

高守亭, 刘璐, 李娜. 2013. 近几年中尺度动力学研究进展 [J]. 大气科学, 37 (2): 319–330, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.12304. Gao Shouting, Liu Lu, Li Na. 2013. Major advances in research on mesoscale atmospheric dynamics in recent years [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 37 (2): 319–330.

近几年中尺度动力学研究进展

高守亭¹ 刘璐^{1,2} 李娜^{1,2}

1 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029

2 中国科学院大学, 北京 100049

摘要 近几年, 中尺度气象由于在逐日天气预报中的重要作用和在气象灾害预报中的显著贡献, 已经成为一个热门的研究课题。中尺度气象研究并预测中尺度天气系统的发生发展及其引发的灾害性天气, 如暴雨、冰雹、龙卷风等。本文主要总结了 2007 年以来我国在中尺度研究中取得的显著性成果。主要包括: 波动、涡旋、锋面、稳定性、 \mathbf{Q} 矢量和不变量。在波动方面包括重力波的形成和传播的研究, 包含旋转 Rossby 波、混合低频旋转 Rossby 波和高频惯性重力波在内的台风波动以及考虑水汽作用的中尺度波作用守恒。涡旋部分主要介绍了青藏高原低涡 (TPV) 和热带气旋内部的涡旋问题。除了涡旋之外, 锋面在中国也是一个关键系统。在锋面方面的进展有: 梅雨锋中的 β 中尺度双雨带机制的产生和维持的实验性研究, 以及基于广义位温的锋生函数的提出, 这些成果使得对锋生过程的描述更接近于实际大气状况。在不稳定问题上, 主要介绍了采用 Energy-Casimir 方法建立的拟能量波作用方程和基本气流具有线性和非线性切变时的横波扰动的不稳定。关于 \mathbf{Q} 矢量, 介绍了从地转 \mathbf{Q} 矢量, 半地转 \mathbf{Q} 矢量到非地转 \mathbf{Q} 矢量, 非地转湿 \mathbf{Q} 矢量的发展, 以及由湿地转 \mathbf{Q} 矢量和垂直风切变耦合得到的新型散度方程。最后, 讨论了有关质点的两个不变量位温和位涡的相关研究新进展。

关键词 中尺度波动 中尺度涡旋 \mathbf{Q} 矢量 不变量

文章编号 1006-9895(2013)02-0319-12

中图分类号 P401

文献识别码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.12304

Major Advances in Research on Mesoscale Atmospheric Dynamics in Recent Years

GAO Shouting¹, LIU Lu^{1,2}, and LI Na^{1,2}

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

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

Abstract Mesoscale meteorology has been a subject of intense research activities in recent years because of its important role in daily weather forecasting and significant contribution to the predictions of meteorological disasters. Mesoscale meteorology explores the occurrence, development, and forecasting of mesoscale weather systems and the accompanying severe weather such as heavy rainfall, hail, and tornado wind. Recent observational, theoretical, and numerical studies have advanced our understanding of mesoscale weather dynamics. The present review mainly focuses on achievements since 2007, which consist of waves, vortices, fronts, stability, \mathbf{Q} -vectors, and conservative quantities. In the field of waves, progress includes the study of formation and propagation of gravity waves; research of typhoon waves including vortex Rossby waves, mixed low-frequency vortex Rossby waves, and high-frequency inertial gravity waves; and the study of the wave-activity relationships that consider the water vapor effect. Recent studies have also expanded

收稿日期 2012-09-18, 2012-11-09 收修定稿

资助项目 中国科学院重点部署项目课题 KZZD-EW-05-01; 国家自然科学重点基金及面上基金项目 40921160379、41075043, 国家重点基础研究发展计划项目 2009CB421505

作者简介 高守亭, 男, 1945 年出生, 研究员, 主要从事中尺度动力学研究。E-mail: gst@mail.iap.ac.cn

our understanding of the vortex, particularly the Tibetan Plateau Vortex (TPV), and tropical cyclones, which is of great importance in weather forecasting. The front is another key weather system in China. Advances in front research include an experimental study of the generation and maintenance mechanism of the β mesoscale double rainbands in the Meiyu front and a proposal of the scalar frontogenesis function based on the generalized potential temperature, which makes the description of the front genesis process more closely related to the actual atmosphere. To address instability, we introduce a pseudo-momentum function based on the Energy–Casimir method and instability of transverse waves when the basic flow has linear or nonlinear shear. Moreover, the development of the Q -vector—from the geostrophic Q -vector to the ageostrophic moist Q -vector—and a new divergence function deduced by coupling of the geostrophic moist Q -vector and the vertical wind shear are introduced. Finally, we discuss the latest advances in two conservative quantities: potential temperature and potential vorticity.

Keywords Mesoscale wave, Mesoscale vortex, Q -vector, Conservative quantity

1 引言

中国幅员辽阔，从寒带到热带横跨多个纬度，加之复杂地形影响，因而天气多变。另外，中国位于亚洲季风最显著的地方。夏季，季风从西太平洋和赤道印度洋地区吹向中国内陆，易引发强风、暴雨、冰雹等灾害性天气，对国家财产和人民生活造成巨大伤害。中尺度天气系统是导致这些灾害性天气发生的直接因素，因而对中尺度天气系统发展演变及其形成机制的研究尤为重要。Lu et al. (2007) 对 2007 年以前的许多中尺度研究成果进行了总结，包括中尺度环流的发生发展、平衡和非平衡流、东亚大气环流背景下与湿位涡相关的 β 中尺度暴雨的形成和发展等。随着观测与数值模拟技术的提高，近几年中尺度研究又取得了新的进展，有些成果甚至在国际上处于领先水平。

本文在前人的基础上回顾了 2008 年以来我国在中尺度大气动力学方面取得的研究成果，主要包括：对中尺度系统发生发展有重要意义的重力波和台风中的中尺度波动过程，如涡旋 Rossby 波 (VRW) 和混合 Rossby 惯性重力波 (RIGW)；对我国天气有重要影响的青藏高原低涡及热带气旋中的中尺度涡旋；梅雨锋和锋生函数研究；能够直观表达波活动性及波流相互作用的波作用方程和不稳定研究；对天气系统诊断有重要贡献的 Q 矢量研究；与位涡和位温相关的能够指示天气系统发生发展的不变量研究等。

2 中尺度波

2.1 重力波

重力波在大气环流的能量和动量传输中起着重要作用，且重力波可激发和组织对流，造成晴空

湍流等。山脉、对流、垂直风切变及与急流—锋面系统有关的非平衡调整均是重力波的重要波源。对重力波的波源和波动性质的研究对于理解大气中的关键动力过程具有重要的意义。

Wang et al. (2009) 研究了理想急流中惯性重力波传播特点。沿用 Snyder et al. (2007) 和 Viúdez (2007) 的涡旋偶极子产生急流的方法，Wang et al. (2009) 分析了两类急流中的重力波性质，同时对两类急流所产生的重力波性质进行了对比分析。两类不同的急流中一类由地面涡旋偶极子形成 (SFJET)，其所产生的波动的空间结构与 Snyder et al. (2007) 类似；一类由大气中层偶极子形成 (MDJET)，其所产生波动的空间结构与 Viúdez (2007) 类似。模拟结果发现，当气流的 Rossby 数超过 0.15 时，两类急流出口区中都有低频惯性重力波产生，重力波的特征频率约为科氏参数的 1~2 倍，和急流几乎是锁相的，说明急流中重力波自发辐射的特点。重力波随着传播环境的变化，波性质也有明显的变化。通过对中层急流所产生重力波的射线追踪分析进一步发现，背景场气流的变形能够强烈影响波动性质：重力波的水平和垂直波长减小，特征频率接近惯性频率，特征相速和垂直群速度减小为 0。通过对偶极子两涡旋距离的调整（由远及近）可以使急流的强度逐渐增大。当罗斯贝数 Ro 介于 0.05~0.15 之间时，90 km 分辨率的静止重力波振幅随 Rossby 数平方的增大而增大，分辨率增大也相应地会使重力波振幅增加的幅度变大。

Wang and Zhang (2010) 又在上述研究的基础上进一步研究了涡旋偶极子中重力波的产生问题。所不同的是他们利用线性数值模式研究了非线性非静力中尺度模式中偶极子的重力波产生机制的问题。在急流最大风速层 (11.5 km 左右) 存在一

上升和下沉运动的对接。Viúdez (2007) 通过 ω 方程分析推断其和重力波的产生有关, 且上升/下沉运动对接的起源为非地转涡度的物质变率。Wang and Zhang (2010) 采用位涡反演的平衡流作为基本态避免了准地转流所造成的误差, 并对所使用的线性模式叠加了三种类型的强迫: 散度强迫、涡度强迫和热力强迫。通过对比分析发现, 三种强迫下的线性模式均能反应非线性非静力模式下涡旋偶极子产生重力波的过程, 但涡度强迫对涡旋偶极子中重力波的产生有最大贡献, 且线性模式中涡旋偶极子的重力波激发与不稳定机制没有显著联系, 这和 Viúdez (2007) 的研究不谋而合。

接着, Wang and Zhang (2010) 又利用线性模式研究了具有显著水平和垂直风切变的急流区的重力波的传播性质。所研究的重力波是通过在理想急流中心叠加不同尺度的辐合辐散强迫。这些强迫产生的重力波经过几个惯性周期后达到稳定, 但振幅会随时间有缓慢的增长。线性模式模拟的波动对特定强迫会产生响应, 但对该强迫的空间尺度依赖性较小。远离强迫的波动结构(例如水平/垂直波长, 相速和位置) 通过波动捕获机制被环境风切变所限制。因此, 模拟的重力波活动性集中于固定切变连线的纵横比约等于大尺度特征环境的纵横比的邻近地区。射线追踪分析表明波动捕获机制是水平和垂直风切变对长波和短波不同影响的结果。以上利用了数值模式及相关的波动提取和追踪技术研究了急流附近重力波的产生机制和传播性质等与重力波相关的动力学问题。赵南等 (2010) 还曾利用传统求解析解的方法研究了平衡流中重力波自发辐射问题。从 f 平面正压模式中的散度、涡度和连续方程出发推导出下方程:

$$\frac{\partial^2 \delta}{\partial t^2} - L_0 \delta = -\nabla \cdot \left[f \zeta \mathbf{u} + \frac{\partial}{\partial t} (\mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u}) - \nabla^2 (\phi \mathbf{u}) \right]. \quad (1)$$

方程 (1) 包含了惯性重力波自发辐射的核心思想, 因方程 (1) 右端的主要贡献在 Froude 数 $F = U/c \ll 1$ 时, 可以认为主要来自非定常的涡旋运动。因此它可以看作是某种给定惯性重力波的“波源”。与某种外在的初始扰动所导致的自由惯性重力波比较而言, 它被视为由涡旋流自发产生的惯性重力波, 故称波自发辐射。根据尺度分析原理, 方程 (1) 可以写为:

$$\frac{\partial^2 \delta}{\partial t^2} - c^2 \nabla^2 \delta + f^2 \delta = R(\phi, \zeta), \quad (2)$$

其中,

$$R(\phi, \zeta) = -\nabla \cdot \left[f \zeta \mathbf{u}_\zeta + \frac{\partial}{\partial t} (\mathbf{u}_\zeta \cdot \nabla \mathbf{u}_\zeta) - \nabla^2 (\phi \mathbf{u}_\zeta) \right] \quad (3)$$

为涡旋流对惯性重力波的外源强迫。

利用格林函数可以给出方程 (2) 的解析解:

$$\delta(\mathbf{r}, t) = \frac{c^2}{4\pi} \int \int_{t'>t} \int_{\Omega} R(\mathbf{r}', t') \frac{\exp\left[i \frac{f}{c^2} \sqrt{c^2(t-t')^2 - |\mathbf{r}-\mathbf{r}'|^2}\right]}{\sqrt{c^2(t-t')^2 - |\mathbf{r}-\mathbf{r}'|^2}} d\mathbf{r}' dt'. \quad (4)$$

方程 (4) 表明在任何时刻 t 在 \mathbf{r} 处的惯性重力波的振幅由较早所有时刻 t' 的 \mathbf{r}' 处强迫效应的累计决定。惯性重力波主要表现为纯粹的重力波波阵面附近的扰动。由方程 (4) 引入两个近似问题: 远场近似和近场近似。远场近似惯性重力波的特征尺度远大于涡旋流的尺度, 自发辐射以多极辐射为主。近场近似分析则表明与涡旋流伴随的辐合辐散可以有两部分组成: 1) 惯性重力波的辐合辐散, 它是相对快变的振荡、传播运动; 2) 从属于平衡流的辐合辐散, 是相对缓慢的调整运动。

2.2 台风中的波动

观测事实和数值模拟结果均表明热带气旋 (TC) 中基流的特殊分布会导致基态涡度垂直分量的径向梯度, 从而证明 Rossby 波的存在。沈新勇等 (2007a) 使用柱坐标系下的正压浅水方程组以及斜压扰动方程组, 研究了台风涡旋系统中的涡旋 Rossby 波 (VRW) 的物理特性, 并将其分成为两类。第一类是正压涡旋 Rossby 波, 在水平无辐散情况下其推导出的频散关系如下:

$$\omega = \frac{4mR\mu_2 d\bar{\zeta}_z}{\mu_N^2 dr}, \quad (5)$$

这类波动主要是由于气流中的二阶径向水平切变或基流的垂直涡度在径向的变化产生的 ($\beta_* = d\bar{\zeta}_z/dr$), 并随着基本气流 \bar{U}_0 单项传播。当基本气流的垂直涡度 $\bar{\zeta}_z$ 沿着 r 方向增大时, 正压涡旋 Rossby 波沿着切向圆周方向逆时针传播; 反之, 则传播方向恰好相反。

第二类是斜压涡旋 Rossby 波。考虑到 $N^2 = 0$, 其相速度为:

$$c = \bar{U}_0 - \frac{\frac{\partial \bar{\zeta}_r}{\partial z}}{k^2 + \left(\frac{n\pi}{H}\right)^2}. \quad (6)$$

斜压涡旋 Rossby 波主要由切向基本气流在垂直方向上的二阶切变所致，也是随着基流 \bar{U}_0 单向传播，它的相速度与纬向波数有关，是频散波，在 x 方向存在群速度。当 ζ_r 沿着空间 z 方向增大时，第二类涡旋 Rossby 波相对于基流顺时针方向传播；反之，传播方向相反。

当基流中的平均风速 \bar{U} 具有二次径向水平切变或垂直切变时，台风中的波动可能是混合 VRW 和重力波的不稳定。若 \bar{U} 仅仅具有线性切变，不存在二阶切变时，则不存在 VRW，在这种情况下，台风中的波动仅仅是惯性重力波的不稳定。

黄泓和张铭（2008）讨论了热带气旋中的螺旋云带的不稳定的动力特征。设计了正压无辐散涡旋模型和正压原始方程模型来进行比较，结果均出现了不稳定的螺旋云带，在涡旋中只要背景流场 \bar{U}_0 不均匀，就会出现与环境涡度 $d\bar{U}_0/dr$ 有关的项，从而产生涡旋波。结果均表明，该不稳定波动的结构在从涡旋中心到 $20\sim40$ km 范围内，运动以涡旋运动为主；而在距中心 $150\sim180$ km 处，运动以辐合、辐散为主。因而当研究内部和外部不稳定螺旋云带的形成、发展时，水平辐合辐散不能忽视，也就是保留了惯性重力波。当要讨论内部和外部不稳定螺旋云带的生成和结构时，最好选择非平衡混合涡旋 Rossby 波和惯性重力波。

在涡旋 Rossby 波 (VGWs) 和惯性重力波 (IGWs) 的基础上，Zhong et al. (2009) 通过在柱坐标系中使用旋转浅水方程模型提出了在 TC 中既有旋转也有辐散运动的混合涡旋 Rossby 惯性重力波 (VRIGWs)。通过简化径向结构方程为线性扰动，然后把它转化成为贝塞尔常系数方程。最终得到 (径向离散的) 三次方频率方程：

$$F(\omega) = \omega^3 - (m^2 - F_r \eta \Omega) \omega + n R_0 T_r = 0. \quad (7)$$

该方程可能存在三个波频解，这取决于判别式中 Q 的符号：

$$Q = \frac{(m^2 - F_r \eta \Omega)^3}{27} - \frac{1}{4} n^2 R_0^2 T_r^2. \quad (8)$$

其中， m 是贝塞尔常系数方程的特征值， R, Ω, η, ω 分别是无量纲半径、角速度、垂直绝对涡度、波频率。当 $Q > 0$ 时，在热带气旋中，低频 VRWs 和高频 IGWs 共存；当 $Q = 0$ 时，有不同动力特征的混合 VRIGWs 产生；当 $Q < 0$ 时，会产生低频传播的混合 VRIGWs 和两个反向传播的混合 VRIGWs。经过分析发现， $Q > 0$ 易出现在眼区或外部区域中，

而 $Q \leq 0$ 易发生于眼壁处。结果表明，高频 IGWs 在眼壁处波速会减半，因而眼壁处更适合于混合 VRIGWs 的发展。在眼壁处，短波增长速度比长波快，混合波的这个不稳定特性可以解释强 TC 中多边形眼壁和多涡旋的形成原因。而且，当径向宽度随时间减小时，当螺旋雨带形成时所有波动都会出现，这说明 TC 中的一部分螺旋云带可能由方位角扰动的径向位移差产生。

Zhong et al. (2010) 探究了二维非粘性热带气旋中涡旋 Rossby 波 (VRW) 的正压稳定性，类似于旋转动力学中 f 平面上的涡旋。他们发现了正压涡旋的两个必要的不稳定性条件：第一是必须在径向范围内至少有一个涡度梯度的零点，即由正压涡度方程推导出：

$$\overline{\eta}_0|_{R=R_k} = 0. \quad (9)$$

第二是扰动的相对传播速度必须与基本涡度梯度符号相反，以确保不稳定能量的增长。关系式如下：

$$(\overline{V}_0 - c_r) \overline{\eta}_0 < 0. \quad (1)$$

这反映出了不稳定能量的约束关系。不稳定波动不是无限增大的，其最大增长速度取决于平均涡度的径向梯度的峰值和正切波数 (WN)。然后，他们通过使用高分辨率模拟得到 TC 中的基本态和不同的 WN 扰动，发现对于涡度正压不稳定的必要条件在最大涡度半径范围内 (RMV) 很容易满足。波动能量在 RMV 内部 (外部) 消减 (增加)，这主要是因为平均绝对涡度的径向梯度是负值。这个结果解释了在 TC 眼壁处强涡度的发展。

为了研究次级眼壁的形成，Qiu et al. (2010) 使用一个高分辨率，全物理模型来研究了理想化的热带气旋。验证了 β 褶带轴对称假设，同时也进一步研究了轴对称涡旋 Rossby 波 (VRW) 在次级眼壁的形成中的重要性。结果表明，在次级眼壁的形成阶段，内核外部的对流组织形成了外部螺旋雨带。不断地由对流上升气流形成的位涡偶极子沿着雨带移动，并不断进入内核区域，最后使得形成 β 褶带轴对称化。次级眼壁的形成是一个快速加强过程，在这个过程中涡旋热塔、离散 VRW 和切变 VRW 控制着内核的不对称结构。切变 VRW 不断地在眼壁外围产生，并且随着向外传播不断地变成同心结构，由此在 VRW 的停滞半径处形成了一个弱的但不可忽视的次级环流。与次级环流相关的低层辐合和波流相互作用加速了平均正切流。穿过停滞半径时，相对涡度的平均径向梯度会增强，这导致

β 褶带区域在对流层低层向外扩展。这个研究结果说明停滞半径机制和 BSA 机制可能协同合作, 在这个意义上, 前者有助于建立一个广阔的 β 褶带区域, 后者能够在此基础上发展起来。

2.3 中尺度波作用守恒

大约在过去三十年间, 为了不同的研究目的, 人们建立了大量的波动关系。以前的大部分波动理论是建立在准地转近似的气压坐标系中或等熵坐标系中。由于这些波动理论是静力平衡的, 他们大部分用于大尺度系统中。Scinocca and Shepherd (1992) 从哈密尔顿系统推导出一个有限振幅的非静力平衡的波动守恒定律。然而, 他们的理论只能用于二维系统中。在 Scinocca and Shepherd (1992) 之后, Ran and Gao (2007) 推导出了三维、非地转的、非静力平衡的假动量波动关系:

$$\partial J / \partial t + \nabla \cdot \mathbf{F} = S. \quad (11)$$

这里, \mathbf{F} 表示假动量的波动通量, 在扰动振幅中是二次的。由于(11)式是在非地转非静力平衡的动力框架中构造的, 波动关系可以应用于诊断非静力平衡的中尺度天气系统的发展和传播过程。上述的假动量的波动关系被证明是一个非常有用的天气诊断工具。它能够应用到考虑了外强迫力、耗散作用和边界条件的全球系统中。除此之外, 它也能应用于湿空气中。对于湿空气, Gao and Ran (2009) 进一步研究了水汽在中尺度波动关系中的影响。将流体分为有稳定解的基本态部分和与涡旋有关的扰动部分。Gao and Ran (2009) 得到了非线性扰动方程:

$$\partial A_{\nu_e} / \partial t = -\nabla \cdot \mathbf{F}_{\nu_e} + \nabla \cdot (S_{\varphi_e} \nabla V_e \times \mathbf{i}), \quad (12)$$

其中

$$\begin{aligned} F_{\nu_e} = & V_e A_{\nu_e} + V_0 A_{\nu_e} + G_{\nu_e} \nabla \varphi_e \times \mathbf{i} + \\ & (V_e \cdot \nabla \varphi_0) \nabla V_e \times \mathbf{i} \end{aligned} \quad (13)$$

是标准波通量。对于暴雨来说, 如果设定方程(2)和(3)中的标量 φ , 如 φ 可以取比湿 q_v , 相当位温 θ_{se} , 虚位温 θ_v , 从而构成诊断暴雨的三种波作用密度。用此方法可以较准确的诊断暴雨落区。

3 涡旋

3.1 青藏高原低涡

青藏高原低涡(TPV)是一种在青藏高原上形成的涡旋。它主要在500 hPa等压面上, 它的水平尺度在400~500 km, 生命周期是1~3天, 大部分高原涡旋都是暖心结构。青藏高原上的涡旋对极端

天气过程有一定的影响。当它不断地发展并向东移出青藏高原时, 它常常导致长江流域(尤其是四川地区)大范围的暴雨或雷暴。

根据对相关的波动的研究, 刘晓冉和李国平(2007)利用相平面分析的方法, 由非绝热大气运动方程组导出了与非线性惯性重力内波有关的方程:

$$U'' + aU + bU^2 = 0, \quad (14)$$

其中, $a = [f^2 n^2 + k^2 (\sigma_s - \eta)] / (n^2 v^2)$, $b = [k^3 (\sigma_s - \eta)] / (n^2 v^3)$ 。然后利用直接积分方法得到两类有气象意义的波解, 其中与青藏高原暖性低涡有关联的一类具有间断点的奇异波解为:

$$\Omega = -\frac{k}{n} \left| U_0 + \frac{3}{2} U_0 \operatorname{csch}^2 \left| \frac{\sqrt{a}}{2} \theta \right| \right|. \quad (15)$$

在 $\theta = 0$ 处, 存在间断点。作者重点分析了这类波动解的特征, 发现了在高原上初级阶段的一些波动与热带气旋类似, 可以用奇异波解来解释空心高原低涡。但由于高原低涡没有充足的水汽, 因而不会像台风那样发展剧烈。进而讨论了高原非绝热加热对高原低涡的生成移动和高原低涡的暖心结构的作用, 从非线性动力学角度解释了非绝热加热作用对高原低涡暖心结构生成的作用。

通过将螺旋度、非地转的湿 \mathbf{Q} 矢量理论相结合, 运用天气学分析和动力学方法分析了一次高原低涡东移造成暴雨的个例。结果表明, Z-螺旋度的500 hPa水平分布能够对低涡中心的移动和暴雨的分布有一个很好的指示, 暴雨落区位于正的涡度梯度处。当发生暴雨时, Z-螺旋度能够反映出天气的动力学特征。低层湿 \mathbf{Q} 矢量散度辐合场与高原低涡暴雨的强度及落区具有很好的对应关系, 基本上能够准确地反映出同时刻降水的落区和强度(黄楚惠和李国平, 2009)。

通过解线性涡度方程推导出了青藏高原中的混合波和他们的频散特性, 在边界层中非绝热加热对混合波的作用和混合波与涡度通量场的特征之间的联系都进行了定性的讨论(Chen and Li, 2010)。可以得出: 高原低涡可能包含混合惯性重力 Rossby 波和径向的热交换场, 它的径向梯度对混合波有很重要的作用。

3.2 台风中的中尺度涡旋

我国是世界上台风登陆最多, 灾害最严重的国家之一。台风造成的暴雨洪涝灾害和风暴潮是造成

我国气象灾害和次生灾害的最主要的天气系统之一。另一方面，台风有它自己的魅力。它能够为干热地区带来大量的水汽和凉爽的天气，这对农业很重要。因而精确的预测台风的路径和强度是非常重要的。在过去30年中，我们见证了热带气旋路径预测的不断进步。这个进步主要是由于观测技术和数据同化技术的提高，预测模型的改进和对控制热带气旋运动的机制的进一步理解。台风本身属于天气尺度的现象，但其环流内部经常出现复杂的中尺度系统，这是台风产生灾害性天气的直接原因。

钟玮等(2008)研究了台风中的准平衡流。他通过加入准平衡流的 ω -方程描述了飓风水平涡旋场的基本特征，对飓风准平衡流涡散运动共存和深对流的组织化的特征进行了诊断分析。然而，在行星边界层的入流区域和高层的出流区域包含了显著的非平衡超梯度流。当环境风场底层到高层存在顺切变时，飓风内中尺度对流带的移动方向的左侧有利于强对流单体的发展和新对流单体的形成，右侧相反。同时强气旋式旋转流场的作用，使得对流单体形成后随基本气流传播至对流减弱区，造成了飓风非对称结构的形成和维持。

Hao et al. (2010)在正压方程的基础上，通过合理的假设（考虑地表摩擦作用，热带气旋中的气块速度线性变化，表面气压是圆形的），推导出了单位空气块的地形力的数学公式：

$$\begin{aligned} dv_\theta &= dM \frac{\partial v_\theta}{\partial M} + dr \frac{\partial v_\theta}{\partial r} + d\pi \frac{\partial v_\theta}{\partial \pi}, \\ dv_r &= dM \frac{\partial v_r}{\partial M} + dr \frac{\partial v_r}{\partial r} + d\pi \frac{\partial v_r}{\partial \pi}, \end{aligned} \quad (16)$$

其中 dM 、 dr 是代表地形坡度误差和气旋中心和观测中心之间距离的误差， $d\pi$ 代表气压梯度误差，需要估算，估算公式如下：

$$d\pi = \pi(p_0 + dp_0, T_0 + dT_0, r + dr) - \pi(p_0, T_0, r). \quad (17)$$

这个在一定假设下的公式，使我们能够描述热带气旋中斜坡误差、中心气压误差和热带气旋风场位置误差的影响，并发现他们是影响热带气旋风场形成的关键因素。尽管大部分研究关注于热带气旋中的暴雨，这个研究填补了热带气旋中对强风研究较少的缺陷。

针对以往在求解有限区域流函数、速度势方面常常出现的由边界处理不当导致的问题，诸如计算不稳定、原始风场无法还原、边界上的系统缺失等，

Chen and Kuo (1992a, 1992b)相继提出了求解有限区域流函数、速度势的两种新方法——调和—正弦谱展开法和调和—余弦谱展开法。在此基础上，周玉淑等(2008)利用H-C方法(调和—余弦级数展开方法)来研究台风内水平风场的分布，从而细致地分析出台风的动力结构，加深对台风系统结构的了解。使用这种方法，将函数(流函数和势函数)分为两部分。第一部分是Laplace方程在给定边界条件的解，称为调和部分(外部部分)。而第二部分是初始风场和调和部分的差，满足齐次边界条件下的泊松方程，至于区域内部的涡度或散度有关，称为内部部分，能够扩展为双傅里叶余弦级数。为了验证这个方法，用上述方法将超强台风SAOMEI(0608)的水平风场分解为两部分，无辐散部分和无旋部分。对这两部分的分析说明以低层无辐散为标志的台风中心更接近于观测中心。另外，无辐散风能够清楚地说明水汽的输送路径。此外，当SAOMEI登陆时，中国南海和菲律宾西部的对流活动都不利于水汽输送，因而不利于台风SAOMEI维持。可见分解后的无辐散风场和无旋风场能更清楚地体现出台风SAOMEI的风场结构。因而这个方法对于了解台风的特性非常重要，在未来也将得到广泛的应用。此后，通过总结了过去最常用的分离方法，周玉淑和曹洁(2010)引入了调和—正弦/余弦方法。通过个例研究可以看出调和—正弦/余弦方法能够区分并且重现有限区域内的风场状况，这个结果对于研究中尺度系统的动力结构是非常令人激动的。

韩英和伍荣生(2008)在前人的基础上探究了冷空气影响台风的形成和发展的机制。发现温度梯度增大会对涡度梯度起到增强作用。推导公式如下：

$$\zeta = \frac{3v_0}{r} + \frac{f}{2} - \frac{r\rho}{2p} \left(f + \frac{2v_0}{r} \right) \left(fv_0 + \frac{v_0^2}{r} \right) + \frac{\left(f + \frac{2v_0}{r} \right)^2 \left[\frac{\partial \zeta}{\partial p} + \frac{1}{\rho} \left(f + \frac{v_0}{r} \right) \right]}{\frac{2R}{r} \frac{\partial T}{\partial r}}, \quad (18)$$

可见最后一项与温度梯度有关。在不考虑台风高层(400 hPa以上)，其大多数阶段 $\partial \zeta / \partial p > 0$ ，且在台风正涡度环境中 $(1/\rho)(f + v_0/r) > 0$ ，由于热带气旋是暖心结构， $\partial T / \partial r < 0$ ，因而，当 $\partial T / \partial r$ 的绝对值越大， $\partial T / \partial r$ 的倒数就越小， ζ 就越大。由此

设计了敏感性试验, 结果显示当波动进入热带气旋的外围但不改变气旋的暖心结构时, 热带气旋的环境流场会发生变化。北半球冷空气的入侵将会增强热带气旋背面的北风, 形成指向热带气旋中心的推力, 即辐合增强。可见, 一方面冷空气把边界上的能量往气旋中心输送, 另一方面导致温度梯度增加, 从而加强了气旋的发展。

李英等(2010)研究了台风 Rananim 中中尺度辐合线(MCL)的形成和发展。MCL 发生在 700 hPa 以下的低层对流层中, 是由中纬度冷空气侵入台风环流中形成具有指向冷空气的斜升气流, 并形成辐合线上的垂直环流圈。MCL 从台风低层获得动能和正涡度, 而 MCL 的发展在高层也为台风提供动能和正涡度, 从而能够减缓台风的消亡。

4 梅雨锋和锋生

4.1 梅雨锋

在中国, 梅雨是由相对暖的东亚季风与变性冷空气的相互作用而引起的。梅雨锋是一个天气尺度的准静止云带, 一般为东北—西南走向, 经常伴随着积雨云, 呈中尺度双雨带结构。尽管这一结论很早就被提出, 但是关于 β 中尺度双雨带的形成和维持机制的研究却很少。Wang et al. (2007) 继“波流概念模型”之后在湿热成风平衡的条件下设计了一个梅雨锋结构的理想化扰动, 然后做了环境径向速度的垂直分布的实验, 深入研究了 β 中尺度双雨带的形成和维持机制。他们发现高空北风能使向下入侵的干冷空气加强, 而这干冷空气对 β 中尺度双雨带的形成和维持机制有着非常重要的作用, 而且当高空西风急流出现加速时, 向下侵入的干冷空气的强度和范围与质量调整导致的次级环流的强度有关。

Zhang and Tan (2009) 模拟了与梅雨锋强降水有关的 MCS, 发现 MCV 主要受 MCS 的潜热释放的影响, 且 MCS 和 MCV 之间存在的正反馈是其关键特征。

4.2 锋生函数

对干空气而言, 位温在非绝热过程中是一个很好的守恒量。但是, 当湿空气中伴随着潜热释放时, 位温不再守恒。然后, 人们引入了相当位温来保持湿空气绝热过程中的守恒。尽管如此, 如果相当位温要保持守恒, 湿空气必须是饱和的, 因而相当位温仍有局限性。然而实际大气, 既不是绝对干的也不是处处饱和的, 而是由于扰动或其他的复杂过程

形成非均匀饱和的。即使在云中, 因为空气的夹卷作用, 绝对饱和也不存在。因而, Gao et al. (2004) 定义了如下广义位温,

$$\theta^* = \theta \exp \left[\frac{Lq_s}{c_p T} \left(\frac{q}{q_s} \right)^k \right]. \quad (19)$$

进一步, 给出了广义位温 θ^* 的物理解释, 并证明了保守性。通过在饱和或接近饱和的空气中使用 θ^* , Gao et al. (2008) 推导出了锋生函数:

$$\begin{aligned} F &= \frac{d}{dt} |\nabla \theta^*| \\ &= -\frac{1}{|\nabla \theta^*|} \left[\frac{\partial \theta^*}{\partial x} \left(\frac{\partial V_h}{\partial x} \cdot \nabla \theta^* \right) + \frac{\partial \theta^*}{\partial y} \left(\frac{\partial V_h}{\partial y} \cdot \nabla \theta^* \right) \right] - \\ &\quad \frac{1}{|\nabla \theta^*|} \left[\left(\frac{\partial \theta^*}{\partial x} \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial \theta^*}{\partial x} \frac{\partial w}{\partial x} \right) \frac{\partial \theta^*}{\partial z} \right] + \\ &\quad \frac{1}{|\nabla \theta^*|} \left[\frac{\partial \theta^*}{\partial x} \frac{\partial Q^*}{\partial x} + \frac{\partial \theta^*}{\partial y} \frac{\partial Q^*}{\partial y} \right], \end{aligned} \quad (20)$$

这里 θ^* 是广义位温, V_h 是水平风速, 这类锋生函数对于解决实际大气问题更合适。

4.3 形变和形变方程

风场是大气中最重要的元素之一, Petterssen (1956) 将其分成四部分: 平流项、辐散项, 旋转项和形变项。形变项能通过平流效应使水平温度梯度增大, 这常常与锋面的形成有着密切的关系, 例如, 中国东部的梅雨锋。形变项对降水的触发和维持有着重要的作用, 而且对于形变场的时间演变的理解有着重要的意义。Gao et al. (2008) 在证明了总形变(TD)(定义为伸长形变平方和切变形变平方的和的二次开方)是一个独立于坐标系的不变量的基础上, 进一步推导出了总形变倾向方程, 如下:

$$\begin{aligned} \frac{\partial E}{\partial t} &= -V \cdot \nabla E - E \nabla_h \cdot V + \frac{uF + vr}{E} \frac{\partial f}{\partial y} - \\ &\quad \frac{F}{E} \left(g \frac{\partial^2 z}{\partial x^2} - g \frac{\partial^2 z}{\partial y^2} \right) - \frac{r}{E} \left(2g \frac{\partial^2 z}{\partial x \partial y} \right) + \\ &\quad \frac{F}{E} \left(\frac{\partial w}{\partial x} \frac{\partial u}{\partial p} - \frac{\partial w}{\partial y} \frac{\partial v}{\partial p} \right) + \frac{r}{E} \left(\frac{\partial w}{\partial y} \frac{\partial u}{\partial p} + \frac{\partial w}{\partial x} \frac{\partial v}{\partial p} \right) + \\ &\quad \frac{F}{E} \left(\frac{\partial F_x}{\partial x} - \frac{\partial F_y}{\partial y} \right) + \frac{r}{E} \left(\frac{\partial F_x}{\partial y} + \frac{\partial F_y}{\partial x} \right). \end{aligned} \quad (21)$$

通过分析总形变倾向方程中的每个量, 发现总形变的局地变化主要由气压梯度项, 垂直速度项和平流项决定。通过个例研究发现总形变可能是研究降水

的一个很好的工具，尤其是与梅雨锋和形变流场分布有关的天气事件。在此研究的基础上，Ran et al. (2009) 定义了一个形变参量：

$$H_{q_v} = \zeta_{q_v} \eta_{q_v} = \left(\frac{\partial v_{q_v}}{\partial x} + \frac{\partial u_{q_v}}{\partial y} \right) \left(\frac{\partial u_{q_v}}{\partial x} + \frac{\partial v_{q_v}}{\partial y} \right), \quad (22)$$

其中， ζ_{q_v} 为切变形变， η_{q_v} 为伸长形变。

进而推导出了在气压坐标系下的形变参量的倾向方程。用这个参量来研究台风碧利斯周围的湿通量环流的形变特征，结果显示在登陆之前，碧利斯外围的湿通量环流变形为反气旋环流，在经向和纬向上伸长。登陆后形变逐渐减弱。由此可见在不同的阶段，形变对湿通量环流起着不同的作用。

5 稳定性研究

稳定性问题是地球流体力学的重要研究内容，从线性、弱线性到非线性，从保守系统到耗散系统，气象学家对这一问题进行了广泛深入的研究。目前，随着观测技术的提高，数值预报模式的分辨率的提高，为分析对称不稳定和由它发展起来的天气现象提供了有力的工具，也有力地推动了中尺度气象学的新的进展。

冉令坤和高守亭 (2009) 考虑了水汽效应，引进 Casimir 函数，采用 Energy-Casimir 方法建立了三维非地转平衡和非静力平衡的拟能量波作用方程，讨论了层结稳定大气内中尺度扰动系统的稳定性问题，得到拟能量波作用方程：

$$\begin{aligned} \frac{\partial A}{\partial t} + \nabla \cdot F &= -\rho_0 u_e \left(v_e \frac{\partial u_0}{\partial y} + w_e \frac{\partial u_0}{\partial z} \right) - \rho u f v_e + \\ &\quad \rho \left(\frac{T_v}{T} \frac{Q}{c_p} + \lambda T S_{q_v} \right) \left(\frac{dC}{d\theta_v} \frac{\theta_v}{T_v} + c_p \right), \end{aligned} \quad (23)$$

拟能量波作用方程具有非守恒形式。对于基本态层结稳定的湿大气 ($\partial \theta_{v0} / \partial z > 0$)，拟能量波作用密度辐合 ($\nabla \cdot F < 0$) 有利于扰动系统的不稳定发展；拟能量波作用密度辐散 ($\nabla \cdot F > 0$)，抑制扰动系统不稳定发展。除受拟能量波作用通量散度影响之外，纬向基本气流、科氏力作用以及由非绝热加热和水汽相变所构成的波作用源汇项对其也有贡献。通过个例分析，说明拟能量波作用密度能够较好地

抓住强降水区上空对流层中低层动力场的扰动特征，并在一定程度上可以有效地表征降水系统的发展演变。

安洁和张铭 (2009) 采用计算横波型扰动波谱和谱函数的方法，研究了不稳定的结构和性质，发现：对于三支波动连续谱区互不重叠的天气尺度情况，若此时出现不稳定扰动，则是 Rossby 波的斜压不稳定；在中 α 尺度中高端，其不稳定是准平衡的斜压不稳定；在中 α 尺度低端则出现了非平衡不稳定，这是一类混合波不稳定；在中 β 尺度波段，若存在不稳定则为非平衡的涡旋—重力惯性混合波不稳定。在此基础上，安洁等 (2010) 通过波谱和谱函数，进一步对垂直非线性切变基流中横波型扰动的不稳定作了数值研究。主要结论与线性垂直切变基流的结论相一致，但这里因基流垂直分布较复杂，垂直方向会出现散涡比以 1 为界的多段交替分布。因而对于横波型扰动，只要基流不是常数，且层结稳定，虽此时存在纯重力惯性波连续谱区，但均无纯重力惯性波的不稳定，只有涡旋—重力惯性混合波的不稳定。

沈新勇等 (2007b) 使用三维中尺度扰动动力学方程组，讨论了一类与基本气流方向成任意夹角的纬向线状扰动的斜交不稳定问题。讨论了在线性和非线性风速切变类型下的斜交不稳定扰动的波动性质以及发生不稳定的物理成因。结果发现：在基本气流的切变为线性切变的情况下，可以发生斜交不稳定。但是发生斜交不稳定必须要求满足下列条件之一：一个是沿着线状扰动方向的基本气流切变大于某一个临界值；另一个是垂直于线状扰动方向的基本气流切变。在此线性风速切变的情况下，斜交不稳定则为重力惯性内波的不稳定。对于基本气流具有非线性二阶切变的情形，此时斜交型不稳定中的扰动除了包含重力惯性内波之外，还包含了涡旋 Rossby 波。涡旋 Rossby 波产生的物理根源是基本流场的经向风速具有二次切变。

6 Q 矢量

自 1978 年 Hoskins 等提出 Q 矢量概念，其被广泛用于天气诊断分析及实际业务预报中。Hoskins (1978) 从准静力、准地转、绝热无摩擦、 f 平面的 p 坐标系中推导出了准地转 Q 矢量，其表达式为：

$$\begin{aligned} \mathbf{Q} = & (\mathbf{Q}_x, \mathbf{Q}_y) = \\ & \left(-\frac{\partial \mathbf{V}_g}{\partial x} \cdot \nabla \left(\frac{\partial \phi}{\partial P} \right), -\frac{\partial \mathbf{V}_g}{\partial y} \cdot \nabla \left(\frac{\partial \phi}{\partial P} \right) \right) = \\ & \left(-\frac{R}{P} \left(\frac{\partial u_g}{\partial x} \cdot \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial v_g}{\partial x} \cdot \frac{\partial T}{\partial y} \right), -\frac{R}{P} \left(\frac{\partial u_g}{\partial y} \cdot \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial v_g}{\partial y} \cdot \frac{\partial T}{\partial y} \right) \right), \end{aligned} \quad (24)$$

上式中利用了静力平衡关系和气体状态方程。由方程(24)可知, 仅用一层等压面的位势高度 ϕ 和温度 T 便可计算出该层的准地转 \mathbf{Q} 矢量。但过多的假设和简化限制了准地转 \mathbf{Q} 矢量在中尺度天气中的分析与应用。因而, 自准地转 \mathbf{Q} 矢量被提出之后, 气象工作者对其进行了一系列的改进。张兴旺(1999)从准静力、绝热无摩擦、 f 平面的 p 坐标系原始方程出发推导了非地转 \mathbf{Q} 矢量。非地转 \mathbf{Q} 矢量正式脱离了地转框架的限制而直接从原始方程出发进行推导计算, 因而可用于对尺度较小的天气系统的分析, 具有更广泛的实际意义。可以发现, 上述类型的 \mathbf{Q} 矢量都是在绝热无摩擦条件下推导而出。然而, 实际大气却并非如此。当有强烈对流天气如暴雨暴雪天气发生时, 大气中有强烈的凝结潜热释放, 显然, 大气此时是处于非绝热状态。为了能够更趋近真实大气, 张兴旺(1998), 姚秀萍和于玉斌(2000, 2001)和Yao et al.(2004)考虑大气中的水汽凝结潜热释放作用同时推导了非地转湿 \mathbf{Q} 矢量。接着, 针对真实大气非均匀饱和的事实, Yang et al.(2007)从 p 坐标系下的非均匀饱和热力学方程出发推导了非均匀饱和大气中的非地转湿 \mathbf{Q} 矢量。近五年, \mathbf{Q} 矢量研究又有了一些新的进展。针对计算非地转(湿) \mathbf{Q} 矢量时需要两层等压面这一事实, 岳彩军(2008, 2009), Yue and Shou(2008)和Yue(2009)利用地转风垂直切变代替非地转(湿) \mathbf{Q} 矢量中的实际风垂直切变得到一种修改的非地转 \mathbf{Q} 矢量:

$$\begin{aligned} \mathbf{Q}^{\#} = & (\mathbf{Q}_x^{\#}, \mathbf{Q}_y^{\#}) = \\ & \left(-\frac{R}{P} \left(\frac{\partial u}{\partial x} \cdot \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial x} \cdot \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial H}{\partial x}, \right. \\ & \left. -\frac{R}{P} \left(\frac{\partial u}{\partial y} \cdot \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \cdot \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial H}{\partial y} \right). \end{aligned} \quad (25)$$

考虑到 \mathbf{Q} 矢量散度在诊断垂直运动和天气分析方面的良好应用, Cao and Gao(2007)发展了“延伸的 \mathbf{Q} 矢量分析方法”, 探讨了 \mathbf{Q} 矢量旋度与大气场

本身的关系, 并发现 \mathbf{Q} 矢量旋度与非地转风垂直涡度直接相关。曹洁等(2008)进一步利用原有的风场分解技术将 \mathbf{Q} 矢量分解为散度分量和旋度分量并发现 \mathbf{Q} 矢量旋度能够在一定程度上弥补 \mathbf{Q} 矢量散度诊断降水时的不足, 因而具有一定的应用前景。这里指的一提的是考虑到 \mathbf{Q} 矢量对垂直运动的诊断仅是瞬时而无法对其演变做出预测, 陈忠明等(2009)从湿斜压原始方程出发, 将大气的斜压热力作用通过热力学方程引入散度方程, 推导出了以下包含湿地转 \mathbf{Q} 矢量和垂直风切变耦合强迫作用的新型散度方程:

$$\begin{aligned} \frac{\partial D}{\partial t} = & \left\{ -\Delta^2 E + \mathbf{k} \cdot [\nabla \times (f + \zeta) \mathbf{V}] \right\} + \\ & \left\{ \frac{1}{\sigma_m} \left(2\mathbf{Q}^* - f^2 \frac{\partial \mathbf{V}_a}{\partial p} \right) \cdot \frac{\partial \mathbf{V}}{\partial p} \right\} - \omega \frac{\partial D}{\partial p}. \end{aligned} \quad (26)$$

方程(26)将 \mathbf{Q} 矢量与散度演变联系起来, 为 \mathbf{Q} 矢量研究提供了一个新的视角。由方程(26)可以发现, 不仅质量场与风场之间的非平衡 $\{-\Delta^2 E + \mathbf{k} \cdot [\nabla \times (f + \zeta) \mathbf{V}]\}$ 能够使散度场发生剧烈变化, 而且斜压非地转作用与风垂直切变的耦合

$$\frac{1}{\sigma_m} \left(2\mathbf{Q}^* - f^2 \frac{\partial \mathbf{V}_a}{\partial p} \right) \cdot \frac{\partial \mathbf{V}}{\partial p}$$

对散度场的变化也起着强迫作用。

7 不变量

不变量又可称守恒量。在大气科学甚至整个物理学中, 不变量的研究始终都是具有实际意义的课题。不变量的重要意义在于其不依赖于坐标, 且能够追踪大气中空气块的移动。了解气块的移动方向对于天气预报具有非常重要的意义, 试想如果能够通过不变量了解气块的移动规律, 其在某一地区所引发的天气现象也自然明了。不变量分为整体不变量和质点不变量。大气动力学中最重要的两个质点不变量为位温和位涡。然而它们的守恒性是有条件的, 绝热条件位温守恒, 绝热无摩擦条件下位涡守恒。尽管如此, 这两个物理量在天气分析与预报中得到了广泛的应用, 尤其是位涡。例如利用位涡异常来追踪大气中扰动的发展演变、来解释地面气旋的发展过程、来诊断降水系统的结构特征和发展演变等。在 z 坐标系、 p 坐标系及 θ 坐标系中计算位涡都比较简单。然而当利用模式的输出资料计算位涡时, 需要首先将模式在地形追随坐标系下计算的输出量插值到 p 或 θ 坐标系中, 然后计算位涡。显

然, 地形追随坐标系向其他坐标系的转换存在插值误差, 这对位涡的计算精确度有重要影响。Cao and Xu (2012) 为解决这一问题推导了地形追随坐标系下的位涡守恒形式:

$$PV_\eta = -(g/\mu)(f\mathbf{k} + \nabla_\eta \times \mathbf{v}) \cdot \nabla_\eta \theta. \quad (27)$$

直接利用模式输出量在地形追随坐标系下计算的位涡比先将模式输出量插值到其他经典坐标系再进行计算的位涡准确度要高。尽管位涡在大气科学中的作用得到充分展现, 但位涡也是有缺陷的。由于滤去了与重力波相关的快流型, 因而不适合研究中小尺度天气; 其仅反映了位温梯度方向的涡度信息而忽略了可能对中小尺度系统发展有重要作用的非位温梯度方向的涡度信息。为此, 科学工作者也在拓宽位涡的研究视角, 寻找更多的包含更丰富物理信息的不变量(守恒量)研究更小尺度天气系统的演变并在此方面做了尝试。Gao et al. (2012) 在绝热无摩擦的动力框架下推导了广义 Ertel-Rossby 不变量(ERI)。从原始方程出发首先推导出如下广义涡度方程:

$$d_t [(\xi_g / \rho) \cdot \nabla \lambda] = (\xi_g / \rho) \cdot \nabla d_t \lambda, \quad (28)$$

其中, $\xi_g = \xi_a - \nabla \eta \times \nabla S$ 为广义涡度, η 为温度 T 的拉格朗日积分, λ 为任意参数。方程 (28) 的重要性在于提供了一种寻找不变量简单而有效的方式。对任意的物理量只要满足

$$\frac{d\lambda}{dt} = 0, \quad (29)$$

便可有

$$d_t [(\xi_g / \rho) \cdot \nabla \lambda] = 0. \quad (30)$$

因而可得到新的不变量:

$$P = (\xi_g / \rho) \cdot \nabla \lambda. \quad (31)$$

将位温代入方程 (30) 可得到传统的位涡 $PV = (\xi_a / \rho) \cdot \nabla \theta$ 。Gao et al. (2012) 利用 Clebsch 变换将速度场分解为速度初值、动量势积分的梯度和热力梯度量三项。并用速度初值代替方程 (30) 中的 $\nabla \lambda$ 从而得到了旋转坐标系中的广义 Ertel-Rossby 不变量:

$$GER = \xi_g \cdot V_g / \rho, \quad (32)$$

其中, $\xi_g = \xi_a - \nabla \eta \times \nabla S$ 为广义涡度, $V_g = \alpha \nabla \beta = V_a - \nabla \Phi - \eta \nabla S$ 为广义速度。广义 Ertel-Rossby 不变量其实可理解为一种广义的螺旋度。进一步, 若以我们已熟知的不变量位涡代替方程 (30) 中的 λ 则可

得到以下新的不变量:

$$SPV = (\xi_g / \rho) \cdot \nabla PV. \quad (33)$$

SPV 中因包含位涡梯度而被称为二阶位涡。两个新的不变量在追踪暴雨系统, 示踪台风, 指示大风区方面得到了应用。

8 总结

在过去几年, 关于中尺度动力学方面出现了许多新的成果。首先, 我们从中尺度系统的波动开始讨论, 包括重力波、台风中的波。对于重力波, 研究了在具有显著水平和垂直切变的急流中以及涡旋偶极子中重力波的产生及传播特性。另外, 在台风中的波中的新进展有: 涡旋 Rossby 波, 涡旋重力波和混合 Rossby 惯性重力波, 其中混合 Rossby 惯性重力波为研究 TC 中的螺旋雨带和眼壁提供了新的视角。关于波动, 推导出一个三维非地转非静力平衡的拟动量波动关系, 并将水汽作用考虑在内。

在涡度方面也取得了很大的进展, 尤其是青藏高原涡动和台风涡动方面。发现在青藏高原低涡中可能存在混合惯性重力涡旋 Rossby 波, 这与热带气旋中的涡动相似。关于台风, 包括对台风中的准平衡流的进一步研究, 以及对冷空气入侵的研究, 使得对台风的形成和发展有着更深刻的理解。最后, 提出一个调和-余弦展开方法对台风内部的风场进行研究, 将风场分解为无旋部分和无辐散部分。

锋面在我国是一个最重要的系统。近几年关于梅雨中的中 β 尺度双雨带进行了深入的模拟研究, 同时, 在广义位温的基础上提出了一个新的锋生函数, 这个函数能够更加准确的描述实际大气。另外, 通过对形变场的研究提出一个新的变量——形变参量。

关于稳定性的问题, 本文介绍了在考虑了水汽效应前提下, 采用 Energy-Casimir 方法建立了三维非地转平衡和非静力平衡的拟能量波作用方程, 讨论了层结稳定大气内中尺度扰动系统的稳定性问题。以及通过波谱和波函数方法, 研究了在基本气流具有线性切变和非线性切变时的横波型扰动的不稳定。

在 \mathbf{Q} 矢量方面, 从准地转 \mathbf{Q} 矢量、半地转 \mathbf{Q} 矢量、非地转 \mathbf{Q} 矢量到非地转湿 \mathbf{Q} 矢量的一步步发展, 使人们对真实大气的了解越来越深入。在此基础上, 推导出了非均匀饱和大气的非地转湿 \mathbf{Q} 矢量, 在饱

和湿 \mathbf{Q} 矢量和垂直风切变耦合强迫作用下的新型散度方程并进一步探讨了 \mathbf{Q} 矢量旋度这一物理量。

最后, 总结了大气中两个质点不变量位温和位涡的发展和应用。为解决插值误差问题推导出的地形追随坐标系下的位涡守恒形式以及在绝热无摩擦的动力框架下推导的广义 Ertel-Rossby 不变量。

近几年, 关于中尺度动力学的研究进展层出不穷, 由于自身水平所限, 在这里仅回顾了部分学者的相关研究成果, 而对于该领域所涉及的全部内容恐难一一详述, 若读者希望对本文中所涵盖的具体内容或相关问题取得更为深入的了解, 可搜集并阅读其他相关文献。

参考文献 (References)

- 安洁, 张铭. 2009. 垂直切变基流中的非平衡不稳定性 [J]. 热带气象学报, 25 (1): 48–58. An Jie, Zhang Ming. 2009. Non-equilibrium instability in vertical shear flow [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 25 (1): 48–58.
- 安洁, 蔡增亮, 张铭, 等. 2010. 非线性垂直切变基流中横波型扰动的不稳定 [J]. 热带气象学报, 26 (4): 438–444. An Jie, Zang Zengliang, Zhang Ming, et al. 2010. Instability of transversal wave disturbance of nonlinear vertical shear flow [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 26 (4): 438–444.
- Cao J, Gao S T. 2007. Extended interpretations in \mathbf{Q} vector analyses and applications in a torrential rain event [J]. Geophys. Res. Lett., 34: L15804.
- 曹洁, 高守亭, 周玉淑. 2008. 从流场分解角度改进 \mathbf{Q} 矢量分析方法及在暴雨动力识别中的应用 [J]. 物理学报, 57 (4): 2600–2606. Cao Jie, Gao Shouting, Zhou Yushu. 2008. Improved \mathbf{Q} vector analyses from the perspective of field separation and its application in a torrential rain event [J]. Acta Physica Sinica (in Chinese), 57 (4): 2600–2606.
- Cao J, Xu Q. 2012. Computing hydrostatic potential vorticity in terrain-following coordinates [J]. Mon. Wea. Rev., 139: 2955–2961.
- Chen G, Li G P. 2010. The analyses of wave and eye region in Tibetan Plateau vortex [J]. Plateau and Mountain Meteorology Research, 30 (1): 6–11.
- Chen Q S, Kuo Y H. 1992a. A consistency condition for wind-field reconstruction in a limited area and a Harmonic-Cosine series expansion [J]. Mon. Wea. Rev., 120: 2653–2670.
- Chen Q S, Kuo Y H. 1992b. A Harmonic-Sine series expansion and its application to partitioning and reconstruction problems in a limited area [J]. Mon. Wea. Rev., 120: 91–112.
- 陈忠明, 杨康权, 伍红雨. 2009. 湿斜压热动力耦合强迫激发辐合增长和暴雨维持的一种机制 [J]. 物理学报, 58: 4362–4371. Chen Zhongming, Yang Kangquan, Wu Hongyu. 2009. Mechanism of heavy rainfall maintenance and increment in convergence excited by coupling forces between dynamic and thermodynamic fields [J]. Acta Physica Sinica (in Chinese), 58: 4362–4371.
- Gao S T, Ran L. 2009. Diagnosis of wave activity in a heavy rainfall event [J]. J. Geophys. Res., 114 (D8): D08119.
- Gao S T, Wang X R, Zhou Y S. 2004. Generation of generalized moist potential vorticity in a frictionless and moist adiabatic flow [J]. Geophys. Res. Lett., 31 (12): L12113.
- Gao S T, Yang S, Xue M, et al. 2008. Total deformation and its role in heavy precipitation events associated with deformation-dominant flow patterns [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 25 (1): 11–23.
- Gao S T, Xu P, Ran L, et al. 2012. On the generalized Ertel-Rossby invariant [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 29: 690–694.
- 韩英, 伍荣生. 2008. 冷空气入侵对热带气旋发生发展的影响 [J]. 地球物理学报, 51 (5): 1321–1332. Han Ying, Wu Rongsheng. 2008. The effect of cold air intrusion on the development of tropical cyclone [J]. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 51 (5): 1321–1332.
- Hao S F, Pan J S, Yue C J, et al. 2010. A dynamical interpretation of the wind field in tropical cyclones with the consideration of orographic factors [J]. Journal of Tropical Meteorology, 16 (2): 125–133.
- Hoskins B J, Dagbici I, Darics H C. 1978. A new look at the ω equation [J]. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 104 (439): 31–38.
- 黄楚惠, 李国平. 2009. 基于螺旋度和非地转湿 \mathbf{Q} 矢量的一次东移高原低涡强降水过程分析 [J]. 高原气象, 28 (2): 319–326. Huang Chuhui, Li Guoping. 2009. A case study of plateau vortex moving eastward with heavy rainfalls based on helicity and nongeostrophic wet \mathbf{Q} -vector [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 28 (2): 319–326.
- 黄泓, 张铭. 2008. 热带气旋螺旋云带动力不稳定的性质 [J]. 气象学报, 66 (1): 81–89. Huang Hong, Zhang Ming. 2008. Unstable dynamical properties of spiral bands in tropical cyclones [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 66 (1): 81–89.
- 李英, 陈联寿, 钱传海, 等. 2010. 登陆台风 Rananim (0414) 环流内中尺度辐合线的形成和发展研究 [J]. 气象学报, 68 (5): 640–651. Li Ying, Chen Lianshou, Qian Chuanhai, et al. 2010. Statistical downscaling of pattern projection using multi-model output variables as predictors [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 68 (5): 640–651.
- 刘晓冉, 李国平. 2007. 热力强迫的非线性奇异惯性重力内波与高原低涡的联系 [J]. 高原气象, 26 (2): 225–231. Liu Xiaoran, Li Guoping. 2007. Nonlinear singular inertial gravitational wave forced by diabatic heating and its association with the Tibetan Plateau vortex [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 26 (2): 225–231.
- Lu H, Gao S, Tan Z, et al. 2007. The major research advances of mesoscale weather dynamics in China since 2003 [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 24 (6): 1049–1059.
- Petterssen S. 1956. Weather Analysis and Forecasting [M]. Academic Press, 428pp.
- Qiu X, Tan Z M, Xiao Q N. 2010. The roles of vortex Rossby waves in hurricane secondary eyewall formation [J]. Mon. Wea. Rev., 138: 2092–2109.
- 冉令坤, 楚艳丽, 高守亭. 2009. Energy-Casimir 方法在中尺度扰动稳定性研究中的应用 [J]. 气象学报, 67 (4): 530–539. Ran Lingkun, Chu Yanli, Gao Shouting. 2009. Application of Energy-Casimir method to the study of mesoscale disturbance stability [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 67 (4): 530–539.
- Ran L, Gao S. 2007. A three-dimensional wave-activity relation for pseudomomentum [J]. J. Atmos. Sci., 64: 2126–2134.
- Ran L, Yang W, Hong Y. 2009. Deformation of moisture flux circulation

- surrounding the landfall typhoon “BILIS” [J]. *Journal of Tropical Meteorology*, 15: 167–180.
- Scinocca J F, Shepherd T G. 1992. Nonlinear wave-activity conservation laws and Hamiltonian structure for the two-dimensional anelastic equations [J]. *J. Atmos. Sci.*, 49 (1): 5–28.
- 沈新勇, 明杰, 方珂. 2007a. 台风涡旋系统的波动性质及其数值模拟 [J]. *气象科学*, 27 (2): 176–186. Shen Xinyong, Ming Jie, Fang Ke. 2007. The proper ties of wave in typhoon and its numerical simulation [J]. *Scientia Meteorologica Sinica* (in Chinese), 27 (2): 176–186.
- 沈新勇, 倪允琪, 丁一汇, 等. 2007b. 中尺度斜压不稳定的波动性质及其数值模拟 [J]. *气象学报*, 65 (6): 825–835. Shen Xinyong, Ni Yunqi, Ding Yhui, et al. 2007. Wave properties of mesoscale obliquely crossing instability and its numerical simulation [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 65 (6): 825–835.
- Snyder C, Muraki D J, Plougonven R, et al. 2007. Inertia-gravity waves generated within a dipole vortex [J]. *J. Atmos. Sci.*, 64: 4417–4431.
- Viúdez A. 2007. The origin of the stationary frontal wave packet spontaneously generated in rotating stratified vortex dipoles [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 593: 359–383.
- Wang C M, Wang Y, Wu R S. 2007. The dynamical analysis of the structure of β meso-scale double rainbands in Meiyu front [J]. *Journal of Tropical Meteorology*, 13 (2): 120–131.
- Wang S G, Zhang F Q. 2010. Source of gravity waves within a vortex-dipole jet revealed by a linear model [J]. *J. Atmos. Sci.*, 67: 1438–1455.
- Wang S G, Zhang F Q, Chris S. 2009. Generation and propagation of inertia-gravity waves from vortex dipoles and jets [J]. *J. Atmos. Sci.*, 66: 1294–1314.
- Yang S, Gao S T, Wang D H. 2007. Diagnostic analyses of the ageostrophic Q vector in the non-uniformly saturated, frictionless, and moist adiabatic flow [J]. *J. Geophys. Res.*, 112 (D09114): 1–9.
- 姚秀萍, 于玉斌. 2000. 非地转湿 Q 矢量及其在华北特大暴雨中的应用 [J]. *气象学报*, 58 (4): 436–446. Yao Xiuping, Yu Yubin. 2000. Non-geostrophic wet Q -vector analysis and its application to typhoon torrential rain [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 58 (4): 436–446.
- 姚秀萍, 于玉斌. 2001. 完全 Q 矢量的引入及其诊断分析 [J]. *高原气象*, 20 (2): 208–213. Yao Xiuping, Yu Yubin. 2001. Perfect Q -vector and its diagnoses [J]. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 20 (2): 208–213.
- Yao X P, Yu Y B, Shou S W. 2004. Diagnostic analyses and application of the moist ageostrophic vector Q [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 21 (1): 96–102.
- 岳彩军. 2008. 梅雨锋气旋暴雨的 Q 矢量分析: 个例研究 [J]. *气象学报*, 66 (1): 35–49. Yue Caijun. 2008. The Q vector analysis of the heavy rainfall from Meiyu front cyclone: A case study [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 66 (1): 35–49.
- 岳彩军. 2009. “海棠”台风 (2005) 结构对其降水影响的 Q 矢量分解研究 [J]. *高原气象*, 286: 1348–1364. Yue Caijun. 2009. Q vector partitioning study on effects of typhoon structures on precipitation associated with Typhoon Haitang (2005) [J]. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 286: 1348–1364.
- Yue C J. 2009. The Q vector analysis of the heavy rainfall from Meiyu front cyclone: A case study [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 66 (1): 3–7.
- Yue C J, Shou S. 2008. A modified moist ageostrophic Q vector [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 25 (6): 1053–1061.
- 张兴旺. 1998. 湿 Q 矢量表达式及其应用 [J]. *气象*, 24 (8): 3–7. Zhang Xingwang. 1998. An expression of the wet Q -vector and application [J]. *Meteorological Monthly* (in Chinese), 24 (8): 3–7.
- 张兴旺. 1999. 修改的 Q 矢量表达式及其应用 [J]. *热带气象学报*, 15 (2): 162–167. Zhang Xingwang. 1999. The expression of the modified Q vector and its application [J]. *Journal of Tropical Meteorology* (in Chinese), 15 (2): 162–167.
- Zhang J, Tan Z M. 2009. A simulation study of the mesoscale convective systems associated with a Meiyu frontal heavy rain event [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 23 (4): 438–454.
- 赵南, 甘璐, 沈新勇. 2010. 涡旋流自发辐射惯性重力波的初步解析研究 [J]. *应用气象学报*, 21: 83–88. Zhao Nan, Gan Lu, Shen Xinyong. 2010. A preliminary analytical study on the spontaneous emission of inertia-gravity waves from vertical flows [J]. *Journal of Applied Meteorological Science* (in Chinese), 21: 83–88.
- 钟玮, 陆汉城, 张大林. 2008. 非对称型强飓风中的准平衡流特征分析 [J]. *地球物理学报*, 51 (3): 657–667. Zhong Wei, Lu Hancheng, Zhang Dalin. 2008. The diagnoses of quasi-balanced flows in asymmetric intense hurricane [J]. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 51 (3): 657–667.
- Zhong W, Zhang D L, Lu H C. 2009. A theory for mixed vortex Rossby-gravity waves in tropical cyclones [J]. *J. Atmos. Sci.*, 66: 3366–3381.
- Zhong W, Lu H C, Zhang D L. 2010. Mesoscale barotropic instability of vortex Rossby waves in tropical cyclones [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 27 (2): 243–252.
- 周玉淑, 曹洁. 2010. 有限区域风场的分解和重建 [J]. *物理学报*, 59 (4): 2898–2906. Zhou Yushu, Cao Jie. 2010. Partitioning and reconstruction problem of the wind in a limited region [J]. *Acta Physica Sinica* (in Chinese), 59 (4): 2898–2906.
- 周玉淑, 曹洁, 高守亭. 2008. 有限区域风场分解方法及其在台风 SAOMEI 研究中的应用 [J]. *物理学报*, 57 (10): 6654–6665. Zhou Yushu, Cao Jie, Gao Shouting. 2008. The method of decomposing wind field in a limited area and its application to typhoon SAOMEI [J]. *Acta Physica Sinica* (in Chinese), 57 (10): 6654–6665.