

波流相互作用与波动传播模态

徐祥德¹ 冉令坤²

¹ 中国气象科学研究院, 北京 100081

² 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029

摘 要 波和流是大气中两种最基本的运动形式, 两者之间的相互作用可以导致千变万化的天气现象。波流相互作用理论是大气动力学的基本理论之一, 该理论的研究具有重要的理论价值和科学意义。波流相互作用的研究主要包括两方面: 一方面是可以描述基本气流对波强迫作用的“波作用”(守恒)方程的研究, 另一方面是可以描述波对基本气流反馈作用的 E-P 通量以及波形变、传播等理论的研究。波流相互作用的研究不仅在理论上已取得重要进展, 例如, E-P 通量的提出, 剩余环流的引进, 广义 E-P 通量的出现, 三维 E-P 通量的建立, 波作用守恒方程、波动突变、波流稳定性结构、波形变及其大圆路径、低频波遥相关等理论的发展, 而且在实际应用上也取得丰硕成果, 如科学地解释了赤道平流层东西风准两年振荡、极地平流层爆发性增温、瞬变波对阻高的维持和高空急流加速以及大气低频波遥相关等, 特别是为预测行星波的传播, 研究风暴轴和诊断分析实际大气中波能集中区和发散区提供了理论基础和科学方法。作者从小振幅和有限振幅扰动两方面回顾了国内外波流相互作用和低频波传播理论的研究进展, 重点介绍了大尺度环流系统波流相互作用和波动传播模态的最新研究成果, 提出了不同动力、热力背景下多尺度波流相互作用机理及其理论模型, 建立了非线性大气动力学突变及其稳定性结构等理论。相对来说, 热源强迫和地形强迫引起的波流相互作用中稳定性问题的研究一直比较薄弱, 特别是关于大气水分循环过程和青藏高原等复杂大地形影响下不同尺度系统波流相互作用的研究, 这也是未来波流相互作用研究的一个重要内容。

关键词 波流相互作用 波动传播模态 E-P 通量 波作用方程

文章编号 1006-9895(2007)06-1237-14

中图分类号 P433

文献标识码 A

Wave – Flow Interaction and Wave-Propagation Modes

XU Xiang-De¹ and RAN Ling-Kun²

¹ Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

² Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

Abstract Wave and basic flow are the two primary forms of atmospheric motions, and their interaction may lead to various weather phenomena. As a basic subject of atmospheric dynamics, studies of wave – flow interaction are of significance in academic and scientific senses. The wave – flow interaction theory includes two aspects: (1) the “wave-activity” (conservation) equation which describes the effect of basic flow on wave; (2) the E-P flux and wave transformation and propagation theories that represent the feedback of wave to basic flow. Not only many important advancements had been made in the theoretical researches, such as the proposal of E-P flux, introduction of residual circulation, appearance of extended E-P flux, construction of three-dimension E-P flux, and progresses of “wave-activity” conservation equation, abrupt change of wave, wave – flow steady structure, wave transforming and its great

收稿日期 2007-05-30, 2007-07-28 收修定稿

资助项目 国家自然科学基金资助项目 40405011、40475006

作者简介 徐祥德, 男, 1942 年出生, 博士生导师, 目前从事天气动力、动力气候和大气环境等领域研究。

E-mail: cep99@cams.cma.gov.cn

circle route and remote correlation of low-frequency waves, etc., but also a lot of achievements had been accomplished in the applications of these theories, including the scientific explanations to the quasi-biennial oscillation (QBO) of stratospheric zonal wind in the equator, the stratospheric sudden warming over the polar region, the maintaining effect of transient wave on blocking high, the acceleration of upper level jet stream and the remote correlation of low-frequency waves. Especially, these researches of wave-flow interaction provide the theoretical foundations and scientific methods for the forecast of planetary wave propagation, the investigations of storm track and the diagnosis of convergence and divergence of wave energy in real atmosphere. From small-amplitude and finite-amplitude aspects, the research progresses of wave-flow interaction and wave propagation theories in China and overseas countries are reviewed in this paper. Focusing on the investigations of wave-flow interaction and wave-propagation modes in large-scale circulation, the authors bring forward the mechanism and theoretical mode for multi-scale wave-flow interaction under various dynamic and thermal backgrounds, and reveal the nonlinear atmospheric dynamic abrupt change and its steady structure theories. Compared with the above investigations, the stability study of complicated wave-flow interaction caused by heating source and topography forcings is unsubstantial. Especially, the effects of atmospheric water cycle and topography of the Tibetan Plateau on wave-flow interaction of synoptic systems with various scales are not clearly known. It would become an important branch for wave-flow interaction research in the future.

Key words wave-flow interaction, wave-propagation modes, E-P flux, wave-activity equation

1 引言

在大气科学研究中,常常需要把一个物理量分解成基本态和被称为“波”的扰动态两部分。一般情况下,人们通过对物理量取时间平均、纬向平均或平滑滤波而获得基本态,把物理量与基本态之间的偏差作为扰动态。这种分解方法为人们研究大气科学问题带来了极大的方便,但同时也产生了如何看待和处理基本态与扰动态之间关系的各种问题。实际上,一个天气系统的整体时空演变取决于大气基本态和扰动态的各自发展以及它们之间的相互作用。

扰动态和基本态之间的相互作用可以称为波流相互作用,这里的“波”指的是物理量的扰动态,“流”指的是物理量的基本态。在以往的研究中,人们常常把物理量的平均态(纬向平均或时间平均)作为基本态,从这个角度来讲,波流相互作用是指偏离平均气流的扰动和平均气流之间的相互作用。利用波流相互作用理论可以解释一些重要天气现象,例如,利用重力波上传破碎理论可以解释赤道平流层东西风准两年振荡^[1];利用行星波上传与临界层理论可以解释平流层爆发性增温^[2];利用广义斜压大气 E-P 通量理论可以解释对流层顶高空急流的加速与减速现象^[3~5]。正因为如此,长期以来波流相互作用问题一直是国内外众多气象专家、学

者所关注的焦点和研究的对象。

波流相互作用的研究主要包括两方面内容,一方面是可以描述基本气流强迫波动发展的“波作用”(守恒)方程的研究,另一方面是可以描述波动对基本气流反馈作用的 E-P 通量以及波形变、传播等理论的研究。

Shepherd^[6]和 Haynes^[7]对“波作用”的定义是这样的:“波作用”是一种(守恒)扰动量,在小振幅近似下它是扰动振幅的二次方或更高次方项[A wave activity may be defined to be a conserved disturbance quantity that is quadratic (or of higher order) in the disturbance fields in the small-amplitude limit]。波作用通常满足如下局地波作用方程:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{F} = S, \quad (1)$$

其中, A 称为波作用密度, $\mathbf{F}$ 称为波作用通量, S 代表由湍流摩擦力和非绝热加热等强迫因子构成的源汇项。从方程(1)可以看出,波作用通量 $\mathbf{F}$ 的辐合和辐散可以引起波作用密度 A (在某种条件下,可以认为是一种波能量)的局地集中和发散,从而导致瞬变波的局地发展和局地衰减。对于边界上没有流入流出并且不考虑源汇项的闭合系统,波作用是守恒的,即

$$\frac{d}{dt} \iiint A dx dy dz = 0.$$

Eliassen 和 Palm^[8]首先建立了 Eliassen-Palm

通量(简称 E-P 通量)的概念,它表征扰动纬向动量和扰动热量的经向输送。表征波动对基本气流反馈作用的纬向平均变形欧拉方程可以写为:

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} - f \bar{v}^* = \frac{1}{\rho_0} \nabla \cdot \mathbf{F}^{\varpi}, \quad (2)$$

其中,“—”代表纬向平均, $\bar{v}^*$ 称为经向剩余环流分量,

$$\mathbf{F}^{\varpi} = -\rho_0 \overline{u'v'} \mathbf{j} + \frac{f \rho_0}{N^2} \overline{v' \Phi_z} \mathbf{k}$$

称为 E-P 通量。从方程 (2) 可以看出, E-P 通量散度 ($\nabla \cdot \mathbf{F}^{\varpi}$) 反映了扰动对纬向平均气流的反馈作用,在其他条件不变的情况下,辐散的 E-P 通量将会加速纬向平均西风,辐合的 E-P 通量将会削弱纬向平均西风。E-P 通量是研究小振幅波流相互作用最基本、最重要的工具之一,在 Rossby 波传播、大气环流异常以及平流层爆发性增温等方面的研究中得到广泛应用。E-P 通量把波的输送性质与波的传播特性联系起来,具有很多重要性质,例如,对于叠加在纬向基本气流中的小振幅波动, E-P 通量表现为波作用(守恒)方程中的波作用通量;对于缓慢变化基本气流中的平面波,在 Wentzel-Kramers-Brillouin (WKB) 近似下, E-P 通量的矢量方向与波动群速度方向平行,代表波能量的传播方向;在准地转近似下, E-P 通量散度与准地转位势涡度的经向通量成正比。

波作用方程 (1) 和纬向平均变形欧拉方程 (2) 是有联系的。对于叠加在缓变纬向平均气流中的小振幅扰动,在 WKB 近似下,可以认为波作用通量 $\mathbf{F}$ 和 E-P 通量 $\mathbf{F}^{\varpi}$ 是相同的,都满足群速度 ($\mathbf{c}_g$) 关系,即

$$\mathbf{F}^{\varpi} = \mathbf{F} = A \mathbf{c}_g, \quad (3)$$

从而有,

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} - f \bar{v}^* = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial A}{\partial t}. \quad (4)$$

这是基本态与扰动态之间最直接的联系,波流相互作用最简单的描述。由式 (4) 可见,对整体大气而言,通过波动的动量和热量输送,发展的波动 ($\partial A / \partial t > 0$) 将削弱纬向平均基本气流 ($\partial \bar{u} / \partial t < 0$), 波动吸收纬向平均基本气流的能量;衰减的波动 ($\partial A / \partial t < 0$) 将增强基本气流 ($\partial \bar{u} / \partial t > 0$), 波动的能量转换为纬向平均基本气流的能量。因此,通过能量交换,波动与纬向平均基本气流不断地相互作用,相互维持,从而引起大气的发展演变。

在研究线性波流相互作用理论的同时,人们也将目光转向了有限振幅非线性波流相互作用,在这方面开展了一系列的研究。

Energy-Casimir 方法是 20 世纪 80 年代以来研究流体运动非线性稳定性的重要方法之一,它是在苏联著名学者 Arnold^[9, 10] 的 60 年代工作基础之上发展起来的。Arnold 把变分原理与先验估计(也称为“积分估计”)方法结合起来,研究了二维、无粘和不可压缩流体的非线性稳定性问题,建立了两个非线性稳定性判据,即 Arnold 第一定理和第二定理,他所采用的方法被称为 Arnold 方法,也被称为“Energy-Casimir”方法^[9, 10]。曾庆存等^[11] 在 Arnold 方法的基础上发展了一种广义变分方法,对大气动力学中各种基本模式(正压与斜压准地转模式、分层模式和原始方程组等)作了深入系统的研究,建立了一系列非线性稳定性判据。Mu 等^[12] 深化与发展了 Energy-Casimir 方法,建立二维正压准地转模式与多层准地转模式非线性稳定性和三维连续层准地转运动稳定性的判据,并讨论了扰动发展的上界估计与饱和问题。

Energy-Casimir 方法的一个重要应用是建立波作用方程。Mcintyre 等^[13] 利用 Energy-Casimir 方法研究了准地转近似下稳定层结基本气流中 Eulerian 形式的有限振幅波作用守恒方程,他们研究指出,根据 Arnold 方法选取适当形式的 Casimir 函数不变量,使之与定常基本态之间存在一定的约束关系,可以得到有限振幅拟能量波作用守恒方程。这种拟能量是一种二次和二次以上的扰动量,它的守恒性与基本气流的时间对称性有关,与基本气流的稳定性无关。

Haynes^[7] 进一步推广了 McIntyre 等^[13] 的理论,在等熵坐标系中,采用“拓展 Momentum-Casimir”和“拓展 Energy-Casimir”方法,舍弃 Hamiltonian 动力学约束条件,引进 Casimir 函数不变量,推导出纬向对称基本气流和纬向非对称基本气流中强迫耗散作用下的有限振幅波作用方程,其波作用密度和波作用通量都用欧拉变量来表示,该波作用方程对定常基本态有严格要求,基本态不能任意选取。

Scinocca 等^[14] 系统地阐述了如何利用“Momentum-Casimir”和“Energy-Casimir”方法推导波作用方程。根据 Noether 定理,Hamiltonian 动

力学系统可以表示为

$$U_t = J \frac{\delta H}{\delta U}, \quad (5)$$

$$U_\alpha = -J \frac{\delta M}{\delta U}, \quad (6)$$

其中, U 是由物理量组成的矢量, H 是系统总能量或 Hamiltonian 函数, M 是系统动量, J 是矩阵算子, 下标 “ t ” 和 “ α ” 分别表示时间和空间的偏导数。在 Hamiltonian 系统中, 如果基本态 $\bar{U}$ 是定常的, 那么由式 (5) 可知, 函数 $A = H(U) - H(\bar{U}) + E(U) - E(\bar{U})$ (其中, $\bar{U}$ 为 U 的基本态, E 为 Casimir 函数不变量) 在定常基本态 $\bar{U}$ 处的一阶变分为零, 即

$$\left. \frac{\delta A}{\delta U} \right|_{U=\bar{U}} = \left. \frac{\delta H}{\delta U} \right|_{U=\bar{U}} + \left. \frac{\delta E}{\delta U} \right|_{U=\bar{U}} = 0. \quad (7)$$

这样, A 中仅保留了扰动态的平方项和更高次方项以及扰动散度项, A 称为拟能量波作用密度 (与能量有关的波作用密度)。对 A 求时间偏导数, 就可以得到形如 (1) 式的拟能量波作用守恒方程。同理, 如果基本态 $\bar{U}$ 是关于纬向对称的, 那么根据式 (6) 可知, 函数 $J = M(U) - M(\bar{U}) + E(U) - E(\bar{U})$ 在纬向对称基本态 $\bar{U}$ 处的一阶变分为零, 即

$$\left. \frac{\delta J}{\delta U} \right|_{U=\bar{U}} = \left. \frac{\delta M}{\delta U} \right|_{U=\bar{U}} + \left. \frac{\delta E}{\delta U} \right|_{U=\bar{U}} = 0. \quad (8)$$

同样, J 中仅保留了扰动态的平方项和更高次方项以及扰动散度项, J 称为拟动量波作用密度 (与动量有关的波作用密度)。对 J 求时间偏导数, 就可以得到拟动量波作用守恒方程。这就是 “Momentum-Casimir” 和 “Energy-Casimir” 方法的基本思想。Scinocca 等^[14]把二维滞弹性方程组写成 Hamiltonian 动力学系统的形式, 利用 (7) 和 (8) 式推导了有限振幅拟能量和拟动量波作用守恒方程, 方程中各项都是用 Eulerian 变量表示的, 并证明当波振幅 $\alpha \rightarrow 0$ 时, 在 WKB 近似下, 波作用通量和群速度满足 $F = A c_g$ 关系。这两种波作用守恒方程对应的基本气流是不同的, 拟能量波作用守恒方程对应着定常基本气流, 该基本气流可以是纬向对称的, 也可以是纬向非对称的; 而拟动量波作用守恒方程对应的基本气流是纬向对称的, 它可以是定常的, 也可以是非定常的。

Scinocca 和 Peltier^[15]利用纬向非对称基本气流中有限振幅拟能量波作用守恒方程诊断分析了下坡强风暴的发生发展过程, 分析结果表明正交模不

稳定引起大振幅扰动, 正交模切变不稳定在风暴扰动的下方导致扰动对时间平均流的强迫, 这种扰动强迫对风暴的发展起重要作用。他们根据文献^[14]的理论结果, 分析了与 Long 模式解 (地形强迫下两维稳定层结基本气流) 有关的小振幅和有限振幅波作用的空间分布和时间演变特征^[16]。Ren^[17]利用 Arnold 方法推导了半地转浅水模式的有限振幅波作用不变量, 并讨论了基本气流稳定的条件。Brunet 等^[18]利用浅水模式的有限振幅波作用 (拟动量) 方程分析了低纬度波破碎区孤立 Rossby 波的非线性反射, 数值试验表明波作用从低纬度地区向中纬度地区反射。

波作用方程除了可用于诊断分析扰动与基本气流的相互作用, 还可用于从资料中定量地识别不同空间尺度的波动, 分析它们的传播和演变。Brunet^[19]利用浅水模型的拟动量和拟能量波作用密度表达式, 建立了经验正交模理论 (Empirical Normal Modes, ENMs)。由于经验正交模理论采用的协方差矩阵与经验正交函数 (Empirical Orthogonal Functions, EOFs) 的协方差矩阵不同, 它既有经验正交函数的统计特征, 又有正交模 (Normal Mode) 的动力学性质, 因此经验正交模理论把统计学和动力学联系起来, 在它们之间架起了一座桥梁。Zadra 等^[20]利用线性动力学系统的波作用守恒方程提出了新的经验正交模分解技术, 并利用 NCEP 再分析资料分析了正交模态及其传播特性。Charron 等^[21]采用经验正交模理论研究了模式大气中惯性重力波在洛基山、北太平洋和美洲中部地区的产生、传播、发展和破碎的问题。Chen 等^[22]利用经验正交模方法诊断分析了 MM5 模拟的飓风中螺旋带, 并利用 E-P 通量及其散度分析了飓风中涡旋 Rossby 波的产生和传播。

波流相互作用的研究有着悠久的历史, 最早可以追溯到 19 世纪 Rayleigh^[23]关于声波的研究工作, 他认为平均流的产生主要是由声波震动引起的耗散造成的。多年以来, 许多国内外气象专家学者对波流相互作用问题进行了广泛而深入的研究, 取得了丰硕成果, 有些研究成果已经应用到业务中。

2 波流相互作用

1939 年, Rossby^[24]首先讨论了纬向平均流与驻波之间的关系, 指出在弱纬向平均流时期, 半永

久性阿留申低压趋于向西移动, 反之亦然。Rossby 等^[25]又研究了与波流作用有关的指数循环。Charney 等^[26]在研究对流层低层行星尺度扰动向高层传播时, 提出了著名的非加速原理。

E-P 通量理论的优点在于它把方程组中扰动效应同纬向平均基本气流分开, 集中体现扰动动量通量和扰动热量通量对纬向平均基本气流局地变化的强迫。在 Eliassen 和 Palm^[8]的工作基础上, Andrews 和 McIntyre^[27]定义剩余环流分量 ($\bar{v}^*$ 和 $\bar{w}^*$), 把瞬变波的热量通量引入纬向平均变形欧拉方程中, 首次推广了 E-P 通量理论。徐祥德和高守亭^[28]详细地讨论纬向平均变形欧拉方程中剩余环流的物理意义, 认为剩余环流完全由非绝热加热所决定, 所以在绝热情况下, E-P 通量的辐散辐合主要引起纬向平均基本气流的加速与减速, 而不会导致剩余环流的变化; 他们总结了在对流层内使用 E-P 通量诊断纬向平均基本气流加速的条件: 首先是 $|\partial\bar{\theta}/\partial p|$ 比较大, 其次是无明显的非绝热加热, 最后是准地转理论成立。很明显, 中高纬度地区靠近高空急流带的 200 hPa 等压面满足这三个条件, 这也就是为什么有研究发现 200 hPa 等压面上 E-P 通量的辐散辐合能够引起高空急流带内纬向平均气流的明显加速与减速。Andrews 和 McIntyre^[29]采用拉格朗日平均方法, 又进一步把 E-P 通量理论推广到有限振幅扰动, 并提出有限振幅非加速原理。McIntyre^[30]研究指出广义拉格朗日平均理论中的波作用密度及其通量都与扰动位移有关, 由于不方便利用资料直接计算, 所以这个理论在实际应用中有很大困难。

Plumb^[31]研究了准地转近似下纬向平均基本气流中准地转定常波的三维传播, 通过引入一个无辐散矢量, 推导出了非纬向平均的局地波作用方程,

$$\frac{\partial A_s}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{F}_s = G_s,$$

其中, A_s 为非纬向平均的波作用密度, $\mathbf{F}_s$ 为三维波作用通量, 并进一步证明对于缓变基本气流, 在平面波近似下, $\mathbf{F}_s$ 独立于波位相, 平行于群速度; 该理论的计算结果表明, 冬季北半球 Rossby 波列主要是青藏高原的地形强迫和西北大西洋、北太平洋和西伯利亚的非绝热加热以及基本气流与涡动的相互作用造成的。在此基础上, Plumb^[32]进一步研

究了时间平均的三维基本气流与小振幅瞬变涡动的相互作用; 假设时间平均基本气流在空间上变化非常缓慢, 推导出时间平均的三维波作用方程

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{M}_T = S_M,$$

在平面波近似下, 波作用通量 $\mathbf{M}_T$ 平行于群速度。Kuroda^[33]根据 Matsuno^[34]的球面准地转理论, 考虑地转风的辐散分量, 研究了准地转定常波的三维 E-P 通量和波作用方程; 研究表明, 考虑地转风辐散分量的 E-P 通量表达式与 Plumb 得到的结果^[31]相同, 这说明对于行星尺度运动, 当地转风有辐散分量时, Plumb 得到的 E-P 通量和波作用方程同样是有有效的。

Lau 和 Holopainen^[35]发展了时间平均方程的完全求解方法, 并估算了扰动动量通量和扰动热量通量的作用; 与 E-P 通量诊断分析相比, 这种方法的缺点是缺少波传播特征的信息。Young 和 Rhines^[36]假设平均位涡梯度为常数, 推导了位涡拟能守恒方程, 但是这种方法在实际大气中不适用。Hoskins 等^[37]定义了准矢量 $\mathbf{E}$, 在某种近似下, 它与群速度有关, 但不平行于群速度, 与 E-P 通量不同, 它与群速度之间没有显示关系。

Pfeffer^[4]利用传统欧拉方程和变形欧拉方程讨论了对流层和平流层低层的波动与纬向平均基本气流之间的相互作用, 研究表明扰动热量通量对纬向平均基本气流的影响很小, 扰动动量通量主要引起对流层高层和平流层低层纬向平均基本气流的加速与减速。变形欧拉方程中各项的相关分析表明, E-P 通量的水平分量与纬向平均基本气流强度和形态的日变化呈正相关; 与剩余环流有关的科里奥利力项与 E-P 通量的垂直分量呈负相关。Pfeffer 对此进行了解释: 当层结参数充分小时, E-P 通量散度主要引起剩余环流的响应; 当层结参数充分大时, E-P 通量散度主要引起纬向平均基本气流的加速与减速。

Tung^[38]利用等熵坐标中原始方程研究了纬向平均基本气流的非地转理论, 给出了非地转条件下等熵坐标中 E-P 通量拟散度的定义 ($\square \cdot \mathbf{F}$), 推导了 E-P 通量拟散度与纬向平均基本气流局地变化和 Ertel 位涡通量的关系, 并讨论了 E-P 通量拟散度的参数化问题。Yang 和 Olaguer^[39]利用 Tung 推导的等熵坐标系中非地转 E-P 通量关系和等熵

混合系数 (K_{yy}) 对南北半球不同季节的平流层进行了诊断分析。

Takaya^[40, 41] 利用准地转位涡度方程, 没有采用任何形式的平均, 推导出叠加在非平均基本气流中小振幅瞬变波的波作用方程,

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{W} = D_T,$$

其中, $M = (A + E)/2$ 称为拟动量波作用密度, 由波拟能 A 和波动能 E 线性叠加构成, 并且独立于波位相。在平面波近似下, 波作用通量 $\mathbf{W}$ 平行于三维群速度, 因此波作用通量 $\mathbf{W}$ 是诊断 Rossby 波三维传播的有力工具。

我国气象专家学者在波流相互作用理论研究方面做了许多杰出的工作。20 世纪 40 年代, 叶笃正^[42] 首先研究了正压罗斯贝波的能量频散, 提出长波能量频散理论。20 世纪 80 年代, 曾庆存^[43, 44] 利用非线性理论全面系统地研究了瞬变波的波包理论, 讨论了有关瞬变波的能量传播问题。Zeng^[45] 在球面大气大尺度扰动演变和波流相互作用研究中指出, 在某种条件下, 由于旋转效应, 非纬向扰动可以完全被纬向流吸收, 非纬向流能量的吸收依赖于纬向流的切度和扰动尺度。Zeng 和 Zhang^[46] 的研究结果表明, 连续谱在波流相互作用中起着重要作用。

黄荣辉等^[47, 48] 把 E-P 通量理论推广到球面, 提出准定常行星波在球面三维大气中沿两支波导传播的行星波传播理论, 证明了球面大气行星波的波作用守恒原理, 并指出在北半球地形与定常热源强迫所产生的定常行星波传播中存在两支波导: 一支波导从高纬度对流层指向平流层中上层; 另一支波导从中纬度对流层下层指向低纬度对流层顶附近。Wu 等^[49] 把 E-P 通量进一步推广到湿大气。

刘式适和刘式达^[50] 研究指出, 正压 Rossby 波的发展与否取决于 Rossby 波的动量经向输送和基本气流的经向分布; 斜压波的发展与否取决于 Rossby 波的热量经向输送和基本气流的垂直分布。刘式适和刘式达^[51] 研究了频散效应对 Rossby 波动量和热量输送的影响, 研究结果表明, 在大尺度扰动中, 如只有粘性效应, 通过 Rossby 波, 动量由基流的高值向低值输送; 加入频散效应后, 在一定的条件下可以出现动量由基流的低值向高值输送。吕克利^[52] 采用准地转位涡度方程和 WKB 近似方法,

推导出非均匀层结和空间缓变基本气流中 Rossby 波能量、波作用和波拟能的守恒方程。陶建军^[53] 从正压涡度方程出发讨论波流之间能量转换的条件, 并引入时空缓变量导出 Sine-Gordon 方程及其孤立子解, 从理论上进一步证明瞬变波的强迫对阻塞形势的维持和加强具有重要的作用。伊兰和陶诗言^[54] 研究了定常波和瞬变波在亚洲季风区大气水分循环中的作用, 研究结果表明, 瞬变涡动总把水汽从高水汽含量区送到低水汽含量区, 实现与平均环流相反的输送, 维持了热带地区和中高纬地区水汽的平衡。姚文清等^[55] 分析了江淮流域旱涝年夏季 E-P 通量的分布状况, 结果表明早年 E-P 通量在 40°N 附近呈强辐合特征, 涝年在 30°N 附近呈强辐合特征, 其分布形式与降水的对应关系显著。

高守亭等^[56~58] 在波流相互作用领域开展了一系列工作, 不仅研究了高空波动与高空急流的相互作用问题, 也研究了与地形有关的波流相互作用以及波-波相互作用等问题; 把 E-P 通量理论推广到斜压大气, 提出广义斜压大气 E-P 通量理论, 并利用该理论对高空急流加速进行了诊断分析和物理解释。高守亭等^[59] 通过对波流相互作用的深入研究, 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, 即瞬变波把自己的热量和动量输送给纬向平均气流, 使得该范围内的急流带加速, 加强了高空急流的地转适应过程, 由此产生的次级环流会诱发低层锋生, 这是一种高低空相结合的三维锋生理论, 这种锋生概念的物理模型目前已经被实际观测所证实。高守亭等^[60] 在大气低频变异中的波流相互作用研究中强调指出阻高上游的低槽加深东移、海温变化以及地形作用是促使阻高异常的重要因素。冉令坤等^[61~63] 推导出纬向基本气流局地变化与一种新形式 E-P 通量之间的关系, 诊断结果表明, 在 200 hPa 纬向基本气流急流区内, 新形式 E-P 通量散度是影响纬向基本气流发展演变的重要因子, 并且纬向基本气流的加速与减速主要是由新形式 E-P 通量中扰动动量的经向输送造成的。重力波破碎也是波流相互作用理论研究中的一个重要问题, 高守亭等^[64] 在 McFarlane^[65] 重力波拖曳参数化方案基础上, 考虑了重力波破碎后减少的动量对纬向平均气流的拖曳作用, 进一步修正了 McFarlane 的重力波拖曳参数化方案。

段安民和吴国雄^[66] 推导了准地转框架下包含

非绝热效应的 E-P 通量, 证明了由 Eliassen 和 Palm^[8] 导出的波动能量关系与由 Lorenz^[67] 导出的大气能量循环关系的一致性, 并指出传统的绝热条件下的 E-P 通量仅能表征冬季的波能输送情况, 其他季节必须要考虑非绝热加热的影响。

除了大尺度系统, 人们发现波流相互作用还与中尺度系统的发展演变密切相关。丁一汇和沈新勇^[68] 把 E-P 通量理论引入到中尺度对称扰动动力学模型中, 在不考虑平均经圈环流的情况下, 建立了可用于表征对称扰动与纬向基流的相互作用的倾斜 E-P 通量理论。徐祥德和高守亭^[28] 提出瞬变中尺度波动与基本气流相互作用的 A-B 混和方程, 并把波流相互作用问题变换到复洛伦兹系统进行讨论, 进一步讨论波流相互作用非线性稳定性问题。Tan 等^[69, 70] 研究了 A-B 混和方程的包络波解和外部强迫对斜压瞬变波包的影响。在此基础上, Ran 和 Gao^[71] 采用 Momentum-Casimir 方法建立了三维非地转平衡和非静力平衡的拟动量波作用方程, 把波流相互作用理论完全拓展到中尺度领域, 该方程的优点在于通过选取不同的 Casimir 函数可以讨论中尺度扰动与不同基本气流的相互作用。

除了动力理论研究之外, 我国气象学者也开展了关于波流相互作用的数值模拟和天气学诊断分析研究。陈文和黄荣辉^[72] 利用波-流相互耦合原始方程谱模式研究了非常定基本气流中行星波对臭氧的输运作用, 研究结果表明, 该波流耦合模式能较好地模拟中层大气纬向平均流场及准定常行星波的基本变化特征, 在波-流相互作用情况下, 中高纬地区行星波对臭氧输运的年际变化大大增强。余斌和黄荣辉^[73] 通过计算 $\mathbf{E}$ 矢量, 研究了 1983/1984 和 1986/1987 两年冬季中纬度地区低频波流间的相互作用特征, 结果表明热带地区对流活动的差异对这种相互作用有重要影响。陆日宇和黄荣辉^[74] 在关于阻塞形势演变过程中波数域能量的诊断分析中指出, 在阻塞形势形成前, 由于波流相互作用, 使得平均流减弱, 并且波流相互作用在太平洋地区和大西洋地区有不同的特点; 分析结果还表明, 阻塞形势维持期间, 由于波波相互作用, 行星波异常增幅; 而在崩溃期间, 也主要通过波波相互作用使得行星波动能减少。林本达和高山月^[75] 利用准地转模式研究了波的水平尺度, 不同层结状态下的不同结构基本气流和不同纬度的 β 值对定常行星波垂直

传播的综合影响。

3 波流形变及其低频传播模式

大气运动的稳定性问题是大气动力学的基本问题之一, 波流相互作用中的非线性稳定性理论是大气稳定性理论中的一个重要内容。以往的线性稳定性理论研究主要采用标准模方法, 把问题归为对特征值问题求解。这些线性稳定性理论仅适用于小扰动的情形, 在扰动发展初期是合理的, 但是线性理论不能给出由于扰动的演变而引起的基本流的变化, 所以线性理论不适合研究波流作用中的稳定性问题。另外, 由于连续谱的存在, 标准模形式的扰动并不能反映所有类型的扰动, 所以要想研究波流作用中的稳定性问题, 必须站在非线性理论的起跑线上。

李崇银^[76] 利用简单的非线性动力学模型研究了基本气流在中高纬度大气季节内振荡不稳定激发中的作用, 研究结果表明, 西风廓线对不稳定模的影响非常重要, 不同的西风廓线所激发的不稳定模不仅增长率不同, 而且频谱位置也不一样, 这一理论结果与实际观测比较一致。李崇银等^[77] 考虑西风角动量(基本气流的二阶修正)对缓慢移动的 Rossby 波的反馈作用, 建立起缓慢移动 Rossby 波与大尺度地形近共振相互作用的理论模型。尽管目前关于非线性稳定性研究方面的论文不胜枚举, 但对热源强迫及地形强迫引起的复杂的波流相互作用中的稳定性问题的研究相对来说比较薄弱。

在 20 世纪 70 年代, Charney 和 Devore^[78] 采用高截谱模式研究阻塞高压的形成机制, 随后国内外很多气象学者对大气环流非线性问题进行了广泛深入的探讨。叶笃正等^[79] 通过观测分析, 揭示出在一个广泛的时空尺度内大气中存在各种突变现象。柳崇健和陶诗言^[80] 首次基于导自微分拓扑这一几何分支的“突变论”, 针对副热带高压北跳现象建立了初等突变模型, 并对控制参数的渐变如何导致行为变量的突变进行研究, 解释了大气环流的“六月突变”现象。杨大升等^[81] 和伍荣生^[82] 提出了很有学术价值的观点, 将非线性理论用于台风发生发展和 CISK 机制的研究。徐祥德^[83, 84] 研究了扰动的稳定性结构、相路特征的分岔及热源时间振荡影响的问题, 导出了 Liapunov 稳定性理论简化动力模型, 揭示了扰动热源时间振荡的影响效应和天气尺度系

统扰动稳定性模态及其相路拓扑特征,分析表明,系统偏离平衡点的相路特征取决于动力和热力因子及它们之间的相互关系,这些相路特征可以表征系统发展或衰减的情况,有助于我们对天气扰动不稳定状态、系统发展的快慢过程及其影响因素的探讨。例如,把轴对称涡旋作为一个“开放”系统,从非线性运动相路拓扑结构理论出发,研究轴对称涡旋能量平衡态、非线性与线性稳定性结构以及涡旋运动的失稳、突变的问题,提出了轴对称涡旋型台风非线性动力系统中非线性平衡模态及其动力系统突变理论。

低频振荡是一种普遍的大气现象,在过去的研究中人们常常把这种低频振荡或低频波视为二维 Rossby 波,例如,Wallace 等^[85]在研究低频振荡的可能起因时指出,低频振荡的水平结构就是二维 Rossby 波列;Hoskins 等^[86]利用球面 Rossby 波传播的大圆路径理论来解释低频振荡的传播现象;李崇银^[87]的研究表明,低频振荡可以从上、下层的经向和纬向环流以及它们的偏差环流准周期的向东和向北的传播中得到识别。很多学者对低频振荡的触发和传播机制开展研究,取得很大进展,概括地说,地球旋转效应、风速垂直切变、气流的辐散/辐合、非绝热加热的垂直结构、南半球中纬度冷空气活动以及西风带中指数循环等都是影响低频振荡产生和传播的重要因素。Xu 等^[88]把这些因素引入等压坐标系原始方程组,综合研究了热带低频振荡的触发机制、引起低频振荡的主要因子、低频振荡周期和环境流型特征以及低频振荡与西风指数循环和南半球冷空气爆发之间的关系等。在此基础上,徐祥德^[89]采用准地转涡度方程对低频 Rossby 波开展深入研究,详细地分析了波频率、波数、基本气流、 β 因子、凝结潜热加热(或水汽)对低频波的振幅、经向传播的距离、波射线形状的影响等,研究结果表明,频率越低,低频波振幅越大,经向传播的特征也越显著。Ghil^[90]研究了非线性低频变化,提出多流型域的概念,这种多流型域的提法能够较好地反映大气低频变化的状况。李崇银^[91]在《大气低频振荡》一书中阐述了低频振荡现象不仅存在于热带,而且也存在于中高纬度地区,并用大量事实证实了热带及中高纬度大气的季节内振荡特征。

Hoskins 等^[86]首先提出 Rossby 波大圆理论,成功地解释了低频波向极和向东传播的现象。徐祥

德等^[28]将 Hoskins 等的大圆理论推广到包含实际西风廓线和地形的数学模型中,提出了低频波波射线“大圆路径”变形的广义波射线理论,分析结果表明, β 效应、基本西风和地形结构影响准定常波的传播路径,导致大圆路径变形;大地形强迫激发的波射线可呈抛物线,该波射线的特征与地形结构,纬向风和波数等因素密切相关;若考虑实际西风经向廓线,波射线可呈正弦曲线。徐祥德等^[92]进一步考虑西风基本气流、地形和热力强迫的影响,对二维 Rossby 波的波射线进行数值试验研究,数值结果表明地形激发的低频波的经向传播路径呈抛物型;在一定的纬向风背景下向南传播的波列跨过赤道进入南半球,向东北方向传播的波列分支在转向点向低纬地区传播,这两支波列可以“拼接”成—“大圆路径”;在实际大地形与纬向基本西风的共同影响下,低频波可形成正弦波型波列。

Wallace 和 Gutzler^[85]发现如果赤道中、东太平洋出现热力异常(如厄尔尼诺现象),作为对这种热力强迫的响应,在远离热力异常的区域将出现一个太平洋-北美遥相关型(PNA)。徐祥德等^[93, 94]为了从理论上探讨这种由热力强迫引起的遥相关型,利用多尺度摄动法与 WKB 近似法研究了热源空间结构特征与经向波列传播路径变形及振幅演变之间的关系,探讨低频波的传播路径及振幅演变同扰动热源强度和空间结构之间的可能联系,研究了纬向西风和热源强迫的季节变化对低频波的影响,揭示低频波波射线及其截获带的季节特征。取得了一些有学术意义的结果。

中高纬度地区扰动对低纬地区大气波动的激发效应问题是低频波研究的另一个重要内容。Charney^[95]研究指出中纬度的影响可以驱动或启动低纬度的大气扰动,并给出波动穿过纬向平均流而传播的判据。大量观测事实也表明,中纬度扰动能够深入低纬和赤道地区,有时甚至可以穿过这些地区进入另一半球的中纬度区域。Yasunari^[96]研究发现,向北漂移的周期为 40 天的云量异常对印度地区大气垂直结构有明显影响,这类高低空异常环流的向东和向北准周期性传播特征与南半球冷空气活动及南半球西风带斜压扰动密切相关。Sumathipale 和 Murakami^[97]认为赤道低频波主要是由北半球和南半球的副热带和中纬度地区 30~60 天准周期性经向冷涌强迫产生的。热带大气周期性低频振荡除了

受热带地区东西风分布特征、流场辐合辐散效应、非绝热加热垂直结构和科里奥利参数等诸因素影响外, 南北半球中纬度地区冷暖空气活动以及由此引起的赤道地区热力强迫也是激发热带低频波的重要因素。徐祥德^[98]研究了热带大气周期性低频振荡相图结构与南北半球中纬度热力强迫之间的相关性, 指出热带地区低频波及其产生条件在非线性情况下的确可归纳为动力系统相图结构的形成问题。

4 波流相互作用理论研究存在的问题

波流相互作用及其动力学问题研究到今天, 不仅在理论上已有重要进展, 如 E-P 通量的提出, 剩余环流的引进, 广义 E-P 通量的出现, 三维 E-P 通量的建立, 波作用守恒方程、波动突变、波流稳定性结构、波形变及其大圆路径、低频波遥相关等理论的发展等, 而且在实际应用上也取得了丰硕成果, 如科学地解释了赤道平流层东西风准两年振荡、极地平流层爆发性增温、瞬变波对阻高的维持和高空急流加速以及大气遥相关等, 特别是为预测行星波的传播^[48, 99], 研究风暴轴^[100]和诊断分析实际大气中具体的波能集中区和发散区提供了理论基础和科学方法。

波流相互作用的内容广泛丰富, 涉及到大气动力学的方方面面, 我们以上的回顾也仅限于波流相互作用研究的部分内容, 未覆盖全部。迄今为止, 波流相互作用研究仍存在许多亟待解决的问题。例如, 在传统的波流相互作用理论研究中, 人们通常对控制方程取纬向平均, 在二维的经向垂直剖面内研究 E-P 通量、纬向平均基本气流和剩余环流之间的关系, 采用纬向平均或时间平均的好处是可以消掉有关方程中的一阶扰动量, 保留二阶扰动量。传统 E-P 通量只能表征瞬变波动在经向方向和垂直方向上的传播, 不能表征瞬变波动在纬向方向上的传播, 而在研究影响局地天气和气候的扰动时, 常常需要明确地诊断波动的纬向传播; 传统 E-P 通量的辐散和辐合只能反映扰动动量和扰动热量输送对纬向平均基本气流的反馈作用, 不能反映扰动动量和扰动热量输送对非纬向平均基本气流的反馈作用。正是这些不足使得传统 E-P 通量在实际应用中有很大的局限性。另外, 对资料取纬向平均, 很多有意义的大气信息都丢失了。在纬向平均变形欧拉动量方程中, 剩余环流分量的引入也带来了一些问

题有待于进一步改进与完善等。

Plumb^[31]和 Takaya^[41]认识到传统 E-P 通量的局限性, 在准地转近似下, 研究了定常波和瞬变波的三维传播问题, 得到了三维 E-P 通量表达式和波作用方程。这些研究工作在帮助人们认识波的三维传播特征方面起了很大的作用, 同时也使我们看到了不采用任何形式的平均来研究三维波流相互作用的可能性。然而, 这些三维波流相互作用理论都是建立在准地转近似和静力平衡基础上的, 因此它们不能很好地反映大气的非地转效应和非静力平衡特性。另外, 准地转近似在实际应用中存在一定的局限性。首先, 准地转近似适用于中高纬度地区, 不适用于全球所有区域, 在低纬热带地区, 准地转近似不成立, 很多在地转理论或准地转理论基础上推导出来的 E-P 通量和波作用守恒方程在赤道地区具有奇点, 这些理论不能很好地解释波列在南北半球之间的传播; 其次, 对于半年或准两年振荡, 准地转近似把扰动强迫中很重要的赤道波和重力波都滤掉了; 最后, 准地转理论可以很好地描述 $R_0 \ll 1$ 的大尺度运动, 但是不能有效地描述中小尺度运动。

由于等熵坐标系中大气方程组在形式上比较简单, 而且对于绝热运动, 大气方程组是准二维 (x, y) 的, 因此很多学者^[7, 38, 39]采用等熵坐标系来研究非地转条件下小振幅和有限振幅扰动的波流相互作用问题。等熵坐标系虽然有很多优点, 但也有些局限性, 例如, 控制方程仍是静力平衡的。另外, 等熵面在平流层相对比较平直, 但是在对流层顶的折叠处、高/低空锋区附近以及对流层低纬度地区等熵面经常有明显的倾斜, 常常出现与地面相交的情况, 因此, 等熵坐标系的非地转波流相互作用理论主要适用于平流层, 而在对流层中低层不适用。

波流相互作用是一个古老而又新颖的科学问题, 它的古老在于人们对它已经开展了几十年的持续研究, 它的新颖在于随着研究的深入, 不断地有新的科学问题涌现。过去人们侧重于对大尺度环流系统波流相互作用及其传播模态的研究, 但对中尺度系统波流相互作用的研究相对较少。在 20 世纪的 80~90 年代, 可用于诊断分析波流相互作用的资料基本上是大尺度格点资料, 其分辨率比较低。由于在资料获取方面的局限性, 所以当时人们重点研究了准地转近似和静力平衡条件下大尺度波流相

互作用理论及其低频传播动力学,并应用这些理论和与该理论相配套的大尺度格点资料来诊断分析大尺度系统的波流相互作用及其传播问题,还谈不上研究中尺度系统的波流相互作用及其传播。但是到了现阶段,随着计算条件的提高和各种高分辨率数值模式的出现,特别是中尺度非静力平衡数值模式(如 MM5、WRF 和 ARPS 等)的广泛应用,卫星遥感与各类先进大气探测系统及其地基、空基的综合观测系统业务化高速发展,并可获取高时空分辨率的非地转、非静力平衡的三维综合气象要素资料,这为研究对流层内中尺度系统的波流相互作用奠定了基础。在中尺度系统研究中,人们不仅可以从动力学不稳定条件、能量收支以及涡度和散度的分布等方面对中尺度系统的形成机理和发展演变进行理论和诊断分析研究,而且还可以建立和完善三维湿空气非地转条件下非静力平衡的波流相互作用理论,并利用该理论从中尺度波流相互作用的角度出发,研究对流层内中尺度扰动系统的形成和发展演变,分析中尺度扰动系统与背景场基本气流的相互作用,这将是波流相互作用理论在实际应用上的一种崭新尝试。

1978 和 1998 年中国科学界发起了第一次、第二次青藏高原大气科学试验。叶笃正与陶诗言和陈联寿等先后主持实施了第一次、第二次青藏高原科学试验。随后在青藏高原及周边区域,中国科学界开展了各类国际合作研究及现场科学试验,对许多国际前沿性研究领域的科学问题进行探索,取得了丰硕的科研成果,这些高原研究的重大进展为在青藏高原大地形复杂背景下不同尺度的波流相互作用理论研究提供了重要的“数据源”及科学依据。

水汽是大气的基本组成元素,在中尺度系统发展演变过程中扮演重要角色。以往的波流相互作用理论研究主要针对干空气,完全忽略了水汽作用,因此,我们认为考虑水汽效应,加强不同动力、热力和地形背景条件下湿空气中多尺度波流相互作用的研究是未来波流相互作用理论研究的一个重要方向。

参考文献 (References)

- [1] Lindzen R S, Holton J R. A theory of the quasi-biennial oscillation. *J. Atmos. Sci.*, 1968, **25**: 1095~1107
- [2] Matsuno T. A dynamical model of the stratospheric sudden warming. *J. Atmos. Sci.*, 1971, **28**: 1479~1494
- [3] Gao Shouting, Tao Shiyan, Ding Yihui. The generalized E-P flux wave-meanflow interactions. *Science in China (Series B)*, 1990, **33**: 704~715
- [4] Pfeffer R L. A study of eddy-induced fluctuations of the zonal-mean wind using conventional and transformed Eulerian diagnostics. *J. Atmos. Sci.*, 1992, **49**: 1036~1050
- [5] Gao Shouting, Zhang Hengde, Lu Weisong. Ageostrophic generalized E-P flux in baroclinic atmosphere. *Chinese Phys. Lett.*, 2004, **21**: 576~579
- [6] Shepherd T G. Symmetries, conservation laws, and hamiltonian structure in geophysical fluid dynamics. *Adv. Geophys.*, 1990, **32**: 287~338
- [7] Haynes P H. Forced, dissipative generalizations of finite-amplitude wave activity conservation relations for zonal and non-zonal basic flows. *J. Atmos. Sci.*, 1988, **45**: 2352~2362
- [8] Eliassen A, Palm E. On the transfers of energy in stationary mountain waves. *Geofys. Publ.*, 1961, **22**: 1~23
- [9] Arnol'd V I. Conditions for nonlinear stability of stationary plane curvilinear flows of an ideal fluid. *Dokl. Akad. Nauk. USSR.*, 1965, **162**: 975~978. English Transl.: *Soviet. Math.*, 1965, **6**: 773~777
- [10] Arnol'd V I. On a priori estimate in the theory of hydrodynamic stability. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved, Matematika*, 1966, **54**: 3~5. English Transl.: *Amer. Math. Soc. Transl.*, Series 2, 1966, **79**: 267~269
- [11] 曾庆存, 卢佩生. 非均匀基流上扰动的演变. *中国科学*, 1980, **12**: 1193~1202
Zeng Qingcun, Lu Peisheng. Evolution of disturbance to a nonuniform basic flow. *Science in China (in Chinese)*, 1980, **12**: 1193~1202
- [12] Mu Mu, Vladimirov V, Wu Yong-Hui. Energy-casimir and energy-lagrange methods in the study of nonlinear symmetric stability problems. *J. Atmos. Sci.*, 1999, **56**: 400~411
- [13] McIntyre M E, Shepherd T G. An exact local conservation theorem for finite amplitude disturbances to non-parallel shear flows, with remarks on Hamiltonian structure and on Arnol'd's stability theorems. *J. Fluid Mech.*, 1987, **181**: 527~565
- [14] Scinocca J F, Shepherd T G. Nonlinear wave-activity conservation laws and Hamiltonian structure for the two-dimensional anelastic equations. *J. Atmos. Sci.*, 1992, **49**: 5~27
- [15] Scinocca J F, Peltier W R. Finite-amplitude wave-activity diagnostics for Long's stationary solution. *J. Atmos. Sci.*, 1994, **51**: 613~622
- [16] Scinocca J F, Peltier W R. The instability of Long's stationary solution and the evolution towards severe downslope wind-storm flow. Part II: The application of finite amplitude local wave activity flow diagnostics. *J. Atmos. Sci.*, 1994, **51**: 623~653

- [17] Ren S. Finite-amplitude wave-activity invariants and nonlinear stability theorems for shallow water semigeostrophic dynamics. *J. Atmos. Sci.*, 2000, **57**: 3388~3397
- [18] Brunet G, Haynes P H. Low-latitude reflection of Rossby wave trains. *J. Atmos. Sci.*, 1996, **53**: 482~496
- [19] Brunet G. Empirical normal-mode analysis of atmospheric data. *J. Atmos. Sci.*, 1994, **51**: 932~952
- [20] Zadra A, Brunet G, Derome J, et al. Empirical normal mode diagnostic study of the gem model's dynamical core. *J. Atmos. Sci.*, 2002, **59**: 2498~2510
- [21] Charron M, Brunet G. Gravity wave diagnosis using empirical normal modes. *J. Atmos. Sci.*, 1999, **56**: 2706~2727
- [22] Chen Yongsheng, Brunet G, Yau M K. Spiral bands in a simulated hurricane. Part II: Wave activity diagnostics. *J. Atmos. Sci.*, 2003, **60**: 1239~1256
- [23] Rayleigh L. Theory of Sound. Vol. II, 2nd edn., McMillan Co, London, 1896. 319~326
- [24] Rossby C G. Relation between variations in the intensity of the zonal circulation of the atmosphere and displacement of semi-permanent centers of action. *J. Marine Res.*, 1939, **2**: 38~55
- [25] Rossby C G, Willett H C. Circulation of the upper troposphere and lower stratosphere. *Science*, 1948, **180**: 643~652
- [26] Charney J G, Drazin P G. Propagation of planetary-scale disturbances from the lower into the upper atmosphere. *J. Geophys. Res.*, 1961, **66**: 83~109
- [27] 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**: 2031~2048
- [28] 徐祥德, 高守亭. 外源强迫与波流相互作用动力学原理. 北京: 海洋出版社. 2002. 57~81
Xu Xiangde, Gao Shouting. *Forcings and Dynamics of Wave-Mean Flow Interaction* (in Chinese). Beijing: China Ocean Press, 2002. 57~81
- [29] Andrews D G, McIntyre M E. An exact theory of nonlinear waves on a Lagrangian-mean flow. *J. Fluid Mech.*, 1978, **89**: 609~646
- [30] McIntyre M E. Introduction to the generalized Lagrangian-mean description of wave-mean flow interaction. *Pure Appl. Geophys.*, 1980, **118**: 152~176
- [31] Plumb R A. On the three-dimensional propagation of stationary waves. *J. Atmos. Sci.*, 1985, **42**: 217~229
- [32] Plumb R A. Three-dimensional propagation of transient quasi-geostrophic eddies and its relationship with the eddy forcing of the time-mean flow. *J. Atmos. Sci.*, 1986, **43**: 1657~1678
- [33] Kuroda Y. Quasi-geostrophic 3-dimensional E-P flux of stationary waves on a sphere. *J. Meteor. Soc. Japan*, 1996, **60**: 37~65
- [34] Matsuno T. Vertical propagation of stationary planetary waves in the winter northern hemisphere. *J. Atmos. Sci.*, 1970, **27**: 871~883
- [35] Lau N-Ch, Holopainen E O. Transient eddy forcing of the time-mean flow as identified by geopotential tendencies. *J. Atmos. Sci.*, 1984, **41**: 313~328
- [36] Young W R, Rhines P B. Rossby wave action, enstrophy and energy in forced mean flows. *Geophys. Astrophys. Fluid Dyn.*, 1980, **15**: 39~52
- [37] Hoskins B J, James I N, White G H. The shape, propagation and mean-flow interaction of large-scale weather systems. *J. Atmos. Sci.*, 1983, **40**: 1595~1612
- [38] Tung K K. Nongeostrophic theory of zonally averaged circulation, Part I: Formulation. *J. Atmos. Sci.*, 1986, **43**: 2600~2618
- [39] Yang H T, Olague K K. Ageostrophic theory of zonally averaged circulation, Part II: Eliassen-Palm flux divergence and isentropic mixing coefficient. *J. Atmos. Sci.*, 1990, **47**: 215~241
- [40] Takaya K. A formulation of a wave-activity flux for stationary Rossby waves on a zonally varying basic flow. *Geophysical Research Letters*, 1997, **24**: 2985~2988
- [41] Takaya K, Nakanura H. A formulation of a phase-independent wave-activity flux for stationary and migratory quasi-geostrophic eddies on a zonally varying basic flow. *J. Atmos. Sci.*, 2001, **58**: 608~627
- [42] Yeh T C. On the energy dispersion in the atmosphere. *J. Meteor.*, 1949, **6**: 1~16
- [43] 曾庆存. 强迫基流上 Rossby 波包的结构和演变. 中国科学, 1985, **4**: 377~395
Zeng Qingcun. Structure and evolution of Rossby wave packet on the forced basic flow. *Science in China* (in Chinese), 1985, **4**: 377~395
- [44] Zeng Qingcun. The evolution of Rossby-wave packet in a three-dimensional baroclinic atmosphere. *J. Atmos. Sci.*, 1983, **40**: 73~84
- [45] Zeng Qingcun, Lu Peisheng, Li Rongfeng. Evolution of large scale disturbances and their interaction with mean flow in a rotating barotropic atmosphere—Part II. *Advances in Atmospheric Sciences*, 1986, **3**: 172~188
- [46] Zeng Qingcun, Zhang Minghua. Wave-mean flow interaction: The role of continuous-spectrum disturbances. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2000, **17**: 1~17
- [47] 黄荣辉. 冬季格陵兰高原对北半球定常行星波形成的作用. 大气科学, 1983, **7**: 393~402
Huang Ronghui. The role of greenland plateau in the formation of the northern hemispheric stationary planetary waves in winter. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica)* (in Chinese), 1983, **7**: 393~402

- [48] 黄荣辉, 岸保勘三郎. 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 (B), 1983, **10**: 940~950
Huang Ronghui, Gambo K. On other wave guide in stationary planetary wave propagations in the winter Northern Hemisphere. *Science in China (Series B)* (in Chinese), 1983, **10**: 940~950
- [49] Wu Guoxiong, Chen Biao. Non-acceleration theorem in a primitive equation system. I: Acceleration of zonal mean flow. *Advances in Atmospheric Sciences*, 1989, **6**: 1~20
- [50] 刘式适, 刘式达. 大气动力学. 北京: 大学出版社, 1991. 292~310
Liu Shikuo, Liu Shida. *Atmospheric Dynamics* (in Chinese). Beijing: Peking University Press, 1991. 292~310
- [51] 刘式适, 黄伟, 刘霞. 频散效应对 ROSSBY 波动量和热量输送的影响. 大气科学, 1994, **18**: 837~846
Liu Shikuo, Huang Wei, Liu Xia. Influences of dispersion effects on momentum and heat transports by the Rossby waves. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica)* (in Chinese), 1994, **18**: 837~846
- [52] 吕克利. 大气中的位涡守恒和 Rossby 波的能量、波作用与拟能守恒. 热带气象学报, 1995, **11**: 258~268
Lu Keli. Conservation conditions of potential vorticity and wave energy, action and enstrophy for Rossby waves. *Journal of Tropical Meteorology* (in Chinese), 1995, **11**: 258~268
- [53] 陶建军. 正压大气中的波流相互作用及 Sine-Gordon 方程. 气象学报, 1997, **55**: 154~162
Tao Jianjun. On interaction between wave and flow in the barotropic atmosphere and Sine-Gordon equation. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 1997, **55**: 154~162
- [54] 伊兰, 陶诗言. 定常波和瞬变波在亚洲季风区大气水分循环中的作用. 气象学报, 1997, **55**: 532~544
Yi Lan, Tao Shiyan. Role of the standing and the transient eddies in atmospheric water cycle in the Asian monsoon region. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 1997, **55**: 532~544
- [55] 姚文清, 徐祥德, 冉令坤. 江淮流域旱涝年夏季 E-P 通量特征分析. 气象, 2004, **30**: 11~14
Yao Wenqing, Xu Xiangde, Ran Lingkun. Characteristics of summer Eliassen-Palm flux in drought/flood years of the Changjiang and Huaihe valley. *Meteorology* (in Chinese), 2004, **30**: 11~14
- [56] 高守亭, 陶诗言, 丁一汇. 表征波与流相互作用的广义 E-P 通量. 中国科学 (B), 1989, **7**: 774~784
Gao Shouting, Tao Shiyan, Ding Yihui. Generalized E-P flux representing wave-mean flow interactions. *Science in China (Series B)* (in Chinese), 1989, **7**: 774~784
- [57] 高守亭, 陶诗言, 丁一汇. 寒潮期间高空波动与东亚急流的相互作用. 大气科学, 1992, **16**: 718~724
Gao Shouting, Tao Shiyan, Ding Yihui. Upper wave-east Asian jet interaction during the period of cold wave outbreak. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica)* (in Chinese), 1992, **16**: 718~724
- [58] 高守亭, 陶诗言. 大中尺度波流相互作用理论的研究. 中国科学院院刊, 2001, **16**: 126~129
Gao Shouting, Tao Shiyan. The study of large-scale and mesoscale wave and flow interaction theory. *Bulletin of the Chinese Academy of Sciences* (in Chinese), 2001, **16**: 126~129
- [59] 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
Gao Shouting, Tao Shiyan. The lower layer frontogenesis induced by the acceleration of upper jet stream. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica)* (in Chinese), 1991, **15**: 11~21
- [60] 高守亭, 朱文妹, 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
Gao Shouting, Zhu Wenmei, Dong Min. On the wave-flow interaction in the low frequency atmospheric variation: Blocking pattern. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 1998, **56**: 665~679
- [61] Ran Lingkun, Gao Shouting, Lei Ting. Effect of a new Eliassen-Palm flux on barotropic basic flow. *Chinese Phys. Lett.*, 2004, **21** (5): 980~982
- [62] Ran Lingkun, Gao Shouting. Ageostrophic theory of zonal flow acceleration and wave-activity conservation law. *Acta Meteorologica Sinica*, 2004, **18** (1): 87~94
- [63] 冉令坤, 高守亭, 雷霆. 高空急流区内纬向基本气流加速与 EP 通量的关系. 大气科学, 2005, **29**: 409~416
Ran Lingkun, Gao Shouting, Lei Ting. Relation between acceleration of basic zonal flow and EP flux in the upper-level jet stream region. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2005, **29**: 409~416
- [64] Gao Shouting, Ran Lingkun. On the parameterization scheme of gravity wave drag effect on the mean zonal flow of mesosphere. *Chinese Science Bulletin*, 2003, **48** (10): 1020~1023
- [65] McFarlane N A. Effect of orographically excited gravity wave drag on the general circulation of the lower stratosphere and troposphere. *J. Atmos. Sci.*, 1987, **44**: 1775~1800.
- [66] 段安民, 吴国雄. 非绝热条件下的波流相互作用与大气能量循环. 中国科学 (D 辑) (地球科学), 2005, **35**: 352~360
Duan Anmin, Wu Guoxiong. Wave-flow interaction and atmospheric energy cycle under the diabatic condition. *Science in China (Series D)* (in Chinese), 2005, **35**: 352~360
- [67] Lorenz E N. The nature and theory of the general circulation of the atmosphere. In: World Meteorol Organ, Eds. Publ 218. Geneva, 1967. 1~161
- [68] 丁一汇, 沈新勇. 对称扰动与纬向基流的相互作用 I. 倾斜 E-P 通量理论. 大气科学, 1998, **22**: 735~743

- Ding Yihui, Shen Xinyong. The interactions between symmetric disturbance and zonally basic flow. Part I: Slant E-P flux theory. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica)* (in Chinese), 1998, **22**: 735~743
- [69] Tan B, Liu S. Collision interaction of solitons in barocline atmosphere. *J. Atmos. Sci.*, 1995, **52**: 1501~1512
- [70] Tan B. Collision interactions of envelope Rossby solitons in a baroclinic atmosphere. *J. Atmos. Sci.*, 1996, **53**: 1604~1616
- [71] Ran Lingkun, Gao Shouting. A three-dimensional wave-activity relation for pseudomomentum. *J. Atmos. Sci.* 2007, **64**: 2126~2134
- [72] 陈文, 黄荣辉. 中层大气行星波在臭氧的季节和年际变化中输运作用的数值研究 II. 波流相互作用的情况. *大气科学*, 1996, **20**: 703~712
- Chen Wen, Huang Ronghui. A numerical study of seasonal and interannual variabilities of ozone due to planetary wave transport in the middle atmosphere. Part II. The case of wave-flow interaction. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica)* (in Chinese), 1996, **20**: 703~712
- [73] 余斌, 黄荣辉. 热带对流活动与低频波流相互作用. *热带气象学报*, 1995, **11**: 297~305
- Yu Bin, Huang Ronghui. Relationships between different tropical convective activities and low frequency wave-mean flow interactions. *Journal of Tropical Meteorology* (in Chinese), 1995, **11**: 297~305
- [74] 陆日宇, 黄荣辉. 关于阻塞形势演变过程中波数域能量的诊断分析. *大气科学*, 1996, **20**: 269~278
- Lu Riyu, Huang Ronghui. Energedcs examination of the blocking episodes in the northern Hemisphere. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica)* (in Chinese), 1996, **20**: 269~278
- [75] 林本达, 高山月. 定常行星波的垂直传播及其动力学效应. *大气科学*, 1994, **18**: 889~901
- Lin Benda, Gao Shanyue. The vertical propagation of stationary planetary waves and its dynamic effects. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica)* (in Chinese), 1994, **18**: 889~901
- [76] 李崇银. 大气大尺度水平运动的稳定性. *大气科学*, 1986, **10**: 240~249
- Li Chongyin. Stability of atmospheric large-scale horizontal motions. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica)* (in Chinese), 1986, **10**: 240~249
- [77] 李崇银, 曹文忠, 李桂龙. 基本气流对中高纬度大气季节内振荡不稳定的激发的影响. *中国科学 (B)*, 1995, **9**: 978~985
- Li Chongyin, Cao Wenzhong, Li Guilong. Effect of basic flow on triggering the instability of atmospheric intraseasonal oscillation in mid-high latitudes. *Science in China (Series B)* (in Chinese), 1995, **9**: 978~985
- [78] Charney J G, Devore J G. Multiple flow equilibria in the atmosphere and blocking. *J. Atmos. Sci.*, 1979, **36** (7): 1205~1216
- [79] 叶笃正, 陶诗言, 李麦村. 在六月和十月大气环流的突变现象. *气象学报*, 1958, **29**: 249~263
- Yeh T, Dao Shihyen, Li Meitsiun. The abrupt change of circulation over Northern Hemisphere during June and October. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 1958, **29**: 249~263
- [80] 柳崇健, 陶诗言. 副热带高压北跳与月尖 (CUSP) 突变. *中国科学 (B辑)*, 1983, **13**: 474~480
- Liu Chongjian, Tao Shiyen. Sudden northward jump of the subtropical high and CUSP sudden change. *Science in China (Series B)* (in Chinese), 1983, **13**: 474~480
- [81] 杨大升, 丁敏芳. 台风发生非线性动力机制. 台风会议文集. 北京: 气象出版社, 1985. 231~243
- Yang Dasheng, Ding Minfang. Nonlinear dynamical mechanism of typhoon formation. *Typhoon Meeting Thesises* (in Chinese), Beijing: China Meteorological Press, 1985. 231~243
- [82] 伍荣生. CISK 理论中的若干问题. *气象学报*, 1987, **45**: 131~139
- Wu Rongsheng. Some aspects on the theory of CISK. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 1987, **45**: 131~139
- [83] 徐祥德. 天气尺度系统稳定性结构、相路特征的分岔及热源时间振荡影响问题的探讨. *气象学报*, 1987, **45**: 140~149
- Xu Xiangde. A study on the stability structure of synoptic scale systems, the bifurcation problem of the phase path characteristics and the influence of the time-oscillation of heat source. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 1987, **45**: 140~149
- [84] 徐祥德. 轴对称涡旋非线性运动平衡态、失稳和突变影响因子的研究. *大气科学*, 1991, **15**: 63~72
- Xu Xiangde. Study on influence factors of equilibria, destabilization and catastrophe of nonlinear movement of axisymmetric vortex. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica)* (in Chinese), 1991, **15**: 63~72
- [85] Wallace J M, Gutzler D S. Teleconnections in the geopotential height field during the Northern Hemisphere winter. *Mon. Wea. Rev.*, 1981, **109**: 784~812
- [86] Hoskins B J, Karoly D. The steady linear response of a spherical atmosphere to thermal and orographic forcing. *J. Atmos. Sci.*, 1981, **38**: 1179~1196
- [87] 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, **15**: 668~675
- Li Chongyin. Trough and ridge of southern-Asia summer monsoon, tropical cyclone and moving CISK wave. *Science in*

- China* (Series B) (in Chinese), 1985, **15**: 668~675
- [88] Xu Xiangde, He Jinhai, Zhu Qian'gen. A dynamical analysis of basic factors of low-frequency oscillation in the tropical atmosphere. *Acta Meteorologica Sinica*, 1990, **4**: 157~167
- [89] 徐祥德. 波射线变形及其影响因子的探讨. *气象学报*, 1991, **49**: 288~299
- Xu Xiangde. A study on deformations of ray and its relevant factors. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 1991, **49**: 288~299
- [90] Ghil M. Dynamics, statistics, and predictability of planetary flow regimes, In: *Irreversible Phenomena and Dynamical Systems Analysis in Geosciences*, Bicolis C, Nicolis G, Eds. Dordrecht-Boston-Lancaster: D. Reidel Publ. Co., 1987. 241~283
- [91] 李崇银. 大气低频振荡. 北京: 气象出版社, 1993. 107~116
- Li Chongyin. *Atmospheric Low-Frequency Oscillations* (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 1993. 107~116
- [92] 徐祥德, 何金海, 赵天良, 等. 强迫二维 Rossby 波传播特征的数值试验. *气象学报*, 1993, **51**: 111~116
- Xu Xiangde, He Jinhai, Zhao Tianliang, et al. Numerical experiments of propagation characters of forced two dimension Rossby wave. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 1993, **51**: 111~116
- [93] 徐祥德, 朱复成, 陆曼云. 东西风廓线特征与大气运动平衡态定常波的相关关系及共振条件的研究. *高原气象*, 1991, **10**: 134~145
- Xu Xiangde, Zhu Fucheng, Lu Manyun. Correlations between the profile characteristics of the easterlies and westerlies and stationary waves in equilibrium state. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 1991, **10**: 134~145
- [94] 徐祥德, 朱复成. 行星尺度定常波经向波列波射线路径及截获带的季节特征. *应用气象学报*, 1991, **2**: 225~233
- Xu Xiangde, Zhu Fucheng. Seasonal characters of ray path of meridional wave train of planetary scale stationary wave and its trapping zone. *Quarterly Journal of Applied Meteorology* (in Chinese), 1991, **2**: 225~233
- [95] Charney J G. A further note on large-scale motions in the tropics. *J. Atmos. Sci.*, 1969, **26**: 182~185
- [96] Yasunari T. A quasi-stationary appearance of 30 - 40 day period in the cloudiness fluctuations during the summer monsoon over India. *J. Meteor. Soc. Japan*, 1980, **58**: 225~229
- [97] Sumathipala W L, Murakami T. The role of low-level northerly surges upon the enhancement of 30 - 60 day equatorial oscillations during winter. UHMET 87 - 10, Dept. of Meteorology, Univ. of Hawaii. 1987
- [98] 徐祥德. 热带大气周期性振荡相图结构与南北半球中纬度热力强迫效应的相关关系. *大气科学*, 1992, **16**: 147~157
- Xu Xiangde. Correlations between the phase diagram structures of periodic oscillations in the tropical atmosphere and thermal forcing from midlatitudes of the southern and northern Hemispheres. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica)* (in Chinese), 1992, **16**: 147~157
- [99] Edmon H J, Hoskins B J, McIntyre M E. Eliassen-Palm cross sections for the troposphere. *J. Atmos. Sci.*, 1980, **37**: 2600~2616
- [100] Higgins R W, Schubert S D. Low-frequency synoptic-eddy activity in the pacific storm track. *J. Atmos. Sci.*, 1993, **50**: 1672~1690