

云南省科委应用基础研究基金项目(95D133Q)资助

气候变化的多尺度诊断分析 和预测的多种技术方法研究

尤卫红 著

气象出版社

云南省科委应用基础研究基金项目(95D133Q)资助

气候变化的多尺度诊断分析 和预测的多种技术方法研究

尤卫红 著

气象出版社

内 容 简 介

本书以近年来被认为是 Fourier 分析方法突破性进展的“小波理论”为基础,研究了气候变化的多尺度诊断分析方法和全球、全国及云南近百年来气候变化的多尺度特征和规律,并与气候变化的动力学理论、统计理论和非线性科学的混沌理论相结合,进行了短期气候变化预测的多种技术方法研究。

书中提及的“云南长期天气预报业务系统”已正式投入实时预报工作。在云南省气象台的实际业务应用中产生了明显的社会服务效益和经济效益。该系统具有预报模型建立的预报理论新,自动化程度高,有良好的业务运行安全保障体系等优点。

本书对广大气象预报人员和相关学科的研究人员颇具参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

气候变化的多尺度诊断分析和预测的多种技术方法研究
/尤卫红著. —北京:气象出版社,1998. 3

ISBN 7-5029-2433-7

I. 气… II. 尤… III. 气候变化-天气预报-方法 IV. P
456

中国版本图书馆 CIP 数据核字(97)第 24281 号

云南省科委应用基础研究基金项目(95D133Q)资助

气候变化的多尺度诊断分析 和预测的多种技术方法研究

尤卫红 著

责任编辑:徐 明 黄丽荣 终审:刘树泽

封面设计:何 青 责任技编:刘祥玉 责任校对:成秋影

* * *

气象出版社出版发行

(北京市海淀区白石桥路 46 号 邮政编码:100081)

北京市白河印刷厂印刷

* * *

开本:787×1092 1/16 印张:7.75 字数:198 千字

1998 年 3 月第一版 1998 年 3 月第一次印刷

印数:1~800

ISBN 7-5029-2433-7/P·0875

定价:16.00 元

致 谢

本文是在导师林振山教授和傅抱璞教授的悉心指导下完成的。三年来,林老师和傅先生以他们那科学敏锐的洞察力,渊博精深的学识,严谨求实的科学态度以及正直宽厚的为人,达观向上的生活态度和作风等使学生受益匪浅,并为学生创造了毕生使用不尽的财富。在此谨向林老师和傅先生致以衷心的感谢。

在论文的完成过程中,南京大学大气科学系的邓自旺师弟、吴爱明博士、刘黎平博士、刘建栋博士,清华大学应用数学系的伍从斌博士,中国科学院大气物理研究所的琚建华博士,云南大学地球科学系的谢应齐教授、卜玉康教授、严华生副教授,云南省气象台的霍义强正研级高工、王裁云正研级高工、王恒康高工、李敏高工、段旭高工、肖子牛高工和杞明辉等都给予了我许多的支持和帮助。在此一并向他们致以最诚挚的谢意。

在攻读博士学位的三年时间里,云南省气象局的几位局长以及科教处、人事处、业务处、省气象学会、省气象台等有关单位的领导和职员在我的学习、工作和主持科研项目等多方面也给予了积极的关心、支持和帮助。在此也一并向他们表示衷心的感谢。

最后,我要十分感激我的爱妻舒敏女士,感激她三年来几乎承担了抚养幼子的所有责任和全部家务,给予我在精神上、生活上的极大鼓励和支持,使我能够专心致志于学习、工作和科研,并能战胜各种困难,顺利完成学业。

摘 要

气候变化及其异常对经济和社会发展影响的问题已成为当前世界各国政府和科学界十分关注的重大问题。近 10 年,全国和许多国家发生的洪涝和干旱已造成了粮食、水资源和能源的重大损失和危机,从而极大地影响了经济和社会的长期发展。因此,气候变化及其预测的研究已成为当前一个迫切需要解决的重大科学问题。本文以近年来被认为是 Fourier 分析方法突破性进展的“小波理论”为基础,研究了气候变化的多尺度诊断分析方法和全球、全国及云南近百年来气候变化的多尺度特征和规律,并与气候变化的动力学理论、统计理论和非线性科学的混沌理论相结合,进行了短期气候变化预测的多种技术方法研究。

首先,以小波分析的多分辨分析理论为基础,建立了一个自适应的多分辨数据滤波器。该滤波器不仅具有传统方法所不具有的局部化、多层次、多分辨的优点,而且对于突变点的判断也像 M-K 方法一样精确。此外,该滤波器还具有可以同时判别多个突变点而不改变原时间序列的大尺度结构的优点。该滤波器的应用表明:①全球近百年来气温变化对于较大时间尺度的演变来说主要特征是变暖。分为 3 个层次:1919 年以前的偏冷期;1920~1978 年的偏暖期和 1979 年以后的更暖期。对应于这种较大时间尺度的层次演变,全球的气温变化表现出了十分明显的突变特征,其两个最明显增暖的突变点分别发生在 1920 和 1979 年。对应于较小时间尺度的演变来说,全球近百年来气温变化则表现出了较多冷暖交替的层次结构和突变特征。这时的多分辨滤波结果除保留有原较大时间尺度演变的层次结构和突变点外,还增加了新的层次结构和新的突变点。②全国近百年来气温变化主要经历了 3 个持续近 30 年的冷暖交替时期,它们分别是 1919 年以前的偏冷期;1920~1954 年的偏暖期和 1955~1986 年的偏冷期。对应于这种较大时间尺度的气候演变,全国的气温变化也表现出了十分明显的突变特征,其冷暖交替的突变点分别发生在 1920、1955 和 1987 年。云南近百年来气温变化与全国的气温变化是基本一致的,但与北半球和全球的气温变化并不完全一致,其中最主要的差异是北半球和全球的气温变化在 1955~1978 年是一个极弱的偏冷期,1979 年发生明显增暖的突变,而全国和云南的气温变化在 1955~1986 年则是一个较强的偏冷期,从 1987 年开始才出现明显增暖的突变。③云南近百年冬、春、夏、秋四个季节的气温变化的层次结构和突变特征是基本一致的,但也存在明显的季节差异,其中最明显的是冬、春季气温变化与全国的年气温变化情况相同,而夏、秋季气温变化则与北半球和全球的年气温变化情况相同。此外,云南近百年冬、春、夏、秋四个季节的气温变化的振幅也差异较大,其中以冬季变化最强,夏季变化最弱。④云南 8 月低温冷害天气的出现主要在 1955~1986 年的这一较大时间尺度的偏冷期中。对应于较小时间尺度的气温变化来说,云南 8 月低温冷害天气的出现则一般位于一个气温相对偏低的气候演变层次里。这一具有重要实用价值的特征,在云南 8 月低温冷害天气出现前的几个月就能明显地表现出来。

其次,用 Marr 小波和 Morlet 小波分析了云南近百年的气温和降水变化,得出了云南近百年来气温和降水变化的一些多时间尺度演变特征和突变特征。这些特征为云南短期气候预测服务,提供了云南近百年来气候变化的多时间尺度演变规律和背景,因而具有十分重要的实际意义。小波变换基于仿射群(即平移和伸缩)的不变性,从而允许把一个时间序列分解为对时间

和频率的贡献。小波变换对于获取一复杂时间序列的调整规律以及分辨时间序列在不同时间尺度上的演变特征等是非常有效的。由于小波变换的这些优点,用小波变换的小波系数及其反演来建立不同时间尺度的气候预测模型,并对昆明、玉溪和楚雄 1991~1996 年的月气温距平值以及滇中月降水距平值在月、季、年三种时间尺度上,进行了具有重要实际意义的预测试验和检验。通过对这些试验预测结果的检验和评价,得到的重要结论是:建立的气候预测模型对月气温距平值预测的效果在月、季、年三种时间尺度上均是十分显著的,其对月气温距平值预测的距平值相关准确率在月、季、年三种时间尺度的预测中,已分别达到了 73.1%、73.1%和 69.4%。对月降水距平值预测的效果则没有气温那么显著,而仅在月、季时间尺度上对雨季(5~10 月)的预测有比较明显的效果,对于干季(11~4 月)和年时间尺度上的预测则几乎没有效果。

第三,在云南 8 月低温冷害天气的气候特征分析的基础上,将自适应多分辨数据滤波器的输出结果与短期气候预测的相空间理论相结合,提出了云南 8 月低温冷害天气的短期气候预测方法。该方法的物理思想是用相空间来描述气候的层次结构演变特征和动力演化行为特性,从而将气候变化的层次结构理论和短期气候预测的相空间理论结合起来研究短期气候预测问题。进行了月雨量的可预报性估算试验和月雨量的相空间相似统计预报试验。考虑到气候系统状态量之间的物理关系和动力行为特性,提出了短期气候预测的相空间投影技术。该技术的物理思想是用相空间来描述统计相关的物理图像,从而将相关理论与相空间理论有机地结合起来解决实际问题。通过这种结合,在作降水预测时,不仅考虑局地降水的直接因素,而且还考虑该地与降水的间接因素以及外界对该地的影响,这就极大地发展和丰富了短期气候预测的相空间理论和模式,使之具有更广阔的实际业务应用前景。探讨了云南 5 月雨量短期气候预测的大气环流背景、天气气候成因及预测思路,用 1956~1992 年的月平均资料详细分析了云南 5 月降水与前期(1~3 月)北半球 100、500hPa 高度场的关系,研究了影响云南 5 月旱涝的大气环流系统及主要大气活动中心的演变规律及遥相关场的波列结构,进行了云南 5 月雨量的短期气候预测技术研究。

最后,在上述科研和预报试验工作的基础上,已建立了一整套全新的“云南长期天气预报业务系统”。现在整个业务系统都已正式投入云南长期天气预报业务的实时预报工作,并向全省各级气象台站及有关的服务单位提供滚动式的长期天气预报服务产品。该系统以其预报服务产品准确率高、内容丰富、服务及时等优点而深受各级气象台站和广大服务单位的好评,从而在云南省气象台的实际业务应用中产生了明显的社会服务效益和经济效益。“云南长期天气预报业务系统”还具有预报模型建立的预报理论新,自动化程度高,有良好的业务运行安全保障体系,清晰顺适的操作界面,合理先进的结构,易于操作,易于移植和推广使用,易于改进、扩充和完善等优点。

ABSTRACT

The problem of the influence of climate changes and anomalies on the development of economics and societies has drawn more and more attentions not only in the worldwide scientific circle but also in many governments. In the last decade, the floods and droughts occurring in China and many other countries cause severe damages and lead to the crises of grain production, water resources and energy source. These greatly affect the long-term development of nations, economics and societies in the world. Therefore, the researches on climate change and its forecast are urgently placed before us. In this paper, based on Wavelet Theory which is thought an important breakthrough to Fourier Analysis, we study the multiscale diagnosis method of climate changes, and analyse the multiscale features and regularities of climate variations during the last 100 years in Globe, China and Yunnan Province. We also study the varied methods of short-range climate forecast by combining the wavelet theory, the dynamics theory of climate changes, the statistics theory and the chaos theory of nonlinear science.

Firstly, an adaptive multiresolution data filter has been established by using multiresolution theory of wavelet analysis. This filter not only has advantages such as locality, multiscale, multiresolution, which the traditional methods lack, but also is as accurate to determining catastrophe points as the M-K method. In addition, this filter can determine the several catastrophe points at the same time without smoothing the large-scale structure. The application results show that: (1) The main features of the air temperature variations during the last 100 years in Globe are warming and they can be described as 3 hierarchies corresponding to the larger-scale changes, which include the cold period before the 1919, the warm period from 1920 to 1978 and the warmer period after the 1979. Corresponding to the larger-scale climatic changes, the air temperature variations in Globe obviously show the catastrophe features whose jumping points occurred in 1920 and in 1979. Corresponding to the smaller-scale climatic changes, the air temperature variations in Globe increase more the hierarchies and jumping points with the cold and warm vicissitudes. Then the filtered data of multiresolution not only conserve the hierarchical structure and jump points of the larger-scale changes, but also increase the new hierarchical structure and the new jumping points. (2) The air temperature variations during the last 100 years in China have passed three main cold and warm vicissitudes of lasting 30 years, which include the cold period before the 1919, the warm period from 1920 to 1954 and the cold period from 1955 to 1986. Corresponding to the larger-scale climatic changes, the air temperature variations in China also obviously show the catastrophe features whose jumping points occurred in 1920, in 1955 and in 1987. Though the air temperature variations of Yunnan Province are similar to those of China, they are different from those of the Northern Hemisphere and Globe. Their main differences

are that there is a weaker cold period in air temperature variations from 1955 to 1978 and a jumping point of warming in 1979 in the Northern Hemisphere and Globe , but there is a stronger cold period from 1955 to 1986 and a jumping point of warming in 1987 in China and Yunnan Province. (3) The hierarchical structures and the jump features of surface air temperature variations during the last 100 years in Winter , Spring , Summer and Autumn of Yunnan Province are rough similar to each other but exist differences. The main differences are that the air temperature variations in the Winter and in the Spring of Yunnan Province are similar to those of China , but the air temperature variations in the Summer and in the Autumn of Yunnan Province are similar to those of the Northern Hemisphere and Globe. In addition , there is a large difference among the amplitudes of the air temperature variations in the 4 seasons of Yunnan Province , the amplitude of the Winter is the largest and the one of the Summer is the least. (4) The chilling damage weathers of Yunnan Province in August are main during the cold period from 1955 to 1986. Corresponding to the smaller-scale air temperature variations , the chilling damage weathers of Yunnan Province in August generally take place in the climatic hierarchy which the surface air temperature is lower. The feature can appear before several months of chilling damage weather occurring in Yunnan Province.

Secondly , by using the transforms of the Marr wavelet and the Morlet wavelet , the variations of surface air temperature and yearly precipitation during the last 100 years in Yunnan Province have been studied. Some multi-time scale and jump features of the variations have been discovered. These features are very important in short-range climate forecast for Yunnan Province. They give the multi-time scale regularity and the background of climatic changes in Yunnan Province. Wavelet transform is based on invariance under the affine group , namely translation and dilation , which allows the decomposition of a time series into contributions of both time and frequency. Wavelet transform is very effective in extracting the modulation regularity of a complex time series and resolving the change features of the time series at multi-time scales. Considering these advantages of wavelet transform , a climate forecast model of multi-time scale has been established by using the wavelet coefficients of wavelet transform and their inverse transforms. The forecast experiments of monthly surface air temperature variations in Kunming , Yuxi , Chuxiong and monthly precipitation variations in Central Yunnan in 1991~1996 are run at month , season and year forecast time scales. These experiments are very important for actual operational short-range climate forecasts. By verifying and evaluating the experimental forecasts , some important conclusions have been obtained: The climate forecast model established by us is very significant in forecasting anomaly values of monthly surface air temperature variations at month , season and year time scales , and the forecast accuracy of anomaly sign of the model can reach 73.1% , 73.1% and 69.4% at the 3 time scales respectively. The forecast effects of monthly precipitation are less significant than air temperature and they are significant only at month and season time scales in rainy season (May~Oct.) , but they are little effective in drought season (Nov. ~Apr.) and at year time scale.

Thirdly , based on the climatic characteristics of chilling damage weather of Yunnan Province in August , the short-range climate forecast method of chilling damage weather of Yunnan Province in August has been introduced by combining the adaptive multiresolution filtering data with the phase space theory of short-range climate forecast. The physical thought of this method is describing the features of climatic hierarchical structure changes and the properties of climatic dynamic changes with phase space. So the problem of short-range climate forecast has been studied by combining the hierarchy theory of climate changes with the phase space theory. The predictability experiments and the statistical forecasting experiments of monthly precipitation are run by using analog principle of phase space. Considering the physical relations and dynamic properties among state variables of a climatic system , a phase space projective method of short-range climate forecast has been established. The physical thought of this method is describing the physical figure of statistical relationships with phase space , then it effectively combines the relation theory with the phase space theory to solve some actual problems. By this kind of combination , we not only consider the direct factors of the local precipitations but also consider the influence of indirect factors and outside on the precipitation when we forecast the precipitation. So we have developed the phase space theory and models of short-range climate forecast and enable them to have wide application field in operational uses. The effects of atmosphere general circulation background field , synoptic-climatological mechanism and forecasting thought on the precipitation in May in Yunnan Province have been studied. The relationships between precipitation in May in Yunnan Province and 100, 500hPa geopotential height fields of the Northern Hemisphere from January to March have been studied by using monthly mean data during 1956~1992. The effects of atmospheric circulation systems and the variations of main atmospheric active centres on drought/flood in May in Yunnan Province , and wave train construction of teleconnection have been studied. Based on these analyses , the short-range climate forecast method of precipitation in May in Yunnan Province has been formed.

Finally, based on these studies and forecasting experiments , a new Long-range Forecast System for Yunnan Province has been established. Now this system has been used in the operational long-range forecasts of Yunnan Province and produces the updating prediction reports for the meteorological observatories or stations in Yunnan Province and the using departments concerned. Because of the advantages such as high forecast accuracy , plentiful forecast products and timely forecast service et al. , this system is very popular with the meteorological observatories or stations in Yunnan Province and the using departments concerned and has obtained the significant social service effects and economic effects in the operational predictions in the Meteorological Observatory of Yunnan Province. In addition , the Long-range Forecast System for Yunnan Province not only has the new forecasting theories of establishing models but also has the advantages such as high automaticity , good safety measures of system running , clear and friendly interface , rational and advanced structure , easy to operate , easy to transplant , easy to spread , easy to improve , easy to expand , easy to perfect and so on.

目 录

摘要

ABSTRACT

第一章 引 论	(1)
§ 1.1 气候变化的多尺度特性	(1)
§ 1.2 气候变化的层次	(2)
§ 1.3 气候变化的突变特征	(3)
§ 1.4 气候变化的多尺度诊断与小波分析	(3)
§ 1.5 气候系统的可预报性	(4)
§ 1.6 短期气候变化的预测方法	(5)
第二章 自适应多分辨数据滤波器及其应用	(9)
§ 2.1 自适应多分辨数据滤波器的建立	(9)
§ 2.2 近百年全球气温变化的多尺度结构和突变特征.....	(12)
§ 2.3 近百年全国气温变化的多尺度结构和突变特征.....	(16)
§ 2.4 云南近百年气温变化与全国和全球的比较.....	(17)
§ 2.5 云南近百年四季气温变化的大尺度结构特征.....	(19)
§ 2.6 云南 8 月低温冷害天气的气候特征.....	(20)
第三章 小波变换在多尺度气候诊断分析中的应用	(26)
§ 3.1 小波变换的时间和频率(空间和尺度)分析.....	(26)
§ 3.2 小波变换的基本原理.....	(27)
§ 3.3 连续小波变换.....	(29)
§ 3.4 离散小波变换.....	(32)
§ 3.5 小波变换在多尺度气候诊断分析中的应用.....	(37)
第四章 小波变换在气候预测模型研究中的应用	(43)
§ 4.1 时间函数的小波变换及其反演.....	(43)
§ 4.2 气候预测模型的建立.....	(44)
§ 4.3 月、季、年时间尺度的气候预测检验.....	(45)
§ 4.4 基于小波变换的气候预测方法讨论.....	(50)
第五章 云南 8 月低温冷害的短期气候预测	(52)
§ 5.1 云南 8 月低温冷害的确定标准和预测对象.....	(52)
§ 5.2 云南 8 月低温冷害的短期气候预测方法.....	(54)
§ 5.3 对 1994 和 1995 年的预测检验.....	(55)
§ 5.4 云南 8 月低温冷害的短期气候预测方法讨论.....	(56)
第六章 月雨量的可预报性及其预测方法研究	(59)
§ 6.1 气候系统的可预报性概念.....	(59)
§ 6.2 月雨量的可预报性估算试验.....	(60)

§ 6.3	月雨量可预报性的相空间相似统计预报试验·····	(63)
§ 6.4	相空间投影预测技术的提出·····	(66)
§ 6.5	多元时间序列资料的选取和相空间构造·····	(67)
§ 6.6	月雨量预测的相空间投影技术·····	(68)
第七章	云南 5 月雨量的气候预测研究 ·····	(72)
§ 7.1	昆明 5 月降水对赤道东太平洋海温异常的响应·····	(72)
§ 7.2	云南 5 月雨量的天气气候成因探讨·····	(73)
§ 7.3	前期大气环流变化对云南 5 月雨量的影响·····	(77)
§ 7.4	云南 5 月雨量和雨季开始期的业务预测模型·····	(81)
第八章	云南长期天气预报业务系统 ·····	(88)
§ 8.1	系统使用的资料和预测项目·····	(88)
§ 8.2	系统建立的预报原理和方法·····	(90)
§ 8.3	业务系统的设计和运行·····	(99)
§ 8.4	系统发展的“九五”研究方向 ·····	(103)
参考文献	·····	(104)
附录		
	尤卫红攻读博士学位期间主持科研技术工作情况·····	(110)
	尤卫红攻读博士学位期间发表论文情况·····	(111)
	尤卫红攻读博士学位期间获奖情况·····	(112)

第一章 引 论

气候变化及其对经济和社会发展影响的问题已成为当前世界各国政府和科学界十分关注的重大问题。近十多年来,世界范围内的气候异常给许多国家的粮食生产、水资源和能源带来了严重的影响。例如,1972年美国由于冬季严寒带来的能源危机造成经济损失达200亿美元;1988年,美国中西部的严重干旱造成粮食减产37%,而孟加拉国却遭受空前未有的水灾;非洲持续多年的干旱,使许多国家遭受本世纪最严重的粮食危机。因此,能否预测气候的这些异常变化,已成为一个迫切需要解决的重大科学问题。

我国地处世界上气候变率较大的地区之中,气候灾害出现的频数很高,气候异常造成的损失甚为严重。根据近40年的记录和研究结果,可以看到我国气候灾害的频发性和严重程度,以及它和世界气候异常的紧密相关。在近40年中,我国每年都有数省或大江大河流域面积的许多地区遭受旱灾或水灾,而且往往是同一年份同一地区干旱和洪涝并存。我国发生大范围的大旱大涝的年份也为数不少。平均而言,我国每年因旱涝灾害少收粮食约2000万吨,更不必说重灾年的损失是如何巨大了。因此,提高对我国气候灾害的预测和防治能力,已是各级政府和国民经济各部门的迫切要求。

本章概括地讨论了气候变化的多尺度特性,气候变化的层次,气候变化的突变特征,气候变化的多尺度诊断与小波分析,气候系统的可预报性和短期气候变化的预测方法等。

§ 1.1 气候变化的多尺度特性

气候系统是一个包括了大气圈、水圈、冰雪圈、岩石圈和生物圈等子系统的复杂系统。这些子系统除了受到不同时间尺度的外界周期的或非周期的强迫作用外,内部之间还通过能量和动量交换,通过生物和化学循环等,进行不同时间尺度的线性和非线性的相互作用,从而可以出现时间尺度从旬到 10^8 年、空间尺度从公里到全球尺度的多尺度气候变化。

地球的气候已发生过从年到冰期尺度等不同时间尺度的有意义的连续的变化。气候变化一般可分为强迫变化和自由变化。强迫变化指的是气候系统对外界强迫力变化的响应,自由变化指的是由于气候系统各组元之间的内在非线性相互作用、内在不稳定性以及反馈所引起的气候变化。

影响气候系统的但不受气候变量本身影响的纯外界因素的变化,可称为气候变化的外因。而那些与发生在内部系统各种物理过程中的非线性作用有关的变化,可称为气候变化的内因。外因包括了天文因子的变化和地球因子的变化。天文因子包括了以下的变化:①太阳辐射强度;②地球轨道参数;③地球的旋转速率。对于地球强迫因子,必须考虑:首先,由于人类活动和火山爆发而引起的大气成分的变化;其次,由于使用土地等而引起的陆表变化;第三,地壳构造的长期变化,如造山过程、大陆漂移、地轴偏斜等。

对于线性系统,外部强迫力的变化将导致简单的因果关系。如果强迫力是一振荡源,则系统的响应频率将精确地等于强迫力的频率。然而,事实上并不总是这样的。因为内部气候系统其内在禀性是不稳定的,是一直处于变化中的。由于气候系统是一耗散、具有多个不稳定源的

高阶非线性系统,其复杂的内部相互作用和自由变化导致了气候的可变性,也导致了气候变化的多尺度特性。

归纳已有的研究结果,可以粗略地把气候变化按时间尺度分为 6 类:

- (1) 短期气候变化,其时间尺度为月、季、年(长期天气变化);
- (2) 中期气候变化,其时间尺度为几年(年际变化);
- (3) 长期气候变化,其时间尺度为几十年(年代际变化);
- (4) 超长期气候变化,其时间尺度为几百年(世纪际变化);
- (5) 历史时期气候变化,其时间尺度为千年;
- (6) 地质期气候变化,其时间尺度为万年或更长。

由于有气候资料记载的时间不过几百年,对于气候变化的研究也就主要集中在前 4 个时间尺度,尤其是前 3 个时间尺度的变化。

§ 1.2 气候变化的层次

由于气候系统有各种各样的时空尺度,在研究复杂的气候变化时,不仅要考虑各子系统之间的相互作用(如各种正负反馈机制和策动力等),而且还必须考虑不同时间尺度之间的相互作用和关系。显然,不可能也没有必要跨越整个时间尺度来研究气候,而应该考虑时间尺度的等级。通过研究,人们还发现短期气候(长期天气)过程的空间尺度与时间尺度有密切关系。如月、季时间尺度的气候现象对应 1000~3000km 的空间尺度;年际尺度的气候现象对应于洲或洋的空间尺度;而几十年尺度的气候现象则几乎涉及全球尺度。把这种时空内在联系的结构叫做层次。不同的层次,对应于不同的时空尺度,从而反映了气候系统不同侧面的本质、现象和规律。通过引入层次概念,可以把所研究的较高层次的演化特性看作是固定的,而把层次较低的演化过程消去,或用统计和参数化等方法处理,从而使研究过程简单明了。

气候系统的多层次结构可以从气候谱里得到佐证。不同时间尺度的气候谱(如温度曲线)往往具有惊人的相似性。这说明了气候系统的自相似性。不同层次结构的自相似性是非线性浑沌系统的特征之一。而其各层次往往是高度自组织的。其表现之一就是气候定态的相互转换。如地质时期的冰期和间冰期的转换以及西非 Sahelian 的降水丰沛期到干旱期的转换。显然,描述西非 Sahelian 的年际雨量变化和描述旱—湿期的变化分属两个不同层次的问题。前者对后者的几十年时间尺度而言,属于低层次问题,反之亦然。

气候系统的高层次属性是低层次的集中表现,它体现了低层次的主要行为和吸引子性质。而低层次可看作是对高层次的一种“可正或可负”的阻尼或涨落,它丰富了高层次的外延,使其细腻化,从而形成了多样化、复杂化的气候态。

从低层次看,气候系统的演化行为可能是含糊不清的。但从高层次看,却比较规则,可用整体上的理论全局研究之。例如,每旬的雨量变化往往是反复无常的,但在季度尺度上气候系统的降水特性却体现了明显的、有规则的周期变化。

在建立描写一定条件的气候系统时,作用力是至关重要的。显然,决定不同气候层次演化行为的主要的力是不同的。决定气候高层次的力对低层次而言是一恒定的背景场。而决定低层次的力对高层次而言则为一扰动场,其性质是随机的或涨落的。所以,可以用提高层次的方法来定性地研究某低层次的气候行为及其特性。

对具体的气候模拟来说,在对应于季节(或更短的)时间尺度这一气候层次,可以把大气视

为仅有的内在可变因素,而把海冰、陆地表面及生物圈的性态当作是已知给定的外界(边界)条件,是不变的。而对应于几十年甚至世纪时间尺度的气候层次,则把海冰、陆表视为可变的内在因素,而把天气活动视为一种平均效果(作用)为零的“白噪声”。所以,通过引入气候层次,可以针对不同的气候层次建立不同的气候模式。

§ 1.3 气候变化的突变特征

气候变化除多尺度特征和层次特征外,突变也是其重要特征。尤其是从一个气候阶段变化到另一个气候阶段时,气候往往发生较为快速的剧烈变化,即突变。

根据气候突变的情况,可以把气候突变归并为 3 种类型:均值突变、变率突变和趋势突变。从一个气候基本状态(以某一平均值表示)向另一个气候基本状态的急剧变化就是均值突变。这类突变相对较多,影响也较大。两个气候状态(阶段)的平均值并无明显差异,但其变率有极明显的不同,这样两类气候状态间的急剧变化,称为变率突变。变率突变包括两种情况:其一是振幅有明显差异的突变;其二是频率有明显差异的突变。两个气候阶段有完全相反的变化趋势,例如,某个气候阶段温度一致持续下降,其后一个气候阶段的温度一致持续上升,这样两个气候阶段的急剧转变称为趋势突变。

气候变化是极其复杂的,气候突变也一样,这里归纳出的 3 种类型只是其最基本的特征。对实际资料的分析表明,气候变化往往会出现这 3 类突变现象,尤其是均值突变,但有时也可以看到几类突变同时综合发生的情况。

§ 1.4 气候变化的多尺度诊断与小波分析

气候变化的多尺度特性是气候系统的基本属性之一,因此对气候变化的多尺度诊断分析也就成了大气科学的一项重要研究内容。但以往的所有分析方法,包括 Fourier 分析,都因为不具有局部化、多层次和多分辨的性质,而不能全面客观地反映气候变化的多尺度规律和层次结构演变的突变特征。例如,当只使用固定时间尺度的低通滤波器时,在消去气候变化的噪音和小尺度波动的同时,也平滑了与大尺度振幅有关的激烈变化与突变,显然这对于分析气候的激烈变化与突变以及研究气候变化的多尺度层次结构特征等是很不合适的。此外,传统的滤波器,要么对突变点的判别十分模糊,要么只能判别存在一个突变点的序列,对于结构比较复杂的序列则无法或很难给出较客观的结论。Yamamoto 方法给出的突变区宽度还嫌太大。Mann—Kendall 方法虽然给出了十分理想的突变点和突变区,但滤去了除突变外的所有信息。以往的所有技术因不具有多分辨分析的缺点,故无法诊断出气候变化的内在多尺度层次结构。

人们还知道,当用 Fourier 分析研究一个信号或一个场的谱特性时,必须获得在时间域(或空间域)中信号的全部信息,甚至包括将来(或无穷远)的信息。另外,如果一个信号在某个时刻(或某个位置)的一个小的邻域中变化了,那么整个谱都要受到影响。因此,在像气候变化这种非平稳信号分析的许多实际应用中,只有 Fourier 分析方法是相当不够的。Fourier 变换公式的不足,已经被 Gabor 注意到了。Gabor 在他 1946 年的论文中,为了提取信号 Fourier 变换的局部信息,引入了一个时间局部化窗函数 $g(t - b)$,其中参数 b 用于移动窗以便覆盖整个时域,从而发展了加窗 Fourier 分析。但仍注意到,加窗 Fourier 变换的时间频率窗的宽度对于观察所有频率的谱是不变的,由于著名的“测不准原理”,这就限制了加窗 Fourier 变换对非平

常的高频与低频信号的应用。

在实际应用中大量需要的是,怎样能够确定时间间隔,使在任何希望的频率范围(或频带)上产生频谱信息。因为一个信号的频率与它的周期长度成反比,由此得到:对于高频的信息,时间间隔要相对地小,以给出比较好的精度;对于低频的信息,时间间隔要相对地宽,以给出完全的信息。换句话说,基于“测不准原理”,重要的是要有一个灵活可变的时间频率窗,使在高中心频率时窗自动变窄,而在低中心频率时窗自动变宽。这样就产生了小波分析的数学技术。

小波变换基于仿射群的不变性,即平移和伸缩的不变性,从而允许把一个时间序列分解为对时间和尺度(频率)的贡献,因此小波变换对于获取一复杂时间序列的调整规律以及分辨时间序列在不同时间尺度上的演变特征等是非常有效的。多维小波则可同时用于分析复杂信号在时间和空间上的多尺度演变规律和特征。

小波变换起源于1980年法国科学家Morlet在地震数据的分析中。后来,他与理论物理学家Grossmann合作建立了连续小波变换的几何图象。1985年,连续小波变换被Meyer扩展到 n 维,之后Murenzi除了伸缩和平移外还引入了旋转。因此,小波变换在 n 维场中已具有分辨不同尺度的“显微镜”作用和具有分离信号在不同角度的贡献的“偏振镜”作用。

1986年,Meyer发现了一个从正则小波建立的正交基,之后与他的学生Lemarie合作把它扩展到了 n 维的情况。1987年,Meyer和Mallat引入了多分辨分析的概念,从而给出了建立正交小波基的一般方法,并实现了快速小波算法。从那时以来,已有许多其它的正交小波基被发现,其中有:使用指数减小的样条函数的Battle-Lemarie小波,Rioul的离散正交基和通过重复一些离散滤波器建立的Daubechies紧支撑正则小波。

在近十来年的时间内,小波分析及其应用得到了蓬勃发展。它涉及面之宽广、影响之深远、发展之迅速都是空前的。目前,小波分析是国际上掀起热潮的一个国际前沿领域和当今许多学科与工程技术聚会中的一个热门话题。它可以作为表示函数的一种新基底,也可作为时间频率分析的一种技术,也可认为它是一个新的数学学科。总之,它是一种具有非常丰富的数学内容,且有巨大潜力的多方面适用的工具。

小波理论在大气科学领域中的应用在最近几年才刚刚起步,但在湍流研究、冷锋的低层温度场空间结构研究、对流的多时间尺度结构研究、降水量场的多层次空间结构研究等方面,均已进行了有益的尝试,并取得了丰硕的成果。目前,小波分析在研究气候变化的多尺度结构和突变特征等方面的工作,也已经取得了十分明显的效果,并为客观地研究气候变化的多层次规律与特征提供了新方法。

§ 1.5 气候系统的可预报性

从一般意义上讲,气候系统的可预报性指的是可能对系统不久的将来或长期的将来作出预测的精确程度。气候系统的可预报性是一个十分复杂而有争议的课题。从数值预报的数学基础——确定性论出发,气候预测不仅是可行的,而且可以不受时间限制。遗憾的是,数值预报的准确率随着预报时间的增长而迅速下降,这一事实是众所周知的。气候系统的可预报性取决于:

- (1) 模式气候系统与客观气候系统之间的差异;
- (2) 气候各子系统资料的精度和完备性;
- (3) 计算方法、计算条件和计算误差;

(4) 非线性气候系统的内在随机性。

由于目前人们对岩石圈、水圈、冰雪圈、生物圈(包括人类活动)的了解甚少,所积累的资料精度和完备性十分不足,因此就目前人类对气候系统的了解而言,要进行精确的气候预测是不现实的。因为从“盲人摸象”到对整只大象的全局了解,毕竟需要有个较长时间和反复验证的过程。从人类认识发展过程而言,决定气候可预报性的(1)~(3)三种因素,并不否定气候的可预报性,问题在于第(4)个因素:非线性气候系统的内在随机性。

由于气候状态的连续性,而气候资料的极其离散化以及气候系统的非线性动力学行为特性,导致了气候动力场空间结构的极端复杂性。初始条件或系统参数的稍微不同,将导致气候系统的未来状态在本质上的不同。这就是对所谓的“气候系统对初值的敏感性”或“气候系统的内在随机性”的一种直观解释。然而,正是对初值的极其敏感,使得气候系统的状态在奇怪吸引子上的平均值反而对初值不敏感。系统在奇怪吸引子上的运动不仅是各态历经的,而且是混合的。原则上讲,无论是对耗散非线性系统的浑沌行为,还是对哈密顿非线性系统的浑沌行为,都可以通过引入定常的分布函数来进行统计描述。从这个意义上讲,气候又是可预测的。这也说明了统计气候预测将是气候预测的最有力工具。显然,这里所说的统计方法已不是人们所熟悉的那种基于气候要素平均为主的传统统计气候学了,而是与动力学、非线性力学相结合的统计动力气候学理论。这也指明了统计气候学的发展方向。

§ 1.6 短期气候变化的预测方法

短期气候变化的预测是指月、季、年时间尺度的气候变化预测,通常也叫长期天气预报。当前,无论国内还是国外,短期气候预测业务主要还是依靠统计方法。

1.6.1 经验的预测方法

不同气象要素间的相关系数或相关曲线可以用来制作短期气候预测。除我国外,近年来美国、日本、印度和菲律宾等国也都把海温、副热带高压等取作经验预测的重要因子。

相关系数的计算不仅为经验方法所不可缺少,而且它也是许多统计方法的基础。例如,在回归方法中需要计算相关矩阵,经验正交函数中需要计算协方差矩阵,而相关系数与协方差本质上相同。在某些经验方法中所用的相关系数,缺乏必要的统计检验。即使通过检验的相关系数,多数也不超过 0.6,有些甚至低于 0.5。这样的相关系数,虽然表示了一定的相互关系,在气候诊断中也能起到很好的作用,但用这种相关系数做出的预测,往往难以达到足够的准确率。相关系数的另一个问题是它随时间发生变化,而预测的失败往往发生在相关系数变化剧烈的时候。相关系数变化的原因有二:其一是用于计算相关的资料选取不当;其二是气候演变规律的变化。由此又引出了一个计算相关系数所需资料的长度问题。资料太短,得到的相关系数真实性差;资料长了,容易把几个不同的气候阶段混在一起,不仅使相关系数的数值降低,而且影响相关系数的代表性。如何估计未来相关系数的变化从而采取相应的对策,是一个尚未很好解决的问题。

找相似也是一种常用的短期气候预测方法。比较简单的找相似的方法,就是用肉眼判断形态学相似,这种方法主观性较强。近年来提出了一些相似判据,使这一方法进了一步。其中常用的相似系数,意义与相关系数相近,因而也存在与相关系数类似的问题。将平面资料用正交函数展开,比较其展开式系数,也是一种找相似的客观方法。发展用计算机找相似,可以处理更

多的资料。

韵律现象已为人们所熟知,并已用于业务预测之中。可惜许多韵律现象并无严格的时间间隔,因而在预测中难以掌握。关于韵律的机制,已提出了一些看法,但尚无被一致接受的结论。

许多经验方法具有深厚的实践基础,有些还有一定的物理考虑,它为理论工作提供了丰富的素材,但这些方法往往比较粗糙,有的还缺乏客观性,有待进一步加工。

1.6.2 统计学的预测方法

统计学的预测方法是目前短期气候预测的主要方法。在我国的短期气候预测业务中,就使用了众多的统计预测方法。如:自回归、逐步回归、二级判别、逐步判别、谐波分析、功率谱分析、聚类、复相关表、车贝雪夫展开、经验正交展开、模糊数学方法等。

多元分析方法 逐步回归是目前短期气候预测中应用最广、效果较好的方法之一。但也出现了一些问题。主要的有:变量之间的相关性引起的回归误差的增大,回归系数随时间而变,个别特殊记录影响模型的稳定,变量的筛选对 F 统计量十分敏感,历史资料拟合好但实际预测效果差等。

判别分析也是多元分析中应用较广的方法之一。早期的判别分析是二级判别,以后发展到多级判别。逐步判别方法使判别分析有了与逐步回归类似的功能,可以引进和剔除因子。目前普遍采用的判别分析实质上是线性判别。有人研究了非线性判别和逐步非线性判别问题,给出了既适用于二级判别又适用于多级判别的非线性判别函数。

多元分析预测方法中的一个重要问题是因子的选择。因子选择适当与否对预测的成败起着重要的作用。有人说,只要因子选好了,什么方法都能报好。如果因子选择不当,再好的方法也没有用。这种说法虽然有些偏颇,但它从一个侧面说明了因子的重要性。

怎样的因子才是好的呢?首先是要有明确的物理意义。这就需要加强对预测对象物理规律的研究。因此,应当把预测方法研究和物理规律研究结合起来。为了做好短期气候预测,需要加强对短期气候变化规律研究成果的调查研究,从中提炼出较好的预测因子。诊断是研究气候变化规律的有力工具,对因子的选择能起到重要作用。

时间序列方法 传统的时间序列预测方法将时间序列分为趋势项、周期项和随机项三部分。趋势项可用多项式分出。周期项可用功率谱或最大熵谱计算。处理随机项的最简单方法就是采用平稳性假定。

但是,气候序列从本质上讲是非平稳的,因此又有人将处理非平稳序列的自回归求和滑动平均模型引入气候预测。门限自回归模型提出了一种逐段线性化方法,因而有可能对序列中的转折做出预测。马尔可夫链方法也是时间序列预测方法的一种模型。

正交分解方法 正交分解问题的实质在于将复杂的高维空间的资料在低维空间用正交函数的线性组合表示。降维之后的表达式虽然不能准确表达原来的资料,但却在以下方面具有优越性:其一,低维空间的正交函数具有好的代表性,可以突出原始资料的基本特征;其二,如果降维得当,则因降维而损失的信息基本上是资料中的非本质的东西,因而通过降维实现了滤波。目前在短期气候预测中用得最多的是经验正交函数和车贝雪夫多项式。

用正交函数做预测的方法有如下特点:①预测的结果是一个场而不是一个点,这无疑有更大的实际意义。②预测的方法是先报出系数后再用系数合成场分布,这比逐点做出预测从而给出场分布的方法要好。因为系数代表了场的总体特征,用系数合成场时考虑了各点间的有机联系,因而优于逐点孤立做预测的方法。