

近 5 000 a 的气候波动与太阳变化*

洪业汤 姜洪波 洪冰 朱泳煊 林庆华 曾毅强 王羽

(中国科学院地球化学研究所环境地球化学国家重点实验室, 贵阳 550002)

摘要 对 John A. Eddy 提出的过去 5 000 a 中 16 个明显的太阳活动变化, 金川泥炭纤维素 $\delta^{18}\text{O}$ 温度代用记录有很好的的一对一的响应. 每当较长期的太阳活动水平低落时, $\delta^{18}\text{O}$ 值就减小, 地表气温下降; 反之, 在高的太阳活动水平期间, $\delta^{18}\text{O}$ 值增大, 温度上升. 据此讨论了未来 50~100 a 地表气温的演变趋势.

关键词 全球变化 太阳变化 气候驱动 泥炭 氧同位素

1 太阳辐射变化与气候波动

在当前的全球变化研究中, 全球气候变化的性质和原因的不确定性, 已成为研究的焦点之一. 由于太阳提供的能量是地球气候系统的主要驱动因素, 因此, 太阳本身所提供的能量发生变化, 或者地球所实际接收到的太阳能发生变化, 两者都可能成为改变地球气候系统的原因. 根据这一基本认识, 长期以来国内外开展了大量的研究. 迄今为止, 上述第二方面的研究可能最为成功, 其代表就是已被普遍引用的 Milankovitch 理论^[1].

对第一方面的研究, 困难首先在于测量技术. 尽管对太阳的总辐射量(即所谓太阳常数)究竟是否是不变的已逐渐有了怀疑, 并从本世纪初已开始进行实际测量, 但这些测量结果却未能确切发现太阳辐射的短期变化, 这就阻碍了进一步研究太阳辐射变化与地球气候变化之间的物理机制, 使得太阳变化与气候变化相互关系的许多研究都成为有争议的.

但是, 正是科学上的这些争议推动着太阳变化与地球气候变化关系研究的开展. 在过去的 20 年中, 至少在以下三方面取得了引人注目的进展.

首先是从 70 年代末期开始利用卫星技术对太阳辐射进行研究, 把以地基为主的观测变成从空间测量, 从而避免了地基观测的某些固有缺陷. 空间测量表明, 太阳总辐射量的确不是不变化的, 从 1979 年至 1990 年期间, 变化约 0.1%, 大约相当于 0.24 W/m^2 的驱动力变化. 或许更为重要的是这些观测带给人们的启示, 即更长时间尺度(如数百年尺度)的太阳变化可能比 1979 年以来的变化要更大, 对了解气候的变化也更重要. 与此同时, 就太阳变化对地球气候的驱动作用积累了更多的相关性研究, 所涉及的太阳变化指标包括太阳黑子数、太阳黑子周期长度、紫外辐射、发光度等, 所观测的大气气候特征包括特定地区的温度、全球平均海面温度等. 一些崭新的物理作用机制也逐步提出, 如发现地球平流层温度与波长 10.7cm 的太阳辐射之间有很好的相关性, 而且这种相关性又以某种方式向对流层扩散和放大^[2]. 这些进展已

使得太阳本身辐射变化的影响研究成为了解地球气候变化的重要努力方向之一。

Reid 等人^[3]认为,在太阳的长期变化与气候变化的直接相关方面,最有说服力的证据是 John A. Eddy 提出的. 以树轮放射性碳浓度异常为太阳活动水平的指示,以欧洲和全球冰川的进退作为气候变化的指示,Eddy 对过去 7 500 a 识别出 18 个显著的太阳活动水平变化期,推测存在一个周期约为 1 000 或 2 500 a 的波动趋势,并指出太阳活动水平的长期变化与全球气候变化之间有好的正相关(图 1)^[4,5]. 这些假说对以后的研究有很大影响. 但迄今为止,还

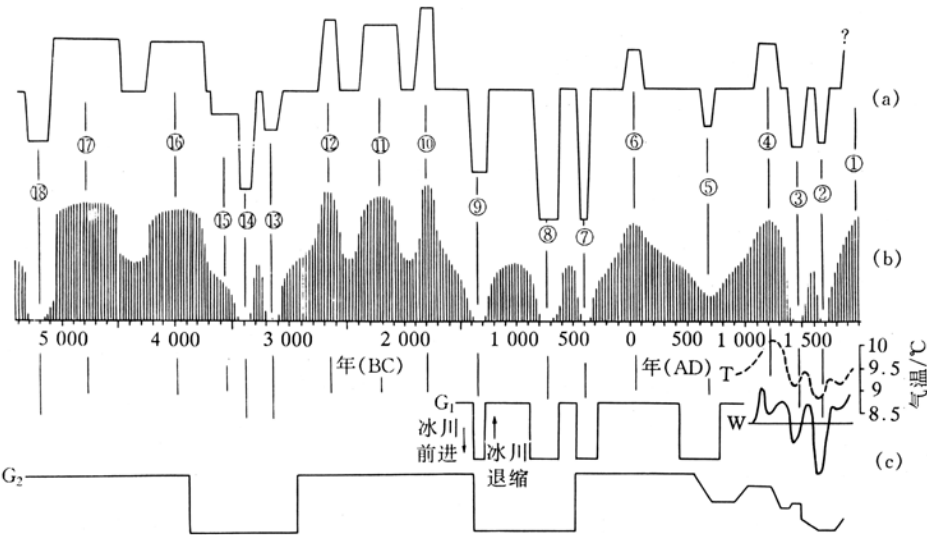


图 1 太阳活动与地表气温关系示意图

(a)以蒙德极小期的¹⁴C浓度为标准的大气¹⁴C浓度变化示意图,向下表示¹⁴C浓度增加,提示太阳活动减弱.带圈的数字表示表1中所述的太阳变化特征.(b)太阳活动水平较长期变化示意图.(c)过去气候变化的4种估计.G₁示阿尔卑斯山冰川进退时间,G₂示全球冰川进退变动时间,T示英国年均气温,W示巴黎和伦敦的严冬指数,向下表示寒冷(据 Eddy^[5]).

表 1 树轮¹⁴C记录的太阳活动变化与泥炭 $\delta^{18}\text{O}$ 温度代用指标

太阳变化	¹⁴ C记录的开始和结束时间	实际可能持续的时间	$\delta^{18}\text{O}$ 变化	相应时间
1 现代极大	1800 AD~现在	1780? AD~现在	清极大	1825 AD
2 蒙德极小	1660~1770 AD	1640~1710 AD	明万历极小	1618 AD
3 史勃勒极小	1420~1570 AD	1400~1510 AD	明弘治极小	1500~1525 AD
4 中世纪极大	1140~1340 AD	1120~1280 AD	南宋极大	1060~1170 AD
5 中世纪极小	660~770 AD	640~710 AD	唐极小	640~715 AD
6 罗马极大	1~140 AD	20~80 AD	西汉极大	20 BC
7 希腊极小	420~300 BC	440~360 BC	—	—
8 荷马极小	800~580 BC	820~640 BC	春秋极小	850~770 BC
9 埃及极小	1400~1200 BC	1420~1260 BC	商极小	1300 BC
10 石柱极大	1850~1700 BC	1870~1760 BC	商极大	1850~1640 BC
11 金字塔极大	2350~2000 BC	2370~2060 BC	夏极大	2270 BC, 2020 BC
12 苏美尔极大	2700~2550 BC	2720~2610 BC	—	—
13 极小	3200~3050 BC	3220~3110 BC	极小	3120 BC
14 极小	3410~3270 BC	3430~3330 BC	极小	3430 BC
15 极小	3670~3410 BC	3690~3470 BC	极小	3467 BC
16 极大	4220~3700 BC	4240~3760 BC	极大	3710 BC

—表示无 $\delta^{18}\text{O}$ 数据,见正文论述.

没有一个长期的气候代用记录对此假说作出响应,其部分原因可能在于它要求气候代用记录不仅要有高的时间分辨率和足够的时间长度,而且对气候变化要有高的敏感性. 本文将报道金川泥炭纤维素 $\delta^{18}\text{O}$ 时间系列所指示的温度变化与太阳活动水平长期变化的比较结果.

2 泥炭 $\delta^{18}\text{O}$ 气候代用记录对太阳变化的响应

所研究的金川泥炭地位于吉林省辉南县金川镇西大甸子,在全球位置上靠近西太平洋边缘,是气候变化最敏感的区域之一. 关于研究区的自然环境、泥炭芯的采集、定年、年龄校正、泥炭纤维素的提取、纤维素 $\delta^{18}\text{O}$ 的测定方法以及植物纤维素 $\delta^{18}\text{O}$ 系列作为温度代用指标的原理等,均已论述于我们较早发表的论文中^[6]. 由于受东亚季风的影响,金川泥炭全剖面植物主要由苔草及少量芦苇等沼生植物所组成. 金川泥炭植物纤维素中的 $\delta^{18}\text{O}$ 值与大气降水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值之间可近似认为存在正相关,因而也与地表气温间存在正相关. 显然,如果在金川泥炭纤维素 $\delta^{18}\text{O}$ 值的变化与太阳活动水平变化之间能发现某种相关的话,也就间接地指示了太阳活动与地表温度间的驱动-响应关系.

图 2 中的曲线 1 是金川泥炭纤维素 $\delta^{18}\text{O}$ 值变化的距平曲线,时间分辨率为 20 a, $\Delta\delta^{18}\text{O}$ 的零值是近 5 000 a $\delta^{18}\text{O}$ 的平均值. 由曲线 1 可见,绝大部分 $\Delta\delta^{18}\text{O}$ 值变动约在 $-4\text{‰} \sim +2.5\text{‰}$ 之间. 相对于 5 000 a 的平均温度而言,它所指示的地表温度变动范围估计为 $-6^{\circ}\text{C} < \Delta T < +4^{\circ}\text{C}$,幅度可能不超过 10°C .

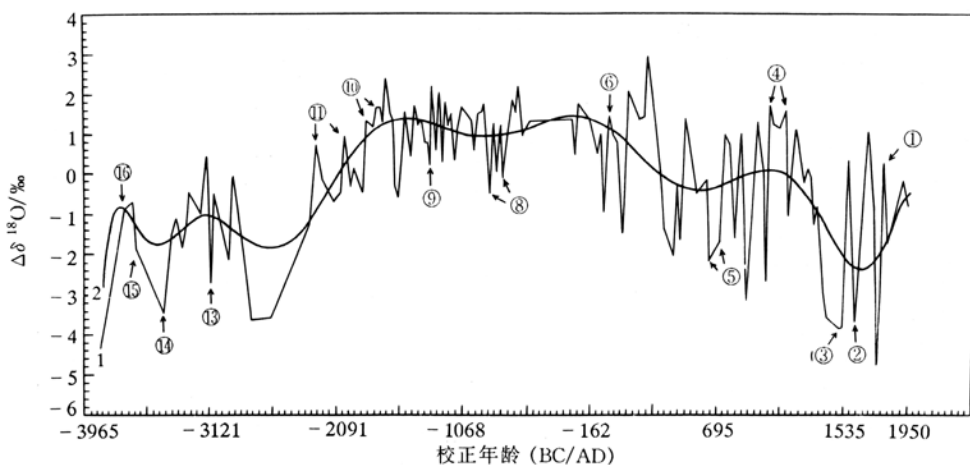


图 2 近 5 000 a 温度变化的金川泥炭 $\delta^{18}\text{O}$ 代用记录与太阳变化
带圈的数字与图 1 相同. 有负号的校正年龄代表公元前年龄

在 Eddy 提出的 18 个明显的太阳活动水平变化中,16 个落在近 5 000 a 内. 根据 Eddy 提供的太阳活动明显异常的年代,可将这 16 个明显的太阳活动变化的位置在金川泥炭 $\delta^{18}\text{O}$ 温度代用曲线上标示出来(图 2). 其中,在相当于第 7 和第 12 号太阳活动时期,因先期进行了泥炭 $\delta^{13}\text{C}$ 测定以后未有足够的纤维素样品供氧同位素分析而未有泥炭 $\delta^{18}\text{O}$ 数据^[6]. 由图可见,这些明显的太阳变化按其活动强弱水平都一一对应于泥炭 $\delta^{18}\text{O}$ 大小的变化,即一一对应于地表温度的变化,在位相特征和发生年代上几乎完全一致.

例如,由图 1 可见,在大约公元前 4000~3000 年期间,树轮放射性碳记录指示出是一个太阳活动水平的明显低落时期,有 4 次明显的太阳变化,其中第 15, 14 和 13 号太阳活动更处于极小时期. 与此期间太阳活动水平低落相对应,图 2 表明,公元前 4000~3000 年期间的金川泥炭纤维素 $\Delta\delta^{18}\text{O}$ 值几乎全部低于过去 5 000 a 的平均值,表明这一时期是明显的寒冷时期,与 Denton 所说的全球第二新冰期相吻合(图 1 中的曲线 G_2 所示的相应冷期). 所不同的是,泥炭 $\delta^{18}\text{O}$ 记录到了更精细的变化,在大约公元前 3430 年、3120 年和 3467 年分别记录到了 3 个极小和在公元前约 3710 年的一次极大,与 Eddy 提出的第 14, 13, 15 和 16 号太阳活动水平的高低分别相对应,表明了这期间气温在低温水平下的波动性.

过去 5 000 a 中其它一些经常提及的气候变化,如夏商时期和宋代相当于欧洲中世纪时期的温暖以及小冰期等,都与明显的太阳活动变化有关. 这种一一对应关系,在表 1 中清楚可见. 值得指出的是,当太阳活动水平明显变化的持续时间较长,超过 100 a 以上时,泥炭 $\delta^{18}\text{O}$ 记录也往往会给出一组数值作响应. 如在第 11, 10 和 4 号太阳活动极大期时,分别有一组高的 $\delta^{18}\text{O}$ 值相对应;而在第 8, 5 和 3 号太阳活动水平低落时期,也分别有一组低的 $\delta^{18}\text{O}$ 值. 这些结果表明,在过去 5 000 a 中,在数十年至数百年尺度上,太阳活动水平的明显变化与地球气候的明显波动之间有好的一对一的驱动-响应关系:每当较长期的太阳活动水平低落时,地表气温就下降,反映在泥炭纤维素 $\delta^{18}\text{O}$ 值上就减小;而当太阳活动水平提高,地表气温升高,泥炭 $\delta^{18}\text{O}$ 温度代用指标就增大.

我们曾经指出,在约 4 600~3 600 aBP 期间,有过一次明显的自然升温过程^[6],现在可以进一步探讨它的原因. 由图 2 和表 1 可见,公元前 4000 年至 3000 年的 1 000 a 期间,在太阳活动水平出现了连续 3 次明显的极小之后,在紧接着的 1 000 多年中(大约 2600~1600 BC, 即约 4 600~3 600 aBP),又出现了连续 3 次明显的太阳活动极大. 相应地,泥炭 $\delta^{18}\text{O}$ 温度代用指标持续增高,1 000 a 中平均每百年增加约 0.6‰;全球地表气温由 Denton 所说的新冰期寒冷阶段持续回升,在中国大陆上则出现了由新石器晚期的寒冷阶段向历史上商代明显较今温暖气候的演变. 这可能是过去 5 000 a 历史上一次持续时间最长、增温幅度最大(可能达 6℃ 左右)的由太阳活动水平变化驱动的自然变暖过程,对气候变化研究有重要意义. 我们曾论述过这期间随着变暖过程而发生的气候脱离过湿状态而转干旱现象;埃及、印度和中国的古文明也正是在此自然变暖过程中有了迅速发展. 中国古代社会完成了由新石器时代向青铜时代的过渡,由氏族部落联盟过渡到奴隶制的夏商王朝,创造了甲骨文字,开始了有文字记载的中华古文明^[6,7].

在图 2 中还有许多原因不明的 $\delta^{18}\text{O}$ 的明显变化,或许有待今后开展深入细致的太阳活动水平研究来认识. 同时,也不能排除存在其它影响地表气温的因素,如火山活动. 金川泥炭地在长白山天池火山西北的上风向约 150 km. 据报道,长白山天池火山在历史上曾有过几次大规模喷发,其中公元 626 年、1026 年、1215 年等年份的大规模喷发被认为具有全球性环境影响^[8]. 有意思的是,图 2 中在约公元 640 年、1023 年和 1200 年确实记录到了 3 个明显的 $\delta^{18}\text{O}$ 极小,表明气温曾急剧转冷. 其中公元 1023 年和 1200 年两个冷峰尤其值得注意,因为它们都在 Eddy 所指出的中世纪太阳活动极大期范围,或欧洲中世纪温暖期范围. 在这种太阳活动水平高的背景下出现两个明显的冷峰,可能的确反映了火山活动的影响,有待于今后在泥炭相应层位开展火山喷发物质的鉴定工作来证实. 但看起来,火山活动对气候只能产生短期影响,

它不能改变气候变化的基本演变趋势。

3 近几百年的气候波动与太阳变化

为了解泥炭纤维素 $\delta^{18}\text{O}$ 温度代用曲线在过去 5 000 a 中的波动趋势, 对图 2 曲线 1 进行了多项式拟合分析。图 2 曲线 2 是其 15 阶多项式拟合结果, 表明泥炭 $\delta^{18}\text{O}$ 呈现 4 个连续的准正弦波动变化, 它们的周期从早到晚分别约为 830, 1650, 1430 和 1160 a, 平均周期约为 1 270 a。其中 1 160 a 的这个周期波动, 与包含了中世纪极大和蒙德极小的太阳活动水平变化周期非常吻合, Eddy 正是根据这个明显的周期变化, 推测太阳活动可能存在一个周期约 1 000 a 的波动变化^[4]。

值得注意的是, 这 4 个连续准正弦波动曲线的趋势本身, 又可能是一个周期更长的准正弦波动的一部分, 可用一个 5 阶多项式对图 2 曲线 1 的拟合来描述, 即 4 个小的正弦波动沿着这个更长周期的波动在变化(图 3)。由于我们所研究的泥炭剖面的时间长度还不够长, 泥炭 $\delta^{18}\text{O}$ 的这个长周期波动可能还未展现成一个完整的正弦波动。但将它与树轮 ^{14}C 记录相比较, 会发现在 5 000 a 以来时段上两者很相似: 树轮 ^{14}C 浓度在 10 000 a 周期的正弦波动上叠加有若干小的 ^{14}C 浓度变化, 如 Eddy 推测, 它们可能表现为约 1 000 a 的周期; 而泥炭 $\delta^{18}\text{O}$ 则在一个长周期的正弦波动的一部分上叠加有 4 个小的周期约 1 000 a 的正弦波动。因此, 泥炭 $\delta^{18}\text{O}$ 的波动趋势在一定程度上似乎也反映了太阳活动长期和较长期变化的趋势。

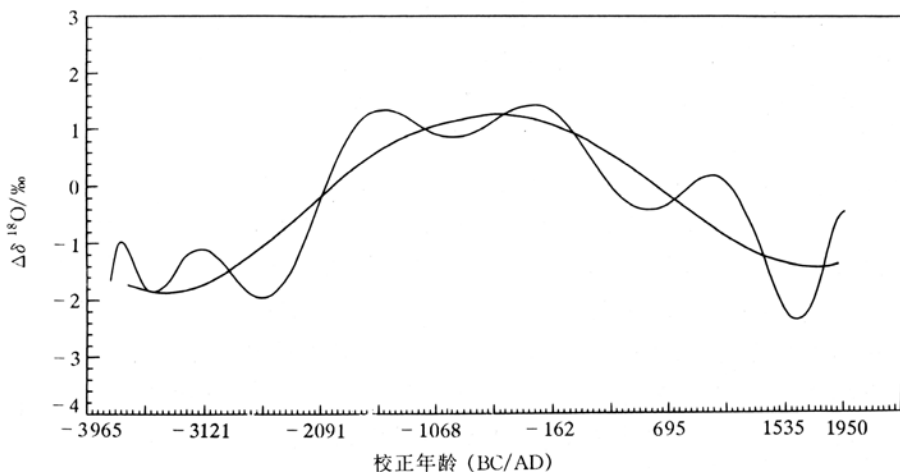


图3 金川泥炭 $\delta^{18}\text{O}$ 的长期和较长期波动趋势

这样, 我们有可能更好地认识近几百年来地表气温的变化趋势。尽管一般地说, 全球变暖过程从有实际测量的公元 1860 年起已能观察到, 但根据金川泥炭 $\delta^{18}\text{O}$ 温度代用记录(图 2 曲线 2), 大约从公元 1610 年开始, 泥炭 $\Delta\delta^{18}\text{O}$ 在波动中就已显示不断增大的趋势, 指示地表气温逐渐脱离小冰期寒冷阶段而逐渐回升, 并一直持续到现在。由图 2 和图 3 可见, 这一变暖过程实际上是继新石器晚期-夏商期间自然变暖过程之后的又一明显的变暖过程, 很可能仍是气候系统长期自然波动的一部分, 而太阳活动水平本身的变化可能是其主要的驱动因素。这种考虑的依据主要有以下几方面。首先, 在公元 1610~1950 年, 在图 2 曲线 2 $\Delta\delta^{18}\text{O}$ 波动趋势

图上, $\Delta\delta^{18}\text{O}$ 增加达 2‰, 即每百年平均增加 0.6‰, 与前述新石器晚期-夏商期间自然变暖过程的 $\Delta\delta^{18}\text{O}$ 增加速率相同; 其次, 这两次变暖过程在中国大陆北方都引起相似的降水量减少, 气候转干旱的现象^[6]; 另外, 大致与此相对应, 从若干指标来看, 例如从在太阳 11 a 周期的极大值时出现的年均太阳黑子数目, 从树轮 ^{14}C 浓度的变化以及观察到的太阳发光度的变化等都表明, 大约从蒙德极小期后至今, 太阳活动水平稳定地逐步增强^[4]; 最后, 这种太阳活动水平增强引起的升温估计与 $\delta^{18}\text{O}$ 增加所指示的温度升高估计也近似。据认为, 自公元 1850 年以来太阳辐射的输出有 0.14% 的增加, 相当于太阳辐射驱动力增加 0.34 W/m^2 , 所引起的地表气温增加约 0.5°C ^[2]; 而从公元 1850~1950 年期间, 泥炭纤维素 $\delta^{18}\text{O}$ 增加约 0.6‰, 所指示的气温变化估计不超过 1°C 。

最近, 根据公元 1860~1995 年期间包括大气圈、海洋、冰雪圈和陆地表面的全球三维耦合模型模拟气候系统的最新结果, 德国 Max-Planck 气象研究所所长 Lennart O. Bentsson 指出: “直至大约 1980 年为止, 典型的气候变化主要是由自然的、基本上是无法预报的温度波动所左右; 自那以后, 温室气体增温的影响变得比较清晰。特别值得注意的是在本世纪 80 年代和下世纪前 20 年之间的迅速变暖, 预计全球平均增温 1°C 。这种增温趋势将稳定地持续到整个 21 世纪”^[9]。显然, 我们在此所讨论的 1610~1950 年期间的气候变化应属于 Bentsson 所说的 1980 年以前的气候自然变化的一部分, 但是, 是过去 5 000 a 中所显现的平均周期大约 1 000 a 的气候波动的一部分。由图 2 曲线 2 和图 3 可见, 就 1950 年的泥炭 $\delta^{18}\text{O}$ 值来说, 它似乎正处在一个上升时期。如果前述周期性存在的话, 那么泥炭 $\delta^{18}\text{O}$ 值似乎还将继续上升。但由于泥炭 $\delta^{18}\text{O}$ 的变化受到太阳大约 10 000 a 长周期变化和约 1 000 a 较长周期变化的双重制约, 因此, 估计 1950 年以后, $\delta^{18}\text{O}$ 的上升不会持续很久, 可能在 2050~2100 年间将达到峰值; $\delta^{18}\text{O}$ 的增幅也不会很大, 可能不会超过它前一个正弦波动的峰值, 即可能不会超过近 5 000 a 泥炭 $\delta^{18}\text{O}$ 的平均值。

如果是这样的话, 这意味着, 即使不考虑人为活动释放温室气体的影响, 由于太阳本身辐射变化的驱动, 到下世纪前半期全球地表百年平均气温仍将上升, 并可能在大约 2050~2100 年左右达到峰值。然后可能逐渐下降, 开始新一轮新的波动。应当强调的是, 这是一种百年尺度上的波动趋势, 而在年际尺度上仍表现为相当大的不规则变化。但是, 了解近期太阳变化和气候变化在它们长期演变趋势中所处的位置, 对认识现实的气候变化现象和探讨未来的演变趋势无疑是重要的。总之, 未来几十年对认识地球气候变化将是重要时期。加强太阳辐射变化的观测及其对地球气候影响的机制研究, 加强气候代用指标及其对太阳辐射变化的响应研究, 与驱动气候变暖的温室气体因素一起, 将有可能更好地阐明地球气候未来的演变方向。

参 考 文 献

- 1 美国国家航空和宇航管理局地球系统科学委员会. 陈泮勤, 马振华, 王庚辰译. 地球系统科学. 北京: 地震出版社, 1992. 69~75
- 2 Houghton J T. Radioactive Forcing of Climate Change. In: Houghton J T et al. eds. Climate Change. London: Cambridge University Press, 1995. 189~192
- 3 Reid G C. Solar total irradiance variations and the global sea surface temperature record. J Geophys Res, 1991, 96(D2): 2 835~2 844

- 4 Eddy J A. The Maunder minimum. *Science*, 1976, 192: 1 189~1 202
- 5 Eddy J A. Climate and the changing sun. *Climate Change*, 1977, (1): 173~190
- 6 洪业汤, 姜洪波, 陶发祥, 等. 近 5 000 a 温度的金川泥炭 $\delta^{18}\text{O}$ 记录. *中国科学, D 辑*, 1997, 27(6): 520~524
- 7 洪业汤, 姜洪波, 陶发祥, 等. 气候变化与文明发展. 见: 刘嘉麒, 袁宝印主编. *中国第四纪地质与环境*. 北京: 海洋出版社, 1997. 359~367
- 8 刘若新, 仇士华, 蔡莲珍, 等. 长白山天池火山最近一次大喷发年代研究及其意义. *中国科学, D 辑*, 1997, 27(5): 437~441
- 9 Bengtsson L O. Modelling and prediction of the climate system. *Alexander von Humboldt Stiftung Mitteilungen*, 1997, 69: 3~14