

天气预报集成技术 和方法应用研究

TIANQI YUBAO

JICHENG JISHU HE FANGFA

YINGYONG YANJIU

杞明辉 许美玲 程建刚 沙文生 赵梅珠 杨松等 编著

气象出版社

天气预报集成技术和方法 应用研究

杞明辉 许美玲 程建刚 沙文生 赵梅珠 杨松 等编著

气象出版社

内容提要

本书介绍了大气科学及其预测、预报理论和技术中的部分确定性与不确定性问题、集合与集成预报原理及技术方法等。全书分两大部分:第一部分主要介绍大气运动过程中的确定性和非确定性问题,并通过理论推导和实例分析阐述了大气系统中这种确定性与非确定性的对立统一导致预测具有准确和不准确性双重属性,从而需要开展集合与集成以尽可能减少预报过程中的不确定因素,提高预报准确率;同时对集合与集成预报的基本原理与技术方法进行讨论,给出了云南省集合与集成预报技术和方法研究试验的一些经验和结果。第二部分主要介绍以集成预报技术为基础形成的综合集成预报业务系统。

本书理论推导与实例分析相结合,系统而实用。可供从事气象、水文等工作的专业技术人员和科研、教育人员参考,特别适合省级气象业务和科研人员使用。

图书在版编目(CIP)数据

天气预报集成技术和方法应用研究/杞明辉等著.
—北京:气象出版社,2006.3
ISBN 7-5029-4122-3

I. 天… II. 杞… III. 天气预报-研究

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 023558 号

出版者:气象出版社

网 址: <http://cmp.cma.gov.cn>

E-mail: qxcbs@263.net

责任编辑:李太宇 丁问微 袁信轩

封面设计:张建永

责任校对:王丽梅

印刷者:北京中新伟业印刷有限公司印刷

发行者:气象出版社

开 本: 787×1092 1/16 印 张: 12.25 字 数: 314 千字

版 次: 2006 年 3 月第一版 2006 年 3 月第一次印刷

书 号: ISBN 7-5029-4122-3/P·1500

印 数: 1~800 册

定 价: 30.00 元

地 址: 北京市海淀区中关村南大街 46 号

邮 编: 100081

电 话: 总编室: 010-68407112 发行部: 010-62175925

终 审: 黄润恒

版式设计: 安红霞

前 言

云南省是自然灾害频发且严重的省份之一，每年因各种气象灾害及与气象因素密切相关的灾害所造成的经济损失约占全省社会生产总值（GDP）的 3%~6%。气象灾害以及气象因素所诱发的灾害造成的经济损失、人员伤亡、交通、电力及通信中断等为各种自然灾害之首，已严重影响云南省社会经济的可持续发展。因此，提高天气气候预报预测准确率不仅是减灾防灾的需要，更是新时期构建和谐社会、满足人民日趋丰富的生活及社会活动的需要。但是，由于天气系统的复杂性、大气科学中的诸多不确定性等问题使天气预报的精度等尚不能满足实际需求。提高预报准确率、丰富预报产品内容、延长预报产品可用时效已经成为广大气象科技工作者需要长期努力的目标。

随着大气科学理论的不完善和大气探测技术的改进，无论是传统天气学预报和统计学预报，还是现代数值预报其准确率都在不断提高。天气气候诊断、预测、预报和服务中可以参考的信息日趋丰富。但是这些信息的精度、属性等各有差异，如何从多种技术手段所获得的各种监测预警信息、诊断信息、预测预报信息中提取精度最高、最有决策参考价值、最能代表实际大气的真实状态的信息已经成为提高预报预测准确率和服务能力的关键所在。在这方面，20 世纪 70 年代以来逐渐发展起来的动力延伸预报、集合预报以及在集合预报基础上的综合集成预报技术已逐渐成为天气预报产品最终集成的关键技术和重要手段。特别是以动力数值预报为基础的集合与集成预报技术的不断完善和广泛应用，不仅提高了全球中期预报的精度、延长了预报产品的可用时效，而且集合与集成预报这一原本用于解决中期时效内大气运动确定与非确定性问题的技术手段逐渐在气候预测和短时乃至临近预报中的应用研究与试验也取得了可喜的成就。

尽管集合与集成预报技术及其应用的成就令人瞩目，但以动力集合预报为主的客观要素预报产品的精度仍离社会的实际需求存在较大差距。在现行条件下，预报员对天气图的经验分析、动力数值预报结果的主观订正和统计预报结果等多种信息的综合分析集成仍在天气预报服务乃至气候预测服务中起着难以被取代的作用和地位；另一方面，目前的动力集合预报、统计集合等集合预报仍将焦点主要集中在对集合成员个体精度的改进与提高上，但对如何从不同集合成员中提取最有效的预测预报信息技术方法的研究尚不足，即集合预报的技术相对成熟而集合结果的集成技术尚不成熟。因此，开展对包括动力预报、天气学预报、统计学预报等多种预报方法和预测技术在内所得到的多种预测预

报信息的综合集成预报技术和方法的研究开发已成为提高天气气候预测预报准确率的重要途径之一。

在云南省“十五”科技攻关项目(2001NG43)的支持下,我们将研究和分析试验的重点放在对不同预报方法所形成的具有不同预报精度的多种预报产品的综合集成预报上,并在课题负责人程建刚的组织和带领下经过近5年的试验、研究、总结,提炼出了几种集成效果较好的集成方法。

本书主要由杞明辉、许美玲、程建刚、沙文生、赵梅珠、杨松等编著,并得到课题组尤临、刘建宇等同志的帮助。全书共分两大部分,其中第一部分主要论述大气运动过程中的确定性和不确定性问题,并通过理论推导和实例阐述大气系统中的这种确定性与非确定性的对立统一导致预测预报具有准确和不准确性双重属性,从而需要集合与集成以提高预报准确率;同时对集合与集成预报的基本原理与技术方法进行讨论,给出了集合与集成预报技术和方法在云南省研究试验的经验和结果。第二部分主要介绍以第一部分中介绍的各种集合与集成预报技术为基础形成的综合集成预报系统。由于攻关项目的重点是科研成果的业务化,因此综合集成系统除集合与集成预报工具外还包括了与天气预报服务相关的其他信息的综合集成与显示、预报工具的预报质量客观评分、产品生成及分发等,是面向省以下广大气象台站的综合业务系统。

本书得到云南省科技厅、云南省气象局的大力支持和帮助,得到了云南省“十五”科技攻关项目(2001NG43)资助,并得到省内外有关专家的指导和帮助,在此我们表示衷心感谢。

本书中的许多观点为课题组在集合与综合集成预报试验结果的总结,其结果可能具有一定局限性,加之我们对大气科学中诸多科学问题的认识尚不够深刻、对集合与集成预报的理论和技術方法了解不够全面等原因,书中不足之处在所难免,请广大读者和同行们批评指正。

作 者

2005年10月于昆明

目 录

第一部分 大气运动的确定性与非确定性及其集成预报原理

第一章 集合预报与预报集成的相关问题探讨	(3)
1.1 大气科学中的确定性与不确定性问题	(3)
1.2 误差及天气气候预测的确定性与非确定性讨论	(11)
1.3 天气预报中的误差控制	(41)
第二章 预报集成及集合预报原理	(49)
2.1 集合预报的由来及基本思路	(52)
2.2 集合与集成预报中最基本的两种方法	(58)
2.3 集合与集成预报现状及发展趋势	(69)
第三章 集成预报原理、主要方法及其应用	(77)
3.1 集成预技术及基本原理	(77)
3.2 集成预报的主要方法介绍	(87)
3.3 集成预报技术在云南省降水预报中的应用	(100)

第二部分 天气预报综合集成业务系统

第四章 预报信息综合集成业务系统	(119)
4.1 综合集成业务系统设计及总体框架	(120)
4.2 综合集成业务系统主要功能模块	(124)
第五章 灾害性天气预报综合集成业务系统安装	(132)
5.1 运行环境及目录结构	(132)
5.2 系统安装说明	(135)
5.3 系统运行	(155)
第六章 系统操作指南	(158)
6.1 进入系统	(158)
6.2 菜单操作	(159)

第一部分

**大气运动的确定性与
非确定性及其集成预报原理**

第一章 集合预报与预报集成的相关问题探讨

1.1 大气科学中的确定性与不确定性问题

大气系统是一个具有明显耗散性、非线性、开放性特征的复杂系统,就大气运动的能量而言,主要源于太阳辐射。但大气系统本身并不是一个孤立的封闭系统,它与水圈、岩石圈、冰雪圈和生物圈之间存在频繁的能量、动量和质量的交换与传输,正是这五大圈层之间复杂的相互关系决定了大气科学本身具有确定性和非确定性双重特征。大气科学依据物理学和数学的基本原理,研究大气运动中各种物理过程的基本特性、揭示大气运动的各种动量、能量及其转换过程、天气气候现象及其演变过程及内在机制与规律,从而进一步促进大气科学理论的发展并形成日趋完备的对天气气候演变趋势和天气现象的预报方法与技术手段。数学和物理学是大气科学的理论基础,追溯大气科学发展的历程,每一个重大理论问题的突破都是数学和物理学理论突破及其在大气科学中应用的结果。

初期的大气科学是研究地球大气中所发生的各种现象的发生及其变化规律,并对其发生和演变进行预测预报进而为人类服务的科学,虽为地球科学的重要分支,但其研究内容比较单一而集中。随着地球系统科学的不断发展和人类逐渐对大气圈、生物圈、冰雪圈、水圈、岩石圈各圈层间相互作用、相互影响的内在联系有了更加清晰的认识,大气不再是一个具有确定边界的独立圈层,大气科学的研究也由此进入一个崭新的历史发展时期。

大气圈作为地球系统中一个最为活跃、与各圈层间交换最频繁的圈层,其各种变化都直接或间接受到地球系统中其他层圈和太阳等天体的影响。剧烈的地质构造运动等复杂原因使地球表面地形复杂,地球表面不再是平坦的陆地或水面,在一定程度上使大气圈与冰雪圈、水圈、岩石圈等各圈层之间相互渗透和相互交织。水循环、碳循环、能量循环等循环过程周而复始地重复是各圈层之间的相互影响的重要表现形式之一。在地球系统各圈层间的相互作用中,大气圈作为特殊而复杂的流体占有十分重要地位,它与地球其他圈层的相互作用在一定程度上决定着地球系统的整体行为和连锁反应,因而使大气科学的内涵更加丰富。

与其他自然学科一样,大气科学是同许多自然学科之间相互渗透、相互借鉴的。诸如我们在研究大气运动及海洋运动过程时,必须以流体力学、热力学为基础,通过数学手段研究和解决相关的科学问题;研究太阳辐射等过程对大气及海洋运动过程的影响及作用机制时,需与太阳物理学乃至空间物理学相联系;而研究水汽的输送与循环过程、海洋和大气间相互作用的动量、能量与质量交换与传输时,便同水文科学、海洋科学密切合作。由此可见,物理学和数学的基本原理和技术手段是解决大气科学问题的基础。与此同时,随着各学科间相互交叉与渗透的日趋频繁,学科间的联系日趋紧密,如地震学、地质学、冰川学、生物学乃至生态与环境科学等都与大气科学中的气候学等有着密切的联系。气候变

化对冰川、生态、环境有着重要的作用,反过来由于地球生态环境等的变化又反馈于气候变化。在某种程度已经很难划分学科间的明显界线,也难以以简单的方式回答大气科学与相关学科间谁是因谁是果。

正是由于各学科间错综复杂的相互关系和物质间的内在联系以及大气系统的开放性、非线性等特性,确定了大气科学本身的确定性与不确定性特征。而这种特征直接或间接地表现在天气预报的确定性(可预报性)和非确定性(不可预报性)。研究天气预报的可预报性与非确定性问题,对提高预报准确率具有十分重要的意义。

就大气科学的确定性而言,从宏观看,大气运动本身是一个具有确定性特征的物理问题,该问题可以以确定的数学表达方式(即方程或方程组)来加以描述。例如大气运动遵循牛顿运动定律,在球坐标系下可以将其表征为(1.1.1)所示的数学模型

$$\begin{cases} \frac{du}{dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{a \cos \varphi \partial \lambda} + 2\Omega v \sin \varphi + \frac{uv \operatorname{tg} \varphi}{a} + F_{\lambda} \\ \frac{dv}{dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{a \partial \varphi} - 2\Omega u \sin \varphi - \frac{u^2 \operatorname{tg} \varphi}{a} + F_{\varphi} \\ \frac{d\omega}{dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} - g \end{cases} \quad (1.1.1)$$

其中 u, v, ω 分别为大气运动速度在东西和南北水平方向的分量和垂直方向的分量; a, ρ, p 分别为地球半径、大气密度、气压; φ, λ, Ω 分别为地理纬度、经度和地转角速度, F_{λ}, F_{φ} 为摩擦力在 λ 和 φ 方向的分量。

由方程(1.1.1)可见,大气的水平运动主要受气压梯度力、科氏力、地表摩擦力等的影响,而垂直运动则主要取决于浮力和地球引力的作用。从这一角度分析看,大气的运动是确定的,而且在方程的每一项都确定的情况下可以以确定的数学模型描述大气运动的动力学特征。

又如,大气运动过程中发生的热量交换及各种相变过程和水汽循环过程也同样满足热力学定律和质量与动量守恒定律。这一过程可以以热力学方程、状态方程和水汽方程(1.1.2)等数学模型

$$\begin{cases} \frac{\partial \Phi}{\partial \ln \sigma} = -RT \\ \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{1}{p_s} \left[\frac{1}{a \cos \varphi} \left(p_s u \frac{\partial T}{\partial \lambda} + p_s v \cos \varphi \frac{\partial T}{\partial \varphi} \right) + p_s \dot{\sigma} \frac{\partial T}{\partial \sigma} - \frac{\kappa T \omega}{\sigma} \right] = Q \\ \frac{\partial q}{\partial t} + \frac{1}{p_s} \left[\frac{1}{a \cos \varphi} \left(p_s u \frac{\partial q}{\partial \lambda} + p_s v \cos \varphi \frac{\partial q}{\partial \varphi} \right) + p_s \dot{\sigma} \frac{\partial q}{\partial \sigma} \right] = S \end{cases} \quad (1.1.2)$$

其中 Φ, R, T, q 分别为大气重力位势、大气状态常数、温度和比湿, Q, S 分别为加热函数和水汽源汇函数,其他为气象常见符号。

由方程组(1.1.2)可知,大气运动过程中气压、气温、水汽的变化与大气中的热量传输与交换过程、水汽相变过程、水汽传输与交换过程等有关。一旦这些过程确定后,大气

运动过程中的热力学性质就确定了。既然大气运动演变的动力学、热力学过程都可以以一组确定的微分方程来描述,那么,大气科学的确定性和不确定性也与描述大气运动过程的这一数学模型的特性有密切的联系。

应用微分方程组解的存在性和惟一性原理可知(不失一般性假定描述大气运动某种过程的微分方程可表示为 $y = f(x, y, t)$ 的基本形式),讨论如下形式的微分方程:

$$y^{(n)} = f(x, y, y', \dots, y^{(n-1)}) \quad (1.1.3)$$

方程(1.1.3)中 n 是微分方程的阶次,为一个自然数,且 $n \geq 1$ 。

可以证明,如果函数 $f(x, y, t)$ 及其关于 y 的 $1, 2, \dots, (n-1)$ 阶偏导数在区域 $R: |x - x_0| < \delta, |y - y_0| < \sigma$ 上的每一个点都连续,即其 $1, 2, 3, \dots, (n-1)$ 阶导数存在且在零点处的左右极限值相等,则在区域 R 中经过零点 (x_0, y_0) 一定存在方程(1.1.3)的解,而且惟一。可以理解,正是描述大气运动过程的微分方程组解的存在性和惟一性在一定程度使得能够通过数值模拟技术来实现对天气形势的准确预报。而对于某类特定的天气现象而言,可以理解为描述大气运动过程及状态的微分方程的解将空间分成该类天气现象的出现或不出现两个部分,这实际也是确定性的另一种表现形式。

根据确定性理论,只要在特定的初始的 t_0 时刻的大气状态(即所谓初始条件)和大气的边界条件下,就可以通过积分描述大气运动状况的微分方程得到大气在未来 $t_0 + \Delta t$ 时刻的状态,从而实现预报:

$$\begin{cases} \frac{\partial H}{\partial t} = f(x, y, z, t) \\ H|_{t=0} = H_0 \end{cases} \quad (1.1.4)$$

如果上述描述大气系统某种运动状况的微分方程存在解而且惟一,即等式右端函数 $f(x, y, z, t)$ 的原函数 $g(x, y, z, t)$ 存在,大气特征参数 H 在初始时刻 t_0 时的初值确定,则通过求解方程(1.1.4)得到经过 Δt 时刻后的大气参数为:

$$H(x, y, z, t) = \int_{t_0}^{t_0 + \Delta t} f(x, y, z, t) dt \Rightarrow H(x, y, z, t) = H_0 + [g(x, y, z, t) - g(x_0, y_0, z_0, t_0)] \quad (1.1.5)$$

其中 H_0 为 $H(x, y, z, t)$ 在 $t = t_0$ 时刻的初始值, $g(x, y, z, t)$ 是 $f(x, y, z, t)$ 的原函数, Δt 为积分的时间步长。

式(1.1.5)就是在确定性理论指导下的现代数值天气预报的基本模型,由此我们可以看出,大气未来时刻的运动状态主要由控制和表征大气运动规律性的函数 $g(x, y, z, t)$ 的变化以及大气在初始时刻的基本状态 H_0 两大因素决定。即要通过数值积分方式实现对某类表征大气运动特征的参数 H 进行准确的预报,需要具备两个必要条件,其一是揭示大气系统中该类运动状态的物理过程可以通过确定的数学模型来精确表达,而且表征这种物理过程的该微分方程或方程组的解析解存在且惟一。简单说就是方程(1.1.4)能够精确、完备地表征大气运动中的某类物理事实和 $f(x, y, z, t)$ 的原函数 $g(x, y, z, t)$ 存在且惟一;其二是大气系统的初始状态 H_0 (观测事实)已知且精确。实际应用中则归结为在某一起报时刻的观测值要准确无误。

事实上,大气科学的确定性特征不仅表现在可以通过确定的物理过程和数学模型来客

观地表征大气运动过程的动力学和热力学过程,而且多年以来的观测事实和科学试验结果也证明了这一物理过程和数学模型的客观性和真实性。例如,尽管地球表面各地降水量的时间和空间分布存在明显的差异性,但全球长期平均的结果表明蒸发量、水汽交换与输送量、凝结降水量之间总是平衡的,遵循宏观质量守恒。而从地球所吸收到的太阳辐射能量与地球的全部对外辐射能量的长期平均结果看也处于平衡状态。另一方面,根据上述动力学、热力学、能量学物理过程和数学模型所描述的大气运动模型所开展的数值模拟与预报实验结果均表明,在相同预报精度的前提下,数值天气预报已经使天气形势预报时效由 20 世纪 60 年代的 24~48 小时延伸到 120~144 小时左右。所有这些都直接或间接地证明了大气科学中确定性的一面。

既然大气是一个全方位开放、高度非线性的耗散系统,它不仅通过吸收太阳辐射和向太空散发长波辐射、短波辐射等多种形式而与太空发生能量、热量交换;同时又通过地球自转、地形摩擦、耗散等方式获得或失去角动量;通过感热交换、非绝热加热等形式与陆地形成热量交换;通过海-气间的相互作用和相互影响、水循环等方式而与海洋间发生质量、热量、能量交换。正是由于这些物理过程的复杂性以及迄今为止尚对这些相互影响、相互作用的物理机制没有完全搞清楚等,决定了大气科学理论在宏观上遵循确定性原理的同时,而在微观方面或涉及具体物理过程时仍然存在不确定性。而这种理论上的不确定性在一定程度上正是天气预报存在不确定性以及这种不确定性长期以来难以突破的重要因素。

正如自然界中的一切事物都具有对立和统一的特性一样,大气科学理论也在对立与统一中不断发展和完善。确定性和非确定性问题既是矛盾的,又是统一的,它们同时存在,只是表现的形式各异。实际上牛顿力学是以宏观运动为基本假设而存在的。正如在相对论理论尚未奠定以前,量子力学中的诸多微观运动都难以以经典的牛顿力学来解释一样。

在我们讨论大气科学理论的确定性时,以大气的运动动力学方程(1.1.1)和状态方程、热力学方程、水汽方程(1.1.2)来说明。前面的论述过程中已经强调,当微分方程中的相关项是确定的时,方程组存在而且有惟一解。即以此为模型可以通过积分方式得到未来某时刻大气的确定性运动状态。但当仔细分析方程(1.1.1)和(1.1.2)中的每一具体单项,会发现仍存在不确定的因素:

例如,通常情况下,在(1.1.1)式中一般认为空气的密度 ρ 几乎为常数或者变化非常小,在实际大气中也的确存在全球长期平均空气密度的变化非常小的观测事实。但对局部地区而言,空气密度并非保持常数。而且密度的变化在一定程度上是构成局地强对流天气发展的重要因素之一。如中尺度的台风、气旋和中小尺度的龙卷风、微尺度的雷暴单体等强对流天气系统内空气密度差异十分明显。而且这种密度差异引发的浮力变化和对流往往引起水平方向的辐合辐散运动,从而与周边的空气运动相联系,其相互影响和作用机制可以通过流体运动的连续方程得以解释。实际上(1.1.1)式中最大的不确定因素来自大气运动过程中受到的粘性力项,即 F_λ 和 F_ϕ 的取值及其变化。其不确定性不仅表现在目前仍难以以一个精确的数学物理模型来表征大气运动过程中的粘性力,而在具体数值预报业务中只能通过半理论、半经验的模型以参数化形式来间接和近似地加以描述其对大气运动的作用。同时,其不确定性也表现在粘性力与下垫面环境(主要是粗糙度等)关系密切,而且大气中的摩擦耗散是无法通过探测和试验方法解决的重要影响因子,它对近地面层的湍流交换具

有十分重要的作用。

在 (1.1.2) 式中仍存在不完全确定的因素, 其中最难以以精确的数学模型来表达的是大气系统中的非绝热加热 Q 和水汽的源与汇 S 。其中, 非绝热加热项 Q 由以下几个主要部分组成, 且每一部分都存在难以以简单的数学模型来精确表达:

$$(1) \text{ 大气系统与陆面间的热量交换引发的热量增减: } Q_1 = -\lambda_0 \left. \frac{\partial T_1}{\partial z} \right|_{z=0}$$

其中 λ_0 为近地面层附近的空气热传导系数, 它与空气的密度、湿度、成分及变化等有关; z 为空气团距地表高度; T_1 为运动气团的温度。

白天当太阳辐射强烈时, 地面和大气层都迅速升温, 但地表的升温较大气层的升温迅速, 因而使 $\frac{\partial T_1}{\partial z} < 0$, 此时 $Q_1 > 0$, 近地面层的空气从地表获得热量而加热, 导致热空气浮力加大而上升从而产生对流。夏季的许多热低压的形成和维持都与此有关。例如夏季青藏高原低层的热低压系统的生成与长期维持与此有关。

夜间地面和大气层都不能获得直接太阳辐射能量而降温, 但由于地面面的辐射冷却迅速而降温, 但空气的降温速度慢而在近地面形成 $\frac{\partial T_1}{\partial z} > 0$, 此时 $Q_1 < 0$; 近地面层的空气向地表输出热量而降温, 冷空气浮力减小而下沉, 使近地面层的气压上升。冬季大气中地面大陆冷高压的形成和维持与此有关。例如冬季欧亚大陆地面冷高压系统的形成、维持及活动等都是近地面层大气强烈辐射冷却的结果。显而易见, 就平均状况而言, 近地面层大气与土壤 (海洋亦然) 间的热量传输与交换存在白天与夜间反向、冬季与夏季反向的特点。事实上 Q_1 的不确定性不仅表现在近地面层空气导热系数 λ_0 并非是一个严格意义上的常数, 它与近地面层空气的密度、湿度等的变化有关, 同时存在较大的局地性差异, 而这种差异在确定性数值预报中难以得到客观合理的考虑。

$$(2) \text{ 大气中水汽相变过程的潜热释放: } Q_2 = -L \frac{dq_s}{dt}$$

其中 L 为水的相变潜热, 它表明大气中发生水汽凝结过程 (其反过程为水受热发生蒸发) 时释放 (或吸收) 热量而导致大气层由于水的相变过程获得 (或失去) 热量的多少与空气中参与相变水汽的变化量有关。 q_s 为饱和比湿, 它表示空气饱和时一定体积内水汽质量与空气总质量的比; t 为运动时间。在实际大气运动中水汽的变化与因相变而产生的非绝热加热是一个十分复杂的过程, 该项可以近似如下:

$$Q_2 = -L \frac{dq_s}{dt} \approx -L \omega \frac{A - B}{1 - \frac{L_C}{c_0}} \quad (1.1.6)$$

$$\text{其中 } A = \frac{-0.622 \times 6.11}{p} \exp \left[\frac{a(T - T_0)}{T - b} \right], \quad B = C \times \frac{RT}{c_p T} (1 + 0.61 q_s), \quad C = \frac{a}{T - b} - \frac{a(T - T_0)}{(T - b)^2},$$

$T_0 = 273.16$, a 和 b 为已知的统计常数, c_p 为定压比热。

当大气达到饱和或接近饱和状态时, 在适合条件下空气中的水汽产生凝结, 水由气

态转化为液态或固态（凝结成雪、冰晶等），空气中水汽因此而减少。在气态水向液态或固态（冰晶、雪等）转化的过程中释放凝结潜热，空气处于加热升温期；反之，当水吸收热量而蒸发时，液态水向气态水转化从而使空气中的水汽含量增加，空气因散失热量而降温。由空气中水的相变过程所导致的非绝热加热（或冷却）看，虽然已经使用非常复杂的数学模型来描述整个变化的物理过程，但其中仍存在就数学意义和物理本质而言都不严格和不精确的问题。

(3) 太阳辐射加热部分： $Q_3 = Q_s + Q_L$

太阳辐射是大气系统的能量来源，可分为短波辐射 Q_s 和长波辐射 Q_L 两大部分，无论短波辐射还是长波辐射都与日地距离、大气微粒结构（如水汽、气溶胶）等有密切的关系，当大气系统获得的净辐射总量为正值时，大气系统升温，反之降温。长期观测结果表明全球大气系统的辐射总量基本平衡，但存在明显的日变化、季节变化、局地差异大等情况。这也表明了辐射等绝热过程仍存在许多难以以精确数学模型表达的非确定因素。即便大气系统获得的太阳辐射能量基本相同，但由于云量在不同纬度带上分布的严重不均匀等因素的影响，大气层本身的对外长波辐射分布存在较大的局地差异，从而导致净辐射能量的严重不均匀分布，这种不均匀分布难以在数值模式中以精确的数学模型加以表达。

(4) 其他非绝热过程

主要包括感热加热过程、大气中的对流加热过程等。与大尺度的空气抬升运动时产生潜热加热不同的是前者大气处于层结稳定状态（ $-\frac{\partial \theta}{\partial p} > 0$ 或者 $-\frac{\partial \theta_e}{\partial p} > 0$ ）、大气层处于饱和或接近饱和状态（ $q_s - q \rightarrow 0$ ），而对流性加热则是大气层处于条件性不稳定状态（ $-\frac{\partial \theta_{se}}{\partial p} < 0$ ）并且气柱有水汽的辐合，有利于凝结而释放热量的结果。

上述分析表明，宏观意义上的大气运动具有确定性的一面是无可辩驳的事实，这无论是在理论依据还是实际观测事实方面都已经得到了证明。但无论是从严格的物理过程分析还是数学模型分析来看，大气运动过程中的许多具体物理过程，我们仍没有完全搞清楚。用于描述这些物理过程的数学模型也存在不够严格和精确的地方，这在一定程度上反映了大气科学理论本身仍然存在不确定性和不精确性，在实际预报预测业务中则集中表现为天气气候过程存在可预报性和不可预测性的对立与统一。

事实上，大气系统的这种宏观的确定性、有规律性而微观和具体过程的不确定性和无规律性在实际大气运动过程中是普遍存在的。其宏观意义上的确定性、有规律性往往表现在大气运动过程的总体的、平均的变化，满足能量、动量、质量等的守恒性、有规律变化性、以及明显的周期性等特点。例如从大气中全球多年平均状态分析，尽管因日地距离的变化、太阳运动等因素导致太阳辐射的微弱变化，但大气系统从太阳接收到的总辐射能量与其对外辐射的总能量保持平衡，而对某些局部地区因受阴雨、火山灰等复杂因素的影响，仍可能出现局部时间和空间域上的不平衡；从气候尺度分析，全球多年降水总量和蒸发总量之间基本平衡，但存在严重的局部不平衡现象。如赤道热带地区受赤道辐合带影响等因素，可能出现降水量大于蒸发量；而副热带的沙漠地区则在下沉气流影响下可能出现蒸发量远大于降水量，从而导致宏观上的平衡与局地的严重失衡等等。

大气运动过程中最复杂而又最能够体现大气运动确定性与非确定性、规律性与无规律

性的统一就是边界层运动及湍流。由于受摩擦等复杂因素影响,边界层中的许多运动都显得杂乱无章,但经过一定的时间和空间平均后,这些运动又都显得有一定的规律性。这也进一步说明了大气运动宏观时空尺度的有规律性和具体微观过程的无规律性和非确定性。当然,这种气候尺度的宏观运动有规律性和确定性并不意味着大气系统宏观运动都是可预报的。实际上,每个微观的运动物理过程都对宏观运动产生不同程度的影响,正如气候变化与气候异常实际是一一次次天气异常累积的产物,尽管我们难以将气候异常与天气异常的因果关系明确加以区分,但这种相互影响的关系是显而易见的。为了说明大气系统这一特殊流体运动过程的确定性与非确定性的统一,下面以流体扩散运动过程中的密度函数的时间演变过程为例加以说明。图 1.1.1 为流体扩散过程中概率密度函数随时间的变化图:

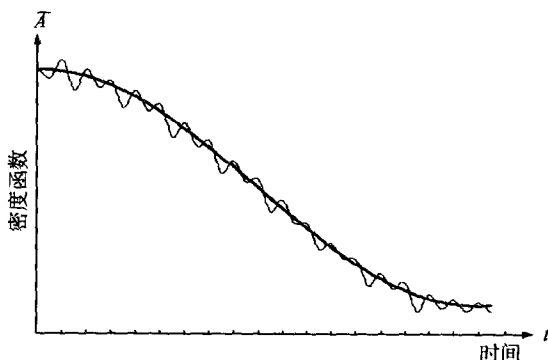


图 1.1.1 流体扩散密度函数的时间演变趋势图

由图 1.1.1 流体密度函数的变化可以清楚看到,其密度函数对时间的总体平均呈现出有规律的连续减小的趋势,其平均变化曲线表现得连续、光滑、有规律(粗实线)。而对某一个具体的观测试验样本(细实线)而言,其值在平均值的附近变化,可大可小,显得具有随机性和不确定性。类似的情况在实际大气运动中非常普遍,如气温的变化主要与太阳辐射作用有关,同时也受风、湿度等变化的影响。当日出后随着太阳辐射的逐渐加强,地面气温呈现逐步上升的变化趋势;而随着太阳高度角的变化,午后气温逐渐降低。从多年平均的情况看这种变化曲线与正弦函数的变化曲线非常相似,并具有周期性特点,因此,在一些数值预报模式中对非绝热过程的参数化处理也以近似的正弦或余弦函数粗细曲线的变化趋势为依据。但在实际大气中气温的变化往往并非如此简单,而是在不同地区、不同时间里有很大的波动。导致这种波动的因素很多,包括大气中的如对流交换、平流输送乃至云量、水汽相变等。

大气科学中的不确定性还表现在对大气层边界认识的不确定性等方面,与其他学科不同的是随着对影响大气系统诸多因子的认识和研究的深入,大气圈与其他圈层间的界线更加模糊。对于大气的上界,大约有 90% 的大气总质量集中在地表以上 15 km 以内的大气层中,尽管大气中的各种天气显现大都发生在该气层内,但并不意味着以外的大气对天气气候变化的影响可以忽略。在距地表 2000 km 高度以上,大气已经极其稀薄,逐渐向星际空间过渡,而无明显的上界;过去大气科学研究的重点集中在各种天气现象多发的对流层内,

对平流层以上的研究相对较少。随着对平流层以上大气中各种光化学应对大气成分影响、平流层动量下传对高空急流的激发与影响等的研究和认识的深入,特别是平流层附近由于太阳紫外辐射的光化学作用等因素形成臭氧层的变化对人类健康、地球生物圈乃至其他圈层具有重大影响的认识,大气科学研究的上界在不断外延,近些年来已经开始研究太空活动等因素可能造成的对大气成分的影响和可能出现的大气环境改变及其对天气气候的效应;对于大气的下边界而言,过去一般将地表(或水表)作为大气的下边界,在数值预报模式中由于考虑大气这一特殊流体与地表和水表都有所差别而将两者的交汇面作为大气下边界。随着对海洋过程、陆面过程对大气具有重要影响,大气圈、水圈、岩石圈、生物圈之间存在明显的热量、动量交换和物质交换与循环等过程的认识,特别是 ENSO 事件对全球性天气气候影响等研究工作的不断深入,大气科学研究的下边界已经涉及生物圈、水圈、冰雪圈、岩石圈等地球系统的其他成员。海洋过程、陆面过程、地表植被乃至土壤类型等因素在气候变化的数值模拟与预报中已经成为必需考虑的重要因素。问题的复杂性还表现在迄今为止还没有完全清楚陆地与大气、海洋与大气以及生物圈与大气间各种物理过程的机制,更难以确切证明究竟什么层次或深度的陆地和海洋对大气的影 响最为关键。尤其对包括火山爆发、海啸等地质与海洋过程中地球本身能有多少热量、物质等向大气层输送,这种输送究竟能在多大程度上对局地、区域乃至全球性天气气候的变化产生影响等,这些都是有待进一步研究的复杂问题。

统计学作为数学的重要分支在 20 世纪 60 年代逐渐在大气科学研究和天气预报中广泛应用,为揭示大气科学中湍流、摩擦耗散、辐射等复杂过程的规律及相互作用机制、揭示天气气候变化特征及其规律发挥了重大的作用。比如著名的海洋与大气间相互作用的 ENSO 理论、边界层运动中的混合长理论等的建立与应用,在一定程度上都是概率论和统计学在大气科学中的应用的成果。以统计学为基本依托发展起来的统计预报原理,在揭示气候变化规律、天气气候诊断等大气科学研究和预报业务中具有重要作用,甚至数值预报中诸多在动力理论上难以解释和解决的问题,统计方法的加入却取得了非常好的效果,如包络地形处理、物理过程的参数化处理等。事实上,这些在数值天气预报中动力学上难以圆满解释但又取得很好效果的统计方法,在一定程度上进一步证实了大气科学理论不确定性的一面和不够精确的地方。

然而,在大气科学研究和天气气候预测中,概率论与统计学原理的不确定性问题更加突出。在概率论角度将某类事件必然会出现的概率定为 1,一定不出现的概率定为 0,这似乎是非常确定的。但于由于大气系统的复杂性使得在任何时候都难以将其简单归结为 1 或 0 两类,而是统计结果往往介于 $[0,1]$ 之间的模糊区域,特别是当统计结果出现在 0.5 附近时,凭借统计学原理根本不能判断事件究竟能否出现。统计学方法的不确定性还在于我们只能知道因子与对象之间存在相互关联的关系及关联的程度而无法揭示其内在的机制。同时,天气气候事件发生概率的大小只能说明其出现频率的高低而无法绝对性地肯定小概率事件就一定不出现,这正是天气预报大多数情况下比较吻合而有时却出入较大乃至相反

的重要原因。

1.2 误差及天气气候预测的确定性与非确定性讨论

在上一节中我们从大气运动的观测事实分析和数学物理模型推导等简单讨论了大气科学确定性与非确定性的统一与对立。这一特性自大气科学诞生以来就一直成为制约大气科学发展,同时又促进大气科学理论不断完善的重要因素。事实上,大气科学中诸多不确定因素都源于大气运动的开放性和复杂性。正是这种不确定性、复杂性、开放性使以大气科学为理论基础、全球联合观测为依托、天气学预报方法、统计学预报方法、动力数值预报方法为基本手段的天气预报也存在确定和非确定双重特性。

1.2.1 误差问题及主要来源

1.2.1.1 基础理论不够完善所带来的误差

首先是天气预报所依赖的基础理论和技术方法仍存在数学和物理意义上的不严格和不完全精确性所导致的误差,下面从控制大气运动的原始方程组出发进行简单讨论:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \Phi}{\partial \ln \sigma} = -RT \\ \frac{\partial p_s}{\partial t} + \frac{1}{a \cos \varphi} \left[\frac{\partial}{\partial \lambda} (p_s u) + \frac{\partial}{\partial \varphi} (p_s v \cos \varphi) \right] + \frac{\partial}{\partial \sigma} (p_s \dot{\sigma}) = 0 \\ \frac{\partial u}{\partial t} - \frac{1}{a \cos \varphi} z p_s v \cos \varphi + \frac{1}{a \cos \varphi} \frac{\partial}{\partial \lambda} (\Phi + E) + \frac{RT}{a \cos \varphi} \frac{\partial}{\partial \lambda} (\ln p_s) + \dot{\sigma} \frac{\partial u}{\partial \sigma} = F_u \\ \frac{\partial v}{\partial t} + z p_s u + \frac{1}{a} \frac{\partial}{\partial \varphi} (\Phi + E) + \frac{RT}{a} \frac{\partial}{\partial \varphi} (\ln p_s) + \dot{\sigma} \frac{\partial v}{\partial \sigma} = F_v \\ \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{1}{p_s} \left[\frac{1}{a \cos \varphi} \left(p_s u \frac{\partial T}{\partial \lambda} + p_s v \cos \varphi \frac{\partial T}{\partial \varphi} \right) + p_s \dot{\sigma} \frac{\partial T}{\partial \sigma} - \frac{\kappa T \omega}{\sigma} \right] = Q \\ \frac{\partial q}{\partial t} + \frac{1}{p_s} \left[\frac{1}{a \cos \varphi} \left(p_s u \frac{\partial q}{\partial \lambda} + p_s v \cos \varphi \frac{\partial q}{\partial \varphi} \right) + p_s \dot{\sigma} \frac{\partial q}{\partial \sigma} \right] = S \\ Z = \frac{1}{p_s} \left\{ f + \frac{1}{a \cos \varphi} \left[\frac{\partial v}{\partial \lambda} - \frac{\partial}{\partial \varphi} (u \cos \varphi) \right] \right\} \\ \omega = p_s \dot{\sigma} + \sigma \frac{\partial p_s}{\partial t} + \frac{\sigma}{a \cos \varphi} \left[p_s u \frac{\partial}{\partial \lambda} (\ln p_s) + p_s v \cos \varphi \frac{\partial}{\partial \varphi} (\ln p_s) \right] \end{array} \right. \quad (1.2.1)$$

如前所述,当大气中没有摩擦耗散、非绝热加热、水汽相变等物理过程或者这些过程可以以精确的已知数学函数来表达时,方程(1.2.1)是一组在数学和物理意义上都非常严谨的控制方程组,但实际大气运动是一个具有显著摩擦耗散、非绝热加热、随时都会发生水汽相变的复杂过程。而且这些过程对大气中能量、动量、质量等的传输与交换具有举足轻重的意义。同时,这些复杂的大气物理过程又是迄今为止尚难以以精确的数学函数来具体描述的。因此,目前天气预报所依赖的理论尚不完备和精确,在一定意义上尚存在难以