

Q 矢量和湿 Q 矢量在暴雨诊断中的应用比较

赵桂香^{1,2} 程麟生² 李新生³

(1. 山西省气象台, 太原 030006; 2. 兰州大学大气科学学院;
3. 山西省晋中市气象局)

提 要: 利用常规探空和地面实测资料, 以发生在 2001 年 7 月 26—27 日山西省晋中市的一次区域性暴雨为例, 对准地转 Q 矢量和非地转湿 Q 矢量在暴雨诊断中的应用进行了定量对比分析, 结果表明: (1) Q 矢量对暴雨的预报有一定的指示作用, 降水前期 700hPa 诊断效果最好, 但在暴雨的强度和落区上存在明显偏差。而湿 Q 矢量在各层对暴雨均表现出良好的诊断特性, 其散度辐合区与暴雨区有较好的对应关系, 其强锋生出现 6 小时后开始产生强降水, 且暴雨区与强锋生中心基本吻合, 700hPa 表现尤为突出。(2) Q 矢量锋生函数分布表现出典型的准地转特征, 而湿 Q 矢量锋生函数分布则具有明显的中尺度特征, 因此, Q 矢量适宜于研究与天气尺度系统相关的大气运动, 而湿 Q 矢量更适宜于研究天气尺度系统激发的次级环流。湿 Q 矢量较准地转 Q 矢量更能反映出暴雨的落区和暴雨的中尺度特性, 在反映暴雨的强度上也更具优越性。

关键词: Q 矢量 锋生函数 暴雨 定量比较

Comparison and Application of Q -vector and Wet- Q -vector to Diagnosis of Storm Rain

Zhao Guixiang^{1,2} Cheng Linsheng² Li Xinsheng³

(1. Shanxi Meteorological Observatory, Taiyuan 030006; 2. Atmospheric Science College of Lanzhou University;
3. Jinzhong Meteorological Office, Shanxi Province)

Abstract: Based on some routine observation when a regional storm rain in Jinzhong, Shanxi Province during 26—27 July 2001, the application of quasi-geostrophic Q - and wet- Q -vector are made. The analysis shows that (1) the quasi-geostrophic Q -vector is a good indicator for

the heavy rain forecast specially at 700hPa level in the beginning stage of the rainfall, while the wet- Q -vector has a good diagnostic property on each level. (2) The distribution of Q -vector frontogenesis function has typical quasi-geostrophic characteristic, but wet- Q -vector ones has apparent mesoscale characteristic. So quasi-geostrophic Q -vector adapt to study of atmospheric motion associated with synoptic scale system, and wet- Q -vector adapt to the secondary circulation triggered by synoptic scale system.

Key Words: Q -vector frontogenesis function storm rain quantitative comparison

引言

准地转 Q 矢量 (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 Hoskins 1978 年提出准地转垂直运动可由 Q 矢量散度来诊断以来, Q 矢量在实际业务工作中不断被引申应用, 国内外许多专家、学者应用 Q 矢量诊断方法对不同的天气过程进行了诊断分析^[1-10], 得出了一些有意义的结论。但准地转 Q 矢量受到准地转近似的限制, 不宜用于研究次天气尺度运动。张兴旺^[11]由考虑了大气中水汽凝结非绝热作用的原始方程组出发, 推导出 P 坐标系的非地转的湿 Q 矢量 Q^* 的表达式, 之后, 有人利用湿 Q 矢量对暴雨进行了一些诊断分析工作^[12,13], 但对 Q 矢量和湿 Q 矢量进行定量比较分析的还较少, 因此以发生在 2001 年 7 月 26—27 日山西省晋中市的一次区域性暴雨为例, 定量比较了准地转 Q 矢量和非地转湿 Q 矢量在暴雨诊断中的差异; 计算了湿 Q 矢量锋生函数 (未曾发现有人进行过这项工作), 并与 Q 矢量锋生函数做了对比, 发现它们的分布和演变存在明显差异, 在对暴雨的落区和强度的诊断上, 湿 Q 矢量锋生函数更具优越性。

1 天气过程概述

2001 年 7 月 23—29 日, 晋中市出现强

降水天气过程, 过程持续时间平均为 4 天, 过程降雨量最大 132.9mm, 26 日 20 时—27 日 20 时日降雨量在 51.1~90.2mm 之间, 是晋中有降水记录以来唯一的一次全市 11 县(市)均达到暴雨标准的天气过程。从 6 小时降水分布图(图略)来看, 雨带基本呈东西向带状分布, 向偏东方向发展很快, 最强降水出现在 26 日夜间。

2 资料来源及处理

为了确保计算、分析和比较的可靠性, 选取 2001 年 7 月 25 日 20 时—29 日 08 时的 20 时和 08 时连续演变共 8 个时次、地面到 300hPa 共 6 层的实测资料, 资料范围为 26~47°N、103~124°E。采用克里金方法对所选取的资料进行网格化插值, 形成插值格距为 0.7°×0.7°, 网格数为 31×31 的网格化资料。各物理量计算中, 采用中央差分格式, 对于计算中用到的高度 H , 温度 T , u 、 v 分量, 位温 θ , 假相当位温 θ_e 均采用了其九点平滑值。另外, 在计算湿 Q 矢量时, 用到的垂直速度 ω 由运动学方法(积分连续方程法)计算求得, 为减小计算误差, 提高计算精度, 采用了二次修订方案进行修订。

3 Q 矢量和湿 Q 矢量表达式

3.1 Q 矢量表达式

$$Q = (Q_x, Q_y) = \left(\left(-\frac{\partial \mathbf{V}_g}{\partial x} \right) \cdot \nabla \left(-\frac{\partial \phi}{\partial p} \right), \right.$$

$$\left(-\frac{\partial \mathbf{V}_g}{\partial y}\right) \cdot \nabla \left(-\frac{\partial \phi}{\partial p}\right) \quad (1)$$

这就是准地转 Q 矢量的表达式, 它可以表示成如下分量形式:

$$Q_x = -\frac{R}{P} \frac{\partial \mathbf{V}_g}{\partial x} \cdot \nabla T = -\frac{R}{P} \left(\frac{\partial u_g}{\partial x} \cdot \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial v_g}{\partial x} \cdot \frac{\partial T}{\partial y} \right) \quad (2)$$

$$Q_y = -\frac{R}{P} \frac{\partial \mathbf{V}_g}{\partial y} \cdot \nabla T = -\frac{R}{P} \left(\frac{\partial u_g}{\partial y} \cdot \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial v_g}{\partial y} \cdot \frac{\partial T}{\partial y} \right) \quad (3)$$

式中, $u_g = -\frac{9.8}{f} \cdot \frac{\partial H}{\partial y}$, $v_g = \frac{9.8}{f} \cdot \frac{\partial H}{\partial x}$

Q 矢量散度:

$$D_Q = \nabla \cdot \mathbf{Q} = \frac{\partial Q_x}{\partial x} + \frac{\partial Q_y}{\partial y} \quad (4)$$

锋生函数:

$$F = \mathbf{Q} \cdot \nabla \theta_s = Q_x \frac{\partial \theta_s}{\partial x} + Q_y \frac{\partial \theta_s}{\partial y} \quad (5)$$

在以上各项计算中, 均包含了地转风, 这就是准地转最明显的特征。

3.2 湿 Q 矢量 (Q*) 表达式

由考虑了大气中水汽凝结非绝热作用的原始方程组出发, 可以推导出 P 坐标系的非地转的湿 Q 矢量, 其表达式为:

$$\mathbf{Q}^* = (Q_x^*, Q_y^*) = \left\{ \frac{1}{2} \left[f \left(\frac{\partial v}{\partial p} \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial p} \frac{\partial v}{\partial x} \right) - h \frac{\partial \mathbf{V}}{\partial x} \cdot \nabla \theta - \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{LR\omega}{C_p p} \frac{\partial q_s}{\partial p} \right) \right], \right. \\ \left. \frac{1}{2} \left[f \left(\frac{\partial v}{\partial p} \frac{\partial u}{\partial y} - \frac{\partial u}{\partial p} \frac{\partial v}{\partial y} \right) - h \frac{\partial \mathbf{V}}{\partial y} \cdot \nabla \theta - \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{LR\omega}{C_p p} \frac{\partial q_s}{\partial p} \right) \right] \right\} \quad (6)$$

其中,

$$Q_x^* = \frac{1}{2} \left[f \left(\frac{\partial v}{\partial p} \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial p} \frac{\partial v}{\partial x} \right) - h \frac{\partial \mathbf{V}}{\partial x} \cdot \nabla \theta - \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{LR\omega}{C_p p} \frac{\partial q_s}{\partial p} \right) \right] \quad (7)$$

$$Q_y^* = \frac{1}{2} \left[f \left(\frac{\partial v}{\partial p} \frac{\partial u}{\partial y} - \frac{\partial u}{\partial p} \frac{\partial v}{\partial y} \right) - h \frac{\partial \mathbf{V}}{\partial y} \cdot \nabla \theta - \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{LR\omega}{C_p p} \frac{\partial q_s}{\partial p} \right) \right] \quad (8)$$

在湿 Q 矢量表达式中, 不仅全部为实际风, 同时还包含了凝结潜热加热项, 这是与其它 Q 矢量明显不同的特征, 充分体现其更接近实际大气的状况^[2]。

4 准地转 Q 矢量和湿 Q 矢量的定量比较

利用网格化资料, 根据公式 (1) ~ (8) 对 7 月 25 日 20 时—29 日 08 时各层次的 Q (湿 Q) 矢量、各分量场、Q (湿 Q) 矢量散度、Q (湿 Q) 矢量锋生函数分别进行了计算, 并做了 Q (湿 Q) 矢量散度经纬向剖面图, 着重分析讨论 850hPa、700hPa、500hPa 和 300hPa 上上述各量的分布及演变特征。

4.1 Q (Q*) 矢量、各分量与暴雨

Q_x 、 Q_y 分别为 Q 矢量在 x、y 方向上的分量。 Q_y 表示温度梯度 $-\partial T/\partial y$ 的大小变化, 当 $Q_y > 0$ 时, 表示 $|\partial T/\partial y|$ 减小, 即锋消, 而当 $Q_y < 0$ 时, 表示 $|\partial T/\partial y|$ 增大, 即锋生。 Q_x 则表示温度梯度 $-\partial T/\partial y$ 的方向变化, 当 $Q_x > 0$ 时, 表示 $-\nabla T$ 作气旋式旋转, 而当 $Q_x < 0$ 时, 表示 $-\nabla T$ 作反气旋式旋转。

分析各层 Q_x 和 Q_y^* 的时间演变, 就 Q_x 而言: 在反映锋区强弱能力上中低层明显优于高层, 降水前期 700hPa 比 850hPa 反映明显, 而当降水临近时, 850hPa 比 700hPa 更好, 更具指示意义。在这种高、低空系统明显且配合较好的情况下, 高空 300hPa 上

Q_x 的分布在某种程度上能反映地面系统的变化特征,这对判断系统演变和降水的开始有着非常重要的意义,而 500hPa 指示意义不明显。暴雨落区在 Q_x 负值中心东南侧。与准地转 Q 矢量的 Q_x 分布场相比, Q_x^* 分布特征更为明显,在反映各层系统变化和暴雨落区上都有良好的诊断特性,在 26 日 08 时—28 日 20 时的降水时段中, Q_x^* 的分布型式发生了明显的演变,其负值区与降水区

对应,暴雨出现在等 Q_x^* 线梯度最大且靠近负值区一侧,负值最大中心数值较 Q_x 负值中心明显偏大(图 1),且 Q_x 负值中心最大值较暴雨提前 18 小时出现,而 Q_x^* 负值中心最大值则提前 6 小时出现。由此也可看出,二者对暴雨的预报都有一定的指示意义,但 Q 矢量适宜于研究与天气尺度系统相关的大气运动,而湿 Q 矢量更适宜于研究天气尺度系统激发的次级环流。

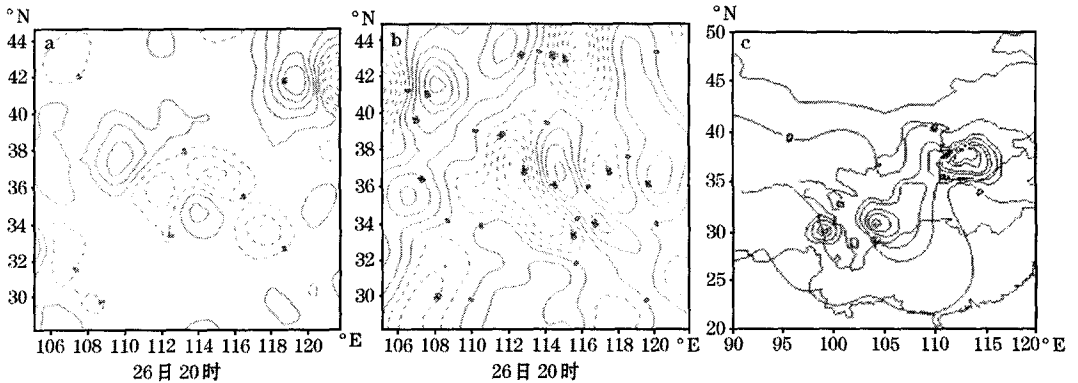


图 1 2001 年 7 月 26 日 20 时 700hPa Q_x (a) 和 Q_x^* (b) 分布与 27 日 02—08 时雨量 (c) 对比

分析各层 Q_y 和 Q_y^* 的时间演变,可看出: Q_y 场是在强降水开始前 6 小时指示意义明显;虽然降水区上空出现弱的辐散区,但双侧强锋生作用相互促进,使山西中部锋生作用迅速增强。在 26 日 08 时—28 日 08 时的降水时段中, Q_y^* 分布发生了较为明显的变化,在暴雨发生的前 6 小时(26 日 20 时), Q_y^* 场有一个明显的突变, Q_y^* 较 Q_y 更能准确反映锋生作用的强弱,且在与暴雨落区对应关系上更具优越性。

分析 Q 矢量图,发现: 700hPa 表现最好,其它层指示意义不明显。700hPa 上(图 2), 26 日 20 时,河西走廊到山西西部出现一条带状分布的 Q 矢量的辐合线,6 小时后强降水出现在辐合线东南侧,但辐合线分布的走向与降水轴线基本一致, Q 矢量指向暴雨区。而 Q^* 矢量图显示: 500 ~ 850hPa 均有明显反映,辐合区与强降水带对应,且其强度也较 Q 矢量的明显要强,

700hPa 和 850hPa 上表现尤为突出。

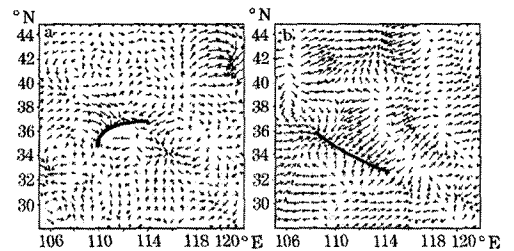


图 2 2001 年 7 月 26 日 20 时 700hPa 准地转 Q 矢量 (a) 和湿 Q 矢量 (b) 分布对比
粗实线代表辐合线

4.2 $Q(Q^*)$ 矢量散度的平面和垂直结构差异

为了更好地揭示 Q 矢量与强降水的关系,对 Q 矢量散度进行了计算、分析,并分别选取暴雨区上空的 112.8°E 为基线作经向垂直剖面, 37.2°N 为基线作纬向垂直剖面。

在 850~500hPa 散度图上, 25 日 20 时—26 日 08 时(暴雨发生前 12—24 小时), 河套到山西一带均为南北或东北—西南走向的 Q 矢量散度辐合区所覆盖, 而东北和高原地区则为辐散区所覆盖, 演变趋势表现为与低层天气系统(低涡)相对应, 辐合带有明显的停滞或南北摆动的演变特点。暴雨发生在 Q 矢量散度辐合中心东南侧, 而不在辐合中心。并且, 锋区附近的 Q 矢量的辐合值较其南北两侧的都大。自西向东 Q 矢量的辐合和辐散区的分布呈非对称的耦合形式, 辐合和辐散区之中心间的距离为 200km 左右, 这与中尺度低涡的发展东移有关。

准地转 Q 矢量在四层的散度场分布对雨区有一定反映, 但在位置和强度上存在明显偏差, 而湿 Q 矢量散度场表现出良好的诊断特性, 对实际降水的反映明显优于准地转 Q 矢量, 其 700hPa 和 850hPa 散度辐合场能将主雨带与降水中心反映出来, 尤其是 700hPa 湿 Q 矢量散度辐合中心与降水中心一一对应, 二者不仅在位置上, 而且在强度上对应得也较好。500hPa 和 300hPa 湿 Q 矢量散度辐合场对雨区的反映较准地转 Q 矢量也有不错的表现。从总体上看, 湿 Q 矢量的诊断特性比准地转 Q 矢量要好, 在暴雨出现前 6 小时表现得尤为突出。从总的预报效果来看, 700hPa 湿 Q 矢量辐合中心对暴雨区预报有最好的指示意义。

Q 矢量散度在纬向上(图 3)呈耦合性对称分布, 随着降水的临近, 辐合中心在东移、加强, 辐合中心大约位于 500hPa 上, 湿 Q 矢量散度纬向分布与 Q 矢量散度有着类似的结构, 但其辐合中心位置偏低、强度偏强; 强降水开始前 18 小时, 其经向无明显辐合中心, 而在强降水开始前 6 小时, 出现强的辐合中心, 高度位于大约 500hPa 左右。湿 Q 矢量经向剖面图上(图略), 26 日 08 时—27 日 20 时在暴雨区上空一直存在较强辐合区, 辐合中心在 650hPa 左右, 位于 35.8°N, 较最大降水中心的位置略偏南,

且湿 Q 矢量散度分布随高度略向北倾斜, 因而 700hPa 的散度辐合场与地面降水的位置有着较好的垂直对应。与 Q 矢量经向剖面图比较, 其辐合中心位置更接近实际强降水中心, 且强度明显大于 Q 矢量辐合中心, 更能反映实际降水强度。

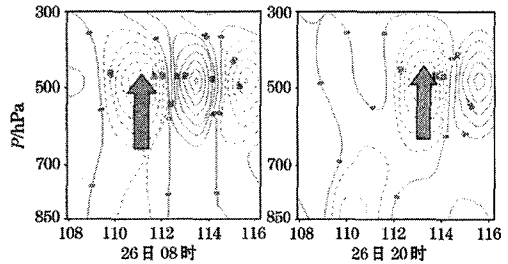


图 3 2001 年 7 月 26 日 08 时和 20 时准地转 Q 矢量散度纬向(沿 37.2°N)垂直分布

4.3 $Q(Q^*)$ 矢量锋生函数及其所表现的准地转和中尺度特征

比较湿 Q 矢量锋生函数与 Q 矢量锋生函数(图 4), 发现它们之间存在明显差异:

(1) 在分布特征上: Q 矢量锋生函数呈近似南北或东北—西南向的带状分布, 南北跨度 8~10 个纬距, 且其中有规律地分布着 2~3 个中心, 中心轴线位置与走向基本与地面锋面系统一致, 这是典型的准地转特征; 而湿 Q 矢量锋生函数分布则无此特征, 其强锋生中心只有一个, 南北跨度也较小, 只有 4 个纬距左右, 表现出明显的中尺度特征。

(2) 在反映雨区分布、强度、出现和维持时间上, 也存在明显不同: 中低层 Q 矢量锋生函数基本能将强降水区反映出来, 但强降水区在强锋生轴线东南侧, 其强度反映上存在明显偏差, 出现时间上存在后延性, 850hPa 比 700hPa 更具指示意义; 而湿 Q 矢量锋生函数则不同, 其锋生中心与降水区对应关系较好, 强锋生中心与暴雨区相对应, 在出现和维持时间上, 对应得也较好, 且各层均有不错的表现, 700hPa 表现最佳。

综上所述, 湿 Q 矢量较准地转 Q 矢量

更能反映出暴雨的落区和暴雨的中尺度特性,在反映暴雨的强度上也更具优越性。

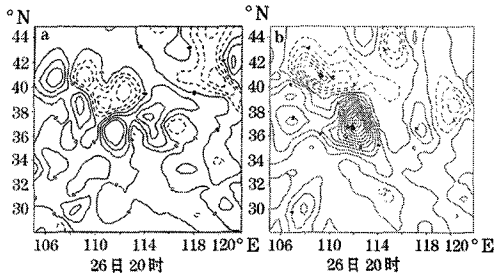


图 4 2001 年 7 月 26 日 20 时 700hPa 准地转 Q 矢量锋生函数 (a) 和湿 Q 矢量锋生函数 (b) 分布对比

5 结 语

(1) 准地转 Q 矢量对暴雨的预报有一定的指示作用,降水前期 700hPa 诊断效果最好,但并不能完全将雨区反映出来,且在暴雨的强度和落区上存在明显偏差,而当降水临近时,850hPa 比 700hPa 更好;300hPa 上 Q_z 的分布在某种程度上能反映地面系统的变化特征,这对判断系统的演变和降水的开始有着非常重要的意义;500hPa 指示意义不明显。

(2) 湿 Q 矢量在各层对暴雨均表现出良好的诊断特性,其散度辐合区与暴雨区有较好的对应关系,其矢量指向暴雨区;其强锋生出现 6 小时后开始产生强降水,且强锋生中心与暴雨区有着较好的对应关系。利用湿 Q 矢量锋生函数可判断暴雨的强度、落区以及出现和维持时间,700hPa 表现尤为突出。

(3) 分析垂直剖面图得出: Q (湿 Q) 矢量散度在纬向上呈耦合性对称分布,湿 Q 矢量散度辐合中心在 650hPa 左右,其垂直对应暴雨区,分布随高度略向北倾斜。

(4) Q 矢量锋生函数分布表现出典型的

准地转特征,而湿 Q 矢量锋生函数分布则具有明显的中尺度特征。因此, Q 矢量适宜于研究与天气尺度系统相关的大气运动,而湿 Q 矢量更适宜于研究天气尺度系统激发的次级环流。湿 Q 矢量较准地转 Q 矢量更能反映出暴雨的落区和暴雨的中尺度特性,在反映暴雨的强度上也更具优越性。

参考文献

- 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.
- 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.
- 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, 14 (8): 25-30.
- 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 [J]. 气象, 1995, 21 (3): 40-43.
- 杨小燕, 曹希李. 准地转 Q 矢量诊断场与暴雨关系的分析 [J]. 气象, 1995, 21 (11): 17-21.
- Keyser, D., M. J. Reader and R. J. Reed. 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.
- Lawrence B. Dumn. Evaluation of vertical motion: Past, Present, and Future [J]. Wea. Forecasting, 1991, 6 (1): 65-73.
- Hoskins, B. J. and M. Pedder. The diagnosis of middle latitude synoptic development [J]. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 1980, 106 (450): 707-719.
- 车锡果, 刘庆军, 沈跃琴等. 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 [J]. 高原气象, 1995, 14 (2): 192-197.
- 郁淑华, 骆红. 川东北涡暴雨环境场及 Q 矢量分析 [J]. 高原气象, 1991, 10 (1): 70-76.
- 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.
- 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.
- 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.
- 岳彩军, 寿绍文. 定量分析几种 Q 矢量 [J]. 应用气象学报, 2003, 14 (1): 40-47.