

文章编号: 1004-4965 (2008) 05-0557-07

21世纪 Q 矢量在中国多种灾害性天气中应用研究的进展

岳彩军¹, 寿绍文², 姚秀萍³

(1. 中国气象局上海台风研究所, 上海 200030; 2. 南京信息工程大学大气科学学院, 江苏 南京 210044; 3. 中国气象局培训中心, 北京 100081)

摘 要: 伴随着 Q 矢量理论的完善与发展, 人们也对 Q 矢量的分析方法开展了广泛的应用研究, 不仅用于诊断分析研究暴雨、台风、暴雪、强对流及沙尘暴等多种灾害性天气的成因, 同时在天气预报工作中也扮演着越来越重要的角色。对进入21世纪以来中国对 Q 矢量的应用研究工作进行全面、系统地回顾与总结, 并对未来关于 Q 矢量的应用研究工作进行了讨论与展望。

关 键 词: Q 矢量; 灾害性天气; 诊断分析与预报; 应用研究

中图分类号: P433

文献标识码: A

1 引 言

众所周知, 天气现象的发生、演变与垂直运动密切相关, 因此, 对于垂直运动的研究不仅有利于揭示天气现象的发生及演变规律, 同时也有利于对其进行预报。但到目前为止, 垂直运动仍是一个不可直接通过观测手段得到的物理量, 需要通过对其它观测物理量进行诊断分析而得到, 因此, 用于计算垂直运动的诊断工具的性能就显得尤为重要。在科学文献中, Q 矢量被誉为诊断垂直运动的一种高级工具^[1]。自1978年Hoskins等^[2]提出准地转 Q 矢量之后, 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中, 也就是说, Q 矢量不仅是一种天气诊断分析工具, 同时在天气预报工作中也扮演着重要角色。我国是1980年代后期引入 Q 矢量分析方法的, 且备受广大气象科研与业务工作者青睐, 岳彩军^[3]曾对上世纪我国关于 Q 矢量应用研究工作状况进行了全面回顾。随着对 Q 矢量理论的熟悉与深入了解, 国内学者在对其进行应用研究的同时, 又对 Q 矢量理论进行了不断完善与发展, 先后提出了半地转 Q 矢量^[4]、修改的 Q 矢量(非地转干 Q 矢量)^[5]、湿 Q 矢量(非地转湿 Q 矢量)^[6-9]、改进的湿 Q 矢量^[10]以及改进后的非地转湿 Q 矢量^[11]。最近, 岳彩军等^[12]对我国关于 Q 矢量理论和方法的研究工作进行了较为系统的总结, 并具体给出了每一种 Q 矢量

的计算表达式及以其散度作为强迫项的 ω 方程的计算表达式, 且对每一种 Q 矢量分析方法的特点给予了简单介绍和说明。另一方面, 伴随着 Q 矢量理论研究的不断深入, 更凸显 Q 矢量的优越性, 从而又进一步推动了人们对 Q 矢量分析方法的应用研究。 Q 矢量分析方法已被广泛应用于我国不同区域发生的不同类型灾害性天气(如暴雨、台风、暴雪、强对流及沙尘暴等)的诊断分析研究。那么, 进入21世纪之后, 国内对 Q 矢量的具体应用研究状况如何? 未来又将如何更进一步挖掘出 Q 矢量这种先进诊断工具应用在天气预报上的潜能? 都是值得我们去全面总结与认真思考的。本文将全面回顾、总结我国进入21世纪以来对 Q 矢量的应用研究工作, 同时也将探讨未来如何能更有效地使用 Q 矢量进行天气过程的诊断分析研究, 更为重要的是, 如何发挥出其在天气预报工作中的潜能。

2 Q 矢量在暴雨(强降水)研究中的应用

Q 矢量作为一种先进的天气诊断分析工具, 被我国各地气象工作者广泛用于暴雨(强降水)的诊断分析研究, 且主要是通过计算 Q 矢量、 Q 矢量散度、 Q 矢量涡度以及 Q 矢量锋生函数。下面将从我国不同地理区域划分着手进行综述性研究。 Q 矢量在西南地区有着较为广泛的应用。李英等^[13]、郭荣芬等^[14-16]以及鲁亚斌等^[17]应用湿 Q

收稿日期: 2007-04-11; 修订日期: 2007-06-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(40405009; 40075009; 40205008; 40875025); 江苏省气象灾害重点实验室(南京信息工程大学)开放课题(KJS0602); 上海市气象局科研开发项目(04A06)共同资助

通讯作者: 岳彩军, 男, 安徽蚌埠人, 副研究员, 博士, 主要从事中尺度动力学、海气相互作用的研究。E-mail: yuecaijun2000@163.com

矢量分析云南省不同暴雨(强降水)天气个例时主要发现,湿 Q 矢量流场的辐合中心(辐合线)与强降水区吻合,大暴雨出现在(700 hPa)湿 Q 矢量辐合及散度负值中心处。杨洋等^[18]用准地转 Q 矢量及其散度、旋度、锋生函数对 3 个影响贵州的 MCC 个例进行了诊断分析,发现这些诊断场的强度变化与 MCC 及其暴雨的发生与发展有很好的对应关系。郁淑华^[19]分析四川盆地西、北部一次大暴雨过程发现,对流层中低层的准地转 Q 矢量辐合带对暴雨有指示意义。刘运成^[20-21]对四川广元的一次区域性大暴雨天气过程进行湿 Q 矢量诊断分析表明,700 hPa 湿 Q 矢量涡度正值中心与其散度负值中心重叠的区域是中尺度低值系统发展的有利区域,并与暴雨区对应,同时该层锋生中心可以对应 12 小时后的暴雨区。在西北地区,目前仍主要使用准地转 Q 矢量作为研究分析工具。李宗义等^[22]对甘肃、陕西两省南部出现的一次区域性暴雨过程进行了准地转 Q 矢量诊断分析,发现 500 hPa 正 Q 矢量涡度、负 Q 矢量散度的分布对暴雨预报有显著的指示性。孟妙志等^[23]分析 2003 年陕西盛夏连续性暴雨表明,700 hPa 准地转 Q 矢量辐合区与暴雨区有较好的对应关系。高菊霞等^[24]也利用准地转 Q 矢量分析了 2003 年 9 月 19 日陕西暴雨过程。华南地区,尤其是前汛期多暴雨发生^[25-26]。针对广西 1998 年 6 月 16~26 日连续性暴雨过程,李向红^[27]共分析了 11 个时次的 850 hPa 准地转 Q 矢量散度、锋生函数等诊断场,指出该层 Q 矢量散度场与暴雨落区有较好的对应关系。苏小山^[28]对广东茂名市一次特大暴雨进行了准地转 Q 矢量诊断分析。最近,郑彬等^[29]利用非地转干 Q 矢量探讨了广东 0506 大暴雨的成因。在华中地区,张芳华等^[30]对 2005 年 6 月初湖南大暴雨过程进行诊断分析表明,湿 Q 矢量辐合区对 6 小时暴雨落区预报有指示意义。刘志雄等^[31]利用湿 Q 矢量探讨了“04.6”湘西北特大致洪暴雨形成机理。张霞等^[32]对河南省一次大暴雨过程进行了诊断分析发现,850 hPa 准地转 Q 矢量散度的负值区与暴雨的落区有着较好的对应关系。相对来讲, Q 矢量分析方法在华东地区得到了更为广泛的应用。杨晓霞等^[33]应用非地转干 Q 矢量对 1999 年山东一次特大暴雨天气过程进行了诊断分析,结果表明,850~700 hPa Q 矢量辐合区与上升运动区和大暴雨区有较好的对应关系,且暴雨产生在 850 hPa 和 500 hPa Q 矢量湿锋生区的暖空气一侧。同样利用非地转干 Q 矢量,杨晓霞等^[34]对山东省一次春季罕见大范围暴雨天气进行诊断分析发现,暴雨区低层(925~850 hPa)有较大非地转 Q 矢量辐合。曹晓岗^[35]对 1998 年江西盛夏季节的连续暴雨过程诊断分析表明,500 hPa 准地转 Q 矢量散度在此次连续暴雨过程中与降水强弱有较好的对应关系。刘志雄等^[36]利用湿 Q 矢量细致地诊断分析了 1991 年一次典型的江淮梅雨锋暴雨过程,结果表明,湿 Q 矢量散度辐合场随高度向北倾

斜,在梅雨锋暴雨发展、衰亡阶段,湿 Q 矢量散度散、合场在垂直方向上主要呈现出了相间分布的特点。岳彩军等^[37-39]还结合此次梅雨锋暴雨过程对准地转 Q 矢量、半地转 Q 矢量、非地转干 Q 矢量及湿 Q 矢量的诊断特性进行了定性、定量比较研究,并指出 700 hPa 各 Q 矢量的矢量、散度辐合区较其在 850 hPa、500 hPa 上对降水反映更好。李艳春等^[40]应用湿 Q 矢量对 1999 年江淮地区一次暴雨天气过程进行诊断分析,结果表明,850 hPa 湿 Q 矢量辐合区是暴雨发生的有利区域。刘汉华等^[11]利用改进的非地转湿 Q 矢量分析 2003 年一次江淮梅雨锋暴雨过程时,发现 500 hPa 高度上的 Q 矢量散度辐合场的辐合强度及其辐合中心位置,对同时刻的降水强度及雨区位置有非常好的指示作用。在华北地区,卢焕珍^[41]对 2000 年发生在天津塘沽的一次暴雨过程进行诊断分析表明,700 hPa 湿 Q 矢量散度辐合场对降水预报有很好的指导意义。赵桂香等^[42]结合 2001 年山西省晋中市的一次区域性暴雨个例,对准地转 Q 矢量和湿 Q 矢量进行了定量对比分析,指出两种 Q 矢量在 700 hPa 诊断效果最好,且湿 Q 矢量明显优越于准地转 Q 矢量。 Q 矢量在东北地区也有所应用。侯亚红等^[43]应用准地转 Q 矢量分析了 2003 年辽宁一次暴雨天气过程,表明低层 Q 矢量散度辐合带与暴雨区有较好的对应关系,揭示出 Q 矢量散度的辐合中心或辐合线、散度场和锋生函数场与暴雨落区有关。上述分析表明,进入 21 世纪以来, Q 矢量被我国许多气象工作者应用于对不同区域的暴雨(强降水)天气进行诊断分析研究,均获得了有意义的发现。可喜的是,湿 Q 矢量理论的优越性已逐渐被大家认知和接受,并取代准地转 Q 矢量成为主要的诊断分析工具,且多数研究指出,700 hPa 湿 Q 矢量的诊断场对降水的落区及强度有较好的指示意义,相对来讲,准地转 Q 矢量对降水的指示层次具有不确定性。

3 Q 矢量在台风研究中的应用

登陆台风是影响我国的一个重要天气系统。进入 21 世纪以来, Q 矢量被我国气象学者广泛应用于对台风暴雨的诊断分析研究。李志楠等^[44]通过计算准地转 Q 矢量锋生函数,对 9608 号台风外围对流云团引发河北省西南部特大暴雨过程进行了诊断分析。对于此次暴雨过程,姚秀萍等^[7-9]研究表明,湿 Q 矢量能较清楚地揭示暴雨天气系统的演变,800 hPa 湿 Q 矢量与降水落区存在最佳的对应关系,湿 Q 矢量的散度负值区较好地预报出未来 6 h 的降水落区,而且中心数值的大小与未来 6 h 降水的强度存在正相关的对应关系,同时研究还表明,湿 Q 矢量明显较非地转干 Q 矢量优越。李江南等^[45]结合 2001 年台风 Fitow 引发的暴雨过程,从动力学角度解释了用非地转 Q 矢量散度场来判断暴雨落区要比用准地转 Q 矢量散度场好的原因。郭荣芬等^[46]分析了 2003 年“伊布都”台风低压西

行引发的云南暴雨过程, 指出 700 hPa 湿 Q 矢量及湿 Q 矢量散度辐合区与强降水区对应较好。朱健等^[47-48]通过计算 2004 年对浙江省造成重大影响的几个主要台风(“蒲公英”、“云娜”、“海马”)影响过程中的准地转 Q 矢量散度场, 指出低层 925 ~ 850 hPa 等压面上 Q 矢量散度场对暴雨区的移动及强度变化有诊断意义。颜琼丹等^[49]则利用湿 Q 矢量对 2004 年“云娜”台风暴雨进行了诊断分析, 结果表明, 850 hPa 湿 Q 矢量的散度负值区和流场辐合区与未来 12 小时的强降水落区有较好的对应关系。杨宇红等^[50]对 2004 年台风“艾利”造成福建省特大暴雨的物理成因进行了研究, 指出台风暴雨位于对流层低层湿 Q 矢量散度辐合、辐散交界处。薛根元等^[51]利用准地转 Q 矢量对 2005 年“海棠”台风在浙闽地区造成强降雨的成因作了初步研究, 发现 850 hPa Q 矢量辐合区与强降水有很好的对应关系。上述研究成果表明, 将 Q 矢量应用于台风暴雨研究, 同样获得了许多有意义的发现, 多数研究认为: 低层 925 ~ 850 hPa Q 矢量的诊断量与台风降水对应关系相对较好些, 但相对于第 2 节而言, Q 矢量理论在我国台风暴雨研究中的应用研究还存有较大的发展空间, 目前应用研究水平还主要处于由准地转 Q 矢量向湿 Q 矢量的过渡阶段。

4 Q 矢量在降雪及其它灾害性天气研究中的应用

早在 1990 年代前期, 朱爱民等^[52]已将准地转 Q 矢量应用于探讨暴雪成因研究。进入 21 世纪以来, 董安祥等^[53]应用准地转 Q 矢量理论对 1996 年青藏高原东部一次大雪过程进行了诊断分析, 结果表明, 在降雪前 24 小时, Q 矢量散度出现了整层辐合, 500 hPa 锋生函数正值区南部等值线密集处与大雪区有较好的对应关系。李加洛等^[54]对 2002 年青海东部一次强暴雪天气过程进行准地转 Q 矢量诊断分析, 结果表明, 500 hPa Q 矢量锋生函数、500 hPa + 700 hPa Q 矢量散度场均与青海高原暴雪区有较好的对应关系, 对青海高原的降雪预报有指示作用。匡晓燕等^[55]对 2000 年、2003 年河南省两场初雪进行准地转 Q 矢量诊断对比分析表明, 暴雪出现在 700 hPa Q 矢量散度辐合区及该层 Q 矢量湿锋生梯度最大区域。周翠芳等^[56]用湿 Q 矢量对 2006 年宁夏北部一次强降雪过程进行了诊断分析表明, 最强降雪区出现在 Q 矢量散度正负值交界附近的负值区上升支一侧, 且 500 hPa 辐合带与暴雪中心配合得较好。上述研究表明, 中高层 700 ~ 500 hPa Q 矢量散度、锋生函数与暴雪的落区有较好的对应关系。

此外, Q 矢量也被用于强对流、沙尘天气的分析研究。利用准地转 Q 矢量, 林金淦等^[57]从 Q 矢量流场、 Q 矢量散度场水平和垂直分布以及 Q 矢量锋生函数场分布等方面对 2005 年 5 月 5 日福建前后两次飊线天气过程进

行了分析, 结果表明 Q 矢量分析方法对强对流天气的预报具有指示作用。胡文东等^[58]计算分析了 2001 年 4 月 8 日宁夏强沙尘暴天气过程中湿 Q 矢量及锋生函数的变化特征。屠妮妮等^[59]应用准地转 Q 矢量锋生函数分析了引发强沙尘暴的蒙古气旋的动力特征。上述分析也表明, 目前对降雪、强对流及沙尘暴等灾害性天气的诊断分析研究还主要停滞于准地转 Q 矢量理论水平。

综上所述, 进入 21 世纪以来, Q 矢量被广泛应用于对全国各地、各种类型灾害性天气(暴雨、台风、暴雪、强对流、沙尘暴等)的诊断分析研究, 都取得了很好的效果, 获得了有意义的发现, 同时也表明 Q 矢量是一种性能优越的天气诊断分析工具, 具有广阔的应用前景。但需要指出的是, 对于不同类型的灾害性天气来讲, Q 矢量的指示层次存在较明显差异, 并且还有些研究仍基于准地转 Q 矢量理论, 也即表明 Q 矢量理论的应用研究未来还有很大的发展空间。

5 Q 矢量分解的应用研究

许多研究表明, Q 矢量分解对诊断分析更有应用价值, 能分离出具有气象意义的过程和结构。岳彩军等^[60-61]先后将湿 Q 矢量、改进的湿 Q 矢量分解在沿等位温线的自然坐标系中, 诊断分析了 1991 年一次典型江淮梅雨锋暴雨过程, 结果表明, Q 矢量分解可将梅雨锋暴雨的垂直运动场进行有意义的尺度分离, 更有利用梅雨锋暴雨的潜在物理机制的评估。在梅雨锋暴雨的不同阶段, 对于垂直运动场而言, 不同尺度的 Q 矢量散度辐合场的强迫作用不同, 有主、次之分。王川等^[62]同样将湿 Q 矢量分解在沿等位温线的自然坐标系中, 揭示了 2002 年发生在青藏高原东侧川陕地区的一次罕见大暴雨过程的中尺度特性。杨晓霞等^[63]也利用相同的湿 Q 矢量分解诊断分析山东春、秋季罕见的暴雨天气表明, 在 2003 年 4 月 17 ~ 18 日春季暴雨个例中, 垂直于等位温线的湿 Q 矢量的辐合与总的湿 Q 矢量的辐合相接近, 暴雨以中尺度上升运动为主, 而在 2003 年 10 月 10 ~ 12 日秋季暴雨的个例中, 平行于等位温线的湿 Q 矢量的辐合与总的湿 Q 矢量的辐合在形状上相似, 在强度上偏强, 暴雨的上升运动以大尺度为主, 中间夹杂着中小尺度的上升运动, 降水以混合型为主。与上述分解方法不同的是, 隆霄等^[64]把湿 Q 矢量分解为动力学部分和非绝热过程部分, 并对我国 3 次暴雨过程进行了诊断分析, 表明动力学强迫总是位于对流层低层, 而非绝热过程的强迫主要位于对流层中层, 它与积云对流过程中的潜热反馈有关, 并且动力部分的强迫要比热力强迫早, 同时指出积云对流最初触发机制是动力学的, 积云对流过程这的潜热反馈机制只是在对流发生后对对流过程起激励作用。赵桂香等^[65]则分别考虑湿 Q 矢量在 x 、 y 方向的分量, 对 2001 年山西省晋中市的一次区域性

暴雨进行诊断分析表明, Q_x 和 Q_y 在强度、层次以及出现的时间上存在明显差异, 并指出可能是由于对于暴雨这种伴有强烈上升运动的天气现象来说, 其经向上热量和动量的交换较纬向上的要大得多, 且暴雨出现在 Q_y 正、负值得交汇处。可见, 将 Q 矢量分解在不同坐标系、将 Q 矢量分解为动力、热力部分以及将 Q 矢量分解在 x 、 y 不同方向, 这些对 Q 矢量的不同分解处理方法都较总的 Q 矢量获得了更为有意义的发现。

6 Q 矢量在天气预报中的应用研究

Q 矢量不仅是一种有效的天气诊断分析工具, 同时也被应用于天气预报。陈威等^[66]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^[67]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。众所周知, 天气预报水平与数值预报水平密切相关, 同时对数值预报产品的“再加工”即释用技术是提高数值预报水平的重要手段之一。为了揭示 Q 矢量对数值预报产品动力释用的必要性和合理性, 很多学者进行了相关研究。岳彩军等^[68]结合一次典型的江淮梅雨锋暴雨过程研究表明, 湿 Q 矢量散度辐合场与同时刻地面雨区之间的对应关系较改进的 MM4 模式输出的垂直运动 ω 场优越。郑峰等^[69]结合 2001 年一次浙南闽东风波暴雨过程, 对比分析了准地转 Q 矢量与 MM5 预测能力, 结果表明, Q 矢量散度大值中心强度和位置的演变较好地反映了暴雨落区和中尺度低涡的诱生, 其预示能力较 MM5V2 预报的准确率高, 将中尺度模式和 Q 矢量计算结合起来可以提高风暴路径和雨区的预报准确率。牟佳等^[70]分析 2000 年北京地区一次暴雨过程发现, 湿 Q 矢量散度辐合区与上升运动有较好的对应关系, 而且与非地转 ω 方程的垂直速度相比较能分离出较小的尺度, 对暴雨预报起更好的指示作用。上述工作表明, 对数值预报产品进行 Q 矢量动力释用不仅必要、合理, 而且有很大发展空间。进入 21 世纪以来, 也有人对此作了进一步具体应用研究。丁建军等^[71]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。吴爱敏等^[72]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^[73]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 矢量大的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。上述关于 Q 矢量的释用研究工作主要基于准地转 Q 矢量散度, 且释用结果基本上是定性的。最近, 岳彩军等^[74]新发展了一种湿 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^[5]散度为强迫项的 ω 方程得到垂直运动场 ω_1 , 然后由 ω_1 计算湿 Q 矢量^[6-9]散度场, 接着再利用松弛法迭代求解以湿 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 (基于 MM5V3.6 而建立) 产品, 得到 Q^*VIP 定量降水预报 (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 mm/24 h 以上降水的 TS 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。该项释用技术将 Q 矢量的优越诊断特性与数值预报产品有机结合在一起, 使 Q 矢量在天气预报中的应用由定性转化为定量, 并在定量降水预报中发挥作用。

7 讨论与展望

大家应注意到, 上述对不同天气个例诊断分析研究所得到的结论有许多共性, 但也存在不同, 如有的是 Q 矢量散度辐合中心与同时刻降水中心对应关系好, 有的是与未来 N 小时降水中心对应好, 也有的是 Q 矢量散度辐合与辐散相间处与降水中心对应的关系好。再比如, 与降水中心对应的 Q 矢量散度所在层次也存在差异, 大家的研究结论并不统一。研究结果之间的差异则表明各自都有很强的针对性, 但又不具有普适性。其实, Q 矢量散度也存在“空报”和“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, 这一点应引起我们足够的重视, 在具体对 Q 矢量应用时, 还需要与其它物理量结合起来, 且与天气系统一并考虑。因为 Q 矢量并不能完全反映大气的不稳定状态, 尤其是大气中的垂直运动也不完全都是由 Q 矢量强迫产生的, 因此完全依赖于 Q 矢量则会出现“漏报”情况, 同时垂直运动与降水的发生也并非完全对应, 因此完全依赖 Q 矢量则也会现“空报”现象。另外, 现有的诊断分析工作主要还处于定性阶段, 基于 Q 矢量散度辐合中心与降水中心存在对应关系可定性反映出降水的落区, 但 Q 矢量散度辐合强度与降水强度之间是否存在量化的对应关系? 到目前为止也没有看到相关研究报道, 这也表明对降水强度的量化诊断研究还存在很大空间。

过去提及 Q 矢量, 可能首先想到它是个天气诊断分析工具, 且多用于大尺度天气现象诊断分析研究。但随着

Q 矢量理论研究的完善与发展, Q 矢量这个概念本身的内涵也在发生变化, 尤其是湿 Q 矢量及改进的湿 Q 矢量, 不仅利用实际风计算, 同时还考虑了非绝热加热作用, 表明不仅可用于准地转、大尺度天气现象的诊断分析研究, 同样也适用于非地转特征明显且伴有大量凝结潜热释放的中小尺度天气现象的诊断分析研究。前文所述的大量应用研究成果都是非常好的例证。诚然, 在对湿 Q 矢量或改进的湿 Q 矢量的具体推导过程中也采用了这样或那样的物理假设, 而这些也正表明目前的 Q 矢量理论仍需要进一步完善, 未来还有很大的发展空间。另外想说明的是, Q 矢量不仅是一个有效的诊断分析工具, 同时它也是一个非常出色的天气预报辅助工具。基于对大量天气个例的实况资料的诊断分析研究成果, 通过对数值预报产品的“再加工”, 那么所得的 Q 矢量动力释用产品则在天气预报工作中扮演着重要角色。未来对 Q 矢量应用研究应着重从以下几个方面考虑。

(1) 诊断分析工作应由定性向量化发展。由于区域不同、天气类型不同, 即使相同类型的天气, 由于发生的区域或季节不同, 可能形成机理与物理特征也各不相同, 且使用的 Q 矢量种类也不同, 因此目前得到的结论也不同, 并且很多结论来自于个例研究, 还很难具有普适性。如何对这些定性的研究成果加以提炼、凝聚, 提取出量化的信息, 工作难度非常大。可以讲, 定性的诊断分析研究成果很难进一步推动 Q 矢量在天气预报工作中的量化应用。鉴于这种情况, 各地需要对发生的灾害性天气类型进行归类统计, 基于特定的 Q 矢量类型, 对大量天气个例进行分析总结, 找出与天气现象之间存在对应关系的具体的 Q 矢量参数, 并得到量化的判据指标。这将为 Q 矢量与数值预报产品有机结合, 从而定量应用于天气预报打下坚实基础。

(2) 由单独使用向综合应用发展。分析区域内 Q 矢量的辐合区很多, 即使也满足灾害性天气现象的发生指标, 难道都会有灾害性天气出现吗? 单独使用 Q 矢量极易面临此类问题。这就需要与其它物理结合起来进行综合分析判断, 尤为重要, 与背景环流中的天气系统一并结合分析则更为有效。有研究^[38]指出, 与降水对应的 Q 矢量的辐合场基本位于槽前及梅雨锋气旋的中、前方, 基于此结果可首先明确哪些 Q 矢量辐合区是需要重点关注的对象。可以说, 该研究思路起到一定的借鉴作用。

(3) 指示作用和预示作用研究应共同发展。在未来针对 Q 矢量的应用研究工作中, 不仅要研究 Q 矢量参数与同时期天气灾害性天气现象之间的对应关系, 即为指示作用, 同时也要关注前期的 Q 矢量参数与灾害性天气

未来发展演变所存在的对应关系, 即为预示作用。过去多数研究主要集中在 Q 矢量的指示作用上, 令人欣喜的是, Q 矢量的预示作用在一些研究工作^[7, 47, 49]中也得到了体现。我们认为今后这方面的研究需要更进一步加强, 预示作用与指示作用都非常重要, 将二者应用于天气预报工作中也都非常有益。对二者共同研究发展, 将会使 Q 矢量的应用研究更为深入、到位, 并促进 Q 矢量成为一种真正有效的天气预报辅助工具, 在实际业务工作中发挥出积极作用。

(4) 进一步加强对 Q 矢量分解方法的应用研究。 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。分解后的 Q 矢量具有不同的物理意义, 同时天气现象的发生、演变也是多种尺度相互作用的结果, 因此不同的 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。进一步加强 Q 矢量分解的应用研究将具有重要的科学意义。文献[61]已给出了改进的湿 Q 矢量分解在 p 坐标系中的计算表达式及详细推倒过程, 从而便于读者对 Q 矢量分解的理解与运用。

(5) 进一步完善湿 Q 矢量释用技术。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, 从本质上推动了 Q 矢量释用研究向前迈进了坚实一步。但要想使 Q^*VIP 技术真正投入业务使用, 还有不少方面需要今后进一步改进和完善, 如考虑地形抬升和地表摩擦作用, 考虑使用不仅包括大尺度稳定水汽凝结潜热加热信息同时还包括对流水汽凝结潜热加热信息的改进的湿 Q 矢量等。

(6) 由二维 Q 矢量向三维 Q 矢量即 C 矢量发展。早在 1992 年, Xu^[75]提出了 C 矢量概念。 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, 应积极开展 C 矢量分析方法在各种灾害性天气诊断及预报工作中的应用研究。

相对国内来讲, 国外在 21 世纪对 Q 矢量的应用研究工作很少, 这有可能局限于国外对 Q 矢量的理论研究状况。众所周知, 自从 1991 年广义 Q 矢量^[76]和 1992 年 C 矢量提出之后, Q 矢量理论研究在国外几乎没有新进展, 即使 1990 年代后期和 21 世纪初开展的 Q 矢量分解研究工作, 也都是基于准地转 Q 矢量。鉴于此, 对于进入 21 世纪以来国外有关研究工作本文就不再具体给出了。

参考文献:

- [1] DUNN L B. Evaluation of vertical motion: Past, Present, and Future[J]. Wea Forecasting, 1991, 6(1): 65-73.
- [2] HOSKINS B J, DAGBICI I, DARICS H C. A new look at the ω -equation[J]. Quart J Roy Meteor Soc, 1978, 104(1): 31-38.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 张兴旺. 湿 Q 矢量表达式及其应用[J]. 气象, 1998, 24(8): 3-7.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] YAO Xiuping, YU Yubin, SHOU Shaowen. Diagnostic analyses and application of the moist ageostrophic Q vector[J]. Adv Atmos Sci, 2004, 21(1): 96-102.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 岳彩军, 寿亦萱, 寿绍文, 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.
- [13] 李英, 张腾飞, 郭荣芬. 云南一次持续性暴雨过程的非地转湿 Q 矢量分析[J]. 南京气象学院学报, 2002, 25(2): 259-264.
- [14] 郭荣芬, 鲁亚斌, 李自顺. “99.5.7”昆明大暴雨分析[J]. 气象科技, 2004, 32(2): 90-96.
- [15] 郭荣芬, 鲁亚斌, 杨向东. 500 hPa 反气旋环流下滇中暴雨中尺度云团分析[J]. 气象科学, 2005, 25(3): 280-287.
- [16] 郭荣芬, 李英, 杨向东, 等. 非地转湿 Q 矢量在云南冬季强降水中的分析应用[J]. 气象, 2005, 31(2): 12-16.
- [17] 鲁亚斌, 张腾飞, 徐八林, 等. 一次孟加拉湾风暴和冷空气影响下滇西大暴雨中尺度分析[J]. 应用气象学报, 2006, 17(2): 201-206.
- [18] 杨洋, 刘益兰, 李文彬, 等. 贵州 MCC 的诊断分析[J]. 贵州气象, 2000, 24(2): 6-10.
- [19] 郁淑华. 诱发泥石流灾害的四川盆地大暴雨过程分析[J]. 气象, 2002, 28(8): 30-33.
- [20] 刘运成. 一次大暴雨过程的物理量诊断分析[J]. 四川气象, 2006, 26(2): 12-14.
- [21] 刘运成. 青藏高原东侧一次连续大暴雨过程湿 Q 矢量分析[J]. 气象, 2006, 32(2): 43-49.
- [22] 李宗义, 徐建芬, 孙兰东, 等. 西北区东部“1998 年 8 月 19-20 日”暴雨诊断分析[J]. 甘肃气象, 2000, 18(3): 21-23.
- [23] 孟妙志, 梁新兰. 陕西 2003 年盛夏连续性暴雨过程分析[J]. 陕西气象, 2004(2): 20-23.
- [24] 高菊霞, 李建芳. 2003 年 9 月 19 日陕西暴雨分析[J]. 陕西气象, 2005(2): 5-8.
- [25] 王志伟, 唐红玉, 李芬. 近 50 年中国华南雨涝变化特征分析[J]. 热带气象学报, 2005, 21(1): 87-92.
- [26] 谷德军, 纪忠萍, 林爱兰, 等. 广州春季降水的变化及其前兆信号[J]. 热带气象学报, 2005, 21(6): 579-587.
- [27] 李向红. 广西“98.6”暴雨过程的 Q 矢量分析及落区预报[J]. 广西气象, 2000, 21(1): 30-32.
- [28] 苏小山. 茂名市一次特大暴雨的诊断分析[J]. 广东气象, 2004(2): 22-24.
- [29] 郑彬, 林爱兰, 袁金南, 等. 广东 0506 大暴雨的成因探讨[J]. 热带气象学报, 2007, 23(2): 135-140.
- [30] 张芳华, 杨克明, 毛冬艳, 等. 2005 年 6 月湖南大暴雨过程的天气动力学诊断分析[J]. 气象, 2006, 32(3): 78-85.
- [31] 刘志雄, 戴泽军, 叶成志, 等. “04.6”湘西北大致洪暴雨形成机理分析[J]. 气象, 2005, 31(10): 61-67.
- [32] 张霞, 王咏青, 李敏. 准地转 Q 矢量在河南省区域暴雨过程中的诊断应用[J]. 气象与环境科学, 2007, 30(1): 39-43.
- [33] 杨晓霞, 谭志华, 华岩. 一次特大暴雨天气的 Q 矢量分析[J]. 气象, 2001, 27(2): 44-47.
- [34] 杨晓霞, 赵宇, 高留喜. 山东省春季大暴雨天气的形成机制个例分析[J]. 气象科技, 2005, 33(1): 45-49.
- [35] 曹晓岗. “98.7”连续暴雨过程诊断分析[J]. 南京气象学院学报, 2000, 23(1): 133-138.
- [36] 刘志雄, 岳彩军, 寿绍文, 等. 应用湿 Q 矢量诊断梅雨锋暴雨[J]. 南京气象学院学报, 2003, 26(1): 102-110.
- [37] 岳彩军, 寿绍文. 几种 Q 矢量的比较[J]. 南京气象学院学报, 2002, 25(4): 525-532.
- [38] 岳彩军, 寿绍文, 姚秀萍. 梅雨锋暴雨的 Q 矢量定性分析[J]. 气象科学, 2003, 23(1): 55-63.
- [39] 岳彩军, 寿绍文, 董美莹. 定量分析几种 Q 矢量[J]. 应用气象学报, 2003, 14(1): 39-48.
- [40] 李艳春, 季亮, 潘晓滨, 等. 一次暴雨过程中的湿 Q 矢量诊断分析[J]. 气象科学, 2005, 25(2): 179-185.
- [41] 卢焕珍. 一次暴雨过程的湿 Q 矢量诊断分析[J]. 天津航海, 2002(2): 47-49.
- [42] 赵桂香, 程麟生, 李新生. Q 矢量和湿 Q 矢量在暴雨诊断中的应用比较[J]. 气象, 2006, 32(6): 25-30.
- [43] 侯亚红, 陈力强. 一次辽宁暴雨过程的 Q 矢量诊断分析[J]. 辽宁气象, 2004(3): 6-7.
- [44] 李志楠, 郑新江, 赵亚民, 等. 9608 号台风低压外围暴雨中尺度云团的发生发展[J]. 热带气象学报, 2000, 16(4): 316-326.
- [45] 李江南, 闫敬华, 魏晓琳, 等. 非地转强迫对 Fitow (0114) 暴雨的影响[J]. 气象学报, 2005, 63(1): 69-76.
- [46] 郭荣芬, 鲁亚斌, 李燕, 等. “伊布都”台风影响云南的暴雨过程分析[J]. 高原气象, 2005, 24(5): 784-791.
- [47] 朱健, 沈晓玲. 2004 年几次台风暴雨 Q 矢量诊断的比较分析[J]. 灾害学, 2006, 21(2): 90-94.
- [48] 朱健, 沈晓玲. “云娜”台风暴雨的 Q 矢量与螺旋度诊断分析[J]. 科技通报, 2007, 23(1): 22-27.

- [49] 颜琼丹, 蔡亲波. 非地转湿 Q 矢量在台风“云娜”暴雨过程中的分析应用[J]. 热带气象学报, 2006, 22(5): 505-509.
- [50] 杨宇红, 沈新勇, 林两位, 等. 0418 号台风艾利暴雨成因分析[J]. 气象, 2006, 32(7): 81-87.
- [51] 薛根元, 诸晓明, 朱健. 0505 号台风“海棠”灾害的初步诊断研究[J]. 科技导报, 2005, 23(10): 29-34.
- [52] 朱爱民, 寿绍文. 长江中下游地区“84.1”暴雨过程分析[J]. 气象, 1993, 19(3): 20-24.
- [53] 董安祥, 郭慧, 贾建颖, 等. 青藏高原东部一次大雪过程的 Q 矢量分析[J]. 南京气象学院学报, 2001, 24(3): 405-409.
- [54] 李加洛, 达成明, 刘海明, 等. 青海东部一次强暴雪天气的 Q 矢量诊断分析[J]. 气象, 2003, 29(9): 8-12.
- [55] 匡晓燕, 王蕊, 宋清之. 河南省两场初雪的 Q 矢量诊断分析[J]. 河南气象, 2004(2): 13-15.
- [56] 周翠芳, 刘建军, 陈晓燕, 等. 宁夏北部强降雪天气的非地转湿 Q 矢量的诊断[J]. 宁夏工程技术, 2006, 5(3): 221-225.
- [57] 林金淦, 龚振彬, 吴启树. Q 矢量分析方法在福建两次地线天气过程分析中的应用[J]. 台湾海峡, 2006, 25(1): 117-122.
- [58] 胡文东, 纪晓玲, 李艳春, 等. 2001 年 4 月 8 日宁夏强沙尘暴天气中尺度系统分析[J]. 南京气象学院学报, 2004, 27(6): 791-799.
- [59] 屠妮妮, 矫海燕, 赵琳娜, 等. 引发强沙尘暴的蒙古气旋的动力特征分析[J]. 中国沙漠, 2007, 27(3): 520-527.
- [60] YUE Caijun, SHOU Shaowen, LIN Kaiping, 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.
- [61] 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.
- [62] 王川, 杜川利, 寿绍文. Q 矢量理论在青藏高原东侧大暴雨过程中的诊断应用[J]. 高原气象, 2005, 24(2): 261-267.
- [63] 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.
- [64] 隆霄, 程麟生, 梅春杰. 完全 Q 矢量及其在暴雨过程诊断分析中的应用[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2006, 42(3): 32-39.
- [65] 赵桂香, 程麟生. 2001 年 7 月山西中部一次罕见暴雨过程的诊断分析[J]. 高原气象, 2006, 25(6): 1 083-1 091.
- [66] 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.
- [67] 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.
- [68] 岳彩军, 寿绍文. 湿 Q 矢量散度场与 Ω 场的比较[J]. 南京气象学院学报, 2002, 25(3): 420-424.
- [69] 郑峰, 寿绍文. 一次东风波中尺度暴雨的 Q 矢量与 MM5 预测能力对比[J]. 干旱气象, 2005, 23(1): 45-48.
- [70] 牟佳, 申红喜, 刘开宇, 等. 非地转湿 Q 矢量分析及其在暴雨过程中的应用[J]. 贵州气象, 2005, 29(6): 8-11.
- [71] 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.
- [72] 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.
- [73] 樊明, 周军, 冯军. 几种物理量在皖南暴雨预报中的初步应用[J]. 干旱气象, 2006, 24(4): 30-34.
- [74] 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(QPF)中应用研究[J]. 应用气象学报, 2007, 18(5): 666-675.
- [75] 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.
- [76] DAVIES-Jones R. The frontogenetical forcing of secondary circulations, Part I: the duality and generalization of the Q vector[J]. J Atmos Sci, 1991, 48(4): 497-509.

RECENT ADVANCES ON APPLIED STUDY OF Q VECTOR TO DIAGNOSTIC ANALYSIS AND PREDICTION OF SEVERE WEATHERS

YUE Cai-jun¹, SHOU Shao-wen², YAO Xiu-ping³

(1. Shanghai Typhoon Institute, CMA, Shanghai 200030, China; 2. School of Atmospheric Sciences, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China; 3. China Meteorological Administration, Training Center, Beijing 100081, China)

Abstract: Along with perfection and development of the Q vector theory, the Q vector analytic method has been used widely in applied research. More specifically, it has been used to diagnose and analyze the genesis of severe weathers such as rain storm, typhoon, snow storm, severe convection and sand-dust storm. Meanwhile, it plays a more and more important role in weather forecasting. The applied research on Q vector in China since the beginning of the 21st century is reviewed completely and systematically, along with a discussion and a prospective study in this field in the last part of the work.

Key words: Q vector; severe weather; diagnostic analysis and prediction; application study