

气候变化检测与诊断技术的若干新进展^{* 1}

封国林^{1,2} 龚志强^{1,2} 支 蓉^{1,2}
FENG Guolin^{1,2} GONG Zhiqiang^{1,2} ZHI Rong^{1,2}

1. 国家气候中心,中国气象局气候研究开放实验室,北京,100081

2. 兰州大学大气科学学院,兰州,730000

1. *Laboratory for Climate Studies, National Climate Research Center CMA, Beijing 100081, China*

2. *College of Atmospheric and Sciences of Lanzhou University, Lanzhou 730000, China*

2008-01-20 收稿,2008-05-08 改回.

Feng Guolin, Gong Zhiqiang, Zhi Rong. 2008. Latest advances of climate change detecting technologies. *Acta Meteorologica Sinica*, 66(6):892—905

Abstract Global warming and its influences on world society and economic had caused the attention of all the people in different countries. Predicting the future trend of global temperature change had become a extremely serious problem climate research. It is also rather important to develop new climate detecting technologies to adapt the new characteristics of global warming. So, based on five aspects of climate detecting technologies research: (1) abrupt climate change detecting, (2) separating the useful information of observed data, (3) complexity of climate system, (4) discerning of the dynamical characteristics of climate system, (5) definition and detection of extreme events et al., latest advances of these aspects and their research results are briefly introduced. At last, probable difficulties and key problems in climate change detecting technologies are discussed.

Key words Abrupt climate change, Extreme climate events, Detect, Dynamical characteristic

摘 要 近年来,全球气候变暖及其对世界经济的影响已经引起了社会各界的关注和重视,判断当前全球的温度变化趋势,已经成为研究气候变化的一个至关重要的问题。进一步发展新的气候变化检测技术以适应全球增暖的新特征则显得尤为重要。因此,结合(1)气候突变和转折检测技术、(2)观测数据信息的分离和提取、(3)气候系统内在复杂性、(4)气候系统动力学结构特征的识别、(5)极端气候事件定义及其检测等方面的气候变化检测技术研究,分别介绍了中国近期气候变化检测技术的研究进展及部分研究成果,主要侧重于新检测技术和方法的介绍。最后,就当前气候变化检测技术方面的一些焦点和难点问题做了简单的讨论。

关键词 气候突变,极端气候事件,检测,动力学结构特征

中图法分类号 P467

1 引 言

近 10 多年来,中国在气候变化研究方面取得了一系列重要成果,其中一个重要的方面就是对中国历史气候资料的恢复、重建和整理以及各种观测数据的整理和均一化处理等。如:20 世纪 70 年代,气象科学研究所与北京大学地球物理系等单位合作整

理出版了《华北、东北近五百年旱涝分布图》,1981 年完成并出版了《全国近五百年旱涝分布图集》(中央气象研究所,1975;中央气象局气象科学研究所,1981);王绍武等(1998a)恢复了华北区、华中区和中南区等 10 个区域 1600—2000 年的平均温度资料;姚檀栋等(1992)、王绍武等(1998b)、施雅风等(1999)通过树轮、冰芯和石笋等多种代用资料恢复

^{*} 资助课题:国家科技支撑计划(2007BAC29B01 和 2007BAC03A01)。

作者简介:封国林,主要从事非线性气候动力学、极端气候事件、气候变化和气候复杂网络等方面的研究。E-mail: fenggl@cma.gov.cn

中国的各种温度和降水资料等。观测资料方面:中国气象局气象信息中心等单位先后发布了中国地面气候资料日值、月值和年值数据集、中国卫星遥感植被指数数据集等(Liu, et al, 2003; 李庆祥等, 2007)。

资料整理取得的成果,有利于从更长、更广的时空尺度检测和分析气候变化的特征;而数据的多样性及其分辨率的差异、数据本身的非线性、非平稳性特征等也对气候变化的检测方法和技术提出了新的要求。

IPCC 第四次评估报告(IPCC, 2007)明确指出近 50 年气候平均线性增暖速率($0.13\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$)几乎是近 100 年来的 2 倍,1906—2005 年温度变化的线性增暖速率为 $0.74\text{ }^{\circ}\text{C}$,最近 12 年(1995—2006 年)中有 11 年位列 1850 年以来最暖的 12 年之中。据 IPCC 的预测,由于人类活动的影响,全球的变暖趋势还要加剧,全球增暖的背景下,导致气候变化的因素主要可以分为两大类:(1) 太阳活动、火山爆发等外强迫导致的气候系统动力结构的变化,即自然变率;(2) 温室气体的排放、气溶胶和下垫面改变等人为因素的影响引起的变化,即人为变率。因此,如何在一定程度上区分自然变率和人为变率对气候的影响及贡献大小,进而分析局地 and 全球气候变化的特征? 如何从气候系统内在动力学结构特征的角度对观测资料进行分析,进而检测气候突变与转折、分析极端气候事件强度和频率变化的可能原因等? 这些新的科学问题,也使一些传统的气候变化检测技术面临新的挑战。

近 10 多年来,在气候变化研究方面,中国连续资助了一系列涉及气候变化及其影响问题的重大科技项目,在这些科技项目的支持下,中国的气候变化基础科学和适应领域研究取得了一系列进展,对全球气候变化科学的发展以及国家适应与减缓行动计划的制定做出了独特的贡献。全球气候变化检测技术方面也取得了重要的研究成果:符淙斌等(1996)整理出版了《全球变化与我国未来的生存环境》,叶笃正等(1999)编写了《旱涝气候研究进展》,王绍武(2001)主编出版了《现代气候学研究进展》,丁一汇等(2007)编写了《中国的气候变化与气候影响研究》等等。这些专著的出版,为当前中国气候变化研究领域的发展,指出了可能的研究方向,提供了必要的理论和方法保障(王绍武等, 1999; 叶笃正等,

2003; 丁一汇等, 2007; 秦大河等, 2007)。在此基础上,魏凤英(2007)整理了当前气候变化的检测与预测技术,编著出版了《现代气候统计诊断与预测技术》第 2 版。封国林等(2006)整理了近 5 年来数学和物理科学领域出现的一些新的非线性理论和方法,通过一系列数值试验等将这些新的方法与气候变化检测相结合,整理出版了《观测数据非线性时空分布理论和方法》。气候变化检测技术包括以下几个方面:(1)气候突变和转折检测技术的研究;(2)观测数据信息的分离和提取;(3)气候系统内在复杂性的研究;(4)气候系统动力学结构特征的识别;(5)极端气候事件定义及其检测技术研究等。本文主要从这 5 个方面概要介绍近 5 年来中国气候变化检测技术的若干新进展及我们课题组的部分研究成果,并且主要侧重于新的检测技术和方法的介绍。

2 气候突变及其检测技术的研究

20 世纪 60 年代中期以来,以 Thom(1975)的工作为先导而逐步建立的突变理论,目前已被广泛应用于气候、地震等各个研究领域(Dansgaard, 1982)。气候突变又称气候变化的不连续性、气候的跳跃,是普遍存在于气候系统中的一种重要现象。自从 Lorenz 和 Charney 从理论上揭示了气候突变的可能性后,有关气候突变的研究得到了广泛的开展(Lorenz, 1963, 1976; 封国林等, 2005)。一般认为,气候系统内部动力结构发生演化或外界的扰动过大,将导致系统的状态在相空间中不再趋向于原来的吸引子而是趋向于新的吸引子即发生了突变,是气候系统所具有的非线性表现形式之一(Dai, et al, 2005; Weaver, et al, 2004)。气候突变主要体现在两个方面:(1) 时间尺度既包括百年际、千年际及以上尺度,如冰期与间冰期的交替,小冰期与中世纪暖期的转换等,也包括年代际尺度的气候突变,但关于这方面的研究依旧存在一定的争议;(2) 气候要素统计特征量的变化幅度主要包括均值突变、方差突变、频率突变、趋势突变等。因此,不同尺度和不同统计特征量的气候突变,须有相应的检测方法和技术。

传统的突变检测方法有:(1)滑动 t 检验法、(2)Cramer 法、(3)Le paga 法、(4)Yamamoto 法、(5)Mann-Kendall 法、(6)Pettitt 法,前 4 种方法主要用于检测序列的均值突变,相比较而言,Le paga 法更

为有效,但目前该方法在气象领域应用相对较少;后2种方法主要用于检测序列的趋势突变。这些方法不需要样本量遵从一定的分布,也不受少数异常值的干扰,因此都属于非参数统计检验方法。应用传统的突变检测方法,符淙斌等(1982; 1991)最早揭示了季风区域气候变化的强信号,南亚季风和东亚季风的突变与全球增暖的突变具有一致性;严伸伟等(1990)指出了突变的行星尺度带状结构;王绍武等(2004)讨论了气候变暖导致气候突变的可能性,建议进一步加大对气候突变的研究;肖栋等(2007a, 2007b)应用滑动 t 检验对全球海表温度场(GSST)的年代际突变点进行定量检测和分析,从而了解年代际突变的分布特征、最早响应时间和响应区域及垂直空间分布特征等。马柱国等(2006)利用 Mann-Kendall 法检测和分析中国北方近 45 年的干旱化特征,系统地认识干旱化的年代际时空格局。穆穆等(2007)通过草原生态系统模型,从理论上论证在一定的强迫作用下,非平衡态之间突变是完全可能等。

传统的突变检测方法需要设定滑动窗口,因此存在不同程度的突变漂移问题。针对观测数据的非平稳特征,2001 年 Bernaola-Galvan 等提出了一种突变检测的分割方法(简称 BG 算法)。龚志强等(2006a)通过数值试验验证了该方法的有效性(图 1),并利用这一方法检测和分析了北半球树木年轮和北京石花洞石笋距平宽度序列不同尺度的突变特征:树轮和石笋序列滤波得到的低频分量在 380、900、1120、1350、1600 年附近均发生了世纪尺度的突变,年代际尺度上,不同的代用资料反映的突变时间有所差异,但突变的疏密分布类似。张文等(2007)应用高阶距分析方法对树轮和石笋资料的研究表明,20 世纪增暖主要是世纪尺度上的贡献。用 BG 算法对近 530 年旱涝指数(龚志强等, 2008)的研究进一步表明:气候变化在年际尺度上以自然变率为主;在年代际尺度上是自然变率和人为变率共同作用的结果;在世纪及其以上尺度可能以自然变率为主(由于目前代用资料和观测资料有限,这一点有待进一步论证,检测较困难)。

气候系统的演化遵循连续性方程、状态方程、热力学方程等(刘式适等, 1991),气候要素观测序列也具有均值、方差等统计量,因此气候突变可以分为

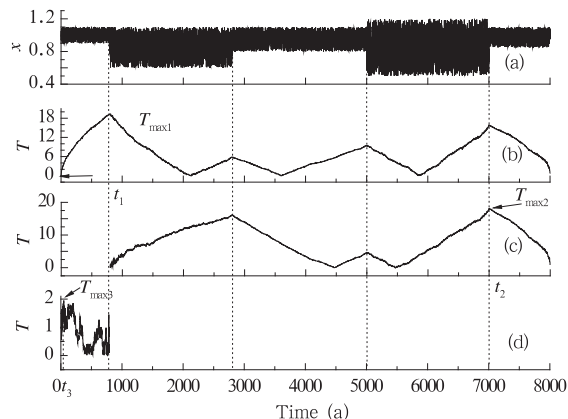


图 1 理想时间序列 BG 算法处理结果
(a. 原序列, b. 原序列 T 值曲线, c, d. 分别为找到第一个突变点左右两部分序列的 T 值曲线, $T_{\max1}$ 和 $T_{\max2}$ 为突变点对应的 T , $T_{\max3}$ 不符合突变条件)

Fig. 1 The results of BG test of the ideal time series
(a. original series, b. T series of original series, c and d. is T series of right and left part of the first abrupt change point of original series. $T_{\max1}$ and $T_{\max2}$ is T value of first and second abrupt change point, $T_{\max3}$ less than the T value of abrupt change)

两大类:(1)一个或两个统计量发生快速变化,但气候系统的动力学结构没有发生变化(即控制方程没有变化),如均值、方差、频率等位相改变;(2)气候状态发生了变化,气候系统遵循的动力学方程的参数和变量等随着时间的变化(即气候系统的动力学结构发生变化),气候系统本身由一种相对稳定的状态跳跃到另一种状态,即动力学结构突变(李建平等, 1996; 杨培才等, 2003, 2005)。关于气候系统的动力学结构突变的检测,封国林等做了一些初步的尝试性工作,将近几年非线性科学的一些研究成果与气候系统的突变检测相结合,并进行了一定的修正,从而给出了多种可能从动力学结构特征角度检测气候突变的理论和方法,如:动力学相关因子指数、动力学指数分割算法、去趋势波动算法、排列熵算法、近似熵算法等(封国林等, 2006; 万仕全等, 2005b; 龚志强等, 2006b; 侯威等, 2006),从而为气候系统动力学结构突变的研究开辟了可能的新途径。此外,部分学者将指纹法应用于气候、医学和化学等领域的突变检测,它主要通过分析比较气相色谱的指纹特征,包括谱图的外形轮廓、出峰范围和一些特征比值来进行判别。

3 气候资料信息的识别和提取

气候系统是大气-海洋-冰雪圈相互耦合的复杂系统,全球增暖的背景下,人类活动的加剧,气候系统受自然变率作用的同时又增加了人为变率的影响,这就必然导致气候系统是具有很层次性和多尺度性的复杂系统。代用资料和观测资料等作为气候系统复杂性的外在表现形式,必然也包含了多层次性、多尺度性等信息。因此,气候资料信息的分离和提取的作用也就显而易见了。气候研究中,气候信息的提取主要有4个用途(魏凤英,2007):(1)从假定的人为因素或外部作用中将自然变率的类型识别出来;(2)利用检测出的气候信息推断物理概念模型,建立气候模式;(3)利用识别出的气候信息,比较模式模拟与观测资料的基本特征,以此验证气候模式的有效性;(4)利用气候信息本身的变化规律预测系统未来的演变趋势。

传统的信息识别技术主要有:(1)功率谱方法、(2)最大熵谱法、(3)交叉谱方法、(4)多位最大熵谱法、(5)小波分析等,其中功率谱方法、交叉谱方法和小波分析以傅里叶变化为基础,而最大熵谱法则以自回归模型为基础。这些方法主要用于气候资料的周期识别,在以往气候资料的检测和分析中发挥了重要的作用,并取得了一系列重要的成果。如:黄荣辉等(2006)应用熵谱分析方法,分析了中国夏季降水和东亚水汽输送通量,发现夏季降水都具有准2 a周期的振荡特征,这种周期振荡与东亚上空夏季风水汽输送通量的准2 a周期振荡密切相关;张勤等(2001)通过多时间尺度分析,将与ENSO有关的变化分为3个主要的分量:2—7 a的ENSO循环尺度,8—20 a的年代际尺度,20 a以上的平均气候态变化;朱锦红等(2003)利用相关分析、功率谱分析和小波分析对中国华北地区降水的年代际振荡及其与东亚夏季风的关系进行了研究。

气候资料是高维的观测资料,其中必然包含“噪声”和“信号”两部分,这里的“信号”即代表气候变化特征的主要分量,因此如何从原始观测资料中剔除“噪声”,提取“信号”对于气候变化的研究则尤为重要。一般而言,混沌信号降噪方法(Sugihara, et al, 1990; Thomas, 1993)都采用了相似的技术路线,包含3个方面的内容:(1)从观测序列中重构吸引子,选择一类模型估计原系统的局部动力学行为并从统

计角度拟合出模型参数,(2)修正观测数据,使修正后的数据和模型更一致。Sauer等(1991)提出了搜索平均非线性降噪算法(SAM算法),侯威等(2007)对该方法做了一定的修正以后通过Henon映射数值试验验证了SAM算法的有效性,并应用于1960—2000年逐日温度观测资料的降噪,这一处理能够有效降低数据中的噪声成分,增强了实际温度资料的可预报性。(3)1984年法国物理学家J. Morlet提出小波概念并应用于分析地震数据以来,小波变换作为一种信号处理方法,不仅可以作为周期分析的工具,还可以通过小波分解分离观测数据中的“噪声”,提取包含原序列主要信息的不同尺度分量,即通过基函数的伸缩、平移运算,达到对观测序列的多分辨率分析(Grossmann, et al, 1984; Mallat, 1989)。但由于小波分解的实质是带通滤波器,所以不同分量一般与固定频带相对应,小波基和分解层次的选择带有很强的主观性,因此分解精度有待进一步提高。针对小波分解存在的一些问题,1998年美国国家宇航局Huang等(1998)提出的一种新时间序列分析方法——希尔伯特-黄变换(Hilbert-Huang transform, HHT)。这一方法主要包含了2部分内容:经验模态分解(Empirical mode decomposition, EMD)和希尔伯特变换(Hilbert Transform, HHT)。EMD方法主要是将一个复杂信号进行平稳化处理,其结果是将不同尺度或层次的波动或趋势分量从原序列提取出来,得到若干具有不同尺度特征的本征模态函数(Intrinsic Mode Function, IMF)分量;HHT主要是将EMD分解得到的IMF分量进行希尔伯特变换,得到IMF随时间变化的瞬时频率和振幅(图2),最终可以得到振幅-频率-时间的三维谱图(图3)。该方法克服了小波变换的一些局限性,具有比小波分解更高的分解精度。HHT方法目前受到人们的广泛关注,已经在气象等领域得到一定的应用。如:龚志强等(2005)对比分析了EMD方法和小波变换方法的异同性,并讨论两种方法的分解分量中虚假和真实信号的识别;杨培才等(2005)应用EMD方法对NINO 3区海表温度进行分解,通过不同尺度IMF分量之间的关系讨论了气候系统的非平稳行为。万仕全等(2005a)利用EMD方法将气候序列作平稳化处理,得到一系列平稳分量IMF的基础上,再利用均生函数(Mean Generate Function, MGF)模型获得各分量的初次预测值,结

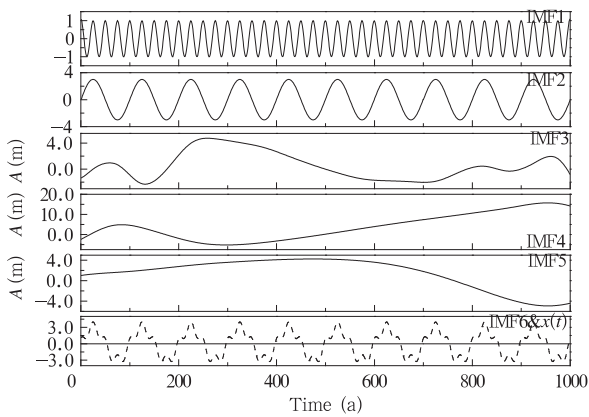


图2 冰芯 O^{18} 序列基于 EMD 的 IMF 分量的时域图 (IMF1—IMF6 依次为 EMD 的 6 个分量, IMF6 & S 中实线为 IMF6, 虚线为冰芯 O^{18} 序列)

Fig. 2 The IMF components based on the EMD for the Guliya ice core $\delta^{18}\text{O}$ time series (IMF1—IMF6 are orderly obtained; and the solid line in the IMF6, S panel is IMF6 component, and the thin dash line the original series)

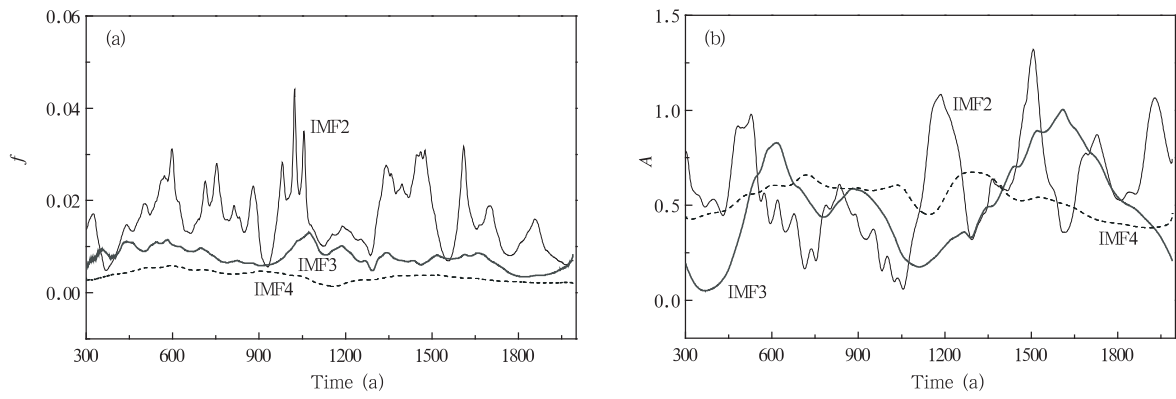


图3 冰芯 O^{18} 序列基于 EMD 的 3 个 IMF 分量 HT 的时频和时幅谱 (a. 时频谱, b. 时幅谱)

Fig. 3 Time-frequency (a) and time-amplitude (b) spectral structure of IMF2 (thin line), IMF3 (thick line) and IMF4 (dash line) (The abscissa is time, and the ordinate frequency f (a) and amplitude A (b), respectively)

复杂的非线性和非平衡的相互作用,形成了气候系统的非线性特征;(2)气候系统是有序态、随机态和混沌态共存于一个复杂系统中,显示出了系统的多样性特征;(3)气候系统能够形成各种时空图样,在这些时空范围内具有明显的层次性;(4)气候系统对初始条件、参数和环境的微小扰动高度敏感;(5)气候系统的整体行为并非简单地与子系统的行为相联系,气候系统要求我们必须从整体上去把握它的发展趋势;(6)气候系统的基本动力学行为是大量子系统的统计平均行为,表征其复杂性的各种物理量同样具有统计性,如:各种气象要素、熵和拓扑维等物

合最优子集回归 (Optimal Subset Regression, OSR) 模型构建了一种新的预测模型。显然,通过 EMD 分解得到的 IMF 分量对原序列的贡献是不同的,不同的气候要素之间相互作用的强弱也是有差异的,如何通过数理的方法来衡量这种差异也是科研工作者迫切关心的问题之一。Schreiber 等 (2000) 发展了传递熵算法,该方法能够有效衡量两个或多个分量对另外一个分量作用的强弱,对于当前全球变暖下人为变率和自然变率作用强弱的区分具有一定启示,封国林等 (2006) 将该方法应用于分析气候变化的不同尺度系统对中国降水的可能影响。

4 气候系统的复杂性研究

气候系统无疑是一个复杂系统,气候的复杂性主要表现在它完全满足复杂系统所具有的“6 大”基本特征 (Lorenz, 1963, 1976): (1) 气候系统是由多个子系统组成的,它们之间以某种或多种方式发生

理量。目前,讨论非线性和复杂性的方法很多,已有的研究大致为:对描述气候变化的非线性微分方程的研究、对连续的气候观测资料的研究及对离散的历史气候等级序列的研究。从物理学角度看,定量刻画非线性动力系统复杂性的两个最常用的量就是分维数和李雅普诺夫 (Lyapunov) 指数,它们分别度量了非线性动力系统相空间几何结构的规则性或复杂性程度;也有利用熵理论和方法来研究资料序列的统计复杂性和 Kolmogorov 复杂性 (David, 1998; Zebrowski, et al, 2000)。但上述方法大都基于观

测数据足够长的基本假设,才能保证计算出来的结果具有可靠性。郝柏林(1999)提出可以通过符号动力学建立运动轨道和形式语言的联系,然后借助语法复杂性理论来刻画复杂性,其核心的内容就是粗粒化。不同程度的粗粒化,舍去更小层次上的细节,使它们在所关注的层次中表现为某些特征量,有利于突出本质的特征。Sebastien 等(1999)指出,首先要判定什么样的函数能够作为序列的符号复杂性函数,其次要弄清序列复杂性和与之相关联的动力系统之间的关系,如果给出一个不一定是符号的拓扑动力系统或测度理论的动力系统,都可以建立与之相对应的符号系统,在适当的条件下,可以讨论该系统的复杂性函数。

在对气候及环境演变的复杂性认识上,陈述彭(1991)对地球科学的复杂性与系统性进行了评述;丑纪范(1997)从众多自由度系统的特定时空尺度大气现象与观测事实密切结合的角度,对大气中的非线性及复杂性的研究进行了评述,揭示了天气尺度的可预测时段不超过 2—3 周,大气中除了有天气尺度的混沌分量外,还有行星尺度的稳定分量,大气复杂性就表现在混沌分量与稳定分量之间的非线性相互作用上。近几年来,Kaspar 等(1987)提出了能够

衡量任意有限长度符号序列复杂性的研究方法:Lemper-Ziv 复杂度。侯威等(2005)应用该方法衡量了 Logistic 映射和 Lorenz 模型产生的时间序列以及古里雅冰芯和石笋代用资料的复杂度,进而从理想混沌模型数值试验和代用资料分析两个方面分析气候系统的复杂性。

气候系统的无标度性是复杂性研究的又一重要成果,这一方面的研究可以说是方兴未艾,具有较强的生命力。Andrea Kiraly 等(2002)利用去趋势涨落方法(DFA)对 Hungary 16 个站 1951—1989 年逐日温度资料滤除趋势项后,对衡量温度涨落的物理量进行统计分析发现,逐日温度资料中存在着较好的尺度律特征;Peter 等(2002)定义了降水率,并从该角度对各种不同雨量降水的出现概率进行统计,同样发现其中存在尺度律特征;郑祚芳等(2007)运用 DFA 方法分析温度和降水序列发现,北京年平均气温和降水量均可划分为多个标度不变区域,在特定的标度域内,它们都表现出正长程相关的性质。支蓉等(2006)基于中国 740 站点近 40 年逐日降水资料,揭示了降水的无标度性质(图 4),通过幂律指数讨论了降水无标度性质的时空演化特征以及不同尺度系统对这一性质的可能影响等。这些研究

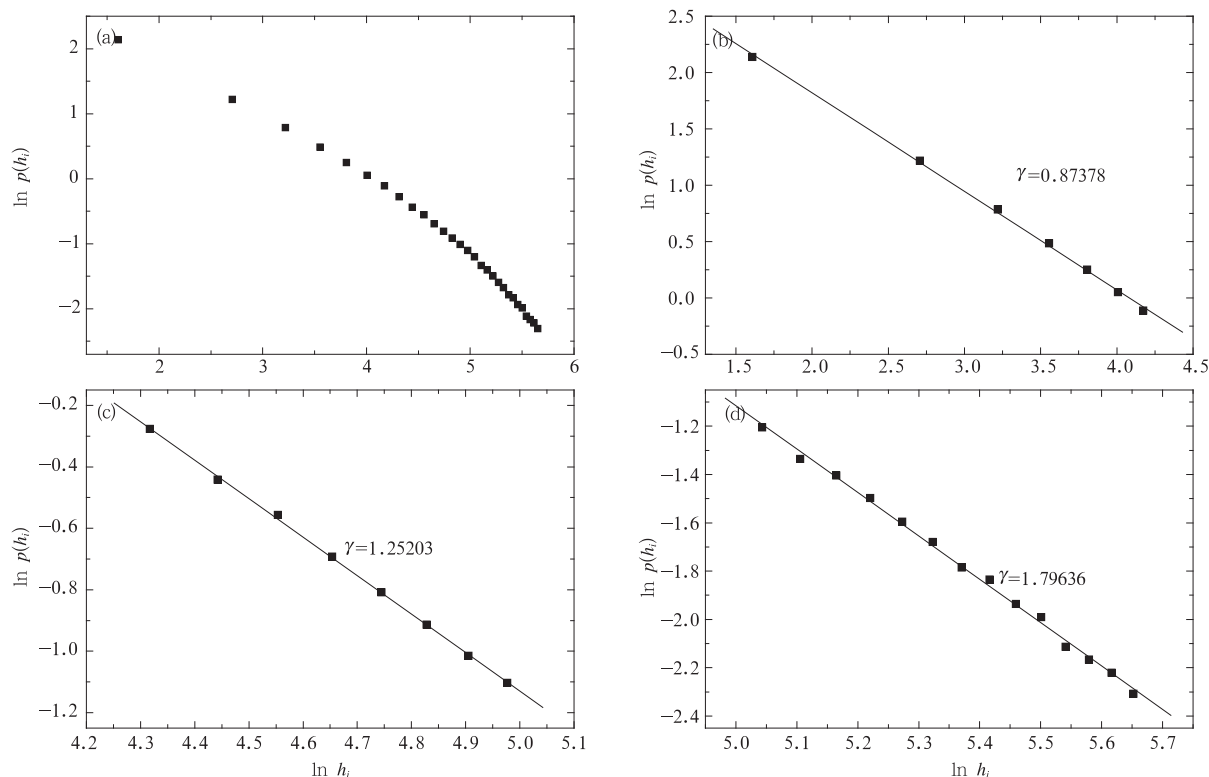


图 4 中国 435 站点 1960—1969 年降水的无标度性

Fig. 4 Scale free characteristics of precipitation series of 435 stations in China during 1960—1969
(a. 0—29 mm, b. 0—7 mm, c. 7.1—15 mm, d. 15.1—29 mm)

在一定程度上揭示了气候系统也存在无标度特征这一非线性复杂系统的共同属性,从而为制作年际与年代际气候预测提供了理论基础。

此外,自然变率作用的基础,人为变率大大加强进一步加剧了气候系统本身的复杂性,对气候变化及其各种外部强迫信号的归因研究则提出了新的要求。Allen 等(1999)应用最优指纹识别方法(Optimal Fingerprinting),通过多变量回归的思想给出了气候变化及其研究的新的可能途径;针对一般的大气环流模式不能很好地模拟小尺度上气候变化外强迫的影响,Allen 等(1999)采用残余一致性测试(Residual Consistency Test)估算局地外强迫对大气环流的可能作用。

尽管当前该领域的研究尚处于初步探索阶段,但是,复杂性科学理论和方法将为研究全球气候变化提供一种新思路和新途径,并具有很好的理论研究价值。而在非线性动力学层次上认识气候系统复杂性的本质,是当前气候科学领域中迅速发展的前沿课题,同时具有重要的科学意义和实际应用前景。

5 气候系统动力学结构特征研究

Taken(1981)指出,系统中的任一分量的演化都是由与之相互作用着的其他分量所决定,因此,这些相关分量的信息就隐含在任一分量的发展过程之中。Packard 等(1980)提出的时间延迟的思想,可重构出动力学系统的相空间。这对于不能直接测量深层的自变量而仅仅知道一组单变量时间序列的研究人员来说,也有了研究系统的动力行为的可能。例如已知地面气压观测数据,可通过重构反演出部分高空信息,弥补高空观测资料的不足。它的基本思想是:系统中的相关分量的信息隐含在任一分量的发展过程中,为了重构一个“等价”的状态空间,只需考察一个分量,并将它在某些固定的时间延迟点(比如一秒前、两秒前等)上的测量作为新维处理,即延迟值被看成是新的坐标,它们确定了某个多维状态空间中的一。重复这一过程并测量相对于不同时间的各延迟量,就可以产生出许多这样的点,然后再运用其他方法来检验这些点是否存在于一个混沌吸引子上。经过相空间重构,如分数维、Lyapunov 指数等一些不变量得到保留。相空间重构可把具有混沌特性的时间序列重建为一种低阶非线性动力学系统,它是非线性时间序列分析的重要步骤,重构的质量直接影响到模型的建立和预测。延迟时间 τ 和嵌入维数 m 的选择是相空间重构的两个重要参数。

可选择的方法很多,主要有:自关联函数法、互信息函数法和周期轨道法等。

李建平等(1997)探讨了用一维时间序列重构相空间确定吸引子维数的理论,揭示其中存在的本质问题,从相空间理论等角度出发,验证了大气中吸引子的存在性。气候动力学研究表明,较长时间尺度的气候行为,往往由较少的自由度来描述,由于不同尺度的相互作用,导致运动方程难以简化。即使对于大尺度的低阶气候系统,也难以从基本的 Navier-Stokes 方程简化出气候长期演变方程。因此,对于长时间尺度的气候动力学,纯粹的动力方程和经典统计手段将无法达到分析目的。近几年来,应用动力学结构思想分析观测序列方面,Bezruchko 等(2001)研究了对一个给定的时间序列,如何应用相空间重构的思想恢复其动力学方程及参数。刘式适等(1991)将热带气旋分为内外 2 个区,2 个区的时间、空间及物理量有不同的尺度,应用尺度分析和摄动法到热带气旋的 2 个区域,分别求得在 2 个区域的控制方程,其中内区受旋转风和一个演变方程制约,外区受梯度风和一个演变方程制约。为了有效地诊断混沌时间序列动力结构,封国林等(2005, 2006)介绍了一种能识别随机或混沌序列的非线性动力学结构,同时具有较高区分能力和比较能力,并能较好地适用于较短时间序列和小尺度情况的新的分析方法:动力学自相关因子指数 Q (Q 指数),应用 Q 指数一方面分析了中国 20 世纪 70 年代末夏季气候异常的动力学机制,及其与印度-东亚型(IEA)等遥相关波列的关系(图 5);另一方面分析了

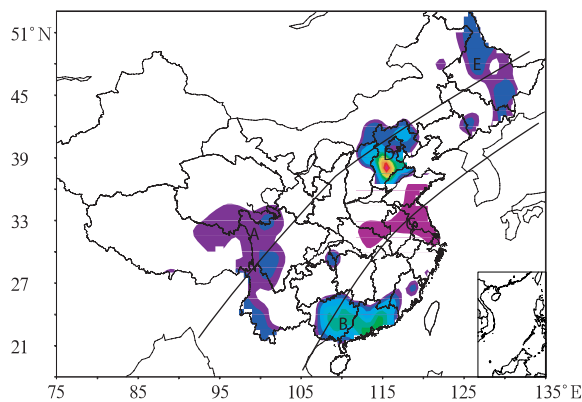


图 5 5 个与传统“雨型”性质不同的动力学气候特征区
(A. 青藏高原型、B. 南型、C. 江淮型、D. 华北型、E. 东北型)

Fig. 5 Five Traditional precipitation types of different dynamical climate characteristic regions
(A. Plateau pattern, B. South China pattern, C. Jianghuai pattern, D. North China pattern, E. Northeast China pattern)

中国夏季风区降水的区域动力学特征及其对外部物理因子的响应。此外,万仕全等(2005b)利用 Q 指数方法研究了北半球树木年轮距平宽度序列、北京石花洞石笋微层厚度等气候代用资料的动力学特征(图

6),发现它们具有相似的动力学演化结构,即无论是区域还是全球范围的气候,均在 700—900 年和 1300—1700 年发生了动力学结构上的突变,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。

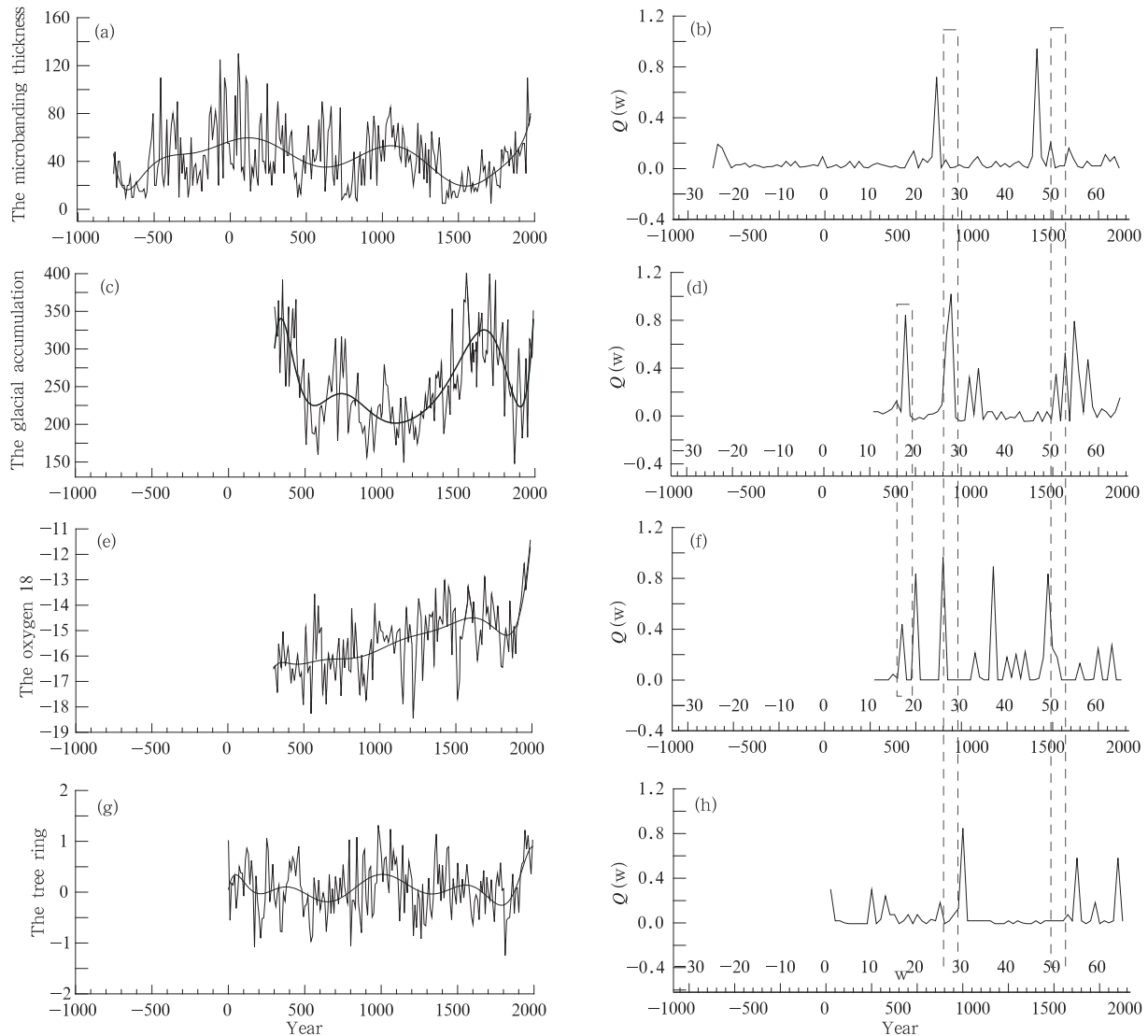


图 6 中世纪暖期和现代小冰期重大事件 Q 指数

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

Fig. 6 Q index of serious climate events of mid-century warm periods and little ice age

(a, b. Beijing Shihua cave stalagmite time series (BC 768—1980) and Q index; c, d. Guliya glacier time series (301—1980) and Q index; e, f. Guliya ice core ^{18}O time series (301—1980) and Q index; g, h. North hemisphere tree ring time series (1—1995) and Q index)

6 极端气候事件检测研究

在全球变暖的大背景下,极端气候事件发生的

频率、强度等会如何变化是 IPCC 第 2 次报告(SAR)以来气候变化研究中普遍关注的问题。Katz 等(1992)认为与气候平均态相比,极端气候事件对

气候变化更敏感。不同于气候平均态的变化,与极端气候事件的发生频率或强度有关的任何变化都可能对自然和社会产生重大的影响。

Easterling 等(2000)将极端气候事件分为两类:一类基于简单的气候统计学,这些极端气候事件每年都会发生,如非常高或非常低的逐日温度、强的逐日或逐月降水量;另一类是更复杂一些的直接由事件发生与否来决定的,如洪涝、飓风等,这样的事件对于给定的地点并不是每年都发生。Beniston 等(2007)简单归纳了常用的定义极端事件的 3 种标准:①事件发生的频率相对较低;②事件有相对较大或较小的强度值;③事件导致了严重的社会经济损失。IPCC 第 3 次报告(TAR)和第 4 次评估报告(AR4)都对极端天气气候事件作了明确的定义(Houghton, et al, 2001; IPCC, 2007),对一特定地点和时间,极端天气事件就是从概率分布的角度来看,发生概率极小的事件,通常发生概率只占该类天气现象的 10%或者更低。从这样的定义来看,极端天气事件的特征是随地点而变的;极端气候事件就是在给定时期内,大量极端天气事件的平均状况,这种平均状态相对于该类天气现象的气候平均态也是极端的。从气候学研究的角度来看, TAR 和 AR4 给出的定义只涉及事件的发生概率,避免了事件的绝对强度随区域不同而差异较大,很难用同一标准作比较的问题。

分析研究极端事件的变化特征通常有 2 种方法:(1)定义与极端事件相关的代用气候指数,通过分析这些气候指数的特征来反映极端事件的变化情况;(2)根据天气现象(如热带气旋)本身的定义标准,直接通过对原始资料的分析来判断该类极端事件的频率或强度有何变化。气候变化检测和指标专家组(ETCCDM I, Expert Team on Climate Change Detection and Indices)定义了 27 个代用气候指数,主要集中在对极端事件的描述上,其中包括 16 个气温指数和 11 个降水指数,这些指数是从逐日最高、最低及平均气温或逐日降水量计算得到的。Alexander 等将这些指数归纳为(Kiktev, et al, 2003):①基于百分比阈值的相对指数;②代表某个季节或某年最大或最小值的绝对指数;③气温或降水值大于或小于某固定阈值的天数的阈值指数;④过度冷、暖、干、湿的持续时间或对生长季长度而言的生长周期所对应的持续指数;⑤其他指数,包括年总降水

量、气温日较差、平均雨日降水强度、极端气温差以及年极端降水占总降水的百分比。

检测极端气候事件的方法较多,最常见的方法有绝对阈值方法和百分位阈值方法。绝对阈值法就是设定一个阈值,当大于这一阈值则为极端值;百分位阈值法是采用某个百分位值作为极端值的阈值,超过这个阈值的值被认为是极值,并称为极端事件。百分位值的确定一般需要了解气候要素的概率分布函数,或对该气候要素的概率分布函数做出某种假设,然后根据统计学和概率论相关知识给出便于实际操作的公式。翟盘茂等(2003)应用百分位方法和绝对阈值方法对 1951—1999 年中国北方极端气温和极端降水进行研究发现,中国暖日和暖夜发生频率有增加趋势;冷日数减少,冷夜数减少更明显;中国西部和长江中下游极端降水事件发生频率显著增加,华北显著减少,而且这些地区的极端降水与平均降水变化趋势一致。龚道溢等(2004)发现 1956—2001 年华北地区的极端高温发生频率显著升高,极端低温发生频率显著降低;Wang 等(2005)利用 1961—2001 年中国的气象台站资料,发现西南、西北北部和华东极端降水事件频率有增加趋势,华北、华中有减少趋势,而且这种趋势与平均降水变化趋势空间分布一致。Qian 等(2005)利用 494 个台站 1961—2000 年的降水资料,根据基于降水百分比、强度及持续性的不同阈值指数,发现黄河流域和华北干旱出现的频率增加,东南地区(包括长江中下游)和新疆地区强降水事件增多。

百分位方法计算均值时将极端事件即极端值也包括在内,某种程度上掩盖了系统背景的真实信息,从而可能导致某些极端事件无法检测到。因此,章大全等(2008)采用中值和均值两种极端事件检测方法,分别对中国 194 个站点 1957—2001 年的日温度资料和月平均温度资料进行分析,并对两种不同检测方法得出的结果进行比较发现,除西南地区部分站点外,近 50 年中国大部分地区极端低温事件的年均发生次数趋于减少,而极端高温事件发生频率的变化则呈现出东南沿海地区减少、西北内陆地区增加的分布特点(图 7)。同时讨论了极端事件发生频率、强度变化等与 20 世纪 70 年代中后期的气候突变的可能联系:极端高温/低温突变发生的时间较温度突变的时间晚 3—4 a,即温度突变的过程可能是极端温度事件的由一个相对稳定状态向另一个稳态演变的过程(图 8)。

关于人为因素和自然因素与极端气候事件之间的可能联系的研究,目前国际上大多结合模式针对某种影响因素进行数值试验的方法,如: Karoly 等

(2005)应用 GFDL R30、HadCM2、PCM 3 种模式比较分析了 30、50 和 100 a 尺度上温度的变化趋势及其对温室气体及硫酸盐气溶胶等强迫的可能响应。

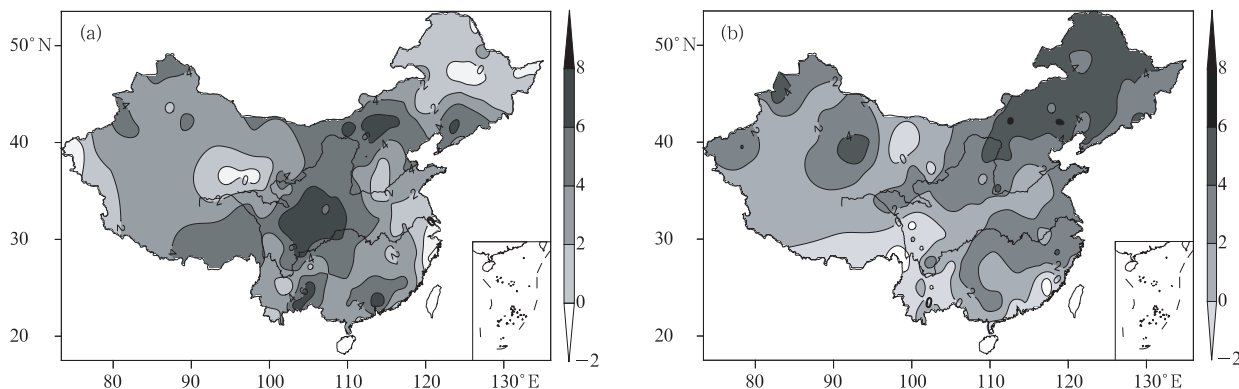


图 7 逐日资料得到的年均极端高温/低温事件发生次数(单位:d)

(a. 中值方法, b. 均值方法)

Fig. 7 The results of detecting method based on median and average
(annual average number of extreme high/low temperature events detected by climate extremes detecting method based on median (a) and average (b) respectively)

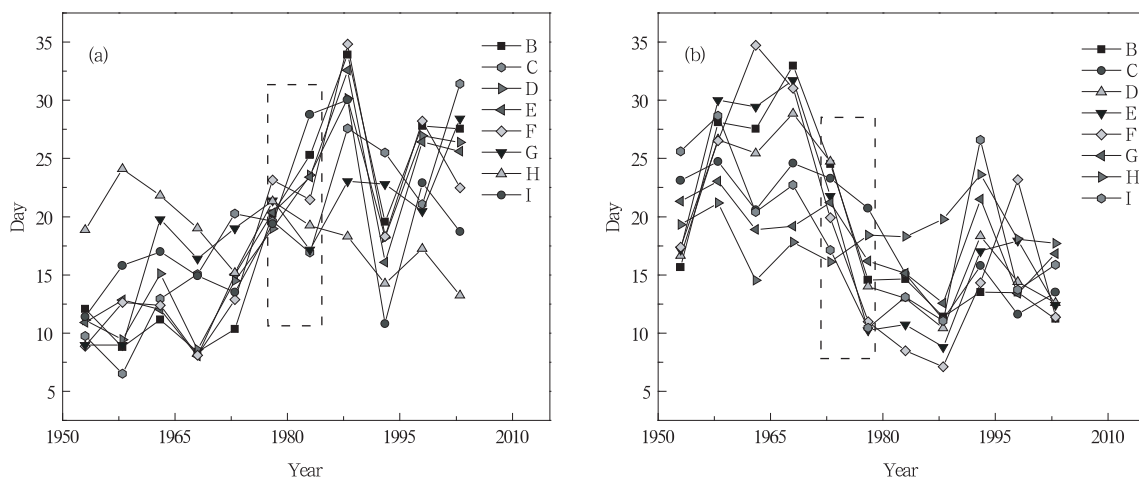


图 8 中国 8 个气候特征区域每 5 年极端温度出现频数分布

(虚线框为年均温突变区域,即极端高温和极端低温的突变的过渡阶段;a. 极端高温,

b. 极端低温, B—I 分别代表不同区域)

Fig. 8 Frequency changes of extreme high/low temperature of 8 climate characteristic regions (B—I)
(Dash box denotes temperature abrupt change periods, i. e. shifted periods of extreme high/low temperature, (a) and (b) is extreme high/low temperature, respectively)

7 总结和讨论

气候系统是大气-海洋-冰雪圈系统内部物理过程相互作用的结果,其影响的空间范围广阔和时间尺度多样化,同时各子系统间存在不同程度的正负反馈作用,各种气候要素的观测序列,作为气候系统

内在复杂性的表现形式,必然具有非线性、非平稳性等特征。因此选择合适的统计方法、动力学方法或统计与动力相结合的方法对气候要素的观测序列进行检测和分析就显得尤为重要。

本文从气候突变的检测和研究、气候资料信息的提取和分离、气候系统复杂性的研究、气候系统动

力学结构特征及极端气候事件的检测等 5 个方面简要介绍了近几年来中国气候变化检测技术研究的若干新进展以及本工作小组的部分成果。显然,这 5 个方面的科研问题是当前中国乃至国际气候变化研究领域的一些热门课题,国家重点基础研究发展规划:北方干旱化与人类适应;国家科技支撑计划:我国主要极端天气气候事件及重大气象灾害的监测预测和应对等重大项目都有关于这些方面的研究内容。因此,关于这些科学问题的检测方法的研究也越来越受到人们的关注。

就当前而言,虽然气候变化检测技术的研究已经取得了一定的成果,但是依然存在一些焦点、难点问题未能很好克服。如:气候观测序列是非线性的混沌系列,而当前的许多检测方法是基于传统线性过程的思想,虽然 20 世纪 70 年代以来也出现了像 Lyapunov 指数、复杂度、熵等一些非线性的检测方法,但是这些方法依然存在一定的局限性;全球变暖的背景下,气候资料本身又具有了新的特征,如何进一步完善这些理论和方法以便更好地对气候要素资料进行检测和分析是一个有待继续深入研究的问题。此外,传统的气候变化检测技术大都是统计方法,而当前各种气候模式的构建都是基于动力过程的思想,因此如何将统计和动力相结合,进而发展新的动力-统计方法,其意义是显而易见的。此外,极端事件的检测和模拟、气候变化的影响及其可能的外部强迫研究、自然变率和人为变率的识别及气候要素相似场的判断等问题,国际上近几年出现了中值算法、最优指纹识别方法、经验模态分解方法、复杂网络理论等新的数理方法等。这些方法为气候变化及其归因的研究提供了新的思路,但目前国内对这些方法的应用相对较少,在以后的工作中,我们将对这些方法做详细的介绍,通过数值试验等讨论其适用性并应用于中国气候变化的检测和归因。

References

- Allen M R, Tett S F B. 1999. Checking for model consistency in optimal fingerprinting. *Clim Dyn*, 15: 419-434
- Bezruchko B P, Karavaev A S, Ponomarenko V I, et al. 2001. Reconstruction of time-delay systems from chaotic time series. *Phys Rev E*, 64: 056216
- Beniston M, Stephenson D B, Christensen O B, et al. 2007. Future extreme events in European climate: An exploration of regional climate model projections. *Clim Change*, 81(Sup 1): 71-95
- Chen Shupeng. 1991. Complicity and systemic of earth science. *Scientia Geographica Sinica* (in Chinese), 11(4): 297-305
- Chinese Academy Meteorological Sciences. 1975. Wet and Dry History Martial of North and Northeast China of the Past 500 Years (in Chinese). 146pp
- Chinese Academy Meteorological Sciences. 1981. Wet and Dry Distribution in China of Past 500 Years (in Chinese). Beijing: Sino-map Press, 1-10
- Chou Jifan. 1997. Research progress in nonlinear and complicity of atmosphere science. *Bull Chinese Academy Sci* (in Chinese), 5: 325-329
- Dansgaard W C. 1982. A new Greenland deep ice core. *Science*, 218: 1273-1277
- Dai X G, Fu Z B, Wang P. 2005. Interdecadal change of atmospheric stationary waves and North China drought. *China Phys*, 2005, 14(4): 850-858
- David P Feldman, Crutchfield Jams P. 1998. Measures of statistical complexity: why? *Physics Lett A*, 238(4, 5): 244-252
- Ding Yihui. 1997. Research of Climate Change and Influence in China (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 1-562
- Ding Yihui, Ren Guoyu, Zhao Zongci. 2007. Detection, attribution and projection of climate change over China. *Desert Oasis Meteor* (in Chinese), 1(1): 1-10
- Easterling D R, Meehl G A, Parmesan C, et al. 2000. Climate extremes: Observations, modeling and impacts. *Science*, 289: 2068-2074
- Feng Guolin, Gong Zhiqiang, Dong Wenjie, et al. 2005. The analysis of climate abrupt change during based on the heuristic segmentation algorithm. *Acta Phys Sinica* (in Chinese), 54(11): 5494-5499
- Feng Guolin, Gong Zhiqiang, Zhi Rong, et al. 2006. Nonlinear theories and methods on spatial-temporal distribution of the observational data (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 1-100
- Fu C B, Flecher. 1982. Large signal of climatic variation over the ocean in the Asian monsoon region. *Proceedings of the annual climate diagnostic workshop*, NCAR, Boulder, USA
- Fu Congbin, Wang Qiang. 1991. Abrupt changes in the north Aisa long term changes and its synchronization with global warming. *Sci China (Series B)* (in Chinese), (6): 666-672
- Fu Congbin, Yan Zhongwei. 1996. Global Climate Change and Future Living Environment (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 347pp
- Gong Daoyi, Han Hui. 2004. Extreme climate events in northern China over the last 50 years. *Acta Geographica Sinica* (in Chinese), 59(2): 230-238
- Gong Zhiqiang, Zou Mingwei, Li Jianping, et al. 2005. On the difference between empirical mode decomposition and wavelet decomposition in the nonlinear time series. *Acta Phys Sinica* (in Chinese), 54(8): 3974-3984

- Gong Zhiqiang, Feng Guolin, Wan Shiquan. 2006a. Analysis of features of climate change of Huabei area and the global climate change based on heuristic segmentation algorithm. *Acta Phys Sinica* (in Chinese), 55(1): 477-484
- Gong Zhiqiang, Feng Guolin, Dong Wenjie, et al. 2006b. The research of dynamic structure abrupt change of nonlinear time series. *Acta Phys Sinica* (in Chinese), 55(6): 3180-3187
- Gong Zhiqiang, Feng Guolin. 2008. The research of durative characteristics of dry/wet series of China during the past 1000 years. *Acta Phys Sinica* (in Chinese), 57(6): 3931-3942
- Grossmann A, Morlet J. 1984. Decomposition of hardy functions into square integrable wavelets of constant shape. *Siam J Math Anal*, 15(4): 723-736
- Hao Bolin. 1999. Description of complicity and "complex science". *Science*(in Chinese), 51(3): 3-8
- Hou Wei, Feng Guolin, Gao Xinquan. 2005. Investigation on the time series of ice core and stalagmite based on the analysis of complexity. *Acta Phys Sinica* (in Chinese), 54(5): 2441-2447
- Hou Wei, Feng Guolin, Dong Wenjie. 2006. A technique for distinguishing dynamical species in the temperature time series of north China. *Acta Phys Sinica* (in Chinese), 55(5): 2663-2668
- Hou Wei, Lian Yi, Feng Guolin. 2007. Nonlinear noise reduction for the observation data of climatology based on the searching average method. *Acta Phys Sinica* (in Chinese), 56(1): 589-596
- Houghton J T, Ding Y, Griggs D J, et al. 2001. IPCC, Climate change 2001: The scientific basis //Observed Climate Variability and Change. Cambridge, United Kingdom and New York, USA: Cambridge University Press
- Huang N E, Shen Z, Long R S, et al. 1998. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis. *Proc R Soc Lond A*, 454(1): 903-995
- Huang Ronghui, Chen Jilong, Huang gang. 2006. The quasi-biennial oscillation of summer monsoon rainfall in China and its cause. *Chinese J Atmos Sci* (in Chinese), 30(4): 545-560
- IPCC. 2007. Summary for Policymakers of the Synthesis Report of the IPCC Fourth Assessment Report. Cambridge, UK: Cambridge University Press
- Kaspar F, Schuster H G. 1987. Easily calculatable measure for the complexity of spatio-temporal patterns. *Phys Rew A*, 36(2): 842-848
- Katz R W, Brown B G. 1992. Extreme events in a changing climate: Variability is more important than averages. *Climatic Change*, 21(3): 289-302
- Karoly D J, Wu Q. 2005. Detection of regional surface temperature trends. *J Clim*, 18(21): 4337-4343
- Király A, János I M. 2002. Stochastic modeling of daily temperature fluctuations. *Phys Rev E*, 65:051102
- Kiktev D, Sexton D M H, Alexander L, et al. 2003. Comparison of modeled and observed trends in indices of daily climate extremes. *J Clim*, 16(22): 3560-3570
- Li Jianping, Chou Jifan. 1996. Some problems existed in estimating fractal dimension of attractor with one dimensional time series. *Acta Meteor Sinica* (in Chinese), 54(3): 312-322
- Li Jianping, Chou Jifan. 1997. Existence of attractors in atmosphere. *Sci China(Series B)* (in Chinese), 27(1): 89-95
- Li Qingxiang, Li Wei. 2007. Construction of the gridded historic temperature dataset over China during the recent half century. *Acta Meteor Sinica* (in Chinese), 65(2): 293-301
- Liu X M, Li Q X. The research of the inhomogeneity test on China climate data series. *Acta Meteor Sinica*, 2003, 17(3): 492-502
- Liu Shigua, Liu Shida. 1991. Dynamics of Atmosphere (in Chinese). Beijing: Peking University Press, 536pp
- Lorenz E N. 1963. Deterministic nonperiodic flow. *J Atmos Sci*, 20: 130-141
- Lorenz E N. 1976. Nondeterministic theory of climatic change. *Quat Res*, 6: 495-506
- Ma Zhuguo, Fu Congbin. 2006. Fact of drying of north China during 1951-2004. *Chinese Science Bull*, 51(20): 2429-2439
- Mallat S. 1989. Multi-frequency channel decomposition of images and wavelet models. *IEEE Trans Signal Process*, 37(12): 2091-2110
- Mu Mu, Wang Bing. 2007. Nonlinear instability and sensitivity of a theoretical grassland ecosystem to finite-amplitude perturbations. *Nonlin Processes Geophys*, 14: 409-423
- Packard N H, Crutchfield J P, Farmer J D, et al. 1980. Geometry from a time series. *Phys Rev Lett*, 45(3): 712-716
- Peters O. 2002. A complexity view of rainfall. *Phys Rev Lett*, 88(1): 018701
- Qian W, Lin X. 2005. Regional trends in recent precipitation indices in China. *Meteor Atmos Physics*, 90(2): 193-207
- Qin Dahe, Chen Zhenlin, Luo Yong. 2007. Updated understanding of climate change sciences. *Adv Clim Change Res* (in Chinese), 3(2): 63-73
- R Thom. 1975. Structural stability and morphogenesis. New York: Benjamin-Addison Wesley Press, 82-115
- Sauer T, Yorke J, Casdagli M. 1991. Embedlogy, determining the model order of nonlinear input/output systems directly from data. *J Stat Phys*, 65(3-4): 579-616
- Schreiber T. 2000. Measuring information transfer. *Phys Rev Lett*, 85(2): 461-464
- Sebastien F, Zoltan K. 1999. Complexity for finite factors of infinite sequences. *Theoretical Computer Science*, 218(1): 177-195
- Shi Yafeng, Yao Tandong, Yang Bao. 1999. 10a scale climate changes contained in past 2000a ice core and comparing with reference record of east China. *Sci China (series D)* (in Chinese), 29(Sup): 79-86
- Sun Feng, Liu Shigua. 1999. Quasi balanced dynamic structure of tropical cyclone. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis* (in Chinese), 35(3): 366-374

- Sugihara G., May R M. 1990. Nonlinear forecasting as a way of distinguishing chaos from measurements error in time series. *Nature*, 344: 734-740
- Takens F. 1981. Detecting strange attractors in turbulence//*Dynamical Systems and Turbulence*. Warwick: Springer-Verlag, 266-381
- Thomas S. 1993. Extremely simple nonlinear noise-reduction method. *Phys Rev E*, 47(4):2401-2404
- Wan Shiquan, Feng Guolin, Dong Wenjie. 2005a. From regional to global dynamics structure of the climatic proxy. *Acta Phys Sinica* (in Chinese), 54(11): 5487-5493
- Wan Shiquan, Feng Guolin. 2005b. Extracting useful information from the observations for the prediction based on emd method. *Acta Meteor Sinica* (in Chinese), 63(4): 516-525
- Wang Y Q, Zhou L. 2005. Observed trends in extreme precipitation events in China during 1961-2001 and the associated changes in large scale circulation. *Geophysical Res Let*, 32(5): L09707
- Wang Shaowu, Ye Jinlin, Gong Daoyi. 1998a. Climate in China during the little ice age. *Quaternary Sciences*, (1): 54-64
- Wang Shaowu, Ye Jinlin, Gong Daoyi. 1998b. Construction of mean annual temperature series for the last one hundred years in China. *Quart J Appl Meteor* (in Chinese), 9(4): 392-401
- Wang Shaowu, Zhu Jinhong. 1999. Several hot studying fields on climatology. *Quart J Appl Meteor* (in Chinese), 10(Sup): 104-102
- Wang Shaowu. 2001. Progress of research in modern climate research (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 458pp
- Wang Shaowu, Luo Yong, Zhao Zongci. 2004. Will the global warming bring chilling? *Sci Techn Rev*, 7:8-10
- Weaver A J, Hillaire M C. 2004. Global warming and the next ice age. *Science*, 304: 400-402
- Wei Fengying. 2007. Statistics technology of diagnose and forecast of modern climate (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 1-296
- Xiao D, Li J P. 2007. Main decadal abrupt changes and decadal modes in global sea surface temperature field. *Chinese J Atmos Sci* (in Chinese), 31(5): 839-854
- Xiao D, Li J P. 2007. Spatial and temporal characteristics of the decadal abrupt changes of global atmosphere-ocean system in 1970s. *J Geophys Res*, 112 (D24S22): doi: 10. 1029/2007JD008956
- Yan Z W. 1990. Northern hemispheric summer jump during the 1960's, part I, rainfall and temperature. *Sci China (B)*, 33:1092-1101
- Yang Peicai, Bian Jianchun, Wang Geli. 2003. Hierarchy and non-stationary behavior of the climate system-discussion of prediction of the complex system. *Chinese Sci Bull*, 2003, 48(13): 1470-1476
- Yang Peicai, Zhou Xiuji. 2005. On nonstationary behaviors and prediction theory of climate systems. *Acta Meteor Sinica* (in Chinese), 63(5): 556-570
- Yao Tandong, Thompson L G. 1992. Dunde ice core and correlation with temperature change during the past 5000 years. *Sci China (B)* (in Chinese), 10: 1089-1093
- Ye Duzheng, Huang Ronghui. 1990. Progress of dry/wet climate research (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 1-156
- Ye Duzheng, Fu Congbin, Dong Wenjie. 2003. Several progress in area of global climate changes. *Chinese J Atmos Sci* (in Chinese), 27(4):435-450
- Zebrowski J J, Poplawska W. 2000. Symbolic dynamics and complexity in physiological time series. *Chaos Solitons and Fractals*, 11(7): 1061-1075
- Zhai P M, Pan X H. 2003. Trends in temperature extremes during 1951-1999 in China. *Geophysical Res Let*, 30(17): 1913-1916
- Zhang Daquan, Qian Zhonghua. 2008. Analysis of extreme events in China's temperature in recent 50 years using detecting method based on median. *Acta Phys Sinica*, 57 (7):4634-4640
- Zhang Déer. 1980. Some characteristics of the temperature change in winter in south China of the past 500 years. *Chinese Sci Bull* (in Chinese), 25(6): 270-272
- Zhang Qing, Ding Yihui. 2001. Decadal climate change and ENSO cycle. *Acta Meteor Sinica* (in Chinese), 59(2): 157-172
- Zhang Wen, Gao Xinquan, Dong Wenjie. 2007. Detection of the recent 2000a climatic extreme anomalies based on a new kind of approach-the high-order moment method. *Acta Phys Sinica* (in Chinese), 56(10): 6150-6156
- Zhen Zuofang, Zhang Xiuli, Cao Hongxing, et al. 2007. Characteristics of long-term climate change in Beijing with detrended fluctuation analysis. *Chinese J Geophysics* (in Chinese), 50(2): 420-424
- Zhi Rong, Gong Zhiqiang, Wang Deying. 2006. Analysis of the spatio-temporal characteristics of precipitation of China based on the power-law exponent. *Acta Phys Sinica* (in Chinese), 55(11): 6185-6191
- Zhi Rong, Lianyi, Fen Guolin. 2007. The influence of different scale systems on precipitation analyzed on the basis of power-law exponent. *Acta Phys Sinica* (in Chinese), 56(3):1837-1842
- Zhu Jinhong, Wang Shaowu, Mu Qiaozhen. 2003. 80a oscillation of summer precipitation in north China and its correlation with Asia summer monsoon. *Adv Nature Sci* (in Chinese), 13(11): 1205-1211

附中文参考文献

- 陈述彭. 1991. 地球科学的复杂性与系统性. *地理科学*, 11(4): 297-305
- 丑纪范. 1997. 大气科学中非线性与复杂性研究进展. *中国科学院院刊*, 5: 325-329
- 丁一汇. 1997. 中国的气候变化与气候影响研究. 北京: 气象出版社, 1-562

- 丁一汇, 任国玉, 赵宗慈. 2007. 中国气候变化的检测及预估. 沙漠与绿洲气象, 1(1):1-10
- 封国林, 龚志强, 董文杰等. 2005. 基于启发式分割算法的气候突变检测研究. 物理学报, 54(11):5494-5499
- 封国林, 董文杰, 龚志强等. 2006. 观测数据非线性时空分布理论和方法. 北京:气象出版社, 227pp
- 符淙斌, 王强. 1991. 南亚夏季风长期变化中的突变现象及其与全球迅速增暖的同步性. 中国科学(B辑), (6): 666-672
- 符淙斌, 严仲伟. 1996. 全球变化与我国未来的生存环境. 北京:气象出版社, 347pp
- 龚道溢, 韩晖. 2004. 华北农牧交错带夏季极端气候的趋势分析. 地理学报, 59(2): 230-238
- 龚志强, 邹明伟, 李建平等. 2005. 基于非线性时间序列分析经验模态分解和小波分解异同性的研究. 物理学报, 54(8): 3974-3984
- 龚志强, 封国林, 万仕全. 2006a. 基于启发式分割算法检测华北和全球气候变化的特征. 物理学报, 55(1): 477-484
- 龚志强, 封国林, 董文杰等. 2006b. 非线性时间序列的动力结构突变检测的研究. 物理学报, 55(6): 3180-3187
- 龚志强, 封国林. 2008. 中国近 1000 年旱涝的持续性特征研究. 物理学报, 57(6): 3931-3942
- 郝柏林. 1999. 复杂性的刻画与“复杂性科学”. 科学, 51(3): 3-8
- 黄荣辉, 陈际龙, 黄刚. 2006. 中国东部夏季降水的准两年周期振荡及其成因. 大气科学, 30(4): 545-560
- 侯威, 封国林, 高新全. 2005. 基于复杂度分析冰芯和石笋代用资料时间序列的研究. 物理学报, 54(5): 2441-2447
- 侯威, 封国林, 董文杰. 2006. 利用排列熵检测近 40 年华北地区气温突变的研究. 物理学报, 55(5): 2663-2668
- 侯威, 廉毅, 封国林. 2007. 基于搜索平均法的气象观测数据的非线性去噪. 物理学报, 56(1): 589-596
- 李建平, 丑纪范. 1996. 利用一维时间序列确定吸引子维数中存在的若干问题. 气象学报, 54(3): 312-322
- 李建平, 丑纪范. 1997. 大气中吸引子的存在性. 中国科学(D辑), 27(1): 89-95
- 李庆祥, 李伟. 2007. 近半个世纪中国区域历史气温网格数据集建立. 气象学报, 65(2): 293-301
- 刘式适, 刘式达. 1991. 大气动力学. 北京:北京大学出版社, 536pp
- 马柱国, 符淙斌. 2006. 1951~2004 年中国北方干旱化的基本事实. 科学通报, 51(20): 2429-2439
- 秦大河, 陈振林, 罗勇. 2007. 气候变化科学的最新认知. 气候变化研究进展, 3(2):63-73
- 施雅风, 姚檀栋, 杨保. 1999. 近 2000 年古里雅冰芯十年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), 29(增刊):79-86
- 孙峰, 刘式适. 1999. 热带气旋的准平衡动力学结构. 北京大学学报(自然科学版), 35(3): 366-374
- 万仕全, 封国林. 2005a. 基于 EMD 方法的观测数据信息提取与预测研究. 气象学报, 63(4): 516-525
- 万仕全, 封国林, 董文杰. 2005b. 气候代用资料动力学结构的区域与全球特征. 物理学报, 54(11): 5487-5493
- 王绍武, 叶瑾琳, 龚道溢. 1998a. 中国小冰期的气候. 第四纪研究, (1): 54-64
- 王绍武, 叶瑾琳, 龚道溢. 1998b. 近百年中国年气温序列的建立. 应用气象学报, 9(4): 392-401
- 王绍武, 朱锦红. 1999. 几个方兴未艾的气候学问题. 应用气象学报, 10(增刊): 104-102
- 王绍武. 2001. 现代气候学研究进展. 北京:气象出版社, 1-458
- 王绍武, 罗勇, 赵宗慈. 2004. 全球变暖会导致气候严寒吗. 科技导报, 7:8-10
- 魏风英. 2007. 现代气候统计诊断与预测技术. 北京:气象出版社, 296pp
- 肖栋, 李建平. 2007. 年平均全球海表温度场中主要的年代际突变和年代际模态. 大气科学, 31(5): 839-854
- 杨培才, 卞建春, 王革丽. 2003. 气候系统的层次结构和非平稳行为—复杂系统预测问题探讨. 科学通报, 48(13): 1470-1476
- 杨培才, 周秀骥. 2005. 气候系统的非平稳行为和预测理论. 气象学报, 63(5): 556-570
- 姚檀栋, Thompson L G. 1992. 敦德冰心记录与过去 5 ka 温度变化. 中国科学(B辑), 10: 1089-1093
- 叶笃正, 黄荣辉. 1990. 旱涝气候研究进展. 北京:气象出版社, 156pp
- 叶笃正, 符淙斌, 董文杰. 2003. 全球变化科学领域的若干研究进展. 大气科学, 27(4):435-450
- 章大全, 钱忠华. 2008. 利用中值检测方法研究近 50 年中国极端气温变化趋势. 物理学报, 57(7):4634-4640
- 张德二. 1980. 中国南部近 500 年冬季温度变化的若干特征. 科学通报, 25(6):270-272
- 张勤, 丁一汇. 2001. 热带太平洋年代际平均气候态变化与 ENSO 循环. 气象学报, 59(2): 157-172
- 张文, 高新全, 董文杰. 2007. 利用高阶矩检测近 2000 年来气候极端异常的研究. 物理学报, 56(10): 6150-6156
- 郑祚芳, 张秀丽, 曹鸿兴等. 2007. 用去趋势涨落分析研究北京气候的长程变化特征. 地球物理学报, 50(2): 420-424
- 支蓉, 龚志强, 王德英. 2006. 基于幂律尾指数研究中国降水的时空演变特征. 物理学报, 55(11): 6185-6191
- 支蓉, 廉毅, 封国林. 2007. 基于幂律尾指数研究不同尺度系统对降水的影响. 物理学报, 56(3): 1837-1842
- 朱锦红, 王绍武, 慕巧珍. 2003. 华北夏季降水 80 年振荡及其与东亚夏季风的关系. 自然科学进展, 13(11): 1205-1211
- 中央气象研究所. 1975. 华北、东北近五百年旱涝史料. 146pp
- 中央气象局气象科学研究所. 1981. 中国近五百年旱涝分布图集. 北京:地图出版社, 1-10