

大尺度大气动力学研究进展

陈久康 陆维松

(南京气象学院)

提 要

本文从动力不稳定性、大气运动的谱结构及其演变、准定常行星波动力学、波-流相互作用、大气环流遥相关机制的研究、阻塞形势动力学、波的破碎等7个方面,总结了大尺度大气动力学研究的进展情况。

一、关于动力不稳定性

大气运动的不稳定性问题,是一个经典而又困难的问题。非传统的不稳定性理论近年来有了较大发展。Arnold (1965)〔1〕提出了一种非常有力的变分方法来求不稳定性判据。Arnold (1965) 和 Dikii (1965) 给出了二维无辐散模式的带状流或常定曲线流的不稳定性判据。Blumen (1968) 给出了三维带有等熵下垫界面的地转模式的不稳定性判据。McIntyre等 (1987)〔2〕和 Andrews (1984a,b) 对这一理论方法作了推广。Shepherd (1988〔3〕, 1989) 应用 Arnold 的不稳定性定理,提出了正压和斜压一般基流非线性的普遍关系式。曾庆存 (1979, 1983〔12〕, 1985, 1986〔4〕、1990〔5〕) 将 Arnold 的定理推广为大气运动中普遍的不稳定性变分原理。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, 具有重要意义。

纬向非均匀气流的稳定性问题正成为大气动力学研究的一个热点, 这需要广义的时

间正交模理论来处理, 近年来提出了不稳定性理论及模式结果分析的新的论点。即, 非纬向气流的不稳定度依赖于绝对不稳定度的存在 (Merkine 1977〔6〕, 1978, Farrell 1983)。Pedlosky (1989)〔7〕进一步研究了纬向非均匀气流的不稳定动力学特征。

Farrell (1985〔8〕, 1988, 1989〔9〕) 指出, 由含 Ekman 摩擦的 Eady 和 Charney 模式的初值问题的解表明, 对于气旋空间尺度和真实的垂直湍流粘性系数值, 扰动有大的瞬变增长, 但所有的标准模指数衰减。这意味着指数不稳定一般不能解释中纬气旋尺度扰动的发展。Valdes 和 Hoskins (1988)〔10〕则认为即使含有 Ekman 摩擦的实际大气纬向平均状态对标准模也是不稳定的, 并肯定了 Farrell 注意初值问题的意义。他们认为对单个系统, 初值问题和非标准模增长问题是十分重要的。他们得到, 初始瞬变增长率在初始 1—2 天中比较标准模增长率大两倍。Farrell (1989)〔9〕则认为他们的 e 折叠时间尺度为 132 小时是不恰当的。看来, 单个系统的初始瞬变增长, 或非标准模的增长问题已成为当前研究气旋生成机制的一个很重要研究方向。在研究动力学非指数增长的扰动发展时, 进一步探讨不稳定性理论是很有意义的, 这种扰动与变形场有关。一般积分约

束条件,观测研究和模式研究一样可用于推广和发展新的设想,这种设想包括与非标准模形式的波动有关过程,在波动和大气环流的能量学中,这种暂时增长的作用,以及它与传统的标准模增长的关系值得进一步研究。

二、关于大气运动的谱结构及其演变

叠加在基流上的小扰动的演变过程是一个经典的理论问题。长时间以来,人们特别注意其中的运动失稳问题,并创造了标准模求解法,但 Case (1960)^[11]和 Burger (1966)指出,只有当基流为零时,对应离散谱的谱函数才是完备的,而当基流不为零时,对应于离散谱的谱函数(特征波动)可能是不完备的,仅有离散谱的线性组合,不能表示任意的扰动。曾庆存(1979,1982,1983^[12]),卢佩生(1981),陈久康(1980)^[13],为了克服这一困难,改用波包表示法,指示出扰动发展与否的普遍性判据,以及波幅,波长,波速随时间变化的规律性。陈久康(1980)还提出了 β 效应随纬度变化对波演变的影响,首次提出了 δ 效应问题。杨惠君(HuiJun Yang, 1987, 1988^[14], 1989)采用 δ 平面近似,系统讨论了 δ 效应对Rossby波包的演变影响问题。

曾庆存,卢佩生等(1986^[15], 1990^[16])采用更通用的方法,研究了线性准地转模式,线性原始方程模式的谱及相应的标准波动的性质和结构,给出了正压原始方程连续谱的表达式,并指出在波-流相互作用中连续谱占有重要地位。

三、关于准定常行星波动力学

Hoskins等(1981)研究了球面大气对热力和地形强迫的定常线性响应。黄荣辉等(1982)给出了球面34层准地转模式对大地形和定常热源的响应。Alpert(1983) Jacgmin和Lindzen (1985) Lin (1983) 认

为,运用线性理论就可以得到定常波动的主要特征。Nigan等(1986)通过精密的大气环流模式研究,证明了线性理论的适用性,并指出了它的缺陷。雷兆崇(1988)^[17]研究了球面多层原始方程模式对大地形和热力强迫的线性和非线性定常响应。他认为,在纬向平均基本气流相对较弱的区域和层次上,非线性响应与线性响应有明显大的差异。30°N以南的热带区域加热场对中高纬行星波有重要影响,但不如热带外区域加热场及地形动力强迫作用影响大。Lindzen (1986)^[24]也曾对热带加热在强迫高纬定常波中起着主要作用提出质疑,他认为,PNA型只能说明行星波变化的18%,显然,PNA中热带部分忽略后,并不会对行星波的变化有大的影响。

四、关于波-流相互作用

Eliassen和Palm (1960)以及Charney和Drazin (1961)提出了关于平均气流和波动相互作用引起平均场变化的无加速理论。这一理论由于Andrews和McIntyre (1976)引进准拉格朗日意义下的平均气流转换方程和定义新的E-P通量以及余差环流而得以广泛推广。Edmon, Hoskins和McIntyre (1980)将无加速定理推广到任意振幅的扰动,并借此研究定常涡旋和瞬变涡旋对平均气流的作用。Stone和Salustri (1984)^[18]则定义了湿E-P通量,同时证明湿空气中的无加速定理。Andrews(1983), Plumb (1985, 1986^[20])则把E-P通量概念推广到三维的情形并讨论了波与非纬向对称流相互作用守恒定理。Pfeffer(1981)曾把郭晓岚(1956)的平均经圈环流方程引进波-流相互作用的研究中,从而考虑了波-流相互作用时,次级环流的影响。吴国雄(1989)^[19]采用类似处理方法,提出了原始方程中的无加速定理。该理论还推广到湿空气中,得到有无凝结作用时,E-P通量有

很大不同。

五、关于大气环流遥相关机制的研究

近年来长期天气过程物理机制的研究日益深入,特别对北半球三维遥相关及其物理机制作了不少研究。Wallace等(1981)发现了北半球冬季五个遥相关型, Hoskins与Karoly(1981)把叶笃正所提出的Rossby波频散理论推广到球面大气中,提出了“大圆路径传播理论”。黄荣辉等(1982,1983,1984)利用波的折射指数平方与E-P通量系统地研究了准定常行星波的传播规律,特别是提出了两支波导,引起国内外重视。陆维松(1989)^[21]直接从物理直观导得球面上定常波传播的普遍方程。由于准定常行星波在球面大气中的传播,某区域大气环流异常会引起另一些区域大气环流的异常。

Moura和Shukla(1981), Keshavamurty(1982), Shukla和Wallace(1983), Tokicha等(1985)利用数值模拟方法研究了PNA遥相关产生机制,赤道东太平洋海表温度异常增暖,将会引起北半球PNA型大气环流的异常。Gambo, 卢理和李维京(1987)^[22]模拟了热带大西洋海温异常对北半球欧亚型环流异常的作用, Nitta(1987), 黄荣辉等(1987^[23], 1988)从观测上和数值模拟指出西太平洋海表温度异常增暖所引起的菲律宾周围的对流活动异常活跃,会引起盛夏东亚上空西太平洋副高加强和北半球夏季环流异常,黄荣辉等(1985)还模拟了青藏高原夏季热源异常对北半球大气环流异常的作用。

Simmons, Wallace和Branstator认为即使没有发生厄尔尼诺现象,也可能由于纬向非均匀气流的正压不稳定引起PNA型。王国民和黄仕松(1989)通过数值试验提出,时间平均环流的空间结构对低频波的结构特征有重要影响,在急流区上游,低频波沿西北—东南向波导向副热带频散,而在急

流出口区,则出现PNA型遥相关。

六、关于阻塞形势动力学

对于阻塞这种现象,国际上举行了专题研讨会,主要有波-波相互作用,波-流相互作用,外部源、汇作用,线性共振作用等形成阻塞的机制,这是全局性的。另一方面,还有从局地性的孤立子和偶极子来讨论阻塞的形成和维持。在波-波相互作用中, Egger(1978), Wiin-Nilsen(1986)等提出自由波与地形波非线性共振相互作用是产生阻塞的主要机制,陆维松(1989)^[21]提出波的非线性准共振可能产生阻塞,并指出准共振的频率偏离与中纬低频振荡有关。在波-流相互作用中, Kalnay-Rivas和Merkine(1981)提出基流纬向非均匀性产生的不稳定,可能激发背风波列的形成,从而使得阻塞产生。Simmons(1983)利用真实纬向非均匀的基流得到,其不稳定模对应低频波列。在研究阻塞的许多工作中都包含了外部源汇作用。Lindzen和Tung(1979, 1986)提出了波动与大地形线性共振即可产生阻塞,而Charney等(1979)开创的多平衡态与阻塞也可看作有外源下基流与波的相互作用。我国朱抱真、朱正心强调了热力作用在产生阻塞作用。纪立人则引入大地形作为强迫项直接研究阻塞。在局地观点中,一种是偶极子,自从Stern(1975)首先提出偶极子解以来, McWilliams, Flierl(1980)等将偶极子用于解释阻塞的形成。为了解释偶极子的成因, Shutts(1983, 1986)提出了瞬变涡旋与局地非线性“自由模”——偶极子型的共振是阻塞形成的重要机制。Pierrehumbert等(1984, 1985), Read(1985)也强调了这种大尺度涡旋的强迫作用。另一种是孤立波, Malguzzi和Malanotte-Rizzoli(1984, 1985)详细研究了弱非线性Rossby波孤立波作为理想阻塞模型,提出涡旋强迫机制维持孤立波。为了说明偶极

子和孤立子这样的定常解的激发机制, Hou和Farrel (1986) 从数值试验和理论分析得到, 在无粘Couette流中的一个有限振幅正压波能演变为准定常的永形波。这表明准定常状态能够从缺少直接强迫力的初始条件的区域中产生。他们认为, 一个有限振幅波与平均流相互作用能够产生定常解, 这是从初值激发闭合的非线性偶极子和孤立波的可能机制。Young (1987)⁽²⁶⁾进一步提出, 定常解的形式取决于能量与动量平方之比: $e = E/M^2$ 。当此参数 e 小于临界值, 最小位涡拟能解是平行流, 而当 e 大于临界值, 最小位涡拟能解是有限振幅Rossby波。此时能量、环流和动量均为常数。值得注意, 上述Hou和Farrell⁽²⁵⁾的解使用了不适当的通道长宽比。不是最小位涡拟能解, 但若利用这个不适当的长宽比, 其最小位涡拟能解可能是平行流。Butchart等 (1989)⁽²⁷⁾利用位势函数 $A = dq/d\psi$ 将弱非线性的孤立子与强非线性的偶极子联系起来统一考虑, 函数 A 提供了这两种孤立相干结构的共同的动力学特征。我国巢纪平等 (1980) 用非线性椭圆余弦波解释阻塞, 刘式达、刘式适 (1982)⁽²⁸⁾, 1989) 用孤立波来解释阻塞形势, 罗哲贤 (1989)⁽²⁹⁾也作了强迫耗散孤立子与局地阻塞的研究。吕克利 (1988)⁽³⁰⁾的研究认为, 基本气流的经向切变对西风带中Rossby孤立波的形成具有重要作用, 较强的切变则能形成类似于阻塞高压的流型。

七、关于波的破碎

已经证明, Rossby波也会像重力波一样, 有类似的波破碎现象 (McIntyre和Palmer 1984), 为了探索这种可能的现象, 已经分析了中层大气资料 (Leory等1985)。Warn (1976), Warn和Stewartson (1978) 提出了非线性对临界层的作用, 得到了著名的SWW解。Killworth和McIntyre (1985)⁽³¹⁾利用SWW解得Rossby波的破

碎, 并研究了Rossby波的临界层的吸收, 反射和超反射问题。Maslowe (1986)⁽³²⁾对切变流中非线性临界层研究的进展作了综述。Held等 (1987⁽³³⁾, 1989) 提出了球面上正压和斜压切变流上扰动的线性和非线性衰减, 在非线性和耗散两种作用下, 临界层附近Rossby波破碎, 且有可能产生反气旋。非线性临界层和Rossby波的破碎是当前大气动力学一个很活跃的研究方向。

大尺度大气动力学研究涉及的领域相当广泛, 本文回顾的7个方面研究的进展, 并非是问题的全部。另外, 非线性大气动力学、热带大气动力学、海-气相互作用动力学也是近10年来十分活跃的研究领域, 并取得了可喜的进展⁽³⁴⁾, 鉴于其他同志已进行了全面的总结, 这儿就不再介绍了。至于大尺度大气动力学的数值模拟研究, 也已有很好地评述文章, 这儿也不再提及。

参考文献

- (1) Arnold, V.I., conditions for nonlinear stability of stationary plane curvilinear flows of an ideal fluid, Doklady Akademia Nauk USSR, 162, 975—978, 1965.
- (2) McIntyre, M.E. and T.G. shepherd, An exact local conservation theorem for finite-amplitude disturbances to non-parallel shear flows, with remarks on Hamiltonian structure and on Arnold's stability theorems, J. Fluid Mech, 181 527—565, 1987.
- (3) Shepherd, T.G., Rigorous bounds on the nonlinear saturation of instabilities to parallel shear flow, J. Fluid mech., 196, 291—322, 1988.
- (4) Zeng Qingcun, Variational principle of instability of atmospheric motions, Proceedings of Inter summer colloquium on nonlinear dynamics of the atmosphere, Science Press, 175—186, 1989.
- (5) 曾庆存, 大气运动不稳定的变分原理, 南京气象学院学报, 13, 123—157, 1990.
- (6) Merkin, L., Convective and absolute in-

- stability of baroclinic eddies, *Geophys. Astrophys. Fluid Dynamics*, 9, 129—157, 1977.
- [7] Pedlosky, J., Simple models for local instabilities in zonally inhomogeneous flows, *J. Atmos. Sci.*, 46, 1769—1778, 1989.
- [8] Farrell, B.F., Transient growth of damped baroclinic waves, *J. Atmos. Sci.*, 42, 2718—2727, 1985.
- [9] Farrell, B.F., Unstable baroclinic modes damped by Ekman dissipation, 46, 397—401, 1989.
- [10] Valdes, P.J., and B.J. Hoskins, Baroclinic instability of the zonally averaged flow with boundary damping, *J. Atmos. Sci.*, 45, 1584—1993, 1988.
- [11] Cae, K.M., stability of inviscid plane couette flow, *The physics of fluid*, 3, 143—148, 1960.
- [12] Zeng Qincun, The evolution of a Rossby Packet wave in a three-dimensional baroclinic atmosphere, *J. Atmos. Sci.*, 40, 73—84, 1983.
- [13] 陈久康, 正压大气球面行星波螺旋结构变化的机制, *气象科学*, 1, 27—41, 1980.
- [14] Huijun Yang, Global behavior of the evolution of a Rossby wave packet in barotropic flows on the Earth's δ -surface, *J. Atmos. Sci.*, 45, 133—146, 1988.
- [15] 卢佩生, 卢理, 曾庆存, 正压准地转模式的谱和扰动的演变, *中国科学 (B)*, 29, 1225—1233, 1986.
- [16] 曾庆存, 李荣风, 张铭, 旋转二维可压缩流动的谱和特征函数, I: 谱点的分布, *大气科学*, 14, 129—142, 1990.
- [17] 雷兆崇, 一个大气定常波的非线性初始方程谱模式, *热带气象*, 4, 1988.
- [18] Stone, P.H. and G. Salustri, Generalization of the quasigeostrophic Eliassen-Palm flux to include eddy forcing of condensation heating, *J. Atmos. Sci.*, 41, 3527—3536, 1984.
- [19] Wu, Guo-xiong and Chen Biao, Non-acceleration theorem in a primitive equation system; I acceleration of zonal mean flow, *Adv. Atmos. Sci.*, 6 1—20, 1989.
- [20] Plumb, R.A., Three-dimensional propagation of transient quasi-geostrophic eddies and its relationship with eddy forcing of the time-mean flow, *J. Atmos. Sci.*, 43, 1657—1678, 1986.
- [21] 陆维松, 球面定常行星波的几种传播路径, *气象学报*, 47, 221—226, 1989.
- [22] Gambo, K., Lu, L., and Li, W.J., Numerical simulation of Eurasian Pattern teleconnection in the atmospheric circulation during the Northern Hemisphere winter, *Adv. Atmos. Sci.*, 4, 385—394, 1987.
- [23] Huang, R. H., and Li, W. J., Influence of the heat source anomaly over the western tropical Pacific on the subtropical High over East Asia, International conference on the General circulation of East Asia, April 10—15, 1987, Chengdu, China.
- [24] Lindzen, R.S., Stationary planetary waves, blocking and interannual variability, *Advances in Geophysics*, 29, 251—272, 1986.
- [25] Hou, A.R. and B.F. Farrell, Excitation of nearly steady finite-amplitude barotropic waves, *J. Atmos. Sci.*, 43, 720—728, 1986.
- [26] Young, W.R., selective decay of enstrophy and the excitation of barotropic waves in a channel, *J. Atmos. Sci.*, 44, 2804—2812, 1987.
- [27] Butchart, N. et al, A theoretical and diagnostic study of solitary waves and atmospheric blocking, *J. Atmos. Sci.*, 46, 2060—2078, 1989.
- [28] 刘式达, 刘式适, 大气中的非线性椭圆余弦波和孤立波, *中国科学*, 25, 372—384, 1982.
- [29] 罗哲贤, 阻塞高压形成机制的数值研究, *中国科学 (B)*, 32, 665—672, 1989.
- [30] 吕其利, 大地形与正压Rossby孤立波——弱二次切变基本气流, *气象学报*, 46, 412—420, 1988.
- [31] Killworth, P.D. and M.E. McIntyre, Do Rossby-wave critical layers absorb, reflect, or over-reflect? *J. Fluid Mech.*,

- 161, 449—492, 1935.
- [32] Maslowe, S.A., Critical layers in shear flows, *Ann. Rev. Fluid Mech.*, 18, 405—432, 1986.
- [33] Held, I.M. and P.J. Philips, Linear

and Nonlinear barotropic decay on the sphere, *J. Atmos. Sci.*, 44, 200—207, 1987.

- [34] 工作总结, 中国气象学会动力气象委员会, 1990年。

Achievements in the research on large-scale atmospheric dynamics

Chen Jiukang

Lu Weisong

(Nanjing Institute of Meteorology)

Abstract

In this paper, some achievements in the research on large-scale atmospheric dynamics are reviewed.