

# 大气科学基础理论研究的意义与进展

刘式适

(北京大学地球物理系)

**摘要** 本文是根据1990年12月8日至10日在北京大学召开的大气科学基础理论问题研讨会的精神撰写的。大气科学既是基础学科,又是对国民经济发展有重大影响的应用学科。本文分析了大气科学基础理论研究的重大意义和进展,并指出:在发展应用大气科学的同时,加强大气科学基础理论研究对整个大气科学及其应用以及其它自然科学都有重要的意义

## 一、大气科学基础理论研究的重大意义

大气科学是研究发生在地球大气中的各种时空尺度的运动及现象的演变规律,和利用这些规律为人类服务的一门学科。由于影响大气运动和现象的因素多而复杂,人们很难在实验室内对它们进行完整的复制和研究,只能以大自然为实验室,对它们进行观测,并对各种资料进行整理、分析和综合,从而提炼出它们的演变规律或归纳出模式。随着观测手段的突飞猛进(如气象卫星、遥感)和数学物理的进展,人们对它们的认识越来越丰富,从而不断产生新的概念和模式,并大大推动大气科学的应用,为其它学科开辟新的研究前沿课题。

大气科学基础理论以观测事实为背景,广泛应用近代数学物理基础,着重研究发生在大气中的各种时空尺度的运动形态及其相互作用和相互转换的物理过程,探讨大气物理量的演变规律,从而做出准确的天气预报和给出恰当的气候变化,为国民经济和整个社会服务。

### 1. 大气科学基础理论研究的跨学科影响

近100年来,大气科学基础理论研究的突破具有重大的、跨学科的影响,例如

1897年, V. Bjerknes 提出的斜压概念和环流理论,把压力场和温度场结合在一起,讨论它们对流体运动的影响,这种研究突破了流体力学中的场论,其影响遍及整个流体运动(包括天体物理中的流体运动),这可与物理学中的电场理论相媲美。

1927年 Richardson 提出的逐步积分概念和用差分方法求解大气运动方程组的尝试,推动了近代计算技术和电子计算机的发展。

1937—1939年 Rossby 提出的大气长波理论和适应过程概念不但奠定了近代大气动力学的基础,而且,他把自然界中质量分布只在运动中形成的哲学观点用于大气运动,分析了大气大尺度运动流场与气压场的矛盾对立统一,推动了大气、海洋、天体学科的巨大进展。

1963年 Lorenz 提出的奇怪吸引子和浑沌的概念是近20年来自然科学的重大突破,他把确定论与随机论联系起来,推动了非线性动力学的巨大进展并带动了整个自然科学甚至社会科学的发展。

以上事例充分说明,大气科学基础理论的研究是极其重要的,具有跨学科的重大影响。

### 2. 大气科学基础理论研究的历史贡献

从大气科学发展的历史来看,大气科学基础理论研究也大大推动了大气科学的发展。

经典的热力学原理早就发现,在绝热过程中,气体的温度变化完全由其压力变化所决定。因此,当空气质点作绝热上升运动时,随着其压力的减小,温度也要减小;而当空气质点作绝热下沉运动时,随着其压力的增加,温度也要增加。另外,尽管静止状态空气的下层密度大,上层密度小,似乎层结是稳定的,但层结稳定与否还决定于静止状态下的气温垂直分布。大气科学中引进了一个综合气压和气温的物理量——位温,不但使经典热力学的绝热过程可以用位温守恒去表述,而且大气的层结稳定度也可以用位温的垂直分布去描述。事实上,由于地球各处的海拔高度不同,在各个位置上测出的气温很难说明气团的冷暖性质,而必须将气温订正到海平面高度,即用位温来判断气团的冷暖性质。所以,位温作为一种守恒量的引入,大大促进了大气科学的进展。类似,大气科学中引入了位涡度、准地转位涡度等在一定条件下的守恒量,不但使某些大气动力学问题的处理大大简化,而且促使大气准地转模式等的建立,从而大大促进了大气科学的发展。

在一般物理学中只有位能的概念,但人们发现在大气科学中,通常位能的数值远大于动能的数值,这就使人们认识到大气中的位能存在一个贮存问题,而且只有位能的一小部份与动能进行转换,因而引进了有效位能的概念。这个概念的引入不但使人们对大气能量及其转换的认识产生了飞跃,促进了大气环流理论及整个大气科学的进展,而且也使人们认识到,不仅动能可按正定量方式来定义,位能也可按正定量方式来定义。

人们起初分析天气资料用的是等高面分析,即把同一时刻同一高度上的气压、气温等资料填写在一张图上进行分析。后来,人们采用等压面分析。等压面的分析促进了 $p$ 坐标系的建立,这不但使理论研究更方便地应用于实际,而且使数值天气预报大大推进了一步。同时,这还使大气非线性方程可通过适当变换,形式上线性化。

Rossby 波的发现与证实,为近代大气环流和整个大气动力学的研究开创了新纪元。Rossby 波的理论不但正确地描述了大气大尺度运动的演变,而且迄今仍是做大范围天气预报的主要根据。

混沌现象的发现,对湍流研究开辟了新的道路,人们开始探索经过一系列分岔形成间隙湍流是最终通向湍流的道路。同时,用包含非线性因子、耗散因子和频散因子的 KdV-Burgers 方程来描写湍流,这就大大促进了大气湍流研究的进展。

### 3. 大气科学基础理论研究的实际意义

大气科学基础理论的建立发展一方面离不开观测技术的发展,同时,又将大大提高天气预报的准确性和改进气候预测。

19 世纪以前,短期天气预报是通过对象、物象的观测来完成的。以后,经过改进发展,用地面天气图和高空天气图作天气预报,但也只能是定性的和经验的。直到 1939 年, Rossby 从高空天气图上发现了长波,并在理论上应用二维无辐散绝对涡度守恒方程求出了长波公式,才使短期天气预报的定量化和数值化成为可能。1950 年 Richardson 开始探索数值天气预报,经过 40 年的努力,由于大气动力学基本原理的完善,更准确的数值预报模式的建立以及高速电子计算机的飞速发展,现在不但短期数值天气预报已成为日常业务,而且中期数值天气预报也在我国及欧美各国取得了长足的进步。

我国在“七五”和“八五”期间,设立中期数值天气预报和中小尺度灾害性天气(台风、暴雨)

数值预报的研究,要求尽快建立业务化的预报系统,无疑,这些研究对我国国民经济的发展是十分重要的。但目前我们对影响这些预报的某些物理过程,对制约这些过程发展的矛盾诸方面以及矛盾之间的相互制约和转化,认识得还不够本质和全面。诸如阻塞系统的形成、维持和崩溃,低空急流的形成和维持,对中期天气预报和降水预报都是十分重要的,但我们对其演变规律还认识得不很清楚,这必然在一定程度上影响了预报的准确率。因而还需要对某些有关现象进行规律性的基础研究。

事实上,大气科学基础理论的研究成果并不要很长时间就能在应用中发挥作用。例如,20世纪30年代末期 Rossby 提出的地转适应理论和长波理论,只经过10多年,天气预报就从定性的发展为定量的数值预报,这是天气预报的一个重大突破。如果没有 Rossby 的基础理论,也就谈不上今天的数值预报。因此,只要大气科学基础理论问题抓得好,研究思路和方法对头,那么,基础理论的研究成果必将很快地转化为应用,这对于大气科学是特别明显的。

## 二、近代大气科学基础理论研究的重大进展

近30多年来,大气科学基础理论的研究取得了重大进展,现分三个主要方面叙述。

### 1. 大气环流与大尺度动力学

(1) 发展与不稳定性理论 大气运动的发展或不稳定问题,是一个经典的问题,传统的研究方法是正交模方法(normal mode method),它要求解本征值问题。但这不仅繁琐,且只能解决线性问题,求得的只是狭义的离散谱,不包含连续谱,通常是不完备的。1965年 Arnold 提出用变分方法来研究不稳定问题,并给出了在二维无辐散条件下带状基流的不稳定性判据。这样就避开了具体求解本征值问题,而且可以讨论非线性不稳定问题。后来,Andrews (1984),McIntyre (1986),Shepherd (1988, 1989)等应用 Arnold 的不稳定性原理提出了正压和斜压的一般基流的非线性不稳定的判据。曾庆存(1979, 1983, 1985, 1986, 1990)将 Arnold 的不稳定性原理推广为大气运动中普遍的不稳定性变分原理,得到了许多不稳定判据。

(2) 谱与波包动力学 Case (1960)和 Burger (1966)提出,应用正交模方法研究大气运动得到的仅是离散谱,而且,只有当基流为零时,对应的离散谱才是完备的,基流不为零时,必须加上连续谱才能恰当解决大气扰动的演变。卢佩生,曾庆存等(1986)首先从理论上论证了正压准地转模式,当波速  $c$  为复数时,它为离散谱,但在  $c$  的实数域内,存在连续谱,并且给出了扰动按谱函数的分解和演变过程。

正是由于用纯离散谱表征大气扰动的缺陷,曾庆存等(1979, 1982, 1983)开始用波包(wave packet)表示扰动,它既反映离散谱的特征又表征连续谱的形态,而且将波包与 WKB 方法结合得到的波包动力学可以导得扰动演变过程的所有特性和规律。

(3) 行星波传播动力学 1963年,Longuet-Higgins 把叶笃正所提出的 Rossby 波的频散理论推广到旋转球面大气中,得到了定常行星波在球面上按一个大圆路径传播。Hoskins 和 Karoly(1981)分析了球面行星波对热力和地形的定常线性响应,并又一次肯定了定常行星波传播的大圆路径理论(great circle routes theory),从而部分解释了大气中的遥相关(teleconnection)现象。黄荣辉与 Gambo (1983)指出了行星波在实际基本气流中的三维传播存在两支波导,从而进一步解释了大气中的遥相关现象。这些成果都为研究 Elwin 现象及全球气候变化奠定了基础。

(4) 波-流、波-波相互作用理论 自从 Matsuno (1966) 创立了低纬波动理论以后, Lindzen 和 Holton (1968) 就分析了低纬波与基本气流的相互作用, 并成功地说明了低纬基本气流存在准两年周期振荡(即 QBO)。Andrews 和 McIntyre (1976) 引入了波作用量(wave action)的概念, 证明了大气中的一个新的基本原理——波作用量守恒原理。Eliassen 与 Palm (1961) 提出的 E-P 通量和 Andrews 和 McIntyre (1976) 提出的广义的 E-P 通量是分析波-流相互作用的重要参量, 它一方面可以用来诊断平流层的爆发性增温, 一方面可以用 E-P 通量及其相伴的剩余环流很好地解释扰动的热量和动量输送和平均径圈环流的形成。

与波-流相互作用理论提出的同时, Longuet-Higgins 和 Gill (1967) 提出了波-波相互作用的共振理论。他们指出: 由于波与波之间的相互作用, 能量相互传递, 从而限制了波振幅的无限增长。Egger (1978) 和 Wiin-Nilsen 等 (1986) 提出自由波与地形波非线性相互作用是产生阻塞系统的主要机制。

## 2. 非线性大气动力学

60 年代开始, 流体力学的研究跨入非线性的时代。相应的非线性大气动力学的研究也迅速发展, 其中主要包括非线性大气波动、非线性稳定性变化(分岔和突变)、浑沌和湍流、阻塞流体力学等诸方面的研究

(1) 非线性波 1964 年, Long 首先用多尺度方法论述了在西风带大气中存在孤立波, 并指出非线性正压 Rossby 波的振幅满足 KdV 方程, 随后, Larsen (1968) 和 Benny (1966) 等人也都进一步论证了正压和斜压的 Rossby 孤立波。巢纪平 (1980) 首先讨论了大气中的正压 Rossby 椭圆余弦波。刘式达和刘式适 (1982, 1983, 1985, 1986, 1987, 1988) 用直接求解和非线性项展开法对大气非线性波作了较系统的研究, 不但求得 KdV 方程, 而且求得了“频率-波数-振幅”的非线性频散关系。

(2) 阻塞系统动力学(从孤立子到偶极子) 非线性波理论建立以来, 人们用孤立子(soliton)来说明阻塞系统。Stern (1975) 首先提出了行星波中存在偶极子(modon)的概念, 他求解定常的正压准地转位势方程, 得到了北低南高的流场结构。McWilliams (1980) 将偶极子概念用以解释大气中的阻塞——切断系统。Charney (1979) 用多平衡态理论, Lindzen 和 Tung (1979, 1986) 用波与大地形线性共振的理论, Shntts (1983, 1986) 用瞬变涡旋与局地非线性共振理论, 朱抱真 (1982) 用热强迫理论, 纪立人 (1986) 用大地形强迫理论等解释阻塞系统的形成, 大大促进了阻塞系统及异常环流的研究。

(3) 非线性稳定性及浑沌 Lorenz (1960, 1962, 1963) 对于非线性动力学的发展作出了巨大的贡献。特别是他研究大气对流时发现了浑沌和奇怪吸引子现象, 创立了研究非线性系统的一种新方法, 即将微分方程的定性理论和数值计算相结合、将确定论和随机论相结合, 而且还给湍流运动的研究提供了一个新的途径。

## 3. 低纬大气动力学

由于热带观测资料的增加, 在 60 年代, 低纬动力学的研究掀起了一个高潮, 主要成果是第二类条件不稳定理论, 即 CISK 理论(Charney, Eliassen 和 Ooyama 1964), 低纬波动理论(Matsuno, 1966) 和对流参数化理论(Kuo 1965, Ooyama 1964, Arakawa-Shubert 1974)。到 80 年代, 联系大气环流和气候变化问题, 低纬大气动力学又掀起了一个新的高潮, 主要进展有:

(1) 低频动力学 热带大气中的 30—60 天(季节内)的低频振荡在 70 年代就被发现,但到 80 年代后,低频动力学的研究才进入高潮。主要内容有:Hayashi(1970)和 Lindzen (1974)提出并由 Lau. K. M. (1987), Takahashi(1987), Miyahara (1987)广泛研究的 wave-CISK 理论; Emanuel (1987), Neelin (1987)提出并由 Lau. K. M. (1988)详细研究的蒸发风反馈理论; Yamagata (1984)提出的外源强迫理论。这些理论一致认为非绝热因子是导致低频振荡的根本原因。

(2) 海气耦合和 ENSO 动力学 ENSO 事件及它在全球范围形成的天气气候异常受到全世界的重视。80 年代开始在注意研究 ENSO 事件的影响同时, ENSO 事件的动力学机制也在深入开展。Philander (1983), Schopf 和 Snarez (1987), Battisti (1988), Lau 和 Shen (1988)的一系列研究表明: ENSO 事件是海洋和大气耦合相互作用的结果。

### 三、我国大气科学基础理论研究的重大贡献

我国现代大气科学在竺可桢、涂长望、赵九章、叶笃正、谢义炳、陶诗言、顾震潮等老一辈科学家的指导下,经过几十年的努力,无论在学科发展、观测技术及台站网建设方面均取得了巨大的成就,特别是在大气科学的基础理论研究方面培养出一批年富力强的优秀中青年研究骨干。他们在大气科学基础理论方面做出的成果均处于国际先进水平,主要的有以下几方面。

#### 1. 大气环流与大尺度动力学

(1) 适应理论 60 年代,我国气象学家叶笃正、曾庆存、李麦村等用尺度分析方法论证了地转适应过程和准地转演变过程存在时间尺度和物理性质的可分性,给出了适应方向的临界尺度——Rossby 变形半径。80 年代,曾庆存(1979, 1980, 1981)又提出旋转适应理论,指出在旋转球面上,非带状扰动在一定条件下能被纬向环流吸收,而在另外的条件下,扰动得以维持。这两种过程的交替出现,在一定程度上构成了高低指数循环,这是大气环流季节变化的重要标志。

(2) 行星波动力学 曾庆存(1979, 1983, 1985, 1986, 1990)将 Arndt (1965)的不稳定性变分原理推广为大气运动中普遍的不稳定性变分原理,得到了包括正压和斜压、分层或连续模型、准地转或原始方程组、带状基流或非带状基流、定常或非定常基流等各种情况普遍适用的不稳定性判据,不但总结了前人的研究成果,而且有重要的理论和实际意义。

卢佩生和曾庆存(1986)首先从理论上说明了大气连续谱的存在,同时提出用波包来表示扰动。由此形成的波包动力学经过国内许多学者(曾庆存,巢纪平,卢佩生,黄荣辉,杨大升,刘式适,刘式达,陈久康等)的努力,不仅指出了行星波存在螺旋结构,而且给出了正压的或斜压的、 $\beta$  平面或球面的、平直基流或任意基流的、定常的或非定常的行星波的传播和演变规律,在国际气象界独树一帜。

黄荣辉(1982, 1983, 1984)用 34 层的球面准地转模式讨论了行星波对大地形和常定热源的响应,并利用 E-P 通量研究了准定常行星波的传播规律,特别是指出了两支波导,肯定了遥相关的存在,受到学术界重视。

#### 2. 湿大气动力学和低频动力学

谢义炳(1978)提出了湿斜压和湿力管的概念,建立了湿大气动力学的基本原理,并对我国夏季由于低空湿急流的存在形成的大范围暴雨研究有重要的实际意义。伍荣生(1982, 1984)

应用地转动量近似分析了边界层的流场、地形的作用和非线性过程,取得了许多重要的结果。在国际上普遍应用 CISK-Kelvin 波来说明低频振荡的同时,李崇银(1988)提出了低频振荡的 CISK-Rossby 波理论,指出赤道地区 30—60 天的振荡是 CISK-Kelvin 波和 CISK-Rossby 波共同作用的结果。刘式适(1990)又进一步从理论上证明了这一点。

### 3. 非线性大气动力学

丑纪范等(1983, 1989)应用 Lorenz 研究非线性系统的新方法研究了普遍的大气运动方程组的整体性质,指出这套方程组在相空间中存在全局吸引的不变点集,并指出这套方程组的任何数值模式实质上是马尔科夫链,这对数值模式和简化模型的研究有重要的意义。

刘式适和刘式适(1982, 1983, 1985, 1986, 1987, 1988)首创用行波法将大气非线性波动的偏微分方程组化为常微分方程组,继而又用 Taylor 展开法将后者化为  $KdV$  方程,并求得了非线性大气波动的频散关系,特别是获得了非线性 Rossby 波的频散关系,它在振幅趋于零时就化为著名的 Rossby 公式。他们同时用混沌研究湍流,取得了许多重要的结果。

## 四、大气科学基础理论研究的发展趋势

从前面叙述的大气科学基础理论研究的重大意义和发展可以看到:一方面,高技术带来的新的观测事实,是大气科学基础理论研究的基础;另一方面,大气科学的新概念、新方法等基础性的研究,将会推动大气科学的应用。因此,我们既要注意应用研究,攻克急需的中期数值预报等课题,同时,还需考虑我国国情,创造一定条件,使一些中青年骨干发挥其聪明才智,在大气科学基础理论研究上取得新的突破,这是完全有可能的。

从大气科学基础理论的发展看出,近代大气科学紧密地与现代数学物理的前沿概念和方法相联系。新的非线性数学物理的概念和方法,如分岔、突变、混沌、耗散结构、奇异摄动法都已在大气科学中应用和发展。同时,近代大气科学基于探讨全球气候变化的需要,已把大气、海洋视为一体,广泛地开展地球流体力学的研究,如海气耦合等。与此相呼应,世界气候的研究计划(WCRP)及其子计划——海洋和全球大气(TOGA)和海气耦合响应试验(COARE)等均在全世界范围内执行。所以,从大气科学基础理论研究来看,今后 10 多年内,应着重研究以下几个方面的问题:预计有关这些问题的概念、理论、方法等都将有新的突破,从而带动应用大气科学的发展,推动应用技术方法的改进,更好地为国民经济建设服务。

1. 大气中不同时间、空间尺度运动的相互作用,特别是大气中的热力、动力、物理、化学等过程的相互作用,以及水的相变等非绝热因子与动力过程的相互作用,进而研究大气运动的层次(hierarchy)理论。

2. 行星波动力学。着重分析波-流、波-波相互作用中的谱特征,行星波传播规律及频散特征,对热源强迫的非线性适应等。

3. 湍流串级理论、“负粘性”机理、“零通量”及边界层的其它动力学问题。

4. 低频动力学及与其密切相关的非绝热波、海气耦合理论及 ENSO 事件的动力机理。

5. 非线性数学理论及其在大气中的应用。着重研究阻塞系统的非线性机理和非线性稳定性。

6. 大气热力和动力过程中的守恒量及建立更合理的大气运动(含大尺度和中小尺度,短期、中期和气候的)模式。

总之,任务是艰巨的,但党和国家应鼓励我国中青年的优秀大气科学研究人员,发挥才智,团结协作,在大气科学基础研究中做出新的贡献,取得新的突破,为祖国四个现代化尽心尽力。

## SIGNIFICANCE AND ADVANCE ON THE BASIC THEORETICAL RESEARCH OF ATMOSPHERIC SCIENCES

Liu Shikuo

(Peking University)

### Abstract

This paper is based on the spirit of the atmospheric science discussion conference held in Peking University, in 8—10 December 1990. The atmospheric science is not only a branch of basic science, but also an applied discipline which is closely related with the development of national economy. In this paper the significance and advance on the basic theoretical research of atmospheric sciences are summarized. It is shown that while speeding up the development of the applied atmospheric sciences we must pay attention to strengthen its basic theoretical research which is of great significance for whole atmospheric science and its application and other natural sciences.

### 获 1991 年国家自然科学基金资助的前 20 所科研单位(按经费)

单位名称	资助项数	资助金额(万元)
1 中国科学院地球化学研究所广州分部	22	111.50
2 中国科学院地质研究所	15	88.50
3 中国科学院海洋研究所	15	81.40
4 中国科学院物理研究所	16	71.80
5 中国科学院化学研究所	18	71.10
6 中国人民解放军军事医学科学院	17	69.00
7 中国科学院地理研究所	12	67.00
8 中国科学院生态环境研究中心	17	65.90
9 中国科学院金属研究所	13	64.40
10 中国科学院长春应用化学研究所	16	63.30
11 中国预防医学科学院	15	54.50
12 中国科学院南京土壤研究所	10	53.30
13 中国科学院植物研究所	15	53.30
14 中国科学院力学研究所	13	53.00
15 中国科学院动物研究所	14	51.50
16 中国科学院空间科学与应用研究中心	10	49.50
17 中国科学院上海光学精密机械研究所	11	47.50
18 地质矿产部地质研究所	6	46.00
19 中国科学院长春物理研究所	11	45.00
20 中国医学科学院基础医学研究所	12	44.00

(综合计划局 供稿)