

岳彩军,曹钰,寿绍文.Q 矢量研究进展[J].暴雨灾害,2010,29(4):297-306

Q 矢量研究进展

岳彩军^{1,2},曹钰³,寿绍文³

(1.中国气象局上海台风研究所,上海 200030;2.中国气象局台风预报技术重点开放实验室,上海 200030;
3.南京信息工程大学 江苏省气象灾害重点实验室,南京 210044)

摘要:1978 年至今 30 多年期间,Q 矢量一直不断得到改进与完善,并被广泛应用于天气诊断及实际业务预报。Q 矢量理论研究主要包括:准地转 Q 矢量、C 矢量、广义 Q 矢量、半地转 Q 矢量、非地转干 Q 矢量、非地转湿 Q 矢量及非均匀饱和大气中的非地转湿 Q 矢量等。Q 矢量应用研究主要包括:Q 矢量分解及对 Q 矢量诊断分析能力的提高;Q 矢量散度被定性用于短期天气预报工作;对以 Q 矢量散度为强迫项的 ω 方程的迭代计算及水汽作用的考虑,则将 Q 矢量分析应用于定量降水预报(QPF)。基于对 30 多年来 Q 矢量分析的理论研究及应用的总结、分析基础上,最后进行了有意义的讨论,指出了现阶段仍然存在的问题,并对未来研究方向进行了展望。

关键词:Q 矢量;诊断分析;预报应用;研究进展

中图分类号:P43 文献标识码:A 文章编号:1004-9045(2010)04-0297-10

1 引言

众所周知,垂直运动是大气过程发展的产物,是导致云、降水等天气现象的重要动力条件。大气中发生的凝结和降水过程,热量和动量的垂直输送,以及大气中位能与动能之间的相互转换等,都与垂直运动有密切关系,因而垂直运动常被作为天气系统生成、发展的一个重要指标,对天气预报有着十分重要的意义。但垂直运动至今无法直接测量,一般都是基于其他观测物理量资料,通过诊断分析而得,因此,能否较好地描述垂直运动,对其诊断方法的先进与否,将显得尤为重要。

准地转(QG)理论是近代动力气象学的基础。中纬度大气的许多基本结构都可以使用准地转理论加以描述,因此,它是中纬度天气学,或者说是中纬度地区天气预报的主要理论依据。早在 20 世纪 40 年代后期,准地转方法就被用来诊断中纬度斜压扰动产生的垂直运动。20 世纪 50 年代以后,得到了一般形式的 ω (p 坐标系中的垂直速度)方程^[1]。到了 20 世纪 70 年代,QG 原理在业务气象学中事实上已经成为从模式产品估算垂直运动的基础^[2]。用 ω 方程诊断垂直环流的优点在于它是个诊断方程,只需一个时间资料,而且方程的物理意义很清楚。但是, ω 方程右边包含垂直导数值,这使得定量计算时,至少需要两层资料,定性

诊断也带来不便。此外,大气中的垂直运动可以认为是由绝对涡度的差动平流和温度平流的拉普拉斯强迫产生的。当这两项的符号相反时,很难定性判断垂直运动的方向,并且这两项之间还存在部分抵消效应,如果分别计算两项强迫的垂直运动时会得出不正确的结果^[3]。所以这种形式的方程在定量计算 ω 及定性应用上都有一定的困难。

1947 年,Sutcliffe^[4]在气旋发展方程中引用了准地转近似(风速和气压梯度保持近似平衡),不仅用热力涡度平流作为一种计算散度的垂直廓线和地面气压变化的方法,而且用热成风作为气旋移动的“引导”机制。在 Sutcliffe^[4]的发展理论中,强迫形式简单,这在描述中纬度大尺度天气系统移动和发展时,效果是比较好的。但由于其简化过多,失去了描述中尺度的信息。实例分析表明,其在描述垂直于锋区及急流入口区、出口区的非地转环流时,出现混乱现象^[5]。1978 年,Trenberth^[6]采用类似 Sutcliffe^[4]的方法将方程的强迫项表示成热成风涡度平流,提出在某厚度层的中部由整层热成风形成的涡度平流可以近似表示方程中 QG 的强迫。它不仅克服了对流层中层存在最明显的抵消现象的缺点,而且在没有进行实际计算的情况下,采用此近似,通过检验热成风涡度平流,能得到对垂直运动场的较好定性评估^[7]。但同 Sutcliffe^[4]一样,在该形式的强迫项中忽略了地转变形项的作用,因此这种形

收稿日期:2010-11-15;定稿日期:2010-11-30

基金项目:国家自然科学基金项目(40875025、40875030、40775033 和 40921160381)、上海市自然科学基金项目(08ZR1422900)及中国气象局 2009 年气象新技术推广重点项目(09A13)

作者简介:岳彩军,男,1972 年生,博士,副研究员,主要从事中尺度动力学、海气相互作用研究。E-mail: yuecaijun2000@163.com

式的 ω 方程仅适用于斜压性比较小的对流层中层。

在科学文献中, Q 矢量分析方法被视为一种业务垂直运动估算的先进方法。自 1978 年 Hoskins 等^[8]提出 Q 矢量概念之后, 备受广大气象科研与业务工作者的青睐。不仅被广泛应用于天气诊断分析研究, 以及对数值预报产品的动力释用研究, 与此同时, 在理论上也对其加以深入研究, 对 Q 矢量分析进行了不断完善与发展。针对 Q 矢量分析的理论及应用研究工作, 岳彩军^[9]及岳彩军等^[10-12]先后从不同着眼点入手, 做过有意义的总结分析, 但具体到国外已有的及国内近些年的有关 Q 矢量理论及应用研究工作, 仍显得不够全面、系统。本文将基于上述已有综述研究工作基础上, 对 1978 年以来至今 30 多年期间关于 Q 矢量分析的理论研究及应用工作, 进行全面、系统地总结分析。

2 Q 矢量分析的特点

1978 年, Hoskins 等^[8]用另一方法推导出了完全的准地转 ω 方程, 保留了准地转方程组所能描述的所有过程的作用, 把准地转强迫项表示成一个矢量的散度, 且将这个矢量称为 Q 矢量。Hoskins 等^[8]的这一发展又被称为“ Q 矢量分析”。 Q 矢量定义为作用在水平位温梯度上的地转速度形变的常数倍。假设垂直运动分布在三维空间呈正弦波动变化分布, 则其正比于 Q 矢量散度。以 Q 散度作为强迫项的 ω 方程, 不仅避免了传统 ω 方程的缺点, 而且其物理意义清楚、计算简单的特点, 同时又避免了 Sutcliffe^[4]理论和 Trenberth^[6]方法的不足, 它包括了变形项, 且适用于整个对流层(或者说斜压性较大的情况)。具体地讲, 用 Q 矢量散度表示 ω 的大小及分布, 能避免直接求解 ω 方程的大量计算, 只需一层等压面资料即可计算, 这在定量计算上比惯用的 ω 方程简便。同时, 也能表示出产生 ω 的强迫机制的强弱, 而且由于在对流层低层 Q 矢量与非地转速度成正比, 所以 Q 矢量亦可表示低层的非地转速度场。此外, Q 矢量不仅能用来诊断垂直环流, 而且由于它决定了流场和温度场热成风的个别变化, 亦即决定了水平温度的个别变化, 因而还可用来预报锋生或锋消, 用 Q 矢量可方便地表示出准地转锋生函数。相对于 Sutcliffe^[4]理论及 Trenberth^[6]近似而言, Q 矢量能在描述中小尺度系统时提供更多的信息, 对锋生形势的诊断更为精确。以 Q 矢量散度为强迫项的 ω 方程更易与天气图结合应用, 且较 Sutcliffe^[4]理论更为精确。

3 Q 矢量分析的种类

鉴于 Q 分析方法对垂直运动估算的优越性, 自 1978 年 Q 矢量概念产生以来, 人们从各个角度对 Q

矢量分析进行了不断改进和完善, 并衍生出多种 Q 矢量分析。下面进行具体介绍。

3.1 准地转 Q 矢量及 C 矢量

1978 年, Hoskins 等^[8]由准静力、准地转、绝热无摩擦 f 平面的 p 坐标系运动方程组出发推导的 Q 矢量即为准地转 Q 矢量。Hoskins 等^[8]推导准地转 Q 矢量方程时, 非地转环流的正压部分被排除在 ω 方程之外, 这对于诊断非地转环流的三维空间结构来说无疑是个缺憾。为了恢复失去的信息, 1992 年, Xu^[13]将准地转 Q 矢量由二维拓展到三维空间, 即得到 C 矢量。具体讲, 将准地转 Q 矢量的两个分量方程与垂直非地转涡度方程合并, 得到一组完整的三维准地转诊断方程, 该方程的左边为包含了非地转伪涡度 (ageostrophic pseudovorticity) 矢量的三维矢量形式, 方程右边为地转强迫矢量即 C 矢量。 C 矢量在水平面上的投影向左旋转 90° 即为准地转 Q 矢量。 C 矢量的垂直分量正比于定压位势面的高斯曲率。相对于准地转 Q 矢量而言, C 矢量没有更多的复杂性, 而是包含了更多的信息。1996 年, 缪锦海^[14]得到了在原始方程条件下的广义 Q 矢量的三维形式, 即广义 C 矢量。此外, Kuo 等^[15]得到一个与准地转 Q 矢量、 C 矢量均相关的三维 P 矢量。 P 矢量旋度的水平分量与准地转 Q 矢量正交, 且其大小正比于准地转 Q 矢量。 P 矢量旋度的垂直分量为非地转伪涡度, 与 C 矢量的垂直分量相同。

鉴于准地转 Q 矢量是用地转风计算的局限性, 许多学者在利用准地转 Q 矢量进行科学研究时, 首先利用其它风场直接替换准地转风场, 然后再进行诊断分析。Kiladis 等^[16]及 Hall 等^[17]直接利用旋转风代替地转风进行准地转 Q 矢量计算。Funatsu 等^[18]利用位涡反演 (PVI) 所得的平衡风场计算准地转 Q 矢量。Hutchinson 等^[19]直接用实际风进行准地转 Q 矢量计算。尽管准地转 ω 方程是估算天气尺度垂直运动的很好的一级近似方式, 但是, 更多具体信息仍需要进一步考虑, 如非绝热效应, 对于暖季节频发的较小尺度天气系统来讲, 可能就很重要, 于是, Lynch 等^[20]将大气边界层中的非绝热过程及潜热作用引入到以准地转 Q 矢量散度为强迫项的 ω 方程中, 非绝热作用具体考虑了地表感热通量、大尺度潜热释放以及对流过程。与 Lynch 等^[20]不同的是, Giordani 等^[21]提出一种准地转 Q 矢量的广义表达式, 方程右端由 5 个强迫项 (2 个热力强迫项和 3 个动力强迫项) 组成, 包含了更多的物理过程, 更适于研究大气边界层的非地转流。此外, 也有学者得到其它坐标系中的准地转 Q 矢量表达式。Mattocks 等^[22]得到等熵坐标系中的准地转 Q 矢量。Reasor 等^[23]推导出柱坐标系中的准地转 Q 矢量。上述研究均获得了很

好的效果,但都是完全建立在准地转理论上。因此,许多学者还从理论角度入手对 Q 矢量分析作了进一步深入研究。

3.2 广义 Q 矢量

1991年, Davies-Jones^[24]从原始方程组(PE)出发,利用涡度动力学观点,得到了类似于准地转 Q 矢量的广义 Q 矢量。广义 Q 矢量分为两个部分:锋生矢量和涡旋伸展项,在准地转假设条件下,这两个部分是相等的,但对于包含了涡度和热力特性的传统准地转 Q 矢量来讲,不仅可以得到双重物理解释,进而可以洞察到这两项在平衡被自身热成风平流破坏又被非地转环流修复过程中的不同表现。相对传统的准地转 Q 矢量来讲,在 AB(alternative balance)近似条件下的广义 Q 矢量并没有更多的复杂性,其用总的水平风场代替了地转风,但没有替换由水平温度梯度得到的热成风。广义 Q 矢量不仅具有传统准地转 Q 矢量的诊断特性,同时包含着更多的信息。此外, Keyser 等^[25]用无辐散风替代地转风同时保持热成风不变,也得到了一个相似的广义 Q 矢量。

3.3 半地转 Q 矢量

半地转近似又称地转动量(GM)近似。在半地转近似条件下的动力方程组比准地转近似条件下的动力方程组包含有更多的信息:保留了非地转风造成的地转动量平流,多了由非地转风引起的温度平流项,且考虑了 β 效应。李柏等^[26]由半地转、准静力、绝热无摩擦的 p 坐标下动力方程组出发推导出半地转 Q 矢量。相对准地转 Q 矢量而言,半地转 Q 矢量的表达式中不仅包含了准地转各项,而且还考虑到了非地转风的作用、风垂直切变、纬度效应及热成风作用。因此,更具有表征中尺度系统特征的能力。Hoskins 等^[27]也曾得到相似的结果。

3.4 非地转 Q 矢量

3.4.1 非地转干 Q 矢量

准地转 Q 矢量是在准地转近似假设下得到的,半地转 Q 矢量是在半地转近似条件下得到的,因而都受到一定程度的限制,尤其是应用于次天气尺度运动和激烈天气系统中,将有明显的不足。张兴旺^[28]由准静力、绝热无摩擦、 f 平面的 p 坐标系原始方程出发,推导得到非地转干 Q 矢量。值得注意的是,对于非地转干 Q 矢量来讲,完全利用实际风计算,这是其与准地转 Q 矢量及半地转 Q 矢量所不同的显著特点。它可用于低纬度地区,也可用于次天气尺度运动和激烈的天气系统。同时也注意到,计算某层的非地转干 Q 矢量需要用到其相邻上下层资料,鉴于此,岳彩军^[29,30]及 Yue^[31]用地转风垂直切变代替实际风垂直切变以及地

转风平衡关系,对非地转干 Q 矢量^[28]进行一系列转化、处理后,得到一种修改的非地转干 Q 矢量(Q^N)。计算 Q^N 矢量仅需要一层资料。如果用地转风代替实际风,则 Q^N 矢量就完全退化为 Hoskins 等^[8]所定义的准地转 Q 矢量。

3.4.2 非地转湿 Q 矢量

对于非地转干 Q 矢量来讲,没有考虑非绝热加热作用,而实际大气并非是绝热的。为了能更真实地反映大气状况,1998年,张兴旺^[32]考虑了大气中水汽凝结潜热释放作用,从包含非绝热效应的 p 坐标系原始方程出发,推导出非地转湿 Q 矢量。姚秀萍等^[33,34]及 Yao 等^[35]直接通过方程各项的量级比较,对方程尺度分离后进行简化,也得到了非地转湿 Q 矢量,且与张兴旺^[32]所得结果是一致的,二者不同之处仅在于采用了不同的推导方法。在非地转湿 Q 矢量的表达式中,不仅全部用实际风计算,同时还显式地包括了凝结潜热加热项,更接近于实际大气状况。但也应注意到,非地转湿 Q 矢量中仅包含了大尺度凝结加热信息,同时,计算某层非地转湿 Q 矢量还需要用到其相邻上下两层资料。因此,又有学者先后开展了对非地转湿 Q 矢量的改进与完善工作。2003年,岳彩军等^[36]在考虑大气中大尺度凝结加热作用的同时,也将对流凝结加热作用这一重要非绝热加热信息考虑进去,从而实现非地转湿 Q 矢量的修改与完善工作。2007年,刘汉华等^[37]考虑了包括凝结加热(大尺度凝结加热和对流凝结加热)、辐射加热和感热加热在内的所有加热信息,也对非地转湿 Q 矢量进行了改进。上述两项研究工作都是从非绝热加热作用的角度考虑的。最近, Yue 等^[38]对非地转湿 Q 矢量进行转化、加工处理,得到一种修改的非地转湿 Q 矢量($Q^{\&}$)。 $Q^{\&}$ 矢量计算仅需要一层资料,这延续了传统准地转 Q 矢量在计算上的优越性。同时, $Q^{\&}$ 矢量考虑了大尺度凝结加热作用,且完全用实际风计算,与非地转湿 Q 矢量具有相似的诊断特性。此外,彭春华等^[39]根据中国夏季暴雨系统的有关特点,通过尺度分析和简单参数化处理,导出一种适用于低层 850 hPa 单层的非地转湿 Q 矢量(Q')。 Q' 矢量不仅适当地隐含非绝热作用,而且也包含了低层摩擦强迫。显然,仅针对 850 hPa 这一层也是其不足之处。

3.4.3 非均匀饱和大气中的非地转湿 Q 矢量

针对真实大气并不是处处都是饱和的事实情况,为了解决饱和与未饱和的过渡区潜热释放的不连续问题,高守亭^[40]及 Yang 等^[41]则由非均匀饱和大气中的热力学方程出发,结合 p 坐标下的非地转方程,得到包含非绝热加热效应的非均匀饱和大气中的非地转湿 Q 矢量(Q_{um})。 Q_{um} 矢量能普遍地表示干空气、未饱和

湿空气和饱和湿空气中的 Q 矢量,能应用到有潜热释放的饱和与非饱和的过渡区中对垂直运动的驱动作用。将凝结几率函数 $(q/q_s)^k$ 引入 Q_{um} 矢量,使得 Q_{um} 矢量不仅包含了潜热释放效应,同时还包含相对湿度作用,故它比非地转干 Q 矢量和非地转湿 Q 矢量更具完备的物理意义。

4 相关分析方法

Q 矢量散度是 Q 矢量分析的基础,且被广泛应用于对垂直速度的评估,并取得重要的意义。除此之外,还有很多与 Q 矢量分析紧密相关的诊断分析方法,如迭代计算以 Q 矢量散度为强迫项的 ω 方程、 Q 矢量锋生函数、 Q 矢量旋度 β 效应以及 Q 矢量分解。下面予以具体介绍。

4.1 迭代计算以 Q 矢量散度为强迫项的 ω 方程

在有关 Q 矢量的诸多应用研究工作中,多数情况下,是通过 Q 矢量散度来定性估算垂直速度分布。但值得注意的是, Q 矢量散度并非直接等同于垂直速度,如 Barnes^[42]研究指出, Q 矢量散度可以用来衡量垂直运动,但对于诊断垂直速度的研究工作来讲,这仅仅是迈出第一步,为了具体描述垂直运动,必需计算求解 ω 方程。但是,垂直速度与 Q 矢量散度之间的定量关系还与稳定度(σ)(在相同 Q 矢量散度强迫作用下,弱(强)稳定度对应着强(弱)垂直运动)和边界条件的选择密切相关。因此,下面主要从求解 ω 时所采用的不同处理方案角度入手,进行具体介绍。

为了数值求解 ω 方程,必需预先给定顶层、底层的垂直速度初值,以及垂直方向上各层侧边界上的垂直速度初值。在 Tapp^[43]及 Tapp 等^[44]的研究工作中,假设顶层(100 hPa)及各侧边界上的垂直速度初值为 0,底层垂直速度初值设为地形抬升和摩擦效应产生的垂直速度,并且三维空间的稳定度 σ 是变化的。Stoelinga 等^[45]及 Locatelli 等^[46]采用一个简单的松弛迭代方法计算求解以 Q 矢量散度为强迫项的 ω 方程,将顶层设在 75 hPa 且垂直速度初值设为 0,侧边界条件设为完全垂直速度(full vertical velocity)的平滑值,对于底层的垂直速度初值,则分别考虑为 Ekman 效应和地形强迫作用的结果,对于前者引发的垂直速度,则粗略考虑为地表上的地转相对涡度值,对于后者强迫产生的垂直速度,则粗略地用地形抬升作用来表示。Lynch 等^[20]指出,以 Q 矢量散度为强迫项的 ω 方程是可求解的泊松方程(Poisson equation),同时,顶层及侧边界的垂直速度初值设为数值预报模式输出的垂直速度,地表摩擦作用强迫产生的垂直速度设为底层垂直速度初值。另外, Pyle 等^[47]在研究工作中将底层及顶层的垂直速度

初值设为 0,由运动学方法得到的垂直速度设为侧边界上垂直速度的初值。采用连续松弛迭代方法, Martin^[48]计算了以 Q 矢量散度为强迫项的 ω 方程,对于稳定度 σ 采用了空间平均处理。在 Rogers 等^[49]及岳彩军等^[50]的研究工作中,顶层 100 hPa、底层 1 000 hPa 及侧边界上的垂直速度初值均设为 0,且每层稳定度 σ 取为该层平均值。

4.2 Q 矢量锋生函数

锋生是指某种反映锋生特征的物理特性 S (如温度 T ,位温 θ 等)的梯度增大(即 S 等值线变密)过程。一般可以定义一个锋生函数 $F=d|\nabla S|/dt$ 或 $F=d|\nabla S|^2/dt$,当 $F>0$ 时,锋生;当 $F<0$ 时,锋消。 Q 矢量不仅能用来诊断垂直环流,而且由于它决定了流场和温度场热成风的个别变化,亦即决定了水平温度的个别变化,因而还可用来判断锋生、锋消。常见的 Q 矢量锋生函数表示为 $F=(Q \cdot \nabla \theta)/|\nabla \theta|$ ^[51-57]。 $Q \cdot \nabla \theta>0$,即 Q 指向暖空气时,将增加原有的温度梯度,因而有利于锋生。当 Q 与 $\nabla \theta$ 同向时,最有利于锋生。 $Q \cdot \nabla \theta<0$,即 Q 指向冷空气时,将减小原有的温度梯度,因而有利于锋消。当 Q 与 $\nabla \theta$ 反向时,最有利于锋消。也有研究将 Q 矢量锋生函数的计算公式表述为 $2Q \cdot \nabla \theta$ ^[5,58-62]、 $2(p_0/p)^k(p/R)Q \cdot \nabla \theta$ ^[63,64]及 $2Q \cdot \nabla \theta_e$ ^[65]。

4.3 Q 矢量旋度

Hoskins 等^[5]基于非线性平衡方程研究指出, Q 矢量旋度 $(\vec{k} \cdot \nabla \times Q)(VQ)$ 正比于低层非地转涡度。如果存在非地转涡度(即风场和质量场之间存在不平衡),将出现一个调整过程,并激发产生散度场和垂直速度场,进而在风场和质量场之间建立一个新的平衡。最近, Cao 等^[66]结合降水过程对比分析 VQ 和 Q 矢量散度的垂直分布、时间变化,结果表明, VQ 能更好的反映降水中心的位置和降水强度,原因在于 VQ 自身诊断特点,其更能抓住与对流系统中非平衡运动密切相关的非地转运动。

4.4 β 效应

如果考虑科氏力参数随纬度的变化,那么在以 Q 矢量散度为强迫项的 ω 方程的右边还应包括 β 效应。具体地讲, $\beta=df/dy=2\Omega \cos \phi/a$, a 为地球平均半径, Ω 为地球角速度。Hoskins 等^[8]研究指出, β 项处于次要地位(低纬度夏季除外)。White^[67]认为,在冬季 β 项对垂直速度的影响处于次要地位,但在 20°N 附近的夏季, β 项对垂直速度的影响起主要作用。为了研究与平衡水平风场对应的“平衡垂直运动场”, Funatsu 等^[18]在使用以 Q 矢量为强迫项的 ω 方程的同时,也考虑了 β 效应。事实上,是否需要考虑 β 效应,可视问题研究对象而

定。如果是研究低纬度天气现象或直接计算垂直速度,可以在以 Q 矢量散度为强迫项的 ω 方程中引入此项。如果仅是直接利用 Q 矢量散度来评估垂直速度,则此项作用可不予考虑。

4.5 Q 矢量分解

许多研究^[25,29-31,47,48,68-86]表明, Q 矢量分解(Partitioning)更具有对实际天气系统诊断分析的应用价值,是一个非常有效的诊断分析工具,能分离出具有气象意义的过程和结构,而这些仅靠“总”的 Q 矢量是无法揭示的。通常情况下,将 Q 矢量分解在以等位温线为参照线的自然坐标系中(简称为 PT 分解)。也有另外一种分解方法,即将 Q 矢量分解在以等高线为参照线的自然坐标系中(简称为 PG 分解)。无论哪种分解方法,分解后的各 Q 矢量分量与“总”的 Q 矢量具有相同的诊断特性。下面进行具体介绍。

4.5.1 Q 矢量 PT 分解

首先介绍 Q 矢量 PT 分解的相关研究工作。Keyser 等^[25,68]发现将 Q 矢量分解为平行和垂直于等温线两部分时,导致了与斜压扰动相关的垂直运动场的一个有意义的尺度分离。和等温线正交的 Q 矢量分量分布具有锋区尺度且呈带状结构,平行于等位温线的 Q 矢量分量则表现为天气尺度分布且呈胞状结构。这种 Q 矢量分解方法被广泛用于天气分析与研究^[47,48,69-73,76,80-86]。此外,仔细分析可发现,准地转 Q 矢量分量 Q_s 包括了地转涡度和地转变形项两部分的强迫作用,然而,这两项的强迫作用一直没有单独分析过。针对准地转 Q 矢量分量 Q_s ,Martin^[77]还开展了进一步的分解研究。结合温带锢囚气旋个例研究表明,地转涡度和地转变形二者对于热力演变、云及降水分布的强迫作用,既有区别又相互互补,这从一个新的角度揭示出了温带气旋锢囚阶段所蕴含的 QG 动力学。后来,Martin^[78]还研究了两个温带气旋过程中 Q 矢量横向(transverse)分量(正交于地转风垂直切变)和切向(shearwise)分量(沿地转风垂直切变)强迫产生的准地转垂直运动分布。上述研究都是基于准地转 Q 矢量、针对大尺度天气系统。Yue 等^[80]及岳彩军等^[81]、杨晓霞等^[84]以及梁琳琳等^[86]则将 Q 矢量 PT 分解思想先后应用于湿 Q 矢量、改进的湿 Q 矢量,并用于暴雨中尺度天气现象的诊断分析,从而进一步拓展了 Q 矢量 PT 分解思想的应用范围。值得一提的是,Martin^[76]对于大尺度特征的温带锢囚气旋进行诊断分析时发现,具有天气尺度的 Q_s 矢量辐合强迫表现出主要的作用,而此时具有锋区尺度的 Q_n 矢量辐合强迫则起着非常小的作用。Martin^[78]也得到类似的结论。而 Yue 等^[80]及岳彩军等^[81]针对江淮梅雨锋气旋暴雨研究表明,在暴雨的开始形成阶段, $2 \nabla \cdot Q_n$

对垂直运动场的产生起着主要的强迫作用, $2 \nabla \cdot Q_n$ 的强迫作用处于次要地位;在暴雨的强盛阶段, $2 \nabla \cdot Q_n$ 已经演变为主要强迫因子,对垂直运动场产生起着主要的动力强迫作用,而 $2 \nabla \cdot Q_s$ 的强迫作用则处于次要地位,甚至多起着背景场的作用,甚至个别时次可以忽略不计;在暴雨的衰亡阶段,相对而言, $2 \nabla \cdot Q_s$ 对垂直运动场产生的强迫作用逐渐增强,而 $2 \nabla \cdot Q_n$ 的强迫作用则迅速衰减。可见,通过分解 Q 矢量可以揭露出在不同尺度的天气过程中,不同尺度所起的作用不同,这也是“总”的 Q 矢量难以揭示的。最近,Yue^[82]也采用类似的分解方法诊断研究了“海棠”台风(2005)暴雨过程。

4.5.2 Q 矢量 PG 分解

下面介绍 Q 矢量 PG 分解的相关研究工作。与常见的将 Q 矢量分解在以等位温线为参考线的自然坐标系中不同,1998年,Jusem 等^[74]提出了另外一种 Q 矢量分解方法,即将 Q 矢量分解在以等高线为参考线的自然坐标系中,并得到四个分量:(a)沿流伸展项(alongstream stretching) Q_{dst} ,表示等高线之间水平空间的收缩/伸展致使沿着气流的温度梯度增强/减弱。(b)曲率项(curvature) Q_{curv} ,描述曲率效果,如等高线的气旋曲率在下流方向增加(减小)将引起下沉(上升)运动。(c)切变平流项(shear advection) Q_{shdv} ,表示由水平风切变所引起的温度平流。(d)穿流伸展项(crosstream stretching) Q_{crst} ,描述风场汇合、分流效果,即风场的汇合、分流致使穿越气流的温度梯度增强、减弱。 Q_{dst} 矢量与 Q_{curv} 矢量都是沿等高线方向,二者强迫作用之间可发生相互增强或抵消; Q_{shdv} 矢量与 Q_{crst} 矢量都是沿穿越等高线方向,二者强迫作用之间可发生相互增强或抵消。简单地讲, Q_{dst} 、 Q_{crst} 二者反映的是流场的汇合、分流引起沿流、穿越流温度梯度的变化而对垂直运动产生的激发、强迫作用,只不过 Q_{dst} 沿着等高线方向,而 Q_{crst} 始终与等高线正交; Q_{curv} 主要反映流场曲率对沿流温度梯度的影响,从而对垂直运动产生的激发、强迫作用; Q_{shdv} 主要反映水平风切变致使穿越流温度梯度的改变,从而对垂直运动产生的激发、强迫作用。这种新的分解方法特性在于可以有效诊断评估气流曲率、汇合或分流等因子对垂直运动产生的不同强迫机制。后来,Donnadille 等^[79]应用 PG 分解方法探讨了温度平流及曲率的汇合、水平切变对垂直运动的强迫作用。最近,岳彩军^[29,30]及 Yue^[31]将 Q 矢量 PG 分解思想拓展应用于修改后的非地转干 Q 矢量,并用于梅雨锋气旋暴雨、台风暴雨的诊断分析研究。

需要说明的是,在实际研究工作中,究竟是采用等温线还是等高线作为选择自然坐标系的参考线进

行 Q 矢量分解? 这取决于客观分析的目的。如果是讨论水平温度梯度大小和方向各自诱发垂直运动的变化, 那么选择等温线(或等熵线、等密度线)作为参考线是合适的。但是, 如果是研究垂直运动与流场几何形状的相关性, 则使用等高线作为参考线更为有效。譬如说, 仅考虑流体曲率对垂直运动产生的强迫影响, 采用沿等高线作为参考线的分解方法可以达到目的, 但如果采用等温线作为参考线的话, 则无法将其分离出来进行单独估算(除非等温线和等高线平行)。

此外, Morgan^[75]提出一种分片(piecewise)分解 Q 矢量方法, 具体地讲, 首先利用分片 PV 反演方法进行风场反演, 然后基于反演所得风场进行 Q 矢量计算, 从而将 Q 矢量进行分解。此种 Q 矢量方法可用于估算引发高层、中层及低层 PV 异常的垂直运动。

5 Q 矢量分析在天气预报中的应用

已有研究^[87]表明, Q 矢量分析方法在天气预报业务工作中具有广阔的应用前景。和其它的诊断分析工具一样, Q 矢量分析方法可计算分析数值预报模式输出的格点资料, 能帮助预报员估算有限区域内的垂直运动场, 以及可对模式预报产品进行动力释用。 Q 矢量散度和 Q 矢量本身可以在很多层次上计算和显示, 在剖面图或时间和高度图中也可以显示 Q 矢量散度的垂直分布^[2]。在天气图上, Q 矢量场的标绘对实际预报业务来讲, 将是一个很重要的客观参考工具^[5]。Barnes^[58]基于 Q 矢量分析方法发展了一个实时微机绘图系统, 并用于诊断分析 1982 年 6 月 25—26 日发生在科罗拉多州东部的一次强对流风暴过程, 结果表明, Q 矢量分析在对流发生前 4 h, 准确地显示出大尺度强迫作用的发生, 对当时业务有限区域模式预报结果不充分表现起到了弥补作用。Chen 等^[88]将 Barnes^[58]的诊断分析方案应用于华北夏季一次强对流事件研究表明, 由于斜压强迫非常弱, 当时有限区域模式没有预报出此次事件, 而 Q 矢量分析可提前 12 h 清楚地显示出相关强迫作用, 研究还指出, 将该种诊断分析方案与常规资料有效结合使用, 具有改善局地短期天气预报水平的潜在能力。Wetzel 等^[89]发展了一种可用于中纬度冬季降水分析与预报的“配料法”(ingredients-based methodology(IM)), 其中, Q 矢量被作为五个基本物理成分之一。陈威等^[90]结合准地转 Q 矢量涡度、散度, 分别提出黑龙江省南部和北部 6—8 月暴雨发生时各要素的临界值, 从而建立暴雨的诊断预报模型。周功挺等^[91]基于 1960—2002 年 5—6 月发生在浙南地区的 17 次大暴雨个例, 着重探讨了准地转 Q 矢量场与大暴雨的关系。结果表明, 中低层 Q 矢量的辐合和大暴雨的

发生有着很好的对应关系, 非热低压引起的大暴雨位于 Q 矢量辐合中心附近, 或者辐合中心区南—西南方。利用上述分析特征作为主要参考依据之一, 指导 2005 年浙南地区 5—6 月暴雨过程预报, 取得了较好的实际效果。需要强调的是, 通过对数值预报产品“再加工”, Q 矢量动力释用产品成为改进天气预报的有效途径之一。Grumm 等^[92]指出, 美国国家气象中心(NMC)气象业务处(MOD), 将 Q 矢量对数值预报产品的“再加工”所得产品用来作为 MOD 降水预报的指导, 通过分析 Q 矢量的散度场, 则改进嵌套网格模式(NGM)对降水的落区预报。Nuss 等^[93]研究指出, 通过 Q 矢量分析, 可揭示出有限区域内的低层强迫作用, 从而有助于帮助预报员对业务数值预报模式的结果进行客观订正, 并且 Q 矢量分析可在一定程度上对发展中的气旋未来移动路径起预示作用, 而这也正是数值预报手段所面临的一个难点。Wiesmueller 等^[94]研究指出, 在许多天气预报服务部门, Q 矢量散度已经成为制作天气预报的常规手段之一。刘敦训等^[95]结合 1997 年 5 月 6—7 日山东区域暴雨过程, 利用准地转 Q 矢量对 T63 模式产品进行动力释用表明, Q 矢量散度辐合中心与雨区有较好的对应关系, 利用 Q 矢量散度辐合场可初步确定降水的落区, 比模式直接输出效果好。丁建军等^[96]研究指出, 基于 MM5 模式预报产品计算得到的湿 Q 矢量, 对 2003 年 7 月 31 日固原暴雨天气具有较好的描述能力和预报指导意义。姜学恭等^[97]利用国家气象中心 HLAFS 资料, 通过准地转 Q 矢量散度等动力因子对强降水过程的诊断分析, 从而得到它们之间的联系, 进而在此基础上建立一种内蒙古区域性暴雨落区的客观预报方法。吴爱敏等^[98]在探讨 HLAFS 资料应用于短期降水 MOS 预报方法时指出, 准地转 Q 矢量散度及其涡度是建立降水预报方程所选的主要因子。樊明等^[99]对 8 次暴雨过程的数值预报产品资料进行合成平均、求出平均场, 研究指出 500 hPa 上准地转 Q 矢量强负散度区与暴雨中心相匹配, 对暴雨的落区预报有指示意义。上述研究工作都基于准地转 Q 矢量。因此, 对于包括预报员在内的气象科研与业务工作人员应该注意到, 准地转理论通常对诊断分析孕育中尺度事件形成的大尺度背景条件是有用的, 但也绝非百分之百准确。同时我们也注意到, 上述研究基本上都是基于 Q 矢量散度的定性研究。最近, 岳彩军等^[50]基于非地转湿 Q 矢量^[32-35], 发展了一种湿 Q 矢量释用(Q^*VIP)技术: 利用松弛法迭代求解以非地转干 Q 矢量^[28]散度为强迫项的 ω 方程得到垂直运动场 ω_1 , 然后由 ω_1 计算非地转湿 Q 矢量散度场, 接着再利用松弛法迭代求解以非地转湿 Q 矢量散度场为强迫项的 ω 方程得到

垂直运动 ω_2 , 最后由 ω_2 结合水汽条件进行降水量计算, 得到 Q^*VIP 降水场。将此项释用技术应用于华东区域数值预报模式产品, 得到 Q^*VIP QPF 场, 其独立于模式本身输出的 QPF 场, 但与模式 QPF 场具有相同的时空分辨率。对 2004 年 6—8 月汛期降水预报统计检验表明, Q^*VIP 预报有无降水、小雨及 $10.0 \text{ mm} \cdot (24 \text{ h})^{-1}$ 以上降水的 T_s 评分、正确率都明显高于 MM5 模式, 而漏报率、空报率则是前者明显低于后者。该项释用技术使 Q 矢量在天气预报中的应用由定性转化为定量, 并在 QPF 中发挥作用。

6 讨论与展望

6.1 讨论

在针对 Q 矢量分析的应用研究过程中, 多数工作都能取得很好效果, 但也有不理想的情况存在。诚然, 有必要对一些问题进行分析讨论, 具体情况如下: (1) Q 矢量散度可以间接地估算垂直运动, 对降水的发生、落区有很好的指示意义。但是, 仔细分析会发现, Q 矢量散度也存在“空报”、“漏报”现象, 即出现 Q 矢量散度辐合区并不代表就一定有天气现象发生, 天气现象发生的地方也并不代表就一定有 Q 矢量散度辐合场出现。原因在于, 尽管 Q 矢量较充分地包含了大气中的动力学信息和热力学信息, 但事实上, 在 Q 矢量推导过程中, 不仅用到了动力学或热力学上的假设, 并且与降水密切相关的一些物理过程及信息(如蒸发作用等)也没有考虑进去。这意味着, Q 矢量并不具有完全描述大气中动力学信息和热力学信息的能力, 不能完全反映大气的不稳定状态, 即大气中的垂直运动并不完全是由 Q 矢量强迫产生的。因此, 完全依赖于 Q 矢量分析会出现“空报”、“漏报”现象。(2) 利用 $\omega \propto \nabla \cdot Q$ 的前提条件是大气中 ω 具有波状函数的特性, 而大气中的 ω 不一定具有此特性, 这种情况造成的误差也是 Q 矢量分析不可避免的。如 Durran 等^[7]研究指出, 可能在某层上 Q 矢量散度强迫作用与实际的垂直运动场并非是同位相的。(3) 仔细分析以 Q 矢量散度为强迫项的 ω 方程会发现, 在其左端包括静力稳定度, 可见, 静力稳定度也会影响到 $\omega \propto \nabla \cdot Q$ 关系, 如果静力稳定度值水平变化很大, 将会引起 Q 矢量诊断分析结果对实际情况的曲解。(4) Q 矢量分析方法(Q 矢量散度辐合、辐散)可以直接帮助预报员判断出上升运动、下沉运动的位置, 但这也仅仅是对垂直运动场的一种间接估算, 而并非是垂直运动场本身。(5) 当需要对以 Q 矢量散度为强迫项的方程进行迭代计算直接得到垂直速度时, 计算过程中通常假定均匀边界条件是均匀的, 即假定顶层、低层及各侧边界上的垂直速度初值

为 0, 对于计算求解来讲, 这是一种很不错的简单、实用处理方法, 但是, 从物理角度来看, 这种均匀边界条件的假定处理方式, 对于某些天气个例来讲可能并不恰当。(6) 目前, 对于计算各种湿 Q 矢量来讲, 都无法回避这样一个问题, 那就是在计算非绝热加热的垂直平流项时, 垂直速度该如何处理? 在已有的关于各湿 Q 计算的文献中, 很少有作者专门介绍对垂直速度计算的处理方案。值得注意的是, 不同的垂直速度计算方案, 对大尺度凝结加热强迫作用的描述会产生明显差异, 从而影响到湿 Q 矢量散度的计算结果, 进而意味着对以湿 Q 矢量散度为强迫项的方程的左端垂直速度将有着不同的反映。显然, 这个问题是未来湿 Q 矢量理论发展所无法回避和必需面对的。

6.2 展望

关于 Q 矢量分析的应用与研究已经取得了丰富成果, 但仍有很多科学问题值得进一步探讨、研究, 因此, 在今后的实际业务和科学研究工作中, 可着重开展以下几个方面的工作:

(1) C 矢量(广义 C 矢量)是传统二维 Q 矢量概念的三维拓展, 具有诸多优越诊断特性, 可积极开展 C 矢量(广义 C 矢量)分析在实际业务工作中的应用研究。

(2) Q 矢量分解可以揭示出总的 Q 矢量难以揭示的天气过程中的潜在物理机制, 不同的 Q 矢量分量在天气过程的不同阶段可能扮演的角色不同, 这也意味着, Q 矢量分解对天气现象的发生、天气过程的突变、转折等较总的 Q 矢量可能更具有指示性。因此, 可进一步加强对 Q 矢量分解在业务工作上的应用研究。

(3) 新发展的湿 Q 矢量释用(Q^*VIP)技术使得 Q 矢量在降水预报中的应用由定性转为定量, 但要想使 Q^*VIP 技术真正投入业务使用, 还有很多工作需要进一步改进和完善, 如考虑地形抬升和地表摩擦作用, 使用包含更多非绝热加热信息的改进的湿 Q 矢量, 对边界条件采取非均匀化处理, 以及如何合理考虑稳定度问题等。

(4) 单独使用 Q 矢量进行诊断分析、预报时, 存在“空报”、“漏报”现象, 这可能与 6.1 节中所述原因有极大关联。与其它物理量有机结合起来进行综合分析判断将可能是一种有效解决途径。众所周知, 在气象学中, 螺旋度是一个用于衡量环境风场具有多少沿气流方向的水平涡度及其贡献的参数, 它的大小反映了旋转与沿旋转轴方向运动的强弱程度。位涡是一个综合反映大气热力和动力性质的物理量, 它把大气中两种不稳定机制(对流不稳定和斜压不稳定)有机地结合在一起。因此, 将 Q 矢量与螺旋度、位涡等先进物理量一并使用将是一项有意义的尝试工作。

(5)在各种类型的湿 Q 矢量计算表达式中都显式地包含垂直速度 ω 项, 这为实际应用工作带来不便, 如何将湿 Q 矢量计算表达式中的显式非绝热加热信息转化处理成为隐式, 值得探讨研究。

(6) Q 矢量分析主要应用于温带地区, 而在热带地区应用较少, 因此, 今后可在以 Q 矢量散度为强迫项的 ω 方程中注重 β 效应的考虑, 加强 Q 矢量分析在低纬度地区天气现象研究中的应用。

(7)目前, 所使用的 Q 矢量分析主要为 p 坐标系中所得, 为了便于有针对性地对问题进行深入研究, 更能揭示出天气现象发生、发展的内在机理, 可进一步发展不同坐标系中的 Q 矢量分析, 如等熵坐标系、柱坐标系等。

参考文献:

- [1] 白乐生. 准地转 Q 矢量分析及其在短期天气预报中的应用[J]. 气象, 1988, 4(8): 25-30.
- [2] Dunn L B. Evaluation of vertical motion: Past, Present, and Future [J]. Wea Forecasting, 1991, 6(1): 65-73.
- [3] 林本达. 大气中垂直环流的成因和诊断[G]// 北方天气文集(6). 北京: 北京大学出版, 1987, 152-174.
- [4] Sutcliffe R C. A contribution to the problem of development[J]. Quart J Roy Meteor Soc, 1947, 73(317): 370-383.
- [5] Hoskins B J, Pedder M. The diagnosis of middle latitude synoptic development[J]. Quart J Roy Meteor Soc, 1980, 106(450): 707-719.
- [6] Trenberth K E. On the interpretation of the diagnostic quasi-geostrophic omega equation[J]. Mon Wea Rev, 1978, 106(1): 131-137.
- [7] Durran D R, Snellman L W. The diagnosis of synoptic scale vertical motion in an operational environment [J]. Wea Forecasting, 1987, 2(1): 17-31.
- [8] Hoskins B J, Draghici I, Darics H C. A new look at the - equation[J]. Quart J Roy Meteor Soc, 1978, 104(439): 31-38.
- [9] 岳彩军. Q 矢量及其在天气诊断分析中应用研究的进展[J]. 气象, 1999, 25(11): 3-8.
- [10] 岳彩军, 寿绍文. Q 矢量理论及其应用研究的进展[J]. 气象教育与科技, 1999, 22(2): 24-34.
- [11] 岳彩军, 寿亦萱, 姚秀萍, 等. 中国 Q 矢量分析方法的应用与研究[J]. 高原气象, 2005, 24(3): 450-455.
- [12] 岳彩军, 寿绍文, 姚秀萍. 21 世纪 Q 矢量在中国多种灾害性天气中应用研究的进展[J]. 热带气象学报, 2008, 24(5): 557-563.
- [13] Xu Q. Ageostrophic pseudovorticity and geostrophic C -vector forcing—a new look at Q vector in three dimensions [J]. J Atmos Sci, 1992, 49(12): 981-990.
- [14] 缪锦海. 广义 C 矢量和中尺度环流[G]// 85-906-08 课题组. 暴雨科学、业务试验和天气动力学理论的研究. 北京: 气象出版社, 1996, 235-237.
- [15] Kuo H-C, Nuss W A. P vectors as a diagnostic tool for synoptic-scale circulations[J]. Mon Wea Rev, 1995, 123(3): 776-789.
- [16] Kiladis G N, Thorncroft C D, Hall N M J. Three-dimensional structure and dynamics of African easterly waves. Part I: Observation[J]. J Atmos Sci, 2006, 63(9): 2212-2230.
- [17] Hall N M J, Kiladis G N, Thorncroft C D. Three-dimensional structure and dynamics of African easterly waves. Part II: Dynamical modes[J]. J Atmos Sci, 2006, 63(9): 2231-2245.
- [18] Funatsu B M, Waugh D W. Connections between potential vorticity intrusions and convection in the eastern tropical Pacific [J]. J Atmos Sci, 2008, 65(3): 987-1002.
- [19] Hutchinson T A, Bluestein H B. Prefrontal wind-shift lines in the plains of the United States[J]. Mon Wea Rev, 1998, 126(1): 141-166.
- [20] Lynch A H, Cassano E N, Assano J J, et al. Case studies of high wind events in Barrow, Alaska: Climatological context and development processes[J]. Mon Wea Rev, 2003, 131(4): 719-732.
- [21] Giordani H, Planton S. Modeling and analysis of ageostrophic circulation over the azores oceanic front during the SEMAPHORE Experiment[J]. Mon Wea Rev, 2000, 128(7): 2270-2287.
- [22] Mattocks C, Bleck R. Jet streak dynamics and geostrophic adjustment processes during the initial stages of lee cyclogenesis[J]. Mon Wea Rev, 1986, 114(11): 2033-2056.
- [23] Reasor P D, Montgomery M T. Low-wavenumber structure and evolution of the hurricane inner core observed by airborne dual-Doppler radar[J]. Mon Wea Rev, 2000, 128(6): 1653-1680.
- [24] Davies -Jones R. The frontogenetical forcing of secondary circulation. Part I: The duality and generalization of the Q vector[J]. J Atmos Sci, 1991, 48(4): 497-509.
- [25] Keyser D, Reeder M J, Reed R J. A generalization of Petterssen's frontogenesis function and its relation to the forcing of vertical motion[J]. Mon Wea Rev, 1988, 116(3-4): 762-780.
- [26] 李柏, 李国杰. 半地转 Q 矢量及其在梅雨锋暴雨研究中的应用[J]. 大气科学研究与应用, 1997, 12(1): 31-38.
- [27] Hoskins B J, Draghici J. The forcing of ageostrophic motion according to the semi-geostrophic equations and in an isentropic coordinate model[J]. J Atmos Sci, 1977, 34(12): 1859-1867.
- [28] 张兴旺. 修改的 Q 矢量表达式及其应用[J]. 热带气象学报, 1999, 15(2): 162-167.
- [29] 岳彩军. 梅雨锋气旋暴雨的 Q 矢量分析: 个例研究[J]. 气象学报, 2008, 66(1): 35-49.
- [30] 岳彩军. “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, 2009, 28(6): 1348-1364.
- [31] Yue C. The Q vector analysis of the heavy rainfall from Meiyu Front cyclone: A case study[J]. Acta Meteor Sin, 2009, 66(1): 35-49.
- [32] 张兴旺. 湿 Q 矢量表达式及其应用[J]. 气象, 1998, 24(8): 3-7.
- [33] 姚秀萍, 于玉斌. 非地转湿 Q 矢量及其在华北特大台风暴雨中的应用[J]. 气象学报, 2000, 58(4): 436-446.
- [34] 姚秀萍, 于玉斌. 完全 Q 矢量的引入及其诊断分析[J]. 高原气象, 2001, 20(2): 208-213.
- [35] Yao X, Yu Y, Shou S. Diagnostic analyses and application of the moist ageostrophic Q vector[J]. Adv Atmos Sci, 2004, 21(1): 96-102.
- [36] 岳彩军, 寿亦萱, 寿绍文, 等. Q 矢量的改进与完善[J]. 热带气象学报, 2003, 19(3): 308-316.
- [37] 刘汉华, 寿绍文, 周军. 非地转湿 Q 矢量的改进及其应用[J]. 南京气象学院学报, 2007, 30(1): 86-93.
- [38] Yue C, Shou S. A modified moist ageostrophic Q vector [J]. Adv Atmos Sci, 2008, 25(6): 1053-1061.

- [39] 彭春华, 洪国平, 胡伯威. 一种适用中国夏季暴雨系统诊断的非地转 Q 矢量 ω 方程[J]. 气象学报, 1999, 57(4): 483-492.
- [40] 高守亭. 大气中尺度运动的动力学基础及预报方法[M]. 北京: 气象出版社, 2007, 191-200.
- [41] Yang S, Gao S, Wang D. Diagnostic analyses of the ageostrophic \vec{Q} vector in the non-uniformly saturated, frictionless, and moist adiabatic flow[J]. J Geophys Res, 2007, 112 (D09114): 1-9, doi: 10.1029/2006JD008142
- [42] Barnes S L. The limited-area fine-mesh model and quasi-geostrophic theory: A disturbing case study[J]. Wea Forecasting, 1986, 1(1): 89-96.
- [43] Tapp R G. Vertical motion diagnostics related to Q -vectors, and the reorganisation of a cold system[J]. Meteor Atmos Phys, 1988, 39(2): 65-73.
- [44] Tapp R G, Oliver S E. Diagnosis and prediction of middle level cloud development associated with cold fronts over southern Australia[J]. Meteor Atmos Phys, 1989, 41(4): 231-246.
- [45] Stoelinga M T, Locatelli J D, Hobbs P V. Structure and evolution of winter cyclones in the central United States and their effects on the distribution of precipitation. Part VI: A mesoscale modeling study of the initiation of convective rainbands[J]. Mon Wea Rev, 2000, 128(10): 3481-3500.
- [46] Locatelli J D, Stoelinga M T, Hobbs P V. Organization and structure of clouds and precipitation on the mid-Atlantic coast of the United States. Part VII: Diagnosis of a nonconvective rainband associated with a cold front aloft [J]. Mon Wea Rev, 2002, 130(2): 278-297.
- [47] Pyle M E, Keyser D, Bosart L F. A diagnostic study of jet streaks: Kinematic signatures and relationship to coherent tropopause disturbances[J]. Mon Wea Rev, 2004, 132(1): 297-319.
- [48] Martin J E. Lower-tropospheric height tendencies associated with the shearwise and transverse components of quasigeostrophic vertical motion[J]. Mon Wea Rev, 2007, 135(7): 2803-2809.
- [49] Rogers, E, L F Bosart. A diagnostic study of two intense oceanic cyclones[J]. Mon Wea Rev, 1991, 119(4): 965-996.
- [50] 岳彩军, 寿亦萱, 寿绍文, 等. 湿 Q 矢量释用技术及其在定量降水预报中的应用研究[J]. 应用气象学报, 2007, 18(5): 666-675.
- [51] Boyle J S, Bosart L F. Cyclone-anticyclone couplets over north America. Part II: analysis of a major cyclone event over the eastern United States[J]. Mon Wea Rev, 1986, 114(12): 2432-2465.
- [52] Moore J T, Blakley P D. The role of frontogenetical forcing and conditional symmetric instability in the midwest snowstorm of 30-31 January 1982[J]. Mon Wea Rev, 1988, 116(11): 2155-2171.
- [53] O'Handley C, Bosart L F. Subsynoptic-scale structure in a major synoptic-scale cyclone[J]. Mon Wea Rev, 1989, 117(3): 607-630.
- [54] Gyakum J R. Meteorological precursors to the explosive intensification of the QE II storm[J]. Mon Wea Rev, 1991, 119(5): 1105-1131.
- [55] Chen Y-L. Some synoptic-scale aspects of the surface fronts over Southern China during TAMEX [J]. Mon Wea Rev, 1993, 121(1): 50-64.
- [56] Bullock T A, Gyakum J R. A diagnostic study of cyclogenesis in the Western North Pacific Ocean[J]. Mon Wea Rev, 1993, 121(1): 65-75.
- [57] Locatelli J D, Martin J E, Castle J A, et al. Structure and evolution of winter cyclones in the central United States and their effects on the distribution of precipitation. Part III: The development of a squall line associated with weak cold frontogenesis aloft[J]. Mon Wea Rev, 1995, 123(9): 2641-2662.
- [58] Barents S L. Omega diagnostics as a supplement to LFM/MOS guidance in weakly forced convective situations[J]. Mon Wea Rev, 1985, 113(12): 2122-2134.
- [59] Wilson K J, Stern H. The Australian summertime cool change. Part I: Synoptic and subsynoptic scale aspects[J]. Mon Wea Rev, 1985, 113(2): 177-201.
- [60] Doswell C A. The distinction between large-scale and mesoscale contribution to severe convection: A case study example[J]. Wea Forecasting, 1987, 2(1): 3-16.
- [61] Keshishlan L G, Bosart L F. A case study of extended east coast frontogenesis[J]. Mon Wea Rev, 1987, 115(1): 100-117.
- [62] Dole R M, Black R X. Life cycles of persistent anomalies. Part II: The development of persistent negative height anomalies over the North Pacific Ocean[J]. Mon Wea Rev, 1990, 118(4): 824-846.
- [63] Riley G T, Bosart L F. The Windsor locks, Connecticut tornado of 3 October 1979: An analysis of an intermittent severe weather event[J]. Mon Wea Rev, 1987, 115(8): 1655-1677.
- [64] Gyakum J R. Evolution of a surprise snowfall in the United States Midwest[J]. Mon Wea Rev, 1987, 115(10): 2322-2345.
- [65] 李英, 陈联寿, 雷小途. 变性台风 Winnie(9711) 环流中的锋生现象[J]. 大气科学, 2008, 32(3): 629-639.
- [66] Cao J, Gao S. Extended interpretations in Q vector analyses and applications in a torrential rain event[J]. Geophys Res Lett, 2007, 34, L15804, doi: 10.1029/GL030781.
- [67] White G H. Estimates of the seasonal mean vertical velocity fields of the extratropical northern hemisphere[J]. Mon Wea Rev, 1983, 111(7): 1418-1433.
- [68] Keyser D, Schmidt B D, Duffy D G. Quasi-geostrophic vertical motions diagnosed from along- and cross-isentropic components of the Q vector[J]. Mon Wea Rev, 1992, 120(5): 731-741.
- [69] Kurz M. Synoptic diagnosis of frontogenetic and cyclogenetic processes[J]. Meteor Atmos Phys, 1992, 48(1): 77-91.
- [70] Kurz M. The role of frontogenetic and frontolytic wind field effects during cyclonic development[J]. Meteor Appl, 1997(4): 353-363.
- [71] Barnes S L, Colman B R. Quasigeostrophic diagnosis of cyclogenesis associated with a cut off extratropical cyclone - The Christmas 1987 storm[J]. Mon Wea Rev, 1993, 121(6): 1613-1634.
- [72] Barnes S L, Colman B R. Diagnosing an operational numerical model using Q -vector and potential vorticity concepts [J]. Wea Forecasting, 1994, 9(1): 85-102.
- [73] Schar C, Wernli H. Structure and evolution of an isolated semi-geostrophic cyclone[J]. Quart J Roy Meteor Soc, 1993, 119(509): 57-90.
- [74] Jusem J C, Atlas R. Diagnostic evaluation of vertical motion forcing mechanism by using Q -vector partitioning [J]. Mon Wea Rev, 1998, 126(8): 2166-2184.
- [75] Morgan M C. Using piecewise potential vorticity inversion to diagnose frontogenesis. Part I: A partitioning of the Q vector applied to diagnosing surface frontogenesis and vertical motion[J].

- Mon Wea Rev, 1999, 127(12): 2796–2821.
- [76] Martin J E. Quasi-geostrophic forcing of ascent in the occluded sector of cyclones and the trowel airstream[J]. Mon Wea Rev, 1999, 127(1): 70–88.
- [77] Martin J E. The separate roles of geostrophic vorticity and deformation in the midlatitude occlusion process [J]. Mon Wea Rev, 1999, 127(10): 2404–2418.
- [78] Martin J E. The role of shearwise and transverse quasigeostrophic vertical motions in the midlatitude cyclone life cycle[J]. Mon Wea Rev, 2006, 134(4): 1174–1193.
- [79] Donnadille J, Cammas J-P, Mascart P, et al. FASTEX IOP 18: a very deep tropopause fold. II: quasi-geostrophic omega diagnoses[J]. Quart J Roy Meteor Soc, 2001, 127 (577): 2269–2286.
- [80] Yue C, Shou S, Lin K, et al. Diagnosis of the heavy rain near a Meiyu front using the wet Q vector partitioning method[J]. Adv Atmos Sci, 2003, 20(1): 37–44.
- [81] 岳彩军, 董美莹, 寿绍文, 等. 改进的湿 Q 矢量分析方法及梅雨锋暴雨形成机制[J]. 高原气象, 2007, 26(1): 165–175.
- [82] Yue C. Quantitative analysis of torrential rainfall associated with typhoon landfall: A case study of typhoon Haitang (2005) [J]. Progr Natur Sci, 2009, 19(1): 55–63.
- [83] Posselt D J, Martin J E. The effect of latent heat release on the evolution of a warm occluded thermal structure[J]. Mon Wea Rev, 2004, 132(2): 578–599.
- [84] 杨晓霞, 沈桐立, 刘还珠, 等. 非地转湿 Q 矢量分解在暴雨分析中的应用[J]. 高原气象, 2006, 25(3): 464–475.
- [85] Thomas B C, Martin J E. A synoptic climatology and composite analysis of the Alberta Clipper [J]. Wea Forecasting, 2007, 22(2): 315–333.
- [86] 梁琳琳, 寿绍文, 苗春生. 应用湿 Q 矢量分解理论诊断分析“05.7”梅雨锋暴雨[J]. 南京气象学院学报, 2008, 31(2): 167–175.
- [87] Sanders F, Hoskins B. An easy method for estimation of Q -vectors from weather maps[J]. Wea Forecasting, 1990, 5(2): 346–353.
- [88] Chen S J, Bai L S. Omega diagnosis of a cold vortex with severe convection[J]. Wea Forecasting, 1988, 3(4): 296–304.
- [89] Wetzel S W, Martin J E. An operational ingredients-based methodology for forecasting midlatitude winter season precipitation[J]. Wea Forecasting, 2001, 16(1): 156–171.
- [90] 陈威, 刘先昌, 袁美英, 等. 暴雨落区的诊断预报方法 [J]. 黑龙江气象, 2000, (3): 22–26.
- [91] 周功挺, 叶子祥, 余贞寿. 浙南梅汛期大暴雨天气分型及诊断分析[J]. 气象, 2006, 32(5): 67–73.
- [92] Grumm R H, Siebers A L. Operational Q -vector analysis for heavy precipitation forecasting[C]// Eighth conference on numerical weather prediction, February 22–26, 1988, Baltimore, Maryland, AMS.
- [93] Nuss W A, Titley D W. Diagnosis of oceanic cyclogenesis using surface-based on Q vectors[J]. Wea Forecasting, 1994, 9(1): 136–155.
- [94] Wiesmueller J L, Zubrick S M. Evaluation and application of conditional symmetric instability, equivalent potential vorticity, and frontogenetic forcing in an operational forecast environment [J]. Wea Forecasting, 1998, 13(1): 84–100.
- [95] 刘敦训, 程相坤. 应用 Q 矢量分析方法结合数值预报产品诊断区域暴雨[J]. 山东气象, 1997, 17(4): 12–16.
- [96] 丁建军, 胡文东, 陈晓娟, 等. 2003 年 7 月 31 日固原暴雨天气数值模拟[J]. 干旱气象, 2004, 22(1): 38–43.
- [97] 姜学恭, 石岚, 孙永刚, 等. Q 矢量分析方法在内蒙古暴雨预报中的应用[J]. 内蒙古气象, 1999, 4: 8–9.
- [98] 吴爱敏, 郭江勇. HLAFS 资料在短期降水、气温 MOS 预报方法中的应用[J]. 干旱气象, 2006, 24(2): 45–48.
- [99] 樊明, 周军, 冯军. 几种物理量在陇南暴雨预报中的初步应用[J]. 干旱气象, 2006, 24(4): 30–34.

Advances in Studies of Q Vector

YUE Cai-jun^{1, 2}, CAO Yu³, SHOU Shao-wen³

(1. Shanghai Typhoon Institute, China Meteorological Administration, Shanghai 200030;

2. Laboratory of Typhoon Forecast Technique/China Meteorological Administration, Shanghai 200030;

3. Jiangsu Key Laboratory of Disaster Weather, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044)

Abstract: The concept and analysis of Q vector were first introduced by Hoskins in 1978. During the last three decades, the Q vector has been intensively analyzed and widely applied to synoptic diagnosis and operational forecast. The theories of Q vector mainly include two-dimensional and three-dimensional quasi-geostrophic Q vector derived from quasi-stationary, quasi-geostrophic, adiabatic, frictionless equations on f -plane, generalized Q vector under AB approximation, semi-geostrophic Q vector under GM approximation, ageostrophic Q vector derived from quasi-stationary, adiabatic, frictionless primitive equations on f -plane, ageostrophic Q vector with diabatic effects and further modification, and moist ageostrophic Q vector in non-uniformly saturated atmosphere. The applications of Q vector mainly contain improvement of diagnostic ability by the partition of Q vector and of accurate weather forecast by the divergence of Q vector, and the application of Q vector to quantitative precipitation forecast (QPF) by the iterative calculation of equation with the forcing of divergence of Q vector and water vapor. This review summarizes main results from studies of Q vector from 1978 to now pointing out that the problem still exists at this stage and discusses the further perspective of research of Q vector.

Key words: Q vector; Diagnostic analysis; Application in weather forecast; Advances