

# 地球轨道根数变化与第四纪冰期

杨 志 根

(中国科学院上海天文台 上海 200030)  
(中国科学院国家天文台 北京 100012)

## 摘 要

介绍了米兰柯维奇 (Milankovitch) 天文气候学理论和第四纪地质时期以来冰期的研究进展。研究结果表明, 地球上的冰体积具有近 10 万 yr 的变化周期, 并伴有近 4 万 yr 和 2 万 yr 的变化周期, 它们是由于地球的轨道根数变化导致的气候变迁所致; 不同的地球物理资料中均存在上述类似的变化周期, 表明气候变迁所导致的变化是全球性效应, 证实米兰柯维奇天文理论是基本正确的; 对天文气候学理论作了简要介绍, 指出了米兰柯维奇天文气候学理论的可能不足, 对引起最近百万 yr 以来的近 10 万 yr 气候变化周期的可能天文机制也作了介绍。

**关键词** Milankovitch 天文气候学理论 — 第四纪冰期 — 气候变迁

**分类号**: P183

## 1 引 言

地质和古气候学家对距今约 200 万 yr 以来的第四纪地质和气候记录作了颇为深入的研究, 证实了在此时期地球上存在周期为 (10 ~ 12) 万 yr 冰期变化, 称为第四纪冰期, 同时还存在周期为近 4 万 yr 和近 2 万 yr 的冰期变化。这些冰进和冰退的周期性变化表征了全球性气候的周期性变化, 它们对于地球演化、生物进化和气候变迁的研究具有十分重要的意义。

1920 年南斯拉夫科学家米兰柯维奇 (Milankovitch) 首先提出了地球气候的长期变化与地球轨道半长径  $r$ 、地球轨道偏心率  $e$ 、黄赤交角  $\varepsilon$  和地球的近日点黄经  $\omega$  有单值的函数关系<sup>[1,2,3]</sup>。此理论的基本出发点是太阳辐射为地球表面唯一的热量来源, 而忽略每年分别从恒星际和地球深处接收的 22.2J 和 226.1J 的热能, 并由此基本思想创立了地球气候变化的天文理论。米兰柯维奇基于上述地球轨道根数的长期变化理论计算了过去的

日照变化,较好地解释了地球轨道变化引起的气候长期变化并导致地球的冰期与间冰期。

在米兰柯维奇关于气候变迁的天文理论提出之前,气候变迁理论的发展大约经历了四个阶段<sup>[1]</sup>。1837年地质学家 Agassiz 最先宣布发现了地球冰期;五年后气象学家 Adhemar 提出了春分点岁差运动会导致地球冰期的发生;1855年 Leverrier 给出了地球轨道偏心率长期变化的近似理论计算公式;而后 Croll 采用此公式计算了过去 50 万 yr 以来的地球轨道偏心率变化,从理论上预测了地球冰期。1900~1950 年是米兰柯维奇天文气候学理论的发展时期。

1950 年 Brouwer-Woerkom 把地球轨道长期变化理论发展到一个新的水平,使当时根据地质记录给出的气候变化资料与由天文理论计算的日照变化曲线十分相似。之后,许多作者的研究又进一步讨论并改进了 Brouwer-Woerkom 的地球轨道长期变化理论<sup>[4,5]</sup>,使气候变迁的天文理论得到了更进一步的发展。

科学家为了解释第四纪冰期的气候变迁,在过去的 100 多年中,提出了不同的假说。概括起来可以有三种类型的假说<sup>[3]</sup>: (1) 地学假说, (2) 物理假说, (3) 天文假说。地学假说是根据海陆变迁及其形状变化,把气候变迁与地质学、大地构造学联系起来进行研究;物理假说是把太阳的辐射与地球对其吸收的变化联系起来进行研究,它涉及大气环流和大气中二氧化碳的变化等因素;而天文假说则是把地球置于宇宙环境中来研究地球本身运动的变化,认为这会引起对太阳热量吸收的改变。

## 2 米兰柯维奇天文气候理论

如果不考虑大气的吸收,在  $t_1$  至  $t_2$  的某时间段内位于地球某纬度  $\phi$  处单位面积上得到的平均太阳辐射量为<sup>[3]</sup>:

$$W = \int_{t_1}^{t_2} \frac{1}{\pi} \frac{I_0}{\rho^2} (h_0 \sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \cos h_0) dt \quad (1)$$

式中  $I_0$  为太阳常数,  $h_0$  为太阳时角,  $\delta$  是太阳赤纬,  $\rho$  可表示为:

$$\rho = \frac{r}{a} \cdot \frac{1 - e^2}{1 + e \cos v} \quad (2)$$

其中  $e$  是地球轨道偏心率,  $r$  为日地距离,  $a$  是地球轨道半长径,  $v$  是太阳真近点角。对式 (1) 进行积分,不难得出,在地球上  $\phi$  处,地球大气上界接受的太阳辐射量分别是地球轨道偏心率  $e$ 、黄赤交角  $\varepsilon$  和与分点岁差有关的量  $e \sin \tilde{\omega}$  的函数,其中  $\tilde{\omega}$  是地球的近日点黄经。

米兰柯维奇认为,冰期到来的条件是较大的  $e$  和较小的  $\varepsilon$  以及北半球夏天在近日点附近开始。这个结论与第四纪冰期的结果大致相符。

在研究地球轨道长达数十万 yr 至上百万 yr 的变化中,比利时的 Berger 曾给出了很

高精度的计算结果, 他将与太阳辐射量有关的地球轨道根数表示为时间的周期函数<sup>[6]</sup>:

$$\left. \begin{aligned} e &= e_0 \sum_i A_i \cos(\lambda_i t + \beta) \\ \varepsilon &= \varepsilon_0 \sum_i B_i \cos(\alpha_i t + \gamma) \\ e \sin \tilde{\omega} &= \sum_i P_i \sin(\sigma_i t + \zeta) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中  $\varepsilon_0$ 、 $e_0$  为积分常数, 取初始历元为 1950.0,  $\varepsilon_0 = 23^\circ.320556$ ,  $e_0 = 0.0287069$ , 得到主周期项及其振幅见表 1。

表中  $\varepsilon$  项展开式包括 240 项, 其中 47 项的振幅大于  $1''$ ,  $\varepsilon$  项的主周期为 4.10 万 yr, 其振幅明显大于其它各项, 在 100 万 yr 甚至更长的时间范围内,  $\varepsilon$  在  $22^\circ 02'$  和  $24^\circ 30'$  之间变化, 当前值为  $23^\circ 26' 21''$ ;  $e$  的主周期为 41.29 万 yr, 其它三项周期的平均为 10.59 万 yr, 变化范围为 9.49 万 yr 至 12.33 万 yr,  $e$  的变化范围为 0.0005 到 0.0607, 当前值为 0.0167; 与分点岁差有关的项  $e \sin \tilde{\omega}$  的展开式已经算到 589 项, 其平均变化周期为 2.2 万 yr, 变化范围为  $-0.05$  到  $0.05$ , 当前值为 0.01635。

表 1 地球轨道根数表达式中主要项的系数

No.	分点岁差 ( $e \sin \tilde{\omega}$ )		黄赤交角 ( $e$ )		轨道偏心率 ( $e$ )	
	振幅 /rad	周期 / $10^4$ yr	振幅 /('')	周期 / $10^4$ yr	振幅 /rad	周期 / $10^4$ yr
1	0.0186080	2.37	-2462.22	4.10	0.011029	41.29
2	0.0162752	2.24	-857.32	3.94	-0.008733	9.49
3	-0.0130066	1.88	-629.32	5.36	-0.007493	12.33
4	0.0098883	1.92	-411.28	4.05	0.006724	9.96

Berger(1980) 曾采用地质数据和太阳辐射量数据, 利用多元回归模型, 模拟了过去 40 万 yr 的气候并预测了未来 6 万 yr 的气候变化。模拟结果表明, 未来气候变化的总趋势将是向冷的方向发展, 其间会有近 2 万 yr 和 4 万 yr 的周期变化<sup>[7]</sup>。1991 年, Berger 等人<sup>[8]</sup> 又将太阳辐射量数据推算到距今约 1000 万 yr; 1992 年, Berger 和 Loutre<sup>[9]</sup> 又进一步采用数值解 (QTD90)、半分析解 (LA90) 和分析解 (BER90) 方法将地球轨道根数推算到距今 300 万 yr 前, 得到在过去 300 万 yr 时间上, 由三种不同方法得到的  $e$  解的相互偏差不大于 0.005, 在  $\varepsilon$  项的位相上, BER90 比 LA90 和 QTD90 分别超前 6000yr 和 9000yr, 而对  $e \sin \tilde{\omega}$  项, 前者方法分别超前后两者的位相为 2000yr 和 4000yr, 表明三种方法的结果具有很好的一致性。

### 3 第四纪冰期

#### 3.1 氧同位素资料的分析

近 30 年, 科学家们对地球上近 10 万 yr 周期的第四纪冰期作了大量的研究与考证。Kukla 等人<sup>[10]</sup> 在 1981 年, 讨论了最近 200 万 yr 以来关于地球上的冰期史, 肯定了最近的百万 yr 中, 存在大约 10 万 yr 的冰盖体积的变化周期, 证实了在此之前对深海沉积核采样得到的氧同位素  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$  比值时间序列的谱分析结论<sup>[11]</sup>, 对最近 78 万 yr 以来

的氧同位素变化  $\delta^{18}\text{O}$  时间序列的分析, 得到了同样的结论<sup>[12]</sup>。图 1 结果给出了过去 40 余万 yr 以来深海沉积核中氧同位素  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$  比值随时间的变化, 它表征了地球上冰盖体积的变化, 表明当全球冰体积增大, 氧同位素比值  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$  也随之增大, 全球性气温进入了低温期, 反之则进入高温期。

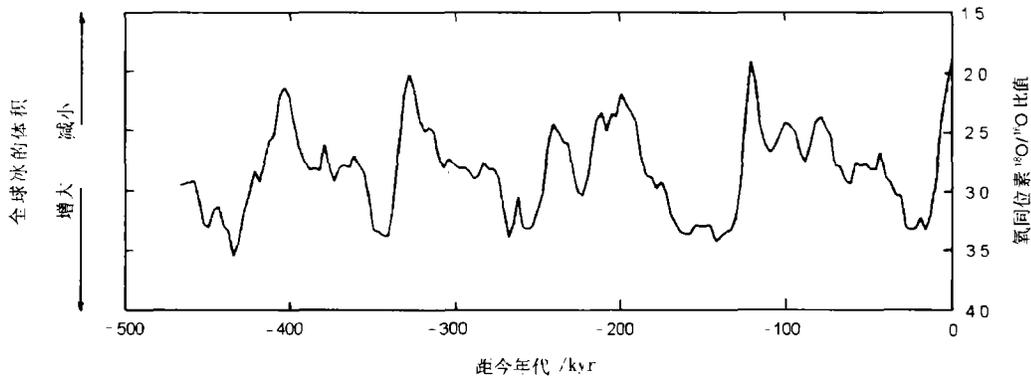


图 1 最近 40 余万年以来深海沉积核中氧同位素  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$  比值的变化, 它表征了地球上冰盖体积随时间的变化

图 1 结果告诉我们, 第四纪最近一次冰期的持续时间为近 12 万 yr, 其中前 10 万 yr 为缓慢的冰积过程, 后 2 万 yr 为快速的冰融期, 也即为全球变暖期。目前全球可能仍处于这一冰期的间冰期阶段。

### 3.2 极地冰芯资料分析

20 世纪 60 年代, 美国陆军寒区研究和工程实验室最早在格陵兰西北部的世纪营地和南极伯德站分别钻取了深度为 1387m(1966 年) 和 2164 m(1968 年) 的冰芯; 70 年代, 通过对上述冰芯和沿海一些冰芯地层氢氧稳定同位素资料的分析, 获取了末次冰期至间冰期的气候变化资料<sup>[14,15]</sup>; 80 年代法苏合作对南极东方站进行了钻探, 获取了包括末次冰期至间冰期和倒数第二次冰期在内的 16 万 yr 以来的气候变化资料, 并利用冰内储存的大气成分和微量物质资料, 首次给出了古大气和古环境的结果<sup>[16~22]</sup>; 进入 90 年代, 欧洲和美国分别在格陵兰中部冰盖地区钻取冰芯, 获取了深度达 3028.8 m(GRIP 计划) 和 3054 m(GISP2 计划), 使冰芯气候记录延长到了距今 25 万 yr 之前, 展示了两个完整的近 10 万 yr 冰期旋回气候变化的信息, 并在气候记录中发现了一系列高频变化事件<sup>[23~25]</sup>, 南极东方站 Vostok 的冰芯记录也延长到了距今 20 万 yr<sup>[26,27]</sup>; 至 1998 年, Vostok 站的冰芯在俄罗斯、美国和法国科学家的联合努力下, 已钻探到了 3623 m 深度, 获得了过去 42 万 yr 以来的由冰芯氧同位素资料反演的气候环境变化<sup>[28]</sup>。由上述极地冰芯资料, 科学家们已反演出地球气候 (10~12) 万 yr 的变化周期, 并同样存在近 4 万 yr 和近 2 万 yr 左右的变化周期<sup>[27~32]</sup>。

图 2 是最近 42 万 yr 以来 Vostok 站的  $\text{CO}_2$ (a)、气温  $\Delta T$ (b)、 $\text{CH}_4$ (c)、氧同位素含量变化  $\delta^{18}\text{O}$ (d) 和在北纬  $65^\circ$  的日晒率 (e) 随时间的变化; 科学家们对此的解释是, 由于冰芯中贮存有不同地质时期的大气成份和微量物质, 它们能反映第四纪中的古大气、古

环境的信息, 这些密切相关的周期性变化均由地球的轨道根数  $\epsilon$ 、 $e$  和  $e\sin\tilde{\omega}$  的长期变化所致。因此, 利用冰芯资料研究古气候及其变迁已成为与天文学有关的全球变化计划中十分重要的内容之一。至 1997 年, 人类已在南北极区冰盖上钻取了 10 支深冰芯, 其中 6 支在南极, 4 支在格陵兰<sup>[13]</sup>。目前, 科学家们利用极地深冰芯资料正在进一步开展有关古地球物理参数, 包括古地球大气的反演研究。

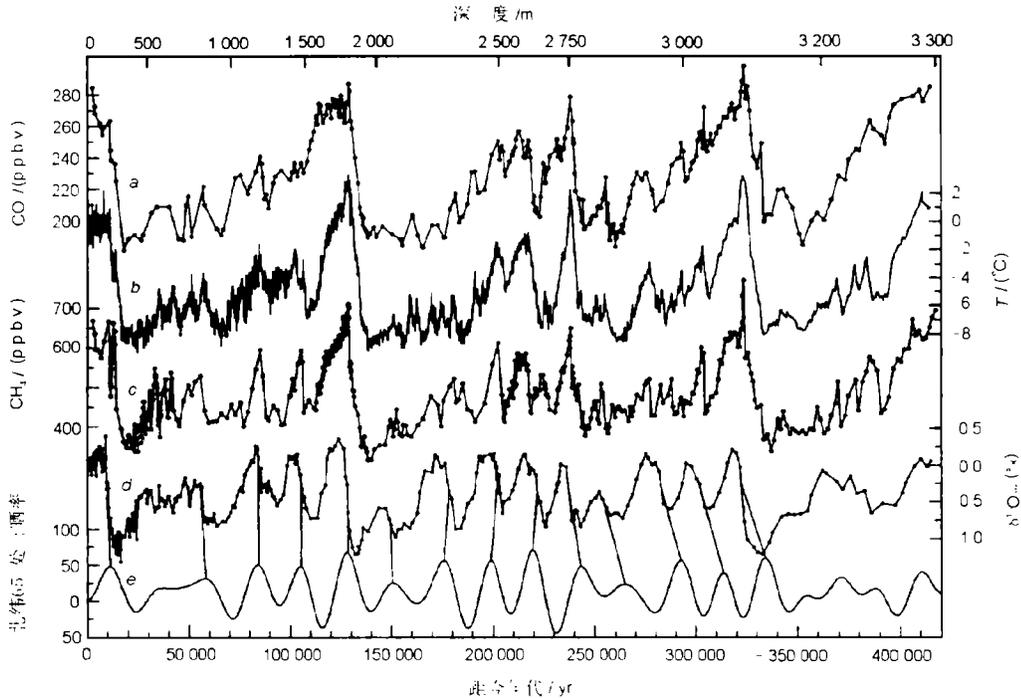


图2 南极东方站(Vostok)42万 yr 以来的 CO<sub>2</sub>(a)、气温  $\Delta T$ (b)、CH<sub>4</sub>(c)、氧同位素含量变化  $\delta^{18}\text{O}$ (d) 和在北纬 65° 的日晒率 (e) 的时间序列

### 3.3 同位素锶比值的分析

对最近 25 万 yr 海水中放射性同位素锶比值 ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ) 时间序列的分析, 发现在近 10 万 yr 的周期波动中还叠加了近 4 万 yr 和 2 万 yr 的变化周期<sup>[33]</sup>。进一步将  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  时间序列延长到 45 万 yr 并进行了分析, 发现  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  比值的最大和最小期分别与同时期的全球陆地冰盖体积变化同步<sup>[12,34]</sup>, 表明在干旱的地球中, 化学的侵蚀作用要比在潮湿的间冰期阶段弱<sup>[35~37]</sup>。

### 3.4 黄土资料的分析

中国的黄土古土壤地层是东西大陆地区保存最完整的古气候记录资料之一, 古土壤的磁化率值具有明确的气候学意义。根据安芷生等人(1989)的研究<sup>[38]</sup>, 高磁化率值记录了强盛的夏季风环境效应占优势的温湿气候特点, 低磁化率值记录了严酷的冬季风环境效应占优势的低温干燥气候特点。因此, 古土壤地层的磁化率值可以作为一种很好的第四纪气候变迁的代用指标, 也是迄今为止已经发现的储存过去地球轨道变化的一种信

息库。对我国陕西省洛川跨度为 240 万 yr 的古黄土磁化率资料的分析,证实它具有十分明显的近 10 万 yr 和准 4 万 yr 和 2 万 yr 的变化周期,并分离出近 40 万 yr 的变化周期 [3,39]。这与表 2 中地球轨道参数变化的主周期项是一致的。对中国甘肃临夏北塬最近 15 万 yr 以来的黄土磁化率资料与南极冰芯等资料进行了对比研究,证实它们与南印度洋 RC11-120 孔岩芯反映的夏季北半球表面温度变化和由底栖有孔虫介壳  $\delta^{18}\text{O}$  反映的大陆水体随时间的变化 [13,40~42]、以及与北极格陵兰 GRIP 冰芯  $\delta^{18}\text{O}$  记录 [14] 具有非常好的一致性。

### 3.5 对古地磁场和碳酸盐丰度的研究

对位于赤道西太平洋的西加罗林群岛上 5 个粘土层样本进行了近 20 万 yr 以来古地磁场的长期变化研究,发现这些粘土层的磁场强度存在 4~5 万 yr 的周期变化,并认为可能与地球的  $\epsilon$  变化有关 [43];最近,对位于整个太平洋中自最近 70 万 yr 以来 5 个沉积核的古地磁场强度资料用小波方法作了进一步的分析后,肯定了古地磁场强度中近 10 万 yr 周期变化的存在,它可能与地球轨道根数变化有关,并发现与近 10 万 yr 的气候变化周期同步,但存在约 1.8 万 yr 的相位滞后 [44]。此外,不少作者对南大西洋副热带区域沉积核记录中的碳酸盐丰度作了详细的分析,发现这些资料中不存在与地球轨道根数  $e$  有关的近 41 万 yr 的周期变化 [45,46]。

## 4 冰期后地壳反弹与全球海平面变化

1991 年,加拿大的 Tushingham 等人根据冰期后的相对海平面变化资料建立了晚更新世(约近 100 万 yr)以来的冰期后地壳反弹模型 ICE-3G [47];1994 年, Peltier 又进一步基于全球海平面变化的最新资料为约束,其中增加了巴巴多斯的高精度海平面变化资料,采用更严格的地球模型和求解方程,建立了新的 ICE-4G 冰期后地壳反弹模型 [48]。与 ICE-3G 模型相比,ICE-4G 模型将最近一次的全局性 10~12 万 yr 周期的第四纪冰期中的冰体积最大期(即全球最冷期),从距今 1.8 万 yr 前推前到距今 2.1 万 yr 之前,相应地由于冰的融化所引起的全球平均海平面上升也从 ICE-3G 的 115m 改变为 105m。因此,根据 ICE-4G 模型,在距今约 2.1 万 yr 前,地球上的冰体积曾达到极大值,相应的全球平均海平面要比现在低 105m。目前地球上只剩下格陵兰冰盖、南极冰盖和残剩的北美冰盖。

由于冰期后地壳反弹在地幔粘性的作用下会引起地面点的空间位移和地极的长期漂移,并改变地球自转的转动惯量。采用高精度的地球自转非潮汐项长期变化结果、全球海平面变化或地极长期漂移等结果为约束,基于冰期后地壳反弹模型中的冰盖变化参数和地球内部结构模型,可以估计得到地球的平均下地幔粘性  $\nu_{LM}$ 。近年来有关作者估计得到的  $\nu_{LM}$  结果为近  $10^{22}$  Pa·s 量级 [50~56]。目前北美的哈得逊湾和欧洲的波的尼亚湾具有最明显的地壳反弹速度,最大值可达每年 10 mm。

南极和格陵兰的冰盖是准永久性地貌。由于其反射率高,在大气热量平衡中起着冷却的作用,并因此在气候学中起着十分重要的作用。两大冰盖包括了地球上约 80% 的淡

水。在距今约 2.1 万 yr 前, 两冰盖的总体积达到约 41 百万  $\text{km}^3$ <sup>[47~49]</sup>, 约占全部陆地冰盖体积的 62%。如果忽略地壳的反弹调整因素, 格陵兰冰盖和南极冰盖的全部融化可引起海平面的上升分别为 6~8m 和约 60m<sup>[57]</sup>, 这对今天的地球来讲将是灾难性的。

## 5 天文气候学理论

根据天文气候学 (astroclimatology) 的主要观点, 全球性的气候变迁是由全球各地和各季节所获得的太阳辐射量的改变所引起的, 而其中地球的几何轨道缓慢变化是主要的原因。美国的第三位总统杰斐逊最早提出了天文气候学理论。进入 20 世纪后, 南斯拉夫科学家米兰柯维奇发展了天文气候学理论, 提出了以 10 万 yr 为周期的气候变迁理论。之后澳大利亚的 Williams(1975) 又提出了以亿 yr 为周期的气候变迁理论<sup>[58]</sup>。

过去 160 万 yr 以来的气候变迁, 冰期和间冰期的反复交替出现, 米兰柯维奇在 20~30 年代提出了这是由地球轨道三要素 (地球轨道倾角、轨道偏心率和近日点黄经) 的缓慢变化所致。1970 年, Broecker 等人<sup>[59]</sup> 指出最近的百万年以来, 地球上的冰期确实存在近 10 万年为主的周期变化。Hays(1976)<sup>[11]</sup> 研究证实, 深海中反映过去数十万年中古气候变迁的三个主要周期项的平均周期是 10 万 yr、4.2 万 yr 和 2.3 万 yr, 分别与根据天文学计算得到的轨道偏心率、黄赤交角和分点岁差有关项的平均变化周期相关, 于是 Hays 等人宣告, 米兰柯维奇理论 (the Milankovith theory) 已经被证实, 也就是说, 产生第四纪冰期变化的根本原因是地球轨道根数的缓慢自然变化。于是这项理论被称为天文气候学理论 (the astronomical climate theory or the astroclimatology)。

### 5.1 米兰柯维奇天文气候学理论的不足

根据米兰柯维奇理论, 北纬 65° 地区夏半年天文辐射总量的多少大体可以代表全球性冰川的消长。对此, 曾有不少学者提出过异议。近 20 余年来科学家们所揭示的事实证明了米兰柯维奇理论可能是不全面的。在 1984 年出版的《米兰柯维奇和气候 (Milankovitch and Climate)》<sup>[6]</sup> 一书中, 一些作者对米兰柯维奇的观点提出了修正。他们认为, 不能只局限地考虑局部季节 (夏半年) 和局部纬度地区 (65°N) 的太阳辐射量的变化来定义全球性的气候变化。徐钦琦对过去 73 万 yr 以来不同氧同位素阶段、不同季节所获得的太阳辐射量变化的综合分析, 得到的结论是, 当北半球冬半年由全球所获得的平均太阳辐射量减少时, 全球性的冬季温度随之下降, 反之则全球性的冬季温度就升高, 两者呈正相关关系; 而当北半球夏半年由全球所获得的平均太阳辐射量增多时, 全球各地的夏季温度呈现下降趋势, 反之亦然, 为负相关关系<sup>[60]</sup>。因此, 过去数十万 yr 以来不同氧同位素阶段的全球性的平均温度是与北半球冬半年由全球所获得的平均太阳辐射量变化密切相关的。然而, 这只是从统计上, 而不是从天体力学机制上对米兰柯维奇的天文理论提出了可能的修正。

### 5.2 关于 10 万 yr 周期的成因机制

根据米兰柯维奇理论, 由于地球轨道偏心率  $e$  的变化引起了太阳对地球日照率的变化, 从而导致地球上 10~12 万 yr 周期的冰期变化。然而, 近年来有些科学家对此提出了疑问, 近 10 万 yr 周期项对地球接收太阳热辐射变化的影响要小于近 41 万 yr 项和近 2 万

yr 项, 但为何在几乎所有的地质资料中, 近 10 万 yr 变化周期却表现得尤为明显。研究认为, 过去百万年以来地质资料中的近 10 万 yr 变化周期可能不是来自  $e$  的变化, 而是来自地球轨道倾角  $i$  的变化<sup>[61]</sup>, 过去关于  $i$  的真实变化被忽略了。引起这种忽略的原因可能有两个方面: 一是自米兰柯维奇理论问世以来, 许多人已承认了米兰柯维奇理论的真实性和, 其次是过去的计算中没有采用太阳系的不变平面作为参考面来计算  $i$  的变化, 因而,  $i$  的变化中的近 10 万 yr 的周期反映不明显。对最近 60 万 yr 以来的全球 5 个深海沉积核的氧同位素变化资料和根据行星扰动的直接积分计算得到的地球轨道相对于太阳系不变平面的  $i$  变化作了比较, 发现两者具有很好的一致性 (见图 3), 但后者存在约 3.3 万 yr 的位相滞后。上述结论显然与  $e$  是引起近 10 万 yr 冰期变化的结论不一致<sup>[62]</sup>, 因此, 地球上 10~12 万 yr 冰期变化周期的真正机制还有待于研究。

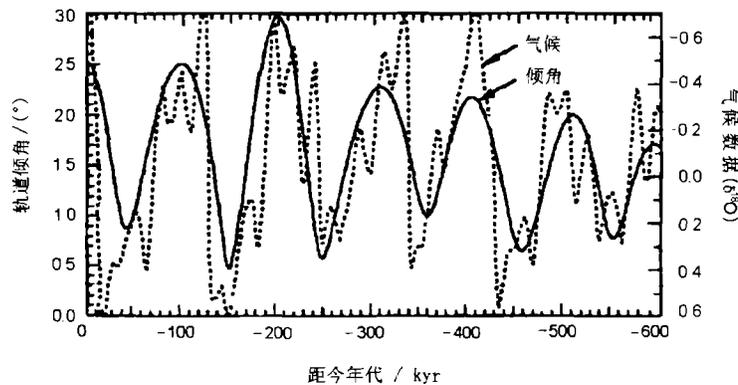


图 3 地球轨道倾角  $i$  的变化与氧同位素含量变化  $\delta^{18}\text{O}$  所表示的气候变化之间的比较<sup>[61]</sup>

1997 年, Muller 等人<sup>[63]</sup>进一步基于  $e$  的线性变化模型、非线性的冰变化模型和  $i$  的变化模型, 用谱分析方法证实了  $i$  的变化模型中具有单一的近 10 万 yr 周期的强谱峰存在, 而在  $e$  的线性变化模型中, 存在与表 1 结果一致的近 12.5 万 yr、9.5 万 yr 和近 41 万 yr 的周期项, 但它们的幅度只与噪声水平相当, 再进一步将  $i$  的变化与位于大西洋、太平洋和印度洋的深海钻探资料<sup>[64~71]</sup>的谱分析结果作比较研究, Muller 等人得到的基本结论是: 虽然我们还不能完全排斥  $e$  的变化对地质资料中近 10 万 yr 周期项的相对较小的贡献, 但我们可以基本肯定, 在过去的近 100 万 yr 中, 地质资料中  $\delta^{18}\text{O}$  普遍存在近 10 万 yr 为主的变化周期,  $i$  的变化是引起这近 10 万 yr 周期冰体积波动的主要外驱动力; 此外, Muller 等人的研究还表明, 在过去的 150 万 yr 至 250 万 yr 间, 地球上的冰期存在与黄赤交角  $\epsilon$  有关的 4.1 万 yr 为主的周期变化, 这也证实了 Ruddiman 等人 (1989)<sup>[72]</sup> 和 Raymo 等人 (1989)<sup>[73]</sup> 的研究结论。Kortenkamp 等人 (1998)<sup>[74]</sup> 对行星际尘埃吸积率进一步研究后认为, 在过去的约 120 万 yr 以来, 地球上近 10 万 yr 周期的冰体积波动与  $e$  的变化无关, 深海沉积核中地外氦 ( $^3\text{He}$ ) 元素的浓度也存在一个近 10 万 yr 的周期波动, 它可能与  $i$  的变化引起地球对行星际尘埃粒子的吸积率变化有关。

## 6 结论与讨论

由于地球轨道参数的改变所引起的地球的冰期(特别是第四纪冰期)中近 10~12 万 yr 周期的冰的进退变化,对整个地球的周期和长期的演变所起的作用是巨大的。可以预测,在未来距今分别约 0.5 万 yr、2.3 万 yr 和 6.8 万 yr 时,全球将进入温度的三个冷谷期,分别比现在降温约 3.0、5.0 和 7.0°C。到距今约(9~10)万 yr,即进入新一轮冰期的最冷期,地球将比现在降温 8~12°C。在格陵兰,末次冰盛期与全新世的气温差达到 12~13°C<sup>[75]</sup>。

对冰芯  $\delta^{18}\text{O}$  资料的进一步分析已经表明,在最近约 2 万 yr 的气候变暖过程中,还存在着千年时间尺度的变化周期,其无法用米兰柯维奇的天文理论得到解释。此外,还存在数十 yr 到上百 yr 时间尺度的气温突变过程,例如,在距今约 1 万 yr 前的一次寒冷事件(新仙女木事件)的结束过程中,在不到 50 yr 的时间内气温突然增加了 7°C<sup>[13]</sup>。研究表明,在百年尺度的气候变化上,可以用太阳活动来加以解释。国际上将开展太阳辐射与气候变化空间观测计划<sup>[76]</sup>。

研究资料还显示,在最近的三次近 10 万 yr 的冰期中,全球性的冰川范围在逐步缩小,末次冰期中的冰川范围最小,天文气候学理论揭示了这是由于地球轨道根数的缓慢自然变化所致。根据上述讨论,我们可归纳出如下三点:

(1) 对地质资料的分析结果表明,全球性的气候在近 10 万 yr 时间尺度的波动上具有同步一致的变化趋势;由于地球轨道参数的变化,导致了地球吸收太阳热辐射的变化,而引起全球性气温的变化,使行星际尘埃粒子在地质资料中的沉积量发生相应的变化;南极东方站在冰盛期的不可溶粒子尘埃的沉积量是全新世的 9~15 倍,表明在冰期有更多的星际尘埃粒子从高空远途输运到冰盖上<sup>[77,78]</sup>。因此,所有上述地质资料在近 10 万 yr 周期的变化趋势上都具有高度的相关性,它们可能起因于地球轨道相对于太阳系不变平面倾角  $i$  的变化,而不是地球轨道偏心率  $e$  的变化<sup>[64,65]</sup>。然而,由于  $i$  的变化滞后于气候变化约 3.3 万 yr,因此,地质资料中近 10 万 yr 尺度周期波动的真正的机制解释,还有待未来进一步研究证实<sup>[79]</sup>。

(2) 根据表 1 结果,近 2 万 yr 周期项似乎具有最大的振幅变化,近 4 万 yr 项和 41 万 yr 项的振幅变化相当,而近 10 万 yr 周期项振幅不到近 2 万 yr 项的一半,但根据对大量的地质资料和气候资料的分析结果表明,最近百万 yr 以来,近 10 万 yr 周期的冰期旋回是最显著的地球冰期变化特征。因此,如果米兰柯维奇天文理论是正确的,那么表 1 中还应该包括一项更大振幅的近 10 万 yr 周期变化项,并且在位相上应与观测资料的相应变化相符。

(3) 地球上第四纪(最近 100 万 yr)以来的冰盖体积存在近 4 万 yr 和近 2 万 yr 的变化周期,它们受到冰盖体积近(10~12)万 yr 变化周期的明显调制作用;目前的地球正处于第四纪末次冰期后的间冰期阶段。Wahr 等人(1993)<sup>[80]</sup>基于美国冰川研究委员会 1985 年对南极和格陵兰冰盖的研究,得到了这两个冰盖目前正处于冰积过程,并引起全球平均海平面分别以  $(0.6\pm 0.6)$  mm/yr 和  $(0.1\pm 0.4)$  mm/yr 的速率下降的结论;然而,文献[57]根据全球海平面变化观测资料和地球自转变化资料,研究得到了与上述不同的结论。由于地球进入新一轮冰期后所引起的地球物理效应会存在相位滞后,因此,不排除目前的地球已开始从间冰期阶段进入新一轮的全球性 10~12 万 yr 周期的冰期阶段的可能性。

## 参 考 文 献

- 1 Imbrie J. ICARUS, 1982, 50: 408
- 2 么枕生. 气候学原理, 北京: 科学出版社, 1958
- 3 吴守贤, 华英敏, 孙永岸等. 陕西天文台台刊, 1990, 13(2): 1
- 4 Berger A L. Nature, 1977, 269: 44
- 5 Imbrie J, Imbrie J Z. Science, 1980, 207: 943
- 6 Berger A et al. eds. Milankovitch and Climate, Dordrecht: Reidel, 1984. 3
- 7 Berger A. In: Cazenave A ed. Solved and Unsolved Problems, Dordrecht: Reidel, 1980. 111
- 8 Berger A et al. Quaternary Science Review, 1991, 10: 297
- 9 Berger A, Loutre M F. Earth Planet. Sci. Lett., 1992, 111(2-4): 369
- 10 Kukla G, Berger A, Lotti R et al. Nature, 1981, 290: 295
- 11 Hays J D, Imbrie J, Shackleton N J. Science, 1976, 194: 1121
- 12 Imbrie J, Shackleton N J, Imbrie J Z. In: Berger A et al. eds, Milankovitch and Climate, Dordrecht: Reidel, 1984. 269
- 13 康建成, 温家洪. 极地研究, 1997, 9(2): 134
- 14 Dansgaard W, Johnsen S J, Clausen H B et al. Nature, 1993, 364: 218
- 15 Oeschger H, Arquit A. In: Bradley R S ed. Global Changes of the Past, Snowmass, Colorado: OIES Global Change Intitute, 1989, 175
- 16 Lorius C, Jouzel J, Ritz C et al. Nature, 1985, 316: 592
- 17 Jouzel J, Lorius J. Nature, 1987, 329: 403
- 18 Genthon C, Barnola J M, Raynaud D et al. Nature, 1987, 329: 414
- 19 Chppellaz J, Barnola J M, Raynaud D et al. Nature, 1990, 345(6271): 127
- 20 Boutron C F, Rudniew S N et al. Earth and Plnetary Sci. Letters, 1993, 117(3,4): 431
- 21 Raynaud D, Jouzel J, Barnola J M et al. Sience, 1993, 259(5097): 926
- 22 Martin T. Paleoceanography, 1990, 5: 1
- 23 Morre J. Arctic Centre News, 1993, (3): 7
- 24 Thompson L G. In: Btdley R S ed. Global Changes of the Past, Snowmass, Colorado: OIES Global Change Intitute, 1989, 201
- 25 Boulton C F. Nature, 1993, 366(6455): 507
- 26 Jouzel J, Barkov H J et al. Vostok ie ore: towards a second climatic cycle, Summary for Fifth International Symposium on Antarctic Glaciology, 1993, Cambridge: [s.n.], 1994
- 27 Jouzel J, Barkov N I, Barnola J M et al. Nature, 1993, 364(6436): 407
- 28 Jouzel J, Raynaud D, Barkov N I et al. Nature, 1999, 399(3): 429
- 29 Paytan A, Kastner M, Chavez F P. Science, 1996, 274: 1355
- 30 Dansgaard W. In: Berger W H, Labeyrie L D eds. Abrupt Climate Change, Dordrecht: Reidel, 1987. 223
- 31 Berger A. Long-term History of Climate Ice Ages and Milankovitch Periodicity, Tucson, AZ: University of Arizona Press, 1991
- 32 Greenland Ice-core Project (GRIP) Members. Nature, 1993, 364: 203
- 33 Dia A N, Cohen A S, O'Nions R K et al. Nature, 1992, 356: 786
- 34 Clements S C, Farrell J W, Gromet L P. Nature, 1993, 363: 607
- 35 Berger A L. Quat. Res., 1978, 9: 139
- 36 Berger A. Quat. Int., 1989, 2: 1
- 37 Imbrie J et al. Paleoceanography, 1992, 7: 701
- 38 安芷生, Kukla G, 刘东生. 第四纪研究, 1989, (2): 155
- 39 华英敏. 上海天文台年刊, 1994, (15): 9
- 40 Kang J C, Wen J H. Antarctic Research, 1991, 9(2): 134
- 41 Jouzel J, Lorius C, Petit J R et al. Nature, 1987b, 329: 403

- 42 Martinson D G, Pisias N G, Hays J D *et al.* *Quaternary Research*, 1987, 27: 1
- 43 Yamazaki T, Noboru I. *Earth, Planet. Sci. Lett.*, 1994, 128(3-4): 527
- 44 Yokoyama Y, Yamazaki T. *Earth, Planet. Sci. Lett.*, 2000, 181(1-2): 7
- 45 Schmieder F *et al.* *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2000, 179: 539
- 46 Strick M R, Paterne M, Bassinot F C *et al.* *Nature*, 1998, 392: 269
- 47 Tushingham A M, Peltier W R. *J. Geophys. Res.*, 1991, 96(B3): 4497
- 48 Peltier W R. *Science*, 1994, 265: 195
- 49 Kambeck K, Yokoyama Y, Johnston P *et al.* *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2000, 181(4): 513
- 50 Yang Z G, Manabe S, Yokoyama K *et al.* *Proceedings of the Tech. Workshop for APT and APSG 1996, Kashima, Japan: Kashima Space Research Center Communications Research Laboratory*, 1996, 294
- 51 Yang Z G, Manabe S, Yokoyama K *et al.* *天文学报*. 1998, 39(3): 298
- 52 杨志根. *天文学报*, 1996, 37(3): 313
- 53 Vermeersen L L A, Fournier A, Sabadini R. *J. Geophys. Res.*, 1997, 102(B12): 27689
- 54 Mitrovica J X, Milne G A. *J. Geophys. Res.*, 1998, 103(B1): 985
- 55 Kaufmann G, Lambeck K. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 2000, 121(3-4): 301
- 56 Zhigen Yang. *Chinese Journal of Geophysics*, 2001, 44(6) (in press)
- 57 杨志根. *上海天文台年刊*, 1996, (17): 57
- 58 Williams G E. *Earth, Planet. Sci. Lett.*, 1975, 26: 361
- 59 Broecker W S, Donk J V. *Geophys. Space Phys.*, 1970, 8: 169
- 60 徐钦琦, *天地生综合研究进展*, 北京: 中国科学技术出版社, 1986
- 61 Muller R A. *Nature*, 1995, 377: 107
- 62 Covey C. *Scientific American*, 1984, 250: 58
- 63 Muller R A, MacDonald G J. *Science*, 1997, 277: 215
- 64 Quinn T R, Tremaine S, Duncan m *et al.* *A. J.*, 1991, 101: 2287
- 65 Tiedemann R, Sarntheim M, Shackleton N J. *Paleoceanography*, 1994, 9: 619
- 66 Shackleton N J, Hall M A. In: *Initial Report of the Deep Sea Drilling Project*, Washington, DC: U.S. Government Printing Office, 1984, 81: 599
- 67 Shackleton N J, Hall M A. *Proc. Ocean Drill. Program Sci. Results*, 1989, 111: 295
- 68 Shackleton J J, Berger A L, Peltier W R. *Trans. Soc. Edinburgh Earth Sci.*, 1990, 81: 251
- 69 Berger W H, Yasuda M K, Bickert T *et al.* *Geology*, 1994, 22: 463
- 70 Mix A C *et al.* *Proc. Ocean Drill. Program Sci. Results*. 1991, 138: 371
- 71 Muller R A, MacDonald G J. *Geology*, 1997, 25: 3
- 72 Ruddiman W F, Raymo M E, Martijson D G *et al.* *Paleoceanography*, 1989, 4: 353
- 73 Raymo M E, Ruddiman W F, McIntyre A *et al.* *Paleoceanography*, 1989, 4: 413
- 74 Kortenkamp S J, Dermott S F. *Science*, 1998, 280: 874
- 75 Johnsen S J, Clausen H B, Dansgaard W *et al.* *Nature*, 1992, 359(6393): 311
- 76 Kopp G, Rottman G, Harder J *et al.* *American Geophysical Union, Spring Meeting*, 2001. SH52A-08
- 77 Petit J R, Mounier M, Jouzel J *et al.* *Nature*, 1990, 343(6253): 56
- 78 Petit J R, Martin M, Jouzel J *et al.* *The Dust Record in Antarctic Ice: New Data and Comparison with other Records. Summary for Fifth International Symposium on Antarctic Glaciology*, 1993, Cambridge: [s.n.], 1994
- 79 Hinnov L A. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2000, 28: 419
- 80 Wahr J, Han D, Trupin A *et al.* *Adv. Space Res.*, 1993, 13(11): 11257

## Changes of the Earth's Orbital Elements and the Quaternary Glacial Epoch

Yang Zhigen

(1. *Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030*)

(2. *National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012*)

### Abstract

The recent progress on studies of the Quaternary glacial-interglacial epoch which relates to the Milankovitch astronomical theory of paleoclimate is presented. The different large glacial-interglacial changes with cycles of 100 ~120,  $\approx$ 40 and 20 thousands years are found in the data of global ice volume, which is implied by the data of oxygen isotope ratio in the deep sea. The similar period terms above in glacial-interglacial climate changes are also documented by complementary climate records derived from different data of geology, such as the deep sea sediments, the records of polar ice core's  $\delta^{18}\text{O}$  from Vostok and the central Greenland, the magnetic susceptibility data of loess profile in China and so on. According to the Milankovitch astronomical theory of paleoclimate, the variations in the geometry of the Earth's orbital elements are the fundamental source of the succession of Quaternary ice age. Hence, it is the global effects that caused by the climatic variations. Milankovitch astronomical theory of paleoclimate is basically reliable. However, the deficiency in this theory and the possible external mechanism of the glacial-interglacial changes with cycles of 100 ~ 120 thousands years are introduced and discussed.

**Key words** Milankovitch astronomical theory of paleoclimate—Quaternary glacial epoch—Climatic changes