

Q 矢量及其在天气诊断分析 中应用研究的进展

岳彩军

(南京气象学院研究生部, 210044)

提 要

对 Q 矢量的理论研究动态及其主要应用结果作了综合评述, 并对该领域的研究前景作了一定的展望。

关键词: Q 矢量 ω 方程 诊断分析 进展

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^[1]。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和发展的一个重要指标, 是对天气预报以及与暴雨有关的研究工作十分重要的一个物理量, 掌握它的诊断方法, 对于天气预报, 特别是对暴雨预报有着重要的意义^[2]。在科学文献中, Q 矢量方法被誉为业务垂直运动估算的高级方法^[3]。本文从 Q 矢量产生的背景、Q 矢量概念的提出、其在日常台站工作中的应用以及 Q 矢量理论的进一步完善和发展等各方面出发, 全面、系统地介绍关于这一方法的理论研究及其在实际天气诊断分析业务工作中的应用状况, 并指出对其理论及应用研究的未来方向。

1 Q 矢量产生的背景

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。从某种角度讲, 常规方法的天气预

报就是这一理论的定性应用。早在 40 年代(20 世纪, 下同)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。50 年代以后, 得到了一般形式的 $\omega(p$ 坐标系中的垂直速度)方程^[4]。到了 70 年, 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^[3]。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, 这使定量计算时, 至少需要两层的观测资料, 定性诊断也带来不便^[1]。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的强迫产生的^[4]。当这两项的符号相反时, 很难定性地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^[1]。所以这种形式的方程在定量计算 ω 及定性应用上有一定的困难。

Sutcliffe^[5](1947)在他的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。他将对流层上下层的“相对散度”作为环流

系统发展的指标。这一发展指标可以表示成热成风对地面地转涡度的平流和对热成风涡度平流之和。在 Sutcliffe 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。经实例分析表明,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^[6]。Trenberth^[7]采用类似 Sutcliffe 的方法将 ω 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 ω 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这个缺点,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^[8]。但同 Sutcliffe 一样,在该形式的强迫项中忽略了地转变形项的作用,因此这种形式的 ω 方程仅适用于斜压性比较小的对流层中层^[4]。

2 Q 矢量概念的提出

Hoskins 等^[9](1978)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能描述所有过程的作用,不仅避免了传统 ω 方程的缺点,而且有物理意义清楚、计算简单的特点,同时还避免了 Sutcliffe 理论和 Trenberth 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)。他将准地转强迫项表示成一个矢量的散度,这个矢量称为 Q 矢量。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^[4]。此外,由于 Q 矢量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,因而还可以预报锋生或锋消^[1]。相对于 Sutcliffe 理论及 Trenberth 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^[6]。如果从数值计算这个角度来看,使用 Hoskins^[8](1978)提出的 Q 矢量方案将是最佳选择。所以 Q 矢量散度可以精确表示 ω 方程的强迫项。Hoskins 的这一发展可称为“Q 矢量分析方法”^[4]。Q 矢量方法如果以网格点的形式,则很容易在预报中得到应用, Q 矢量的散度和 Q 矢量本身可以在很多层计算和显示,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^[3]。Barnes^[10]用 Q 矢量分析方法建立了一个微机诊断系统,用于实际天气个例分析,将分析结果与有限区域数值预报进行比较。结果表明, Q 矢量分析方法可以作为一种诊断工具用于短期天气预报业务。在天气图上, Q 矢量场的标绘对实际预报业务来讲,将是一个很重要的数学工具^[6]。这些充分说明 Q 矢量是一个对天气发展过程诊断和预报相当有用的物理量, Q 矢量是目前用来计算垂直运动最好的一种工具^[8]。

3 Q 矢量在实际业务工作中的应用

Q 矢量是一种准地转的诊断量,可对描述系统发展提供更多的信息^[11]。自 Hoskins 在 1978 年提出准地转垂直运动可由 Q 矢量散度来诊断后,基于此理论上,人们对 Q 矢量的认识又进入一个新阶段。在 80 年代后期, Q 矢量在实际业务工作中得到了广泛的应用。白乐生^[4](1988)用准地转理论的方法分析了在辽宁地区发生发展的一次强对流天气过程。结果表明, Q 矢量分析比较清楚地揭示了这次过程中次天气尺度场的垂直运动的演变及其与强对流系统的联系。与此同时, Q 矢量亦被用于对锋生的研究。Keyser 等^[12](1988)提出标量锋生函数的矢量广义化,在研究锋生的过程中,不仅考虑了水平温度梯度大小的拉格朗日变化对锋生的作用,而且

考虑了水平温度梯度方向的拉格朗日变化对锋生的作用。通过把 Q 矢量强迫作用分离为矢量锋生函数的大小分量和方向分量,为在三维斜压扰动中分离出与锋区有关的垂直环流提供了可能的动力学依据:锋面环流与 Q 矢量的大小分量有关,而基本环流(与斜压扰动有关的环流)与方向分量有关。Sanders 等^[13](1990)在研究从天气图上估计 Q 矢量的简易方法时,也发现对于锋生形势应用 Q 矢量分析将更为准确。有人^[14]研究指出,用 Q 矢量计算的锋生函数具有预报性,为预报员提供了产生强降水天气过程的大尺度系统发生发展信息,尤其是在中纬度近地面,它能近似代表非地转风,这一点在实际预报工作中非常实用。进入 90 年代, Q 矢量已被广泛应用于台站日常业务工作中。郁淑华、骆红^[15](1991)对一次川东北涡暴雨过程进行了 Q 矢量分析,发现了为预报低涡的生成、维持有益的依据。最近也有人^[16]通过 Q 矢量诊断分析,给出东北冷涡加强和减弱与垂直运动及大尺度强迫作用的关系,结果指出, Q 矢量散度和旋度与东北冷涡的加强和减弱有较好的对应关系,特别是 Q 矢量旋度为东北冷涡的加强和减弱的预报提供了有价值的信息。郁淑华^[17](1993)还试图对一次低压槽南端伸入高原区域的过程进行 Q 矢量分析,以探讨长波槽在高原上南伸的物理机制。接着^[18]她又应用 Q 矢量分析了一次高空槽在青藏高原上诱发切变线的过程,发现了产生、维持切变线的重要机制,并指出高原切变线的产生、维持还与锋生情况有一定的关系,有人^[19]应用 Q 矢量分析方法诊断宁夏夏季的降水过程指出:关于降水系统,用 Q 矢量表示的准地转强迫作用对于其系统的发生、发展有着重要意义。尤其是 Q 矢量散度均能为降水天气预报提供大量的信息。杨小燕等^[14](1995)也应用准地转 Q 矢量理论分析了一次连续暴雨过程,指出: Q 矢量理论固有的非

常有用的特性,对造成强对流天气的不稳定斜压大气有很好的适用性。 Q 矢量与非地转风的对应关系有助于了解揭示非地转运动造成的大尺度不稳定能量释放的本质和造成暴雨的内在机制,这是其它准地转理论所不及的。有人^[20]在一定的天气环境背景条件下,考察了 Q 矢量在强对流暴雨区诊断预报中的应用。最近,还有人^[21]通过计算多层 Q 矢量的散度、旋度及 Q 矢量的温度平流等量值,来探析一次台风暴雨突然增幅的原因。其实, Q 矢量也能够用于诊断江淮梅雨锋上次级环流的活动,也能为梅雨锋暴雨的落区预报提供信息。有人^[22]应用 Q 矢量分析方法对 20 次伴有暴雨的江淮梅雨锋过程进行分析,揭露了梅雨锋暴雨期对流层低层 Q 矢量散度场的分布特征以及与中、低空主要天气系统和暴雨带之间的时空配置关系,指出了 Q 矢量散度场对江淮梅雨锋暴雨的落区有较好的预报意义。并发现 Q 矢量散度辐合区与梅雨锋云带有良好的对应关系,但与梅雨锋暴雨区的配合并非存在一一对应关系,认为这可能是准地转理论不能完全适用于斜压过程以及由于对流的发展、非绝热加热对上升运动显示了较重要的作用有关。也有人指出^[23],利用 Q 矢量的散度来描绘垂直速度场的分布时存在一定的误差,如果在分析过程中考虑到静力稳定度参数随高度变化的影响,将会给垂直速度场提供一个更接近的描述。

通过 Q 矢量诊断分析理论在实际业务工作的应用,使得人们对 Q 矢量的认识得到了进一步深化。实践证明, Q 矢量的确能揭示天气系统发生发展及其演变过程中垂直运动的特性,是日常工作中制作天气预报的一个非常重要的参考依据。同时也应指出,在引入 Q 矢量散度场作诊断分析时,还必需与天气形势分析及其他物理量相结合才会有较好的效果。也不可否认,随着人们认识的深入,有关 Q 矢量理论的某些方面需要重新认识和完

善。例如,在三维、半地转、非地转及湿、非绝热等条件下, Q 矢量又将如何讨论?这里尚有许多工作可做。

4 在理论上对 Q 矢量的进一步深入研究与探讨

由于 Q 矢量分析方法在实际业务中有着广泛的应用价值,因而进入 90 年代以后人们对它的研究更加深入和具体。

Davies-Jones^[24](1991) 从原始方程组(PE)出发,提出广义 Q 矢量的问题,并推导出以广义 Q 矢量散度作强迫项的非地转的 ω 方程。XuQing^[25](1992) 在准地转 Q 矢量方程的基础之上引进了垂直非地转涡度方程,并将其和准地转 Q 矢量的两个分量方程合并在一起,得到一个完整的三维准地转诊断方程,即 C 矢量方程。 C 矢量方程是准地转 Q 矢量方程的一个三维扩展, C 矢量概念的提出使得非地转环流的分析不仅简单、直接,而且为非地转流提供了一个新的求解方法。

研究表明,分解 Q 矢量也有助于展示有气象意义的孤立过程和结构,而这些恰又是总的(Total) Q 矢量难以确定的,因而在研究锋生和垂直运动的物理机制时, Q 矢量分解是一个有效的工具。Keyser 等^[26](1992) 发现将 Q 矢量分解为分别平行和垂直于等温线的两部分时,导致了与斜压扰动相关的垂直运动分布的一个有意义的尺度分离。和等温线正交的 Q 矢量分布具有锋区尺度且呈现带状结构,而平行等温线的 Q 矢量则表现出一个天气尺度分布且呈环状结构,这种 Q 矢量分解法被广泛用在天气学上。例如 Barnes^[27](1993) 将此分解法应用于诊断分析 1987 年圣诞节在科罗拉多州东北部地区出现的一次风暴过程,非常清楚地解释了在此次天气过程中一个发展成主导涡旋的次级最大涡度值出现的成因。此外,Schar 等^[28](1993) 的分解方式基本类似于 Davies-Jones。通常情况下,是将 Q 矢量分解

在沿着等温线的自然坐标系中。最近 Jusem^[29] 等(1998) 则讨论了另外一种新的分解方法,即将 Q 矢量分解为分别平行和垂直于等高线的两部分,尤其是 Q 矢量被分解在沿着地转风的自然坐标系中。将其应用于对实际天气形势的网格分析中,得出了重要的结论。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了 Q 矢量分解呢?这取决于所进行客观分析的目的。如果客观上是讨论地转引起的水平温度大小和方向的各自变化,那么等温线(或等熵线或等密度线)作为参考线是合适的。如果客观上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是较为有利的。譬如说,仅考虑流体曲率对垂直运动强迫产生的影响,采用后者可以达到目的,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评估(除非等温线和等高线平行)。

近两年,国内学者关于 Q 矢量的理论研究也非常活跃。我们知道,在准地转近似下,对非地转风的消弱作用很大,在应用于非地转性明显的中尺度系统诊断研究时就存在一定的缺陷。因此李柏等^[30](1997) 引入一种新的 Q 矢量即半地转 Q 矢量。从半地转 Q 矢量表征的 ω 方程看,它不仅具有与准地转 Q 矢量所表征的 ω 方程一样的简化形式,而且从新的角度实现了简化描述大气三维空间的相互制约机制。同时它又较准地转 Q 矢量更加完善,它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。通过对实际天气个例诊断分析结果比较,也充分证明了半地转 Q 矢量的优越性。事实上,无论是准地转 Q 矢量、广义 Q 矢量还是半地转 Q 矢量,都是假定大气是绝热条件下得到的,而实际大气并非绝热的。为了能较真实地反映大气状况,张兴

旺^[3](1998)在考虑了大气凝结潜热作用的情况下,提出了湿 $Q(Q^*)$ 矢量的概念,并由非绝热的原始方程组出发,推导出非地转的湿 Q 矢量表达式以及用湿 Q 矢量散度作唯一强迫项的非地转 ω 方程。利用常规气象资料作实例分析,结果表明湿 Q 矢量与次级环流有良好的对应关系,特别是低纬度地区,湿 Q 矢量散度与暴雨落区的相应配置比准地转 Q 矢量散度与暴雨落区的相应配置更准确。同时他还指出,在实际大气中 ω 场并非是严格的波状特征函数,这就会直接影响湿 Q 矢量散度与垂直运动的对应关系。因此在做降水落区诊断分析时,对湿 Q 矢量散度的计算应加上 $\nabla \cdot Q^* \propto \omega$ 的约束条件,以便提高降水落区判断的准确率。

5 总结

从1978年Hoskins提出 Q 矢量这个概念以来到目前已有20年了。回顾20年的研究历史可见,人们对 Q 矢量理论及其应用的认识在不断地深化。近10年来,在理论上对 Q 矢量的理论研究更加深入、具体。 Q 矢量、广义 Q 矢量、 C 矢量、半地转 Q 矢量及非地转湿 Q 矢量的提出; Q 矢量的分解研究,无不说明关于 Q 矢量的理论研究已经相当完善与成熟了。此外, Q 矢量较其它诊断工具有更多的优越性。对于多数天气系统,利用 Q 矢量不仅能作出简易、准确的定性判断,而且能提供更精确的定量计算,因而其在实际业务工作中得到了广泛的应用。但遗憾的是,应用所依据的理论基本上仍停滞在1978年时期的 Q 矢量理论水平上。因此,未来对 Q 矢量的研究重点应放在对其新理论的应用研究上。

综上所述, Q 矢量的理论及其在天气诊断分析应用的研究已取得了很多成果,但还有许多问题值得进一步深入研究。

(1)应着重探讨如何将新近的 Q 矢量理论及其计算方案引进到实际业务中去,如何在实际应用过程中建立起概念化模型,进而

把理论应用提高到一个更高、更新的水平。

(2)如何将系统化的理论研究成果进行系统性的应用,进一步地说,如何在实际业务应用过程中,依据完善、先进的 Q 矢量理论,研制出适合台站日常天气预报的系统化的 Q 矢量诊断分析工具软件,从而能充分发挥其良好的诊断工具作用,达到理论研究的真正目的。

(3)从理论上进一步加强对 C 矢量的理论研究,因为 C 矢量比 Q 矢量具有更多的优越性,如何将 C 矢量理论逐步完善起来,将是今后研究的一个重要方向。

(4) C 矢量从提出到现在,还没有人将其真正应用到实际业务工作中去,因而加强对其现有理论的应用研究是极有价值的,也是非常有意义的一项工作。

总之,将来对 Q 矢量理论及其应用的研究,应必需综合、全面而有重点地考虑其各种特性。只有这样,才能深入了解它的诊断机制,从而在实际业务工作中对其运用自如,进而使日常短期天气业务预报准确率较以前有更大幅度地提高。

参考文献

- 1 林本达. 大气中垂直环流的成因和诊断. 北方天气文集(6). 北京:北京大学出版社,1987.
- 2 郑良杰主编. 中尺度天气系统的诊断分析和数值模拟. 北京:气象出版社,1989.
- 3 Lawrence B. Dunn. Evaluation of vertical motion; Past, Present, and Future. Wea. Forecasting, 1991, 6(1): 65~73.
- 4 白乐生. 准地转 Q 矢量分析及其在短期天气预报中的应用. 气象, 1988, 14(8): 25~30.
- 5 Sutcliffe, R. C. A contribution to the problem of development. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 1947, 73(317): 370~383.
- 6 Hoskins, B. J. and M. Pedder. The diagnosis of middle latitude synoptic development. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 1980, 106(450): 707~719.
- 7 Trenberth, K. E.. On the interpretation of the diagnostic quasi-geostrophic omega equation. Mon. Wea. Rev., 1978, 106(1): 131~137.

- 8 Durran, D. R. and L. W. Snellman. The diagnosis of synoptic scale vertical motion in an operational environment. *Wea. Forecasting*, 1987, 2(1): 17~31.
- 9 Hoskins, B. J., I. Dagbici and H. C. Darics. A new look at the ω -equation. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 1978, 104(1): 31~38.
- 10 Barends, S. L. . Omega diagnostics as a supplement to LFM/MOS guidance in weakly forced convective situations. *Mon. Wea. Rev.*, 1985, 113(12): 2122~2134.
- 11 盛华, 陶诗言. 青藏高原与洛基山背风坡气旋的对比分析(二)—诊断分析. *大气科学*, 1988, 12(4): 338 页.
- 12 Keyser, D., M. J. Reeder and R. J. Reed. A generalization of Petterssen's frontogenesis function and its relation to the forcing of vertical motion. *Mon. Wea. Rev.*, 1988, 116(3~4): 762~780.
- 13 Sanders, F. and B. Hoskins. An easy method for estimation of Q -vectors from weather maps. *Wea. Forecasting*, 1990, 5(2): 346~353.
- 14 杨小燕, 曹希孝. 准地转 Q 矢量诊断场与暴雨关系的分析. *气象*, 1995, 21(11): 17~21.
- 15 郁淑华, 骆红. 川东北暴雨环境场及 Q 矢量分析. *高原气象*, 1991, 10(1): 70~76.
- 16 孙永罡等. 东北冷涡的 Q 矢量诊断分析. *黑龙江气象*, 1997, (3): 8 页.
- 17 郁淑华. 一次高原北侧槽个例的 Q 矢量分析. *高原气象*, 1993, 12(4): 437~441.
- 18 郁淑华. 一次高空槽在青藏高原上诱发切变线的 Q 矢量分析. *应用气象学报*, 1994, 5(1): 109~112.
- 19 车锡果等. 准地转 Q 矢量分析方法在宁夏夏季降水天气预报中的应用. *高原气象*, 1995, 14(2): 192~197.
- 20 周一鹤等. 局地强对流暴雨胁区的诊断分析, 北方气旋文集(6). 北京: 北京大学出版社, 1987.
- 21 邓之瀛, 杨美川. 8506 台风暴雨突然增幅的诊断分析. *大气科学研究与应用(十二)*, 1997, 1: 25~30.
- 22 汪克付, 叶金印. 江淮梅雨锋暴雨过程 Q 矢量分析及落区预报. *气象*, 1995, 21(3): 40~34.
- 23 Tapp, R. G. . Vertical motion diagnostics related to Q -vectors, and the reorganisation of a cold frontal system. *Meteorol. Atmos. Phys.*, 1988, 39(2): 65~73.
- 24 Davies-Jones, R. The frontogenetical forcing of secondary circulations. Part I: the duality and generalization of the Q vector. *J. Atmos. Sci.*, 1991, 48(4): 497~509.
- 25 Xu, Q. . Ageostrophic pseudovorticity and geostrophic C -vector forcing—a new look at Q vector in three dimensions. *J. Atmos. Sci.*, 1992, 49(12): 981~990.
- 26 Keyser, D., B. D. Schmidt and D. G. Duffy. , Quasi-geostrophic vertical motions diagnosed from along- and cross-isentrope components of the Q vector. *Mon. Wea. Rev.*, 1992, 20(5): 731~741.
- 27 Barnes S. L. and B. R. Colman. Quasigeostrophic diagnosis of cyclogenesis associated with a cutoff extratropical cyclone—The Christmas 1987 storm. *Mon. Wea. Rev.*, 1993, 121(6): 1613~1634.
- 28 Schar, C. and H. Wernli. Structure and evolution of an isolated semi-geostrophic cyclone. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 1993, 119(509): 57~90.
- 29 Jusem, J. C. and Atlas, R. , Diagnostic evaluation of vertical motion forcing mechanisms by using Q -vector partitioning. *Mon. Wea. Rev.*, 1998, 126(8): 2166~2184.
- 30 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. *大气科学研究与应用(十二)*, 1997, 1: 31~38.
- 31 张兴旺. 湿 Q 矢量表式及其应用. *气象*, 1998, 24(8): 3~7.

The Advances on Q -Vector and Its Application to Synoptic Diagnosis

Yue Caijun

(Department of Graduate, Nanjing Institute of Meteorology, Nanjing 210044)

Abstract

A substantial review on the developments of the theoretic studies of Q -vector and the results of its main application is conducted completely and systematically, along with a prospective study in this field.

Key Words: Q -vector omega equation diagnosis advances