

第四纪气候变化机制研究的进展与问题

熊尚发 丁仲礼 刘东生

(中国科学院地质研究所 北京 100029)

摘要 自从本世纪 50 年代海洋沉积氧同位素记录被揭示以来,经典的陆地 4 次冰期理论被新的认识所取代,人们发现第四纪以来冰期-间冰期旋回远远不止 4 次,并且从深海沉积和陆地黄土获取的古气候变化记录与地球轨道参数变化可以对比,为揭示第四纪古气候变化机制构建了明确的框架。近年来有关末次冰期不稳定气候事件的揭示也为深入认识古气候变化特征提供了新的证据。然而冰期-间冰期旋回机制、南北半球在冰期-间冰期循环过程中的耦合机制以及气候不稳定事件发生机制仍然是困扰古气候研究者的重大问题。

关键词 第四纪 冰期-间冰期旋回 气候不稳定性 气候变化机制

分类号 P532

近几十年尤其是近 10 年以来,第四纪古气候研究无论在记录(深海、冰心、黄土)揭示还是在机制认识及模拟方法方面都取得了非常大的进步。经典的 4 次冰期理论被新的认识所打破,从海洋、陆地黄土中揭示的几十次冰期-间冰期旋回及其包含的轨道周期的模式使得第四纪古气候变化及其机制的研究有了一个比较清晰的框架。伴随着认识的进步,有关古气候机制方面的问题显得愈加突出,这些问题包括冰期-间冰期旋回的机制;南北半球在冰期-间冰期循环过程中耦合的机制;气候不稳定性机制等。这既是过去研究遇到的新问题,又是未来研究面临的新课题。

围绕这些问题,我们拟针对不同时间尺度就当前古气候研究作一个概略的回顾,着重讨论轨道尺度、万年尺度及千年-十年尺度的气候变化机制。

1 轨道尺度气候变化机制

1.1 气候变化与轨道参数变化的关系

深海沉积与黄土记录都显示,第四纪气候变化存在约 2~10 万年尺度的周期性气候变化,这一尺度恰好与地球轨道参数变化周期相当。因此人们很早就注意到气候变化与轨道参数变化(及其引起的太阳辐射纬度-季节分配格局的变化)之间的关系。最早 Emiliani^[1]将

国家自然科学基金重大项目“我国干旱半干旱区 15 万年来环境演变的动态过程与发展趋势”(项目编号:49291100)资助。第一作者简介:熊尚发,男,1965 年 6 月出生,助理研究员,主要从事第四纪古气候学的研究。收稿日期:1997-06-02;修改稿:1997-10-28

深海氧同位素记录与 65°N 太阳辐射变化曲线进行了对比,他认为海洋低温时段(氧同位素高值)与北半球高纬太阳辐射低值时段可以很好地对比,由此认为更新世全球气候是由北半球高纬太阳辐射所控制。Broecker 等^[2]对太阳辐射模式进行了重新设定,使得气候变化曲线与太阳辐射变化曲线之间对比性更好,通过巴巴多斯(Barbados)珊瑚礁阶地的精确定年,证实了海面变化与北半球中高纬(45°N)夏季太阳辐射之间的对应关系。Hays 等^[3]通过对太阳辐射曲线与古气候记录曲线进行谱分析,令人信服地说明了气候变化与轨道参数变化之间的紧密关系,这一方法也被以后的研究采用。Imbrie 等^[4]进一步通过轨道参数叠加获得了与氧同位素记录极其相似的模式曲线,从而证明气候变化是对轨道参数变化的线性响应。

1.2 轨道尺度气候变化的周期分析

轨道参数变化与气候变化关系可能是本世纪古气候研究的最大发现之一。研究轨道参数变化与气候变化关系的最重要手段是周期分析。Hays 等^[5]对南印度洋两个钻孔 45 万年记录进行的谱分析结果表明,周期谱含有三个峰值,分别对应于 23 ka、42 ka 和 100 ka 年的周期,三个峰分别占气候变化份额的 10%、25% 和 50%。这三个峰值周期恰好与地球轨道参数变化周期相吻合,虽然在幅度上 100 ka 周期在二者之间并不对应^[5]。以后的相关研究又进一步加深了对地质记录和轨道参数变化周期关系的认识。Ruddiman 等^[6]对北大西洋五个钻孔 1.65 Ma 以来的记录进行了轨道调谐分析,发现所有的记录(底栖有孔虫 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^{13}\text{C}$ 、 CaCO_3 含量、SST)在松山-布容期过渡时段有一个周期转换过程,对偏心率和岁差周期的响应幅度增加,而对黄赤交角周期的响应幅度则减少。记录的主导周期也在 0.7~0.6 Ma 之间发生转换,从 41 ka 占主导变为以 100 ka 周期为主导。Raymo 等^[7]对相同钻孔 2.8~1.6 Ma 时段的分析表明,这一时段是以 41 ka 成分为主导周期的,偏心率(96 ka)和岁差(23 ka)周期从 2.1 Ma 左右开始显现。

McIntyre 等^[8]对于热带大西洋 25 万年以来表层海温研究则显示其变化受太阳辐射岁差周期所驱动。根据相位分析,在岁差周期内,东赤道太平洋与南半球海温具有同时变化(或前者略晚于后者)的关系,而它们又明显领先于北半球海温和大陆冰量的变化。

Tiedemann 等^[9]对大西洋 ODP 659 孔 5 Ma BP 以来底栖有孔虫氧同位素和粉尘通量进行了周期分析。从相位分析结果看,在轨道周期范围内,粉尘通量最大值几乎在所有时段,所有周期(41、23、19 ka)内都领先于大陆冰量最大值(只有 41 ka 在 3.5~4 Ma BP 时段粉尘通量滞后于冰量变化)。这可能表明,非洲粉尘以及热带大气环流不受大陆冰量变化所直接控制。对于非洲西部和东部海洋以及阿拉伯海钻孔陆源碎屑记录的周期分析^[10]显示,4.5~2.8 Ma BP 主导周期为 23 ka,而 19 ka、100 ka、41 ka 周期也很明显;2.8~1.0 Ma 主导周期为 41 ka,其次为 100 ka、23 ka、19 ka 较弱;1 Ma BP 至今主导周期成为 100 ka,其次 41 ka、23 ka、19 ka 微弱,又似乎表明北半球大陆冰量、北大西洋海温与非洲气候变化之间的密切关系。

陆地记录时段较长的不多。Hooghiemstra 等^[11]对哥伦比亚丰萨(Funza)-I 孔孢粉记录进行了周期分析,这一记录跨时 1.45 Ma,分析显示 100 ka 周期从 800 ka BP 开始出现,23 ka 周期贯穿整个记录,40 ka 周期以及 30 ka、15 ka、13 ka、10 ka 周期在记录中都有显示。Ding 等^[12]对中国黄土-古土壤序列的粒度记录进行了谱分析,揭示出几个周期转换时段的存在,2.5~1.6 Ma BP 有 400 ka、90 ka、55 ka、41 ka、29 ka、23 ka、19 ka 等周期;1.6~0.8 Ma BP 以 41 ka 为主导周期;1.0~0.55 Ma BP 以 100 ka 为主导周期,41 ka 次之,19

ka, 23 ka 较弱; 0.6~0 Ma BP 仍以 100 ka 周期为主, 41 ka 强度下降。

从上述对于地质记录的周期分析来看, 第四纪以来气候变化的主导周期有一个转变过程, 大体上是从岁差周期主导转变为黄赤交角周期为主导, 最后是以偏心率周期为主导。

1.3 10 万年周期产生问题

第四纪以来气候变化主导周期存在转变过程, 而同一时期太阳辐射的季节和地区分配格局却没有发生类似的变化, 如北半球高纬 6 月中旬太阳辐射变化从 3200 ka BP 以来, 始终是以岁差周期为主导, 各时期的变化并不显著^[5]。这表明, 气候变化虽然在一定程度上受太阳辐射的直接驱动, 但在更多分量上却不受轨道参数变化的控制, 而可能受气候系统内在机制的控制。

最大的问题来自 10 万年周期的产生。虽然偏心率周期接近 10 万年, 但是由偏心率变化引起的太阳辐射变化分量太小, 不足以解释布容期以来气候记录中 10 万年周期占主导地位的事实^[13, 14]。因此, 气候系统变化的 10 万年周期的起源以及演化机制就成为第四纪古气候研究中的最大疑难问题了。

Imbrie 等^[14]认为, 10 万年周期产生于气候系统内部的非线性响应机制, 与北半球大陆冰盖产生的气候惰性有关。但是, 有记录表明^[15], 在早中生代(200 Ma BP)、白垩纪(~100 Ma BP)、中新世(~15 Ma BP)等不存在大陆冰盖的时期, 气候变化就有 400 ka、100 ka、130 ka、30 ka 等变化周期, 说明 10 万年周期的产生可能与大陆冰盖关系非常复杂。Short 等^[16]通过模拟发现, 低纬地区能够在岁差周期为主的太阳辐射驱动下产生 100 ka、400 ka、41 ka、23 ka、19 ka、12 ka 及 10 ka 等多种周期的复杂响应。Crowley 等^[17]的模拟表明低纬地区(季风波动区域)能够产生 100 ka 周期的响应, 在模拟的温度场中, 太阳直射点每年两次穿越赤道以及南北向相互作用的季节转换能够增加 100 ka 和 400 ka 周期的强度。Liu 等^[18]提出, 气候记录中主导周期转变可能与青藏高原构造抬升有关。最近, Muller 等^[19]提出, 轨道面倾角(orbital inclination)与冰期旋回有关, 根据对所获沉积记录的周期分析, 发现其谱密度特征与轨道面倾角周期相似, 而与地球轨道三要素周期明显不同; 而 Farley 等^[20]获得的海底³He 通量证据中 100 ka 周期的存在, 也似乎支持了这一假说。

总之, 10 万年周期的成因仍然是困扰第四纪古气候学家的最重要的问题之一, 甄别各种假说还有待更多的证据。

2 万年尺度气候变化机制与冰期-间冰期转换机制

2.1 不稳定气候事件机制

对于末次冰期—间冰期的气候变化, 目前的研究开始侧重于一系列轨道以下尺度的气候事件及其机制的研究, 这些气候事件包括 Younger Dryas (YD) 事件、Heinrich (H) 事件、D-O 颤动(Dansgaard-Oeschger oscillations)以及冰期-间冰期转换过程等。

对于 YD 事件, 目前已在不同区域不同记录中发现其存在的证据。在海洋沉积中, YD 时期极地有孔虫占优势的分布表明此时接近于盛冰期环境。底栖有孔虫 Cd/Ca 和 $\delta^{13}\text{C}$ 记录显示, YD 事件时期深层水几乎停止生成, 而中层水却得到加强^[21]; 在格陵兰冰心记录中, 从 YD 事件回复到间冰期状态过程中, 在 50 年内温度增加了 7℃, 显示快速回返的巨大气候效应^[22]。YD 事件在阿拉斯加的孢粉记录、北美冰川沉积记录、苏禄海沉积, 甚至在新西兰的冰川沉积记录中都有发现, 表明 YD 事件可能是一个全球性气候事件。

对于 YD 事件的原因, Broecker^[23]认为是由于冰盖融化, 淡水注入导致大西洋温盐环流的中断, 从而给北大西洋地区带来寒冷气候。这一假说也得到某些证据的支持, 但同时也有证据与之相矛盾。也有人认为 YD 事件与 CO₂ 浓度降低有关或者是大气圈变化的后果^[24]。从格陵兰冰心粉尘记录看^[25] YD 时期粉尘大量增加, 暗示粉尘也可能在这次气候转变过程中起着重要的反馈作用。

Heinrich 事件是指在北大西洋沉积中发现的冰漂碎屑 (IRD) 周期性增加的过程, 又特指末次冰期期间普遍存在的 6 次大的冰漂碎屑沉积事件, 反映了 6 次较大的冰山崩塌融化过程^[26]。事实上冰漂碎屑在某些层位的富集是很早就观察到的, 但当时人们并未将它与更多的气候过程进行联系。Broecker 等^[27]在几百公里以外又找到相同的冰漂碎屑事件, 表明 Heinrich 事件具有一定的普遍性。于是有关这些事件的气候意义才开始引起人们的注意。Bond 等^[28]首先将海洋沉积中的 Heinrich 事件与格陵兰冰心中的快速气候变化 (D-O 事件) 进行了对比, 发现 H 事件正是 D-O 颤动事件中最突出的部分, 从而将冰盖行为与海洋-大气圈变化联系起来。以后, 在北太平洋深海沉积、中国黄土堆积^[29]、南美山地冰川等多种记录中都检出与 H 事件相当的信号, 似乎表明 H 事件与 YD 事件一样, 是一个全球性气候事件。

关于 H 事件的原因, 目前还没有合适的解释。MacAyeal^[30]通过模拟认为, H 事件可以用冰盖自发波动进行解释, 但是这一模式无法解释北大西洋沿岸不同冰盖出现的 H 事件同时性变化现象; 有人认为 H 事件是对全球性气候变化的一种响应。Bond 等^[31]通过高分辨率的研究, 发现冰漂碎屑具有千年尺度的变化, 可以与 D-O 颤动进行完全的对比, 而与海表面温度 (SST) 具有不同的变化。也有研究表明 NADW (North Atlantic Deep Water) 减少与海温下降 (从而与格陵兰冰心记录的气温下降) 可以对比。Broecker^[32]认为 H 事件是激发全球气候变化 (通过大洋传送带开-合机制) 的原因; 而某些记录 (南半球山地冰川) 似乎表明是全球气候变化导致 H 事件, H 事件作为一个反馈 (通过大洋传送带) 放大了这种全球性气候变化的影响。

2.2 冰期-间冰期转换机制及南北半球耦合机制

对于万年尺度的气候变化, 冰期-间冰期转换的原因及南北半球变化耦合是最大的问题。冰期-间冰期转换的直接驱动, 用米兰科维奇假说很难加以解释, 因为轨道偏心率导致的太阳辐射分配变化实在太小, 无法解释气候记录中从冰期到间冰期发生的巨大变化和这种变化在南北半球同时发生的现象。

有不少模拟表明, 冰盖通过自身的内在变化和滞后效应 (不需太阳辐射驱动) 就能产生冰期-间冰期旋回的变化; 但是, 古气候学家还是普遍认为, 最初的变化动力与北半球太阳辐射分配变化有关, 这样, 有关冰期-间冰期转换机制及南北半球变化耦合机制的讨论就集中在两个方面的问题上了, 即气候变化信号是如何从北半球传递到南半球的? 北半球高纬太阳辐射的微小波动何以被反馈放大为全球气候如此剧烈的转换?

Denton 等^[33]曾经提出一个海面变化-冰盖波动锁定的南北半球耦合模式来解释冰期-间冰期转换及南北半球耦合问题, 这一模式认为, 米兰科维奇假说中的北半球高纬太阳辐射变化通过南北半球海基、陆基冰盖波动-海面变化-冰盖热汇变化形成放大效应, 从而使区域辐射变化激发全球性气候变化。Broecker^[34]认为, 南北半球耦合实际上反映了南半球变化从属于北半球变化, 然而他认为海面变化传递无法解释南半球变化的一些事实, 因此,

深海环流或大气圈 CO₂ 变化可能是传递因子。

最近, Broecker 等^[13]进一步发展了他的假说, 认为冰期- 间冰期旋回是由海- 气系统重组形成的, 具体说, 是大洋传送带的开- 合过程导致的, 并认为北大西洋是大洋环流(因而也是冰期- 间冰期) 状态转换的关键区, 也即激发区。Imbrie 等^[14]认为冰期- 间冰期旋回是由于北半球冰盖作为巨大的惯性源, 在岁差、黄赤交角驱动超过一定限度时, 以响应外源驱动的方式, 驱使大气圈和海洋变化而形成的。他们还根据不同区域气候替代性指标的相位分析, 认为激发区在Nordic海(挪威海、丹麦海、格陵兰海的总称), 即Nordic海的变化激发北大西洋的环流变化, 最后导致更大范围的气候变化。Imbrie 等在此认为冰期- 间冰期旋回是内源驱动(冰盖驱动) 的变化, 但与外源驱动有关, 并且其传递驱动的路径与响应外源驱动过程是一致的。

目前看来, 无论是哪一种假设, 都无法完满地解释冰期发动机制以及南北半球耦合问题。对于北大西洋的变化能否激发全球气候变化, 也是一个值得进一步研究的问题。同时, 模拟表明, 冰盖对于全球气候的直接影响是非常有限的^[65]。因此, 很可能激发冰期机制的源区不止北大西洋一个区域, 并且, 传递气候变化的途径也可能并非局限于大洋传送带或大气 CO₂ 变化。在高纬气候波动传播、气候系统内部反馈放大作用及气候变化南北半球耦合方面, 亚洲季风区的水汽、粉尘变化可能是被忽视的重要因子。

3 短时间尺度气候变化机制

短时间尺度气候变化事件是第四纪古气候研究中的薄弱领域, 这也意味着这一领域有着广阔的前景。短时间尺度气候变化在这里特指万年以下时间尺度的气候变化, 最典型的就是末次冰期D- O旋回事件, 而在末次冰期之后与D- O旋回类似或更短时间尺度的变化也不断被检出。如格陵兰冰心化学分析结果就显示在全新世以来存在明显的千年尺度的波动, 海盐和陆地粉尘在0~ 610、2 400~ 3 100、5 000~ 6 100、7 800~ 8 000以及> 11 300 a BP期间都有显著增加, 反映气候变干变冷, 表明全新世以来出现Quasi- 2 600 a周期事件^[66]。有意思的是, 这些事件在北大西洋冰漂碎屑沉积中也有反映。Bond^[67]发现全新世冰漂碎屑出现的周期在1 000~ 2 400年间, 出现的时间与格陵兰海盐记录颇为吻合, 看来, D- O波动尺度的气候事件不但出现于冰期, 也可能出现于间冰期。最近, 对于中国黄土的研究表明, 千年尺度的波动事件在黄土记录中也有显著表现^[38, 39], 同时, 从赤道到高纬、极地, 从海洋到陆地的许多沉积记录中都发现有千年尺度快速波动的证据, 这意味着这一尺度气候事件也具有全球性。对于更短时间尺度(十至百年尺度) 的变化, 近年来开始得到越来越多的关注。十至百年尺度气候变化主要记录于冰岩心、湖泊纹层、树轮、珊瑚、淡水碳酸盐沉积、历史文献及仪器记录之中。这些记录能达到年- 季分辨率, 为近2 000年来高分辨率气候历史的恢复提供了极有利的条件。从有关的记录中, 普遍可见中世纪暖期、小冰期及本世纪气候转暖等气候事件的影响, 同时, 一些特殊气候事件(如厄尔尼诺- 南方涛动事件, 简称ENSO事件) 也能在某些记录中检出。对高分辨率记录的分析已发现存在年际(4~ 5年, 7~ 8年)、十年际(15~ 25年) 以及百年际(100~ 270年) 等多种变化周期^[40]。

有关短周期气候变化的原因与机制, 了解程度比对百万年、十万年时段气候变化原因与机制要少得多。根据初步的研究, 太阳活动、火山活动和北大西洋底层流变化可能是重要的驱动力, 但都需进一步研究^[41]。对于太阳活动来说, 一些记录中甄别出的太阳活动黑子周期

表明其对气候变化是有一定影响的。但是, 太阳活动峰谷年的变化 $< 0.1\%$, 仅相当于大气圈顶部太阳辐射量约 $1\text{ W}/\text{m}^2$ 的变化, 如此小的变化却导致气候非常显著的波动, 其机制尚难以解释。从一些高分辨率记录中检出了火山活动的证据, 且火山活动与气候转变时期往往对应, 表明火山活动对气候变化的影响不可忽视, 但火山爆发影响持续时间一般仅为一至二年, 对气候系统的影响到底有多大, 尚需深入研究。北大西洋底层流通过“开—合”机制影响大洋热量输送, 对北大西洋地区气候影响显著, 但其对于更大范围, 尤其是全球性气候变化的影响则需进一步分析。此外, 研究还表明 EN SO 发生频率和振幅也可能与全新世变化有影响。

总的说来, 目前在第四纪气候变化机制研究方面, 以轨道尺度气候变化的研究比较深入, 对于千年和万年尺度的气候变化研究也有了很明显的进展, 而对于短时间尺度(十至百年尺度)气候变化的研究则刚刚开始, 对其机制的了解极其有限。

从空间和过程上看, 目前的气候变化机制研究对北大西洋地区及北美冰盖的作用给予了密切的关注, 对南极边缘海和大气 CO_2 的意义也有足够的认识。而对东亚—西太平洋季风区在全球气候变化中的确切作用则没有形成明确的认识, 对东亚季风区的粉尘和水汽的全球气候意义也没有很好的理解。由此将激发今后的研究, 并可能获得新的认识。

主要参考文献

- Emiliani C. Pleistocene temperatures. *J Geol*, 1955, 63: 538~ 578
- Broecker W S, Thurber D L, Goddard J, *etc*. Milankovitch hypothesis supported by precise dating of coral reefs and deep-sea sediments. *Science*, 1968, 159: 297~ 300
- Hays J D, Imbrie J, Shackleton N J. Variations in the Earth's orbit: pacemaker of the ice ages. *Science*, 1976, 194: 1121~ 1132
- Imbrie J, Imbrie Z. Modling the climatic response to orbital variations. *Science*, 1980, 207: 943~ 953
- Berger A, Pestiaux P. Accuracy and stability of the Quaternary terrestrial insolation. In: Berger A L, *et al* eds. Milankovitch and climate, Part I. Dordrecht: D. Reidel Pub Co, 1984. 83~ 111.
- Ruddiman W F, Kutzbach J E. Forcing of late Cenozoic Northern Hemisphere climate by plateau uplift in Southern Asia and the American West. *J Geophys Res*, 1989, 94(D15): 18 409~ 18 427.
- Raymo M E, Ruddiman W F, Backman J, *etc*. Late Pliocene variations in Northern Hemisphere ice sheet and North Atlantic deep water circulation. *Paleoceanography*, 1989, 4: 413~ 446
- McIntyre A, Ruddiman W F, Karlin K, *etc*. Surface water response of the equatorial Atlantic Ocean to orbital forcing. *Paleoceanography*, 1989, 4: 19~ 55
- Tiedemann R, Sarnthein M, Shackleton N J. A stratigraphic timescale for the Pliocene Atlantic $\delta^{18}\text{O}$ and dust flux records of ODP site 659. *Paleoceanography*, 1994, 9: 619~ 638
- deMenocal P B. Pliocene-Pleistocene African climate. *Science*, 1995, 270: 53~ 59
- Hooghiemstra H, Melice J L, Berger A, *etc*. Frequency spectra and paleoclimatic variability of the high-resolution 30~ 145 ka Funza Ipollen record (eastern Cordillera, Colombia). *Quat Sci Rev*, 1993, 12: 141~ 156
- Ding Z L, Yu Z, Rutter N W, *etc*. Towards an orbital time scale for Chinese loess deposits. *Quat Sci Rev*, 1994, 13: 39~ 70
- 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.
- Imbrie J, Berger A, Boyle E A, *etc*. On the structure and origin of major glaciation cycles II The 100 000 year cycle. *Paleoceanography*, 1993, 8: 699~ 735

- 15 Olsen P O. A 40 million-year lake record of early Mesozoic orbital climatic forcing. *Science*, 1986, 234: 842~ 848
- 16 Short D A, Mengel J G, Crowley T J, *etc*. Filtering of Milankovitch cycles by Earth's geography. *Quat Res*, 1991, 35: 157~ 173
- 17 Crowley T J, Kim K-Y, Mengel J G, *etc*. Modelling 100 000-year climate fluctuations in pre-Pleistocene time series. *Science*, 1992, 255: 705~ 707.
- 18 Liu T, Ding Z. Stepwise coupling of monsoon circulations to global ice volume variations during the late Cenozoic. *Global and Planetary Change*, 1993, 7: 119~ 130
- 19 Muller R A, MacDonald G J. Glacial cycles and orbital inclination. *Nature*, 1995, 377: 107~ 108
- 20 Farly K A, Patterson D B. A 100 kyr periodicity in the flux of extraterrestrial ^3He to the sea floor. *Nature*, 1995, 378: 600~ 603
- 21 Boyle E A, Keigwin L D. North Atlantic thermohaline circulation during the past 20 000 years linked to high-latitude surface temperature. *Nature*, 1987, 330: 35~ 40
- 22 Dansgaard W, White J W C, Johnsen S J. The abrupt termination of the Younger Dryas Climate event. *Nature*, 1989, 339: 532~ 534
- 23 Broecker W S, Andree M, Wolfli W, *etc*. The chronology of the last deglaciation: Implications to the cause of the Younger Dryas event. *Paleoceanography*, 1988, 3: 1~ 19
- 24 Lowell T V, Heusser C J, Andersen B G, *etc*. Interhemispheric correlation of late Pleistocene glacial events. *Science*, 1995, 269: 1 541~ 1 549
- 25 Mayewski P A, Meeker L D, Whitlow S, *etc*. The atmosphere during the Younger Dryas. *Science*, 1993, 261: 195~ 197.
- 26 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
- 27 Broecker W S, Bond G, McManus J, *etc*. Origin of the North Atlantic's Heinrich events. *Climate Dynamics*, 1992, 6: 265~ 273
- 28 Bond G, Broecker W, Johnsen S, *etc*. Correlations between climate records from North Atlantic sediments and Greenland ice. *Nature*, 1993, 365: 143~ 147.
- 29 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
- 30 MacAyeal D R. Binge/Purge oscillations of the Laurentide ice sheet as a cause of the North Atlantic's Heinrich events. *Paleoceanography*, 1993, 8: 775~ 784
- 31 Bond G C, Lotti R. Iceberg discharges into the North Atlantic on millennial time scales during the last glaciation. *Science*, 1995, 267: 1 005~ 1 010
- 32 Broecker W S. Massive iceberg discharges as triggers for global climate change. *Nature*, 1994, 372: 421~ 424
- 33 Denton G H, Hughes T J. Milankovitch theory of ice ages: Hypothesis of ice-sheet linkage between regional insolation and global climate. *Quaternary Research*, 1983, 20: 125~ 144
- 34 Broecker W S. Terminations. In: Berger A L, *etc* eds. *Milankovitch and climate Part II*. Dordrecht: D Reidel Pub Co, 1984. 687~ 698
- 35 Manabe S, Broccoli A J. The influence of continental ice sheets on the climate of an ice age. *Journal of Geophysical Research*, 1985, 90: 2 167~ 2 190
- 36 O'Brien S R, Mayewski P A, Meeker L D, *etc*. Complexity of Holocene climate as reconstructed from a Greenland ice core. *Science*, 1995, 270: 1 962~ 1 964
- 37 Kerr R A. Millennial climate oscillation spied. *Science*, 1996, 271: 146~ 147.
- 38 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: 385~ 391
- 39 An Z, Porter S C. Millennial-scale climatic oscillations during the last interglaciation in central China. *Geology*, 1997, 25: 603~ 606

- 40 Mann M E, Park J, Bradley R S. Global interdecadal and century-scale climate oscillations during the past five centuries. *Nature*, 1995, 378: 266~ 270
- 41 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

THE PROBLEMS AND PROGRESS IN THE STUDIES OF MECHANISMS FOR QUATERNARY CLIMATE CHANGES

XIONG Shang-fa Ding Zhong-li LU Tung-sheng
(*Institute of Geology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029*)

Abstract Since 1950's when Emiliani obtained the first curve of the oxygen isotope records in the deep ocean sediments, the classical glaciation hypothesis developed by Penck had been replaced by the new discoveries which, by the works of Emiliani and of Shackleton, demonstrated that during Quaternary period the cycles of glacial-interglacial were much more than four times. The correspondence between the paleoclimate records from deep ocean sediments as well as continental loess and the earth orbital parameters have established a solid framework for the study of climate change mechanisms. In recent years, the new discoveries including climatic instability during last glacial period have provided an opportunity to study the characteristics and mechanisms of the millennial scale climate changes. However, paleoclimatologists are still puzzled by the climate change mechanisms concerning the development of glacial-interglacial cycles, the synchronous climate changes between Northern and Southern Hemisphere, and the operation of the climate instability.

Key words Quaternary, Glacial-interglacial cycles, Climate instability, Mechanisms of climate changes.