

大气动力学的一些问题*1)

中国科学院大气物理研究所 曾庆存

一、大气动力学和流体力学的关系

人类生活在地球上的大气圈里，大气的物理性质和运动状态直接影响着人类的生产活动和社会活动。在漫长的生物进化和人类发展的过程中，人类及其远祖能适应地质年代的环境而得以维持下来和继续发展，例如经历了大大小小的冰河时期和交替出现的暖湿和干冷的气候。人类还能利用气候，并改造气候和环境。所谓气候，就是大气状态和大气运动的长期（例如多年以及上百年的统计平均状态。人类的进一步发展必须充分认识“气候”尺度的大气运动及其变化规律。此外，现在人们还要每天作气象预报。从时效来分，有几小时至一、二天的短期天气预报，三天以上至半个月的中期天气预报以及半个月以上的长期预报；从范围上分，又有方圆不过数里的单站预报，大到一省或数省的区域预报以及全国甚至全球范围的大范围地区预报；从内容上看，则有寒潮、台风、旱涝、暴雨等灾害性天气预报，还有温、湿、风、云、雨等日常预报，等等。所谓天气或气象，就是指发生在大气圈中的物理-力学（有时是物理-化学）现象，其中尤以大气的热力状态和运动状态为主。因此，就天气预报的实质而言，就是认识和预报大气的各种尺度和各种类型的运动及其演变的规律。气候和天气的观测、研究、预报以及合理利用，这些就是所谓气象学和大气科学的内容；研究大气运动规律性及天气变化的理论就构成大气动力学的主要内容。

气象学以自然界（大气的实际情况）为研究对象，必须采取直接观测的方法取得资料，然后进行综合分析找出规律，这种方法是传统的、也是非常重要的。但是，发生在自然界中的现象极其复杂，一种现象与另一种现象往往同时并存，起作用的因子众多。为了透过现象看本质，必须分出矛盾的主次。因此，

十分需要把问题抽象出来，简化为一些理论模式，再对这些模式进行深入的研究，并和实际情况进行对比，检验抽象是否正确，再不断进行修正。这些就是大气动力学中的主要研究方法。

很明显，大气动力学和流体力学有密切关系，大气动力学的研究方法和理论流体力学方法大体上也是相同的。其实，大气运动是自然界中最常见的一类流体运动，大气动力学就是研究大气现象的流体力学，前者是后者的一个分支和组成部分。在这里不妨重提一下历史：流体力学的萌芽及其早期的发展，一个重要来源正是人们在观察自然和利用自然中所积累起来的经验总结。例如，雷电的轰鸣，狂飙的怒吼，和风弄叶的和谐音响，鸟语人言，都和气体振动及在空气中的传播有关，由此达到“振动成声”的认识；“风乍起，吹绿一池春水。”这是波动理论的最直接的来源之一，气压计则是为了测量大气压力的需要而发明的，等等。这些都与大气运动有直接的联系。不过，上述现象是局部性的，随着人类生产的发展，人们能够在生产技术中复制这些自然过程，而且发现和制造出比这复杂曲折得多、然而也是更纯粹和更有规律得多的流体运动现象，它们直接推动着人们的生产活动。这样，就形成和发展了气动力学、水动力学等等先进的流体力学分支，和大自然中自发发生的现象似乎毫不相干了。大气动力学主要研究和气候及天气有关的那样的大气运动，它的时间尺度和空间尺度都比生产技术中的过程要大得多，因此也难于研究得多，这就造成了大气动力学在流体力学中相对落后的情形。当今，人类认识自然环境、合理利用和改造自然环境的要求已成为一个重大的课题，大气科学的重要性也就日益显著，大气动力学应该有一个大的发展，为此需要力学界的支援。

还需指出，大气运动既然是自然界中一种流体宏观运动，因此，它和其他自然界的流体运动形式（例如海洋环流、空间气体运动、其他行星大气的运动等

*1979年12月19日收到。

1) 本文曾在第二届全国流体力学学术会议（1979年11月9—16日，无锡）全体会上报告。

等)就有许多共性,也有其各自的特点,对它们进行统一的研究是很必要的。其实,在自然界流体宏观运动过程中,起主要作用的是引力、旋转以及能量的交换和转移过程,这是共同的;参数的不同、物性的差异以及能量转移过程的具体形式的不同,则构成它们之间运动形式的差异。因此,通过抽象处理,使得人们不仅认识了大气和其他自然流体运动的基本规律,而且通过比较,还使人们对大气运动的特点以及支配这些特点的规律性有更深刻的认识。这就形成所谓“地球流体力学”,它在近十余年有很大的发展,甚至已成为流体力学的一个重要分支。但因其研究的对象是自然界的流体,不限于地球上的流体,因此,更确切的名称应该是“自然流体力学”。大气动力学的一般理论问题包括在自然流体力学之中,但大气动力学还应包括自己特有的具体的内容。

下面介绍一些重要的大气动力学的基本问题,这些也是自然流体力学中的一些基本问题。如前所述,大气运动是极其多种多样的。在时间尺度和空间尺度上以及在形态和性质上都有很大差别。大体上说,可以分为全球规模的和行星尺度的运动——即所谓大气环流、大尺度天气系统、涡旋、波动、对流以及边界层和湍流。我们这里只讲关于前三者的一些问题。

二、大气环流和大尺度运动的动力学

1. 在引力和旋转力场中流体运动的一般特点

简言之,大气运动是由地球吸收太阳辐射能所推动的,然而它又是在地球重力场和旋转力场的作用下。此外,大气还具有一定的可压缩性。大气的大尺度运动具有一些非常鲜明的特点。在别的行星上的大气运动也是如此。试看一下不同高度处的大气运动平均状态。图1是100毫巴等压面1月平均位势高度分布(约相当于距地面15公里高空的流线)。图2是1月500毫巴等压面平均位势高度分布(约相当于距地面5公里高空的流线)。图3则是1月海平面平均气压分布(流线大体和等压线平行)。所有这些图的特点是有一个平均的绕极涡旋——西风环流存在。但在其上还叠加有非轴对称扰动(表现为气流的弯曲或即行星波,亦称为槽和脊)和涡旋(称为气旋和反气旋),这些扰动在低层很明显,愈往上则绕极涡旋占明显的优势。这是平均情况。若取某一瞬间的图,则这种波状的结构或闭合的涡旋就更为明显,如图4。高空的气压槽脊以及涡旋就是所谓天气形势或天气系统,天气预报首先要考虑它们随时间的演变。

地表受太阳辐射加热,一般是极地温度低,赤道带温度高,因而使大气有南北温差。一种最简单的设想是将大气看作一部热力机器,在温差推动下运动起来,大气运动可以看作流体工作以满足热量交换,若无旋转力作用,则将会产生大规模的轴对称的对流运动,即冷空气在低层流向南方,在赤道上上升,在高空流向北方,在极区下沉。这就是所谓Hadley环流。

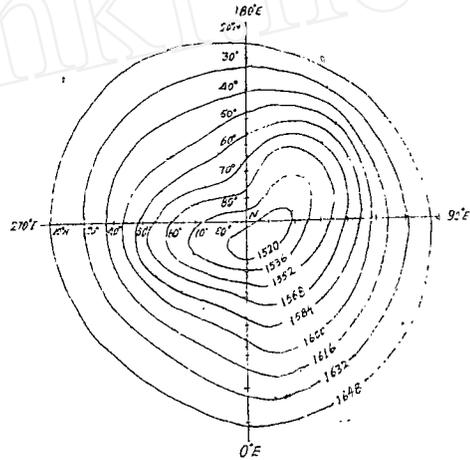


图1 北半球100毫巴等压面1月平均位势高度分布(单位:10米)

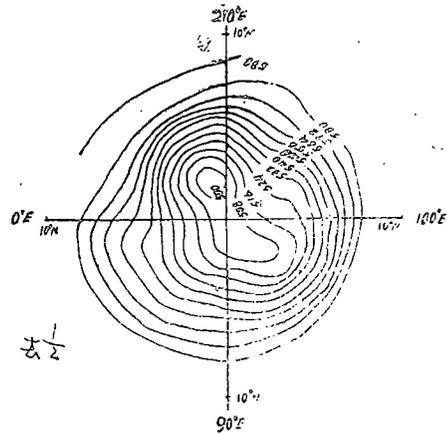


图2 北半球500毫巴等压面1月平均位势高度分布(单位10米)

然而大气环流状态并非如此。在地球自转作用下,北风将会偏转为东北风,南风将偏转为西南风,这样就形成了东西风环流,如果它过于强大,就会阻碍

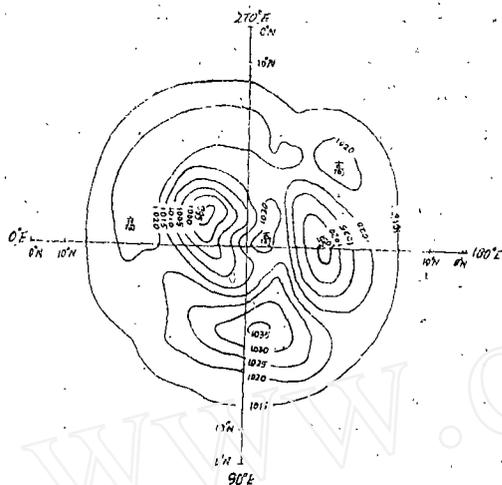


图3 北半球平均1月海平面气压分布
(单位: 毫巴)

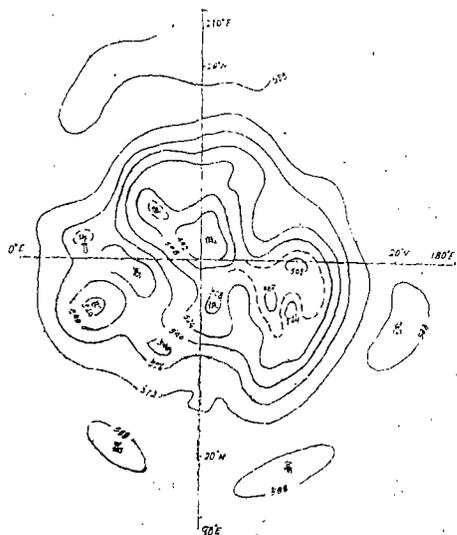


图4 1956年8月10日15世界时北半球500毫巴高度图 (单位: 10米)

Hadley环流的发展和进一步的南北热量交换, 于是积聚起来的热量需要采取另外的形式进行交换, 即水平面上的侧向交换, 表现为每一高度层上都有南来北往的冷暖空气运动, 这就表现为行星波和涡旋的形式。或即所谓Rossby环流型。人类曾经经过了长达一、二百年的时间才得到这样简明的物理分析和认识它的基本规律。现在, 人们还知道旋转速率很高的木星上大气的环流状态是非常明显的东西风带状结构。非轴对称扰动一般非常微弱(注意: 高层大气环流亦以带状环流为主, 但没有木星大气那样明显地分为几

带, 且带与带之间的过渡很突然), 而有一些旋转很慢与极赤温差很大或旋转很快的行星的大气环流却表现为明显的Hadley型(低空东北信风, 高空西南风), 即准轴对称而且具有南北风分界的环流。它们都不像地球上的大气环流那样以行星波为主要流型。

显然, 行星尺度大气运动的类型主要取决于水平温差和由重力与旋转角速率组合而成的参数。人们已经作了许多模拟试验——旋转圆盘试验。中心冷却, 外边加热, 调整向径温差和转速, 用于模拟各种类型出现的条件, 结果得到主要由所谓热力Rossby数 Ro_T^* 及广义Taylor数 $(G^*)^{-1}$ 决定, 如图5, 其中

$$Ro_T^* = \frac{\epsilon g H}{2\Omega^2 (b-a)^2} (T_b - T_c)$$

$$(G^*)^{-1} = (b-a) \Omega^2 g$$

这里 a, b 分别为转盘内外环半径; T_c, T_b 分别为相应的温度, H 为盘内液体厚度, ϵ 为其膨胀系数; g 为重力加速度; Ω 为盘的转动角速率。由图5可见, 当

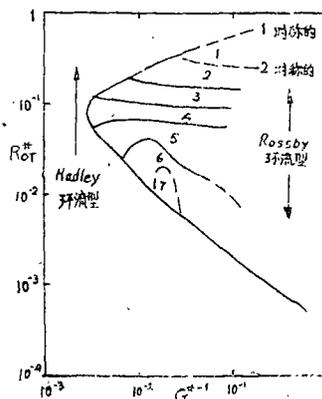


图5 转盘实验流型变化图 (Rossby流型区内数字为波数)

参数在一定范围内时, 运动是轴对称Hadley型, 但在另一区域内则突然转变为Rossby型, 准定常行星波的波数亦由上述二参数决定。这种实验结果可以很好地定性解释地球上大气和其他行星上大气流型的差异, 甚至还可以定性解释地球上大气环流冬季与夏季的区别。无疑, 这是一项很有意义的基本研究。现在亦已建立了相应的理论, 解释这种流型的转变, 在定性解释上是相当满意的, 不过在波数的转变方面以及另外一些现象方面, 理论与实验还有不小的差别。此外, 行星大气在旋转球体之上, 而非在转盘之上, 球面问题和平面问题有许多差别, 甚至可以导致质的差别。因此, 无论在实验上和理论上, 关于引力场中旋转流体运动的基本研究都有待发展。

2. 大气模式

如前所述,要在理论上建立大气大尺度运动的模式,必须考虑重力、科氏力的作用,容许热量交换的斜压性和可压缩性,即引力场中斜压旋转流体模式。当在较长时段内考察大气运动变化时,自然还应考虑到大气与外界能量交换,即必须考虑辐射传递方程和近地面层的导热机理。还需要指出的是,地球上的大气还有其独特之处,就是水汽相变释放潜热是一个非常重要的过程,云、雨的热力作用构成了大气的内热源。事实上,正是水汽成为热量交换的重要媒介,它把大部分地面吸收的大阳辐射带到大气中来。还有,既然考虑了能量的输入,就必须考虑耗散力的作用。因此,能够较好地描写大气运动的模式应该是:在重力场作用下有外源和内耗的斜压旋转流体力学模式。尤其是对气候形成和中长期天气预报来说,更是如此。当然,地形、海陆影响等在气象问题中也是非常重要的,也应考虑进来。

然而,为了弄清大气运动的纯动力学过程及其规律性,利用更为简单的大气动力学模式进行理论分析也是很有用的。这时可以不考虑外源和内耗。最简单的而又能抓住基本特性的大气动力学模式就是旋转球面上受重力场作用的可压缩流体运动。如再考虑到重力作用驱使大气质量聚集在很薄的范围之内,其厚度比大气运动的水平尺度小了二至三个数量级。因此,甚至还可再简化为研究沿高度平均的运动,即二维问题,这就是所谓二维或正压大气模式。有时甚至略去二维可压缩性,从而得到无辐散正压大气模式,它还能抓住一些主要特点;不过,在许多方面来说,它又过于简单了。

3. 旋转流体运动的适应过程

在旋转和重力作用下流体运动具有一些鲜明的特点。由于重力场的强大作用和大气运动的水平尺度远大于垂直尺度,这就使得大气运动具有明显的准水平性以及满足准静力平衡关系(重力和气压梯度力在垂直方向上的分量取得平衡)。这就是所谓适应于重力作用或“静力平衡适应”。

在满足静力平衡关系的条件下,由环境条件可以决定三个特征尺度:时间尺度 f^{-1} (或 ω^{-1} , ω 为地球自转角速率, f 为科利奥利参数),速度尺度 $C_0 = \sqrt{gH}$ (H 为大气等效高度, g 为重力加速度),以及水平长度尺度 $L_0 = C_0 f^{-1}$ 。大气运动的相应特征量 t^* , U^* , L^* 和上述三量之比就是大气运动中的主要特征参数(无量纲量),即 $e^{-1} = t^* f$, $Ma = U^*/C_0$, $\mu^{-1} = L^*/L_0$ 。按这些参数可以区分大气运动的类

型: $e \ll 1$ 称为准地转运动, $Ma \ll 1$ 即低速流, $\mu^{-1} \geq 1$ 和 $\mu^{-1} \ll 1$ 分别称为大尺度的和中小尺度的。对于大气中行星波型的运动,就属于大尺度低速流,这时还常有 $e \ll 1$,即属于准地转运动。 e 常称为准地转小参数。 $e \ll 1$ 说明科氏力和压力梯度力处于准平衡状态,称为地转平衡关系。这是行星大气大尺度运动的又一个鲜明特点。

大气中不断有扰动源起作用。因此,在局部地区常可使 $e \ll 1$ 不满足。何以大气中从整体上说还能经常保持 $e \ll 1$ 呢?对于这种机理的认识无疑是个基本问题,这就是所谓地转适应过程问题,即大气大尺度运动有调整到地转平衡的趋势。研究表明,这种过程是非常快的,比日常见得到的大尺度流场的演变过程要快得多,故常见到 $e \ll 1$ 。

大气运动的第三个特点就是绕极涡旋为主,如前所述。在大气中,即使在行星波比较明显的时候,在一定条件下,大气环流也常有恢复到绕极涡旋状态的趋势。这说明存在着向地球旋转状态适应的机理,我们称之为“旋转适应过程”。很明显,旋转适应是大气环流和一群行星波作为一个整体的演变过程,故这种过程比单个行星波的演变过程要慢得多,是属于“中长期演变过程”和中长期天气预报的对象。全球规模的准平衡态的建立或恢复受更多因子的制约,不像局部地区那样容易达到,故旋转适应只在一定条件下才能完全达到。和旋转适应相反的过程则是非轴对称环流(行星波和闭合的涡旋)发展的过程。在大气中常是这两种过程交替出现,从而形成所谓“指数循环”现象,即以带状环流的强度作为指数,它是随时间振动的。带状环流为主谓之“高指数环流”,行星波和闭合涡旋明显谓之“低指数环流”。由高指数环流转变为低指数环流,常常受热力因子作用。

我们对适应过程有较多的研究,建立了较系统的地转适应过程理论,提出了初步的旋转适应过程理论,可解释地球上大气的指数循环和木星大气环流的带状结构。进一步的研究是很必要的。

4. 不同尺度运动的相互作用

大气中存在着空间尺度相差很大的各种运动,它们之间大都有较强烈的相互作用。而且有许多类的相互作用过程中,能量的转换正好和经典的湍流过程相反,即较小尺度运动正好是能源,能量由此转移到到更大尺度运动上来,成为产生和维持较大尺度运动的主要能源。例如一群群的对流云把能量反馈给台风环流,而气旋及长波则把能量反馈给超长波和带状环流。研究这类非线性相互作用问题无疑将会大大加深人们对自然流体流动过程以及天气系统的发生发展过

程的认识,从而有助于作好天气预报。但是这类问题的研究无论在数学上和物理上都有较大的难度。

就以大尺度大气运动来说。流场形势的转变也表现为运动的空间尺度的改变。在这里,科氏力的作用同样是一个决定性的因素。正是由于科氏力的作用,使得全球规模的大气运动不具有各向同性(以带状环流为主)。我们的研究还表明:由于旋转力场的作用使得能量确实可以由较小尺度运动转移到较大尺度运动。且当满足旋转适应条件时,能量还可全部转到带状环流(最大尺度的运动)上来。

应该指出,非线性相互作用问题迄今还只作过很少的研究,今后应从建立相互作用方程组、能量转移机理以及数学方法等方面加强研究。

5. 热源和边界的影响

大气中热量传递的形式和流场的形势有紧密的联系,并有强烈的相互作用。例如,极冰的界限以及海洋温度分布和大气环流长期状态有关,水汽含量、潜热释放以及云量多少及其对辐射场的作用本身就有关,水汽含量、潜热释放以及云量多少及其对辐射场的作用本身就是和流场形势演变相互制约着的。气候学从物理和动力学方面来考察就是热源、边界(海陆、地形)和大气运动相互作用之下大气运动的统计平均状态。当然,在考虑到热源和内耗之后,方程非常复杂,故现有的气候模式都是作了大量简化的。研究如此大大简化了的方程的结构稳定性是重要的。

就天气系统的演变过程来说。水汽凝结加热等的作用则是起着很重要作用的,而且通过热量的交换还使得一个天气系统和另一个天气系统耦合起来,产生强烈的相互作用。可惜在这方面只有一些物理考虑或者较复杂的数值试验结果,理论的研究还很少,是应该加强的。

至于地形起伏的动力和热力作用,也是迫使气流具有复杂形式的重要因子。地形的几何影响虽属流体力学中经典的绕体问题,但三维斜压绕流仍然是一个复杂而需大力研究的问题,尤其是非正常问题。

6. 运动的不稳定和突变

流体运动的不稳定性理论在大气动力学研究中曾起过较大的作用。就以长波(行星波)的不稳定问题来说,正压大气水平切变基流不稳定理论和斜压大气垂直切变基流的不稳定理论,在解释高空流场的迅速演变过程以及气旋发展等方面有许多贡献。这些理论结果已经在地球流体力学甚至一般的流体力学中广泛引用。但应指出,已有的理论都是讨论过于简化了的情况。简化主要在两方面:一是用了准地转模式,二

是方程作了线性化且取基流为平直的,基流形式又很简单。因此,所得结果只能说明一部分大气动力学过程的机理,但其实用上的意义就有限。这两方面都是要改进的。在第一个方面,近来已开始用原始方程研究平直气流上小扰动的不稳定性问题,即不采用准地转平衡近似,由此我们得到了“非地转不稳定”的一般判据。当 $U^*/C_0 > 1$ 时出现“超高速不稳定”,类似于可压缩气体的冲激波的形成;而在另外一些情况下则又退化为科氏力场中“惯性振荡”或“惯性波”的不稳定现象。在第二个方面,则应研究非平直气流问题,这或者是应用WKBJ方法,或者是直接应用非线性方程。

应用WKBJ方法不单可以研究非平直气流下的问题,而且能够给出扰动演变特性的许多很有意义的结果。例如,我们得到:重力-惯性波在非均匀气流传播过程中,振幅的增加(发展)将伴随着波长的变短;而涡旋波与此正好相反,即发展时波长变长,衰减时波长变短;发展和衰减的扰动各具有很不相同的结构。这些都与实际大气中的情况相吻合。WKBJ方法的进一步研究以及精确化是值得做的工作。

非线性不稳定理论研究应该加强。这方面的一个基本问题是不稳定的定义。对于不同的定义会有不同的处理方法,结果也会很不相同。不稳定定义应该既要有利于归纳和解决一般性的问题,又要便于理论分析。若采用扰动的方差大于某一给定量(例如大于初始方差的某个倍数),则有许多数值试验和半理论半试验的结果说明:大气运动一般是不稳定的。因初始场有观测误差,故作为初值问题求解方程进行天气预报,就只在一定时效内才有意义,这就是所谓预报时效或预报可能性问题。但应指出,研究特殊流场的不稳定问题也是有很大理论意义和实用意义的。即使从天气预报实践的经验来看,确有许多类型的中长期演变过程是可以预报的,不因初始场有不大的差别而不同。这说明这类流型是稳定的。找到这类流型并确定它们的演变规律,就可为中长期预报问题作出很大的贡献。举例来说,在许多情况下,由“低指数环流”转为“高指数环流”时一般有稳定性,我们提出的旋转适应过程也说明了这点。

非线性不稳定问题中另一个特出的问题是流型的突变现象。在转盘实验中,当沿径向的温差逐渐增大时,流型就会由Hadley环流型突然转变为Rossby环流型;在Rossby环流型区域内,也会由某一种波数的行星波突然转变为另一种波数的行星波。这种突变现象比较具体和比较明显,可用部分线性化或非线性不稳定理论方法来研究。大气中经常出现的则是另

一类突变现象，它表现为大气环流状态或天气系统演变过程中非常迅速地由一种状态转变到另一种状态，例如在过渡季节中，暖湿空气的北进和高空急流位置都有一种跳跃式的变化；大气环流由高指数环流转变为低指数环流的关键时刻，台风形成的关键时刻等，都表现为很突然的现象，天气预报员往往猝不及防而报错。但如何将这类问题抽象出来，形成一个数学物理上的突变模式并进行研究，还需作多方面的努力。

7. 数值天气预报和数值试验

既然大气运动是流体运动，所以天气预报可以而且应当作为初值问题由求解流体力学方程组而计算出来，这就是所谓数值天气预报方法。现在各国都已用这种方法作短期预报和中期预报，甚至试验作长期预报。数值天气预报业务的建立及其蓬勃发展，乃是大气动力学研究的一个凯歌式的巨大胜利。由于它发展极快，在短短二十余年就已经形成为气象学中一个重要的分支了。应该指出，数值预报是处在气象学、流体力学和计算数学这三者的汇合点上，它的发展也是流体力学和计算数学的伟大胜利。不仅如此，在当代，计算数学方法已经渗透到研究大气环流、大气动力学等各个方面，“数值试验”已经成为气象中很重要的一种研究方法了。如果说计算数学和流体力学相结合产生了“计算流体力学”，则大气动力学中的数值试验不妨也可称为“计算气象学”了。

数值预报等所要处理的是非线性偏微分方程的初值问题，数据量极大，要求计算的时限又长，因此计算稳定性和计算速率问题非常突出。它和气动力学中的高超音速绕体问题中间断解计算方法完全不同，但同样都是计算力学甚至计算数学中的大问题。为了解决像数值预报这样的初值问题的计算问题，现已发展起来一些独特的方法和相应的计算数学理论，例如能量守恒型差分格式的构造和分解算法（Splitting method）等等，这些在地球流体力学中甚至在计算数学中都可以认为是一些重要的成果。但必须指出，解决计算稳定性只是第一步，因为从预报的角度看，预报的准确度亦即计算精度才是最主要的问题。这个问题现在已引起人们的注意。

三、大气涡旋

1. 旋转流体中涡旋的重要性

在旋转流体中流场总具有涡量。就大气大尺度运动来说，涡量常比散度大一个数量级，有旋部分是主要的，即无论从三维或二维的涡量和散度而论，大气

运动均具有准涡旋运动的特点。具有较大散度的流场系统常常限于局部地区并以明显的通常称为波动（或重力-惯性波）的形式出现。不妨将上述的涡旋形式和通常的波动形式的运动简称为涡旋和波动。不过，在气象上，由于历史上的原因，常常把具有波状弯曲形态的流场也称为波动，例如所谓行星波等，而只把具有闭合环流的流场称为涡旋。但从整体来说，环绕地球的几个行星波系统仍然组成弯曲的绕极涡旋。从性质上说和重力-惯性波这类具有传递比气流速度大得多的波动完全不同。天气形势是天气预报中的一个主要对象，它实质上就是涡旋和涡旋群，例如，大到全球范围的绕极涡旋的整体特性，季节变换的主要高空气压槽脊，影响中期预报的副热带高压和阻塞高压等，和寒潮爆发相联系的高空大槽和冷涡以及气旋（风暴），都是几个并存的涡旋；台风和龙卷风则是非常强烈的涡旋；至于造成局部灾害性天气的大暴雨也与深厚的对流涡旋相联系。各种尺度运动间的相互作用问题，主要也是各种尺度和不同强度的涡旋间的相互作用。涡旋的结构不同，相互作用会有很大的不同。例如在关于旋转适应过程问题中，若全球只有两个涡旋中心（如图6），相互作用的结果是演变成为轴对称环流（图中虚线）；但若还有另外一个涡旋中心（如图7

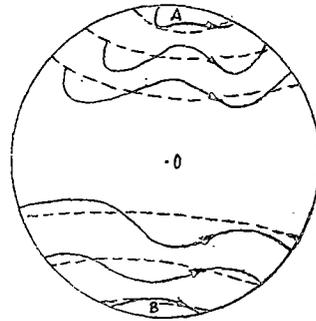


图6 有旋转适应时的流型

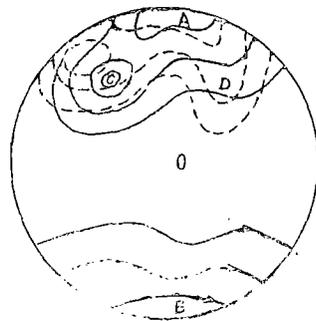


图7 无旋转适应时的流型

中的涡旋中心C)，则流场永远是非带状的和非定期的，还会出现准周期的振动等现象，例如由于中心C的存在，会引起下游槽D的加深（图中的虚线）。

2. 大气涡旋的特点

大气中的各种尺度涡旋的一个共同特点是大都有明显的斜压性，涡旋是动能的制造者和能量转换和传递的重要形式，是很复杂的现象，与经典的涡旋不同。气旋是冷暖气团交锋、冷空气侧向侵入暖空气下方、释放内能和位能、产生动力的机构，图8表示气旋在地面上的流场和温度场结构。图9表示通过图8中A-B线的垂直剖面上的温度场和流场，这是一种典型的情况，在许多实际的个例中还有许多复杂的细致结构。台风运动的维持则是由众多深厚的对流涡旋将水汽带到高空造成大量潜热释放所致，这些热量加热大气，成为一个暖中心，再由内能转变成台风涡旋流场的动能。图10是按卫星拍摄的台风云图复制的平面流场示意图。图11则是通过上图A-B线的垂直剖面图上台风的结构。

至于像行星波和由行星波强烈发展而成的涡旋，有时也可以看作正压二维涡旋，但这种涡旋的运动明显地受制于更大的绕极涡旋的影响和地球自转的影响。这种涡旋群的运动也是十分复杂的。

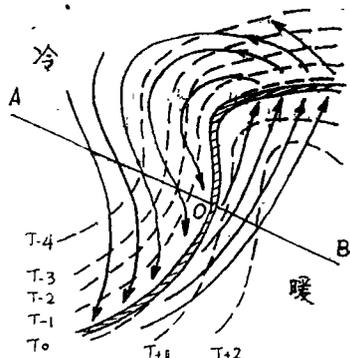


图8 气旋流场及温度场示意图
阴影带表示冷暖气团的界面

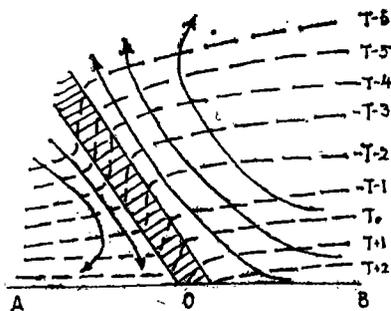


图9 通过气旋区的垂直剖面图 阴影带表示交锋区

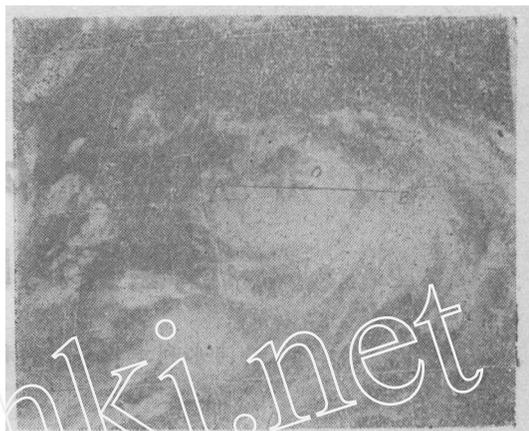


图10 气象卫星拍摄的云图（白色为密云区，黑色为无云区）

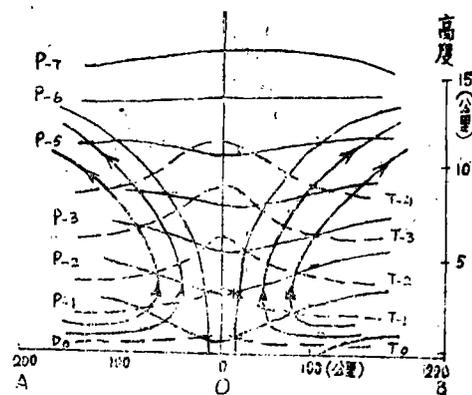


图11 通过台风中心的垂直剖面图

3. 涡旋模式和涡旋动力学

从上述可见，涡旋动力学的研究具有基础性和实用性双重意义。在流体运动形态中，层流、涡旋和波动是基本类型，而且涡旋还具有外观上更鲜明、易于辨认的几何形态。但似乎可以认为，即使在流体力学中，涡旋动力学的研究现在仍处于未成熟阶段。迄今在流体力学中研究较多的是波动，涡旋的研究相对来说比较少。涡旋模式比较简单，例如点涡、涡管（涡丝）、涡街等，还有用正交展开法将涡旋表示为各种振幅的非线性波的组合。但这些都不能很好地表示大气中的大涡旋，尤其是斜压三维涡旋的结构。因此，要研究大气涡旋的非定常运动，尤其是涡旋的相互作用，似乎从涡旋的数学表示法（涡旋模式），以及非线性方程组的定性和定量研究方面，都应有所创新。

利用实验方法研究大气涡旋也是可能的而且是有前途的。现在人们利用转盘已能模拟出冷暖气团间交锋区（锋面）的气旋。我国亦已成功模拟出台风的形成和结构。进一步的研究并且和理论研究紧密地结合起来，是很有意义的。