

末次冰期 Heinrich 事件研究进展

Research progress of Heinrich events in the last glacial

江波^{1,2}, 李铁刚¹, 孙荣涛³, 赵京涛^{1,2}

(1. 中国科学院海洋地质与环境重点实验室, 山东 青岛 266071; 2. 中国科学院 研究生院, 北京 10039; 3. 山东理工大学 资源与环境学院, 山东 淄博 255049)

中图分类号: P532

文献标识码: A

文章编号: 1000-3096 (2007) 11-0073-05

随着全球变化问题研究的深入, 末次冰期一系列数百至数千年时间尺度的气候突变事件逐步进入人们的视野并快速引起了广泛重视, 对 300 ka 特别是近 130 ka 以来气候波动事件的研究成为近年来古气候研究的热点, 也是进展最快的研究主题之一, 例如 Heinrich 事件^[1]、Dansgaard-Oeschger 旋回^[2]和 Younger Dryas^[3]事件等。人们企图通过高分辨率的沉积记录来获取更为准确的信息, 以探求 Heinrich 事件在全球的响应及驱动机制等问题。作者综述了近年来在 Heinrich 事件上取得的研究进展。

1 Heinrich 事件发现起因和研究历程

1988 年, Heinrich 发表了关于北大西洋东部 Dreizack 海沉积物岩芯的研究成果, 发现末次冰期北大西洋岩芯中常包含数层(一般为 6 层)陆源冰漂碎屑含量增多的沉积物, 意味着末次冰期有数次大量冰川倾注进北大西洋^[1], 然而当时并没有引起人们的重视。后来, Bond 等^[4]通过对距离前者几千公里远的取样岩芯进行研究, 发现了同样的沉积记录, 伴随着温度和盐度的降低, 有孔虫数量的急剧减少, 并认为冰川融化所产生的新鲜水注入可能破坏了大西洋深层水的组成。这一结论很快引起了古气候联合会的关注, 人们的视线才重新聚集在波动的冰盖和北大西洋温盐环流向北运输热量之间的耦合关系研究上。

根据沉积层中碳酸盐的存在和非碳酸盐屑的地球化学特征, 可以推断 Heinrich 事件的冰山主要来源于劳伦泰德 (Laurentide) 冰盖, 但不是全部, 冰漂碎屑有着更广泛的冰川物源, 这一发现对冰漂事件的

气候驱动机制提供了重要证据^[5-6]。在北大西洋, Heinrich 沉积层表现出两个显著特征: 第一, 富含快速堆积的碳酸盐碎屑; 第二, 所有的 6 个 Heinrich 事件沉积物都包含低温表层水, 低浮游有孔虫通量和低盐度证据^[4]。Heinrich 事件以北大西洋发生大规模的冰川漂移事件为标志, 代表大规模冰山涌进的气候效应而导致气候快速变冷事件^[7-8]。在整个末次冰期的气候背景下, 北大西洋共发生了 6 次人的 Heinrich 事件, 其时代依次为 60 000 aB.P., 50 000 aB.P., 35 900 aB.P., 30 100 aB.P., 24 100 aB.P. 和 16 800 aB.P.^[7]。

对格陵兰冰芯的研究发现, 末次冰期内该地区的气候发生了一系列千年级的、快速的、大幅度的冷暖变化事件, 即 Dansgaard-Oeschger 事件, 也称 Dansgaard-Oeschger(D-O)旋回。根据格陵兰的冰芯记录, 几次大的 Heinrich 事件使大气温度在冰期气候条件下又降低 3~6 °C^[2], 这些事件基本上以 5 000~10 000 a 为周期, 持续的时间为 200~2 000 a^[9]。它发生在 D-O 旋回中的最冷期, 代表上一次的旋回的结束, 随后的变暖又代表新的旋回的开始, 这说明 Heinrich 事件与 D-O 旋回并不是两个孤立的气候演变过程^[10]。

佛罗里达地区孢粉分析表明^[11], 在湖泊沉积中也

收稿日期: 2006-09-09; 修回日期: 2007-04-24

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (90411014); 国家自然科学基金项目 (40506015)

作者简介: 江波 (1981-), 男, 湖北天门人, 硕士研究生, 主要从事古海洋学研究, 电话: 0532-82898531, E-mail: bjiangh@163.com

有对应于 Heinrich 事件变冷的记录; 同样, 格陵兰冰岩芯高分辨率多变量化学分析也发现了类似于 Heinrich 事件的气候波动^[12], 此外中国的黄土中也有类似的记录。这些研究说明 Heinrich 事件不仅仅局限于北大西洋深海沉积物岩芯记录中, 它也许是北半球末次冰期气候中的气候振荡事件。

古气候记录的基本资料都支持冰期时的热带躲过了曾肆虐高纬地区的寒冷气候^[13]这一观点, 因而人们普遍认为 Heinrich 事件一般应该发生在中高纬度地区。但 Thompson 等^[14]在热带安第斯山约 6 000 m 处左右钻取的冰芯中的 $\delta^{18}\text{O}$ 研究结果不仅支持了以雪线变化为基础的结论(即冰期时山区的温度比现在低 5 °C), 同时说明, 热带地区在冰期时可以变得很冷。南海南部 NS-93 孔数据^[15]进一步证明了 Heinrich 事件在低纬度地区的响应。此外, 来自赤道大西洋^[16]、红海^[17]、孟加拉湾^[18]、中国热带湖泊古气候记录也显示了低纬度气候对高纬度区域的快速响应。

2 Heinrich 事件在不同研究对象中的记录及响应

2.1 H 事件在冰芯中的沉积记录

姚檀栋等根据对古里雅冰芯和格陵兰冰芯的对比研究, 认为末次冰期中的气候突变并不是大西洋地区的独特事件, 这种气候变化特征在青藏高原不但存在, 而且更为明显, 古里雅冰芯所处的青藏高原对气候的反应较格陵兰地区敏感。三极地区冰芯记录对比研究表明, 大的气候变冷事件在全球具有一致性, 但各气候事件的变幅和小的气候事件具有区域性。此外古里雅冰帽顶部矗立于对流层中上部, 直接记录大气过程的变化, 对气候变化的敏感性比同地区的其他记录更强^[13,19]。

2.2 H 事件在黄土中的沉积记录

中国黄土高原中部黄土的粒度记录表明亚洲冬季风受到了明显的影响, 表现为对 Heinrich 冷事件的明显响应^[20,21]。吕连清等^[22]测定了甘肃合作盆地剖面黄土的磁化率以及粒度值, 发现 8 个明显的粒度变粗事件, 认为北半球高纬度气候变化系统对如此高海拔的青藏高原地区的冬季风也产生了深刻影响, 而高纬度地区冷事件对高原冬季风的影响程度比暖事件强。郭正堂等^[23]研究黄土磁化率发现, Heinrich 事件在东亚季风区有明显的印记, 并且 H 事件不仅仅影响冬

季风, 而且还影响夏季风。吕厚远等^[24]通过对比黄土高原与南海陆架古季风演变的生物记录与 Heinrich 事件之间的关系, 发现深海氧同位素的变化代表了全球冰量的变化, 全球冰量变化是控制冬季风强弱的最直接因素。全球冰量通过冬季风等因素在“轨道尺度”上可能影响了夏季风对特定地区的控制时间, 从而控制了黄土区气候的年均状况, 但没有影响夏季风固有的变化周期和振幅^[13]。鹿化虞等^[21]通过粒度、碳酸盐含量等代用参数曲线与北大西洋进行对比, 发现 Heinrich 事件记录了末次冰期北半球冰量(至少是 Laurentide 冰盖)的扩张过程, 北半球冰量的波动影响西伯利亚-蒙古高压波动, 从而导致东亚冬季风气候波动, 因此至少可以说东亚冬季风的加强与北半球冰量变化有更直接的关系, 它的波动受控于北半球气候控制下的冰量波动。

2.3 Heinrich 事件在深海沉积物中的沉积记录

冲绳海槽浮游有孔虫组合记录、古海水温度记录以及氧同位素记录显示末次冰期 Heinrich 事件在冲绳海槽中部 DGKS9603 孔留下了强烈的印记^[25, 26], 这是 Heinrich 事件首次在冲绳海槽地区发现。南海 NS-93-5 柱状样高分辨率沉积序列和氧同位素地层剖面表明, 近 200 ka 来南海南部与北极地区存在着古气候的遥相关和西太平洋暖池的不稳定性^[27]。南海南部 NS-93 孔磁化率数据显示, H1 到 H6 其对应的磁化率均为低值, 磁化率大小的变化, 反映了南海南部 200 ka 以来气候的暖、冷旋回, 磁化率的相对高值代表了气候的暖期^[15]。最近, 南海北部地区 MD97-2194 孔陆源复合指标显示, 高的陆源输入间断同 Heinrich 事件是紧密相关的, 从而识别出 H1 和 H2 事件在南海北部地区的存在^[28]。汤贤赞等^[29]通过分析西太平洋暖池区中心 WP92-5 柱样沉积物磁性地层学磁化率和 $\delta^{18}\text{O}$ 值, 获得了布容正极性期内哥德堡、莫诺湖(Mono Lake)和蒙哥(或 Maelifell)3 个短暂的地球磁场漂移, 发现 Heinrich 层中的 H1, H2 和 H3 事件与大西洋中部 SU90-09 柱样沉积物磁化率所记录的 H1, H2 和 H3 冷事件具有较好的对应关系, 表明磁化率的变化可能是气候频繁颤动特征在大洋沉积中的一个重要标志。

2.4 H 事件在石笋中的沉积记录

洞穴石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 变化主要取决于大气降水的同位素组成和洞穴地表年均温^[30]。 $\delta^{18}\text{O}$ 值的长期变化趋势主要指示大气温度的变化。 $\delta^{18}\text{O}$ 值越轻(越负),

指示东亚夏季风增强,气温增高,年降水量增加,气候温暖湿润;反之,则代表冷干气候或东亚夏季风减弱,冬季风盛行^[31]。汪永进等^[32]认为,南京汤山葫芦洞的石笋高分辨率氧同位素曲线反映了H1事件发生时东亚季风气候变化突发式降温 and 回暖过程中叠加百年尺度的气候振荡旋回这两个显著特点。北半球高纬度地区寒冷事件可以通过冬季风环流促进南京地区大气年平均温度下降,致使洞穴石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 值显著偏正,但西太平洋暖池效应对东亚夏季风的影响同样不可忽视。贵州都匀七星洞Q4、Q6石笋高精度的TIMS-U系列年和氧同位素分析结果表明^[33],末次冰期该区夏季风兴衰演变历史与极地及北大西洋地区一样均具有高度的不稳定性。证实了末次冰期中国南方东亚季风气候也存在与北大西洋H1至H5对应的冷事件。同样,H1寒冷事件在贵州荔波董哥洞的石笋记录得到了良好的反映^[30],而湖北神龙架地区石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 中明显地记录到了H2事件的存在^[34]。

2.5 H事件在不同地区响应情况的对比

通过青藏高原古里雅冰芯与格陵兰冰芯记录进行对比发现,青藏高原从间冰阶向冰阶的过渡时间比格陵兰地区更快;青藏高原在末次冰期盛期时的气候突变频率远大于格陵兰地区,而且每次突变事件的持续时间也比格陵兰地区短^[13]。通过对比不同地区、不同纬度资料发现,同一地区,同一指标所取得的年龄数据相近,而不同指标即使是在同一地区所取得的年龄数据相差较明显。H2事件持续时间较短,这在不同地区都得到了很好体现。总的看来,Heinrich事件在北大西洋地区表现要晚,其中在H1事件上的反映尤为突出,与其他地区相比存在着明显的滞后,从侧面进一步说明尽管H事件在北大西洋反映最为强烈,但它可能代表的是一个响应,而不是一个原因^[35]。

2.6 Heinrich事件驱动机制探讨

取自冰芯和深海沉积物的古气候记录表明,末次冰期-间冰期旋回中存在着一系列数百年至数千年时间尺度的气候突变事件,它不能简单地用轨道参数的变化来解释。为解释这些具有全球性的亚轨道时间尺度气候突变事件,已提出了众多不同的地球气候系统内部动力因素对气候突变事件的触发和放大作用为主要思路的解释机制,包括对米兰柯维奇驱动的非线性反馈^[35],冰盖内部动力驱动下的冰山涌进^[36,5],大气系统内部的冷循环^[7]和大洋内部的不稳定^[37]等。其中北大西洋环流的变化和大冰盖内部动力驱动下的冰

山涌进是目前解释这些气候突变事件的主要机制。

北大西洋的环流模式是东北流向的墨西哥湾流携带高温、高盐的表层水到北海海域后冷却浓缩下沉进入深海形成北大西洋深层水。反过来,深层水形成时的拉力维持着墨西哥湾流的强度保持热带水进入北大西洋的流量,将巨大的热量带入并影响欧洲大陆,如果北大西洋表层水下沉过程减弱或停止墨西哥湾流变弱或关闭,冬季形成的海冰可以在一年的大部分时间里存在,这可以反射太阳的热量导致相邻陆地凉爽的夏季和较冷的冬季,由于此时大气是来自寒冷的海冰表面而不是温暖的湾流水团,使欧洲和西西伯利亚的气候变得寒冷和干燥^[38]。由于大量淡水的注入导致北大西洋环流模式的变化,在海气耦合的反馈作用下触发气候突变,这一机制解释了北大西洋区域对气候突变事件的反映最为强烈和敏感^[39,40]。然而环流变化的自身动力源成为这一假设最大的困难。大冰盖内部驱动下的冰山涌进假设可以对此进行解释北大西洋地区突然变冷事件,如冰盖边缘巨大的冰坝湖泊的突然注入,就是反映了北美劳伦泰德大冰盖6次大规模的融水通过圣劳伦斯湾,引发全球性或至少北大西洋地区的强降温事件,这种情况曾被作为Younger Dryas事件的触发机制^[3]。

3 结语

从目前研究成果看来,尽管现有的资料说明Heinrich事件具有全球性效应,但是其成因和影响范围的研究还存在着很大的不确定性,Heinrich事件在不同地域是否同时发生或者发生的先后顺序还有待进一步研究。这一问题的解决需要3个必要条件^[41]:

(1) 高分辨率古气候记录的获取;(2) 年代模型的开发;(3) 高灵敏度多项指标的提取。研究Heinrich事件的驱动机制等问题,需要从全球的角度来进行分析。不管何种机制作用使得Heinrich事件在全球范围内产生影响,它在区域内的响应在时间上应该是一致的(尽管表现方式不一致),但是不同的测年方法所测算的结果却有所差异。因此,对于同一事件在不同记录中的年龄差别似乎应该考虑不同测年方法的校正问题,从而有必要建立一种模式或提出一种方法来消除同一地区不同测年方法所带来的影响。由于驱动机制上的原因,考虑不同测年方法所带来年龄差异的应该放在一个特定的区域来进行解决。另外,沉积特征对气候变化不同的响应规律是由于大洋环流运送

物质先后顺序的差异。南京汤山石笋气候曲线反映的干冷事件与 GRIP 冰芯中的对应事件相比存在 1 000~2 000 a 的相位差^[42]；南极东部的冰芯资料显示该区间冰期来临的时间要比格陵兰地区晚大于 2 000 a。假定人们承认大洋传送带模式的适用性,那么人们是否可以不同地域 Heinrich 事件发生年龄的相位差上入手,寻求他们之间存在的联系,从而进一步探讨这一模式在解释 Heinrich 事件驱动机制上的适用性。

参考文献:

- [1] Heinrich H. Origin and consequences of cyclic ice rafting in the Northeast Atlantic Ocean during the past 130 000 years[J]. **Quaternary Research**, 1988, 29:142-152.
- [2] Mayewski P A, Meeker L D, Twickler M S, *et al.* Major feature and forcing of high-latitude Northern Hemisphere atmospheric circulation using a 11 000 year glacio-chemical series [J]. **Journal of Geophysical Research**, 1997,102: 26 345-26 365.
- [3] Berger W H, Jansen E. Younger Dryas episode: ice collapse and super-fjord heat pump [A]. Troelstra S R, van Hinte J E, Ganssen G M. **The Younger Dryas** [C].Amsterdam: Koninklijke Nederlandse Akademie van Wetenschappen, 1995.62-105.
- [4] Bond G, Heinrich H, Broecker W, *et al.* Evidence for massive discharges of icebergs into the North Atlantic Ocean during the last glacial period[J]. **Nature**, 1992, 360:245-248.
- [5] Bond G C and Lotti R. Iceberg discharge into the North Atlantic on millennial time scales during the last glaciation[J]. **Science**, 1995,267:1 005-1 009.
- [6] Bischof J, Clark D L, Vincent J S, *et al.* Origin of ice-rafted debris: Pleistocene paleoceanography in the western Arctic Ocean[J]. **Paleoceanography**, 1996, 11:743-756.
- [7] Bond G, Broecker W, Johnsen S, *et al.* Correlations between climate records from North Atlantic sediment and Greenland Ice[J]. **Nature**, 1993, 365:143-147.
- [8] Andrews J T. Abrupt changes (Heinrich event) in late Quaternary North Atlantic marine environments [J]. **Journal of Quaternary Science**, 1998, 13 (1) : 3-16.
- [9] Elliot M, Labeyrie L, Bond G, *et al.* Millennial scale iceberg discharge into the Irminger Basin during the last glacial period[J]. **Paleoceanography**, 1998,13:433-446.
- [10] Brook E J, Sowers T, Orchardo J. Rapid variations in atmospheric methane concentration during the past 110 000 years[J]. **Science**, 1996, 273:1 087-1 091.
- [11] Grimm E C, George L, Jacobson, *et al.* A 50 000-year record of climate oscillations from Florida and its temporal correlation with the Heinrich events[J]. **Science**, 1993, 261:198-200.
- [12] Mayewski P A, Meeker L D,Whitlow S, *et al.* Changes in atmospheric circulation and ocean ice cover the north Atlantic during the last 41 000a[J]. **Science**, 1994, 263: 1 747-1 751.
- [13] 姚檀栋.末次冰期青藏高原的气候突变—古里雅冰芯与格陵兰 GRIP 冰芯对比研究[J].中国科学(D 辑),1999, 29 (4) :175-184.
- [14] Thompson L G, Mosley-Thompson E, Davis M E, *et al.* Late glacial stage and Holocene tropical ice core from Huascarán, Peru[J]. **Science**, 1995,269:46-50.
- [15] 杨小强, 李华梅, 周永章.南海南部 NS93-5 孔沉积物磁化率特征及其对全球气候变化的记录[J].海洋地质与第四纪地质, 2002, 22 (1) :31-36.
- [16] Zhao M, Beveridge N A S, Skackleton N J, *et al.* Molecular Stratigraphy of cores off northwest Africa: sea surface temperature history over the last 80 ka [J]. **Paleoceanography**, 1995, 10:661-675.
- [17] Geiselhart S, Henleben C, Ertlenkeuser H. High resolution stratigraphy of stable oxygen isotope 1 and 3 in the Southern Red Sea [J]. **Journal of Conference Terra Abstracts**, 1999,4:174.
- [18] Hofmann A, Kudrass H-A, Wiedicke M, *et al.* High-frequency changes of the monsoonal system during the last 80 000 years recorded in the sediment cores from the northern bay of Bengal [J]. **Journal of Conference Terra Abstracts**, 1999, 4:171.
- [19] Cortijo E, Labeyrie L, Vidal L, *et al.* Changes in sea surface hydrology associated with Heinrich event 4 in the

- North Atlantic Ocean between 40° and 60° N[J]. *Earth Planet Science Letters*, 1997, 146: 29-45.
- [20] Porter S C, An Zhisheng. Correlation between climate events in the North Atlantic and China during the last glaciation[J]. *Nature*, 1995, 375:305-308.
- [21] 鹿化虞, 周杰. Heinrich 事件和末次冰期的气候不稳定性[J]. *地球科学进展*, 1996, 11 (2): 40-44.
- [22] 吕连清, 方小敏, 鹿化煜, 等. 青藏高原东北缘黄土粒度记录的末次冰期千年尺度气候变化[J]. *科学通报*, 2004, 49 (11): 1091-1098.
- [23] 郭正堂, 刘东生, 吴乃琴, 等. 最后两个冰期黄土记录的 Heinrich 事件型气候节拍[J]. *第四纪研究*, 1996, 1: 21-30.
- [24] 吕厚远, 郭正堂, 吴乃琴. 黄土高原和南海陆架古季风演变的生物记录与 Heinrich 事件[J]. *第四纪研究*, 1996, 1: 11-20.
- [25] Li Tiegang, Liu Zhenxia, Hall M A, *et al.* Heinrich event imprints in the Okinawa Trough: evidence from oxygen isotope and planktonic foraminifera[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology*[J]. *Palaeoecology*, 2001, 176: 133-146.
- [26] 刘振夏, 李培英, 李铁刚, 等. 冲绳海槽 5 万年以来的古气候事件[J]. *科学通报*, 2000 年, 45(16): 1776-1781.
- [27] 陈木宏, 涂霞, 郑范, 等. 南海南部近 20 万年沉积序列与古气候变化关系[J]. *科学通报*, 2000, 45(5): 542-548.
- [28] Lin Da-Cheng, Liu Chiung-Hui, Fang Tien-His, *et al.* Millennial-scale changes in terrestrial sediment input and Holocene surface hydrography in the northern South China Sea (IMAGE MD972146)[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2006, 236: 56-73.
- [29] TANG Xianzan, CHEN Zhong, YAN Wen, *et al.* Younger drays and heinrich events recorded by magnetic susceptibility of sediments from the central temperature area of Western Pacific Warm Pool[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2003, 48: 808-813.
- [30] 张美良, 程海, 林玉石, 等. 贵州荔波 1.5 万年以来石笋高分辨率古气候环境记录[J]. *地球化学*, 2004, 33 (1): 65-74.
- [31] 张美良, 林玉石, 覃嘉铭, 等. 黔南洞穴石笋古气候变化记录及终止点口的确定[J]. *中国科学*, 2002, 32 (11): 942-950.
- [32] 汪永进, 吴江滢, 刘殿兵, 等. 石笋记录的东亚季风气候 HI 事件突变性特征[J]. *中国科学 (D 辑)*, 2002, 32 (3): 227-233.
- [33] 张美良, 程海, 袁道先, 等. 末次冰期贵州七星洞石笋高分辨率气候记录与 Heinrich 事件[J]. *地球学报*, 2004, 25(3): 337-344.
- [34] 陈仕涛, 汪永进, 吴江滢, 等. 东亚季风气候对 Heinrich2 事件的响应: 来自石笋的高分辨率记录[J]. *地球化学*, 2006, 35 (6): 586-892.
- [35] Broecker W S. Massive iceberg discharge as triggers for global climate change[J]. *Nature*, 1994, 372: 421-424.
- [36] McIntyre A, Molino B. Forcing of Atlantic equatorial and subpolar millennial cycles by precession [J]. *Science*, 1996, 277: 1867-1870.
- [37] Sakia K, Peltier W R. A multi-basin reduced model of the global thermohaline circulation: paleoceanographic analyses of the origins of ice-age climate instability [J]. *Journal Geophysical Research Ocean*, 1996, 101(C10): 22535-22562.
- [38] Overpeck J, Hughen K, Hardy D, *et al.* Arctic environmental change of the last four centuries [J]. *Science*, 1997, 278: 1251-1256.
- [39] Lang C, Leuenberger M, Schwander J, *et al.* Rapid temperature variation in central Greenland 70 000 years ago [J]. *Science*, 1999, 286: 934-937.
- [40] Bennett K D, Haberle S G, Lumley S H. The last glacial-Holocene transition in southern Chile [J]. *Science*, 2000, 290: 325-326.
- [41] 秦蕴珊, 李铁刚, 苍树溪. 末次冰期以来气候系统的突变[J]. *地球科学进展*, 2000, 15(3), 243-250.
- [42] 汪永进, 吴江滢, 吴金全, 等. 末次冰期南京石笋高分辨率气候记录与 GRIP 冰芯对比[J]. *中国科学 (D 辑)*, 2000, 30 (5): 533-539.

(本文编辑:刘珊珊)