

全球平均温度在 21 世纪将怎样变化?

钱维宏^①, 陆波^①, 祝从文^②

① 北京大学物理学院大气科学系, 北京 100871;

② 中国气象科学研究院, 北京 100081

E-mail: qianwh@pku.edu.cn

2009-12-28 收稿, 2010-03-18 接受

国家自然科学基金资助项目(90502001, 90711003, 40890053)

摘要 采用 HadCRUT3 全球平均温度距平序列和北太平洋海温年代际涛动(PDO)指数及赤道中东太平洋海温距平序列, 探讨了全球温度变化中的长期趋势和多时间尺度周期性波动. 研究发现, 过去 159 年(1850~2008 年)的增暖速率是每 100 年 0.44°C , 其间叠加了 1910 年前后和 1950~1970 年前后的两次冷期, 以及 19 世纪 70 年代、20 世纪 40 年代和 1998 年以来的 3 次 10 年际暖期. 器测的全球温度变化中存在准 21 a 和准 65 a 的周期性波动并受百年尺度波动的影响. 最近的 10 年际暖期是这 3 个周期性波动正位相叠加的结果, 形成了器测温度以来的首次叠加现象. 3 个周期性波动叠加的最大增温是 0.26°C , 时间发生在 2004 年. 准 21 a 和准 65 a 的周期性波动反映了太阳辐射和海洋变化的影响. 根据这一长期趋势和 3 个周期性波动, 能够预测 21 世纪 30 年代会出现一个冷期, 而在 21 世纪 60 年代出现一个暖期. 21 世纪的最大增暖幅度在 0.6°C 附近, 远小于 IPCC 报告的预估.

关键词

全球气温
长期趋势
周期性波动
10 年际暖期
预测

地球气候变化的原因来自地球系统外部的强迫和内部不同部分之间的相互作用. 全球平均气温是反映地球气候变化的重要指标, 也是历次政府间气候变化专门委员会(IPCC)报告的核心内容之一. 科学界试图预测未来的气候(气温)变化, 其首要前提是要有足够长的可靠的历史气温观测, 其次是对气温变化的过程和机理有足够的认识.

最近 Peterson 等人^[1]针对 20 世纪 50~70 年代的冷期, 分类了科学界在 20 世纪 60~70 年代发表的全球降温、全球增暖和不确定的相关文章. 在他们给出的统计表中, 20 世纪 60 年代只有 1 篇降温的文章, 70 年代有 6 篇. Peterson 等人^[1]的统计发现, 20 世纪 60 年代全球增暖的文章有 3 篇, 70 年代达 40 余篇. 20 世纪 80 年代全球增暖的文章增加到 200 多篇, 90 年代增加到 4000 多篇. 21 世纪以来的 9 年, 全球增暖的相关文章达到了 9000 多篇. 全球增暖已经成为科学界和全人类瞩目的问题.

在不同排放前景下, 2007 年 IPCC 报告^[2]多模式集合预测 2090~2099 年相对 1980~1999 年的全球平均气温增加在 $1.8\sim 4.0^{\circ}\text{C}$ 之间, 即增温会达到 2°C . 全球平均温度增暖 2°C 的阈值已成为当前国际谈判的焦点. 最近 Kerr^[3]在 *Science* 上报道指出: 1999~2008 年的 10 年全球平均温度并没有像 IPCC(2007)报告的那样上升 0.2°C , 而是出现了一个 10 年温度平台(stagnation or flat). 这就是我们曾经论述过的中国气候变化的 10 年际冷期和 10 年际暖期^[4,5]. 针对全球温度变化表现出的新特点, 有研究认为^[3], 这一现象是暂时的, 全球增暖仍将继续. 也有研究认为^[3], 过去的 10 年中, 温室气体增暖的痕迹已经终止. 前者推测, 气候系统中的海洋环流部分会使全球降温, 使温室增暖暂缓了 10 年. 也有研究推测, 温度下降可能与温室气体、污染气溶胶、火山气溶胶、海洋 ENSO 事件和太阳活动等多方面的作用有关. 针对目前的争议, 本文试图利用 1850~2008 年的全球月平均气温序列^[6],

分解这一时期中多次冷期和暖期的特征,最后对 21 世纪的全球平均气温给出可能的预估。

1 全球平均气温变化中的阶段性趋势

本文采用 HadCRUT3 器测 1850 年 1 月~2009 年 3 月全球月平均气温相对 30 年(1961~1990 年)平均的距平序列^[6]。在 1850~2008 年逐年平均的全球气温距平序列中,1986 年以来的全球平均气温距平始终大于 0℃。图 1 中分别标出了 1850~2008,1911~2008 和 1976~2008 年 3 个时段的增温趋势,它们分别是每 100 年 0.44,0.73 和 1.7℃。如果保持最近 33 年的全球增暖速率不变,则 21 世纪末的气温值是 2.03℃,与 IPCC 多模式集合预估的 2090~2099 年增暖低限值相近。过去的 159 年中,全球气温经历了 3 次年代际暖平台和 2 次年代际冷低谷的变化,分别出现在 1878,1911,1944,1976 和 1998 年。由相邻暖平台和冷低谷可以给出气温变化的阶段性趋势。最近 33 年的增暖趋势与 1911~1944 年的增暖趋势(0.16℃/10 a)相当。1878~1911 年经历了全球降温的趋势(-0.088℃/10 a)。1944~1975 年全球平均气温维持了一个相对低温时段,没有明显的趋势变化。1998 年是过去 100 年来气温最高的 1 年,2002~2005 年全球平均气温位于次高,但从 2006~2008 年气温在持续下降。由此可见,1998~2008 年已经形成了一个 10 年际的气温平台。这个气温平台类似于 20 世纪 40 年代的 10 年际暖平台。

从图 1 中看出,1976 年是 20 世纪后期全球平均气温最低的 1 年。用 1975~2008 年月平均全球气温序列计算了它的总趋势,为每 10 年增暖 0.17℃。从图 2 可以清楚地看出,这一时段的气温变化还存在 10 年际的波动。1998 年是过去 34 年来平均气温最高的 1 年,而 2008 年是 1998 年以来平均气温最低的 1 年。1998~2008 年的 11 年趋势是每 10 年-0.01℃,即近 10 年平均气温有所下降。2008 年以来北半球不断发生的大范围寒冷、雨雪、冰冻天气过程也可能是这一降温趋势的表现。事实上,用不同的 10 年,或用某个 30 年的趋势预估未来几十年或未来百年的温度变化是不合适的。

2 全球气温变化中的周期性波动

从图 1 和 2 中看出,全球平均气温序列中存在长期趋势和短期振荡。早在 2002 年我们使用 Mann 等人^[7]在 1999 年给出的和在 2001 年被 IPCC 报告引用

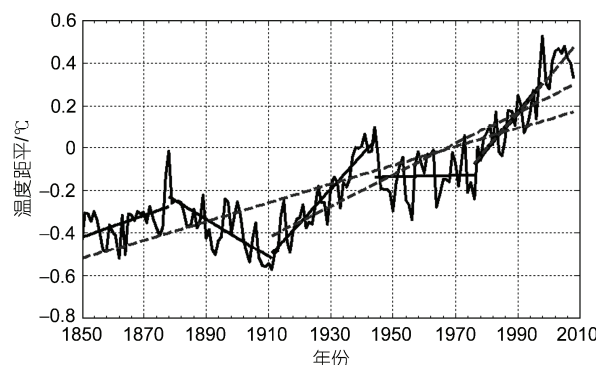


图 1 1850~2008 年逐年全球平均气温(相对 1961~1990 年全球平均气温)的距平序列

实直线指示 1850~1878, 1878~1911, 1911~1944, 1944~1976 和 1976~1998 年每 10 年趋势 0.051, -0.088, 0.160, 0.003 和 0.175℃。虚线指示 1850~2008, 1911~2008 和 1976~2008 年 3 个时间段的每 100 年增温趋势 0.44, 0.73 和 1.70℃

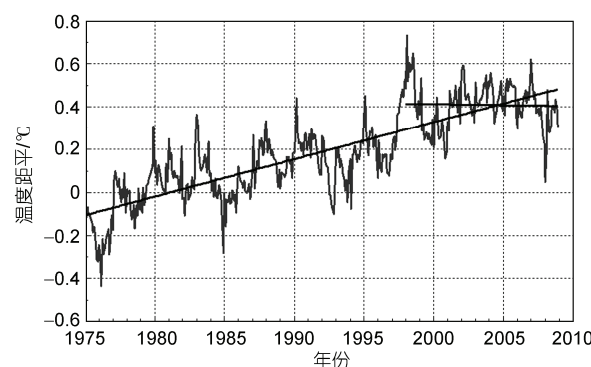


图 2 1975 年 1 月~2008 年 12 月的月平均全球温度(相对 1961~1990 年全球温度)的距平序列

实线分别指示 1975~2008 年趋势(0.17℃/10 a)和 1998~2008 年趋势(-0.01℃/10 a)

的过去千年北半球温度序列做分析,也能得出不同时段长期趋势和短期振荡。这一结果到 2006 年才发表^[8]。2008 年, Mann 等人^[9]更新了近 2000 年的全球温度序列。从更新的序列中可以检测到中世纪暖期和小冰期的存在,近千年内它们之间的平均温度在 1450 年前后突然降低了 0.24℃(图略)。气候学界对这一温度突然下降的原因仍不清楚。在最近的千年中,全球温度变化可划分为 3 个大的时期,前 400 多年处于中世纪暖期(MWP),接着出现了近 400 年的小冰期(LIA),从 1850 年开始进入到全球增暖期(GWP)。随着工业革命的开始,1850 年以后有了相对多的器测温度。我们用 1850 年以来的器测逐年温度减去对应

年份的趋势值,得到图 3(a)中的偏差温度序列.在去趋势的偏差气温序列中可以清楚地看到 3 次暖平台和 2 次冷低谷.3 次暖平台分别出现在 19 世纪 70 年代,20 世纪 40 年代和 1998 年以来的 10 年.2 次冷低谷分别出现在 1910 年前后和 1970 年前后.因此,剔除全球增暖期以来的长期趋势后再分析其中的多时间尺度温度振荡是有意义的.

在时间序列的分析中,子波变换^[10]和经验模态分解(EMD)^[11]方法比 Fourier 变换的优越之处在于它们能够很好地表达信号的局域频谱特征.而本文要考察的是如何用有限几个有物理基础的正交周期性波动函数,最大化满足全序列的拟合.因此,我们先对图 3(a)中的原序列做子波变换,得到几个主要的周期性波动.再用具有波动形式的余弦函数进行全序列拟合,使拟合的偏差平方和达到最小.当用 Mann 等人^[9]的序列做最近千年温度序列子波分析时发现,全球气温在小冰期期间有准 115 a 的振荡和近 200 年

来的 180~200 a 振荡频带.于是,我们根据最大拟合效果取用了 179 a 的周期性波动函数.图 3(a)中的两条曲线分别给出了 2 个和 3 个周期性波动函数模拟的 1850~2008 年全球气温.用 21.2 和 64.1 a 两个尺度周期性波动函数模拟,3 次暖平台和 2 次冷低谷显现出来了.用 21.2, 64.1 和 179 a 三个周期性波动函数的线性叠加,模拟的气温曲线更逼近原始序列.从图 3(b)中看出,过去的 159 年中这 3 个周期性波动函数只在 21 世纪之交出现了 10 年际的正位相叠加现象.1910 年前后的最冷低谷也用这 3 个周期性波动函数模拟出了.

周期性波动反映的是自然变率,在未来的气候变化中这些波动仍然存在.于是,我们在图 4 中给出了过去 159 年气温序列及其不同周期性波动函数的模拟和对未来到 2100 年的逐年气温预报.用 3 个周期性波动函数和长期趋势较好地模拟了过去 159 年的温度变化.在对未来的预测中,全球平均气温从最近的暖平台开始阶段性下降,到 2035 年达到一个低谷,平均温度在 0.22℃,之后温度又开始逐步上升,到 2068 年达到一个 0.58℃的暖平台.在 21 世纪末,全球平均气温为 0.31℃.需要说明的是,这里的全球平均气温预报仅仅局限于不同周期性波动函数值的线性外推和与百年趋势的叠加,没有考虑不同波之间的非线性相互作用效果.

3 全球平均气温周期性波动的可能原因

我们来寻找全球平均气温序列中 21.2 和 64.1 a 两个周期性波动产生的可能原因. Schlessinger 和 Ramanakutty^[12]使用奇异谱分析(SSA)方法对 4 条全球温度序列进行了分析,得到这些温度序列中存在 65~70 a 的振荡,并认为这一振荡是海气耦合系统中的自然变率.在这一系统中,大气的信号可以从海洋中寻找.在全球海温变化中,北太平洋海温变化的年代际涛动(PDO)所具有的时间尺度与全球温度 64.1 a 周期性波动的时间尺度相当.图 5(a)是对去趋势全球年平均气温和 PDO 指数序列^[13]做标准化处理后的比较.根据 PDO 资料的来源介绍,这一序列中已去除了全球增暖的影响,并且 PDO 代表的海温只是全球海洋的部分,即 20°N 以北的北太平洋.20 世纪的 100 年中,全球平均气温的两次冷低谷和两次暖平台在 PDO 序列中也同样存在.除了振幅上对应关系不够平稳外, PDO 的变化位相超前全球平均气温是稳定的.用去趋

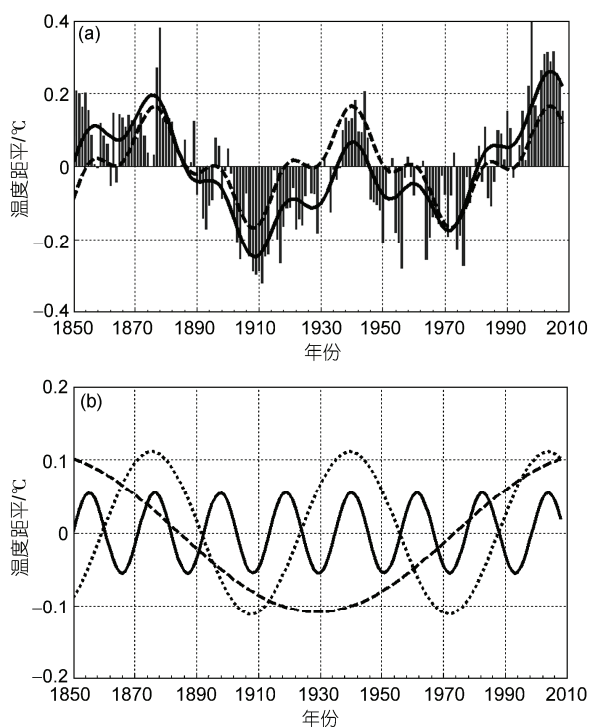


图3 去趋势后的气温变化及其模拟和余弦函数随时间的变化 (a) 去趋势后的 1850~2008 年全球平均气温距平序列(柱状图),长虚线为 21.2 和 64.1 a 两个周期性函数的线性叠加,实线为 21.2, 64.1 和 179 a 三周期性函数的线性叠加; (b) 3 根余弦函数: 实线 21.2 a 周期函数 $y=0.055\cos(0.296t+10.0)$, 短虚线 64.1 a 周期函数 $y=0.111\cos(0.098t+4.70)$, 长虚线 179 a 周期函数 $y=-0.109\cos(0.035t+39.0)$, 其中 t 是从 1850~2008 年

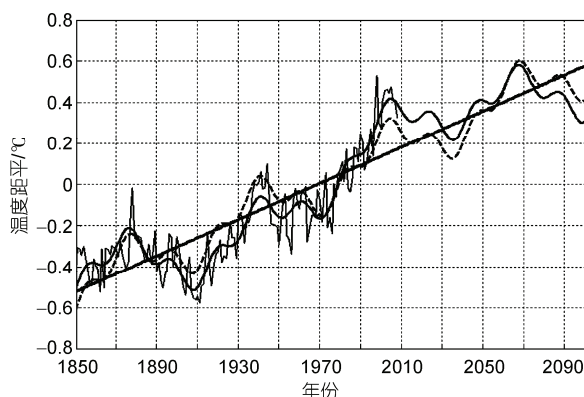


图4 观测全球平均气温序列及其周期函数模拟与21世纪气温预报

1850~2008年逐年全球平均气温距平序列(黑折线), 长期趋势(直线, $0.44^{\circ}\text{C}/100\text{a}$); 21.2和64.1a周期函数线性叠加和预报(虚曲线); 21.2, 64.1和179a周期函数线性叠加和预报(实曲线)

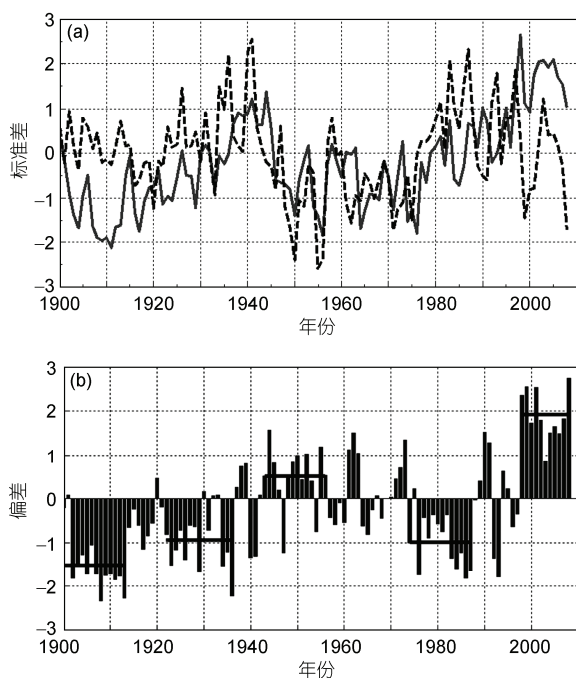


图5 全球平均气温与PDO指数序列的位相比较

(a) 去趋势后的1900~2008年全球平均气温标准化序列(实线)与PDO指数标准化序列(虚线); (b) 用去趋势后的全球温度标准化序列减PDO指数标准化序列的差值序列. 差值序列中的黑色直线表示阶段差值平均

势全球平均气温减PDO指数得到的差值序列可以反映它们之间的年代际位相差(图5(b)). 20世纪20~30年代和20世纪70~80年代PDO序列上升超前全球平均气温(负值), 又在20世纪40~50年代和1998年以

来的10年中PDO序列下降超前全球平均气温(正值). 在过去的100年中, PDO超前全球平均气温0~10年的相关在0.2~0.3之间, 达到了99%信度. 而它们之间的滞后1~9年相关在 ± 0.1 之间, 不具显著性. 基于PDO的区域性和与全球平均气温变化的位相关系, 我们推测目前全球温度经历的暖平台是全球平均气温在年代际尺度上有所下降的表征.

我们再考察年际全球平均气温变化与赤道中东太平洋Niño3.4区年际海温^[14,15]变化之间的关系. 从图6中看出, 主要的赤道太平洋年际增温事件都对应全球平均气温年际增加, 而年际海洋降温也对应全球平均气温年际下降. 赤道太平洋的海温与全球平均气温具有同期的和超前的年际相关. 同期相关系数达到0.36(通过99%信度检验), 海温超前全球温度2~3个月的相关系数达到0.4, 超前10个月的相关系数也达0.24. 相反地, 全球平均气温超前赤道太平洋海温5~10个月的相关系数都较低. 这一关系说明, 全球平均年际气温变化受赤道海洋年际海温的滞后影响, 在某种程度上可用海温预估全球平均气温的年际变化. 这种一致性的年际变化关系也反映

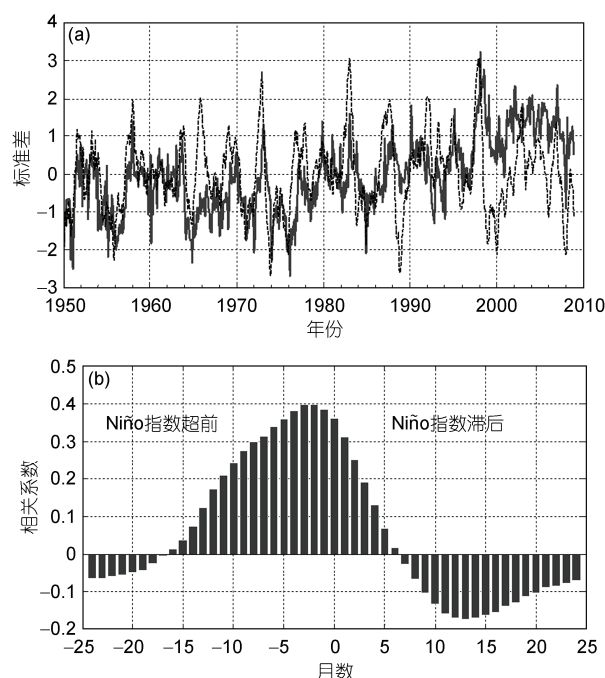


图6 全球平均气温与赤道中东太平洋海温距平序列的比较
去趋势后的1950~2008年全球平均气温距平标准化序列(实线)与Niño3.4区海温距平标准化序列(虚线)(a)及它们之间的滞后相关系数随月数的变化(b)

出,赤道太平洋海温变化中也存在准20年的振荡。

4 结果与讨论

对过去100年全球平均气温变化的解释、当前出现的10年际暖平台和21世纪的全球温度预估,它们都是近20年来和当前科学界及社会极为关注的问题。通过本文的初步分析,我们给出下列主要的结论和讨论。

(1) 器测以来的全球平均气温变化中包含多尺度周期性波动的相互作用。利用不同时间尺度周期性波动阐述全球平均气温近些年的快速升高现象,是数据数理分析方法上的探索,也是区分全球变暖中自然变化与人类活动影响的新思路。这种借助全序列拟合的周期性波动分析方法,可以用于历史序列的分析,也可以综合各个周期性波动之间的位相关系预测未来的气候变化。

(2) 过去159年(1850~2008年)的增暖性线趋势是 $0.44^{\circ}\text{C}/100\text{ a}$ 。过去百年增暖趋势的原因可能来自人类活动的影响或有更长时间尺度外强迫的作用,是有待深入研究的问题^[16]。过去159年、过去98年和过去33年的增暖趋势分别是 0.44 、 0.73 和 $1.7^{\circ}\text{C}/100\text{ a}$,先后翻倍。过去不同时间段的增暖趋势反映了一些周期性波动的叠加。这种趋势会随时间变化,用于未来的预测有其时效限制。

(3) 1998年以来出现了世纪之交的全球温度变化

10年际暖平台。在去159年(1850~2008年)的增暖趋势后,这样的10年际暖平台还出现在19世纪70年代和20世纪40年代,另有两次冷低谷分别出现在1910年和1970年前后。这些冷、暖期的出现是21.2和64.1 a周期性波动叠加的结果。最近的10年际暖平台是多个周期性波动正位相叠加形成的。考虑159 a的长期趋势和3个周期性波动的线性叠加,预计从21世纪之交的暖平台开始,全球平均气温要下降到2035年(0.22°C),2068年又会达到一个 0.58°C 的暖平台。预计的这两次冷、暖期与早些年我们预估的21世纪年代际冷暖期在时间上一致^[8]。

(4) 全球平均气温变化中的两个主要周期性波动是气候系统外部强迫和内部振荡的结果。全球温度变化中的21.2 a周期性波动与太阳周期性活动有关,而全球平均气温变化中的64.1 a周期性波动可能是海气耦合系统中的自然振荡^[12]。这两个周期性波动也出现在中国的干湿气候变化序列中^[17,18]。早在1988年,我们也注意到地球角动量存在交替出现的准24 a和准49 a周期变化,完成两者循环的周期是60~70 a,并把地球自转、大气环流和区域气候变化联系起来^[19]。1997年我们又把全球海温年代际振荡与地球角动量联系起来预测了20世纪末到2010年前热带太平洋海温会维持在一个偏暖的基本态^[20]。10~20年前的这些长期气候预测正是考虑了地球系统内部不同圈层之间的耦合振荡关系。

参考文献

- Peterson T C, Connolley W M, Fleck J. The myth of the 1970s global cooling scientific consensus. *Bull Am Meteor Soc*, 2008, 89: 1325—1337
- IPCC. Climate change 2007: The physical science basis. In: Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007
- Kerr R A. What Happened to Global Warming? Scientists Say Just Wait a Bit. *Science*, 2009, 326: 28—29
- Qian W H, Zhu Y F. Climate change in China from 1880—1998 and its impact on the environmental condition. *Clim Change*, 2001, 50: 419—444
- Qian W H, Lin X, Zhu Y F, et al. Climatic regime shift and decadal anomalous events in China. *Clim Change*, 2007, 84: 167—189
- Brohan P, Kennedy J J, Harris I, et al. Uncertainty estimates in regional and global observed temperature changes: A new dataset from 1850. *J Geophys Res*, 2006, 111: D12106
- Mann M E, Bradley R S, Hughes M K. Northern hemisphere temperatures during the past millennium: Inferences, uncertainties, and limitations. *Geophys Res Lett*, 1999, 26: 759—762
- Gao X Q, Zhang X, Qian W H. Climate change: Long-term trends and short-term oscillations. *J Tropical Meteorol*, 2005, 14: 2370—2379
- Mann M E, Zhang Z H, Hughes M K, et al. Proxy-based reconstructions of hemispheric and global surface temperature variations over the past two millennia. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2008, 105: 13252—13257
- Lau K M, Weng H. Climate signal detection using wavelet transform: How to make a time series sing. *Bull Am Meteor Soc*, 1995, 76: 2391—2402

- 11 Wu Z, Huang N E, Long S R, et al. On the trend, detrending, and variability of nonlinear and nonstationary time series. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2007, 104: 14889—14894
- 12 Schlesinger M E, Ramankutty N. An oscillation in the global climate system of period 65—70 years. *Nature*, 1994, 367: 723—726
- 13 Zhang Y, Wallace J M, Battisti D S. ENSO-like interdecadal variability: 1900—1993. *J Clim*, 1997, 10: 1004—1020
- 14 Trenberth K E. The Definition of El Niño. *Bull Amer Meteor Soc*, 1997, 78: 2771—2777
- 15 Hurrell J W, Trenberth K E. Global sea surface temperature analyses: Multiple problems and their implications for climate analysis, modeling, and reanalysis. *Bull Amer Meteor Soc*, 1999, 80: 2661—2678
- 16 王绍武, 罗勇, 闻新宇, 等. 近千年全球温度变化研究的新进展. *气候变化研究进展*, 2007, 3: 14—19
- 17 Zhu J H, Wang S W. 80a-oscillation of summer rainfall over the east part of China and East Asian summer monsoon. *Adv Atmos Sci*, 2001, 18: 1043—1051
- 18 Qian W H, Hu Q, Zhu Y F, et al. Centennial-scale dry-wet variations in East Asia. *Clim Dyn*, 2003, 21: 77—89
- 19 钱维宏. 长期天气变化与地球自转速度的若干关系. *地理学报*, 1988, 43: 60—66
- 20 钱维宏. 全球气候与地球自转速度的年代际变化. *科学通报*, 1997, 42: 1409—1411