



北太平洋大洋钻探研究进展

张亚南, 仲 义, 陈 艇, 赵德博, 王敦繁, 盖聪聪, 姜兆霞, 蒋晓东, 刘青松

Research progress of ocean drilling in the North Pacific Ocean: Paleooceanography and paleoclimate

ZHANG Yanan, ZHONG Yi, CHEN Ting, ZHAO Debo, WANG Dunfan, GAI Congcong, JIANG Zhaoxia, JIANG Xiaodong, and LIU Qingsong

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2022062501>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in



关注微信公众号，获得更多资讯信息

张亚南, 仲义, 陈艇, 等. 北太平洋大洋钻探研究进展——古海洋与古气候[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2022, 42(5): 16-32.

ZHANG Yanan, ZHONG Yi, CHEN Ting, et al. Research progress of ocean drilling in the North Pacific Ocean: Paleoceanography and paleoclimate[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2022, 42(5): 16-32.

北太平洋大洋钻探研究进展 ——古海洋与古气候

张亚南¹, 仲义¹, 陈艇², 赵德博³, 王敦繁¹, 盖聪聪¹, 姜兆霞⁴, 蒋晓东¹, 刘青松¹

1. 南方科技大学海洋科学与工程系海洋磁学中心, 深圳 518055

2. 重庆师范大学长江上游湿地科学研究重庆市重点实验室, 重庆 400047

3. 中国科学院海洋研究所海洋地质与环境重点实验室, 青岛 266071

4. 中国海洋大学海底科学与探测技术教育部重点实验室, 青岛 266100

摘要: 北太平洋作为全球大洋环流的重要组成部分, 在高低纬间热量和物质的传输与再分配方面起到重要的调控作用, 进而影响到地球气候系统。基于过去 50 多年来的大洋钻探工作, 前人在北太平洋地球科学的研究上取得了一系列的成果。本文回顾了北太平洋古海洋和古气候方面的研究进展, 包括: (1) 东亚夏季风和西部边界流演化, 以及其对高低纬热量、水汽的传输; (2) 北太平洋中层水和深层水的性质变化、分布范围和驱动机制, 以及冰期旋回中水体垂直交换作用的气候响应; (3) 风尘输入对亚洲内陆古环境的反映, 及其对北太平洋生产力的铁肥效应。尽管前人针对上述科学问题都开展了相应的研究工作, 但目前在对北太平洋上述几方面的认识上仍然存在着分歧。基于对前人研究的总结概括, 本文最后提出了未来北太平洋研究的关键科学问题, 强调了多圈层、多系统角度对深入认识过去地球气候系统变化的重要性, 并对未来大洋航次开展的理想靶区进行了展望。

关键词: 大洋钻探; 东亚夏季风; 西部边界流; 风尘; 生产力; 北太平洋

中图分类号: P736

文献标识码: A

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2022062501

Research progress of ocean drilling in the North Pacific Ocean: Paleoceanography and paleoclimate

ZHANG Yanan¹, ZHONG Yi¹, CHEN Ting², ZHAO Debo³, WANG Dunfan¹, GAI Congcong¹, JIANG Zhaoxia⁴,

JIANG Xiaodong¹, LIU Qingsong¹

1. Southern University of Science and Technology, Department of Ocean Science and Engineering, Shenzhen 518055, China

2. Chongqing Normal University, Chongqing key laboratory of wetland science research in the upper Yangtze River, Chongqing 400047, China

3. Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Key Laboratory of Marine Geology and Environment, Qingdao 266071, China

4. Ocean University of China, Key Laboratory of Submarine Geosciences and Prospecting Techniques, Qingdao 266100, China

Abstract: As an important part of global ocean circulation, the North Pacific Ocean plays a key role in regulating the transfer and redistribution of heat and matter between high and low latitudes, thus affecting the Earth's climate system. Based on the ocean drilling programs over 50 years in the past, many achievements in geoscience have been made. We reviewed the progresses of paleoclimate research in the North Pacific in the following aspects: (1) the evolution of the East Asian summer monsoon and the western boundary current, as well as their contributions to the transportation of heat and water vapor between high and low latitudes in North Pacific; (2) changes in water property, distribution, and the driving mechanisms of the Pacific Deep Water and North Pacific Intermediate Water, as well as the climatic response of their interaction during glacial-interglacial cycles; (3) the response of aeolian flux to the Asian inland and its iron fertilization effect on the North Pacific productivity. Previous studies have addressed those scientific problems, uncertain issued remain controversial. We therefore proposed the key scientific issues for future research in the North Pacific Ocean, and emphasized the importance of multi-layer and multi-system perspectives for deciphering the

资助项目: 国家自然科学基金重点项目“南海与东菲律宾海协同演化研究”(92158208); 国家自然科学基金“上新世亚北极太平洋硅藻种群特征及其环境控制因素”(41904069); 同济大学海洋地质国家重点实验室开放课题“晚第四纪以来亚北极太平洋地区高-低纬度气候系统响应机制研究”(MGK202209); 重庆师范大学博士启动/人才引进项目“三峡库区消落带沉积物环境磁学特征及其对重金属污染的指示”(20XLB021)

作者简介: 张亚南(1994—), 男, 博士, 主要从事古海洋沉积方面的研究工作, E-mail: yananzhang9@163.com

通讯作者: 刘青松(1972—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事海洋磁学方面的研究, E-mail: qslu@sustech.edu.cn

收稿日期: 2022-06-25; **改回日期:** 2022-08-02. 文凤英编辑

past changes of the Earth's climate system. Finally, we suggested the ideal target areas for ocean drilling program in North Pacific in the future.

Key words: ocean drilling; East Asian summer monsoon; western boundary current; eolian dust; productivity; North Pacific

作为全球最大的海洋,太平洋通过大洋环流将地球上的热量和物质进行再分配,对过去地球气候系统的变化具有重要的意义。晚第四纪以来,冰期-间冰期旋回成为地球气候变化的主要特征,同时兼具千年尺度的震荡变化。然而,太平洋对这些全球性变化的贡献目前尚未被全面厘定。现今北太平洋,由于盐跃层的存在,无法形成深层水,仅发育太平洋中层水(North Pacific intermediate water, NPIW)。而太平洋深层水(Pacific deep water, PDW)作为现代大洋深水环流末端受到南极深水的补给,是海洋中最大的碳储库,蕴含着大量的营养盐物质和溶解无机碳(dissolved inorganic carbon, DIC)。有研究表明,太平洋环流系统在过去冰期旋回中发生了显著的变化^[1-2]。NPIW的通风可能是解释全球气候的长期演变和高频气候震荡产生的原因^[3]。温暖时期NPIW的减弱,导致富含DIC的PDW更容易上涌,促进海水与大气间的交换,从而提高了该时期大气CO₂含量^[4]。同时,深水上涌也为表层带来了大量的N、P等营养盐物质,刺激了表层生产力的爆发。此外,NPIW通风的减弱以及高生产力条件下有机质降解对水体O₂的消耗,导致北太平洋最小含氧带(oxygen minimum zones, OMZ)的广泛发育^[5]。在过去几十年里OMZ的范围不断扩大和加剧,对生态系统环境造成严重威胁^[6-7]。因此,北太平洋古海洋学研究不但有利于揭示过去地球气候变化机制,而且为预测未来全球变暖背景下海洋生态环境的变化提供支撑。

亚洲风尘作为全球风尘循环中重要的组成部分,对东亚乃至全球气候都有着深远的影响。据统计每年有将近20亿t风尘物质释放到大气中,最终有约75%的风尘会沉降到附近陆地,形成黄土高原

等特殊地形,其余的25%则被传输到海洋中^[8]。作为全球第二大风尘源区,亚洲内陆广泛分布的干旱-半干旱区每年为北太平洋提供了近7000万t的风尘物质,并成为远洋沉积物质的主要来源。大气粉尘通过反射和吸收进入地球的太阳辐射,可以直接影响到区域辐射收支和大气降水平衡^[9]。同时,风尘中的铁元素与海洋表层生产力之间具有紧密的联系,并参与到海洋生物化学循环过程(铁实验假说)^[10]。具体而言,铁元素供给能够促进海洋生产力的爆发,并通过生物泵作用将大气CO₂转移到深海中,从而影响全球碳循环^[10-11]。此外,海洋沉积物中的风尘通量、粒径等指标还可以用来追溯源区的古气候变化,对研究亚洲内陆古气候变化和青藏高原隆升也具有重要意义。

本文回顾了过去五十余年北太平洋大洋钻探研究以及相关的古海洋与古气候研究进展,在此基础上总结了目前北太平洋的关键科学问题,并对未来大洋钻探及北太平洋古海洋与古气候学研究提供建议。

1 北太平洋大洋钻探研究概述

过去50余年,大洋钻探计划在北太平洋(>35°N)开展了20余次大洋钻探航次,积累了大量的岩芯钻孔,为研究北太平洋的沉积构造演化提供了丰富的材料。目前为止有6个航次的设计以古海洋与古气候学的研究为主(表1),主要集中在北太平洋边缘海和海隆区域(图1),包括以西太平洋古海洋学为主要任务的DSDP第88/86航次,以亚北极太平洋风尘研究为主要目标的ODP第145航次,针对突变事件时期(如古新世—始新世极

表 1 北太平洋古海洋与古气候大洋钻探航次
Table 1 The ocean drilling expeditions in the North Pacific

航次	钻探区域	主要研究目标	钻探站位	时间
Leg 86/88	西北太平洋	风尘、黑潮延伸流	576—581	1982
Leg 145	亚北极太平洋	风尘、NPIW	881—887	1993
Leg 198	沙茨基隆起	深水环流	1207—1214	2001
323	白令海	NPIW	U1339—1345	2009
341	阿拉斯加大陆边缘	NPIW	U1417—1421	2013
346	日本海	东亚季风	U1422—1430	2013

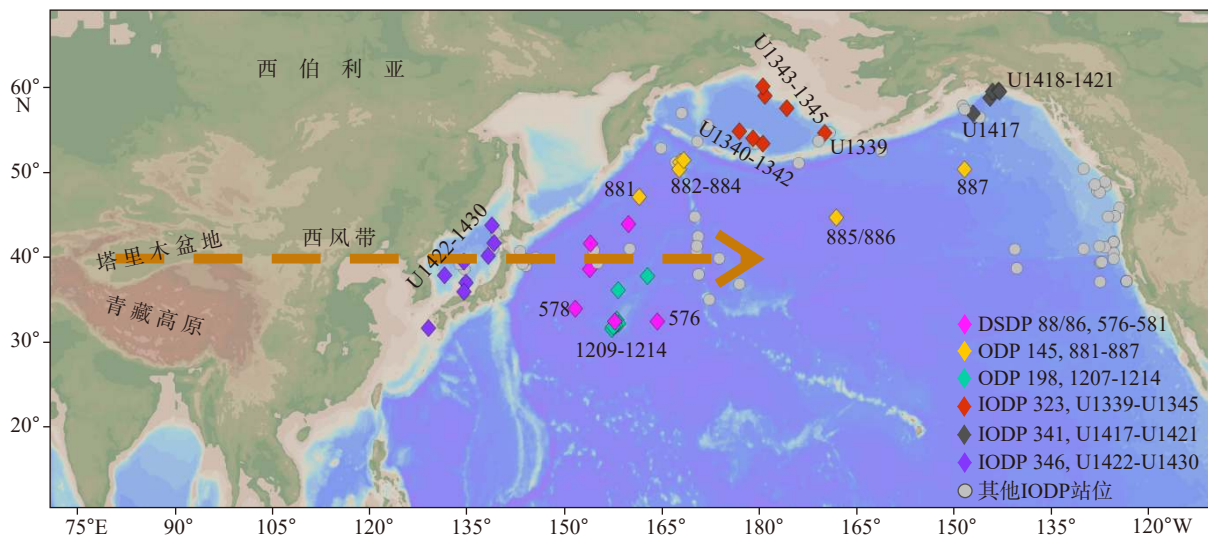


图1 北太平洋 (>35°N) 古海洋与古气候大洋钻探航次及站位
地图使用 Ocean Data View 生成^[14]。

Fig.1 Ocean drilling expeditions and sites in paleoceanography and paleoclimatology of the North Pacific (>35°N)

Map is generated using Ocean Data View^[14].

热事件等)气候变化的 ODP 第 198 航次, 2009 年以“白令海古海洋学”为主题的 IODP 第 323 航次, 2013 年以“阿拉斯加南部大陆边缘”和“亚洲季风”为主题的 IODP 第 341 和 346 航次。整体来说, 早期的 DSDP 航次海洋沉积物的主要目标涉及到北太平洋沉积物分布特征、生物地层和远洋生物群落演化等方面。ODP 和 IODP 航次则围绕具体的科学问题开展, 如亚北极太平洋作为 NPIW 的生成区, 在冰期/间冰期旋回中受到冰盖和海冰范围的显著影响; 而处在西风带和东亚季风路径上的北太平洋中纬度海区, 则成为研究风尘和大气环流的绝佳区域, 同时该区域也为过去高低纬间的热量传输提供了重要的参考。近年来的研究表明, 北太平洋在全球气候系统中起着重要的作用, 涉及到水循环、碳循环和风尘循环之间复杂的耦合过程^[12-13]。因此, 北太平洋古海洋与古气候学研究的开展对于深入认识过去地球气候系统变化和预测未来气候前景具有十分重要的意义。

2 古海洋与古气候的沉积记录

2.1 东亚夏季风演化

东亚夏季风从低纬海洋携带大量水汽至亚洲东北部乃至北太平洋, 控制着当地河流(如黑龙江)入海径流量以及北太平洋降水量的变化。现代观测表明, 黑龙江入海径流量可影响来年鄂霍次克海

海冰的形成, 显示出与海冰分布负相关的关系^[15]。而海冰的形成直接控制该海域的盐度波动, 从而对北太平洋中层水的形成产生深远影响^[16]。此外, 东亚夏季风向北太平洋输送的暖湿气流为当地带来的降水, 也可影响该区域的海表盐度变化, 进而对北太平洋水团下沉及中层水形成演变做出贡献^[17]。因此, 东亚夏季风是北太平洋低纬影响高纬气候过程的一个重要枢纽。查明东亚夏季风演化及其驱动机制, 对于深刻理解北太平洋气候演变及其在全球气候系统中的作用至关重要。

季风形成于中低纬区域, 其形成源于海陆所接收太阳辐射产生的热力差异, 故此与地球表面的海陆分布密切相关。由于南北有亚、澳两个大陆, 西东为青藏高原与太平洋, 东亚季风的影响因素远比非洲季风和印度季风更为复杂^[18]。东亚季风研究从黄土-古土壤开始, 然后扩展到洞穴石笋、湖泊与海洋沉积物, 大多数聚焦于轨道-千年时间尺度。但由于各替代指标的多解性及夏季风系统的复杂性, 轨道时间尺度东亚夏季风演化及其驱动机制研究仍存在较多争议。

洞穴石笋氧同位素记录凭借其样品的高分辨率以及精确定年, 成为应用最为广泛的东亚夏季风指标(图 2)。近年来, 石笋氧同位素记录能否准确反映东亚夏季风降水演变出现了诸多争议。如有观点认为其氧同位素变化指示了来自印度洋、南海及西太平洋水汽相对贡献量的变化^[19-20], 抑或可能指示了印度季风演化的信号^[21-22]。此外, 还有研究

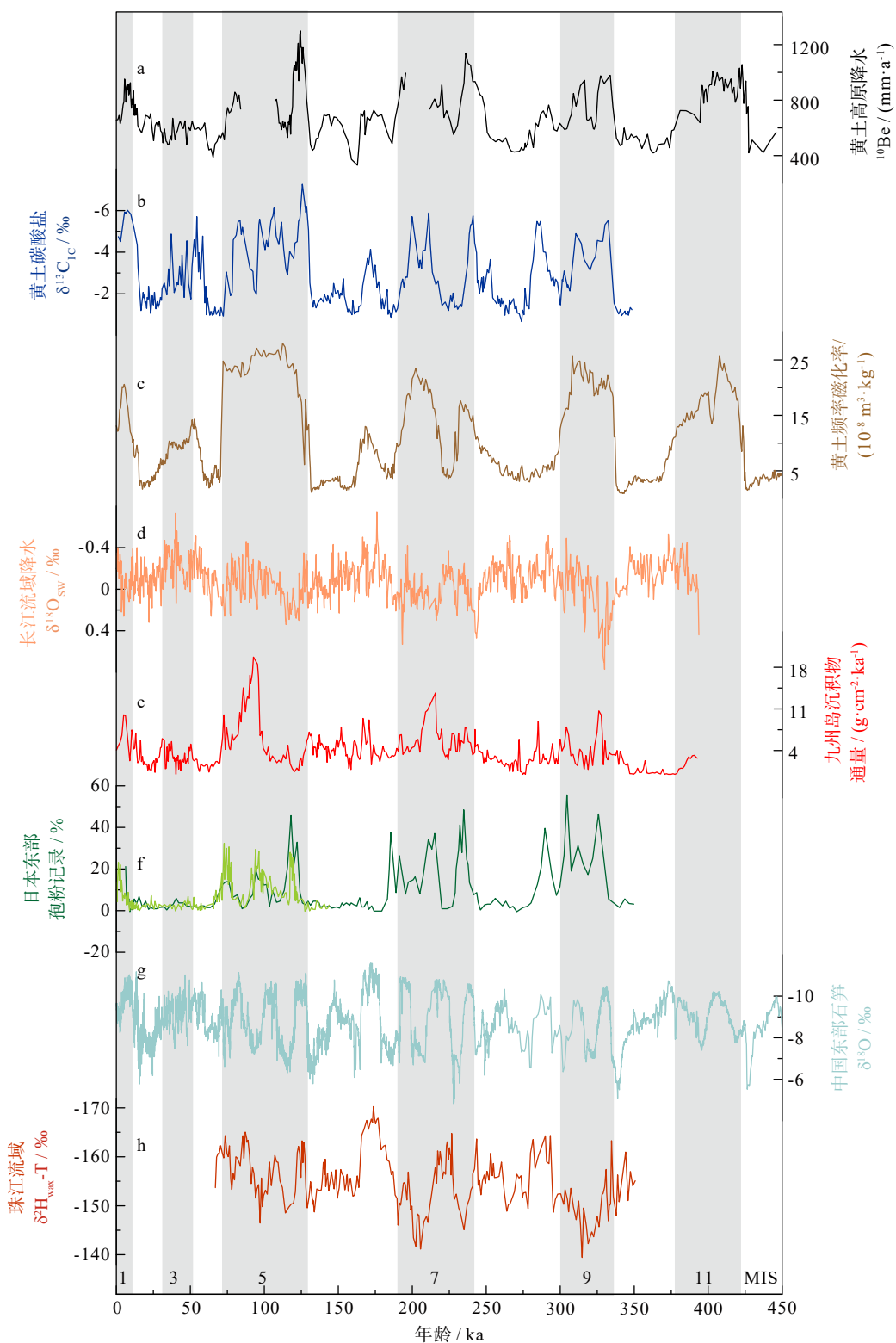


图 2 晚第四纪东亚夏季风记录对比

a. 黄土 ^{10}Be 记录^[27]; b. 黄土碳酸盐碳同位素记录^[28]; c. 黄土频率磁化率记录^[29]; d. 长江流域降水记录^[30]; e. 九州岛沉积物通量, 指示日本九州岛降水记录^[31]; f. 日本东部孢粉记录。RC1499 孔(青黄色)和 MD01-2421 孔(深绿色)^[32-33]; g. 中国东部石笋氧同位素记录^[24]; h. 珠江流域叶蜡氢同位素记录^[34]。灰色条带指示海洋氧同位素阶段。

Fig.2 Comparison of East Asian summer monsoon records in East Asian continent and surrounding oceans reflected from different data a. Loess ^{10}Be data^[27]; b. Loess carbonate $\delta^{13}\text{C}$ data^[28]; c. Loess magnetic susceptibility (χ_{fd}) data^[29]; d. Yangtze River runoff data^[30]; e. Sediment flux of Kyushu as rainfall data^[31]; f. Pollen records in eastern Japanese in Site RC1499 (bluish yellow) and MD01-2421 (dark green)^[32-33]; g. Chinese cave $\delta^{18}\text{O}$ data^[24]; h. Pearl River leaf wax $\delta^2\text{H}$ data^[34]. Grey bars show Marine Oxygen Isotope Stage (MIS).

称其可能反映了西太平洋海表温度变化所引起的水汽同位素分馏效应的强弱变化,而非季风降水的增强^[23]。但近年来,越来越多的指标-模型相结合的工作表明,东亚石笋氧同位素记录指示了东亚大陆大范围内夏季风强度的变化,而非降水演化,呼吁结束长久以来对于东亚石笋氧同位素指代性的争论^[24-26]。

黄土-古土壤为另外一个东亚夏季风重建的经典材料,其诸多指标如磁化率、碳酸盐碳同位素以及铍同位素(¹⁰Be)等被应用到东亚夏季风演化重建工作中。然而,黄土-古土壤不同指标之间重建的夏季风演化历史仍存在较大差异。其中¹⁰Be和碳酸盐碳同位素记录除了具有非常强的100 ka周期以外,23 ka周期也较为显著^[27-28](图2a、b),这与磁化率记录所显示的以100 ka周期为主是不同的^[29](图2c)。有观点认为,冰期风尘通量的急剧升高而产生的稀释作用使得磁化率降低,因此整体未出现强岁差周期信号^[25,35]。另外,古土壤成壤过程中还受到化学风化的强烈影响,因此以十万年周期变化为特征的温度可能也是黄土-古土壤记录出现强100 ka周期的重要因素^[36]。碳酸盐碳同位素记录同时受到降水和温度的影响,因此也难以判定其准确的指示意义^[28]。此外,有研究发现,黄土-古土壤中的¹⁰Be主要被细粒级沉积物(<4 μm)所吸附^[37]。因此,冰期-间冰期旋回中,风尘沉积物粒度的巨大波动^[38],可能直接控制了黄土-古土壤中的¹⁰Be含量,因此也影响了其对于东亚夏季风演化的指示意义。

近年来,西北太平洋边缘海及深海沉积物在轨道时间尺度东亚夏季风演化方面取得了重要进展。根据IODP 346航次在冲绳海槽北部钻取的U1429沉积岩芯,Clemens等^[30]基于当地的海水氧同位素记录重建了长江流量和当地的降水演化历史,发现东亚夏季风演化缺失了岁差周期(图2d)。这一发现既与中国北方黄土-古土壤重建的夏季风演化不同^[27-29](图2a-c),又区别于中国南方珠江流域的叶蜡氢同位素记录^[34](图2h)。有模拟结果显示,长江流域夏季风降水演变的岁差信号确实不明显^[25],这可能反映了东亚夏季风降水演化的空间差异性。与海水氧同位素记录不同的是,基于U1429站位沉积物中来自日本九州岛的沉积物通量,重建的当地降水结果表明其既具有100 ka周期,也有较强的23 ka周期^[31](图2e)。这与日本岛东部的孢粉记录显示的结果是一致的^[32-33](图2f)。同时,通过与中国北方和南方的夏季风指标进行对比,发现岁差时间尺度上,日本南部的降水演化与其他区域是

反向的。这一点也得到数值模拟结果的证实^[31,39]。

值得注意的是,季风强度和降水是东亚季风系统的两个重要组成部分。季风强度演化在东亚大部分区域是一致的,但由于降水带可随着东/西南季风的增强或者减弱而向北/西北推进或者后退,东亚大陆的降水分布也就产生了巨大差异^[25]。以上指标所记录的东亚夏季风演化历史形式多样,可能与指标的多解性以及季风降水本身的空间差异性有关。但总体上仍然是高低纬气候过程的综合驱动,如北半球高纬冰量、温室气体以及中低纬太阳辐射相互作用的结果^[28,30-31,34]。寻找更加可靠的替代指标,对于厘定东亚夏季风演化及其驱动机制,以及查明其在北半球高低纬气候过程中的作用至关重要。

2.2 西部边界流演化历史

海洋主要通过海-气界面热交换来影响大气过程,这一过程与海表面温度的空间与时间变化直接相关。在低纬度海区,厄尔尼诺-南方涛动(El Niño-Southern Oscillation, ENSO)影响着纬向上的海洋热量分布,是海洋影响气候年际变化最显著的异常信号,并以热带东中太平洋海温的变化为主要标志^[40]。而在经向热量分布上,西边界流系统在亚热带和亚极地海洋热量传输过程中发挥着重要的作用,深刻影响着北太平洋中-高纬海区的气候变化^[41]。黑潮(Kuroshio Current, KC)和黑潮延伸体(Kuroshio Current Extension, KCE)作为西边界流系统在北太平洋副热带环流的重要分支,流经全球海洋向大气加热的关键海区和海洋涡旋出现最频繁的海域^[42]。KCE一般在35°N、140°E附近脱离日本东海岸的束缚,转向流入北太平洋开阔盆地(图3)。作为西边界流的延续,KCE仍保持着高温、高速、高涡动性等特征,具有较高的感热潜热通量和净热释放^[43]。一方面,西边界流系统过渡带具有当今世界海洋生物多样性最高的生态渔业系统^[44]。随着全球变暖的加剧,海表温度的逐步上升造成鱼类产量不断下降^[45]。另一方面,该系统是北太平洋地区高-低纬水汽热量传输的重要通道,理解西部边界流系统对过去气候变化的响应机制,对预测和减轻未来气候变化、当地生物多样性和人类食物供应的影响具有重要意义^[46]。

观测结果表明,过去半个世纪以来,西边界流不断增强并向极区扩张,所导致的海表温度(sea surface temperature, SST)增温速度比全球平均温度高出2~3倍^[47]。由于西部边界流对气候变化的重

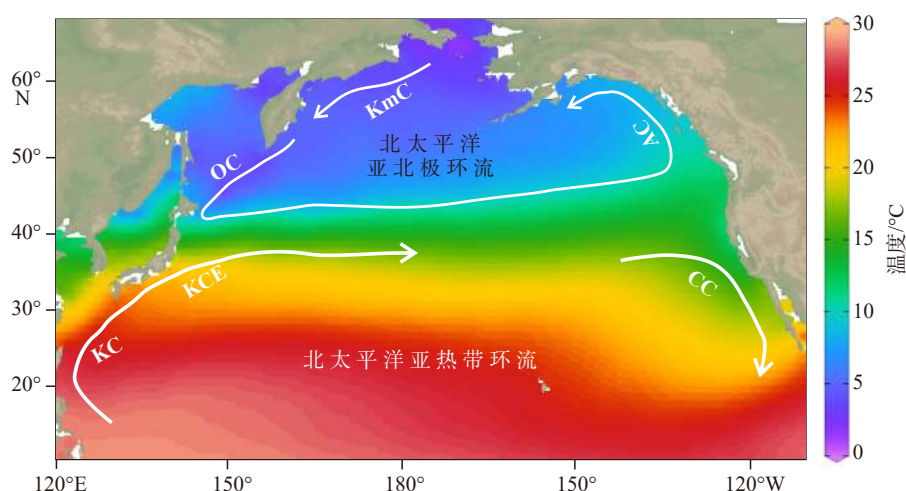


图 3 北太平洋海表温度及表层环流

地图使用 Ocean Data View 生成^[14]。KmC: 勘察加流, OC: 亲潮, AC: 阿拉斯加暖流, CC: 加利福尼亚流, KC: 黑潮, KCE: 黑潮延伸流。

Fig.3 Sea surface temperature and surface circulation in the North Pacific

Map is generated using Ocean Data View^[14]. KmC: Kamchatka Current, OC: Oyashio Current, AC: Alaska Current, CC: California Current, KC: Kuroshio Current, KCE: Kuroshio Current Extension.

要影响,其长时间变化记录的重建及影响机制的研究对预测未来西部边界流的变化具有重要的意义。近些年大洋钻探围绕西边界流系统的研究主要集中在轨道和构造时间尺度方面。其中, Vats 等^[48]通过 IODP U1429 站位的有孔虫属种分析和 SST 重建结果发现,黑潮强度响应于低纬度的岁差和偏心率信号。但是,更多的记录集中于中低纬度地区,缺乏对于高-低纬度地区热量传输过程的整体认识。

在构造尺度上,通过浮游生物多样性和古生物地理学特征重建过去 KCE 的行为方式成为研究北太平洋西边界流变化的主要方法,这部分工作主要集中在上新世—更新世时期西边界流位置和强度的变化上。以 ODP 第 198 航次为例,前人通过有孔虫种属和群落数据证实 KCE 在晚新近纪时期已经开始出现于西北太平洋地区^[49]。Gallagher 等^[50-51]通过古生物学记录显示从晚上新世~3.0 Ma 开始 KC 可能已经达到现今的北部界限,此时 KC 也明显增强,可能与中美海道的关闭和北半球冰盖扩张的开始有关。近年来,有研究系统对比了 ODP 1207-1209 记录到的 KCE 变化,发现其与构造和气候事件间的紧密联系,包括中美海道关闭、KCE 区域环境由暖变冷以及北太平洋副热带环流的增强^[49,52]。此外,ODP 1208A 的 SST 重建结果表明,12 Ma 以来 SST 呈现逐步降温的趋势,且在上新世时期保持较为平稳的特征^[53]。Venti 等^[54]根据 ODP 1208 烯酮记录重建了 3.0~1.8 Ma 以来 KCE 的 SST 变化,结果表明

KCE 在北半球冰盖扩张时期(约 2.7 Ma)降温 2~4 °C;同时认为,热带-温带之间的热平衡可能加强了冰盖在 41 ka 周期上的变化。

2.3 北太平洋中层水演化

现今 NPIW 被定义为副热带北太平洋最低盐度区(main salinity minimum in the subtropical North Pacific),主要集中在 300~800 m 水深范围内^[55]。其主要来源于海冰形成过程中产生的陆架水——鄂霍次克海中层水^[56-57],阿拉斯加湾对于 NPIW 的形成也有一定贡献,但明显低于鄂霍次克海^[58-59]。经过混合形成 NPIW 后,其沿着亚北极锋和副热带锋流向东太平洋,并逐渐变重下沉,而后从东太平洋沿等密度锋向西南方向移动进入西太平洋^[59]。观测结果显示 NPIW 在东西太平洋的分布范围不同,在东太平洋向南延伸至亚热带锋附近^[60],而在西太平洋则影响到南海,甚至到印尼贯穿流区^[58-59]。

近年来亚北极海区大洋钻探航次的开展,揭示了 NPIW 在构造尺度上的演化特征及其对气候的响应。在上新世晚期的气候变冷时期(约 2.73 Ma),亚北极太平洋 ODP 882 站位和南大洋 ODP 1096 站位都显示出蛋白石累积速率的明显下降,可能与北半球冰川作用加剧事件(intensification of Northern Hemisphere glaciation, iNHG)期间,高纬海区中层水形成的加强有关^[61-62]。增强的盐度分层使得富含硅酸盐的深水上涌作用减弱,并造成表层硅质生产力的降低和硝酸盐利用率的减少^[61,63]。然而, Burls 等^[64]

根据 ODP 882 站位的氧化还原记录,认为是表层与深部水体的强烈交换(即北太平洋形成深层水),导致了上新世期间的高生产力;模拟结果表明,该时期太平洋经向翻转环流的增强与北太平洋经向海表温度梯度的降低有关(高低纬水汽传输减少,促进了 NPIW 的加深)。但由于长时间尺度钻孔的缺乏,使得对上新世时期 NPIW 演化特征和成因机制的认识尚不清楚。2013 年 IODP 323 航次的开展,取得了白令海 5 Ma 以来的沉积记录,为上新世以来 NPIW 的研究提供了基础。U1342 和 U1343 站位的氧同位素对比表明,白令海峡在 MIS 22—23 期间的关闭,促进了 NPIW 通风的加深,并可能影响到中更新世转型(mid-Pleistocene transition, MPT)期

间大气 CO_2 的降低和全球变冷^[65]。但受到年龄的限制,白令海峡的关闭对 MPT 开始变冷(约 1.2 Ma)的影响,仍需进一步的研究。

在轨道尺度上,底栖有孔虫氧碳同位素结果表明 NPIW 在冰期加强,在间冰期相对减弱^[66-67]。末次冰盛期(last glacial maximum, LGM) NPIW 在垂向深度上可能扩张到 2 000 m 左右^[68-69],但鄂霍茨克海通风年龄记录表明此时的通风较弱^[70],可能与 NPIW 形成源区的转变有关^[71]。Max 等^[72]通过对比亚北极太平洋和赤道东太平洋的碳同位素变化发现,冰期条件下营养物质丰富的 NPIW 向赤道太平洋扩张,并造成东赤道太平洋埋藏有机碳的增加。白令海 U1343 站位记录表明,850 ka 以来冰期期间

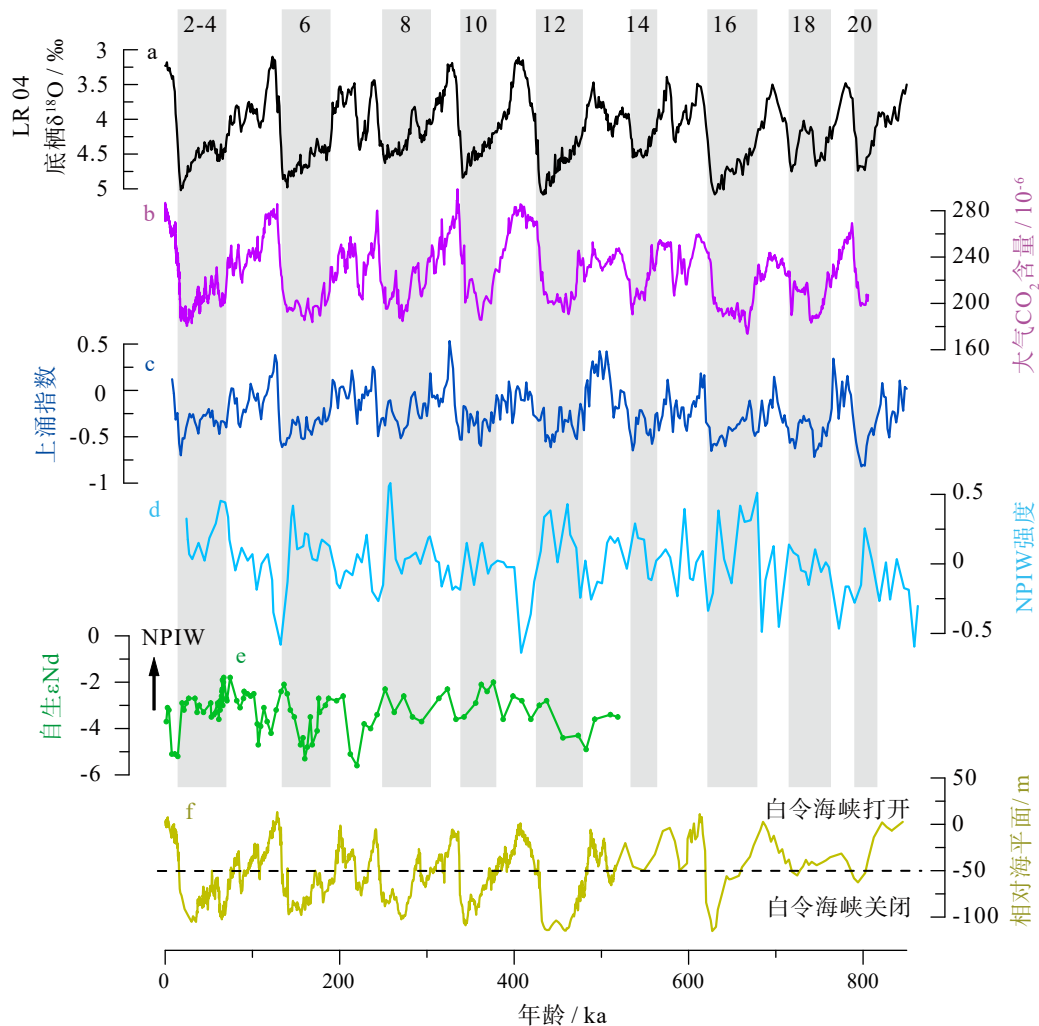


图4 北太平洋中层水(NPIW)演化及其气候响应(850 ka以来)

a. LR04 底栖 $\delta^{18}\text{O}$ ^[75]; b. 大气 CO_2 含量^[76]; c. U1343 站位太平洋深层水(PDW)上涌指数^[1]; d. NPIW 强度变化^[1]; e. 白令海 U1345 站位自生 ϵNd 记录^[73]; f. 相对海平面变化^[77-78], -50 m 虚线代表白令海峡现今深度。

Fig.4 The evolution of North Pacific Intermediate Water (NPIW) and its climatic responses

a. LR04 benthic foraminiferal $\delta^{18}\text{O}$ stack^[75]; b. Atmospheric CO_2 concentration^[76]; c. Upwelling index of Pacific Deep Water (PDW) from site U1343^[1]; d. NPIW intensity^[1]; e. Site U1345 authigenic ϵNd records from Bering Sea^[73]; f. Relative Sea Level^[77-78], the dotted line at -50 m represent modern Bering Strait depth.

海冰的扩张和白令海峡的关闭, 促进了 NPIW 的形成, 并抑制了 PDW 的上涌, 进而调节轨道尺度上大气-海洋间的 CO_2 交换^[1](图 4)。Jang 等^[73]重建了 U1345 站位 550 ka 以来的 ϵNd 变化, 并认为其可能与 NPIW 的形成有关(图 4e); 与北大西洋 ϵNd 结果对比后, 发现 200 ka 以来北大西洋-北太平洋跷跷板效应并不显著。同样, U1342 站位 1.2 Ma 以来 NPIW 的重建结果也表明其与北大西洋深层水(North Atlantic deep water, NADW)在轨道尺度上并不存在反相位关系, 从而质疑了北大西洋-北太平洋跷跷板理论在轨道尺度上的适用性^[74]。

在千年尺度上, 冷期白令海对 NPIW 的形成具有很大贡献, 甚至占据着主导作用^[66,79]。最新研究表明, 在 HS1(Hinrich Stadial 1)期间亚北极西北部深层水中白令海水团的贡献可达 36%~41%^[79]。亚北极东西太平洋多个钻孔有孔虫 ^{14}C 通风年龄结果显示在 HS1 和 YD(Younger Dryas)期间通风年龄降低, NPIW 加强, 其中在 HS1 期间 NPIW 通风可能达到 2500~3600 m 水深^[80], 而在 Bølling-Allerød 暖期则明显减弱^[67,81]。这一观点也在白令海氧化还原重建结果中得到了验证, 并认为与海冰形成有关^[82]。前人研究发现末次冰期以来 NPIW 通风与北大西洋径向翻转环流(Atlantic meridional overturning circulation, AMOC)之间的反相位变化趋势, 可能与白令海峡的关闭有关(图 4), 从而认为大西洋-太平洋之间存在跷跷板效应^[80,82]。模拟结果也显示出海盆间的这种联系, 可能和北大西洋与北太平洋之间的大气遥相关作用密切联系^[82]。Rae 等^[83]基于东北太平洋放射性碳和 B 同位素结果认为, NPIW 在 HS1 期间能够直接通风到深层, 并与 PDW 联通, 从而造成该时期大气 CO_2 的增加。该区域的 ϵNd 结果也支持了 HS1 和 YD 期间 NPIW 与 PDW 之间的强烈交换, 但 Du 等^[84]认为这是深水冲刷作用的增强, 而非 NPIW 的通风加深。还有一部分研究则认为 NPIW 虽然在 HS1 和 YD 期间有所加强, 但并未加强成为深层水^[85-87]。亚北极的氧化还原结果表明 NPIW 在 HS1 期间的通风仅局限在 1400 m 深度以上^[86]; 氧碳同位素证据也表明在 YD 时期其通风深度可能只达到 1200 m^[87]。Gong 等^[88]通过模拟认为 HS1 时期, 中深层之间的层化作用增加, 有利于北太平洋深海对 CO_2 的封存, 而非释放。目前, 由于多指标间的复杂性和局限性, 对于末次冰消期以来的 NPIW 通风深度认识还存在着争议, 这也使得北太平洋在千年尺度上对全球碳循环的影响尚不清楚。

2.4 太平洋深层水演化

由于现今北太平洋没有深层水的形成, PDW 是由北大西洋和南大洋形成的深水补给而成。南大洋底层水(AABW)沿着西部边界的深部海盆自南向北流动, 在北太平洋沿着陆坡上涌而形成 PDW, 随后向南回流, 并在南半球西风的吹拂下从亚南极海区上涌至表层, 从而成为深海碳储库泄露的出口^[89]。在晚第四纪以来的冰期旋回中, 大气 CO_2 浓度的变化达到约 100×10^{-6} ^[76]。前人研究表明, 深海是地球表层系统中最重要碳储库之一, 其碳储库是大气的六十倍之多^[90-91]。太平洋深水作为全球最大和最老的水团, 其在现今地球海洋大气系统中存储了大量 DIC, 在冰期甚至更大^[92-93]。因此, 认识 PDW 在过去的变化成为全球碳循环及其气候响应研究的重要课题。

前人的研究表明, 在冰期-间冰期旋回中, 太平洋深水环流发生了显著变化^[84,94-95]。其中, 冰期太平洋深水 $\delta^{13}\text{C}$ 明显负偏, 并且 $\delta^{13}\text{C}$ 最小值分布深度也表现出明显的下移^[68], 表明了冰期 PDW 碳储库的增加, 这也得到了深水通风记录的验证^[96-97]。由于有机质分解对 O_2 的消耗, 深海碳储库的增加会伴随着水体溶解氧的减少, 并产生 DIC 和 N、P 等营养盐物质。因此, 对相关产物的定量化重建, 可以用来反映深海碳储库的变化。ODP 882 站位氧化还原敏感元素指标表明亚北极太平洋深水水团的氧含量在冰期明显降低, 意味着深海碳储库的增加^[93]。这与赤道太平洋基于 B/Ca 重建的碳酸根离子浓度($[\text{CO}_3^{2-}]$)的结果一致, 冰期 $[\text{CO}_3^{2-}]$ 的降低, 意味着水体中富含更多的碳^[98]。而在间冰期, 北太平洋深部氧含量明显增加, 通风年龄减小, 表明深部通风速率的增加^[93,97]。这可能与间冰期北大西洋深水形成的重新启动有关, 并造成深海溶解 CO_2 向大气的转移^[99]。尽管有研究表明冰期 PDW 碳储库的增加与太平洋深水环流的减弱有关^[84,95,97], 但最近来自南大洋的 ϵNd 同位素证据表明, 冰期太平洋环流加快, 并认为碳储库的增加可能与其他机制更为相关(如生物泵效率增加或高纬海气交换的减弱)^[94]。同时, 东北太平洋的通风年龄结果并不支持冰期碳储库的增加^[100-101], 这也使得对于 PDW 的性质还需要进一步的研究。

2.5 北太平洋风尘记录

北太平洋风尘研究最早可以追溯到 1983 年美国密歇根大学 Janecek 和 Rea 两位教授的工作, 他们

通过提取北太平洋 GPC-3 钻孔中风尘堆积速率和粒度变化信号,重建了过去 70 Ma 以来北半球大气环流的演变历史^[102]。继此之后,借助于深海钻探项目 DSDP 86 航次获得的 576 和 578 两个钻孔, Janecek 教授又细化了北太平洋风尘在不同搬运距离上的差异,通过对比相近纬度上由远及近站位风尘堆积速率和粒度变化差异,他们发现风尘堆积速率和粒度随北太平洋搬运距离的增加呈指数下降,而非线性下降^[103]。过去 40 年以来,北太平洋风尘研究方面取得了极大的进展,高分辨率的海洋风尘沉积不仅在亚洲内陆古气候变化的研究中起到了重要作用,而且为地球气候系统中的海-陆耦合过程提供了深入的认识。

在构造尺度上,风尘的变化受到亚洲内陆干旱

化事件的影响,反映了新生代全球变冷和青藏高原抬升等过程。基于 IODP 346 航次的 U1430 站位的主微量元素, Anderson 等^[104]重建了日本海约 13 Ma 以来的风尘源区和通量的变化,并指示亚洲干旱化事件的阶梯式变化。然而,北太平洋风尘站位记录之间还存在着差异,与 ODP 885/886 所显示的风尘通量阶段性显著增加趋势不同, ODP 1208 站位记录表明 25 Ma 以来风尘通量呈逐渐增加的趋势^[105]。同样, ODP 576 和 LL44-GPC3 也没有像 ODP 885/886 在约 8~7 Ma 期间所显示出风尘通量增加的记录^[102-103,106]。尽管最近的深海锰结核研究认为该时期的微生物活动与风尘的增加有关,可能受到青藏高原东北部隆升所引起的亚洲干旱化事件的影响^[107],但造成这种记录上差异性的原因依然尚不清楚。

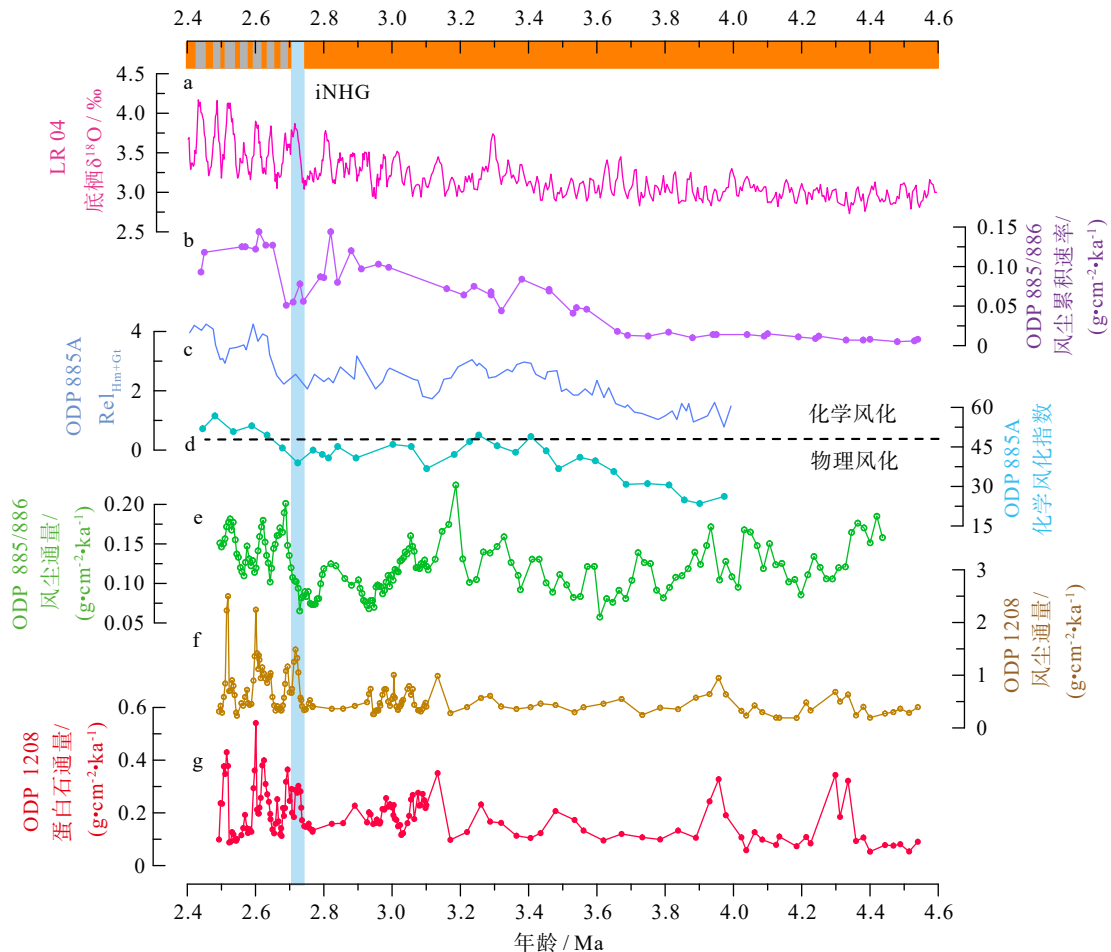


图5 北太平洋风尘通量记录对比

a. LR04 底栖 $\delta^{18}\text{O}$ ^[75], b. ODP 885/886 风尘累积速率^[106], c. ODP 885A 赤铁矿与针铁矿相对含量 ($\text{Rel}_{\text{Hm+Gt}}$)^[108], d. ODP 885A 化学风化指数 (CIA)^[108], e 和 f. ODP 885/886 和 ODP 1208 风尘通量^[110], g. ODP 1208 蛋白石通量^[110]。

Fig.5 The comparison of aeolian flux in North Pacific sedimentary cores

a. LR04 benthic foraminiferal $\delta^{18}\text{O}$ stack^[75], b. Eolian dust mass accumulation rate from ODP 885/886^[106], c. Relative concentration of hematite and goethite ($\text{Rel}_{\text{Hm+Gt}}$) from ODP 885A^[108], d. Chemical index of alteration (CIA) from ODP 885A^[108], e and f. dust flux of ODP 885/886 and ODP 1208, respectively^[110], g. Opal flux of ODP 1208^[110].

Zhang 等^[108]通过磁学参数重建了 ODP 885A 站位 4 Ma 以来的风尘通量变化, 并与化学风化指数进行对比; 结果表明在 iNHG 时期, 风尘通量的增加伴随着源区化学风化的增强(图 5c、d), 从而认为在全球变冷条件下, 风尘源区变的间接性湿润而非干旱。同样, 模拟结果也认为需要谨慎对待风尘通量在亚洲内陆干旱化上的解释^[109]。除了风尘源区的变化外, 西风带的强度和其位置的纬向摆动也深刻影响着北太平洋的风尘记录。基于多指标参数(包括陆源⁴He、Ti 等), Abell 等^[110]重建了 4.6 Ma 以来北太平洋不同纬度钻孔的风尘记录并进行对比(图 5e、f)。在 iNHG 时期, ODP 1208 站位的风尘通量的增加远远高于 ODP 885/886 站位, 表明全球变冷时期, 西风带向低纬的移动; 这也影响到亚北极锋的改变, 使得高纬未完全利用的营养物质能够进入到中纬海区, 并造成该区域生产力的爆发^[110]。然而, 在更新世冰期旋回过程中, 这种西风带摆动造成的风尘通量的纬向变化, 表层环流的改变以及对海洋生物化学过程的影响, 人类对此还未有清晰的认识。

在轨道尺度上, 亚北极太平洋 ODP 882 站位高分辨率风尘记录结果与北太平洋中纬度海区的 Shatsky 和 Hess 隆起风尘通量记录表现较为一致, 都显示出冰期风尘通量相比间冰期有所增加。Serno 等^[111]认为这与亚北极夏季太阳辐射和高山冰盖变化引起的沙尘风暴及持续时间有关。同样来自 Shatsky 隆起的 1209 站位 Sr-Nd 同位素结果表明, “准风尘”组分(operationaly-defined eolian dust, ODED)实际上是亚洲风尘和火山灰的混合物, 并认为 ϵ Nd 暖期的高值和冷期的低值反映了过去 50 万年来风尘的演化^[112]。与源区干旱条件控制冰期/间冰期风尘释放的观点不同, McGee 等^[113]认为冰期经向温度梯度的增加促进了风尘源区高速风事件的强度和频率, 导致风尘通量的增加, 从而提出“风假说”来解释冰期/间冰期风尘通量的变化。同样, 西风带主轴位置可能也在冰期旋回中发生显著的变化。基于模拟和地质记录的证据表明, 在 LGM 期间西风带主轴位置相比今天明显南移, 从而影响北太平洋远端风尘沉积记录的变化^[114-116]。

目前北太平洋长期的风尘记录依旧较为缺乏, 且存在着一定的分歧。但由于海洋沉积物的连续性和区域对比性等优势, 未来基于大洋钻探开展的北太平洋风尘研究能够极大地丰富过去 20 年大陆环境钻探的成果, 并为解译亚洲内陆的气候变化提供重要的认识。同时通过海陆环境对比, 以及风尘输入对海洋生物地球化学和全球碳循环方面的研

究, 可以真正意义上实现对全球气候变化多圈层耦合的系统性研究。

2.6 北太平洋生产力变化机制

碳循环是轨道尺度地球气候系统内部重要的反馈过程, 冰期大气 CO_2 的降低, 能够进一步降低温室气体效应, 从而放大轨道辐射变化引起的气候降温。作为地球表层系统中重要的碳储库, 海洋对冰期旋回中大气 CO_2 变化具有深刻的影响^[117-118]。生物泵作为海洋固碳的重要机制, 通过海洋浮游植物的光合作用吸收大气 CO_2 , 转化成有机质颗粒进入深海。中纬度北太平洋受到寒冷、高生产力亚极区表层水和温暖、低生产力的副热带表层水的影响, 从亚热带环流到亚北极环流烯酮产量增加了 10 倍^[119]。据估算, 北太平洋每年可吸收大约 0.5 Pg C, 占到海洋总吸收 CO_2 的约 25%, 其中生物泵的速率和效率起到重要的作用^[120]。因此, 了解过去冰期旋回中海洋表层生产力变化及其控制机制, 对认识全球碳循环和气候变化具有重要的意义。

海洋层化作为亚北极太平洋生产力变化的主要控制因素, 已经在众多的记录中被证实^[4,14,121]。PDW 作为全球大洋最老的水体, 其内部蕴含了大量的 DIC 和硝酸盐、磷酸盐等营养物质, 温暖时期海洋层化的减弱, 能够促进水团之间垂直上的交换, 从而造成表层生产力的爆发。构造尺度上, ODP 882 和 ODP 885/886 站位记录到上新世以来的硅质生产力变化, 其中在 iNGH 时期表现出显著的降低趋势^[61,122-123]。该现象在南大洋的记录中也有发现, Sigman 等^[61]认为这可能是由于全球降温背景下, 极区海洋层化作用加强, 从而限制了深海营养盐向海洋表层的输送。然而, 近年来白令海的生产力记录却显示出完全不同的变化趋势, 在 iNHG 之后 (2.1~2.6 Ma) 生产力提高而非降低^[124-125]。Iwasaki 等^[124]认为这可能意味着该时期白令海陆架发生“铁泄露”。但由于大洋钻孔的缺乏, 对于 iNHG 时期亚北极太平洋生产力的变化及其机制仍然还不清楚。

在轨道尺度上, 北太平洋生产力重建结果表明不同区域存在着显著的差异^[126-129]。西北太平洋和白令海多指标重建的生产力记录都表现出冰期低、间冰期高的变化模式(图 6b、c), 海洋层化作用下的营养盐供应变化对该区域生产力的主导作用被广泛接受^[2,130-131]。除此之外, 间冰期高海平面条件下, 来自白令海陆架沉积物的铁输入也极大地刺激了该时期表层初级生产力的提高, 并在沉积物中形成

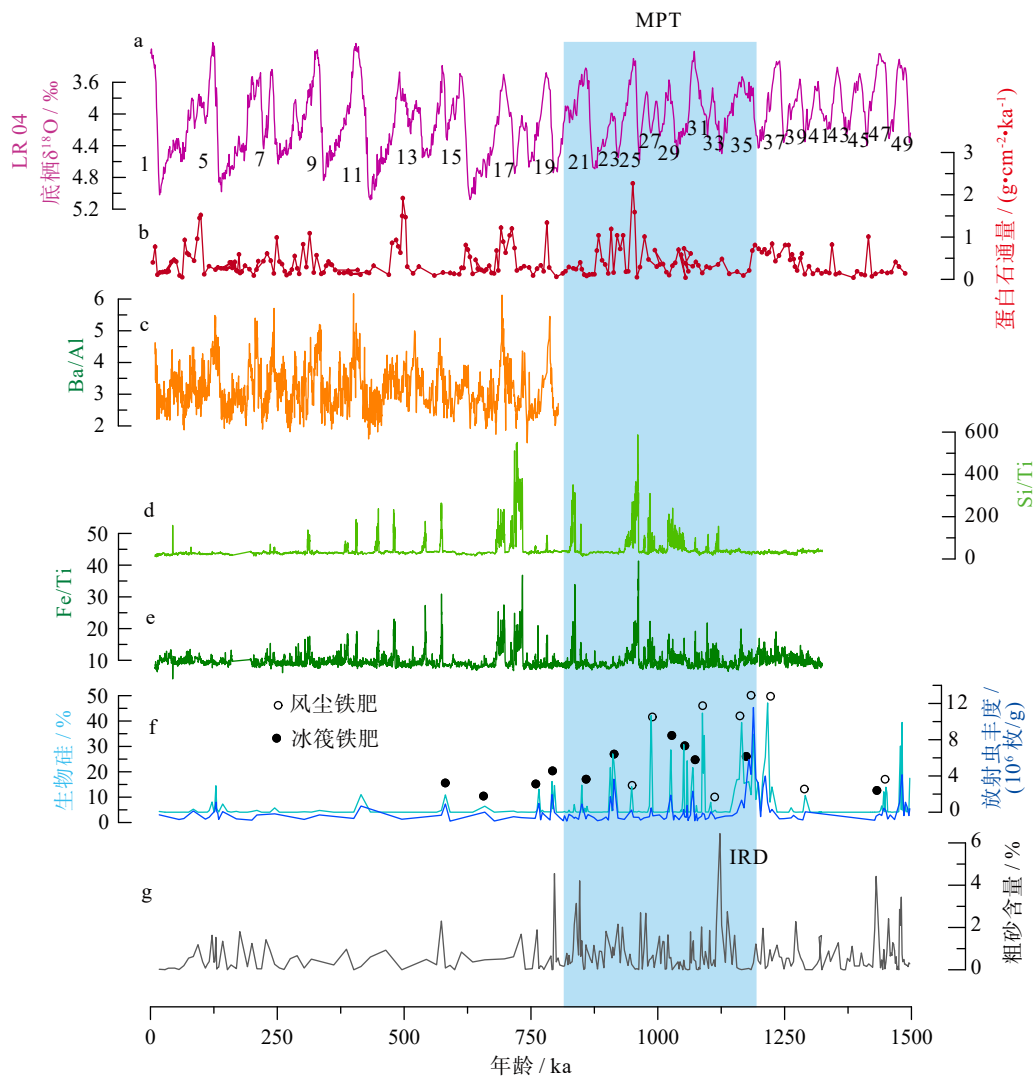


图6 北太平洋生产力变化模式

a. LR04 底栖 $\delta^{18}\text{O}$ [75], b. ODP 882 蛋白石通量 [61], c. ODP 882 Ba/Al [126], d. U1342 Si/Ti 比值 [132], e. U1342 Fe/Ti 比值 [132], f. U1417 生物硅含量 (蓝色) 和放射虫丰度 (天蓝色) [134], g. 粗砂含量 [134]。

Fig.6 The Patterns of productivity change in the North Pacific

a. LR04 benthic foraminiferal $\delta^{18}\text{O}$ stack [75], b. Opal flux from ODP 882 [61], c. Ba/Al records from ODP 882 [126], d. Si/Ti records from U1342 [132], e. Fe/Ti records from U1342 [132], f. Biogenic silica (blue line) and diatom concentration (sky blue line) from U1417, respectively [134], g. Coarse sand content from U1417 [134].

缺氧纹层(图6d、e)[132]。作为北太平洋重要的铁输入来源,风尘的铁肥效应已经在现代观测和实验中被证实[133]。然而,在北太平洋能够支持生产力与风尘输入之间关系的古海洋记录却很少[134],特别是在西北太平洋和白令海,冰期风尘通量的增加并未引起生产力的爆发[130,132,135]。相似的情形也发生在南大洋南极区,最近25个冰期旋回以来的记录也表明了风尘与生产力之间的反相位关系,进一步验证了海洋分层对高纬海区生产力的控制作用[136-137]。而中纬度太平洋重建的生产力结果显示冰期的高生产力与风尘通量的增加一致,表明风尘的铁肥效应在中纬度太平洋更为有效[128-130]。同时,冰期西风

带的南移可能也影响到北太平洋亚北极锋面向中纬度太平洋的移动,从而将高纬未利用的营养盐传输至贫营养的中纬度海区,并造成冰期中纬度生产力的增加。然而,目前研究还主要依靠单个钻孔,纬向上连续的多钻孔研究较少,这也限制了对北太平洋表层环流锋面位置变化及其对生产力影响的深入研究。另外,对于东北太平洋,科迪勒拉冰盖的动态变化对太平洋海盆的沉积物输送模式及海洋环境具有深远的影响。U1417 站位基于生物硅含量重建了0.5~1.5 Ma 以来生产力变化,结果表明该区域存在着两种不同的铁输入机制(冰筏碎屑和风尘),并与当地冰盖范围的变化密切相关,而非冰

期-间冰期气候变化(图 6f、g)^[134]。沉积物铁含量分析表明,冰川来源的铁输入能够为东北太平洋提供更多的生物可利用铁^[138],这为北太平洋的生产力变化及机制的研究提供了一个新的视角。

末次冰消期以来,生产力的变化与 NPIW 的形成紧密相关。其中在 Bølling-Allerød 暖期,北太平洋出现了显著的生产力峰值和广泛的缺氧记录。指标记录显示,该时期深海通风年龄降低,中深层水的性质也更为一致,表明深水上涌的增强,并为表层提供了充足的养分。但该时期并没有显示任何来源的铁输入过程,因此铁肥作用被认为在亚北极太平洋最多起到次级作用^[13]。虽然北太平洋在 Bølling-Allerød 暖期深层水能够与大气发生强烈的海气交换,但冰芯记录中的大气 CO₂ 浓度却没有出现明显的上升。有研究推测,这可能与该时期的高生产力有关,即生物泵的固碳效率高于海气交换的碳释放效率^[80]。但最近 B 同位素重建的大气 CO₂ 分压(*p*CO₂)结果显示北太平洋在 Bølling-Allerød 暖期对 CO₂ 的释放,并认为该过程可能抵消了其他海区对 CO₂ 的吸收^[4]。除此之外,在 Heinrich stadial 1(HS1),东北太平洋的 B 同位素结果却表明,北太平洋中层水的通风深度加深,并可能与富碳的 PDW 联通,从而造成 HS1 时期大气 CO₂ 快速增加约 30×10⁻⁶^[83]。生产力在 Bølling-Allerød 暖期的峰值也被重新解释为分层条件下,光强度的增加和营养跃层的变浅对生产力的贡献。

3 展望与思考

太平洋作为全球最大的海洋,其内部环境微小的变化便能引起地球气候系统的改变。这种变化是多圈层、多系统耦合的结果,涉及到大气环流、洋流和冰盖等重要过程,对全球气候和碳循环具有深远的影响(图 7)。包括以下几个方面:

(1) 高低纬间热量传输及其气候响应。不同于以往的北半球高纬地区驱动全球气候,近年来,全球气候通过季风调节的“低纬驱动假说”也逐渐被重视起来。尽管有记录表明北太平洋高纬冰盖的排放与亚洲季风可能存在着紧密的联系^[139],暗示了低纬水汽和热量的驱动过程,但目前对于高低纬联系过程的记录还比较少。因此,未来通过北太平洋海区进一步探讨亚洲季风和西边界流的时空演变特征,将可能有助于为全球气候的低纬驱动机制提供关键的证据。

(2) NPIW 形成演化及其与 PDW 之间的交换。

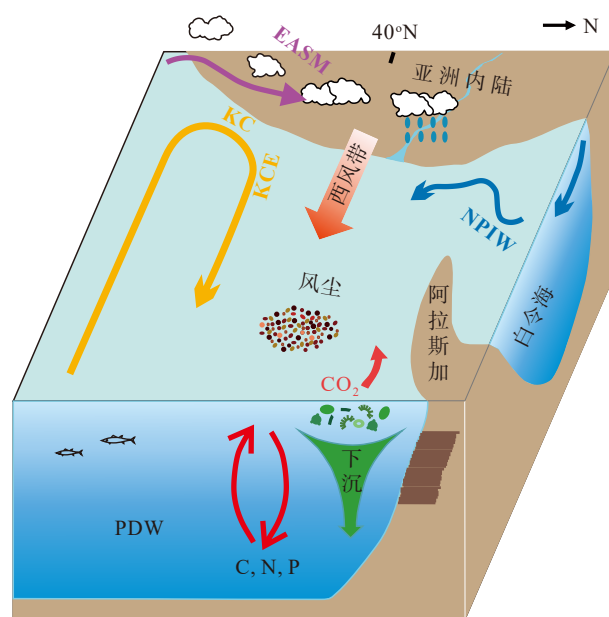


图 7 北太平洋多圈层耦合过程示意图

EASM: 东亚夏季季风, KC: 黑潮, KCE: 黑潮延伸流, NPIW: 北太平洋中层水, PDW: 太平洋深层水。

Fig. 7 Diagram of multilayer coupling processes in the North Pacific Ocean

EASM: East Asian Summer Monsoon, KC: Kuroshio Current, KCE: Kuroshio Current Extension, NPIW: North Pacific Intermediate Water, PDW: Pacific deep water.

目前对于 NPIW 通风深度及其与 PDW 之间的联系,依然还存在着很大的争论,特别是在特殊的气候变化期间, NPIW 能否形成深层水(如上新世期间)。因此,还需要多指标记录与气候模拟相结合,来进一步加深对 NPIW 通风深度、分布范围和水团性质及其影响机制等方面的研究。

(3) 北太平洋风尘通量变化及其对亚洲内陆气候的反映。风尘在搬运的过程中受到源区环境变化、搬运距离和大气环流强度的影响,从而造成粉尘通量、粒度在时空上的异质性。然而,目前纬向上风尘通量的研究还比较少,未来相关方面的研究有利于了解西风带在不同气候状态下的摆动及其环境效应。同时,风尘通量对于源区干旱化的解释也受到了一定的挑战,在未来也需要与地球化学指标进行更多的结合,来更准确地评估亚洲内陆的环境变化。

(4) 北太平洋生产力变化模式区域性差异及驱动机制。除了水团垂直交换作用下、营养物质的调控作用,北太平洋生产力也明显受到铁肥效应的影响,其中铁输入的来源至少包括 3 种: 陆架沉积物、风尘、冰筏碎屑等。但目前关于铁在搬运及进入海洋参与生物地球化学循环中的变化还尚不清楚,因

此,有必要加强现代铁循环过程的物理和化学行为研究,特别是在参与生物地球化学循环中的变化。另一方面,通过铁同位素等手段,来区分不同来源铁及其对海洋生产力的贡献。

大洋钻探能够提供不同时间分辨率以及连续的长时间序列的海洋沉积物,从而得以重建地质历史时期地球各圈层之间的变化和相互作用,极大地推动了地球系统科学的发展。未来在北太平洋开展相应的大洋钻探研究,对于解决北太平洋长远的气候演化、地球多圈层的耦合过程以及构造与气候之间的联系具有十分重要的意义。其中皇帝海山链是北太平洋少有的可以开展大洋钻探研究的理想靶区。这主要是由于北太平洋海域平均水深为5000~6000 m,基本位于碳酸盐补偿深度(carbonate compensation depth, CCD)以下,很难获得理想样品来开展气候变化的研究。而皇帝海山链是由一系列在板块运动和热点作用下形成的新生代盾状火山组成,该区域的平均水深为2000~3000 m,均在CCD以上,保存了大量的钙质生物化石信息,为北太平洋古海洋与古气候的研究提供了可行性。此外,皇帝海山链近南北向延伸2000多千米,横跨北太平洋中高纬度(20°~50°N)。该区域也基本覆盖了西风带活动区以及北太平洋亚北极环流和亚热带环流锋面的位置。因此,未来在皇帝海山链开展大洋钻探计划,对北太平洋多学科、多圈层的综合研究具有重要的意义。一方面,这对于加深不同环境状态下西风带纬向摆动的响应,以及风尘通量变化对海洋生物化学循环过程的影响都具有重要的推动作用。另一方面,作为高-低纬热量、水汽传输过程的重要场所,该区域的研究可能为全球气候的低纬驱动机制提供了关键的证据,这对深入认识过去地球气候变化和预测未来气候环境都有着深远的意义。

参考文献 (References)

- [1] Worne S, Kender S, Swann G E A, et al. Coupled climate and subarctic Pacific nutrient upwelling over the last 850,000 years [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2019, 522: 87-97.
- [2] Jaccard S L, Haug G H, Sigman D M, et al. Glacial/interglacial changes in subarctic north pacific stratification [J]. *Science*, 2005, 308(5724): 1003-1006.
- [3] Takahashi K, Ravelo A, Alvarez-Zarikian C. Pliocene-Pleistocene paleoceanography and climate history of the Bering Sea [R]. Scientific Prospectus, IODP, 323, 2009: 3-4, doi: 10.2204/iodp.sp.323.2009.
- [4] Gray W R, Rae J W B, Wills R C J, et al. Deglacial upwelling, productivity and CO₂ outgassing in the North Pacific Ocean [J]. *Nature Geoscience*, 2018, 11(5): 340-344.
- [5] Paulmier A, Ruiz-Pino D. Oxygen minimum zones (OMZs) in the modern ocean [J]. *Progress in Oceanography*, 2009, 80(3-4): 113-128.
- [6] Schmidt S, Stramma L, Visbeck M. Decline in global oceanic oxygen content during the past five decades [J]. *Nature*, 2017, 542(7641): 335-339.
- [7] Deutsch C, Brix H, Ito T, et al. Climate-forced variability of ocean hypoxia [J]. *Science*, 2011, 333(6040): 336-339.
- [8] Shao Y P, Wyrwoll K H, Chappell A, et al. Dust cycle: An emerging core theme in Earth system science [J]. *Aeolian Research*, 2011, 2(4): 181-204.
- [9] Forster P, Ramaswamy V, Artaxo P, et al. Changes in atmospheric constituents and in radiative forcing [C]//Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2007: 129-234.
- [10] Martin J H. Glacial-interglacial CO₂ change: The iron hypothesis [J]. *Paleoceanography*, 1990, 5(1): 1-13.
- [11] Mitchell B G, Brody E A, Holm-Hansen O, et al. Light limitation of phytoplankton biomass and macronutrient utilization in the Southern Ocean [J]. *Limnology and Oceanography*, 1991, 36(8): 1662-1677.
- [12] Li D W, Zheng L W, Jaccard S L, et al. Millennial-scale ocean dynamics controlled export productivity in the subtropical North Pacific [J]. *Geology*, 2017, 45(7): 651-654.
- [13] Lam P J, Robinson L F, Blusztajn J, et al. Transient stratification as the cause of the North Pacific productivity spike during deglaciation [J]. *Nature Geoscience*, 2013, 6(8): 622-626.
- [14] Schlitzer R. Ocean data view [EB/OL]. 2022(2022-04-04). <https://odv.awi.de>.
- [15] Ogi M, Tachibana Y. Influence of the annual Arctic Oscillation on the negative correlation between Okhotsk Sea ice and Amur River discharge [J]. *Geophysical Research Letters*, 2006, 33(8): L08709.
- [16] Shcherbina A Y, Talley L D, Rudnick D L. Direct observations of North Pacific ventilation: Brine rejection in the Okhotsk Sea [J]. *Science*, 2003, 302(5652): 1952-1955.
- [17] Emile-Geay J, Cane M A, Naik N, et al. Warren revisited: Atmospheric freshwater fluxes and "Why is no deep water formed in the North Pacific" [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2003, 108(C6): 3178.
- [18] Wang P X, Wang B, Cheng H, et al. The global monsoon across time scales: Mechanisms and outstanding issues [J]. *Earth-Science Reviews*, 2017, 174: 84-121.
- [19] Maher B A, Thompson R. Oxygen isotopes from Chinese caves: records not of monsoon rainfall but of circulation regime [J]. *Journal of Quaternary Science*, 2012, 27(6): 615-624.
- [20] Parker S E, Harrison S P, Comas-Bru L, et al. A data-model approach to interpreting speleothem oxygen isotope records from monsoon regions [J]. *Climate of the Past*, 2021, 17(3): 1119-1138.
- [21] Caley T, Roche D M, Renssen H. Orbital Asian summer monsoon dy-

- namics revealed using an isotope-enabled global climate model [J]. *Nature Communications*, 2014, 5: 5371.
- [22] Liu J B, Chen J H, Zhang X J, et al. Holocene East Asian summer monsoon records in northern China and their inconsistency with Chinese stalagmite $\delta^{18}\text{O}$ records [J]. *Earth-Science Reviews*, 2015, 148: 194-208.
- [23] Rao Z G, Jia G D, Li Y X, et al. Asynchronous evolution of the isotopic composition and amount of precipitation in north China during the Holocene revealed by a record of compound-specific carbon and hydrogen isotopes of long-chain *n*-alkanes from an alpine lake [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2016, 446: 68-76.
- [24] Cheng H, Edwards R L, Sinha A, et al. The Asian monsoon over the past 640, 000 years and ice age terminations [J]. *Nature*, 2016, 534(7609): 640-646.
- [25] Cheng H, Zhang H W, Cai Y J, et al. Orbital-scale Asian summer monsoon variations: Paradox and exploration [J]. *Science China Earth Sciences*, 2021, 64(4): 529-544.
- [26] Zhang H W, Zhang X, Cai Y J, et al. A data-model comparison pinpoints Holocene spatiotemporal pattern of East Asian summer monsoon [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2021, 261: 106911.
- [27] Beck J W, Zhou W J, Li C, et al. A 550, 000-year record of East Asian monsoon rainfall from ^{10}Be in loess [J]. *Science*, 2018, 360(6391): 877-881.
- [28] Sun Y B, Kutzbach J, An Z S, et al. Astronomical and glacial forcing of East Asian summer monsoon variability [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2015, 115: 132-142.
- [29] Hao Q Z, Wang L, Oldfield F, et al. Delayed build-up of Arctic ice sheets during 400, 000-year minima in insolation variability [J]. *Nature*, 2012, 490(7420): 393-396.
- [30] Clemens S C, Holbourn A, Kubota Y, et al. Precession-band variance missing from East Asian monsoon runoff [J]. *Nature Communications*, 2018, 9(1): 3364.
- [31] Zhao D B, Wan S M, Lu Z Y, et al. Response of heterogeneous rainfall variability in East Asia to Hadley circulation reorganization during the late Quaternary [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2020, 247: 106562.
- [32] Igarashi Y, Oba T. Fluctuations in the East Asian monsoon over the last 144ka in the northwest Pacific based on a high-resolution pollen analysis of IMAGES core MD01-2421 [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2006, 25(13-14): 1447-1459.
- [33] Morley J J, Heusser L E. Role of orbital forcing in East Asian monsoon climates during the last 350 kyr: evidence from terrestrial and marine climate proxies from core RC14 - 99 [J]. *Paleoceanography*, 1997, 12(3): 483-493.
- [34] Thomas E K, Clemens S C, Prell W L, et al. Temperature and leaf wax $\delta^2\text{H}$ records demonstrate seasonal and regional controls on Asian monsoon proxies [J]. *Geology*, 2014, 42(12): 1075-1078.
- [35] Kong X H, Zhou W J, Beck J W, et al. Loess magnetic susceptibility flux: a new proxy of East Asian monsoon precipitation [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2020, 201: 104489.
- [36] Sun Y B, Wang T, Yin Q Z, et al. A review of orbital-scale monsoon variability and dynamics in East Asia during the Quaternary [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2022, 288: 107593.
- [37] Gu Z Y, Lal D, Liu T S, et al. Five million year ^{10}Be record in Chinese loess and red-clay: climate and weathering relationships [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1996, 144(1-2): 273-287.
- [38] Sun Y B, An Z S, Clemens S C, et al. Seven million years of wind and precipitation variability on the Chinese Loess Plateau [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2010, 297(3-4): 525-535.
- [39] Dai G W, Zhang Z S, Otterå O H, et al. A modeling study of the tri-pole pattern of East China precipitation over the past 425 ka [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2021, 126(7): e2020JD033513.
- [40] 陈大可, 连涛. 厄尔尼诺-南方涛动研究新进展 [J]. *科学通报*, 2020, 65(35): 4001-4003. [CHEN Dake, LIAN Tao. Frontier of El Niño-Southern oscillation research [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2020, 65(35): 4001-4003.]
- [41] Hu D X, Wu L X, Cai W J, et al. Pacific western boundary currents and their roles in climate [J]. *Nature*, 2015, 522(7556): 299-308.
- [42] Navarra G G, Di Lorenzo E. Poleward shift and intensified variability of Kuroshio-Oyashio extension and North Pacific Transition Zone under climate change [J]. *Climate Dynamics*, 2021, 56(7-8): 2469-2486.
- [43] Wang L, Li T, Zhou T J. Intraseasonal SST variability and air-sea interaction over the Kuroshio Extension region during boreal summer [J]. *Journal of Climate*, 2012, 25(5): 1619-1634.
- [44] Tittensor D P, Mora C, Jetz W, et al. Global patterns and predictors of marine biodiversity across taxa [J]. *Nature*, 2010, 466(7310): 1098-1101.
- [45] Noto M, Yasuda I. Population decline of the Japanese sardine, *Sardinops melanostictus*, in relation to sea surface temperature in the Kuroshio Extension [J]. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 1999, 56(6): 973-983.
- [46] Zhang Y, Zhang Z G, Chen D K, et al. Strengthening of the Kuroshio current by intensifying tropical cyclones [J]. *Science*, 2020, 368(6494): 988-993.
- [47] Wu L X, Cai W J, Zhang L P, et al. Enhanced warming over the global subtropical western boundary currents [J]. *Nature Climate Change*, 2012, 2(3): 161-166.
- [48] Vats N, Mishra S, Singh R K, et al. Paleocceanographic changes in the East China Sea during the last~400 kyr reconstructed using planktic foraminifera [J]. *Global and Planetary Change*, 2020, 189: 103173.
- [49] Lam A R, Leckie R M. Subtropical to temperate late Neogene to Quaternary planktic foraminiferal biostratigraphy across the Kuroshio Current Extension, Shatsky Rise, northwest Pacific Ocean [J]. *PLoS One*, 2020, 15(7): e0234351.
- [50] Gallagher S J, Kitamura A, Iryu Y, et al. The Pliocene to recent history of the Kuroshio and Tsushima Currents: a multi-proxy approach [J]. *Progress in Earth and Planetary Science*, 2015, 2(1): 17.
- [51] 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): PA1206.
- [52] Lam A R, MacLeod K G, Schilling S H, et al. Pliocene to earliest

- pleistocene (5-2.5 Ma) reconstruction of the Kuroshio current extension reveals a dynamic current [J]. *Paleoceanography and Paleoclimatology*, 2021, 36 (9): e2021PA004318.
- [53] LaRiviere J P, Ravelo A C, Crimmins A, et al. Late Miocene decoupling of oceanic warmth and atmospheric carbon dioxide forcing [J]. *Nature*, 2012, 486 (7401): 97-100.
- [54] Venti N L, Billups K, Herbert T D. Increased sensitivity of the Pliocene-Pleistocene northwest Pacific to obliquity forcing [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2013, 384: 121-131.
- [55] Rakestraw N W. The oceans: Their physics, chemistry, and general biology (Sverdrup, H. U.; Johnson, Martin W.; Fleming, Richard H.) [J]. *Journal of Chemical Education*, 1943, 20 (10): 517.
- [56] Talley L D. An Okhotsk Sea water anomaly: implications for ventilation in the North Pacific [J]. *Deep Sea Research Part A. Oceanographic Research Papers*, 1991, 38: S171-S190.
- [57] Yasuda I, Kouketsu S, Katsumata K, et al. Influence of Okhotsk sea intermediate water on the Oyashio and North Pacific intermediate water [J]. *Journal of Geophysical Research:Oceans*, 2002, 107 (C12): 3237.
- [58] You Y Z, Sugiharara N, Fukasawa M, et al. Roles of the Okhotsk sea and gulf of Alaska in forming the north Pacific intermediate water [J]. *Journal of Geophysical Research:Oceans*, 2000, 105 (C2): 3253-3280.
- [59] You Y Z. Implications of cabbeling on the formation and transformation mechanism of North Pacific Intermediate Water [J]. *Journal of Geophysical Research:Oceans*, 2003, 108 (C5): 3134.
- [60] Talley L D. Distribution and formation of North Pacific intermediate water [J]. *Journal of Physical Oceanography*, 1993, 23 (3): 517-537.
- [61] Sigman D M, Jaccard S L, Haug G H. Polar ocean stratification in a cold climate [J]. *Nature*, 2004, 428 (6978): 59-63.
- [62] Haug G H, Sigman D M. Polar twins [J]. *Nature Geoscience*, 2009, 2 (2): 91-92.
- [63] Studer A S, Martínez-García A, Jaccard S L, et al. Enhanced stratification and seasonality in the Subarctic Pacific upon Northern Hemisphere Glaciation-New evidence from diatom-bound nitrogen isotopes, alkenones and archaeal tetraethers [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2012, 351-352: 84-94.
- [64] Burls N J, Fedorov A V, Sigman D M, et al. Active Pacific meridional overturning circulation (PMOC) during the warm Pliocene [J]. *Science Advances*, 2017, 3 (9): e1700156.
- [65] Kender S, Ravelo A C, Worne S, et al. Closure of the Bering strait caused Mid-Pleistocene transition cooling [J]. *Nature Communications*, 2018, 9 (1): 5386.
- [66] Cook M S, Ravelo A C, Mix A, et al. Tracing subarctic Pacific water masses with benthic foraminiferal stable isotopes during the LGM and late Pleistocene [J]. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2016, 125-126: 84-95.
- [67] Sagawa T, Ikehara K. Intermediate water ventilation change in the subarctic northwest Pacific during the last deglaciation [J]. *Geophysical Research Letters*, 2008, 35 (24): L24702.
- [68] 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.
- [69] Keigwin L D. Glacial-age hydrography of the far northwest Pacific Ocean [J]. *Paleoceanography*, 1998, 13 (4): 323-339.
- [70] Keigwin L D. Late Pleistocene-Holocene paleoceanography and ventilation of the Gulf of California [J]. *Journal of Oceanography*, 2002, 58 (2): 421-432.
- [71] Ohkushi K, 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.
- [72] 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.
- [73] Jang K, Huh Y, Han Y. Authigenic Nd isotope record of North Pacific Intermediate Water formation and boundary exchange on the Bering Slope [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2017, 156: 150-163.
- [74] Knudson K P, Ravelo A C. North Pacific intermediate water circulation enhanced by the closure of the Bering Strait [J]. *Paleoceanography*, 2015, 30 (10): 1287-1304.
- [75] Lisiecki L E, Raymo M E. A Pliocene-Pleistocene stack of 57 globally distributed benthic $\delta^{18}\text{O}$ records [J]. *Paleoceanography*, 2005, 20 (1): PA1003.
- [76] Bereiter B, Lüthi D, Siegrist M, et al. Mode change of millennial CO_2 variability during the last glacial cycle associated with a bipolar marine carbon seesaw [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2012, 109 (25): 9755-9760.
- [77] Rohling E J, Grant K, Bolshaw M, et al. Antarctic temperature and global sea level closely coupled over the past five glacial cycles [J]. *Nature Geoscience*, 2009, 2 (7): 500-504.
- [78] Sosdian S, Rosenthal Y. Deep-sea temperature and ice volume changes across the Pliocene-Pleistocene climate transitions [J]. *Science*, 2009, 325 (5938): 306-310.
- [79] Horikawa K, Kozaka Y, Okazaki Y, et al. Neodymium isotope records from the Northwestern Pacific: Implication for deepwater ventilation at Heinrich Stadial 1 [J]. *Paleoceanography and Paleoclimatology*, 2021, 36 (10): e2021PA004312.
- [80] Okazaki Y, Timmermann A, Menviel L, et al. Deepwater formation in the North Pacific during the Last Glacial termination [J]. *Science*, 2010, 329 (5988): 200-204.
- [81] Kim S, Khim B K, Ikehara K, et al. Millennial-scale changes of surface and bottom water conditions in the northwestern Pacific during the last deglaciation [J]. *Global and Planetary Change*, 2017, 154: 33-43.
- [82] Detlef H, Sosdian S M, Belt S T, et al. Late quaternary sea-ice and sedimentary redox conditions in the eastern Bering Sea-implications for ventilation of the mid-depth North Pacific and an Atlantic-Pacific seesaw mechanism [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2020, 248: 106549.
- [83] Rae J W B, Sarnthein M, Foster G L, et al. Deep water formation in the North Pacific and deglacial CO_2 rise [J]. *Paleoceanography*, 2014, 29 (6): 645-667.
- [84] Du J H, Haley B A, Mix A C, et al. Flushing of the deep Pacific

- Ocean and the deglacial rise of atmospheric CO₂ concentrations [J]. *Nature Geoscience*, 2018, 11 (10): 749-755.
- [85] Max L, Lembke-Jene L, Riethdorf J R, et al. Pulses of enhanced North Pacific Intermediate Water ventilation from the Okhotsk Sea and Bering Sea during the last deglaciation [J]. *Climate of the Past*, 2014, 10 (2): 591-605.
- [86] Jaccard S L, Galbraith E D. Direct ventilation of the North Pacific did not reach the deep ocean during the last deglaciation [J]. *Geophysical Research Letters*, 2013, 40 (1): 199-203.
- [87] Ohkushi K, Hara N, Ikehara M, et al. Intensification of North Pacific intermediate water ventilation during the Younger Dryas [J]. *Geo-Marine Letters*, 2016, 36 (5): 353-360.
- [88] Gong X, Lembke-Jene L, Lohmann G, et al. Enhanced North Pacific deep-ocean stratification by stronger intermediate water formation during Heinrich Stadial 1 [J]. *Nature Communications*, 2019, 10 (1): 656.
- [89] 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.
- [90] Houghton R A. Balancing the global carbon budget [J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2007, 35: 313-347.
- [91] Zeebe R E. History of seawater carbonate chemistry, atmospheric CO₂, and ocean acidification [J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2012, 40: 141-165.
- [92] Jacobel A W, Anderson R F, Jaccard S L, et al. Deep Pacific storage of respired carbon during the last ice age: perspectives from bottom water oxygen reconstructions [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2020, 230: 106065.
- [93] Jaccard S L, Galbraith E D, Sigman D M, et al. Subarctic Pacific evidence for a glacial deepening of the oceanic respired carbon pool [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2009, 277 (1-2): 156-165.
- [94] Hu R, Piotrowski A M. Neodymium isotope evidence for glacial-interglacial variability of deepwater transit time in the Pacific Ocean [J]. *Nature Communications*, 2018, 9 (1): 4709.
- [95] Wan S, Jian Z M, Gong X, et al. Deep water [CO₃²⁻] and circulation in the south China sea over the last glacial cycle [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2020, 243: 106499.
- [96] de la Fuente M, Skinner L, Calvo E, et al. Increased reservoir ages and poorly ventilated deep waters inferred in the glacial Eastern Equatorial Pacific [J]. *Nature Communications*, 2015, 6: 7420.
- [97] Skinner L C, Primeau F, Freeman E, et al. Radiocarbon constraints on the glacial ocean circulation and its impact on atmospheric CO₂ [J]. *Nature Communications*, 2017, 8: 16010.
- [98] Yu J M, Anderson R F, Jin Z D, et al. Responses of the deep ocean carbonate system to carbon reorganization during the Last Glacial-interglacial cycle [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2013, 76: 39-52.
- [99] Jaccard S L, Galbraith E D. Large climate-driven changes of oceanic oxygen concentrations during the last deglaciation [J]. *Nature Geoscience*, 2012, 5 (2): 151-156.
- [100] Lund D C. Deep Pacific ventilation ages during the last deglaciation: Evaluating the influence of diffusive mixing and source region reservoir age [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2013, 381: 52-62.
- [101] Lund D C, Mix A C, Southon J. Increased ventilation age of the deep northeast Pacific Ocean during the last deglaciation [J]. *Nature Geoscience*, 2011, 4 (11): 771-774.
- [102] Janecek T R, Rea D K. Eolian deposition in the northeast Pacific Ocean: Cenozoic history of atmospheric circulation [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1983, 94 (6): 730-738.
- [103] Janecek T R. Eolian sedimentation in the northwest Pacific Ocean: A preliminary examination of the data from Deep Sea Drilling Project sites 576 and 578 [R]. Initial Reports, DSDP, 86, 1985: 589-603. doi: 10.2973/dsdp.proc.86.126.1985.
- [104] Anderson C H, Murray R W, Dunlea A G, et al. Aeolian delivery to Ulleung Basin, Korea (Japan Sea), during development of the East Asian Monsoon through the last 12 Ma [J]. *Geological Magazine*, 2020, 157 (5): 806-817.
- [105] Zhang W F, Chen J, Ji J F, et al. Evolving flux of Asian dust in the North Pacific Ocean since the late Oligocene [J]. *Aeolian Research*, 2016, 23: 11-20.
- [106] Rea D K, Snoeckx H, Joseph L H. Late Cenozoic Eolian deposition in the North Pacific: Asian drying, Tibetan uplift, and cooling of the northern hemisphere [J]. *Paleoceanography*, 1998, 13 (3): 215-224.
- [107] Jiang X D, Zhao X, Zhao X Y, et al. Abyssal manganese nodule recording of global cooling and Tibetan Plateau uplift impacts on Asian aridification [J]. *Geophysical Research Letters*, 2022, 49 (3): e2021GL096624.
- [108] Zhang Q, Liu Q S, Roberts A P, et al. Mechanism for enhanced eolian dust flux recorded in North Pacific Ocean sediments since 4.0 Ma: aridity or humidity at dust source areas in the Asian interior? [J]. *Geology*, 2020, 48 (1): 77-81.
- [109] Shi Z G, Liu X D, An Z S, et al. Simulated variations of eolian dust from inner Asian deserts at the mid-Pliocene, last glacial maximum, and present day: contributions from the regional tectonic uplift and global climate change [J]. *Climate Dynamics*, 2011, 37 (11-12): 2289-2301.
- [110] Abell J T, Winckler G, Anderson R F, et al. Poleward and weakened westerlies during Pliocene warmth [J]. *Nature*, 2021, 589 (7840): 70-75.
- [111] Serno S, Winckler G, Anderson R F, et al. Change in dust seasonality as the primary driver for orbital-scale dust storm variability in East Asia [J]. *Geophysical Research Letters*, 2017, 44 (8): 3796-3805.
- [112] Zhang W F, Li G J, Chen J. The application of Neodymium isotope as a chronostratigraphic tool in North Pacific sediments [J]. *Geological Magazine*, 2020, 157 (5): 768-776.
- [113] McGee D, Broecker W S, Winckler G. Gustiness: the driver of glacial dustiness? [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2010, 29 (17-18): 2340-2350.
- [114] Nagashima K, Tada R, Tani A, et al. Millennial-scale oscillations of the westerly jet path during the last glacial period [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2011, 40 (6): 1214-1220.
- [115] Luetscher M, Boch R, Sodemann H, et al. North Atlantic storm track changes during the Last Glacial Maximum recorded by Alpine speleothems [J]. *Nature Communications*, 2015, 6: 6344.

- [116] Vandenberghe J, Renssen H, van Huissteden K, et al. Penetration of Atlantic westerly winds into Central and East Asia [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2006, 25 (17-18): 2380-2389.
- [117] Broecker W S. Glacial to interglacial changes in ocean chemistry [J]. *Progress in Oceanography*, 1982, 11 (2): 151-197.
- [118] Broecker W S. Ocean chemistry during glacial time [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1982, 46 (10): 1689-1705.
- [119] Harada N, Sato M, Shiraishi A, et al. Characteristics of alkenone distributions in suspended and sinking particles in the northwestern North Pacific [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2006, 70 (8): 2045-2062.
- [120] Takahashi T, Sutherland S C, Wanninkhof R, et al. Climatological mean and decadal change in surface ocean $p\text{CO}_2$, and net sea-air CO_2 flux over the global oceans [J]. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2009, 56 (8-10): 554-577.
- [121] Rae J W B, Gray W R, Wills R C J, et al. Overturning circulation, nutrient limitation, and warming in the Glacial North Pacific [J]. *Science Advances*, 2020, 6 (50): eabd1654.
- [122] Haug G H, Sigman D M, Tiedemann R, et al. Onset of permanent stratification in the subarctic Pacific Ocean [J]. *Nature*, 1999, 401 (6755): 779-782.
- [123] Snoeckx H D, Rea D K, Jones C E, et al. Aeolian and silica deposition in the central North Pacific: Results from sites 885/886 [R]. Scientific Results, ODP, 145, 1995: 219-230, doi: 10.2973/odp.proc.sr.145.123.1995.
- [124] Iwasaki S, Takahashi K, Kanematsu Y, et al. Paleoproductivity and paleoceanography of the last 4.3 Myrs at IODP Expedition 323 Site U1341 in the Bering Sea based on biogenic opal content [J]. *Deep Sea Research Part II: Tropical Studies in Oceanography*, 2016, 125-126: 145-154.
- [125] Stroynowski Z, Ravelo A C, Andreasen D. A Pliocene to recent history of the Bering Sea at Site U1340A, IODP Expedition 323 [J]. *Paleoceanography*, 2015, 30 (12): 1641-1656.
- [126] Jaccard S L, Galbraith E D, Sigman D M, et al. A pervasive link between Antarctic ice core and subarctic Pacific sediment records over the past 800 kyrs [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2010, 29 (1-2): 206-212.
- [127] Knudson K P, Ravelo A C. Enhanced subarctic Pacific stratification and nutrient utilization during glacials over the last 1.2 Myr [J]. *Geophysical Research Letters*, 2015, 42 (22): 9870-9879.
- [128] Maeda L, Kawahata H, Nohara M. Fluctuation of biogenic and abio-genic sedimentation on the Shatsky Rise in the western north Pacific during the late Quaternary [J]. *Marine Geology*, 2002, 189 (3-4): 197-214.
- [129] Amo M, Minagawa M. Sedimentary record of marine and terrigenous organic matter delivery to the Shatsky Rise, western North Pacific, over the last 130 kyr [J]. *Organic Geochemistry*, 2003, 34 (9): 1299-1312.
- [130] Burgay F, Spolaor A, Gabrieli J, et al. Atmospheric iron supply and marine productivity in the glacial North Pacific Ocean [J]. *Climate of the Past*, 2021, 17 (1): 491-505.
- [131] Moore C M, Mills M M, Arrigo K R, et al. Processes and patterns of oceanic nutrient limitation [J]. *Nature Geoscience*, 2013, 6 (9): 701-710.
- [132] Knudson K P, Ravelo A C, Aiello I W, et al. Causes and timing of recurring subarctic Pacific hypoxia [J]. *Science Advances*, 2021, 7 (23): eabg2906.
- [133] Han Y X, Zhao T L, Song L C, et al. A linkage between Asian dust, dissolved iron and marine export production in the deep ocean [J]. *Atmospheric Environment*, 2011, 45 (25): 4291-4298.
- [134] Müller J, Romero O, Cowan E A, et al. Cordilleran ice-sheet growth fueled primary productivity in the Gulf of Alaska, northeast Pacific Ocean [J]. *Geology*, 2018, 46 (4): 307-310.
- [135] Kim S, Takahashi K, Khim B K, et al. Biogenic opal production changes during the Mid-Pleistocene Transition in the Bering Sea (IODP Expedition 323 Site U1343) [J]. *Quaternary Research*, 2014, 81 (1): 151-157.
- [136] Jaccard S L, Hayes C T, Martínez-García A, et al. Two modes of change in southern ocean productivity over the past million years [J]. *Science*, 2013, 339 (6126): 1419-1423.
- [137] Weber M E, Bailey I, Hemming S R, et al. Antiphased dust deposition and productivity in the Antarctic Zone over 1.5 million years [J]. *Nature Communications*, 2022, 13 (1): 2044.
- [138] Koffman B G, Yoder M F, Methven T, et al. Glacial dust surpasses both volcanic ash and desert dust in its iron fertilization potential [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2021, 35 (4): e2020GB006821.
- [139] Walczak M H, Mix A C, Cowan E A, et al. Phasing of millennial-scale climate variability in the Pacific and Atlantic Oceans [J]. *Science*, 2020, 370 (6517): 716-720.