

近几年中国大气动力学的主要进展*

李崇银 黄荣辉 杨大升 倪允琪

(中国气象学会动力气象学委员会)

摘 要

10 年来,尤其是最近几年来,中国科学家在动力气象学以及新兴发展起来的气候动力学的研究方面取得了明显的进展,许多成果得到国内外专家的重视和好评。本文就主要的几个方面作一概括性的介绍,以促进中国动力气象学和气候动力学研究的进一步发展。

关键词: 新进展,大气动力学,中国。

1 行星波动力学

准定常行星波的形成、演变、传播与异常是气候动力学中一个关键性的科学问题。在 1980 年代初,中国一些学者对这方面有了较系统的研究(黄荣辉,1982^[1];1983^[2];1984^[3]; Zeng Qingcun,1983^[4])。近年来,又根据行星波理论对北半球夏季大气环流遥相关、波流相互作用等进行了研究。

1.1 准定常行星波动力学的研究

中国学者在与 Nitta 同时及其后对东亚太平洋型(即后来 Lau 称的东亚北美型)进行了研究(黄荣辉等,1988^[5]),并指出这个遥相关型严重地影响东亚夏季短期气候变化与异常。又进一步利用波在缓变媒质中的传播理论和数值模拟研究了东亚太平洋型遥相关的一种形成机理,从理论和数值模拟提出西太平洋暖池上空,特别是菲律宾周围上空对流活动形成的强大热源所强迫产生的准定常行星波列的作用,还利用波射线的变化说明了这个遥相关型的年际变化(Huang Ronghui and Lu Li,1988^[6];黄荣辉等,1992^[7])。

关于行星波垂直传播特征,1980 年代后期人们更注意研究行星波的传播过程。利用实际观测资料分析了北半球行星波的垂直传播特征及其与基本流的相互作用,其分析结果与理论所得的结果一致,冬季准定常行星波在三维大气中传播存在着两支波导(黄荣辉、邹捍,1989^[8])。并用一个非定常 34 层线性化全球原始方程谱模式研究了地形强迫行星波垂直传播特征(黄荣辉和严邦良,1993^[9])。行星波垂直传播还直接受到垂直风切变和凝结加热的影响(李崇银,1987^[10])。

关于瞬变波与准定常行星波的关系,以前许多研究主要研究地形与热源对准定常行星波的形成作用,最近几年的研究表明了瞬变波对于准定常扰动有很大作用,并提出了阻塞高压的形成与行星波的增幅有关(邹捍与黄荣辉,1988^[11]);而瞬变涡旋对于阻塞高压

* 1994 年 9 月 12 日收到原稿,1994 年 11 月 24 日收到修改稿。

的维持起了很大作用。

1.2 关于大气环流无加速定理的研究

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。国外学者虽证明了球面大气准地转无加速定理。但是,对于行星尺度运动,其运动的南北宽度有可能超过 Rossby 变形半径,因此必须考虑非地转风分量对位涡度南北输送的贡献。去掉 Edmon 的假设,同样可求得球面准地转无加速定理。最近在进一步考虑了地形和非绝热加热等外源强迫的作用后,中国学者求得了原始方程系的无加速定理,这样更合理地描述大气纬向平均温度与西风的变化,并可应用于数值预报业务(Wu Guoxiong, 1989^[12]; 吴国雄等, 1990^[13])。

1.3 中层大气中的行星波动力学

中国学者从资料分析和数值模拟都发现, O₃ 总含量的 2 波振幅在热带基本气流为西风时比较大,指出这可能是由于行星波的强度变化所引起的(严邦良、黄荣辉, 1991^[14]; Huang Ronghui and Wang Liangying, 1990^[15])。

用波-流相互耦合的 34 层原始方程谱模式研究了热带 QBO 对中高纬度行星波分布的影响以及对 O₃ 的输送作用,结果表明行星波扰动产生的余差环流对 O₃ 的输送起了极重要的作用,行星波的变化对中高纬度地区平流层 O₃ 浓度的变化有直接影响(陈文、黄荣辉, 1994^[16])。

2 大气季节内振荡的动力学研究

大气季节内振荡是近些年来国内外普遍注意的研究课题,在大量资料分析研究其结构和活动规律的基础上,动力学机制研究也获得许多重要结果,并成为气候动力学的重要部分。

2.1 热带大气季节内(30—60d)振荡的动力学机制

热带大气常处于湿对流不稳定状态,积云对流加热的反馈是热带大气运动的主要能源。中国学者最先将对流凝结加热反馈(CISK)机制引入热带大气季节内振荡的动力学研究(李崇银, 1985^[17]),指出移动性 CISK 波(moving CISK mode)是驱动南亚季风系统 30—60d 振荡的重要机制。

针对热带大气季节内振荡主要缓慢东移的特征,国际上许多研究用在积云对流加热下的热带 Kelvin 波来进行动力学解释。针对 CISK-Kelvin 波理论难于解释热带大气季节内振荡有时的向西传播及与中纬度季节内振荡构成的波列特征,中国学者又提出了 CISK-Rossby 波理论(Li Chongyin, 1988^[18]; 李崇银, 1990^[19]; Liu Shikuo & Wang Jiyong, 1990^[20]),指出积云对流加热的反馈不仅可产生 CISK-Kelvin 波也能激发产生 CISK-Rossby 波,两者都是热带大气季节内振荡的驱动机制(Li Chongyin, 1993^[21]),在离赤道较远的热带地区 CISK-Rossby 波更为重要。

在同时考虑对流加热反馈和蒸发-风反馈的动力学研究中(李桂龙和刘式适, 1993^[22])不仅仍然得到了 CISK-Kelvin 波和 CISK-Rossby 波,而且表明,在没有对流加热的情况下,蒸发-风反馈不能激发产生类似赤道地区季节内振荡的波动。

2.2 中高纬度大气季节内振荡的动力学机制

在系统进行中高纬度大气季节内振荡的分析研究的基础上(李崇银, 1991^[23]), 发现其与热带大气季节内振荡有显著的不同结构和活动规律, 显示有不同的动力学机制, 进而开展了中高纬度大气季节内振荡的动力学研究。

国际上已有的研究和数值模拟表明, 大气对外源强迫可产生明显遥响应, 并可形成 PNA 和 EUP 波列, 但未指出这种响应的性质。中国的 GCM 数值模拟发现大气对外强迫(无论在热带或中纬度的强迫)所产生的响应主要是低频(30—60d)遥响应, 从而证明外源强迫是激发产生全球大气季节内振荡的重要机制(Li Chongyin & Xiao Ziniu, 1991^[24]; Li Chongyin et al., 1993^[25])。而且, 热带地区加热异常的强迫以及大气响应场的低频波列是热带大气和中纬度大气季节内振荡间相互作用的主要过程和机制(王国民和黄土松, 1993^[26])。

斜压不稳定是中高纬度长波槽脊发展的基本动力学机制, 但这种不稳定不直接激发低频波。最近的研究表明, 地形强迫 Rossby 波的不稳定可以激发产生中高纬度大气季节内振荡(罗德海和李崇银, 1992^[27])。其结果同观测到的中高纬度季节内振荡的尺度特征十分一致。

波与波的非线性相互作用, 尤其是准共振已被认为是产生大气阻塞形势的机制之一, 三波共振的理论分析表明(陆维松, 1991^[28]), 在一定条件下, 特别是在波的频率偏离影响下, 准共振可以产生季节内振荡(能量变化周期主要在 20—60d)。同时, 在有周期性外源强迫(周期不要太长)影响的情况下, Rossby 波通过共振相互作用可以形成大气季节振荡(Luo Dehai & Li Chongyin, 1993^[29]), 其相轨迹显示出有奇异吸引子的特征。

3 阻塞形势的动力学研究

阻塞形势是导致大气环流持续性异常, 严重影响长期天气和短期气候的重要问题。自从多平衡态及其失稳和转换理论问世以来, 中国学者基于非线性系统演变特征也对于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(金飞飞、朱抱真, 1986^[30])。近些年来, 中国学者更多地在局域性阻塞流型的形成方面进行了大量的动力学研究, 尤其是关于 Rossby 孤立波理论, 强迫耗散 KdV 动力学以及瞬变天气尺度扰动的重要作用等方面的研究有自己的特色, 深化了人们对阻塞形势的动力学机制的认识。

3.1 Rossby 孤立波理论

大气中的偶极子型流型是最典型的阻塞形势, 国际上在 1980 年代主要用 Modon 理论来进行动力学解释, 而中国学者则提出了 Rossby 孤立波理论(Luo Dehai and Ji Liren, 1988^[31], 罗德海、纪立人, 1989^[32]; 罗德海, 1990^[33])。进一步分析还表明, 偶极子阻塞可以通过 Rossby 波的调制不稳定发展而形成, 其阻塞形势可维持达 25d 左右, 最后通过能量频散而消失。这种 Rossby 孤立波理论既能反映偶极子阻塞的孤立波特征, 又能显示偶极子阻塞的衰减机制(频散作用), 从而较好解释了大气中偶极子阻塞的形成过程和衰退机制。

3.2 强迫耗散 KDV 动力学

在考虑强迫和耗散的情况下, 由正压涡度方程出发, 通过约化摄动方法, 扰动流函数

将满足强迫耗散 KDV 方程。在一定形式的定常强迫条件下,流型的定常强迫响应具有孤立子的形态,从而可以解释局域阻塞流型的形成(罗哲贤,1989^[34];罗哲贤、马镜娴,1991^[35])。

3.3 瞬变天气尺度扰动的激发

关于局域阻塞流型形成中天气尺度扰动的作用,国际上虽早有分析,但尚未认识得十分清楚。中国学者从不同尺度扰动能量转换的规律研究了瞬变(天气尺度)涡旋对阻塞流型形成的重要作用(吴国雄,1994^[36];吴国雄等,1994^[37])。

对于弱辐散相当正压大气,其变形半径达千公里量级,动能转换是双向的。分析 1980 年 7 月东北亚上空阻塞流型的形成,发现有三次天气系统从欧亚东移促使阻塞的形成;动能转换表明确有大量天气尺度扰动能量向行星尺度的阻塞系统转换。

4 ENSO(海-气相互作用)动力学

发生在热带太平洋地区的 ENSO 是目前热带地区海-气相互作用研究的一个焦点,这是因为 El Nino 事件一旦发生,将会在全球引起严重的气候异常,从而在世界许多地区造成严重的气候灾害。为此,对这一现象的产生机制及其演变规律的研究,是目前气象学界和海洋学界普遍关注的前沿研究课题。由于气象学家和海洋学家的努力,人们已认识到 ENSO 现象不仅是一事件(Event),而且是一种周而复始的循环(Cycle)。Bjerknes(1966)首先提出关于 ENSO 循环的产生机制。尽管从现在的研究成果来看,这个假设中没有考虑热带西太平洋的作用,没有考虑赤道海洋波动的作用以及没有考虑热带海洋冷水期与暖水期的关系,但是,这个假设无论对于海气相互作用的研究,或是对于气候学的研究都起很重要的作用。

4.1 ENSO 循环动力学机制的研究

国际上一些学者提出 ENSO 循环是在不稳定海-气相互作用下由于海洋 Kelvin 波与 Rossby 波传播的结果。按照这种理论,当赤道西太平洋的海表温度处于高的状态时,就会产生向东传播的 Kelvin 波,而暖的 Kelvin 波继续东传,当它传到赤道东太平洋就会产生 ENSO 现象。与此观点不同,中国一些学者强调海-气耦合波的作用,提出热带大气和海洋可以产生不稳定海-气耦合波,ENSO 循环则是由于这种耦合波作用的结果(Chao Jiping and Zhang Renhe,1988^[38];Zhang Renhe and Chao Jiping,1993^[39])。

4.2 亚洲、澳大利亚季风对 ENSO 循环的作用

上述的研究和 White et al.(1987)的研究说明了 ENSO 事件发生前赤道西太平洋海水热容量(OHC)必须有较大的正异常,即西太平洋暖池(Warm pool)处于暖的状态是 ENSO 事件发生必不可少的条件。然而,近来许多观测研究表明,只有暖池暖的条件,没有西风异常,ENSO 事件也不可能发生,热带太平洋的西风爆发对于 ENSO 事件的发生起触发作用。国外的研究认为与热带 30—60d 振荡相联系的超级云团活动可诱导西风爆发,并触发 El Nino 的发生。

中国学者首先提出东亚冬季风异常对于 El Nino 事件的发生起了很重要的作用(李崇银,1988^[40];Li Chongyin,1990^[41])。进一步的分析表明,亚洲、澳大利亚季风区产生的西风异常通过遥相关型传播到热带太平洋,使热带太平洋对流层下层产生西风异常,这对于

ENSO 事件的产生起了很重要作用(Huang Ronghui and Fu Yunfei, 1993)^[42]。资料分析和数值模拟表明, El Nino 与热带大气大气季节内振荡间存在清楚的相互作用(李崇银, 周亚萍, 1994,^[43])。

5 大气边界层和中尺度动力学的研究

5.1 大气边界层动力学

近年来国际上这方面的进展并不大,但中国在 PBL 动力学的一些领域却有发展,成绩比较突出。其中以非线性边界层动力学最为出色。主要是用地转动量近似和摄动法求解非线性边界层动力方程,研究大尺度场对边界层和边界层对自由大气的影响,得到在不同大尺度场情况下对经典 Ekman 螺旋线解的修正和讨论旋转减弱对锋生和对自由大气波动的影响。还用同样方法在各种湍流系数随高度变化情况下求解非线性边界层的细微结构,取得更符合实际的结果(徐银梓、赵鸣, 1988^[44])。还用局地坐标研究 PBL 流场特征和 σ 坐标中地形边界层的动力特征以进一步研究地形对边界层的影响(伍荣生, 1989^[45])。还研究了边界层中的适应过程,即研究 PBL 中初始偏离平衡态的流场向平衡态调整的过程(徐银梓、伍荣生^[46])。还研究了 PBL 中各种特征参数对边界层中大气运动动能耗散的影响(赵鸣, 1989^[47])。还在传统的边界层动力方程中引入速度三阶导数项的湍流色散力以解释负粘性现象(刘式适等, 1992^[48])。

5.2 中尺度动力学

近年来中国的两台 Doppler 雷达已开始运作,并取得一些结果。特别是对 1991 年江淮暴雨中中尺度风场的分析结果,对今后进一步开展中尺度动力学的理论研究和检验中尺度动力学理论都十分重要。同时,中尺度动力学的理论研究也取得了进展,如关于对称不稳定性理论,除了发展横波不稳定研究,还进一步深入地讨论了横波扰动的发展问题(王东海、周晓平, 1994^[49]; 张可苏, 1988^[50]),并使对称不稳定理论进一步联系实际,如用以解释梅雨锋暴雨带的形成和发展(余志豪, 陆汉城, 1988^[51])。同时非线性和凝结加热对称不稳定性的作用也取得新成果(罗德海, 1990^[52]),使这方面的研究前进了一步。近年来还进一步讨论了重力波在不同基流状态中的不稳定问题,研究了强非地转特征对大振幅重力波的影响及对强风暴系统的作用(孙淑清, 1990^[53]; 陆汉城等 1991^[54])。另外,还用半地转模式研究地形对冷锋、暖锋和锢囚锋的影响,得出迎风、背风坡上锋生、锋消的不同。此外,用中尺度系统的非静力平衡和强非线性模式已对深对流的发生发展开始了理论探讨,这是向难度较高问题进军的良好开端。

近年来数值模拟方法已普及到几乎所有各种中尺度天气现象。比较广泛的还是暴雨模拟。目前(包括引进的)中国已有 8 个研究和预报暴雨的模式,暴雨模拟已相当深入。最近在地形对暴雨形成上的研究有较多进展,同时结合中国东亚季风情况来研究参数化也有不少工作。这些研究使中国目前的暴雨短期数值预报达到国际领先水平。近年来对中 β 尺度对流风暴的动力学模拟也有不少进展,中国已建立起能研究主要过程的较好和较全面的模式,基本弄清了水物质中各相的作用(胡志晋等, 1988^[55]),以适应当前迫切需要的临近数值预报及人工影响天气的工作。近年来对各种中尺度现象如对锋面、边界层、地形风、海陆风和都市热岛效应等的数值模拟明显增多(李兴生等, 1990^[56]; 赵思雄,

1991^[57];金皓、王彦昌,1991^[58])。还用依托于相互耦合的动力-云模式模拟云场的宏观结构,得到与观测比较一致的结果(许焕斌、王思微,1990^[59])。

6 大气运动的连续谱

直到目前,大气动力学的研究主要采用的是流体力学中的标准模方法。然而,实际大气中扰动的演变并不能完全用特征波动表示;扰动的发展或衰减也常不同于用标准模得到的经典不稳定理论所描述的呈指数增长或衰减。

在中国学者提出用波包理论揭示大气连续谱扰动(Zeng Qingcun,1983^[4])的基础上,对于大气连续谱扰动的系统研究取得了可喜的成果。首先从动力学上证明了任意大气扰动按离散谱和连续谱函数展开的基本定理;用实际大气环流形势按展开理论进行分析,结果表明在一年四季中与连续谱相对应的扰动占着主导地位,尤其是对于天气尺度扰动,连续谱更为突出;用实际大气资料的分析计算表明,连续谱扰动所完成的角动量和能量输送占全部输送的绝大部分,证实了所谓“扰动滋养”西风主要是由连续谱扰动执行的(张明华,1987^[60])。

同标准模的不稳定能量呈指数增长不一样,连续谱扰动的不稳定能量增长是有限的,这更符合实际大气中扰动发展的情况。进一步还提出了估计大气中连续谱扰动能量增长上限的方法(任舒展,1992^[61]),发现能量增长的上限既依赖于初始扰动的形式又依赖于背景(基本气流)场的形式。

最近,中国学者进一步研究了斜压大气中的连续谱,并通过对实际大气环流的分析,指出了连续谱同离散谱的原则差别(任舒展,1993^[62])。首先,连续谱所构成的槽脊有随时间逐渐变平的趋势,表现了连续谱将最终被基流吸收的理论结果;同时连续谱构成的形势与大气环流的时间平均场(定常波)结构相似,显示出其全局特征。

过去有关波-流相互作用的研究都基于离散谱的分析,连续谱和离散谱对基本气流作用的分析计算表明,连续谱的影响要大得多,而且连续谱最终都将被基流吸收。因此,连续谱的作用是基本气流维持的主要因素。

连续谱和离散谱存在着明显相互作用,这种相互作用所导致的动量和热量向北输送,以及对基本气流的改变都起相当重要的作用。

7 气候动力学数值模拟

用数值模拟手段研究气候及其变化的动力学,是当代气候动力学研究的重要部分,中国学者几年来使用各类数值模式进行了大量研究,取得了显著的成绩。

7.1 海温异常(SSTA)的气候效应

海温异常(尤其是热带海温异常)已被认为是气候变化的重要强迫源,不少人用 GCM 进行了大量试验研究。通过对赤道西太平洋和印度洋、中纬度西太平洋以及赤道东太平洋等关键海区 SSTA 影响亚洲夏季风的过程及机制的模拟试验(Ni Yunqi, et al., 1989^[63]; 1991^[64]; 陈月娟等,1992^[65]),发现赤道西太平洋 SST 正距平将使印度季风增强,而赤道西印度洋 SST 正距平将使印度季风减弱。数值模拟还清楚地表明,北半球夏季的东亚—太平洋遥相关型的年际变化同赤道西太平洋 SST 有明显关系(黄荣辉、孙凤英,1992^[7])。

用 IAP GCM 所作的数值模拟试验不仅表明全球大气对赤道东太平洋 SST 正距平的响应主要是低频遥响应(李崇银、肖子牛, 1991^[66]; 肖子牛、李崇银, 1992^[67]); 而且对中纬度地区的外强迫(包括 SSTA)也将主要激发出大气低频遥响应, 并使得外强迫的影响持续较长时间(Li Chongyin, et al., 1993^[68])。另外, GCM 的数值模拟还表明, 通过欧亚波列的影响, 夏季大西洋的 SST 异常也会对东亚大气和环流及天气产生明显影响(杨修群等, 1992^[69])。

7.2 青藏高原热力异常及陆面过程对大气的影响

青藏高原的动力和热力作用已为人们所了解, 而数值模拟清楚地表明, 同雪盖有关的高原反照率增加, 导致地面热源减弱, 将造成亚洲大陆地面低压的减弱(刘晓东等, 1991^[70]), 并影响南亚夏季风活动, 例如减弱高原南侧的经向环流和降水(Zhang Zhenqiou, et al., 1991^[71])。高原加热异常的模拟表明, 异常加热将导致青藏高原对流层上部高压的增强和扩大以及位置偏西北, 同时使亚洲大陆低压加深(Qian Yongfu, 1991^[72]; Qian Yongfu, et al., 1992^[73])。

7.3 ENSO 的数值模拟和预测试验

利用一个有自由表面的太平洋环流模式与 AGCM 耦合, 中国学者很好地模拟了 El Nino 和 La Nina 的产生过程, 并进行了试验预报(Zeng Qingcun, et al., 1990^[74]; 张荣华等, 1991^[75]; Zhang Ronghua and M Endoh, 1994^[76])。

最近, 在分析已有模式基础上, 一个可用于 ENSO 模拟和预测试验的混合海-气耦合模式已基本研究成功(Ni Yunqi, et al., 1993^[77]), 该模式由 COLA R15 L18(菱形截断波数为 15, 垂直分层为 18 层)AGCM 和简单海洋模式(Zebiak-Caue 模式)耦合组成。15 个个例的预报试验结果表明, 其预报和观测的 Nino3 指数超前 15 个月的相关系数达 0.60(显著小于为 0.01); 预报绝对误差为 0.6—0.9℃。这表明混合海-气模式可能具有超前 15 个月预报 ENSO 的能力。同时还指出热带中太平洋海-气相互作用在热带中东太平洋海温变化中起重要作用。试验预报清楚地表明, 该模式具有避免严重气候漂移和计算量仅为完全海-气耦合模式一半, 两个明显的特点。

为了进一步改进和提高模式的预报能力和精度, 还根据奇异值分解方法(Singular value decomposition)的思想提出了一种可用于修正和消除模式中存在的系统误差的试验方案, 试验表明采用该方案可明显改进 COLA R15 AGCM 对风应力距平场的模拟结果(Ni Yuanqi, et al., 1993^[77])。

7.4 大气温室气体浓度变化的气候效应

利用一个两层 AGCM-海洋-海冰模式进行数值模拟研究指出 CO₂ 浓度加倍将使地表气温上升约 1.75℃, 但表现出很大地区性和季节差异性, 高增温区位于北半球高纬和南极, 且冬季增暖大于夏季, 全球降水略有增加(王会军等, 1992^[78])。利用全球大气-混合层海洋模式模拟指出, CO₂ 倍增也可对全球土壤湿度产生明显影响, 低纬度变干, 并且也具有季节差异性(赵宗慈等, 1990^[79]; 王万秋等, 1993^[80])。

8 非线性大气动力学

在 1980 年代广泛进行大气运动多平衡态、突变和分岔, 波与基流以及波与波相互作用

用研究的基础上,中国学者近年来特别注意非线性在气候动力学方面的应用,使其成为了大气非线性动力学的重要分枝,而对于气候变化问题来讲,由于时间尺度远大于大气能量耗散的时间尺度,其动力学研究必须考虑耗散和非绝热加热的重要作用,也就是说需要把气候动力学作为一个强迫耗散系统进行研究。

用 H 空间算子理论分别研究绝热无摩擦大气系统、强迫耗散线性系统以及强迫耗散非线性系统,发现它们的长期行为有根本的差别(丑纪范,1990^[81])。对于绝热无摩擦系统,有能量守恒的性质,初值的影响会不衰减地延续到无穷;对强迫耗散线性系统,初值影响将随时间衰减至零,存在唯一的渐近态且与初值无关;对于强迫耗散非线性系统,初值影响随时间衰减,渐近态可能与初值有关,由此会出现多态、突变和浑沌。

对强迫耗散的非线性大气动力学方程组的整体和全局行为的研究表明,大气动力学算子有向外源非线性适应的现象(汪守宏等,1989^[82]);并且提出了一种缩减大气环流模式自由度的新方法,即对模式的一个现实作 EOF 分析,从而找出支撑吸引子的少数自由度,并以此为基底获得简化模型(张邦林,丑纪范,1991^[83])。对大气数值模式的全局分析(Cell to Cell Mapping)还证明了其渐近行为可用浑沌吸引子上的概率测度来描写,这种概率测度由外强迫参数确定,与初始状态无关。这样,气候动力学可认为是研究这一概率测度的特征及其演变规律的学科(Chou Jifan and Xie Zhihui,1993^[84])。

根据相空间轨线估计气候吸引子值数的方法所确定出的气候吸引子的分维数,大致处于 2.2—4.8 之间,也显示出气候变化是相当复杂的非线性系统的行为(Liu shida 等,1990^[85])。如果把 ENSO 视为一个复杂的非线性动力系统的行为,已有的研究表明,对于这样的十分复杂的非线性系统,对其演变资料进行关联维数的分析,仍可看到具有一般的可预报性(杨培才,陈烈庭,1990^[86])。

本文第 1 和 4 节由黄荣辉执笔;第 2、3、6 和 8 节由李崇银执笔,第 5 节由杨大升执笔;第 7 节由倪允琪执笔。全文虽想尽量反映中国动力气象学和气候动力学方面的全面进展和成果,但由于时间关系,难免有遗漏之处。请见谅。

参考文献

- [1] Huang Ronghui and K Gambo. The response of a hemispheric multi-level model atmosphere to forcing by topography and stationary heat source. *J Meteor Soc Japan*. 1982. 60: 78—108.
- [2] 黄荣辉. 岸保勘三朗. 关于冬季北半球定常行星波传播另一波导的研究. *中国科学*, 1983, B 辑, 940—950.
- [3] 黄荣辉. 球面大气中行星波的波作用守恒方程及用波作用通量所表征的定常行星波传播波导. *中国科学*, 1984, B 辑, 766—775.
- [4] Zeng Qingcun. The evolution of Rossby-wave packet in a three-dimensional baroclinic atmosphere. *J Atmos Sci*. 1983. 40: 73—84.
- [5] 黄荣辉. 李维京. *大气科学(特刊)*. 1988. 107—116.
- [6] Huang Ronghui and Lu Li. Numerical simulation of the relationship between the anomaly of subtropical high over East Asia and the convective activities in the western tropical Pacific. *Adv Atmos Sci*. 1988. 6: 202—214.
- [7] 黄荣辉. 孙凤英. 北半球夏季遥相关型的年际变化及其数值模拟. *大气科学*. 1992. 16(1): 52—61.
- [8] 黄荣辉. 邹捍. 球面斜压大气中上传行星波与纬向平均气流的相互作用. *大气科学*. 1989. 13: 383—392.
- [9] 黄荣辉. 严邦良. 用线性化全球原始方程谱模式研究地形强迫行星波垂直传播特征. *大气科学*. 1993. 17: 257—

- 267.
- [10] 李崇银. 对流凝结加热和垂直风切变对行星波垂直传播的影响. 热带气象, 1987, 3: 191—196.
- [11] 邹捍, 黄荣辉. 北半球阻塞形势建立与维持的 E-P 通量诊断研究. 中国科学. B 辑. 1998. 2: 202—215.
- [12] Wu Guoxiong. Non-acceleration theorem in a primitive equation system I. Acceleration of zonal mean flow. Adv Atmos Sci. 1989. 6: 1—20.
- [13] 吴国雄, 陈彪. 原始方程系统中的无加速定理 I: 纬向平均温度的变化. 大气科学. 1990. 14: 143—154.
- [14] 严邦良, 黄荣辉. 34 层线性球面原始方程谱模式与模式大气对地形强迫的响应. 大气科学. 1991, 15 (1): 16—27.
- [15] Huang Ronghui and Wang Liangying. Relationship between the interannual variations of total ozone in the Northern Hemisphere and the QBO of basic flow in the tropical stratosphere. Adv Atmos Sci. 1990. 7: 47—56.
- [16] 陈文, 黄荣辉. 在行星波和纬向平均流耦合的模式中因行星波输送引起的臭氧年际变化的研究. 大气科学 (待发表).
- [17] 李崇银. 南亚夏季风槽脊和热带气旋活动与移动性 CISK 波. 中国科学 (B). 1985. 28: 668—675.
- [18] Li Chongyin. International summer colloquium on large-scale dynamics of the atmosphere. Beijing. August 10—20. 1988. 361—393.
- [19] 李崇银. 赤道以外热带大气中 30—50 天振荡的一个动力学研究. 大气科学. 1990. 14: 83—92.
- [20] Liu Shikuo and Wang Jiyong. A Baroclinic semi-geostrophic model using the wave-CISK theory and low-frequency oscillation. Acta Meteor Sinica. 1990. 4: 576—585.
- [21] 李崇银, 李桂龙. El Nino 影响热带大气季节内振荡的一个动力学研究. 大气科学 (待发表).
- [22] 李桂龙, 刘式适. Wave-CISK, 蒸发-风反馈和低频振荡. 大气科学, 1993, 17: 403—414.
- [23] 李崇银. 大气低频振荡. 1991. 北京: 气象出版社. 206.
- [24] Li Chongyin and Xiao Ziniu. 8th Conference on Atmospheric and Oceanic Waves and Instability. 14—18 October 1991. Denver. USA.
- [25] Li Chongyin et al.. Climate Variability. China Meteor Press. 1993. 177—190.
- [26] 王国民, 黄士松. 季节内尺度热带-中纬度相互作用机制初探. 大气科学, 1993, 17: 442—450.
- [27] 罗德海, 李崇银. 地形强迫 Rossby 波的不稳定和中高纬度地区 30—60d 低频振荡. 气候变化若干问题研究 82—86. 科学出版社. 1992. 246.
- [28] 陆维松. 正压大气波动准共振与中纬低频振荡. 中国科学 (B). 1991: 102—112.
- [29] Luo Dehai and Li Chongyin. Climate. Environment and Geophysical Fluid Dynamics. China Meteorological Press. 1993. 447: 111—112.
- [30] 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). 1986: 663—672.
- [31] Luo Dehai and Ji Liren. Algebraic Rossby solitary wave and blocking in the atmosphere. Adv Atmos Sci. 1988. 5: 445—454.
- [32] 罗德海, 纪立人. 大气阻塞形成的一个理论. 中国科学 (B). 1989. 1: 103—112.
- [33] 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.
- [34] 罗哲贤. 阻塞高压形成机制的数值研究. 中国科学 (B). 1989. 665—672.
- [35] 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 (4): 17—25.
- [36] 吴国雄. 大气中功能的双向转化和单向转化. 大气科学. 1994. 18: 508—518.
- [37] 吴国雄等. 瞬变涡动输送和阻高形成——1980 年夏我国的持续异常天气. 气象学报. 1994. 52: 308—318.
- [38] Chao Jiping and Zhang Rehe. The air-sea interaction waves in the tropics and their instabilities. Acta Meteor Sinica. 1988. 2: 275—287.
- [39] Zhang Renhe and Chao Jiping. Climate Variability. China Meteorological Press. 1993. 236—244.
- [40] 李崇银. 频繁强东亚大槽活动与 El Nino 的发生. 中国科学 (B). 1988: 667—675.
- [41] Li Chongyin. Interaction between anomalous winter monsoon in East Asia and El Nino events. Adv Atmos Sci.

- 1990, 7: 36—46.
- [42] Huang Ronghui and Fu Yunfei. Impact of Asian monsoon on the ENSO event. Proc of the seventh Japan and East China Seas study/Pacific Marginal Seas Work-shop, May 9—15, 1993, Qing dao, China.
- [43] 李崇银, 周亚萍. 大气季节内振荡和 ENSO 的相互关系. 地球物理学报, 1994, 37: 17—26.
- [44] 徐银梓, 赵鸣. 半地转三段 k 模式边界层运动. 气象学报, 1988, 46: 267—275.
- [45] 伍荣生. 地形与 Ekman 边界层中的气流. 气象学报, 1989, 47: 137—146.
- [46] 徐银梓, 伍荣生. 正压边界层中的风压场相互调整. 气象学报, 1988, 46: 393—402.
- [47] 赵鸣. 自由对流与稳定层结边界层风廓线的解析表达和边界层顶抽吸速度. 大气科学, 1992, 16: 18—28.
- [48] 刘式适, 刘式达. 湍流的粘性和频散效应. 大气科学, 1992, 16: 205—215.
- [49] 王东海, 周晓平. 斜压大气中尺度横波扰动的发展. 大气科学, 1994, 18: 61—71.
- [50] 张可苏. 斜压气流的中尺度稳定性 I. 横波型不稳定. 气象学报, 1988, 46: 285—392.
- [51] 余志豪, 陆汉城. 梅雨锋暴雨的中尺度雨带和雨峰团. 中国科学(B), 1988: 1002—1010.
- [52] 罗德海. 旋转正压大气中的非线性 Schrödinger 方程和大气阻塞. 气象学报, 1990, 48: 265—274.
- [53] 孙淑清. 梅雨锋中大振幅重力波的活动及其与环境场的关系. 大气科学, 1990, 14: 163—172.
- [54] 陆汉城等. 应用气象学报, 1991, 2: 264—273.
- [55] 胡志晋等. 积雨云中微物理过程的数值模拟(二)阵雨、冰雹、暴雨的个例研究. 气象学报, 1988, 46: 28—40.
- [56] 李兴生等. 坡地对城市热岛影响的数值研究. 气象学报, 1990, 48: 293—302.
- [57] 赵思雄. 用 10 层准拉格朗日有限区域模式对高原东侧锋生过程的数值模拟. 1991, 15(5): 40—50.
- [58] 金皓, 王彦昌. 三维海陆风的数值模拟. 大气科学, 1991, 15(5): 25—32.
- [59] 许焕斌, 王思微. 三维可压缩大气中的云尺度模式. 气象学报, 1990, 48: 80—90.
- [60] 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论文. 1987.
- [61] 任舒展. 正压准地转大气中纯粹连续谱能量增长上限的估计. 自然科学进展, 1992, 3: 269—272.
- [62] 任舒展. 准地转模型中的连续谱动力学理论及其在大气环流中的应用. 中国科学院大气物理研究所博士论文. 1993.
- [63] Ni Yunqi et al. The effects of sea surface temperature over the equatorial western Pacific and the Indian Ocean on the Asian summer monsoon. Acta Meteor Sinica, 1989, 3: 375—394.
- [64] Ni Yunqi et al. A numerical study of the mechanism for the effect of Northern winter Arctic ice cover on the global short-range climate evolution. Adv Atmos Sci, 1991, 8: 489—498.
- [65] 陈月娟等. 太平洋海温异常对其上空环流影响的分析及数值试验. 大气科学, 1992, 16: 592—600.
- [66] 李崇银, 肖子牛. 赤道东太平洋增暖对全球大气 30—60d 振荡的激发. 科学通报, 1991, 36: 1157—1160.
- [67] 肖子牛, 李崇银. 大气对外强迫低频遥响应的数值模拟 I: 对赤道东太平洋 SSTA 的响应. 大气科学, 1992, 16: 707—717.
- [68] Li Chongyin et al. Climate Variability, 1993, 177—190.
- [69] 杨修群等. 大西洋海温异常对东亚夏季大气环流影响的数值试验. 气象学报, 1992, 50(3): 349—354.
- [70] 刘晓东等. 夏季青藏高原与热带西太平洋下垫面热源异常对中国短期气候的影响. 高原气象, 1991, 10: 305.
- [71] Zhang Zhengqion et al. Numerical experiments on the effect of Qinghai-Xizang Plateau snow-cover on summer monsoon formation. Acta Meteor Sinica, 1991, 5: 442—455.
- [72] Qian Yongfu. Numerical experiments of the effects of initial desert moisture on the climate change. Adv Atmos Sci, 1991, 8: 459—470.
- [73] Qian Yongfu et al. Numerical simulation of heating anomaly effects of Tibetan Plateau on circulation in summer. Acta Meteor Sinica, 1992, 6: 70—81.
- [74] Zeng Qingcun et al. Experiments and problems of seasonal and extraseasonal predictions. Climate Change, Dynamics and Modelling, China Meteor Press, 373—378, 1990.
- [75] 张荣华, 曾庆存, 张学洪. 太平洋大尺度环流数值模拟 I: 长期平均环流. 大气科学, 1991, 15: 51—64.
- [76] Zhang Ronghua and Endoh M. Simulation of the 1986—1987 El Niño and 1988 La Niña events with a free surface

tropical Pacific Ocean general circulation model. J G R. 1994. 99 (4) : 7743--7759.

- [77] Ni Yunqi, Zebiak S E, Can M A, Marx L and Shukla J. Experimental ENSO prediction with a hybrid coupled ocean-atmospher model. the proceeding of AGU in Dec. 1993.
- [78] 王会军等. CO₂ 含量加倍引起的气候变化的数值模拟研究. 中国科学 (B). 1992 (6) : 663—672.
- [79] 赵宗慈等. 用全球大气混合层海洋环流模式模拟二氧化碳增加对土壤湿度季节变化的影响. 气象学报, 1990, 48: 450—458.
- [80] 王万秋等. IAP GCM 对全球海温异常的响应——CO₂ 引起气候变化的等效研究. 大气科学, 1993, 17: 129—136.
- [81] 丑纪范. 大气动力学的新进展. 兰州大学出版社, 1990.
- [82] 汪守宏, 黄建平, 丑纪范. 大尺度大气运动方程组成的一些性质——定常外源强迫下的非线性适应. 中国科学 (B), 1989, 3.
- [83] 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). 1991 (4) : 442—451.
- [84] Chou Jifan and Xie Zhihui. Nonlinear dynamics and climate modeling. *Climate Variability*, China Meteorological Press, 1991.
- [85] Liu Shida et al. Annual Report of LASG. 1990. 176—183.
- [86] 杨培才, 陈烈庭. 厄尔尼诺南方涛动的可预报性. 大气科学, 1990, 14: 64—71.

NEW ADVANCES OF ATMOSPHERIC DYNAMICS IN CHINA

Li Chongyin Huang Ronghui Yang Dasheng Ni Yunqi

(Committee of Dynamical Meteorology, Chinese Meteorological Society)

Abstract

In this paper, some new advances of atmospheric dynamics (dynamical meteorology and climate dynamics) in China in recent years are systematically introduced. It consists of the dynamics of planetary waves, the dynamics of atmospheric intraseasonal oscillation, the dynamics of the blocking pattern, ENSO (air-sea interaction) dynamics, atmospheric boundary layer and meso-scale dynamics, continuous spectra of atmospheric motion, numerical simulation of climate dynamics and nonlinear atmospheric dynamics. In recent 10 years in China, the studies on dynamical mechanism of atmospheric intraseasonal oscillation, the formation mechanism of blocking pattern, the interaction between El Nino and monsoon in East Asia, atmospheric continuous spectra, the modelling in the ocean-atmosphere coupled model and so on, not only possess characters but also have had important successes with higher level in the world. The goal of this paper is to promote further development of atmospheric dynamics in China and to have much more and better scientific results.

Key words: New advances, Atmospheric dynamics, China.