冰期气候突变的高低纬同步性

张旭^{1,2*}, 刘小康³, 张炜晨¹

1. 兰州大学资源环境学院, 泛三极生态环境与气候变化前沿中心, 西部环境教育部重点实验室, 兰州 730000;

2. 中国科学院青藏高原地球科学卓越创新中心, 北京 100101;

3. 中国科学院青藏高原研究所, 中国科学院高寒生态重点实验室, 北京 100101

* 联系人, E-mail: zhangxu@lzu.edu.cn

Synchronicity of abrupt climate changes during the last glacial period

Xu Zhang^{1,2*}, Xiaokang Liu³ & Weichen Zhang¹

¹Key Laboratory of Western China's Environmental Systems (Ministry of Education), Center for Pan Third Pole Environment (Pan-TPE), College of Earth and Environmental Science, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China;

²Center for Excellence in Tibetan Plateau Earth Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

³Key Laboratory of Alpine Ecology, Institute of Tibetan Plateau Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

* Corresponding author, E-mail: zhangxu@lzu.edu.cn

doi: 10.1360/TB-2020-1201

一项最新发表在 *Science* 上的研究表明^[1], 北极格陵兰冰芯记录的末次冰期中发生的气候突变事件与中低纬度的气候变化是同时发生的。

由于积雪年复一年的堆积, 地球两极的格陵兰岛和南极大陆形成了厚厚的冰盖。冰盖中不同冰层间的微小气泡, 保留了当时大气的水分子和其他粒子, 为我们了解地质历史时期的地球古气候和古环境提供了独一无二的记录载体。例如, 气泡中的化学成分可以记录过去的温室气体(比如二氧化碳)的水平, 而火山灰或沙尘则暗示着强大的火山喷发或显著的全球干旱。它们像古生物化石, 勾勒出过去特定时段的古气候特征。因此, 从冰川或者冰盖中钻取的长冰芯记录, 为我们了解地球历史上发生过的复杂气候变化提供了一把钥匙。其中, 冰芯中氧同位素比值($\delta^{18}\text{O}$, 指质量数为 18 的氧原子所占比率与标准平均海洋水的偏差再乘以 1000)的变化, 与当地气温有着密不可分的联系^[2], 为我们重建过去大气温度的变化提供了可能。

格陵兰岛的冰芯钻孔记录了地球历史中的最后一次冰期旋回(即末次冰期, 时间范围为过去约 115~11.7 ka)。最早是由 Dansgaard 和 Oeschger 于 1982 年发现了冰芯 $\delta^{18}\text{O}$ 记录中一系列反复、剧烈的快速冷暖交替的信号, 在 1993 年再次确认后, 这一现象被命名为 Dansgaard-Oeschger (DO) 事件^[3]。在 DO 事件期间, 格陵兰岛的年均气温可在短短数十年内(人类寿命范围内)迅速升高 8~16°C, 当地气候进入一个相对暖的时期, 即间冰期; 之后温度逐渐下降, 最后迅速进入一个相对冷的时期, 即冰期。这一过程反映了

气候系统的非线性变化特征, 而 Broecker 和 Denton^[4]提出的大洋传送带动力机制过程来解释这一特征是目前较为主流的观点。

大洋传送带是一个理论上的贯穿全球各大洋的物质能量输运带, 其在大西洋的部分又名大西洋经向翻转流 (Atlantic meridional overturning circulation, AMOC), 可将赤道附近的低纬度大西洋甚至南半球的热量向北输送至大西洋北部及北海, 这些暖水在此失热后变重下沉, 形成北大西洋底层水, 再经大西洋底部流回南大洋。因此, AMOC 的减弱或停滞将导致北半球高纬度地区的变冷和南半球的变暖, 由此引起南北半球经向(沿经线方向)温度梯度的变化, 使得热带辐合带(intertropical convergence zone, ITCZ)(雨带)位置南移, 并导致北半球夏季降水减少、南半球降水增多。如果实际情况与理论推测一样, 那么格陵兰的温度变化与 ITCZ 相关的降水应该有几乎同步的响应。但这一推测目前仍缺少可靠的证据, 主要难点在于如何确定格陵兰 DO 事件与中低纬度地区的气候变化是否同步。

为了验证二者的同步性, 需要分别从高纬和低纬地区获得足够多且精确定年的古气候记录, 分析它们在 DO 事件发生时的先后顺序。虽然现在有大量公开发表的冰芯、海洋沉积物等古气候记录, 但它们因为定年误差偏大, 并不适用于该方面的研究。

在岩溶(或喀斯特)地区广泛发育的洞穴沉积物是研究以上科学问题的良好载体。洞穴内部的次生碳酸盐, 包

括钟乳石和石笋等,是由洞穴顶部裂隙中渗透而下的滴水(含有碳酸氢根离子和氢离子)在洞穴内部的滴水点缓慢沉积碳酸钙而形成.石笋沉积过程中会随着时间的形成旋

回层(层理),其氧同位素($\delta^{18}\text{O}$)信号可用来大致反映碳酸钙生成时的洞穴内部温度和大气降水同位素变化.更重要的是,这些沉积物(岩)可使用一种称为铀钍定年的放射性

图 1 DO 事件发生时全球不同地区的气候响应^[1]. (a) 根据洞穴石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录集成所得的两个季风区(亚洲夏季风(ASM)与南美季风区(SAM), 蓝色), 以及欧洲和两个季风区(欧洲-地中海(EM)与季风区, 红色)之间的空间年龄偏移量的概率分布函数(PDFs), 以及先前发表的南极 WAIS 冰芯 $\delta^{18}\text{O}$ 记录与北极 NGRIP 冰芯

$\delta^{18}\text{O}$ 记录之间的偏移量(棕色)^[13]. (b)~(k) DO 期间模型注水实验的气候变化, 每条曲线均表示相对于模拟数据平均值的差异变化. (b) 北大西洋经向翻转流(AMOC)指数(定义为北大西洋 45°N 以北 300~1500 m 水域经向流函数的最大值); (c) NGRIP 冰芯钻孔所在位置的表层年均气温(NGRIP MAT); (d) 欧洲-地中海地区的表层年均气温(30°~45°N, 25°~40°E)(EM MAT); (e) 东亚地区(20°~30°N, 108°~120°E)年均降水量; (f) 印度地区(25°~35°N, 75°~85°E)年均降水量; (g) 南美地区(5°~10°S, 30°~75°W)年均降水量; (h) 热带-亚热带大西洋(5°~30°S, 60°W~10°E)年均海平面温度; (i) 反映海平面气压从 20°~90°S 变化的南半球环状模态指数; (j) 南大洋(55°~75°S, 60°W~10°E)年均海平面温度; (k) 南极大陆西部(75°~82°S, 90°~135°W)表层气温, 可代表 WAIS 冰芯位置上空的气温. 黄色阴影表示大气对大西洋 ITCZ 开始向亚热带北大西洋迁移的快速响应期, 粉红色阴影表示 AMOC 和北半球变暖进一步加强时期, 蓝色阴影表示 AMOC 开始转变为间冰阶模式. 灰色曲线是原始模型输出序列, 其他彩色曲线为 11 年滑动平均后的序列. 黑色虚线为应用贝叶斯和最小二乘法对每条原始时间序列进行分析后导出的模式序列. (a)中年份是指每个概率分布函数的偏移年数; (b)~(k)中横坐标为模式年份, 第 1 年重置为除去淡水通量的年份. 因此, (a)中 NGRIP-WAIS 概率分布函数曲线相对于 (b)~(k)中的模式年份比例处于近似正确的位置

Figure 1 Spatial synchrony of climate changes during interstadial onsets^[1]. (a) Probability distribution function (PDFs) of spatial age offsets between the two monsoon regions (ASM minus SAM, blue) and between Europe and both monsoon regions (EM minus Monsoon, red) based on composite speleothem data. Also shown (brown) is the previously determined offset between the WAIS ice core $\delta^{18}\text{O}$ and NGRIP $\delta^{18}\text{O}$ ^[13]. (b)~(k) Simulated climate changes in a DO-type hosing simulation, each expressed as anomalies from the mean of the simulation. (b) AMOC index (defined as maximal meridional stream function at the water depth of 1500 to 3000 m north of 45°N in the North Atlantic). (c) Annual mean surface air temperature over the NGRIP drilling site (NGRIP MAT). (d) Annual mean surface air temperature over the Europe-Mediterranean region (30°~45°N, 25°~40°E) (EM MAT). (e)~(g) Mean annual precipitation over the Eastern Asian (20°~30°N, 108°~120°E) (e), Indian (25°~35°N, 75°~85°E) (f), and South American regions (5°~10°S, 30°~75°W) (g). (H) Annual mean sea-surface temperature (SST) in the tropical-subtropical South Atlantic (5°~30°S, 60°W~10°E). (i) Southern Annular Mode index reflecting changes in sea-level pressure from 20°~90°S. (j) Annual mean SST in the Atlantic sector of the Southern Ocean (55°~75°S, 60°W~10°E). (k) MAT over West Antarctica (75°~82°S, 90°~135°W) taken to be representative of the WAIS ice core site. Yellow shading indicates the period of fast atmospheric response in which the Atlantic ITCZ starts migrating toward the subtropical North Atlantic. Pink shading indicates the period of further strengthening of the AMOC and NH warming. Blue shading indicates the start of the AMOC interstadial mode. The gray series are raw model outputs, and the color series are 11-year running averages. The black dotted lines are model series derived from the application of a Bayesian, least-squares change-point analysis to each raw time series. For (b)~(k), the x axis shows model years, with year 1 reset to the year of the removal of the freshwater flux. For (a), the year scale refers to the age offset for each PDF. The NGRIP-WAIS PDF curve is therefore in its approximate correct position with respect to the model-year scale in (b)~(k)

同位素测试技术,精确地测定不同的沉积旋回形成时的绝对年龄^[5],且年龄误差远远小于同时期的冰芯和海洋沉积物记录.这为解答高、低纬气候变化的时间同步性提供了可能.

2020年8月21日, *Science* 在线发表了来自澳大利亚、法国、中国、丹麦、瑞士、英国的国际科研团队合作完成的最新研究成果^[1].该研究工作通过收集来自中低纬度地区的63个有较高时间分辨率和精确年龄框架的石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 古气候记录,结合南北极的冰芯数据,首次证实了高低纬气候系统在DO爆发时几乎是同步变化的,并进而发现石笋古气候记录的气候突变与模拟试验中区域气候对AMOC重启的响应具有很好的一致性(图1).这确认了AMOC变化是引起高低纬气候同步响应的主因,再次证实

了AMOC变化与过去气候突变事件之间密不可分的联系.

对于DO事件爆发后的全球气候响应,我们已经有了比较充分的认识,但相关的动力学过程仍有不确定之处.目前,解释AMOC变化的主流观点可分为两类:第一类强调AMOC的双稳态的特征^[6-9],即在同一气候背景下AMOC存在两种截然不同的气候态,此时AMOC对外力变化非常敏感,随机性的气候噪音就可能导致气候突变的发生;第二类强调AMOC本身具有自震荡的特征^[10-12],即在某一气候背景下,AMOC是不稳定的、震荡的,因此即使无外力的介入,气候突变依然可以发生.这两类观点在理论上给出了大西洋径向翻转流突变的动力框架,但遗憾的是,触发其变化的因素依然不清晰,这将是该领域未来研究的重点方向之一.

推荐阅读文献

- 1 Corrick E C, Drysdale R N, Hellstrom J C, et al. Synchronous timing of abrupt climate changes during the last glacial period. *Science*, 2020, 369: 963–969
- 2 Jouzel J. Water stable isotopes: Atmospheric composition and applications in polar ice core studies. In: Holland H D, Turekian K K, eds. *Treatise on Geochemistry*. 2nd Ed. 2014, 5: 213–256
- 3 Dansgaard W S, Johnsen J, Clausen H B, et al. Evidence for general instability of past climate from a 250-kyr ice-core record. *Nature*, 1993, 364: 218–220
- 4 Broecker W, Denton G. The role of ocean-atmosphere reorganization in glacial cycles. *Geochim Cosmochim Acta*, 1989, 53: 2465–2501
- 5 Cheng H, Edwards R L, Shen C C, et al. Improvements in ^{230}Th dating, ^{230}Th and ^{234}U half-life values, and U-Th isotopic measurements by multi-collector inductively coupled plasma mass spectrometry. *Earth Planet Sci Lett*, 2013, 371–372: 82–91
- 6 Stommel H. Thermohaline convection with two stable regimes of flow. *Tellus*, 1961, 13: 224–230
- 7 Ganopolski A, Rahmstorf S. Rapid changes of glacial climate simulated in a coupled climate model. *Nature*, 2001, 409: 153–158
- 8 Zhang X, Lohmann G, Knorr G, et al. Abrupt glacial climate shifts controlled by ice sheet changes. *Nature*, 2014, 512: 290–294
- 9 Zhang X, Knorr G, Lohmann G, et al. Abrupt North Atlantic circulation changes in response to gradual CO_2 forcing in a glacial climate state. *Nat Geosci*, 2017, 10: 518–523
- 10 Winton M. Deep decoupling oscillations of the oceanic thermohaline circulation. In: Peltier W R, ed. *Ice in the Climate System*. Berlin: Springer, 1993. 417–432
- 11 Peltier W R, Vettoretti G. Dansgaard-Oeschger oscillations predicted in a comprehensive model of glacial climate: A ‘kicked’ salt oscillator in the Atlantic. *Geophys Res Lett*, 2014, 41: 7306–7313
- 12 Brown N, Galbraith E D. Hosed vs. unhosed: Interruptions of the Atlantic Meridional Overturning Circulation in a global coupled model, with and without freshwater forcing. *Clim Past*, 2016, 12: 1663–1679
- 13 WAIS Divide Project Members. Precise inter polar phasing of abrupt climate change during the last ice age. *Nature*, 2015, 520: 661–665