

# 千年全球气温中的周期性变化及其成因

钱维宏, 陆波

北京大学大气科学系, 北京 100871

E-mail: qianwh@pku.edu.cn

2010-05-20 收稿, 2010-08-23 接受

**摘要** 采用最新重构的千年全球代用与器测气温序列、近 400 年太阳辐射和北太平洋海温指数序列, 分解了不同时段气温变化的趋势和全时间域上的多时间尺度周期变化, 探讨了气温周期变化的成因. 千年全球气温序列中清楚地存在中世纪暖期(MWP)、小冰期(LIA)和全球增暖期(GWP). 剔除这 3 个时期的基本气候态后, 气温序列中仍然存在准 21 年、准 65 年、准 115 年和准 200 年的周期变化. 这 4 个气温变化的自然周期中, 准 65 年的周期与海温变化有关, 而其他 3 个周期与太阳辐射变化有明确的位相滞后关系. 准 21 年的气温周期变化形成了十年暖期和十年冷期的交替. 21 世纪之交形成了过去千年中首次的上述 4 个周期暖位相的叠加, 也就形成了国际社会关注的全球性增暖和暖平台现象. 根据长期趋势和周期振荡的叠加, 预计全球气温会在 21 世纪 30 年代进入一个冷期, 而在 21 世纪 60 年代达到一个新的暖期.

## 关键词

全球气温  
太阳辐射  
长期趋势  
十年暖期  
周期振荡

20 世纪全球变暖的原因和 21 世纪全球气温变化的预测是当前全球气候变化科学研究的两个核心问题. 认识 20 世纪全球变暖的原因, 首先要回答自然变化导致变暖和人类活动导致变暖的相对贡献<sup>[1,2]</sup>. 20 世纪的全球气温存在明显的年代际变化, 如 20 世纪 10 年代和 20 世纪 70 年代的冷期与 20 世纪 40 年代的暖期. 但是, 20 世纪的大气 CO<sub>2</sub> 浓度并没有出现年代际的振荡. 气候模式试图用火山活动来强迫 20 世纪的全球降温<sup>[3,4]</sup>, 但这不能解释 20 世纪有多次火山活动而没有降温和有降温而没有火山活动的情况. 21 世纪全球气温的预测结果主要来自 IPCC(2007)报告中多模式对不同情景下大气 CO<sub>2</sub> 浓度的响应. 未来情景下的 CO<sub>2</sub> 浓度越高, 模式预测的全球变暖值就越大. 这些模式预测的 21 世纪末全球平均气温距平值都接近或在 2℃ 以上. 当前, 2℃ 阈值已成为国际气候会议的热门话题. 事实上, 目前的气候模式尚不具有产生与观测一致的多尺度气候振荡现象, 如 20 世纪中的十年暖期和十年冷期<sup>[5]</sup>.

要对 21 世纪的气候变化做出可信的预测, 关键要对过去千年的气候演变有一个比较全面的认识和

理解. 对过去气候变化的认识, 困难来自历史资料长度的限制. 仪器记录的气温观测是从工业化才有的, 目前发表的全球气温观测资料只向前延伸到了 1850 年. Hadley 中心和 CRU 释放了器测 1850~2008 年的全球月平均气温距平序列<sup>[6]</sup>. 利用这一观测气温序列, 我们<sup>[5]</sup>分析得到过去 159 年(1850~2008 年)的变暖速率是 0.44℃/100 a, 其间叠加了 1910 年前后和 1970 年前后的两次冷期, 以及 19 世纪 70 年代、20 世纪 40 年代和最近发生的 3 次暖期. 全球气温存在年际、十年际、年代际和世纪尺度的变化. 分析发现, 在年际和年代际尺度上, 全球平均气温变化的位相落后于海温变化的位相<sup>[5]</sup>. 对世纪尺度气温变化及其可能的原因解释需要几百年, 甚至千年的资料序列. 本文试图用最新整合的全球过去千年气温序列, 近 400 年太阳辐射和北太平洋海温指标, 进一步认识全球气温变化中的多时间尺度规律和可能的变化原因.

## 1 千年气温变化

采用 Mann 等人<sup>[7]</sup>2008 年新发表的去千年全球

平均气温序列并结合 HadCRUT3 器测气温<sup>[6]</sup>, 我们把千年全球气温序列延长到了 2008 年. 图 1(a)给出的是公元 1000~2008 年全球气温相对 1961~1990 年的距平序列. 这一气温序列是由近百年的器测和早期的代用资料, 经过尺度集成和变量误差回归方法重构的<sup>[7]</sup>. 这一新的千年气温序列与 2003 年 Mann 和 Jones<sup>[8]</sup>给出的千年气温序列的不同在于, 新序列中中世纪暖期(MWP)和小冰期(LIA)之间的区别清楚了. 时段变化点可以确定在 15 世纪 40 年代和 19 世纪 40 年代, 于是 MWP 和 LIA 时段相对 1961~1990 年的平均气温值分别是 -0.25 和 -0.49℃. 从 MWP 到 LIA, 平均气温下降了 0.24℃. 我们把 1850 年以来的时段称为全球增暖期(GWP), 这期间每百年气温上升了 0.44℃. 20 世纪气温来自观测, 但不排除城市热岛的影响. 用逐年的气温分别减去上述前后时段上的平均气温和趋势值, 可以得到一条新的气温距平序列(图 1(b)). 新的气温距平序列中清楚地存在年代际的变化, 最大温度变幅达 0.5℃, 与 1850~2008 年的长期变暖趋势每百年 0.44℃相当. 所以, 我们剔除的 MWP 和 LIA 温度平均值及 GWP 温度趋势, 相当于去除了 300~400 年尺度的全球气温低频变化.

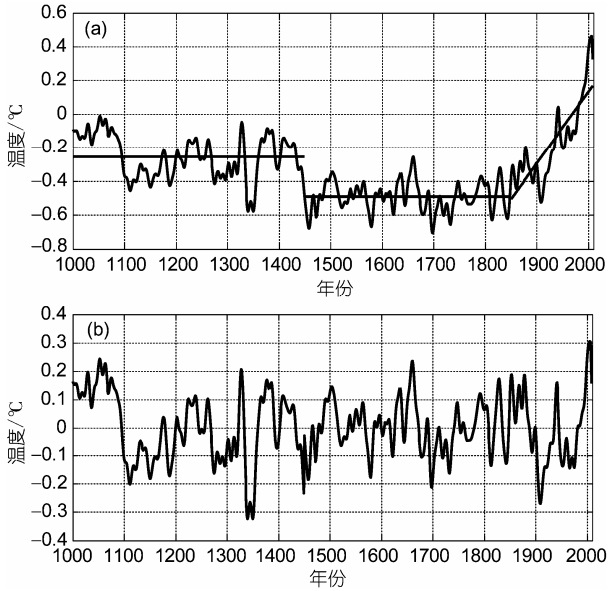


图 1 公元 1000~2008 年全球平均温度(相对 1961~1990 年)距平序列

(a) 由 Mann 等人<sup>[7]</sup>发表的去千年全球平均温度序列并结合 HadCRUT3 温度<sup>[6]</sup>重构与延续的温度距平序列, 图中的直线指示温度平均或温度趋势; (b) 剔除 MWP 和 LIA 温度平均值及 GWP 趋势后的温度距平序列

在时间序列的分析中, 子波变换<sup>[9]</sup>比 Fourier 变换的优越之处在于它能够很好地表达信号的局域频谱特征. 本文着重考察如何用有限几个有物理基础的周期性波动函数, 最大化满足全序列的拟合<sup>[5]</sup>. 为此, 我们先对图 1(b)中的序列做子波变换, 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. 这一序列中存在 21.1 年、62.5 年、116 年和 194.6 年的 4 个主要周期性振荡(图略). 这 4 个周期中前两个达到了 95% 的信度水平, 具有阶段性的周期变化. 根据子波变换的性质, 我们可以取这 4 个周期的子波系数, 或用对应频带上的子波系数模拟原序列. 基于这 4 个常出现的周期, 我们给出了 4 条周期性余弦函数的序列(图 2). 取高频变化周期 21 年, 相当于考虑了十年暖期与十年冷期的重复出现. 62.5 年和 116 年的周期, 它们的变化幅度接近 0.1℃, 194.6 年的周期变幅超过了 0.1℃. 这 4 个周期的振幅、频率和初位相都是不一样的. 于是, 在一些时间点上它们可能相互抵消, 而在另外的时间点上它们有可能发生正位相(或负位相)的叠加, 形成气候异常. 考察过去千年的这 4 个周期, 它们依次在 2002, 1998, 1994 和 1998 年分别达到了最近 1 次暖的温度峰值, 其中 1998 年出现了 2 个周期变化的正位相叠加. 所有 4 个周期变化能在 1994~2002 年不到十年内正位相相遇, 却是过去千年来的第一回. 事实上, 1 个暖期(暖平台)已经在 21 世纪之交形成了<sup>[10]</sup>.

图 3 给出的是剔除趋势后的气温距平序列与上述 4 条周期性余弦函数序列叠加的比较. 年代际气温变化和 20 世纪的增暖趋势较好地模拟出来了, 20 世纪 10 年代和 20 世纪 70 年代的冷期, 以及 20 世纪 40 年代和 21 世纪初的暖期也被模拟出来了. 这两条千年序列之间的相关系数达到 0.50. 两条序列之间的差异可能来自余弦函数是确定的波动, 而气温具有气候系统中的阶段性变化, 以及系统的非线性相互作用. 它们之间的差值幅度大约为 0.2℃. 如果去掉 21.1 年的函数序列, 仅仅用其他 3 条函数序列模拟, 则拟合的最近峰值就落在了 20 世纪末. 这反映出准 20 年的振荡对十年温度暖期的出现具有重要的调节作用.

## 2 太阳和海洋强迫的气候变化

为了解释全球温度变化中的多时间尺度振荡的

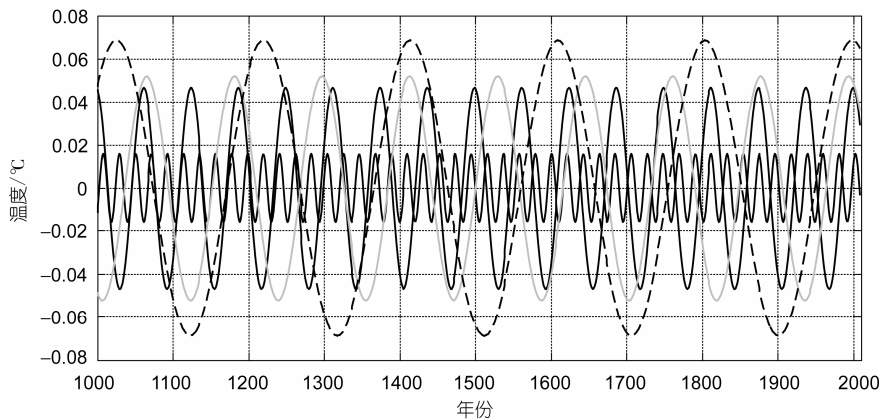


图2 基于小波分析得到的4条周期性余弦函数序列

小振幅黑线(21.1年周期,  $-0.016\cos(0.3t+5.2)$ ), 最近的峰值在2002年; 大振幅黑线(62.5年周期,  $0.047\cos(0.1t+0.22)$ ), 最近的峰值在1998年; 灰线(116年周期,  $0.052\cos(0.054t-1.13)$ ), 最近的峰值在1994年; 虚线(194.6年周期,  $0.069\cos(0.032t-1.7)$ ), 最近的峰值在1998年, 时间  $t$  为从公元1000年开始计数的年份

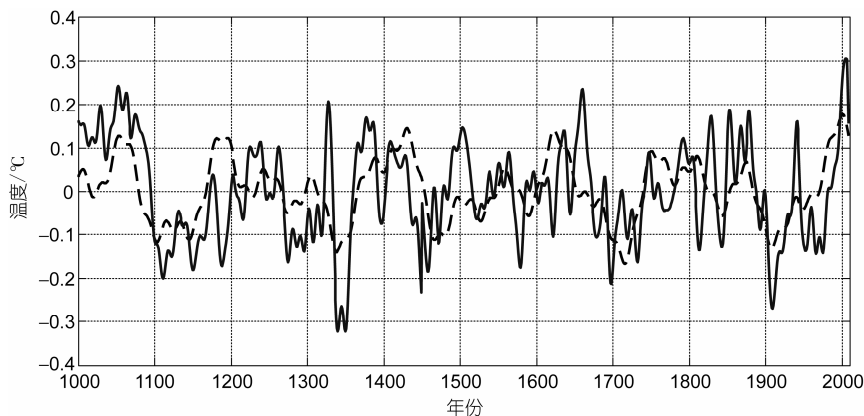


图3 公元1000~2008年温度序列与4条周期性余弦函数集成

实线, 剔除趋势后的温度原始序列; 虚线, 4条(21.1, 62.5, 116和194.6年)周期性余弦函数的叠加序列

成因, 我们取用了近400年基于 $^{10}\text{Be}$ 重构的太阳辐射序列<sup>[11,12]</sup>. 利用1600~2000年全球气温序列和太阳辐射序列计算的小波分析谱, 分别得到了气温变化的69.9, 111和206.7年3个主要周期和太阳辐射的118和175年2个主要周期(图略).

太阳辐射的2条周期性余弦函数以及它们的模拟序列与原序列的对比分别给出在图4(a)和(b)中. 这2条函数序列很好地模拟了太阳辐射在百年尺度上的变化. 把太阳辐射118年和气温变化111年的函数序列画在图5中, 可以看到太阳辐射变化的位相超前气温变化的位相大约10~25年. 在近200年的时间尺度上, 太阳辐射位相也是超前气温变化位相的(图略). 这反映了全球气温在百年尺度上的变化受到太

阳辐射变化的影响, 即全球气候对太阳辐射的响应有一个滞后. 这种滞后关系可以用太阳辐射直射北回归线时间在6月21日前后, 而北半球夏季风降水和对流层低层温度在8月初才发展到北半球最北位置来解释<sup>[13]</sup>.

我们又选择公元1850~2000年全球平均气温和太阳辐射序列进行子波分析, 结果得到气温变化存在显著的21.2和64.8年周期, 太阳辐射变化存在10, 22和43.3年的周期. 把这一时段的2条气温余弦函数序列(图6(a))叠加起来能够较好地拟合剔除长期趋势后的气温变化. 在近150年的全球气温变化中, 3次十年暖期和2次十年冷期, 都被拟合出来了(图6(b)). 原始的太阳辐射序列可以分解成5条独

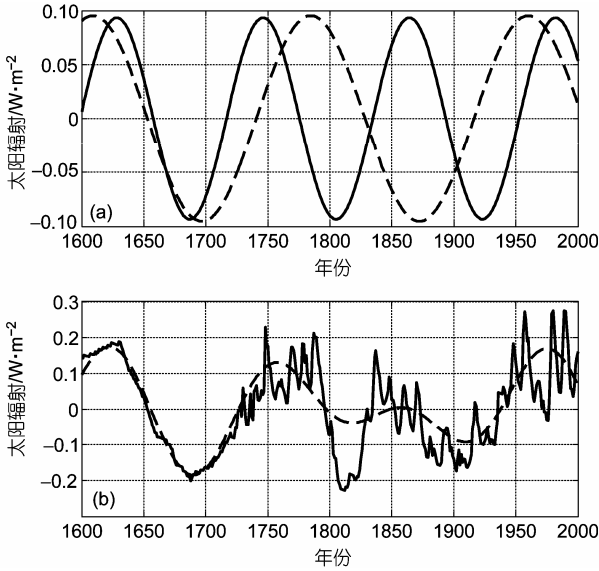


图4 太阳辐射余弦函数序列及其集成与原序列的比较

(a) 太阳辐射的 2 条周期性余弦函数序列(实线, 118 年周期,  $0.0933 \cos(0.0533t-5.06)$ ; 虚线, 175 年周期,  $-0.0953 \cos(0.0358t+2.07)$ ); (b) 太阳辐射两条余弦函数序列的集成(虚线)与太阳辐射原序列(实线)的比较, 时间  $t$  为从公元 1600 年开始计数的年份

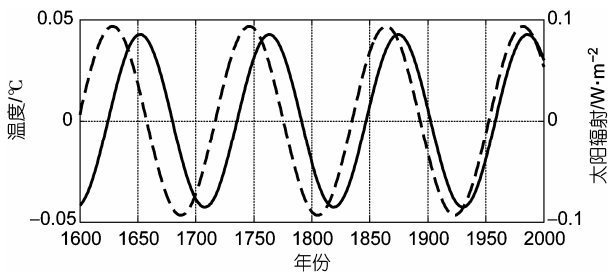


图5 百年尺度上温度与太阳辐射变化位相关系的比较

实线, 温度变化 111 年周期性余弦函数( $-0.0427 \cos(0.056t-2.15)$ )序列; 虚线, 太阳辐射量 118 年周期性余弦函数( $0.0933 \cos(0.0533t-5.06)$ )序列

立的周期性函数. 太阳辐射的 10, 22 和 43.3 年周期变化的振幅只在  $0.025 \sim 0.05 \text{ W/m}^2$  之间, 而 118 和 175 年周期变化的振幅达到  $0.1 \text{ W/m}^2$ . 太阳辐射原序列与太阳辐射 3 条周期性函数序列的集成, 以及太阳辐射 5 条周期性函数序列的集成给出在图 6(c) 中. 5 条周期性函数的叠加可以较好地模拟出太阳辐射的原序列.

为了说明十年冷期和十年暖期形成的可能原因, 我们在图 7 中给出了太阳辐射变化的 22 年函数序列和气温变化的 21.2 年函数序列. 过去的 150 年中, 太阳辐射变化的位相超前气温, 反映了十年冷期和十

年暖期的形成与太阳辐射量变化有关. 同样, 我们又在图 8 中给出了太阳辐射变化的 10 年函数序列和气温变化的 10.7 年函数序列. 在先前的分析<sup>[5]</sup>中, 1975~2008 年全球月平均气温序列中的十年际振荡是很清楚的. 同样, 在十年际尺度上, 太阳辐射变化的位相超前气温变化 1~2 年. 最近 Meehl 等人<sup>[14]</sup>用 3 个气候模式探讨了在 11 年尺度上太阳辐射变化对气候影响的放大作用.

分析准 65 年的气温周期性变化也是很有意义的. Schlesinger 和 Ramankutty<sup>[15]</sup>早就指出, 全球气候系统中有一个 65~70 年的变化周期. 为了论证气温准 65 年周期的存在, 而且受到外强迫的影响, 我们分析北太平洋的海温变化与全球气温变化的关系. 海温序列来自 Shen 等人<sup>[16]</sup>重建的太平洋年代际涛动(PDO)指数. 对北太平洋这一海温代用序列检测得到, 它有准 62 年的周期. 图 9 给出了气温变化的 63 年周期分量序列和北太平洋年代际涛动(PDO)指数的 62 年周期分量序列. 它们之间有一个位相差, 海温变化位相早于气温变化 2~6 年. 这一关系说明, 太阳辐射和海洋在全球气候变化中的作用不容低估, 太阳辐射首先强迫于海温, 再影响到全球气温的变化.

### 3 未来全球气温的预估

我们尚不清楚过去 159 年(1850~2008 年)以每 100 年  $0.44^\circ\text{C}$  的变暖速率还能维持多久. 未来百年的气温变化是很难遵循过去百年气温趋势发展的. 在任何时间尺度的预报中, 依赖过去的趋势是不可靠的, 但自然周期性振荡是比较稳定的. 我们曾在这一百年趋势下用准 70 年的自然振荡预测 21 世纪 40 年代会有一个冷期, 21 世纪 70 年代进入一个暖期<sup>[17]</sup>. 最近, 我们又用两个周期(21.2 和 64.1 年)振荡叠加上百年趋势, 预计全球平均气温降低到 2035 年前后, 然后上升到 2068 年附近的一个新的暖期<sup>[5]</sup>. 如果用本文中的 3 个周期性(21.1 年+62.5 年+116 年)波动, 或者 4 个周期性(21.1 年+62.5 年+116 年+194.6 年)波动函数序列叠加上百年趋势, 也能得到类似的预测结果. 不同分量的组合预测表明, 21 世纪的暖期期望值在  $0.6^\circ\text{C}$ . 这些预测是在仅仅用不同的余弦函数组合下线性外推累加的结果, 并没有考虑气候系统中可能出现的非线性相互作用. 如图 3 所示, 非线性相

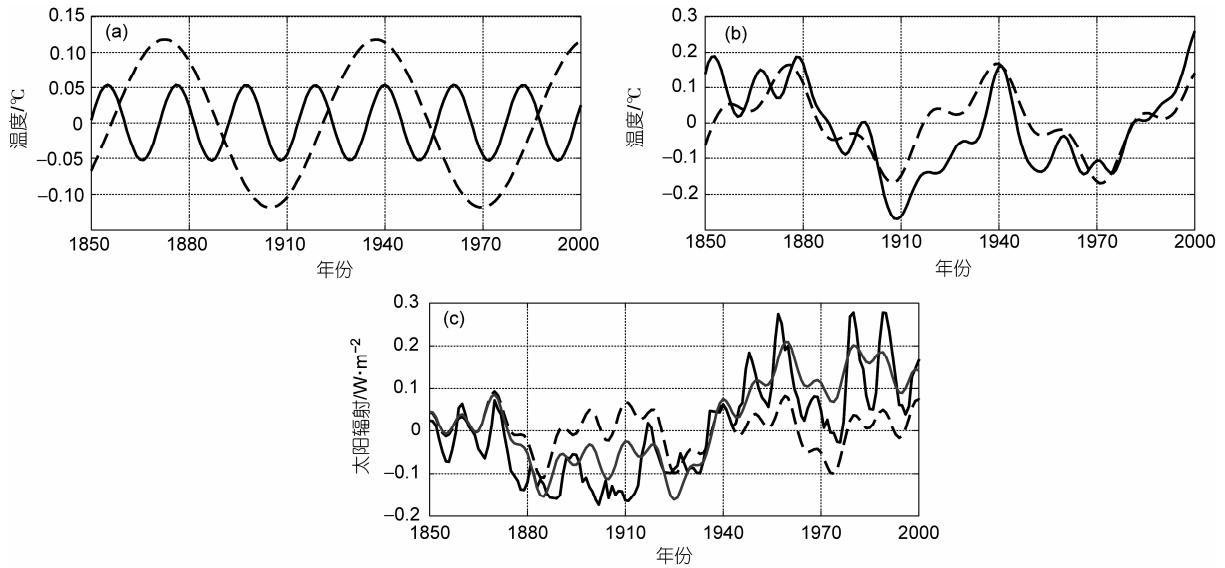


图6 公元1850~2000年全球平均温度和太阳辐射变化的比较

(a) 全球平均温度变化的21.2年(实线)和64.8年(虚线)余弦函数序列; (b) 温度变化中2条余弦函数序列的叠加(虚线)与原温度序列(实线)的比较; (c) 太阳辐射序列(黑色实线)与太阳辐射3条周期性函数(10年+22年+43.3年)序列的集成(黑色虚线)及太阳辐射5条周期性函数(10年+22年+43.3年+118年+175年)序列的集成(灰色实线)

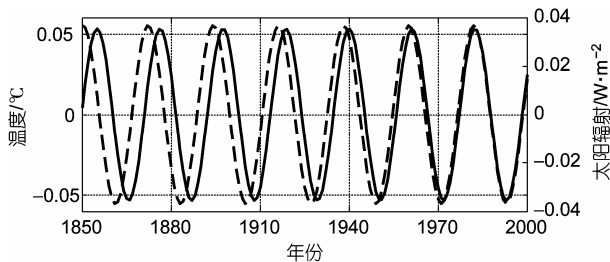


图7 准20年尺度上温度与太阳辐射变化位相的比较

实线, 温度变化的21.2年周期性余弦函数序列; 虚线, 太阳辐射变化的22年周期性余弦函数序列

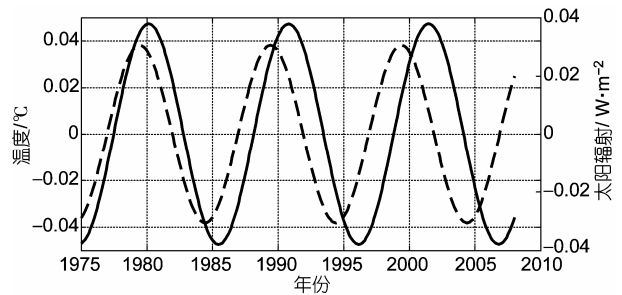


图8 准10年尺度上温度与太阳辐射变化位相的比较

实线, 全球月平均温度中的10.7年周期性余弦函数序列; 虚线, 太阳辐射变化的10年周期性余弦函数序列

互作用的可能变幅在0.2℃左右.

#### 4 结论与讨论

通过对千年全球气温序列和近400年太阳辐射、海温序列的分解分析, 我们可以归纳出如下认识.

(1) 过去的一千年中, 全球平均气温经历了15世纪40年代前的中世纪暖期和之后的小冰期及1850年以来的全球增暖期. 从中世纪暖期到小冰期, 平均气温下降了0.24℃, 增暖期以来全球气温每百年上升了0.44℃. 这3个时期的温度变化反映了地球气候系统中还存在300~400年的振荡, 但变化的原因仍不清楚. 20世纪, 年代际的温度自然变率与长期增暖趋

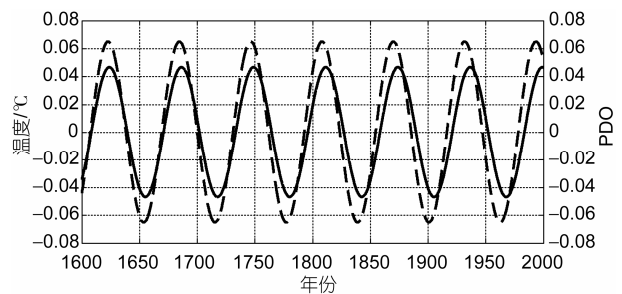


图9 年代际尺度上全球平均温度与年代际涛动(PDO)指数位相的比较

实线, 全球平均温度变化的63年周期性余弦函数序列; 虚线, 北太平洋年代际涛动(PDO)指数的62年周期性余弦函数序列

势的变幅相当. 由此推断, 人类活动, 包括城市热岛影响导致的 20 世纪温度变化量不超过总变幅的 1/4.

(2) 全球平均气温存在准 21 年、准 65 年、准 115 年和准 200 年的周期变化. 准 21 年的周期变化构成了十年冷期和十年暖期的交替出现. 20 世纪 40 年代的暖期和 21 世纪初的暖期是 21 年周期暖期与其他周期暖期叠加的结果. 21 世纪之交最强的暖期是过去千年中 4 个独立周期性暖期叠加的结果.

(3) 全球平均气温具有的准 10 年、21 年、65 年、115 年和 200 年周期属于自然变化, 是外强迫作用的结果. 全球气温的这些周期性振荡与太阳辐射有关,

气温变化滞后于太阳辐射变化. 全球气温中的准 65 年周期变化落后于北太平洋海温变化的年代际位相, 反映出气候系统中的自然振荡.

(4) 要对未来百年全球平均气温做出预估, 历史资料长度至少需要千年. 本文所用的千年温度序列中, 前 800 多年的温度信息主要来自代用资料. 代用资料的可靠性也会影响本文对气温变化周期的检测. 基于未来百年继续变暖 0.44℃ 的趋势和多时间尺度周期叠加, 21 世纪的全球温度会继续当前的年代际降温到 21 世纪 30 年代, 此后温度上升到 21 世纪 60 年代的一个暖期.

## 参考文献

- 1 Scafetta N, West B J. Is climate sensitive to solar variability? *Phys Today*, 2008, 3: 50—51
- 2 Benestad R E, Schmidt G A. Solar trends and global warming. *J Geophys Res*, 2009, 114: D14101
- 3 Meehl G A, Stocker T F, Collins W D, et al. Global Climate Projections. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press, 2007. 747—845
- 4 Hansen J, Sato M, Ruedy R, et al. Climate simulations for 1880—2003 with GISS modelE. *Clim Dyn*, 2007, 29: 661—696
- 5 钱维宏, 陆波, 祝从文. 全球平均温度在 21 世纪将怎样变化? *科学通报*, 2010, 55: 1532—1537
- 6 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
- 7 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
- 8 Mann M E, Jones P D. Global surface temperatures over the past two millennia. *Geophys Res Lett*, 2003, 30: 1820
- 9 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
- 10 Easterling D R, Wehner M F. Is the climate warming or cooling? *Geophys Res Lett*, 2009, 36: L08706
- 11 Lean J, Beer J, Bradley R. Reconstruction of solar irradiance since 1610: Implications for climate change. *Geophys Res Lett*, 1995, 22: 3195—3198
- 12 Bard E, Frank M. Climate change and solar variability: What's new under the sun? *Earth Planet Sci Lett*, 2006, 248: 1—14
- 13 Qian W H, Tang S Q. Identifying global monsoon troughs and global atmospheric centers of action on a pentad scale. *Atmos Ocean Sci Lett*, 2010, 3: 1—6
- 14 Meehl G A, Arblaster J M, Matthes K, et al. Amplifying the Pacific climate system response to a small 11-year solar cycle forcing. *Science*, 2009, 325: 1114—1118
- 15 Schlesinger M E, Ramankutty N. An oscillation in the global climate system of period 65—70 years. *Nature*, 1994, 367: 723—726
- 16 Shen C M, Wang W C, Gong W, et al. A Pacific decadal oscillation record since 1470 AD reconstructed from proxy data of summer rainfall over eastern China. *Geophys Res Lett*, 2006, 33: L03702
- 17 Gao X Q, Zhang X, Qian W H. Climate change: Long-term trends and short-term oscillations. *J Tropical Meteorol*, 2006, 12: 139—149