

国外对 LGM 以来深海 岩心与冰岩心若干研究进展

任国玉

(北京师范大学地理系 100875)

提 要 介绍了近十年来国外 LGM 阶段以来深海岩心和冰岩心研究的主要成果, 评述了这些工作对过去全球环境演变研究的重要意义。

关键词 深海岩心 冰岩心 过去全球变化

近十年来, 国外对末次冰期极盛期(LGM)以来深海岩心和冰岩心的研究取得了一系列重要成果, 进一步增加了人们对这段时间全球环境演变历史的了解, 也为“过去全球变化研究”奠定了良好的基础。

1 深海岩心研究

在先前海底岩心 $\delta^{18}\text{O}$ 长时间序列分析基础上, 80 年代以来局部海区 LGM 后高频变化的研究及综合性研究又有一些新的发展。其中对墨西哥湾冰期 $\delta^{18}\text{O}$ 与大陆冰盖消融关系的研究、阿拉伯海涌升流区和孟加拉湾海区微体生物种类与季风变化关系的研究, 以及地中海静稳水层的研究等成果尤为引人注目。

晚冰期前段, 劳伦台冰盖冰融水通过密西西比河泄入墨西哥湾。这个事件必然对该海区海水 ^{18}O 相对含量产生影响, Leventer 等(1982)重新分析了墨西哥湾海底沉积岩心微生物介壳 $\delta^{18}\text{O}$ 的变化, 指出, 从 16ka B. P. 开始, $\delta^{18}\text{O}$ 值波动下降, 至 13ka B. P. 达最低, 然后又陡然上升, 到 12ka B. P. 已升至 LGM 阶段水平^[1]。这个波动可能真实地记录了排入墨西哥湾的劳伦台冰盖冰融水数量的变化。但是, 我们也能看到 13~12ka B. P. 阶段 $\delta^{18}\text{O}$ 的突然上升究竟与冰川暂时扩张有关, 还是与劳伦台冰盖冰融水改由圣劳伦斯河直接泄入大西洋有关? 这是尚未解决的问题。

目前, 在阿拉伯海西侧近岸地区海底表层沉积中, *Globigenina bulloides* 这一指示相对温凉高纬水域环境的种特别丰富, 这显然系夏季涌升流使表层水温降低所致, 而涌升作用又同西南季风强度密切相关。Prell(1984)发现, *G. bulloides* 相对丰度的最后一次高峰出现在 9000 a B. P., 而末次冰期极盛阶段丰度值却比较低^[2]。这一结果和 Kutzbach(1981)通过模式计算得

收稿日期: 1992-07-24, 修改稿: 1992-11-21

到的南亚夏季风在 9000 a B. P. 达到最强的结论完全一致。

在孟加拉湾,由于印度次大陆季风径流的作用使表层海水产生明显的盐度梯度。在北部的低盐海域,*Globogadriina dutertrei* 这种浮游有孔虫比较丰富。Gullen(1981)的工作表明,这种有孔虫丰度最大值出现在 11500 a B. P.,说明当时盐度最低,因而也反映那个时候泄入孟加拉湾的淡水是 LGM 以来最多的⁽³⁾。但是,这同前述 Prell 在阿拉伯海西部工作的结论相矛盾。笔者认为,这种不一致可能是由雅鲁藏布江—布拉马普特拉河在晚冰期承接了西藏东南部地区一部分冰川融水造成的。

东部地中海岩心浮游有孔虫 $\delta^{18}\text{O}$ 值在 9000 a B. P. 附近也是很低的,这可能反映了尼罗河注入东地中海的淡水当时较多。一些喜低盐度的有孔虫在那个时间高度富集独立地证实了这一结论⁽⁴⁾。尼罗河水量主要由发源于埃塞俄比亚高原的河流补给,而这个高原西侧的降水受来自几内亚湾的西南季风影响。因此,9000 a B. P. 东地中海表层盐度和 ^{18}O 的低值证明了撒哈拉沙漠以南的夏季风增强了。考虑到来自阿拉伯海西侧海底岩心的证据,我们可以认为,北非和南亚季风区夏季风强度对地球轨道参数变化的影响应在时间上具有一致性。

Moore 等(1981)根据深海岩心微体生物资料计算了现代与 LGM 阶段之间的群组相似性指数(faunal similarity index),表明冰期海洋生物组成同现代的差异在各大洋的中纬度地区最为明显,而副热带和赤道水域相似性指数均较高。但低纬海洋的东部边界流区冰期与目前差异较多,表现为一些喜冷水种向赤道迁移。这说明低纬大洋寒流及涌升作用在 LGM 时是更强大的⁽⁵⁾。阿拉伯海西侧在盛冰期也出现一个相似指数较小区域,这是否由涌升流强度变化所引起尚不清楚。

Ruddiman 和 McIntyre(1981)对海底岩心有孔虫的研究表明,晚冰期发生在西北欧和北美东北沿岸的迅速气候波动在北大西洋温度上也有明确显示。在 13000 a B. P. 之前,北大西洋极峰处于 40°N 以南。从 13000 a B. P. 开始,极峰迅速北移至接近于今天的位置。但约在 11000 a B. P. 它又突然返回到接近 45°N 的南方,在那里停留了至少几百年,然后才重新向高纬推移。在 6000—9000a B. P.,北大西洋极峰位置比今天还靠向西北⁽⁶⁾。

Anderson 等(1990)对加利福尼亚岸外大陆坡海底晚更新世岩心的研究把纹层和生物扰动层交替现象与类似 ENSO 的长期海—气变化联系起来。他们认为,反厄尔尼诺条件表现为涌升流增强,表层生产量增加,但在底层氧最小值带溶解氧将减少,这有利于纹层保存;另一方面,厄尔尼诺事件将伴随着涌升作用减弱和表层生产量下降,而底部溶解氧会增加,底栖生物扰动加强。这样,纹层和扰动层的交替可能代表了比年际波动频率更低的长时间尺度上 ENSO 现象的重现。这种和 ENSO 相联系大洋东部边界流区生产量的长期波动可能具有所谓“碳泵”(Carbon Pump)作用,把大气 CO_2 吸入海洋储库⁽⁷⁾。海底岩心的这个新研究方向对于深入理解海洋、大气和生物圈相互作用机制无疑具有重要意义,同时它也是近年国外地球科学各分支部门日趋联合的一个生动体现。

2 冰岩心研究

冰岩心可以提供丰富的区域和全球环境演变信息。过去的大气温度、降水、大气组成、火山活动、陆源尘埃等均可以在冰岩心内得到反映。

目前为止,超过 15000 年的冰岩心定代问题尚未完全解决,但 LGM 以后的年代确定还

是足够精确的。因此,冰岩心资料对于研究晚冰期和全新世环境演变规律是特别有用的。

南极的三个冰岩心(Vostok, Byrd 和 Dome C)已经钻到了末次冰期的沉积层,其中 Vostok 站冰心达到 16 万年以前。在这几个冰岩心中,LGM 以来的 $\delta^{18}\text{O}$ 变化非常相似。LGM 阶段年平均温度比全新世平均水平低 $8\sim 9^\circ\text{C}$ (Lorius, 1989)^[8]。在晚冰期的急剧升温过程中,11000 a B. P. 开始的短暂温度逆转可能相当于北大西洋地区的新仙女木事件。

在格陵兰的 Camp Century 和 Dye 3 站冰岩心中, $\delta^{18}\text{O}$ 记录揭示 LGM 阶段年平均气温降低幅度比南极地区还大,分别达 16°C 和 10.5°C ^[8],同时 LGM 到全新世过渡阶段的迅速波动也更为明显。据 Dansgaard 等,这期间气温在 50 年内可能发生了约 7°C 的变化^[9]。格陵兰和南极的冰岩心和 $\delta^{18}\text{O}$ 记录表明,南北两个半球 LGM 以来的主要温度变化趋势是一致的。

微粒分析反映出冰期大气粉尘含量比全新世高得多,粉尘含量曲线与 $\delta^{18}\text{O}$ 曲线位相相反。南极大陆上空 LGM 阶段陆源微粒含量至少为全新世水平的 8 倍,而海源微粒比全新世高出 $1\sim 2$ 倍(Lorius, 1989)^[8]。在格陵兰,盛冰期大气尘粒含量变化同南极记录相似,波动幅度甚至更大一些(Bradley, 1985)^[10]。这可能反映 LGM 陆地干燥程度加强了,同时海洋微粒的增加也证明当时大气环流强度和风速显著增大。由于大气粉尘含量在 LGM 之前的冰期内并不都是高的,因此,已经排除了它是冰期气候起因的可能性^[10]。

80 年代冰岩心研究最重大的成就当属大气 CO_2 含量长期波动事实的发现。根据来自 Camp Century、Byrd 站冰岩心气泡中空气成分的分析,LGM 大气 CO_2 水平为 $190\sim 200\text{ppm}$,而全新世平均水平为 $270\sim 280\text{ppm}$ (Neftel et al., 1982)^[11]。研究还发现,晚冰期格陵兰 Dye 3 冰岩心 CO_2 含量曾在 13000 a B. P. 明显增加,约为 300ppm ,并与 $\delta^{18}\text{O}$ 指示的第一次升温过程一致。在新仙女木阶段, CO_2 似乎也下降了,以后则重新增加,并达到全新世较高水平 (Oeschger et al., 1982)^[12]。已经证实,大气甲烷浓度也发生了类似于 CO_2 的波动^[8]。

这些研究结果对于深入理解全球环境演变机制具有极为重要的意义。米兰柯维奇理论在解释冰期及冰后期南、北两半球气候变化的同时性方面遇到了困难,因为地球轨道参数改变在使一个半球的某个季节太阳辐射减少的同时,它也使另一半球同样季节内太阳辐射增加(Lookwood, 1985)^[13]。南、北两半球海陆分布的不同及其由此引起的气候大陆性强弱的差别在一定程度上说明了米氏理论与观测事实不一致的原因(任国玉, 1991)^[14]。冰岩心研究表明,地球环境系统不同变量之间的相互作用可能是更复杂的。LGM 阶段以后在轨道参数因素使北半球夏季变暖的同时,冰盖消融引起的反射率减小,伴随增温出现的 CO_2 等温室气体的增加,以及大气粉尘含量的相应下降等,可能都一致地使变暖过程增幅,并使得增温信号向南半球传播。Oeschger 等(1982)认为, CO_2 可能提供了半球间耦合的部分原因^[12]。Lorius 等(1990)则通过计算认为南极 Vostok 站温度变化的 $40\sim 50\%$ 可能是由 CO_2 和 CH_4 温室效应贡献的。余下的大部分则可以从北半球辐射-冰盖的反馈影响予以解释^[15]。

CO_2 长期变化的机制尚不完全清楚,但已经提出若干假说。其中一个假说把 CO_2 变化和海洋环流及海洋生物量随气候的变化联系起来。南大洋海冰区秋季结冰过程中特有的海水上下混合作用可能使那里成为大气 CO_2 的一个重要的汇(Budd, 1991)^[16]。如果是这样,晚冰期增暖过程中南大洋海冰分布范围的缩小可能已经减弱了那里的垂直混合作用,使海洋吸收的 CO_2 减少。另一方面,原来由于这种混合作用进入到深层的溶解氧也减少,这将进而使全球大洋其它地区的生物量受到影响,导致海洋生物对大气 CO_2 的固定作用降低。大气 CO_2 的增加使得地球轨道参数变化和冰盖本身反馈作用引起的全球增温进一步增幅。

进入全新世以后,冰岩心记录反映出 $\delta^{18}\text{O}$ 、 CO_2 和粉尘含量等变化幅度均比较小。 $\delta^{18}\text{O}$ 记录表明全新世之初南极大陆气温是较暖的。这在 Dome C 和 Vostok 站尤其明显(Lorius, 1989)^[17]。Petit 等(1990)根据对 Dome C、Vostok 和 Komsomlskaia 站冰心资料分析认为,东南极地区在 10000 a B. P. 左右最暖,最冷时期在 6000 a B. P. 前后和 1500 a B. P. 前后^[18]。早期发表的格陵兰 Camp Century 资料也表明全新世前半段气温略高,但最高值不象南极那样出现在全新世初,而是约在 8000~5000 a B. P. (Dansgaard et al., 1971)^[17]。这可能反映了北美和西北欧全新世初残余冰体存在对北大西洋地区早全新世增暖的一种滞后影响。

Camp Century 冰岩心记录表明,5000~9000 a B. P. 大气 CO_2 含量比后来高(Neftel et al., 1982)^[11];在 2500~4500 a B. P. 之间一般较低;1000~2500 a B. P. 又相对高;1000a B. P. 以后,特别是小冰期 CO_2 含量再度降低。可以看到,Camp Century 冰心记录的大气 CO_2 含量波动同目前恢复的全新世温度变化存在着较好的对应关系。

祁连山敦德冰岩心分析证实全新世初或晚更新世末(12000 a B. P.)粉尘含量迅速下降,近一万年内粉尘水平的波动远较 LGM 为小,但相对高值阶段有 9000~10000 a B. P., 6000~7000 a B. P. 和 3000 a B. P. 以后,其中 1000 a B. P. 至现在粉尘含量是近 12000 年来最高的(Thompson, 1989)^[19]。敦德冰岩心 $\delta^{18}\text{O}$ 的几个相对低值出现在 7000~9000 a B. P., 5000~6000 a B. P. 和 1000~2000 a B. P.^[19]。因此 $\delta^{18}\text{O}$ 反映的相对冷期似乎和低粉尘含量阶段对应,而暖期则对应着高粉尘含量段!根据姚檀栋和谢自楚(1991),敦德冰岩心微粒含量峰值出现于从春季初到夏末的雪层中,这和当地沙暴、浮尘和大风频率峰值在一年出现时间一致^[20]。12000 a B. P. 以来祁连山地区温度与粉尘含量的这种配置关系证明,全新世千年时间尺度上大气粉尘含量的增加主要是由西北内陆春夏季节更高的地表气温引起较强的对流性扰动造成的。在冰期和间冰期这样长时间尺度变化上,粉尘含量与温度呈反相关联系,即冰期对应高粉尘含量,间冰期对应低粉尘含量。笔者认为,这可以用冰期和冰后期气候系统处于两种截然不同的模态(modes)来解释。因此,冰期大气粉尘集中的体制可能是不同于全新世的。

冰岩心记录对揭示南半球缺乏历史文献记载地区近 2000 年来气候变化规律特别有意义。秘鲁 Oueklaya 冰岩心和南极点冰岩心均清楚地显示了 1530 年至 1900 年这段时间 $\delta^{18}\text{O}$ 的较负数值,说明在南极内陆和安第斯山脉地区存在小冰期的降温过程(Thompson, 1989)^[21]。这两个冰心粉尘分析也表明在相当于小冰期的这段时间有所增加。但来自南极半岛 Siple 站的资料却没能反映出小冰期信号^[21]。

敦德冰岩心本世纪 $\delta^{18}\text{O}$ 变化指示近 60 年来气候已显著增暖,其中 40、50 和 80 年代是最暖的几个 10 年^[21,22]。Thompson(1989)建议,这也许显示出亚洲大陆内部对大气 CO_2 增加的响应是比较强烈的^[21]。

参 考 文 献

- [1] Leventer A et al. Dynamics of the Laurentide ice-sheet during the last deglaciation. *Earth Planet Sci Lett*, 1982, (59): 11-17.
- [2] Prell W L. Monsoon climate of the Arabian Sea during the last Quaternary. In: Berger A L et al(eds). *Milankovitch and Climate, Part I*, 1984. 349-366.
- [3] Gullen J L. Microfossil evidence for changing salinity patterns in the Bay of Bengal over the last 20000 years. *Paleogeogr Pa-*

- leocli *Paleoeco*, 1981, (35): 315—356.
- [4] Ruddiman W F. Climate studies in ocean cores. In: Hecht (ed). *Paleoclimate Analysis and Modeling*. John Wiley & Sons, 1985. 207—214.
- [5] Moore T C et al. The biological record of the ice—age ocean. *Paleogeogr Paleocli Paleoeco*, 1981, (35): 357—370.
- [6] Oeschger H. The ocean system; Ocean/climate and ocean/CO₂ interactions. In: Rosswall et al (eds). *Scales and Global Change*. John Wiley & Sons Ltd, 1988. 319—351.
- [7] Anderson R Y et al. Expression of seasonal and ENSO forcing in climatic variability at lower than ENSO frequencies; Evidence from Pleistocene marine varves off California. *Paleogeogr Paleocli Paleoeco*, 1990, (78): 287—300.
- [8] Lorius C. Polar Ice Cores; A record of climate and environmental changes. In: Bradley R S (ed). *Global Changes of The Past*. UCAR/Office for Interdisciplinary Earth Studies. Boulder, Colorado, 1989. 261—294.
- [9] Dansgaard W et al. The abrupt termination of the Younger—Dryas climate event. *Nature*, 1989, (339): 532—534.
- [10] Bradley R S. *Quaternary Paleoclimatology*. Allen & Unwin, Boston, 1985. 120~169.
- [11] Neftel A et al. Ice core sample measurements give atmospheric CO₂ content during the last 40000 years. *Nature*, 1982, (295): 220—223.
- [12] Oeschger H et al. Late—glacial climate history from ice cores. In: Ghazi A (ed). *Paleoclimatic Research and Models*. Report and Proceedings of The Workshop. Brussels, Dec 15—17, 1982, D Reidel Publishing Company. 95—107.
- [13] Lockwood J C. *World Climatic Systems*. Edward Arnold, London, 1985, 111—112.
- [14] 任国玉. 太阳辐射与气候变化. *地球科学进展*, 1991, 6(6): 37—41.
- [15] Lorius C et al. The ice core record; climates sensitivity and future greenhouse warming. *Nature*, 1990, (347): 139—145.
- [16] Budd W F. Antarctica and Global Change. *Climatic Change*, 1991, (18): 271—299.
- [17] Lorius C J. Polar ice cores and climate. In: Berger A et al (eds). *Climate and Geo—Sciences*. Kluwer Academic Publishers, 1989. 77—103.
- [18] Petit J R et al. Holocene climate records from Antarctic ice. *Annals of Glaciology*, 1990, (14): 354.
- [19] Thompson L G et al. Glacial stage ice—core record from the subtropical Dunde Ice Cap, China. *Annals of Glaciology*, 1990, (14): 288—297.
- [20] 姚檀栋, 谢自楚. 敦德冰岩心研究及其意义. *中国西部第四纪冰川与环境*, 科学出版社, 1991. 24—32.
- [21] Thompson L G. Ice—core records with emphasis on the global record of the last 2000 years. In: Bradley R S (ed). *Global Changes of The Past*. UCAR/Office for Interdisciplinary Earth Studies. Boulder, Colorado, 1989. 201—224.
- [22] 谢自楚等. 敦德冰岩心古气候环境记录的初步研究. *第四纪研究*, 1989, (2): 135—140.

RESEARCH PROGRESSES ABROAD IN OCEAN AND ICE CORES SINCE THE LAST GLACIAL MAXIMUM

Ren Guoyu

(*Department of Geography, Beijing Normal University, Beijing 100875*)

Abstract

Some major results and progresses from abroad in the studies of ocean and ice cores representing the last 18000 years have been reviewed. The importance of the works in the research of Global Changes of the Past has been discussed.

Key words: Ocean core, Ice core, Global Changes of the Past