

# 千年气候模拟与中国东部温度重建序列的比较研究

刘健 Hans von Storch 陈星 Eduardo Zorita 郑景云 王苏民

(中国科学院南京地理与湖泊研究所, 南京 210008; Institute for Coastal Research, GKSS Research Center, D-21502 Geesthacht, Germany; 南京大学大气科学系, 南京 210093; 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101. E-mail: jianliu@niglas.ac.cn)

**摘要** 利用全球海气耦合气候模式 ECHO-G 进行的 1000 年长时间积分气候模拟试验与中国东部区域温度重建资料作对比, 以验证 ECHO-G 模拟中国区域气候的能力, 并探讨近千年来中国区域气候变化的原因. 重建资料是中国东部地区(25°~40°N, 105°E 以东)1000 年来分辨率为 30 年的冬半年温度距平变化序列. 模拟试验以随时间变化的有效太阳辐射、CO<sub>2</sub> 浓度和 CH<sub>4</sub> 浓度场为外强迫, 从 1000 年开始积分至 1990 年. 结果表明: 重建和模拟结果的相关系数为 0.37, 置信度为 97.5%. 模拟和重建结果均反映出了 1000~1300 年的中世纪暖期、1300~1850 年的小冰期和 1900 年之后的升温期. 对于 1300~1850 年的小冰期和 1900 年之后的升温期, 模拟和重建的正负距平基本一致, 尤其是 1670~1710 年 Maunder 太阳黑子最小期时, 模拟和重建值都达到了温度低谷, 且无位相差异. 但对 1000~1300 年的中世纪暖期, 模拟与重建资料存在显著差异, 这与重建资料质量降低有关. 模拟的变幅(1.62 K)略小于重建值(2.0 K), 但两者具有较好的可比性. 模拟结果的诊断分析表明, 在 1000 年尺度上, 太阳辐射和火山活动是控制全球和区域温度变化的主要因子, 而在最近百年尺度上, 温室气体含量的变化对快速增温起着更为重要的作用.

**关键词** 气候 模拟 重建 中国东部

20 世纪 90 年代以来, 在“过去全球变化”(PAGES)和“气候变化与可预报性”(CLIVAR)两大国际研究计划的推动下, 各国科学家在过去两千年(2 ka)以来气候环境变化的研究方面作了大量工作<sup>[1-3]</sup>. 但无论国内还是国外, 大部分工作集中在各种气候代用资料(历史文献、树轮、冰芯、湖芯等)的获取及气候序列的重建上<sup>[4-15]</sup>, 对于 2 ka 以来不同时间尺度气候变化的影响因素和动力机理的研究相对比较薄弱<sup>[16-18]</sup>.

长时间积分气候模拟是在大气科学和计算机科学共同飞速发展下出现的新生事物, 对于认识更长时间尺度气候变化的原因和动力机理起着重要作用. 由于它对于计算机系统的要求较高, 近年来只有美国、德国、比利时等欧美发达国家才逐步开展这方面的工作<sup>[19-21]</sup>. 受计算机系统和气候模式系统的限制, 此类工作国内迄今为止还未开展. 本文介绍了利用德国全球海气耦合气候模式 ECHO-G<sup>[22]</sup>进行的 1000 个模式年的长时间积分气候模拟试验结果与中国东部区域温度重建资料对比的情况, 一方面帮助检验模式模拟区域气候的能力, 另一方面帮助认识历史气候重建序列的一些不足, 进而理解中国过去气候变化的原因和机理, 并促进国内开展相关研究, 以达到更全面地认识历史气候变化规律、提高未来气候

变化趋势的预测能力、为社会经济的可持续发展服务的目的.

## 1 模式与模拟

全球海气耦合气候模式 ECHO-G 是目前国际上进行长时间气候模拟最合适的气候模式之一. 它由全球大气环流模式 ECHAM4 和海洋环流模式 HOPE-G 耦合而成<sup>[22]</sup>. ECHAM4 和 HOPE-G 均为德国马普气象研究所(Max Planck Institute for Meteorology, MPI)开发. ECHAM4 是第四代大气环流谱模式, 它以原始方程为基础, 采用混合 p-σ 坐标, 水平分辨率为 T30, 相当于 3.75° × 3.75°, 垂直分 19 层, 其中 200 hPa 以上有 5 层, 模式顶层为 30 hPa, 相当于 30 km. 海洋模式 HOPE-G 的水平分辨率从相当于 T42 的 2.8° × 2.8° 到赤道地区的 0.5° × 0.5°, 垂直方向共 20 层. 该模式在现代气候模拟和古气候模拟研究中均得到较多应用, 其气候模拟能力已得到可靠验证<sup>[23,24]</sup>.

利用这个模式进行的 1000 年长时间积分模拟试验包括控制试验(固定强迫条件)和强迫试验. 控制试验是以现代气候状况为固定强迫积分 1000 年, 其结果能反映年际和年代际尺度的气候振荡, 但不能模拟出中世纪暖期和小冰期等百年以上尺度的气候变化<sup>[25]</sup>. 强迫试验是在随时间变化的 3 种外强迫驱动下积分 1000 年. 这 3 种外强迫是太阳活动、温室气体浓度(包括 CO<sub>2</sub> 和 CH<sub>4</sub>)和平流层火山气溶胶的辐射效应<sup>[26,27]</sup>. 图 1 是上述强迫因子的时间变化. 关于这个模拟试验更详细的情况可参见 von Storch 等<sup>[28]</sup>的报道. 本文就是采用此强迫试验结果与重建资料作对比.

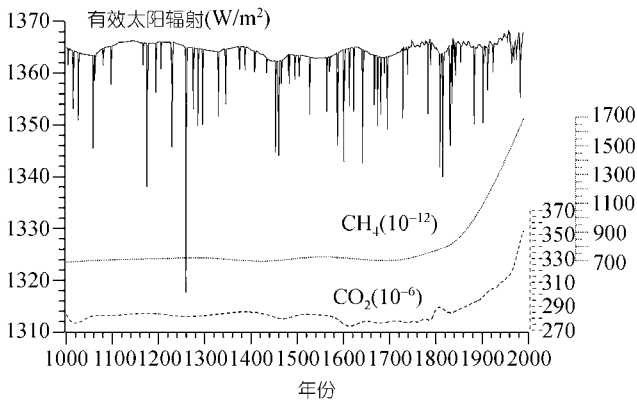


图1 强迫因子的时间变化

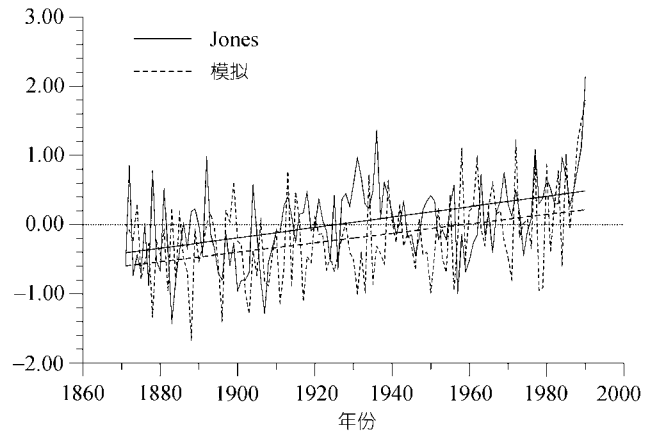


图2 中国东部区域冬半年温度距平变化的模拟与 Jones 观测集成资料的对比

## 2 资料

中国拥有丰富的长时段历史文献记录资料. 中国学者在发掘利用这些资料进行过去历史气候变化研究方面已开展了大量工作. 在此基础上, 近年来葛全胜等参照、发展和完善竺可桢<sup>[28,29]</sup>利用物候资料对中国过去 5000 年冷暖变化进行推断的方法, 根据收集、整理的历史文献冷暖记载及相关研究成果, 对中国东部地区(25°~40°N, 105°E 以东)过去 2000 年冬半年的温度状况进行了定量重建, 建立了中国东部地区过去 2000 年分辨率为 10~30 年的冬半年温度距平变化序列<sup>[30]</sup>. 本文利用其中 1000 年来分辨率为 30 年的重建序列作为对比的依据.

## 3 模拟与资料对比

首先比较 ECHO-G 在中国东部区域的模拟结果与国际上认可的 120 年观测集成资料(Jones 等, 1998)<sup>[7]</sup>以验证模式的模拟能力; 然后分析 1000 年来中国东部温度模拟和重建情况.

### 3.1 模拟能力验证

图 2 是由模拟结果和 Jones 观测集成资料计算的中国东部区域 1870 年来的冬半年平均温度距平(相对于 1951~1980 年)的逐年变化. 图中虚线和实线分别为模拟结果和 Jones 资料的计算值及相应的变化趋势, 点线为零距平线. 可以看出, 两者给出的 1870 年以来中国东部区域温度变化的上升趋势是一致的, 两者在 99.5% 的置信度水平上相关, 但模拟值比观测值整体偏低约 0.15 K, 与 Jones 观测集成资料的误差水平相当. 这证明模拟结果和 Jones 观测集成资料有相同的可信度.

### 3.2 中国东部温度模拟与重建结果对比

先从全球模式的试验结果中提取中国东部区域(25°~40°N, 105°~123.75°E, 共 20 个网格点)1000 年来的冬半年平均温度距平(相对于 1951~1980 年)值, 并转换为 30 年算术平均值, 再与重建的中国东部温度距平序列(30 年分辨率)作对比. 图 3 给出了对比的结果. 图中实线为重建值, 虚线为模拟值, 点线为零距平线. 图中还分别给出了重建值和模拟值的多项式拟合曲线.

图 3 显示, 重建和模拟结果有相似的变化趋势, 其相关系数为 0.37, 置信度达 97.5%. 模拟和重建结果均反映出了 1000~1300 年的中世纪暖期、1300~1850 年的小冰期和 1900 年之后的升温期. 对于 1300~1850 年的小冰期和 1900 年之后的升温期, 模拟和重建的正负距平基本一致, 尤其是 1670~1710 年 Maunder 太阳黑子最小期时, 模拟和重建值都达到了温度低谷, 且无位相差异. 但对 1000~1300 年的中世纪暖期, 模拟与重建资料存在一定的位相差异, 重建资料呈两峰一谷, 而模拟结果是三峰两谷. 模拟的温度变幅为 -0.70~0.92 K, 而重建的温度变幅为 -1.1~0.9 K. 从整体上来看, 模拟值的变幅(1.62 K)略小于重建值(2.0 K). 由图 3 可见, 1500 AD 之后模拟值与重建值在相位和变幅上对应得比 1000~1500 AD 好, 这与距今时间越远, 模拟所设置的外强迫条件的估算误差越大<sup>[27]</sup>, 而用于气候重建的文献资料点位数越少<sup>[30]</sup>有关. 另外还可发现, 近 100 多年来模拟值与重建值的差异有所加大, 这可能是由模拟试验的强迫因子的限制造成的. 本强迫试验中没有考虑气溶胶因子的强迫作用. 越到近代, 由于人类活动的影响, 气溶胶的区域降温效应越明显, 这一点已包含在重建资料中, 而模拟结果中却未加考虑, 从而导致到近代, 模拟与重建的差异反而加大, 而且模拟值大于重

建值.

值得一提的是, 图 3 显示, 模拟的 20 世纪增温已远大于中世纪暖期, 而重建的 20 世纪增温接近却未超过中世纪暖期. 这两种不同的结果, 导致模拟派和重建派对 20 世纪全球增温的不同观点: 前者认为 20 世纪的增温已经超过了气候的正常变化范围, 这一趋势若继续发展, 将为人类带来灾难性的影响; 而后者则认为现阶段的增温还没有超出气候的自然变化范围, 不必恐慌. 目前这两种观点的争论仍在继续<sup>[31]</sup>. 现阶段尚未得到一致的正确结论. 最终的认识有待于气候模式模拟长时间气候变化能力的提高和气候资料重建工作的进一步深入, 并建立更多高分辨率的更精确可靠的历史气候变化序列, 使两者对历史气候演变的刻划共同逼近真实.

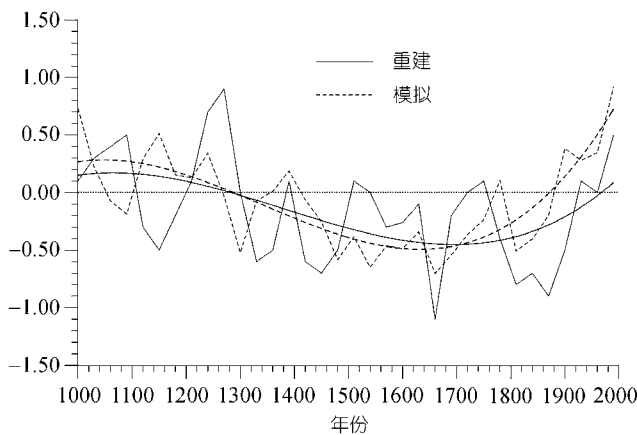


图 3 1000 年来中国东部温度距平变化的模拟与重建对比

#### 4 机理分析

根据真实强迫试验(以随时间变化的有效太阳辐射、CO<sub>2</sub> 浓度和 CH<sub>4</sub> 浓度为外强迫)与控制试验(以

1990 年的有效太阳辐射、CO<sub>2</sub> 和 CH<sub>4</sub> 浓度为外强迫)的比较发现, 控制试验可以模拟出气候系统围绕平衡态的上下振荡, 但不能给出中世纪暖期和小冰期这样百年尺度上的气候变化情景(图略). 因此可以肯定太阳活动、火山活动和人类活动引起的温室气体含量的增加是过去 1000 年来世纪尺度气候变化的主要驱动因子.

为了分析太阳活动、火山活动和温室气体含量变化因子在 1000 年气候变化中的贡献, 我们在有效太阳辐射变化(受太阳活动和火山活动变化影响)和有效太阳辐射与温室气体共同变化两种情况下对中国东部区域相对于 1951~1980 年的 10 年平均温度距平模拟值进行了拟合.

在有效太阳辐射变化情况下的拟合曲线方程为:

$$\Delta T = 0.17 + 0.13\Delta S, \quad (1)$$

上式中,  $\Delta T$  为中国东部区域相对于 1951~1980 年的 10 年平均温度距平(K),  $\Delta S$  为相对于 1951~1980 年的平均太阳辐射(1365.75 W/m<sup>2</sup>)的 10 年平均有效太阳辐射变化量(W/m<sup>2</sup>).

有效太阳辐射与温室气体(CO<sub>2</sub> 和 CH<sub>4</sub>)共同变化情况下的拟合曲线方程为:

$$\Delta T = 0.73 + 0.10\Delta S + 5.28 \ln \left( \frac{C}{C_0} \right) + 0.04(\sqrt{H} - \sqrt{H_0}), \quad (2)$$

上式中,  $\Delta T$  和  $\Delta S$  的意义同上,  $C$  为大气 CO<sub>2</sub> 的 10 年平均浓度(10<sup>-6</sup>),  $C_0$  是 1951~1980 年的平均 CO<sub>2</sub> 浓度(322.65 × 10<sup>-6</sup>),  $H$  为大气 CH<sub>4</sub> 的 10 年平均浓度(10<sup>-12</sup>),  $H_0$  是 1951~1980 年的平均 CH<sub>4</sub> 浓度(1510.85 × 10<sup>-12</sup>)<sup>[32]</sup>.

拟合曲线(1)和(2)与温度距平模拟曲线的相关系数分别为 0.53 和 0.66, 置信度均为 99.9%. 图 4 给出了上述两个方程得出的拟合曲线及模拟曲线.

从图 4 还可看出, 有效太阳辐射(太阳辐射和火山活动共同影响)可以决定千年以来温度变化的主要趋势(拟合(1), 虚线). 自 1000~1900 年间, 该曲线与模拟的温度曲线趋势一致. 但在 1900 年以来的近百年间, 其温度趋势与模拟结果存在较大差别, 增暖趋势不明显, 基本维持平衡态上下的正常波动变化. 只有在加入温室气体(CO<sub>2</sub> 和 CH<sub>4</sub>)后, 方可拟合出 20 世纪温度上升的特征来(拟合(2), 点线). 拟合曲线(2)在 1000~1900 年的时间尺度上与拟合曲线(1)基本一致,

但在近百年来,该曲线与模拟的温度变化一致,反映出了20世纪的明显增温趋势,说明近百年来温室气体含量增加对全球和区域增温的作用愈来愈明显。由此可见,在1000年尺度上,太阳辐射和火山活动是控制全球和区域温度变化的主要因子,而近百年来,温室气体含量的变化对温度的变化起着更为重要的作用。

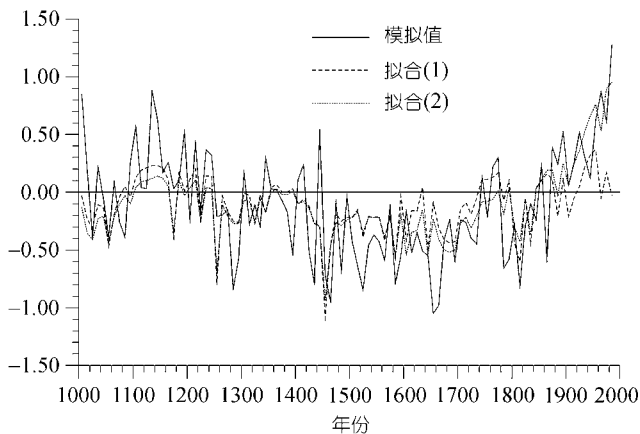


图4 模拟的中国东部温度距平及其拟合曲线

## 5 结论

研究表明,重建及利用全球海气耦合气候模式ECHO-G模拟的温度在低频(百年尺度)变化及趋势上具有很好的相似性。模拟和重建的30年分辨率的近千年冬半年温度距平序列的相关系数为0.37。模拟和重建结果均反映出了1000~1300年的中世纪暖期、1300~1850年的小冰期和1900年之后的升温期。模拟的温度变幅为 $-0.70\sim 0.92$  K,而重建的温度变幅为 $-1.1\sim 0.9$  K。模拟值的变幅(1.62 K)略小于重建值(2.0 K)。对于1300~1850年的小冰期和1900年之后的升温期,模拟和重建的正负距平基本一致,尤其是1670~1710年Maunder太阳黑子最小期时,模拟和重建值都达到了温度低谷,且无位相差异。然而,对于1000~1300年的中世纪暖期,模拟与重建资料存在明显差异。这种现象表明特别需要进行这样的全球气候模式的区域检验。

在随时间变化的有效太阳辐射、 $\text{CO}_2$ 浓度和 $\text{CH}_4$ 浓度的驱动下,ECHO-G能捕捉到中国东部区域近千年来气候变化的阶段特征,说明太阳活动,火山活动和温室气体含量变化是近千年来气候变化的主要控

制因子。在1000年尺度上,太阳辐射和火山活动是控制全球和区域温度变化的主要因子,而在最近百年尺度上,温室气体含量的变化对温度的变化起着更为重要的作用。然而,模拟结果并未反映出几十年时间尺度的气候波动。这说明气候模式对气候系统内部变率的模拟能力还较有限,还有其他影响因素,如气溶胶和地表过程等,需要在今后的模拟工作中考虑。

重建资料的分辨率为30年,较粗略。时间愈久远,信度愈低。需要加强气候重建工作,努力开发更有效的代用资料,建立更高分辨率、更精确可靠的中国历史气候序列,以便更深入地认识历史气候变化机理。

致谢 葛全胜研究员和张雪芹博士在气候重建方面给予了支持,Fidel González-Ruoco和Olaf Krüger博士在模拟工作上给予了帮助,德国GKSS研究中心提供了良好的工作条件和经费支持,特此一并致谢。中国科学院知识创新工程(批准号:KZCX3-SW-321)、国家自然科学基金(批准号:40272123,40475035,40331013)和中国科学院南京地理与湖泊研究所创新项目(CXNIGLAS-A02-06)共同资助。

## 参 考 文 献

- 1 杨保,施雅风,李恒鹏.过去2 ka气候变化研究进展.地球科学进展,2002,17(1):110~117
- 2 王丽华,张德二.国外有关近两千年气候变化的研究进展.气象科技,2001,(2):21~28
- 3 王绍武,谢志辉,蔡静宁,等.近千年全球平均气温变化的研究.自然科学进展,2002,12(11):1145~1149
- 4 Bradley R S, Jones P D. Climate Since AD1500. London: Routledge, 1992. 511~537
- 5 Esper J, Cook E R, Schweingruber F H. Low-frequency signals in long tree-ring chronologies for reconstructing past temperature variability. Science, 2002, 2250~2253
- 6 Holmgren K, Karlen W, Lauritzen S E, et al. A 3000-year high-resolution stalagmite-based record of paleoclimate for north-eastern South Africa. The Holocene, 1999, 295~309
- 7 Jones P D, Briffa K R, Barnett T P, et al. High-resolution palaeoclimatic records for the last millennium: interpretation, integration and comparison with General Circulation Model control-run temperatures. The Holocene, 1998, 8: 455~471
- 8 Jones P D, Osborn T J, Briffa K R. The evolution of climate over the last millennium. Science, 2001, 292: 662~667
- 9 Woodhouse C A, Overpeck J T. 2000 years of drought variability

- in the central United States. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1998, 79(12): 2693~2714
- 10 Yang B, Braeuning A, Johnson K R, et al. General characteristics of temperature variation in China during the last two millennia. *Geophysical Research Letters*, 2002, 29: 1029~1040
- 11 康兴成, 张其花, Graumlich L J. 青海都兰过去 2000 年来的气候重建及其变迁. *地球科学进展*, 2000, 15(2): 215~221
- 12 沈吉, 张恩楼, 夏威夷. 青海湖近千年来气候环境变化的湖泊沉积记录. *第四纪研究*, 2001, 21(6): 508~513
- 13 施雅风, 姚檀栋, 杨保. 近 2000a 古里雅冰芯 10a 尺度的气候变化及其与中国东部文献记录的比较. *中国科学, D 辑*, 1999, 29(增 1): 79~86
- 14 姚檀栋, 秦大河, 田立德, 等. 青藏高原 2 ka 来温度与降水变化——古里雅冰芯记录. *中国科学, D 辑*, 1996, 26(4): 348~353
- 15 张丕远, 王铮, 刘啸雷, 等. 中国近 2000 年来气候演变的阶段性. *中国科学, B 辑*, 1994, 24(9): 998~1008
- 16 Crowley T J. Causes of climate change over the last 1000 years. *Science*, 2000, 289: 270~277
- 17 Jones P D, Bradley R S. *Climatic Variations and Forcing Mechanisms of the Last 2000 Years*. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag, 1996. 501~547
- 18 Bauer E, Claussen E M, Brovkin V. Assessing climate forcings of the Earth system for the past millennium. *Geophysical Research Letters*, 2003, 31(12): 1276~1292
- 19 Crowley T J. Causes of climate change over the last 1000 years. *Science*, 2000, 289: 270~277
- 20 Bertrand C, Loutre M F, Berger A. Climate of the last millenium: a sensitivity study. *Tellus*, 2002, 221~244
- 21 Widmann M, Tett S F B. Simulating the climate of the last millenium. *PAGES Newsletter*, 2003, 11(2&3): 21~23
- 22 Legutke S, Voss R. The Hamburg Atmosphere-Ocean Coupled Circulation Model ECHO-G. Technical Report No.18, German Climate Computer Center(DKRZ), 1999
- 23 Raible C C, Blender R. Northern Hemisphere midlatitude cyclone variability in GCM simulations with different ocean representations. *Climate Dynamics*, 2004, 22(2-3): 239~248
- 24 Renssen H, Isarin R F B. Surface temperature in NW Europe during the Younger Dryas: AGCM simulation compared with temperature reconstructions. *Climate Dynamics*, 1997, 14(1): 33~44
- 25 Zorita E, González-Rouco J F, Legutke S. Testing the Mann et al.(1998) approach to paleoclimate reconstructions in the context of a 1000-yr control simulation with the ECHO-G coupled climate model. *Journal of Climate*, 2003, 16, 1378~1390
- 26 González-Rouco J F, von Storch H, Zorita E. Deep soil temperature as proxy for surface air-temperature in a coupled model simulation of the last thousand years. *Geophysical Research Letters*, 2003, 30(21): 2116, doi:10.1029/2003GL018264
- 27 Zorita E, González-Rouco J F, von Storch H, et al. Natural and anthropogenic modes of surface temperature variations in the last thousand years. *Geophysical Research Letters*, 2005, 32: L08707, doi:10.1029/2004GL021563
- 28 von Storch H, Zorita E, Jones J M, et al. Reconstructing past climate from Noisy data. *Science*, 2004, 306: 679~682
- 29 竺可桢. 中国近 5000 年来气候变迁的初步研究. *中国科学*, 1973, (2): 168~189
- 30 Ge Q, Zheng J, Fang X. Winter half-year temperature reconstruction for the middle and lower reaches of the Yellow River and Yangtze River, China, during the past 2000 years. *The Holocene*, 2003, 13(6): 933~940
- 31 王绍武, 赵宗慈, 杨保. 近年来关于气候变暖的争议. *气候变化通讯*, 2003, 2(6): 12~14
- 32 Myhre G, Highwood E J, Shine K P, et al. New estimates of radiative forcing due to well mixed greenhouse gases. *Geophysical Research Letters*, 1998, 25(14): 2715~2718

(2005-07-07 收稿, 2005-09-13 收修改稿)