

# 非线性大气动力学的进展<sup>\*</sup>

李建平<sup>1)</sup> 丑纪范<sup>2)</sup>

1) (中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体物理学数值模拟国家重点实验室, 北京 100029)

2) (中国气象局气象培训中心, 北京 100081)

**摘 要** 总结了自新中国成立以来中国科学院大气物理研究所在非线性大气动力学领域的进展, 其中主要介绍了在非线性的适应过程、非线性稳定与不稳定、全局分析理论、可预报性、低阶谱方法与多平衡态动力学、非线性波动、波流相互作用、阻塞高压非线性动力学、中小尺度非线性动力学等几个方面的研究成果及最新进展。

**关键词:** 非线性大气动力学; 非线性适应; 全局分析; 可预报性; 阻塞高压; 多平衡态

## 1 引言

大气是一个由外源强迫驱动的、存在耗散的、受重力场作用的、不均匀的旋转流体系统, 其运动受一组复杂的动量、质量和能量非线性方程控制, 因此, 大气的运动在本质上是非线性的。非线性的存在使得大气现象丰富多彩、运动变化万千, 但同时也大大增加了人们认识大气运动规律及预测大气变化的难度, 所以, 发展非线性大气动力学无疑是非常必要的。事实上, 在大气科学领域, 有关非线性动力学问题的研究日益活跃起来。非线性研究的结果让人们看到了以往在线性情况下所不曾见到过的、独特的一些现象, 揭示出大气现象的复杂性、多样性、不确定性和不可预测性的一面, 大大拓宽了人们的眼界。非线性动力学理论不断发展使得人们从根本上理解发生在大气中各种现象的运动规律, 进而对其预测提供可靠的理论和方法。从基本属性上看, 非线性大气动力学分为两类: 保守系统的非线性动力学和强迫耗散非线性动力学。无论是在问题的提法还是在适用范围上, 无论是在物理性质还是在数学分析上, 这两个方面都有本质的不同。建国以来, 我国学者在这两个方面进行了大量的研究, 取得了可喜的成果, 并出版了一些专著<sup>[1~17]</sup>。这些成果在揭示大气非线性现象、建立相关的非线性大气动力学理论方面取得了显著的进展。本文主要介绍中国科学院大气物理研究所自新中国成立以来在非线性的研究成果及最新进展, 对所外国内的相关工作也略有旁及 (正是由于这个原因, 本文并未完全涵盖所外的非线性研究工作, 这是需要读者特别注意的地方)。

## 2 非线性适应过程

大气适应是大气动力过程中最根本的性质之一<sup>[18~22]</sup>, 是大气动力学最基本的研究

内容之一,在这方面已取得显著进展。从 20 世纪 60 年代至今,关于适应问题方面已有比较系统的综述<sup>[1,22~28]</sup>。从这些论述中可以清楚地知道无论是在线性适应还是非线性适应方面,我国气象科学家都作出了重要贡献,如提出了适应的尺度理论<sup>[29,30]</sup>、适应过程和演变过程的可变性<sup>[31,32]</sup>、多时间尺度<sup>[27,33~38]</sup>、旋转适应<sup>[1,24,25,39,40]</sup>、中小尺度适应<sup>[22,41]</sup>、适应和演变的相互作用<sup>[1,31,32]</sup>、位涡适应<sup>[35,42]</sup>、热成风适应<sup>[43~45]</sup>、适应锋生<sup>[1,28,46]</sup>、热带地转和半地转适应<sup>[47,48]</sup>、静力适应<sup>[22,49]</sup>等等具有独创性的理论和观点,大大丰富和深化了人们对大气运动的认识。非线性适应问题较线性适应有本质不同的性质,下面只论述非线性适应方面的工作。

## 2.1 大尺度运动的非线性适应

曾庆存<sup>[1,31,32,50,51]</sup>最先系统地研究了非线性地转适应问题,指出无论是正压还是斜压非线性大气运动中,地转适应和演变过程在时间上和物理性质上都是可分的,演变过程主要是由非线性平流项作用决定的。陈秋士<sup>[43,44]</sup>在引入度量地转关系近似程度后进一步证实,在高度非地转的运动中,方程中的非线性平流项是小项,可以略去,说明在这样的运动中主要是线性适应过程,适应基本完成之后,在天气演变的慢过程中非线性平流项变得重要起来<sup>[52~54]</sup>。非线性项的作用是使得风场和气压场沿着某一确定的方向演变,且满足地转风关系但同时又激发出环绕着这基本方向的周期很短的地转偏差<sup>[1]</sup>。因此,在重力和地球旋转作用下,大气运动永远处于平衡与不平衡(适应与不适应)的矛盾状态而随时间不断演化。

叶笃正等<sup>[34,38]</sup>指出,即使在演变过程中仍可分较快的发展阶段和缓慢的演变阶段,从而提出大尺度大气运动的“多时间尺度”概念,之后,又推广到大气各类尺度的运动中,指出多时间尺度特性是一种普遍的现象<sup>[27]</sup>。李麦村<sup>[35]</sup>进一步研究了大尺度大气运动阶段性的物理基础,提出大气运动的双适应现象:地转适应和位涡适应,他从理论和数值分析两方面论证了位涡适应过程的存在。位涡适应过程是非线性适应过程,它包含了地转平衡,地转适应是位涡适应的初级阶段。这种非线性适应了场的主要特征是流线与位势涡度线平行。之后,李麦村又将结果推广到斜压大气情形<sup>[42]</sup>。伍荣生等<sup>[33,37]</sup>和巢纪平<sup>[36]</sup>对多时态特征进行了补充说明,指出多时态特征是旋转大气中一种固有的现象<sup>[27]</sup>。大气存在多时间尺度特性的根本原因是大气中存在不同特征时间尺度的波动,从而形成了以不同波频散为物理内容的适应过程。

在非线性作用下的场,一般不会有完全适应,只有准平衡状态,这是适应过程和演变过程相互作用、相互影响的结果。但在某些特殊的情形下,则会有非线性完全适应。曾庆存<sup>[1]</sup>研究了正压和斜压大气非线性完全适应的条件问题,给出一些充分性的判据,然而,由于它的复杂性,直到目前这个问题的全面答案并未确定。不过,即使是完全适应的情况,非线性适应的结果也和线性理论结果不同。非线性作用造成从散度场中可分出一个与涡旋场和温度场相匹配的缓慢演变的部分,此即散度场向涡旋场和温度场的适应<sup>[1]</sup>。袁重光和曾庆存<sup>[55]</sup>通过数值试验进一步证实了这一点。

## 2.2 中小尺度运动的适应过程

中小尺度系统运动的适应问题是非线性的,这个问题是由叶笃正和李麦村<sup>[41]</sup>最早提出并研究的,他们的理论和数值实验表明对于中尺度系统,仍有快的适应过程和慢的演变过程。曾庆存<sup>[1]</sup>作了进一步的探讨,指出对于孤立的中尺度系统,在某些条件

之下运动有完全的非线性适应，流场趋于常定的广义梯度风平衡关系。这些非线性理论结果与实际相符，可以满意地解释成熟的中小尺度系统的许多特征。不过，这些结果是在正压情形下得到的，对于斜压大气中的中尺度非线性适应问题则复杂得多，还需进一步深入研究，目前只给出了一些非线性完全适应的充分性条件<sup>[1]</sup>。

对于小尺度运动，静力平衡条件是不能适用的，对于某些中尺度系统也是如此。因此，需要研究非静力平衡的中小尺度运动的非线性适应问题。叶笃正和李麦村<sup>[34]</sup>推导出非静力平衡的中小尺度运动的位涡守恒方程，指出存在声波频散、重力内波频散和平流过程三种基本时态<sup>[24]</sup>，它们的特征时间依次显著增大。将这些理论结果应用到对流系统可推知，浅薄的对流系统，动力作用占主导作用；深厚的对流系统，需要有热力作用才行；对于相同厚度的对流系统，层结愈稳定，需要的热力作用愈大，而运动速度愈大，动力作用愈大。

### 2.3 旋转适应

上述适应过程的研究针对的是在平面地面近似上局地扰动情况。对于球面大气的行星尺度运动，曾庆存等<sup>[1,24,25,39,40]</sup>创造性地提出了旋转适应理论。无论是在物理上还是在数学上，它与地转适应过程都有本质的区别。旋转适应研究的是全球范围或半球规模的大气环流演变问题，描述的是行星尺度系统群和天气尺度系统群的演变过程，这种过程比单个行星波或单个天气尺度现象的演变过程要缓慢得多，是属于中长期演变过程的范围，显然对它的研究有着极重要的理论意义和实际价值。其实，在平面地面近似下的非线性完全适应过程中，也可看到旋转适应的端倪。比如，无论是在大尺度还是中尺度运动中，非线性完全适应均是在地转参数  $f \neq 0$  的情形下得到的，即在旋转大气中才成立，所以，非线性完全适应是旋转流体不同于非旋转流体的独有的特征<sup>[1,24,25]</sup>。

曾庆存<sup>[1,39]</sup>指出，在旋转球面上，若满足一定条件，非带状扰动（行星波）和重力惯性波的能量能够最终全部被纬圈环流所吸收，说明行星尺度波群组成的大气环流状态在地球旋转作用下有趋向于带状纬圈环流的趋势，即存在着向地球旋转状态适应的机理，因此称为“旋转适应过程”。数值试验<sup>[56]</sup>及转盘实验<sup>[57]</sup>都证实了这一理论。此外，他指出利用准地转模式和平面近似常常得不到旋转适应过程，它们有可能给出虚假的能量循环<sup>[39,50]</sup>。

在旋转适应过程中起主要作用的是能量非线性转换机制。球面大气的非线性旋转适应过程说明大气环流常有恢复到带状环流的趋势是旋转地球大气的一种固有现象。利用旋转适应过程可以解释大气环流中众多现象，如大气运动中负粘性机理、能量集中和角动量传递过程、大气环流高低指数循环过程、旋转大气运动不具有各向同性、中期天气演变过程等等<sup>[39]</sup>。旋转适应过程是维持纬圈环流以及大气环流中期演变过程的一种极为重要的机理。可以说，旋转适应理论是一个里程碑式的工作<sup>[58,59]</sup>。

### 2.4 向外源强迫的非线性适应过程

讨论有外源和耗散的适应过程是属于长期天气和气候演变过程的范畴，自然与上述保守系统的适应有根本不同。巢纪平和许有丰<sup>[60]</sup>以及张可苏<sup>[61]</sup>曾研究过大气向热源的线性适应过程。

丑纪范<sup>[5,62,63]</sup>最先研究了强迫耗散系统的非线性适应过程，他用  $H$  空间的算子理

论研究了大尺度大气运动方程算子的性质, 并由此研究了在  $R^n$  空间中强迫耗散系统的终态, 证明了存在大气吸引子。汪守宏等<sup>[64]</sup> 利用无穷维动力系统的方法将上述结果推广到  $H$  空间中, 并证明吸引子有有限的维数。李建平和丑纪范<sup>[65,66]</sup> 作了进一步的探讨, 研究了在非定常外源强迫下大尺度大气方程组解的性质, 在外源强迫有界的情况下将上述结果推广到  $R^n$  空间和  $H$  空间中, 并研究了有地形条件<sup>[67]</sup>、完整的干空气运动<sup>[68]</sup>、湿大气运动<sup>[69]</sup> 等多种情形, 证明了大气全局吸引子的存在。而全局吸引子是由外源强迫 (包括下垫面和太阳辐射等) 所决定的终态。这些工作揭示出大气作为强迫耗散的非线性系统具有向外源强迫的非线性适应过程这样一个重要性质。这种适应与保守系统的适应过程的根本区别在于全局吸引子的存在。

上述理论 (称之为全局分析理论, 详见第 4 节) 所得到的向外源的非线性适应即是气候系统的适应过程<sup>[70,71]</sup>, 其特征是适应了的状态是由外源强迫所决定的状态, 这种向给定外源决定终态的适应过程是非常迅速的 (在惯性流形外是以指数形式适应的<sup>[72]</sup>), 而在吸引子上的状态运动是较为缓慢的演变过程。因此, 气候系统存在三种特征时间尺度: 向吸引子适应的快过程、在吸引子上演变的慢过程和宏观状态随外参数变化而演变的更为缓慢的过程<sup>[6,73,74]</sup>。长期数值天气预报的滤波方法<sup>[75~77]</sup> 就其物理实质就是与上述适应理论相一致的。

李建平和丑纪范<sup>[70,71,78]</sup> 将曾庆存<sup>[31,32]</sup> 所提出的时间边界层的概念进一步推广到强迫耗散的非线性气候系统中, 引入气候系统三类时间边界层——第一、第二时间边界层和内时间边界层。气候系统第一时间边界层内是系统不在吸引子上的状态迅速演变到吸引子上的过程, 与上述第一种时间尺度相对应。第一时间边界层外是在吸引子上的演变过程, 对应于上述第二种时间尺度。第一时间边界层和其外的演变过程又是第二时间边界层, 第二时间边界层外是宏观状态随外参数变化而演变的更为缓慢的过程, 即对应第三种时间尺度。在耗散的时间尺度内, 系统可看成是绝热无摩擦的, 这样就会有保守系统的地转适应和地转演变过程, 而此时的时间边界层就是强迫耗散系统的内时间边界层。这些特点反映出强迫耗散的非线性系统在时间边界层上的自相似结构。

此外, 张铭<sup>[79]</sup> 应用数值试验研究了次天气尺度中有热源的非线性适应过程, 李志锦和丑纪范<sup>[80]</sup> 研究了以大尺度背景场为控制变量的一类强对流中尺度系统向下垫面强迫的非线性适应及这类系统的预报问题, 吴国雄等<sup>[81]</sup> 和刘屹岷等<sup>[82]</sup> 研究了热力适应, 并应用到热带、副热带大气运动的发展、频散及副热带高压的形成的研究中。

### 3 非线性稳定与不稳定问题

大气环流的形势常有剧烈变化和持续性异常发生, 这些与大气运动的稳定与不稳定性问题密切相关。用线性方法研究它们是有很大局限性的, 因此需要发展非线性稳定性分析。非线性的稳定性分析方法有变分方法<sup>[83~89]</sup>、弱非线性方法<sup>[6,90,91]</sup>、低阶谱方法<sup>[6,91~94]</sup>、亚临界的非线性稳定性<sup>[95]</sup> 等几种。曾庆存<sup>[85]</sup> 将 Arnold<sup>[83,84]</sup> 第一定理推广为大气运动中普遍的不稳定性变分原理, 运用各种守恒律构造泛函, 得到包括正压或斜压、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可能大气模式普遍适用的不稳定性判据, 特别是他第一次得到了关于非

定常流、地形扰动流和非地转流的不稳定性判据,具有重要的意义。穆穆<sup>[86~89]</sup>对 Arnold 第二定理作了系统性的深化,将 Arnold 等的广义变分原理与现代非线性偏微分方程理论中的非线性先验估计方法创新性地结合起来,在该领域取得了突出的成果。徐祥德和高守亭<sup>[17]</sup>对波流相互作用的非线性稳定性理论作了较为全面的总结和研究。鉴于本专集中已有专门文章对此部分内容进行了详细的综述,因此本文从简,有兴趣的读者请参见穆穆等<sup>[89,97]</sup>的最新评论文章。

## 4 全局分析理论

研究大气系统的长期行为或气候的演变过程需要用全局分析理论<sup>[70,71,74,78,98,99]</sup>,这是强迫耗散的非线性气候动力学。全局分析是研究系统所有可能的初值在任意长时间上的整体特征和全局行为,特别是时间无穷时的终态情况。在实际中并非需要时间无穷长的限制,而常常是确定在有限时间后就可达到的状态。全局分析是一种直接方法,不需要对方程求解,直接通过方程本身的特征和性质来了解的渐近性态。全局分析的基本思想是撇开系统中各种具体运动及其局部性质,而研究其整体特征和全局行为,阐明外源强迫对气候运动的基本影响,从而揭示出气候系统中最基本的运动规律<sup>[78,98]</sup>。全局分析理论的基本成果包括以下几个方面:

(1) 揭示出完整大气动力学方程组(干空气或湿大气)、完整海洋动力学方程组、完整海气耦合系统、海陆气耦合系统是  $H$  空间中非常特殊的算子方程,即它们都可以统一表述成如下 Hilbert 空间中的非线性算子方程<sup>[62,66~73,78,98]</sup>,

$$\begin{cases} \frac{\partial \varphi}{\partial t} + [N(\varphi) + L(\varphi)]\varphi = \xi(\varphi), \\ \varphi|_{t=0} = \varphi_0, \end{cases} \quad (1)$$

其中,抽象算子  $N(\varphi)$  是反伴算子,  $L(\varphi)$  是自伴正算子。

(2) 得到全局行为定理<sup>[71,98~100]</sup>,即气候动力学方程组(无论是定常外源强迫还是非定常外源强迫)存在全局吸引子,随着时间的增长气候系统演化到全局吸引子上。不在吸引子上的状态只有暂态意义。全局吸引子具有有限的维数,代表了由外源强迫所决定的系统的终态,说明具有向外源强迫的非线性适应过程(见第 2.4 节)。全局行为定理表明,气候系统的长期行为可以用有限维动力系统来描述<sup>[78]</sup>。

(3) 利用算子的性质,揭示出强迫、耗散和非线性作用对系统渐近行为有根本不同的影响<sup>[62,101]</sup>。证明非线性、耗散和外源强迫三者的共同作用是产生多平衡态的根源,即大气多平衡态是有耗散和外源相互作用的非线性机制<sup>[1012]</sup>。

(4) 提出对大气动力学方程组进行简化或离散化的算子约束准则<sup>[103]</sup>。这是一种新的数值模式设计原则。它是能量约束法<sup>[104]</sup>的拓展,有严格的数学基础,并具有明确的物理意义,能够保证各种简化不歪曲原系统最基本的物理属性和全局性质。这种方法针对的是非静力近似下的非绝热和有耗散的情况,因此,适合于强迫耗散的非线性数值模式的设计。

(5) 提出了依据实况观测资料或模式的一个现实构造决定大气系统长期行为的支撑吸引子的少数自由度的理论和方法<sup>[105,106]</sup>,即对模式的一个现实作经验正交函数分解,

以此获得的经验“优势模态”为基底得到简化模型。

(6) 建立了大气吸引子观, 给出初值与模式相协调即四维同化的实质的全新解释<sup>[100]</sup>。

(7) 给出一种新的计算稳定性概念<sup>[106]</sup>, 并用于强迫耗散非线性系统的计算稳定性分析中。

(8) 提出一种分解算法的算子约束原则<sup>[70,71]</sup>, 即分解后方程中的算子保持原方程中算子的性质不变。利用它来分解方程简便明了, 物理意义十分清楚, 并可方便地对原方程进行多级分解。

(9) 指出在月和季时间尺度的数值预报和模拟中下垫面异常因子自然配置信息的重要性, 尤其是要考虑下垫面多个显著异常因子的自然配置型信息及其非线性相互作用<sup>[108~110]</sup>。数值试验研究表明这是一个有希望改进预测水平的途径。

(10) 对舍入误差进行了全局分析, 揭示出任何大气数值模式都是有限个胞的集合上的简单胞映射<sup>[11,63,111]</sup>。

(11) 对观测误差进行了全局分析, 揭示出当运用实际观测的量作为初值并对实际观测的量进行预报或模拟时, 任何大气数值模拟都是有限个胞的集合上的广义胞映射, 实质上是离散的 Markov 链<sup>[11,63,98,112]</sup>。系统向外源的非线性适应过程表现为趋向于由外源决定的概率分布, 因此, 敏感初条件使得动力确定论过程变为概率分布的演变过程。这提供了一个较好的研究气候问题的数学概念和数学工具。气候动力学可以认为是研究这种概率分布的特征及其演化规律的学科<sup>[11,99]</sup>。

(12) 给出了“气候”的数学定义及其可预报性的定量研究方法(见 5.5 节)。指出“气候”这个概念是与特定的时间尺度相联系的, 而这个时间尺度又非任意选定的, 而是由气候系统五个部分的特性客观地从物理上存在的<sup>[11,113]</sup>。

## 5 大气可预报性问题

自从 Thompson<sup>[114]</sup>和 Lorenz<sup>[115,116]</sup>关于大气的可预报性开创工作以来, 非线性确定性系统中存在可预报性的问题已经成为一个不能回避的事实。这样, 如何定量地估计大气可预报性期限及如何利用可预报性来设计数值模式就成为十分重要的研究课题<sup>[5,16,117~120]</sup>。这是挑战性很强、难度很大的领域, 目前已取得一些进展, 但离彻底解决它们还有相当的距离。

### 5.1 非线性最优扰动与可预报性研究

自从 Lorenz<sup>[121]</sup>提出用线性奇异向量理论研究大气运动的可预报性问题以来, 该方法在天气、气候的可预报性研究中被广泛应用, 但它只适用于线性情形。

为了考察大气运动非线性对可预报性的影响, 穆穆<sup>[122]</sup>提出了非线性奇异向量和非线性奇异值的概念, 这是对线性奇异向量和线性奇异值的推广。穆穆和王家城<sup>[123]</sup>采用二维正压准地转模式, 用数值方法求得了不同基态的非线性奇异向量, 结果表明: 当第一非线性奇异向量充分小时, 可用第一线性奇异向量来近似代替它, 但对于较大的非线性最优扰动, 相应的切线性模式不能很好地近似非线性模式。另外, 对于一些基态, 还可能出现局部非线性最优扰动, 这一类扰动通常具有较大的能量和相对较小的

增长率, 对可预报性的影响可能比第一非线性奇异向量大, 在可预报性研究中有更重要的作用。

非线性最优扰动可用于估计误差增长。根据误差的信息, 初始误差应该有一个上界, 但能量较大的局部非线性最优扰动可能超过这个上界, 从而对应于不合理的初始误差。为在可预报性研究中更好地考察非线性, 穆穆等<sup>1)</sup>提出了条件非线性最优扰动的概念(此概念刻划了预报时刻非线性发展最大且满足给定约束条件的一类初始扰动), 并将其应用于研究一个理论 ENSO 海气耦合模式的可预报性, 结果表明, 条件非线性最优扰动比线性奇异向量更容易发展成 ENSO 事件; 在估计误差增长方面, 条件非线性最优扰动比线性奇异向量更能刻划误差的非线性发展。

另外, 穆穆等<sup>[120, 124, 125]</sup>根据可预报性定量研究的需要, 将可预报性问题分成三类子问题。其一是在给定初始误差和允许预报误差信息的条件下, 研究模式最大可预报时间; 问题二是在初始误差和预报时间已知的情况下, 考察最大预报误差; 问题三则是在给定预报时间和允许预报误差的条件下, 探讨允许的最大初始误差。穆穆等<sup>[125]</sup>将它们归结为非线性优化问题, 并采用 Lorenz 模式, 研究了如何用数值方法研究这三类问题。

## 5.2 可预报性单调性原理及可预报性相对观

大气或气候是一个多时空尺度的系统, 这种特性决定了大气或气候的可预报性必然是一个强的依赖于现象的时空尺度的概念<sup>[5, 16, 120]</sup>。不同时空尺度大气的可预报期限还与初始特征和外源强迫的特征有关。当给定初始场  $X_0$  和外源强迫  $F$  的情况下, 大气的可预报性时间  $T_p$  满足:

$$T_p = T_p(D \times T; X_0, F), \quad (2)$$

其中,  $D$  和  $T$  分别为系统空间尺度和时间尺度。显然, 系统的可预报性由它的空间尺度、时间尺度、初始特征和外源强迫特征等四个因素决定。进一步, 利用上述关系可给出大气中稳定分量和混沌分量<sup>[126]</sup>的确切含义。在相同的初始特征和外源强迫特征条件下, 时空尺度较大的系统具有较大的可预报性。这就相当于牛顿的惯性定律所表述的质量较大的物体具有较大的惯性一样。可预报性的这种特性称为可预报性的“单调性原理”。这一原理的重要意义有两个, 一个是不能将描述系统次尺度的混沌分量(低层次)的模式用来预报系统主尺度的稳定分量(高层次); 另一个是要建立可预报性的相对观。

对于特定的预报时间  $\tilde{T}_p$ , 对应一个临界尺度  $D$  满足  $\tilde{T}_p = T_p(D \times T; X_0, F)$ 。那么, 系统的稳定分量是这样的一些分量, 其尺度为  $(D_i \times T)$ , 满足

$$D \leq D_i, \tilde{T}_p \leq T_p(D_i \times T; X_0, F), \quad (3)$$

而系统的混沌分量是尺度为  $(D_i \times T)$  的那些分量, 它们满足

$$D_i \leq D, T_p(D_i \times T; X_0, F) \leq \tilde{T}_p. \quad (4)$$

所以, 对于不同时空尺度的大气或气候预测来说, 应针对其稳定分量特别加以研究, 抓住其稳定分量的主要特点可以提高对系统的认识和预测水平<sup>[126]</sup>。

1) Mu Mu, Duan Wansuo, and Wang Bin, Conditional nonlinear optimal perturbation and its applications, *Nonlinear Processes in Geophysics*, 2002, submitted.

可预报性的相对观指出,大气或气候既是可预报的,又是不可预报的。这几乎是矛盾的结论却反映了大气或气候系统可预报性具有两面性的实质。树立可预报性的相对观对于指导预测实践是非常有益的。正是由于可预报的相对性,使得我们在研究中必须把目光放在对于某一特定时空尺度的预测问题寻找其相应可预报的稳定分量上来,从而减少盲目性。此外,不同可预报性的运动,它们可预报的对象无论在物理内容上还是在表现形式上都不会是一样的。认识到这一点对于研究和制作大气和气候的预测来说有着根本的意义。

### 5.3 模式可预报性研究必须考虑机器精度

传统上,采用大气环流模式来估计可预报性时效的做法是对具有微小误差的初始场的数值解进行比较来研究误差随时间的增长情况<sup>[114,118,127]</sup>。这种思想来源于认为如果模式是绝对精确的,对于任一确定的初始场可以得到其准确的数值解。这种无限精度理想化的传统观念现在看来是不正确的,它没有考虑到计算机存在机器精度这一客观现实。一方面数值算法本身是不完全准确的,而实现计算的计算机又存在机器精度,即计算过程中不可避免会有舍入误差存在,因此,上述做法所得到的可预报性界限,不仅依赖于算法,也依赖于计算机的精度,同时还依赖于模式本身。所以,这样所得到的可预报性界限并不是大气或气候的可预报性界限,而且也并非是模式最佳可预报性的确切定量。

最新的研究表明<sup>[128~130]</sup>,由于计算机的有限精度所造成的舍入误差对模式长期积分所得数值解有着重要的影响,而这种有限精度的现实性造成了客观上存在计算不确定性原理。这个原理解释出现实中数值模式的有效模拟能力是有限度的。这一特性是固有的,是不依赖于所模拟的对象(确切地说是除去一个零测度集),而有效模拟能力的大小常常是与模拟的对象有关。根据计算不确定性原理可以得到一种研究模式可预报性的全新方法,即通过实现模式的最优计算来得到模式的最大有效计算时间,从而估计现实情况下其可预报性期限。根据计算不确定性理论,我们提出一种逐步调整的最优计算方法,试验表明这种方法是实现最优数值模拟的一种有效途径<sup>[130]</sup>,从而可以实现使数值模式达到其最佳可预报性。

此外,根据计算不确定性原理,在实践中需要特别引起注意的是,不断提高模式的分辨率并不一定能够延长模式的可预报性。已有的数值实验也证实了这一点<sup>[131]</sup>。

### 5.4 利用观测资料提取可预报性信息

杨培才和陈烈庭<sup>[132]</sup>利用时间序列重构相空间的方法研究了 ENSO 事件的可预报性问题,他们的计算表明 ENSO 系统的关联维数在 5~7 之间, Lyapunov 指数介于 0.03~0.09 之间,平均可预报性时间在 11~33 个月左右。杨培才等<sup>[133]</sup>对低层大气的实测资料用相同的方法研究了低层大气运动的混沌特征,得到关联维数在 5.5~7.3 之间,最大 Lyapunov 指数介于 0.037~0.046 之间。郑祖光和刘式达<sup>[134]</sup>用大气湍流资料计算了 Lyapunov 指数和分数维,最大 Lyapunov 指数在 0.1~0.4,分数维为 2.3。这些研究表明大气系统或海气耦合系统具有非常复杂的非线性动力系统行为,但就其统计特性而言,仍存在一定的可预报性。不过,需要指出的是,虽然运用单变量的时间序列重构相空间可以用来探讨非线性系统的混沌行为,但其中却存在着实质的局限性和问题<sup>[135,136]</sup>,使得这种方法的应用前景受到限制<sup>[99]</sup>。

## 5.5 可预报性的全局分析

为了克服传统的点映射观念对系统作全局特征分析所碰到的困难，丑纪范<sup>[63,137]</sup>首先提出引入胞映射理论来研究。胞映射理论是美籍华人学者徐学书先生<sup>[138,139]</sup>创立的，它是用数值的方法来研究非线性动力系统全局特征问题的有效工具。这种方法可以用来定量研究可预报性问题<sup>[11,137]</sup>，并能得到无穷多种初值下系统的全局可预报期限。

可预报性问题是一个全局性的极限问题，系统状态达到吸引子的概率分布之前的时间就是系统的可预报期限。估计这个期限需要研究系统状态的转移，而全局状态的转移是由简单胞映射理论和混沌理论所建立的广义胞映射来表达的<sup>[11,74,98]</sup>。基于一个最大简化的地—气耦合模式，郭秉荣等<sup>[11]</sup>和范新岗等<sup>[140]</sup>采用胞映射全局分析方法，对气候系统的可预报性进行了全局的研究，结果表明气候系统存在最大可预报期限，对于超过逐日预报可预报期限后的预报，用胞映射思想证明了平均值的可预报性，并得到了一些定量结果。此外，研究还表明耦合机制具有延长可预报期限的作用，观测精度的提高亦可延长可预报期限。

## 6 低阶谱方法与多平衡态动力学

自从 Lorenz<sup>[92]</sup>首先提出用截断谱模式来研究大气环流以来，低阶谱方法<sup>[5,141]</sup>在大气科学中被广泛地用来揭示非线性现象的机理，特别是 Charney 等<sup>[94,142]</sup>关于多平衡态与阻塞形势的研究将低阶谱方法推向高潮，其后的十余年间多平衡态动力学成为一个热点，取得了不少成果。然而，由于低阶谱模式本身的局限性<sup>[99]</sup>，如低谱模式所得的多平衡的特征对控制方程是敏感的、对高截谱分量是敏感的等等<sup>[143]</sup>，目前这方面的研究并不活跃。

### 6.1 多平衡态理论与阻塞高压

朱正心和朱抱真<sup>[144]</sup>考虑到纬向加热差异的作用，用低阶谱方法研究了纬向不对称加热强迫作用下的多平衡态与阻塞形势，结果表明：当纬向不对称加热差异的强度超过一临界值时，才能形成阻塞高压；而当加热差异的强度等于或小于临界值时，所形成的阻塞形势就很快崩溃。因此，阻塞形势是纬向不对称加热作用下的准稳定的超长波非线性平衡态。朱正心<sup>[145,146]</sup>进一步讨论了大气运动的非线性及纬向不对称的热力和地形强迫作用下阻塞动力学机制。金飞飞和朱抱真<sup>[147~149]</sup>利用两层准地转的低阶谱模式研究了强迫波、自由波和纬向气流的非线性相互作用，对高低指数的转换和振荡机理进行了解释，并对全局性阻塞流型的形成进行了动力学讨论，取得了一些有意义的结果。

### 6.2 大气环流的季节突变

为了给出叶笃正等<sup>[150]</sup>最早发现的大气环流突变现象的动力学解释，李麦村和罗哲贤<sup>[151]</sup>用与 Charney 等<sup>[94,142]</sup>讨论阻塞高压时相类似的方法，即用一个考虑了加热耗散的正压一层模式的低阶谱方法研究了西风急流位置的突变机制。在一定的参数的数值变化下，计算的结果与观测的 6 月、10 月对流层南支急流突然跳跃和突然建立的图像非常相似。他们的研究指出水平方向存在着不同尺度的热力强迫是出现跳跃的必要条件，非线性作用及耗散作用的存在对于突变的出现必不可少，从而表明环流突变机

制是一个有多种热力强迫、有耗散、有热力动力共同作用的非线性机制。柳崇健和陶诗言<sup>[152]</sup>从上面的方程出发,结合突变论的方法,最后得到了一个与月尖突变标准面等价的三维曲面,讨论了副高北跳的机制,从而对大气环流的6月突变现象作了解释。缪锦海和丁敏芳<sup>[153]</sup>研究了热力强迫下的大气平衡态突变,得到了与上面类似的结论。朱抱真<sup>[154]</sup>还讨论了季节突变的一些动力过程。此外,热带的环流变化也有突变性,如南亚冬夏季风的建立,朱抱真和赵景霞<sup>[155]</sup>把南亚冬夏季风视为两种稳定的平衡态,用非线性平衡态理论探讨了热带季风的形成,研究了冬夏季风环流的突变式的建立和维持,并对季风的活跃与振荡进行了一些动力学解释。

### 6.3 副热带流型的多平衡态

大气环流的多平衡态特征是一个普遍性质,并不限于中高纬度地区。李麦村和罗哲贤<sup>[156]</sup>用低阶谱方法,论证了北半球夏季副热带流型的多平衡态特征,指出大尺度大气运动的非线性、不同空间尺度的热力强迫和地球大气的固有参数特征的结合,使得北半球夏季副热带有两组根本不同的流型——东部型和西部型<sup>[157]</sup>,从而形成了北半球夏季副热带流型的多平衡态特征。他们<sup>[158]</sup>又通过在Lorenz<sup>[159]</sup>低谱湿模式中引进温度和全露点温度垂直递减率随空间、时间的变化及积云对流调整和地形,研究了大气湿过程的作用,结果表明湿过程在夏季副热带高压的形成、发展和维持中可能有重要作用。并证实湿过程在大气环流经向流型的形成中起着重要的作用。此外,他们<sup>[160]</sup>在Lorenz<sup>[159]</sup>低谱湿模式中引入海陆差异从而构成一个海陆气耦合的低湿谱模式,通过干湿模式的对比试验进一步研究了湿过程对夏季对流层中部副热带高压东部型和西部型形成中的影响。刘四臣等<sup>[161]</sup>和李维亮等<sup>[162]</sup>也采用Lorenz<sup>[163]</sup>提出的一个低谱湿模式,同时考虑了南北加热差异和东西加热差异,并引入地形效应,讨论了热力强迫对湿斜压大气中副热带高压和南亚高压的多平衡态的影响。

### 6.4 多平衡态产生机理

李麦村和罗哲贤<sup>[164]</sup>用有加热、有地形和有摩擦的二层准地转截断谱模式研究了大气环流形态的分支现象,等温静止和Hadley环流是模式大气的两类定常流型,随着参数的变化,大气环流会发生分支现象。他们<sup>[165]</sup>用二层准地转低谱湿模式进一步研究了从平衡态向周期态的分支,表明对流凝聚加热对平衡态向周期态的分支以及分支后的流型特征具有明显的影响。数值试验<sup>[166]</sup>的结果进一步证实了这一结论。秦建春和朱抱真<sup>[167,168]</sup>通过一个含有近共振热力强迫和耗散、基本流有常数切变的二层准地转 $\beta$ -平面纬向周期性窄通道斜压模式,运用多尺度方法,研究了近共振热力强迫作用下多重平衡态的激发、建立和转换机制,分析表明非线性和外强迫是产生多平衡态的决定因素,摩擦对多平衡态解的性态有很大影响,改变“环境参数”可引起多平衡态之间的转换。吴国雄和董步文<sup>[169,170]</sup>用一个有地形、强迫源和摩擦耗散的球面正压低阶模型来研究大气平衡态的动力特征,讨论了大气的振荡机制和稳定平衡态的吸引机制。李建平和丑纪范<sup>[102]</sup>则从最普遍的意义证明大气多平衡态现象是有耗散和外源相互作用的非线性机制。

除了上述研究外,许有丰<sup>[171]</sup>用两层准地转截断谱模式研究了纬圈基本气流、超长波和长波之间的非线性相互作用以及它们对指数循环的贡献,得出了大气环流指数循环这种准周期振荡过程,其周期为8~15天。杨培才<sup>[172]</sup>研究了33模Lorenz系统的某

些总体特征,并讨论了高维系统对原始方程的逼近问题。通过改变耦合参数,杨培才和刘锦丽<sup>[173]</sup>讨论了从单个 Lorenz 系统的解到双 Lorenz 系统的解的非线性演化过程。

## 7 非线性波动、波流相互作用

波动与基本气流相互作用一直是大气环流动力学的基本课题<sup>[174~176]</sup>。叶笃正<sup>[177]</sup>第一次提出并研究了波状基本气流下小扰动的演变问题,拓宽了以前有关不稳定理论研究的对象,得到了扰动有相互作用等许多新结果。曾庆存<sup>[178~180]</sup>用 Rossby 波包概念系统地研究了大气扰动的演变,以及扰动与基本气流之间的相互作用,取得了有意义的结果,从理论上得到了扰动振幅、扰动波长、移动速度和扰动结构的变化规律,并在讨论三维斜压大气中 Rossby 波包的演变时详细论证了波作用量守恒。而后,曾庆存等<sup>[181,182]</sup>又在球面大气上研究了大尺度扰动的演变和波流相互作用,指出某些条件下,因旋转适应过程,非纬向扰动可以完全被纬向气流吸收,尽管就长期平均而言扰动滋养西风<sup>[183~185]</sup>。此外,曾庆存<sup>[186]</sup>还把 Wentzel-Kramers-Brillouin-Jeffery (WKBJ) 方法与积分法相结合,研究了准地转斜压扰动的发展特征。廖洞贤<sup>[187]</sup>研究了正压大气中切变涡度和曲率涡度的相互转化,在一定条件下,叠加在切变切变基流上的小槽可以是气流弯曲而变成深槽,即扰动发展,而在另外的条件下,弯曲的气流可以变成切变较强的基流,即扰动衰减。陈英仪和巢纪平<sup>[188]</sup>利用 WBKJ 方法导出了螺旋 Rossby 波的广义波作用量所满足的方程,进而探讨了螺旋 Rossby 波的波作用守恒和稳定性。吴国雄等<sup>[189,190]</sup>在考虑了地形和非绝热等外源强迫的作用后,求得了原始方程系的无加速定理,从而更合理地描述大气纬向平均温度与西风的变化。高守亭和陶诗言<sup>[191]</sup>发展了一种研究中尺度波流相互作用的 A-B 混合方法,并研究了波能集中与低空锋生的关系。李贤琅<sup>[192]</sup>研究了旋转球面正压大气中有限振幅扰动波包与纬向基本气流的非线性共振相互作用,指出非线性共振相互作用是大气旋转适应过程的重要机制。罗德海和李崇银<sup>[193]</sup>研究了在有周期性外源强迫(周期不要过长)影响的情况下 Rossby 波共振非线性相互作用,指出通过 Rossby 波共振相互作用可以形成大气季节内振荡。

伍荣生<sup>[194]</sup>得到了非线性波动的基本方程。刘式适等<sup>[12,195~197]</sup>和刘式达等<sup>[198,199]</sup>较系统地研究了大气中非线性波动问题,讨论了大气非线性波动的共同特征,分析了正压模式大气中地形对非线性 Rossby 波的影响,系统归纳了重要的非线性方程的各类显式行波解。谭本旭和伍荣生<sup>[200]</sup>采用多尺度摄动法研究了 Rossby 包络孤立波的碰撞及相互作用。黄思训和张铭<sup>[201]</sup>利用函数逼近方法讨论了大气中非线性波动的非频散解。高守亭等<sup>[202]</sup>将一维重力约化摄动法推广到多维情形,指出此法是研究大气非线性波传播相互作用的有力工具。黄思训等<sup>[203]</sup>采用追赶法技巧、拓扑方法以及奇异摄动等方法探讨了有粘性大气及流体中非线性行波解。

## 8 阻塞高压非线性动力学

除了第 6 节中介绍的用低阶谱方法讨论阻塞形势的多平衡态理论外,尚有其他很多关于阻塞形成的非线性动力学理论。巢纪平和黄瑞新<sup>[204]</sup>最早提出用 Rossby 孤立波

来解释大气中的阻塞高压和切断低压。朱抱真等<sup>[205]</sup>和王斌<sup>[206]</sup>用 Pedlosky<sup>[90]</sup>的弱非线性理论分别研究了无耗散情况和有耗散情况下大气超长波和纬向基流之间的非线性相互作用,并通过它们的非线性反馈来解释偶极子阻塞的形成。伍荣生等<sup>[207,208]</sup>研究了三波非线性 Rossby 波共振和准共振相互作用,并与阻塞环流联系起来。刘式达和刘式适<sup>[209]</sup>用孤立 Rossby 波来解释阻塞形势。陆维松<sup>[210]</sup>提出波动非线性准共振可能产生阻塞,并提出准共振的频率偏离与中纬低频振荡有关。李崇银<sup>[13,211]</sup>认为由于大气中存在地形和热源的强迫波,当移动性槽脊的频率和波数与强迫波的频率和波数相等或接近时,将产生非线性共振或准共振,并由此导致阻塞环流的生成。罗哲贤等<sup>[212,213]</sup>用强迫耗散 KdV 方程来解释区域性阻塞流型的形成。陈忠明等<sup>[214]</sup>研究了振荡型 Rossby 孤立波与阻塞。邹捍和黄荣辉<sup>[215]</sup>、陆日宇和黄荣辉<sup>[216]</sup>研究了波流相互作用,认为波流相互作用使得西风减弱,为阻塞形势的建立提供了先行条件。

科研工作者系统地研究了阻塞的非线性动力学,获得了有意义的结果。罗德海和纪立人<sup>[217~220]</sup>提出用代数 Rossby 孤立波来解释偶极子阻塞,导出了非线性 Schrödinger 方程并最先提出阻塞形成的包络 Rossby 孤立子理论,理论结果可较好地描述偶极子阻塞产生的物理机制及阻塞的生成、维持和崩溃等全过程。近几年,罗德海等<sup>[14,221~224]</sup>提出了阻塞形成的包络 Rossby 孤立子与天气尺度波相互作用理论,理论结果能够解释满意天气尺度波强迫阻塞环流的一些观测事实。理论结果指出,阻塞的产生是强迫包络孤立子从频散向非频散的转换过程,而在阻塞崩溃期间则相反。数值试验结果表明天气尺度波对阻塞的产生是起主导作用,而地形主要起位相锁相作用。罗德海等<sup>[225]</sup>进一步从观测资料上证实了天气尺度波激发的阻塞环流的生成是从频散系统向弱频散系统甚至非频散系统转换的过程,相反,阻塞的崩溃是阻塞系统从弱频散系统向频散系统转换的过程,因此,天气尺度波激发的阻塞环流的生命循环就是频散和非频散系统之间的转换过程。徐祥德等<sup>[17]</sup>和高守亭等<sup>[226]</sup>研究了阻塞维持过程中的波流相互作用。吴永辉和穆穆<sup>[227]</sup>研究了 Modons 解的 Liapunov 稳定性,证明了 Modons 解在 Liapunov 意义下是不稳定的,并引入了阻塞生命跨度的概念。

## 9 中小尺度非线性动力学

巢纪平<sup>[228]</sup>对层结大气中热对流发展的进行了非线性分析,讨论了积云发展初期的动力过程。他还研究了层结和风场对小尺度扰动发展的非线性影响<sup>[229,230]</sup>。李麦村研究了中尺度非线性重力波,他采用小参数展开法得到两层正压大气模式的非线性解<sup>[231]</sup>,分析了飚线形成的非线性过程,指出重力波的非线性集中是飚线形成的机制。还指出了这种非线性集中形成飚线不可缺少的天气学条件,其中关于大气层结和风力切变两个因素对于飚线形成是两个十分重要的因子,由此讨论了重力波对特大暴雨的触发作用<sup>[232]</sup>。进一步,在基本气流存在切变的情况下,得到了描写孤重力内波的 KdV 方程<sup>[233]</sup>。这种非线性孤重力波的振幅较大,在条件不稳定大气中可以形成不连续线——飚线,产生强大的辐合和对流,从而形成强风暴及暴雨。对于斜压大气的情况,许秦<sup>[234]</sup>和李麦村等<sup>[235]</sup>从理论上证明斜压非静力平衡大气中飚线的形成与演变和正压大气中一样可以归结为一类由 KdV 方程所描述的大气孤波,指出在斜压非静力平衡大气

中频散过程与非线性过程是爬线形成的主要过程，当这种孤波被激发出来时会形成一种孤波队列，与观测到的爬线或雷雨列队现象一致。黄思训和张铭<sup>[236]</sup>研究了一个不含科里奥利力、但包含频散效应和耗散效应的二层模式非线性重力行波解，指出振荡型的行波解的波形与一类爬线过境时气压涌升的波形很相似。罗德海<sup>[237]</sup>利用分叉和突变理论研究了非线性和凝结加热对对称不稳定性的作用，指出用尖点突变来解释大气中爬线的激发过程可能是一种可行的途径。丁一汇和沈新勇<sup>[238]</sup>对非线性对称不稳定的一些理论和方法进行了评述。李志锦等<sup>[80,239]</sup>根据强迫耗散的非线性动力学理论，研究了垫面强迫产生的一类强对流中尺度系统的动力学特征及其预报方法。张颖和张铭<sup>[240,241]</sup>用一个准二维非静力数值模式，通过数值试验的方法研究了加热反馈对线性和非线性对称不稳定的影响，还研究了线性和非线性横波型不稳定的中尺度模态的发展、演变和结构特征。张铭和张立凤<sup>[242]</sup>还对  $\alpha$  中尺度涡旋波的斜交型稳定性问题进行了研究。陆汉城等<sup>[243,244]</sup>用非线性对流对称不稳定探讨了涡旋大气运动中尺度扰动发展的可能机制。刘式达等<sup>[245]</sup>从定性和定量两方面分析了中尺度涡旋的三维螺旋结构，给出了螺旋斑图。

## 10 结语

本文旨在介绍自新中国成立以来中国科学院大气物理研究所在非线性大气动力学领域的一些重要成果和进展。在非线性适应过程方面，主要介绍了保守系统中的大尺度非线性适应、中尺度适应过程、旋转适应和强迫耗散非线性系统中向外源强迫的非线性适应等工作。在全局分析理论方面，总结了其重要结果。在大气可预报性方面，概述了非线性最优扰动在可预报性问题、可预报性的单调性原理、模式可预报性对机器精度的依赖性、重构相空间方法及可预报性的全局分析等研究。在低阶谱方法与多平衡态动力学方面，主要内容包括多平衡态与阻塞高压、大气环流的季节突变、副热带流型的多平衡态以及多平衡态产生的机理等。此外，对非线性稳定与不稳定理论、波流相互作用、非线性波动、阻塞高压非线性动力学、中小尺度非线性动力学等几个方面的研究成果也作了相应介绍。应当看到，这些研究还仅仅是揭开了大气非线性现象神秘面纱的一个小角，离最终看清其真面目还相差甚远。但我们坚信，随着非线性大气动力学中各种新思维、新理论和新方法的不断提出和深入发展，必将使大气科学上升到一个新的台阶。

致谢：穆穆研究员和段晚锁博士为本文提供了部分材料，特此致谢！

## 参 考 文 献

- 1 曾庆存，数值天气预报的数学物理基础（第一卷），北京：科学出版社，1979，543 pp.
- 2 郭秉荣、丑纪范、杜行选，大气科学中数学方法的应用，北京：气象出版社，1986，390 pp.
- 3 Zeng Qingcun, *Proceedings of International Summer Colloquium on Nonlinear Dynamics of the Atmosphere*, Beijing: Science Press, 1987, 406 pp.
- 4 刘式达、刘式适，非线性动力学和复杂现象，北京：气象出版社，1989，249 pp.

- 5 丑纪范, 大气动力学的新进展, 兰州: 兰州大学出版社, 1990, 214 pp.
- 6 朱抱真、金飞飞、刘征宇, 大气和海洋的非线性动力学概论, 北京: 海洋出版社, 1991, 328 pp.
- 7 丑纪范、刘式达、刘式适, 非线性动力学, 北京: 气象出版社, 1994, 201 pp.
- 8 赵松年, 非线性科学—它的内容、方法和意义, 北京: 科学出版社, 1994, 95 pp.
- 9 丑纪范、郜吉东, 长期数值天气预报(修订版), 北京: 气象出版社, 1995, 353 pp.
- 10 仪垂祥, 非线性科学及其在地学中的应用, 北京: 气象出版社, 1995, 273 pp.
- 11 郭秉荣、江剑民、范新岗等, 气候系统的非线性特征及其预测理论, 北京: 气象出版社, 1996, 254 pp.
- 12 刘式适、刘式达、谭本馗, 非线性大气动力学, 北京: 国防工业出版社, 1996, 251 pp.
- 13 李崇银, 气候动力学(第2版), 北京: 气象出版社, 2000, 515 pp.
- 14 罗德海, 阻塞非线性动力学, 北京: 气象出版社, 2000, 248 pp.
- 15 黄思训、伍荣生, 大气科学中数学物理问题, 北京: 气象出版社, 2001, 540pp.
- 16 丑纪范, 大气科学中的非线性与复杂性, 北京: 气象出版社, 2002, 203 pp.
- 17 徐祥德、高守亭, 外源强迫与波流作用动力学原理(第2版), 北京: 海洋出版社, 2002, 291 pp.
- 18 Rossby, C. G., On the mutual adjustment of pressure and velocity distribution in certain simple current system, I, *J. Mar. Res.*, 1937, **1**, 15~282.
- 19 Rossby, C. G., On the mutual adjustment of pressure and velocity distribution in certain simple current systems, II, *J. Mar. Res.*, 1938, **2**, 239~263.
- 20 Oboukhov, A. M., The problem of the geostrophic adaptation, *Izvestiya of Academy of Science USSR, Ser. Geography and Geophysics*, 1949, **13**, 281~189.
- 21 奥布霍夫, A. M., 大气中的适应过程, 罗四维等译, 北京: 科学出版社, 1956, 75 pp.
- 22 叶笃正、李麦村, 大气运动中的适应问题, 北京: 科学出版社, 1965, 126 pp.
- 23 Blumen, W., Geostrophic adjustment, *Rev. Geophys. Space Phys.*, 1972, **10**, 485~528.
- 24 曾庆存、叶笃正, 旋转大气中运动的适应过程问题的研究(一), 大气科学, 1981, **4**(4), 379~393.
- 25 曾庆存、叶笃正, 旋转大气中运动的适应过程问题的研究(二), 大气科学, 1982, **5**(1), 101~112.
- 26 Gill, A. E., *Atmospheric-ocean dynamics*, Academic Press, 1982, .
- 27 叶笃正、巢纪平, 论大气运动的多时态特征—适应、发展和准定常演变, 大气科学, 1998, **22**, 385~398.
- 28 伍荣生、方娟, 地转适应与锋生, 解放军理工大学学报, 2001, **2**, 1~6.
- 29 Yeh, T. C., On the formation of quasi-geostrophic motion in the atmosphere, *J. Meteor. Soc. Japan*, The 75 th Anniversary Volume, 1957, 130~134.
- 30 曾庆存, 扰动特性对大气适应过程的影响和测风资料的使用问题, 气象学报, 1963, **33**, 37~50.
- 31 曾庆存, 大气中的适应过程和发展过程(一)物理分析和线性理论, 气象学报, 1963, **35**, 163~174.
- 32 曾庆存, 大气中的适应过程和发展过程(二)非线性问题, 气象学报, 1963, **35**, 281~189.
- 33 伍荣生、巢纪平, 旋转大气中运动的多时态特征和时间边界层, 大气科学, 1978, **2**, 267~275.
- 34 叶笃正、李麦村, 大气各类运动的多时间尺度特性, 第二次全国数值天气预报文集, 北京: 科学出版社, 1979, 181~192.
- 35 李麦村, 大尺度大气运动的阶段性, 中国科学, 1979, (6), 509~607.
- 36 巢纪平, 关于“大气各类运动的多时间尺度特性”的讨论, 第二次全国数值天气预报文集, 北京: 科学出版社, 1979, 193~195.
- 37 伍荣生, 旋转大气中运动的多时态特征和时间边界层(II), 大气科学, 1980, **4**, 138~146.
- 38 Yeh, T. C. and Li Maicun, On the characteristics of scales of the atmospheric motions, *J. Meteor. Soc. Japan*, Ser. II, 1982, **60**, 16~23.
- 39 曾庆存, 旋转大气中运动的非线性相互作用和旋转适应过程, 中国科学, 1979, (10), 986~995.
- 40 曾庆存、叶笃正, 旋转大气中运动的适应过程, 力学学报, 1980, **13**, 1~11.
- 41 叶笃正、李麦村, 中小尺度运动中风场和气压场的适应, 气象学报, 1964, **34**, 409~423.
- 42 李麦村, 斜压大气中的位涡适应过程, 中国科学(B辑), 1982, 473~481.
- 43 陈秋士, 简单斜压大气中热成风的建立和破坏(一), 气象学报, 1963, **33**, 51~63.

- 44 陈秋士, 简单斜压大气中热成风的建立和破坏 (二), 气象学报, 1963, **33**, 153~161.
- 45 陈秋士、励名德, 四层模式热成风适应, 气象学报, 1964, **34**, 253~270.
- 46 骆启仁, 斜压大气中的地转适应过程和高空锋生过程, 中国科学技术大学学士学位论文, 1963.
- 47 Chao Jiping and Lin Yonghui, The foundation and movement of tropical semi-geostrophic adaptation, *Acta. Meteor. Sinica*, 1996, **10**, 129~141.
- 48 巢纪平, 热带地转适应运动的动力学基础, 气象学报, 2000, **58**, 1~10.
- 49 巢纪平, 论小尺度过程动力学的一些基本问题, 气象学报, 1962, **32**, 104~118.
- 50 曾庆存, 我国大气动力学和数值天气预报研究工作的进展, 大气科学, 1979, **3**, 256~269.
- 51 曾庆存, 斜压大气中的特征波动和地转适应过程, 大气科学, 1978, **2**, 1~14.
- 52 叶笃正、李崇银、王必魁, 动力气象学, 北京: 科学出版社, 1988, 221~243.
- 53 刘式适、刘式达, 大气动力学 (下), 北京: 北京大学出版社, 1991, 497~501.
- 54 刘式适、刘式达, 大气动力学 (上), 北京: 北京大学出版社, 1991, 180.
- 55 袁重光、曾庆存, 地转适应过程的数值试验, 气象学报, 1980, **38**, 97~105.
- 56 曾庆存、袁重光、李荣凤, 半球旋转适应过程的数值试验, 中国科学, 1980, (7), 687~695.
- 57 欧阳兵, 扰动与基本带状环流非线性相互作用的实验研究, 大气科学, 1989, **13**, 29~37.
- 58 叶笃正, 近年来我国大气科学研究的进展, 大气科学, 1979, **3**, 195~202.
- 59 曾庆存, 大气动力学的一些问题, 气象科技, 1980, (1), 1~5.
- 60 巢纪平、许有丰, 二层线性模式长期过程的一些计算, 动力气象论文集, 北京: 科学出版社, 1961, 90~95.
- 61 张可苏, 在有热源和耗散情况下的大气适应过程, 大气科学, 1980, **4**, 109~211.
- 62 丑纪范, 初始场作用的衰减与算子的特性, 气象学报, 1983, **41**(4), 385~392.
- 63 Chou Jifan, Some general properties of the atmospheric model in H space, R space, point mapping, cell mapping, in: *Proceedings of International Summer Colloquium on Nonlinear Dynamics of the Atmosphere* (Edited by Zeng Qingcun), 10-20 Aug. Beijing: Science Press, 1986, 187~189.
- 64 汪守宏、黄建平、丑纪范, 大尺度大气运动方程组解的一些性质, 中国科学 (B辑), 1989, **19**, 328~336.
- 65 李建平、丑纪范, 非定常外源强迫下大尺度大气方程组解的性质, 科学通报, 1995, **49** (13), 1207~1209.
- 66 李建平、丑纪范, 大气吸引子的存在性, 中国科学 (D辑), 1997, **27** (1), 89~96.
- 67 李建平、丑纪范, 地形作用下大气方程组解的渐近性态, 自然科学进展, 1999, **9**(12), 1110~1118.
- 68 Li Jianping, and Chou Jifan, Further study on the properties of operators of atmospheric equations and the existence of attractor, *Acta. Meteor. Sin.*, 1997, **11** (2), 216~223.
- 69 李建平、丑纪范, 湿大气方程组解的渐近性质, 气象学报, 1998, **55** (3), 187-198.
- 70 李建平, 大气和海洋动力学方程组的定性理论及其应用, 兰州大学博士学位论文, 1997, 209 pp.
- 71 李建平、丑纪范, 大气动力学方程组的定性理论及其应用, 大气科学, 1998, **22** (4), 443~453.
- 72 李建平、丑纪范, 大气方程组的惯性流形, 中国科学 (D辑), 1999, **29** (3), 270~278.
- 73 丑纪范, 大气动力学的若干进展和趋势, 现代大气科学的前沿与展望, 北京: 气象出版社, 1995, 71~75.
- 74 谢志辉、丑纪范, 大气动力学方程组全局分析的研究进展, 地球科学进展, 1999, **14**, 133~139.
- 75 长期数值预报小组 (巢纪平等), 一种长期数值天气预报方法的物理基础, 中国科学, 1977, (2), 162~172.
- 76 长期数值预报小组 (巢纪平等), 长期数值天气预报的滤波方法, 中国科学, 1979, (1), 75~84.
- 77 郭裕福, 近年长期数值天气预报滤波模式的进展, 大气科学, 1983, **7**, 328~334.
- 78 李建平、丑纪范, 气候动力学的全局分析理论及应用, 科学通报, 2003, **48**, 703~707.
- 79 张铭, 次天气尺度系统地转适应过程的数值试验, 大气科学, 1984, **8**, 46~53.
- 80 李志锦、丑纪范, 受下垫面强迫的一类强对流系统及预报, 中国科学 (B辑), 1993, **23** (10), 1114~1120.
- 81 吴国雄、刘屹岷, 热力适应、过流、频散和副高 I. 热力适应和过流, 大气科学, 2000, **24**, 433~446.
- 82 刘屹岷、吴国雄、宇如聪等, 热力适应、过流、频散和副高 II. 水平非均匀加热与能量频散, 大气科学, 2001, **25**, 317~328.
- 83 Arnold, V. I., Conditions for nonlinear stability of stationary plane curve linear flows of an ideal fluid, *Dokl. Akad. Nauk. USSR*, 1965, **162**, 975~978. English Transl.: *Soviet Math*, 1965, **6**, 773~777.

- 84 Arnol'd, V. I., On a priori estimate in the theory of hydrodynamic stability, *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Matematika*, 1966, **54**, 3~5. English Transl.; *Am. Math. Soc. Transl. (Series 2)*, 1969, **79**, 267~269.
- 85 Zeng Qingcun, Variational principle of instability of atmospheric motion, *Adv. Atmos. Sci.*, 1989, **6**, 137~172.
- 86 穆穆, 大气运动非线性不稳定性研究的若干新进展, *大气科学*, 1995, **19**, 494~509.
- 87 穆穆, 大气运动非线性稳定性研究中的能量-Casimir 方法, *力学进展*, 1998, **28**, 235~249.
- 88 穆穆, 大气运动的非线性稳定与不稳定性问题研究, *中国科学院院刊*, 2001, **16**(6), 432~435.
- 89 Mu Mu, and Wu Yonghui, Arnol'd Nonlinear stability theorems and their application to the atmosphere and oceans, *Surveys in Geophysics*, 2001, **22**, 383~426.
- 90 Pedlosky, J., Finite amplitude baroclinic waves, *J. Atmos. Sci.*, 1970, **27**, 15~30.
- 91 陆维松, 动力稳定性原理, 北京: 气象出版社, 1992, 298 pp.
- 92 Lorenz, E. N., Deterministic nonperiodic flow, *J. Atmos. Sci.*, 1963, **20**, 130~141.
- 93 Charney, J. G. and J. G. Devore, Multiple flow equilibria in the atmosphere and blocking, *J. Atmos. Sci.*, 1979, **36**, 1205~1216.
- 94 Charney, J. G., and D. M. Straus, Form-drag instability, multiple equilibria and propagating planetary waves in baroclinic, orographically forced, planetary waves system, *J. Atmos. Sci.*, 1980, **37**, 1157~1176.
- 95 陆维松, 正压非线性亚临界不稳定, *气象学报*, 2001, **59**, 641~651.
- 96 陶诗言、黄荣辉、曾庆存, 天气和气候动力学研究, 赵九章纪念文集, 叶笃正主编, 北京: 科学出版社, 1997, 60~86.
- 97 穆穆、季仲贞、王斌等, 理论和计算地球流体力学的研究与进展, *大气科学*, 2003, **27**(4), 700~722.
- 98 丑纪范, 大气动力学方程组的全局分析, *北京气象学院学报*, 1995, (1), 1~12.
- 99 丑纪范, 大气科学中非线性与复杂性研究的进展, *中国科学院院刊*, 1997, **12**(5), 325~329.
- 100 丑纪范, 四维同化的理论和新方法, 数值天气预报中的若干新技术, 廖洞贤等主编, 北京: 气象出版社, 1995, 262~294.
- 101 Li Jianping, and Chou Jifan, The effects of external forcing, dissipation and nonlinearity on the solutions of atmospheric equations, *Acta. Meteor. Sin.*, 1997, **11**(1), 57~65.
- 102 李建平、丑纪范, 大气多平衡态产生之根源, *科学通报*, 1996, **41** (22), 2061~2063.
- 103 李建平、丑纪范, 大气动力学方程组简化的算子约束法, *科学通报*, 2000, **45** (19): 2104~2108.
- 104 Lorenz, E. N., Energy and numerical weather prediction, *Tellus*, 1960, **12**, 364~373.
- 105 张邦林、丑纪范, 经验正交函数在气候数值模拟中的应用, *中国科学 (B辑)*, 1991, **21** (4), 442~448.
- 106 丑纪范, 气候数值预测的进展和发展前景, 21 世纪初大气科学回顾与展望——第三次全国大气科学前沿学科研讨会论文集, 北京: 气象出版社, 2000, 49~51.
- 107 李建平、丑纪范, 强迫耗散非线性大气方程的计算稳定性, *科学通报*, 1999, **44**(2): 214~217.
- 108 丑纪范, 关于短期气候预测会商综合集成的探讨, *新疆气象*, 1995, **18**(5), 1~7.
- 109 董文杰、丑纪范, 利用数值模式改进汛期降水预报综合集成的初步探讨, 气候预测研究, 王绍武主编, 北京: 气象出版社, 1996, 119~130.
- 110 董文杰, 1996, 我国夏季降水异常的统计分析、模式研究及预测方法探讨, 兰州大学博士学位论文, 129 pp.
- 111 丑纪范, 短期气候预测及其有关非线性动力学的进展, *内蒙古气象*, 1995, (6), 1~7.
- 112 郭秉荣, 气候系统的非线性特征及其预测理论, *甘肃气象*, 1998, **16**(2), 1~7.
- 113 Chou Jifan, and Xie Zhihui, Nonlinear dynamics and climate modeling, in: *Climate Variability*, Beijing: China Meteorological Press, 1993, 215~221.
- 114 Thompson, P. D., Uncertainty of initial state as a factor in the predictability of large-scale atmospheric flow pattern, *Tellus*, 1957, **9**, 275~295.
- 115 Lorenz, E. N., The predictability of hydrodynamic flow, *Trans. New York Acad. Sci.*, Ser. 2, 1963, **25**, 409~432.
- 116 Lorenz, E. N., Deterministic nonperiodic flow, *J. Atmos. Sci.*, 1963, **20**, 130~141.

- 117 纪立人、李志锦, 大气可预报性研究的新进展——对数值预报效果的预测, 数值天气预报中的若干新技术, 廖洞贤、柳崇健主编, 北京: 气象出版社, 1995, 365~391.
- 118 李崇银, 气候变化及可预报性 (CLIVAR) ——气候研究的国际新计划, 气候与环境研究, 1996, **1**, 87~95.
- 119 洛伦兹, E. N., 混沌的本质, 刘式达、刘式适、严中伟译, 北京: 气象出版社, 1997, 214 pp.
- 120 穆穆、李建平、丑纪范等, 气候系统可预报性理论研究, 气候与环境研究, 2002, **7**, 227~235.
- 121 Lorenz, E. N., A study of the predictability of a 28-variable atmospheric model, *Tellus*, 1965, **17**, 321~333.
- 122 Mu Mu, Nonlinear singular vectors and singular values, *Science in China (D)*, 2000, **43**, 375~385.
- 123 Mu Mu, and Wang Jiacheng, Nonlinear fastest growing perturbation and the first kind of predictability, *Science in China (D)*, 2001, **44**, 1128~1139.
- 124 Mu Mu, Duan Wansuo, and Wang Jiacheng, The predictability problems in numerical weather and climate prediction, *Adv. Atmos. Sci.*, 2002, **19**, 191~204.
- 125 Mu Mu, Duan Wansuo, and Wang Jiacheng, Nonlinear optimization problems in atmospheric and oceanic sciences, *Computational Mathematics and Modelling*, 2002, invited talk, 169~178.
- 126 丑纪范、徐明, 短期气候数值预测的进展和前景, 科学通报, 2001, **46**, 890~895.
- 127 新田尚, 天气的可预报性 (赵其庚、胡圣昌译), 北京: 气象出版社, 1988, 237 pp.
- 128 李建平、曾庆存、丑纪范, 非线性常微分方程的计算不确定性原理 I. 数值结果, 中国科学 (E 辑), 2000, **43**(5), 403~412.
- 129 李建平、曾庆存、丑纪范, 非线性常微分方程的计算不确定性原理 II. 理论分析, 中国科学 (E 辑), 2000, **43**(6), 550~567.
- 130 李建平, 算不准原理及其意义与启示, 中国科学院院刊, 2000, **15**(6), 428~430.
- 131 Simmons, A. J., Dynamical prediction; some results from operational forecasting and research experiments at ECMWF, *Long-Range Forecasting Research Publication*, WMO, Series No. 1, 1983, 187~206.
- 132 杨培才、陈烈庭, 埃尔尼诺/南方涛动的可预报性, 大气科学, 1990, **14**, 64~71.
- 133 杨培才、刘锦丽、杨硕文, 低层大气运动的混沌吸引子, 大气科学, 1990, **14**, 335~341.
- 134 郑祖光、刘式达, 用大气湍流资料计算 Lyapunov 指数和分维, 气象学报, 1988, **46**, 41~48.
- 135 李建平、丑纪范, 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, 1996, **54**, 312~323.
- 136 李建平, 用一维时间序列确定吸引子维数中应注意的两个问题, 高原气象, 1996, **15**(2), 229~233.
- 137 Chou Jifan, Predictability of the atmosphere, *Adv. Atmos. Sci.*, 1989, **6**(3), 335~346.
- 138 Hsu, C. S., A generalized theory of cell to cell mapping dynamical systems, *ASME J. Appl. Mech.*, 1980, **47**, 931~939.
- 139 Hsu, C. S., *Cell to Cell Mapping—A Method of Global Analysis for Nonlinear System*, New York: Springer-Verlag, 1987, 358pp.
- 140 范新岗、张红亮、丑纪范, 气候系统可预报性的全局研究, 气象学报, 1999, **57**, 190~197.
- 141 吴王杰、张韧、黄思训, 非线性科学的气象应用研究, 地球科学进展, 1995, **10**, 523~530.
- 142 Charney, J. G., and D. M. Straus, Form-drag instability, multiple equilibria and propagating planetary waves in baroclinic, orographically forced, planetary waves system, *J. Atmos. Sci.*, 1980, **37**, 1157~1176.
- 143 Zhao Jingxia, and Zhu Baozhen, Sensitivity of the multiple equilibria to governing system, *Adv. Atmos. Sci.*, 1989, **6**, 33~43.
- 144 朱正心、朱抱真, 纬向不对称热力强迫下超长波的非线性平衡态与阻塞形势, 中国科学 (B 辑), 1982, (4), 361~371.
- 145 朱正心, 地形与热力共同作用下超长波的非线性平衡态与阻塞形势, 大气科学, 1983, **7**, 13~22.
- 146 朱正心, 阻塞动力机制中两个本质性的物理因子, 大气科学, 1984, **8**, 233~241.
- 147 金飞飞、朱抱真, 大气环流的不连续振荡和指数循环, 气象学报, 1986, **44**, 38~46.
- 148 金飞飞、朱抱真, 强迫波、自由波和纬向气流的相互作用 I. 平衡态环流的分支, 中国科学 (B 辑), 1986,

(6), 663~672.

- 149 金飞飞、朱抱真, 强迫波、自由波和纬向气流的相互作用 II. 高低指数的转换和振荡的定性分析, 中国科学 (B辑), 1986, (8), 889~896.
- 150 叶笃正、陶诗言、李麦村, 在六月和十月大气环流的突变现象, 气象学报, 1958, **29**, 249~263.
- 151 李麦村、罗哲贤, 6月和10月大气环流突变的非线性机制, 中国科学 (B辑), 1983, (2), 187~192.
- 152 柳崇健、陶诗言, 副高北跳与月尖突变, 中国科学 (B辑), 1983, (5), 474~480.
- 153 缪锦海、丁敏芳, 热力强迫下的大气平衡态突变与季节变化, 中国科学 (B辑), 1985, (1), 87~96.
- 154 Zhu Baozhen, Dynamic processes of the sudden change in seasonal variations, in: *Proceedings of International Summer Colloquium on Nonlinear Dynamics of the Atmosphere*, Edited by Zeng Qingcun, 10-20 Aug. Beijing: Science Press, 1986, 48~66.
- 155 Zhu Baozhen, and Zhao Jingxia, Multiple flow equilibria in tropical circulation and monsoon, *Adv. Atmos. Sci.*, 1987, **4**, 375~384.
- 156 李麦村、罗哲贤, 北半球夏季副热带流型的多平衡态特征, 大气科学, 1985, **9**, 423~427.
- 157 陶诗言等, 中国夏季副热带天气系统若干问题的研究, 北京: 科学出版社, 1963.
- 158 李麦村、罗哲贤, 湿过程对北半球夏季大气环流的作用, 大气科学, 1987, **11**, 341~350.
- 159 Lorenz, E. N., Low-order models of atmospheric circulations, *J. Met. Soc. Japan*, 1982, **60**, 255~267.
- 160 李麦村、罗哲贤, 湿过程对多平衡态及副热带流型的影响, 中国科学 (B辑), 1988, **18** (1), 105~112.
- 161 刘四臣、李维亮, 热力强迫下斜压大气的多平衡态与副热带高压, 中国科学 (B辑), 1987, **17**, 441~450.
- 162 李维亮、刘四臣, 热力强迫对湿斜压大气中南亚高压平衡态的影响, 气象学报, 1991, **49**, 448~457.
- 163 Lorenz, E. N., Formulation of a low-order model of a moist general circulation, *J. Atmos. Sci.*, 1984, **41**, 1933~1945.
- 164 李麦村、罗哲贤, 大气环流形态的分支现象, 大气科学, 1984, **8**, 161~169.
- 165 李麦村、罗哲贤, 平衡态向周期态的分支和副热带流型的两类低频振荡, 中国科学 (B辑), 1985, (5), 551~560.
- 166 李麦村、罗哲贤, 湿过程对北半球夏季大气环流低频振荡的影响, 中国科学 (B辑), 1986, **16**, 320~327.
- 167 秦建春、朱抱真, 近共振热力强迫作用下多重平衡态的激发、建立和转换 (一) —多重平衡态的渐近解, 大气科学, 1986, **10**, 371~382.
- 168 秦建春、朱抱真, 近共振热力强迫作用下多重平衡态的激发、建立和转换 (二) —多重平衡态机制的理论分析, 大气科学, 1987, **11**, 145~152.
- 169 吴国雄、董步文, 大气平衡态的动力特征 I: 多平衡态的共面和非共面性质, 大气科学, 1990, **14**, 267~276.
- 170 吴国雄、董步文, 大气平衡态的动力特征 II: 大气的振荡机制和稳定平衡态的吸引机制, 大气科学, 1990, **14**, 385~394.
- 171 许有丰, 不同尺度波动的非线性相互作用和大气的指数循环过程, 大气科学, 1984, **8**, 382~391.
- 172 杨培才, 33 模 Lorenz 系统的某些总体特征, 大气科学, 1987, **11**, 48~57.
- 173 杨培才、刘锦丽, 耦合的八模 Lorenz 系统的分叉特征, 大气科学, 1988, **12**, 396~404.
- 174 李崇银, 当代大气科学的几个重大研究课题, 大气科学, 1987, **11**, 430~440.
- 175 李崇银、黄荣辉、杨大升等, 近几年中国大气动力学的主要进展, 气象学报, 1995, **53**, 260~270.
- 176 高守亭, 瞬变波同纬向平均流相互作用研究进展, 21 世纪初大气科学回顾与展望——第三次全国大气科学前沿学科研讨会论文集, 北京: 气象出版社, 2000, 144~148.
- 177 叶笃正, 波状基本气流中的若干扰动动力学问题, 气象学报, 1964, **34**, 1~10.
- 178 Zeng Qingcun, On the evolution and interaction of disturbances and zonal flow in rotating barotropic atmosphere, *J. Meteor. Soc. Japan*, 1982, **66**, 24~36.
- 179 Zeng Qingcun, The evolution of Rossby-wave packet in a three-dimensional baroclinic atmosphere, *J. Atmos. Sci.*, 1983, **40**, 73~84.
- 180 曾庆存, 强迫基流上 Rossby 波包的结构和演变, 中国科学 (B辑), 1985, (4), 377~385.

- 181 Zeng Qingcun, Lu Peisheng, Li Rongfeng, et al., Evolution of large scale disturbances and their interaction with mean flow in a rotating barotropic atmosphere Part I., *Adv. Atmos. Sci.*, 1986, **3**, 39~58.
- 182 Zeng Qingcun, Lu Peisheng, Li Rongfeng, et al., Evolution of large scale disturbances and their interaction with mean flow in a rotating barotropic atmosphere Part II., *Adv. Atmos. Sci.*, 1986, **3**, 172~188.
- 183 张明华, 大气动力学中连续谱及其在大气环流中的重要地位, 中国科学院大气物理研究所博士学位论文, 1987.
- 184 曾庆存、任舒展, 斜压大气中连续谱动力学理论及应用 I. 连续谱动力学理论, 中国科学 (B 辑), 1995, **25**, 1210~1218.
- 185 任舒展、曾庆存, 斜压大气中连续谱动力学理论及应用 II. 大气环流中的连续谱和离散谱, 中国科学 (B 辑), 1995, **25**, 1329~1338.
- 186 Zeng Qingcun, The development characteristics of quasi-geostrophic baroclinic disturbance, *Tellus*, 1983, **35A**, 337~349.
- 187 廖洞贤, 切变涡度和曲率涡度在正压大气中的相互转化及其在天气预报中的应用, 气象学报, 1963, **33**, 512~517.
- 188 陈英仪、巢纪平, 螺旋 Rossby 波的波作用守恒和稳定性, 中国科学 (B 辑), 1983, (7), 663~672.
- 189 Wu Guoxiong, Non-acceleration theorem in a primitive equation system I. Acceleration of zonal mean flow, *Adv. Atmos. Sci.*, 1989, **6**, 1~20.
- 190 吴国雄、陈彪, 原始方程系统中的无加速定理 II. 纬向平均温度的变化, 大气科学, 1990, **14**, 143~154.
- 191 高守亭、陶诗言, 高空急流加速与低层锋生, 大气科学, 1991, **15**, 11~21.
- 192 李贤琅, 旋转大气中有限振幅扰动波包与基本气流的非线性共振相互作用, 气象学报, 1985, **43**, 450~457.
- 193 Luo Dehai, and Li Chongyin, *Climate, Environment and Geophysical Fluid Dynamics*, Beijing: China Meteorological Press, 1993, 111~112.
- 194 伍荣生, 长波近似与大气中线性与非线性 Rossby 波, 中国科学 (B 辑), 1985, (12), 1149~1158.
- 195 刘式适、刘式达, 地球流体中的非线性波动, 中国科学 (B 辑), 1983, (3), 279~289.
- 196 Liu Shikuo, and Liu Shida, Nonlinear waves in barotropic model, *Adv. Atmos. Sci.*, 1985, **2**, 147~157.
- 197 刘式适、谭本旭, 地形作用下的非线性 Rossby 波, 应用数学和力学, 1988, **9**(3), 229~240.
- 198 刘式达、刘式适, 大气非线性波动的共同特征, 科学通报, 1986, **31**(7), 528~531.
- 199 刘式达、刘式适、叶其孝, 非线性演化方程的显示行波解, 数学的实践与认识, 1998, **28**(4), 289~301.
- 200 谭本旭、伍荣生, 非线性 Rossby 波及其相互作用 I. Rossby 包络孤立波的碰撞, 中国科学 (B 辑), 1993, (4), 437~448.
- 201 黄思训、张铭, 大气中非线性波动的非频散解, 中国科学 (B 辑), 1987, **17** (11), 1236~1246.
- 202 高守亭、杨惠君, 多维约化摄动和大气中的非线性波动, 大气科学, 1986, **10**, 35~45.
- 203 Huang Sixun et al., Structure of flood wave with viscosity, *Math. Methods in the Applied Sci.*, 2000, **23**, 949~963.
- 204 巢纪平、黄瑞新, 旋转正压大气中的椭圆余弦波, 中国科学, 1980, (7), 696~705.
- 205 朱抱真、王斌, 有限振幅超长波的发展及对流层大气环流的指数循环, 中国科学, 1981, (1), 73~84.
- 206 王斌, 非绝热有限振幅超长波的演变和大气环流的中长期变化, 中国科学 (B 辑), 1982, (6), 566~576.
- 207 伍荣生, 正压大气中波动共振与能量变化, 中国科学, 1979, (2), 195~203.
- 208 伍荣生、苏炳凯, 非线性共振与中期天气变化, 气象学报, 1981, **39**, 386~393.
- 209 刘式达、刘式适, 大气中非线性椭圆余弦波和孤立波, 中国科学 (B 辑), 1982, 372~384.
- 210 陆维松, 正压大气波动准共振与中纬低频振荡, 中国科学 (B 辑), 1991, **21**, 102~112.
- 211 李崇银, 大气低频振荡 (修订版), 北京: 气象出版社, 1993, 310 pp.
- 212 罗哲贤, 阻塞高压形成的数值试验, 中国科学 (B 辑), 1989, **19**, 665~672.
- 213 罗哲贤、马镜娴, 强迫耗散非线性系统的局域阻塞和流型, 大气科学, 1991, **15**, 17~25.
- 214 Chen Zhongming et al., Oscillatory Rossby Solitary waves in the atmosphere, *Adv. Atmos. Sci.*, 1994, **10**, 11~17.

- 215 邹捍、黄荣辉, 北半球阻塞形势的建立与维持道德 E-P 通量诊断分析, 中国科学 (B 辑), 1988, **18** (2), 202~215.
- 216 陆日宇、黄荣辉, 关于阻塞过程中波数域能量的诊断分析, 大气科学, 1996, **20**, 269~278.
- 217 罗德海, 大气中大尺度包络孤立子理论与阻塞环流, 北京: 气象出版社, 1999, 113 pp.
- 218 罗德海, 阻塞与天气尺度波相互作用的研究进展, 21 世纪初大气科学回顾与展望——第三次全国大气科学前沿学科研讨会论文集, 北京: 气象出版社, 2000, 124~127.
- 219 Luo Dehai, and Ji Liren, Algebraic solitary Rossby waves and blocking in the atmosphere, *Adv. Atmos. Sci.*, 1988, **5**, 445~454.
- 220 罗德海、纪立人, 大气阻塞形成的一个理论, 中国科学 (B 辑), 1990, **20** (1), 111~121.
- 221 罗德海、纪立人, 地形对正压大气中 Modon 形成的影响和大气阻塞, 大气科学文集, 北京: 科学出版社, 1990, 122~129.
- 222 Luo Dehai, Planetary-scale baroclinic envelope Rossby solitons in a two-layer model and their interaction with synoptic-scale eddies, *Dyn. Atmos. Oceans.*, 2000, **30**, 27~74.
- 223 Luo Dehai, and Li Jianping, Barotropic interaction between planetary- and synoptic-scale waves during the life of blocking, *Adv. Atmos. Sci.*, 2000, **17**, 649~670.
- 224 Luo Dehai, and Li Jianping, Interaction between a slowly moving planetary-scale dipole envelope Rossby soliton and a wavenumber-two topography in a forced higher order nonlinear Schrödinger equation, *Adv. Atmos. Sci.*, 2001, **18**(2): 239-256.
- 225 Luo Dehai, Li Jianping, and Huang Fei, Life cycles of blocking flows associated with synoptic-scale eddies; observed results and numerical experiments, *Adv. Atmos. Sci.*, 2002, **19**, 594~618.
- 226 高守亭、朱文妹、董敏, 大气低频变异中波流相互作用 (阻塞形势), 气象学报, 1998, **56**, 665~679.
- 227 吴永辉、穆穆, 偶极涡的 Liapunov 意义下非线性不稳定性及大气阻塞现象探讨, 自然科学进展, 1999, **9**, 369~372.
- 228 巢纪平, 层结大气中热对流发展的一个非线性分析, 气象学报, 1961, **31**, 191~204.
- 229 巢纪平, 层结和风场对小尺度扰动发展的非线性影响, 气象学报, 1962, **32**, 164~176.
- 230 巢纪平、周晓平, 积云动力学, 北京: 科学出版社, 1965, 116 pp.
- 231 李麦村, 飚线形成的非线性过程, 中国科学, 1976, (6), 592~601.
- 232 李麦村, 重力波对特大暴雨的触发作用, 大气科学, 1978, **2**, 201~209.
- 233 李麦村, 大气中飚线形成的非线性过程与 KdV 方程, 中国科学, 1981, (3), 341~350.
- 234 许秦, 层结大气中的内惯性重力孤立波与飚线形成的非线性过程, 中国科学 (B 辑), 1983, (1), 87~73.
- 235 李麦村、薛纪善, 斜压大气中飚线的非线性过程与 KdV 方程, 大气科学, 1984, **8**, 143~152.
- 236 黄思训、张铭, 非线性重力行波解研究, 中国科学 (B 辑), 1991, **21** (10), 1110~1120.
- 237 罗德海, 大气中对称运动的非线性稳定性分析, 大气科学, 1990, **14**, 181~187.
- 238 丁一汇、沈新勇, 对称不稳定理论及其应用 (二) 非线性理论, 应用气象学报, 1994, **5**, 470~476.
- 239 李志锦, 下垫面强迫产生的一类强对流中尺度系统的特征及其预报方法, 兰州大学博士学位论文, 1992, 62 pp.
- 240 张颖、张铭, 线性与非线性对称不稳定的数值试验, 气象学报, 1995, **53**, 225~231.
- 241 张颖、张铭, 线性和非线性横波型不稳定的数值研究, 气象学报, 1998, **56**, 447~457.
- 242 张铭、张立凤,  $\alpha$  中尺度涡旋波不稳定的研究, 21 世纪初大气科学回顾与展望——第三次全国大气科学前沿学科研讨会论文集, 北京: 气象出版社, 2000, 149~152.
- 243 陆汉城, 涡旋大气运动中尺度扰动发展的可能机制—非线性对流对称不稳定, 21 世纪初大气科学回顾与展望——第三次全国大气科学前沿学科研讨会论文集, 北京: 气象出版社, 2000, 153~158.
- 244 陆汉城、钟科、张大林, 1992 年 Andrew 飓风眼壁区倾斜上升运动发展的可能机制——非线性对流对称不稳定, 大气科学, 2002, **26**, 83~90.
- 245 刘式达、辛国君、刘式适等, 大气中尺度涡旋的三维螺旋结构理论, 气象学报, 2000, **58**, 151~158.

## Advances in Nonlinear Atmospheric Dynamics

Li Jianping<sup>1)</sup>, and Chou Jifan<sup>2)</sup>

1) (*State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029*)

2) (*Training Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081*)

**Abstract** Some advances in nonlinear atmospheric dynamics in the Institute of Atmospheric Physics (IAP), Chinese Academy of Sciences (CAS) since 1949 have been surveyed. Especially, some achievements and latest progresses in nonlinear adjustment process, nonlinear stability and instability, global analysis, predictability, low-order method and multiple equilibria dynamics, nonlinear wave, interactions between disturbances and zonal flow, nonlinear blocking dynamics, meso- and micro-scale nonlinear dynamics, and etc. other institutes are mainly summarized. The related advances in these fields mentioned above from other institutes in China are also partly introduced.

**Key words:** nonlinear atmospheric dynamics; nonlinear adjustment; global analysis; predictability; blocking high; multiple equilibria