



上新世以来南极底层水变化及其与全球气候的潜在联系

易亮^{1*}, 谭亮成^{2,3}, 姚会强^{4,5}, 邓成龙^{6,7}

1. 同济大学海洋地质国家重点实验室, 上海 200092;
2. 中国科学院地球环境研究所, 黄土与第四纪地质国家重点实验室, 西安 710061;
3. 西安交通大学全球环境变化研究院, 西安 710049;
4. 中国地质调查局广州海洋地质调查局, 自然资源部海底矿产资源重点实验室, 广州 510075;
5. 南方海洋科学与工程广东省实验室(广州), 广州 511458;
6. 中国科学院地质与地球物理研究所, 岩石圈演化国家重点实验室, 北京 100029;
7. 中国科学院大学地球与行星科学学院, 北京 101408

* 联系人, E-mail: yiliang@tongji.edu.cn

Antarctic bottom water evolution since the Pliocene and its potential linkage to global climate changes

Liang Yi^{1*}, Liangcheng Tan^{2,3}, Huiqiang Yao^{4,5} & Chenglong Deng^{6,7}

¹ State Key Laboratory of Marine Geology, Tongji University, Shanghai 200092, China;

² State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Institute of Earth Environment, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710061, China;

³ Institute of Global Environmental Change, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

⁴ Key Laboratory of Marine Mineral Resources, Ministry of Natural Resources, Guangzhou Marine Geological Survey, China Geological Survey, Guangzhou 510075, China;

⁵ Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Guangzhou), Guangzhou 511458, China;

⁶ State Key Laboratory of Lithospheric Evolution, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;

⁷ College of Earth and Planetary Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 101408, China

* Corresponding author, E-mail: yiliang@tongji.edu.cn

doi: [10.1360/TB-2023-0425](https://doi.org/10.1360/TB-2023-0425)

2004年上映了福克斯公司制作的科幻片《后天》(The Day After Tomorrow), 主要讲述温室效应造成大洋环流异动、地球重新来到冰河纪的故事。近年来不断有证据表明, 大洋环流在全球变暖背景下已经进入了一个显著变弱的阶段^[1]。预测这种环流减弱是否如“后天”猜测的那般, 需要对过去大洋环流的变化进行重建。

南极底层水(Antarctic bottom water)发源于南极, 由陆架水和绕极深层水(circumpolar deep water)混合而成; 通常分布于水深大于5000 m的大洋深部, 是全球大洋环流的关键组成。它不但为大洋底层提供了丰富的溶解氧, 也在水体中封存了大量CO₂, 是全球气候变化的重要调节器之一。然而, 对于南极底层水的长期变化及可能影响, 认识并不清晰。

东太平洋海床上广泛分布着“铁锰结核”, 其生长过程与富氧的南极底层水密切相关。东太平洋的克拉里昂-克利珀顿断裂带(Clarion-Clipperton fracture zone, 简称C-C区)位于赤道高生物生产力带以北^[2], 渐新世晚期以来就受到南极底

层水对海底地形的侵蚀塑造^[3], 为铁锰结核提供了良好的生长环境, 促进了铁锰结核的繁荣发展, 被称为全球“锰结核带”^[4,5], 为追踪南极底层水的长期演化提供了机会^[3]。2013年, 我们在C-C区(10.05°N, 154.32°W, 5050 m水深)采集到了本研究的铁锰结核样品。

此项研究中, 首先面临的是结核研究的基本难题: 精确定年问题。我们综合应用磁场显微成像技术、¹⁰Be/⁹Be、钕通量和天文调谐等多种定年方法, 将结核的定年精度提高了2个数量级, 为重建南极底层水的变化奠定了基础(图1)。随后, 通过5 μm间距的元素地球化学扫描, 建立了基于Ni、Mn、Cu元素特征的水体演化新指标, 提出结核的元素含量变化可以反映南极底层水的历史, 从而揭示470万年以来南极底层水变化特征及其在北半球冰盖发育过程中的可能作用。该研究成果发表在Science Advances^[6]。

在C-C区, 海洋生产力的影响较弱^[7], 底部通风主要受控于南极底层水的强度变化^[8,9]。C-C区的铁锰结核以水成型-成岩型

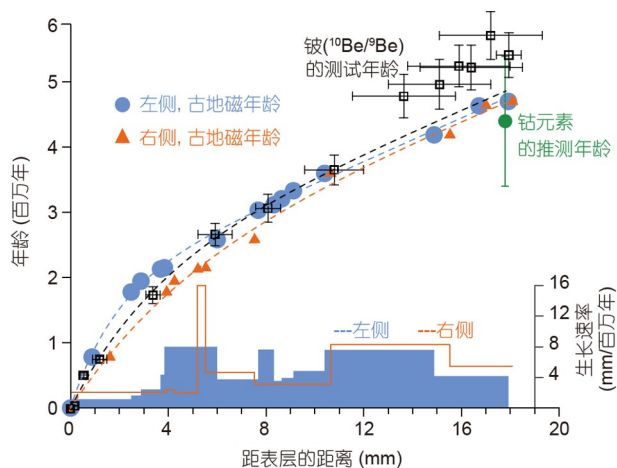


图1 铁锰结核年龄模型^[6]
Figure 1 Age models of the marine ferromanganese nodule in this study^[6]

为生长特征^[10], 不受热液过程的影响, 且海水化学特征变化不是结核生长的主导因素, 因此可以记录深海通风与南极底层水的变化历史. 通过与不同地点深海通风的环境代用指标进行对比, 我们认为铁锰结核的金属元素Ni、Mn和Cu可以用来反映C-C区底层海水溶解氧含量的变化(oxygen-sensitive, OS). 由于Ni、Mn和Cu之间的含量变化存在高度一致性, 我们将三者的算术平均值(标准化)作为南极底层水氧化还原条件的代用指标(即OS指数). 高OS指数值反映了溶解氧增加和通风增强, 反之亦然. 另外, 通过多种计算过程的结果对比, 我们认为结核生长类型及元素组成对OS指数的影响可以忽略不计. 因此, 我们提出OS指数反映了过去470万年研究区底层海水的溶解氧含量变化, 而这一变化指示了南极底层水的强度特征.

将南极底层水记录(OS指数变化)与其他地质记录进行对比研究发现, 东太平洋底层海水的溶解氧含量呈现冰期(冷期)增加、间冰期(暖期)减少的特征, 与大气CO₂浓度变化趋

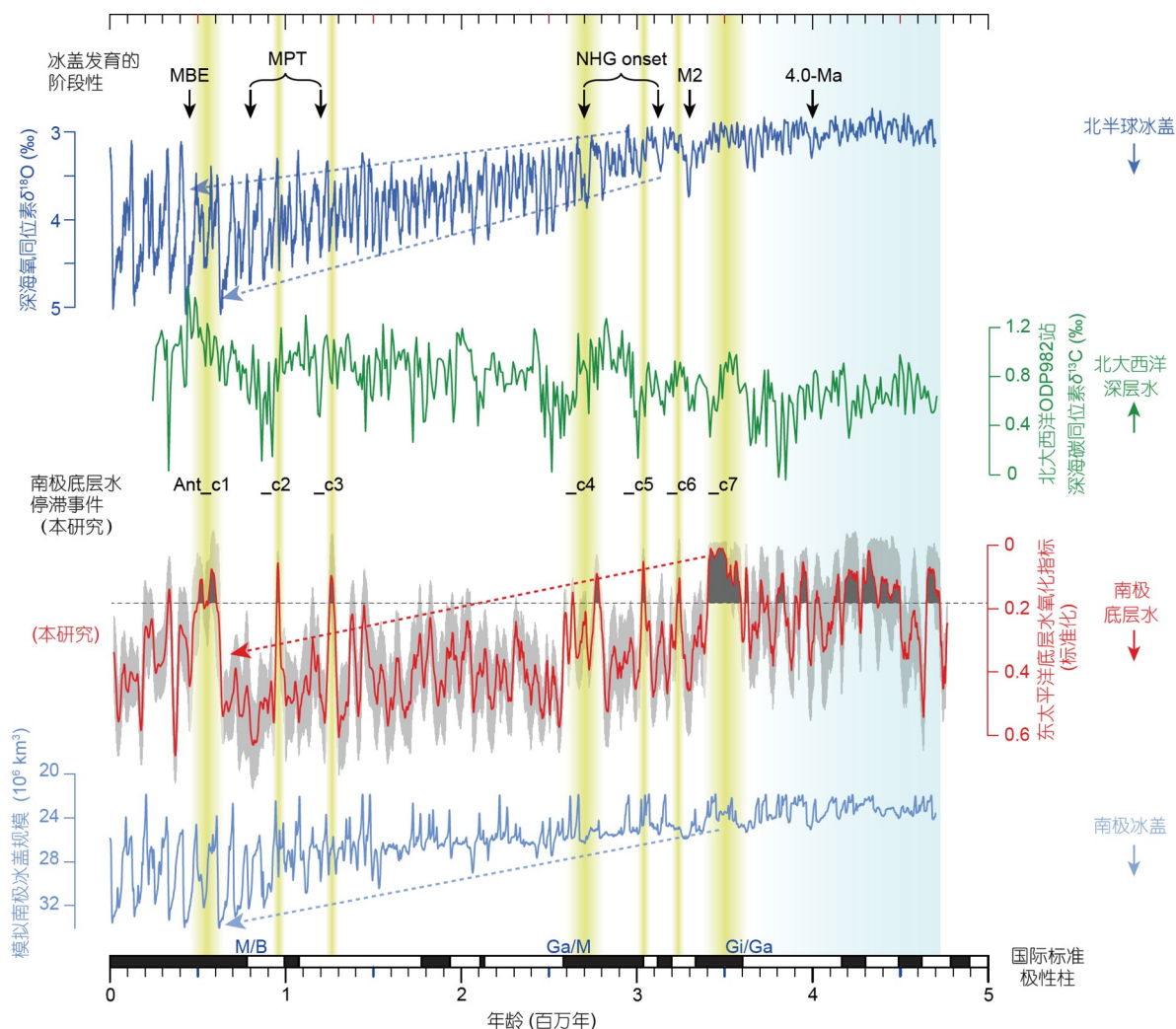


图2 470万年以来东太平洋南极底层水记录及其停滞事件^[6]
Figure 2 Abyssal ventilation in the eastern Pacific during the Plio-Pleistocene epochs and the potential collapse events^[6]

势相反。这一负相关关系说明南极底层水在冰期(冷期)可能封存了大量CO₂, 进而对全球气候环境变化产生重要影响。上新世早期(约470~340万年), 东太平洋底层水特征与西南极冰盖振荡一致^[11]。340万年以来, 东太平洋的深海含氧量呈线性增长, 这一趋势与观测到的南极冰盖变化特征一致, 表明南极气候变化趋于稳定且更加严寒。

此外, 我们识别出7次南极底层水的极弱/停滞事件(标记为Ant_c1~c7, 图2)。这些事件与北半球冰盖发育的关键阶段一一对应, 具体包括M2事件、北半球冰盖扩张(NHG onset)、中更新世气候转型(MPT)和中布容事件(MBE)。我们认为, 虽然不同时期南极底层水停滞的驱动机制并不相同, 但都与南极冰盖及南极底层水的变化相关。至少有两种可能

的机制: (1) 大面积的海冰覆盖可能会阻止风应力引发的绕极深层水上涌; (2) 如果海冰覆盖非常有限, 温暖的绕极深层水上涌进入陆架区, 阻止低密度冰架水的下沉。这两种情况都将减少南极底层水的产生。我们据此推测, 南极底层水的停滞可能联合北大西洋深层水的增强, 共同为北半球冰盖的阶段性发育提供必要的水汽支持。

这项研究重建了上新世以来东太平洋南极底层水的变化历史, 为南极底层水和北半球冰盖发育之间的密切耦合提供了关键新证据。因此, 虽然目前无法准确预测现在的大洋环流减弱将如电影《后天》所描述般的影响全球气候过程, 但我们的研究表明, 在过去的数百万年中, 南极底层水的停滞可能已多次将地球带入了更加严酷的冰期气候。

推荐阅读文献

- 1 Li Q, England M H, Hogg A M C, et al. Abyssal ocean overturning slowdown and warming driven by Antarctic meltwater. *Nature*, 2023, 615: 841–847
- 2 Antoine D, André J M, Morel A. Oceanic primary production: 2. Estimation at global scale from satellite (Coastal Zone Color Scanner) chlorophyll. *Glob Biogeochem Cycle*, 1996, 10: 57–69
- 3 Glasby G P. Manganese: Predominant role of nodules and crusts. In: Schulz H D, Zabel M, eds. *Marine Geochemistry*. Heidelberg: Springer, 2006. 371–427
- 4 Halbach P E, Friedrich G, von Stackelberg U. The Manganese Nodule Belt of the Pacific Ocean: Geological Environment, Nodule Formation, and Mining Aspects. Stuttgart: Ferdinand Enke Verlag, 1988
- 5 Kennett J P, Watkins N D. Deep-sea erosion and manganese nodule development in the southeast Indian Ocean. *Science*, 1975, 188: 1011–1013
- 6 Yi L, Medina-Elizalde M, Tan L, et al. Plio-Pleistocene deep-sea ventilation in the eastern Pacific and potential linkages with Northern Hemisphere glaciation. *Sci Adv*, 2023, 9: eadd1467
- 7 Khripounoff A, Caprais J C, Crassous P, et al. Geochemical and biological recovery of the disturbed seafloor in polymetallic nodule fields of the Clipperton-Clarion Fracture Zone (CCFZ) at 5000-m depth. *Limnol Oceanogr*, 2006, 51: 2033–2041
- 8 Mewes K, Mogollón J M, Picard A, et al. Impact of depositional and biogeochemical processes on small scale variations in nodule abundance in the Clarion-Clipperton Fracture Zone. *Deep Sea Res Part I-Oceanographic Res Papers*, 2014, 91: 125–141
- 9 Juan C, Van Rooij D, De Bruycker W. An assessment of bottom current controlled sedimentation in Pacific Ocean abyssal environments. *Mar Geol*, 2018, 403: 20–33
- 10 Wegorzewski A V, Kuhn T. The influence of suboxic diagenesis on the formation of manganese nodules in the Clarion Clipperton nodule belt of the Pacific Ocean. *Mar Geol*, 2014, 357: 123–138
- 11 Cook C P, van de Flierdt T, Williams T, et al. Dynamic behaviour of the East Antarctic ice sheet during Pliocene warmth. *Nat Geosci*, 2013, 6: 765–769