

文章编号: 1673-1719 (2006) 01-0021-07

小冰期气候变化研究新进展

New Advances in Research on the Little Ice Age Climate Change

王劲松^{1,2}, 陈发虎^{2,3}, 杨保³, 陈建徽²

(1 中国气象局 兰州干旱气象研究所 甘肃省干旱气候变化与减灾重点实验室, 甘肃 兰州 730020; 2 兰州大学 西部环境教育部重点实验室 中德干旱环境联合研究中心, 甘肃 兰州 730000; 3 中国科学院 寒区旱区环境与工程研究所 沙漠与沙漠化重点实验室, 甘肃 兰州 730000)



摘要: 利用冰芯、树轮、石笋、湖泊沉积和历史文献等多种代用资料进行小冰期的研究已取得了较大进展。研究表明: 小冰期是全球性的气候异常期, 时间跨度约为 500 a (1400–1900 AD); 小冰期气候变化的干(湿)/冷(暖)配置在全球存在区域性差异, 其变化幅度、起讫和持续时间也因地而异。小冰期气候的形成, 受到太阳、火山活动、大气环流, 以及大气、海洋和陆地间相互作用的影响。综合分析小冰期在全球的时空分布特点和形成的可能原因, 对小冰期研究中仍未解决的主要问题及今后研究的重点进行了展望。

关键词: 小冰期; 气候波动; 时空分布; 成因

中图分类号: P467 **文献标识码:** A

引言

“小冰期”(Little Ice Age, 简写LIA)的概念最早是由 Matthes^[1] 提出的, 当时主要用来描述全新世高温期之后的冰川活动时期, 是泛指全新世气候最适宜期之后的寒冷时期, 可称为广义小冰期^[2]。经过半个世纪的讨论, 当前概念下的小冰期则专指近 1000 a 以来中世纪暖期之后出现的寒冷时期。关于小冰期存在的证据, 最初起源于欧洲。但随着南、北半球高分辨率的气候代用资料的大量出现, 对小冰期只是欧洲气候事件的传统概念提出了挑战。为此, 1992 年在东京召开了小冰期气候国际

讨论会^[3], 会议揭示了 3 个重要事实: 近 500 a 全球并非经历了单调寒冷的小冰期; 近 500 a 最寒冷时期的出现时间存在区域差异; 不同季节的气候重建序列可能表现出不同的演变模式^[4]。近年来, 国外对小冰期是否为全球气候异常期的问题又展开了广泛讨论^[5–9]。中国在小冰期气候变化的研究上也取得了许多进展^[10–14], 这些研究成果为中国小冰期气候异常的存在提供了证据。

虽然有关小冰期的研究在国际上取得了较大进展, 但至今仍存在各种争论^[15]。争论的焦点为小冰期是否为近 1000 a 来全球性的异常期, 其持续时间多长及其是否具有区域性差异, 以及气候变幅如何

收稿日期: 2005–09–14; 修订日期: 2005–12–06

基金项目: 中国气象局兰州干旱气象研究所干旱气象科学研究基金 (IAM200413); 科技部重大国际合作项目 (2002CSB); 教育部博士点基金 (20020730010) 资助

作者简介: 王劲松 (1968–), 女, 苗族, 副研究员/硕士, 主要从事干旱气候研究。E-mail: wangjs02@lzu.edu.cn

等方面,本文综合分析近10 a来国际上对小冰期气候变化的最新研究成果,试图回答上述问题,以促进国内对小冰期气候和环境的深入研究。

1 全球有关LIA的记录

1.1 欧洲

对捷克地温的研究表明^[16],小冰期有两个明显的寒冷阶段:1400–1500AD、1600–1700AD,其中最低温度发生在(1650±30)AD。挪威的冰川资料表明^[17],小冰期时有明显的冰进发生。沉积岩芯^[18]记录了冰岛小冰期的存在事实,其中小冰期后期与1780–1920AD海冰增加的时期是相当一致的。在挪威通过摇蚊获取的气温表明^[19],小冰期的夏季平均温度比现在低0.5℃。爱尔兰石笋氧同位素的研究则证实,小冰期是一种区域性而非局地性的气候特征^[8]。可见,欧洲特别是北欧确实在14–19世纪间发生过气候异常:冰川前进、气候寒冷。

1.2 美洲

Stuiver *et al.*^[20]对格陵兰冰盖GISP2冰芯 $\delta^{18}\text{O}$ 序列的分析表明,小冰期时段为1350–1800AD。随后,Jensen *et al.*^[6]对格陵兰冰盖GRIP冰芯的研究表明,在1300–1900AD期间降温十分显著。这些都表明了小冰期在格陵兰冰盖存在的事实。加拿大纹泥厚度特征指示,其小冰期表现为冷湿的特征^[21]。阿拉斯加的树轮揭示^[22],小冰期3次冰进时间分别为1200–1300AD、1610–1750AD和1870–1900AD。对加勒比海的沉积岩芯分析表明,小冰期阶段该地区较为湿润^[23]。总的来看,北美的小冰期时段为1300–1850AD。除了处于高纬度的格陵兰外,北美的小冰期气候以冷湿为主要特征。

中南美洲小冰期研究近年来有较大进展。O'Hara *et al.*^[24]的研究表明,在1640–1915AD墨西哥经历了长期严重的干旱,研究认为这种严重干旱与小冰期的出现有关。委内瑞拉在小冰期时期气候以干冷为特征^[7];秘鲁、阿根廷的小冰期也表现出干旱的特征^[25–26]。从已有的研究来看,中南美洲在中世纪暖期之后确实存在气候异常,且在气候寒冷

时段出现严重干旱。

1.3 非洲

考古学的研究认为,在非洲南部小冰期气候特征是冷期与干期对应,暖期与湿期对应^[27]。东非硅藻记录的小冰期在约600~200 aBP,是一个冷干的时期^[28]。近年来,较高分辨率的小冰期研究取得了较大进展。Repinski *et al.*^[29]对非洲南部石笋稳定同位素的分析指出,在小冰期阶段该区气候为干冷。对石笋同位素的测量指出,1700AD为南非小冰期的最冷时期^[30]。非洲大陆的小冰期气候波动总体来说,呈现冷干/暖湿的气候配置。

1.4 大洋洲

新西兰南方的阿尔卑斯山冰川在1300–1900AD表现出明显的大规模前进^[31],与小冰期时段有很好的对应。新西兰石笋氧同位素表明^[32],小冰期有3个冷期:1400–1500AD、1600–1700AD和1850–1920AD。利用澳大利亚大堡礁8个珊瑚钻芯的氧同位素重建的420 a太平洋西南海表温度和盐度表明^[9],在小冰期期间,该区具有较高的海表温度和盐度,纬向温度梯度加强,大气环流加强。在1870年小冰期结束时,该区海表温度和盐度则突然降低。

1.5 亚洲

我国学者对亚洲小冰期气候的研究成果较多,继竺可桢^[10]的开创性研究之后,王绍武等^[11]、张德二^[14]、王苏民等^[33]先后做过综述。Yang *et al.*^[34]重建的中国近2000 a曲线显示,自1400AD后中国开始进入冷期,一直持续到1920AD,并指出17世纪中期是中国近1000 a来最冷的时期。近年利用高分辨率代用资料又得到一些新的研究结果:用北京石花洞石笋年层厚度重建的暖季温度,其温度下降时段正好与小冰期吻合^[35];对陕西佛爷洞石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^{13}\text{C}$ 的分析表明^[36],小冰期3个冷期分别为1545–1640AD、1675–1745AD和1790–1825AD,其中在1475–1690AD为湿期,1690–1825AD为干期。对台湾湖泊沉积的分析指出^[37],小冰期气候多为冷干。姚檀栋等^[12]对敦德冰芯氧同位素的分析认为,小

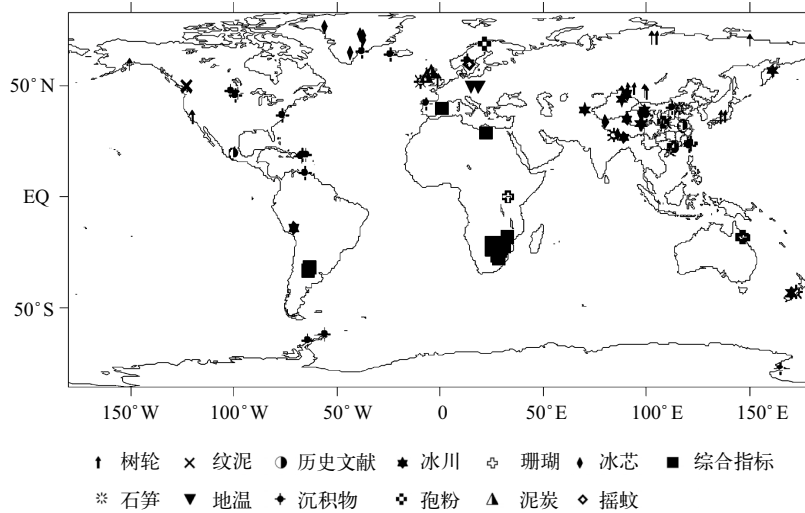


图1 代用指标指示的小冰期在全球的分布

Fig. 1 The distribution of the LIA indicated by proxy data in the world

冰期的3个冷期分别为1420–1520AD、1570–1680AD和1770–1890AD,其中最冷期为第2冷期。3次冷期在古里雅冰芯中也有明显记录,且表现为冷期降水减少、暖期降水增加^[13]。喜马拉雅山中段的达索普冰芯的积累量表明^[38],积累量在1601–1650AD是低谷期,而1651–1700AD明显增大,其中1651–1700AD是高积累量时期。青藏高原的冰川在小冰期时存在明显冰进和面积增大的现象^[39]。可见,小冰期期间中国不同气候区的区域降水和温度变化不同。

日本近年来的研究表明^[40,31],日本小冰期与中国小冰期具有较为一致的特点。日本柳杉 $\delta^{13}\text{C}$ 的变化主要反映了温度的变化,1400–1920AD为相对冷期,而1600–1700AD的温度比平均温度低 2°C ^[41]。在中亚,16–19世纪的小冰期所表现出的冷期亦非常显著^[42]。Jacoby *et al.*^[43]、D'Arrigo *et al.*^[44]分别利用西伯利亚和蒙古的树轮宽度,给出了这两个地区与小冰期对应的冷期。

亚洲小冰期气候变化除在中国区域有较多的记录外,在日本也较多,同时还涉及中亚、西伯利亚、蒙古,而在南亚和中东很少。

1.6 南极地区

Khim *et al.*^[45]对南极半岛海洋沉积物进行的分析表明,其磁化率曲线表现出显著的振荡,对中世

纪暖期和小冰期有明显的反映。Domack *et al.*^[46]的研究也发现了小冰期在环南极地区的证据。

2 LIA 时空分布和变化幅度

2.1 LIA 的空间分布

综合上述研究成果,小冰期可定义为自1300AD中世纪暖期结束以来,持续时间超过100a的气候异常期。图1根据已有的研究,给出了小冰期在世界范围的空间分布,由图可见,在低、中、高纬度区域都存在小冰期,各种气候代用资料均记录到了LIA的存在。

在上述定义下,可知自中世纪暖期以来的近千年间,树轮、湖泊、石笋、孢粉、考古等古气候代用资料均记录到全球不同地区出现的气候异常,并以持续上百年的寒冷为主要特征。小冰期是全球性的气候异常期^[5,47,48],但小冰期的分布并不具有空间均匀性。

2.2 LIA 发生的时间

全球不同地区小冰期的起讫时间并不一致^[49]。由全球各大洲1000a来气候变化的代表性曲线(图略)表明,近1000a间,各条曲线总的趋势表现出大的冷暖期出现时间基本一致。大体上从14世纪初到19世纪末为一寒冷的时期,只是这一冷期的具体起始和结束时间在各地有所不同。平均来说,

小冰期时间跨度约为 500 a (1400–1900AD)。对亚洲大陆而言,这种变冷过程较欧洲、美洲和非洲大陆开始得要晚一些。大洋洲的新西兰,其小冰期的开始时间与欧洲、美洲和非洲大陆不同,而与亚洲大陆较为一致,这种差异值得进一步探讨。

已有的研究证明,大多数地区的小冰期包含3个冷期,其中最冷时段主要发生在17世纪。一般来说,在海拔和纬度较高的地区,小冰期出现和结束的时间较早,在低海拔和低纬地区则相对较晚。

2.3 LIA 气候的变化幅度

由于降水的空间分布差异较大,利用代用资料对降水的恢复有一定的困难,因此有关小冰期期间降水变化幅度的定量研究还不是很多。对古里雅冰芯积累量和 $\delta^{18}\text{O}$ 的分析表明^[13],小冰期期间积累量总体是高的,降水量是增加的;但在小冰期内部,气温下降伴随降水的减少,气温上升伴随降水的增加。17世纪气候寒冷,年降水量不到 200 mm;18世纪气候转暖,年降水量增加到 210 mm;19世纪气候再度转冷并达到小冰期以来的最寒冷阶段,年降水总量也急剧减少到 180 mm 左右。马金珠等^[50]对沙漠降水补给量的研究发现,小冰期整体是湿润的。刘健等^[51]通过数值模拟则发现,东亚地区尤其中国东部年降水量在小冰期期间是增加的,但东南亚和印度地区的年降水量均有所减少。夏季的降水空间变化格局与年平均降水类似,但其变幅要大于年变幅。然而,仍有不少研究认为^[52–53],在中国小冰期是干旱的。

有关小冰期内的温度变化幅度, Winter *et al.*^[54] 的研究表明,与目前相比,加勒比海海表温度降低了 2~3℃。在 1300–1850AD, 北非毛里塔尼亚沿岸北大西洋海表温度与目前相比降低了 3~4℃^[55]。大西洋切萨皮克海湾在小冰期初期 1450–1530AD 和小冰期末期 1720–1850AD, 春季海水温度比目前低了 2~4℃^[56]。新西兰 1430–1670AD 是降温幅度最大的时期,比目前温度降低了约 0.8℃^[57]。Tyson *et al.*^[30] 的研究指出,南非小冰期的最冷时期,温度比现今降低了 1℃。根据摇蚊化石恢复的挪威小冰期时夏季平均温度比现在低 0.5℃^[19]。小冰期时中国的平均

气温比 20 世纪暖期平均低 1℃ 左右^[58]; 北半球高纬和南极地区平均气温可能更低,较 20 世纪暖期平均气温低 1.5~2℃^[58]。

上述研究表明,小冰期期间全球各地均有明显的降温,但降温幅度不尽相同。小冰期的温度异常幅度在陆地上不超过 2℃,而在海洋上则可达到 4℃。降温幅度在高纬、中纬地区和赤道附近,以及南、北半球之间都存在较大的差异。一般来说,低海拔和低纬地区小冰期温度变化的幅度较小。尽管各地降温幅度不同,但平均大约降低 1℃ 还是可信的。

3 LIA 形成机制的讨论

近年来的研究进一步证实了小冰期气候与火山活动增强有关^[59]; 另外,太阳活动弱对应于温度偏低时期^[60]。Jones *et al.*^[61] 认为,小冰期阶段温度的降低既与 ENSO 有关,还与北大西洋涛动 (NAO) 指数有关。也有研究认为^[5],大气经向环流的加强是小冰期气候阶段的主要特征。中国的小冰期很可能受到由于海陆热力差异所引起的东亚季风环流异常的影响^[62]。小冰期的寒冷还与北大西洋温盐环流 (THC) 的变化有关^[56],当 THC 强度减弱时,有利于寒冷气候的发生。

数值模拟方面,主要强调了太阳辐射异常,以及火山活动和海洋热传输的强迫机制^[63]。太阳活动减弱,会引起高纬度地区的大幅降温,但中纬地区的降温不如高纬地区那么严重。刘健等^[51]利用最新的太阳辐射、火山灰记录等资料,通过模拟试验反映出太阳辐射和火山活动的作用,是引起小冰期气候寒冷的最主要原因。

可见,小冰期气候的形成机制是复杂的,既受到太阳活动的外部强迫作用,也受到大气环流本身变化的内部因子的影响,以及大气和海洋、大气和陆地相互作用带来的影响。总之,太阳活动弱、火山活动强是主要的强迫因子,而大气环流的变化(经向环流的增强、季风强度的变化等)和海洋环流的作用可能是外源强迫通过地球系统内部的反馈作用,进一步加强或削弱外源强迫,从而导致各地区小冰期起始时间和变化强度及形式出现差异。

4 结论

(1) 在北半球中高纬地区已经有了大量丰富的古气候代用资料证明小冰期的气候变化;在低纬地区,也有相关的研究。在南半球,由于资料较少,对小冰期气候波动及古气候代用资料的研究要相对少些。但总的来说,已经从全球范围找到了相当多的证据来证明,小冰期是近 1000 a 来全球性的气候异常期。

(2) 研究者普遍认为在中世纪暖期之后,全球都经历了持续数世纪的相对寒冷的小冰期。但对各地小冰期起止时间的确定还存在差别。在高海拔和高纬度地区,小冰期出现和结束的时间较早,在低海拔和低纬地区则相对较晚,且前者小冰期气温变化的幅度较后者大。

(3) 太阳活动的强迫是小冰期气候形成的外部因素;火山活动,大气环流的变化,大气和海洋及大气和陆地间的相互作用是小冰期气候形成的内部因子。

(4) 小冰期除了冷/暖特征外,是否还存在干/湿特征,对这一问题的定量研究还较少。也就是说,当前小冰期气候研究的重点应该是进一步定量地分析区域响应的特点及其变幅;另外,小冰期的气候背景也是值得深入探讨的问题。

(5) 迄今为止,对小冰期气候的模拟通常是进行一些敏感性试验,一般认为太阳辐射异常和火山灰的作用导致了气候变冷。但对于模拟结果与小冰期记录的对比与检验的工作,以及它们之间动力学关系的研究还不多。■

致谢: 论文的完成得到兰州大学中德干旱环境联合研究中心的老师和同学们的帮助,承蒙张平中教授、赵艳博士提出宝贵意见,在此一并致谢。

参考文献

- [1] Matthes F E. Report of the committee on glaciers, transactions of the America [J]. Geophysical Union, 1939, 20: 518-523.
- [2] Lamb H H. Climate: Present, Past and Future [M]. London: Methuen, 1977: 100, 221, 430.
- [3] Mikami T. Proceedings of the International Symposium on the Little Ice Age Climate [C]. Tokyo: Tokyo Metropolitan University, 1992: 1-5,141-174, 253-277.
- [4] 杨保. 小冰期以来中国十年尺度气候变化时空分布特征初步研究 [J]. 干旱区地理, 2001, 24 (1): 67-73.
- [5] Kreutz K J, Mayewski P A, Meeker L D, *et al.* Bipolar changes in atmospheric circulation during the Little Ice Age [J]. Science, 1997, 277:1294-1296.
- [6] Jensen D D, Mosegaard K, Gundestrup N, *et al.* Past temperatures directly from the Greenland ice sheet [J]. Science, 1998, 282: 268-271.
- [7] Haug G H, Hughen K A, Sigman D M, *et al.* Southward migration of the intertropical convergence zone through the Holocene [J]. Science, 2001, 293:1304-1308.
- [8] McDermott F, Matthey D P, Hawkesworth C. Centennial-scale Holocene climate variability revealed by a high-resolution speleothem $\delta^{18}\text{O}$ record from SW Ireland [J]. Science, 2001, 294:1328-1331.
- [9] 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, 295:1511-1514.
- [10] 竺可桢. 中国近 5000 年来气候变迁的初步研究 [J]. 中国科学 (B 辑), 1973, 16 (2): 291-296.
- [11] 王绍武, 叶瑾琳, 龚道溢. 中国小冰期的气候 [J]. 第四纪研究, 1998, 18 (1): 54-62.
- [12] 姚檀栋, 谢自楚, 武筱舫, 等. 敦煌冰帽中的小冰期气候记录 [J]. 中国科学(B 辑), 1990, 20 (11):1196-1201.
- [13] 姚檀栋, 焦克勤, 杨志红, 等. 古里雅冰芯中小冰期以来的气候变化 [J]. 中国科学(B 辑), 1995, 25 (10): 1108-1114.
- [14] 张德二. 中国的小冰期气候及其与全球变化的关系 [J]. 第四纪研究, 1991, 11(2): 104-111.
- [15] Jones P D, Briffa K R. Preface: The "Little Ice Age": Local and global perspectives [J]. Climate Change, 2001, 48(1): 5-8.
- [16] Bodri L, Cermak V. Climate change of the last millennium inferred from borehole temperatures: regional patterns of climatic changes in the Czech Republic-part III [J]. Glob. and Planet. Change, 1999, 21: 225-235.
- [17] Matthews J A, Dahl S O, Nesje A, *et al.* Holocene glacier variations in central Jotunheimen, southern Norway based on distal glaciolacustrine sediment cores [J]. Quat. Sci. Rev., 2000, 19: 1625-1647.
- [18] Jennings A E, Hagen S, Hardardottir J, *et al.* Oceanographic change and terrestrial human impacts in a post AD1400 sediment record from the Southwest Iceland shelf [J]. Climate Change, 2001,48(1): 83-100.
- [19] Brooks S J, Birks H J B. Chironomid-inferred air temperatures from

- Lateglacial and Holocene sites in north-west Europe: progress and problems [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2001, 20: 1723-1741.
- [20] Stuiver M, Grootes P M, Baraziunas T F. The GISP2 $\delta^{18}\text{O}$ climate record of the past 16500 years and the role of the sun, ocean and volcanoes. [J]. *Quaternary Research*, 1995, 44: 341-354.
- [21] Nederbragt A J, Thurow J W. A 6000 year varve record of Holocene climate in Saanich Inlet, British Columbia, from digital sediment colour analysis of ODP Leg 169S cores [J]. *Marine Geology*, 2001, 174: 95-110.
- [22] Calkin P E, Wiles G C, Barclay D J. Holocene coastal glaciation of Alaska [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2001, 20: 449-461.
- [23] Nyberg J, Kuijpers A, Malmgren B A, *et al.* Late Holocene changes in precipitation and hydrography recorded in marine sediments from the Northeastern Caribbean Sea [J]. *Quaternary Research*, 2001, 56: 87-102.
- [24] O'Hara S L, Metcalfe S E. The climate of Mexico since the Aztec period [J]. *Quaternary International*, 1997, 43: 1-7.
- [25] Goodman A Y, Rodbell D T, Seltzer G O, *et al.* Subdivision of glacial deposits in Southeastern Peru based on pedogenic development and radiometric ages [J]. *Quaternary Research*, 2001, 56: 31-50.
- [26] Cioccale M A. Climatic fluctuations in the central region of Argentina in the last 1000 years [J]. *Quaternary International*, 1999, 62: 35-47.
- [27] Huffman T N. Archaeological evidence for climatic change during the last 2000 years in Southern Africa [J]. *Quaternary International*, 1996, 33: 55-60.
- [28] Stager J C, Cumming B, Meeker L. A high-resolution 11400-yr diatom record from Lake Victoria, East Africa [J]. *Quaternary Research*, 1997, 47: 81-89.
- [29] Repinski P, Holmgren K, Lauritzen S E, *et al.* A late Holocene climate record from a stalagmite, Cold Air Cave, Northern Province, South Africa [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 1999, 150: 269-277.
- [30] Tyson P D, Karlen W, Holmgren K, *et al.* The Little Ice Age and medieval warming in South Africa [J]. *South African Journal of Science*, 2000, 96: 121-126.
- [31] Winkler S. The 'Little Ice Age' maximum in the Southern Alps, New Zealand: Preliminary results at Mueller Glacier [J]. *The Holocene*, 2000, 10: 643-647.
- [32] Hندی C H, Wilson A T. Palaeoclimate data from speleothems [J]. *Nature*, 1968, 219: 48-51.
- [33] 王苏民, 刘健, 周静. 我国小冰期盛期的气候环境 [J]. *湖泊科学*, 2003, 15 (4): 369-376.
- [34] Yang B, Braeuning A C, Johnson K R. General characteristics of temperature variation in China during the last two millennia [J]. *Geophysical Research Letters*, 2002, 29 (9): 381-384.
- [35] Tan M, Liu T S, Hou J Z, *et al.* Cyclic rapid warming on centennial-scale revealed by a 2650-year stalagmite record of warm season temperature [J]. *Geophysical Research Letters*, 2003, 30 (12): 191-194.
- [36] Paulsen D E, Li H C, Ku T L. Climate variability in central China over the last 1270 years revealed by high-resolution stalagmite records [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2003, 22: 691-701.
- [37] 罗建育, 陈镇东, 万政康. 台湾大鬼湖的古气候研究 [J]. *中国科学 (D辑)*, 1996, 26 (5): 474-480.
- [38] 段克勤, 王宁练, 蒲健辰. 达索普冰芯记录的印度季风突变 [J]. *科学通报*, 2001, 26 (24): 2069-2073.
- [39] 王宁练, 丁良福. 唐古拉山东段布加岗日地区小冰期以来的冰川变化研究 [J]. *冰川冻土*, 2002, 24 (3): 234-244.
- [40] Tagami Y. Some remarks on the climate in the Medieval Warm Period of Japan [C] // *Paleoclimate and environmental variability in Austral-Asian transect during the past 2000 years (IGBP Proceedings)*. Nagoya, Japan: Nagoya University, 1996: 115-119.
- [41] Kitagawa H, Matsumoto E. Climatic implications in a Japanese cedar (*Cryptomeria japonica*) during the last two millennia [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 1995, 22 (16): 2155-2188.
- [42] Narama C. Late Holocene variation of the Raigorodskogo Glacier and climate change in the Pamir-Alai, central Asia [J]. *Catena*, 2002, 48: 21-37.
- [43] Jacoby G C, Lovelius N V, Shumilov O I, *et al.* Long-term temperature trends and tree growth in the Taymir region of Northern Siberia [J]. *Quaternary Research*, 2000, 53: 312-318.
- [44] D'Arrigo R, Jacoby G, Pederson N, *et al.* Mongolian tree-rings, temperature sensitivity and reconstructions of Northern Hemisphere temperature [J]. *The Holocene*, 2000, 10: 669-672.
- [45] Khim B K, Yoon H I, Kang C Y, *et al.* Unstable climate oscillations during the late Holocene in the Eastern Bransfield Basin, Antarctic Peninsula [J]. *Quaternary Research*, 2002, 58: 234-245.
- [46] Domack E W, Leventer A, Dunbar R, *et al.* Chronology of the Palmer Deep site, Antarctic Peninsula: A Holocene palaeoenvironmental reference for the circum-Antarctic [J]. *The Holocene*, 2000, 11: 1-9.
- [47] Broecker W S. Was the medieval warm period global? [J]. *Science*, 2001, 291: 1497-1499.
- [48] Soon W, Baliunas S, Idso C, *et al.* Reconstructing climate and environmental changes of the past 1000 years: a reappraisal [J]. *Energy*

- and Environment, 2003, 14 (2/3): 233-299.
- [49] 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: 779-787.
- [50] 马金珠, 陈发虎, 赵华. 1000年以来巴丹吉林沙漠地下水补给与气候变化的包气带地球化学记录 [J]. 科学通报, 2004, 49 (1): 22-26.
- [51] 刘健, 陈星, 王苏民, 等. 小冰期气候的模拟 [J]. 自然科学进展, 2004, 14 (4): 462-468.
- [52] 罗建育, 陈镇东. 台湾高山湖泊沉积记录指示的近4000年气候与环境变化 [J]. 中国科学(D辑), 1997, 27 (4): 366-372.
- [53] 秦小光, 刘东生, 谭明, 等. 北京石花洞石笋微层灰度变化特征及其气候意义(II): 灰度的年际变化 [J]. 中国科学 (D辑), 2000, 30 (3): 239-248.
- [54] Winter A, Ishioroshi H, Watanabe T, *et al.* Carribean sea surface temperatures: Two-to-three degree cooler than present during the Little Ice Age [J]. Geophysical Research Letters, 2000, 27: 3365-3368.
- [55] deMenocal P, Ortiz J, Guilderson T, *et al.* Coherent high- and low-latitude climate variability during the Holocene warm period [J]. Science, 2000, 288: 2198-2202.
- [56] 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: 17-29.
- [57] Williams P W, Marshall A, Ford D C, *et al.* Palaeoclimatic interpretation of stable isotope data from Holocene speleothems of the Waitomo district, North Island, New Zealand [J]. The Holocene, 1999, 9(2): 649-657.
- [58] 王绍武. 小冰期气候的研究 [J]. 第四纪研究, 1995, 15 (3): 202-212.
- [59] Lamoureux S F, England J H, Sharp M J, *et al.* A varve record of increased 'Little Ice Age' rainfall associated with volcanic activity, Arctic Archipelago, Canada [J]. The Holocene, 2001, 11: 243-249.
- [60] Stuiver M, Braziunas T F, Grootes P M, *et al.* Is there evidence for solar forcing of climate in the GISP2 oxygen isotope record? [J]. Quaternary Research, 1997, 48: 259-266.
- [61] Jones P D, Osborn T J, Briffa K R. The evolution of climate over the last millennium [J]. Science, 2001, 292: 662-667.
- [62] Qian W H, Zhu Y F. Little Ice Age climate near Beijing, China, inferred from historical and stalagmite records [J]. Quaternary Research, 2002, 57: 109-119.
- [63] Frenzel B, Galli M, Nanni T, *et al.* Solar output and climate during the Holocene [C] // 14th EPC/ESF Workshop. Stuttgart: Fischer, 1995: 131-160.

欢迎订阅《气候变化研究进展》

《气候变化研究进展》是由中国气象局国家气候中心主办的综合性学术刊物, 主要发表国内外气候变化研究的最新成果与进展以及与气候变化有关的交叉学科, 如地球科学、生态、环境科学、人文、社会科学等方面的最新研究论文; 报道全球变化最新的观测事实、重要信息及应对全球气候变化的适应、减缓措施和技术研究成果等; 反映与气候变化相关的各类国际、国内重大活动、重大科技计划及国际环境外交谈判的信息。主要栏目有: “研究论文”、“综述”、“研究短论”、“动态快讯”、“学术争鸣”、“对策建议”、“书评”等。

《气候变化研究进展》适宜气候变化及其相关领域的科研、业务人员、大专院校师生以及相关政府工作人员阅读, 关注气候变化的公众也可从中获取有用的信息及知识。

本刊为双月刊, 单月月底出版, 每年出版6期, 每期定价12元, 全年72元。订阅处: 全国各地邮局。国内邮发代号: 80-463。

编辑部地址: 北京市海淀区中关村南大街46号国家气候中心《气候变化研究进展》编辑部 100081

联系人: 苗秋菊 电话/传真: 010-58995171

E-mail: accr@cma.gov.cn <http://www.climatechange.cn>