



晚更新世阿蒙森海生产力和冰筏输入的变化对表层海洋环境和西南极冰盖演化的指示

张静渊, 肖文申, 王汝建, 樊加恩, 王含章, 杨如意

Changes in productivity and ice-rafting input in the Amundsen Sea during the Late Pleistocene: Implications on the evolution of surface-ocean environment and the West Antarctic Ice Sheet

ZHANG Jingyuan, XIAO Wenshen, WANG Rujian, FAN Jiaen, WANG Hanzhang, and YANG Ruyi

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2023020802>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

渤海湾西岸晚更新世以来的沉积环境演化及碳埋藏评价

Environmental evolution and carbon burial assessment of the west coast of Bohai Bay since Late Pleistocene

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(6): 194

南黄海中部隆起晚新近纪—第四纪沉积序列的地层划分与沉积演化

Stratigraphic classification and sedimentary evolution of the late Neogene to Quaternary sequence on the Central Uplift of the South Yellow Sea

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 25

海洋环境中甲烷好氧氧化过程的研究进展

A review on microbial aerobic methane oxidation in marine environment

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 67

珠江口内伶仃洋晚第四纪黏土矿物组成特征及对源区气候变化的指示

Late Quaternary clay minerals in the inner Lingdingyang of the Pearl River Estuary, southern China: Implications for paleoclimate changes at the provenance

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 202

南海南部浅表层柱状沉积物孔隙水地球化学特征对甲烷渗漏活动的指示

Pore water geochemistry of shallow surface sediments in the southern South China Sea and its implications for methane seepage activities

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 112

江苏中部海岸晚第四纪沉积物的粒度与磁化率特征及其古环境意义

Characteristics of grain size and magnetic susceptibility of the Late Quaternary sediments from core 07SR01 in the middle Jiangsu coast and their paleoenvironmental significances

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 210



关注微信公众号，获得更多资讯信息

张静渊, 肖文申, 王汝建, 等. 晚更新世阿蒙森海生产力和冰筏输入的变化对表层海洋环境和西南极冰盖演化的指示 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2023, 43(2): 136-144.

ZHANG Jingyuan, XIAO Wenshen, WANG Rujian, et al. Changes in productivity and ice-rafting input in the Amundsen Sea during the Late Pleistocene: Implications on the evolution of surface-ocean environment and the West Antarctic Ice Sheet[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2023, 43(2): 136-144.

晚更新世阿蒙森海生产力和冰筏输入的变化对表层海洋环境和西南极冰盖演化的指示

张静渊, 肖文申, 王汝建, 樊加恩, 王含章, 杨如意

同济大学海洋地质国家重点实验室, 上海 200092

摘要: 阿蒙森海是当前全球变暖背景下西南极冰盖消融的核心区域。本文分析了中国第 34 次南极考察采集自阿蒙森海的 ANT34-A5-7 岩芯中生产力和冰筏碎屑含量等指标, 旨在重建研究区深海氧同位素 MIS 6 期以来表层海洋环境和西南极冰盖演化历史。研究结果显示, 阿蒙森海生产力呈现间冰期高、冰期低的特征。在末次间冰期 (MIS 5.5) 具有比当前更高的生产力水平, 同时伴随着西南极冰盖的严重消融。这个现象归因于 MIS 5.5 更暖的海表温度、更少的海冰覆盖, 以及向南入侵的绕极深层水的上涌。该研究结果可对预测未来气候变化提供必要的理论依据。

关键词: 海洋表层生产力; MIS 5.5; 阿蒙森海; 西南极冰盖

中图分类号: P736.2

文献标识码: A

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2023020802

Changes in productivity and ice-rafting input in the Amundsen Sea during the Late Pleistocene: Implications on the evolution of surface-ocean environment and the West Antarctic Ice Sheet

ZHANG Jingyuan, XIAO Wenshen, WANG Rujian, FAN Jiaen, WANG Hanzhang, YANG Ruyi

State Key Laboratory of Marine Geology, Tongji University, Shanghai 200092, China

Abstract: The Amundsen Sea is the core area of the melting West Antarctic Ice Sheet (WAIS) in the recent global warming process. Productivity proxies and ice rafted debris (IRD) contents in core ANT34-A5-7 collected from the Amundsen Sea during the 34th Chinese Antarctic Research Expedition were investigated, to reveal the changes of the surface-ocean environment and the evolution history of the WAIS since the MIS (Marine Isotope Stage) 6. Results show increased (decreased) productivity during interglacial (glacial) periods. In particular, the higher productivity level than the Holocene productivity ones during the MIS 5.5 was accompanied by significant WAIS melting. These findings could be interpreted as warmer sea surface, less sea ice, and stronger upwelling of the circum-polar deep water in the Amundsen Sea during the MIS 5.5. This study provided valuable information for predicting future climate changes.

Key words: sea surface productivity; Marine Isotope Stage 5.5; Amundsen Sea; West Antarctic Ice Sheet

全球变暖背景下, 冰盖消融促使海平面上升, 对人类社会产生威胁。1992—2017 年的 25 年里, 南极冰盖可能流失了 27200 ± 13900 亿 t 的冰, 相当于全球海平面上升 7.6 ± 3.9 mm^[1]。其中 1992—2012 年的 20 年间, 南极冰盖的消融对海平面上升的贡献达到 $0.15 \sim 0.46$ mm/a, 而在 2012—2017 年期间加速至 $0.49 \sim 0.73$ mm/a^[2]。西南极是整个南极升温最快的区域, 西南极冰盖 (West Antarctic Ice

Sheet, WAIS) 的融化对海平面升高的贡献显著, 其融冰水造成的海平面上升量目前约占全球海平面上升总量的 10%^[3]。一旦西南极冰盖全部融化将造成全球平均海平面上升 $3 \sim 5$ m^[4]。

西南极冰盖坐落在低于海平面的陆架上, 长期遭受相对温暖海水的侵蚀和海洋潮汐的作用, 导致冰架的基底并不稳定。阿蒙森海域的冰架是目前西南极冰盖融化的核心区域^[5], 温暖的绕极深层水

资助项目: 国家自然科学基金“第四纪冰期旋回中南大洋中深层水向中低纬太平洋的入侵及其气候效应”(42030401); 自然资源部国家海洋局极地考察办专项“南极重点海域对气候变化的响应和影响”子课题(01-03-02D)

作者简介: 张静渊 (2000—), 男, 硕士研究生, 专业方向为海洋地质学与古环境研究, E-mail: 2231674@tongji.edu.cn

通讯作者: 肖文申 (1982—), 男, 博士, 副教授, 从事古海洋与古气候研究, E-mail: wxiao@tongji.edu.cn

收稿日期: 2023-02-08; **改回日期:** 2023-02-22. 周立君编辑

(Circumpolar Deep Water, CDW) 侵入南极陆架导致冰架底部融化, 使得冰架变薄, 冰盖接地线不断后退, 引起了南极冰盖的退缩^[6]。研究显示, 在末次冰盛期(LGM), 阿蒙森海的大部分地区的冰川接地线曾接近大陆架边缘^[4]。南半球高纬度的西风增强了上升流, 促使阿蒙森海的冰盖在 10 400—7 500 年前经历了大量的消融, 并在这一冰消期中快速地从大陆架撤退到接近现代界限的位置^[4]。以海洋为驱动的冰架融化使冰川排泄进入阿蒙森海是导致冰量损失的主要原因^[7]。松岛冰川(Pine Island Glacier)与思韦茨冰川(Thwaites Glacier)的接地线后退速率最高, 是西南极冰盖的主要排泄通道。今天, 冰川融水在阿蒙森海的排泄是造成西南极冰盖质量不均衡和全球海平面上升的主导因素^[8], 一旦该区域的冰盖生长与消融平衡被彻底打破, 将会对全球海平面的上升产生不可估量的影响。

阿蒙森海的地质记录可以提供过去西南极冰盖消融与生长过程的关键信息。根据西南极冰层下发现的海洋硅藻和宇宙成因的¹⁰Be 核素浓度升高, Scherer 等^[9]认为如今被冰盖覆盖的西南极内陆地区曾是开阔水域, 进而说明中更新世以来西南极冰盖至少发生过一次崩塌。此外, 对阿蒙森海的 PS58/254 岩芯的研究发现, 在深海氧同位素 13—15 期(MIS 13—15)出现的沉积异常可能指示西南冰盖的大量消融^[10]。而 MIS 5、MIS 11 以及 MIS 31 等更新世重要的间冰期也均为显著的融冰期^[11], 这个观点得到后续研究的支持^[12-13]。巴哈马群岛和百慕大群岛高水位海相沉积年龄为 390~570 ka, 并解释为在 MIS 11 期或 MIS 15 期间西南极冰盖、格陵兰冰盖以及部分的东南极冰盖发生了大幅度缩减所导致的海平面上升的结果。通过南极大陆边缘海洋沉积记录中的冰筏碎屑(IRD)含量变化, 也能反演地质历史时期冰盖的演化。晚更新世以来, 罗斯海-阿蒙森海扇区的冰筏碎屑沉积集中出现在冰消期阶段, 反映了西南极高纬地区在南极气温变暖过程中冰架的快速消融^[14]。虽然目前已有大量针对西南极冰盖的研究, 但对冰盖演化受各种海洋环境变化的响应机制的认识还较为有限。

本文通过分析阿蒙森海陆坡区沉积物中生产力指标和冰筏指标含量的变化, 探讨了近 20 万年以来阿蒙森海海洋环境变化与冰盖演化的关系。研究结果将有助于理解冰盖在冰期-间冰期尺度上的演化规律及其形成机制, 并对未来可能的气候变化提供重要的参考。

1 区域概况

阿蒙森海是南极面向太平洋的边缘海, 南部与南极陆架及其上的西南极冰盖相接。阿蒙森海的表层洋流系统主要受南极绕极流(Antarctic Circumpolar Current, ACC)以及南极陆坡流(Antarctic Slope Current, ASC)影响。ACC 由南半球西风带驱动, 主要影响阿蒙森海北部区域。ASC 主要由极地东风驱动, 形成了两个分支: 一支沿陆架边缘前进, 另一支与 ACC 合流(图 1)。绕极深层水(Circumpolar Deep Water, CDW)是阿蒙森海地区影响冰盖消融的重要水团之一。CDW 到达陆坡附近后会在地形等因素的影响下, 经由陆坡和陆架上的海槽上涌并与陆架水团混合^[15-16]。沿陆架向南侵进的较为温暖的 CDW 侵蚀冰盖基底并加速冰架融化^[17-19]。

最近几十年阿蒙森海冰覆盖显著减少^[20]。自 20 世纪 70 年代末以来, 阿蒙森海和别林斯高晋海的海冰面积以每 10 年(1978—2010 年)6.6% 的速度减少^[20]。南极绕极流南部边界(Southern Boundary of ACC, SBACC)以南的阿蒙森海的海冰由于风应力而向西漂移^[21], 而 SBACC 以北局部地区形成的海冰与罗斯海海冰一起向东漂移^[22]。

2 材料与方法

2.1 材料

本文的研究材料来自中国第 34 次南极科学考察在阿蒙森海下陆坡钻取的重力柱岩芯样 ANT34-A5-7(69°56'58" S、110°0'54" W, 水深 3 537 m)(后文缩写为 A5-7)。站位位于现代冬季海冰边缘。A5-7 岩芯总长 469 cm, 经过基础参数扫描后, 按照 2 cm 间隔取样, 共获得 235 个样品。

2.2 实验方法

本文对 A5-7 岩芯开展了 XRF 元素扫描、磁化率扫描、粗组分含量、火山灰丰度统计、有孔虫丰度统计、生物硅含量(opal)、有机碳氮含量(TOC、TN)、AMS ¹⁴C 测年等分析。AMS ¹⁴C 测年在崂山实验室完成, 其余分析在同济大学海洋地质国家重点实验室完成。

(1)XRF 元素扫描与磁化率测试: 将岩芯剖开后, 将沉积物表面清理干净并平整, 铺上 XRF 专用薄膜(SPEX CertiPrer 3525 Ultralene foil), 并用

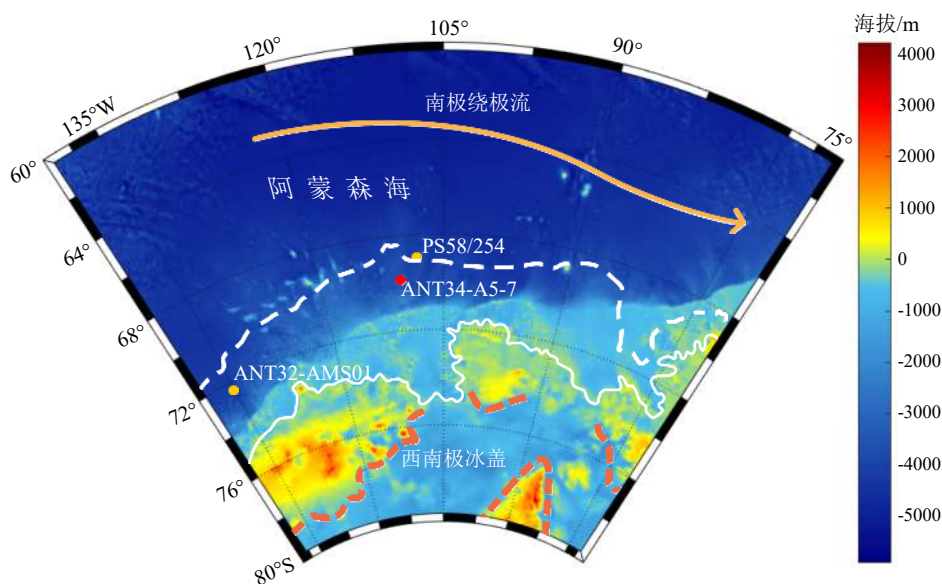


图 1 阿蒙森海区域概况及研究站位

白色虚线为现代年平均海冰覆盖率高于 20% 的界限, 白色细线为西南极冰盖边界 (<http://www.noaa.gov>), 橙色虚线为海平面以下接地线^[23]。红色菱形为本文研究岩芯 ANT34-A5-7, 黄色圆点为对比岩芯记录 ANT32-AMS01^[24] 和 PS58/254^[10]。

Fig.1 Site map and the physiography of the Amundsen Sea (AS)

White dashed line indicates sea ice edge with annual mean sea ice coverage of 20%. White solid line indicates the extent of the West Antarctic Ice Sheet (WAIS) in the Amundsen Sea sector of the Antarctica (<http://www.noaa.gov>). Orange dashed line denotes the WAIS grounding line^[23]. The studied core ANT34-A5-7 and compared cores ANT32-AMS01^[24] and PS58/254^[10] are denoted by diamond and dots, respectively.

AVAATECH 公司的 XRF 荧光光谱岩芯扫描仪在 10、30、和 50 kV 电压下进行元素含量无损扫描测试, 分辨率为 1 cm, 每个电压下测试时间为 30 s, 测得元素从 Al 至 U 的相对含量。随后用 Geotek-MSCL 按 1 cm 分辨率进行磁化率扫描。

(2) 粗组分含量与火山灰、有孔虫丰度、IRD 含量统计: 取约 10 g 烘干的沉积物样品, 加水浸泡后, 再使用孔径为 63 μm 的筛子冲筛。将 > 63 μm 的屑样烘干, 依次通过 150 μm 和 250 μm 筛子干筛并称重, 得到 > 63 μm 、> 150 μm 和 > 250 μm 的粗组分含量。随后在 40 倍实体显微镜下对 > 150 μm 组分进行有孔虫丰度和火山灰丰度统计, 并使用 > 150 μm 的组分含量作为 IRD 含量。

(3) AMS ^{14}C 测年: 根据有孔虫丰度变化, 从 2~4 cm 沉积物 > 150 μm 的屑样中挑取浮游有孔虫 *Neogloboquadrina pachyderma* (sinistral) 约 10 mg 进行 AMS ^{14}C 测年。另外取 0~2、2~4、50~52、74~76 和 90~92 cm 5 个样品进行全样有机碳测年。AMS ^{14}C 测年结果经南大洋区域常用的碳储库年龄 1300 年校正后^[25-27], 用 Calib 8.2 和 Marine20 校正曲线进行日历年计算^[28-29]。

(4) 生物硅含量测定用硅钼蓝比色法^[30]: 称取干样 0.15 g, 依次加入过氧化氢和盐酸去除有机质和

碳酸钙, 洗净残余的酸后烘干, 之后用碳酸钠将样品中的生物硅析出到溶液中。取定量的溶液, 通过钼酸铵和抗坏血酸依次形成硅钼黄和硅钼蓝, 最后用分光光度计进行吸光度测试, 并通过标样测试所得的结果进行生物硅含量计算。

(5) 有机碳、氮含量测定: 取研磨后的样品 0.1 g, 加入稀盐酸去除生源碳酸钙, 经去离子水将残余酸洗净, 烘干并用锡杯包好, 放入 Thermo Quest Italia.S.P.A. 有机元素分析仪 (EA1110 型) 上进行测试。由于所测试样品中碳酸钙含量极低, 测得的碳和氮含量作为 TOC 及 TN 含量。

3 结果

3.1 地层年代框架

AMS ^{14}C 测年结果显示, A5-7 岩芯次表层 (2~4 cm) 有孔虫和有机碳的平行样测年结果相差 2531 a (表 1), 该年龄差别被认为是有机碳中包含的老碳污染所致。假定老碳污染恒定, 在年龄计算中将所有的有机碳年龄减去 2531 a 之后, 再进行碳储库年龄的校正和日历年的计算^[28-29]。此外, 50~52 cm 与 74~76 cm 测年结果发生倒转, 在年龄模式

表 1 南极阿蒙森海 ANT34-A5-7 岩芯 AMS ¹⁴C 测年数据及其校正年龄
Table 1 Result and calibration of AMS ¹⁴C dating data of core A5-7

深度/cm	测试材料	¹⁴ C 年龄/aBP	碳储库和老碳校正年龄/aBP	日历年 /aBP
0~2	有机碳	12 476±29	8 645±29	7 807±207
2~4	有机碳	14 081±34	10 250±34	10 091±274
2~4	<i>N. pachyderma</i>	11 550±30	10 250±30	10 091±222
50~52	有机碳	25 121±73	21 290±73	23 286±307
74~76	有机碳	20 168±50	16 337±50	17 524±282
90~92	有机碳	26 389±84	22 558±84	24 542±364

建立中将 50~52 cm 的测年结果剔除。90~92 cm 测年结果为 26.3 ka。92 cm 以下的地层年龄没有 AMS ¹⁴C 定年控制。

南大洋地理环境特殊, 碳酸钙保存差, 成岩作用复杂。低纬度海域常用的有孔虫氧同位素地层学的应用由于有孔虫保存不连续, 且其同位素信号受到融冰水等影响不能反映全球气候信息, 在南极海域受到了极大限制^[31-32]。因此, 该岩芯沉积地层利用其他指标进行对比。

生源蛋白石 (opal) 含量和 XRF-Si/Al 作为南大洋常用的硅质生物生产力指标^[31], 在极峰以南的区域, 通常呈现间冰期高、冰期低的特点, 因此常被用来进行南大洋沉积物年龄模式的建立^[10, 33-34]。此外, ANT34-A5-7 岩芯中的火山灰层可与研究区广泛分布的火山灰层进行对比^[35]。其中最显著的 B 层火山灰可与研究区发生在 MIS 5/6, 约 130.7 ka 的火山灰沉积事件对应^[8, 35]。而 A 层和 C 层火山灰的年龄大致为 92 ka (MIS 5.2) 和 142 ka (MIS 6)^[35], 从而获得岩芯的确切年龄控制。在此基础上, 本文通过对比 XRF-Si/Al 和南极冰芯温度数据^[36]、海平面^[37]和全球大洋底栖有孔虫 δ¹⁸O 数据^[32], 以及邻近站位 PS58/254 所测得的生产力结果^[10], 结合该岩芯相对古地磁强度 (RPI) 数据与全球 RPI 数据对比 (樊加恩, 未发表), 建立了该岩芯年龄框架 (图 2)。需要指出的是, 通过 XRF 生产力指标、古地磁指标获得的年龄与 70~72、90~92 cm 的 ¹⁴C 测年结果不符。这个层位的 ¹⁴C 年龄也导致了该层位极高的沉积速率。由于有机碳的 ¹⁴C 测年影响因素很多, 目前尚不清楚造成这个现象的具体原因。我们倾向于使用匹配度更高的生产力指标和古地磁指标来获得地层年龄控制, 由该年龄模式计算得到的沉积速率如图 2b 所示, 平均沉积速率约 3 cm/ka。总体来讲沉积速率变化幅度不大, 最大值位于 20 ka 附近, 其沉积速率接近 5 cm/ka。

3.2 生源组分含量

A5-7 岩芯的有孔虫丰度与 Ca/Al 比值呈现一致的变化规律 (图 3)。有孔虫丰度在早全新世达 1.6×10³ 枚/g; 在 MIS 5.5, 其丰度比全新世高一个数量级, 达 13.4×10³ 枚/g。在其余层位, 有孔虫几乎缺失, 仅在 MIS 3 和 MIS5 的其他层位零星出现。ANT34-A5-7 岩芯中的生物硅含量较低, 总体在 0~2% 范围内波动 (图 3)。生物硅含量的变化与 Si/Al 呈现一定的区别, 但均在 MIS 5.5 显著增高, 其余在全新世和 MIS 3 也呈现相对高值。有机碳和氮含量在 A5-7 岩芯中较低, 分别在 0.2%~0.8% 和 0~0.13% 范围内波动。与生物硅含量类似, 这两个指标在 MIS 5.5 显著增加, 在全新世和 MIS 3 也呈现高值, 而在 MIS 2、4 和 6 等冰期呈现低值。C/N 比值在 3~15 之间波动, 总体低于 10。

3.3 陆源组分含量的变化

A5-7 岩芯中 > 150 μm 的粗组分中生源组分含量极低 (图 3), 该组分主要反映了冰筏搬运的陆源碎屑, 其百分含量用来指示冰筏碎屑 (IRD) 含量的变化。IRD 在岩芯中整体含量较低, 大部分层位在 1% 以下。在岩芯顶部 IRD 含量达 6% 左右, 体现了末次冰消期的冰筏输运。而在 MIS 5.5, IRD 含量整体超过 10%, 最高达 19%。在 MIS 3 也有少量 IRD 出现。磁化率的变化主要来源于陆源含磁性矿物的输入, A5-7 的磁化率主要在 0~200×10⁻⁵ SI 范围内波动, 在 MIS 3 出现近 300×10⁻⁵ SI 的峰值。而在冰筏碎屑含量最高的 MIS 5.5, 磁化率值却最低, 其值 < 50×10⁻⁵ SI。

镜下鉴定显示, A5-7 岩芯的火山灰主要分布在 3 个层位, 在此命名为火山灰层 A、B、C (233、297、321 cm) (图 2), 其中 B 层的火山灰含量最高, 达 178 枚/g, 而 A 和 C 层的含量相对较低, 仅为 3 枚/g。

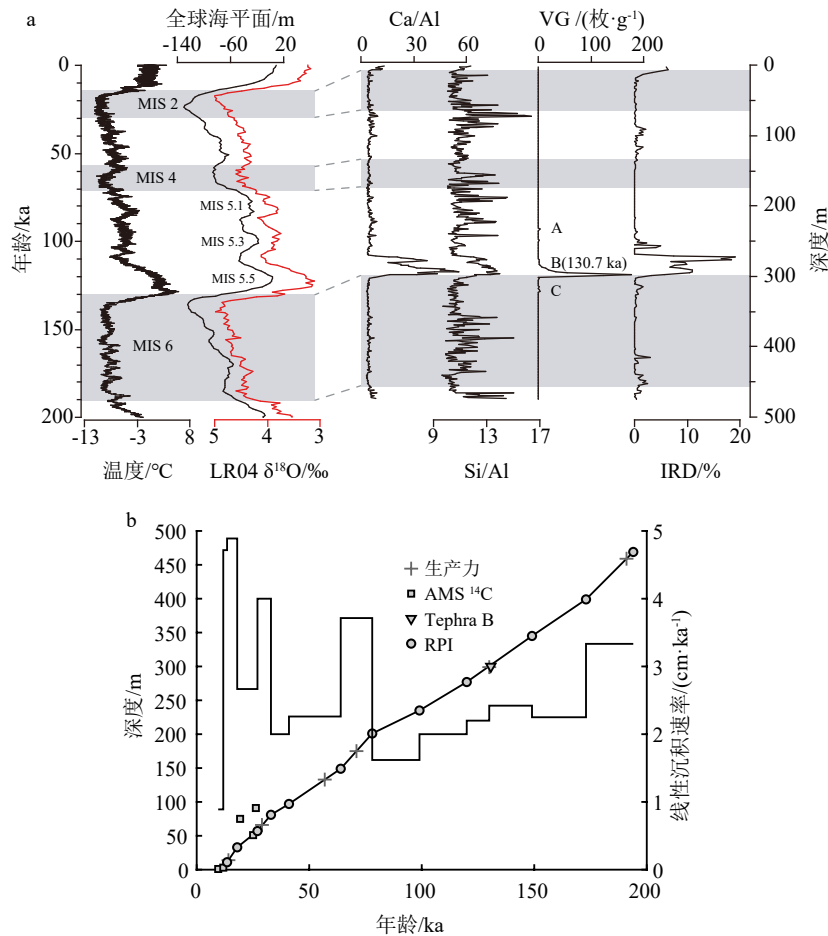


图2 南极冰芯 EDC 指示的南极温度变化^[36]、全球海平面^[37]、全球大洋底栖有孔虫 LR04- $\delta^{18}\text{O}$ 曲线^[32]与 A5-7 岩芯 XRF-Ca/Al、-Si/Al, 火山灰丰度 (VG), IRD ($>150\ \mu\text{m}$) 含量对比 (a) 以及年龄控制点与线性沉积速率 (b)

分图 a 中 B 层火山灰年龄来自参考文献 [38], 分图 b 中古地磁相对强度 (RPI) 控制点来自于樊加恩等未发表资料。

Fig.2 Temperature anomaly of the Antarctic^[36], global sea level variation^[37], and curve of LR04- $\delta^{18}\text{O}$ stack of benthic foraminifera^[32] in comparison to the XRF-Ca/Al, -Si/Al, the abundances of volcanic glass (VG), and the ice-rafted debris (IRD, $>150\ \mu\text{m}$) contents in core ANT34-A5-7(a), age control points and linear sedimentation rate (LSR) (b)

The age of tephra B in Fig.2a is from reference [38], age control points from the Relative Paleo-Intensity (RPI) are adopted from Fan et al (unpublished data).

4 讨论

4.1 冰期-间冰期旋回中生产力变化特征

A5-7 岩芯的有孔虫丰度、TOC、TN、生物硅含量等各项生产力指标 (图 3) 总体呈现出较好的一致性, 均表现出间冰期高、冰期低的特征。对比邻近的 PS58/254 和 ANT32-AMS01 岩芯, 二者的生物硅含量在 MIS 5 期也出现了大幅度的提高^[10, 24]。相比于前两者较低分辨率的记录, A5-7 记录中体现了更多的变化细节, 如冰期-间冰期旋回内, 特别是 MIS 5 时期, A5-7 的各指标间存在一些差异, MIS 5.5 期各生产力指标均超过了岩芯顶部的全新世沉积, 指示了 MIS 5.5 时期比全新世具有更高的表层海洋生

产力。从 MIS 5.4 期开始, TN、生物硅含量以及有孔虫丰度迅速降低, 而 TOC 含量的相对高值存续了几乎整个 MIS 5。这些指标的变化首先受到表层生产力高低的控制, 同时也受到溶解-保存作用的影响^[42]。因此, 这个差别可能体现了各生源组分保存效率的差异。同时, 有机碳可能受到海源、陆源等不同来源的影响^[43]。C/N 的变化常用来指示陆源和海源有机碳输入比例的变化^[44]。通常陆源有机碳的 C/N 值高于 20, 而海源有机碳的 C/N 值低于 10^[45]。A5-7 中 C/N 不论在生产力低的冰期和相对高的间冰期, 总体都低于 10, 可能指示有机质主要为海源。然而, 这样的低值也可能反映了有机碳在沉积物中的保存效率很低, 导致 TN 相对于 TOC 的比重增加。同时, 这也说明 C/N 在反映阿蒙森海的陆源-海源有机碳来源方面受到限制。有机碳在阿蒙森

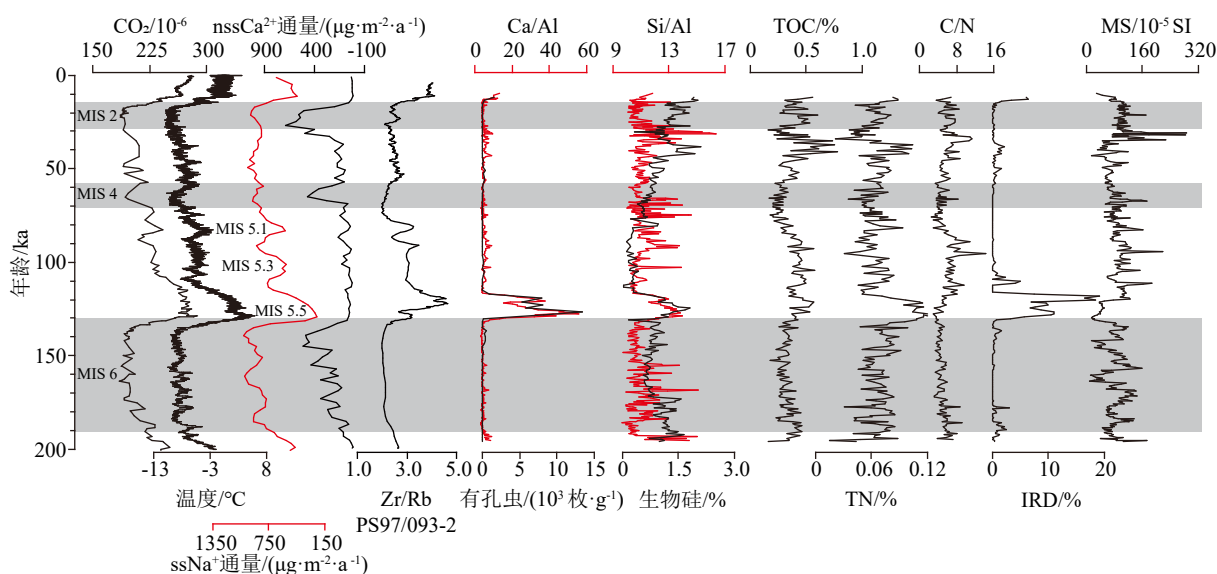


图3 南极 EDC 冰芯 CO_2 浓度^[39]、温度变化^[36]、海冰覆盖指标 ssNa^+ 通量^[40] 及风尘指标 nssCa^{2+} 通量^[40], 德雷克海峡 PS97/093-2 岩芯 XRF-Zr/Rb^[41], 与 A5-7 岩芯有孔虫丰度、XRF-Ca/Al、-Si/Al、生物硅含量 (opal)、有机碳与氮含量 (TOC、TN)、有机碳氮比值 (C/N)、IRD 含量 (>150 μm) 和磁化率记录进行对比

Fig.3 CO_2 concentration^[39], temperature anomaly of the Antarctica^[36], sea-salt Na^+ flux^[40], dust record non-sea-salt Ca^{2+} flux^[40] from EDC ice core, and the XRF-Zr/Rb record of core PS97/093-2 from the Drake Passage^[41], compared to foraminifera abundance, XRF-Ca/Al, -Si/Al, biogenic opal content, total organic carbon, total nitrogen, C/N ratio, ice-rafted debris (IRD, >150 μm), and magnetic susceptibility (MS) of core A5-7

海沉积物中含量低可能有两方面因素:一方面阿蒙森海总体生产力低^[33, 46],使得从海表到达海底的有机碳本身就很少。另一方面,沿南极陆坡下沉的南极底层水富含氧^[47],易消耗海底沉积物中的有机碳。然而,尽管各生源指标存在细节上的差异,在冰期-间冰期尺度上,它们呈现一致的变化趋势,说明表层生产力是这些指标的主要控制因素^[48]。

在南大洋,影响表层海洋生产力变化的因素主要有海冰覆盖、海水温度、营养盐供应等。海冰覆盖率是阿蒙森海东部的硅藻产量的主要控制因素^[49]。生物硅的沉积和保存受到海冰扩张的强烈影响。在冰期-间冰期尺度,海冰的扩张/退缩和蛋白石沉积带的北/南位移密切相关^[47, 50]。浮游植物(如硅藻)的生长依赖光合作用,因而季节性海冰覆盖区(Seasonal Ice Zone, SI_Z)内的生物生产力会随着海冰的覆盖率和时长的变化而变化,随之而来的以浮游植物为食(如有孔虫)的浮游动物的数量也会发生改变。因此,海冰的消融所导致的光照量变化对近冰端的以硅藻为代表的初级生物生产力造成直接影响。南极冰芯记录的南大洋海冰变化(图3),显示在 MIS 2、4、6 等冰期,海冰大幅扩张,而在 MIS 5(尤其是 5.5)和全新世,海冰退缩^[40]。利用硅藻重建的南大洋海冰记录显示,部分现代海冰覆盖下的站位在 MIS 5.5 期显示出了长期的无海冰特

征,这说明 MIS 5.5 期的海冰覆盖范围与现代范围相比明显更小^[51-52],从而极大地促进了初级生产力的提高^[53]。同时,来自多个站位的平均数据显示, MIS 5.5 期南大洋地区夏季海表温度比现代高约 1~2 $^{\circ}\text{C}$ ^[51],温暖的表层海水也有助于 MIS 5.5 期海洋生产力的提高。

表层海水中的营养盐供给量也是决定南极地区表层海洋生产力的主要因素^[54-56]。硅藻氮同位素的研究显示,南大洋地区冰期的 $\delta^{15}\text{N}$ 偏重,但对应了较低的生产力,说明冰期的营养盐利用率更高^[54, 57-58],换言之,南大洋地区的营养盐供应在冰期比间冰期更低。南大洋的营养盐的供应主要通过垂直混合或 CDW 上涌所携带的营养盐提供^[59],而冰期伴随着海冰向北扩张,南半球西风带的北移和/或减弱,使得高纬南大洋上升流减弱,阻碍了对表层海水的营养供应^[60-62]。EDC 冰芯所反映的 nssCa^{2+} 通量(图3)被认为是风尘输入的替代指标^[40],其在冰期和间冰期与 A5-7 岩芯的各生产力指标变化趋势大致相反,可以排除风尘输入作为生产力变化的主控因素,该过程与亚南极地区的情况不同^[63]。相较之下, N、P、Si 等主量营养元素的供应对极峰以南的高纬度南大洋生产力更加重要。这些营养元素向表层海水的供应主要通过 CDW 的上涌,将富含溶解态、再矿化营养在西风带的驱使下,从次

表层、中层水上涌,促进表层生产力勃发^[64]。CDW的上涌程度与西风带的迁移和ACC的流速密切相关^[41, 65],ACC影响着从印度洋与太平洋输送到大西洋的CDW的量^[66],且其流速变化会通过海冰范围的变化而放大^[65]。前人通过沉积物XRF-Zr/Rb比值指示沉积物颗粒大小,进而指示德雷克海峡ACC流速变化(图3)。数据显示,中晚更新世以来,更大的粒度指示着ACC在间冰期(例如MIS 5.5)的流速更高以及西风带的南移^[41]。这与前文所认为的MIS 5.5期CDW上涌程度增强和南移与海冰覆盖率降低所吻合。同时,冰期减弱的垂直水体交换导致CO₂能更多地封存在南大洋深层水体中,降低了大气CO₂的浓度(图3)^[39]。

除了MIS 5.5呈现生产力峰值之外,MIS 5.4期以及之后的时期研究区生产力回落到冰期相当的水平。ANT32-AMS01站位分辨率相对更高的Ba/Al值中也出现了类似的变化趋势^[24]。这个现象说明,这些时期海表降温,海冰重新扩张,海水层化加强,营养盐供应减弱,该区域一直保持较冷的环境。

MIS 3期TOC与TN、生物硅含量以及有孔虫丰度均出现了不同程度的上升且C/N比值稳定在6左右,一定程度上指示了海域生产力的加强,但其含量和变化幅度与MIS 5.5差别很大。该时期的CO₂浓度、南极温度以及Zr/Rb比值所反映的ACC强度也是处在一个较冰期略高的水平(图3),说明MIS 3期南极区仍然较冷的环境。

4.2 冰期-间冰期旋回中的陆源输入变化特征及其对冰盖演化的指示

A5-7岩芯年龄范围包含了两个完整的冰期旋回,记录了该区域完整的冰盖生长和消融过程。冰筏碎屑含量的变化,反映了冰盖消融的情况。末次冰消期—全新世和MIS 5.5,IRD含量呈现峰值,反映了该时期西南极冰盖的消融。尤其MIS 5.5的IRD含量比末次冰消期—全新世期间显著增加,指示MIS 5.5冰盖更严重的消融状态。研究显示,MIS 5.5全球海平面比现在高5~9 m^[67],其中,西南极冰盖严重消融甚至垮塌^[68],这与我们的记录吻合。

磁化率也常用来指征陆源碎屑输入的情况^[31, 69]。对比磁化率和IRD数据(图3)可知,磁化率在IRD含量最高的MIS 5.5期明显低于其他时期,而在其他时期,IRD含量极低,却呈现较高的磁化率。这个特征指示冰盖消融最严重的时期陆源碎屑的来源发生了变化。MIS 5.5的IRD是否来自西南极内陆,需要进一步的物源指标的研究来确定。

MIS 5.5西南极冰盖发生严重的崩塌,也与周边海洋环境的变化密切相关。在该时期海冰严重消退,水温升高,同时西风带南移,使得CDW上涌增强,能够更有效地侵入陆架,使得冰架崩塌。这一过程与全新世和现代观测结果一致^[7-8]。

5 结论

(1) ANT34/A5-7岩芯的有机质来源主要为海源,各生产力指标均呈现冰期低、间冰期高的旋回性变化,指示阿蒙森海晚更新世以来冰期生产力低、间冰期高的特点。

(2) MIS 5.5的高生产力和大量冰筏碎屑的输入,指示末次间冰期阿蒙森海域比现在更暖的环境,对应更高的海水温度和更低的海冰覆盖率,具有更丰富的营养供应。

(3) MIS 5.5绕极深层水的上涌不仅为阿蒙森海表层海水带来了丰富的营养盐,而且其侵入陆架并溶蚀冰架底部促进了西南极冰盖的融化,导致大量冰筏碎屑的输入,指示当时西南极冰盖严重垮塌,对当时海平面上升有重要贡献。

致谢: 感谢中国第34次南极科考队的全体科考队员和“雪龙”号全体船员为沉积物样品的采集所付出的艰辛努力。感谢中国极地研究中心样品库提供宝贵的研究材料。

参考文献 (References)

- [1] The IMBIE Team. Mass balance of the Antarctic Ice Sheet from 1992 to 2017 [J]. *Nature*, 2018, 558 (7709): 219-222.
- [2] Shepherd A, Fricker H A, Farrell S L. Trends and connections across the Antarctic cryosphere [J]. *Nature*, 2018, 558 (7709): 223-232.
- [3] Mouginot J, Rignot E, Scheuchl B. Sustained increase in ice discharge from the Amundsen Sea Embayment, West Antarctica, from 1973 to 2013 [J]. *Geophysical Research Letters*, 2014, 41 (5): 1576-1584.
- [4] Larter R D, Anderson J B, Graham A G C, et al. Reconstruction of changes in the Amundsen Sea and Bellingshausen Sea sector of the West Antarctic Ice Sheet since the Last Glacial Maximum [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2014, 100: 55-86.
- [5] Joughin I, Alley R B, Holland D M. Ice-sheet response to oceanic forcing [J]. *Science*, 2012, 338 (6111): 1172-1176.
- [6] Alley K E, Scambos T A, Siegfried M R, et al. Impacts of warm water on Antarctic ice shelf stability through basal channel formation [J]. *Nature Geoscience*, 2016, 9 (4): 290-293.
- [7] Holland D M, Nicholls K W, Basinski A. The Southern Ocean and its interaction with the Antarctic Ice Sheet [J]. *Science*, 2020, 367 (6484): 1326-1330.

- [8] Hillenbrand C D, Smith J A, Hodell D A, et al. West Antarctic Ice Sheet retreat driven by Holocene warm water incursions [J]. *Nature*, 2017, 547(7661): 43-48.
- [9] Scherer R P, Aldahan A, Tulaczyk S, et al. Pleistocene collapse of the West Antarctic ice sheet [J]. *Science*, 1998, 281(5373): 82-85.
- [10] Hillenbrand C D, Kuhn G, Frederichs T. Record of a Mid-Pleistocene depositional anomaly in West Antarctic continental margin sediments: an indicator for ice-sheet collapse? [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2009, 28(13-14): 1147-1159.
- [11] Pollard D, DeConto R M. Modelling West Antarctic ice sheet growth and collapse through the past five million years [J]. *Nature*, 2009, 458(7236): 329-332.
- [12] Hearty P J, Kindler P, Cheng H, et al. A +20 m middle Pleistocene sea-level highstand (Bermuda and the Bahamas) due to partial collapse of Antarctic ice [J]. *Geology*, 1999, 27(4): 375-378.
- [13] Kindler P, Hearty P J. Elevated marine terraces from Eleuthera (Bahamas) and Bermuda: sedimentological, petrographic and geochronological evidence for important deglaciation events during the middle Pleistocene [J]. *Global and Planetary Change*, 2000, 24(1): 41-58.
- [14] 李永斌, 王汝建, 武力, 等. 南极罗斯海扇区晚更新世以来冰筏碎屑记录反映的冰川动力学史[J]. *第四纪研究*, 2021, 41(3): 662-677. [LI Yongbin, WANG Rujian, WU Li, et al. Glacial dynamics evolutions revealed by ice-rafted detritus record from the Ross Sea Sector of the Southern Ocean since Late Pleistocene [J]. *Quaternary Sciences*, 2021, 41(3): 662-677.]
- [15] Talley L D, Pickard G L, Emery W J, et al. Descriptive Physical Oceanography: An Introduction[M]. 6th ed. London: Academic Press, 2011.
- [16] Walker D P, Brandon M A, Jenkins A, et al. Oceanic heat transport onto the Amundsen Sea shelf through a submarine glacial trough [J]. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34(2): L02602.
- [17] Jacobs S S, Jenkins A, Giulivi C F, et al. Stronger ocean circulation and increased melting under Pine Island Glacier ice shelf [J]. *Nature Geoscience*, 2011, 4(8): 519-523.
- [18] Turner J, Orr A, Gudmundsson G H, et al. Atmosphere-ocean-ice interactions in the Amundsen Sea Embayment, West Antarctica [J]. *Reviews of Geophysics*, 2017, 55(1): 235-276.
- [19] Jenkins A, Dutrieux P, Jacobs S, et al. Decadal ocean forcing and Antarctic ice sheet response: Lessons from the Amundsen Sea [J]. *Oceanography*, 2016, 29(4): 106-117.
- [20] Parkinson C L, Cavalieri D J. Antarctic sea ice variability and trends, 1979-2010 [J]. *Cryosphere*, 2012, 6(4): 871-880.
- [21] Orsi A H, Whitworth III T, Nowlin Jr W D. On the meridional extent and fronts of the Antarctic circumpolar current [J]. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 1995, 42(5): 641-673.
- [22] Assmann K M, Hellmer H H, Jacobs S S. Amundsen Sea ice production and transport [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2005, 110(C12): C12013.
- [23] Lythe M B, Vaughan D G, the BEDMAP Consortium. BEDMAP: a new ice thickness and subglacial topographic model of Antarctica [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2001, 106(B6): 11335-11351.
- [24] 鞠梦珊, 陈志华, 赵仁杰, 等. 晚第四纪南极阿蒙森海扇区冰盖与古生产力旋回变化[J]. *海洋学报*, 2019, 41(9): 40-51. [JU Mengshan, CHEN Zhihua, ZHAO Renjie, et al. Late Quaternary cyclic variations of ice sheet and paleoproductivity in the Amundsen Sea sector, Antarctica [J]. *Haiyang Xuebao*, 2019, 41(9): 40-51.]
- [25] Berkman P A, Forman S L. Pre-bomb radiocarbon and the reservoir correction for calcareous marine species in the Southern Ocean [J]. *Geophysical Research Letters*, 1996, 23(4): 363-366.
- [26] Gordon J E, Harkness D D. Magnitude and geographic variation of the radiocarbon content in Antarctic marine life: implications for reservoir corrections in radiocarbon dating [J]. *Quaternary Science Reviews*, 1992, 11(7-8): 697-708.
- [27] Domack E, Leventer A, Dunbar R, et al. Chronology of the Palmer Deep site, Antarctic Peninsula: a Holocene palaeoenvironmental reference for the circum-Antarctic [J]. *The Holocene*, 2001, 11(1): 1-9.
- [28] Stuiver M, Reimer P J. Extended ^{14}C data base and revised Calib 3.0 ^{14}C age calibration program [J]. *Radiocarbon*, 1993, 35(1): 215-230.
- [29] Heaton T J, Köhler P, Butzin M, et al. Marine20-the marine radiocarbon age calibration curve (0-55, 000 Cal Bp) [J]. *Radiocarbon*, 2020, 62(4): 779-820.
- [30] Mortlock R A, Froelich P N. A simple method for the rapid determination of biogenic opal in pelagic marine sediments [J]. *Deep Sea Research Part A. Oceanographic Research Papers*, 1989, 36(9): 1415-1426.
- [31] Xiao W S, Frederichs T, Gersonde R, et al. Constraining the dating of late Quaternary marine sediment records from the Scotia Sea (Southern Ocean) [J]. *Quaternary Geochronology*, 2016, 31: 97-118.
- [32] 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.
- [33] Wu L, Wang R J, Xiao W S, et al. Productivity-climate coupling recorded in Pleistocene sediments off Prydz Bay (East Antarctica) [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2017, 485: 260-270.
- [34] Hillenbrand C D, Fütterer D K, Grobe H, et al. No evidence for a Pleistocene collapse of the West Antarctic Ice Sheet from continental margin sediments recovered in the Amundsen Sea [J]. *Geo-Marine Letters*, 2002, 22(2): 51-59.
- [35] Hillenbrand C D, Moreton S G, Caburlotto A, et al. Volcanic time-markers for Marine Isotopic Stages 6 and 5 in Southern Ocean sediments and Antarctic ice cores: implications for tephra correlations between palaeoclimatic records [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2008, 27(5-6): 518-540.
- [36] Jouzel J, Masson-Delmotte V, Cattani O, et al. Orbital and millennial Antarctic climate variability over the past 800, 000 years [J]. *Science*, 2007, 317(5839): 793-796.
- [37] Miller K G, Mountain G S, Wright J D, et al. A 180-million-year record of sea level and ice volume variations from continental margin and deep-sea isotopic records [J]. *Oceanography*, 2011, 24(2): 40-53.
- [38] Turney C S M, Fogwill C J, Golledge N R, et al. Early Last Interglacial ocean warming drove substantial ice mass loss from Antarctica [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2020, 117(8): 3996-4006.

- [39] Lüthi D, Le Floch M, Bereiter B, et al. High-resolution carbon dioxide concentration record 650, 000-800, 000 years before present [J]. *Nature*, 2008, 453 (7193): 379-382.
- [40] Wolff E W, Fischer H, Fundel F, et al. Southern Ocean sea-ice extent, productivity and iron flux over the past eight glacial cycles [J]. *Nature*, 2006, 440 (7083): 491-496.
- [41] Toyos M H, Lamy F, Lange C B, et al. Antarctic circumpolar current dynamics at the Pacific Entrance to the Drake Passage over the past 1.3 million years [J]. *Paleoceanography and Paleoclimatology*, 2020, 35 (7): e2019PA003773.
- [42] Anderson R F, Barker S, Fleisher M, et al. Biological response to millennial variability of dust and nutrient supply in the Subantarctic South Atlantic Ocean [J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2014, 372 (2019): 20130054.
- [43] Stein R. Accumulation of organic carbon in marine sediments[D]. Doctor Dissertation of Universität Giessen, 1991.
- [44] Meyers P A. Preservation of elemental and isotopic source identification of sedimentary organic matter [J]. *Chemical Geology*, 1994, 114 (3-4): 289-302.
- [45] Thornton S F, McManus J. Application of organic carbon and nitrogen stable isotope and C/N ratios as source indicators of organic matter provenance in estuarine systems: evidence from the Tay Estuary, Scotland [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 1994, 38 (3): 219-233.
- [46] Hillenbrand C D, Grobe H, Diekmann B, et al. Distribution of clay minerals and proxies for productivity in surface sediments of the Bellingshausen and Amundsen seas (West Antarctica) - Relation to modern environmental conditions [J]. *Marine Geology*, 2003, 193 (3-4): 253-271.
- [47] Diekmann B. Sedimentary patterns in the late Quaternary Southern Ocean [J]. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2007, 54 (21-22): 2350-2366.
- [48] Billups K, York K, Bradtmiller L I. Water column stratification in the Antarctic Zone of the southern ocean during the mid-Pleistocene climate transition [J]. *Paleoceanography and Paleoclimatology*, 2018, 33 (5): 432-442.
- [49] Esper O, Gersonde R, Kadagies N. Diatom distribution in southeastern Pacific surface sediments and their relationship to modern environmental variables [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2010, 287 (1-4): 1-27.
- [50] Pudsey C J, Howe J A. Quaternary history of the Antarctic Circumpolar Current: evidence from the Scotia Sea [J]. *Marine Geology*, 1998, 148 (1-2): 83-112.
- [51] Chadwick M, Allen C S, Sime L C, et al. Reconstructing Antarctic winter sea-ice extent during Marine isotope Stage 5e [J]. *Climate of the Past*, 2022, 18 (1): 129-146.
- [52] Crosta X, Kohfeld K E, Bostock H C, et al. Antarctic sea ice over the past 130 000 years - Part 1: a review of what proxy records tell us [J]. *Climate of the Past*, 2022, 18 (8): 1729-1756.
- [53] Chadwick M, Allen C S, Sime L C, et al. How does the Southern Ocean palaeoenvironment during Marine Isotope Stage 5e compare to the modern? [J]. *Marine Micropaleontology*, 2022, 170: 102066.
- [54] Robinson R S, Sigman D M. Nitrogen isotopic evidence for a poleward decrease in surface nitrate within the ice age Antarctic [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2008, 27 (9-10): 1076-1090.
- [55] Sigman D M, Hain M P, Haug G H. The polar ocean and glacial cycles in atmospheric CO₂ concentration [J]. *Nature*, 2010, 466 (7302): 47-55.
- [56] Anderson J B, Shipp S S, Lowe A L, et al. The Antarctic Ice Sheet during the Last Glacial Maximum and its subsequent retreat history: a review [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2002, 21 (1-3): 49-70.
- [57] Studer A S, Sigman D M, Martínez-García A, et al. Antarctic Zone nutrient conditions during the last two glacial cycles [J]. *Paleoceanography*, 2015, 30 (7): 845-862.
- [58] Horn M G, Beucher C P, Robinson R S, et al. Southern ocean nitrogen and silicon dynamics during the last deglaciation [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2011, 310 (3-4): 334-339.
- [59] 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.
- [60] Sigman D M, Fripiat F, Studer A S, et al. The Southern Ocean during the ice ages: a review of the Antarctic surface isolation hypothesis, with comparison to the North Pacific [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2021, 254: 106732.
- [61] Sigman D M, Boyle E A. Palaeoceanography: Antarctic stratification and glacial CO₂ [J]. *Nature*, 2001, 412 (6847): 606.
- [62] Toggweiler J R, Russell J L, Carson S R. Midlatitude westerlies, atmospheric CO₂, and climate change during the ice ages [J]. *Paleoceanography*, 2006, 21 (2): PA2005.
- [63] Martínez-García A, Sigman D M, Ren H J, et al. Iron fertilization of the Subantarctic Ocean during the last ice age [J]. *Science*, 2014, 343 (6177): 1347-1350.
- [64] Anderson R F, Ali S, Bradtmiller L I, et al. Wind-driven upwelling in the southern ocean and the deglacial rise in atmospheric CO₂ [J]. *Science*, 2009, 323 (5920): 1443-1448.
- [65] Wu S Z, Lembke-Jene L, Lamy F, et al. Orbital- and millennial-scale Antarctic Circumpolar Current variability in Drake Passage over the past 140, 000 years [J]. *Nature Communications*, 2021, 12 (1): 3948.
- [66] Gordon A L. Inter-ocean exchange of thermocline water [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1986, 91 (C4): 5037-5046.
- [67] Dutton A, Carlson A E, Long A J, et al. Sea-level rise due to polar ice-sheet mass loss during past warm periods [J]. *Science*, 2015, 349 (6244): aaa4019.
- [68] Dutton A, Lambeck K. Ice volume and sea level during the last interglacial [J]. *Science*, 2012, 337 (6091): 216-219.
- [69] Bareille G, Grousset F E, Labracherie M, et al. Origin of detrital fluxes in the Southeast Indian Ocean during the last climatic cycles [J]. *Paleoceanography*, 1994, 9 (6): 799-819.