

非冰期突然气候变化与太阳变化*

洪 业 汤

(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 本文试图介绍发生在非冰期,主要是全新世的突然气候变化研究所取得的进展,包括山地冰川和深海沉积物所记录的全新世突然气候变化,季风和干旱气候突然变化,以及突然气候变化与太阳变化的关系。太阳变化对整个全新世气候变化的影响似乎正愈来愈明晰起来。

主题词 太阳变化 突然气候变化 季风 干旱 全新世

1 引言

2000 年 1 月《美国科学院会报》刊登了美国海洋与大气管理局古气候计划项目负责人 J. Overpeck 及其同事的一篇论文,题目是“Nonglacial rapid climate events: Past and future”^[1]。从题目可看出,他强调的是突然气候变化,特别是发生在非冰期的突然气候变化事件。他认为长期以来,古气候学研究基本上是跟着气候动力学研究的结果走,基本上都是在关于地球气候相应于缓慢变化的气候驱动而逐渐发生变化的模式下,开展古气候学的追踪研究。例如,被被誉为古气候学第一个重大革命的米兰科维奇理论,就是论证了地球与太阳相对位置关系的缓慢变化如何决定性地导致了地球冰期气候的反复出现。又如,20 世纪 80 年代后期对 El Niño - Southern Oscillation (ENSO) 变化的稳态模型研究,导致了成功地预报季节至年际气候的变化。

但是在过去的一二十年间,一种新的气候变化模式逐渐显露出来。这是一种急速的、跳跃式的气候变化,一种反复地出现在近代历史上可持续数十年之久的气候极端变化。关于这种突然的气候变化,国际学术界在过去几十年间已较多地对发生在冰期期间的突然气候变化事件开展了研究。J. Overpeck 等^[1]认为,对发生在像今天这种的或者未来的“温暖气候”状况下,或非冰期状况下的突然气候变化,研究得还较少,值得加强研究。

强调加强突然气候变化研究的原因是容易理解的。从学术意义方面看,突然气候变化显然暗示了存在一种不同于前述缓慢气候变化的驱动机制,而对它了解得还很少;从社会经济方面的意义看,它与人类社会显然关系密切,它明确地提示人们,人类社会对这种气候变化的突然性要有足够的、全面的准备。因为一旦这些曾经在过去发生过的突然气候变化在未来出现,而我们又没有足够的准备,那对人类社会将可能造成严重影响。

作者简介:洪业汤 男 60 岁 研究员 环境地球化学专业 E-mail: ythong@public.gz.cn

* 国家自然科学基金(批准号:49733130)资助重点项目

2002-06-30 收稿,2002-09-06 收修改稿

2 非冰期突然气候变化事件研究

2.1 北美山地冰川记录的全新世突然气候变化研究

对全新世气候稳定性问题,尽管格陵兰冰芯上部即全新世时段的 $\delta^{18}\text{O}$ 值异常稳定^[2],也有其它一些研究表明全新世气候似乎是稳定的,但是更多的一些来自陆地和海洋的研究结果表明,全新世气候是不稳定的。一个有代表性的陆地的例子是对北美洲南阿拉斯加和育空地区(Yukon territory)的圣爱丽斯山(St. Elias Mountains)高山冰川的研究。G. H. Denton 和 W. Karlén^[3]发现,全新世至少有3次大的高山冰川扩展,时代最年轻的两次分别发生在小冰期和2 400 ~ 3 300 a B. P.,这两次冰川扩展的幅度大致相同;第3次发生在约4 900 ~ 5 800 a B. P.,幅度可能比前两次稍小。除这3次大的冰川扩展外,还有一些扩展幅度较小,分布范围可能也较小的冰川扩展,例如发生在约1 250 ~ 1 050 a B. P. 期间的冰川扩展。叠加在这些大的冰川扩展事件上的还有许多小的变化。在这些冰川扩展期之间的是冰川的退缩变化。冰川的退缩和伴随的高山云杉树分布顶界线的上升,分别发生在约6 175 ~ 5 975 a B. P., 4 030 ~ 3 300 a B. P., 2 400 ~ 1 250 a B. P., 1 050 ~ 460 a B. P., 以及从1920年至今时段。总的来看,这些冰川进退指示的全新世气候变化,具有一系列的持续约600 ~ 900 a的冰川扩展期,它们被一系列持续约1 750 a的冰川退缩期隔开,因而大约每隔2 500 a就出现一次冰川扩展,即气候变冷^[3]。这些观察结果也得到欧洲和其它一些地区高山冰川研究结果的支持,因而说明全新世气候是不稳定的。

2.2 北大西洋深海沉积物记录的全新世突然气候变化研究

一个有代表性的海洋的结果是G. Bond等^[4]对北大西洋VM28-14和VM29-19两个钻孔沉积物的研究结果。他们用0.5 ~ 1cm间距分割沉积物柱样品,相当于获得50 ~ 100 a的时间分辨率。通过岩石学和同位素的方法,获得了一系列新的发现。

G. Bond等^[4]发现,全新世北大西洋气候曾发生过一系列急速的重组,每次气候的重组都影响了冰山漂移碎屑沉积物(IRD)的沉积。共识别出8次IRD事件,其发生时间的峰值分别在约11 100a B. P., 10 300a B. P., 9 400a B. P., 8 100a B. P., 5 900a B. P., 4 200a B. P., 2 800a B. P.和1 400a B. P. (校正年龄)。IRD事件不仅见于全新世时段的沉积物中,而且在末次冰期也表现为千年尺度的变化。但是这些IRD事件没有严格的周期。对冰期而言,IRD事件的平均步长为 $1\,536 \pm 563$ a,而对全新世,平均步长为 $1\,374 \pm 502$ a,两者合起来,IRD事件的平均步长为 $1\,470 \pm 532$ a^[4]。这个气候变化的准周期贯穿在整个冰期和全新世。G. Bond等^[4]认为,发生在全新世的这一系列冷事件可以看成是一些小的D-O周期(即Bond周期)事件。他们认为,全新世IRD事件出现的最直接原因是一系列的海洋表面变冷。每次变冷都是由于北大西洋表面环流的一次相当大的变化所引起。证据是冷水型有孔虫的出现。同位素证据表明,新仙女木事件时,海水温度下降约5℃。他们还指出,北大西洋海表面环流的变化与格陵兰上空大气的变化是一个耦合系统,都在经历着同样的千年尺度的变化。因此他们推测,全新世和冰期千年尺度的气候变化应当基本上起源于同样的驱动机制,即一个准周期性的气候周期。对这个准1 470 a的周期的起因,G.

Bond 等^[4]认为,目前了解得还很少。但他们认为可以肯定排除大冰盖的不稳定性,因为到全新世中、晚期时,地球北部大冰盖已基本退缩;也不像是轨道周期引起的变化,因为可能的轨道周期都比 1 470 a 的周期要长。G. Bond 等^[4]趋向认为北大西洋热盐环流的变化可能起着重要的作用:1 470 a 的周期可能调节着冰山向北大西洋的输入,通过冰山融化的淡水,周期性地影响着北大西洋深层水的生成,从而调节着热盐环流的变化,进而影响气候变化。但也可能以一种更简单的方式,即淡水输入海洋就直接引起热盐环流的大幅度振荡,而这个振荡可能跟踪着一个弱的却是持续的外部驱动,并最终影响气候变化。我们将在本文后部再论及这一重要问题。

2.3 北非 - 印度洋季风气候的突然变化研究

在低纬度地区,突然气候变化也同样存在。一个有代表性的例子是非洲 - 亚洲季风气候的突然变化研究。过去 20 多年来,国际学术界对全新世季风气候的演变规律开展了活跃的研究,覆盖了从西非、东非、西亚到包括我国青藏高原及其周边地区在内的广阔季风区域。这些研究涉及到众多的湖泊和多种季风活动代用指标。通过这些湖泊代用记录的对比研究发现,全新世早 - 中期是一个季风活动持续强盛因而比今天更湿润温暖的时期。但是在这一总的变化趋势下,众多的湖泊中都记录到了多次的、急速的变干,其时段分别是在约 11 000 ~ 9 500 a B.P., 8 000 ~ 7 000 a B.P., 6 000 a B.P. 和 4 000 ~ 3 000 a B.P. (¹⁴C 年龄)。当时湖泊水位突然明显下降,气候由湿的状态突然急剧转变成干的状态。在这样广阔的空间内急速的气候干湿状态变化能表现出几乎同时性,很可能反映了一种大陆尺度的甚至全球性的现象^[5]。另一个引人注意的现象是,这些湖泊衰退的突然性及其所指示的环境生态的变化。降水大幅度减少,并常常持续数百年之久。例如,发生在约 4 000 a B.P. 前后的那次气候突然变干,使非洲大部分湖泊水位严重下降。由发育在一个陨石坑上位于加纳南部的 Bosumtwi 湖沉积可见,当时老的沉积物遭到严重侵蚀,可以认定当时湖泊水位肯定低于现在的水平^[6]。在这一时期,非洲撒哈拉地区植被严重退化,降尘强烈,最终导致撒哈拉沙漠化——地球陆面覆盖最大的变化。也正是在这一时期,西亚的美索不达米亚地区发生持续严重的干旱,研究认为,这种极端气候可能与当地 Akkadian 王国的崩溃和印度河谷文明的衰落有直接关系^[7]。

一些研究认为,火山活动^[8]、太阳变化^[9],以及地球南北冰盖的变化^[10]等可能与全新世季风气候的突然变化有某种关系。但目前研究较多的似乎是集中在两方面:一是季风突然变化与海洋表面温度 (SST) 变化的关系;另一是与陆地表面状态的关系。已经有相当多的研究发现,撒哈拉非洲季风强度的变化与海洋表面温度的变化之间存在同步的变化关系。现代海洋表面温度观测表明,当南大洋是温暖时,北大西洋和北太平洋则是冷的,这正好与撒哈拉的干季相同时;反之也一样^[11]。这种季风强度变化的现象,可以用大洋传送带理论来解释。由于这一假说得到了对季风与海洋温度和盐度同步观测资料^[12]的支持,以及 GCM 模型模拟^[13]的支持,因此,可以认为,非洲弱的季风是与北大西洋高纬度区域海洋表面温度和盐度的负异常相关。

对此假说也有不同的看法。F. Gasse 等^[5]认为,大洋传送带理论还不能算是气候变化的原初驱动因素,因为海洋传送带的开合是由其它一些基本因素变化,如融冰水的注

人、北大西洋深层水的生成等因素控制,这意味着还有其它因素控制着海洋热盐环流的变化。因此,F. Gasse 等^[5]认为,“还没有发现一种把海洋热盐传送带的强度与季风强度联结起来的直接机制。”他们认为,热带陆地地表状态的变化可以为季风气候的实然变化事件提供更令人满意的解释。所谓热带陆地地表状态变化,主要指热带地表干湿状态的变化及其引起的甲烷释放的变化。他们认为,大气最大的净加热发生在热带陆地上空;而土壤湿度效应对气候变化的重要性可以等同于海洋表面温度异常的效应。陆面过程与季风降雨突然变化间的联系,可能是通过季风、陆面状态和甲烷释放之间的反馈关系来实现的。

2.4 北美干旱气候的突然变化研究

美国把干旱看成是最重要的自然灾害之一,因为它给经济带来严重影响。1987 ~ 1989 年短短两年的旱灾,给美国经济造成约 70 亿美元的损失^[14]。对湖泊沉积、树轮等多种气候代用记录研究发现,在过去 2 000 年中美国大陆上曾发生多次严重的旱灾,其中最严重的有 4 次,分别发生在约 200 ~ 300 年,700 ~ 900 年,900 ~ 1100 年,和 1100 ~ 1200 年^[14]。美国 20 世纪发生的旱灾,比起这些历史上的旱灾来说,不论从干旱持续的时间长度还是干旱的强度来看,都只能算是小的^[14]。例如,美国 20 世纪 30 年代的严重干旱,使得天空风尘滚滚,被称为“Dust Bowl”。但这些风沙只限于美国有限地区的地表;而古气候记录显示,在过去 2 000 年中曾发生过多次更强烈、持续时间更长的干旱,使得风沙移动跨越美国大部分重要的农业生产区域^[14]。

特别值得注意的是,过去 2 000 年美国大平原地区的干旱变率具有一系列不同的相对稳定的形态。但是从一种相对稳定形态到另一种相对稳定形态的变化却是突然发生的。例如,美国北达科他州(North Dakota)月亮湖(Moon Lake)的盐度代用记录表明,在约 1200 年前,气候以干旱形态占优势,其特征是具有一系列比较有规律的、通常持续数十年至百年的干旱期;但在约 1200 年时,气候突然发生变化,在几十年时间内,气候突然由相对稳定的干旱态跳变为相对稳定的湿润态,结束了过去长逾 1 000 a 的干旱期,转变为相对稳定的湿润期^[15]。中国东北金川泥炭记录中,也在约 1200 年时,同样清楚地记录到了这一由于旱到湿润的突然气候变化^[16]。

这种突然气候变化的机理是什么,目前尚不清楚,也还没有一种过程模型来成功地模拟这种干旱状态的突然变化^[1]。J. Overpeck 等^[1]认为它提出的重要启示是,美国大平原目前应当说还处于一种相对湿的气候状态,与历史上的干旱相比,还算不上是真正严重的干旱。美国目前的干旱状态还完全不能等同于公元 1200 年前那些持续时间更长、更严重的干旱。美国现今的包括仪器记录在内的干旱变率状态的记录,并没有代表所有在历史上曾经出现过的那些严重干旱的类型。因此,现在相对湿的气候状态在将来也有可能突然结束,历史上曾经出现过的那种持续时间长而且严重的干旱也有可能在未来发生^[1]。显然,这些研究结果对我们如何评估当前我国面临的干旱状况,如何应对未来可能发生的情况,如何进一步加强研究是有参考价值的。

3 全新世突然气候变化与太阳变化

如果说冰期古气候学研究基本上是跟踪一种由轨道变化引起的太阳入射地球能量变

化的话,那么全新世气候的突然变化与太阳关系的研究则是完全不同的另一种模式。它们基本上是各自沿着自己的方向平行地在进行探索。它们相互之间力图彼此融合,但似乎每一次尝试都引起强烈争议。发现、论争、研究和发展贯穿了过去几十年的研究历史。

3.1 大气 ^{14}C 作为太阳变化指标的研究

长期以来,人们从对太阳黑子、日冕等现象的观测发现,太阳是一个十分奇特的、以某种规律性变化着的星球。太阳黑子数记录以及与太阳活动紧密相关的地球极光次数和强度变化记录等都被用作太阳变化的代用指标。但这些指标的不确定性经常引起争议。例如,在地球上不同纬度地区观测到的太阳黑子数可能会有差异。在一个太阳周期中,太阳黑子数的平均纬度变化有向着赤道方向而增加的趋势。在这种情况下,太阳黑子数与太阳辐射变化是什么关系?太阳黑子数是否就是最合适的太阳变化指标?或许“太阳黑子面积”是否更好一些?但在太阳盘面上黑子连续滚动出现的过程中,不同发展阶段的太阳黑子是否对地球环境有不同的影响?等等。另外,不论太阳黑子数记录还是极光记录的时间延展跨度都较短,最长的太阳黑子数记录也只能追溯到过去约 300 来年,远不足以满足全新世古气候学对比研究用。因此,需要寻找新的太阳变化代用指标。

1951 年, W. F. Libby 及其同事发表了他们的第一批 ^{14}C 年龄数据,并首次把 ^{14}C 称为放射性碳。这一开拓性工作在古代气候学领域中的重要性毋需赘述。紧接着在 1956 年,荷兰格罗宁根(Groningen)的 H. de Vries 在对生长于 17 和 14 世纪的树木进行 ^{14}C 测量时发现,树木中的 ^{14}C 浓度有变化的迹象,并于 1958 年发表了“放射性碳浓度随时间和地球上的位置而变化”的论文。他的发现迅速引起人们的注意,许多实验室开展工作进行检验。其中,正在美国地质调查所从事 ^{14}C 测定研究的 H. E. Suess 认为,最好是在一个已精确知道年龄的树木上来进行检验。正好亚利桑那大学树轮实验室发现了一棵大松树(*Pinus aristata*),该实验室的 C. W. Ferguson 博士通过数年轮确定其生长期长达 7 000 多年。C. W. Ferguson 深知这棵树对上述科学研究的重要性,于是聪明地决定把树轮样品同时分送给 3 个著名的 ^{14}C 实验室,即宾夕法尼亚大学、亚利桑那大学和加利福尼亚大学的斯克瑞普斯海洋研究所的 ^{14}C 实验室。每个实验室 10 克样品,由 10 个年轮一组的分样构成。H. E. Suess 当时已来到斯克瑞普斯海洋研究所,他用乙炔作计数气体,利用超低本底计数器开始对这些树轮样品的 ^{14}C 进行测定。他很快发现,所测得的 ^{14}C 值的确总是与 C. W. Ferguson 从数年轮得到的年龄所计算出的 ^{14}C 值有偏离。对过去 2 000 年,偏离的数量级相对较小,但往后偏离就大了。由数树轮确定的最老的年轮样品的 ^{14}C 测定值几乎高出计算值 10%,即所测得的 ^{14}C 年龄年轻约 800 年^[17]。

为解释这一现象,随后许多学者开展了研究工作。H. E. Suess 等^[18] 发现,树轮 ^{14}C 的测量值与计算值之间存在一种特殊的函数关系,这种关系为后来许多实验室所证实,其进一步的发展成为今天古气候学界普遍采用的年龄校正的基础,在此不拟赘述。要强调指出的是,由于 H. E. Suess^[17] 采用了当时最灵敏的、超低本底的 ^{14}C 测量技术,使他得以发现一个当时其它实验室都没有发现的现象,即在过去 7 000 年中,大气 ^{14}C 活动至少有两类变化:一类是长时间尺度的缓慢变化,在 7 000 a B.P. 和 2 200 a B.P. 之间, ^{14}C 活动减低约 100%,这一类长期的变化现在已归因于地球磁场的变化所引起;另一类变化是叠加在此

长期变化上的短期 ^{14}C 变化,即相对于在一条平滑的树轮 ^{14}C 变化的总趋势曲线上,有一系列相对小的、偏离总趋势的 ^{14}C 变化,或偏离总趋势的一系列 ^{14}C “纽动”。H. E. Suess 等进一步对这些 ^{14}C 的短期变化进行了谱分析,指出这些 ^{14}C 纽动变化不是随机的,而是周期性地偏离总趋势的变化,其中一个最显著的周期是约 200 a^[18]。由于大气 ^{14}C 的生成是宇宙射线轰击大气 ^{14}N 的结果,H. E. Suess 研究后认为,大气 ^{14}C 活动的短期变化可能与太阳磁场对入射地球并产生 ^{14}C 的宇宙射线的屏蔽调节作用有关。如果是这样的话,这意味着树轮 ^{14}C 的短期变化反映了太阳磁场的变化^[19]。这样,一个长时间跨度的由树轮 ^{14}C 短期变化所表征的太阳活动变化的代用指标,就开始浮现出来。尽管这种代用记录还有若干不确定性,例如 ^{14}C 的短期变化是否还与其它因素,如地球表面各类碳库的大小和交换速率等因素有关,但它的提出确实给太阳变化与气候变化关系的研究带来了新的动力。

3.2 突然气候变化与太阳变化关系研究

在 20 世纪 60 ~ 70 年代,出现了很多气候变化与太阳变化相关性的研究,除了过去数百年直接的仪器观测气候资料外,种类繁多的气候变化代用记录被用来与短期 ^{14}C 变化作比较。由这些对比获得的相关结果使 H. E. Suess 相信,树轮 ^{14}C 的短期变化曲线可能代表了一种古气候曲线,树轮 ^{14}C 的短期变化可以经验地用作为一种气候变化的指标^[19]。

看起来,不论在 ^{14}C 的测量技术方面还是理论研究方面,H. E. Suess 在 20 世纪 50 ~ 60 年代中是走得太快了,他的上述发现不可避免地引起了不同反响。一些著名学者强烈质疑他的发现,声称“还没有 2 个或 2 个以上实验室证实,在中世纪温暖期以前有 de Vries 型的 ^{14}C 波动变化”,“Suess 报道的 ^{14}C 纽动变化还没有得到证实。”^[18]这些质疑意见使 H. E. Suess 付出了沉重代价:他提出的进一步开展研究工作的资助申请遭到美国科学基金会的拒绝^[18],痛失了深入开展研究工作的良机。然而正如科学史上屡见不鲜的那样,科学的论争推动着科学发展。后来 Gordon Pearson 在贝尔法斯特(Belfast)对爱尔兰橡树 ^{14}C 的测量,很好重现了 H. E. Suess 的发现;美国亚利桑那大学的 C. P. Sonett 等^[20]对树轮 ^{14}C 时间序列的理论阐述,证实了 ^{14}C 变化的周期性。至此,没有人对 H. E. Suess 的发现有怀疑, ^{14}C 的短期纽动变化被称为“Suess 纽动”。

但是 ^{14}C 短期变化记录能否用作地球气候的经验指标仍在争论中。G. H. Denton 和 W. Karlén^[3]首次把气候变化与 ^{14}C 短期变化的对比延伸到大部分全新世。他们把前述北美洲 7 000 aB. P. 的冰川进退记录与 H. E. Suess 的树轮 ^{14}C 记录对比,发现两者之间有密切的相关:较高的大气 ^{14}C 浓度时期对应于冰川的扩展期,而较低的 ^{14}C 浓度时期对应于冰川的退缩期。因此,他们认为这种相关性支持 H. E. Suess 的论点,即大气 ^{14}C 的短期变化可以用作古气候的经验指标,全新世气候变化可能是由于太阳变化引起的^[3]。这个结果也得到 T. M. L. Wigley 和 P. M. Kelly^[21]重复检验工作的支持。他们所用的气候代用资料是 Röthlisberger 的全球冰川进退年表,它包括了南半球和北半球 12 个区域的冰川数据。太阳变化的代用指标是经滤波处理的 ^{14}C 异常序列。经多种统计分析后他们指出,“百年尺度上全新世太阳变化的 ^{14}C 证据是无可争辩的。由于主要的 ^{14}C 异常发生在整个全新世,而且在全部可利用的数据中都存在,因此这种类型的太阳活动应当认为是太阳行为的一种固有特征。全球尺度类似小冰期气候的变冷波动似乎与这些 ^{14}C 异常有关。这暗示

了相应于引起 ^{14}C 异常的太阳变化,太阳辐射发生了相当大的变化。”^[21]他们感到惊讶,“确实,考虑到这些气候记录定年的不确定性,连同叠加上的气候系统必然有的自然波动变化,应当会使太阳的驱动影响变得模糊;然而多少让人出乎意外的是,这个对比研究也会得到有意义的结果。”^[21]除了冰川代用气候记录外,泥炭同位素时间序列也记录有同样现象。中国金川泥炭纤维素氧同位素记录与大气 ^{14}C 产率的对比表明,在过去6000年期间,泥炭纤维素 $\delta^{18}\text{O}$ 与大气 $\Delta^{14}\text{C}$ 之间可见几乎一对一的相关性,泥炭纤维素 $\delta^{18}\text{O}$ 指示的大约22个暖时期(包括著名的中世纪温暖期),以及22个冷时期(包括著名的小冰期),都分别与较低和较高的大气 ^{14}C 浓度时期,即分别与较强和较弱的太阳活动相对应^[22]。R. W. Fairbridge在对金川泥炭 $\delta^{18}\text{O}$ 记录的周期性进行验算后发现,泥炭 $\delta^{18}\text{O}$ 记录显示的86~1046 a的系列周期与太阳黑子平均周期(11.12 ± 6 a)的谐波逐一吻合。因此他认为,金川泥炭的结果为地球气候的外部太阳驱动提供了独立的天文证据^[23]。

但并非所有的气候变化与太阳变化间的相关性都是经得起检验的。M. Stuiver及其同事用统计相关分析法对报道的许多相关性结果进行了检验,正如他们所说的:“气候记录与大气 ^{14}C 产率记录之间的相关系数通常都是很小的,当对气候记录和大气 ^{14}C 产率记录进行自相关分析的时候,那些声称气候与 ^{14}C 产率之间有相关性的证据,往往就迅速地消失在统计学的泥淖之中。”^[9]因此,M. Stuiver对太阳变化驱动气候变化的假说一直持谨慎保留态度。众所周知,他在 ^{14}C 方面做了大量工作,正是他从实验测量和理论分析方面令人信服地最终阐明了大气 ^{14}C 记录作为太阳变化代用指标的原理^[24]。这些成果表明,有关气候变化与太阳变化相关性的研究,应该是经得起统计检验的,机制应该是明确的。

最近G. Bond等^[25]把全新世北大西洋浮冰记录与大气 ^{14}C 产率记录和格陵兰冰芯 ^{10}Be 记录分别进行了统计相关研究,得到相关系数 $r = 0.44 \sim 0.56$;而同为反映太阳活动变化的 ^{14}C 与 ^{10}Be 记录之间的相关系数为0.6。同时,用浮冰记录与 ^{14}C 和 ^{10}Be 记录之间进行交叉谱分析,证明它们间在百年至千年尺度上具有统计上的显著相关。据此他们提出,在过去的12000年期间,北大西洋浮冰的增加都是与太阳辐射输出的减少紧密相关的,“在全新世百年和千年尺度上,太阳变化是北大西洋浮冰记录所指示的气候变化的最可能原因。”^[25]G. Bond等进一步指出,全球气候模型的进展已经能模拟仅仅约0.1%的太阳辐射减少所引起的平流层臭氧和温度的变化。这些变化向下方传递其影响,导致北半球高纬度大气变冷,亚极地区大气急流稍微向南变化,Hadeley环流减弱。这些大气变化可能引发北大西洋浮冰相应增加,北大西洋海表面和格陵兰上空变冷,并引发低纬度区域降雨减少。与此同时,当北大西洋浮冰增加时,北大西洋深层水的生成往往同时减少。因而可能同时出现一个补充的放大机制,即太阳变化触发北大西洋热盐环流倒转减弱,从而把太阳变化的影响通过海洋环流传输到全球^[25]。

4 结语

经过半个多世纪的研究,尽管充满着争议,太阳变化对气候变化的影响似乎已经愈来愈明晰起来。正如G. Bond等^[25]指出:“我们的研究结果证明,地球气候系统是一个对太阳能量输出极微弱的扰动都高度敏感的系统,这不仅在数十年的时间尺度上是如此,对此先前已进行了研究;而且如同本研究所证明的那样,在数百年至千年的尺度上也一样。”既

然有愈来愈多的证据表明,气候变化可能与太阳变化紧密相关,与平流层相应的变化,与大气动力学及其与海洋环流的耦合有关,那么对全球气候变化的研究就需要有更开阔的视野,需要有多学科的集成努力,才能更准确地认识我们居住的地球表生环境演变的机理,科学地制定可持续发展战略。

参 考 文 献

- 1 Overpeck J, Webb R. Nonglacial rapid climate events: Past and future. *Proceedings of National Academy of Sciences of USA*, 2000, **97**: 1 335 ~ 1 338
- 2 Dansgaard W, Johnsen S J, Clausen H B *et al.* Evidence for general instability of past climate from a 250-kyr ice-core record. *Nature*, 1993, **364**: 218 ~ 220
- 3 Denton G H, Karlén W. Holocene climate variations: Their pattern and cause. *Quaternary Research*, 1973, **3**: 155 ~ 205
- 4 Bond G, Showers W, Cheseby M *et al.* A pervasive millennial-scale cycle in North Atlantic Holocene and glacial climates. *Science*, 1997, **278**: 1 257 ~ 1 266
- 5 Gasse F, van Campo E. Abrupt post-glacial climate events in West Asia and North Africa monsoon domains. *Earth and Planetary Science Letters*, 1994, **126**: 435 ~ 456
- 6 Talbot M R, Delibrias G. A new Late Pleistocene-Holocene water-level curve for lake Bosumtwi, Ghana. *Earth and Planetary Science Letters*, 1980, **47**: 336 ~ 344
- 7 Weiss H, Courty M A, Wetterstrom W *et al.* The genesis and collapse of third millennium North Mesopotamian civilization. *Science*, 1993, **261**: 995 ~ 1 004
- 8 Bryson R A. Modelling the Northwest India monsoon for the last 40 000 years. *Climate Dynamics*, 1989, **3**: 169 ~ 177
- 9 Stuiver M, Braziunas T F, Becker B *et al.* Climatic, solar, oceanic and geomagnetic influences on late-glacial and Holocene atmospheric $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ change. *Quaternary Research*, 1991, **35**: 1 ~ 24
- 10 Kerr R A. How ice age climate got the shakes. *New Scientist*, 1993, **260**: 890 ~ 892
- 11 Street-Perrott F A, Perrott R A. Abrupt climate fluctuations in the tropics: The influence of Atlantic Ocean circulation. *Nature*, 1990, **343**: 607 ~ 612
- 12 Duplessy J C, Labeyrie L D, Arnold M *et al.* Changes in surface salinity of the North Atlantic Ocean during the last deglaciation. *Nature*, 1992, **358**: 485 ~ 488
- 13 Manabe S, Stouffer R J. Two stable equilibria of a coupled ocean-atmosphere model. *Journal of Climate*, 1988, **1**: 841 ~ 866
- 14 Woodhouse C A, Overpeck J T. 2000 years of drought variability in the central United States. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1998, **79**: 2 693 ~ 2 714
- 15 Laird K R, Fritz S C, Maasch K A *et al.* Greater drought intensity and frequency before A D 1200 in the Northern Great Plains, USA. *Nature*, 1996, **384**: 552 ~ 554
- 16 Hong Y T, Wang Z G, Jiang H B *et al.* A 6 000-year record of changes in drought and precipitation in northeastern China based on a $\delta^{13}\text{C}$ time series from peat cellulose. *Earth and Planetary Science Letters*, 2001, **185**: 111 ~ 119
- 17 Suess H E. Bristlecone pine calibration of the radiocarbon time scale 5300 B C to the present. In: Olsson I U ed. *Radiocarbon Variations and Absolute Chronology*, 12th Nobel Symposium. New York: Wiley, 1970. 303 ~ 309
- 18 Suess H E, Linick T W. The ^{14}C record in bristlecone pine wood of the past 8 000 years based on the dendrochronology of the late C. W. Ferguson. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 1990, **A330**: 547 ~ 560
- 19 Suess H E. Climatic changes and the atmospheric radiocarbon level. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 1971, **10**: 199 ~ 202
- 20 Sonett C P, Finney S A. The spectrum of radiocarbon. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 1990, **A330**: 413 ~ 426
- 21 Wigley T M L, Kelly P M. Holocene climatic change, ^{14}C wiggles and variations in solar irradiance. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 1990, **A330**: 547 ~ 560

- 22 Hong Y T, Jiang H B, Liu T S *et al.* Response of climate to solar forcing recorded in a 6 000-year $\delta^{18}\text{O}$ time-series of Chinese peat cellulose. *The Holocene*, 2000, **10**: 1 ~ 7
- 23 Fairbridge R W. Six millennia in Chinese peats, relating to planetary-solar-luniterrestrial periodicities: A comment on Hong, Jiang, Liu, Zhou, Beer, Li, Leng, Hong and Qin. *The Holocene*, 2001, **11** : 121 ~ 125
- 24 洪业汤. 太阳变化驱动气候变化研究进展. *地球科学进展*, 2000, **15** (4): 400 ~ 405
- 25 Bond G, Kromer B, Beer J *et al.* Persistent solar influence on North Atlantic climate during the Holocene. *Science*, 2001, **294**: 2 130 ~ 2 136

NONGLACIAL ABRUPT CLIMATE CHANGE AND SOLAR VARIATION

Hong Yetang

(*State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002*)

Abstract

Progress in the study on the abrupt climate changes occurring in the nonglacial period, namely the Holocene, has been introduced. Occurrence of the abrupt climate changes during the Holocene implies that there is a new mechanism of climate forcing which is different from the glacial scale climatic variations. However, more pieces of evidence have shown that solar activity may play an important role on the climate variation during the Holocene. This review briefly introduced the research history of ^{14}C tree-ring as a proxy indicator of solar activity. In recently Gerard Bond *et al* have made comparison between the drift ice indices of the North Atlantic and the proxy indicator time series of solar activity. They suggest that the Arctic-Nordic Seas may have been a key region where solar-induced atmospheric changes were amplified and transmitted globally through their impact on sea ice and North Atlantic thermohaline overturning. Moreover, reduced northward heat transport could have further altered North Atlantic latitudinal temperature and hydrologic gradients, potentially enhancing the climate response in low-latitude climates. As Gerard Bond *et al* have pointed out that more lines of evidence have shown that Earth's climate system is highly sensitive to extremely weak perturbations in the Sun's energy output. The influence of solar variation on the climate change during the Holocene seems to be convincing.

Key words solar variation, abrupt climate change, monsoon, drought, Holocene