

费建芳,李波,黄小刚,等. 2011. 位涡反演理论在台风领域中的应用研究进展[J]. 大气科学学报, 34(5): 621-626.

Fei Jian-fang, Li Bo, Huang Xiao-gang, et al. 2011. Advances in application of potential vorticity inversion theory in typhoon research[J]. Trans Atmos Sci, 34(5): 621-626.

位涡反演理论在台风领域中的应用研究进展

费建芳¹, 李波¹, 黄小刚¹, 郎丰旺¹, 宋平²

(1. 解放军理工大学 气象学院, 江苏 南京 211101; 2. 南京信息工程大学, 江苏 南京 210044)

摘要: 位涡作为一个综合反映流体动力学和热力学性质的物理量, 受到气象学者的广泛关注, 位涡反演理论逐渐成为台风研究的重要方法之一。在简要回顾近几十年来位涡反演理论研究进展的基础上, 综述了位涡反演理论在台风领域中的应用进展情况, 讨论了位涡反演理论应用时可能存在的问题, 即位涡平均态求取、近地面摩擦作用以及位涡反演平衡条件等都可能影响反演效果, 并对位涡反演理论的应用前景作了展望。

关键词: 位涡反演; 片段位涡反演; 台风

中图分类号: P433 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-7097(2011)05-0621-06

Advances in application of potential vorticity inversion theory in typhoon research

FEI Jian-fang¹, LI Bo¹, HUANG Xiao-gang¹, LANG Feng-wang¹, SONG Ping²

(1. Institute of Meteorology, PLA University of Science & Technology, Nanjing 211101, China;

2. Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: As a physical quantity comprehensively describing the properties of fluid dynamic and thermodynamic, the potential vorticity receives widespread attention of meteorologists. Potential vorticity inversion theory has become one of the most important methods in typhoon research. In this paper, the advancement about the research of potential vorticity inversion theory in recent decades is briefly reviewed. The advancement about the application of potential vorticity inversion theory in typhoon research is summarized. We also discuss the possible problems relating to potential vorticity inversion theory. The methods for calculating the average potential vorticity state, the role of surface friction and the condition for balance may affect the inversion. Finally, some possible applications of potential vorticity inversion theory are predicted.

Key words: potential vorticity inversion; piecewise potential vorticity inversion; typhoon

0 引言

台风研究一直是大气科学研究领域的热点和重点。过去几十年国内外气象学者连续不断地开展了台风的研究工作, 在观测、动力学理论、数值模拟和预报方法等方面都取得了丰硕的研究成果。但是由于关键性观测资料的缺乏以及台风突变的物理机制

尚未清楚, 异常台风的预报能力依然很低, 不少问题有待深入研究(陈联寿等, 2002)。近几十年来, 位涡作为一个综合反映流体动力学和热力学性质的物理量, 倍受气象学者的关注, 位涡反演理论也由此引入到台风研究中, 并得到广泛应用。本文在简要回顾近几十年来位涡反演理论研究进展的基础上, 综述了位涡反演理论在台风领域中的应用进展情况,

收稿日期: 2010-12-11; 改回日期: 2011-06-08

基金项目: 国家公益性行业(气象)科研专项(GYHY(QX)201106004); 国家重点基础研究发展计划项目(2009CB421502)

作者简介: 费建芳(1962—), 男, 浙江桐乡人, 博士, 教授, 研究方向为中尺度气象学, feijf@sina.com.

并讨论了位涡反演理论可能存在的问题以及应用前景, 以为台风研究提供一些有益的思考。

1 位涡反演理论的研究进展

1.1 位涡及位涡反演

位涡具有守恒及反演的性质。守恒性是指在绝热、无摩擦条件下, 流体所具有的位涡在运动过程中始终保持不变; 反演性是指在某种平衡条件下, 给定位涡的分布及其变化, 就可以反演诊断其他物理量。

早在 20 世纪 40 年代, Rossby (1940) 和 Ertel (1942) 就提出了位涡的概念, 并证明在绝热无摩擦的干空气中, 位涡具有严格守恒的特性。然而当时研究主要偏重于把位涡作为拉格朗日示踪物来研究它在大气中的分布, 人们并没有意识到位涡这个概念会包含许多深刻的动力学内涵。直到 50 年代, Kleinschmidt (1957) 用观测到的对流层上层位涡异常来解释气旋的产生, 并提出了位涡反演理论, 但令人遗憾的是由于他的理论过于超前, 并没有引起人们的重视。

Hoskins et al. (1985) 首次从理论上全面、清晰地阐述了位涡反演理论, 并运用该理论对切断低压、阻塞高压的结构、起源及维持, Rossby 波的传播, 斜压和正压不稳定机制等基本动力学问题一一给出了清晰而简洁的物理图像, 提出进行位涡反演必须具备 3 个基本条件: 1) 指定某种平衡条件; 2) 指定某种参考状态来描述位涡的质量分布; 3) 在适当边界条件下, 在整个研究区域求解反演问题。

在满足上述 3 个条件时, 若给定位涡质量分布, 就能导出相应的风、压和温度场。

自从 Hoskins et al. (1985) 提出位涡反演理论之后, 人们逐渐关注到位涡所蕴藏的丰富动力学内涵, 等熵位涡分析法成为研究大气动力学过程一个非常有用的方法。但在 20 世纪 80 年代及之前, 位涡反演局限在准地转平衡假设下, 这限制了有关理论在强旋转性天气尺度系统研究中的应用。

1.2 片段位涡反演的研究进展

Davis and Emanuel (1991) 指出片段位涡反演是比位涡反演方法更重要的应用, 片段位涡反演方法是利用位涡守恒性分离出主要由非守恒过程引起的位涡异常, 借助片段反演方法可以诊断出各自对风、压场的贡献, 从而推断出某些现象产生的原因和本质特征。

Davis and Emanuel (1991) 采用静力稳定及旋转风近似实际风的假设, 利用非线性平衡关系 (Char-

ney, 1955), 发展了 Ertel 位涡反演技术与片段位涡反演方法, 并成功地将其应用于气旋生成动力过程的探讨。Davis (1992a, 1992b) 同样利用片段位涡反演方法, 探讨潜热释放对温带旋生的影响。至此, 位涡反演的概念能有效应用于高曲率 (即 Rossby 数大于 1) 的温带气旋系统。但是, 此时的 Ertel 位涡并不包含水汽, 而在台风的整个生命史中水汽的作用很重要, 因此, 在台风领域中的应用仍不够精确。

Wang and Zhang (2003) 在台风研究中使用包含水汽和摩擦力的位涡方程, 将台风流场分为轴对称的基本场及非对称的扰动场, 将非线性平衡方程加入系数 ε , 使之满足椭圆条件, 发展出虚高坐标下的 Ertel 位涡反演法。如此调整 ε 的数值, 能使迭代过程容易收敛求解。此方法可以减少许多位涡反演法的假设和限制, 且可反演出高解析的三维平衡流场。

甘璐 (2009) 通过提高平衡方程对平衡流的刻画, 发展并改进了一种高阶位涡反演算子。通过理想化试验说明了该反演算子存在的合理性, 以一次低涡东移引发的大范围降水事件展示了该反演算子的具体应用, 并与满足非线性平衡方程的片段位涡反演算子进行比较, 探讨了该反演算子的优越性。

1.3 片段位涡反演原理及技术实现

根据 Davis and Emanuel (1991)、Wang and Zhang (2003) 发展的片段位涡反演的原理, 在台风研究中片段位涡反演技术实现的具体步骤大致可以概括为: 1) 求取平均场, 即依据平均态求取方法 (时间平均 (Wu and Emanuel, 1995a, 1995b; 宋辉, 2010)、全球纬向平均 (季亮, 2007; 季亮和费建芳, 2009a, 2009b; 季亮等, 2010) 或轴对称平均 (Shapiro and Franklin, 1995; Shapiro, 1996)) 求取流函数和重力位势的平均, 利用 Ertel 位涡的近似定义式求取位涡的平均, 保留设定区域范围内的分布, 即得到平均场; 2) 求取总扰动场, 即将设定时刻的瞬时重力位势场、流函数场以及位涡场与平均场相减, 即得到总扰动场; 3) 分离特定扰动场, 即对照位势高度场上台风周围特定系统的水平和垂直分布范围, 在总扰动场中分离与特定系统相对应的位涡扰动; 4) 求取平衡场, 即对选定的位涡扰动进行反演, 求得与其对应的空间三维分布的重力位势和流函数, 进而诊断出与选定的位涡扰动相对应的风场和温度场; 5) 具体应用, 即结合天气分析方法或者数值模式, 将片段位涡反演得到的平衡场应用到台风特定问题的研究中。

2 位涡反演理论在台风领域中的应用进展

自 Davis and Emanuel(1991) 提出片段位涡反演方法后,位涡反演理论逐渐被广泛地应用于台风领域的许多方面,有效促进了台风领域的研究发展。总的来说,位涡反演技术在台风领域中的应用主要可分为两部分。

第一部分 结合天气分析方法,定义深层平均风作为主导台风运动的引导气流,将片段位涡反演得到的伴随特定位涡扰动的三维无辐散风场进行计算,分别求出台风周围各个天气系统影响台风运动的引导气流分量,通过对各引导气流分量与实际引导气流的定量比较,进而探讨各系统在台风运动中所扮演的角色,从而加深对台风运动特别是异常运动的理解和把握。这部分的应用主要体现在台风运动的研究上。

第二部分 结合数值模式,将利用片段位涡反演技术反演得到的对应个别位涡扰动的平衡风场和温度场叠加到模式初始场上,改变特定天气系统强度和位置,进行数值模拟,从而深入探讨特定天气系统对台风的影响和作用。这部分在台风变性问题和台风初始化研究中应用较多。

下文对位涡反演理论在台风领域中的应用进展作一概述。

2.1 台风运动

台风运动主要是环境引导气流与台风环流相互作用及其效应的综合结果。环境引导气流可以分解为两部分:一是大尺度基本气流;二是天气尺度环流系统与台风靠近时,发生与台风的相互作用,从而影响台风的运动(陈联寿等,2002)。

Wu and Emanuel(1995a,1995b) 首先以位涡观点探讨台风引导气流。他们使用美国国家气象中心 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 全球分析数据,利用位涡反演诊断方法,分别定量评估了飓风 Bob(1991)、Andrew(1992) 以及热带风暴 Ana(1991) 运动过程中大尺度环境气流的控制作用。经对比验证,由除去飓风本身位涡异常之后的全场位涡扰动反演计算得到的平衡引导流可以近似飓风的实际运动。同时还发现,台风有朝周围高层负位涡扰动的最大区域移动的趋势。Shapiro and Franklin(1995)、Shapiro(1996) 以轴对称平均的位涡作为基本场,利用位涡反演方法,诊断 Gloria 飓风(1985) 的引导气流,发现 Gloria 的运动主要受控于 500 hPa 以上、距飓风中心 1 000 km 以

内之局部位涡扰动,而获得与 Wu and Emanuel(1995a,1995b) 一致的结论。Wu and Kurihara(1996) 通过飓风 Bob 模式输出的资料,探讨了飓风和环境场的相互作用。

Wu et al.(2004) 利用位涡反演方法诊断了台风 Sinlaku(2002) 运动过程中速度减缓的影响因子,同时评估了模式未能预报出台风 Sinlaku 速度减缓以及临近台湾时路径南折的具体原因。研究指出,台风速度减缓主要与中纬度槽加强导致的副热带高压减弱东退有关;而台风周围 4 个天气系统(大陆高压、中纬度槽、副高以及高空冷低压) 之间的微妙相互作用是导致模式预报南折路径失败的主要原因。Wu et al.(2009) 研究了台风 Shanshan(2006) 与中纬度槽的相互作用。

双台风效应是导致台风运动异常的重要原因之一。Wu et al.(2003) 利用位涡反演方法,以轴对称平均的位涡为基本场(Shapiro and Franklin,1995; Shapiro,1996),定量诊断分析 2000 年台风 Bopha 的异常南折。结果发现,台风 Saomei 的存在是台风 Bopha 异常南折的最主要原因,而台风 Bopha 对台风 Saomei 的作用很小,整个过程属于单向双台风作用。

Yang et al.(2008) 利用位涡反演和数值模拟相结合的方法,研究台风 Fengshen(2002) 和 Fungwong(2002) 的相互作用。结果表明,在双台风相互作用之前,两者的运动受大尺度环境气流的主导;在双台风相互作用的早期,属于单向双台风作用,即由对应台风 Fengshen 的位涡扰动反演计算得到的引导气流分量对台风 Fungwong 的打转起到一定作用,而台风 Fungwong 对台风 Fengshen 几乎没有影响;在双台风作用的后期,逐渐演变双向双台风作用,即台风 Fengshen 和 Fungwong 通过各自环流互相施加影响。研究还发现,通过不同大小、不同强度的初始台风涡旋的敏感性试验证实,初始台风涡旋的较好近似是双台风相互作用预报成功的重要保证。

2.2 台风变性问题

台风变性过程涉及到台风低压系统与西风带斜压环境场之间的相互作用,其演变发展的机理十分复杂。McTaggart-Cowan et al.(2001) 选取飓风 Earl(1998) 为研究对象,对其变性过程进行分析。选取代表不同物理过程的位涡扰动,利用位涡反演的方法得到相应的平衡场,之后通过数值模拟的方法改变初始场,检验台风的变性和加强对哪一个位

涡扰动最为敏感。

季亮(2007)选取 Winnie(1997)和 Matsa(2005)台风作为研究个例,利用 Davis and Emanuel(1991)、Davis(1992a,1992b)提出的片段位涡反演的方法,分别改变模式初始时刻的高空槽和副高强度,采用与控制试验相同的模式参数进行数值模拟,分析高空槽和副高这两个重要环流系统对登陆台风强度和结构变化的影响。模拟结果发现:高空槽的强度、结构与登陆台风的移向移速以及变性后的发展密切相关,副热带高压的加强(减弱)能够加快(推迟)登陆台风的变性,激发强烈(较弱)的对流层中高层锋生。

肖坤(2009)采用基于 Ertel 位涡反演诊断和锋生函数诊断的锋生位涡反演诊断方法,对一次发生在西太平洋上的台风变性过程进行了详细的诊断分析和机制研究。宋辉(2010)采用位涡反演技术和数值模拟相结合的方法,通过初值敏感性试验和物理量场的诊断分析,对不同天气系统之间的相互作用以及台风变性后再度增强的物理机制进行了深入研究。

2.3 台风初始化

长期以来,台风数值预报的初始化问题(如何在初始场中尽量准确地描述台风的中心强度和位置以及台风的结构特征)是进一步提高台风数值预报准确率的关键所在。宋辉(2010)提出了一个基于位涡反演的台风初始化方案,该方案既能使初始场中的台风中心位置和强度与 CMA-STI 热带气旋最佳路径数据集中的记录相吻合,又能维持变性台风的结构特征(斜压性和不对称性)不致遭到破坏,同时还能保证初始场中各要素之间的协调一致性。当然其初始化方案只针对一个个例进行了应用,是否具有普遍应用性还有待验证。

2.4 台风发生发展机制

除了应用于台风运动、台风变性问题和台风初始化研究中,位涡反演理论还在台风研究的其他领域得到了应用。Wu and Kurihara(1996)利用位涡收支的计算与位涡反演的方法,研究凝结潜热在飓风 Bob 发展过程中所扮演的角色。研究指出:台风内部的凝结潜热释放使得位涡重新分配,最终的净效应导致台风周围的高层负位涡异常增大,进而促进台风的发展。Zhang and Kieu(2006)将片段位涡反演方法和准平衡 ω 方程应用于飓风 Andrew(1992)的数值模拟研究中,分别讨论了潜热释放、摩擦力以及干动力过程台风次级环流的影响和贡

献,进而研究了台风能够在不利的垂直切变条件下增强以及台风眼暖中心形成的原因。

Kieu and Zhang(2010)在 Wang and Zhang(2003)的基础上,发展了一种新的片段位涡反演算法,并应用此方法研究了台风内部各种不同形式、不同大小的轴对称位涡异常对台风结构以及强度可能产生的影响和作用。

3 位涡反演应用可能存在的问题及前景展望

3.1 可能存在的问题

综上所述,位涡反演理论发展到今天,因其完备性和合理性,已成为台风系统诊断分析和数值模拟初值敏感性试验的重要工具,但是位涡反演技术应用于具体问题时还存在很多问题需要继续研究。

1) 进行片段位涡反演时,如何定义位涡平均态,即参考场?不同的平均态分离出的位涡异常区也会不同,分离的位涡异常区不唯一,将有可能降低动力学诊断结论的可信度。目前常用的求取平均态方法主要有前述提到的 3 种。时间平均方法(Wu and Emanuel,1995a,1995b;宋辉,2010)简单实用,但不能完全将台风本身与扰动场分离开,以此探讨台风运动路径时,可能增加讨论的复杂度;全球纬向平均方法(季亮 2007;季亮和费建芳 2009a,2009b;季亮等 2010)随时间变化小,但有时对于特定个例中的特定研究系统(比如大陆高压)不能很好地描述;轴对称平均方法(Shapiro and Franklin,1995;Shapiro,1996)目前在台风研究中最常用,可以清楚地了解环境扰动场与台风之间的相互作用,但计算相对复杂,且有时在求取轴对称平均的过程中产生强扰动。总的来说,在实际研究时,可以将 3 种方法求取的平均态进行比较,视所处理的具体问题确定最优方法,进而尽可能地保证可信度;同时可以考虑对求取平均态方法进行改进和发展。

2) 对于近地面层的位涡异常,摩擦要起作用,如何考虑这部分对位涡反演的影响?早些时候用于研究的位涡方程并不包含水汽和摩擦力,后来 Wang and Zhang(2003)根据台风研究的实际需要,在位涡方程中考虑了水汽和摩擦。但是这样在使得研究本身更符合实际的同时也带来了问题,片段位涡反演对于边界条件比较敏感,而考虑的摩擦力作用于下边界,容易导致下边界附近的反演误差增大,进而影响反演效果。

3) 在进行模式敏感性试验的过程中,如何保证

合理改变特定天气系统的同时,不影响周围其他的系统?实际上在模式初始场中改变特定天气系统的同时往往会影响到周围其他系统,进而影响特定天气系统对台风的影响和作用的准确性(可能包含周围其他系统对台风的影响和作用)。

4) 位涡反演对于平衡条件非常依赖,目前被引用最多的是 Charney 平衡条件(Charney, 1955),但非线性片段位涡反演存在不确定性,因此平衡理论的研究有待进一步加强。

3.2 应用前景展望

尽管在应用中可能存在一些问题,但是可以肯定的是位涡反演理论不仅将继续在台风研究中扮演重要的角色,而且会在更广泛的应用中不断完善,进而更好地推动台风研究,具体可以表现为以下3点:

1) 引入新的平衡条件,改进和发展位涡反演技术,可以对台风的生成、发展机制以及锋面内次级环流等动力学过程进行更深入研究,比如利用片段位涡反演方法分析台风的流场,进而更好地了解台风的内部结构;

2) 运用片段位涡反演方法,可以得到改变了特定天气系统强度和位置的协调稳定的动力场,这样便可以合理构造多个模式初始场,为形成台风的集合预报初始场扰动提供一种新的思路和方法;

3) 利用位涡反演技术的合理性和协调性,发展完善基于位涡反演的台风初始化方案,为初始化方案的合理构造提供新的视角和方法。

自20世纪80年代以来,国内关于位涡的研究主要集中在将位涡作为一个诊断量用于对暴雨、气旋以及其他天气系统的诊断上(王永生和杨大升, 1984; 侯定臣, 1991; 吴国雄等, 1995; 王建中等, 1996; 于玉斌和姚秀萍, 2000; 高守亭和崔春光, 2007; 王巍巍等, 2007; 黄亿等, 2009; 朱健和罗律, 2009; 丁治英等, 2010a, 2010b; 沈桐立等, 2010),位涡反演理论具体的应用研究工作总体还开展得较少(周毅, 1998a, 1998b, 1998c; 张述文和王式功, 2001; 胡伯威, 2003; 寿绍文, 2010)。我国是频繁遭受台风灾害的国家,加深对异常台风机理的研究和理解,进而提高预报准确率,减少灾害损失是当务之急。因此更深入地进行位涡反演技术研究并加以有效运用是完全有必要的。

参考文献:

陈联寿,徐祥德,罗哲贤. 2002. 热带气旋动力学引论[M]. 北京:气象出版社:1-37.

- 丁治英,王慧,沈新勇,等. 2010a. 一次梅雨期暴雨与中层锋生、 β 中尺度小高压的关系[J]. 大气科学学报, 33(2): 142-152.
- 丁治英,罗静,沈新勇. 2010b. 2008年6月20—21日一次 β 中尺度切变线、低涡降水机制研究[J]. 大气科学学报, 33(6): 657-666.
- 甘璐. 2009. 位涡反演的理论、算法及应用研究[D]. 北京:中国气象科学研究院.
- 高守亭,崔春光. 2007. 广义湿位涡理论及其应用研究[J]. 暴雨灾害, 26(1): 3-8.
- 侯定臣. 1991. 夏季江淮气旋的 Ertel 位涡诊断分析[J]. 气象学报, 49(2): 141-150.
- 胡伯威. 2003. 关于位涡理论及其应用的几点看法[J]. 南京气象学院学报, 26(1): 111-115.
- 黄亿,寿绍文,傅灵艳,等. 2009. 对一次台风暴雨的位涡与湿位涡诊断分析[J]. 气象, 35(1): 65-73.
- 季亮. 2007. 中纬度和副热带环流系统对登陆热带气旋影响的数值模拟研究[D]. 南京:解放军理工大学气象学院.
- 季亮,费建芳. 2009a. 登陆台风等熵面位涡演变的数值模拟研究[J]. 气象, 35(3): 66-72.
- 季亮,费建芳. 2009b. 副热带高压对登陆台风等熵面位涡演变影响的数值模拟研究[J]. 大气科学, 33(6): 1297-1308.
- 季亮,费建芳,黄小刚. 2010. 副热带高压对登陆台风影响的数值模拟研究[J]. 气象学报, 68(1): 40-47.
- 沈桐立,曾瑾瑜,朱伟军,等. 2010. 2006年6月6—7日福建特大暴雨数值模拟和诊断分析[J]. 大气科学学报, 33(1): 14-24.
- 寿绍文. 2010. 位涡理论及其应用[J]. 气象, 36(3): 9-18.
- 宋辉. 2010. 台风变性再增强过程的敏感性试验与机制分析[D]. 南京:解放军理工大学气象学院.
- 王建中,马淑芬,丁一汇,等. 1996. 位涡在暴雨成因分析中的应用[J]. 应用气象学报, 7(1): 19-27.
- 王巍巍,张艳玲,寿绍文. 2007. 一次局地大暴雨过程的数值模拟和诊断分析[J]. 南京气象学院学报, 30(3): 411-416.
- 王永生,杨大升. 1984. 暴雨和低层流场的位涡[J]. 大气科学, 8(4): 411-417.
- 吴国雄,蔡雅萍,唐晓菁. 1995. 湿位涡和倾斜涡度发展[J]. 气象学报, 53(4): 387-404.
- 肖坤. 2009. 一次台风变性过程的锋生位涡反演诊断[D]. 南京:解放军理工大学气象学院.
- 于玉斌,姚秀萍. 2000. 对华北一次特大台风暴雨过程的位涡诊断分析[J]. 高原气象, 19(1): 111-120.
- 张述文,王式功. 2001. 位涡及位涡反演[J]. 高原气象, 20(4): 468-473.
- 周毅,寇正,王云峰. 1998a. 气旋生成机制的位涡反演诊断[J]. 气象科学, 18(2): 121-127.
- 周毅,寇正,王云峰. 1998b. 气旋快速发展过程中潜热释放重要性的位涡反演诊断[J]. 气象科学, 18(4): 355-360.
- 周毅,寇正,王云峰. 1998c. 位涡反演诊断方法及效果检验[J]. 空军气象学院学报, 19(2): 121-129.
- 朱健,罗律. 2009. 超强台风“韦帕”的暴雨机制及湿位涡分析[J]. 气象科学, 29(6): 742-748.
- Charney J G. 1955. The use of primitive equations of motion in numerical prediction[J]. Tellus, 7: 22-26.
- Davis C A. 1992a. A potential-vorticity diagnosis of the importance of

- initial structure and condensational heating in observed extratropical cyclogenesis[J]. *Mon Wea Rev* ,120: 2409-2428.
- Davis C A. 1992b. Piecewise potential vorticity inversion [J]. *J Atmos Sci* 49: 1397-1411.
- Davis C A ,Emanuel K A. 1991. Potential vorticity diagnostics of cyclogenesis [J]. *Mon Wea Rev* ,119: 1929-1953.
- Ertel H. 1942. Ein neuer hydrodynamischer wirbelsatz [J]. *Meteor Z* 59: 271-281.
- Hoskins B J ,McIntyre M E ,Robertson A. 1985. On the use of and significance of isentropic potential vorticity maps [J]. *Quart J Roy Meteor Soc* ,111: 877-946.
- Kieu C Q ,Zhang Da-Lin. 2010. A piecewise potential vorticity inversion algorithm and its application to hurricane inner-core anomalies [J]. *J Atmos Sci* 67: 2616-2631.
- Kleinschmidt E. 1957. *Handbuch der Physik* (48) [M]. Berlin: Springer: 112-129.
- McTaggart-Cowan R ,Gyakum J R ,Yau M K. 2001. Sensitivity testing of extratropical transitions using potential vorticity inversions to modify initial conditions: Hurricane Earl case study [J]. *Mon Wea Rev* ,129: 1617-1636.
- Rossby C G. 1940. Planetary flow patterns in the atmosphere [J]. *Quart J Roy Meteor Soc* 66(Suppl) : 68-87.
- Shapiro L J. 1996. The motion of hurricane Gloria: A potential vorticity diagnosis [J]. *Mon Wea Rev* ,124: 1497-2508.
- Shapiro L J ,Franklin J L. 1995. Potential vorticity in hurricane Gloria [J]. *Mon Wea Rev* ,123: 69-92.
- Wang Xingbao ,Zhang Da-lin. 2003. Potential vorticity diagnosis of a simulated hurricane. Part I: Formulation and quasi-balanced flow [J]. *J Atmos Sci* 60: 1593-1607.
- Wu C C ,Emanuel K A. 1995a. Potential vorticity diagnostics of hurricane movement. Part I: A case study of hurricane Bob(1991) [J]. *Mon Wea Rev* ,123: 69-92.
- Wu C C ,Emanuel K A. 1995b. Potential vorticity diagnostics of hurricane movement. Part II: Tropical storm Ana(1991) and hurricane Andrew(1992) [J]. *Mon Wea Rev* ,123: 93-109.
- Wu C C ,Kurihara Y. 1996. A numerical study of the feedback mechanisms of hurricane-environment interaction on hurricane movement from the potential vorticity perspective [J]. *J Atmos Sci* ,53: 2264-2282.
- Wu C C ,Huang T S ,Huang W P ,et al. 2003. A new look at the binary interaction: Potential vorticity diagnosis of the unusual southward movement of tropical storm Bopha(2000) and its interaction with supertyphoon Saomei(2000) [J]. *Mon Wea Rev* ,131: 1289-1300.
- Wu C C ,Huang T S ,Chou K H. 2004. Potential vorticity diagnosis of the key factors affection the motion of typhoon Sinlaku(2002) [J]. *Mon Wea Rev* ,132: 2084-2093.
- Wu C C ,Chen S G ,Chen J H ,et al. 2009. Interaction of typhoon Shanshan(2006) with the midlatitude trough from both adjoint-derived sensitivity steering vector and potential vorticity perspectives [J]. *Mon Wea Rev* ,137: 852-862.
- Yang C C ,Wu C C ,Chou K H ,et al. 2008. Binary interaction between typhoons Fengshen (2002) and Fungwong(2002) based on the potential vorticity diagnosis [J]. *Mon Wea Rev* ,136: 4593-4611.
- Zhang Da-lin ,Kieu C Q. 2006. Potential vorticity diagnosis of a simulated hurricane. Part II: Quasi-balanced contributions to forced secondary circulations [J]. *J Atmos Sci* 63: 2898-2914.

(责任编辑: 倪东鸿)