

王绍武, 黄建斌, 闻新宇. 古气候的启示[J]. 气象, 2012, 38(3): 257-265.

古气候的启示^{*}

王绍武^{1,2} 黄建斌² 闻新宇¹

1 北京大学物理学院大气与海洋科学系, 气候与海-气实验室, 北京 100871

2 清华大学地球系统科学研究中心, 北京 100084

提 要: 回顾了近 20~30 年古气候的研究进展, 包括下列问题: 雪球和热力极大期、冰期-间冰期旋回、古季风、D/O 循环和 H 事件、全新世季风、全新世气候突变、气候变化与古文明、近 2000 年的气候。研究表明, 第四纪前的气候变化中 CO₂ 起着重要的作用, 但是在冰期-间冰期旋回中 CO₂ 变化落后于温度变化。这说明虽然影响机制不同, 但是温室气体和气候间有着密切的相互作用这一点则是可以肯定的。地球目前处于间冰期, 面临着冰期来临的威胁。人类活动造成的气候变暖有可能推迟下一次冰期的到来。21 世纪全球变暖仍将继续, 人们可能做的、也是必须要做的, 是尽可能地降低变暖的速率, 以及可能达到的变暖峰值。

关键词: 古气候, 冰期-间冰期旋回, 全球变暖, 温室效应

Implications of Paleoclimate

WANG Shaowu^{1,2} HUANG Jianbin² WEN Xinyu¹

1 Laboratory for Climate and Ocean-Atmosphere Studies, Department of Atmospheric and Oceanic Sciences, School of Physics, Peking University, Beijing 100871

2 The Center for Earth System Science and the Institute for Global Change Studies, Tsinghua University, Beijing 100084

Abstract: Studies on the paleoclimate during the last 20–30 years are reviewed. The following hot topics are discussed: snowball Earth and Paleocene-Eocene thermal maximum (PETM), glacial-interglacial cycles, paleo-monsoon, D/O cycles and H events, Holocene monsoon, abrupt climate change in the Holocene, climate change and associated ancient civilization, and the last 2 ka climate. It is indicated that, the snowball Earth and PETM were caused by the depletion and explosive increasing of CO₂ in the atmosphere respectively. However, the change of temperature was preceding that of greenhouse gases in glacial-interglacial cycle, as found in the ice cores in the Antarctica. It is also shown that the changes of temperatures and greenhouse gases were highly correlated before the Quaternary, but changed after that, which might be linked to a differed mechanism. Enhancement of greenhouse effect in the present will, probably to some extent, delay the onset of the next glacial period. In any case, anthropogenic effect on the climate will definitely continue in the 21st century even we turn to reduce the emission of greenhouse gases in some ways. The global warming will remain as a critical issue, which we have to face in near future.

Key words: paleoclimate, glacial-interglacial cycle, global warming, greenhouse effect

引 言

2011 年世界气象日的主题为“人与气候”^[1],

2012 年的主题中又包括气候。为什么人们这样关心气候? 很简单, 气候深入到我们的日常生活, 关系到国家的建设和发展, 在国际谈判中也是重要的议题之一。全球气候变暖已经成为家喻户晓的热门问

* 973 计划(2010CB950104)和中国科学院战略先导项目(9-XDA05090104)共同资助

2012 年 1 月 29 日收稿; 2012 年 2 月 17 日收修定稿

第一作者: 王绍武, 主要从事气候教学和研究. Email: swwang@pku.edu.cn

题。同时,水的问题也十分严重。全世界正面临缺水的威胁,这不仅仅是由于人类活动破坏生态、环境的结果,与全球变暖也有着密切的关联。虽然下面谈到温度较多,但是降水量变化也是很剧烈的,季风就是最好的例子。

政府间气候变化专门委员会(IPCC)的核心任务就是处理与全球变暖有关的各种问题。但是,委员会的名称是气候变化而不是全球变暖,因为,全球变暖终究只是现代气候变化的一个重要特征。研究古气候和地球气候的历史,可以为我们提供重要的借鉴,对预估未来的气候变化有重要的意义。

本文的主要目的就是回顾近 20~30 年古气候研究的进展,看看这些新的认识,对预估 21 世纪的气候变化有怎样的启示。

1 雪球和热力极大期

地球有 4.6 Ga(Ga 为 10 亿年)的历史,在这个过程中曾发生过激烈的气候变化。在 2.4 Ga 前就发生过大冰期(或称为冰河时代)。在近 1 Ga 内就可能有 7 个冰河时代^[2],最后一个就是第四纪,开始于 2.6 Ma(Ma 为百万年)前。第四纪的气候特点是冰期-间冰期旋回。早期的旋回长约为 40 ka(ka 为千年),晚期约为 100 ka。我们生活的间冰期称为全新世。第四纪中冰期冰盛期的气温比现代要低 10℃,有 24% 的陆地被冰雪覆盖,而现代只有 11%。但是,地球的历史上还有更冷的时期。如 2.4 Ga 前地球的平均温度可能达到 -50℃,而现代为 14℃。那时全球被冰雪包围,称为雪球(snowball Earth)^[3]。据信雪球的形成与大气中 CO₂ 的大量减少有关,当然冰雪的负反馈作用也很重要。

与此相对立的是古新世-始新世热力极大期(Paleocene-Eocene Thermal Maximum, PETM)。PETM 发生在 55 Ma^[4],那时温度可能比现代高 12℃,大气中的 CO₂ 浓度可能达到 3500 ppmv(气体浓度单位,表示体积的百万分之一),约为现代的 10 倍。不过,当时水合物的分解也促进了大气中温室气体的增加。

这两个例子告诉我们,古气候与大气中的温室气体浓度有密切的关系。同时,这也说明气温与温室气体浓度有强烈的正反馈相互作用,虽然相互作用的机制可能不同。

2 冰期-间冰期旋回

1909 年 Penck 与 Brückner 发表了里程碑式的论文,根据阿尔卑斯山北坡的冰川遗迹,确认曾出现 4 个冰期,并根据多瑙河 4 条支流的名字分别命名为群智(Günz)、明德(Mindel)、里斯(Riss)及武木(Würm)^[5]。这就是著名的四大冰期,发生在 30~50 kaBP(kaBP 表示距 AD1950 的千年)到 640~670 kaBP 之间。此后相当长一段时间,四大冰期成了经典的概念。直到 20 世纪中叶,才有人对四大冰期的概念提出了挑战。Emiliani 利用深海沉积有孔虫的百分比来研究第四纪的温度变化^[6]。根据深海沉积,第四纪有 51 个冰期,这个分析得到了黄土记录的支持。

不过,深海沉积记录的时间分辨率较低,一般只能达到千年尺度,所以大陆冰盖的研究是对冰期-间冰期研究的又一次突破。南极冰芯提供了过去 7 个冰期-间冰期旋回的详细的记录。不仅冰芯 $\delta^{18}\text{O}$ 可以反映温度变化,冰芯气泡还包含 CO₂ 及(CH₄)的信息,对研究冰期-间冰期旋回的形成,及气候与温室气体的关系有重要意义。图 1 给出南极东方站近 420 ka 的冰芯记录,可以明显看出 100 ka 的周期^[7]。

在冰期-间冰期旋回中,温度变化是不对称的。一般冰期占旋回长度的 80%~90%,而间冰期只占 10%~20%。现代间冰期,即全新世开始于 11.5 kaBP,如果间冰期约持续 10 ka 的话,我们很可能要面临间冰期结束的威胁。所以,20 世纪 70 年代初,人们感到形势十分严峻,甚至有人预测 4 ka 后将开始一个新的冰期,11.4 ka 后将出现下一个冰期冰盛期。由于冰期-间冰期旋回的温度振幅大约在 10℃左右,这自然是对人类生存的严重挑战。但是,20 世纪末到 21 世纪初,情况有了变化。一方面人们研究了几个间冰期,而不只是一个末次间冰期,发现间冰期有时可持续 20 ka,乃至 30 ka 以上。另一方面从地球轨道要素造成的太阳辐射变化来看,未来可能更类似于 400 kaBP 那时的情形,那时出现了一次长达 30 ka 以上的间冰期。此外,人类活动造成的气候变暖,也可能在一定程度上推迟下一次冰期的到来,所以,有人认为下一次冰期冰盛期不可能在 50 ka 之内到来(图 2)^[8]。

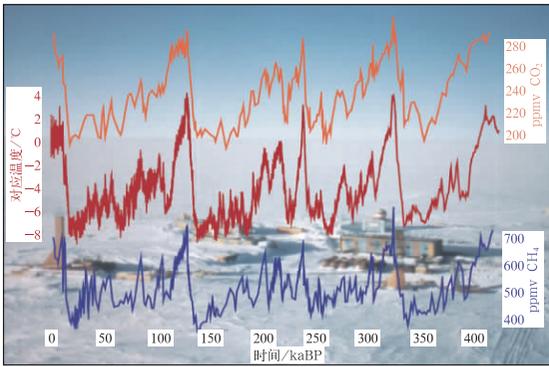


图1 南极东方站冰芯记录

(图中三条曲线上为CO₂, 中为温度, 下为甲烷, 背景为东方站实景^[7])

Fig. 1 The sequence of changes in atmospheric (upper), isotopically inferred temperature (middle), and CH₄ (lower) as recorded in the Vostok ice core. The background image shows the Vostok research station in Antarctic

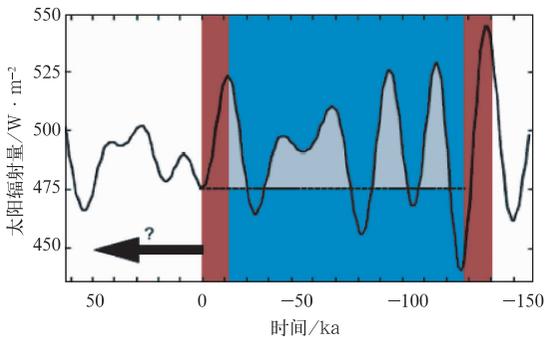


图2 15万年前(-150 kaBP)至6.5万年后(65 kaBP)60°N 6月中的太阳辐射量(蓝色为末次冰期, 红色为间冰期, -120 kaBP为伊米间冰期, 1 kaBP至今为全新世间冰期^[8])

Fig. 2 Mid-June insolation at 60°N for the last 150 and next 65 ka, left red bar marks elapsed duration of the Holocene, blue shading marks the duration of the Last Glacial and right red bar marks the timing of the Last Interglacial

3 古季风

在古气候研究中, 历来强调冰期-间冰期旋回, 确实这就是第四纪气候的主要特征。所以很长一段时间以来, 人们没有注意到季风的变化也有自己的特色, 而只是在冰期-间冰期框架内研究季风, 指出冰期冬季风强、夏季风弱, 间冰期夏季风强、冬季风弱。不过并没有详细的夏季风证据, 因为根据黄土记录研究古季风时, 实际上主要反映了冬季风的情况, 而假设冬季风与夏季风变化相反。近来汪品先^[9]指出,

低纬度的季风虽然也受控于地球轨道要素, 却相对独立于两个半球高纬的冰期-间冰期旋回。

研究表明, 古季风主要变化周期与冰期-间冰期旋回有很大不同^[10]。如上所述, 至少在近700~800 ka, 冰期-间冰期旋回以100 ka周期为主。但是古季风则不然, 夏季风以20 ka周期为主, 冬季风则以40 ka周期为主(图3)。夏季风强度是根据石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 来确定的, 把降水量多的时期解释为夏季风强, 降水量少时夏季风弱。冬季风的强度则是用黄土的粒度来反演。黄土粒度大表示冬季风强、粒度小表示冬季风弱。研究表明, 冬、夏季风的关系是不固定的。例如, 10~50 kaBP 冬季风的变化为强-弱-强。但是夏季风则经历了强-弱-强-弱的过程。10 kaBP 正好是冬季风最强的时期, 夏季风的峰值只稍超前一些, 所以冬、夏季风基本上同位相。而到了50 kaBP 的时候, 夏季风是谷值、冬季风是峰值, 已经变为冬、夏季风变化位相相反了。类似的情况并不少见, 又如150~190 kaBP, 150 kaBP 冬夏季风强、弱相反, 到190 kaBP 又变为一致了。这就是说不仅冬、夏季风主要不是按照冰期-间冰期旋回100 ka的韵律变化, 而且冬、夏季风变化周期也是不同的。这是古气候研究的一个巨大进步。这明确地告诉我们, 研究季风区的古气候, 不能只拘泥于冰期-间冰期旋回。

4 D/O 循环和 H 事件

冰期中并不总是稳定的寒冷气候, 也存在相当强烈的气候振荡, 这是近20多年来古气候研究的又一个重要发现。取得这个成果, 格陵兰冰盖冰芯钻探作出了决定性的贡献。格陵兰冰芯除底部外, 大多可以分辨出年层, 按50 a 取样, 已经可以被视为高分辨率古气候资料。相比之下, 深海沉积记录的时间分辨率在2500 a, 黄土在500~1000 a。所以, 格陵兰冰芯记录提供了分析千年尺度气候变率的可能性。格陵兰冰芯 $\delta^{18}\text{O}$ 表明, 末次冰期中气候是不稳定的, 充满了千年尺度的气候振荡^[11]。后来人们根据发现者的名字, 把这种振荡称为 Dansgaard/Oeschger 循环^[12], 简称 D/O 循环(或 D/O 振荡)。振荡中的暖期被称为间冰阶, 冷期为冰阶。谱分析表明振荡的周期约为1.5 ka。每个循环由增暖开始, 大约用100 a 左右, 然后是缓慢的降温所以也是一种不对称的变化。其温度振幅约为冰期-间冰期旋回的40%~60%。由于冰期气候总的特征是寒

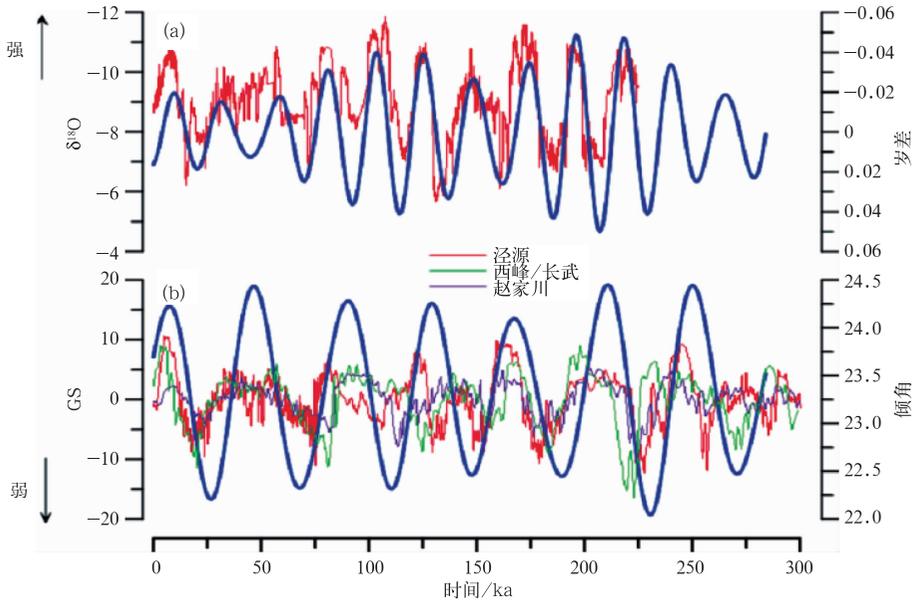


图 3 过去 28.4 万年的 (284 ka) 夏季风 (a) 与冬季风 (b) 及地球轨道要素 (红色、绿色和紫色为古气候代用资料, 蓝色为地球轨道要素^[10])

Fig. 3 Proxy records of East Asian monsoon evolution. (a) The absolute-dated stalagmite $\delta^{18}\text{O}$ record from Sanbao and Hulu caves in central China during the past 284 ka (red), the parameter of precession is plotted for comparison (blue), and (b) Three grain size records of Chinese loess from Jingyuan (red)/Xifeng-Changwu (green)/Zhaojiachuan (purple) sections covering the past 300 ka, the parameter of obliquity is plotted for comparison (blue)

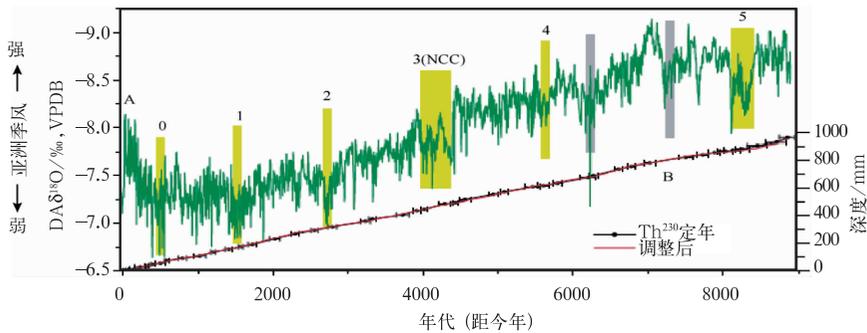


图 4 A 代表中国南部董哥洞石笋 $\delta^{18}\text{O}$ (绿色), 黄色条纹为北大西洋冷事件, NCC 表示中国新石器文化解体; B 代表年龄深度曲线^[15]

Fig. 4 The green curve (A) indicates $\delta^{18}\text{O}$ time series of the Dongge Cave stalagmite DA, vertical yellow bars denote the timing of Bond events 0 to 5 in the North Atlantic, NCC means collapse of Neolithic Culture of China, The red curve (B) denotes DA age-depth relations (mm, relative to the top)

冷, 因而在寒冷的冰期中出现相对较暖的事件是比较引人注意的, 所以把末次冰期中的间冰阶编号, 由近及远共有 25 个间冰阶。

另一个反映冰期中不稳定气候的现象是海因里希事件, 简称 H 事件。1988 年 Heinrich^[13] 指出在北大西洋深海沉积中保存着若干陆源浮冰碎屑 (ice-rafted detritus, IRD) 层, 这表明在末次冰期内曾发生过多次向大洋倾斜 IRD 事件。后来 Bond 等^[14]

发现 H 事件多发生在几个 D/O 振荡之后, 每个振荡冰阶的气温要比上个振荡低, 接连 3~4 个振荡, 最后 1 个冰阶末尾发生 H 事件, 这时格陵兰温度最低。H 事件之后温度迅速回升, 又回到一个温度较高的间冰阶。末次冰期共出现 6 次 H 事件, 从 H₁ 到 H₆, 约在 16.5、23.5、32、39.5、47 和 67 kaBP, 有的作者认为更早时期还有一个 H 事件 H₇, 出现在 87 kaBP。有人认为新仙女木事件 (Younger Dryas,

YD)的性质与H事件相同,因此可以称为H₀事件,但是也有人指出YD时期虽然气候寒冷,但是并没有像其他事件一样的IRD,因此对于把YD事件作为H₀持保留态度。

至于D/O振荡与H事件形成原因,不少研究者强调温盐环流(Thermohaline Current, THC)的作用^[11]。THC指深层的洋流。大西洋传送带的北大西洋部分也称为大西洋径向翻转流(AMOC),上层洋流自南向北,深层自北向南。AMOC是影响气候的一个重要机制。AMOC有3种模态:现代模、冰期模及海因里希模。其变化机制的关键是北大西洋深水形成(NADW)的改变。现代模的情况下,北大西洋有两个深水形成区:一个在北海,一个在北大西洋。温暖而且盐度高的墨西哥湾流,在北上过程中不断降温,而且由于蒸发盐度进一步增高。冷却后的高盐度水在北大西洋及北海下沉,整个过程支持北大西洋传送带。但是,当气候变冷、大量冰山下泻、冰山融化后形成的冷而盐度低的水浮在大洋表面,影响了NADW的形成,这样就出现另外两种模态——冰期模及海因里希模。当北海深水形成停止时出现冰期模,这时北大西洋深水形成仍然继续。如果北海及北大西洋两个地区的深水形成均关闭时,称为海因里希模,这时发生H事件,气候最为寒冷。由于北大西洋传送带的变化受NADW变化影响最大,所以有人把NADW称为“阿喀琉斯的脚踵”,即最薄弱而易受侵犯的环节。

5 全新世季风

前面已经提到第四纪冬、夏季风的关系是不固定的,即有两者同时强或同时弱的情况,也有此强彼弱或此弱彼强的时候。那末,全新世的情况又是如何呢?首先中国南部董哥洞与葫芦洞石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 提供了高分辨率的降水记录,一般认为这代表了夏季风的强度(图4)^[15]。从这个序列来看早全新世夏季风强,以后持续减弱,直到大约400~500a前的小冰期。所以,全新世东亚夏季风总的趋势是减弱的。孢粉、泥炭、黄土 $\delta^{13}\text{C}$ 和有机物、冰芯 $\delta^{18}\text{O}$ 等代用资料也证实早全新世气候湿润,以后逐渐变干。

实际上全新世东亚夏季风由强转弱的趋势并不仅限于东亚地区。首先在阿拉伯海到印度半岛的南亚地区也有强烈的反映。阿曼及也门的石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 、陆源物质(%)、有孔虫(%)、 $\delta^{15}\text{N}$ (‰)、有机碳总量(TOC)一致表明南亚季风在10~8kaBP期间最强,以后逐渐减弱。印度恒河—布拉马普特拉河径

流量、塔尔沙漠中湖泊水位也都反映了这个变化趋势。非洲季风变化更明显,早全新世气候湿润,但是大约在5.5kaBP发生突变之后就再也没有能够恢复。南美洲的委内瑞拉早全新世气候湿润、表示热带辐合带(intertropical convergence zone, ITCZ)偏北,晚全新世气候干燥、ITCZ南移,与东亚、非洲和南亚的变化趋势一致。南美洲南半球的变化则相反,早全新世气候干燥、晚全新世气候湿润。这种相反的变化趋势不仅证明这些地区的气候变化受控于岁差影响,也进一步证明全新世夏季风的变化不是区域性,而是全球性的。

全新世冬季风又是如何变化的呢?从黄土粒度和磁化率来看,早全新世冬季风强,以后逐渐减弱。但是,黄土记录的时间分辨率较低。近来新开发了不少代用资料来反映冬季风强度。例如用烯烴反演海温,根据中国南海东西向海温梯度重建冬季风序列,发现冬季风在11kaBP达到峰值,以后冬季风强度减弱,直到4kaBP,此后冬季风强度又略有上升^[16]。在稍早以前,已经有一些研究者利用冲绳南北海温梯度、中国东部沿海沉积颗粒大小来反演冬季风强度,不过有的序列不够长或分辨率不够高、又或者资料仅限于某个时段,因此没有得到像这样明确的结论。Steinke等^[17]近来综合了多种资料进一步证实全新世东亚冬季风与东亚夏季风的变化趋势是相同的,两者均持续减弱。

6 全新世气候突变

对冰期中千年尺度气候振荡,即D/O振荡的研究打破了认为冰期是稳定的寒冷气候的概念。同样,全新世气候突变的研究也打破了全新世气候温和、平稳的概念。这个问题具有非常现实的意义。2003年美国科学院出版了题为“气候突变:不可避免的惊奇”^[18]一书,该书讨论了在最近的将来发生气候突变的可能性。冰期中总的气候格局是寒冷,所以气候突变以相对温暖的间冰阶为标志。全新世的基本气候特征是温暖,因此气候突变以冷事件为代表。讨论未来出现气候突变的可能性,也就是研究突然发生冷事件的可能性。

作为全新世气候突变的代表性标志是北大西洋冷事件。Bond等^[14]根据IRD确认全新世发生了8次冷事件,时间在11.1、10.3、9.5、8.2、5.9、4.3、2.8和1.4kaBP。后来认为小冰期(0.4kaBP)的性质也相近,作为第0次冷事件,因此全新世共有9次冷事件。图4中的黄色条纹反映了夏季风对冷事件

的响应,东亚季风气候冷干。

早全新世的冷事件被公认为与冰期遗留下来的冰盖融化有关。融冰形成冰湖,一旦冰坝崩溃,大量的淡水涌向北大西洋,形成淡水脉冲。由于淡水较轻漂浮在洋面,阻止了 NADW 的形成,使得 AMOC 减弱,形成冷事件。8.2 ka 事件就是很典型的一次。至于中、晚全新世的冷事件,并没有发现伴随有淡水脉冲。所以,有的作者认为与太阳活动减弱事件有关。

全新世冷事件的气候影响已经有了许多研究。分析表明各次冷事件的气候特征有许多共同之处。一个重要的特征就是高纬降温低纬变干。因此,虽然全新世气候突变的特点是冷干,但是在高纬冷最明显,干旱则主要出现在低纬,特别受季风影响的地区最明显。

7 气候变化与古文明

愈来愈多的证据表明,气候变化推动了人类的进化。DNA 研究证实,大约生存于 500 kaBP 的周口店猿人并不是我们的直系祖先。现代全世界的人,不论国家或民族,都有一个共同的祖先,就是大约 150 kaBP 赤道东非的“亚当”和“夏娃”。我们的祖先在上一个间冰期,即大约 120~130 kaBP 的伊米(Eemian)间冰期后开始向中东迁徙,然后一路通过中亚沿亚洲南部的印度洋沿岸向东迁徙,大约在 40 kaBP 后进入中国。25 kaBP 冰盛期海平面下降时,越过白令海峡进入北美。那么更早期的人类他们去向何方了呢?可惜他们未能抵抗住大自然的侵袭,一一灭亡了。最近灭亡的一支就是大约 100~60 kaBP 生活在欧洲的尼安德特人(*Homo neanderthalensis*)^[19]。

英国科学家指出全球气候变化曾经在 5 个关键时期促进了人类的发展。人与黑猩猩在大约 8 MaBP(MaBP 指距今百万年前)开始分离。经历了原初人、地猿始祖、南方古猿的演变,大约在 2 MaBP 开始出现能人。很可能是一个漫长的干旱期使得森林消失,从而才导致直立人的出现。就在干旱草原的发展时期,大约 1.9 MaBP 人类第一次走出非洲。这是第一次气候对人类发展产生影响的关键时期。大约 400 kaBP,又出现了一个较长的气候相对温暖的时期,气候的变化促使人类第二次走出非洲。这是气候影响人类的第二个关键时期。但是可惜,这两次走出非洲都失败了。说失败了,并不是指没有走出非洲,而是走出非洲后,并没有能世代相

传、子孙繁衍,最后还是灭绝了。接下来的三次气候变化对人类的影响分别发生于约 60、25~15 及 14~10 kaBP。60 kaBP 正是 H₆ 事件之后相对温暖的时期,就在这个时期人类第三次,也是唯一成功的一次走出非洲,并散布到全世界。接下来 25~15 kaBP 是末次冰期冰盛期的后半段,海平面下降 125 m,白令海峡成为陆桥,人类得以追逐驯鹿进入北美。最后 14~10 kaBP 是进入全新世的时期,气候由寒冷的冰期进入温暖的全新世间冰期,人类终于从旧石器时代进入新石器时代,逐步发展了畜牧业及农业,一步一步进入文明社会。

有的研究者认为,全新世气候突变事件对古文明的发展也有影响。例如,8.2 ka 事件就可能促进了畜牧业及农业的发展。由于早全新世气候温暖湿润,人类得以生存、发展。快速增加的人口已经对食物的供应提出了挑战,一旦发生冷干气候的突变,对早全新世的人类造成很大威胁。因此,人们除了向低纬气候更适宜的地区迁徙之外,也开始学习驯养牲畜、播种粮食作物,从而逐渐形成畜牧业及农业。所以,气候是一个双刃剑,适宜的气候给人类提供良好的生存条件,恶劣的气候却可以促进社会的发展。有人认为冷干气候促使游牧民族南侵,在气候突变打击下失去家园的人,成为劳动力的源泉,促进了手工业的发展。

中全新世到晚全新世的一个标志性转变发生在 4 kaBP^[20]。这次事件对世界四大古文明的衰落有着巨大的影响。古埃及出现第一中间期,两河流域阿卡德王国崩溃,古印度文明衰落,中国也开始建立夏朝,发生了考古文化的大范围交替。

8 近二千年的气候

全新世最后的二千年是距我们最近的一段历史时期,这期间也发生了激烈的气候变化。研究这段时期的气候变化有特别重要的意义。因为,这时大的地质环境,如海陆分布、海平面高度、大陆冰量、乃至大气中温室气体浓度,都相当接近于现代的情况。因此,研究这段时期气候变化的原因,必然有助于我们认识气候变化的成因,并有助于未来气候变化的预估研究。

8.1 罗马暖期(Roman Warm Period, RWP)

从公元前(Before Christ, BC)509 年建立罗马共和国到 AD 476 西罗马帝国灭亡,将近 1 ka 是一个气候相对温暖的时期。当然其间仍有波动,但寒

冷时期远不如小冰期中的冷期寒冷,而温暖时期比中世纪暖期中的温暖时期温度要低。所以,这是一

段气候相对温和的时期。在中国大体相当于秦汉暖期,当然其间气候亦有波动^[21]。

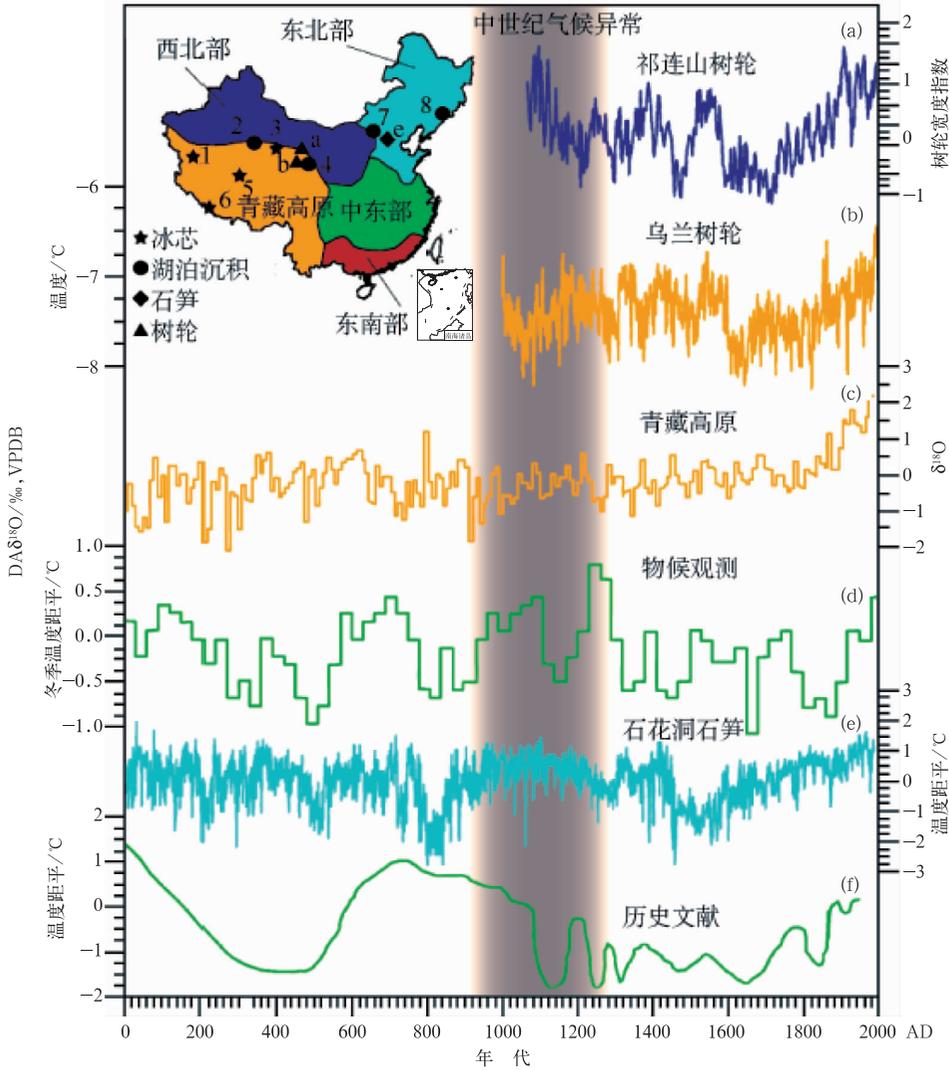


图 5 近 2 ka 中国的温度变化

(a) 中国西北部祁连山树轮宽度指数, (b) 利用西藏高原乌兰树轮重建的 9 月至次年 4 月温度, (c) 青藏高原冰芯 $\delta^{18}O$, (d) 利用史料建立的中国东部冬半年(10 月至次年 4 月)温度距平, (e) 利用北京石花洞石笋重建的 7—8 月温度, (f) 竺可桢根据史料建立的年平均温度曲线
 (左上方为分区及代用资料来源, 数字 1~8 为温度序列所在地理位置; 1 为古里雅冰芯, 2 为苏干湖沉积, 3 为敦德冰芯, 4 为青海湖沉积, 5 为普罗冈日冰芯, 6 为达索普冰芯, 7 为岱海湖泊沉积, 8 为金川泥炭^[24])

Fig. 5 Location of proxy temperature series and the five defined climate regions are shown in upper left of the panel, (a) Ring-width index developed for Qilian juniper in middle Qilian Mountains, (b) Reconstructed mean temperature from September to April for the Wulan area, (c) Tibetan Plateau $\delta^{18}O$ composite, (d) Winter half-year (October—April) temperature anomaly in East China, (e) Shihua temperatures from July to August in Beijing, and (f) Annual mean temperature variations according to Chu (Numbers in the map of China on upper left of the panel show the location of the proxy data, 1 Guliya ice core, 2 Sungan lake sediments, 3 Dunde ice core, 4 Qinghai lake sediments, 5 Puruoganri icecore, 6 Dasupu ice core, 7 Daihai lake sediments, 8 Jinchuan peat sediments)

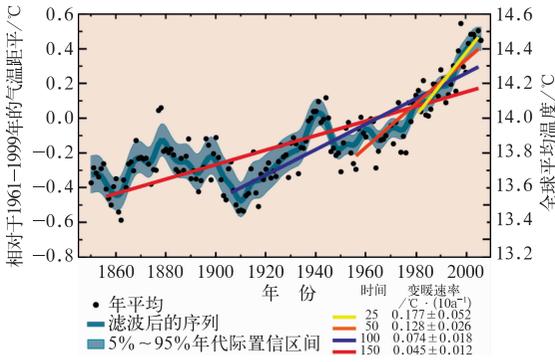


图 6 AD 1850—2005 全球平均温度变化趋势分析 (温度距平相对于 AD 1961—1990 平均, 不同颜色直线显示不同时间的变暖趋势, 变暖速率见图下数字^[26])

Fig. 6 Annual global mean temperatures (black dots) for the period of AD 1850—2005 with linear fits to the data by using different colors, the warming rates are shown in the lower of the panel; the anomalies are relative to the 1961—1990 average

8.2 黑暗时代冷期 (Dark Ages Cold Period, DACP)

欧洲从 AD 476 西罗马帝国灭亡到 10 世纪, “新国叠建、战争相寻、人民生活困难、文化低落”, 被历史学家称为黑暗时代。Lamb^[22] 最早指出黑暗时代气候寒冷。近 2 ka 北半球平均温度序列的建立也证明 AD 300—900 确实温度较低, 这大体上与历史学家所谓的黑暗时代相吻合^[21]。但气温可能仅与近千年平均持平或略低, 不像小冰期, 比千年平均低 0.5°C 。不过不同研究者根据不同地点的不同代用资料建立的温度序列差异较大, 很难给出一个各地共同的冷期, 也许实际上并不存在一个共同的冷期。但是大体上 AD 400—600 和 AD 800—900 两段时间的冷期比较突出。中国南北朝 (AD 420—589) 及中到晚唐 (AD 750—900) 也各有一个冷期^[23], 基本上与北半球的情况类似 (图 5)。

8.3 中世纪暖期 (Medieval Warm Period, MWP)

Lamb^[22] 曾经称之为小气候最适宜期 (Little Climatic Optimum), 以便与气候最适宜期, 即全新世大暖期相区别。最早是根据欧洲的历史记载及树木年轮等代用资料, 指出 AD 950—1200 为一个相对温暖的时期。以后大量的冰川、雪线和年轮等资料证明, 在世界上不少地区, 或早或晚均存在一个气候相对温和的时期, 气温约比近千年平均高 $0.2 \sim$

0.3°C , 最高不超过 0.5°C 。现在通常认定 AD 900—1300 为 MWP。但是, 有的研究者认为 MWP 的气候特征不一定是温暖, 而是干旱, 所以建议称为“中世纪气候异常” (Medieval Climatic Anomaly)^[25]。

8.4 小冰期 (Little Ice Age, LIA)

LIA 专指全新世最后一个冷期。Lamb^[22] 曾把 LIA 定在 AD 1550—1850, 这个定义流行了相当长的时间, 至今仍有研究者使用。现在更多的是采用稍为宽松的时间尺度, 即 AD 1300—1900。不过正如 MWP 不是一个持续 400 a 的暖期一样, LIA 也不是一个持续 600 a 的冷期, 而是其中包括几个冷期。一般认为 14、16 及 18 世纪为 3 个冷期, 气温约比近千年平均低 0.5°C , 比 20 世纪最后的暖期低 1°C 左右。

8.5 现代暖期 (Modern Warming, MW)

这是全球变暖的时期。没有人给出过现代暖期的确切定义。因为大约从 AD 1850 开始有仪器观测记录, 所以有时人们也说近 150 年或近一个半世纪的变暖, 因为从 AD 1850 开始气温即缓慢上升。不过大约在 AD 1910 气温又降到了与 AD 1860 相当的水平, 也就是说这 150 a 的前 50 a 左右并没有明显的增温趋势。所以, 也有的研究者把现代暖期定为 20 世纪开始。不过, 无论如何, 20 世纪的最后 20 a, 即大约从 20 世纪 80 年代开始气温上升加剧。所以 20 世纪后期的变暖无疑是最显著的, 而且增暖速率越来越高 (图 6)^[26]。到 AD 2010, 温度大约已经上升了 0.8°C 。

9 古气候的启示

(1) 地球有 4.6 Ga 的历史, 在这个历史长河中, 气候曾发生过激烈的变化。有过全球被冰雪覆盖的冷期 (雪球), 也有全球没有永久性冰雪覆盖的暖期 (PETM)。气候变化的幅度不仅远远超过近百年的变化, 甚至也超过了第四纪冰期-间冰期旋回的变化。不过, 发生雪球和热力极大, 可能是 CO_2 浓度变化是因, 气候变化是果。这同冰期-间冰期旋回不同: 对于冰期-间冰期旋回, 温度变化在前, 温室气体变化在后。不过无论如何, 气候与温室气体两者之间有强大的正反馈作用, 这对于我们研究现代的气候变化是可以借鉴的。

(2) 2.6 Ma 以来的第四纪, 气候变化的一个主

要特征就是冰期-间冰期旋回。近 700~800 ka 以来旋回的周期为 100 ka。在 100 ka 的旋回中间冰期只占 10%~20%，而冰期可达 80%~90%。目前所处的间冰期，称为全新世，已持续了 11.5 ka。但是，根据地球轨道要素造成的太阳辐射变化，可能 50 ka 之内不会进入下一个冰盛期。目前人类活动造成的气候变暖，还可能在一定程度上推迟下一个冰期的到来。

(3) 无论冰期、间冰期内都存在千年尺度的气候振荡，在冰期中称为 D/O 循环，全新世中称为气候突变(冷事件)。冷事件出现的韵律为 1.5 ka。全新世最后一次冷事件为小冰期，出现于 AD 1300—1900，中心时间为 0.4 ka (AD 1550)。如果过去冷事件间隔约 1.5 ka 的规律仍然有效，则在最近的将来不可能出现新的冷事件。但是，人类活动可能破坏 AMOC，造成气候突变，这是一个值得注意的问题。

(4) IPCC 评估报告^[26]认为，近 50 年的变暖非常可能(>90%)是人类活动影响造成的。如果不控制温室气体的排放，则可能对社会发展产生不利的影 响，因为无论采取什么样的措施，人类活动造成的气候变暖还会在相当长时间内继续下去。全球变暖是人类不得不面对的严酷现实。

(5) 虽然谈到古气候，一般首先谈到的是温度，但是降水量变化也很重要。特别是在当前全球面临缺水的威胁时更是如此。例如，全新世夏季风持续减弱，而且还伴随着一系列的干旱突变，因此未来发生干旱突变的可能性是非常值得重视的。

参考文献

- [1] 翟盘茂. 全球变暖背景下的气候服务[J]. 气象, 2011, 37(3): 257-262.
- [2] 王绍武. 全新世气候变化[M]. 北京: 气象出版社, 2011.
- [3] Hoffman P F, Schrag D P. Snowball earth[J]. Scientific American, 2000, 282: 62-75.
- [4] Cui Y, Kump L R, Ridgwell A J, et al. Slow release of fossil carbon during the Palaeocene-Eocene Thermal Maximum[J]. Nature Geoscience, 2011, 4: 481-485.
- [5] Wilson R C L, Drury S A, Chapman J L. The Great Ice Age: Climate Change and Life[M]. London Routledge, 2000.
- [6] Emiliani C. Two revolutions in the Earth Sciences[J]. Terra Nova, 1995, 7(6): 587-597.
- [7] Oldfield F. PAGES Time stream 2-long records[J]. PAGES News, 1999, (3): 1.
- [8] Müller U C, Pross J. Lesson from the past: Present insolation minimum holds potential for glacial inception[J]. Quat Sci Rev, 2007, 26(25-28): 3025-3029.
- [9] 汪品先. 全球季风的地质演变[J]. 科学通报, 2009, 54(5): 535-556.
- [10] Shi Z, Liu X, Sun Y, et al. Distinct responses of East Asian summer and winter monsoons to orbital forcing[J]. Clim Past Discussions, 2011, 7: 943-964.
- [11] Alley R B, Clark P U, Keigwin L D, et al. Making sense of millennial-scale climate change[J]. Geophysical Monograph Series, 1999, 112: 386-394.
- [12] Dansgaard W, Oeschger H. Environmental Record in Glaciers and Ice Sheets[J]. Chichester: Wiley, 1989, 287-318.
- [13] Heinrich H. Origin and consequences of cyclic ice rafting in the northeast Atlantic Ocean during the past 130,000 years[J]. Quat Res, 1988, 29(2): 142-152.
- [14] Bond G, Showers W, Cheseby M, et al. A pervasive millennial-scale cycle in North Atlantic Holocene and glacial climates[J]. Science, 1997, 278: 1257-1266.
- [15] Wang Y, Cheng H, Edwards R I, et al. The Holocene monsoon: Links to solar changes and North Atlantic climate[J]. Science, 2005, 308: 854-857.
- [16] Huang E, Tian J, Steinke S. Millennial-scale dynamics of the winter cold tongue in the southern South China Sea over the past 26 ka and the East winter monsoon[J]. Quat Res, 2011, 75(1): 196-204.
- [17] Steinke S, Glatz C, Mohtadi M, et al. Past dynamics of the East Asian monsoon: No inverse behavior between the summer and winter monsoon during the Holocene[J]. Global Planetary Change, 2011, 78(3-4): 170-177.
- [18] National Research Council. Abrupt Climate Change: Inevitable Surprises[M]. Washington D C: National Academy Press, 2002.
- [19] Burroughs W J. Climate Change in Prehistory[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2005.
- [20] Weiss H, Bradley R S. What drives societal collapse[J]? Science, 2001, 291: 609-610.
- [21] Christiansen B, Ljungqvist F C. The extra-tropical N H temperature in the last two millennia: reconstructions of low-frequency variability[J]. Clim Past Discuss, 2011, 7(6): 3991-4035.
- [22] Lamb H H. Climatic History and the Future, Vol 2: Climate: Present, Past and Future[M]. London Methuen, 1977.
- [23] 葛全胜, 等. 中国历朝气候变化[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
- [24] Ge Quansheng, Wu Wenxiang. Climate during the Medieval Climate Anomaly in China[J]. PAGES News, 2011, 19(1): 24-26.
- [25] Xoplaki E, Fleitmann D, Diaz H F. Editorial: Medieval climate anomaly[J]. PAGES News, 2011, 19(1): 4.
- [26] IPCC. Climate Change 2007[R]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007: 996.