

第四纪气候变化机制研究的进展与问题^a

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

a 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:1997206202;修改稿:1997210228

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 D^{18}O 和 D^{13}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 较 Q
人上述 于地
体上具 (岁
在O/A期
第四纪 人来气
却没有 发生类



THE
F&C

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砾层沉积中也有反映。Bond

表明其对气候变化的影响是有一定影响的。北半球圈顶部太阳辐射量约 170 W m^{-2} 的波动难以解释。从一些高分辨率记录中找到的对应, 表明火山活动对气候变化的影响。在千年, 对气候系统的影响到底有多大? 大洋热量输送, 对北大西洋地区气候的影响则需进一步分析。此外, 研究其影响。

总的说来, 目前在第四纪气候研究方面, 对于千年到万年尺度的气候变化(千年尺度)气候变化的研究则刚刚开始。

从空间过程上看, 目前的气候变化研究, 除了密切的关系, 对南极边缘海和大风区在全球气候变化中的确切作用, 全球气候意义还没有很好的理解。

1. Emiliani C. The temperatures. J Geol. 1970. 78: 155-162.
2. Broecker W. S. et al. 1985. The oceanic conveyor belt. Deep Sea Res. 32: 303-317.



c i et

m

www.cnki.net