

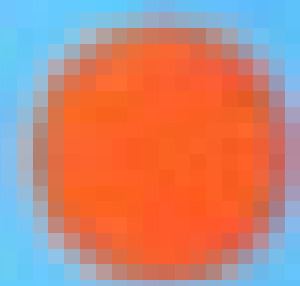
吕达仁 主编

地球环境和气候变化 探测与过程研究



气象出版社

地球环境和气候变化 探测与过程研究



地球环境科学
系列丛书

地球环境和气候变化 探测与过程研究

主编：吕达仁

编委：吴北婴 陈洪滨

王英鉴 王庚辰

邱金桓

气象出版社

内容简介

本书介绍了我国学者在全球环境变化中的中层大气过程和大气遥感探测方面的最新研究成果。全书共分四个部分,重点是大气动力—辐射—光化过程、新的地基大气遥感与探测手段和原理研究以及最新探测结果分析。

本书适合大气科学和空间科学工作者、环境和气象专业的本科生、研究生、教师阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

地球环境和气候变化探测与过程研究/吕达仁 主编. — 北京:气象出版社,1997.9

ISBN 7-5029-1992-9

I. 中… II. 吕… III. ① 全球环境-中层大气-大气探测-研究

② 气候变化-大气遥感-大气探测-研究 IV. P356

中国版本图书馆 CIP 数据核字(97)第 13146 号

地球环境和气候变化探测与过程研究

主编 吕达仁

责任编辑:俞卫平 终审:周诗健

封面设计:田春耕 责任技编:黄慧靖 责任校对:王洋国

* * * *

气象出版社出版

(北京西郊白石桥路 46 号 邮政编码 100081)

北京市鑫正大印刷厂

新华书店总店北京发行所发行 全国各地新华书店经销

* * * *

开本:787×1092 1/16 印张:11.625 字数:296 千字

1997 年 9 月第一版 1997 年 9 月第一次印刷

印数 1~800 定价:20.00 元

ISBN 7-5029-1992-9 /P·0864

前言

气候和环境变化是人类面临的重大问题。当代的主要地球科学国际计划,特别是在全球变化名义下的国际地球生物圈计划(IGBP)、世界气候研究计划(WCRP)、国际人类作用计划(IHDP),均集中于地球系统各层圈的相互作用及其对气候环境的影响。要了解这一变化的全貌,探索控制这类变化的因子,了解其对自然界生态系统和人类经济社会发展的制约作用,建立对规划人类社会发展有指导作用的预测模型,需要不同学科交叉多个方面的共同努力。这些努力首先包括对气候和环境变化的探测和基于探测事实的过程研究。

作为综合研究的基础,探测具有极为重要的地位,但探测全球不同时空尺度、大气各层和地表的变化是一项极为艰巨而长期的任务。这个任务一方面取决于探测原理、技术和处理能力的进展,同时也需要得到理论的指导和数值模拟的辅助。特别是对于变化所涉及的各种参数的重要性与变化幅度的估计。当代的全球和区域性气候与环境变化监测涉及全球的卫星探测,地基对空的遥感探测,大气层的气球探测以及地表和近地大气的直接探测。

过程研究是理解气候与环境变化的因果关系的基础,也是具有物理根据的任何预测模型的基础。海气相互作用、陆气相互作用、大气上下层相互作用的物理、化学、生物学多个方面都是涉及的重要内容。

大气和环境科学的发展已经越来越需要多学科交叉综合研究。为了更好地促进这种学科交叉研究,有效地开展气候与环境变化研究,由中国气象学会大气物理学委员会和动力气象学委员会、中国空间科学学会空间物理专业委员会、北京大学“暴雨监测与预报国家重点实验室”、中国科学院大气物理所“大气边界层和大气化学国家重点实验室”、“中层大气和全球环境探测开放实验室”等6个单位于1997年4月17~19日,在中国科学院大气物理所联合召开了“地球环境和气候变化探测和过程研究”研讨会。作为一个全国性的小型学术会议,集中了多个学科的学者开展共同探讨,涉及到广泛的各个方面,会议上展开了活跃的探讨交流,达到了预定的目标。根据会议目标和提交论文的内容,会议内容由如下几个主题组成:

1. 大气动力—辐射—光化过程研究;
2. 中层大气过程和探测研究;
3. 卫星遥感大气和环境;
4. 地基遥感与大气探测;
5. 土壤—植被—大气相互作用研究。

与会学者共提交了52篇论文报告。这些论文报告虽然是独立的,但综合起来则较好地反

映了当前这个领域的国际前沿和国内研究者的某些重要结果。将论文编辑出版对交流这些方面的研究前沿,向国内外大气与环境科学界及时展示研究成果是会有益的。在对原有论文报告进行了选择和认真的科学评审和修改后,我们编辑出版了这本书。

本书包括了研讨会中 1~4 项主题的重要论文报告。研讨会中的第 5 项主题“土壤—植被—大气相互作用”由于主要针对国家自然科学基金重大项目 IMGRASS (No. 49790020) 的科学任务,除个别论文外,此主题的论文报告将另外编辑出版。

本书由吕达仁、陈洪滨、吴北婴主持编辑,吕达仁任主编。“中层大气与全球环境探测开放实验室(LAGEO)”负责会议和编辑事务,并提供出版费用。LAGEO 秘书陈英承担了大部分成书的文稿整理工作。此外,在本书的编辑过程中还得到了许多专家同行的协助。

气象出版社的周诗健总编及俞卫平女士为本书的高质量及时出版提供了重要的技术支持和帮助。

限于时间和能力,难免还有文字错漏和学术上的不当之处。敬请专家读者不吝指正。

吕达仁

1997 年 5 月 22 日

目 录

前言

大气臭氧短期气候过程的非线性区域预测试验	杨培才 周秀骥 卞建春	(1)
纬向平均区域臭氧层不同维数的动力系统研究	王卫国 谢应齐 邱金恒 陈辉	(8)
大气光化反应过程对大气波动的影响	徐寄遥 王英鉴	(15)
氯和溴化学之间的耦合对南极臭氧的影响	王书仁 吴北婴	(19)
太阳耀斑对中层大气的影响	王英鉴	(32)
光谱分辨率对于地基大气成分遥感可探测高度的影响	徐寄遥 王英鉴	(37)
OH 气辉的光化—动力响应	王咏梅 王英鉴	(42)
地面 UVB 总辐射照度与臭氧的关系	张仲谋 王英鉴	(47)
香河 MST 雷达大气湍流探测初步结果	李卫 吕达仁	(51)
重力波破碎对中层大气环流影响的研究	高守亭 李军 洪钟祥	(57)
国际地球静止卫星遥感的发展动态和我国的发展战略	许丽生 张国栋 丁继烈	(64)
从空间综合遥感大气气溶胶光学厚度和植被反射率的原理和反演方法研究 ...	邱金恒	(71)
使用 GPS 系统遥感水汽分布原理和中国东部地区 T_m 回归分析	李建国 毛节泰	(78)
新一代大气红外垂直探测器的遥感能力	李俊 Hung-Lung Huang	(88)
GMS 云图降水估算的初步试验	王普才 李俊 魏重	(93)
大气气溶胶光学厚度与地表反射率的同时遥感——原理和初步数值试验	吕达仁 李卫 章文星	(98)
北京地区天光偏振特性的观测研究	阎帮华 吕达仁 吴北婴 刘春田 于明 章文星	(104)
利用太阳后向散射紫外光谱仪遥感大气臭氧垂直廓线的研究	孙达 李俊 吕达仁	(112)
红外光谱法测量 CO 等大气微量成分柱总量	王普才 王庚辰 孔琴心 刘广仁 E. I. Grechko E. V. Fokeeva	(120)
臭氧大气质量因子 AMF 的计算	陈洪滨 王普才	(126)
双波长地基微波辐射计雨天探测订正	魏重 王普才 吴玉霞 宣越健	(130)
利用多次散射造成的吸收特征变化反演气溶胶光学厚度	吴北婴 乔劲松	(137)
从宽谱太阳漫射辐射遥感探测大气气溶胶折射率虚部的新方法	尉东胶 邱金恒	(146)
热带海域云雨垂直结构模式及微波衰减特性研究	张凌 窦贤康 刘锦丽	(152)
太阳一天光光谱自动观测系统观测的初步分析	章文星 王普才 李卫 吴北婴	(159)
谷地环流与地形性放大因子研究	陈明 傅抱璞	(166)
平流层臭氧测量用紫外差分吸收激光雷达	胡欢陵 王志恩 吴永华 周军 金传佳 戚福弟 岳古明 陈毓红	(172)
CONTENTS		(179)

大气臭氧短期气候过程的非线性区域预测试验

杨培才

(LAGEO, 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029)

周秀骥

(中国气象科学研究院, 北京 100081)

卞建春

(北京大学地球物理系, 北京 100871)

摘 要

本文利用 Nimbus-7 卫星提供的 TOMS 资料, 建立了一个时空神经网络系统, 并对大气臭氧垂直总量的月平均值在中国地区的分布进行了预测试验。试验区域($70^{\circ}\sim 120^{\circ}\text{E}$, $20^{\circ}\sim 50^{\circ}\text{N}$) 为一个 18×11 的矩形网格, 其空间分辨率为 $3^{\circ}\times 3^{\circ}$; 试验所用到的 TOMS 资料的总长度为 174 个月, 它覆盖了从 1978 年 11 月到 1993 年 4 月这一时段。上述资料被分成两个样本集合, 其中前 150 个月的资料被用来建立预报模式, 后 24 个月的资料被用来检验预报效果。试验的结果是令人鼓舞的。如果用预报场和实况场之间的相关系数和均方根误差来表征预测的精度, 那么, 当预测时效不超过 6 个月时, 其相关系数都在 92% 以上, 而均方根误差都在 14 个 Dobson 单位以下。如果用 TOMS 资料的距平值来计算两个场之间的相关, 那么相关系数随预测时效的增加而明显减小。当预测时效从 1 个月增加到 6 个月时, 相应的相关系数值从 80% 下降到 50% 左右。这似乎表明 TOMS 资料给出的动力学具有混沌行为。

关键词: 大气臭氧, 时空序列, 神经网络, 短期气候, 区域预测

1 引 言

由于臭氧对人类健康和全球环境有着重要影响, 所以大气臭氧的长期和短期变化趋势的预测研究, 一直是大气科学家所关注的问题。应当说, 臭氧的长期变化趋势的预测, 是一件相当困难的事情。因为到目前为止, 科学家们还拿不出一个比较完善的描述臭氧演变过程的数学物理(化学)模式。虽然, 近些年来科学家们提出了一些有关大气臭氧含量在未来 10~20 年后的预测, 但它们并非严格动力学意义上的预测, 而仅仅是在某些假定条件下, 对臭氧潜在状态所做的一些估计。

然而, 近 20 年来, Nimbus-7 卫星给出的全球规模的臭氧垂直总量的观测资料(TOMS), 却使预报时效为月的臭氧短期变化趋势的预测有可能实现。最近史久恩等人^[1]利用 TOMS 资料详细地分析了中国地区臭氧变化的统计特性。他们指出, 中国地区大气臭氧月平均总量的时间序列可被分为三部分: 表示长期变化趋势的部分, 表示周期影响的部分和随机变化部分。其中前两部分占据了臭氧总量的 80% 左右。这表明, 在臭氧时间序列中, 可预报部分构成了它们的主体, 也就是说, 抓住了前两部分, 就可以粗略地解决大气臭氧月平均值的预测问题。

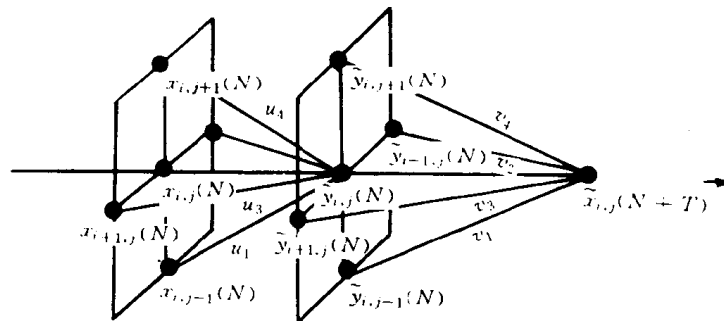
对大气臭氧短期气候过程的更精确的预测,有赖于建立更精确的定量化预报模式。80年代末期,特别是90年代初期,在非线形科学中出现的一些时空序列分析研究(Essex et al.^[2]; Kappenne 和 Niclis^[3]; Abarbanel et al.^[4]; Yang et al.^[5]; 杨培才^[6]),可以成为发展区域预测理论和方法的一个良好的工作基础。特别是 Yang 等人利用 TOMS 资料,计算了臭氧吸引子的维数在全球的分布,他们发现,在中高纬地区,吸引子的维数都在 7.0 左右。这个令人吃惊的一致性表明,在中高纬地区的大气臭氧有可能处在同一个系统的控制之下。这为利用 TOMS 资料的时空序列进行臭氧的区域预测,提供了理论上和观测上的依据。

2 时空神经网络预测系统

神经网络预测理论和方法已经在许多领域中得到了广泛的应用,人们不难在有关文献中找到它的一般形式和建模方法。通常它的输入信号来自一个单变量时间序列,而且这个序列的长度决定着预测结果的好坏。但是,对于绝大多数描述气候过程的历史资料而言,它们的长度远远不能满足预测精度的要求。特别是对于臭氧这样的大气成分,科学家们对它的观测历史,充其量也只有几十个年头。从本质上说,对一个气候系统未来状态的预测,依赖于对它过去所经历过的状态的了解,这就是常说的遍历性问题。过短的历史,自然不可能对系统的状态集合给出一个完整的描述。那么,如何改善系统的遍历性呢?上节提到的某些系统的维数在空间分布的一致性,似乎暗示着这样一个事实:这些时空系统的动力学受着同一规律的控制,在不同空间位置上所观测到的状态属于同一个集合。这说明,在上述物理前提下,联合大量不同空间点上观测到的时间序列,是可以改善系统的遍历性的。事实上,Ghil 等人^[7]在第 24 届 IUGG 大会上所做的科学报告中已经阐述了类似的观点。Abarbanel 等人还给出了利用时空序列重构状态空间的方法。

在有了一个满足(或者假定满足)要求的时空序列之后,不难找到适当的方法建立一个时空网络系统,并用它来进行系统空间结构的预测,或称之为“区域预测”。

在上述思想的基础上,我们利用 Nimbus-7 卫星所提供的 TOMS 资料,完成了一个臭氧垂直总量月平均值的区域分布预测试验。试验区域在 70°E 到 130°E 和 30°N 到 50°N 之间,并被划分成了一个 18×11 的网格,这个网格大体上覆盖了中国地区。TOMS 资料的总长度为 174 个月,其起止年月分别为 1978 年 11 月和 1993 年 4 月。我们的时空预测模式是一个三层网络系统。它的空间结构由一个最简单的五点格式组成(见图 1)。如果用 $\{x_{i,j}(k)\}$ 和 $x_{i,j}(N)$ 表示被归一化了 TOMS 资料时空序列和它的当前态,而用 $\tilde{x}_{i,j}(N)$ 表示 T 个月以后的预报值,那



么,时空网络系统可表示成如下形式:

$$\begin{aligned}\tilde{x}_{i,j}(N+T) &= F\left[\sum_{l=1}^L w_2^l \tilde{y}_{i,j}^{(l)}(N) + v_1 \tilde{y}_{i,j-1}^{(L)}(N) + v_2 \tilde{y}_{i-1,j}^{(L)}(N) + v_3 \tilde{y}_{i+1,j}^{(L)}(N) + v_4 \tilde{y}_{i,j-1}^{(L)}(N)\right] \\ \tilde{y}_{i,j}^{(l)}(N) &= F\left[\sum_{m=1}^M w_1^m x_{i,j}(k) + u_1 x_{i,j-1}(k) + u_2 x_{i-1,j}(k) + u_3 x_{i+1,j}(k) + u_4 x_{i,j-1}(k)\right] \\ k &= N - (M+L) + m + l\end{aligned}$$

其中,下标 i 和 j 分别表示经向和纬向变量, k 表示时间变量,而 N 代表当前时刻。在上式中, $\tilde{y}_{i,j}^{(l)}(N)$ 代表网络系统中间层的场变量,实际上它是一个辅助变量; $F(z)$ 是一个给定的具有“S”形状的非线性函数,并被称为“挤压”函数。在大多数文献里,它被给成是 z 的双曲函数。在我们的模式中,根据被处理的问题的特点,它被定义成如下形式:

$$F(z) = z - a \sin \frac{2\pi}{b} z$$

这里 a 和 b 是两个可以调节的参数。网络系统中的 w_1^m, w_2^l 和 u_n, v_n 分别是层与层之间的时间权重函数和格点与格点之间的空间权重函数,其中 $m=1, 2, \dots, M; l=1, 2, \dots, L; n=1, 2, 3, 4$ 。 M 和 L 分别表示输入层和中间层的维数。它们是给定的,但可以调节。

我们要做的事情就是选取一组最佳的时间权重 w_1^m, w_2^l 和空间权重 u_n, v_n , 使误差函数

$$\epsilon = \left\{ \sum_{i,j,k}^{I,J,N} \|\tilde{x}_{i,j}(k+T) - x_{i,j}(k+T)\|^2 \right\}^{1/2} / \sigma$$

达到最小,这里 σ 是时空序列 $\{x_{i,j}(k)\}$ 的方差。由于 ϵ 是权重 w_1^m, w_2^l 和 u_n, v_n 的非常复杂非线性函数,最小二乘法在这里是不适用的。通常人们采用最速下降法来定出一组可以接受的优化权重系数。限于篇幅,我们不在这里赘述。

3 结 果

在我们的时空网络系统中,上面提到的那些可调节的参数取值如下: $M=9, L=2, b=1$, 而 a 则在 0.05 到 0.1 的范围内挑选。 a 和 b 的上述取值表明, $F(z)$ 是接近线性的,或者说 TOMS 资料的时空序列给出的动力学是一个弱非线性过程。这是一个重要的启示,它说明臭氧预测可有较长的时效,下面给出的试验结果也证实了这一点。 M 和 L 的取值则意味着预测值是由从当前态开始上溯几乎 1 年的观测值所决定的。在上述参数条件下,误差函数 ϵ 的值,随着预报时效 T 的增加,大体上在 0.10 到 0.12 之间变化。对于一个归一化的数据集来说,这是一个可以接受的训练精度范围。

图 2 给出了几个预报试验的个例,它们分别是,当预报时效 $T=1, 3$ 和 5 时,1992 年 3 月份、6 月份、9 月份和 12 月份的预报结果。图中的左侧为臭氧的实况分布,右侧则为预测分布。由图可以看到,两个场在结构上是符合得相当好的,一些重要的分布特征,例如位于青藏高原上空的夏季臭氧异常低谷^[8],都被较好地预报出来了(见 6 月份和 9 月份的结果)。

表 1 臭氧网络系统预报精度

$T(\text{月})$	1	2	3	4	5	6
$R_T(\text{DU})$	9	11	13	13	14	14
$\rho_T(\%)$	96	95	94	93	92	92
$\rho_{aT}(\%)$	82	76	68	60	52	51
$\rho_{TT}(\%)$	79	71	59	49	40	39

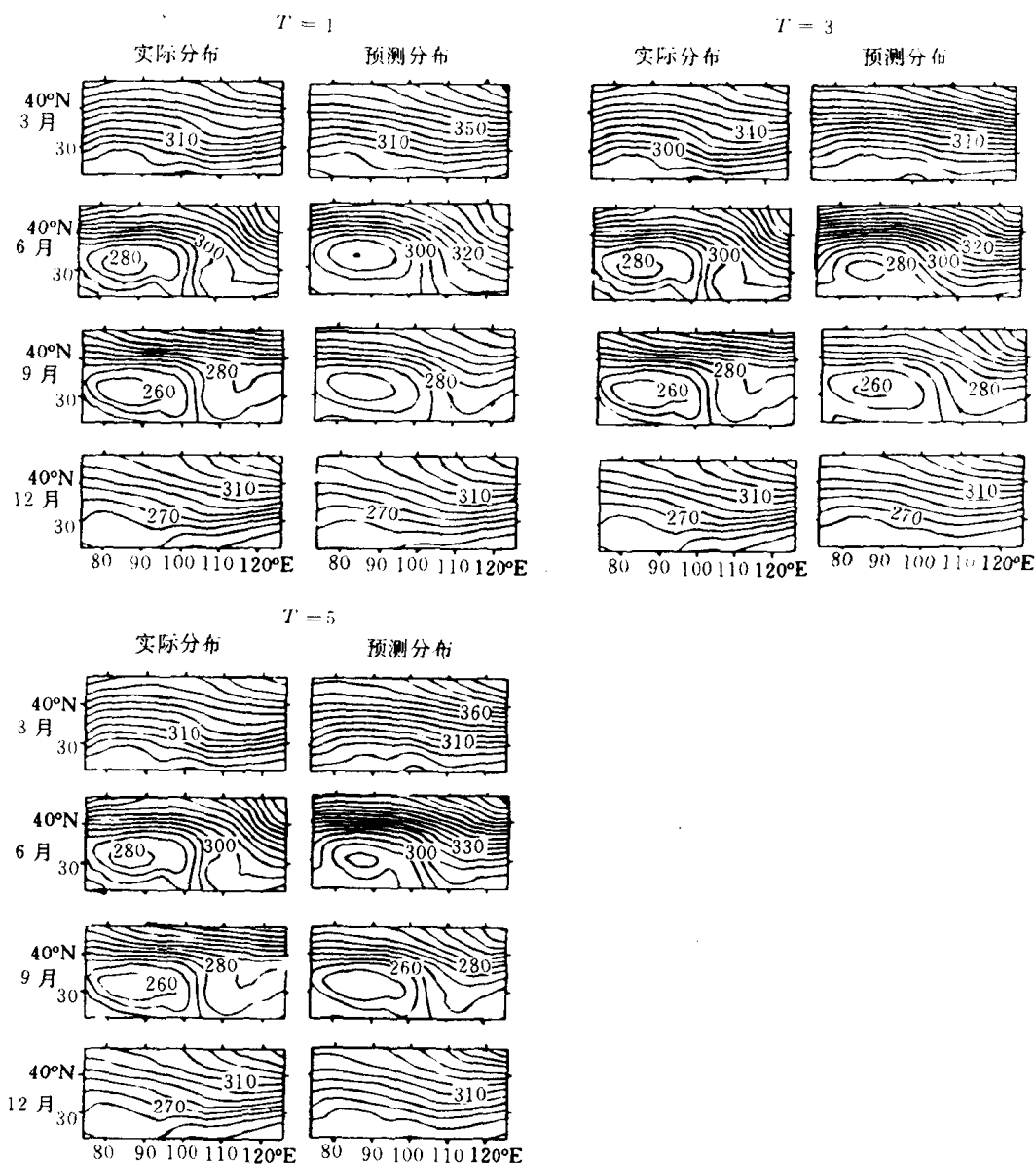


图2 预测试验的部分结果

表1列出了24个检验样本给出的预报误差。其中,符号 R_T 和 ρ_r 分别表示预报场和实况场之间的均方根误差和相关系数。由表我们可以看到, ρ_r 的值保持在92%到96%这样高的水平上,这表明了预报场与实况场之间在态势上是非常一致的,它是图2的结果在数值上的一个说明。两个场在统计上的差异,还可以从 R_T 的大小上看出来。但是,为了更确切地刻画模式的预报水平,人们更关心的是上述数值的相对大小,为此,我们计算了24个检验样本的标准差(约为36 DU),并与 R_T 作了比较,结果发现,后者与前者的比值在0.25到0.39之间。考虑到 T 的大小,这应该是一个可以接受的预报精度。此外,作为对预报能力的一个更客观的评估,常常需要同其它模式的结果进行比较,但是,就大气臭氧的预测而言,据作者所知,目前尚无类似的预报结果公开发表,为此,我们用同样的资料,建立了一个9阶线性回归系统作为比较模式。我们采用了对于预报精度更为敏感的距平值作为预报量,并且分别计算了网络系统和回归系统给出的预报场与实况场之间的相关系数,结果亦列在表1中(这两个量分别用 ρ_{aT} 和 ρ_{iT} 表

示)。比较两者,可以看到,当 $T=1$ 时,它们之间的差别是不大的,但是,随着 T 的增长,网络系统的 ρ_{aT} 值明显高于线性系统。这一方面说明网络系统比线性系统有更高的预报精度,另一方面也说明,前者比后者有更好的可预报性。此外,从 ρ_{aT} 随预报时效 T 变化,还可以看到,它的值随 T 的增长而减小,这种变化趋势似乎表明, TOMS 资料的时空序列给出的动力学具有混沌性质。

为了考察预报精度与季节之间的关系,我们还按下式计算了预报场和实况场之间的平均误差:

$$\epsilon_{m,T} = \frac{1}{I \times J} \sum_{i,j}^{I,J} [\tilde{x}_{i,j}(T,m) - x_{i,j}(T,m)] \quad m = 1, 2, \dots, 24$$

计算的结果表示在图 3 中。这是一个更细致的分析,它使我们有可能发现一些预报误差对季节依赖的反常现象,并从中找到某些影响预测精度的因素。从图中给出的结果可以看到,对于前 12 个检验样本(1992 年 4 月以前的月份), $\epsilon_{m,T}$ 的值或正或负,没有明显的偏离趋势。但是,对于后 12 个样本, $\epsilon_{m,T}$ 的值却全部为正,并且在 1992 年 11 月到 1993 年 3 月之间达到了很大的值。对于每一个 T , $\epsilon_{m,T}$ 的最大值与表 1 中相应的 R_T 值比较,都为它们的两倍左右。这表明,在这些月份中,网络系统给出的预测值有着明显的系统偏差。为什么会出现这种情况呢?很自然地,我们会想到发生在这一时期内,并对臭氧活动的影响最大的 Pinatubo 火山事件。对于 1991 年 6 月出现的这次本世纪最大的火山喷发,大气科学家们做了仔细的观测和分析。他们指出,大量的火山气溶胶对大气光化学过程产生了重要影响,并且导致大气中臭氧的浓度减少。Herman 和 Larko^[9]指出, Pinatubo 火山爆发之后,大气臭氧的浓度在 1992 年夏季到 1993 年夏季期间,明显偏离常值,并且在 1992 年 11 月达到最大。WMO^[10]在 1994 年提出的有关大气臭氧的研究和监测报告也指出, Pinatubo 火山的爆发,使得大气臭氧的全球平均值在 1992 年和 1993 年比 80 年代下降了大约 3%~4%,并且在 1992 年和 1993 年春季出现了最大的负距平。上述观测和分析的结果,同网络系统的预报结果在时间上有很好的一致性。这种一致性使我们有理由认为,预测值的系统偏高是与 Pinatubo 火山事件密切相关的。

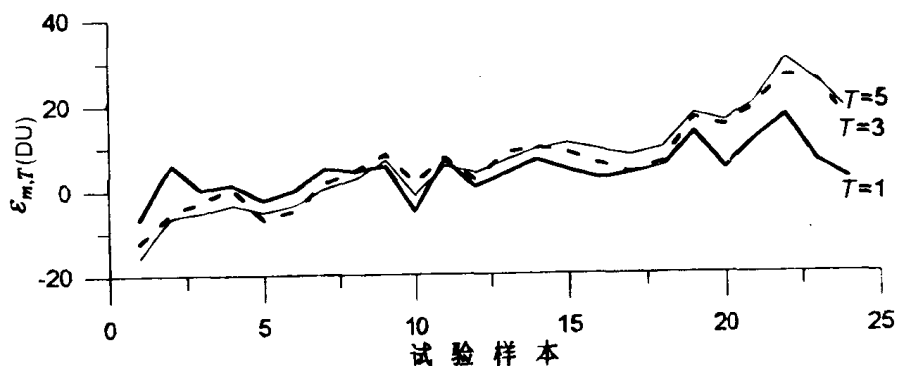


图 3 预报场与实况场之间的平均误差在试验样本上的分布

4 讨 论

对于 TOMS 资料这样短的时空序列而言,上面的试验结果应该说是令人鼓舞的。值得一提的是,最近我们还看到了罗昀等人^[11]利用我国长江中下游地区的地面温度场,重构了一个时空动力系统,并且完成了该地区月平均气温的预测试验。对于这样一个比臭氧系统更复杂的

时空过程,他们同样得到了很好的结果。这些试验的成功,再次说明了用空间资料来改善系统的遍历性是可行的。同时也使我们看到了时空序列在区域性短期气候预测方面的应用前景。从本质上说,这类方法的思想是建立在寻求历史相似并对之进行概括的基础上的,在它看来,所有可用的信息都包含在历史资料中了。因此,它不要求我们事先对控制系统的规律有多么精细的了解,更勿须像数值预报方法那样,要求建立一个完善的数学模式。所以,它特别适合于像气候这样的物理过程不很清楚的问题的预测。当然,处理一个时空序列,或者场时间序列,需要付出比单变量时间序列大得多的代价,也许不得不求助于超级计算机,因为它的巨大的计算量和存储量有时是一般小型计算机难以承受的。但是,这类方法的缺陷主要不在于它对技术上的要求,而是它对资料的过分依赖。它的预报能力受着历史资料的遍历性所限,也就是说,对于资料集未曾包含的那些状态的预测,这类方法是无能为力的。特别是对于那些受到噪音严重污染的资料,人们还不得不花费相当的精力去对付它们。这类方法还有一个经常受到指责缺陷,就是它在物理上是肤浅的。虽然,它给出的是某些有重要统计意义的结果,但是,它不可能对控制系统的物理机制提供深刻认识。另一个需要指出的问题是,这类方法还存在着理论上的缺陷,正如前面所指出的那样,人们还没有找到一个得到理论支持的有效方法,去认定多大一个空间范围或地理区域是处于同一个动力系统的控制之下。尽管有时可以从维数分布得到某些的估计,但是它在理论上仍然是不十分明确的。在大多数情况下,人们还不得不依赖于一些间接的知识或者经验,作出一个假定或猜测,然后根据试验去修改它。

总之,时空序列的预报理论在应用上还存在着一些需要解决的问题,但是,它是一个有着广泛的实际需求的研究领域。从非线性科学和计算技术当前的发展水平来说,已经具备了从时空序列去发展区域预测甚至全球预测的可能和条件。在某些预报领域,人们将会看到一些与数值模式预报并行不悖的时空序列预报方法出现。

参考文献

- [1] 史久恩、周秀骥、任福民,中国地区大气臭氧变化及其对气候环境的影响,周秀骥主编,北京,气象出版社,1996,p. 239。
- [2] Essex C. et al. *Nature*, 1987, 326, p. 64.
- [3] Keppenne C. L. and Niclis C.; *J. Atmos. Sci.* 1989, 46, p. 2356
- [4] Abarbanel H. D. et al., *Rev. Mod. Phy.* 1993, 65, p. 1331.
- [5] Yang P. C. et al., *Physica D*, 1994, 76, p. 331.
- [6] 杨培才,现代大气科学前沿与展望,北京,气象出版社,1995,p. 189.
- [7] Ghil M. et al., *Rev. Geophys. supplement*, 1991, p. 46.
- [8] 周秀骥等,中国地区大气臭氧变化及其对气候环境的影响,周秀骥主编,北京,气象出版社,1996,p. 232.
- [9] Herman, J. R. and Larko D. *JGR, D*, 1994, 99, p. 3483.
- [10] WMO, Global Ozone Research and Moni. Project, No. 37, Scientific Assessment of Ozone Depletion, 1994.
- [11] 罗昀等,1997,待发表。

A NONLINEAR REGIONAL PREDICTION EXPERIMENT FOR A SHORT CLIMATIC PROCESS OF OZONE

Yang Peicai (杨培才),

(LAGEO, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029)

Zhou Xiuji (周秀骥)

(Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081)

and *Bian Jianchun* (卞建春)

(Department of Geophysics, Peking University, Beijing 100871)

Abstract

An experiment for predicting the distribution of ozone over China is carried out by means of a time-space neural network system developed by LAGEO. The data used are the monthly mean values of TOMS data, whose length in time is 174 months from Nov. 1987 to Apr. 1993. They are divided into two parts; the first one, the first 150 months, is used to construct prediction equations and the second part, the last 24 months, to check the prediction results. The experiment has reached some successes. The results show that the coincidence in construction between the prediction field and the observation is good. Some important characteristics in the ozone distribution, such as the unusual depletion area over the Tibetan Plateau in summer, are predicted well. The results also show that the prediction accuracy decreases with the increase of the prediction period validity. This seems to illustrate that the dynamics of the time-space system given by TOMS data is chaotic.

Key words: ozone, time-space system, neural network, short climatic process and regional prediction

纬向平均区域臭氧层不同维数的动力系统研究^{*}

王卫国 谢应齐

(云南大学地球科学系, 昆明 650091)

邱金桓 陈辉

(中国科学院大气物理研究所, 北京 100029)

摘 要

为了从观测的臭氧总量场时间序列资料中直接建立区域系统的非线性动力学方程, 利用自然正交函数分解的方法, 对区域臭氧层系统开拓相空间。选用雨云气象卫星 TOMS 资料, 区域范围从 $5^{\circ}\sim 65^{\circ}\text{N}$ 每隔 10 个纬度取一格点的纬圈平均臭氧总量场, 场时间序列为 1978 年 11 月~1991 年 12 月的逐日臭氧总量。对臭氧总量场处理成距平场后进行自然正交展开, 则由标准化的空间函数构成相空间的一组正交基底, 将时间函数嵌入则对应于系统相点演化的状态分量, 它们是区域动力系统的再现的集合, 因而它们随时间变化的规律可以用于代替对区域系统演化的研究。从时间函数序列相轨迹的动力特征计算区域臭氧层系统的分维数为 $D_2=2.9$, 可估计建立区域动力学方程的最小数目的独立变量 $d=\text{INT}(D_2+1)$ 的信息。根据区域系统的分维数设定在大于 D_2 的不同维数相空间中建立动力系统, 而且在具有二次非线性项的假定下, 把时间函数序列作为描述实际区域非线性动力系统的数学方程的一系列特解, 采用反演建模的理论和方法可解出相空间状态演化方程中的控制参数, 建立起不同维数(状态变量)的区域动力系统。研究表明, 随相空间维数的增加, 建立的动力系统对区域臭氧层系统演化过程可能作出更精确细致的刻画。

关键词: 臭氧层, 相空间, 动力系统

1 引 言

在大气科学中普遍存在着资料分析的问题, 长期以来人们总希望从所掌握的观测资料中分析出资料要素的内在规律和一般特征。由于大气要素场时间序列的每一个观测数据, 对应着所观测系统中全部影响机制经过极其复杂的相互作用所产生的唯一结果和最终结果, 同时还蕴含着有关区域系统未来的演化信息, 它们反映的是区域系统宏观的整体特性。所以我们可以通过对资料分析来探研观测的区域系统的内在规律和演化特征。80 年代以来, 有关非线性时间序列反演系统动力学方程的研究, 由于它所具有的广泛实际应用背景而受到普遍重视^[1,2]。目前已成为时间序列分析理论发展的一个重要研究方向。

臭氧是大气中一种重要的微量气体成分, 它是氧的同素形体, 最大浓度主要分布在平流层 $12\sim 30\text{ km}$ 高度层内, 在中纬度最大浓度峰值出现在 25 km 处。若将一个大气柱中的所有臭氧订正于海平面平均温度和气压(STP)的环境下, 其全球平均的整层臭氧含量只有 0.34 cm

* 中层大气和全球环境探测开放实验室资助

(340DU)。尽管臭氧在地球大气层中的含量很少,但它在太阳—大气—地球表面—宇宙空间之间的辐射平衡中起着重要作用,对于全球和区域性环境生态系统与气候变化的影响却有着特殊意义。大气臭氧层的重要性表现在两个方面:一方面是它在平流层大气化学中的作用,作为原动力促成了平流层复杂的光化学反应,臭氧层是这种反应的平衡结果;另一方面是它对辐射和气候的作用,通过吸收太阳紫外辐射从而保护着地球的生物圈,被吸收的紫外辐射能量大部分进入了平流层,进而导致平流层中温度随高度增加,这一加热提供了驱动平流层和中层大气环流的主要能源。

大气臭氧浓度的变化是最早引起人们注意的全球尺度的大气化学成分浓度变化^[3],研究臭氧层浓度的演变极为重要,因为无论是估计臭氧的产生损耗、迁移转化及其对气候的潜在影响和生态效应,或者是研究平流层大气化学污染等都需要了解大气臭氧含量的演化趋势。由于臭氧层系统中物理、化学、辐射、动力等诸多过程的复杂耦合,目前已有繁简程度各异的多种模式作臭氧层系统演化的数值模拟,但理论结果与实际观测还有较大的偏差。然而,与数值模拟不同,利用观测的时间序列数据建立动力数学模式,是重构动力系统理论和方法的另一形式的重要应用领域,它无需等待建立起完善地控制系统的物理及化学机理。因此,对揭示系统的内在关系和影响系统状态变化过程的因素,解决系统动力行为及其控制机制的理论问题具有重要的现实意义。

2 建立的动力系统方程

对区域臭氧层场时间序列利用自然正交函数分解开拓相空间,由标准化的空间函数构成相空间的正交基,将时间函数嵌入相空间对应于区域臭氧层系统相点的状态分量。计算出区域臭氧层系统的分数维为 $D_2=2.9$,分数维作为系统混沌态的统计特征量,同时它是和系统的控制变量有关的。根据区域系统的分维数设定在大于 D_2 的不同相空间维数中建立的非线性系统的状态变量 T_j 随时间演化的动力系统方程为

$$\frac{dT_j}{dt} = f_j(T_i, \lambda_k) \quad (i, j = 1, 2, \dots, m; m > D_2) \quad (1)$$

在具有二次非线性项的假定下,把时间函数序列 $\{T_j(t)\}$ 作为描述实际臭氧层区域非线性动力系统的动力数学模式的系列特解,采用反演建模的理论和方法求解出相空间状态演化方程中的控制参数 $\{\lambda_k\}$,建立起不同维数的相空间区域动力系统。

2.1 三维相空间的动力系统方程

我们曾对区域臭氧层场时间函数序列取三维状态变量相空间做过动力系统的研究,并将(1)式表示如下

$$\begin{cases} \frac{dT_1}{dt} = a_1T_1 + a_2T_2 + a_3T_3 + a_4T_1^2 + a_5T_2^2 + a_6T_3^2 + a_7T_1T_2 + a_8T_1T_3 + a_9T_2T_3 \\ \frac{dT_2}{dt} = b_1T_1 + b_2T_2 + b_3T_3 + b_4T_1^2 + b_5T_2^2 + b_6T_3^2 + b_7T_1T_2 + b_8T_1T_3 + b_9T_2T_3 \\ \frac{dT_3}{dt} = c_1T_1 + c_2T_2 + c_3T_3 + c_4T_1^2 + c_5T_2^2 + c_6T_3^2 + c_7T_1T_2 + c_8T_1T_3 + c_9T_2T_3 \end{cases} \quad (2)$$

臭氧层系统作为一个具有强迫耗散的非线性系统,强迫和自由易变的外部环境的复杂作用,以及系统的内在不稳定性及反馈机制的相互影响,可导致系统内部性态行为特性的强迫调整,使

系统产生振荡响应。很显然,系统的这样响应过程是由表征系统性质和外在环境的控制参数进行调制的。为了得到一个客观的用于反映各状态变量随时间演化的动力系统,将(2)式中相空间状态变量的时间微商离散后就成为代数方程组,其中除了待定的控制参数 $\{a_k\}$, $\{b_k\}$, $\{c_k\}$ 外,所有的状态变量在时间函数序列中都有实况,从而利用时间函数可确定动力系统方程中的各项控制参数。在表1中给出了反演出的各个控制参数值结果及其方程中各对应项的相对方差贡献 R_k 。

表1 三维相空间动力系统方程中的各项控制参数值与方差贡献

项序 (k)	$\frac{dT_1}{dt}$		$\frac{dT_2}{dt}$		$\frac{dT_3}{dt}$	
	a_k	R_k	b_k	R_k	c_k	R_k
1	-1.1948×10^{-3}	7.6361×10^{-3}	2.2149×10^{-3}	1.8652×10^{-2}	2.7482×10^{-3}	2.2623×10^{-3}
2	-6.4058×10^{-5}	2.4459×10^{-4}	3.2774×10^{-4}	4.4331×10^{-3}	-4.3503×10^{-2}	8.9161×10^{-1}
3	-5.5592×10^{-4}	8.5310×10^{-2}	5.3261×10^{-3}	8.5963×10^{-1}	-9.3962×10^{-5}	5.3509×10^{-4}
4	7.8696×10^{-5}	1.1214×10^{-2}	3.3457×10^{-5}	1.5302×10^{-3}	4.5869×10^{-4}	2.2793×10^{-2}
5	4.2279×10^{-5}	9.2216×10^{-2}	-3.1280×10^{-5}	4.5102×10^{-2}	-4.9551×10^{-5}	8.5213×10^{-4}
6	-8.6048×10^{-6}	1.4904×10^{-1}	-2.9104×10^{-7}	1.5345×10^{-5}	-1.9236×10^{-6}	2.3154×10^{-5}
7	-2.6896×10^{-4}	1.7283×10^{-1}	-2.6768×10^{-5}	2.1133×10^{-3}	-7.5281×10^{-4}	2.4742×10^{-2}
8	-6.7822×10^{-5}	8.6680×10^{-2}	-8.0677×10^{-5}	2.2947×10^{-2}	1.5058×10^{-4}	5.4058×10^{-2}
9	6.6608×10^{-5}	3.9482×10^{-1}	-4.9611×10^{-5}	4.5571×10^{-2}	-1.8399×10^{-5}	8.2274×10^{-4}

因为我们事先无法知道动力系统方程所服从的具体动力函数形式,根据选取控制参数值和方差贡献均为较大项的原则,同时考虑线性项和非线性项的作用,这样可以确定状态变量对系统演化的控制和反馈的强度,从而突出所研究问题的重点,减少研究过程中出现的复杂数学问题,从简化的模式中揭示过程的重要机制,特别是主要的非线性特征。但是,剔除无关项很难有一个明确的尺度。由此,如果在(2)式中凡是相对方差贡献 $R_k < 10^{-2}$ 的项均予以剔除,可得到三维相空间中以下简化了的纬向平均区域臭氧层系统演化行为的动力系统数学模式。

$$\begin{cases} \frac{dT_1}{dt} = a_3 T_3 + a_4 T_1^2 + a_5 T_2^2 + a_6 T_3^2 + a_7 T_1 T_2 + a_9 T_2 T_3 \\ \frac{dT_2}{dt} = b_1 T_1 + b_3 T_3 + b_5 T_2^2 + b_8 T_1 T_2 + b_9 T_2 T_3 \\ \frac{dT_3}{dt} = c_2 T_2 + c_4 T_1^2 + c_7 T_1 T_2 + c_8 T_1 T_3 \end{cases} \quad (3)$$

式中 $a_3 = -5.5592 \times 10^{-4}$, $a_4 = 7.8696 \times 10^{-5}$, $a_5 = 4.2279 \times 10^{-5}$, $a_6 = -8.6048 \times 10^{-6}$, $a_7 = 2.6896 \times 10^{-4}$, $a_8 = -6.7822 \times 10^{-5}$, $a_9 = 6.6608 \times 10^{-5}$; $b_1 = 2.2149 \times 10^{-3}$, $b_3 = 5.3261 \times 10^{-3}$, $b_5 = -3.1280 \times 10^{-5}$, $b_8 = -8.0677 \times 10^{-5}$, $b_9 = -4.9611 \times 10^{-5}$; $c_2 = -4.3503 \times 10^{-2}$, $c_4 = 4.5869 \times 10^{-4}$, $c_7 = -7.5282 \times 10^{-4}$, $c_8 = 1.5058 \times 10^{-4}$ 。

2.2 四维相空间的动力系统方程

由于我们对区域臭氧层的内在规律了解甚少,而且缺乏有关影响臭氧变化的物理和化学机制。为了考察在不同维数的相空间中区域臭氧层系统的性态进一步了解其演化特征,我们有必要增加相空间的状态分量,扩展动力系统方程的数目,在四维相空间中设定具体的动力系统方程为