

# 过去 2 000 年的特征气候时段及其影响因素

黄博津, 余克服, 陈特固

(中国科学院南海海洋研究所边缘海地质重点实验室, 广州 510301)

**摘要:**清楚认识过去 2 000 年来特征气候时段的气候特性, 对于了解现代气候状况及其变化趋势有重要意义。大量研究显示, 过去 2 000 年来的特征气候时段可概括为相对寒冷的黑暗时代冷期(简称 DACP, 大体位于 400—600AD)、相对温暖的中世纪暖期(简称 MWP, 大体位于 900—1400AD)、相对寒冷的小冰期(简称 LIA, 大体位于 1500—1850AD)和 20 世纪异常温暖期。DACP 的起止时间等目前仍有争议; MWP 的争议在于它的全球性以及温暖程度, 特别是它是否暖过 20 世纪后期; LIA 是继 MWP 之后的一个冷期, 全球大部分区域都有记录, 但不同区域 LIA 的起始时间和温度变化幅度各不相同; 20 世纪异常温暖期指的是 20 世纪初(1920s)以来的气候变暖, 目前的争论主要集中于它的驱动机制和影响因素。一般认为, 过去 2 000 年来特征气候时段的形成可能与太阳活动、火山爆发和人类活动、温室气体增多和海气相互作用等因素有关。其中工业化(1860s)以前长时间尺度的气候主要受太阳和火山活动等的影响, 工业化后的气候与温室气体的增多有关。未来对过去 2 000 年气候的研究, 需要提高代用资料指示年代和区域气候信息的准确性, 增加高分辨率、高精度代用资料, 扩展研究区域, 关注气候变化的全面性, 发展气候模型进一步了解气候变化的规律和机制。

**关键词:**过去 2000 年; 气候变化; 特征气候时段

**中图分类号:** P532

**文献标识码:** A

**文章编号:** 0256-1492(2013)01-0097-12

IPCC-AR4<sup>[1]</sup>指出近年来(1905—2006)全球温度上升( $0.74 \pm 0.18$ ) $^{\circ}\text{C}$ , 预估 21 世纪末较 1980—1999 年将平均升高约 1.1~6.4 $^{\circ}\text{C}$ (最佳估计为 1.8~4.0 $^{\circ}\text{C}$ )。人们极其关注的是: 现在的温度是否是近 2 000 年来的最高温度, 未来的温度是否会持续升高, 是什么因素引起近代温度的升高, 人类活动对现代气候变暖的贡献究竟多大? 而要正确回答这些问题则需要我们对过去气候变化过程有比较清楚的了解。其中, 过去 2 000 年既包括了工业革命后人类活动对气候影响增多的时段, 也包括了工业革命前气候单纯的自然变率影响的时段; 同时, 过去 2 000 年包含了人类社会和历史的变迁, 为人类如何适应气候变化提供资料参考。因此, 对近 2 000 年气候的透彻了解都是国内外一直非常关注的热点课题, 希望能够藉此模拟未来的气候趋势、区分气候变化的自然变率和人类活动的贡献。评估近 2 000 年的气候变化, 需要了解其变化过程, 也需要了解其间发生的特征气候时期及其变化幅度、变化

速率、变化周期和驱动机制。本文根据近年来的研究成果对此作进一步阐述, 希望有助于对近 2 000 年气候变化过程的了解, 有助于对近 2 000 年气候特征的深入研究。

## 1 特征气候时段及其气候特征

因为器测的气候资料一般小于 150 年<sup>[2]</sup>, 比较多见用历史文献、冰心、树轮、珊瑚、石笋、湖泊沉积物、海洋沉积物和冰川记录等作为代用资料对过去气候进行重建。但由于各代用资料有其自身的局限性和适用范围, 以及代表气候变化的区域差异, 目前, 虽然用这些代用资料建立了不少关于过去 2 000 年的温度变化曲线, 但各温度曲线之间仍然存在相当大的不一致性(图 1), 如 20 世纪气候变暖的幅度和程度、近 2 000 年中的特征气候时段及其气候特征等。

### 1.1 黑暗时代冷期

黑暗时代冷期(Dark Age Cold Period, 简称 DACP), 指 300BC—300AD 罗马暖期(Roman Warm Period)之后温度变冷的时期。中文术语首见于 2011 年<sup>[5]</sup>。DACP 与古历史文化有着密切的关系, 它对应罗马帝国灭亡(476AD)和欧洲的迁徙

基金项目: 国家重大科学研究规划项目(2010CB950101); 中国科学院战略性先导科技专项(XDA05080301); 国家自然科学基金项目(40830852, 41025007)

作者简介: 黄博津(1987—), 女, 研究生, 从事珊瑚古气候研究, E-mail: dearjin@126.com

收稿日期: 2012-08-05; 改回日期: 2012-10-11. 张光威编辑

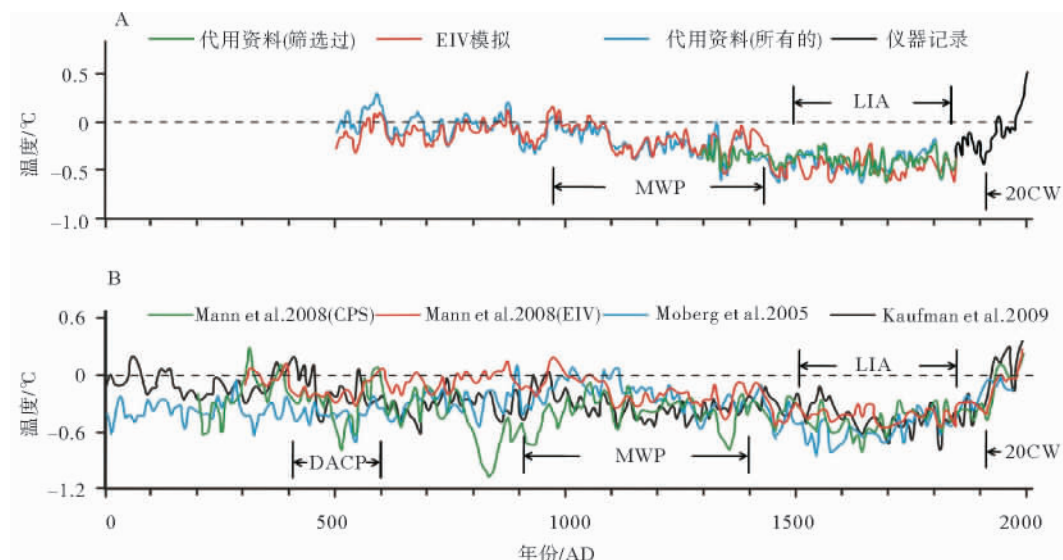


图 1 过去 2 000 年全球的温度变化

(a) 全球年代际尺度温度重建曲线<sup>[3]</sup>; (b) 多指标重建北半球地区近 2 000 年来温度变化曲线<sup>[4]</sup>

Fig. 1 Global variations in surface temperature during past 2 000 years

(a) Reconstructed global decadal surface temperature<sup>[3]</sup>(b) Northern Hemisphere temperature reconstructed by composite proxy records<sup>[4]</sup>

时代(250—600AD)时期<sup>[6]</sup>;也对应中国的汉朝及随后朝政动荡的三国和魏晋南北朝时期(190—530AD)<sup>[7]</sup>。

黑暗时代冷期的起止时间仍存在争议,最新研究进展认为 DACP 约为 300—800AD 间<sup>[8]</sup>。大体上认为中国的 DACP 在 200—500AD<sup>[5,9]</sup>;Moberg 重建的曲线显示北半球 DACP 为 320—550AD,温度比 20 世纪末(1961—1990AD)平均温度低约 0.5℃(图 1C)。青藏高原树轮记录 DACP(343—367)比 20 世纪末(1990—2000)平均温度低 1.2℃<sup>[10]</sup>。大西洋西部 Stream 湾沉积物中有孔虫 Ma/Ca 比值重建 SST 记录 DACP(300—500)比 20 世纪(1958—2007)温度低约 0.5℃<sup>[11]</sup>。

## 1.2 中世纪暖期

1965 年 Lamb 根据对欧洲和北美洲的部分地

区文献记录和英国降水增多的记录,提出在 1000—1200AD 存在明显的温暖气候<sup>[15]</sup>,因为这段时间是欧洲的中世纪,所以,称为中世纪温暖期(Medieval Warm Period,简称 MWP)。后来的研究发现,中世纪暖期好像并不是一个全球现象,于是在近年来又有人称之为中世纪气候异常期(Medieval Climate Anomaly,简称 MCA)<sup>[3]</sup>。

现在 MWP 的证据在北半球找到的比南半球多<sup>[16]</sup>,可能与南半球重建资料比北半球少有关。目前在欧洲、格陵兰岛、非洲、北美洲、南美洲等都有 MWP 的记录<sup>[17]</sup>。虽然关于 MWP 的起止时间还有不少分歧,但目前比较多地接受 Lamb 1972 年定义的 900—1400AD 这一范围(图 1B)<sup>[18]</sup>。

不同区域的 MWP 温度变化幅度不同。就大范围而言,Mann 根据气候模型认为,MMP 在北太平洋中心表现为相对更暖,而在欧洲中部、北美的西北

表 1 黑暗时代冷期的部分起止时间

Table 1 Onset and ending time of Dark Age Cold Period

地点	纬度	经度	指代物	起止时段	文献
北极	78°54'N	6°46'E	海洋沉积物	600—900AD	[12]
欧洲西北部	45°59'N	6°47'E	湖泊沉积物	400—680AD	[13]
青藏高原	35~37°N	98~99°E	树轮	343—367AD	[10]
中国万象洞	33°19'N	105°E	石笋	190—530AD	[7]
大西洋西部	32°N	76°W	海洋沉积物	300—500AD	[11]
印度-太平洋	4~5°S	118~120°E	海洋沉积物	400—950AD	[14]

表 2 中世纪暖期的部分起止时间

Table 2 Onset and ending time of Medieval Warm Period

地点	纬度	经度	指代物	起止时段	文献
北极	78°54'N	6°46'E	海洋沉积物	900—1500AD	[12]
美国	60°47'N	142°57'E	湖泊沉积物	1000—1100AD	[19]
欧洲西北部	45°59'N	6°47'E	湖泊沉积物	680—1350AD	[13]
非洲东部	0°46'S	36°21'E	湖泊沉积物	1000—1270AD	[20]
印度	19°S	82°E	石笋	925—1350AD	[21]
中国万象洞	33°19'N	105°E	石笋	950—1340AD	[7]
南极洲北部	77°49'S	116°40'E	冰心	1140—1287AD	[22]
冰岛北部	66°33'N	17°42'W	海洋沉积物	1000—1350AD	[23]
大西洋西部	38~39°N	76°W	海洋沉积物	1000—1300AD	[24]
大西洋西部	32°N	76°W	海洋沉积物	800—1250AD	[11]
印度-太平洋	4~5°S	118~120°E	海洋沉积物	1000—1250AD	[14]
墨西哥湾	27°11'N	91°24'W	海洋沉积物	800—1250AD	[25]
加勒比海	10°45'N	64°46'W	海洋沉积物	1200—1425AD	[26]

部和南大西洋等部分区域则相对冷一些<sup>[3]</sup>。Koch 等综合前人的研究总结认为 MWP 最暖出现在 950—1000AD 和 1040—1100AD,当时的温度与 20 世纪早期的温度相当<sup>[27]</sup>。较多的记录显示 MWP 时期是一个温暖期,但也有不少研究显示相反的结论,如在赤道东太平洋区域(2.5°S~2.5°N、92.5°W~147.5°W) MWP 出现类似拉尼娜现象,多指标法记录 SST 在 950—1250AD(对应北半球的 MWP)和 1400—1700AD(对应北半球的 LIA)都是相对寒冷的时期(图 6)<sup>[3,28]</sup>。珊瑚记录显示赤道太平洋中部(6°N、162°W) SST 在 10 世纪是一个相对干冷的时期<sup>[29]</sup>。结合上述珊瑚记录进行的气候模拟结果也显示 1320—1462AD 期间气候转冷<sup>[30]</sup>。美洲西北部(50~60°N)的冰川记录显示 MWP(800—1400AD)同小冰期(LIA)一样为进积<sup>[27]</sup>。西藏古里雅冰心记录 11—12 世纪是一个强冷期,比小冰期还冷<sup>[31]</sup>;敦德冰心也显示 1000AD 有一个比小冰期还冷的冷期<sup>[32]</sup>;但奇怪的是在和古里雅冰心临

近的都兰树轮气候重建中出现显著的 MWP 温暖气候特征<sup>[33]</sup>。这些工作表明,对过去气候认识的程度依然是不够的。

### 1.3 小冰期

小冰期(Little Ice Age, 简称为 LIA),指发生在中世纪暖期后的一个相对冷的阶段<sup>[34-36]</sup>。1965 年, Lamb 定义 LIA 的时间为 1500—1700AD<sup>[15]</sup>。美国国家研究委员会(National Research Council, NRC)综合各种代用资料认为 LIA 的时段为 1500—1850AD<sup>[37]</sup>(图 1)。

LIA 在全球的大部分区域都有记录,但 LIA 的起始时间分歧较大,从 12 世纪到 16 世纪不等<sup>[38]</sup>。与大陆 LIA 大部分始于 14—15 世纪不同,海洋的 LIA 起始时间大部分要晚于大陆(表 3、表 4)。不同区域不同研究给出的 LIA 的起始时间不同,结束时间也不一样,但大多数给出 LIA 结束时间为 19 世纪末,在 20 世纪气候变暖之前。

表 3 陆地小冰期的部分起止时间

Table 3 Onset and ending time of Little Ice Age on land

地点	纬度	经度	指代物	起止时段	文献
北极	78°54'N	6°46'E	海洋沉积物	1500—1900AD	[12]
美国	60°47'N	142°57'E	湖泊沉积物	1350—1850AD	[19]
欧洲中西部	46°N	6~8°E	冰川记录	始于 1550AD	[39]
欧洲东南部	47°15'N	25°15'N	树轮	1370—1630AD	[40]
非洲东部	0°46'S	36°21'E	湖泊沉积物	1270—1850AD	[20]
印度	19°S	82°E	石笋	始于 1350AD	[21]
中国万象洞	33°19'N	105°E	石笋	1340—1850AD	[7]
青藏高原	38°06'N	96°24'E	冰心	始于 1400AD	[32]
南极西部	81.65°S	148.80°W	冰心	1400—1900AD	[41]
南极洲北部	77°49'S	116°40'E	冰心	1288—180AD	[22]

表 4 海洋部分小冰期的起止时间

Table 4 Onset and ending time of Little Ice Age in sea

地点	纬度	经度	指代物	起止时段	文献
冰岛北部	66°33'N	17°42'W	海洋沉积物	1350AD—20th	[23]
大西洋西部	32°N	76°W	海洋沉积物	1400—1850AD	[11]
大西洋西部	38~39°N	76°W	海洋沉积物	1450—1530AD 1720—1850AD	[24]
大西洋巴哈马	25.84°N	78.62°W	珊瑚	1552—1730AD	[42]
墨西哥湾	27°11'N	91°24'W	海洋沉积物	1600—1850AD	[25, 43]
加勒比海	10°45'N	64°46'W	海洋沉积物	1500—1700AD	[26]
太平洋	4°S	120°E	海洋沉积物	1550—1850AD	[44]
印度-太平洋	4~5°S	118~120°E	海洋沉积物	1550—1850AD	[14]
大堡礁	22°S	153°E	珊瑚	1565—1700AD	[45]

LIA 冷气候并不是持续的,其间 18 世纪是小冰期中较暖的时期。东太平洋伊莎贝拉岛(Isabela Island)珊瑚氧同位素记录显示,17 世纪早期和 19 世纪早期较冷,18 世纪较暖<sup>[46]</sup>。气候模拟结果也显示,16 世纪初和 18 世纪末则相对较暖<sup>[47]</sup>。综合各代用资料记录显示,中国各区域 LIA 冷气候中也存在 18 世纪较暖的时期,东北部 LIA 分 2 个冷时段 1470—1710s 和 1790—1860s,1720—1780s 较暖;中东部 LIA 较冷时段在 1620—1700s 和 1800—1880s,1710—1790s 较暖;东南部 1740—1790s 是较暖的时段,1820—1900s 是较冷的时段<sup>[9]</sup>。

在 LIA 的降温幅度方面,全球各区域对 LIA 温度变化的响应和降温的幅度各有异同。由树轮资料显示,LIA 期间全球大部分地区平均降温 0~0.2℃,在亚洲的中部和西北部降温幅度最大(>0.8℃)<sup>[34]</sup>。气候模拟结果显示,LIA 降温主要出现在较高纬度的北半球大陆;而在中东、北大西洋、非洲、欧亚大陆的热带地区、以及太平洋的部分海区则不是十分明显(其温度可能与现代相当),小部分地区(如加拿大北部)在 LIA 期间温度甚至比 20 世纪(1967—1990AD)还高<sup>[3]</sup>。气候模型研究分别认为 LIA 全球平均降温 0.16℃和 0.24℃<sup>[3]</sup>;与 MWP 的温度相比,墨西哥湾沉积记录 SST 降低 1℃<sup>[11]</sup>;百慕大群岛沉积物的记录显示 LIA 最冷时期(1640 s)比 MWP 最暖时期(1100s)温度降低达 2℃<sup>[17]</sup>;中国 5 个区域综合分析认为 LIA(1560—1890s)的 30 年平均气温比 20 世纪(1920—1940s)低约 0.6~0.11℃<sup>[48]</sup>。也有研究认为 LIA 降温幅度比较大,如阿尔卑斯山的洞穴石笋记录显示与 1950AD 相比 LIA(1400—1850AD)降温达 1.5℃<sup>[49]</sup>;百慕大群岛南部海岸的 *Diploria labyrinthiformis* 珊瑚记录显示

LIA 后期(1850AD)的 SST 比现代(2000AD)低 1.5℃<sup>[50]</sup>。马尾藻海的沉积物有孔虫 *Globigerinoides ruber* 记录显示 LIA(1600—1750AD)比晚 20 世纪(1990s)的 SST 低 1℃<sup>[51]</sup>。太平洋西南部的双壳贝类研究认为,LIA 早期(1321—1391AD)比 19 世纪(1864—1886AD)SST 低 1.6℃<sup>[52]</sup>。

#### 1.4 20 世纪的异常变暖期

20 世纪的异常变暖(20<sup>th</sup> Century Warming Period,简称 20CW)指的是有仪器记录观测到的工业时期(1850s)以来的温度升高<sup>[2]</sup>。基于 4 167 个站的仪器记录,采用 CAM(气候异常法),以 5°×5°网格重建全球 1851—2001AD 间全球的温度序列,1920—1944 和 1977—2001 年这两个时间段全球气温有明显升高<sup>[54]</sup>。因此,20 世纪的异常变暖指约 1920s 以来的气候变暖<sup>[55-56]</sup>(图 2)。值得关注的是,近 150 年来全球陆上气温、SST 和海上气温的三者总体变化趋势是一致的,受气候变化的影响全球海平面也呈持续上升趋势<sup>[57]</sup>。但 1998 年以来,全球温度停止持续上升,只是波动变化(图 2)<sup>[53]</sup>。

认可气候变暖者的证据主要来自观测到的温度升高、全球大范围积雪融化和冰盖后退等。IPCC-AR4 认为最近一百年(1906—2005)全球平均温度升高了(0.74±0.18)℃<sup>[1]</sup>。当然,全球气候变暖并不是均一同步的,而是存在以下特点:(1)高纬度地区的温度升高速率更快,如近 100 年来北极升温幅度几乎以 2 倍于全球平均温度升高速率<sup>[58]</sup>。因为陆地降水近两个世纪来在中高纬度是增加的,水汽的变化幅度大使得温度的昼夜温差变小,因此升温更明显<sup>[59-60]</sup>。(2)高海拔地区温度升高速率也大,如青藏高原仪器记录显示 1955—1996AD 年平均温

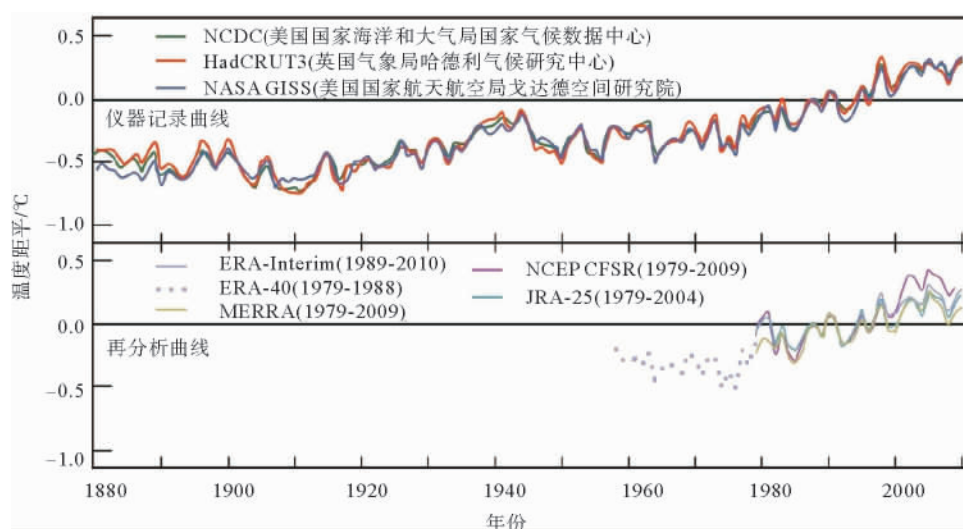


图 2 近 120 年来全球平均温度距平年变化(据文献[53]图 2.3)

Fig. 2 Global average surface temperature annual anomalies since 1880AD<sup>[53]</sup>

度升温速率为  $0.16\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ 年}$ , 冬季平均温度升温速率为  $0.32\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ 年}$ , 明显高于北半球 1890—1990AD 平均速率( $0.054\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ 年}$ )<sup>[61]</sup>。(3)陆地升温要比海洋快<sup>[1]</sup>。对 20 世纪后 25 年(1980—2004)的气候模拟结果显示, 陆地的升温幅度为  $(0.38 \pm 0.014)^{\circ}\text{C}$ , 而海洋的升温幅度为  $(0.19 \pm 0.06)^{\circ}\text{C}$ <sup>[62]</sup>, 这是由于海水的比热容大所致<sup>[63]</sup>。

20 世纪异常温暖期的温度升高速率是关注的重点之一。IPCC-AR4 提到, 20 世纪后 50 年(1950—2000s)的升温速率为  $(0.13\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ 年})$ , 比过去 100 年的升温速率高一倍<sup>[1]</sup>; 最新的模型模拟结果和仪器观测结果相似, 得出 20 世纪后 30 年(1970—2000s)升温速率约  $0.06\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ 年}$ <sup>[64-65]</sup>; 安第斯山脉冰川记录显示 1939 AD 以来升温速率约  $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ 年}$ <sup>[66]</sup>; 气象记录显示近百年(1900—1999)华南大陆沿海年平均温度升高速率为  $0.06 \sim 0.08\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ 年}$ <sup>[67-68]</sup>, 澳门近百年(1901—2007)升温率约为  $0.066\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ 年}$ <sup>[69]</sup>, 台湾近百年来(1900—2000)升温率约为  $0.02\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ 年}$ <sup>[70]</sup>; 多指标综合记录中国 20 世纪升温速率为  $0.06\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ 年}$ , 但 20 世纪 30 年尺度全国平均升温速率  $(0.5 \pm 0.6\text{ }^{\circ}\text{C}/30\text{ 年})$ 、 $0.2 \pm 0.7\text{ }^{\circ}\text{C}/30\text{ 年}$  低于 3 世纪后期的升温速率  $(0.5 \pm 2.0\text{ }^{\circ}\text{C}/30\text{ 年})$ <sup>[71]</sup>; 青藏高原树轮记录 20 世纪增暖幅度  $(0.79\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{百年})$  小于东晋事件(343—425AD)期间的增暖幅度  $(1.01\text{ }^{\circ}\text{C}/30\text{ 年})$ <sup>[10]</sup>。

20 世纪异常温暖期的温暖程度, 以及其是否暖过过去 2 000 年的任何时段是目前关注的另一个焦点。美国国家研究委员会基于对近 2 000 年气候研究的评估认为, 20 世纪是近 400 年来最暖的时

期<sup>[37]</sup>。IPCC 认为 20 世纪后 50 年是过去 500 年中 最暖的 50 年, 并可能是近 1 300 年中平均温度最高的 50 年<sup>[1]</sup>。气候模型模拟认为近 10 年(1998—2008)的平均温度在近 1 300 年来都没有被超过<sup>[72]</sup>。持反对观点, 认为 MWP 比 20 世纪温暖期的温度高的学者也不少, 比如青藏高原 20 世纪(1961—1990)的平均温度比 MWP(942—1014)的低约  $0.12\text{ }^{\circ}\text{C}$ <sup>[10]</sup>。中国的东北部 1190s 温度比 1901—1950AD 的平均温度高约  $0.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 而中东部 1240s 温度比 1901—1950AD 的平均温度高约  $0.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ <sup>[9]</sup>。马尾藻海海洋沉积物记录 MWP(1000AD)温度比现代(1950AD)高约  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ <sup>[51]</sup>。

20 世纪异常温暖期是人类影响所致还是气候波动的自然变率? 有不少人及以 NIPCC(非政府间气候变化专门委员会)为代表的气候评估组织认为, 现代气候正在变暖是由气候的自然变率引起的正常现象<sup>[73]</sup>, 但以 IPCC 为代表的气候评估组织和全球大多数人认可 20 世纪的异常变暖与人类活动关系密切。从千年时间尺度上的综合分析认为, 太阳和火山活动等自然变率因素事实上是使得 20 世纪末温度稍微降低的, 只有人类的影响, 主要是温室气体的增加使得 20 世纪末全球温度的异常升高<sup>[2]</sup>。气候碳循环模型(Climatic carbon cycle models)模拟结果显示, 工业化以来一半的  $\text{CO}_2$  排放( $1.84\text{ 万亿 t}$ )可以导致 2500AD 比工业化前(1900AD)温度升高  $1.3 \sim 3.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ <sup>[74]</sup>。人类活动排放的温室气体和气溶胶可能直接或间接地影响自然变率对气候的作用, 研究中国石笋高分辨率的重建温度序列对比亚洲季风变化序列, 认为亚洲季风的变化既受到太阳



活动影响也受到人类活动影响,20 世纪末区域性(东南亚)降水和温度的变化很大程度上受到人为因素的影响,包括温室气体和气溶胶<sup>[7]</sup>。

## 2 特征气候时段温度异常的原因

### 2.1 太阳活动

太阳活动对气候的影响,主要是指轨道的变化(即是太阳输入量在地球纬度比例的改变)和太阳辐射量的改变影响气候<sup>[75]</sup>。太阳辐射量指的是太阳到达地球的辐射总量。对历史时期太阳总辐射量的估计方法主要有两种。一种是通过宇宙射线间接计算,如依据<sup>14</sup>C 的估计,或者依据<sup>14</sup>C 与<sup>10</sup>Be 的比值进行估计;另一种是根据太阳黑子数外推法进行计算<sup>[65,76]</sup>(图 3)。

太阳辐射量的变化(即一段时间内偏离平均值时)会影响地球气候的变热(强太阳辐射量)和变冷(弱太阳辐射量)<sup>[76]</sup>。在工业化(1850s)前,长时间尺度的区域气候变化主要受到太阳辐射量变化的影响<sup>[77]</sup>。根据太阳黑子数重建过去近 400 年的太阳辐射量变化认为,工业化以前(1610—1800AD)太阳辐射量的变化与北半球气温之间相关性为 0.86,太阳辐射对 1860 年以来的升温的贡献约占 50%,对 1970 年以来的占约 30%<sup>[78]</sup>。MWP 的升温可能与太阳辐射有关,因为宇宙射线(<sup>10</sup>Be 和<sup>14</sup>C)代表的太阳活动在 1000AD 甚为强烈<sup>[79]</sup>。太阳活动也可能影响 LIA(1400—1700AD)的气候变化,石笋记录重建的温度曲线认为 LIA 期间太阳辐射量的 2 个极小期,即斯波瑞尔极小期(1450—1550AD)和蒙德极小期(1645—1715AD),均对应于气候寒冷期<sup>[80]</sup>。D'Arrigo 对 Cook 重建的 Niño 3 指数进行莫勒特小波分析也发现,蒙德极小期对应于 LIA(16 世纪晚期—17 世纪早期)<sup>[81]</sup>。气候模型重建结果显示,蒙德极小期全球温度平均降低了 0.3~0.4 °C,其中北半球大陆平均降低了 1~2 °C<sup>[63]</sup>。中国青藏高原树轮记录的温度曲线存在 110 年和准 200 年的周期,认为这与太阳活动的周期(11 年)有关<sup>[10]</sup>;对北京石花洞重建的温度序列进行奇异谱分析认为气候中的 100~70 年、25~22 年、12 年与 9 年的周期与太阳活动有关<sup>[82]</sup>。但也有基于对各时间尺度太阳活动与气候关系的研究认为,温度降低与太阳辐射之间的关系缺乏最直接的证据,并且二者之间的响应机制是复杂的和间接的<sup>[75]</sup>。

太阳辐射对某些区域气候也可能有影响<sup>[63]</sup>,因

为太阳辐射影响区域的季风变化和各種涛动,如 ENSO 在千年尺度上的变化与太阳活动密切相关,蒙德极小期即与强 ENSO 变化相对应<sup>[81]</sup>;强 El Niño 时期对应赤道辐合带(Intertropical Convergence Zone, 简称 ITCZ)的南移,此时北半球夏季季风较弱,是一个相对冷的时期<sup>[83-84]</sup>。Shindell 研究蒙德极小期与北极涛动/北大西洋涛动指数(Arctic Oscillation/ North Atlantic Oscillation, 简称 AO/NAO)的关系,认为太阳辐射的减少使得海水表面温度降低,通过海气交换导致上层空气变冷,横向温度梯度减少又使得西风减少,呈现低 AO/NAO 指数,加重了陆地的变冷<sup>[63]</sup>。虽然对区域气候变化的机制在认识上还存在不少分歧,但一般认可太阳活动引起的区域模式变化而引起气候变化<sup>[75]</sup>。

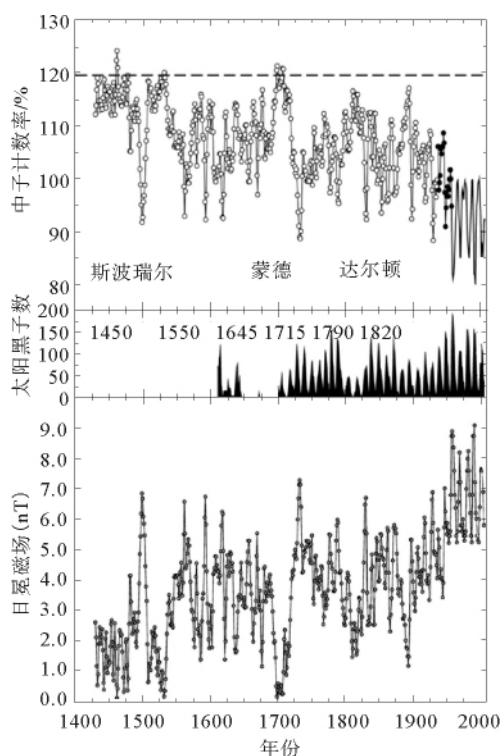


图 3 近 600 年来太阳活动强迫序列<sup>[85]</sup>

Fig. 3 Solar Forcing time series since 1400AD<sup>[85]</sup>

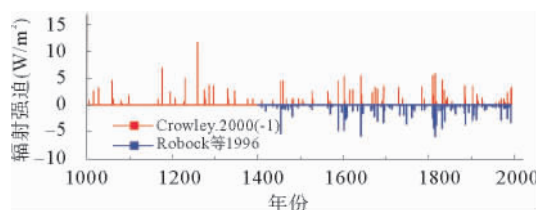


图 4 近 1000 年来火山强迫序列<sup>[86]</sup>

Fig. 4 Volcano forcing time series since 1000AD<sup>[86]</sup>

## 2.2 火山活动

火山活动对气候的影响主要是通过火山喷发的火山灰物质(特别是气溶胶)影响温度<sup>[87]</sup>。火山气溶胶被认为是工业化以前影响全球短时间尺度气候变冷的最主要因素<sup>[77]</sup>。火山活动影响气候变化的机理是,当火山喷发的气溶胶物质进入大气平流层后随大气环流扩散成为太阳辐射的屏障层,这一屏障层导致到达地表的太阳辐射能量减少,地表温度因此降低。而在热带的火山喷发,会使得赤道到两级对流层的有一个温度梯度,使得北半球的冬季产生强的极地漩涡,从而在对流层中产生驻波,形成正 AO/NAO 相,导致北半球大陆冬季变暖<sup>[88]</sup>。因此,低纬度的火山喷发会使得北半球夏季变冷、冬季变暖。火山喷发后部分粒子和气溶胶会存留在平流层中 2~3 年并影响气候<sup>[89]</sup>。火山活动影响气候的特点是幅度大,持续时间短<sup>[77]</sup>。

在年代际尺度的气候模型中,工业化前(1000—1850AD)约 22%~23% 的温度变化能用火山活动解释;到 LIA(1400—1850AD)时段火山活动对气候变化的贡献增加到了 41%~49%,说明 LIA 的降温和火山活动密切相关<sup>[86]</sup>。近期火山活动对气候影响的一个典型例子是印度尼西亚的 Tambora 火山的喷发(1815AD),它导致次年(1816AD)北半球平均温度下降 0.4 °C~0.7 °C,是“无夏之年”<sup>[90]</sup>;青藏高原的古里雅冰心中氧同位素的重建中记录了由 Tambora 火山喷发引起的 1820s 的变冷事件<sup>[91]</sup>。气候模拟也表明火山喷发会使全球平均温度降低,如 Tambora 火山喷发后第 2 年(1817AD)使北半球平均温度降低了 0.5 °C,第 3 年(1818AD)使北半球平均温度降低了 0.7 °C,Pinatubo 火山(1991AD)使全球平均温度降低了 0.35 °C<sup>[77]</sup>。

## 2.3 温室气体排放

温室气体指化石燃料释放出来的二氧化碳(CO<sub>2</sub>)、甲烷(CH<sub>4</sub>)、和氧化氮(N<sub>2</sub>O)等<sup>[1]</sup>。温室气体会吸收和反射地球表面、大气本身以及云层发出的热红外辐射,从而产生温室效应使得地表温度升高。20 世纪中期开始了仪器测量温室气体的浓度,之前的大气中温室气体的浓度是从冰心中计算出来的<sup>[2]</sup>。工业化前大气中 CO<sub>2</sub> 为约 280×10<sup>-6</sup>,2005 年增至 379×10<sup>-6</sup>,1995—2005 年 CO<sub>2</sub> 浓度的年增长率为 1.9×10<sup>-6</sup>/a<sup>[1]</sup>。自 1700s 以来大气中 CH<sub>4</sub> 浓度超过以前 2 倍,达到 1 700×10<sup>-9</sup><sup>[92]</sup>。IPCC-AR4 显示工业化前大气中 CH<sub>4</sub> 约为 715×10<sup>-9</sup>,

1990s 增至 1 732×10<sup>-9</sup>,2005 年增至 1 774×10<sup>-9</sup><sup>[1]</sup>。工业化前 N<sub>2</sub>O 浓度为 270×10<sup>-9</sup>,2005 年增至 319×10<sup>-9</sup><sup>[1]</sup>。

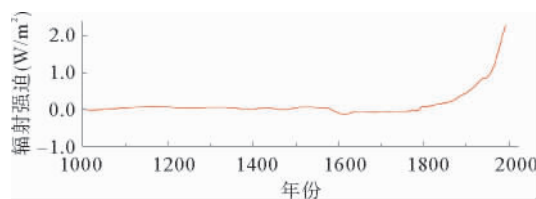


图 5 近 1 000 年来 CO<sub>2</sub> 辐射强迫序列<sup>[86]</sup>

Fig. 5 CO<sub>2</sub> radiative forcing time series since 1000AD<sup>[86]</sup>

在长时间尺度上,冰心记录显示 LIA(1300—1850AD)对应温室气体减少时段,从 1550AD 开始 CO<sub>2</sub> 约降低 10×10<sup>-6</sup>,CH<sub>4</sub> 约降低 40×10<sup>-9</sup>,N<sub>2</sub>O 约降低 5×10<sup>-9</sup>,到最冷时段 1600 s 温室气体的浓度出现最小值<sup>[93]</sup>。对气候的影响是一个逐渐增强的过程,如对北极冰心的研究认为 1840—1920AD 的增温(约 0.75 °C)中温室气体的贡献约 0.1 °C~0.4 °C,1920 年以后温室气体的增加成为影响北极圈气候的主要因素<sup>[94]</sup>。众多模型模拟结果也显示,太阳辐射和火山活动对气候的影响在工业化以前较大,而过去 100 年来温室气体对气候变化的贡献已经超过太阳和火山活动<sup>[2,65,86,95]</sup>。

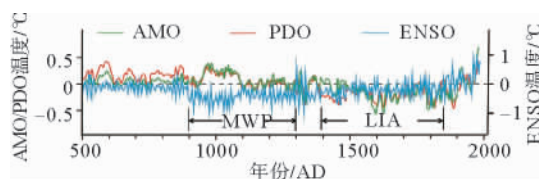


图 6 AMO、PDO 和 ENSO 等振荡影响的区域近

1 500 年来的年代际尺度温度变化曲线<sup>[3]</sup>

Fig. 6 Decadal sea surface temperature reconstructions over the North Atlantic AMO region, North Pacific PDO region and Tropical Pacific ENSO region since 500AD<sup>[3]</sup>

## 2.4 海-气相互作用

大西洋区域的年代际 SST 的变化受大西洋年代际振荡(Atlantic Multidecadal Oscillation, 简称 AMO)的影响<sup>[96]</sup>。AMO 与大西洋东北部、中部和东南部的 SST 呈正相关;与大西洋亚热带地区的 SST 呈负相关。对近 300 年的仪器记录和代用资料分析显示 AMO 存在 70 年的周期<sup>[97]</sup>。对北大西洋沿岸近 500 年的树轮分析显示 AMO 高频周期为 7~25 年,低频年周期为 60~100 年<sup>[98]</sup>。

北太平洋热带以外地区年代时间尺度的海温变化是受到太平洋年代振荡(Pacific Decadal Oscillation, 简称 PDO)的影响<sup>[3]</sup>。PDO 与太平洋东北部的 SST、北美西南部降水呈正相关;与北美西北部降水呈负相关<sup>[99]</sup>。美国和加拿大树轮记录和波谱分析显示 MWP 期间 PDO 弱, LIA 期间 PDO 强。PDO 低频周期为 50~70 年;可能存在 250~500 年的周期;近 200 年来的周期变化不稳定<sup>[99]</sup>。对近 400 年来的太平洋珊瑚和美国树轮的综合分析认为 PDO 有可能还存在 20 年的周期<sup>[100-101]</sup>。对北京石花洞重建的过去 2 650 年来的温度序列进行奇异谱分析认为, 65~50 年的周期与 PDO 有关<sup>[82]</sup>。

赤道太平洋区域气候受厄尔尼诺/南方涛动(El Niño/Southern Oscillation, 简称 ENSO)的影响<sup>[3]</sup>。对 ENSO 敏感的代用资料指数的变化序列做奇异谱分析, 认为 MWP 到现在的气候变化均存在 2~6 年的高频变化周期, 十年尺度的 ENSO 的低频变化存在 35~45 年的周期, ENSO 无论在暖期还是冷期对气候的影响是稳定的<sup>[102]</sup>。但 ENSO 对应赤道太平洋地区气候的变化仍有争论, 王绍武<sup>[103]</sup>总结 Diaz<sup>[102]</sup>通过多指标(指数、SST 和降水变化)重建的 ENSO 序列认为, MWP 在赤道太平洋地区表现为类拉尼娜现象, LIA 时期表现为类厄尔尼诺现象;而 Hong<sup>[104]</sup>通过降水变化重建近千年南方涛动指数(SOI)的变化序列指出, MWP 时期对 SOI 为负值, 赤道太平洋地区气候表现类厄尔尼诺现象, LIA 时期对应 SOI 为正值和太平洋沃克环流增强, 赤道太平洋地区气候表现类拉尼娜现象。

### 3 未来关注的热点

高分辨率、高准确度地重建近 2 000 年的温度变化过程, 仍将是未来关于近 2 000 年气候研究的热点。一系列的争议, 如 20 世纪的暖气候是否是过去 2 000 年来最暖的、工业革命以来人类活动对气候变化的贡献究竟有多大、气候变化的驱动机制等, 都源于对过去 2 000 年的气候变化过程缺少准确的认识。虽然开展过去 2 000 年气候变化研究已经有了相当长的时期, 也取得了可喜的进展, 但从目前的争议和对气候变化规律的认识程度来看, 未来关于近 2 000 年气候变化的研究仍然是任重而道远。

在准确认识近 2 000 年气候变化过程这一大框架下, 首先, 要做的是提高气候代用资料的准确性, 包括其所指示的气候信息和该气候信息所在的年代, 以增加区域气候的真实性和不同区域之间的可

比性。以温度为例, 不少代用资料仅在一定程度上指示温度信息, 因此, 就需要揭示其究竟在多大程度上指示温度, 同时需要进一步发掘能够较好地指示温度信息的代用指标, 最终真实地揭示温度信息;其中, 高精度地确定年代信息的重要性则是不言而喻的。其次, 需要全面地揭示气候信息, 温度对于理解气候变化过程相当重要, 因此, 人们比较多地关注温度, 但降雨、台风活动、日照变化等也很重要, 只有全方面地揭示气候过程, 才能避免气候认识过程中的“盲人摸象”现象。第三, 需要扩大气候重建的区域性, 以便揭示不同区域之间气候的变化的有机联系或驱动关系, 以及增加对全球气候变化的认识。因为代用资料的局限性(如温度重建中比较多地应用树轮、冰心等), 目前, 对过去 2 000 年气候的了解比较多地集中在相对高纬度地区, 而包含热带在内的广大低纬度区域的信息还相当欠缺。第四, 探索合适的气候模型, 进而探讨气候变化的规律和机制, 当然, 气候模型的运用很大程度上依赖于气候变化过程了解的准确性。

### 4 小结

(1)综合近年来的文献可以看出, 对过去 2 000 年来的特征气候时段的划分分歧不大, 一般包括相对寒冷的黑暗时代冷期(300—600AD)、相对温暖的中世纪暖期(900—1400AD)、相对寒冷的小冰期(1500—1850AD)和 20 世纪异常暖期。

(2)但对这几个特征时期的具体气候特征及其驱动机制则仍然有不少争议。人们一般认可太阳活动、火山爆发和人类活动释放的温室气体增多等是影响近 2 000 年气候变化的主要因素, 海-气相互作用是影响区域气候的主要因素。但各个因素在不同特征气候时段所起的作用目前依然不清楚, 特别是人类活动对现代气候变暖的贡献依然没有共识。

(3)预计高分辨率、高准确度地重建近 2 000 年的温度变化过程仍将是未来关于近 2 000 年气候研究的热点, 其中要关注气候代用资料的准确性、重建气候的全面性、气候覆盖区域的广泛性, 在此基础上通过气候模型探讨过去 2 000 年气候变化的规律和机制。

#### 参考文献 (References)

- [1] Pachauri R K, Reisinger A. Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the



- Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [R]. Geneva: IPCC, 2007.
- [2] Jones P D, Mann M E. Climate over past millennia [J]. *Reviews of Geophysics*, 2004, 42(2): 1-42.
- [3] Mann M E, Zhang Z, Rutherford S, et al. Global signatures and dynamical origins of the Little Ice Age and Medieval Climate Anomaly [J]. *Science*, 2009, 326(5957): 1256-1260.
- [4] Kaufman, D S, Schneider D P, McKay N P, et al. Recent warming reverses long-term Arctic cooling [J]. *Science*, 2009, 325(5945): 1236.
- [5] 王绍武. 黑暗时代冷期[J]. *气候变化研究进展*, 2011, 7(3): 233-234. [WANG Shaowu. Dark age cold period [J]. *Advances in Climate Change Research*, 2011, 7(3): 233-234.]
- [6] Buntgen U, Tegel W, Nicolussi K, et al. 2500 years of European climate variability and human susceptibility [J]. *Science*, 2011, 331(6017): 578.
- [7] Zhang P, Cheng H, Edwards R L, et al. A test of climate, sun, and culture relationships from an 1810-Year Chinese Cave Record [J]. *Science*, 2008, 322(5903): 940-942.
- [8] Ljungqvist F C. Temperature proxy records covering the last two millennia: a tabular and visual overview [J]. *Geografiska Annaler Series a-Physical Geography*, 2009, 91A(1): 11-29.
- [9] Ge Q S, Zheng J Y, Hao Z X, et al. Temperature variation through 2000 years in China: An uncertainty analysis of reconstruction and regional difference [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2010, 37(3): L03703.
- [10] 刘禹, 安芷生, Linderholm H W, 等. 青藏高原中东部过去 2485 年以来温度变化的树轮记录 [J]. *中国科学 D 辑*, 2009, 39(2): 166-176. [LIU Yu, AN Zhisheng, Linderholm H W, et al. Annual temperatures during the last 2485 years in the mid-eastern Tibetan Plateau inferred from tree rings [J]. *Science in China (Series D: Earth Sciences)*, 2009, 39(2): 166-176.]
- [11] Saenger C, Came R E, Oppo D W, et al. Regional climate variability in the western subtropical North Atlantic during the past two millennia [J]. *Paleoceanography*, 2011, 26(2): PA2206.
- [12] Spielhagen R F, Werner K, Sørensen S A, et al. Enhanced modern heat transfer to the Arctic by warm Atlantic water [J]. *Science*, 2011, 331(6016): 450.
- [13] Millet L, Arnaud F, Heiri O, et al. Late-Holocene summer temperature reconstruction from chironomid assemblages of Lake Anterne, northern French Alps [J]. *Holocene*, 2009, 19(2): 317-328.
- [14] Wanamaker A D, Kreutz K J, Sch ne B R, et al. Coupled North Atlantic slope water forcing on Gulf of Maine temperatures over the past millennium [J]. *Climate Dynamics*, 2008, 31(2): 183-194.
- [15] Lamb H H. The early medieval warm epoch and its sequel [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 1965, 1: 13-37.
- [16] Bradley R S, Briffa K R, Crowley T J, et al. The scope of medieval warming [J]. *Science*, 2001, 292(5524): 2011.
- [17] Loehle C. Climate change: detection and attribution of trends from long-term geologic data [J]. *Ecological Modelling*, 2004, 171(4): 433-450.
- [18] Lamb H H. *Climate: present, past and future* [M]. Methuen, 1972
- [19] Loso M G. Summer temperatures during the Medieval Warm Period and Little Ice Age inferred from varved proglacial lake sediments in southern Alaska [J]. *Journal of Paleolimnology*, 2009, 41(1): 117-128.
- [20] Verschuren D, Laird K R, Cumming B F. Rainfall and drought in equatorial east Africa during the past 1,100 years [J]. *Nature*, 2000, 403(6768): 410-414.
- [21] Sinha A, Cannariato K G, Stott L D, et al. A 900-year (600 to 1500 A. D.) record of the Indian summer monsoon precipitation from the core monsoon zone of India [J]. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34(16): L16707.
- [22] Bertler N A N, Mayewski P A, Carter L. Cold conditions in Antarctica during the Little Ice Age - Implications for abrupt climate change mechanisms [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2011, 308(1-2): 41-51.
- [23] Sicre M A, Jacob J, Ezat U, et al. Decadal variability of sea surface temperatures off North Iceland over the last 2000 years [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2008, 268(1-2): 137-142.
- [24] Cronin T M, Dwyer G S, Kamiya T, et al. Medieval Warm Period, Little Ice Age and 20th century temperature variability from Chesapeake Bay [J]. *Global and Planetary Change*, 2003, 36(1-2): 17-29.
- [25] Richey J N, Hollander D J, Flower B P, et al. Merging late Holocene molecular organic and foraminiferal-based geochemical records of sea surface temperature in the Gulf of Mexico [J]. *Paleoceanography*, 2011, 26: 1209.
- [26] Black D E, Abahazi M A, Thunell R C, et al. An 8-century tropical Atlantic SST record from the Cariaco Basin: Baseline variability, twentieth-century warming, and Atlantic hurricane frequency [J]. *Paleoceanography*, 2007, 22 (26): A264204.
- [27] Koch J, Clague J J. Extensive glaciers in northwest North America during Medieval time [J]. *Climatic Change*, 2011, 107 (3-4): 593-613.
- [28] Graham N E, Hughes M K, Ammann C M, et al. Tropical Pacific -mid-latitude teleconnections in medieval times [J]. *Climatic Change*, 2007, 83(1-2): 241-285.
- [29] Cobb K M, Charles C D, Cheng H, et al. El Nino/Southern Oscillation and tropical Pacific climate during the last millennium [J]. *Nature*, 2003, 424(6946): 271-276.
- [30] Seager R, Burgman R, Kushnir Y, et al. Tropical Pacific forcing of North American Medieval megadroughts: Testing the concept with an atmosphere model forced by coral-reconstructed SSTs [J]. *Journal of Climate*, 2008, 21(23): 6175-6190.
- [31] 姚檀栋, Thompson L G. 青藏高原 2 ka 来温度与降水变化——古里雅冰心记录 [J]. *中国科学 D 辑*, 1996, 26(4):

- 348-353. [YAO Tandong, Thompson L G, et al. Temperature and methane records over the last 2 ka in Dasuopu ice core[J]. Science in China(Series D:Earth Sciences), 1996, 26(4): 348-353.]
- [32] 姚檀栋, Thompson L. 敦德冰心记录与过去 5ka 温度变化[J]. 中国科学 B 辑, 1992, 10: 1089-1093. [YAO Tandong, Thompson L G. Ice-core record and the temperature change of the past 5ka at Dundee [J]. Science in China, 1992, 10: 1089-1093.]
- [33] 姚檀栋, 杨梅学, 康兴成. 从古里雅冰心与祁连山树轮记录看过去 2000 年气候变化[J]. 第四纪研究, 2001, 21(6): 514-519. [YAO Tandong, YANG Meixue, KANG Xingcheng. Comparative study of the climate changes in the past 2 000 years by using ice core and tree ring records[J]. Quaternary Sciences, 2001, 21(6): 514-519.]
- [34] Matthews J A, Briffa K R. The 'Little Ice Age': Re-evaluation of an evolving concept [J]. Geografiska Annaler Series a-Physical Geography, 2005, 87A(1): 17-36.
- [35] Ogilvie A E J, Jonsson T. "Little Ice Age" research: A perspective from Iceland [J]. Climatic Change, 2001, 48(1): 9-52.
- [36] Le Roy Ladurie E. Times of feast, times of famine: a history of climate since the year [M]. Doubleday (Garden City, N. Y), 1971
- [37] National Research Council. Surface temperature reconstructions for the last 2 000 years [R]. National Academies Press, 2006.
- [38] Wigley T M L. The little ice age [J]. Nature, 1988, 335(6185): 23.
- [39] Holzhauser H, Magny M, Zumbuhl H J. Glacier and lake-level variations in west-central Europe over the last 3500 years [J]. Holocene, 2005, 15(6): 789-801.
- [40] Popa I, Kern Z. Long-term summer temperature reconstruction inferred from tree-ring records from the Eastern Carpathians [J]. Climate Dynamics, 2009, 32(7): 1107-1117.
- [41] Kreutz K J, Mayewski P A, Meeker L D, et al. Bipolar changes in atmospheric circulation during the Little Ice Age [J]. Science, 1997, 277(5330): 1294-1296.
- [42] Saenger C, Cohen A L, Oppo D W, et al. Surface-temperature trends and variability in the low-latitude North Atlantic since 1552 [J]. Nature Geoscience, 2009, 2(7): 492-495.
- [43] Richey J N, Poore R Z, Flower B P, et al. 1400 yr multiproxy record of climate variability from the northern Gulf of Mexico [J]. Geology, 2007, 35(5): 423.
- [44] Oppo D W, Rosenthal Y, Linsley B K. 2 000-year-long temperature and hydrology reconstructions from the Indo-Pacific warm pool [J]. Nature, 2009, 460(7259): 1113-1116.
- [45] Hendy E J, Gagan M K, Alibert C A, et al. Abrupt decrease in tropical Pacific Sea surface salinity at end of Little Ice Age [J]. Science, 2002, 295(5559): 1511-1514.
- [46] Dunbar R B, Wellington G M, Colgan M W, et al. Eastern Pacific sea surface temperature since 1600AD: The  $\delta^{18}\text{O}$  record of climate variability in Galápagos corals [J]. Paleoceanography, 1994, 9(2): 291-315.
- [47] Free M, Robock A. Global warming in the context of the Little Ice Age [J]. Journal of Geophysical Research-Atmospheres, 1999, 104(D16): 19057-19070.
- [48] 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(1): 54-56. [WANG Shaowu, YE Jinlin, GONG Daoyi. Climate in china during the little ice age [J]. Quaternary Sciences, 1998, 1(1): 54-56.]
- [49] Mangini A, Spötl C, Verdes P. Reconstruction of temperature in the Central Alps during the past 2000yr from a  $\delta^{18}\text{O}$  stalagmite record [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2005, 235(3-4): 741-751.
- [50] Goodkin N F, Hughen K A, Cohen A L, et al. Record of Little Ice Age sea surface temperatures at Bermuda using a growth-dependent calibration of coral Sr/Ca [J]. Paleoceanography, 2005, 20(4): PA4016.
- [51] Keigwin L D. The Little Ice Age and Medieval warm period in the Sargasso Sea [J]. Science, 1996, 274(5292): 1504-1508.
- [52] Wanamaker A D J, Kreutz K J, Schoene B R, et al. Gulf of Maine shells reveal changes in seawater temperature seasonality during the Medieval Climate Anomaly and the Little Ice Age [J]. Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology, 2011, 302(1-2): 43-51.
- [53] Blunden J, Arndt D S, Baringer M O. State of the climate in 2010 [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2011, 92(6): S32-36.
- [54] Jones P, Moberg A. Hemispheric and large-scale surface air temperature variations: An extensive revision and an update to 2001 [J]. Journal of Climate, 2003, 16(2): 206-223.
- [55] Jones P, Raper S, Kelly P, et al. Northern Hemisphere surface air temperature variations 1851-1984 [J]. Journal of climate and applied meteorology, 1986, 25(2): 161-179.
- [56] Smith T M, Reynolds R W. A global merged land-air-sea surface temperature reconstruction based on historical observations (1880-1997) [J]. Journal of Climate, 2005, 18(12): 2021-2036.
- [57] Arndt D S, Baringer M O, Johnson M R, et al. State of the Climate in 2009 [R]. 2010. 91(7). S26.
- [58] 秦大河, 陈振林, 罗勇, 等. 气候变化科学的最新认知 [J]. 气候变化研究进展, 2007, 3(2): 63-73. [QIN Dahe, CHEN Zhenlin, LUO Yong, et al. Updated understanding of climate change sciences [J]. Advances in Climate Change Research, 2007, 3(2): 63-73.]
- [59] Easterling D R, Meehl G A, Parmesan C, et al. Climate extremes: observations, modeling, and impacts [J]. Science, 2000, 289(5487): 2068-2074.
- [60] Meehl G A, Zwiers F, Evans J, et al. Trends in extreme weather and climate events: issues related to modeling extremes in projections of future climate change [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2000, 81(3): 427-436.
- [61] Liu X, Chen B. Climatic warming in the Tibetan Plateau dur-

- ing recent decades [J]. *International Journal of Climatology*, 2000, 20(14): 1729-1742.
- [62] Sutton R T, Dong B, Gregory J M, Land/sea warming ratio in response to climate change: IPCC AR4 model results and comparison with observations [J]. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34(2): 2701.
- [63] Shindell D T, Schmidt G A, Mann M E, et al. Solar forcing of regional climate change during the Maunder Minimum [J]. *Science*, 2001, 294(5549): 2149-2152.
- [64] Jones P D, Osborn T J, Briffa K R. The evolution of climate over the last millennium [J]. *Science*, 2001, 292(5517): 662-667.
- [65] Jungclauss J, Lorenz S, Timmreck C, et al. Climate and carbon-cycle variability over the last millennium [J]. *Climate of the Past*, 2010, 6(5): 723-737.
- [66] Vuille M V M, Francou B, Wagnon P, et al. Climate change and tropical Andean glaciers: Past, present and future [J]. *Earth-Science Reviews*, 2008, 89(3-4): 79-96.
- [67] 钱光明. 广东省气候业务技术手册[M]. 北京:气象出版社, 2008. [QIAN Guangming. Guangdong Province climate technical manual [M]. Beijing: China Meteorological, 2008.]
- [68] 陈特固,曾侠,钱光明,等. 华南沿海近 100 年气温上升速率估算[J]. *广东气象*, 2006(3): 1-5. [CHEN Tegu, ZENG Xia, QIAN Guangming, et al. Estimation on the warming rate at South China coastal areas over last 100 years [J]. *Guangdong Meteorology*, 2006(3): 1-5.]
- [69] 冯瑞权,吴池胜,王婷,等. 澳门近百年气候变化的多时间尺度特征[J]. *热带气象学报*, 2010, 26(4): 452-462. [FONG Soikun, WU Chisheng, WANG Ting, et al. Multiple time scales analysis of climate variation in macau during the last 100 years [J]. *Journal of Tropical Meteorology*, 2010, 26(4): 452-462.]
- [70] Hung C W. Temperature discontinuity caused by relocation of meteorological stations in Taiwan, *Terrestrial [J]. Atmospheric and Oceanic Sciences*, 2009, 20(4): 607-617.
- [71] 葛全胜,张学珍,郝志新,等. 中国过去 2000 年温度变化速率[J]. *中国科学 D 辑*, 2011, 41(9): 1233-1241. [GE Quansheng, ZHANG Xuezheng, HAO Zhixin, et al. Rates of temperature change in China during the past 2000 years [J]. *Science in China (Series D)*, 2011, 41(9): 1233-1241.]
- [72] Mann M E, Zhang Z, Hughes M K, et al. Proxy-based reconstructions of hemispheric and global surface temperature variations over the past two millennia [C]//*Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2008, 105(36): 13252-13257.
- [73] Idso C, Singer S F. *Climate Change Reconsidered [R]. Report of the Nongovernmental International Panel on Climate Change (NIPCC)*, 2009.
- [74] Allen M R, Frame D J, Huntingford C, et al. Warming caused by cumulative carbon emissions towards the trillionth tonne [J]. *Nature*, 2009, 458(7242): 1163-1166.
- [75] Rind D. The Sun's Role in climate variations [J]. *Science*, 2002, 296(5568): 673-677.
- [76] Schrijver C J, Livingston W C, Woods T N, et al. The minimal solar activity in 2008-2009 and its implications for long-term climate modeling [J]. *Geophysical Research Letters*, 2011, 38: L06701.
- [77] Shindell D T, Schmidt G A, Miller R L, et al. Volcanic and solar forcing of climate change during the preindustrial era [J]. *Journal of Climate*, 2003, 16(24): 4094-4107.
- [78] Lean J, Beer J, Bradley R. Reconstruction of solar irradiance since 1610: implications for climate change [J]. *Geophysical Research Letters*, 1995, 22(23): 3195-3198.
- [79] Bradley R. 1000 Years of climate change [J]. *Science*, 2000, 288(5470): 1353-1355.
- [80] 何尧启,汪永进,孔兴功,等. 贵州董哥洞近 1000 a 来高分辨率洞穴石笋  $\delta^{18}\text{O}$  记录[J]. *科学通报*, 2005, 50(11): 1114-1118. [HE Yaoqi, WANG Yongjin, KONG Xinggong, et al. High resolution stalagmite  $\delta^{18}\text{O}$  records over the past 1000 years from Dongge Cave in Guizhou[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2005, 50(11): 1114-1118.]
- [81] D'Arrigo R, Cook E R, Wilson R J, et al. On the variability of ENSO over the past six centuries [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2005, 32(3): L03711.
- [82] 戴英,张岩,葛俊逸. 北京地区过去 2650 年来暖季温度的年代际变化特征[J]. *科学通报*, 2011, 56(22): 1854-1854. [DAI Ying, ZHANG Yan, GE Junyi. Decadal-scale variability of warm season temperature in Beijing over the past 2650 years [J]. *Chinese Sci Bull*, 2011, 56(22): 1854-1854.]
- [83] Yancheva G, Nowaczyk N R, Mingram J, et al. Influence of the intertropical convergence zone on the East Asian monsoon [J]. *Nature*, 2007, 445(7123): 74-77.
- [84] Holmes J A, Cook E R, Yang B. Climate change over the past 2000 years in Western China [J]. *Quaternary International*, 2009, 194(1-2): 91-107.
- [85] Schwadron N, Spence H, Came R. Does the space environment affect the ecosphere [J]. *Eos Trans. AGU*, 2011, 92: 36.
- [86] Crowley T J. Causes of climate change over the past 1000 years [J]. *Science*, 2000, 289(5477): 270-277.
- [87] Mann M E, Bradley R S, Hughes M K. Global-scale temperature patterns and climate forcing over the past six centuries [J]. *Nature*, 1998, 392(6678): 779-787.
- [88] Fischer E M, Luterbacher J, Zorita E, et al. European climate response to tropical volcanic eruptions over the last half millennium [J]. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34(5): L05707.
- [89] Robock A. Volcanic eruptions and climate[J]. *Reviews of Geophysics*, 2000, 38(2): 191-219.
- [90] Stothers R B. The great Tambora eruption in 1815 and its aftermath [J]. *Science*, 1984, 224(4654): 1191.
- [91] Shi Y F, Yao T D, Yang B. Decadal climatic variations recorded in Guliya ice core and comparison with the historical documentary data from East China during the last 2000 years [J]. *Science in China Series D-Earth Sciences*, 1999, 42: 91-100.

- [92] Wuebbles D J, Hayhoe K. Atmospheric methane and global change [J]. *Earth-Science Reviews*, 2002, 57(3-4): 177-210.
- [93] Meure C M F, Etheridge D, Trudinger C, et al. Law Dome CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O ice core records extended to 2000 years BP [J]. *Geophysical Research Letters*, 2006, 33(14): L14810.
- [94] Overpeck J, Hughen K, Hardy D, et al. Arctic environmental change of the last four centuries [J]. *Science*, 1997, 278(5341): 1251-1256.
- [95] Ammann C M, Joos F, Schimel D S, et al. Solar influence on climate during the past millennium: Results from transient simulations with the NCAR climate system model [C]//*Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2007, 104(10): 3713-3718.
- [96] Kerr R A. A North Atlantic climate pacemaker for the centuries [J]. *Science*, 2000, 288(5473): 1984.
- [97] Delworth T L, Mann M E. Observed and simulated multidecadal variability in the Northern Hemisphere [J]. *Climate Dynamics*, 2000, 16(9): 661-676.
- [98] Gray S T, Graumlich L J, Betancourt J L, et al. A tree-ring based reconstruction of the Atlantic Multidecadal Oscillation since 1567 AD [J]. *Geophysical Research Letters*, 2004, 31(12): L12205.
- [99] MacDonald G M, Case R A. Variations in the Pacific Decadal Oscillation over the past millennium [J]. *Geophysical Research Letters*, 2005, 32(8): L08703.
- [100] Biondi F, Gershunov A, Cayan D R. North Pacific decadal climate variability since 1661 [J]. *Journal of Climate*, 2001, 14(1): 5-10.
- [101] Peterson D L. A multi-century perspective of variability in the Pacific Decadal Oscillation: new insights from tree rings and coral [J]. *Geophysical Research Letters*, 2002, 29(24): 2204.
- [102] Diaz H F, Pulwarty R S. An analysis of the time scales of variability in centuries-long ENSO-sensitive records in the last 1000 years [J]. *Climatic Change*, 1994, 26(2): 317-342.
- [103] 王绍武. 中世纪暖期与小冰期[J]. *气候变化研究进展*, 2010, 6(5): 388-390. [WANG Shaowu. Medieval Warm Period and Little Ice Age[J]. *Advances in Climate Change Research*, 2010, 6(5): 388-390.]
- [104] Yan H, Sun L, Wang Y, et al. A record of the Southern Oscillation Index for the past 2 000 years from precipitation proxies [J]. *Nature Geoscience*, 2011, 4(9): 611-614.

## RECENT PROGRESS ON SPECIFIC CLIMATIC STAGES AND DRIVING FORCES OVER LAST 2000 YEARS

HUANG Bojin, YU Kefu, CHEN Tegu

(Key Laboratory of Marginal Sea Geology, South China Sea Institute of Oceanology,  
Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510301, China)

**Abstract:** Temperature variations in the specific climatic periods of last 2000 years are helpful in understanding the modern climate status and its changing trend. So far four specific climatic periods have been widely identified for the period of last 2000 years, known as the Dark Ages Cold Period (DACP, 400-600 AD), Medieval Warm Period (MWP, 900-1400 AD), Little Ice Age (LIA, 1500-1850 AD) and 20<sup>th</sup> Century Warm Period (1920s AD-present). Although there are numerous publications addressing the climate details of these periods, there remain hot debates. Studies on DACP indicate that its onset and ending time are still a matter of debate. The debate on MWP is concentrated in its geographic extent (i. e. , global or local) and its magnitude of warmth, for example, whether it was warmer than the recent decades. The debate on LIA exists with its onset and ending time, and the temperature variation in different areas. The study of the 20<sup>th</sup> Century Warm Period is focused on its driving mechanism and influencing factors. It is generally recognized that the formation of these specific climate periods may be related to a series of factors, such as solar activities, volcanic eruptions, greenhouse gas emissions, air-sea interactions, etc. It was highly believed that the decadal-scale temperature variations prior to industrialization period (1860s) were largely driven by solar irradiance and volcanism, while the late 20<sup>th</sup> century warming was closely related to the rapid increase in greenhouse gases. Future study on the climate of past 2000 years will focus on revealing an accurate temperature process by improving the accuracy of climatic proxies, increasing the resolution of proxy-based temperatures, expanding the representative areas, and developing climate models.

**Key words:** past 2 000 years; climate change; special climatic periods