

文章编号: 1001-8166(2006)03-0278-08

地球气候变化的米兰科维奇理论研究进展^{*}

石广玉¹, 刘玉芝^{1,2}

(1·中国科学院大气物理研究所, 北京 100029; 2·中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘 要 米兰科维奇理论是从全球尺度上研究日射量与地球气候之间关系的天文理论(以下简称“米氏理论”)。该理论认为,地球轨道偏心率、黄赤交角及岁差等三要素变化引起的到达北半球中高纬度夏季日射量变化是造成冰期—间冰期旋回的根本原因。详细回顾了米氏理论的发展历程,并以南极东方站过去 42 万年大气和气候变化的历史资料为例,讨论了经典米氏理论中有待研究的若干问题。

关 键 词 米兰科维奇理论; 气候变化; 冰期—间冰期旋回

中图分类号 P46 **文献标识码** A

1 引 言

在地球气候演化的漫长地质历史进程中,不同时间尺度和时期的气候特征及其驱动力是很不相同的。但是除了地球演化的早期阶段,来自地球内部的热量和物质释放以及大陆板块运动等曾起过重要作用外,来自太阳的辐射强迫始终起着重要作用。冰芯、深海岩芯以及黄土沉积等古气候记录表明^[1-7],在人类出现并发展的第四纪(过去 240 万年左右)地球气候几乎总是处于变动的状态中。记录还表明,第四纪晚期(过去 70 万年)的气候,具有以 2~10 万年为周期的一系列冰期—间冰期旋回变化特征,其周期与地球轨道偏心率(周期为 10 万年)、黄赤交角(周期为 4.1 万年)以及岁差(周期为 1.9~2.3 万年)的周期相关。在这一时期,除了偶尔的火山(包括海底火山)爆发可以将地球内部的热量和物质输入大气之外,来自太阳的辐射能几乎成为驱动地—气系统这部热机的唯一能源。与此同时,人类在很早以前就已经知道,到达地气系统的太阳辐射能是受地球绕日公转轨道影响的。所以,将天文学与地球气候联系起来是很自然的。其中,塞尔维亚天文学家米卢廷—米兰科维奇(Milutin Mi-

lankovitch)在 20 世纪 40 年代提出的、被后人称为“米氏理论”的假说,是发展比较成熟并得到较普遍认同的气候变化天文理论。

但是在米氏理论提出的最初阶段,它并未得到普遍认同,甚至还受到不同程度的批判。存在争议的主要原因在于,接受米氏理论需要解决两个难点:首先,使地球气候发生变化的关键日射量是什么?事实上,这一问题的答案一直是不确定的;其次,地质定年上存在很大的不确定性,而精确的地质定年却是验证轨道理论的关键所在。直到 20 世纪 60 年代末,特别是 70 年代初,随着更多地质资料的获得、定年方法的改进以及天文和气候模式的发展,米氏理论才被再度提起,人们逐渐开始接受这一气候变化的天文理论,但仍然充满着争议。

实际上,米氏理论之所以能逐渐被接受,主要归功于可用来研究古气候变化的地质资料的获得,其中包括深海岩芯、珊瑚礁、花粉、树木年轮、冰芯等。20 世纪 60 年代,在巴巴多斯岛、夏威夷和新几内亚进行的珊瑚礁研究表明,在距今约 8 万年、10.5 万年和 12.5 万年时期,冰原尺寸缩小,海平面上升到较高水平,且存在一个 2.0~2.5 万年的周期,这与米兰科维奇计算的冰川曲线结果一致^[8,9]。另外,

* 收稿日期 2005-01-09;修回日期 2005-12-13。

* 基金项目 国家自然科学基金项目“过去 42 万年地面温度变化的物理模式研究”(编号 40575042)资助。

作者简介 石广玉(1942-),男,山东淄川人,研究员,主要从事大气辐射及全球变化的研究。E-mail: shigy@mailiap.ac.cn

Emiliani^[10]从深海岩芯得到的主要反映冰原尺寸变化的氧同位素记录也提供了此类信息。CLIMAP (Climate: Long-range Investigation, Mapping and Prediction)^[11]计划结合几种定年技术,采用功率谱分析等数学方法进行的研究表明,至少地球气候变化的某些周期类型与地球轨道变化有关。1978年, Pisias^[12]从深海岩芯中测量了碳酸钙、硅、浮游动植物残骸在巴拿马盆地的累积率。硅的累积率反映近地表特殊类别的生物群落的大小,其值随着气候变化而增加或减小。碳化率则反映了底层水对累积的碳酸盐的溶解能力。Pisias通过功率谱分析,从整个气候记录中抽取最强的周期特征,发现碳酸盐和硅的累积率分别表现出一个2.3万年和10万年周期,与岁差周期和轨道偏心率周期接近。另外,这些周期也出现在另一站点岩芯的氧同位素记录中。应当指出的是,在此类研究中,最具可信度的要属Hays等^[1]的研究,他们获取了跨度为45万年的深海岩芯记录,发现了2.3万年、4.2万年和10万年周期的气候变化,并认为,在过去的35万年里,这些周期一般来说都与适当的轨道周期步调一致。至此,越来越多的证据支持米氏理论,地球轨道变化影响气候的观点开始被接受。

最近,在10万到百万年时间尺度上的古气候研究中,有若干重要的发现。1999年, Petit等^[6]在《自然》杂志上发表了南极东方站过去42万年大气和气候变化的历史资料,涵盖了最近的4个冰期—间冰期旋回。EPICA (European Project for Ice Coring in Antarctica)^[13]更将气温距平资料扩展到涵盖最近8个冰期—间冰期旋回的74万年。另外,格陵兰、南极富士丘穹以及我国的古里雅冰芯记录、海洋沉积、黄土和石笋记录等也给出了宝贵的古气候资料。其中,GISP2 (Greenland Ice Sheet Project Two)于1993年6月在格陵兰中心的钻探,得到了最深的北半球冰芯,跨时为10万年。南极富士丘穹(Dome Fuji)站的最新资料跨时32万年。中国国内也有很多类似的古气候变化研究,包括对孢粉^[14, 15]、树木年轮^[16, 17]、敦德与古里雅冰芯^[18, 19]、石笋^[20]以及黄土^[21]等地质资料的分析研究。但是,包含大气和气候变化历史的最完整、最长的资料仍然是Petit等1999年给出的研究结果。所以,本文以下的讨论将围绕这一记录展开。

目前,关于冰期—间冰期旋回的米氏理论的研究,正在进一步深入,研究热点和遭遇的困难,大致有以下3个方面:强迫(驱动力)问题,周期与位相

问题,以及如何构建一种具有坚实物理基础的模式,对观测资料进行重建并对模拟结果进行科学评价。

2 强迫(驱动力)问题

2.1 日射量

经典的米氏理论认为,偏心率、黄赤交角和岁差等地球轨道三要素的变化,造成了到达北半球中高纬度的夏季日射量变化,然后,这种变化通过日射量/地面温度/冰雪覆盖/反照率反馈(以下记为1st-SA反馈, Irradiance/Surface Temperature/Ice-Snow Cover/Planetary Albedo Feedback)造成冰期—间冰期旋回。特别地,米氏在其模式中使用的是65°N的夏季日射量。其后的大量研究者,基本上沿袭了这一处理方法^[22-24]。这似乎是很有理由的:一方面,北半球的冰雪覆盖面积对夏季日射量的变化远较冬季日射量敏感。换句话说,冬季日射量减少、气温降低所造成的雪覆盖面积的扩展,远不如夏季日射量增大、气温上升所造成的冰雪覆盖面积缩小的效果大。另一方面,北半球中高纬度的陆地面积比南半球大得多,而陆地上的冰雪覆盖可能比海洋对地表温度更为敏感。

但是,在造成冰雪覆盖/地表温度反馈的日射量选取这一关键问题上,一直存在争议,成为米氏理论的研究难点之一。如早在1968年, Broecker等^[25]就认为,对于过去15万年的古气候记录来说,如果选取45°N的夏季日射量代替米氏所选的65°N夏季日射量,则所得结果与观测记录更符合。1975年, Kuila^[26]指出,米氏理论的欠缺之处,就在于日射量的选取上,并认为:关键的日射量应该是南北半球9月和10月的日射量。Hays等在1976年的研究中,分析了日射量功率谱,计算了55°N和60°N的日射量,并得出2点结论:其一,日射量功率谱表现出黄赤交角和岁差周期的特点,但没有体现轨道偏心率特征;其二,黄赤交角和岁差对日射量影响的相对重要性随纬度和季节的不同而不同。

这里,需要着重指出的是,之所以无法对冰期—间冰期旋回的强迫(驱动力)问题给出一个确切答案,根本原因在于大多数研究侧重于北半球中高纬度的夏季日射量与地表气温的相关性分析,缺乏物理基础。事实上,从物理学特别是能量学的观点来看,决定地表年平均温度并进而决定冰雪覆盖面积的物理量,不应当仅仅是北半球中高纬度的夏季日射量,特别是65°N 6月21日的日射量。尽管,我们目前仍然难于回答,在不同的时间尺度上,全球年平

均的日射量在决定全球年平均地表温度中究竟起着多大程度的作用,因为它涉及到地球气候系统内部各构成要素之间复杂的、也许是非线性的相互作用,但是,有一点是肯定的。在地球气候的冰期—间冰期旋回研究中,用 65 N 6 月 21 日的日射量来驱动地球气候系统,按照我们目前的认知水平,所得结果是无法令人接受的。

本文利用 Berger^[27] 方案计算了过去 42 万年 6 月 21 日到达 65 N 的地面日射量(图略),发现:在过去 42 万年期间,最小日射量出现在大约 23 万年之前,其值为 $435 \text{ W}/\text{m}^2$,而最大值则是大约 22 万年前的 $552 \text{ W}/\text{m}^2$,二者相差 $117 \text{ W}/\text{m}^2$ 。从另一方面来说,目前,普遍认为,全球平均地表温度响应 T_s 与其强迫 F (辐射强迫)存在以下关系^[28-30]:

$$T_s / F =$$

其中, λ 是所谓的气候灵敏度参数,典型取值为 $0.5 \text{ K}/(\text{W} \cdot \text{m}^2)$ ^[31]。尽管在气候模式中,由于对诸如水汽反馈、冰雪反照率反馈,特别是云反馈等物理过程的处理方法不同,可以变化很大,但是,政府间气候变化专门委员会的科学报告认为^[32],其取值范围在 $0.3 \sim 1.4 \text{ K}/(\text{W} \cdot \text{m}^2)$ 之间。于是,如果我们采用 65 N 6 月 21 日所接受到的日射量来驱动地球气候系统的话,必将导致全球地表温度变化 $35 \sim 164 \text{ K}$ 。不但按照我们目前对地球气候系统的认知水平,无法接受这一结果,而且南极东方站的冰芯记录和其他深海沉积物的记录均显示出,在冰期—间冰期旋回期间,地表温度的变化只不过是 10 K 左右^[6]。因此,我们猜测,造成地表温度变化 10 K 左右的日射量,只应当大致在 $7 \sim 40 \text{ W}/\text{m}^2$ 之间。

2.2 温室气体强迫

如上所述,在米氏理论提出的最初阶段,它面临的难题,主要是缺乏气候随轨道形状变化而变化的证据。在找到相关性证据后,却又遭遇了另一个难题:简单的 ISUSA 反馈是否足以引起冰期—间冰期旋回期间如此巨大的气候变化?换句话说,地球气候在响应轨道变化引起的日射量变化时,除 ISUSA 反馈外,是否还存在其他机制?仍是个很大的谜。1983 年, Shackleton 等^[33] 分析了极地冰芯中大气 CO_2 的 4 万年记录,发现:在末次冰期的最冷时期(约 2 万年前),大气 CO_2 体积浓度比工业革命前的典型浓度值 280×10^{-9} 低 $40 \times 10^{-9} \sim 100 \times 10^{-9}$;大约 1.6 万年前,随着大的冰原开始融化, CO_2 浓度开始快速增加,直到大约 1 万年前达到工业革命前的浓度水平后才停止增加。为了进一步确认冰芯记录

的正确性,他们将 CO_2 的间接沉积物记录扩展到了过去 34 万年,同时,又在同一个东太平洋站点对比了地球轨道变化和地表冰量变化记录,利用交叉功率谱分析方法发现,轨道变化趋势超前于 CO_2 的变化。因此,如果地球轨道变化是地球气候变化的最初起因,则大气 CO_2 浓度的变化必定有助于放大气候对轨道变化的响应。事实上, Shackleton 等将 CO_2 变化的实际记录加入到模式中以后,发现:冰原很小的非线性响应确实能够放大气候对地球轨道偏心率 10 万年周期的响应,明显改进了模拟的冰量变化和观测值之间的一致性。

在 10 万年周期问题上, Ruddiman^[34] 认为,温室气体可能是将黄赤交角和岁差的日射量强迫进行非线性放大的一个关键来源。10 万年的信号则来自于岁差周期中 CH_4 放大的间冰期和岁差周期中 CO_2 放大的冰期之间的交替。偏心率则提供了控制这些交替的总的步调:在大的岁差峰值期间(高偏心率时),出现额外的 2.2 万年 CH_4 强迫,在弱岁差(强迫)期间(低偏心率),当大冰原形成时发生 4.1 万年的 CO_2 反馈。

总之,目前学术界已经认识到, CO_2 和 CH_4 等温室气体可能在轨道尺度的地球气候变化中扮演重要角色^[35]。但是,仍然缺乏基于大气温室效应和冰雪反馈等有坚实物理基础的研究。

2.3 大气气溶胶强迫

南极和格陵兰的冰芯记录均表明,显著的气候变冷后,大气气溶胶浓度是增加的。Petit 等^[6] 1999 年的研究表明,在冰期—间冰期旋回期间,南极地区以钠盐为代表的海盐气溶胶浓度可以从间冰期的不足 15 ng/g 变化到冰期的 120 ng/g ,相差近 1 个数量级,而以沙尘为代表的大陆起源的气溶胶则可从 50 ng/g 上升到 $1\ 000 \sim 2\ 000 \text{ ng/g}$,即增加 20 ~ 40 倍。中国的黄土记录^[36-38] 和历史文献记录^[39] 均表明,在气候的寒冷期多沙尘,温暖期少沙尘。由于大气气溶胶的气候效应已经在科学界得到公认^[40],所以在冰期—间冰期旋回的研究中,必须把它作为一种强迫包括进去。事实上,对于气溶胶在冰期气候中的效应,Harvey^[41] 的能量平衡气候模式研究发现:末次冰期极大值(LCM)期间,大气气溶胶光学厚度的增加可能使全球平均温度进一步变冷 2 ~ 3,因而对 LCM 的气候变冷有显著贡献。当然,大气气溶胶浓度的变化是作为一种反馈机制出现在冰期—间冰期旋回中的,它并不是产生旋回的驱动机制。

3 周期与相位问题

在探索第四纪地球气候冰期—间冰期旋回形成的机制中,除了强迫问题(其最重要的作用是决定地面温度距平的大小)之外,还必须考虑周期与相位问题。如前所述,早在1976年,Hays等就在深海岩芯记录中发现了一个 10^5 万年周期,并认为,它是由轨道偏心率以某种方式驱动的。其后,对这一问题,出现了很多研究(如Jouzel等^[42]),但到目前为止,仍然存在极大争论。另外,1981年,又在赤道太平洋深海钻探计划站点¹⁵⁸中的沉积物里发现了一个 40^5 万年的轨道周期^[43],成为另一个有待揭开的谜团。

3.1 10^5 万年周期研究

对于 10^5 万年周期的研究,大致可以分为两类,一是遵循米氏理论,从 10^5 万年气候周期与日射量之间的相关性进行研究,但这类研究遭遇到无法克服的困难。另一类则是在某种程度上摒弃米氏理论而另辟蹊径。

在第一类研究中,Imbrie等^[44]的评述性研究是很有代表性的。他们发现,周期大约 2.3×10^4 万年和 10^5 万年左右的 180° 旋回与天文因子驱动的日射量旋回之间,是强相关的(相关系数分别达到0.95, 0.90和0.91),因此它们之间可能存在某种因果关系,而且其中可能隐藏着一种令人十分感兴趣的物理问题。但是,利用这种相关性来解释 10^5 万年周期却面临着很多难题,其中包括。

(1) 在 10^5 万年谱带,日射量信号的幅度只有 2 W/m^2 左右,比其他两个谱带小1个数量级,但在地球气候系统的响应上却又远强于其他两个谱带。对此,很难找到一种在物理上似乎合理的解释。

(2) 偏心率并不只在 10^5 万年附近变化,实际上,它在 41.3^5 万年处也具有相同的变化量级。最后,从位相上来说, 10^5 万年谱带的气候响应远远滞后于日射量。简言之,米氏理论在解释 10^5 万年旋回上所遇到的主要困难是:幅度过小,位相过于超前。

许多研究者试图将 10^5 万年周期旋回解释为轨道强迫响应与大气、海洋、冰盖以及岩石圈的内部动力过程之间的相互作用^[22, 45-48]。在这些模式中, 10^5 万年旋回的位相受轨道的影响。Weertman^[46]曾研制了一个比较复杂的冰原模式,但并未得到 10^5 万年周期。Pollard^[22]的研究认为,只有当气候系统的某个要素对日射量的增加比其减少有更加强烈的响应时, 10^5 万年周期才可能出现。他在冰原模式中加入

了这样一种非线性响应,却发现气候变化的幅度仍然不够大。Imbrie^[45]曾使用一个简单的统计模式,其中,对日射量的轨道偏心率周期加入了一个非线性响应,模式确实产生了 10^5 万年周期。但是,无法找到能将轨道周期变化和气候变化联系起来的合理物理机制。

正是由于遵循米氏理论在研究 10^5 万年周期旋回上遇到的这些困难,所以,第二种类型的研究,试图将 10^5 万年周期旋回解释成与米氏强迫无关的自由、自维持振荡^[49]。其中, 10^5 万年旋回是由气候系统内部过程强迫的,因此相对于偏心率来说,其位相是任意的。此类数值模式还可以考虑偏心率和气候之间明显存在的统计关系。随机共振气候模式就是其中的一个例子^[50]。模式结果表明,利用轨道变化引起的 10^5 万年偏心率外部周期强迫(幅度取为太阳常数的0.1%左右)和一个内部随机机制之间的共同作用,有可能解释相当于过去 40^5 万年冰期—间冰期旋回的 10^5 左右的大幅度长期温度交替。模式利用随机共振机制,放大原来很小的外部强迫,实现冰期和间冰期这两个观测到的气候态之间的跳跃。

此外,对于第二种类型的研究,还有许多其它的假说和尝试。如物理学家Müller及地球物理学家MacDonald^[51]就认为,随着地球轨道平面的倾斜变化,地球周期性地进出黄道云,会触发冰期的出现。其后,Kortenkamp^[52]通过模拟行星引力、太阳光照以及太阳风如何将小行星碰撞产生的沙尘扩散开,计算了沙尘轨迹,并认为,过去 120^5 万年里,地球尘埃以一个 $2 \sim 3$ 的因子变化。

1998年,Paillard^[53]受海洋温(热)盐环流模式具有多个稳定态的启发,研究了一种具有3个稳定态的气候系统:间冰期、温和冰期和完全冰期;只要越过指定的阈值,就发生气候态之间的过渡。他使用的是一个简单的线性微分模式,该模式受日射量强迫并允许冰量连续变化,结果发现,模式结果与冰量变化的地质记录之间具有很好的一致性,而且,在对过去200万年的模拟中,确实发现了所观测到的约 80^5 万年前至 100^5 万年前附近的显著 10^5 万年周期。

3.2 40^5 万年周期研究

如前所述,早在1981年就已经在赤道太平洋的深海沉积物中发现了一个 40^5 万年的周期,成为古气候变化研究中又一个具有挑战性的难题^[43]。1999年,Rial^[54]利用时间跨度为 120^5 万年、 140^5 万年及

160 万年的 3 个站点 (ODP (Ocean Drilling Program)) 站点 806、849 和 677) 的深海沉积物记录, 通过氧同位素功率谱分析, 再次证实除了观测到的 8~12 万年间的周期外, 还有一个从较快、较高频率到较慢、较低频率变化的 41.3 万年天文周期 (约略地称为“40 万年周期”), 它是在轨道拉长过程中叠加到较短周期上而产生的, 可能对 10 万年周期具有调制作用。在这种想法的指导下, Rial 通过引入轨道强迫间的一种相互作用, 计算了 41.3 万年周期应该如何调整 10 万年周期, 并检验了气候记录与模拟结果之间的一致性。他认为, 调频过程周期性地改变冰期持续时间。虽然他无法指出这种将 41.3 万年周期转化为一个 10 万年周期的变长和变短的物理机制, 但他认为日射量变化的较长周期可能与气候系统的一个振荡部分 (诸如冰原) 相互作用, 从而驱动气候系统发生变化。尽管其他研究者在某种程度上接受了这种调频观点, 但对于米兰科维奇强迫、气候轮回与冰期开始之间的联系仍不甚清楚。

4 结语与未来展望

以上, 我们较为详细地回顾了米兰科维奇气候变化天文理论的历史发展过程, 从古气候记录和模式研究两个方面简述了到目前为止的研究成果和依然存在的困难, 其中包括强迫问题和周期问题等。大致可以概括为:

(1) 深海沉积物、黄土和冰芯等古地质气候记录中, 显示出周期大约是 2 万年、4 万年和 10 万年的明显的气候变化, 它与岁差、黄赤交角以及地球轨道偏心率等地球轨道三要素的周期相当一致。

(2) 经典的米兰科维奇气候变化天文理论认为, 地球轨道三要素的变化所造成的夏季北半球中高纬度日射量的变化, 通过 ISUSA 反馈, 造成第四纪地球气候的冰期—间冰期轮回。但是, 在包括日射量选取在内的驱动力、反馈机制以及地球轨道要素和气候变化两个系列之间的周期和位相等问题上, 米氏理论遭遇到极大困难。特别是在 10 万年周期上, 轨道偏心率带来的日射量变化幅度过小, 位相过于超前。

(3) 为了克服这些困难, 已经提出了各种假说, 进行了大量模式研究, 或者遵循米氏理论的基本思路, 或者将 10 万年周期轮回解释成与米氏强迫无关的自由振荡, 其中, 包括随机共振气候模式。但是, 困难依然存在。最根本的是, 无法在观测到的气候变化与其强迫 (外部的和/或气候系统内部的) 之间

建立令人信服的物理机制。

(4) 记录表明, 观测到的气候变化 (以地面温度距平为代表) 与大气 CO_2 和 CH_4 等温室气体浓度之间存在极好的正相关关系, 且温室气体浓度变化滞后于气温变化。另一方面, 气候变化与海盐和沙尘气溶胶浓度之间存在较好的负相关。因此, 温室气体和气溶胶有可能成为轨道日射量的两个“放大”因子。最近, 我们利用一个 Budyko-Sellers 型南北一维能量平衡气候模式 (EBM) [55] 研究了过去 42 万年里的气候变化 [56]。结果表明, 这种从物理能量学出发的模式, 虽然比较简单, 但它可以较好地重建过去 42 万年冰期和间冰期轮回期间的基本气候变化特征, 特别是模拟结果证明, 温室气体和大气气溶胶在其中起着重要的作用。但是, 模式模拟的间冰期 (10 万年峰值) 温度, 除了目前我们所处的这个间冰期 (其模拟温度高于观测值, 这可以归因于近年来人类活动造成的大气温室气体 GHGs 浓度的“超常”增加) 之外, 其他三个间冰期的地面气温仍然偏低 1~2°, 而冰期温度却又普遍偏高。当然, 适当调整水汽反馈系数以及气溶胶强迫的计算方案, 有可能改善模拟结果。

(5) 理论模式的评价和检验问题。这里, 需要特别指出的是, 判断某种理论或/和模式结果的正确与否, 是一个很困难的但又是极为重要的问题。到目前为止, 在米氏理论的绝大多数研究中, 采用的基本上是以以下两种方法, 即相关性分析和功率谱分析。相关性分析是气候和气象学领域中最常用的一种资料分析方法, 它在揭示不同变量之间的相对位相关系 (相对变化趋势) 上, 显示出强大的功能, 而功率谱分析, 则有助于揭示变量的不同周期的相对重要性, 提示可能存在的因果联系。但是, 这两种方法存在的一个致命弱点是, 对于变量 (如过去 42 万年的日射量与气温距平) 之间的因果联系, 除了提供某种有益的 (但有时又完全可能是误导的) 启示外, 基本上无法回答物理机制的问题。在这方面, 利用解释了的方差 EV 进行分析可能是更有意义的, 它定义为:

$$EV(\%) = \left[1 - \frac{\sum_{t=1}^N (Q_t - M_t)^2}{\sum_{t=1}^N Q_t^2} \right] \times 100$$

其中 Q_t 和 M_t 分别是观测到的和模拟的温度距平, N 是样本数。这是一种非常不同于功率谱分析和相关性分析的方法, 它不但含有不同变量之间的相对位相关系, 而且包含有绝对数值的信息。换句话说, 只有用这种分析方法, 才能从物理机制上探讨不同

变量之间的因果联系。

总之 我们看到 经过多年来的地质资料验证和模式研究 虽然米氏理论已日渐被接受 但仍存在很多难题。我们迫切需要一个具有坚实物理基础的数学模式。

无论如何 在未来很长一段时间内 以下课题仍将是米氏理论的研究重点：

(1) 10 万年周期问题。

(2) 在考虑日射量、温室气体和气溶胶在冰期—间冰期旋回中的作用时 应当在模式中显式表达气候—化学相互作用。

也就是说 把 GHGs 作为地表气温的一个因变量 特别是考虑海洋二氧化碳释放、冻土与沼泽地带甲烷释放与地表温度的关系。

(3) 模式中进一步改进 ISUSA 反馈机制。实际上 冰原面积的变化不但影响地表反照率 也会影响大气—海洋之间和大气—陆地之间的物质和能量输送。因此 一个比较完整的海冰热力学模式和陆面过程模式也许是需要的。

(4) 不同时间尺度地球气候系统构成要素之间的相互作用。

(5) 南北半球之间的相互作用。

参考文献 (References) :

[1] Hays J D, Imbrie J, Shackleton N J. Variations in the Earth's Orbit: Pacemaker of the Ice Ages [J]. *Science*, 1976, 194(4 270): 1 121-1 132.

[2] Isaac J W, Coplen T B, Landwehr J M, et al. Continuous 500 000-Year Climate Record from Vain Calde [J]. *Science*, 1992, 258: 255-256.

[3] Winograd I J, Coplen T B, Landwehr J M, et al. Continuous 500 000-year climate record from vein calcite in Devils Hole, Nevada [J]. *Science*, 1992, 258: 255-260.

[4] Coplen T B, Winograd I J, Landwehr J M, et al. Continuous 500 000-year climate record from vein calcite in Devils Hole, Nevada [J]. *Science*, 1994, 263: 361-365.

[5] Dahl-Jensen D, Mosegaard K, Gundestrup N, et al. Past temperatures directly from the Greenland Ice Sheet [J]. *Science*, 1998, 282: 268-271.

[6] Petit J R, Jouzel J, Raynaud D, et al. Climate and atmospheric history of the past 420 000 years from the Vostok ice core, Antarctica [J]. *Nature*, 1999, 399: 429-436.

[7] McManus J F. A great grand-daddy of ice cores [J]. *Nature*, 2004, 429: 611-612.

[8] Milankovich M M. Canon of Insolation and the Ice-Age Problem [M]. Belgrade: Serbian Academy Special Publication (English Translation by the Israel Program for Scientific Translations, Published for the U.S. Department of Commerce and the National Sci-

ence Foundation, Washington, D.C.) 1941, Chapter 121: 567.

- [9] Kerr R A. Climate control: How large a role for orbital variations [J]. *Science*, 1978, 201: 144-146.
- [10] Emiliani C, Hudson J H, Shinn E A, et al. Oxygen and carbon isotopic growth record in a reef coral from the Florida Keys and a deep-sea coral from Blake Plateau [J]. *Science*, 1978, 202 (4 368): 627-629.
- [11] CLIMAP Project Members. The surface of the Ice-age Earth [J]. *Science*, 1976, 191: 1 131-1 137.
- [12] Pisias N G. Late Quaternary sediment of the Panama Basin: Sedimentation rates, periodicities, and controls of carbonate and opal accumulation [J]. *Geological Society of America Memoir*, 1976, 145: 375-391.
- [13] EPICA community members. Eight glacial cycles from an Antarctic ice core [J]. *Nature*, 2004, 429: 623-628.
- [14] Lu Houyuan, Wang Sumin, Wu Naiqin, et al. A new pollen record of the last 2.8 Ma from the Co Ngoin, central Tibetan Plateau [J]. *Science in China (D)*, 2001, 44 (suppl): 292-300. [吕厚远, 王苏民, 吴乃琴, 等. 青藏高原错鄂湖 2.8 Ma 来的孢粉记录 [J]. *中国科学 D 辑*, 2001, 31 (增刊): 234-240.]
- [15] Shi Yaofeng, Kong Zhaochen. The Climates and Environments of Holocene Megathermal in China [M]. Beijing: China Ocean Press, 1992: 212. [施雅风, 孔昭宸. 中国全新世大暖期气候与环境 [M]. 北京: 海洋出版社, 1992: 212.]
- [16] Kang Xingcheng, Cheng Guodong, Kang Ersi, et al. Runoff from mountain outlet in the Heihe region for the past one thousand years by reconstructing tree rings [J]. *Science in China (D)*, 2002, 32(8): 675-685. [康兴成, 程国栋, 康尔泗, 等. 利用树轮资料重建黑河近千年来出山口径流量 [J]. *中国科学 D 辑*, 2002, 32(8): 675-685.]
- [17] Wang Shaowu, Ye Jinlin, Gong Daoyi. Climate in China during the Little Ice Age [J]. *Quaternary Sciences*, 1998, 1: 54-64. [王绍武, 叶瑾琳, 龚道溢. 中国小冰期的气候 [J]. *第四纪研究*, 1998 (1): 54-64.]
- [18] Yao Tandong. Climatic and environmental record in the past about 2000 years from the Guliya Ice Core [J]. *Quaternary Sciences*, 1997 (1): 52-61. [姚檀栋. 古里雅冰芯近 2000 年来气候环境变化记录 [J]. *第四纪研究*, 1997 (1): 52-61.]
- [19] Yao Tandong, Shi Yaofeng. Holocene climatic fluctuation of the Dunde ice core record [C]. Shi Yaofeng ed. *The Climates and Environments of Holocene Megathermal in China*. Beijing: China Ocean Press, 1992: 206-211. [姚檀栋, 施雅风. 祁连山敦德冰芯记录的全新世气候变化 [C]. 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: 206-211.]
- [20] Tan Ming, Qin Xiaoguang, Liu Dongsheng. Interannual, decadal and century scale climatic changes revealed by stalagmite records [J]. *Science in China (D)*, 1998, 41(4): 416-421. [谭明, 秦小光, 刘东生, 石笋记录的年际、十年、百年尺度气候变化 [J]. *中国科学 D 辑*, 1998, 28(3): 272-277.]
- [21] An Zhisheng, Kutzbach J E, Mill W L, et al. Evolution of Asian monsoons and phased uplift of the Himalaya-Tibetan Plateau since Late Miocene times [J]. *Nature*, 2001, 411: 62-66.

- [22] Pollard D. A simple ice sheet model yields realistic 100 kyr glacial cycles [J]. *Nature* 1982, 296: 334-338.
- [23] Imbrie J, Imbrie J Z. Modeling the climatic response to orbital variations [J]. *Science*, 1980, 207: 943-953.
- [24] David M S, William L D. Milankovitch Radiation variations: A quantitative evaluation [J]. *Science*, 1968, 162: 1 270-1 272.
- [25] Broecker W S, Thurber D L, Goddard J, et al. Milankovitch hypothesis supported by precise dating of coral reefs and deep-sea cores [J]. *Science*, 1968, 159: 297-300.
- [26] Kukla G J. Missing Link between Milankovitch and climate [J]. *Nature*, 1975, 253: 600-603.
- [27] Berger A. Long-term variations of daily insolation and Quaternary climatic change [J]. *Journal of Atmospheric Sciences* 1978, 35: 2 362-2 367.
- [28] Dickinson R E. Carbon Dioxide Review [M]. Clarendon: New York, NY, USA, 1982: 101-133.
- [29] WMO. Atmospheric Ozone: Global Ozone Research and Monitoring Project, World Meteorological Organization [R]. Geneva, Switzerland, Chapter 15, 1986.
- [30] Cess R D, Zhang M H, Potter G L, et al. Uncertainties in CO₂ radiative forcing in atmospheric general circulation models [J]. *Science*, 1993, 262: 1 252-1 255.
- [31] Ramaswamy V, Cicerone R, Singh H, et al. Trace gas trends and their potential role in climate change [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1985, 90: 5 547-5 566.
- [32] Houghton J T, G Meira Filho, Callender B A, et al. eds. Climate Change 1995: The IPCC Scientific Assessment [C]. Cambridge: Cambridge University Press, 1996.
- [33] Shackleton N J, Hall M A, Line J, et al. Carbon isotope data in Core V19-30 confirm reduced carbon dioxide in the ice age atmosphere [J]. *Nature*, 1983, 306: 319-322.
- [34] Ruddiman W F. Orbital insolation, ice volume, and greenhouse gases [J]. *Quaternary Science Review*, 2003, 22: 1 597-1 629.
- [35] Ruddiman W F. The Role of Greenhouse Gases in Orbital-Scale Climatic Changes [J]. *EOS*, 2004, 85: 1, 6-7.
- [36] Zhang X Y, Lu H Y, Arimoto R, et al. Atmospheric dust loadings and their relationship to rapid oscillations of the Asian winter monsoon climate: Two 250-kyr loess records [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2002, 202(3-4): 637-643.
- [37] Zhang X Y, Arimoto R, An Z S, et al. Dust emission from Chinese desert sources linked to variations in atmospheric circulation [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1997, 102: 28 041-28 047.
- [38] Zhang X Y, Arimoto R, An Z S, et al. Late Quaternary records of the atmospheric input of aeolian dust to the Center of the Chinese Loess Plateau [J]. *Quaternary Research*, 1994, 41: 35-43.
- [39] Zhang De'er. A preliminary meteorological analysis on the dust fall in China since historical times [J]. *Science in China (B)*, 1984, 3: 278-288. [张德二. 我国历史时期以来降尘的天气气候学初步分析 [J]. *中国科学: B 辑*, 1984, 3: 278-288.]
- [40] Ramaswamy V, Boucher O, Haigh J, et al. Radiative Forcing of Climate Change [C]. Houghton J T, et al. IPCC Climate Change: The Scientific Basis, Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2001: 881.
- [41] Harvey L D D. Climatic impact of ice-age aerosols [J]. *Nature*, 1988, 334: 333-335.
- [42] Jouzel J, Lorius C, Petit J R, et al. Vostok ice core: A continuous isotope temperature record over the last climatic cycle (160 000 years) [J]. *Nature*, 1987, 329: 408-414.
- [43] Kerr R A. Milankovitch Climate cycles: Old and Unsteady [J]. *Science* 1981, 213: 1 095-1 096.
- [44] Imbrie J, Hays J D, Martinson D G, et al. The orbital theory of Pleistocene climate: Support from a revised chronology of the marine ¹⁸O record [C]. Dordrecht: Reidel Publishing Co., 1984: 269-305.
- [45] Imbrie J, Berger A, Boyle E, et al. On the structure and origin of major glaciation cycles 2. The 100 000 year cycle [J]. *Paleoceanography*, 1993, 8: 699-735.
- [46] Weertman J. Milankovitch solar radiation variations and ice age ice sheet sizes [J]. *Nature*, 1976, 261: 17-20.
- [47] Oerlemans J. Model experiments on the 100 000-yr glacial cycle [J]. *Nature*, 1980, 287: 430-432.
- [48] Galle H, van Ypersele J P, Fichefet T, et al. Simulation of the last glacial cycle by a coupled, sectorially averaged climate ice-sheet model. II. Response to insolation and CO₂ variation [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1992, 97: 15 713-15 740.
- [49] Saltzman B, Maasch K A. Carbon cycle instability as a cause of the late Pleistocene ice age oscillations: Modeling the asymmetric response [J]. *Global Biogeochemistry Cycle*, 1988, 2: 177-185.
- [50] Benzi R, Parisi G, Sutera A. Stochastic resonance in climatic change [J]. *Tellus*, 1982, 34: 10-16.
- [51] Muller R A, MacDonald G J. Glacial cycles and astronomical forcing [J]. *Science*, 1997, 277: 215-218.
- [52] Kortenkamp S J, Dermott S F. A 100 000-year periodicity in the accretion rate of interplanetary dust [J]. *Science*, 1998, 280: 874-876.
- [53] Baillard D. The timing of Pleistocene glaciations from a simple multiple-state climate model [J]. *Nature*, 1998, 391: 378-381.
- [54] Rial J A. Pacing the Ice Ages by frequency modulation of Earth's orbital eccentricity [J]. *Science*, 1999, 285: 564-568.
- [55] Budyko M I. The effect of solar radiation variations on the climate of the Earth [J]. *Tellus*, 1969, 21: 611-619.
- [56] Shi G Y, Liu Y Z. The role of greenhouse gases and aerosols in the glacial and inter-glacial cycle over the past 420 000 years: A physical model study [J]. *AAS*, 2006. *to be submitted*.

Progresses in the Milankovitch Theory of Earth's Climate Change

SHI Guang-yu¹, LIU Yu-zhi^{1,2}

(1. Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;

2. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: Milankovitch has proposed an astronomical theory to explain the relationship between solar insolation and the Earth's climate. It postulates that the changes in insolation at the Northern Hemisphere during the summer months, which are caused by changes in Earth's eccentricity, obliquity and precession, are mainly responsible for driving the glacial-interglacial cycle. In this paper, we reviewed the development process of the Milankovitch theory and its progresses in some detail, and discussed several scientific issues that need to be investigated further by taking the climate and atmospheric history of the past 420 000 years from the Vostok ice core, Antarctica, as an example.

Key words: Milankovitch theory; Climate Change; Glacial-interglacial cycle.

模

《地球科学进展》开辟“973项目研究进展”专栏的公告

1997年6月4日,原国家科技领导小组第三次会议决定要制定和实施“国家重点基础研究发展规划”,随后由科技部组织实施了国家重点基础研究发展计划(亦称“973”)。其战略目标是加强原始性创新,在更深的层面和更广泛的领域解决国家经济与社会发展中的重大科学问题,以提高我国自主创新能力和解决重大问题的能力,为国家未来发展提供科学支撑。

自1998年起至2005年,已先后批准了232个项目,分为农业、能源、信息、资源环境、人口与健康 and 材料六大领域,以及综合交叉与前沿,其中资源环境领域有36项,此外,其他方面含有资源环境和全球变化范畴的项目约有21项,合计达57项,占总项目的24.57%。

为了更好地宣传、交流我国“973”原创性项目的研究成果,提升这些项目的科学价值,《地球科学进展》编辑部经研究决定,开辟“973项目研究进展”专栏,定期或不定期地刊登“973”项目中有关资源环境和全球变化方面的最新研究成果和进展,报道体裁不限,文章主要围绕以下几方面内容撰写:

- (1)对已结题的项目,主要围绕该项目取得的研究成果及其应用价值、发展前景、与国际水平的差距等内容。
- (2)对正在进行的项目,主要就项目研究的现状、进展、新成果及发展前景等内容。
- (3)对刚申请批准的项目,围绕该项目研究的目的、意义、关键科学问题及其要达到的目标等内容。

凡是无项目首席科学家署名的来稿,最好经首席科学家的同意和认可,并签署意见。撰写的文章要求客观、公正、实事求是,内容完整,数据翔实,应有必要的文献、英文文摘等内容。具体格式要求参阅《地球科学进展》的投稿须知。

专栏负责人 林海教授 联系方式 linhai@mail.nsf.gov.cn linh@igsrr.ac.cn

编辑部地址 兰州市天水中路8号 730000 邮箱 a@earth@lzb.ac.cn

投稿时请注明“973项目研究进展”栏目,经审核达到发表要求的稿件将尽快刊出,同时免收审稿费,酌收一定的版面费并致稿酬,并免费赠送全年期刊一套(1~12期)。欢迎从事“973”项目研究的科学家、学者赐稿。谢谢对我们工作的支持和帮助。

二 五年十一月