

# 气候代用资料动力学结构的区域与全球特征\*

万仕全<sup>1)2)</sup> 封国林<sup>2)3)†</sup> 董文杰<sup>2)</sup> 李建平<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup> (兰州大学大气科学学院, 兰州 730000)

<sup>2)</sup> (国家气候中心气候研究开放实验室, 北京 100081)

<sup>3)</sup> (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)

(2005 年 3 月 18 日收到; 2005 年 4 月 25 日收到修改稿)

介绍一种非线性时间序列分析方法——动力学相关因子指数  $Q$  (简称  $Q$  指数), 是基于相空间重构技术的动力学指标, 它能有效识别时间序列之间动力结构的异同性. 利用该方法分析了几种典型代用资料的动力学结构, 发现它们的演变特征基本相似, 区域和全球范围的气候同步变化, 区域气候受到全球气候系统制约. 近 2000 年来的区域到全球气候系统有两个明显动力结构突变期: 700—900a 和 1300—1700a, 它们所对应的环境变化可能是中世纪暖期和现代小冰期事件.

关键词: 气候代用资料, 动力学相关因子指数, 动力学结构, 小冰期, 中世纪暖期

PACC: 9260X

## 1. 引 言

由于受到观测资料长度的限制, 人们只能从地质体或历史文献中获取环境信息并建立高分辨率的气候序列来研究气候环境变化, 这是得以广泛开展过去气候变化研究的主要途径之一. 通过对全球不同区域代用资料所含的气候变化信息进行时间窗的横向对比研究, 可以了解过去全球重大气候变化事件发生的驱动因子及响应过程的动力学特征, 捕获过去气候变化在十年、百年时间尺度上的变化规律, 为建立气候模式提供重要的参数, 为预测未来可能发生的类似变化建立相似形, 同时也为气候模式的修正提供依据. 随着代用资料定年技术的不断提高, 各国科学家们恢复了过去几个世纪乃至千年的区域到全球尺度的气候情景, 并作了大量研究<sup>[1-12]</sup>, 得出了众多结论. 如根据反映温度(降水)变化的代用资料序列距平符号的不同划分了暖期和冰期(或干期和湿期)等气候阶段, 其外部影响因子可能涉及包括太阳异常活动和火山爆发在内的强迫系统. 实际上, 即使是一些重大气候事件(如中世纪暖期和小冰期)发生的原因目前还没有完全弄清楚, 尤其是小冰期, 由于资料来源的不同, 其具体开始以及结束时间还存在较大争议. 当然, 对于复杂且多元的气候系统来

说, 即便它是没有干扰的“纯”系统, 不同区域不同资料所反映的一般统计特征也不可能完全相同. 加之许多其他因子叠加在气候系统的“自然”规律之上, 要分离出一个“纯气候”的序列相当困难. 如何滤除干扰、从固有的不变性探索气候变化的内在规律就显得相当重要<sup>[13-18]</sup>. 任何事物都有自己独特的动力过程, 气候系统也不例外, 因此, 从动力学角度也许可以揭示其更多的本质规律.

由于动力过程相当复杂, 各种子系统之间(大气、海洋、陆面、冰盖、生物)还存在相互作用——非线性和非平稳作用等, 目前人们还难以识别气候系统演变过程中哪些阶段有外强迫介入. 针对上述问题, 本文引进一种新的动力学分析方法, 在理想序列的外强迫源动力学结构识别试验的基础上, 进一步分析了区域到全球代用资料动力学结构的演变特征, 对中世纪暖期和小冰期事件做了探索性讨论. 资料为北半球树木年轮距平宽度序列(1—1995)<sup>[12]</sup>, 北京石花洞石笋微层厚度(768 BC—1980 AD)<sup>[19]</sup>, 青藏高原古里雅冰芯氧 18 同位素和冰芯冰川积累量(301—1990)<sup>[20, 21]</sup>.

## 2. 方 法

$Q$  指数是基于相空间重构理论的时间序列动

\* 国家重点发展基础研究项目(批准号: 2004CB418300)和国家自然科学基金(批准号: 90411008, 40325015)资助的课题.

† E-mail: feng. gl@sina.com

力结构分析方法,其构造和物理意义如下:

对一个长度为  $N$  的时间序列  $\{x(t_i), t_i = 1 - N\}$  进行嵌入空间上动力学轨线重构<sup>[22]</sup>,其嵌入向量表达式为

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

其中  $\tau = t$  为时间延迟,  $\tau$  为延迟参数,  $t$  采样时间间隔,  $m$  为嵌入空间维数. 对序列的每个点重构后,组成了一个  $(N - (m - 1)) \times m$  维的向量矩阵

$$X = \{X_i, i = 1, 2, \dots, N - (m - 1)\}, \tag{2}$$

它的自关联和定义<sup>[23]</sup>为

$$C_{xx}(\tau) = P(X_i - X_{i+\tau}) = \frac{2}{(N - m)(N - (m - 1))} \times \prod_{i=1}^{N-m} \prod_{j=i+1}^{N-(m-1)} (X_i - X_j), \tag{3}$$

表示在重构空间里  $\tau$  距离内找到邻近点  $X_i$  的概率,

$H(\cdot)$  为 Heaviside 阶跃函数. 对于两个不同集合,交互关联和定义为

$$C_{xy}(\tau) = P(X_i - Y_{i+\tau}) = \frac{2}{(N - m)(N - (m - 1))} \times \prod_{i=1}^{N-m} \prod_{j=i+1}^{N-(m-1)} (X_i - Y_j), \tag{4}$$

表示在  $\tau$  领域内找到  $Y_j$  的概率. 在描述混沌信号时,自关联和与交互关联和具有一定区分潜在动力学结构的能力,但它们还远不能作为识别混沌时间序列间相近性最重要的标准<sup>[23-26]</sup>.

如何更好地识别混沌时间序列动力异同性呢? 文献[27]初步回答了这一问题. 假设  $\{x_i\}$  和  $\{y_j\}$  是离散序列上的两点,当  $|x(i) - x(j)| < \epsilon$  时,  $|x(i + 1) - x(j + 1)| < \epsilon$  的概率  $S_m = C_{xx}^{m+1}(\epsilon) / C_{xx}^m(\epsilon)$  较关联和具有更强的预见性,可用于两个时间序列集动力异同性的识别<sup>[24,25]</sup>. 对于两个时间序列  $\{X_i\}$ ,  $\{Y_j\}$ , 动力学自相关因子指数  $Q$  定义<sup>[27]</sup>为

$$Q_{xy} = \lim_{\epsilon \rightarrow 0} \left| \ln \frac{C_{xx}(\epsilon)}{C_{yy}(\epsilon)} \right|, \tag{5}$$

其物理意义是当  $\{Q_{xy}\}$  统计上足够小时,序列集  $\{X_i\}$ ,  $\{Y_j\}$  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. 研究表明它能起到直接测量混沌时间序列之间“距离”的作用<sup>[26]</sup>、能有效区分不同动力系统,尤其是它能处理较短的时间序列,由于

统计上的误差,实际上对于理想时间序列的  $Q$  也难以以为 0. 根据已有的研究<sup>[28]</sup>,  $m$  可取 2—3,  $\tau$  取 1—2.

### 3. 理想时间序列的动力学结构

一个复杂的时间序列可能是由一些相互耦合的动力学过程共同作用产生,利用  $Q$  指数可以找出时间序列中具有相近动力学结构的区段(或窗口). 本节应用  $Q$  指数对如何识别动力系统发生了改变,或者在哪些阶段有外部动力系统侵入作初步研究. 不失一般性,这里给出与简单情形下  $Q$  指数对一个理想时间序列动力结构的诊断试验:由函数  $y = 3\sin(2x^2/100 + 2)$  产生长度为 4000 点的一个理想时间序列,并叠加三种扰动(图 1(a)),类似于文献[27],选取适当的参考窗口(本节窗口长度为 50),计算任意一个参考窗口与其他窗口的  $Q$  指数值(图 1(b)),分析其变化特征. 该时间序列包含如下三种子序列:

- 1) 在该序列中加入随机扰动,即在 580—620 之间(A1)和 1390—1410 之间(B1)叠加小的随机量(图 1(a)).
- 2) 在该序列中加入线性强迫,即在 2000—4000 之间叠加一个 1/1000 的线性增量(图 1(a)).
- 3) 同时叠加以上随机和线性扰动,即在 2580—2620(C1)和 3390—3410 之间(D1)叠加随机扰动.

取 1—50 的子序列为参考窗口,  $Q$  指数变化情况如图 1(b). 可以看出:没有扰动时  $Q$  指数非常小,即动力学结构基本没有变化;在随机强迫处即动力学结构有改变的区域  $Q$  指数发生了明显波动(A2, B2);叠加线性扰动后,  $Q$  指数(2000—4000)维持在一个较大值的水平上,同时在随机扰动处  $Q$  指数亦发生了明显增长(C2, D2).

由上述理想试验可知,由具有相似动力学结构的“窗口族”组成的单一“纯系统”内其它动力结构的窗口都可能被  $Q$  指数有效识别. 此外,我们还做了不同窗口长度下和其他参考窗口的计算,结果是类似的.

### 4. 气候代用资料动力学结构的演变特征

下面将以古里雅冰芯(301—1990)、北京石花洞石笋(767BC—1980AD)、北半球树木年轮距平宽度序列(1—1995)为例进行实际意义上的应用分析. 这些资料外部特征上虽然没有可比性,但均源自相同



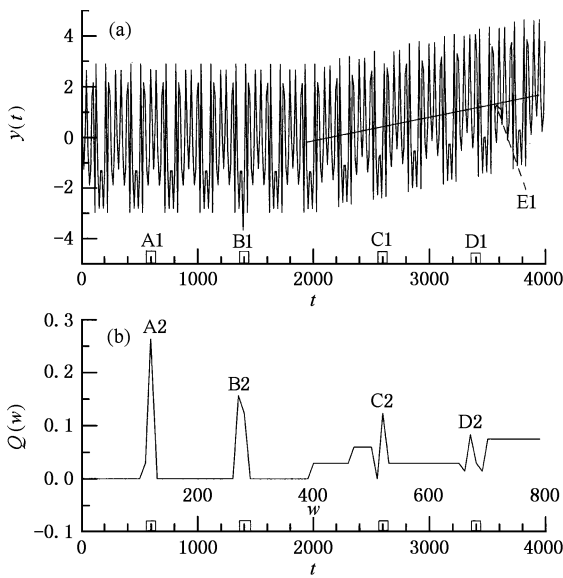


图1 (a)理想时间序列中叠加随机扰动(A1, B1)、线性强迫(E1)和同时叠加两种强迫(C1, D1);(b)  $Q$  值随时间  $t$ (或窗口  $w$ ) 的变化

的系统,都是气候系统的不同“元”,本质上应具有相似的吸引子,均能刻画气候系统的动力学结构。

青藏高原西昆仑山古里雅冰芯是迄今为止内陆地区采到的最长的冰芯,所恢复的气候序列揭示了过去 2000 年气候系统经历了 7 次冷期和 8 次暖期(见表 1),5 次相对降水丰期和 4 次相对降水枯期(见表 2),4—6 世纪和 12 世纪左右有 4 次由冷到暖的突变,小冰期里有三次典型由暖到冷的气候突变<sup>[20]</sup>;北京石花洞石笋揭示了 1130 年以来北京地区的干、湿经历了从 1080AD 以来的极湿润波动下降到 1455AD 前后的极干旱早期,可分为 7 个相对湿润高峰和 7 个相对干旱低谷,有 6 次明显降温期(分别是 1280—1320, 1400—1480, 1550—1600, 1690—1730, 1780—1800, 1840—1890),气温在 1600AD 前后出现明显变化<sup>[19,20]</sup>。此外,通过北半球多个地区(蒙古、东西伯利亚、西加拿大、西西伯利亚、中西伯利亚、北美和北瑞典等)的树木化石综合而得的树木年轮距平宽度序列主要代表大范围气候变化,它含有过去近 2000 年里北半球气候变化信息,可表征全球气候变化特点。目前该序列的研究工作主要由 Briffa 开展,他研究了全新世的年际气候变率,并试图将分析结果与 ENSO(厄尔尼诺/南方涛动)和 NAO(北大西洋涛动)相联系<sup>[12]</sup>。

由于全球地理环境的显著差异,以不同区域代

用资料分析所得的结论很难反映气候变化的一致性,不易进行全球范围的定量比较。在上一节的基础上,下面从动力学结构的角度探讨上述代用资料的演变特征。

为了提高窗口的密度和消除少数窗口的影响,得到较高分辨率和更普遍的结果,这里取窗口长度为 30,计算每个窗口作为参考窗口时的  $Q$  值,最后取其平均。如图 2,石笋微层厚度序列(图 2(a))、冰芯冰川累积量序列(图 2(c))、冰芯氧 18 同位素序列(图 2(e))和北半球树木年轮距平宽度序列(图 2(g))及相应的  $Q$  值(图 2(b), (d), (f), (h))。从图 2(a), (c), (e), (f) 可以看出,虽然这些代表降水、温度或同时具有降水和温度变化信息的代用资料表面上几乎没有多少相似特征,但它们的  $Q$  值(图 2(b), (d), (f), (h))所反映的特征却能基本或在一定范围内保持一致,并有两处主要大值分布区(图 2(b), (d), (f), (h))分别为:(b) 690—720(第 24 个窗口)/1350—1380(第 46 个窗口);(d) 810—840(第 28 个窗口)/1470—1730(第 50—57 个窗口);(f) 750—780(第 26 个窗口)/1410—1440(第 48 个窗口);(h) 870—900(第 30 个窗口)/1590—1620(第 54 个窗口)。 $Q$  值的极大值总体分布特征是:第一组位于第 24—30 窗口之间,第二组位于在 46—54 窗口之间。根据第 3 节的结论和  $Q$  指数的物理含义, $Q$  指数的极大值区一般对应系统动力学发生改变的位置。换言之,区域气候和北半球气候变化有内在的一致性,即在 700—900(800AD 前后)和 1300—1700(1500AD 前后)区域到全球气候系统的动力学结构同时发生了改变。其原因可能有二:一是气候系统确实受到了某些外部系统的干扰,如太阳异常活动、火山或冰雪融化等;二是其自身发生了突变,换句话说,气候可能已从一个层次向另一层次转化。

区域到全球气候的这两次大变化究竟对应了什么气候事件?考虑到气候系统极其复杂,这里仅对上述结论与小冰期、中世纪暖期的可能联系作一些简单探讨。

根据表 1 和表 2 等,我们注意到了 700—900 和 1300—1700 是频繁的冷、暖或干、湿转换期。由  $Q$  的物理含义和图 2(b), (d), (f), (h), 动力学结构发生改变的范围也基本集中在 700—900 和 1300—1700 之间,它们综合了不同研究结论的共同点,佐证了这两个时期的区域到全球气候系统动力学结构确实发生了明显变化。

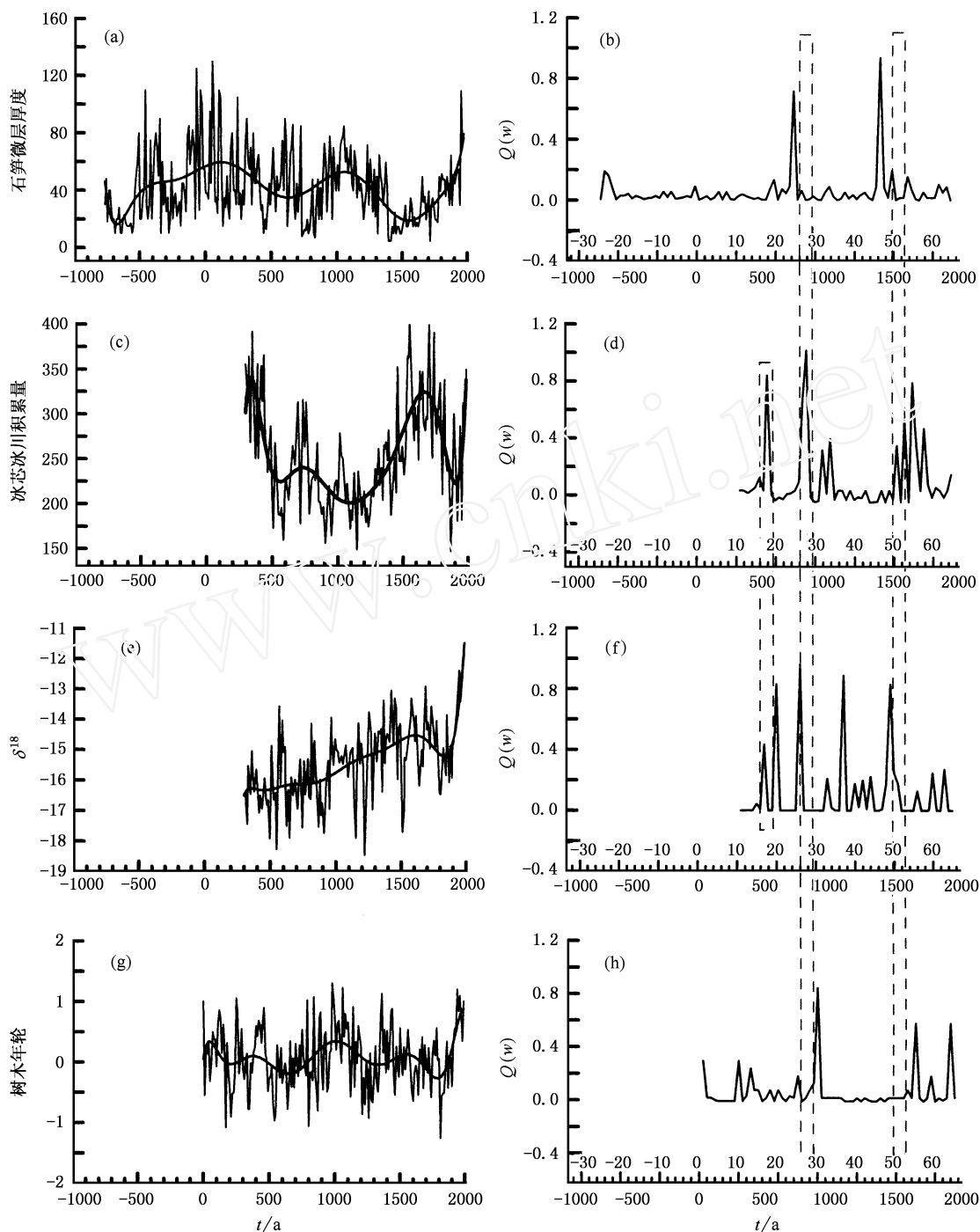


图2 (a),(b) 北京石花洞石笋微层厚度(768BC—1980AD)及其  $Q$  指数随时间(或窗口  $w$ )的变化;(c),(d) 古里雅冰芯冰川积累量(301—1990)及其  $Q$  指数随时间(或窗口  $w$ )的变化;(e),(f) 古里雅冰芯氧 18 同位素 ( $^{18}$ ) (301—1990)及其  $Q$  指数随时间(或窗口  $w$ )的变化;(g),(h) 树木年轮距平宽度序列(1—1995)及其  $Q$  指数随时间(或窗口  $w$ )的变化

小冰期的名称是 Matthesw<sup>[29]</sup> 在 1939 年提出来的,当时是在广泛的意义上应用这个名词的,即泛指气候最适宜期之后,大约从公元前 2000 年开始的冷期,通常根据温度的距平值来判断.现在小冰期则专指近数百年中出现的冷期.不过,究竟小冰期何时开

始,至少有两种不同的意见<sup>[30]</sup>.一种认为,从 16 世纪开始,例如 1550AD;一种认为,从 13 世纪开始,例如 1250AD,前后相差 300 年.用代用资料确认的中世纪后期各地区的冷期如下<sup>[1-12]</sup>:

东亚: 1100—1149, 1250—1349, 1425—1474,

1600—1699, 1800—1899.

欧洲: 1100—1149, 1300—1399, 1550—1699, 1800—1899.

原苏联: 1200—1299, 1400—1499, 1650—1749, 1850—1949.

北美: 1100—1149, 1200—1249, 1300—1349, 1450—1499, 1600—1699, 1800—1849.

北极: 1100—1149, 1250—1299, 1450—1499, 1600—1699, 1800—1899.

南半球: 1100—1149, 1250—1299, 1450—1499, 1550—1699, 1775—1824, 1875—1924.

如果小冰期事件是气候系统动力学结构的一次突变,根据这些结果共同点,可以发现各地区均在 1500AD 前后有不同程度的变冷.说明这是一个全球性的变化,一种动力特征上的突变.另外,根据历史文献档案的研究<sup>[19,31]</sup>,大约 1450AD 前后北京地区发生了明显的干旱事件,这可能是全球气候系统在区域上的一个体现之一.这从侧面佐证了本文计算结果是可靠的.那么另一处动力学结构突变期(700—900)揭示了什么气候事件呢?我们很容易联想到中世纪暖期(一般认为在 750—1300 之间),该事件也是研究颇多的一个气候变化.认为中世纪暖期的发生时期主要有<sup>[32—35]</sup>: 800—1200; 950—1200; 1000—1300; 1150—1300. 同样,如果考虑中世纪暖期也是一次气候系统动力学结构突变,根据图 2(b), (d), (f), (h), 700—900 阶段是区域到全球性气候系统的一个转变期,它持续的时间比已有的多数结论要短.

表 1 100 年平均值在时间尺度上的冷暖变化<sup>[20]</sup>

冷期		暖期	
时段/AD	持续时间/yr	时段/AD	持续时间/yr
		300—350	50
351—500	150	500—600	100
600—700	100	701—800	100
801—900	100	901—1100	200
1101—1200	100	1201—1450	250
1451—1500	50	1501—1600	100
1601—1690	90	1691—1790	100
1791—1880	90	1880—1990	110

综合来看,  $Q$  指数所反映的区域到全球气候系

统的变化在时-空分布特征基本一致,虽然变化不是严格一一对应,但基本维持在一定范围内.即使是同一地质体中提取的不同代用序列,由于受到各种因素影响,它们所反映的动力学结构特征也有一定的差异,如冰芯的冰川积累量和氧 18 同位素(图 2(d), (f)). 这都体现了气候系统的极端复杂性.

表 2 100 年平均值在时间尺度上的干湿变化<sup>[20]</sup>

干旱		湿润	
时段/AD	持续时间/yr	时段/AD	持续时间/yr
		300—400	100
401—560	160	561—720	160
721—980	260	981—1080	100
1081—1270	190	1271—1600	330
1601—1640	40	1641—1810	170
1811—1930	120	1931—1990	30

## 5. 结 论

尽管国际全球变化研究计划(PAGES)和国际气候变率及其可预测性研究计划(CLIVAR)是从上世纪 90 年代初才开始实施的,但是,可以看出,近年来在过去 2000 年的气候和环境变化研究方面有很大进展,突出表现在各种气候代用资料的大规模获取上,如树轮气候重建向低纬方向扩展,从两极冰芯研究向山地冰芯拓展,一些区域性气候要素的空间分布重建等.但同时也存在一些问题,如时、空尺度上气候变化存在不一致性,难以反映气候变化的全球性特点,对一些重大气候事件产生的原因目前还难以给出较合理的解释.如中世纪暖期和小冰期,其确切的开始时间和发生的原因也没有完全达成一致.尽管联系了一些可能的因素,如太阳异常活动、火山爆发等,但从作用机理上还无法证实.针对这些问题,本文应用了最新的动力学分析方法,从动力结构的角度分析了区域到全球范围典型代用资料动力结构的演变特征,结果表明区域到全球气候系统的动力学结构基本相同,区域气候和全球气候系统在 700—900 之间和 1300—1700 之间发生了较大的动力结构突变,所对应的气候事件可能是中世纪暖期和小冰期.但导致这些突变的外部或内部原因还有待进一步研究.

- [1] Shi N 2005 *Chin. Phys.* **14** 844
- [2] Thompson L G, Moseley-Thompson E, Davis M E *et al* 1989 *Science* **246** 474
- [3] Jacoby G C and D 'Arrigo R 1989 *Climatic Change* **14** 39
- [4] Scuderi L A 1987 *Quaternary Research* **27** 220
- [5] Bernabo J C 1981 *IBID* **15** 143
- [6] Paterson W S B, Koerner R M, Fisher D *et al* 1977 *Nature* **266** 508
- [7] Bryson R A 1974 *Science* **184** 753
- [8] Moseley-Thompson E, Thompson L G, Grootes P M and Gundestrup N 1990 *Annals of Glaciology* **14** 199
- [9] Morgan V I 1985 *Climatic Change* **7** 415
- [10] Wilson A T, HENDY C H and Reynolds C P 1979 *Nature* **279** 315
- [11] Dansgaard W 1964 *Tellus* **16** 436
- [12] Briffa K R 2000 *Quaternary Science Reviews* **19** 87
- [13] Dai X G *et al* 2005 *Chin. Phys.* **14** 850
- [14] Dai X G *et al* 2003 *Chin. Sci. Bull.* **23** 2483
- [15] Feng GL *et al* 2004 *Chin. Phys.* **13** 413
- [16] Feng GL *et al* 2004 *Chin. Phys.* **13** 1582
- [17] Wan S Q *et al* 2005 *Chin. Phys.* **14** 628
- [18] Hou W *et al* 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 3940 (in Chinese) [侯威等 2005 物理学报 **54** 3940]
- [19] Liu D S *et al* 1997 *Quaternary Sciences* **1** 41 (in Chinese) [刘东生等 1997 第四纪研究 **1** 41]
- [20] Qing X G *et al* 2000 *Science in China (D)* **30** 239
- [21] Yao T D *et al* 1996 *Science in China (D)* **26** 348
- [22] Sauer T 1994 *Phys. Rev. Lett.* **72** 3811
- [23] Grassberger P 1983 *Physica D* **9** 189
- [24] Kantz H 1994 *Phys. Rev. E* **49** 5091
- [25] Provenzale A, Smith L A, Vio R and Murante G 1992 *Physica D* **58** 31
- [26] Grassberger P 1990 *Phys. Lett. A* **148** 63
- [27] Li C G *et al* 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 2114 (in Chinese) [李春贵等 2003 物理学报 **52** 2114]
- [28] Liu S D *et al* 1993 *Acta Meteorologica Sinica* **51** 333 (in Chinese) [刘式达等 1993 气象学报 **51** 333]
- [29] Matthes F 1939 *Transactions American Geophysical Union* **20** 518
- [30] Bradley R S and Jones P D 1992 *Proceedings of the International Symposium on the Little Ice Age Climate* **1** 1
- [31] Zhang P Y *et al* 1997 *Earth Science Frontiers* **4** 122 (in Chinese) [张丕远等 1997 地学前缘 **4** 122]
- [32] Briffa K R, Bartholin T S and Eckstein D *et al* 1990 *Nature* **346** 434
- [33] Briffa K R and Osborn T J 1999 *Science* **284** 926
- [34] Lamarche V C 1974 *Science* **183** 1043
- [35] Lamb H H 1965 *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* **1** 13

# From regional to global dynamics structure of the climatic proxy

Wan Shi-Quan<sup>1)2)</sup> Feng Guo-Lin<sup>2)3)†</sup> Dong Wen-Jie<sup>2)</sup> Li Jian-Ping<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup> (Department of Physics, Yangzhou University, Yangzhou 225009; College of Atmospheric Science, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

<sup>2)</sup> (Key Laboratory of National Meteorological Bureau Climate Research Center, Beijing 100081, China)

<sup>3)</sup> (Key Laboratory of Regional Climate-Environment Research for Temperature East Asia, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

(Received 18 March 2005; revised manuscript received 25 April 2005)

## Abstract

Global change science is a new research domain nowadays, and one of the most important studies of which is the climate change, to which great attention is paid by all governments in world. It is mainly based on the climatic proxy that we can study the past climate change. Although many achievements have been obtained, majority of the results are limited to the external characteristics of the proxy due to lagged analysis methods. For example, we judge if the climate is flood/drought or cold/warm through linear trend of the time series, however, we do not know whether it is a natural variation or the result of external forces, the mechanism is not uncovered. Because complexity of the open global climate system, there are different characteristics among the climatic proxies from different region of the world, from which it is difficult to reveal the intrinsic general principles i. e. the globality. For the further study on the past climate change, especially to reveal the rules of the global climate change in past 2000a and predict future climate change, a new method making use of the dynamical lag correlation exponent (named  $Q$  index in the text), a dynamics exponent based on the phase-space reconstruction, is introduced in this paper, which can effectively discern the similarities or differences between the dynamics of the two series. With  $Q$  index, we analyze the dynamics structure of some typical climatic proxies. The results show that the dynamics of climatic proxies are almost similar, and the regional climate keeps the same change with the global. In other words, regional climate is controlled by the global climate change. Besides, there are two dynamics jump periods (namely 700—900a and 1300—1700a) in past 2000a of the climate system, which may correspond to the periods of the medieval warm period and the little ice age, respectively.

**Keywords:** climatic proxy, dynamical lag correlation exponent, dynamics structure, little ice age, medieval warm period

**PACC:** 9260X

\* Project supported by the National Key Program Development for Basic Research (Grant No. 2004CB418300) and the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 90411008 and 40325015).

†E-mail: feng\_gl@sina.com