

# 寻求高分辨率的古环境记录\*

汪品先 翦知湓

(同济大学海洋地质开放实验室, 上海 200092)

**摘要** 古气候变化突然事件的发现和对未来环境变化的预测, 提出了取得高分辨率古环境记录的要求。本文试图对国际以及国内文献作一综述, 以介绍晚第四纪环境变迁高分辨率研究的最新进展, 并以海洋部分作为重点。综述涉及千年、百年、十年和年际的不同时间尺度, 但着重阐述“亚米兰科维奇”气候变化, 包括 Heinrich 和 Dansgaard/Oeschger 事件。对于放射性碳测年数据换算为日历年进行专门讨论, 因为这是为环境事件建立精确年代顺序的先决条件。最后, 向我国同行提出三点建议: 1) 在对地层记录运用高分辨率研究方法时要经过精心选择, 避免盲目性, 并充分意识到此类研究的特殊要求; 2) 依靠我国所在区域的特殊自然条件, 在高分辨率古环境研究中发展独立的学术思想; 3) 将高分辨率研究方法推广到前第四纪的沉积序列中去。

**关键词** 高分辨率记录 古环境 亚米兰科维奇周期性 放射性碳测年换算

## 1 引言

恰如政治家需要从历史中吸取教训一样, 科学家在预测人类社会生存环境的变化时, 也要从古气候、古环境的研究中寻求类比、发现规律。20世纪晚期古气候研究的最大突破, 在于证实了地球轨道参数变动造成的冰期旋回即“米兰科维奇周期”。然而, 这项地质学上的重大发现在应用上却遇到了问题。“一万年太久, 只争朝夕”, 人们关心的主要是在与人生寿命可比的时间尺度内进行预测, 不大可能在意2万年, 甚至10万年的“米兰科维奇周期”。提高时间上的分辨率, 是古气候、古环境研究的当务之急。

与此同时, 古气候学在近年来发现了许多实例, 反映出千年、百年, 甚至十年等级的气候变化周期或者准周期, 就像“厄尔尼诺现象”那样的变化, 在不同时间尺度上都会发生。尤其惊人的是突然变化事件: 大约1万年前“新仙女木事件”结束时, 格陵兰上空的气温在近50年内上升7℃, 降尘在不足20年内下降3倍, 冰雪堆积速率在3年内增加一倍<sup>[1,2]</sup>, 而且这类快速变化还反复发生。因此, 科学界的任务不仅要揭示万年甚至百万年以上等级的“轨道尺度”、“构造尺度”的变化规律作为背景, 而且要认识叠加其上的快速突变事件和短周期现象, 通常也就是气候系统内部的变化规律。不仅如此, 冰期旋回如果只用轨道驱

第一作者简介: 汪品先 男 62岁 教授、中国科学院院士 海洋地质学专业 E-mail: pxwang@online.sh.cn

\* 国家自然科学基金(批准号: 49576286)资助项目

1998-10-25收稿, 1998-10-29收修改稿

动的太阳辐射量分布变化来解释,无法理解南北两极变化的同时性和从冰期向间冰期转变的突然性,还必须从地球表面气候系统(即大气-海洋系统)内部寻找原因<sup>[3]</sup>,而探索这类转变机制只能依靠高分辨率的记录。

高分辨率的古环境研究,近年来取得了重大进展。此类研究无论从材料、方法和测试手段,或者从所反映的驱动机制看,都与传统的地质科学有相当大的差别,有必要对国内外进展和有关文献作一综述,以促使我国的研究工作更好地与国际“接轨”。由于古环境研究的范围过于广泛,而且有关陆地的研究我国文献中已有一定程度的报道,此次综述将侧重于海洋,尤其是本文作者所从事的古海洋学研究,并且以千年等级的“亚轨道周期”作为讨论重点。囿于见闻,限于水平,文中难免有顾此失彼、挂一漏万甚至谬误之处,恳请同行指正。

## 2 材料与方法——历史的回顾

高分辨率的古环境记录,要求有相应精度的年代学作为基础;那种以为把取样间距加密就是“高分辨率”的想法,其实是一场误会。时间分辨率取决于材料和方法。沉积纹层和树木年轮常常提供了年际,甚至季节变化的分辨率,而沉积速率低下、生物扰动严重的地层就难以提供高分辨率的记录。分析样品的微量化和测年技术的精确化,是古环境序列高精度定年的前提,否则“高分辨率”也无从谈起。

将各种古环境信息的载体作一比较,冰芯具有显著的优越性。每年的降雪压成一个冰层,保留了包括古大气在内的宝贵材料;而且堆积速率极高,格陵兰冰盖的全新世1万年冰层厚度超过1000m<sup>[4]</sup>。通过多种稳定和放射性同位素、降尘和气泡中气体的分析,和导电率等各种物理参数的测定,可以提供大气化学、大气环流、气温和降水量等种种信息。尽管能提供可靠时间序列的冰芯至今限于十余万年,冰芯在高分辨率古环境研究中起了带头作用。格陵兰和南极的深孔冰芯研究从60年代晚期开始后,到90年代达到了新高潮:格陵兰冰盖顶部相距30km的GRIP与GISP2两个孔,分别取得3000多米长的冰芯,从顶部到2790m采到了相同的11万年高分辨率记录<sup>[5]</sup>,成为晚第四纪最佳的古环境序列,揭示了一系列的气候周期和突变事件,将古气候研究推进到高分辨率的新阶段。

深海沉积保存了环境变迁的连续记录,然而除了海湾沉积中的年纹层外,测年的精度成为分辨率的制约因素。80年代晚期,一方面氧同位素( $\delta^{18}\text{O}$ )地层学进入高分辨率阶段,在近30万年来每个同位素分期(MIS,即marine isotope stage)的内部又分出众多的“事件”<sup>[6]</sup>可供定年;另一方面加速器质谱仪(AMS)用于放射性碳( $^{14}\text{C}$ )测年,使样品的用量减少到常规方法要求的千分之一,为使用同一种有孔虫壳体的测年创造了条件<sup>[7,8]</sup>,从而使深海沉积的年代分辨率大为提高。

然而,深海沉积的环境记录要在高分辨率时间尺度上与冰芯记录对比,就遇到 $^{14}\text{C}$ 测年数据的校正问题。 $^{14}\text{C}$ 测年的基础是放射性碳 $^{14}\text{C}$ 以 $5730 \pm 40\text{a}$ 的半衰期发生衰变,根据所测样品中的 $^{14}\text{C}/\text{C}$ (即 $\Delta^{14}\text{C}$ )值可以测出样品的年龄,其前提是大气层中每年产生的 $^{14}\text{C}$ 总量不变,大气圈、水圈和生物圈三个碳储库的总容量和交换速率不变。但是这两者都会发生某种程度上的变化<sup>[9]</sup>,如不加校正就有可能产生错误。地球上 $^{14}\text{C}$ 来源于宇宙射线的次生中子与大气圈上层的 $^{14}\text{N}$ 相互作用,宇宙射线通量、太阳活动、地磁场强度和大洋海水的流通

这四个因素中任何一项发生变化,都会导致  $\Delta^{14}\text{C}$  的增减,从而影响  $^{14}\text{C}$  年龄,其中尤以地磁场的变化最为重要。近 5 万年来其强度平均较现代为低,因而宇宙射线产生的  $^{14}\text{C}$  也都较现代为强,5 万年来  $\Delta^{14}\text{C}$  的变化至少 80% 由此而起<sup>[10]</sup>。通过树轮的计数(“数木年轮学”)及其  $^{14}\text{C}$  测年的比较,可以求出大气  $\Delta^{14}\text{C}$  的变化,因此早在 80 年代就提出  $^{14}\text{C}$  测年值的标定方法(如 Stuiver 等<sup>[11]</sup>),并进而建立了将  $^{14}\text{C}$  年龄转换为日历年(calendar year)的计算机程序(如 Stuiver 和 Reimer<sup>[12]</sup>)。  $\Delta^{14}\text{C}$  随时间的变化使得  $^{14}\text{C}$  “时钟”会有超前、滞后甚至“停摆”的时候,最突出的例子是新仙女木期结束前后  $^{14}\text{C}$  年龄 9 600aB.P. 和 10 000aB.P. 的两次“停摆”,在  $^{14}\text{C}$  年龄曲线上造成两个“平台”<sup>[13]</sup>,致使  $^{14}\text{C}$  测年得出的 600 年时段(10 600~10 000aB.P.),其实是经过了 1 600 年<sup>[14]</sup>。

如果采用海洋标本(有孔虫、珊瑚等)测年,又多一个海水碳“储库效应(reservoir effect)”的问题<sup>[15]</sup>。由于海水的碳储库比大气的大得多,海水中碳的滞留时间也比大气中的长得多,现在大洋底层水的  $^{14}\text{C}$  年龄在千年以上<sup>1)</sup>,低纬区表层水的  $^{14}\text{C}$  年龄也达 400 年<sup>[16]</sup>。深海沉积通常用单种浮游有孔虫的方解石壳体作 AMS  $^{14}\text{C}$  测年,反映的是当时表层海水的  $^{14}\text{C}/\text{C}$ 。而表层海水中的  $^{14}\text{C}/\text{C}$ ,又受大洋深层环流和海洋上升流变化的影响。因此,海洋样品不仅要校正由于地磁场强度变化造成的  $^{14}\text{C}/\text{C}$  比值偏差( $\Delta^{14}\text{C}_{\text{geo}}$ ),还要校正海水与大气中碳储库的  $^{14}\text{C}/\text{C}$  差值( $\Delta^{14}\text{C}_{\text{res}}$ )<sup>[14]</sup>。为此,一方面可以通过热离子质谱(TIMS)测珊瑚的 U-Th 年龄来标定  $^{14}\text{C}$  测年值<sup>[16,17]</sup>,另一方面也可以用计算机模拟方法求取  $^{14}\text{C}$  的校正值。最近,通过将冰期旋回中海流模拟与地磁场变化相结合,得出了近 5 万年左右与实测结果相当吻合的  $\Delta^{14}\text{C}$  变化曲线(图 1),说明 2~4 万年前  $^{14}\text{C}$  测年结果与实际年龄差距最大,应当增老 2 000~3 500a<sup>[10,2]</sup>。

当然,  $^{14}\text{C}$  测年的高分辨率不仅在于方法和校正,还在于测年材料本身的分辨率。古土壤测年,其腐殖质中碳的更新速率与气温等因素有关,影响  $^{14}\text{C}$  年龄<sup>[18]</sup>;贝壳层测年,有贝壳保存的“年龄平均化(time-averaging)”问题<sup>[19,20]</sup>,难以达到比  $10^2\sim 10^3$  年更高的分

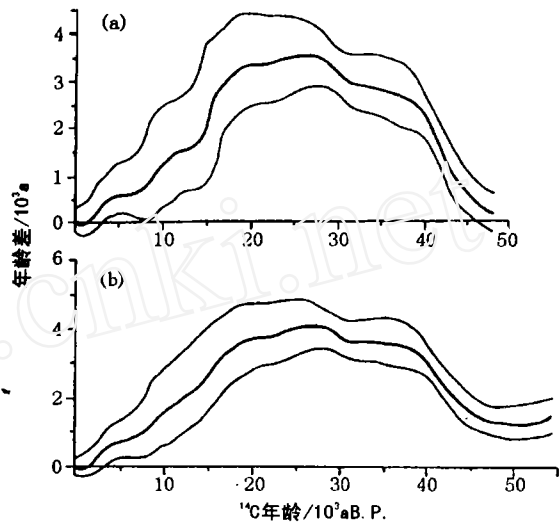


图 1  $^{14}\text{C}$  测年与日历年的偏差

(a) 根据地磁场与海流模拟得出<sup>[10]</sup> (b) 示海洋  $^{14}\text{C}$  值与格陵兰冰芯 GISP2 的对应关系<sup>1)</sup>

纵坐标表示  $^{14}\text{C}$  测年值应校正的年龄差,粗线上下的细线示地磁场强度不确定性造成的误差范围

Fig.1 Deviation of AMS  $^{14}\text{C}$  ages from calendar ages

1) Broecker W S. The Glacial World according to Wally. 1992

2) Voelker A H L, Sarnthein M, Grootes P M *et al.* Correlation of marine  $^{14}\text{C}$  ages from the Nordic seas with the GISP2 isotope record: Implications for radiocarbon calibration. 1998

辨率;在深海沉积中,同一样品中的浮游有孔虫不同属种也会产生不同  $^{14}\text{C}$  年龄<sup>[8]</sup>。总之,  $\Delta^{14}\text{C}$  的测定不仅是定年的手段,同时也是追踪古今全球变化中与碳循环相关的各种过程的武器<sup>[9]</sup>,决不是送了样、测了  $^{14}\text{C}$  就等于有年龄的。

除去测年之外,近年来国际学术界为古环境替代性指标建立了多种物理性质的高分辨率测定方法,如适用于沉积岩芯的伽玛射线衰减孔隙率 (GRAPE) 密度、磁化率、颜色反射率 (color reflectance) 的数字化测定等<sup>[21]</sup>,或用于冰芯的导电率测定法 (ECM)<sup>[22]</sup>,所得的大量数据和高密度曲线,为高分辨率地层对比提供了多快好省的手段。生物和医学上的技术进展,也为提高古环境记录分辨率开辟了新途径。如 CT 技术在沉积学上的应用不

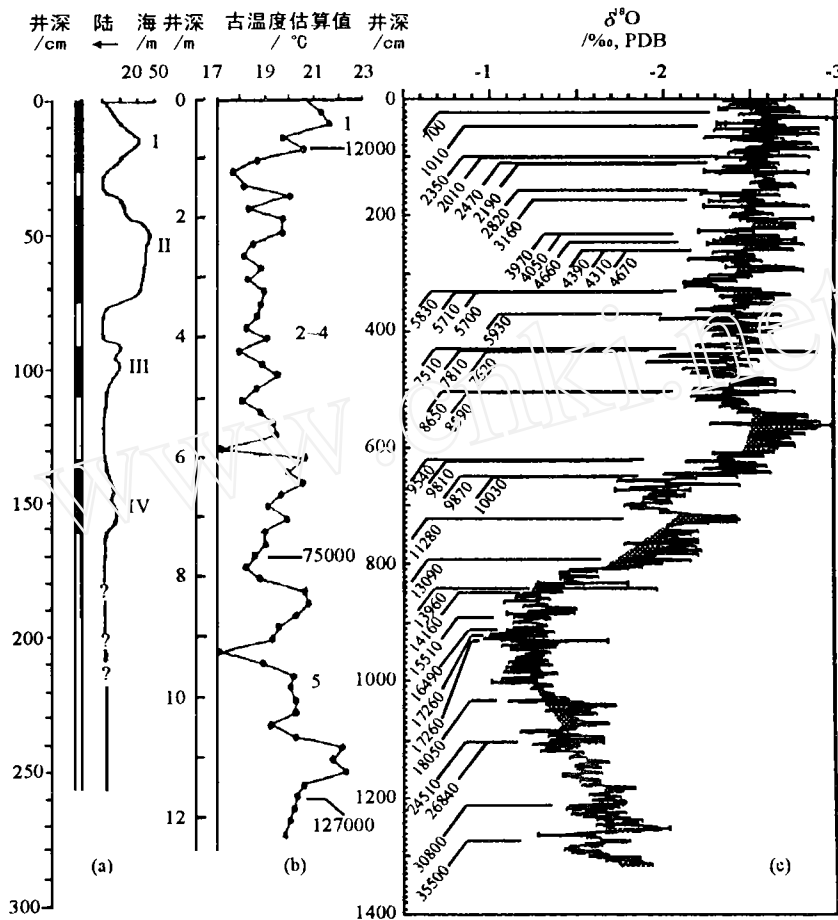


图2 我国海洋古环境研究时间分辨率进展的实例

(a)  $10^4 \sim 10^5$ 年等级:上海面粉厂钻孔中第四纪海侵层(黑色), I ~ IV代表海侵次数<sup>[37]</sup> (b)  $10^3 \sim 10^4$ 年等级:南海北部 V36-3柱状表层海水古温度估算, 1~5代表 MIS 氧同位素分期,带横线数据值为年龄值(a.B.P.)<sup>[38]</sup> (c)  $10^2 \sim 10^3$ 年等级:南海北部 17940 柱状样浮游有孔虫  $\delta^{18}\text{O}$  揭示的古季风变化,左侧数据示 AMS  $^{14}\text{C}$  测年值(a.B.P.)<sup>[1]</sup>

Fig. 2 Examples showing the progress in time resolution of marine paleoenvironmental studies in China

1) 王律江, Samthein M. 南海北部陆坡近四万年的高分辨率古海洋学记录. 见本期27~31页

仅能不破坏样品而清晰测得微细沉积构造<sup>[23]</sup>,而且可以测定沉积物的有效密度 (bulk density)<sup>[24]</sup>,无论对海洋沉积、土壤或冰芯研究中均能适用。最近加拿大新不伦瑞克大学创立的磁共振成像方法 SPRITE(single-point, ramped imaging with T1 enhancement),在多孔多水的湖相沉积柱状样中应用,取得了厘米级的高分辨率<sup>[25]</sup>。他们设计的共焦扫描激光显微镜 (confrontal scanning laser macro scope/microscope,即 CSLM),采用磁性测量使用的长条岩芯即 U形槽取样 (U-channel sampling)<sup>[26]</sup>,可以将大洋钻探或湖泊岩芯中的地层分辨率提高到毫米等级<sup>1)</sup>。

与此同时,我国晚第四纪的古环境研究也正在向高分辨率推进。以黄土剖面为例,陆地古环境研究已从揭示中更新世古气候轨道周期的“转型事件”、S<sub>5</sub>古土壤层的暖湿事件等 10<sup>4</sup>~10<sup>5</sup>年变化<sup>[27,28]</sup>,推进到探讨千、百年尺度的 Heinrich 事件<sup>[29]</sup>和末次冰消期新仙女木事件<sup>[30,31]</sup>等气候波动。而青藏高原古里雅冰芯<sup>[32,33]</sup>和湖泊沉积<sup>[34]</sup>业已提供末次间冰期和冰后期内百年尺度气候变化的高分辨率记录。至于树轮记录的近几百年来陆地古环境和古气候变化<sup>[35,36]</sup>,已经进入了可以与历史气候资料直接对比研究的新阶段。

就海洋而言,到 80 年代初为止,我国海洋古环境的研究还停留在沿岸晚第四纪海侵层的数目上,时间分辨率以第四纪四分的方案为准,实际上是 10<sup>4</sup>~10<sup>5</sup>年的等级(如汪品先等<sup>[37]</sup>;图 2a);80 年代晚期开展了我国海域深水区的古海洋学研究,以米兰科维奇周期为时间标尺,推进到 10<sup>3</sup>~10<sup>4</sup>年(如汪品先等<sup>[38]</sup>;图 2b);90 年代中期以来,深入到“亚轨道周期”即 10<sup>2</sup>~10<sup>3</sup>年的古海洋学研究(如翦知潜等<sup>[39]</sup>;王律江和 Sarnthein<sup>2)</sup>;王吉良等<sup>3)</sup>),进入高分辨率期(图 2c)。

### 3 千、百年尺度的古气候事件

#### 3.1 新仙女木事件

90 年代以来,第四纪古气候研究的最大进展在于近四五万年期间短暂气候事件和突变的发现<sup>[40]</sup>,而最先引起学术界注意的是“新仙女木期 (YD,即 Younger Dryas)”事件。

早在 1985 年举行的“突然气候变化”国际会议<sup>[41]</sup>专题探讨近 2 万年来的突变事件,重点就在于新仙女木期。现在看来,这是末次冰消期在转暖过程中持续大约 1 300±70 年(从约 13 000aB.P. 到约 11 640aB.P.)的一次气候回返事件<sup>[5]</sup>。1981 年格陵兰 Dye3 站的冰芯分析发现在新仙女木期结束时,不到 1m 长的冰芯内冰的 δ<sup>18</sup>O 值从新仙女木期的 -35.2‰ 突变到前北方期 (Preboreal)的 -30.5‰,说明在不到 50 年的时间里格陵兰上空的气温上升 7℃,这种突然变化在西欧其它地区如瑞士的 Gerzen 湖中也有发现<sup>[1]</sup>(图 3A)。1993 年完成的 GISP2 站冰钻进一步揭示不仅新仙女木期的始、终均是突变性,连其前的老仙女木期 (Oldest Dryas)到包令-阿勒罗德期 (Bølling-Allerød)的过渡也是突然的,其中新仙女木期

1) Rack F R, Ribes A C, Damaskinos S *et al.* Preliminary results from biomedical imaging of lake and ocean sediments (Abstract). 1998

2) 王律江, Sarnthein M. 南海北部陆坡近四万年的高分辨率古海洋学记录. 见本期 27~31 页

3) 王吉良, Saito Y, Tadamichi O 等. 冲绳海槽全新世温跃层深度的变化. 1999

末冰雪的堆积速率只用三年时间便增加了一倍,而且大部分增值发生在一年之内<sup>[2]</sup>(图3B)。

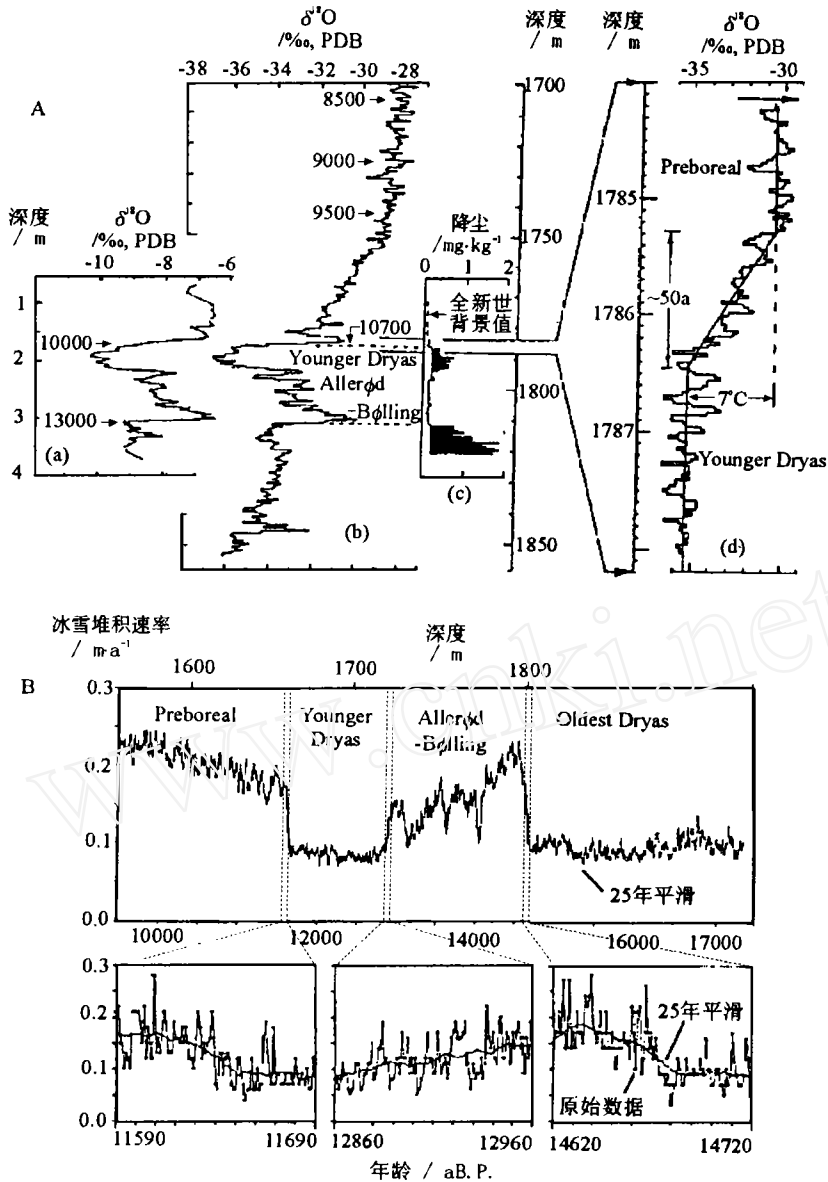


图3 格陵兰冰芯中记录的新仙女木事件

A. Dye 3 站 1700~1850m 进段的冰芯 δ<sup>18</sup>O 值<sup>[1]</sup>: (a) 瑞士 Gerzen 湖底方解石沉积剖面的 δ<sup>18</sup>O 值,带箭头数值为年龄值 (a.B.P.) (以下同) (b) Dye 3 站冰芯更新世与全新世交界处的 δ<sup>18</sup>O 值 (c) 冰芯中的降尘含量,与 δ<sup>18</sup>O 呈相反趋势 (d) 新仙女木期末的冰芯 δ<sup>18</sup>O 细节 B. GISP2 站更新世与全新世冰芯交界处的冰雪堆积速率,上图示 25 年滑动曲线,下方三图示突变时的年度曲线,细线示 25 年滑动曲线<sup>[2]</sup>

Fig.3 Younger Dryas event recorded in the Greenland ice-core

关于新仙女木期的讨论<sup>[42]</sup>,曾经是 10 年前的学术热点。争论的重点,起先在于事件的时空分布范围:新仙女木期是北大西洋区的特殊现象<sup>[43]</sup>,还是全球性事件?是末次冰消期

所独有, 还是冰期旋回中的“多发性事件”? 大量证据表明, 远在北大西洋以外的我国黄土区<sup>[44]</sup>、西太平洋边缘海<sup>[45,46]</sup>, 甚至新西兰<sup>[47]</sup>都有新仙女木期的证据, 只有南极可能相当于增暖期<sup>[48]</sup>。至于相似事件的出现, 看来是一种规律而不是例外(见后)。近年来, 学术界的注意力集中到新仙女木期的成因和机理上来, 在更高分辨率的基础上探索事件的过程和内部差异(如周卫健等<sup>[31]</sup>), 并进而揭示事件的原因。本文无意对形成新仙女木期的种种假设进行评述, 只是指出最近根据当时<sup>14</sup>C钟“停摆”(见前述)和南极增温的现象, 学术界提出可能是北大西洋深层水的生成突然受阻, 诱发全球深层洋流改组, 从而使大气中<sup>14</sup>C含量剧增<sup>[48,49]</sup>的新颖解释。这可能说明南北两极尽管在地球轨道周期的时间尺度上呈现出相同的气候变化, 而在千年尺度上却可能有相反的趋势。无论将来的结论如何, 新仙女木之类的短期突变事件有着重大的理论和实际意义, 因为它提示了全球气候系统内部的复杂关系, 在冰期之后总体回暖过程中可以由于内反馈作用而造成短期气候回返事件。果真如此, 那么人类对于“温室效应”的准备就不仅要考虑全球变暖, 而且要对付可能的突然变冷事件。

### 3.2 Heinrich 事件与 D/O 事件

11年前, 德国水文研究所的 Heinrich<sup>[50]</sup>发现大西洋东北部水深4000m左右的13万年沉积中, 有多次粗碎屑的冰筏沉积物(ice-rafted debris, 即IRD)和冷水浮游有孔虫相对含量的高峰同时出现, 一共发现11层, 其中尤以冰期(MIS第2~4期)的6层最为显著, 这就是后人所说的Heinrich(“哈因里奇”)事件<sup>1)</sup>。但当时Heinrich对他本人发现的重要性并没有充分认识, 以为是 $11\,000 \pm 1\,000$ a的周期, 算是半个米兰科维奇周期; 直到同样的沉积层在北大西洋多处发现<sup>[51]</sup>, 由Broecker等从冰期气候不稳定的高度加以“上纲上线”, 才认识到这是北半球冰盖输出大块冰山引起的气候事件, 属于“亚轨道事件”。一时间在北大西洋寻找冰筏沉积的高潮迭起, 学术界对千年等级事件的兴趣激增。很快查明, “Heinrich”层的主要特点还不在于冰筏沉积之多, 而是有孔虫壳体之稀少, 反映出大批冰山散出, 融冰淡水覆盖海面导致海洋生产力下降<sup>[52]</sup>。Heinrich事件在70000~10000aB.P.之间总共6次, 分布呈准周期性, 间隔7000~10000a不等<sup>[53]</sup>。它们在北大西洋40~55°N间呈“融冰事件(melt-water events)”广泛出现, 使表层水温下降2~6°C, 表层盐度减低1%~3%, 导致北大西洋深层水的生产受阻, 海水垂向交换减弱<sup>2)</sup>。

冰期内部的千年、百年事件, 其实在格陵兰冰芯中早已发现。Dansgaard等<sup>[54]</sup>和Oeschger等<sup>[55]</sup>指出了冰芯中 $\delta^{18}\text{O}$ 与降尘含量的变化及其与欧洲湖泊记录的对应性, 这类变化被Broecker称为Dansgaard/Oeschger事件(D/O事件)<sup>[3]</sup>。近年来格陵兰的新冰芯(GRIP和GISP2)表明, 110000~15000aB.P.之间有23次D/O事件<sup>[1,5,56]</sup>。冰芯中 $\delta^{18}\text{O}$ 曲线的这些峰值(变重), 指示温度的突然增暖, 相当于6~7°C的升温, 同时降尘可以减少4倍之多<sup>1)</sup>。这类延续上千年或较长的事件, 在冰期中以二三千年的准周期或假周期

1) Broecker W S. The Glacial World according to Wally. 1992

2) Cortijo E. Rapid climatic variability of the Atlantic Ocean and global climate: A focus of the IMAGES program (Abstract). 1998

(pseudo-periodicity) 出现, 与大洋深部环流的突变相关<sup>[52]</sup>, 是由于北大西洋深层水的间歇性形成, 海水释出的热量导致大气升温, 称为冰期内的间冰段 (glacial interstadial, 即 IS)。

D/O 事件发现于冰盖, 同时也记录于海洋, 这种二千年周期的冰筏事件在北大西洋广泛发现<sup>[53, 57]</sup>。在海洋记录里, D/O 事件与 Heinrich 事件的关系十分明显: 每隔几次 D/O 事件出现一次 Heinrich 事件, 逐次的 D/O 事件温度趋于下降, 到最冷时便发生一次 Heinrich 事件, 然后又有较暖的 D/O 事件, 如此周而复始, 每一组逐渐变冷的 D/O 事件被称为 Bond 周期<sup>[52]</sup>。最近对北大西洋两个深海柱状样 (DSDP609 与 VM23-81) 高分辨率分析的结果表明: D/O 第 1, 2, 4, 8, 12 和 17 间冰段分别发现在 6 个 Heinrich 事件即 H1~H6 之后, 各个事件与格陵兰冰芯 (GISP) 的对比关系如图 4 所示。

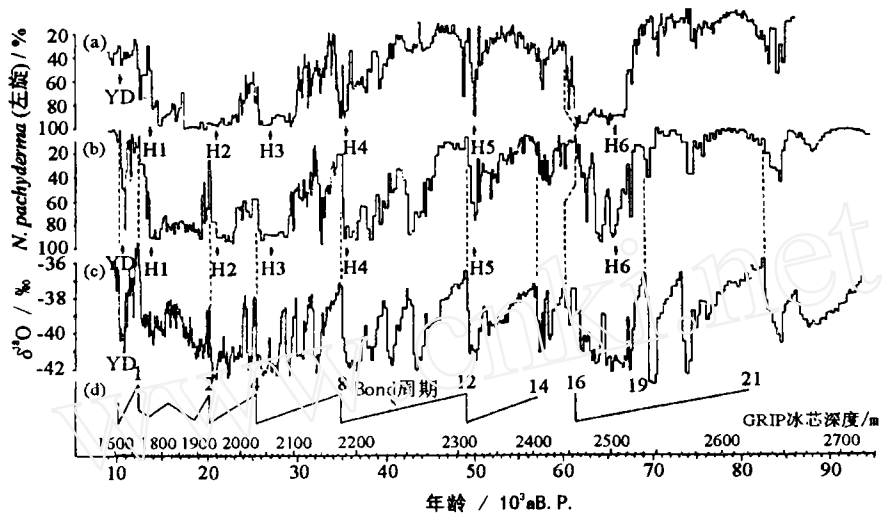


图 4 末次冰期的千年级“准周期”性 Heinrich 事件与 D/O 事件的年代分布及相互关系 (据 Bond 等<sup>[57]</sup>修改)

(a) 北大西洋 DSDP609 柱状样 (49° 53' N, 24° 14' W) 浮游有孔虫 *Neogloboquadrina pachyderma* (左旋) 百分含量曲线, YD 为新仙女木事件, H1~H6 示 Heinrich 事件 (b) 北大西洋 VM23-81 柱状样 (54° 15' N, 16° 50' W), 内容同上 (c) 格陵兰 GRIP 冰芯的  $\delta^{18}\text{O}$  曲线, 虚线示冰芯与深海柱状样 D/O 事件的对比关系 (d) 格陵兰 GRIP 冰芯的 Bond 周期, 数字示 D/O 事件

Fig.4 Chronostratigraphic correlation of the millenium scale quasi-periodicity Heinrich events with the D/O events during the last glacial stage

冰期里的这类“间冰段”, 是一种全球性气候现象<sup>[58]</sup>。冰芯中甲烷含量的 D/O 周期性说明这种短期气候波动已涉及低纬度区<sup>[5]</sup>。Heinrich 事件在美国南方也有反应<sup>[59]</sup>。我国学者近年来在这方面做出了显著成绩, 从黄土序列中的千年等级气候波动<sup>[30, 60, 61]</sup>, 到南海深海沉积中的氧同位素<sup>1)</sup>与花粉记录<sup>2)</sup>, 都揭示出千年等级的周期性, 与北大西洋周期对比良

1) Wang L, Sarnthein M, Erlenkeuser H *et al.* East Asian Monsoon climate during the Late Pleistocene: High-resolution sediment records from the South China Sea. 1998

2) Sun X, Li X. Pollen records of the last 37 ka in deep-sea core 17940 from the northern slope of the South China Sea. 1998



好,说明全球气候的遥相关。

### 3.3 间冰期的不稳定性

从新仙女木期到 Heinrich 和 D/O 事件的发现,雄辩地证明了冰期气候的不稳定性。这类所谓“亚轨道 (sub-orbital) 或者“亚米兰科维奇”事件,对于人类生存环境的预测具有重大意义。然而,人类现在生活的全新世不属冰期,这种千年等级“准周期”和百年尺度的突变,是否也在间冰期里发生?

人们期望格陵兰 3 000m 长的冰芯提供答案。根据 GRIP 冰芯的同位素与元素分析结果,似乎间冰期 MIS5e 期气候同样不稳定,可以分出 5e 1, 3, 5 暖期和 5e2, 4 降温期,降温幅度与 5a, 5c 期相当。5e 期内部这种 5~10°C 的大幅度温度起伏出人意料,由于 5e 可能较全新世稍暖,因此还提出了温度超过现代的地球,气候就趋于不稳定的推论<sup>[62]</sup>。间冰期气候不稳定,25 万年以来气候一直不稳定,一度几成定论<sup>[5, 63]</sup>。然而,这毕竟只是“一孔之见”。紧接着 GISP2 冰芯的结果发表,5e 间冰期内的这些突然变化竟然一概不见。两孔相距 30km,如此戏剧性的差别,只能说明 GRIP 间冰期内种种事件只是冰盖动力变化引起的次生现象,并非气候记录<sup>[40]</sup>。关于 5e 期间千年等级的气候不稳定性,至今仍是学术界的悬案,有待进一步的证据加以澄清。

对于全新世气候不稳定性认识,却经历了一种相反的过程。格陵兰冰芯上部 1 500m 即全新世一万年的  $\delta^{18}\text{O}$  值十分稳定,与以前冰期中的大起大落<sup>[63]</sup>判然不同。然而,早在 20 多年前就曾发现欧美的山谷冰川同时进退,很可能反映全新世也有明显的气候波动<sup>[64]</sup>。最近, Bond 等<sup>[65]</sup>对北大西洋 VM28-14 与 VM29-191 两个深海沉积柱状样的高分辨率研究,发现全新世地层中也有冰筏沉积呈明显的准周期性出现,反映出有含冰的冷水从冰岛以北南溢到英伦三岛以南。在全新世期间,这类气候突变事件发生了 7~8 次,每次又大体上与底栖有孔虫  $\delta^{13}\text{C}$  值变轻的高峰相对应,说明北大西洋深层水的生产减弱。如果与格陵兰冰芯 GISP2 中反映风尘通量的非海生盐 K 曲线对比,这些变冷事件又与风尘强化期相当<sup>[66]</sup>。因此,全新世虽然不见 D/O 事件,但千年级的气候波动依然存在,而且这种  $1\,470 \pm 500\text{a}$  的周期在末次冰期时已经出现,只是冰期时信号加强、全新世信号减弱<sup>[65]</sup>而已。他们还认为“小冰期”无非是这类准周期性事件的最新一次,距上个变冷事件 1 100 年。

研究全新世气候内短期气候事件的热潮,方兴未艾。比如格陵兰冰芯中有约 8 000~8 400a.B.P. 的变冷事件记录,降温幅度大体相当仙女木期的一半<sup>[67]</sup>。这次大约 8 000 年前的短暂事件,从非洲热带的维多利亚湖到南极冰盖东部的冰芯中也都有发现<sup>[68]</sup>,看来具有全球性。但这究竟是末次冰消期结束时的突变,还是上述千余年准周期事件的一种反映<sup>[65]</sup>,尚无定论。

全新世及更新世最晚期的高分辨率古环境历史,在深海纹层沉积中研究最为详细。美国加利福尼亚岸外的 Santa Barbara 盆地<sup>[69]</sup>,委内瑞拉以北加勒比海的 Cariaco 盆地<sup>[70]</sup>,以及日本海的深海盆<sup>1)</sup>,都为 2 万年来或更长时期的海流和风场的变化提供了高分辨率记

1) Tada R, Irino T, Koizumi I. Possible Dansgaard-Oeschger Oscillation signal recorded in the Japan Sea sediments. 1995

录。其中不少资料都涉及百年尺度的周期性问题,如 Cariaco 盆地上升流的 200a 和 140a 周期<sup>[71]</sup>,我国东沙以南深海柱状样中发现的全新世 775 年和 102/84 年的夏季风周期<sup>1)</sup>等等。是什么机制引起这类百年尺度的变化,一直是见仁见智的问题。最容易想到的是太阳周期,可是模型研究表明其作用远远不足以解释地质记录中的变化幅度<sup>[72]</sup>,何况其作用十分复杂,并不能线性地用来解释冷暖变化<sup>[73]</sup>。另一个重要因素是火山作用,很容易想象短暂的火山爆发与气候突变的关系。可是,究竟是火山作用引起气候变化<sup>[74]</sup>,还是气候变化导致冰盖张缩和海面升降,从而诱发火山活动<sup>[75]</sup>,至今处在“先有鸡还是先有蛋”的困惑之中。

总之,全新世内部气候波动的存在应当已有定论,而其幅度与冰期不同似乎亦无异议,对其频率、机制、原因的研究,是学术界面临的课题。值得指出的是近年来我国在全新世研究中的进步。除了我国在丰富的历史和考古资料基础上做出的独特贡献外,从“全新世大暖期”的研究成果<sup>[76]</sup>之后,全新世夏季风最盛期的南北差异<sup>[77]</sup>,东海与南海 4 000 年前发生的“普林虫事件”和黑潮水减弱期<sup>[78,79]</sup>等等,都标志着我国全新世古环境研究从 20 多年前开始向高分辨率迈进<sup>[80]</sup>以来,已经取得了显著成就。

#### 4 十年、年际和年内尺度的高分辨率古环境事件

十年与年际等级的气候变化,对于人类社会具有更加直接的意义。由于仪器测量的气候记录为时过短,对于短期内气候变化的幅度往往估计偏低,而对于气候事件的全球性、同时性又常常估计偏高。通过各种替代性标志取得的记录表明,近 500 年来从未有过为时超过 10 年、20 年的全球同时性的冷期;相反,0.5°C 等级的某区域、某大陆延续数十年的气候异常,近千年间却屡见不鲜<sup>[40]</sup>。同时,人类对于当前厄尔尼诺现象及与之相关的气象灾害的关注,启发了学术界对古厄尔尼诺的兴趣,1990 年 5 月在科罗拉多举行的专题会议<sup>[81]</sup>便是一例;年际变化、甚至季节变化的记录,也相应地成为古气候研究的新目标。

十年和年际尺度的古气候研究,大多集中在最近几百年内,记录的载体除历史和测量资料外,主要是树轮、冰芯和珊瑚,甚至洞穴石笋<sup>[82]</sup>,在我国文献中已在不同程度上有所介绍。比较陌生的是深海沉积和海相化石壳体中的相应信息,为此本文只就深海沉积中厄尔尼诺的记录和海相化石中的季节性变化信息作一简述。

厄尔尼诺作为 2~7a 的准周期性现象,只有分辨率不低于年的时间序列中才能识别。加利福尼亚岸外的 Santa Barbara 盆地,即有年纹层的深海沉积,又处在东太平洋厄尔尼诺现象发生区附近,是提取古厄尔尼诺记录的理想海区。通过箱式柱状样中年纹层的逐层分析,发现在 1957~1958 和 1982~1983 的两次厄尔尼诺期,硅藻暖水种的通量增高反映水温升高,而硅藻总数通量下降说明生产力下降。与此相反,放射虫的总通量却在厄尔尼诺年趋于上升<sup>[83,84]</sup>。浮游有孔虫的氧同位素与海水温度相关,因此可以用年纹层中氧同位素的变化求取厄尔尼诺年海水升温的记录。该区较长的沉积序列揭示了 1750 年以来 225 年的纹层记录,氧同位素值的变化表明厄尔尼诺的出现频度有 50a 左右的周期性<sup>[85]</sup>。

1) Wang L, Sarnthein M, Erlenkeuser H *et al.* East Asian Monsoon climate during the Late Pleistocene: High-resolution sediment records from the South China Sea. 1998

可见,深海沉积在具年纹层条件下可以提供古厄尔尼诺信息。但由于沉积速率较低,而且纹层有时与生物扰动层交替出现,其实际有效分辨率通常还只能达到十年等级,只能据此讨论趋势,而不足以作出年际变化的准确结论<sup>[83]</sup>。真正高分辨率的厄尔尼诺海洋记录,还得靠浅水的群体珊瑚。热带海区滨珊瑚(*Porites*)年纹层的同位素与元素分析,揭示了表层水温、降雨量、风和上升流的年际变化,为厄尔尼诺历史提供了有力的证据<sup>[86] 1)</sup>。如果将珊瑚每个年纹层分成若干薄片,可以将分辨率提高到追踪月际(12片),甚至周际(约50片)变化的高度<sup>2)</sup>。

年内古季节温差的研究,在季风气候区具有特殊意义。多年生的贝壳、大有孔虫可以在个体内部记录季节变化,生命短暂的如浮游有孔虫可以用种群内部不同个体间的差值反映这种变化。软体动物贝壳(如*Strombus bubonius*, *Mytilus californianus*, *Crassostrea gigas*)在不同季节时形成的微生长层具有不同的 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^{13}\text{C}$ 值,它们随表层海水温度和盐度的季节变化而变化。将这一关系应用到地中海<sup>[87]</sup>、加利福尼亚<sup>[88]</sup>和渤海湾<sup>[89]</sup>具有详尽测年资料的海相贝壳化石中去,已揭示出重要的季节性变化。如加利福尼亚全新世中期约5900~4500aB.P.的表层水温较今低约2.5°C,而季节温差却明显增大<sup>[88]</sup>。用沉积捕获器在巴拿马海盆采取水层中不同季节的浮游有孔虫进行氧同位素分析,发现*Globigerinoides ruber*, *Globorotalia inflata*不同季节的 $\delta^{18}\text{O}$ 值呈现出明显的差别,分别反映了“浅层水”(指50m以上, *G. ruber*)和“深层水”(指100m以下, *G. inflata*)的温度季节变化<sup>[90, 91]</sup>,这方面的研究在我国南海业已开展<sup>[92]</sup>。又如,将现代热带大有孔虫*Marginopora vertebralis*壳的环型房室分开,每9~10个房室分别进行氧、碳同位素分析,发现其 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^{13}\text{C}$ 在壳体生存的2年中随季节水温而变化,而且 $\delta^{18}\text{O}$ 值变化曲线与海水温度季节变化相一致<sup>[93]</sup>。此类壳体,在古季风研究中都具有很大的潜力。

## 5 展望与建议

第四纪古环境研究进入高分辨率的境界,是地球科学发展中的一件大事。当前国际学术界高分辨率记录,一般都与建立古环境模型结合在一起。这不仅是提高时间分辨率,加强辨识突变事件能力的问题,而且是地球历史的研究从现象描述进入机理探索的转变。高分辨率研究的要求,也不仅在于精密仪器和先进设备,还在于科学家的思想方法和工作习惯。对于在我国学术界展开高分辨率古环境记录的研究,可以提出以下建议:

(1) 有目的、有重点地选择研究对象。决不要轻易决定加密采样,更不要对剖面质量和价值缺乏了解的情况下盲目进行,以为取样密,“分辨率”就一定“高”。测年的准确性和记录的连续性是进行高分辨率研究的必要条件。必须慎重选择关键性剖面 and 关键性层段,选择有明确针对性的替代性标志去开展高分辨率分析,才可能解决关键问题、取得重要成果。我国部分学术界只重结论不重证据、只讲结果不给数据、定量分析不讲误差等种种旧习惯,与高分辨率古环境研究的要求是格格不入的。

1) Cole J E. Interannual-decadal variability in the tropical ocean-atmosphere and the extratropical response (Abstract). 1998

2) A. Chivas面告

(2) 坚持独立自主的学术探索。晚第四纪古环境高分辨率研究源自西欧北美,而发现的种种事件,也大多起源于北大西洋高纬区。这一方面是科学研究的客观结果,毋庸置疑,但另一方面也应当注意科学发现的地理分布常常受科学家地理分布的制约。就地球表面的环境演变来说,低纬西太平洋和亚洲东南,是当今地球上海陆之间能流与物流量最大的地区。我国科学界在努力以中国实例证实北大西洋区的发现之余,也应当充分注意到本区在全球演变中的重要性,在与国际接轨的同时坚持开展独立自主的学术探索,才有可能作出更具创新性的成果。

(3) 开展前第四纪的高分辨率古环境研究。突变事件不以第四纪为限,而探索因果关系要求提高时间分辨率,更适用于整个地球历史。日本学者用扫描 X 射线分析显微镜对 8m 厚的太古代层状铁矿作 0.8mm 密度的高分辨率化学分析<sup>[94]</sup>,便出自此种目的。地史上众多的突变事件正有待发现。在不到 6 000 年的时间内大洋底层水增温 4°C 以上,底栖有孔虫 50% 绝灭的古新世末事件<sup>[95]</sup>,便是突出的一例。各种环境事件的高分辨率时间序列,是判断因果关系的基础;提高时间分辨率,也是提高地质科学精度的途径。1994 年在利物浦召开的“高分辨率层序地层学”讨论会<sup>1)</sup>,就是层序地层学深入的标志。我国地层学研究实力雄厚、基础深厚,必然能在高分辨率的基础上做出更大的成绩。

在当前地球科学的各个分支中,探索环境演变的多学科研究发展格外迅速,继 19 世纪进化论和 20 世纪板块学说之后,地球气候环境演变机理的揭示,可能是下世纪地球科学的突破口。在这里,高分辨率的研究是通向新世纪新突破的必由之路,也是我国地学工作者一显身手,为国际学术进步做出贡献的广阔天地。

### 参 考 文 献

- 1 Dansgaard W, White J W C, Johnsen S J. The abrupt termination of the Younger Dryas climate event. *Nature*, 1989, **339**:532~533
- 2 Alley R B, Meese D A, Shuman C A *et al.* Abrupt increase in greenland snow accumulation at the end of the Younger Dryas event. *Nature*, 1993, **362**:527~529
- 3 Broecker W S, Denton G H. The role of ocean-atmosphere reorganizations in glacial cycles. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1989, **53**: 2 465~2 501
- 4 Oeschger H, Langway C C eds. *The Environment Record in Glaciers and Ice Sheets*. New York: Wiley, 1989. 1~317
- 5 Mayewski P A, Bender M. The GISP2 ice core record——Paleoclimate highlights. *Reviews of Geophysics*, 1995, Supplement: 1 287~1 296
- 6 Martinson D G, Pisias N G, Hays J D *et al.* Age dating and the orbital theory of the ice ages: Development of a high-resolution 0 to 300 000 year chronostratigraphy. *Quaternary Research*, 1987, **27**:1~29
- 7 Andree M, Oeschger H, Broecker W S *et al.* AMS radiocarbon dates on foraminifera from deep sea sediments. *Radiocarbon*, 1986, **28**(2A):424~428
- 8 Broecker W S, Andree M, Bonani G *et al.* Comparison between radiocarbon ages obtained coexisting planktonic foraminifera. *Paleoceanography*, 1988, **3**(6):647~657
- 9 陈铁梅. <sup>14</sup>C 测年与示踪用于研究四万年来的全球变化. *第四纪研究*, 1990, (2): 181~187

1) Aitken J F, Howell J A. *High resolution sequence stratigraphy: Innovations, applications and future prospects*. 1996

- 10 Laj C, Mazaud A, Duplessy J C. Geomagnetic intensity and  $^{14}\text{C}$  abundance in the atmosphere and ocean during the past 50 kyr. *Geophysical Research Letters*, 1996, **23**(16):2 045~2 048
- 11 Stuiver M, Kromer B, Becker B *et al.* Radiocarbon age calibration back to 13 300 years B.P. and the  $^{14}\text{C}$  age matching of the German Oak and US Bristlecone Pine chronologies. *Radiocarbon*, 1986, **28**(2B):969~979
- 12 Stuiver M, Reimer P J. A computer program for radiocarbon age calibration. *Radiocarbon*, 1986, **28**(2B): 1 022~1 030
- 13 Kromer B, Becker B. Tree-ring  $^{14}\text{C}$  calibration at 10 000 B.P. In: Bard E, Broecker W S eds. *The Last Deglaciation: Absolute and Radiocarbon Chronologies*. New York: Springer-Verlag, 1992. NATO ASI Series 2: 3~12
- 14 Hughen K A, Overpeck J T, Lehman S J *et al.* Deglacial changes in ocean circulation from an extended radiocarbon calibration. *Nature*, 1998, **391**:65~68
- 15 Stuiver M, Pearson G W, Braziunas T. Radiocarbon age calibration of marine samples back to 9 000 cal yr B.P. *Radiocarbon*, 1986, **28**(2B):980~1 021
- 16 Bard E, Hamelin B, Fairbanks R G *et al.* Calibration of the  $^{14}\text{C}$  timescale over the past 30 000 years using mass spectrometric U-Th ages from Barbados corals. *Nature*, 1990, **345**:405~410
- 17 Bard E, Hamelin B, Fairbanks R G. U-Th ages obtained by mass spectrometry in corals from Barbados: Sea level during the past 130 000 years. *Nature*, 1990, **346**:456~458
- 18 Alexandrovskiy A L, Chichagova O A. The  $^{14}\text{C}$  age of humic substances in paleosols. *Radiocarbon*, 1998, **40**(2):991~997
- 19 Meldahl K H, Flessa K W, Cutler A H. Time-averaging and postmortem skeletal survival in benthic fossil assemblages: Quantitative comparisons among Holocene environments. *Paleobiology*, 1997, **23**(2):207~229
- 20 Kowalewski M, Goodfriend G A, Flessa K W. High-resolution estimates of temporal mixing within shell beds: The evils and virtues of time-averaging. *Paleobiology*, 1998, **24**(3):287~304
- 21 金性春, 周祖翼, 汪品先. 大洋钻探与中国地球科学. 上海: 同济大学出版社, 1995. 67~69
- 22 Taylor K C, Hammer C U, Alley R B *et al.* Electrical conductivity measurements from the GISP2 and GRIP Greenland ice cores. *Nature*, 1993, **366**:549~552
- 23 Holler P, Kögler F C. Computer tomography: A nondestructive, high-resolution technique for investigation of sedimentary structures. *Marine Geology*, 1990, **91**:263~266
- 24 Amos C L, Sutherland T F, Radziewicz B *et al.* A rapid technique to determine bulk density of finegrained sediments by X-ray computer tomography. *Journal of Sedimentary Research*, 1996, **66**:1 023~1 025
- 25 Rack F R, Balcom B J, MacGregor R P *et al.* Magnetic resonance imaging of the Lake Agassiz-Lake Winnipeg transition. *Journal of Paleolimnology*, 1998, **19**:255~264
- 26 Weeks R, Laj C, Endignoux L *et al.* Improvements in long-core measurement technique: Applications in paleomagnetism and paleoceanography. *Geophysical Journal International*, 1993, **114**:651~662
- 27 Liu Tungsheng, Ding Zhongli. Stepwise coupling of monsoon circulations to global ice volume variations during the late Cenozoic. *Global and Planetary Change*, 1993, **7**(1~3):119~130
- 28 Ding Z, Yu Z, Rutter N W *et al.* Towards an orbital time scale for Chinese loess deposits. *Quaternary Science Review*, 1994, **13**:39~70
- 29 Guo Z, Liu T, Guiot J *et al.* High frequency pulses of East Asian Monsoon climate in the last two glaciations: Link with the North Atlantic. *Climate Dynamics*, 1996, **12**:701~709
- 30 Porter S C, An Z S. Correlation between climate events in the North Atlantic and China during the Last Glaciation. *Nature*, 1995, **375**:305~308
- 31 周卫建, 安芷生, Porter S C 等. 末次冰消期东亚和挪威海气候事件的对比. *中国科学(D辑)*, 1997, **27**(3): 260~264

- 32 Thompson L G, Yao T, Davis M E *et al.* Tropical climate instability: The Last Glacial cycle from a Qinghai-Tibetan ice core. *Science*, 1997, **276**:1 821~1 825
- 33 姚檀栋, Thompson L G, 施雅风等. 古里雅冰芯中末次间冰期以来气候变化记录研究. 中国科学(D辑), 1997, **27**(5):447~452
- 34 王苏民, 羊向东, 马 燕等. 江苏固城湖 15ka 来的环境变迁与古季风关系探讨. 中国科学(D辑), 1996, **26**(2):137~141
- 35 张志华, 吴祥定. 利用树木年轮资料恢复祁连山地区近 700 年来气候变化. 科学通报, 1997, **42**(8):849~851
- 36 刘 禹, 吴祥定, 邵雪梅等. 树轮密度、稳定 C 同位素对过去近 100a 陕西黄陵季节气温与降水的恢复. 中国科学(D辑), 1997, **27**(3):271~276
- 37 汪品先, 闵秋宝, 卞云华等. 我国东部第四纪海侵地层的初步研究. 地质学报, 1981, **55**(1):1~13
- 38 汪品先, 闵秋宝, 卞云华等. 十三万年来南海北部陆坡的浮游有孔虫及其古海洋学意义. 地质学报, 1986, **60**(3):215~225
- 39 翦知潜, Yoshiki Saito, 汪品先等. 黑潮主流轴近两万年来位移. 科学通报, 1998, **43**(5):532~536
- 40 Overpeck J T. Paleoclimatology and climate system dynamics. *Reviews of Geophysics*, 1995, Supplement: 863~871
- 41 Berger W H, Labeyrie L D. Abrupt climate change—An introduction. In: Berger W H, Labeyrie L D eds. Abrupt Climate Change—Evidence and Implications. Dordrecht: Reidel, 1987. 3~22
- 42 Kennett J P. The Younger Dryas cooling event: An introduction. *Paleoceanography*, 1990, **5**(6):891~895
- 43 Broecker W S, Andree M, Klas M *et al.* New evidence from the South China Sea for an abrupt termination of the Last Glacial period. *Nature*, 1988, **333**:156~158
- 44 An Zhisheng, Porter S C, Zhou Weijian *et al.* Episode of strengthened summer monsoon climate of Younger Dryas age on the loess plateau of Central China. *Quaternary Research*, 1993, **39**:45~54
- 45 汪品先, 卞云华, 李保华等. 西太平洋边缘海的“新仙女木”事件. 中国科学(D辑), 1996, **26**(5):452~460
- 46 Kudrass H R, Erlenkuser H, Vollbrecht R *et al.* Global nature of the Younger Dryas cooling event inferred from oxygen isotope data from Sulu Sea cores. *Nature*, 1991, **349**:406~408
- 47 Sowers T, Bender M. Climate records covering the last deglaciation. *Science*, 1995, **269**:210~214
- 48 Broecker W S. Paleoocean circulation during the Last Glaciation: A bipolar seesaw? *Paleoceanography*, 1998, **13**(2):119~121
- 49 Goslar T, Arnold M, Bard E *et al.* High concentration of atmospheric  $^{14}\text{C}$  during the Younger Dryas cold episode. *Nature*, 1995, **377**:414~417
- 50 Heinrich H. Origin and consequences of cyclic ice rafting in the Northeast Atlantic Ocean during the past 130 000 years. *Quaternary Research*, 1988, **29**:142~152
- 51 Bond G, Heinrich H, Broecker W *et al.* Evidence for massive discharges of icebergs into the North Atlantic Ocean during the Last Glacial period. *Nature*, 1992, **360**:245~249
- 52 Broecker W S. Massive iceberg discharges as triggers for global climate change. *Nature*, 1994, **372**:421~424
- 53 Bond G C, Lottj R. Iceberg discharges into the North Atlantic on millennial time scales during the Last Glaciation. *Science*, 1995, **267**:1 005~1 010
- 54 Dansgaard W, Johnsen S J, Clausen H B *et al.* North Atlantic climatic oscillations revealed by deep Greenland ice cores. *Geophysical Monograph*, 1984, **29**:288~298
- 55 Oeschger H, Beer J, Siegenthaler U *et al.* Late Glacial climate history from ice cores. *Geophysical Monograph*, 1984, **29**:299~306
- 56 Grootes P M, Stuiver M, White J W C *et al.* Comparison of oxygen isotope records from the GISP2 and GRIP Greenland ice cores. *Nature*, 1993, **366**:552~554
- 57 Bond G, Broecker W, Johnsen S *et al.* Correlations between climate records from North Atlantic sediments and Greenland ice. *Nature*, 1993, **365**:143~147

- 58 Keigwin L D, Jones G A. Western North Atlantic evidence for millennial-scale changes in ocean circulation and climate. *Journal of Geophysical Research*, 1994, **99**(C6):12 397~12 410
- 59 Grimm E C, Jacobson G L Jr, Watts W A *et al.* A 50 000-year record of climate oscillations from Florida and its temporal correlation with the Heinrich events. *Science*, 1993, **261**:198~200
- 60 丁仲礼, 任剑璋, 刘东生等. 晚更新世季风-沙漠系统千年尺度的不规则变化及其机制问题. *中国科学(D辑)*, 1996, **26**(5):385~391
- 61 郭正堂, 刘东生, 吴乃琴等. 最后两个冰期黄土记录的 Heinrich 型气候节拍. *第四纪研究*, 1996, (1):21~30
- 62 Greenland Ice-core Project (GRIP) members. Climate instability during the last interglacial period recorded in the GRIP ice core. *Nature*, 1993, **364**:203~207
- 63 Dansgaard W, Johnson S 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
- 64 Denton G H, Karlen W. Holocene climatic variations: Their pattern and cause. *Quaternary Research*, 1973, **3**:155~205
- 65 Bond G, Showers W, Cheseby M *et al.* A pervasive millennial-scale cycle in North Atlantic Holocene and glacial climates. *Science*, 1997, **278**:1 257~1 266
- 66 O'Brien S R, Mayewski P A, Meeker L D *et al.* Complexity of Holocene climate as reconstructed from a Greenland ice core. *Science*, 1995, **270**:1 962~1 964
- 67 Alley R B, Mayewski P A, Sowers T *et al.* Holocene climatic instability: A prominent, widespread event 8 200 yr ago. *Geology*, 1997, **25**(6):483~486
- 68 Stager J C, Mayewski P A. Abrupt early to mid-Holocene climatic transition registered at the equator and the poles. *Science*, 1997, **276**:1 834~1 836
- 69 Kennett J P, Ingram B L. A 20 000-year record of ocean circulation and climate change from the Santa Barbara Basin. *Nature*, 1995, **377**:510~514
- 70 Lin H L, Peterson L C, Overpeck J T *et al.* Late Quaternary climate change from  $\delta^{18}\text{O}$  records of multiple species of planktonic foraminifera: High-resolution records from the anoxic Cariaco Basin, Venezuela. *Paleoceanography*, 1997, **12**(3):415~427
- 71 Peterson L C, Overpeck J T, Kipp N G *et al.* A high-resolution late Quaternary upwelling record from the anoxic Cariaco Basin, Venezuela. *Paleoceanography*, 1991, **6**(1):99~119
- 72 Wigley T M L, Kelly P M. Holocene climate change,  $^{14}\text{C}$  wiggles and variations in solar irradiance. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 1990, **330A**:547~560
- 73 Crowley T J, Kim K Y. Towards development of a strategy for determining the origin of decadal-centennial scale climate variability. *Quaternary Science Reviews*, 1993, **12**:375~385
- 74 Rampino M P, Self S. Volcanic winter and accelerated glaciation following the Toba super-eruption. *Nature*, 1992, **359**:50~52
- 75 McGuire W J, Howarth R J, Firth C R *et al.* Correlation between rate of sea-level change and frequency of explosive volcanism in the Mediterranean. *Nature*, 1997, **389**:473~476
- 76 施雅风主编. 中国全新世大暖期气候与环境. 北京: 海洋出版社, 1992. 1~213
- 77 吴锡浩, 安芷生, 王苏民等. 中国全新世气候适宜期东亚夏季风时空变化. *第四纪研究*, 1994, (1): 24~37
- 78 蔺知潜, 李保华, Pflaumann U 等. 西太平洋晚全新世变冷事件. *中国科学(D辑)*, 1996, **26**(5):461~466
- 79 Li Baohua, Jian Zhimin, Wang Pinxian. *Pulleniatina obliquiloculata* as a paleoceanographic indicator in the southern Okinawa Trough during the last 20 000 years. *Marine Micropaleontology*, 1997, **32**(1~2):59~69
- 80 中国科学院贵阳地球化学研究所第四纪孢粉组、 $^{14}\text{C}$ 组. 辽宁省南部一万年来自然环境的演变. *中国科学*, 1977, (6):603~614
- 81 Diaz H F, Markgraf V eds. El Niño: Historical and paleoclimatic aspects of the southern Oscillation. Cambridge: Cambridge University Press, 1992. 1~476

- 82 谭明, 刘东生, 钟华等. 季风条件下全新世洞穴碳酸钙稳定同位素气候信息初步研究. 科学通报, 1997, 42(12): 1302~1306
- 83 Anderson R Y, Soutar A, Johnson T C. Long-term changes in El Niño/Southern Oscillation: Evidence from marine and lacustrine sediments. In: Diaz H F, Markgraf V eds. El Niño: Historical and Paleoclimatic Aspects of the Southern Oscillation. Cambridge: Cambridge University Press, 1992. 419~434
- 84 Lange C B, Burke S K, Berger W H. Biological production off southern California is linked to climate change. *Climate Change*, 1990, 16: 319~329
- 85 Dunbar R B. Stable isotope record of upwelling and climate from Santa Barbara Basin, California. In: Thiede J, Suess E eds. Coastal Upwelling, its Sedimentary Record, Part B. New York: Plenum Press, 1983. 217~245
- 86 Cole J E, Fairbanks R G, Shen G T. Recent variability in the southern Oscillation: Isotopic results from a Tarawa Atoll Coral. *Science*, 1993, 260: 1790~1793
- 87 Cornu S, Pätzold J, Bard E *et al.* Paleotemperature of the last interglacial period based on  $\delta^{18}\text{O}$  of *Strombus bubonius* from the western Mediterranean Sea. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 1993, 103: 1~20
- 88 Glassow M A, Kennett D J, Kennett J *et al.* Confirmation of middle Holocene ocean cooling inferred from stable isotopic analysis of prehistorical shells from Santa Cruz Island, California. In: Halverson W L, Maender G J eds. The Fourth California Islands Symposium: Update on the Status of Resources. Santa Barbara: Santa Barbara Museum of Natural History, 1994. 223~232
- 89 Wang H, Van Strydonck M. Chronology of Holocene cheniers and oyster reefs on the coast of Bohai Bay, China. *Quaternary Research*, 1997, 47: 192~205
- 90 Fairbanks R G, Sverdlow M, Eise R *et al.* Vertical distribution and isotopic fractionation of living planktonic foraminifera from the Panama Basin. *Nature*, 1987, 298: 841~844
- 91 Ravelo A C, Fairbanks R G. Oxygen isotopic composition of multiple species of planktonic foraminifera: Records of the modern photic zone temperature gradient. *Paleoceanography*, 1992, 7(6): 815~831
- 92 Wiesner M G, Zheng L, Wong H K. Fluxes of Particulate matter in the South China Sea. In: Ittekkot V ed. Particulate Flux in the Ocean. New York: John Wiley and Sons, 1996. 91~154
- 93 Wefer G, Berger W H. Stable isotopes in benthic foraminifera: Seasonal variation in large tropical species. *Science*, 1980, 209: 803~805
- 94 高野雅夫. 全地球史解読のための最新テクノロジー開発. 科学, 1998, 68(10): 778~783
- 95 Kennett J P, Stott L D. Abrupt deep-sea warming, paleoceanographic changes, and benthic extinctions at the end of the Paleocene. *Nature*, 1991, 353: 225~229



## SEARCHING HIGH-RESOLUTION PALEOENVIRONMENTAL RECORDS: A REVIEW

Wang Pinxian     Jian Zhimin

(*Ministry of Education Laboratory of Marine Geology, Tongji University, Shanghai 200092*)

### Abstract

The discovery of abrupt climate changes in the past and the need for predictions of environmental changes in the future have raised an urgent request for high-resolution paleoenvironmental records. The present paper tries to review the international, as well as Chinese literature to show recent progress in the high-resolution studies of late Quaternary environmental changes, preferentially in offshore areas. Although the review covers all the millennial, centennial, decadal and interannual time scales, its emphasis is laid on "sub-Milankovitch" climatic variations including Heinrich events and Dansgaard / Oeschger events. A special discussion is devoted to calibration of radiocarbon datings as a prerequisite for a precise chronology of environmental events. The paper is concluded with three suggestions to Chinese colleagues: 1) to be selective in application of high-resolution approaches to fossil records and to be aware of the specific requirement for high-resolution studies; 2) to develop our own scientific thoughts in high-resolution paleoenvironmental studies on the basis of regional specific features; and 3) to apply the high-resolution approaches to pre-Quaternary sedimentary sequences.

**Key words**     high-resolution records, paleoenvironment, Sub-Milankovitch cyclicality, calibration of radiocarbon datings