

张浣荻, 郝青振. 深海和冰芯证据指示氧同位素阶段 MIS 11~10 时期北极冰盖增长滞后[J]. 第四纪研究, 2019, 39(3):786-788.

Zhang Huandi, Hao Qingzhen. Marine and ice core evidence confirms delayed buildup of Arctic ice sheets during the MIS 11~10 [J]. Quaternary Sciences, 2019, 39(3):786-788.

doi:10.11928/j.issn.1001-7410.2019.03.23

文章编号 1001-7410(2019)03-786-03

# 深海和冰芯证据指示氧同位素阶段 MIS 11~10 时期北极冰盖增长滞后 Marine and Ice Core Evidence Confirms Delayed Buildup of Arctic Ice Sheets during the MIS 11~10

张浣荻<sup>1,2</sup>, 郝青振<sup>1,2,3</sup>

(1. 中国科学院地质与地球物理研究所, 中国科学院新生代地质与环境重点实验室, 北京 100029; 2. 中国科学院大学地球  
与行星科学学院, 北京 100049; 3. 中国科学院生物演化与环境卓越创新中心, 北京 100044)

深海氧同位素阶段(MIS) 11 时期与全新世及未来的地球轨道参数变化相似, 被学术界认为是未来环境的天文相似型。自 20 世纪末开始, 该时期的气候行为特征和机制就受到学术界的密切关注<sup>[1]</sup>。根据黄土粒度—冬季风—北极冰盖的联系<sup>[2]</sup>, 我们提出黄土粒度快速增长的时间(变率)对北极冰盖增长的时间具有指示作用<sup>[3]</sup>。根据黄土高原西峰驿马关和洛川两个黄土-古土壤典型剖面(图 1)样品粒度的高分辨率研究, 并结合黄土高原已经发表的不同剖面的数据<sup>[4-8]</sup>, 发现黄土高原地区 L<sub>4</sub>(对应 MIS 10)下部粒度一直比较细, 与下伏间冰期古土壤 S<sub>2</sub>(对应 MIS 11)时期的粒度接近, 直到 MIS 10 中期, 粒度才开始快速增加<sup>[3]</sup>(图 2b)。由此推测北极冰盖的增长显著滞后于深海氧同位素  $\delta^{18}\text{O}$ <sup>[9]</sup> 指示的全球冰量的增长(图 2k), 并提出 MIS 10 初始期, 南北两极冰盖增长不同步, 南极先于北极进入冰期<sup>[3]</sup>。由于新观点与米兰科维奇理论南北半球冰期-间冰期同步发育的传统观点<sup>[10]</sup>不一致, 可能对理解轨道尺度古气候变化的动力学机制有一定的启示, 因此有必要从全球古气候证据的角度进一步审视该时期的两极冰盖演化特征。

上述黄土研究利用的时间标尺是根据黄土-古土壤序列与深海氧同位素阶段对比方案获得每层古土壤的顶、底界年龄, 在各年龄控制点之间利用粒度权重模型内插获得整个序列的年龄<sup>[3]</sup>。在 S<sub>4</sub>~L<sub>4</sub> 层位, 该方法与不同学者根据粒度 U-ratio<sup>[11]</sup>、粒度权重模型<sup>[6,12]</sup>、磁化率权重模型<sup>[13]</sup>、轨道调谐<sup>[5,7]</sup>等一系列方法建立的时间标尺是一致的, L<sub>4</sub> 层位粒度快速增长的时间均在 360 ka 左右, 甚至更为年轻<sup>[11]</sup>。因此, 就现有黄土时间标尺的精度而言, 由 L<sub>4</sub> 时期黄土粒度变率推测的北极冰盖滞后增长的结论似乎是客观的。然而, 在全球气候研究中, 由于时间标尺不一致导致不同环境记录之间对比具有不确定性是难以回避的事实, 如何在统一的

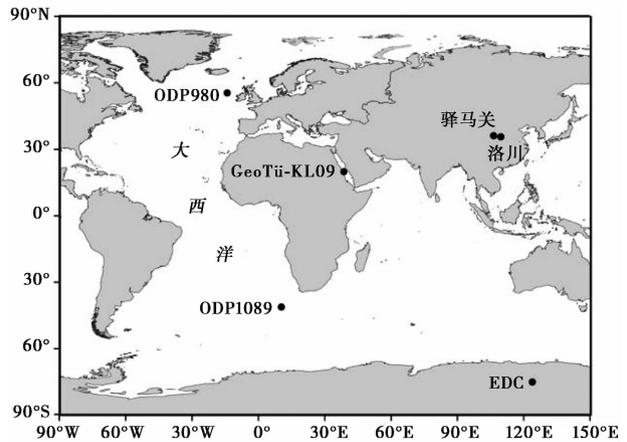


图 1 黄土剖面、深海沉积和冰芯站位位置图

Fig. 1 Location map of loess-paleosol sections, marine sediment cores and EDC ice cores mentioned in this study

时间标尺下讨论南北半球冰期-间冰期旋回是否同步是需要深入思考的问题。由于全球深海水体混合的平均时间仅为约 1 ka<sup>[9]</sup>, 不同大洋的深海底栖有孔虫壳体  $\delta^{18}\text{O}$  变化的相位差可以忽略不计。利用底栖有孔虫  $\delta^{18}\text{O}$  变化可以获得海洋钻记录的统一时间标尺。因此, 利用全球关键地区的海洋钻记录探讨两极冰盖的发育特征, 是检验南北两极冰盖是否同步发育的重要途径。从全球范围内看, 大西洋地区的轨道尺度记录最为完整。本文以大西洋地区大洋钻探站位的记录为主, 并结合南极 EDC 冰芯记录, 对 MIS 11~10 时期两极冰盖发育的同步性进行探讨。

北大西洋和南大西洋高纬度地区代表性钻孔的浮游有孔虫  $\delta^{18}\text{O}$ 、底栖有孔虫碳同位素  $\delta^{13}\text{C}$  和冰筏碎屑的变化<sup>[14-16]</sup> 以及  $\delta^{18}\text{O}$  SPECMAP 曲线<sup>[17]</sup> 和全球底栖有孔虫  $\delta^{18}\text{O}$  复合曲线

2019-02-28 收稿, 2019-03-23 收修稿

\* 国家自然科学基金项目(批准号:41625010, 41888101 和 41690114)资助

第一作者简介: 张浣荻, 女, 26 岁, 硕士研究生, 第四纪地质与古全球变化研究, E-mail: zhanghuandi@mail.iggcas.ac.cn

通讯作者: 郝青振, E-mail: haoqz@mail.iggcas.ac.cn

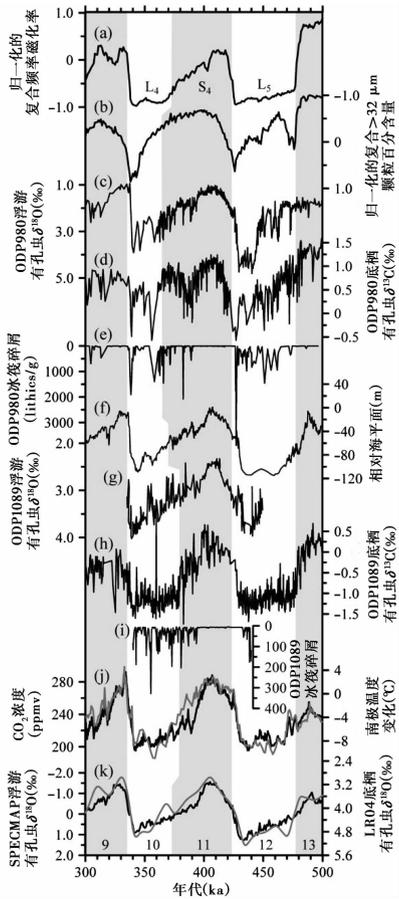


图 2 300~500 ka 期间黄土与深海和冰芯古气候曲线对比 (a)和 (b) 西峰驿马关和洛川黄土-古土壤剖面复合磁化率和复合粒度归一化曲线<sup>[3]</sup>, 正值分别指示东亚夏季风和冬季风增强; (c)~(e) 北大西洋 ODP980 站位的浮游有孔虫氧同位素  $\delta^{18}\text{O}$ 、底栖有孔虫碳同位素  $\delta^{13}\text{C}$  和冰筏碎屑含量曲线<sup>[14]</sup>; (f) 红海相对海平面变化重建综合曲线<sup>[19]</sup>; (g)~(i) 南大西洋 ODP1089 站位的浮游有孔虫  $\delta^{18}\text{O}$ 、底栖有孔虫  $\delta^{13}\text{C}$  和冰筏碎屑含量曲线<sup>[15-16]</sup>; (j) 南极洲 EDC 冰芯的距今温度变化曲线<sup>[20]</sup> (黑线) 和大气  $\text{CO}_2$ <sup>[21]</sup> (灰线); (k) 浮游有孔虫  $\delta^{18}\text{O}$  SPECMAP 曲线<sup>[17]</sup> (灰线) 和全球底栖有孔虫  $\delta^{18}\text{O}$  复合曲线 LR04<sup>[9]</sup> (黑线), 其图中数字为氧同位素阶段

图中阴影为氧同位素阶段定义的间冰期, 对应古土壤层, 其中在 MIS11/10 界线附近采用折线, 表示利用记录推测的南北两极冰期初始期不同步, 南极超前

Fig. 2 Comparison of East Asian monsoon proxy records in loess with marine and ice core records during 300~500 ka. (a) and (b) Stacked frequency-dependent magnetic susceptibility and stacked  $>32\ \mu\text{m}$ -particle content of Yimagan and Luochuan loess sections<sup>[3]</sup>, the high stacked values indicate strengthened East Asian summer monsoon and winter monsoon winds, respectively; (c)~(e) Planktonic  $\delta^{18}\text{O}$ , benthic  $\delta^{13}\text{C}$ , and ice rafted debris records at ODP980, North Atlantic<sup>[14]</sup>; (f) Composite Red Sea relative sea-level reconstruction<sup>[19]</sup>; (g)~(i) Planktonic  $\delta^{18}\text{O}$ , benthic  $\delta^{13}\text{C}$ , and ice rafted debris records at ODP1089, Subantarctic South Atlantic<sup>[15-16]</sup>; (j) Temperature anomaly records<sup>[20]</sup> (black) and  $\text{CO}_2$  concentration<sup>[21]</sup> (gray) from Antarctic EPICA Dome C; (k) Benthic  $\delta^{18}\text{O}$  stack LR04<sup>[9]</sup> (black) and planktonic  $\delta^{18}\text{O}$  stack SPECMAP records<sup>[17]</sup> (gray). The shaded areas indicate interglacial MIS stages and paleosol units, and changes in the boundary line around MIS11/10 transition indicate the different timing of local glacial inception in the two Polar regions. Numbers in (k) refer to MIS

LR04<sup>[9]</sup> 的对比如图 2c~2e、2g~2i 和 2k 所示。前已述及, 深海底栖有孔虫  $\delta^{18}\text{O}$  变化具有全球一致性, 而浮游有孔虫  $\delta^{18}\text{O}$  组成受区域海表环境的影响, 对南北半球高纬度地区的区域气候变化具有指示作用。从图 2c 可以看出, 北大西洋 ODP980 站位浮游有孔虫  $\delta^{18}\text{O}$  虽然在 MIS11 末期有小幅的增加, 并且偶尔出现了短暂的  $\delta^{18}\text{O}$  显著正偏事件, 但是整体仍保持在低值范围内波动, 甚至比该孔 MIS5a 时期的氧同位素值偏负<sup>[14]</sup>, 更接近于间冰期状态。冰筏碎屑的含量一般在冰期和冰消期较大<sup>[14]</sup>, 虽然它与冰量的变化不存在简单的线性关系, 但是对冰盖发育有重要指示作用。从 ODP980 记录可以看出, 虽然小规模冰筏碎屑从 MIS11 后期开始偶尔出现, 但是直到 360 ka 左右, 才开始显著增加<sup>[14]</sup> (图 2e)。

北大西洋深层流 (NADW) 是温盐环流表层流在北极海域下沉, 并在大洋底部向南流动的洋流。NADW 在间冰期强度大, 冰期强度小<sup>[18]</sup>。在北半球高纬度地区, ODP980 等海底深度  $<2300\ \text{m}$  站位的底栖有孔虫  $\delta^{13}\text{C}$  不受南大洋海水的影响, 主要受当地海表生物量变化引起的碳同位素分馏控制, 可以反映 NADW 的强度信息<sup>[18]</sup>, 在间冰期  $\delta^{13}\text{C}$  偏正。可以看出 MIS11 时期, ODP980 站位  $\delta^{13}\text{C}$  整体偏正的状态一直持续到 360 ka; 虽然在 385 ka 附近  $\delta^{13}\text{C}$  一度偏负, 但是该时段冰筏碎屑并没有明显的增加<sup>[14]</sup> (图 2e)。在赤道地区中等海深 (3000~4010 m) 站位的底栖有孔虫  $\delta^{13}\text{C}$  偏正的状态也持续到 360 ka 左右<sup>[18]</sup>。因此, 由图 2b~2e 可以看出, MIS11~10 的北半球的间冰期状态可以持续到 360 ka 左右<sup>[3,14]</sup>。

与北半球高纬度记录相反, 南大西洋高纬度的海洋证据没有显示在 MIS11~10 时期冰期发育滞后的现象。在 MIS11 后期和 MIS10 早期, 虽然 ODP1089 站位的浮游有孔虫 *G. inflata* 的  $\delta^{18}\text{O}$  也有频繁的波动, 但是整体偏正, 显示自约 380 ka 开始, 南极气候已经进入冰期状态<sup>[15]</sup> (图 2g)。冰筏碎屑活动开始的时间更早, 自 395 ka 就已经显著增加<sup>[15]</sup> (图 2i)。大西洋海底深度在 4035~4620 m 之间站位的底栖有孔虫  $\delta^{13}\text{C}$  主要受南大洋海水的影响<sup>[18]</sup>, ODP1089 站位的  $\delta^{13}\text{C}$  记录指示, 在 380 ka 左右南大洋地区快速进入冰期状态<sup>[16]</sup> (图 2h)。

海平面变化和冰芯的证据对理解冰期初始期南北两极不同步也有一定的启示。红海 GeoTü-KL09 等站位相对海平面变化的综合曲线<sup>[19]</sup> 指示 (图 2f), 直到约 370 ka 全球海平面仍处在较高的水平, 可能与北极冰盖滞后增长, 大陆冰盖增长幅度较小有关; 图 2j 显示自约 390 ka 开始南极地区的气温已经降至冰期水平<sup>[20]</sup>。另外, 一个值得关注的现象是, 从大气  $\text{CO}_2$  浓度与温度的耦合变化看, MIS11~10 是一个非常特殊的时期, 南极温度已经降至冰期水平, 但是大气  $\text{CO}_2$  还维持在较高的浓度<sup>[20-21]</sup>。由于该记录来自同一冰芯沉积, 两个信号之间的差异不可能是年代误差引起的。在过去 8 个冰期-间冰期旋回的各个冰始期附近, 这两个信号的不同步变化仅在 MIS11/10 时期最为显著。这似乎表明, 此时较高的大气  $\text{CO}_2$  浓度不足以阻止 MIS11~10 时期南极地区的降温。上述温度与大气  $\text{CO}_2$  浓度非同步变化的原因

和机制是今后 MIS 11 研究值得关注的问题。

由上述南北半球高纬度地区深海证据的对比可以看出,在 MIS 10 初始期,南北半球进入冰期的时间是不同步的,这与米兰科维奇理论有明显的差异。米兰科维奇理论<sup>[10]</sup>的重要内容之一是,南北半球冰期-间冰期是同步的;北半球的冰盖变化通过对洋流和大气环流等要素的影响,传递到南极地区,使得南北半球冰期旋回同步变化。虽然米氏理论被广泛接受,但也有学者基于冰消期的证据,提出末次冰消期在南极高纬度地区发生稍早或者受南极当地的太阳辐射控制<sup>[22]</sup>。最近,基于对 MIS 14 的全球集成研究,我们提出 MIS 14 是由南极驱动进入冰期的,原因是当时南极夏季太阳辐射和地轴斜率同时到达最低值;类似的轨道参数配置也出现在 MIS 10、18 和 20 时期,可能在这些冰期初始期也存在南极驱动的现象<sup>[23]</sup>。关于 MIS 14 时期南极驱动的观点已经引起部分学者的注意<sup>[24-25]</sup>,但是由于 MIS 10 时期太阳辐射降低幅度比 MIS 14 时期小<sup>[3,23]</sup>,如何理解 MIS 10 初始期地球轨道要素配置对南极冰盖变化的影响仍需进一步考虑。本文的结论主要是根据深海和南极冰芯证据得出的,需要数值模拟等工作的进一步检验。

## 参考文献 (References):

- [1] Droxler A W, Poore R Z, Burckle L H. Earth's Climate and Orbital Eccentricity: The Marine Isotope Stage 11 Question[M]. Washington DC: American Geophysical Union, 2003: 1-236.
- [2] Ding Z, Liu T, Rutter N W, et al. Ice-volume forcing of East Asian winter monsoon variations in the past 800,000 years[J]. Quaternary Research, 1995, 44(2): 149-159.
- [3] Hao Q, 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.
- [4] Xiong S, Ding Z, Liu T. Climatic implications of loess deposits from the Beijing region[J]. Journal of Quaternary Science, 2001, 16(6): 575-582.
- [5] Ding Z L, Derbyshire E, Yang S L, et al. Stacked 2.6-Ma grain size record from the Chinese loess based on five sections and correlation with the deep-sea  $\delta^{18}\text{O}$  record[J]. Paleoceanography, 2002, 17(3): 5-1-5-21.
- [6] Wu G, Pan B, Guan Q, et al. Terminations and their correlation with solar insolation in the Northern Hemisphere: A record from a loess section in Northwest China[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2005, 216(3-4): 267-277.
- [7] Sun Y, Clemens S C, An Z, et al. Astronomical timescale and palaeoclimatic implication of stacked 3.6-Myr monsoon records from the Chinese Loess Plateau[J]. Quaternary Science Reviews, 2006, 25(1-2): 33-48.
- [8] Sun Y, Chen J, Clemens S C, et al. East Asian monsoon variability over the last seven glacial cycles recorded by a loess sequence from the northwestern Chinese Loess Plateau[J]. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 2006, 7: Q12Q02. doi: 10.1029/2006GC001287.
- [9] 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. doi: 10.1029/2004PA001071.
- [10] Milankovitch M K. Kanon der Erdbestrahlung und seine Anwendung auf das Eiszeitenproblem[M]. Belgrad: Königlich Serbische Akademie, 1941: 1-633.
- [11] Vandenberghe J, An Z S, Nugteren G, et al. New absolute time scale for the Quaternary climate in the Chinese loess region by grain-size analysis[J]. Geology, 1997, 25(1): 35-38.
- [12] Lu H, Zhang F, Liu X, et al. Periodicities of palaeoclimatic variations recorded by loess-paleosol sequences in China[J]. Quaternary Science Reviews, 2004, 23(18-19): 1891-1900.
- [13] Guo Z T, Berger A, Yin Q Z, et al. Strong asymmetry of hemispheric climates during MIS-13 inferred from correlating China loess and Antarctica ice records[J]. Climate of the Past, 2009, 5(1): 21-31.
- [14] McManus J F, Oppo D W, Cullen J L. A 0.5-million-year record of millennial-scale climate variability in the North Atlantic[J]. Science, 1999, 283(5404): 971-975.
- [15] Hodell D A, Kanfoush S L, Venz K A, et al. The Mid-Brunhes Transition in ODP sites 1089 and 1090 (Subantarctic South Atlantic) [M]// Droxler A W, Poore R Z, Burckle L H eds. Earth's Climate and Orbital Eccentricity: The Marine Isotope Stage 11 Question. Washington DC: American Geophysical Union, 2003: 113-130.
- [16] Hodell D A, Charles C D, Sierro F J. Late Pleistocene evolution of the ocean's carbonate system[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2001, 192(2): 109-124.
- [17] Imbrie J, Hays J D, Martinson D G, et al. The orbital theory of Pleistocene climate: Support from a revised chronology of the marine  $\delta^{18}\text{O}$  record[C]// Berger A, Imbrie J, Hays J, et al. Milankovitch and Climate (Part 1). Dordrecht: D. Reidel, 1984: 269-305.
- [18] Lisiecki L E, Raymo M E, Curry W B. Atlantic overturning responses to Late Pleistocene climate forcings[J]. Nature, 2008, 456(7218): 85-88.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] WAIS Divide Project Members and WAIS D. P. Members. Onset of deglacial warming in West Antarctica driven by local orbital forcing[J]. Nature, 2013, 500(7463): 440-444.
- [23] Hao Q, Wang L, Oldfield F, et al. Extra-long interglacial in Northern Hemisphere during MISs 15 - 13 arising from limited extent of Arctic ice sheets in glacial MIS 14[J]. Scientific Reports, 2015, 5: 12103. doi: 10.1038/srep12103.
- [24] De Wet G A, Castañeda I S, DeConto R M, et al. A high-resolution mid-Pleistocene temperature record from Arctic Lake El'gygytyn: A 50 kyr super interglacial from MIS 33 to MIS 31? [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2016, 436: 56-63. doi: 10.1016/j.epsl.2015.12.021.
- [25] Hughes P D, Gibbard P L. Global glacier dynamics during 100 ka Pleistocene glacial cycles[J]. Quaternary Research, 2018, 90(1): 222-243.