

基于非线性分析方法的多种代用资料的相似性研究*

龚志强^{1,2)} 封国林^{2,3)}

1) 兰州大学大气科学学院, 兰州 730000)

2) 国家气候中心, 中国气象局气候研究开放实验室, 北京 100081)

3) 中国科学院大气物理研究所东亚区域气候-环境重点实验室, 北京 100029)

(2006 年 10 月 1 日收到, 2007 年 2 月 22 日收到修改稿)

代用资料的重建与分析是古气候研究领域的一个重要课题, 应用小波变换和功率谱研究了都兰树轮等 8 种温度代用资料的主要周期, 并以此为基础进行滤波, 结合动力学相关因子指数和相关系数从代用资料的动力学结构特征和外部特征两个角度研究其在不同尺度上的相似性. 研究结果表明, 准 100 a 尺度是这些代用资料的共同周期, 并且 8 种温度代用资料的动力学结构特征和外部特征在准 100 a 及以上的尺度层次上是相似的, 即外部特征和动力学结构特征两个方面均符合可比性条件. 同时, 随着尺度的降低, 动力学结构特征和外部特征的可比性均降低. 60—70 a 尺度及其以下的尺度, 各分量之间的动力学结构特征失去了可比性; 在小于 30 a 的尺度上, 它们的外部特征也不再具有可比性.

关键词: 代用资料, 动力学自相关因子指数, 相似性, 尺度

PACC: 9260X

1. 引言

20 世纪全球变暖、中世纪暖期、小冰期等重大气候事件的研究已经成为当代科学界瞩目的新领域. 但由于观测资料长度较短, 大大限制了对重大古气候事件的研究, 因此代用资料作为一种新的资料来源, 越来越受到气象学工作者的重视. 20 世纪后半期以来, 不少地学家将许多新的研究手段和方法引入环境演变研究中, 建立了许多广泛的气候替代指标, 取得了世人瞩目的大量成果. 继竺可桢^[1]初步建立中国过去 5000 a 温度变化序列图以来, 不同时段、不同区域、不同分辨率的温度变化序列屡有问世. Yang 等^[2]利用冰芯、树轮、湖泊沉积以及历史文献等代用序列, 建立了中国 2000 a 温度变化序列; Tan 等^[3]利用北京石花洞年层厚度序列建立了北京地区过去 2650 a 的温度变化序列; 施雅风等^[4]对都兰树轮序列和中国东部、古里雅冰芯以及青藏高原南部温度代用资料从外部特征的角度进行比较, 研究了中世纪暖期以及小冰期等几次重大气候事件的

迄止时间与特征等. Ge 等^[5]利用历史文献的冷暖记载, 特别是物候记载重建了中国东部地区过去 2000 a 的冬半年温度距平变化序列. 但按不同时间尺度作用的气候变化记录, 往往来源于多种资料, 现有气候代用指标多采用完全不同的单位表述, 这必然导致各种代用资料存在分辨率不同, 每种气候代用资料(如树轮、冰芯、湖泊沉积、石笋、有机炭含量等)究竟何种程度上直接表达了气候变化, 或者说如何将之转化为反映气候要素的数值等问题^[6,7]. 这无疑会给不同代用资料之间的比较和分析带来较大的麻烦. 因此对气候变化的不同类型代用资料的指标应进行相似性和可靠性分析, 即确定不同的代用资料之间在何种条件下具有可比性, 在此基础上取得的气候指标的统计特征, 才有可能对代用资料所表示的气候信息做出正确的诊断与分析, 进而研究气候变率的可预报性和特殊气候型的可持续性.

针对上述问题, 本文将对中国及日本的 8 种温度代用资料为例, 从代用资料的外部特征及其动力学结构特征两个角度, 应用多种非线性分析方法, 对代用资料之间的相似性作初步研究.

* 国家重点基础研究发展计划(973)项目(批准号: 2006CB400503)和国家自然科学基金(批准号: 90411008, 40675044)资助的课题.

† 通讯联系人. E-mail: feng_gl@sina.com

2. 资料和分析方法

资料: 针对前面提出的问题, 我们对中国东西部地区以及日本共 8 种代用资料(图 1)^[4] 进行比较分析. 都兰树轮指数曲线序列(北纬 28°—37°, 东经 85°—99°)是青藏高原南部温度等级资料, 该资料来源于树木年轮, 其中 1260 a 之后的序列综合了昌都、八宿、天峻等 12 个树轮表^[8]; 青藏高原祁连山敦德冰芯 $\delta^{18}O$ 序列(北纬 38°06', 东经 96°24')代表了我国西北地区的温度变化^[9, 10]; 青藏高原古里雅冰芯 $\delta^{18}O$ 序列(北纬 35°12', 东经 81°30')^[11], 该冰芯位于青藏高原西北部, 与青藏高原地区的地表温度变化具有较好的相关性^[12]; 日本树木年轮 $\delta^{13}C$ 序列代表了日本和中国东部沿海地区的温度变化情况^[13]; 金川泥炭 $\delta^{13}O$ 序列(北纬 42°20', 东经 126°22'), 该序列来源于吉林省辉南县金川镇的泥炭沼泽, 可以

表征中国东北地区的温度变化^[14]; 台湾大鬼湖 C/N 序列(北纬 22°52', 东经 120°51')和嘉明湖 TOC 比值序列(北纬 23°17', 东经 121°01')在一定程度上表征干冷和暖湿气候的变化特征^[15—17]; 北京石花洞石笋微层厚度序列(北纬 39°47', 东经 115°56'), 该石笋位于北京房山县南车营村, 石笋微层的形成与洞中的温度和水汽有较大的关联, 因此可以作为温度变化的一个重要指标^[3, 18, 19]. 为了提高比较的准确性, 本文上述 8 种温度代用资料的长度均取为 200—1950 a, 共 1751 a, 并且对所有的资料进行标准化处理. 由图 1 可以看出, 虽然这些代用资料均能在一定程度上表征区域温度的变化特征, 但是由于其分辨率不同, 同时受各种局地外强迫和扰动的影响, 使代用资料相互之间的可比性相对较低, 即使进行多项式拟合以后, 在各个时间段的变化趋势也各不相同, 因此直接对各种代用资料进行比较分析, 很难发现其内在的相似性.

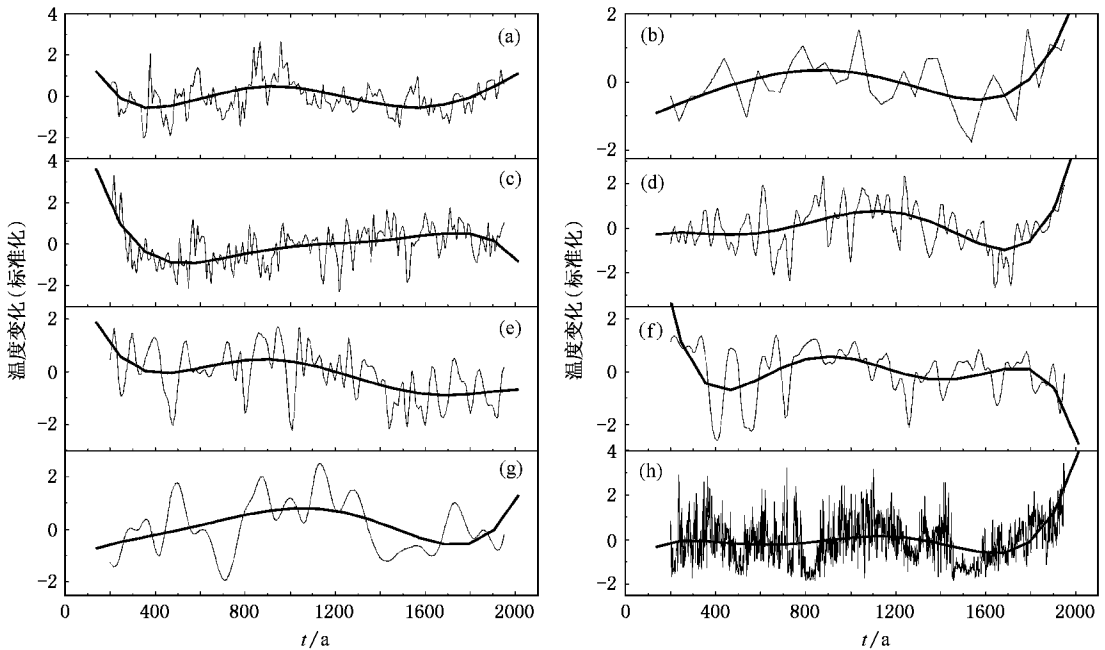


图 1 标准化的 8 种表征区域温度变化的代用资料 (a) 都兰树木年轮 (b) 敦德冰芯 (c) 古里雅冰芯 (d) 日本树木年轮; (e) 金川泥炭沉积 (f) 台湾大鬼湖湖泊沉积 (g) 台湾嘉明湖湖泊沉积 (h) 北京石花洞石笋 (下同) 细线为标准化的代用资料曲线, 粗线为 5 阶多项式拟合曲线, 横坐标为时间 t

1) 小波变换

小波变换是泛函分析、傅里叶变换、样条分析、调和分析和数值分析的完美结晶, 其在时域中具有良好的局部化特征, 能够比较有效地从变化信号中提取信息, 通过对基函数的伸缩、平移运算, 达到对信号的多分辨率分析^[20].

对一个函数 $\varphi(t)$ 当其满足条件^[21, 22]

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \varphi(t) dt = 0, \quad (1)$$

时该函数被称为基小波. 由基小波 $\varphi(t)$ 的伸缩和平移生成函数 $\varphi_{a,b}(t)$ 被称为连续小波:

$$\varphi_{a,b}(t) = |a|^{-1/2} \varphi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (a, b \in R, a \neq 0), \quad (2)$$

式中, a 称为尺度因子, b 称为平移因子. 函数 $\varphi_{a,b}(t)$ 具有伸展 ($a > 1$) 和收缩 ($a < 1$) 的作用, 改变 b 可以实现函数 $\varphi(t)$ 对信号 $x(t)$ 的平移扫描. 对于信号 $x(t) \in L^2(R)$ (即能量有限信号), 关于小波 $\varphi_{a,b}(t)$ 的连续小波变换定义为

$$\begin{aligned} W_x(a, b) &= \int_{-\infty}^{+\infty} \varphi\left(\frac{t-b}{a}\right) x(t) dt \\ &= \int_{-\infty}^{+\infty} \varphi_{a,b}(t) x(t) dt, \end{aligned} \quad (3)$$

小波方差^[8]表征各个不同 a 对应的能量谱, 其定义为

$$\text{Var}(a) = \int_{-\infty}^{+\infty} |W_x(a, b)|^2 db.$$

通常情况下, 小波方差谱的极大值对应原信号的主要显著周期.

2) 功率谱

功率谱分析是以傅里叶变换为基础的频域分析方法, 其意义为将时间序列的总能量分解到不同频率上的分量, 根据不同频率的波的方差贡献诊断出序列的主要周期, 从而确定出周期的主要频率, 即序列隐含的显著周期^[23].

对于一个序列 $x(t)$, 最大滞后时间长度为 m 的自相关系数 $r(j)$, $j = 0, 1, 2, 3, \dots, m$ 为

$$r(j) = \frac{1}{n-j} \sum_{i=1}^{n-j} \left(\frac{x(t) - \bar{x}}{s} \right) \left(\frac{x(t+j) - \bar{x}}{s} \right), \quad (4)$$

其中 \bar{x} 为序列的均值, s 为标准差. 随后计算不同波数的粗谱估计值:

$$\begin{aligned} \hat{s} &= \frac{1}{m} \left[r(0) + 2 \sum_{j=1}^{m-1} r(j) \cos \frac{k\pi j}{m} \right. \\ &\quad \left. + r(m) \cos k\pi \right] \quad k = 0, 1, \dots, m. \end{aligned} \quad (5)$$

粗谱估计与真实谱存在一定误差, 因而需要对粗谱估计作平滑处理, 以便得到连续性的谱值. 对得到的平滑谱用红噪声或白噪声标准谱进行显著性检验, 即将功率谱估计和标准谱绘成曲线图. 根据绘出的曲线看功率谱估计曲线的峰点是否超过标准谱, 若超过则说明峰点所对应的周期是显著的^[24].

3) 相关系数

Pearson 相关系数是描述两个随机变量线性相关的统计量, 一般简称为相关系数或点相关系数, 用 r 表示. 设两个相关变量 $x(t), y(t)$, 它们的相关系数为

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x(i) - \bar{x})(y(i) - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x(i) - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y(i) - \bar{y})^2}}. \quad (6)$$

对于不同变量不同时刻间的线性相关是否显著, 即相关数值达到多少算是存在显著相关关系, 必须进行统计检验. 统计量:

$$t = \sqrt{n-2} \frac{r}{\sqrt{1-r^2}}, \quad (7)$$

遵从自由度 $v = n - 2$ 的 t 分布. 给定显著性水平 α , 查 t 分布表, 若 $t > t_\alpha$, 则显著相关^[23].

4) 动力学相关因子指数

对一个长度为 N 的时间序列 $\{x(t_i), t_i = 1, 2, \dots, N\}$, 基于 Takensi 相空间重构理论, 对其进行嵌入空间上动力学轨线的重构, 其表达式为

$$X_i = \{x(t_i), x(t_i + \tau), \dots, x(t_i + (m-1)\tau)\}, \quad (8)$$

其中时间延迟 $\tau = \alpha \Delta t$, α 为延迟参数, Δt 为采样时间, m 是嵌入空间维数. 这样构成了一个 $(N - \alpha(m-1)) \times m$ 维的向量矩阵, 即

$$X = \{X_i, i = 1, \dots, N - \alpha(m-1)\}, \quad (9)$$

它的自相关和定义为

$$\begin{aligned} C_{xx}(\epsilon) &= P(\|X_i - X_j\| < \epsilon) \\ &= \frac{2}{(N - \alpha m)(N - \alpha(m-1))} \\ &\quad \times \sum_{i=1}^{N - \alpha m} \sum_{j=i+1}^{N - \alpha(m-1)} \mathcal{O}(\epsilon - \|X_i - X_j\|). \end{aligned} \quad (10)$$

(10) 式表示在重构空间里 ϵ 距离内找到邻近点 X_i 的概率, $\mathcal{O}(h)$ 为 Heaviside 阶跃函数. 在描述混沌信号时, 自关联和具有一定区分潜在动力学的的能力, 但它还远不能作为识别混沌时间序列间相似性最重要的标准. 为了更好地识别混沌时间序列的动力异同性, 假设 $x(i)$ 和 $x(j)$ 是离散序列 $x(n)$ (n 为样本长度) 上的两点, $|x(i) - x(j)| \leq \epsilon$ 时, $|x(i+1) - x(j+1)| \leq \epsilon$ 的概率 $s_m = C_{xx}^{m+1}(\epsilon) / C_{xx}^m(\epsilon)$ 比自关联和具有更强的预见性, 可用于两个时间序列动力异同性的识别. 同样, 对于两个时间序列 $\{x_i\}, \{y_i\}$, 动力学相关因子指数 (下文简称 Q 指数) 定义为

$$Q_{xy} = \lim_{\epsilon \rightarrow 0} \left| \ln \frac{C_{xy}(\epsilon)}{C_{yy}(\epsilon)} \right|. \quad (11)$$

上式的物理意义是当 Q_{xy} 统计上足够小时, 序列集 $\{x_i\}, \{y_i\}$ 至少具有相近的动力学结构, 否则就不具有相近的动力学特征^[25-27]. 本文取 Q 指数值

小于 0.2 则认为确有相近的动力学结构^[28,29].

3. 代用资料的周期分析

图 2 为 8 种代用资料的小波方差图. 从图 2 中可以看出, 这 8 种反映温度变化的代用资料中均存在 100 a 和 100 a 以上的大尺度变化的准周期信号. 这些大尺度周期大致可以分为三个层次: 准 100 a 尺度、准 150—200 a 尺度和大于 350 a 的尺度(见表 1). 为了进一步验证这些周期信号存在的可靠性, 取最大滞后长度 $m = \frac{n}{10} - \frac{n}{3}$ ^[23], 我们分析了上述代用资料功率谱的变化特征(如图 3). 图 3 中, 这 8 种代用资料中包含的准周期信号大致可以分为 5 个层次: 小于 30 a 的尺度、准 40—50 a 尺度、准 70—80 a 尺度、准 100 a 尺度和准 165 a 尺度, 并通过了 0.05 的置信度检验. 对比小波变换和功率谱的检测结果发

现, 两者均存在准 100 a 尺度, 即准 100 a 尺度可能是这些代用资料的共同周期. 施雅风等人^[30]也已经证实了古里雅冰芯积累量存在的百年及以上的尺度是由于青藏高原地区的温度的变化受控于太阳活动的缘故. 同时, 前者检测到了准 150—200 a 尺度和大于 350 a 及以上的低频信号, 而后者仅检测到准 165 a 尺度的信号. 小波变换对高频的信号分辨率较低^[31], 故未能检测出功率谱检测得到的准 40—50 a 尺度、准 70—80 a 尺度等尺度信号. 出现上述差异的主要原因可能在于: (1) 不同的检测方法其分辨率不同, 即检测的精度不同; (2) 不同的代用资料其本身的分辨率不同, 以及资料本身包含一些噪声、干扰等信息. 因此, 对多种代用资料进行比较分析时, 如何确定各种代用资料在何种条件下具有内在的相似性, 在何种条件下失去可比性, 这一问题的解决显然对于气候诊断和分析具有一定的现实意义.

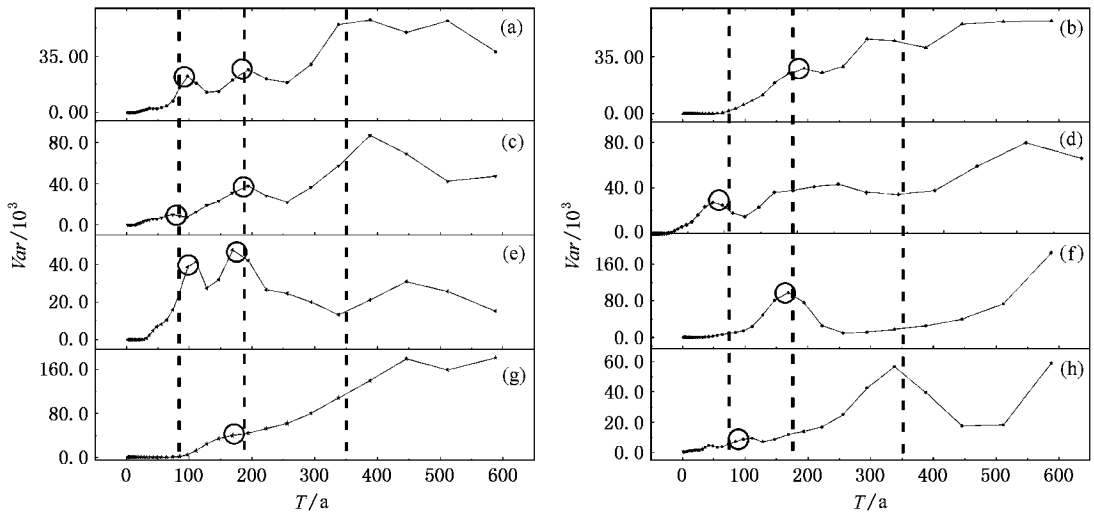


图 2 8 种代用资料的小波方差图(横坐标为周期, 纵坐标为小波方差, 三条虚线标出了三个层次的周期)

表 1 8 种代用资料小波变换检测结果

	周期/a				
都兰树木年轮	—	100	200	370	470
敦德冰芯	—	—	175	275	—
古里雅冰芯	—	75	200	250	525
日本树木年轮	—	75	150	—	450
金川泥炭沉积	—	—	150	—	—
台湾大鬼湖湖泊沉积	—	—	—	—	450
台湾嘉铭湖湖泊沉积	—	75	175	370	—
北京石花洞石笋	40	100	—	320	—

4. 代用资料的内在相似性分析

温度的变化是气候系统中多个尺度系统共同作用的结果, 因此我们试图从各个尺度层次上分别探讨各种代用资料之间的相似性, 这将有助于我们更好地研究各尺度系统所对应的外部控制因素. 本文应用 Zheng 等^[32]提出的一种滤波方法对上述 8 种代用资料进行多次滤波. 该方法是滤波频带很窄的多级滤波器, 能够实现高、低频的分离, 目前已被 Rasmusson 等^[33], Wang 等^[34]用于分离海平面温度

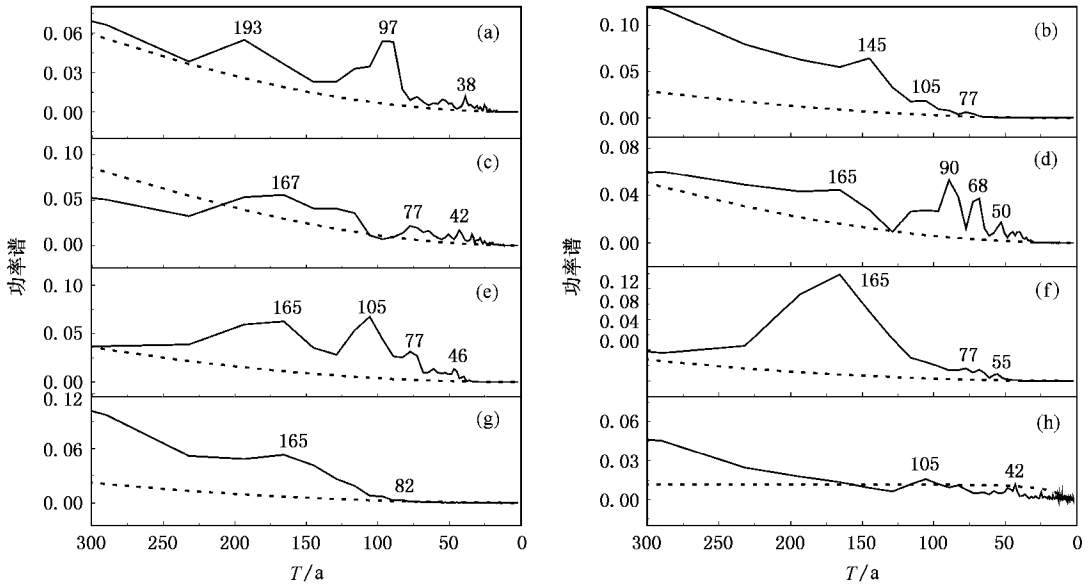


图3 8种代用资料的功率谱图(实线为功率谱,虚线为标准谱,并标注了检测得到的一些主要的显著周期)

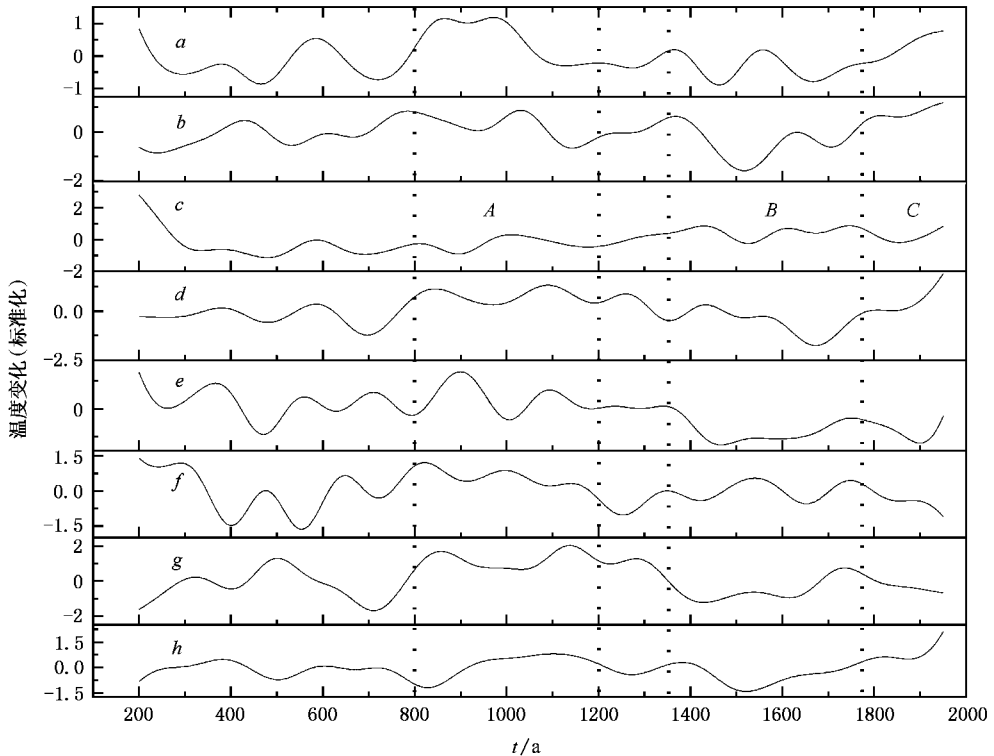


图4 8种代用资料的大于100 a尺度分量图(图中A,B,C分别对应中世纪暖期、小冰期和20世纪以来的气候变暖)

29 a以上的慢变平均值. 计算程序由 Wang 提供, 利用这种方法滤波后序列的长度与原序列相同. 结合前文的周期性分析, 我们通过滤波分别得到了小于 30 a 尺度、30—60 a 尺度、60—70 a 尺度、70—100 a 尺度和大于 100 a 尺度的 5 组分量, 每组 8 个分量分别

与 8 种代用资料一一对应. 这些周期尺度的存在性, 在康兴成^[35]、王绍武^[36]、李建平^[37]等人以往的一些工作已经得到了证实. 对每一组内的 8 个分量, 我们分别从相关系数 r 和 Q 指数两个角度进行分析.

图 4 为 8 种代用资料的大于 100 a 尺度分量图, 从图中可以看出, 在这一尺度层次上不同代用资料之间的可比性大大提高, 其表征的温度变化的升降趋势虽然在时间上存在一定的滞后或超前现象, 但就整体而言是一致的. 并且我们可以清楚地看到中世纪暖期(9—14 世纪)、小冰期(13—19 世纪)和 20 世纪以来的气候增暖等三次重大气候事件是较好对应的. 这也在一定程度上佐证了中世纪暖期、小冰期以及 20 世纪以来的气候增暖是一种百年乃至更大尺度的振荡现象. 其原因在于, 就中国及其周边的一些地区而言, 在百年乃至更大尺度层次上, 气候系统的动力学结构是相似的, 即控制气候系统的外部强迫等是相似的. 为了验证这一结论, 我们计算了这 8 个分量相互之间的相关系数和 Q 指数.

表 2 为大于 100 a 尺度的 8 个分量之间的 Q 指数, 可以看出 8 个分量中除了 (a) 和 (g) 两个分量以外, 其余分量相互之间的 Q 指数非常小, 95.8% 的 Q 指数值上都小于 0.2, 更有一部分几乎接近于 0. Q 指数的物理意义是其统计上足够小时, 两个序列集至少具有相近的动力学结构特征. 因此, 就 Q 指数

的角度而言, 这些分量之间具有相似的动力学特征. 同时, 我们发现 (a) 和 (g) 两个分量与其他分量之间几乎所有的 Q 指数值都超过了 0.2, 换言之 (a) 和 (g) 两个分量与其他的分量都不具有相似的动力学结构, 甚至 (g) 分量与同是台湾地区 (f) 分量之间的 Q 指数值也较大. 结合小波变换和功率谱检测到的共同周期, 这显然是一种反常现象, 出现这一现象的原因可能在于这两个分量所对应的代用资料本身分辨率和噪声污染等因素造成的. 表 3 为大于 100 a 尺度的 8 个分量之间的相关系数 r , 可以看出, 除了 (a) 和 (c)、(c) 和 (h)、(d) 和 (f)、(f) 和 (g) 四对分量之间的相关系数未通过 0.01 显著检验外, 88.9% 分量之间的相关性都非常显著, 即这 8 个分量之间的相关性较好. 基于上述分析, 我们认为, 这 8 种代用资料在准 100 a 及 100 a 以上的尺度层次上是相似的, 即在外围特征和动力学结构特征两个方面均符合可比性条件. 故而对中及其周边地区的一些代用资料进行比较分析时, 应该特别注意这一尺度层次的变化特征.

表 2 大于 100 a 尺度的 8 个分量之间的 Q 指数 ($m=2$)

	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)	(g)	(h)
(a)	—	*	*	*	0.190	*	*	*
(b)	*	—	0.065	0.083	0.050	0.148	*	0.004
(c)	*	0.065	—	0.018	0.115	0.084	*	0.068
(d)	*	0.083	0.018	—	0.133	0.066	*	0.087
(e)	0.190	0.050	0.115	0.133	—	0.198	*	0.046
(f)	*	0.148	0.084	0.066	0.198	—	*	0.152
(g)	*	*	*	*	*	*	—	*
(h)	*	0.004	0.068	0.087	0.046	0.152	*	—
Q 的均值	0.297	0.131	0.131	0.135	0.154	0.168	0.340	0.132

注: 表中“*”表示 Q 指数大于 0.2, 即两个分量之间不具有相似的动力学结构; “—”表示自身的 Q 指数, 恒为 0.000, 故未给出

表 3 大于 100 a 尺度的 8 个分量之间的相关系数 r

	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)	(g)	(h)
(a)	—	0.389	*	0.558	0.311	0.271	0.297	0.160
(b)	0.389	—	-0.129	0.345	0.126	-0.117	0.125	0.490
(c)	*	-0.129	—	-0.106	-0.322	0.167	-0.323	*
(d)	0.559	0.345	-0.106	—	0.318	*	0.544	0.333
(e)	0.311	0.126	-0.322	0.318	—	0.146	0.366	0.217
(f)	0.271	-0.117	0.167	*	0.146	—	*	-0.192
(g)	0.297	0.125	-0.323	0.544	0.366	*	—	0.127
(h)	0.160	0.490	*	0.333	0.217	-0.192	0.127	—
$ r $ 的均值	0.284	0.246	0.150	0.315	0.258	0.128	0.255	0.217

注: 表中“*”表示相关系数未通过 0.01 的显著性检验; “—”表示自身的相关系数, 恒为 1.000, 故未给出

在此基础上,我们对小于 30 a 尺度、30—60 a 尺度、60—70 a 尺度和 70—100 a 尺度四个尺度层次上的 8 个分量作类似的处理,即分别计算 Q 指数和相关系数,进而分析它们在这四个层次上的内在的相似性。分析结果表明,随着尺度的降低,与各尺度对应的 8 个分量之间的可比性逐渐降低,即其内在的相似性越来越差。在 60—70 a 尺度上,83.3% 的 Q 指数值大于 0.2 (见表 4),即这一尺度上各分量之间的动力学结构差异较大,几乎不具有可比性;在小于 30 a 尺度上(见表 5),各分量之间的 Q 指数值 97.7% 都大于 0.2,各分量之间的动力学结构没有任何可比性而言。各分量之间的相关性也随着尺度的降低而减弱,但减弱的速度较 Q 指数缓慢。在 30—60 a 尺度上(见表 6),各分量相互之间依旧具有一定的关联性,72.3% 的相关系数仍可以通过 0.01 的显

著性检验;但在小于 30 a 尺度上(见表 7),只有极少数分量之间的相关系数(8.3%)能够通过 0.01 的显著性检验,即在这一层次上,相关性也不再具有可比性。出现这一结果的原因可能在于:气候系统是一个多层次系统,气候变化是多个尺度系统共同作用的结果^[38—43]。随着尺度的降低,全球性的一些大尺度系统的作用逐渐减弱,如太阳活动、地球自转等;与此同时,局地外强迫等因素的作用逐渐加强,如火山爆发、地形地势等,甚至起主导作用,因此温度、降水等气候特征的区域性大大加强,故而随着尺度的降低,各种代用资料、观测资料等,它们相互之间内在的可比性减弱,相似性降低。在这一过程中,动力学结构(即气候系统的控制方程组)的变化要比气候的外部特征的变化快得多,所以 Q 指数可比性的下降要远快于相关系数。

表 4 60—70 a 尺度的 8 个分量之间的 Q 指数($m=2$)

	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)	(g)	(h)
(a)	—	0.694	0.364	0.046	0.213	0.098	0.645	0.411
(b)	0.694	—	0.330	0.740	0.906	0.595	0.049	0.282
(c)	0.364	0.330	—	0.410	0.576	0.265	0.281	0.048
(d)	0.046	0.740	0.410	—	0.166	0.145	0.691	0.458
(e)	0.213	0.906	0.576	0.166	—	0.311	0.857	0.624
(f)	0.098	0.595	0.265	0.145	0.311	—	0.546	0.313
(g)	0.645	0.049	0.281	0.691	0.857	0.546	—	0.233
(h)	0.411	0.282	0.048	0.458	0.624	0.313	0.233	—
Q 的均值	0.309	0.450	0.284	0.332	0.457	0.284	0.413	0.296

注:表中“—”表示自身的 Q 指数,恒为 0.000,故未给出

表 5 小于 30 a 尺度的 8 个分量之间的 Q 指数($m=2$)

	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)	(g)	(h)
(a)	—	1.711	0.624	0.319	0.827	1.493	1.781	2.913
(b)	1.711	—	2.334	1.392	0.884	0.218	0.070	4.624
(c)	0.624	2.334	—	0.942	1.450	2.116	2.404	2.290
(d)	0.319	1.392	0.942	—	0.508	1.174	1.462	3.232
(e)	0.827	0.884	1.450	0.508	—	0.666	0.954	3.740
(f)	1.493	0.218	2.116	1.174	0.666	—	0.288	4.406
(g)	1.781	0.070	2.404	1.462	0.954	0.288	—	4.640
(h)	2.913	4.624	2.290	3.232	3.740	4.406	4.694	—
Q 的均值	1.208	1.404	1.520	1.129	1.129	1.295	1.457	3.237

注:表中“—”表示自身的 Q 指数,恒为 0.000,故未给出

表 6 30—60 a 尺度的 8 个分量之间的相关系数 r

	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)	(g)	(h)
(a)	—	0.137	*	0.135	*	*	*	0.088
(b)	0.137	—	0.345	0.103	0.267	*	0.474	0.147
(c)	*	0.345	—	*	0.198	0.154	0.229	*
(d)	0.135	0.102	*	—	*	0.198	*	0.224
(e)	*	0.267	0.198	*	—	0.222	0.311	0.134
(f)	*	*	0.154	0.198	0.222	—	*	0.271
(g)	*	0.474	0.229	*	0.311	*	—	0.094
(h)	0.088	0.147	*	0.224	0.135	0.271	0.094	—
$ r $ 的均值	0.051	0.210	0.132	0.094	0.162	0.121	0.158	0.137

注:表中“*”表示相关系数未通过 0.01 的显著性检验;“—”表示自身的相关系数,恒为 1.000,故未给出

表 7 小于 30 a 尺度的 8 个分量之间的相关系数 r

	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)	(g)	(h)
(a)	—	*	*	*	-0.113	*	*	*
(b)	*	—	*	*	*	*	*	*
(c)	*	*	—	*	*	*	*	*
(d)	*	*	*	—	-0.260	0.125	*	*
(e)	-0.113	*	*	-0.260	—	*	*	*
(f)	*	*	*	0.125	*	—	*	*
(g)	*	*	*	*	*	*	—	*
(h)	*	*	*	*	*	*	*	—
$ r $ 的均值	0.016	0	0	0.055	0.053	0.178	0	0

注:表中“*”表示相关系数未通过 0.01 的显著性检验;“—”表示自身的相关系数,恒为 1.000,故未给出

图 5 为各尺度层次上 8 个分量的 Q 指数和相关系数 r 绝对值的均值图. 计算相关系数绝对值的均值时,如果两个分量之间的相关性未通过 0.01 的显著性检验,则取 $r = 0$. 由图 5(a)可以看出,除了大于 100 a 尺度的层次上(a)和(g)分量存在一定的异常外,其余尺度层次上各分量 Q 指数的均值基本

没有重叠现象. 各个尺度上,各分量 Q 指数的均值具有较好的层次特征,整体表现为随着尺度的降低, Q 指数值逐渐增大,即动力学结构的相似性逐渐降低,这和前文的结论是完全一致的. 同时我们也可以发现,70—100 a 尺度是一个临界尺度,低于该尺度后,各分量之间的动力学结构特征基本上不具可

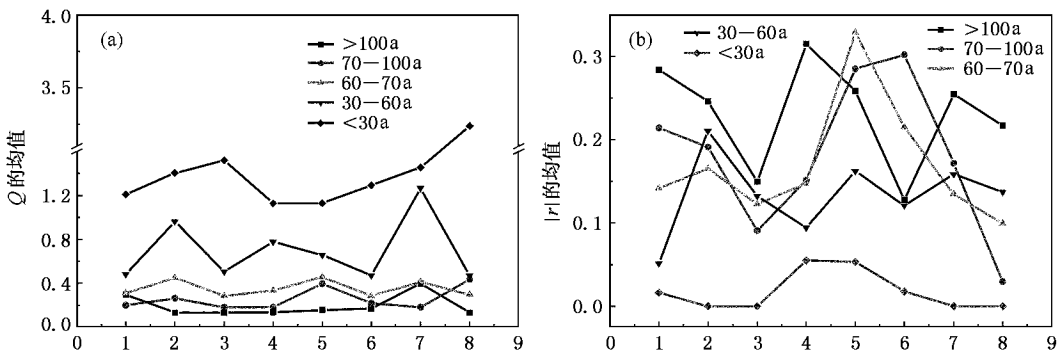


图 5 Q 指数和相关系数 r 绝对值的均值图 (a)为 Q 指数的均值图 (b)为相关系数绝对值的均值图(横坐标为相应的代用资料,1 为都兰树木年轮,2 为敦德冰芯,3 为古里雅冰芯,4 为日本树木年轮,5 为金川泥炭沉积,6 为台湾大鬼湖湖泊沉积,7 为台湾嘉明湖湖泊沉积,8 为北京石花洞石笋)

比性. 图 5(b) 中的相关系数绝对值的均值的单调性规律虽然没有 Q 指数明显, 主要表现在大于 100 a 的尺度、70—100 a 尺度和 60—70 a 的尺度, 三个尺度之间相关系数绝对值的均值出现了一定的交错, 但是仔细比较不难发现, 大于 100 a 尺度的均值基本上分布在最上层, 70—100 a 尺度的均值较 60—70 a 尺度略大一些, 此后, 随着尺度降低, 相关系数的均值也显著减小, 即代用资料外部特征的相似性随着尺度降低而逐渐降低的规律也是存在的. 同时在低于 30 a 尺度上, 代用资料的各分量之间的外部特征也不具有可比性.

5. 结 论

本文通过小波变换和功率谱对都兰树轮、古里雅冰芯、北京石花洞石笋等代用资料进行周期检测, 发现可能存在小于 30 a 尺度, 30—60 a 尺度, 60—70 a 尺度, 70—100 a 尺度和准 100 a 及以上尺度的周

期, 并且准 100 a 尺度可能是这些代用资料的共同周期. 这一周期的存在可能对应于气候系统中太阳活动对温度变化的控制. 在此基础上, 我们应用 Zheng 等^[32]提出的滤波方法对 8 种代用资料进行滤波, 结合动力学相关因子指数和相关系数, 研究代用资料在不同尺度层次上的动力学结构特征和外部特征的内在相似性发现, 在准 100 a 及以上的尺度层次上是相似的, 即外部特征和动力学结构特征两个方面均符合可比性条件. 同时, 随着尺度的降低, 动力学结构特征和外部特征的可比性都在降低. 60—70 a 尺度及其以下的尺度, 各分量之间的动力学结构特征失去了可比性; 在小于 30 a 的尺度上, 它们的外部特征也不再具有可比性. 因此在对大范围内的代用资料进行对比分析时, 有必要首先从资料的外部特征和动力学结构特征等角度确定其在何种尺度上具有相似性, 在何种条件下已不具有可比性. 这对于我们更好地分析资料内在的规律将具有重要的指导意义.

- [1] Zhu K Z 1973 *Science in China (Series D)* **18** 168 (in Chinese) [竺可桢 1973 中国科学(D 辑) **18** 168]
- [2] Yang B, Braeuning A, Johnson K R, Shi Y F G 2002 *Geophys. Res. Lett.* **29** 1324
- [3] Tan M, Liu T S 2003 *Geophys. Res. Lett.* **30** 1617
- [4] Yang B, Kang X C, Shi Y F 2000 *Sci. Geophys. Sin.* **20** 397 (in Chinese) [杨保、康兴成、施雅风 2000 地理科学 **20** 397]
- [5] Ge Q S, Zheng J Y, Fang X Q 2003 *The Holocene* **13** 933
- [6] Wang S W 1990 *Sci in China (Series B)* **20** 553 (in Chinese) [王绍武 1990 中国科学(B 辑) **20** 553]
- [7] Wang N A, Zhao J, Gao S W 1999 *Marine Geology & Quaternary Geology* **19** 59 (in Chinese) [王乃昂、赵晶、高顺尉 1999 海洋地质与第四纪研究 **19** 59]
- [8] Wu X D, Lin Z Y 1981 *Primary Discussion of Tibet Plateau Climate Change of Recent 2000 Years Thesis Collection of Discussion Conference of Climate Change of China* (Beijing: Technology Press) p18 [吴祥定、林振耀 1981 青藏高原近二千年来气候变迁的初步探讨 全国气候变化学术讨论会文集(北京: 科学出版社) 第 18 页]
- [9] Yao T D, Thompson L G 1992 *Science in China (Series B)* **10** 1089 (in Chinese) [姚檀栋、Thompson L G 1992 中国科学(B 辑) **10** 1089]
- [10] Wang S W, Ye J L, Gong D Y, Zhu J H, Yao T D 1998 *Quarterly J. Appl. Meteorology* **9** 392 (in Chinese) [王绍武、叶瑾琳、龚道溢、朱锦红、姚檀栋 1998 应用气象学报 **9** 392]
- [11] Shi Y F, Yao T D, Yang B 1999 *Science in China (Series D)* **29** 79 (in Chinese) [施雅风、姚檀栋、杨保 1999 中国科学(D 辑) **29** 79]
- [12] Lin P N, Thompson L G, Davis M E 1995 *Annals of Glaciology* **21** 189
- [13] Kitagawa H, Matsumoto E 1995 *Geophys. Res. Lett.* **22** 2155
- [14] Hong Y T, Jing H B, Liu T S, Zhou L P, Beer J, Li H D, Leng X T, Hong B, Qin X G 2000 *The Holocene* **10** 1
- [15] Lou J Y, Chen Z D, Wan J K 1997 *Science in China (Series D)* **40** 284
- [16] Lou J Y, Chen Z D 1997 *Science in China (Series D)* **40** 424
- [17] Yang P C, Zhou X J 2005 *Acta Meteorological Sinica* **63** 556 (in Chinese) [杨培才、周秀骥 2005 气象学报 **63** 556]
- [18] Liu D S, Tan M, Qin X G, Zhao S S, Li T Y, Lv J B, Zhang D E 1997 *Quaternary Science* **17** 4 (in Chinese) [刘东生、谭明、秦小光、赵树森、李铁英、吕金波、张德二 1997 第四纪研究 **17** 4]
- [19] Feng G L, Dong W J, Li J P 2004 *Chin. Phys.* **13** 1582
- [20] Li J P, Tan Y Y 1999 *The application of Wavelet Analysis Method* (Chongqing: Chongqing University Press) p1 (in Chinese) [李建平、唐远延 1999 小波分析方法的应用(重庆: 重庆大学出版社) 第 1 页]
- [21] Xiong X J, Guo B H, Hu Y M, Liu J J 2002 *Journal of Oceanography of Huang & Boh Seas* **20** 12 (in Chinese) [熊学军、郭炳火、胡筱敏、刘建军 2002 黄渤海海洋 **20** 12]
- [22] Mallat S 1989 *IEEE Trans. Signal Process* **37** 2091
- [23] Wen F Y 1999 *The Modern Technology of Climate Statistics and Diagnose* (Beijing: Metrological Press) p77 (in Chinese) [魏凤英 1999 现代气候统计诊断预测技术(北京: 气象出版社) 第 77 页]

- [24] Huang J Y , Li H 1984 *Spectrum Analysis in Metrology* (Beijing : Metrological Press) p10 (in Chinese) [黄嘉佑、李 黄 1984 气象中的谱分析 (北京 : 气象出版社) 第 10 页]
- [25] Li C G , Pei L Q 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 2114 (in Chinese) [李春贵、裴留庆 2003 物理学报 **52** 2114]
- [26] Grassberger P , Procaccia I M 1983 *Physica D* **9** 189
- [27] Kantz H 1994 *Phys. Rev. E* **49** 5091
- [28] Sauer T 1994 *Phys. Rev. Lett.* **72** 3811
- [29] Wan S Q , Feng G L , Dong W J , Li J P 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 5487 (in Chinese) [万仕全、封国林、董文杰、李建平 2005 物理学报 **54** 5487]
- [30] Yang B , Shi Y F 2001 *Marine Geology & Quaternary Geology* **21** 61 (in Chinese) [杨 保、施雅风 2001 海洋地质与第四纪地质 **21** 61]
- [31] Gong Z Q , Zou M W , Gao X Q , Dong W J 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 3947 (in Chinese) [龚志强、邹明玮、高新全、董文杰 2005 物理学报 **54** 3947]
- [32] Zheng D W , Dong D N A 1986 *Acta Astron. Sin.* **27** 368
- [33] Rasmusson E M , Wang X L , Ropelewski C F 1994 *Secular Variability of ENSO Cycle* (Sandong : Sandong Academic Press) p15
- [34] Wang X L , Ropelewski C F 1995 *J. Climate* **8** 1584
- [35] Kang X C , Zhang Q H 2000 *Advance in Earth Science* **15** 215 (in Chinese) [康兴成、张其花 2000 地球科学进展 **15** 215]
- [36] Wang S W , Zhu J H , Cai J N , Wen X Y 2004 *Advance in Natural Science* **14** 424 (in Chinese) [王绍武、朱锦红、蔡静宁、闻新宇 2004 自然科学进展 **14** 424]
- [37] Jiang Z H , Li J P , Wang M H 2004 *Climatic and Environmental Research* **9** 422 (in Chinese) [江志红、李建平、王梅华 2004 气候与环境研究 **9** 422]
- [38] Zhi R , Feng G L , Dong W J 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 6185 (in Chinese) [支 蓉、封国林、董文杰 2007 物理学报 **56** 6185]
- [39] Feng G L , Gong Z Q , Dong W , J Li J P 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 5494 (in Chinese) [封国林、龚志强、董文杰、李建平 2005 物理学报 **54** 5494]
- [40] Shi N 2005 *Chin. Phys.* **14** 844
- [41] Dai X G , Fu C B , Wang P 2005 *Chin. Phys.* **14** 850
- [42] Shi N 2000 *J. Trop. Meteor.* **16** 131 (in Chinese) [施 能 2000 热带气象学报 **16** 131]
- [43] Gong Z Q , Feng G L , Wan S Q , Li J P 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 477 (in Chinese) [龚志强、封国林、万仕全、李建平 2006 物理学报 **55** 477]

Analysis of similarity of several proxy series based on nonlinear analysis method^{*}

Gong Zhi-Qiang^{1 2) †} Feng Guo-Lin^{2 3) †}

1 † *Department of Atmospheric and Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China*)

2 † *Laboratory for Climate Studies, National Climate Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China*)

3 † *Key Laboratory of Regional Climate-Environment for Temperate East Asia, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China*)

(Received 1 October 2006 ; revised manuscript received 22 February 2007)

Abstract

Reconstruction and analysis of proxy series is an important program of climate research. Using methods of wavelet transformation and power spectrum, the main periods of Dulan tree ring and other 7 temperature proxy series are analyzed in this paper. Through filtering, the 8 original series were divided into many different scale components, the similarities in dynamics and external features of components on each scale are studied based on the dynamical correlation factor exponent and correlation coefficient. Research results show that quasi 100 a scale might be the common period of these proxy series, meanwhile, both dynamics and external features of these proxy series are similar on the quasi 100 a and even higher scales. This means that the quasi 100 a and even higher scale components meet with comparable conditions in these aspects. More attention must be paid to this scale when analyzing proxy series. We also found that the similarities in dynamics and external features of these proxy series are reduced as the scale of the components decreases; On quasi 60—70 a scale, the component similarities in dynamics features disappear. On quasi 30 a and even lower scale the similarities of external features also disappear.

Keywords : proxy series, the dynamical correlation factor exponent, similarities, scale

PACC : 9260X

^{*} Project supported by the State Key Development Program for Basic Research of China(Grant No. 2006CB400503) and the National Natural Science Foundation of China(Grant Nos. 90411008, 40675044).

[†] Corresponding author. E-mail : feng_gl@sina.com