

我国大气动力学和数值天气预报 研究工作的进展

曾庆存

(中国科学院大气物理研究所)

我国自解放以来大气动力学和数值天气预报研究工作蓬勃发展,取得了不少可喜的成果。在祖国各地已初步形成了一支从事动力学和数值预报工作的力量,研究与天气预报实践密切相关的各种动力学问题,尤其是对我国天气影响很大的问题,同时也注意到基础理论问题的研究。我国数值天气预报的理论及数学方法的研究工作也有许多成果,数值天气预报业务亦已部分地建立了起来。不过,总的来说,我国在这两方面都还比较薄弱,今后应该大大加强,才能满足社会主义建设的需要。

关于我国在1959年以前的研究工作成果,已有文章总结^[1,2]。本文将介绍大气物理研究所近二十年来的研究工作进展,着重在近十年来的工作;在有材料的情况下,也旁及所外的工作。

一、大气动力学

大气动力学的范围很广,本文拟分下面12个方面进行介绍。至于大气湍流和边界层问题、大气环流和与天气系统动力分析等方面有关的工作,本刊另有专文介绍,这里从略。此外,由于动力学研究工作和数值预报研究结合得很紧密,同时在动力学研究中也大量应用“数值试验”方法,因此,在一些情况下,介绍动力学工作时不免要牵涉到一些数值预报工作;而在另一些情况下,我们则又把一部分动力学工作放到数值预报部分加以介绍。

1. 地转适应过程 重力和科氏力是作用于大气运动中的两种最基本的力;此外,大气还具有可压缩性。这些就使得大气运动具有天气图中常见的特点,例如大尺度运动的准无水平辐散性和准地转平衡。驱使大气运动经常保持这种准平衡状态的动力学过程就是所谓地转适应过程,它是一个基本的动力学过程。研究这基本过程是一项基本理论课题,但又有很重要的实用意义。从叶笃正的工作^[3]发表以来,我国对地转适应过程进行了全面的研究,建立了系统的线性和非线性理论。1965年前的工作在叶笃正和李麦村^[4]的专著^[4]中已有系统的总结。其后直至最近的工作大都包括在[5]中;最近叶笃正和曾庆存^[6]还有全面的介绍。因此,我们这里只给出文章目录^[3-6],并扼要介绍一下最主要的结果。

曾庆存^[6](1963)、叶笃正和李麦村^[4](1965)用尺度分析法证明大尺度运动中适应过程和天气系统的演变过程在时间尺度和物理本质上是可以区分的(大气运动过程的阶段

性)。在[8]中还提出“时间边界层”概念,说明局地非地转扰动引起一个暂态过程,其“时间边界层”厚度一般为 f^{-1} (f 为科氏参数)。后来许多人^[14-16,18-19]又阐述了这一概念,并指出 Rossby 波等演变过程的阶段性,从而提出并研究了大气运动的多时间尺度特性^[14-19]。在[5]中则从能量弥散过程的快慢讨论过同类问题。

经过适应过程之后,地转风场的结构完全由初始位涡度分布所决定。叶笃正^[3](1957)最早指出存在一个临界水平尺度,当初始扰动尺度小于此临界值时,涡旋场维持,气压场向它适应;若大于此临界值时则反之。后来曾庆存^[7,8](1960)和陈秋士^[9](1963)证明此临界尺度就是 Rossby 变形半径 L_0 。在斜压大气中,垂直结构也有重要影响^[7],结果可说明低空浅薄系统为热力成因,而深厚的或高空系统则是动力成因^[7,20]。这对解释许多大气动力过程都有用处。

曾庆存^[6,21]最先研究了非线性问题。指出适应过程和流场的演变过程同时进行,还有相互作用,使得流场从整体上处于准地转平衡状态,但非地转风又不断激发出来。此外,非线性过程还使得散度场和涡度场相匹配,即所谓前者向后者适应^[5]。上述这些结论为袁重光等^[22]的数值试验进一步证实。陈秋士^[9,23]则对二层模式中导至热成风关系的建立和破坏的因子作了细致的定性分析,并将它和斜压不稳定等天气过程联系起来。

对于中尺度系统,一般必须应用非线性方程。叶笃正和李麦村^[4](1964)得出这时有向准平衡状态适应,流线和“等能量线”平行。曾庆存^[5]又指出,当满足一定条件时孤立的中尺度系统最终有完全的适应。这可解释中小尺度天气系统的准线性结构或准对称涡旋结构。在非线性适应过程中,位涡度守恒律以及初始位涡度分布仍然是决定性因素,适应后的流线与等位涡度线平行。李麦村^[4]也得到相同的结果。

在斜压大气中,即便用了线性方程,由于存在着扰动能量向宇宙空间弥散的机理^[5,19],也有地转适应过程。由此可解释球面上超长波尺度运动的准地转性以及平流层以上环流的准带状结构。曾庆存^[5]还研究了近赤道地区的适应过程及其特点。巢纪平^[24]证明还有静力平衡适应。张可苏^[25]讨论了在有外热源和粘性消耗情况下的准地转平衡问题。骆启仁^[10]和曾庆存^[5]则讨论了锋生过程和适应过程的关系。吕克利^[26]讨论过切变基流对适应过程的影响。

2. 各种尺度运动的非线性相互作用和旋转适应过程 研究各种尺度运动的相互作用也是既有基本理论意义又有实用意义的。在旋转大气中,不仅有小尺度运动的能量向大尺度运动输送的过程,也有相反的过程。例如大块积云的对流运动维持着中尺度涡旋以及台风环流,而行星波能量向超长波的反馈则维持着超长波和带状环流。本小节只讲大尺度运动过程的相互作用。

Fjortoft^[25]最先讨论过球面上二维不可压缩流体绝对运动(不考虑地球自转影响)的能量变化,此时有“平均尺度守恒”,长波(L)和短波(S)的能量同时向中波(M)输出或者同时由中波输入($L \rightarrow M \leftarrow S$ 或 $L \leftarrow M \rightarrow S$)。曾庆存^[5,26]在计及地球自转之后得出:只有在子午线上的“尺度准守恒”,在旋转球面上行星尺度大气运动不具有各向同性;且在纬圈上还可以有 $L \leftarrow (M, S)$ 的过程。这些结论比较符合实际。Lonquet-Higgins 等^[27]曾将[25]的工作简化为平面问题,并讨论准地转模式三波相互作用特解,伍荣生^[28]用同样方法得到在三波相互作用中长波能量并不全部参与能量循环过程等结论。

此外,叶笃正和陈雄山^[29,30]讨论了带状环流和非带状扰动相互影响问题。先用线性化方程求出扰动演变,再按此计算其相互作用和对带状环流的反馈,指出扰动的相互作用是形成阻塞高压的重要机理。叶笃正和方宗义^[31]则指出,在考虑了相互作用之后,稳定的西风波可以变为不稳定的,也可以相反。

利用原始方程研究相互作用问题可以得到更深刻的结果。曾庆存^[3,26]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,即向地球旋转作用适应,因此称为“旋转适应过程”。例如,在全球面二维正压流动中最主要条件是位涡度等值线只有两个中心,在斜压大气中还须加上地面上没有平流等。若涡旋中心多于二个,则必不能趋向于带状纬圈环流。这机理可以给“负粘性”、指数循环和中期天气演变过程的主导因子等以较好的解释。我们^[32]还作过许多数值试验,结果与理论相符合。同时指出,利用准地转模式和平面近似常常得不到旋转适应过程,有可能给出虚假能量循环。

3. 大气波动 大气大尺度扰动可以大体上分为快波(重力-惯性波)和慢波(其本质是以有旋运动为主的流场,甚至闭合的涡旋也可归入此类),曾庆存^[3,33]对此有较详细的研究,并指出在中层大气(高50—90公里处)可能存在着垂直波长很短的重力-惯性波。对球面上小扰动的分类也给出了完善的结果^[3]。此外,在[5]中以及杜行远等^[33]和李麦村等^[34]还讨论了赤道地区波动的分类问题。在[5]中还从能量弥散观点研究了各种波的特性,指出最经常存在和最易发现的波长是群速为零的波。

在中小尺度运动中还有声波和对流(对流实质上也是涡旋运动,但一般必须计入浮力作用)。巢纪平^[34]、张可苏和周晓平^[35]以及叶笃正和李麦村^[4]给出滤去声波而又不严重歪曲其余中小尺度运动的方法。李麦村^[36-39]着重研究了非线性重力波,他和周晓平等^[39]还研究了重力波和暴雨的关系。非线性重力波可以形成不连续线——“断线”,产生强大的辐合和对流,从而形成强风暴及暴雨。巢纪平等^[40]则用二层模式线性化方程讨论重力-惯性波的传播特点,用以解释雷暴可能逆气流传播以及有“共鸣”现象。

曾庆存^[9]研究了快波和涡旋流场的相互作用,得到:在传播过程中快波能量增加伴随着波长变短,能量被吸收则波长变长;快波在传入气旋强风区时往往被吸收。此外,薛凡炳^[23]研究了月亮和地球运动引起的大气潮汐运动,指出月亮和太阳潮汐的差频波、地极移动波等是低速传播波,在下传时有很大的放大能力,可以影响天气系统;并讨论了一些可能的应用。

波动问题范围很广,其他有关问题将并入以后各小节中。

4. 行星波的传播和演变 行星波亦称长波或 Rossby 波,它是慢波,是描述高空槽脊等天气系统的一种简单模型。行星波的传播、演变和能量关系是一些很重要的问题,叶笃正等作过大量研究,第2、3小节所述的许多工作也属于这范围之内。此外,叶笃正^[20](1949, 1958)和曾庆存^[5]较系统地讨论过行星波能量弥散过程和上游效应等问题。孙淑清、陈隆勋和叶笃正等^[41-43]讨论扰动的垂直传播以及对流层和平流层相互作用问题,其中利用了“折射指数”概念,得出:在一定西风垂直分布情况下超长波可以通过平流层上下传播。

不稳定问题固然重要,但像流场形变等演变过程则是更广泛和更实际的问题。叶笃

正和陈雄山^[44]利用准地转二层模式线性化方程,得到南北槽的迭加和高低层扰动的迭加常可造成很迅速和强烈的发展,甚至超过斜压不稳定所得结果。其后,叶笃正^[45](1964)又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。卢佩生等^[46]进一步讨论非平直气流下小扰动演变的一般问题,得到扰动发展时波长变长、衰减时波长变短,由此给出一些演变过程模式,并指出所谓超长波后退常常是由于长波发展东移和变宽的结果。

自从气象卫星图片明显地表示出行星波的螺旋结构之后,引起了气象学者很大的注意。巢纪平和叶笃正^[47](1977)最早研究了正压大气螺旋行星波的动力学,指出它是维持大气环流物理图案的主要角色。刘式适和杨大升^[48]作了进一步研究,并扩展到斜压大气中。[46]的方法和结论也适用于讨论螺旋波问题。

5. 扰动不稳定和天气系统的演变 高空槽脊和地面气旋是否发展?这是天气预报员很关心的事。扰动的不稳定性理论就是最早从一个侧面来研究此问题。但自六十年代以来,国际上除针对热带天气系统提出“第二类条件不稳定”之外,进展不大。我国北京大学谢义炳^[49]和杨大升^[50,51]等对热带东风气流的不稳定问题进行了研究,得到不稳定与基流南北切变大小、纬度及扰动波长有关,不稳定波波长较短,并将这些结果和台风发展问题结合起来。叶笃正等^[52]讨论了超长波的不稳定问题,指出控制因子主要是静力稳定度和风速垂直切变。

曾庆存^[5]利用正压原始方程,导出关于迭加于平直切变基流上小扰动不稳定性判据的普遍公式,对高中纬和低纬都适用。若基流 $\bar{u} \ll \sqrt{\bar{\phi}}$,它就是郭晓岚正压不稳定判据的推广,但在不稳定情况下,快波亦有可能发展。其次,当 $\bar{u} > \sqrt{\bar{\phi}}$ 时,则有“超高速”不稳定,非地转风强烈发展。上述二者总称为“非地转不稳定”。

要讨论非平直基流下小扰动的不稳定问题,看来只能用[5]、[45]和[46]的方法。此外,廖洞贤^[53,54]利用非线性方程讨论时间变率(倾向),指出由于曲率涡度和切变涡度可以相互转换,由此得到很大的流场形变,并不需要满足线性化不稳定判据。还有,上面几小节亦有关于不稳定性的材料。

6. 超长波 超长波和中长期天气演变有密切联系,我国也有不少动力学研究工作。由于超长波和热源及地形有密切关系,这些工作大都考虑了这些因子的作用。

刘瑞芝等^[55]引入整层辐散来控制超长波移速。章基嘉^[56]则用多层准地转模式详细地讨论各因子对超长波演变的影响。

曾庆存^[5,57]推出能够兼顾超长波和长波的球坐标下的修正准地转模式,指出超长波应区分为经向度较大的和以纬圈环流为主的两大类,它们具有不同的动力学性质。李麦村^[58]以及丑纪范等^[59]则用 β 平面近似也得到同样结论,并指出Burger型超长波在垂直结构上是高模态。李麦村和姚棣荣^[60]还研究了热带地区的超长波和长波,指出经向超长波可能出现慢波和重力-惯性波混合的情况。

朱抱真^[60](1964)用二层准地转模式讨论大地形和热源作用对超长波的影响,指出这些因子可使超长波在固地地理区域内加深,超长波振幅有10-30天周期的变化。后来,丑纪范等^[59]和陈秋士^[61]也讨论同类问题。李崇银和朱抱真^[62](1963)用三层准地转模式和谱分解法(只取很少几个波)研究偏心绕极涡旋的形成及其性质,指出北半球大地形和热

源的偏心不对称分布是产生偏心扰动的原因。值得指出,如按旋转适应理论,也可以推出偏心涡旋的维持必须有热力因子作用。许有丰等^[63]基本上用和[62]同样的方法,但计入了辐射加热以及地面热源作用。

曾庆存^[5]指出,超长波可以基本上看作是一个被动系统,它是受地形、热源以及长波能量反馈控制的,向这些因子适应;滤去长波而单独讨论超长波性质的做法也许是不行的。

7 长期演变过程和准常定流场 这方面的问题又常称为大气环流问题。在50年代,叶笃正、顾震潮和朱抱真等对于建立东亚常定大气环流动力学模式有过重要贡献^[20]。其后,谢义炳和陈受钧等^[64,65]也研究了常定问题,[64]在给定热源与水平湍流情况下推出斜压西风风速和经圈环流分布,推广 Rossby (1947) 涡旋侧向混合假设。

顾震潮^[66] (1958) 最早用控制论的观点方法研究季节变化、年变化等大气环流长期演变问题,把大气看成为在太阳辐射的输入下经常自动调整的系统。后来陈雄山^[67]利用线性化二层准地转模式作了一些具体的计算和讨论。朱抱真等^[68,69]则利用二层准地转模式讨论热源和运动的相互调整,得到在线性情况下等压面对加热场的适应是极其迅速的,一般只需10天左右。陈雄山^[70,71]继续了这方面的工作,他利用二层准地转模式,南北方向取五点,纬圈取三个波,所得年变化等亦与实况相似。

70年代以来,大气物理所开展了大气环流的模拟实验研究,考虑了热源和地形作用,得到东亚大槽、青藏高原和副热带高压的形成、变异和稳定等许多重要结果(本刊另有文章介绍)。此外,结合长期数值预报问题,还研究了地气和海气相互作用问题^[72-75],大气本身的运动只好暂时考虑得简单些,将各种热源热汇用简单的参数化形式表示。得到有一类周期为三个月左右的行星波^[72]。此外,在合适情况下,常是大气运动状态向海洋温度场适应^[72];但相反情况也是存在的^[74,75]。

8. 地形影响 我国对地形的动力和热力作用的研究,在50年代是富有成果的,70年代作了模拟实验研究,如上述。这里只提一下,还从事了非常定问题的模拟实验,如对中国天气有严重影响的西南涡的移动的研究^[76]。除此之外,尚有一些讨论常定解的工作^[77,78];另有一些则结合超长波和大气环流,已如上述;其余的工作则与数值预报结合,着重研究非常定问题^[54,77,79-84,211](大都用准地转模式),或者讨论地形引起流场的瞬时变化,或者讨论对天气系统移动等的影响。

曾庆存^[5]用尺度分析法分析了原始方程中地形影响问题,指出对大尺度地形来说,应该区分为低地形扰动、高地形绕流和高地形爬越这三种情况。在前二种情况下,流场演变过程是准地转的;但在高地形爬越时特征时间尺度很短,不能用准地转近似,这与天气系统越出高原时天气变化很剧烈这事实是相符的。丑纪范等^[85]则用与[8]相似的方法论证了“流场向地形的适应过程”——趋向于绕流状态。

还有一些讨论中小地形影响的工作。巢纪平等^[86]讨论了二层均质流体中地形造成气流和气压跃变的条件。李翼和杜行远等^[87]作了非线性背风波的数值试验,并说明它和太行山区降雨分布有密切关系。曾庆存^[88] (1965) 则讨论了背风波和三维过山波的物理成因,指出在垂直剖面二维问题中,由浮力作用产生背风波,不能用准静力平衡近似;但在三维问题中,不靠浮力作用也可产生“船波”型的过山波。在实际大气中三维过山波更为常

见。

9. 湿斜压大气动力学过程 凝结加热是大气运动内部的最重要热源, 它和大气运动的相互作用应是大气动力学中很重要的研究对象。但由于问题很复杂, 目前研究得不多。近年来我国北京大学谢义炳^[93]、中央气象局雷雨顺、王两铭和中山大学罗会邦等^[90, 91]开展了这方面的研究工作, 取得了一些可喜的成果。这些工作的基点是从能量观点出发, 考虑到各种形式能量可以互相转换, 于是将大气中的内能、位能、潜热和动能统一起来, 在这基础上建立动力学方程的形式以及相应的分析方法。在实际工作中初试表明可以给出强风暴和暴雨过程的预兆。此外, 李麦村^[212]研究过凝结与重力波对暴雨形成的作用。其他工作则与对流和数值预报研究结合在一起。

10. 大气对流 对流是大气运动中的一种重要形式, 大气低层的传热、非层状云的形成以及降雨过程大都和对流有关。我国对积云开展了综合观测和相应的动力学研究, 取得了不少成果, 有关工作已经全部总结在巢纪平和周晓平的专著^[92]中, 这里仅介绍一下以后的工作。其中一些是寻求不稳定度分析的工具以作雷暴和对流雨的预报, 例如 [90] 和 [93] 等; 还有讨论降雨对气流的反作用^[94]。周晓平和张可苏^{[35][95]}等则致力于建立较好地描述对流运动的方程, 目前正在结合暴雨预报进行数值试验。

大尺度对流也很重要。大气物理所在模拟实验中发现: 在没有自转的盘上加热, 只有随时间线性增长的单胞对流; 而在加热强度够大且自转角速合适时则形成低频大辐对流, 称为“惯性对流”, 这些与青藏高原夏季对流系统很相似。模拟组对此还作了合适的理论解释^[96]。有趣的是, 即便使用准静力近似, 也可近似反映上述差异^[5]。

11. 台风和涡旋 张捷迁和魏鼎文等^[97, 98]利用红外加热方法在转盘中成功地模拟了台风形成、结构和移动规律, 和大气中的台风十分相似, 例如台风眼、云壁、螺旋云带等都模拟出来了。还模拟出台风中心过台湾时分成两个中心, 以及台风遇到高地时从右边绕行和加速等现象。相应的理论研究工作是值得做的。此外, 陈秋士^[99]用惯性不稳定解释台风形成, 而谢义炳等^[49]和杨大升等^[51]则归之为热带辐合带的切变不稳定。其他以天气学方法研究台风成因者还有不少工作。

吴中海^[100, 101]讨论了双台风的路径以及龙卷群的移动和变形问题, 得出双台风不会合并, 只可能靠近和打转。此外, 杨大升^[213]讨论过行星边界层对低涡维持、环流结构以及导致暴雨的机理进行过研究。

涡旋是大气运动中很常见和十分重要的形式, 今后必须加强涡旋动力学的研究。

12. 一些数学物理基础问题 我们也研究了一些基础性问题 and 数学方法问题。在 [5] 中系统地总结了这方面的研究成果以及上述的许多基本动力学问题。曾庆存^[5, 8, 102]研究了决定大尺度运动性质的特征参数, 指出运动的特征时间 T 、特征速度 U 和特征长度 L 与由外部环境所决定的相应特征值 f_0^{-1} , c_0 和 L_0 之比 $\varepsilon = (f_0 T)^{-1}$, $M_s = U/c_0$, $\mu^{-1} = L/L_0$ 乃是三个基本的特征参数; 在有地形影响时还要考虑“地形扰动度”参数 $\Delta\tilde{p}_s/p_0$, 其中 $\Delta\tilde{p}_s = p_0 - \tilde{p}_s$, p_0 为海平面标准气压, $\tilde{p}_s$ 为高地上特征气压。顾震潮^[103]则用相似原理研究了决定中小尺度运动的特征参数。后来, 张可苏^[95]将 [102] 的工作推广到非静力平衡情况中去。曾庆存还指出按 ε 展开是渐近收敛的, 并用泛函分析观念研究展开的收敛问题。

在建立动力学模式时, 必须从气象实际出发, 同时在建立理论模式过程中还需作理性

检验,使之在物理上合理、数学上适定。曾庆存^[5]较多地注意了这一问题。指出一个垂直边界条件的正确提法应是气柱总能量有限,并给出小扰动沿垂直坐标的展开法。还研究了各种模式的初、边值问题广义解的适定性。此外,石宗宝^[100]研究过非静力平衡近似下动力学方程初、边值问题的适定性;丑纪范等^[105]讨论过准地转模式解的唯一性。

针对球面上的动力学问题,曾庆存^[5]构造了定义在球面上的广义函数空间和广义向量空间,给出了其表现定理和嵌入定理以及展开定理。还在这基础上证明了 Laplace 潮汐方程组初值问题解的存在、唯一和稳定性,并给出按特征波动展开的公式。

二、数值天气预报

我国数值天气预报研究工作开展较早,顾震潮同志早在 50 年代初就已开展了研究工作,以后也有不少人从事研究工作,研究范围也较广,理论成果是不少的。现在正努力建成我国数值天气预报业务。

1. 简化模式的建立和应用 自 1959 年以来,我国仍有不少研究和应用简化模式(正压准无辐散模式、准地转模式等)的工作^[106-115]。其中 [106] 和 [107] 推出并应用球坐标下的准地转模式, [113] 是介于准地转和准平衡模式之间的模式。董克勤等^[114]利用正压模式并加以修正,用来报台风路径,效果很好,已在业务中使用。此外,张锡福和刘瑞芝对阻塞高压的演变过程进行了大量试报^[115]。南京大学^[160]还试验了中纬度对低纬流场的影响。

王宗皓^[116,165]和廖洞贤等^[117]研究了平衡方程的解法, [116] 提出的轮换迭代法效果很好。曾庆存^[7]提出在准地转模式中应用实测风场作初始场可以改进预报效果。

顾震潮最早提出在预报模式中引入历史资料的重要性和可能性^[2]。后来,丑纪范^[118](1962)、郑庆林和杜行远等^[119,214]提出了在准地转模式中具体的实现方法。为了更有效地利用历史资料,在 [119] 中用了经验正交函数,效果还好。王耀生^[215]则在原始方程中引入外力偏差函数,它由经验确定。

2. 原始方程计算格式的设计和应用 还在 1960 年曾庆存^[120,121]就成功地设计出并试用了可供大规模使用的求解原始方程的计算格式,即所谓“半隐式格式”(当时称为“半显式”)和“全隐式格式”,其后“半隐式”及其各种变种(但其实质并无大异)现在已为国内外广泛使用。陈雄山等^[122-124]将它扩展到三层,并计入地形影响及凝结加热,这方案已在国内用作业务预报。此外,曾庆存、季仲贞和袁重光^[125](1962—1965)则直接按 [102] 求解“半隐式”和“全隐式”三维椭圆型方程,这似乎较便于作多层预报。

我国也早在 60 年代初就已提出在近似计算中保证整体性质是设计计算稳定格式的重要方法^[121]。廖洞贤^[126,216](1964)和郭本瑜^[127](1965)都对二维涡度方程设计了总能量和总位涡度平方瞬时守恒格式, [127] 的格式比 Arakawa 格式^[128]更完善。曾庆存和季仲贞等^[125,129-131]则在 1964—1965 年间设计了在时间和空间都用差分法的能量守恒原始方程差分格式(在一些情况下是“广义能量守恒”),其中还引入了“灵活性替代”,可以调整一些参数和算法以提高计算精度和稳定度。就空间差分形式而言, Lilly 格式^[132](1965)只是我们方法的一种特例(应该指出, [126], [127] 和 [129]—[131] 中的格式都是和 [128] 及 [132] 差不多同时地而且是独立地设计出来的),若在时间步长上交替调整灵活性参数则又可得

到分裂步长的格式,类于 Марчук 方案^[133],但更为灵活。关于上面这些格式以及设计计算格式的理论 and 数值预报中其他问题在[134]中有系统的总结。此外,陈秋士^[135]也基于适应过程和演变过程的可分性建议了一种显式分裂步长格式。应该指出,王宗皓^[136]早在1963年就已将分裂步长方法应用到正压涡度方程上来了;而曾庆存^[137](1962)则从演变过程和湍流过程在时间尺度上的可分性出发,提出先计算数步演变过程然后再计算一步湍流平滑过程的方法,而这正好等价于通常预报过程中加入平滑算子的方法。曾庆存^[123](1962)和王宗皓^[137,138]还提出了三维和二維迎风差格式并证明其计算稳定性;王宗皓等^[139](1964)另一种格式则应用了特征劈锥,在处理有穿过边界的气流时比较好。

周晓平、张学洪和武汉大学数学系以及武汉气象台^[140,141]试验了四层模式等区域预报方案,其中计入地形影响并作地面气压变化预报。大气物理所中期预报组朱抱真、陈嘉宾、张道民、骆美霞等^[142-149]设计了三层模式,考虑了地形、凝结、辐射和感热影响,对这些物理因子作过许多研究和试验。该模式现扩展为五层,并和北京大学^[150]局地区五层模式匹配,亦将用于业务预报。热带数值天气预报协作组^[150,151]则设计了一层 and 四层热带模式,作出了成功的预报实例。钱永甫等^[152]以及刘金达^[153]的格式特别着重讲究有地形存在时气压梯度力的算法。

郑庆林^[154]设计了七层原始方程谱模式,亦将试用于业务预报。此外,廖洞贤等^[155]设计了具有四阶精度的半球能量守恒的原始方程差分格式。

上海气象台和南京大学合作^[156],利用正压原始方程作台风路径业务预报。朱抱真等^[157]利用上述三层模式研究江淮气旋,纪立人^[158]研究夏季切变线的生成,杜行远和许有丰^[159]研究利用数值预报结果作背风波预报,都取得了良好的结果。

3. 计算数学问题 计算数学问题的研究在数值天气预报方法中占有很重要的地位。设计计算稳定、省时而又较精确的格式本身就是计算数学中的一个中心问题,这些方面在以上两小节中已讲及。王宗皓^[161-163,136-139]对提高计算速度、平流项的计算以及求解平衡方程等还作过许多有价值的工作。廖洞贤^[155]致力于设计高阶精度差分格式。马吉涛^[164]提出用广义函数方法构造不规则网格的差分格式。有限元法和样条函数等的应用也有所研究^[165-171],证明了 Arakawa 格式只是有限元法的一个特例。也有一些工作^[125,172]设法在通常二阶精度差分格式中引入订正因子以提高精度。最近,有不少工作^[154,172-176]致力于谱模式的设计,陈雄山和邢如楠还试验了各种谱模式方案及快速福氏变换,其方法可能是目前速度最快的一种。

曾庆存、季仲贞、廖洞贤和郭本瑜还结合数值预报问题研究了有关的计算数学理论问题。郭本瑜^[177]详尽地研究了二维涡度方程差分格式,提出一种广义稳定性定义,并给出解对初值和右端扰动的稳定性的估值、边界形状及边界条件对解的影响的严格估值,这些方法在计算数学方法中也很有意义。曾庆存^[134]和季仲贞^[178,179]研究了有关演变过程方程(数学上常称为“发展方程”)计算格式的计算稳定性一般问题,给出了一些定理,特别是深入研究了非线性计算不稳定性问题,指出只有在时间和空间差分意义上满足能量守恒或能量范数估值的格式才能完全消除非线性计算不稳定。廖洞贤等^[180]则研究了侧边界条件的提法问题。

曾庆存^[181,134](1965)从数学物理观点出发,详细分析了步长为有限时产生计算紊乱

(包括狭义的计算不稳定)现象的机理,指出寄生波由反常的频散性质、反常的能谱转换以及能量关系破坏这三种机理所致,并提出针对性的克服方法。廖洞贤^[182]和曾庆存^[181,134]还详细分析了有限差分法造成天气系统移速偏慢的原因。曾庆存^[218](1962)、张耀科^[183]和伍荣生^[184]还研究了平滑算子。

4. 初始场问题和四维分析问题 在应用原始方程作数值预报时,初始场处理方法是一个很突出的问题。实测的风场和温压场等总有误差,若不加以适当处理,势必产生虚假的重力惯性波,形成计算紊乱。[120]中最早提出可用地转风作初始风场,后来为国内外广泛使用。也可以用按小参数展开法消去快波^[5,121]。刘瑞芝等^[185,186]试验过二级近似或平衡方程,效果都比较好。另一种方法则是直接利用实测风场算流函数,并由此反求高度场^[7,150],试验结果也不错。

同时应用实测风场和温压场也是可行的。一种方法是适当调整灵活性参数,使风、压场的不协调在预报过程中逐渐消失。另外的途径则或多或少要对初始场作一些处理。曾庆存^[187](1965)指出,风场观测误差和温压场误差一样都是偶然误差,因此关键在于处理好所有场的短波部分。为此,建议了一种最优化方案,求解“广义等周问题”即可得到处理好的初始场。此法也可和调整灵活性参数法混合使用。廖洞贤^[188]、郑兴礼等^[189,190]和王晓林等^[191]提出了一些变分方法,改进 Sasaki 方法^[192];周家斌等^[193]和倪允琪等^[194]则提出动力调整初始场的方法。这些方法在试验中都取得了好结果。

随着气象卫星的使用,如何利用非常规(非定时定点)资料也是一个急需解决的问题。我国现已开始研究,黄荣辉、李崇银、袁重光等^[195,196]作过初步的试验。

5. 客观分析和气象系统工程 为使数值预报方法在日常业务中使用,头一个要解决的问题就是自动处理气象资料、输入电子计算机进行天气图分析和作数值预报并将结果输出,应该全盘自动化,广义的客观分析应包括这三部分。

我国客观分析研究工作大都致力于为建立我国的数值预报业务,上海气象台客观分析方案^[197]已在业务中使用,该方案使用多项式插值作为第一近似,然后用逐次订正法。大气物理所纪立人、刘克武等和中央气象局合作设计出来的气象电报自动处理及插值客观分析方法^[198-200],亦已通过了许多实例试验。此外,北京大学^[201]和南京大学^[202]亦有研究。

关于含有台风流场的客观分析法,马吉涛^[203]和金汉良等^[204]的工作给出较好结果。[203]仿照有限元法,提出了一种新思路。马淑芬^[205]则试用付氏展开迭代补缺方法来作低纬地区客观分析。

应该指出,数值预报业务是一个很庞大很复杂的自动化工程系统,顾震潮^[2]早就指出必须把天气预报以及气象业务中比较成熟的东西尽量工程化。因此,必须用系统的观点来认识数值预报等的发展趋向,进行全面综合处理,使之达到最合理的和最优的结果。王宗皓等^[206]从1976年起研究了这类问题,应用了泛系分析理论和大型系统的分解和组合理论,对已有和缺少研究的重要环节都作了研究,比如资料信息压缩传递、数值预报工程化的理论模式、模式组合和优化、天气图识别、人机结合等。

客观分析和气象系统工程是最实用的课题,我国比较薄弱,今后应加强研究。

6. 长期数值预报试验 顾震潮和朱抱真等^[66,68,69]早在50年代末就针对我国的实际需要提出搞长期数值预报,并作了相应的布署和试验,不过由于当时条件限制,尚不能作

全面的试验。自 70 年代初以来,我国又再度重视这一问题。

目前所做的数值预报方法不可能用作长期数值预报,因为这种方法随时间一步步外推来作每天天气形势预报,预报半个月以后的形势其误差已等于气候离差。因此对长期预报来说毫无意义。一种正确的长期数值预报的途径是考虑历史资料,成功与否的关键在于动力和统计是否结合得好,曹鸿兴^[207]对此有过评述。另一种正确的途径则是把长期演变过程突出出来,把其他因子当作参数反馈作用。因此,成功与否的关键在于控制长期过程的主导方程是否合适和参数化是否合乎实际。这两种途径在我国都有研究。属于前者的试验有[119]等工作,有一定结果。属于后者的工作有[59],[72],[73],[208—210],亦有一些试报结果。在这些方法中把一般的天气系统(长波)作为噪音滤去,突出非绝热因子的作用、把云和辐射作用作参数处理,并考虑到地气和海气相互作用。试验工作现仍在进行中。

王宗皓、骆美霞、梁幼林同志和许多同志为本文撰写大力提供材料,给作者极大帮助,谨此致谢。

参 考 资 料

- [1] 顾震潮,我国数值预报的成就,气象学报,1959,30卷,第3期。
- [2] 徐尔颢,十年来我国动力气象的研究,气象学报,1959,30卷,第3期。
- [3] 叶笃正 (Yeh, T. C.), On the formation of quasi-geostrophic motion in the atmosphere, *J. Met. Japan*, The 75th Anniversary Volume, 1957, 130—134.
- [4] 叶笃正、李麦村,大气运动中的适应问题,科学出版社,1965。
- [5] 曾庆存,数值天气预报的数学物理基础,第一卷,1977,科学出版社(即将出版)。
- [6] 叶笃正、曾庆存,旋转大气中的适应过程,1979,(即将发表)。
- [7] 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,第33卷,第1期。
- [8] 曾庆存,大气中的适应过程和发展过程, I, II, 气象学报,1963,33卷第2,3期。
- [9] 陈秋士,简单斜压大气热成风的建立和破坏, I, II, 气象学报,1963,33卷第1,2期。
- [10] 张可苏,在摩擦和热源作用下大气运动的适应过程,中国科学技术大学毕业论文,1963。
- [11] 骆启仁,斜压大气中的地转适应过程和高空锋生过程,中国科学技术大学毕业论文,1963。
- [12] 陈秋士、顾名德,四层模式热成风适应,气象学报,1964,34卷第3期。
- [13] 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,第2卷第1期。
- [14] 叶笃正、李麦村,大气运动的多时间尺度特性,全国第二次数值预报会议论文(以后简记作③),1977,12。
- [15] 叶笃正、李麦村,大尺度大气运动的多时间尺度现象,1979,(科学通报,即将发表)。
- [16] 李麦村,大尺度大气运动的阶段性,1979,(中国科学,即将发表)。
- [17] 李麦村,大气运动的位涡适应现象,气象学会1978年年会论文。
- [18] 巢纪平,关于大气运动多时态特性的物理解释,③。
- [19] 伍荣生、巢纪平,旋转大气中运动的多时态特性和时间边界层,大气科学,1978,2卷,4期。
- [20] 叶笃正、朱抱真,大气环流的若干基本问题,科学出版社,1958。
- [21] Цзян Цин-цунь (曾庆存): К вопросу о приспособление движения к геострофическому в нелинейном случае, Доклад на семинаре УИГ АН СССР, 1960, янв.
- [22] 袁重光、曾庆存,地转适应过程的数值试验,气象学报,(即将发表)。
- [23] 陈秋士,中纬度大尺度系统发生发展的物理过程,数值预报和数理统计预报会议论文集,1974。
- [24] 巢纪平,论小尺度过程动力学的一些基本问题,气象学报,1962,33卷2期。
- [25] Fjortoft, R, *Tellus*, 1953, Vol. 5, 225—230.
- [26] 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,1978,中国科学,(即将发表)。
- [27] Lonquet-Higgins, M. S. & Gill, A. E, *Proc. Roy. Soc. Ser. A*, 1967, 299, 120—140.
- [28] 伍荣生,正压大气中波动共振与能量变化,中国科学,1979,第2期。
- [29] 叶笃正、陈雄山,非线性效应在形成阻塞形势中的作用,气象学报,1963,33卷2期。
- [30] 陈雄山,斜压大气中基本气流与扰动的若干制约过程,气象学报,1964,34卷,1期。
- [31] 叶笃正、方宗义,扰动和基本气流相互作用的若干问题,中国科学技术大学建校五周年纪念科学论文集,1963。
- [32] 曾庆存、袁重光、李荣凤,半球旋转适应过程的数值试验,(即将发表)。

- [33] 杜行远、周秉东,赤道地区大气波动的理论分析,气象学会 1978 年年会论文。
- [34] 李麦村、姚稼荣,热带大气的长波和超长波 I, II, 1979, (大气科学,即将发表)。
- [35] 张可苏、周晓平,重力惯性波的频谱、结构和传播特征,②。
- [36] 李麦村,鬃线形成的非线性过程,中国科学,1976,6 期。
- [37] 李麦村,重力波对特大暴雨的触发作用,大气科学,1978,3 期。
- [38] 李麦村,低空急流上的孤重力波与 KdV 方程,北京市气象学会 1978 年年会报告。
- [39] 李麦村,斜压大气中鬃线形成的非线性过程, (即将发表)。
- [40] 巢纪平、吴钦岳,地转气流中的重力惯性内波,气象学报,1964,34 卷,4 期。
- [41] 孙淑清、陈隆勋、叶笃正,平流层和对流层环流的相互作用,载“平流层大气环流及太阳活动对大气环流影响的研究”,科学出版社,1964。
- [42] 陈隆勋,非地转模式下各种尺度大气波动的垂直传播,同上。
- [43] 陈雄山,平流层与对流层之间动力扰动的上下影响,气象学报,1962,31 卷,4 期。
- [44] 叶笃正、陈雄山,长波的垂直结构和它的移动与发展的关系,气象学报,1963,33 卷,1 期。
- [45] 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 卷,1 期。
- [46] 卢佩生、曾庆存,正压大气中扰动的演变,1979, (大气科学,即将发表)。
- [47] 巢纪平、叶笃正,正压大气的螺旋行星波,大气科学,1977,2 期。
- [48] 刘式适、杨大升,地球大气行星波的螺旋结构,气象学会 1978 年年会论文。
- [49] 谢义炳、黄寅亮,赤道辐合带上扰动不稳定性的简单理论分析,气象学报,1964,34 卷,2 期。
- [50] 杨大升,东风扰动的动力不稳定,气象学报,1965,35 卷,1 期。
- [51] 杨大升、刘式适,东西风交界面上的扰动流场,气象学会 1978 年年会论文。
- [52] 叶笃正、王晓林,超长波的不稳定与发展的一个初步研究,气象学报,1965,35 卷,2 期。
- [53] 廖渭贤,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 卷,4 期。
- [54] 廖渭贤,论气压波和温度波的移动,气象学报,1963,33 卷,4 期。
- [55] 刘瑞芝,正压模式中系统移动速度的研究,气象学报,1962,32 卷,2 期。
- [56] 章基嘉,超长波活动规律的定性分析,大气科学,1979,3 卷,2 期。
- [57] 曾庆存,超长波动力学,1962 年在地球物理所的学术报告。
- [58] 李麦村,超长波尺度分析,大气科学,1977,3 期。
- [59] 郭秉荣、丑纪范,考虑非绝热的超长波尺度分析,②。
- [60] 朱抱真,大地形和热源的动力控制与超长波活动关系的初步研究,气象学报,1964,34 卷,3 期。
- [61] 陈秋士,地形对长波和超长波发展的影响,气象学会 1978 年年会论文。
- [62] 李崇银、朱抱真,偏心绕极涡旋的形成及其动力特性,1979, (气象学报,即将发表)。
- [63] 许有丰、张学洪、张宝严,两层准地转模式中中期过程的初步计算试验, (即将发表)。
- [64] 谢义炳、陈受钧,在给定热源与大型水平湍流影响下自由大气中的平均纬向风与经圈环流,气象学报,1964,34 卷,4 期。
- [65] 杨金锦,大气运动与加热作用相互调整的西风带恒定扰动,气象学报,1965,35 卷,4 期。
- [66] 顾履潮,大气过程的控制观,载中国科学院地球物理研究所“动力气象论文集”(顾履潮等著),1961,科学出版社。
- [67] 陈雄山,在长期数值预报的一个线性模式中大气对太阳实际直接辐射的响应,同上。
- [68] 朱抱真、王宗皓、赵明哲,考虑辐射和运动相互调整的一个长期预报数值模式,同上。
- [69] 巢纪平、许有丰,二层线性模式里长期天气过程的一些计算,同上。
- [70] 陈雄山,非绝热加热及地形动力作用下的大气环流长期演变过程,气象学报,1964,34 卷,3 期。
- [71] 陈雄山,大气环流的一个数值试验,气象学报,1964,34 卷,4 期。
- [72] 长期数值天气预报研究组,一种长期数值天气预报方法的物理基础,中国科学,1977 年 3 月。
- [73] 郭秉荣、丑纪范,大气边界层热力效应的初步研究及其在长期数值预报模式中的应用,②。
- [74] 黄荣辉、朱抱真,关于海气耦合模式线性化解的计算及讨论,1978, (即将发表)。
- [75] 朱抱真、骆美霞,用一个线性化的海气联合模式研究海气相互作用,1979, (即将发表)。
- [76] 李国庆等,青藏高原东南部低涡的初步模拟实验,中国科学,1976,3 期。
- [77] 杜行远,乱流大气中地形对风压场的作用,气象学报,1963,33 卷,3 期。
- [78] 陈受钧,地形对西风带恒定扰动的多层模式,气象学报,1965,33 卷,3 期。
- [79] 朱永祺,斜压大气中地形扰动过程的一个数值试验,气象学报,1962,32 卷,1 期。
- [80] 杜行远,高原地形对气压变化的影响,气象学报,1962,32 卷,2 期。
- [81] 廖渭贤、刘鸿德、李毓芳,一个考虑了地形作用的正压模式,气象学报,1962,32 卷,3 期。
- [82] 伍荣生,大地形与扰动的不稳定,气象学报,1964,34 卷,1 期。
- [83] 伍荣生,大地形与正压扰动的移行,气象学报,1964,34 卷,2 期。
- [84] 陈秋士,地形影响的物理过程的分析,气象学会 1978 年年会论文。

- [85] 郭秉荣、丑纪范, 大地形对风场的影响, ②.
- [86] 巢纪平、章光锟、袁孝明, 二层模式中地形对于气压跳跃形成的初步研究, 气象学报, 1964, 34 卷, 2 期.
- [87] 李翼、杜行远、刘克武、叶笃正, 背风波形成的非线性数值试验及其对降水的影响, 大气科学, 1978, 2 卷, 3 期.
- [88] 曾庆存, 背风波和三维过山波, 1965, (未刊).
- [89] 谢义炳, 湿斜压大气的天气动力学, 大连暴雨会议文集, 吉林省人民出版社, 1979.
- [90] 雷雨顺、吴宝俊、吴正华, 用不稳定能量理论分析和预报夏季强风暴的一种方法, 大气科学, 1978, 2 卷, 4 期.
- [91] 王两铭、罗会邦, 暴雨天气动力学一些问题的探讨 (I), (II), 中山大学学报(自然科学版), 1978, 1.
- [92] 巢纪平、周晓平, 积云动力学, 1965, 科学出版社.
- [93] 王沛霖, 对流预报的平均不稳定能量指标, 气象学报, 1964, 34 卷, 3 期.
- [94] 陈瑞荣, 云中降水分布不对称性对个体积云移动的影响, 气象学报, 1964, 34 卷, 1 期.
- [95] 张可苏, 大气模式的比较研究, 气象学会 1978 年年会论文.
- [96] 中国科学院大气物理所模拟实验组, 非静力平衡层结中的重力惯性波和惯性对流, 大气科学, 1978, 2 卷, 1 期.
- [97] 张捷迁、魏鼎文、何卓华, 台风结构和中国东南沿海地形对台风影响的初步实验研究, 中国科学, 1975, 3, 302-314.
- [98] 魏鼎文、张捷迁, 台风路径的某些模拟实验研究, 大气科学, 1978, 2 卷, 4 期.
- [99] 陈秋士, 惯性波的对流不稳定和台风形成初期阶段的物理分析, 气象学报, 1964, 34 卷, 4 期.
- [100] 吴中海, 双台风的相互作用的一种分析, 气象学会 1978 年年会论文.
- [101] 吴中海, 台风的中小尺度动力结构, 同上.
- [102] 曾庆存, 大气运动的特征参数和动力学方程, 气象学报, 1963, 33 卷, 4 期.
- [103] 顾震潮, 对几种中小尺度运动的相似理论分析, 气象学报, 1964, 34 卷, 4 期.
- [104] 石宗宝, 基本方程组的定解问题, ②.
- [105] 杜行远、周紫东、丑纪范, 关于一些天气预报方程的定解问题, 气象学报, 1964, 34 卷, 4 期.
- [106] 曾庆存、朱永捷 (Цзэн Цин-цунь, Чжу Юнь-ти, К нелинейной задаче об атмосферных движениях планетарного масштаба, Изв. АН СССР, сер. геофиз., 1961, № 1.
- [107] 朱永捷, 球坐标三层模式的一个非线性预报, 气象学报, 1961, 31 卷, 3 期.
- [108] 秦曾源, 一个两参数斜压模式, 气象学报, 33 卷, 1 期.
- [109] 朱永捷, 考虑斜压层结不均匀的一个准无辐散模式, 中国科学院地球物理研究所动力气象学论文集 (二), 科学出版社, 1963.
- [110] 朱永捷、张跃科, 斜压准无辐散模式的一个试验方案及其在阻塞形势研究中的初步应用, 同上.
- [111] 朱永捷、郭永润, 考虑大地形的准地转斜压模式, 数值预报和数理统计预报会议论文集, 科学出版社, 1974.
- [112] 陈雄山、纪立人, 北半球地转模式及试报结果, 科学通报, 1973, 18 卷, 4 期.
- [113] 刘克武、金祥麟、叶笃正、冯树常、匡丕德, 数值天气预报能量方程预报模式, 科学通报, 1975, 20 卷, 9 期.
- [114] 董克勤等, 一种改进的引导气流预报台风路径的方法, 数值预报和数理统计预报会议论文集, 科学出版社, 1974.
- [115] 张锡福、刘瑞芝, 冬季阻塞形势建立和崩溃的数值试验, 中国科学院地球物理研究所动力气象学论文集 (二), 1963.
- [116] 王宗皓、张耀科, 平衡方程的一个数值求解方案及其有关的数值结果, 同上.
- [117] 廖洞贤、周紫东, 关于平衡方程的差分解法, 气象学报, 1962, 32 卷, 3 期.
- [118] 丑纪范, 天气数值预报中使用过去资料的问题, 数值预报和数理统计会议论文集, 科学出版社, 1974.
- [119] 郑庆林、杜行远, 使用多时刻观测资料的数值预报新模式, 同上.
- [120] 曾庆存 (Цзэн Цин-цунь), ДАН СССР, 1961, т. 137, № 1.
- [121] 曾庆存 (Цзэн Цин-цунь), Scientia Sinica, 1963, XII, No. 3.
- [122] 陈雄山等, 初始方程三层模式, ②.
- [123] 上海市气象局预报组, 初始方程三层模式业务数值预报的初步总结, 大气科学, 1976, 1 期.
- [124] 纪立人、邢如楠、陈雄山, 初始方程三层模式的改进试验, (即将发表).
- [125] 曾庆存、季仲贞、袁重光, 原始方程差分格式的设计, ②.
- [126] 廖洞贤, 一个积分非线性正压稠度方程的差分方案, 1964 年兰州天气与动力气象专业会议报告.
- [127] 郭本瑜, 数学学报, 1974, 17, pp. 242-258.
- [128] Arakawa, A., J. Comp. Phys., 1966, 1, 119-143.
- [129] 曾庆存、季仲贞, 能量守恒定律在差分格式构造中的应用, 1965 年 2 月在中国科学院地球物理所的学术报告.
- [130] 曾庆存, 论原始方程差分格式的构造, 同上.
- [131] 曾庆存, 考虑 P_r 及地形的格式, 1969 年在中国科学院大气物理所的学术报告.
- [132] Lilly, D. K., Mon. Wea. Rev., 1965, 93, 1-26.
- [133] Марчук, Г. И., Численное решение задач динамики атмосферы и океана, Ленинград, 1974.
- [134] 曾庆存, 数值天气预报的数学物理基础, 第二卷, 1979, (即将由科学出版社出版).
- [135] 陈秋士, 分析天气形势变化物理过程的显式分解计算方法, ②.

- [136] 王宗皓, 涡度方程的 $x-y$ 方向分裂步长计算方案, 在中国科学院地球物理所的学术报告, 1962 年。
- [137] 王宗皓, 大气动力学初始方程组的一种数值积分方法, 同上, 1963 年。
- [138] 王宗皓, 预报方程差分格式的构造方法, 气象学报, 1965, 35 卷, 4 期。
- [139] 王宗皓, 张济朋, 张季生, 正压初始方程的时间中央差和 Lax 格式交替使用计算, 1964, (尚未发表)
- [140] 中国科学院大气物理所中期组, 武汉中心气象台, 武汉大学数学系, 有限区域中四层原始方程模式试验, ②。
- [141] 武汉大学数学系, 武汉中心气象台, 初始方程正压模式试验初步结果, ②。
- [142] 中国科学院大气物理研究所中期预报组, 初始方程数值模式的一个计算格式及其预报的个例实验, 大气科学, 1977, 1 期。
- [143] 中国科学院大气物理研究所中期预报组, 初始方程数值模式的一个计算格式在有限区域预报的试验, 大气科学, 1977, 3 期。
- [144] 张学洪, 许有丰, 骆美霞, 金祥林, 初始方程模式中引入地形后的初步试验, ②。
- [145] 朱抱真, 张学洪, 骆美霞, 用静力扣除法处理地形的试验, ②。
- [146] 季仲贞, 陈嘉宾, 徐飞亚, 原始方程三层模式大尺度凝结降水方案的比较试验, ②。
- [147] 骆美霞, 张道民, 在一个原始方程中计算地面温度及下垫面感热和蒸发通量的实验, ②。
- [148] 朱抱真, 纪立人, 袁重光, 李崇银, 一个用于数值预报模式的辐射加热的计算方案, ②。
- [149] 朱抱真等, 一个包括地形作用和非绝热作用的原始方程数值模式, 气象学会 1978 年年会论文。
- [150] 中国科学院大气物理研究所热带气象研究组, 一个热带地区正压数值预告模式的初步试验结果, 热带天气会议论文集, 科学出版社, 1976。
- [151] 热带数值预报协作组, 一个四层初始方程热带数值预报模式的初步结果, ③。
- [152] 钱永甫等, 一个有大地形影响的初始方程数值预报模式, 大气科学, 1978, 2 卷, 2 期。
- [153] 刘金达, 有限区域考虑地形的初始方程多层模式, ②。
- [154] 郑庆林, 北半球多层谱(球面函数)模式, ②。
- [155] 廖洞贤, 王超, 张光智, 一个考虑边界条件, 具有能量守恒性质的四阶差分格式, 气象学会 1978 年年会论文。
- [156] 倪允琪, 薛宗元, 金汉良, 西太平洋台风路径数值预报的 [77] 方案及其试验结果, ②。
- [157] 陈嘉宾, 季仲贞, 朱抱真, 一个切变线降水气旋生成的数值模拟, 暴雨学术会议论文集, 1978。
- [158] 纪立人, 江淮切变线形成过程的数值分析, 气象学报, 1965, 35 卷, 1 期。
- [159] 杜行远, 许有丰 (Tu Hsing-yuan and Hsu Yu-feng), WMO Symposium on the interpretation of Broad-scale NWP Products for Local Forecasting Puposes, Warsaw, 1976。
- [160] 南京大学气象系, 中纬度扰动对低纬度副热带高压流场影响的数值试验, 热带天气会议论文集, 广东热带海洋气象研究所印, 1976。
- [161] 王宗皓, 气象问题中椭圆型方程狄氏问题的数值迭代法, 气象学报, 1962, 32 卷, 3 期。
- [162] 王宗皓, 迭代法在数值天气预报中应用的注记, 气象学报, 1965, 35 卷, 4 期。
- [163] 王宗皓, 张耀科, 混合型平衡方程的近似计算, 1964, (尚未发表)。
- [164] 马吉涛, 关于计算不规则网点, 矩形, 正方形网点偏导数的一种统一格式, 大气科学, 1978, 2 卷, 2 期。
- [165] 孙敬猷等, 有限元法在数值天气预报中的应用, 大气科学, 1979, 3 卷, 1 期。
- [166] 王两铭, 用有限元法制作变网格数值预报的一次试验, ②。
- [167] 王申林, 解正压原始方程组的 Galerkin 方法, ②。
- [168] 武汉大学数学系, 武汉中心气象台, 样条函数在数值天气预报中的应用, ③。
- [169] 同上, 曲面拟合法在数值天气预报中的应用, ③。
- [170] 廖洞贤, 张光智, 关于在数值预报中引用样条函数后出现的计算稳定性的问题, ②。
- [171] 北京大学地球物理系, 总参气象局气象研究所, 一个用“样条”格式预报台风移动的原始方程模式, ③。
- [172] 伍荣生, 提高差分与微分逼近程度的一个方案, ②。
- [173] 陈雄山, 平流方程的数值研究, 大气科学, 1979, 3 卷, 2 期。
- [174] 季仲贞, 刘克武, 吴津生, 王宗皓, Hough 函数及其在天气分析和预报中的应用, 1978, (油印本)。
- [175] 王超等, 用差分法和波谱法制作正压预报的比较, ②。
- [176] 邢如楠, 快速富立叶变换在涡度方程(球函数)谱模式中的使用, 1979, (即将发表)。
- [177] 郭本瑜, 数值天气预报中的差分法——非线性差分格式的误差估计, 大气科学, 1978, 2 卷, 2 期。
- [178] 季仲贞, 非线性计算稳定性的比较分析, 1978, (即将在“大气科学”发表)。
- [179] 曾庆存, 季仲贞, 发展方程的计算稳定性问题 1979, (即将在“计算数学”发表)。
- [180] 中央气象局研究所二室, 论半球预报的水平侧边界条件, ④。
- [181] 曾庆存, 计算稳定性的若干问题, 大气科学, 1978, 2 卷, 3 期。
- [182] 廖洞贤等, 数值天气预报中的几个问题, ④。
- [183] 张耀科, 正压涡度方程中考虑粘性项与平滑过程的一些意见, 气象学报, 1965, 35 卷, 1 期。
- [184] 伍荣生, 适用于数值预告及客观分析的平滑算子的研究, 大气科学, 1977, 4 期。
- [185] 刘瑞芝, 张济朋, 正压原始方程的一个数值试验, 气象学报, 1965, 35 卷, 1 期。
- [186] 刘瑞芝, 非线性平衡方程求解及预报试验, ②。

- [187] 曾庆存, 实测风场在数值天气预报中的应用, 大气科学, 1977, 3 期。
- [188] 廖洞贤, 关于处理初始资料和取参数的问题, 气象学会 1978 年年会论文。
- [189] 低纬数值预报协作组, 差分方法在数值天气预报原始方程组模式初值问题的应用, ②。
- [190] 热带数值预报协作组, 低纬度差分初值试验, ②。
- [191] 王瑞林、吴辉璇、王宝根, 正压原始方程差分初值试验, 气象学会 1978 年年会论文。
- [192] Sasaki, Y., M. W. R. 1969, Vol. 98, No. 12.
- [193] 周家斌、武佩珍、王康玲, 动力初值预报试验, 1979, (即将发表)。
- [194] 倪允琪、薛宗元, 适合于台风路径数值预报的初值化试验, ②。
- [195] 李崇银、袁重光, 四维资料同化的试验研究, 大气科学, 1978, 2 卷, 3 期。
- [196] 黄崇辉、袁重光, 关于四维分析中一些问题的初步试验, ②。
- [197] 徐一鸣, 客观分析的一个方案, 大气科学, 1979, (即将发表)。
- [198] 纪立人、刘克武、赵振纪, 逐步订正法的客观分析试验, 数值预报和数理统计预报会议论文集, 科学出版社, 1974。
- [199] 刘克武、赵四强, 气象电报的自动处理及地转插值的客观分析试验, ②。
- [200] 张光智、马淑芬, 一个制作高度预备场的方案, ②。
- [201] 金汉良, STZC-76 高空气象资料处理系统, ②。
- [202] 北京大学地球物理系气象专业等, 气象资料自动化处理和客观分析的试验, ②。
- [203] 马吉涛, 一个含有台风高度场的客观分析方法, 南京大学学报(自然科学版), 1975 (2), pp. 93—103。
- [204] 金汉良, 含有台风在内的 500 毫巴流场的客观分析, ②。
- [205] 马淑芬, 低纬地区气象要素场付氏迭代补缺试验, 气象学会 1978 年年会论文。
- [206] 王宗皓, 数值天气分析预报自动化系统, (尚未出版)。
- [207] 曹鸿兴, 统计动力预报评述, ③。
- [208] 郭秉荣、丑纪范, 用大气温压场的连续演变表征下垫面热状况的长期天气预报方法, ②。
- [209] 同上, 从长期预报角度探讨低纬度大气运动的动力特征, ②。
- [210] 长期数值天气预报研究组, 长期数值天气预报的滤波方法, 中国科学, 1979, 1 期。
- [211] 廖洞贤、王超, 关于地形对流场演变的某些作用的分析, ②。
- [212] 李麦村, 积云凝结加热与重力波对暴雨的触发作用, ②。
- [213] 杨大升, 行星边界层对低涡降水过程的作用, 暴雨学术会议论文集, 1978。
- [214] 杜行远等, 一个利用时间粘连函数的预报方法, ②。
- [215] 王耀生, 反馈模式的初步试验, ②。
- [216] 中央气象局研究所二室, 几种具有守恒性质的差分格式, ②。
- [217] 北京大学地球物理系气象专业, 总参气象局气象研究所, 国家海洋局海洋气象总台, 一个用于降水预报的五层原始方程模式, ②。
- [218] 曾庆存, 平滑算子和湍流耗散效应的等效性, 1962 年在中国科学院地球物理所的学术报告。
- [219] 薛凡炳, 论月亮地球运动对天气过程组合周期的控制, 湖南省气象科学研究所, 1978。
- [220] 吕克利, 切变基流和非绝热加热对大气适应过程的影响, ②。

注: ②即全国第二次数值预报会议论文(1977, 12), 将有文集出版, (科学出版社)。