晚新生代西太平洋古海洋环境演化过程与机制

李铁刚[1,2], 秦秉斌[1], 万世明[2,3], 姚政权[1,2], 邹建军[1,2], 刘焱光[1,2], 乔淑卿[1,2], 徐兆凯[2,3], 孙晗杰[2,3], 南青云[2,3], 常凤鸣[2,3], 熊志方[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；
3. 中国科学院海洋研究所 海洋地质与环境重点实验室，山东 青岛 266071）

摘　要：晚新生代西太平洋通过水文循环和碳循环两类关键过程，对区域乃至全球气候变化产生深刻的影响。本文从上新世以来西太暖池及其主流系演化、晚第四纪北太平洋中层水演化和白令海峡开合、第四纪中国东部陆架环境演化以及新生代亚太沉积物源-汇过程与碳埋藏等方面，综述了西太平洋古海洋环境演化过程与机制。上新世以来西太暖池与印尼贯穿流的演化过程伴随构造运动而阶段性地发生，但其在轨道时间尺度上演化的细节过程并不清晰，尚未形成系统性认识。北太平洋中层水以及白令海峡开合等关键高纬过程在冰期旋回中发生了显著变化，并与低纬过程之间存在遥相关。第四纪中国东部陆架环境演化主要受控于海平面变化以及与低纬过程相关联的热量与物质传输，在此背景下，中国东部陆架形成了富有机碳的泥质沉积体系。构造隆升和亚洲季风驱动下的亚洲大陆与邻洋的沉积物源-汇过程具有显著的碳汇效应，可能在大气 CO_2 浓度（p_{CO_2}）冰期旋回和新生代气候变冷中发挥重要作用。就西太平洋古海洋环境演化过程与机制中若干关键科学问题开展深入和系统研究，不仅可为建立气候变化的低纬驱动理论提供支撑，也可为更好认识我国陆架环境变化规律以及碳汇潜力提供科学依据。

关键词：西太平洋；新生代；古海洋与古环境；水文循环；碳循环

中图分类号：P736.2　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1671-6647(2022)04-0551-13

doi：10.12362/j.issn.1671-6647.20220512001

引用格式：李铁刚, 秦秉斌, 万世明, 等. 晚新生代西太平洋古海洋环境演化过程与机制[J]. 海洋科学进展, 2022, 40(4): 551-563. LI T G, QIN B B, WAN S M, et al. Evolution and mechanism of the paleoceanographic environment in the western pacific during the late cenozoic[J]. Advances in Marine Science, 2022, 40(4): 551-563.

新生代构造演化对现代全球地理、气候和环境格局的形成起了决定性作用[1]。其中，在西太平洋塑造了全球面积最大的表层暖水聚集区——西太平洋暖池（简称西太暖池）。西太暖池是现代最重要的热量和水汽源区之一，是区域乃至全球气候变化的“引擎”[2-3]。西太暖池主要通过“海洋隧道”和“大气桥梁”两种途径影响中国近海[4]、北太平洋[5]和印度洋[6]等区域，形成了大时空尺度的遥相关[7]。在西太暖池的形成演化过程中，印尼海道或印尼贯穿流是关键的“操盘手”，印尼海道的开合和印尼贯穿流的强弱变化控制了从西太暖池向东印度洋的水体输送和热量传输[8-9]。而北太平洋高纬区域的海洋过程，如北太平洋中层水（North Pacific Intermediate Water，NPIW），则有可能是低纬过程演化的“幕后黑手”，作为全球大洋翻转环流系统的一个重要组成部分，NPIW 对低纬过程能产生重要影响[10-11]。在中国近海，与西太暖池和高纬过程密切关联的海平面、黑潮和季风等营力环境是中国近海沧海桑田巨变的“直接推手”，是影响我国东部陆架海环境演化的驱动因素[12-13]。此外，在碳循环研究领域，西太平洋存在一系列受高低纬过程影响的碳源-汇机制[14-15]，针对西太平洋地质历史时期的碳循环过程和机制研究，有助于发现海洋碳汇资源新路径，是实现“双碳”目

收稿日期：2022-05-12

资助项目：青岛海洋科学与技术试点国家实验室山东省专项经费资助项目——新生代西太平洋环境演化的沉积记录及机制（2022QNLM050203）

作者简介：李铁刚（1964—），男，研究员，博士，博士生导师，主要从事海洋地质与古海洋学方面研究. E-mail: tgli@fio.org.cn

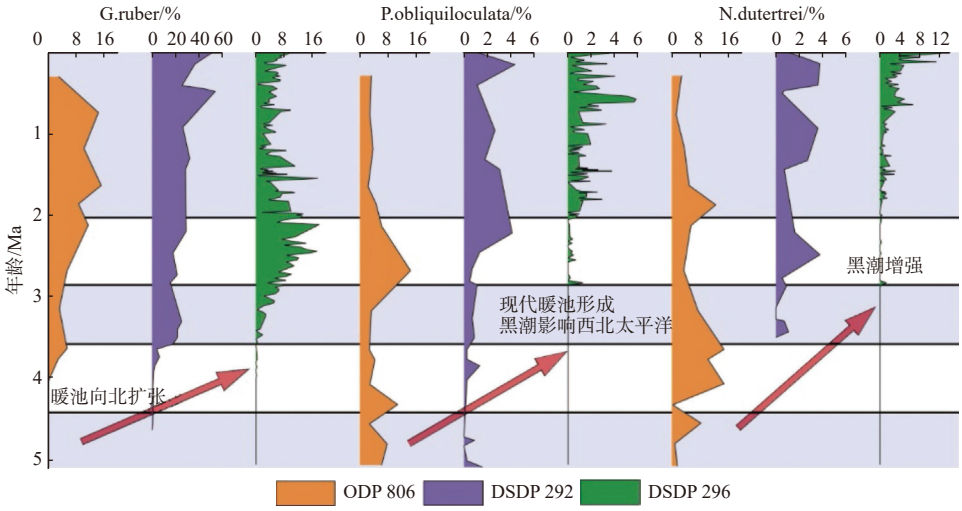
（陈　靖　编辑）

标的“新抓手”。

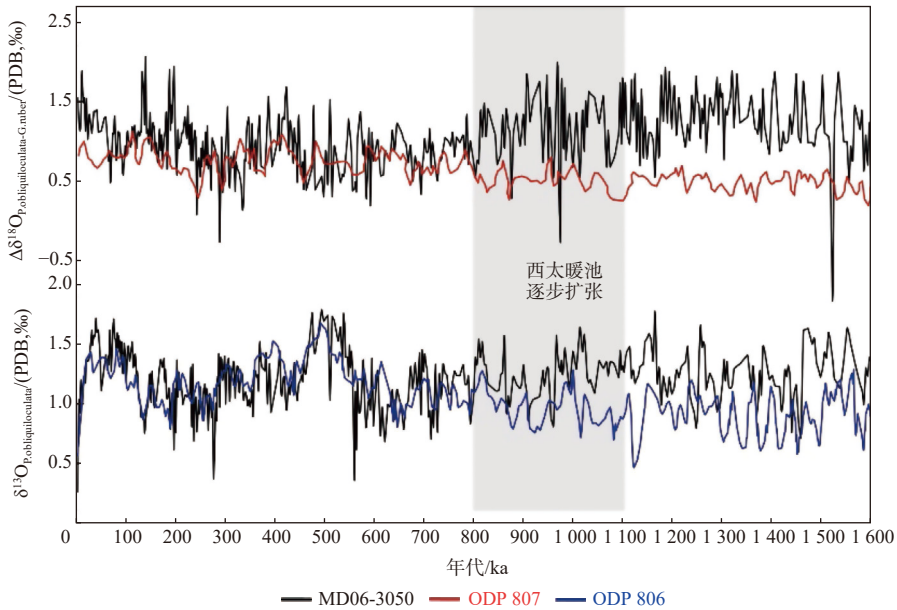
1 国内外研究现状

1.1 上新世以来西太平洋暖池演化及其机理

上新世以来随着构造运动和海平面升降，西太暖池经历了巨大变化。具体来说，上新世以来西太暖池的演化过程呈阶段性特征，在西太暖池“雏形”形成后，约在距今 3—4 Ma 期间现代暖池形成[8,16]；在 2.7 Ma 以及 2.0 Ma 左右西太暖池对西北太平洋等周边海域的影响阶段性加强[17]（图 1）；在 1.1 Ma 前后西太暖池核



(a) 浮游有孔虫群落组成反映的西太暖池对西北太平洋的影响



(b) 浮游有孔虫氧碳同位素反映的在 1.1—0.8 Ma 期间逐渐趋同的暖池的核心和边缘区水文环境

注：图 a 来源于文献 [17]，图 b 来源于文献 [18]。

图 1 上新世以来西太暖池演化的古海学证据

Fig. 1 Paleooceanographic evidence for the evolution of Western Pacific Warm Pool since the Pliocene

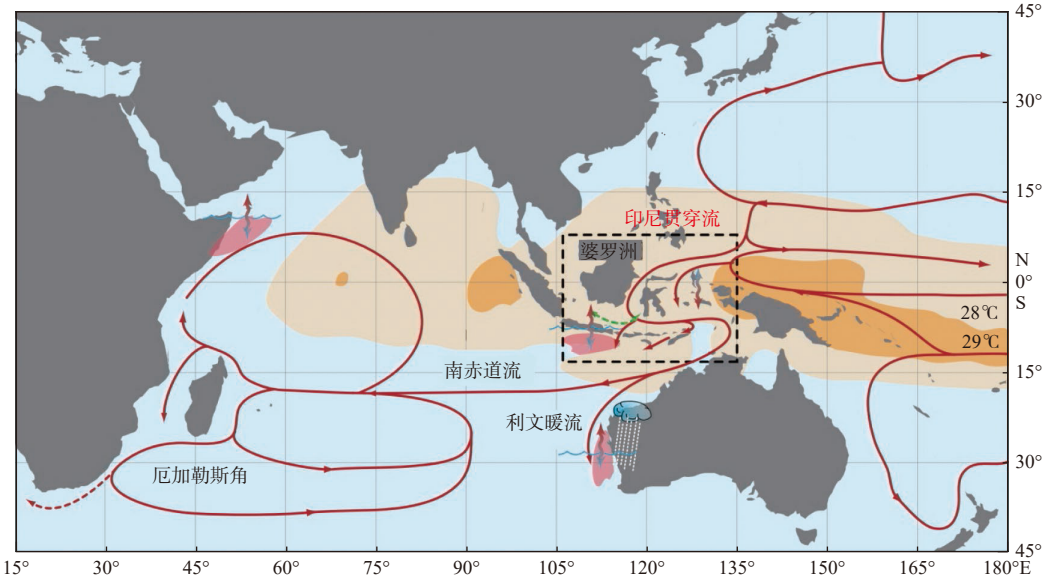
心区逐步开始扩张，直至 0.8 Ma 西太暖池边缘区与核心区的上层水体结构趋于一致[18]（图 1）。随后，西太暖池强弱程度仍发生过变化，比如，西太暖池温跃层深度在中更新世革命事件之后减弱, 在距今约 0.15 Ma 之后又再次加强[19]。同时，西太暖池的演化过程与青藏高原加速隆升、东亚季风增强和北半球冰盖的起始时间均大体相当，说明这一系列重大海洋、气候事件之间可能存在联系[20-22]。

关于上新世以来西太暖池演化的机制存在诸多争议。有研究推测西太暖池的演化过程是伴随着晚新生代构造运动而阶段性发生，认为巴拿马海峡的关闭、澳大利亚板块北移和印尼海道开合是西太暖池和西边界流系统形成的前提，而菲律宾海板块的逆时针方向旋转则是西太暖池强化和黑潮最终形成的条件，上述过程也与一些全球规模的气候环境事件的发生时间相当[23-25]。随着研究的深入，关于西太暖池演化的机制问题逐渐产生争议。比如，西太暖池核心区浮游有孔虫 $\delta^{18}O$ 记录表明，印尼海道收缩或海平面降低有利于西太暖池扩张[8]；但也有研究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移动[9]。另外，在轨道时间尺度上，西太暖池表层海水温度、温跃层深度以及生产力等要素均存在显著的岁差周期[26]，而其中确切的机制尚待进一步论证。

1.2　上新世以来印尼海道/印尼贯穿流演变及其气候效应

作为西太暖池的主流系之一，印尼贯穿流是连接太平洋和印度洋间的唯一通道，调节着太平洋和印度洋间的温盐平衡[6]（图 2）。印尼贯穿流不仅是全球温盐环流在低纬海区的关键组成部分，也可将西太暖池的热带气候效应放大或遥相关到高纬海区[27-29]。目前，印尼贯穿流相关的古海洋学研究已取得了一些进展，至少明确了印尼贯穿流演化的潜在规律。在千年尺度上，望加锡海峡两侧温盐记录的对比以及内部温跃层温度的重建结果显示，印尼贯穿流演化主要和类 ENSO（El Niño-Southern Oscillation）有关，印尼贯穿流在类 El Niño 状态下增强[30-31]，这一论断也与现代观测一致[32]。在轨道尺度上，海平面变化可通过影响区域内海道连通性的方式影响印尼贯穿流的强弱[33-34]，而且冰期/间冰期旋回中的海平面上升将导致印尼贯穿流从表层流主导转换为温跃层流主导[35-36]。另外，印尼贯穿流的演化往往呈现出显著的岁差周期，暗示亚洲季风以及热带辐合带等低纬过程也是影响轨道时间尺度上印尼贯穿流强弱变化的重要因素[37-38]。总之，千年和轨道时间尺度上印尼贯穿流均发生了显著的变化，并与海平面、类 ENSO 气候态、东亚季风和热带辐合带密切相关，然而其中的作用机制尚不清晰。在构造尺度上，上新世以来印尼贯穿流的演化主要受控于印尼海道开合，然而相关的研究少之甚少。基于构造地质学分析，上新世印尼海道的关闭对区域内洋流演化产生了深远影响[24, 39-40]，然而构造地质证据往往容易被板块俯冲等构造活动破坏[22]，因此这些研究中印尼海道的具体关闭模式与时间仍存在巨大分歧。

事实上，印尼海道/印尼贯穿流演化对区域和全球气候的具体影响机制也不完全清晰。区域上，印尼海道/印尼贯穿流演化直接控制西太暖池和东印度洋暖池间的热量和淡水平衡，从而可影响印-太暖池水文循环状况[6]。一方面，印尼海道收缩/印尼贯穿流减弱会抑制印-太暖池间水体交换，使东印度洋表层海水温度降低[24, 34]，但对西太暖池表层海水温度的影响则还存在分歧[41-42]。另一方面，印尼贯穿流水体来源（北源/南源）的变化也会影响区域内水体性质，印尼海道收缩或者千年尺度快速变冷事件可能有利于低温、低盐、低氧的 NPIW 进入并影响印尼贯穿流区域[23, 43]，而目前关于这方面的研究还比较薄弱。从全球气候系统的角度，目前仅仅认识到上新世印尼海道收缩可使全球温盐环流减弱，并抑制高低纬热量交换，从而是引发北半球大冰期的前提条件之一[44-45]。



注：本图来源于文献 [29]。黄色区域代表表层海水温度状况；红色线代表上层水体洋流路径；虚线方框内为印尼贯穿流区域；双向垂直箭头表示海气交换；绿色箭头表示当地海气交换发生季节性逆转；粉红色区域表示当印尼贯穿流不存在时该上升流海区海水温度将升高。

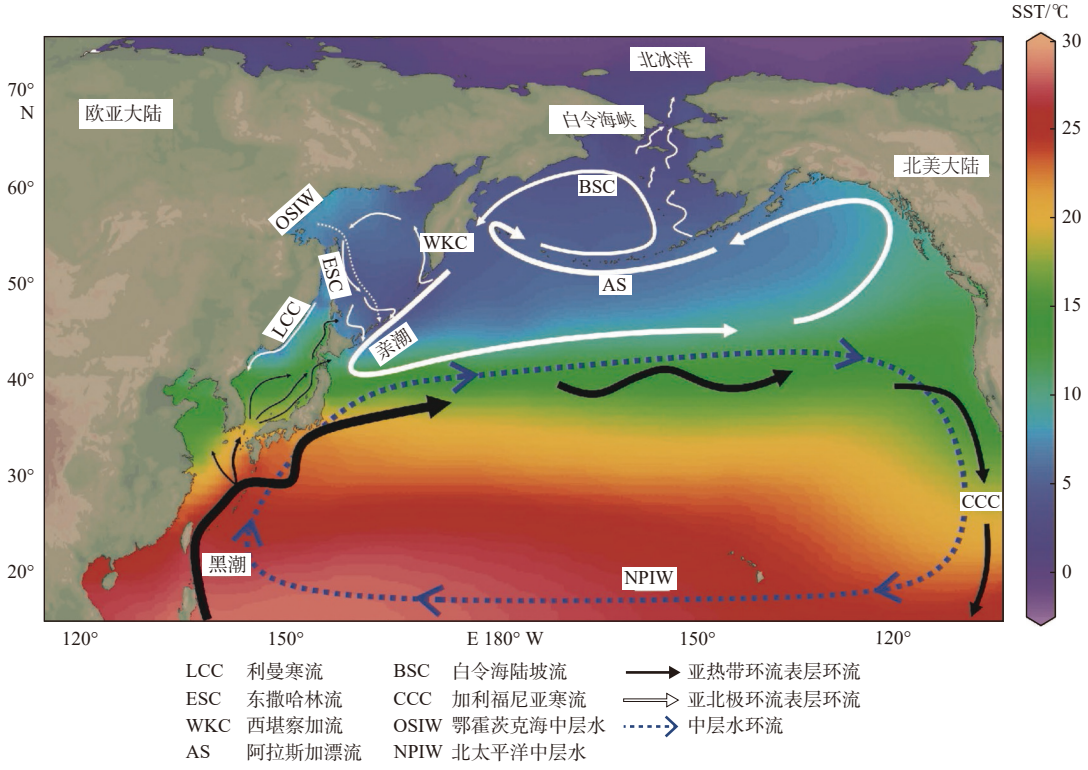
图 2 现代印尼贯穿流对区域以及全球气候的影响[29]

Fig. 2 The regional and global climate influence of modern Indonesian throughflow[29]

1.3 晚第四纪北太平洋中层水演化和白令海峡开合及其环境效应

要充分厘清地质历史时期西太暖池及其主流系演化的过程与机制，就绕不开高纬过程。现今北太平洋由于表层较低的盐度并不发育深层水，而是发育 NPIW。NPIW 主要源自鄂霍茨克海，广泛分布在北太平洋亚热带 300～800 m 水深的海域[46]（图 3）。古海洋学研究发现 NPIW 源区与通风状况在冰期旋回中发生了显著变化[47-50]。冰期时，NPIW 携带的营养盐可以进入热带东太平洋温跃层底部，其上涌将有助于维持冰期较低的大气 p_{CO_2}[11]。介形虫证据还显示，新仙女木冷事件时期，NPIW 强化对印尼贯穿流区域的生物多样性和通风环境有重要的作用[43]。千年尺度上亚热带北太平洋中层环流通风变化也与 NPIW 的形成密切相关[10]。在末次盛冰期，NPIW 强化并向低纬扩张是影响东太平洋冰期生产力变化的重要原因[51]。这些研究证实，通过 NPIW 这一“海洋隧道”，北太平洋高纬过程对低纬热带太平洋的海洋环境和生态系统施加了显著影响，与低纬过程之间存在遥相关。北半球高纬过程影响热带水文循环演化的证据也在位于低纬的石笋和海洋沉积档案中被广泛发现[52-53]。在轨道时间尺度上，高纬持续降温被认为是驱动热带东太平洋冷舌形成和发展的关键动力[54]。

白令海峡作为连接北冰洋与北太平洋的唯一通道，也是北太平洋低盐水影响北冰洋和亚北极北大西洋的重要途径（图 3）。白令海峡贯穿流影响北冰洋的热盐收支、水体层化、生态系统和海冰活动[55-58]。白令海峡的开启极大地缩短了太平洋和大西洋的联通距离，并在控制全球气候波动、北极区域气候以及亚北极大西洋深层水对流等方面起着重要作用[59]。然而由于缺乏有效的地学重建手段[60]，过去针对晚第四纪白令海峡开合状态及其影响的研究较少。对中、晚更新世等时间尺度的白令海峡的开启多基于全球相对海平面的变化进行推断，忽略了冰川均衡调整等局部因素的影响[59, 61]。而白令海峡开启对全球气候变化影响的讨论多基于数值模拟研究，没有有效地质指标的证据支持。



注：表层海水温度数据引自文献 [62] 的 WOA13 数据集。

图 3　西北太平洋年均表层海水温度、表层环流和北太平洋中层水

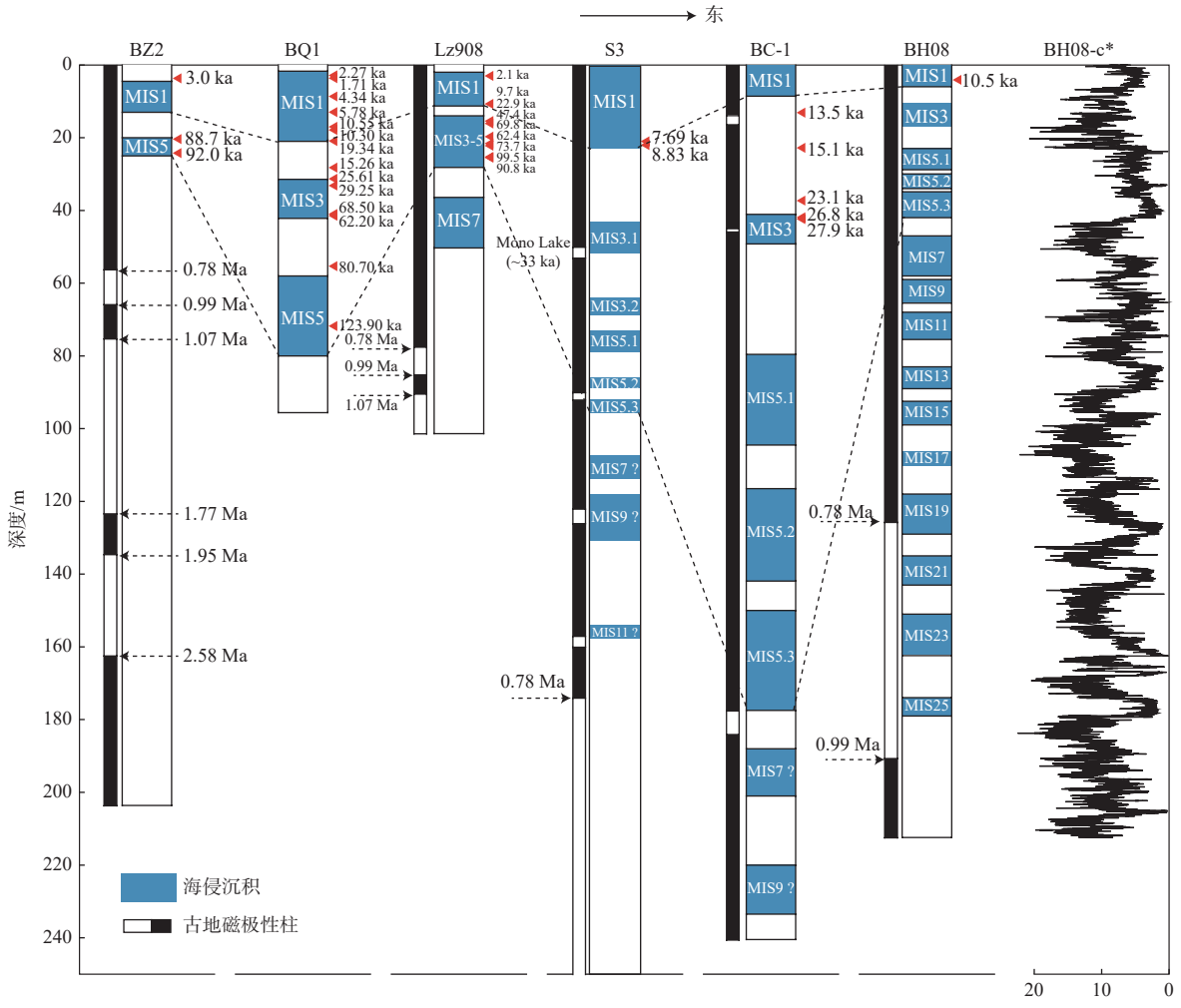
Fig. 3　Schematic of annual mean surface seawater temperature, surface circulation and North Pacific Intermediate Water in the North Pacific

1.4　第四纪中国东部陆架环境演化及其机制

中国东部陆架是全球海陆相互作用最为活跃的地区之一，也是西太平洋沟-弧-盆体系的重要组成部分，因此中国东部陆架环境演化机制十分复杂[12-13]。西太平洋暖池及其主流系向中高纬度地区输送的热量、物质和水汽，对我国东部陆架沉积环境及东亚气候具有深远的影响。此外，第四纪以来冰期旋回中海平面波动最大可达百余米[63]，海平面变化对中国东部陆架环境产生了重要影响，形成了以海侵-海退为主要特征的沉积体系[12]。同时，受以河流为纽带的源-汇系统的控制，全球约 2/3 的物质沉积到陆架边缘海，这些巨量入海物质对陆架边缘海乃至全球大洋的沉积作用、生物地球化学过程和海洋生态环境等都具有巨大影响[64]。在气候和海平面变化的影响下，我国东部陆架形成了极具特色、富有机碳的泥质沉积体系，埋藏了大量有机碳[65]，具有显著的长期碳汇效应，在区域和全球碳循环中具有重要作用。

东部陆架沿海地区作为我国人口密度最大的区域和生产活动中心，其经济贡献对国家发展至关重要。因此，对中国东部陆架第四纪环境演化及有机碳埋藏开展研究，揭示其受控机制，对深入理解这一区域沉积环境变化、有机碳埋藏及其对西太暖池及其主流系、全球海面与气候变化的响应，以及评估未来气候变化对沿海人民生命财产安全的影响具有重要的理论和现实意义。近年来，随着我国海洋专项调查与研究的投入加强，围绕中国东部大陆物质从源到汇的过程和沉积环境演化，学术界已经开展了大量研究，取得了众多研究成果。特别是建立了渤海和黄海第四纪轨道尺度上的地层年代框架和沉积环境演化序列（图 4）[12-13, 66-67]，从陆架沉积中揭示了黄河贯通入海的时代，推动了对黄河演化这一重要科学问题的认识[68]；阐明了我国东部近海沉积物粒度、现代沉积速率的分布特征和规律，定量分析了黄、渤、东海的沉积物来源和沉积物收支[65, 69]，深化了对我国东部陆架沉积物源汇过程的认识；初步估算出中国东部陆架海沉积有

机碳埋藏量约为 13 Mt/a，其中现代有机质埋藏量约占 54%[70-71]。上述研究为深入理解陆架第四纪沉积环境变化提供了重要资料。



注：本图来源于文献 [12]。BZ2、BQ1、Lz908、S3、BC-1、BH08 以及 BH08-c*为沉积物岩芯。

图 4 渤海海域第四纪海侵对比

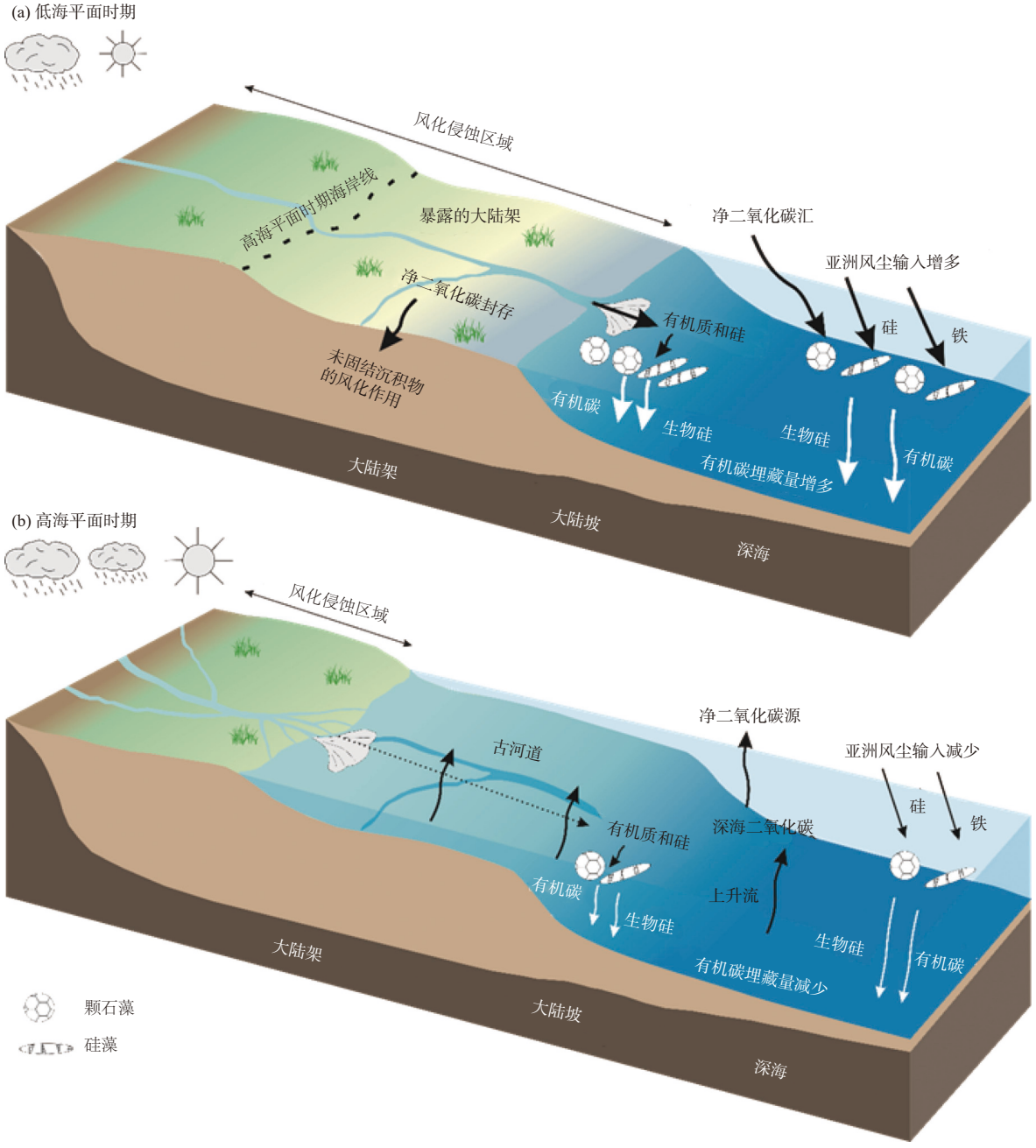
Fig. 4 Comparison of marine transgression during the Quaternary in the Bohai Sea

1.5 新生代构造-气候驱动下的亚太沉积物源-汇过程与碳埋藏

亚洲大陆及其周边的西太平洋区域是全球最大、最具特色的沉积物源-汇系统[72]。在与西太暖池及其主流系密切相关的亚洲季风的影响下，该区域接收了来自于青藏高原—喜马拉雅山脉充沛风化剥蚀产物的输入。由此可以推断，与构造隆升和亚洲季风系统密切相关的、以青藏高原—喜马拉雅山脉为范例的亚洲地区陆表物理剥蚀和化学风化作用及其产物（陆源碎屑、营养和有机质）的向海输运会明显影响到附近海区的沉积物堆积速率、物质组成以及海底环境，即上述沉积物源-汇过程很可能具有非常重要的海洋环境效应[73-74]。且鉴于新生代青藏高原的阶段性隆升、亚洲季风强度、海平面的变化、印尼海道的开合以及印尼贯穿流等关键构造-气候环境控制因子在多种时间尺度的叠加作用，更是加剧了该区域沉积物源-汇过程和古海洋环境变迁的复杂性[74-75]。

与西太暖池及其主流系密切相关的亚洲季风降水是陆表风化剥蚀作用的主控因素，其风化产物蕴含着丰富的沉积物源-汇过程和碳循环信息。例如，构造-季风降水控制下的陆地风化剥蚀过程不仅可以直接消

耗大气 CO_2，而且陆源碎屑矿物和溶解质入海过程中常常伴随着大量的陆源有机质和营养物质（如铁和硅等）的输入，进而通过生物地球化学过程对碳循环产生潜在影响[14, 76]。此外，冰期低海平面时西太平洋宽广陆架的广泛出露及这些出露陆架上松散硅酸盐沉积物的强化学风化作用也可以消耗大量的大气 CO_2[15, 77]（图 5）。可见，厘清构造-气候驱动下的亚洲大陆与邻近海洋的沉积物源-汇过程及其在全球碳循环中的贡献，对于理解新生代全球变冷和解释冰期旋回大气 p_{CO_2} 变化之谜均具有重要科学意义。



注：本图来源于文献 [77]。

图 5　第四纪冰期旋回中黑潮源区周边的陆表风化剥蚀作用过程及其产物入海的碳循环效应

Fig. 5　Schematic model of continental surface processes associated with physical erosion and chemical weathering, as well as the carbon cycle impact of thus produced materials in the Kuroshio source region during the Quaternary glacial-interglacial cycles

2 存在的问题

2.1 西太暖池演化多元多时间尺度的主控因子存在争议

目前，关于上新世以来西太暖池的演化历史及其机制仍然存在较大的不确定性。特别是，对一些区域构造变动和全球气候演变的特征时期，包括西太暖池范围的胀缩和位移、区域水文气候以及水体结构等现代暖池“稳定性”的认识相当有限。例如，早上新世暖期热带太平洋的永久类 El Niño 状态是否真实存在？中上新世暖期暖池的经向扩展和热带太平洋东西温度梯度加强程度及其机制如何？要回答上述科学问题仍需更多的西太暖池古海洋演化证据。

2.2 印尼贯穿流演化对区域和全球气候变化的影响尚不清晰

目前，关于印尼贯穿流演化的作用机制存在明显分歧。具体来说，对轨道时间尺度上印尼贯穿流演化的细节过程的认识还很粗糙，其作用机制并不明确。在长时间尺度上，上新世以来印尼海道/印尼贯穿流的演化呈现阶段性，缺乏连续的长时间尺度演化记录。另外，印尼海道/印尼贯穿流的演化在千年-轨道-构造时间尺度上确实可能对区域和全球气候产生重要影响，然而这些研究往往是片段式的，没有形成系统性认识。

2.3 北太平洋高纬过程与热带太平洋低纬过程的联动模式还未明确

NPIW 冰期旋回以及白令海峡开合等关键的北太平洋高纬过程无疑会对低纬过程乃至全球气候施加影响。冰期旋回中 NPIW 源区以及强度变化将影响 NPIW 的分布范围、渗透深度和水团中的碳、营养盐和溶解氧的存储能力，而这些变化将如何影响热带太平洋的水文循环和碳循环未有定论。过去针对白令海峡开合状态及其影响的研究则受多重因素的限制，如陆架浅水区冰期地质记录难以有效保存，冰消期沉积物易受海冰侵蚀，深水海盆区年代框架存在争议和有效地学重建手段缺乏等。

2.4 中国东部陆架沉积环境和碳埋藏过程对低纬过程与气候变化的响应机制没有定论

目前我国东部陆架多数晚第四纪沉积记录研究侧重在河口到内陆架，对中外陆架的研究关注不够，对更长地质历史如第四纪的源-汇过程和沉积环境研究很少。在陆架沉积有机碳埋藏研究方面，现代海洋沉积碳储量的估算因空间分布局限和站位覆盖率不足还存在很大的不确定性，对我国东部陆架沉积有机碳埋藏、保存及其对沉积过程的响应的理解还不够深入。上述问题的解决是厘清中国东部陆架沉积环境和碳埋藏过程机制的前提。

2.5 亚洲大陆边缘的碳源-汇过程对新生代全球变冷的贡献亟待深入研究

目前亚洲大陆边缘的碳源-汇过程研究工作的时间跨度往往较短，且多停留在定性与低时间分辨率层面上，因而迫切需要更长时间跨度上更多海洋沉积物岩芯记录的进一步补充，尤其是在定量和更高时间分辨率方面。而且，当前国内外相关研究对新生代青藏高原隆升背景下碳源-汇长期过程对全球气候环境影响的重视程度不够。厘清构造-气候驱动下的亚洲大陆边缘及邻近海洋的碳源-汇过程，及其在全球碳循环中的贡献或可为理解新生代全球变冷提供新的启示。

3 研究展望

3.1 多指标、多时间尺度、多学科以及多圈层开展西太暖池及其主流系演化、机制以及气候效应研究

厘清地质历史中西太暖池及其主流系演化过程与机理是开展西太平洋古海洋与古气候研究的重要研究

背景。建议通过多指标方法综合开展多时间尺度上西太暖池及其主流系的古海洋重建工作，相关指标包括海水温度、盐度、水体结构、生产力、流通状况、氧化还原状况以及水团年龄等，力求从多种海洋与气候参数恢复西太平洋百年、千年、轨道以及构造时间尺度的演化史。另外，可基于沉积学、矿物学、地球化学、古气候学和古海洋学这些经典学科的有效交叉，从地球系统四大圈层（大气圈、水圈、岩石圈和生物圈）相互作用角度出发来开展相应研究工作，进而在西太暖池及其主流系气候效应领域取得新认识，拓展科学前沿。

3.2　从水文循环和碳循环两大视角探究太平洋低纬过程对区域以及全球气候的影响

低纬过程对区域以及全球气候施加影响无非是通过水文循环和碳循环两大类途径。从水文循环的视角，低纬过程主要扮演“热引擎”和“蒸汽源”角色，其中热带暖池及其主流系、类 ENSO 过程、亚洲季风以及热带辐合带等是关键机制。从碳循环的视角，陆架区沉积有机碳埋藏、亚洲大陆与其邻洋岛屿的地表化学风化作用和大洋初级生产力演化等西太平洋碳源-汇过程在影响大气p_{CO_2}以及全球碳循环中发挥了重要作用。从以上两大视角开展研究工作，可充分认识太平洋低纬过程对区域以及全球气候的影响。

3.3　地质记录与数值模拟相结合的方式可提高对西太平洋海洋与气候变化成因的认识

开展古海洋与古气候数值模拟研究，并与地质历史资料进行对比，可进一步加强对过去气候变化的物理机制和气候反馈作用的理解，为未来气候预估提供科学依据。比如，上新世暖期被视为当前气候在未来可能出现的气候相似型[78]，揭示上新世古海洋与古气候特征，是目前开展未来气候评估的可行性途径之一。另外，重点关注典型气候特征期（末次冰期、末次冰消期、北半球快速变冷事件等）古海洋与古气候特征，通过精确定量重建或定性描述变化幅度的方式可为气候模拟提供初始数据或边界条件。

4　结　语

晚新生代西太平洋通过水文循环和碳循环两类关键过程，对区域乃至全球气候变化产生深刻的影响。从水文循环的视角，西太暖池可通过印尼贯穿流变动、类 ENSO 过程、亚洲季风系统等低纬因素，并通过与中高纬海洋、大气过程联动，驱动区域和全球气候。从碳循环的视角，热带因素也可通过季风降水和海洋流系演化等，影响亚洲大陆边缘与其邻洋的风化作用和生产力等，进而影响全球碳循环与大气p_{CO_2}。可见，围绕西太平洋开展系统的古海洋环境演化研究，不仅能从学术的角度贡献于低纬驱动理论的建立与完善，而且能提高对西太平洋海洋与气候过程机制的认识，为预测未来气候变化与实现“双碳”目标提供科学依据。

参考文献 (References):

[1] LYLE M, BARRON J, BRALOWER T J, et al. Pacific Ocean and Cenozoic evolution of climate[J]. Reviews of Geophysics, 2008, 46(2), DOI: 10.1029/2005RG000190.

[2] 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.

[3] DE DECKKER P. The Indo-Pacific Warm Pool: critical to world oceanography and world climate[J]. Geoscience Letters, 2016, 3(1): 1-12.

[4] HSUEH Y, LIE H J, AND ICHIKAWA H. On the branching of the Kuroshio west of Kyushu[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 1996, 101(C2): 3851-3857.

[5] TALLEY L D. Closure of the global overturning circulation through the Indian, Pacific, and Southern Oceans: Schematics and transports[J]. Oceanography, 2013, 26(1): 80-97.

[6] GORDON A L. Oceanography of the Indonesian seas and their throughflow[J]. Oceanography, 2005, 18(4): 14-27.

[7] LIU Z Y, ALEXANDER M. Atmospheric bridge, oceanic tunnel, and global climatic teleconnections[J]. Reviews of Geophysics, 2007, 45(2). DOI: 10.1029/2005RG000172.

[8] 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.

[9] VON DER HEYDT A S, NNAFIE A, DIJKSTRA H A. Cold tongue/Warm pool and ENSO dynamics in the Pliocene[J]. Climate of the Past, 2011, 7(3): 903-915.

[10] ZOU J J, SHI X F, ZHU A M, et al. Millennial-scale variations in sedimentary oxygenation in the western subtropical North Pacific and its links to North Atlantic climate[J]. Climate of the Past, 2020, 16(1): 387-407.

[11] RIPPERT N, MAX L, MACKENSEN A, et al. Alternating influence of northern versus southern - sourced water masses on the equatorial Pacific subthermocline during the past 240 ka[J]. Paleoceanography, 2017, 32(11): 1256-1274.

[12] SHI X F, YAO Z Q, LIU Q S, et al. Sedimentary architecture of the Bohai Sea China over the last 1 Ma and implications for sea-level changes[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2016, 451: 10-21.

[13] YAO Z Q, SHI X F, LIU Q F, et al. Paleomagnetic and astronomical dating of sediment core BH08 from the Bohai Sea, China: implications for glacial−interglacial sedimentation[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2014, 393: 90-101.

[14] BLATTMANN T M, LIU Z, ZHANG Y, et al. Mineralogical control on the fate of continentally derived organic matter in the ocean[J]. Science, 2019, 366(6466): 742-745.

[15] WAN S M, CLIFT P D, ZHAO D B, et al. Enhanced silicate weathering of tropical shelf sediments exposed during glacial lowstands: a sink for atmospheric CO_2[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2017(200): 123-144.

[16] SATO K, ODA M, CHIYONOBU S, et al. Establishment of the western Pacific warm pool during the Pliocene: evidence from planktic foraminifera, oxygen isotopes, and Mg/Ca ratios[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2008, 265(1-2): 140-147.

[17] WANG J, CHANG F M, LI T G, et al. The evolution of the Kuroshio Current over the last 5 million years since the Pliocene: evidence from planktonic foraminiferal faunas[J]. Science China Earth Sciences, 2020, 63(11): 1714-1729.

[18] SUN H, LI T G, LIU C L, et al. Variations in the western Pacific warm pool across the mid-Pleistocene: evidence from oxygen isotopes and coccoliths in the West Philippine Sea[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2017, 483: 157-171.

[19] 刘传联, 张拭颖, 金海燕, 等. 暖池区1.53 Ma以来上层海水变化的颗石藻证据[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2005, 33(9): 1172-1176. LIU C L, ZHANG S Y, JIN H Y, et al. Coccolith evidence of upper ocean water variations for past 1.53 Ma in Western Pacific Warm Pool[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2005, 33(9): 1172-1176.

[20] RUDDIMAN W F, PRELL W L, RAYMO M E. Late Cenozoic uplift in southern Asia and the American West: rationale for general circulation modeling experiments[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 1989, 94(D15): 18379-18391.

[21] BOOS W R, KUANG Z. Dominant control of the South Asian monsoon by orographic insulation versus plateau heating[J]. Nature, 2010, 463(7278): 218-222.

[22] 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.

[23] KARAS C, NÜRNBERG 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.

[24] 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.

[25] POTTER P E, SZATMARI P. Global Miocene tectonics and the modern world[J]. Earth-Science Reviews, 2009, 96(4): 279-295.

[26] 汪品先, 翦知湣, 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. 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 Earth Science, 2006, 21(4): 338.

[27] LEE T, FUKUMORI I, MENEMENLIS D, et al. Effects of the Indonesian throughflow on the Pacific and Indian Oceans[J]. Journal of Physical Oceanography, 2002, 32(5): 1404-1429.

[28] 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.

[29] OPPO D W, ROSENTHAL Y. The great indo-pacific communicator[J]. Science, 2010, 328(5985): 1492-1494.

[30] FAN W J, JIAN Z M, CHU Z H, et al. Variability of the Indonesian throughflow in the Makassar Strait over the last 30 ka[J]. Scientific Reports, 2018, 8(1): 1-8.

[31] ZHANG P, XU J, SCHRÖDER J F, et al. Variability of the Indonesian Throughflow thermal profile over the last 25-kyr: a perspective from the southern Makassar Strait[J]. Global and Planetary Change, 2018, 169: 214-223.

[32] SUSANTO R D, FFIELD A, GORDON A L, et al. Variability of Indonesian throughflow within Makassar Strait, 2004−2009[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2012, 117: C09013.

[33] PETRICK B, MARTÍNEZ-GARCÍA A, AUER G, et al. Glacial indonesian throughflow weakening across the mid-pleistocene climatic transition[J]. Scientific Reports, 2019, 9(1): 1-13.

[34] DI NEZIO P N, TIMMERMANN A, TIERNEY J E, et al. The climate response of the Indo - Pacific warm pool to glacial sea level[J]. Paleoceanography, 2016, 31(6): 866-894.

[35] 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.

[36] CAPPELLI E L G, HOLBOURN A, KUHNT W, et al. Changes in Timor Strait hydrology and thermocline structure during the past 130 ka[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2016, 462: 112-124.

[37] ZHANG P, XU J, BEIL S, et al. Variability in indonesian throughflow upper hydrology in response to precession-induced tropical climate processes over the past 120 kyr[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2021, 126(8): e2020JC017014.

[38] PANG X L, BASSINOT F, SEPULCRE S. Indonesian Throughflow variability over the last two glacial-interglacial cycles: evidence from the eastern Indian Ocean[J]. Quaternary Science Reviews, 2021, 256: 106839.

[39] 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. 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 and Quaternary Geology, 2004, 24(1): 7-14.

[40] 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: 14-36.

[41] 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.

[42] WARA M W, RAVELO A C, DELANEY M L. Permanent El Niño-like conditions during the Pliocene warm period[J]. Science, 2005, 309(5735): 758-761.

[43] IWATANI H, YASUHARA M, ROSENTHAL Y, et al. Intermediate-water dynamics and ocean ventilation effects on the Indonesian Throughflow during the past 15, 000 years: ostracod evidence[J]. Geology, 2018, 46(6): 567-570.

[44] KARAS C, NÜRNBERG 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.

[45] DE VLEESCHOUWER D, AUER G, SMITH R, et al. The amplifying effect of Indonesian Throughflow heat transport on Late Pliocene southern hemisphere climate cooling[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2018, 500: 15-27.

[46] TALLEY L D. Distribution and formation of North Pacific intermediate water[J]. Journal of Physical Oceanography, 1993, 23: 517-517.

[47] HORIKAWA K, ASAHARA Y, YAMAMOTO K, et al. Intermediate water formation in the Bering Sea during glacial periods: evidence from neodymium isotope ratios[J]. Geology, 2010, 38(5): 435-438.

[48] OHKUSHI K I, ITAKI T, NEMOTO N. Last Glacial−Holocene change in intermediate-water ventilation in the northwestern Pacific[J]. Quaternary Science Reviews, 2003, 22(14): 1477-1484.

[49] MATSUMOTO K, OBA T, LYNCH-STIEGLITZ J, et al. Interior hydrography and circulation of the glacial Pacific Ocean[J]. Quaternary Science Reviews, 2002, 21(14/15): 1693-1704.

[50] KEIGWIN L D. Radiocarbon and stable isotope constraints on Last Glacial Maximum and Younger Dryas ventilation in the western North Atlantic[J]. Paleoceanography, 2004, 19(4). Doi: 10.1029/2004PA001029.

[51] MAX L, RIPPERT N, LEMBKE-JENE L, et al. Evidence for enhanced convection of North Pacific Intermediate Water to the low-latitude Pacific under glacial conditions[J]. Paleoceanography, 2017, 32(1): 41-55.

[52] HUANG E Q, TIAN J, STEINKE S. Millennial-scale dynamics of the winter cold tongue in the southern South China Sea over the past 26 ka and the East Asian winter monsoon[J]. Quaternary Research, 2011, 75(1): 196-204.

[53] PARTIN J W, COBB K M, ADKINS J F, et al. Millennial-scale trends in west Pacific warm pool hydrology since the Last Glacial Maximum[J]. Nature, 2007, 449(7161): 452-455.

[54] LIU J J, TIAN J, LIU Z H, et al. Eastern equatorial Pacific cold tongue evolution since the late Miocene linked to extratropical climate[J]. Science Advances, 2019, 5(4): eaau6060.

[55] WOODGATE R A, WEINGARTNER T, LINDSAY R. The 2007 Bering Strait oceanic heat flux and anomalous Arctic sea - ice retreat[J]. Geophysical Research Letters, 2010, 37(1). Doi: 10.1029/2009GL041621.

[56] AAGAARD K, WEINGARTNER T J, DANIELSON S L, et al. Some controls on flow and salinity in Bering Strait[J]. Geophysical Research Letters, 2006, 33(19). Doi: 10.1029/2006GL026612.

[57] GREBMEIER J M, OVERLAND J E, MOORE S E, et al. A major ecosystem shift in the northern Bering Sea[J]. Science, 2006. Doi: 10.1126/science.1121365.

[58] COOK M S, KEIGWIN L D, SANCETTA C A. The deglacial history of surface and intermediate water of the Bering Sea[J]. Deep Sea Research Part Ⅱ:Topical Studies in Oceanography, 2005, 52(16-18): 2163-2173.

[59] HU A, MEEHL G A, HAN W Q, et al. Effects of the Bering Strait closure on AMOC and global climate under different background climates[J]. Progress in Oceanography, 2015, 132: 174-196.

[60] JAKOBSSON M, PEARCE C, CRONIN T M, et al. Post-glacial flooding of the Bering Land Bridge dated to 11 cal ka BP based on new geophysical and sediment records[J]. Climate of the Past, 2017, 13(8): 991-1005.

[61] YE L M, MÄRZ C, POLYAK L, et al. Dynamics of manganese and cerium enrichments in Arctic Ocean sediments: a case study from the Alpha Ridge[J]. Frontiers in Earth Science, 2019: 236.

[62] LOCARNINI M, MISHONOV A, BARANOVA O, et al. World ocean atlas 2018 volume 1: Temperature[EB/OL]. [2022-05-03] https://data.nodc.noaa.gov/woa/WOA18/DOC/woa18documentation.pdf.

[63] ROHLING E, FOSTER G L, GRANT K, et al. Sea-level and deep-sea-temperature variability over the past 5.3 million years[J]. Nature, 2014, 508(7497): 477-482.

[64] FRIEDLINGSTEIN P, O'SULLIVAN M, JONES M W, et al. Global carbon budget 2020[J]. Earth System Science Data, 2020, 12(4): 3269-3340.

[65] 石学法, 乔淑卿, 杨守业, 等. 亚洲大陆边缘沉积学研究进展(2011—2020)[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2021, 40(2): 18. SHI X F, QIAO S Q, YANG S Y, et al. Progress in Sedimentology Research of the Asian Continental Margin(2011-2020)[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2021, 40(2): 18.

[66] SHI X F, YAO Z Q, LIU J X, et al. Dominant role of sea level on the sedimentary environmental evolution in the Bohai and Yellow Seas over the last 1 million years[J]. Frontiers in Earth Science, 2021, 9: 229.

[67] YAO Z Q, SHI X F, LIU Y G, et al. Sea-level and climate signatures recorded in orbitally-forced continental margin deposits over the last 1 Myr: new perspectives from the Bohai Sea[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2020, 550: 109736.

[68] YAO Z Q, SHI X F, QIAO S Q, et al. Persistent effects of the Yellow River on the Chinese marginal seas began at least~880 ka ago[J]. Scientific Reports, 2017, 7(1): 1-11.

[69] QIAO S Q, SHI X F, WANG G Q, et al. Sediment accumulation and budget in the Bohai Sea, Yellow Sea and East China sea[J]. Marine Geology, 2017, 390: 270-281.

[70] 赵美训, 丁杨, 于蒙. 中国边缘海沉积有机质来源及其碳汇意义[J]. 中国海洋大学学报: 自然科学版, 2017, 47(9): 70-76. ZHAO M X, DING Y, YU M. Sources of sedimentary organic matter in china marginal sea surface sediments and implications of carbon sink[J]. Periodical of Ocean University of China: Natural Sciences, 2017, 47(9): 70-76.

[71] HU L M, SHI X F, BAI Y Z, et al. Recent organic carbon sequestration in the shelf sediments of the Bohai Sea and Yellow Sea, China[J]. Journal of Marine Systems, 2016, 155: 50-58.

[72] MILLIMAN J D, FARNSWORTH K L. River discharge to the coastal ocean: a global synthesis[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.

[73] GEBREGIORGIS D, HATHORNE E C, GIOSAN L, et al. Southern Hemisphere forcing of South Asian monsoon precipitation over the past ~1 million years[J]. Nature Communications, 2018, 9(1): 4702.

[74] SONG Z H, WAN S M, COLIN C, et al. Paleoenvironmental evolution of South Asia and its link to Himalayan uplift and climatic change since the late Eocene[J]. Global and Planetary Change, 2021, 200: 103459.

[75] XU Z K, WAN S M, COLIN C, et al. Enhancements of Himalayan and Tibetan erosion and the produced organic Carbon burial in distal tropical marginal seas during the quaternary glacial periods: an integration of sedimentary records[J]. Journal of Geophysical Research: earth Surface, 2021, 126(3): e2020JF005828.

[76] DANG H W, WU J W, XIONG Z F, et al. Orbital and sea-level changes regulate the iron-associated sediment supplies from Papua New Guinea to the equatorial Pacific[J]. Quaternary Science Reviews, 2020, 239: 106361.

[77] XU Z K, WAN S M, COLIN C, et al. Enhanced terrigenous organic matter input and productivity on the western margin of the Western Pacific Warm Pool during the Quaternary sea-level lowstands: forcing mechanisms and implications for the global carbon cycle[J]. Quaternary Science Reviews, 2020, 232: 106211.

[78] DOWSETT H J, ROBINSON M M, HAYWOOD A M, et al. Assessing confidence in Pliocene sea surface temperatures to evaluate predictive models[J]. Nature Climate Change, 2012, 2: 365-371. DOI: 10.1038/nclimate1455.

Evolution and Mechanism of the Paleoceanographic Environment in the Western Pacific During the Late Cenozoic

LI Tie-gang[1,2], QIN Bing-bin[1], WAN Shi-ming[2,3], YAO Zheng-quan[1,2], ZOU Jian-jun[1,2], LIU Yan-guang[1,2], QIAO Shu-qing[1,2], XU Zhao-kai[2,3], SUN Han-jie[2,3], NAN Qing-yun[2,3], CHANG Feng-ming[2,3], XIONG Zhi-fang[1,2]

(1. *First Institute of Oceanography*, *MNR*, Qingdao 266061, China;
2. *Laboratory for Marine Geology and Environment, Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology (Qingdao)*, Qingdao 266237, China;
3. *Key Laboratory of Marine Geology and Environment*, *Institute of Oceanology*, *Chinese Academy of Sciences*, Qingdao 266071, China)

Abstract: The Western Pacific has a significant impact on regional and global climate changes through the hydrological and carbon cycles during the late Cenozoic. In the present paper, we review the evolution and mechanism of the paleoceanography and paleoenvironment in the Western Pacific from the following aspects: the Pliocene evolutions of the Western Pacific Warm Pool and its main current, the late Quaternary evolutions of the North Pacific Intermediate Water and the Bering Strait opening and closing, the Quaternary evolution of shelf environment in the Eastern China, and the source-to-sink process and carbon burial of the Cenozoic Asia-Pacific sediments. Since the Pliocene, the evolutions of the Western Pacific Warm Pool and the Indonesian throughflow has formed in stages along with tectonic movements, but the details of their evolutions on the orbital timescales are still not clear. Key high-latitude processes such as the North Pacific Intermediate Water and the Opening and Closing of the Bering Strait have varied significantly during glacial-interglacial cycles and are remotely correlated with low-latitude processes. The evolution of Quaternary shelf environment in the Eastern China is mainly controlled by sea level fluctuation and the heat- and material- transfer associated with low-latitude processes. Under these conditions the Shelf has formed a slurry sedimentary system rich in organic carbon. Sediment source-to-sink processes in continental Asia and adjacent oceans driven by tectonic uplift and Asian monsoons have significant carbon sink effects and may have played an important role in the glacial-interglacial atmospheric carbon dioxide concentration (p_{CO_2}) variations and the Cenozoic climate cooling. Conducting in-depth and systematic research on a number of key scientific issues in the evolution and mechanism of the paleoceanography and paleoenvironment in the Western Pacific Ocean can not only provide a basis for establishing the theory of low-latitude forcing of climate change, but also may help to improve our understanding of the environmental change and the carbon sink potential of China's continental shelf.

Key words: the Western Pacific Ocean; Cenozoic; paleoceanography and paleoenvironment; hydrological cycle; carbon cycle

Received: May 12, 2022