

大中尺度波流相互作用理论的研究*

高守亭 陶诗言

(大气物理研究所 北京 100029)

摘要 介绍了作者所在课题组在瞬变波与纬向平均流的相互作用,重力波上传破碎对平均流拖曳的参数化问题,低频波能量频散的广义波射线理论与与地形有关的波流相互作用的理论及应用问题研究方面取得的进展。

关键词 波,基本流,广义 E-P 通量,广义波射线,波流相互作用

大气中存在着最基本的两种现象:波与基本流。基本流上叠加有各种不同时空尺度的波动,波与流之间不断有能量的转换,存在着明显的波流相互作用,导致了千变万化的天气现象。所以波与流相互作用的研究是大气动力学中最根本的理论之一,有着重要的理论价值和广阔的应用前景。

近年来,我们重点研究瞬变波同纬向平均流相互作用的理论、波上传及波破碎理论、广义波射线变形理论及与地形有关的波流相互作用的理论和问题。以上四个方面是我们从对大量重要大气观测现象的研究中提炼出来的,这些重要理论可以解释或预测重要的天气、气候异常现象。

1 瞬变波与纬向平均流的相互作用的研究

1.1 斜压大气的广义 E-P 通量理论

自有高空观测资料以来,观测到几种重要的天气现象:一种是赤道平流层东西风的准两年振荡(称 QBO 现象),即出现周期近两年的东西风交替分布。相当长一段时间,人们不知如何解释这一现象,直到 1968 年,林潞(Lindzen)和霍尔顿(Holton)^[1]利用重力波上传破碎理论,科学地解释了这一现象,这是波流作用理论的第一次创新。另一种现象

是极地平流层平均 3、4 年左右有一次明显的爆发性增温,这一现象也困惑了人们相当一段时间。直到 1970 年,马宗诺(Matsumoto)^[2]提出行星波上传与临界层作用的理论,完美地解释了这一现象。这是波流理论研究中的第二次重大创新。第三种现象是对流层顶附近的高空急流有时出现明显的增强与加速现象。很长时间以来人们观测到这一现象的存在,但没有科学的理论解释。因为通常的 E-P 通量(瑞典著名数学家伊利亚逊(Eliassen)和潘尔姆(Palm)1961 年在研究驻山波上传时提出的波动的热量通量或动量通量对平均流的强迫效应,后称 E-P 通量)散度中存在病态条件项,即 E-P 通量中的 $(\overline{u'v'})_y$ 项用实际资料计算出的量值比用尺度分析得出的量值要小一个量级,因此用它来诊断纬向平均流的加速常造成较大的误差。同时, E-P 通量的 $(\overline{uw'})_z$ 项中 w' 的量级较小,也不易测准,致使这项计算也不可靠。所以,用通常的 E-P 通量关系就无法很好地诊断高空急流增强现象。又因为高空急流与高空锋区紧密相连,是斜压性很强的区域,所以,安德鲁(Andrews)等^[3]提出的正压大气的广义 E-P 通量,也不适用于解释诊断高空急流增强现象。

* 收稿日期:2001 年 2 月 12 日

经研究, 我们提出斜压大气的广义 E-P 通量理论^[4,5], 并对高空急流的加强、加速现象做了科学的诊断和解释。有关专家认为这是波流理论作用研究中的又一次重大创新和突破。

1.2 急流加速诱导大气低层的锋生理论

以往, 大气低层锋生理论主要流行着伊迪 (Eady) 斜压波增长的观点, 尤其流行哈思根斯 (Hoskins) 和布瑞泽顿 (Bretherton)^[6] 提出的半地转理论的锋生模型。该模型着眼于大气的低层流场和温度场的变化, 没有把高空流场的变化同低层的现象很好地联系起来, 所以不能构成完整的三维图像。但通过对波与流相互作用的深入研究, 我们^[6] 针对我国长江流域锋生的特点, 提出了急流加速引起长江流域锋生的理论, 即发现瞬变波会把自己的热量和动量通量输送给纬向平均流, 使得在该范围内的急流带加速。这就加强了高空急流的地转适应过程, 使急流适应的次级环流本身就会诱发低层锋生。这是一种高低空结合的三维的锋生理论, 同哈思根斯 (Hoskins) 的半地转锋生理论完全不同, 并提出了这种锋生概念的物理模型, 这一模型已经被观测所证实。

2 重力波对平均流拖曳效应参数化理论的研究

就大部分平流层和整个中层大气来说, 最高的温度发生在夏极区 (即赤道地区), 而最低的温度发生在冬极区 (即北极地区), 可是大约在 70 km 以上, 经向温度梯度发生逆转, 以致在中层大气上部最低的温度发生在夏极区, 而最高的温度发生在冬极区^[8], 在中层大气顶附近 (大约 80 km), 就平均而言, 夏极区的温度大约为 70—80℃, 低于冬极区的温度。这样的温度分布远远偏离辐射平衡, 很显然存在动力上的调整过程, 会造成每天大约 50 cm/s 的纬向风的增速^[9]。这样, 中层大气就会有十分强大的纬向风, 但实际上并没有观测到, 所以必存在一种力对纬向风进行拖曳而使之减速, 这种拖曳力, 经众多研究, 已被公认为是上传重力波的破碎引起的。重力波破碎的重要作用, 在所有的 GCM (大气环流模式) 中都必须对重力波的破碎效应进

行参数化。在诸多的参数化方案中, 最值得提及的是麦克法兰 (McFarlane) 的重力波对平均流拖曳参数化方案^[10]。该方案在前些年一直被采用, 并置于美国国家大气研究中心 (NCAR) 的气候模式以及欧洲预报中心的模式中。通过对该参数化方案的仔细研究, 我们发现该方案存在一个重要的缺点, 即没有考虑在波破碎区由于波的破碎引起的波的动量通量的减少, 对减少的部分没有进行参数化。事实上, 减少的那部分对平均流也有影响, 因为波动量通量的损失会引起耗散, 而耗散效应同样会影响平均流。针对该参数化方案中这一概念上的不足, 我们^[5] 提出了一个新的完整的关于重力波拖曳效应的参数化方案。

3 广义波射线的理论研究

研究大气低频振荡的重要性主要在于, 低频波在固定地理区域内重复出现会造成特有的流型域或波流型, 如果这种情况持续下去, 会使大气环流在某些地理区域出现异常或变异。又因低频波的能量以群速度传播的方式向远处频散, 造成大气遥相关, 所以最主要的是要研究低频波的传播路径, 即波射线理论。自麦登 (Madden) 和朱利安 (Julian)^[11,12] 发现 40 天低频振荡以来, 很多学者的研究认为, 低频振荡不仅沿赤道东传, 而且沿经向向北传播。哈思根斯 (Hoskins) 等^[13] 在研究球面罗斯贝 (Rossby) 波传播时, 提出所谓大圆路径理论来解释低频波的能量频散现象。这个理论指出, 波能量的频散路径绕地球类似一个大圆, 但大圆路径理论没有考虑基本流随高度及纬度的变化, 也没有考虑大地形及海洋加热等外强迫的影响。我们^[5] 将哈思根斯 (Hoskins) 大圆理论推广到存在实际西风廓线的基流以及地形强迫条件下的数学模型中, 提出了低频波列波射线“大圆路径”变形的广义波射线理论。揭示了波流作用过程中经向波的传播特征, 并进一步用数值模拟试验证实了低频遥相关波射线变形可能表现出正弦波列路径特征的物理图像。

4 与地形有关的波流相互作用的研究

观测事实以及数值试验均表明, 有些系统的形成及加强可能是区域外的强迫及其波流非线性相

互作用的动力过程共同造成的。区域性持续灾害天气往往与某些相隔遥远的海陆热力差异、极地或高原等强迫源的影响有紧密关系,这些大气动力过程构成了不同尺度的遥响应异常流型。通过 1951—1990 年 40 年的江淮夏季降水量与北半球海平面气压相关场的分析发现,青藏高原地区为北半球上述两要素的高相关区之一。值得注意的是,夏季江淮旱涝与前期青藏高原地面温度存在较显著的相关,江淮夏季降水与前期 3 月份地面气温在中国东部呈负相关,尤其长江中下游更显著;在中国西部则呈正相关,尤其中国西南或青藏高原南侧更为显著。为了证实前期高原的热力异常状况对东亚梅雨期环流型形成的作用,我们采用 OSU-AGCM 模式(美国俄勒冈州立大学大气环流模式)进行了一系列的数值试验。试验结果表明,青藏高原下垫面的适度增温有利于乌拉尔山阻塞高压的加强,且鄂霍次克海高压脊亦加强,形成双阻高环流背景,江淮流域处于两阻高脊间的低槽低部,槽后冷空气与副热带高压西侧的暖空气在江淮地区交汇,造成江淮持续暴雨的有利形势。当高原地表增温过强时,乌拉尔山阻高明显减弱,副热带高压明显西伸,两脊间的低压槽明显减弱,江淮地区处于副热带高压脊西侧的单一西南气流控制之下,冷暖气流的交汇发生于长江上游地区,不利于江淮地区形成持久稳定的雨带。我们^[5]探讨了形成我国灾害天气系统的各类地形外强迫源及其不同时空尺度遥响应的作用,较系统地阐述了行星尺度准定常环流型、区域性特征流型及其异常灾害现象的形成。我们^[4]还进一步揭示了地形强迫因子与波流作用形成的阻塞流型及其偶极子系统特征,以及广义外强迫源与波流作用之间的动力学原理,从而揭示出大气运动状态对外强迫的各类时空尺度响应特征。

我国地形复杂是众所周知的,天山、秦岭等都是阻挡气流的屏障,加之我国是典型的季风国,夏季风及冬季风都会遇到这些屏障而产生流动的阻滞及形变,发生与地形有关的波流相互作用。夏季风受阻时,会因地形抬升而导致对流云的发展,甚至产生风暴系统,造成大的降水等灾害天气现象;冬季风受阻时,在山的迎风面会形成冷垫,甚至低

层的冷空气迎坡爬升,致使其进一步绝热降温,结果造成迎风面的低温区。若其上有来自相反方向的暖空气爬升,则在隆冬季节造成典型的大冰冻天气,在春季则造成典型的低温连阴雨天气。所以,与地形有关的波流相互作用的研究也是国民经济发展的需要。因此,我们详细研究了冷空气遇山受阻后的波流相互作用理论,很好地解释了低温连阴雨及大冰冻天气形成的机理。在相空间里,利用相似原理,得到 Froude 数是表征冷空气遇山受阻强度的最有效的参数的结论,建立了冷空气受阻的界面方程,通过动力分析,找出了冷空气受阻时,出现平行于山的急流的动力机制,并对如何预报这种现象作了理论及方法上的阐明。

本项研究是大气动力学的基本理论之一,涉及很多艰深的理论问题。如斜压大气中的广义 E-P 通量(去除了病态条件的 E-P 通量),A-B 混合方程法(波和基本流相互作用方程组),高空急流加速诱导低层锋生理论,气流遇山受阻时的波流相互作用理论,广义波射线理论等。本项研究推动了大气动力学的发展。作为大气动力学的基本理论,本研究的成果可以用来解释天气学中的很多现象,从而推动了高等天气学的发展。我们的部分研究成果可应用于对长江流域旱涝异常、江南春季低温阴雨及冬季大冰冻的预报,也可用于分析江淮锋生及西南低涡的形成等。我们提出的新的重力波破碎参数化方案被国家“九五”重点科技项目“我国气候预测系统的研制”的第二专题“季节预测模式的研制”所采用。研究论文分别发表在美国《大气科学》(*Journal of Atmospheric Sciences*),英国《季风气象学》(*Monsoon Meteorology*),《中国科学(英)》(*Science in China*),《大气科学进展》(*Advances in Atmospheric Sciences*)等,共计 40 多篇。被国外 SCI 文章引用 157 次,被国内文章包括 SCI 文章引用 160 多次。

参考文献

- 1 Lindzen R S, Holton J R. A theory of the quasi-biennial oscillation, *J. Atmos. Sci.*, 1968, 25: 1 095– 1 107.
- 2 Matsuno T. Vertical propagation of stationary planetary waves in the winter Northern Hemisphere. *J. Atmos. Sci.*, 1970,

- 27: 871– 883.
- 3 Andrews D G , McIntyre M E. Planetary waves in horizontal and vertical shear: the generalized Eliassen– Palm relation and the mean zonal acceleration. *J. Atmos. Sci.* , 1976, 33: 2 031 – 2 048.
 - 4 Murgatroyd R J. The structure and dynamics of the stratosphere, in: Corby G A. *The Global Circulation of the Atmosphere*. London: Royal Meteorological Society, 1972, 159.
 - 5 徐祥德, 高守亭. 外源强迫与波流相互作用动力学原理. 海洋出版社, 1999. 245.
 - 6 Hoskins B J, Bretherton F P. Atmospheric frontogenesis models: Mathematical formulation and Solution. *J. Atmos. Sci.* , 1972, 29: 11– 37.
 - 7 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.
 - 8 Gao Shouting, Tao Shiyan. The generalized E-P flux of wave– meanflow interactions. *Science in China (Series B)* , 1990, 33 (6): 704– 715.
 - 9 Holton J R. The role of gravity wave induced drag and diffusion in the momentum budget of the mesosphere. *J. Atmos. Sci.* , 1982, 39: 791– 799.
 - 10 McFarlane N A. The effect of orographically excited gravity wave drag on the general circulation of the lower stratosphere and troposphere. *J. Atmos. Sci.* , 1987, 44: 1 776– 1 800.
 - 11 Madden R A, Julian P R. Detection of a 40– 50 day oscillation in the zonal wind in the tropical Pacific. *J. Atmos. Sci.* , 1971, 28: 702– 708.
 - 12 Madden R A, Julian P R. Description of global scale circulation cells in the tropics with a 40– 50 day period. *J. Atmos. Sci.* , 1972, 29: 1 109– 1 123.
 - 13 Hoskins B J, Karoly D J. The steady linear response of a spherical atmosphere to thermal and orographic forcing. *J. Atmos. Sci.* , 1981, 38: 1 179– 1 196.
 - 14 高守亭, 朱文姝, 董敏. 大气低频变异中的波流相互作用(阻塞形势). *气象学报*, 1998, 56: 665– 679.

The Study of Large– scale and Mesoscale Wave and Flow Interaction Theory

Gao Shouting Tao Shiyan

(Institute of Atmospheric Physics, CAS, 100029 Beijing)

In this paper, it is pointed out that the wave-flow interaction is not only an universal phenomenon in atmosphere, but also one of main reasons leading to various synoptic phenomena and climatic anomaly. Many important synoptic phenomena may be explained scientifically by the theory of wave propagation and the E-P flux theory of wave-flow interaction. Here the theory of atmospheric lower layer frontogenesis induced by the acceleration of upper level jet stream is introduced. The parameterization of mean-flow dragging effect caused by gravity wave propagating up and its breaking is described. The generalized wave ray theory of the energy dispersion of the low-frequency wave, the theory of wave-flow interaction related to topography and their application are narrated.

高守亭 男, 中国科学院大气物理研究所研究员, 博士生导师, 该所创新基地中小尺度与灾害研究部主任。长期从事波流相互作用理论及大中尺度动力学的研究, 1990—1992 年在英国做博士后, 主要研究背风波和背风气旋问题; 1993—1995 年在美国工作, 集中研究与地形有关的波流相互作用问题。在国内外发表论文 40 余篇, 出版专著一部。2000 年获中国科学院自然科学奖二等奖。