008, 267(1-2): 353-364.
- [50] WANG P X, JIAN Z M, LIU Z F. Interactions between the earth spheres: deep-sea processes and records (II): tropical forcing of climate changes and carbon cycling[J]. Advances in the Earth Science, 2006, 21(4): 338-345. 汪品先, 翦知潜, 刘志飞. 地球圈层相互作用中的深海过程和深海记录(II): 气候变化的热带驱动与碳循环[J]. 地球科学进展, 2006, 21(4): 338-345.
- [51] JIAN Z M, JIN H Y. Ocean carbon cycle and tropical forcing of climate evolution[J]. Advances in the Earth Science, 2008, 23(3): 221-227. 翦知潜, 金海燕. 大洋碳循环与气候演变的热带驱动[J]. 地球科学进展, 2008, 23(3): 221-227.
- [52] KARAS C, NURNBERG D, TIEDEMANN R, et al. Pliocene climate change of the Southwest Pacific and the impact of ocean gateways [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2011, 301(1-2): 117-124.
- [53] WARA M W, RAVELO A C, DELANEY M L. Permanent El Niño-like conditions during the Pliocene warm period[J]. Science, 2005, 309(573): 758-761.
- [54] FORD H L, RAVELO A C, DEKENS P S, et al. The evolution of the equatorial thermocline and the early Pliocene El Padre mean state [J]. Geophysical Research Letters, 2015, 42(12): 4878-4887.
- [55] JOCHUM M, FOX-KEMPER B, MOLNAR P H, et al. Differences in the Indonesian seaway in a coupled climate model and their relevance to Pliocene climate and El Niño[J]. Paleoceanography, 2009, 24(1): Doi: 10.1029/2008PA001678.
- [56] JIAN Z M, YU Y, LI B, et al. Phased evolution of the south-north hydrographic gradient in the South China Sea since the middle Miocene[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2006, 230(3-4): 251-263.
- [57] NATHAN S A, LECKIE R M. Early history of the Western Pacific Warm Pool during the middle to late Miocene (~13.2—5.8 Ma): Role of sea-level change and implications for equatorial circulation[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2009, 274(3-4): 140-159.
- [58] GASPERI J T, KENNETT J P. Vertical thermal structure evolution of Miocene surface waters: western equatorial Pacific DSDP Site 289[J]. Marine Micropaleontology, 1993, 22(3): 235-254.
- [59] HODELL D A, VAYAVANANDA A. Middle Miocene paleoceanography of the western equatorial Pacific (DSDP Site 289) and the evolution of *Globorotalia* (*Fohsella*) [J]. Marine Micropaleontology, 1993, 22(4): 279-310.
- [60] LI Q, LI B, ZHONG G, et al. Late Miocene development of the Western Pacific Warm Pool: planktonic foraminifer and oxygen isotopic evidence[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2006, 237(2-4): 465-482.
- [61] VON DER HEYDT A S, DIJKSTRA H A. The impact of ocean gateways on ENSO variability in the Miocene[J]. Geological Society, London, Special Publications, 2011, 355(1): 305-318.
- [62] SANTOSO A, CAI W, ENGLAND M H, et al. The role of the Indonesian Throughflow on ENSO dynamics in a coupled climate model [J]. Journal of Climate, 2011, 24(3): 585-601.
- [63] SONG Z, LATIF M, PARK W, et al. Influence of seaway changes during the Pliocene on tropical Pacific climate in the Kiel climate model: mean state, annual cycle, ENSO, and their interactions[J]. Climate Dynamics, 2017, 48(11-12): 3725-3740.
- [64] RAVELO A C, DEKENS P S, MCCARTHY M. Evidence for El Niño-like conditions during the Pliocene[J]. GSA Today, 2006, 16(3): 4-11.
- [65] RAVELO A C, LAWRENCE K T, FEDOROV A, et al. Comment on “a 12-million-year temperature history of the tropical Pacific Ocean”[J]. Science, 2014, 346(6216): 1467-1467.
- [66] FEDOROV A V, DEKENS P S, MCCARTHY M, et al. The Pliocene paradox (mechanisms for a permanent El Niño)[J]. Science, 2006, 312(5779): 1485-1489.
- [67] BURLS N J, FEDOROV A V. Simulating Pliocene warmth and a permanent El Niño-like state: the role of cloud albedo[J]. Paleocean-

- ography, 2014, 29(10): 893-910.
- [68] FEDOROV A V, BRIERLEY C M, LAWRENCE K T, et al. Patterns and mechanisms of early Pliocene warmth[J]. Nature, 2013, 496(7443): 43-49.
- [69] WATANABE T, SUZUKI A, MINOBE S, et al. Permanent El Niño during the Pliocene warm period not supported by coral evidence[J]. Nature, 2011, 471(7337): 209-211.
- [70] ZHANG Y G, PAGANI M, LIU Z. A 12-million-year temperature history of the tropical Pacific Ocean[J]. Science, 2014, 344(6179): 84-87.
- [71] ZHANG Y G, PAGANI M, LIU Z. Response to Comment on “A 12-million-year temperature history of the tropical Pacific Ocean”[J]. Science, 2014, 346(6216): 1467-1467.
- [72] LEA D W. Not so permanent El Niño[J]. Science, 2014, 344(6179): 52-53.
- [73] CHAISSON W P, RAVELO A C. Pliocene development of the east-west hydrographic gradient in the equatorial Pacific[J]. Paleoceanography, 2000, 15(5): 497-505.
- [74] RICKABY R E M, HALLORAN P. Cool La Niña during the warmth of the Pliocene[J]. Science, 2005, 307(5717): 1948-1952.
- [75] SHACKLETON N J, OPDYKE N D. Oxygen isotope and palaeomagnetic evidence for early Northern Hemisphere Glaciation[J]. Nature, 1977, 270(5634): 216-219.
- [76] MASLIN M A, LI X S, LOUTRE M F, et al. The contribution of orbital forcing to the progressive intensification of Northern Hemisphere Glaciation[J]. Quaternary Science Reviews, 1998, 17(4-5): 411-426.
- [77] ZACHOS J, PAGANI M, SLOAN L, et al. Trends, rhythms, and aberrations in global climate 65 Ma to present[J]. Science, 2001, 292(5517): 686-693.
- [78] RAVELO A C, ANDREASEN D H, LYLE M, et al. Regional climate shifts caused by gradual global cooling in the Pliocene epoch[J]. Nature, 2004, 429(6989): 263-267.
- [79] KARAS C, NURNBERG D, BAHR A, et al. Pliocene oceanic seaways and global climate[J]. Scientific Reports, 2017(7): 1-8.
- [80] MOLNAR P, CANE M A. El Niño's tropical climate and teleconnections as a blueprint for pre-Ice Age climates[J]. Paleoceanography, 2002, 17(2): Doi: 10.1029/2001PA000663.
- [81] MOLNAR P, CRONIN T W. Growth of the Maritime Continent and its possible contribution to recurring Ice Ages[J]. Paleoceanography, 2015, 30(3): 196-225.
- [82] HAUG G H, TIEDEMANN R, ZAHN R, et al. Role of Panama uplift on oceanic freshwater balance[J]. Geology, 2001, 29(3): 207-210.
- [83] STEPH S, TIEDEMANN R, PRANGE M, et al. Early Pliocene increase in thermohaline overturning: a precondition for the development of the modern equatorial Pacific cold tongue[J]. Paleoceanography, 2010, 25(2): Doi: 10.1029/2008PA001645.
- [84] LUNT D J, VALDES P J, HAYWOOD A, et al. Closure of the Panama Seaway during the Pliocene: implications for climate and Northern Hemisphere Glaciation[J]. Climate Dynamics, 2008, 30(1): 1-18.
- [85] WEIJER W, DE RUIJTER W P M, STERL A, et al. Response of the Atlantic overturning circulation to South Atlantic sources of buoyancy[J]. Global and Planetary Change, 2002, 34(3-4): 293-311.
- [86] KARAS C, NURNBERG D, TIEDEMANN R, et al. Pliocene Indonesian Throughflow and Leeuwin Current dynamics: implications for Indian Ocean polar heat flux[J]. Paleoceanography, 2011, 26(2): Doi: 10.1029/2010PA001949.
- [87] ROSELL-MELE A, MARTINEZ -GARCIA A, MCCLYMONT E L. Persistent warmth across the Benguela upwelling system during the Pliocene epoch[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2014, 386: 10-20.
- [88] TILLINGER D. Physical oceanography of the present day Indonesian Throughflow[J]. Geological Society, London, Special Publications, 2011, 355(1): 267-281.
- [89] FFIELD A, VRANES K, GORDON A L, et al. Temperature variability within the Makassar Strait[J]. Geophysical Research Letters, 2000, 27(2): 237-240.

Water Exchange Between Western Pacific Warm Pool and Indian Warm Pool and Its climatic Effects Since the Late Miocene

LI Tie-gang^{1,2}, XIONG Zhi-fang^{1,2}, JIA Qi^{1,2}

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

2. *Laboratory for Marine Geology, Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266061, China)*

Abstract: Water exchange between western Pacific warm pool and Indian warm pool, operated by Indonesian seaway or Indonesian throughflow (ITF), not only control the budgets of material, heat and fresh water in tropical Indo-Pacific area, but influence high-latitude sea area by feedback and teleconnection, thus playing a key role in the regional and global climate changes. Here we reviewed the evolution of the Indonesian seaway or ITF and their influences on tropical and high-latitude climate since late Miocene. On orbital and millennial timescales, the ITF surface flow was dominant during glacials while the ITF thermocline flow was enhanced during interglacials; there was a transition from surface- to thermocline- dominated ITF flow during deglacials. These changes in ITF on orbital and millennial timescales are associated with variations of sea level, thermohaline circulation, ENSO-like conditions and the East Asian Monsoon, but the details on mechanism are complicated. On tectonic timescales, the Indonesian seaway gradually closed with multistage processes, but the timing of its relatively opening and closing is debatable. The evolution of Indonesian seaway or ITF has reorganized the distribution of heat, nutrient, water masses and ocean currents between the western Pacific warm pool and Indian warm pool, so it exerts an important influence on the formation and development of the warm pool and the condition of ENSO-like especially permanent El Niño-like during the Pliocene. We suggest that the closure of the Indonesian seaway may have triggered the onset of Northern Hemisphere Glaciation, but it is still in debate whether the termination of heat transport to the high latitude northern hemisphere was caused by oceanic or atmospheric circulation changes (both of them were resulted from the closure of Indonesian seaway). Much hypothesis on the forcings of water exchange between western Pacific warm pool and Indian warm pool on the tropical and high latitude areas was mostly based on the model simulations, but it lacked high-quality paleoceanographic records to testify them. In order to solve the scientific issues which may be confronted in near future research, it is urgent to design the study sites on both sides of the Indonesian seaway, and obtain the high-resolution or long-term records, and perform comprehensive study of paleoceanography for all water layers.

Key words: Indonesian seaway; Indonesian throughflow; ENSO; Northern Hemisphere Glaciation; heat and moisture

Received: November 28, 2019