

# 古气候研究揭示两极冰盖不对称演化对全球气候的重大影响

黄建平<sup>1,2</sup>

1. 兰州大学西部生态安全省部共建协同创新中心, 兰州 730000;

2. 兰州大学大气科学学院, 兰州 730000

E-mail: [hjp@lzu.edu.cn](mailto:hjp@lzu.edu.cn)

## Paleoclimate study reveals the profound impact of the asymmetric evolution of polar ice sheets on global climate

Jianping Huang<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Collaborative Innovation Center for Western Ecological Safety, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China;

<sup>2</sup> College of Atmospheric Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China

E-mail: [hjp@lzu.edu.cn](mailto:hjp@lzu.edu.cn)

doi: [10.1360/TB-2024-1039](https://doi.org/10.1360/TB-2024-1039)

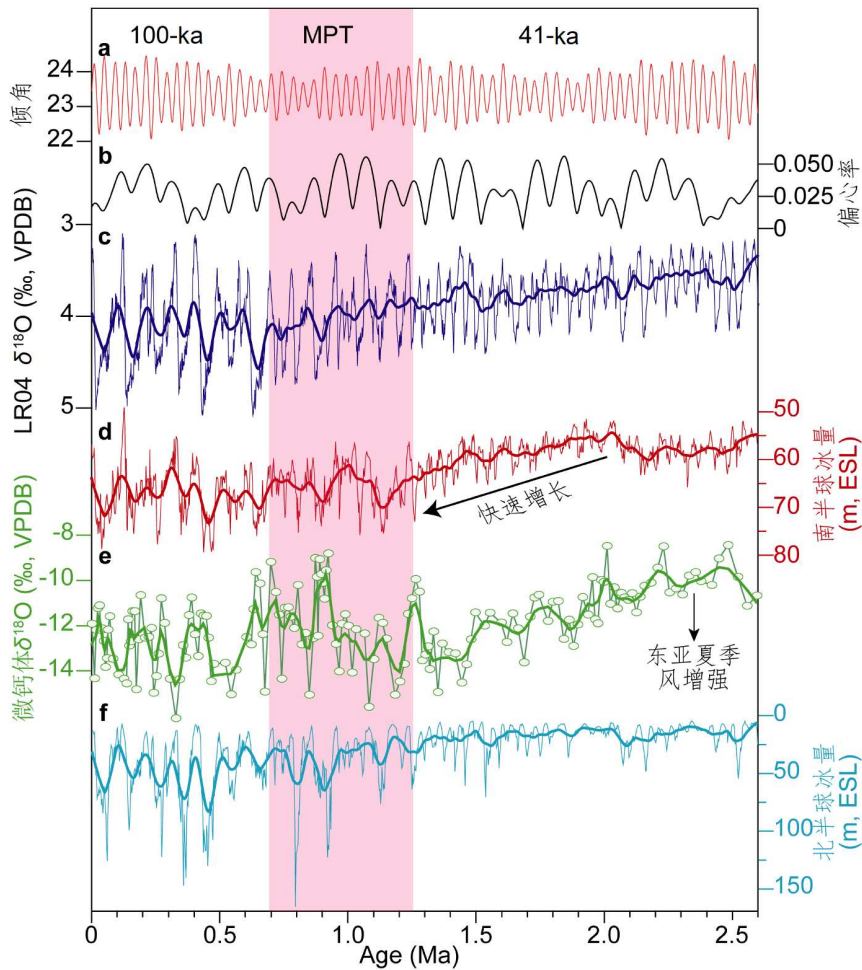
中更新世气候转型(the middle Pleistocene transition, MPT)是古气候研究领域中的一个备受关注的前沿与重难点问题. 该转型标志着全球古气候从对称的4万年周期波动转变为不对称的10万年周期, 然而这一转变的机制至今成谜. 中国科学院地球环境研究所安芷生院士团队联合国内外27位同行, 近期于*Science*发表题为“南极冰盖生长触发中更新世气候转型”的研究论文<sup>[1]</sup>, 为揭开这一谜题提供了全新见解和数据支持. 该研究系统性论述了两极冰盖的不对称演化在改变更新世气候周期性特征转型中的关键作用, 阐明了地球系统中下垫面的变化如何影响冰期-间冰期旋回的动力学机制. 相关成果不仅深化了我们对古气候变迁的理解, 也为现代气候科学的研究提供了重要的启示和指导.

两半球冰盖在新生代呈现不对称演化, 在第四纪(距今2.58 Ma)地球进入了两极有冰的冰室气候状态<sup>[2]</sup>. 第四纪气候以强烈的冰期-间冰期旋回为主要特征, 并辅以缓慢的长期降温过程<sup>[3-6]</sup>. 最为引人注目的是, 在中更新世(距今约1.25~0.7 Ma)期间地球冰盖消长、海温变化等由原本低振幅对称的4万年周期转变为高振幅不对称的10万年周期<sup>[3]</sup>. 这种现象被称为中更新世气候转型(MPT)<sup>[4-6]</sup>, 引起了国际学术界广泛的关注(图1). *Nature*、*Science*等杂志多次刊载了有关这一气候转型的多种理论假说及其对气候系统和人类演化的影响<sup>[7-9]</sup>.

早在1976年, Shackleton和Opdyke<sup>[10]</sup>发表了赤道太平洋V28-239站位第四纪深海底栖有孔虫氧同位素( $\delta^{18}\text{O}$ )变化的

记录, 论证了底栖有孔虫 $\delta^{18}\text{O}$ 可作为全球冰量变化的替代性指标. 通过这一 $\delta^{18}\text{O}$ 记录的频谱分析, 发现全球冰量主导周期在中更新世从对称的4万年转变为不对称的10万年<sup>[11]</sup>, 即MPT<sup>[12]</sup>. 此后, 围绕MPT的发生时间、特性及其背后的机制, 科学界展开了大量研究, 并引发了关于MPT是渐进式变化还是突变事件的热议. 例如, Berger等人<sup>[13]</sup>认为气候周期在距今约0.9 Ma从4万年突变到10万年, 并将其称为中更新世革命(the middle Pleistocene revolution). Lisiecki和Raymo<sup>[4]</sup>通过集成全球57条深海 $\delta^{18}\text{O}$ 记录建立的经典LR04曲线的频谱分析, 证实MPT于距今约1.25 Ma开始, 在距今约0.7 Ma结束, 主导周期从4万年逐渐转变为10万年, 并获得海表温度等全球大尺度气候记录的佐证<sup>[3]</sup>.

在探究MPT的过程中, 我们不仅需要关注该变化的表现形式, 还必须深入挖掘其背后的成因与机制. 作为地球气候历史上一个重要的转折点, 研究MPT发生原因及机理对于理解地球系统气候变化具有重大意义. 米兰科维奇提出受地球轨道要素控制的北纬60°夏季太阳辐射是驱动气候变化的经典理论, 然而在MPT期间地球轨道参数及其约束的太阳辐射量并未表现出显著的长趋势或者转折(图1(a), (b))<sup>[14]</sup>, 因此该理论无法解释MPT成因. 科学家转而从地球系统内部因子的相互作用探索MPT驱动机制, 并提出了多种假说. 例如, 大气 $\text{CO}_2$ 减少(特别是冰期时)假说<sup>[15]</sup>、风化壳假说<sup>[3]</sup>或者两者共同作用<sup>[16]</sup>导致MPT的发生. Raymo等人<sup>[7]</sup>认为长期冷却导致约1.0 Ma东南极冰盖从陆基过渡为海基冰盖引发MPT. 此外,



**图 1** (网络版彩色)重建的第四纪(a)倾角<sup>[14]</sup>、(b)偏心率<sup>[14]</sup>、(c)全球深海氧同位素LR04曲线<sup>[4]</sup>、(d)南半球冰量<sup>[1]</sup>、(e)微钙体氧同位素<sup>[1]</sup>以及(f)北半球冰量<sup>[1]</sup>。(c)~(f)中的粗线表示100 ka平滑平均值  
**Figure 1** (Color online) Quaternary (a) Earth's obliquity<sup>[14]</sup>, (b) Earth's eccentricity<sup>[14]</sup>, (c) global benthic  $\delta^{18}\text{O}$  stack (LR04) oxygen isotope<sup>[4]</sup>, (d) Southern Hemisphere ice volume<sup>[1]</sup>, (e) microcodium  $\delta^{18}\text{O}$  record<sup>[1]</sup>, and (f) Northern Hemisphere ice volume<sup>[1]</sup>. The thick lines are the 100-ka smoothing mean in (c)~(f)

Tziperman和Gildor<sup>[17]</sup>认为大洋深部环流重组导致深海的冷却引发了MPT. 然而, 这些假说尚未从两半球冰盖演化的角度考虑MPT的驱动机制.

21世纪初, 安芷生<sup>[18]</sup>注意到南北半球气候间的相互作用对全球气候变化的影响, 提出了半球跨赤道水汽输送与亚澳季风环流的关系. 至2011年, 安芷生明确提出南北半球冰量不同步变化导致跨赤道气压梯度变化及其对冰期-间冰期印度夏季风动力学的重要影响<sup>[19]</sup>. 遵循这一思路, 安芷生等人<sup>[1]</sup>将地质记录与数值模拟相结合, 发现早更新世以来两极冰盖不对称演化对大气和海洋经向环流的显著影响, 并据此提出了南极冰盖生长触发中更新世气候转型的新理论.

这一研究为回答*Science*提出的125个世界前沿科学问题之一的“大冰期发生原因”提供了全新视角. 该研究分别建立了两半球中纬度海洋表层温度与对应半球冰量的转换方程,

并利用转换方程和中纬度海洋表层温度集成记录首次定量重建了更新世两半球冰量变化的历史(图1(d), (f)), 表明南半球冰盖在距今约2~1.25 Ma期间快速生长(冰期冰量增加了~9 m 等效海平面), 而北半球冰盖实质性增长滞后于南半球, 发生在距今约1.25~0.7 Ma期间(冰期冰量增加了~43 m等效海平面), MPT之后北半球冰期冰量超过南半球. 在距今2~1.25 Ma南极冰盖扩张期间, 新的黄土微钙体氧同位素记录指示亚洲夏季风的显著增强(图1(e)), 反映了增强的跨赤道水汽输送. 数值模拟也证实了南极冰盖增长(特别是面积扩张)和相关的海冰扩张改变了大气和海洋的经向环流, 导致全球变冷, 增加了向北的水汽输送, 进而促进北半球冰盖的生长. 而且在低CO<sub>2</sub>浓度条件下, 南极冰盖和相关的海冰扩张所引起的全球气候效应将进一步增强. 随着南极冰盖的持续扩张, 其累积效应在距今1.25 Ma达到临界阈值, 触发了中更新

世气候周期的转型。这项研究的另一特色是发现了气候跨时间尺度的相互作用,即构造尺度(几十万年或更长)上的南半球冰量增长的累积效应,调制了轨道尺度冰期旋回周期从4万年向10万年的转变。

该研究阐明了地球系统中下垫面的变化如何改变冰期-间冰期旋回的特征和动力机制,树立了由中国科学家主导解决地球系统科学和全球变化前沿问题的典范,走在了世界的

前列。该成果突显了南北极冰盖之间复杂的动力学联系以及对全球气候的重大影响,为理解更新世气候转型提供了新的解释框架。此项研究进一步启迪我们,在全球气候变暖的严峻背景下,迫切需要对当前两半球冰盖非对称消融与全球气候变化之间的关联进行量化评估,从而为揭示地球气候系统对两极冰盖变化的响应和预测未来全球气候变化提供重要参考。

## 参考文献

- 1 An Z, Zhou W, Zhang Z, et al. Mid-Pleistocene climate transition triggered by Antarctic Ice Sheet growth. *Science*, 2024, 385: 560–565
- 2 Westerhold T, Marwan N, Drury A J, et al. An astronomically dated record of Earth's climate and its predictability over the last 66 million years. *Science*, 2020, 369: 1383–1387
- 3 Clark P U, Archer D, Pollard D, et al. The middle Pleistocene transition: Characteristics, mechanisms, and implications for long-term changes in atmospheric  $p\text{CO}_2$ . *Quat Sci Rev*, 2006, 25: 3150–3184
- 4 Lisiecki L E, Raymo M E. A Pliocene-Pleistocene stack of 57 globally distributed benthic  $\delta^{18}\text{O}$  records. *Paleoceanography*, 2005, 20: 2004PA001071
- 5 Rohling E J, Foster G L, Grant K M, et al. Sea-level and deep-sea-temperature variability over the past 5.3 million years. *Nature*, 2014, 508: 477–482
- 6 Clark P U, Shakun J D, Rosenthal Y, et al. Global and regional temperature change over the past 4.5 million years. *Science*, 2024, 383: 884–890
- 7 Raymo M E, Lisiecki L E, Nisancioglu K H. Plio-Pleistocene ice volume, antarctic climate, and the global  $\delta^{18}\text{O}$  record. *Science*, 2006, 313: 492–495
- 8 Snyder C W. Evolution of global temperature over the past two million years. *Nature*, 2016, 538: 226–228
- 9 Timmermann A, Yun K S, Raia P, et al. Climate effects on archaic human habitats and species successions. *Nature*, 2022, 604: 495–501
- 10 Shackleton N J, Opdyke N D. Oxygen-isotope and paleomagnetic stratigraphy of Pacific core V28-239 late Pliocene to latest Pleistocene. In: Cune R M, Hays J D, eds. Investigation of Late Quaternary Paleoclimatology and Paleoclimatology. Bremerhaven: Geological Society of America, 1976. 449–464
- 11 Pisias N G, Moore Jr T C. The evolution of Pleistocene climate: A time series approach. *Earth Planet Sci Lett*, 1981, 52: 450–458
- 12 Maasch K A. Statistical detection of the mid-Pleistocene transition. *Clim Dyn*, 1988, 2: 133–143
- 13 Berger W, Bickert T, Jansen E, et al. The central mystery of the Quaternary ice age: A view from the South Pacific. *Oceanus*, 1993, 36: 53–57
- 14 Laskar J, Robutel P, Joutel F, et al. A long-term numerical solution for the insolation quantities of the Earth. *Astron Astrophys*, 2004, 428: 261–285
- 15 Chalk T B, Hain M P, Foster G L, et al. Causes of ice age intensification across the Mid-Pleistocene Transition. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2017, 114: 13114–13119
- 16 Willeit M, Ganopolski A, Calov R, et al. Mid-Pleistocene transition in glacial cycles explained by declining  $\text{CO}_2$  and regolith removal. *Sci Adv*, 2019, 5: eaav7337
- 17 Tziperman E, Gildor H. On the mid-Pleistocene transition to 100-kyr glacial cycles and the asymmetry between glaciation and deglaciation times. *Paleoceanography*, 2003, 18: 1001
- 18 An Z. The history and variability of the East Asian paleomonsoon climate. *Quat Sci Rev*, 2000, 19: 171–187
- 19 An Z, Clemens S C, Shen J, et al. Glacial-interglacial Indian summer monsoon dynamics. *Science*, 2011, 333: 719–723