

梅雨锋气旋暴雨的 Q 矢量分析: 个例研究^{*}

岳彩军
YUE Caijun

上海台风研究所, 上海, 200030
Shanghai Typhoon Institute, Shanghai 200030, China
2006-04-11 收稿, 2006-08-18 改回.

Yue Caijun. 2008. The Q vector analysis of the heavy rainfall from meiyu front cyclone: a case study. *Acta Meteorologica Sinica*, 66(1): 35–49

Abstract After the modified Q vector (Q^*) is transferred and handled, a kind of Q vector (Q^N) is derived, whose calculating formula is similar to counterpart of quasi-geostrophic Q vector (Q^G), however, Q^N vector is calculated by real wind. The diagnostic abilities of Q^N vector and Q^G vector are compared on the basis of a typical Changjiang-Huaihe Meiyu front cyclone (MYFC) rain storm occurred during 5–6th July 1991, the results show that the diagnostic ability of Q^N vector is better in comparison to the counterpart of Q^G vector, in the meanwhile, the convergence filed of Q^N vector divergence at 700 hPa can serve as a good indicator to the horizontal distribution feather of the simultaneous real precipitation. Then Q^N vector is partitioned into Q_{alst}^N (the “alongstream stretching” component that represents the intensification/weakening of the alongflow thermal gradient by contraction/stretching of isotherm spacing), Q_{curv}^N (the “curvature” component that represents the curvature effect according to which a downstream increase (decrease) in the cyclonic curvature of the isohypses induces subsidence (ascent)), Q_{shdv}^N (the “shear advection” component that represents the thermal advection by horizontal wind shear), and Q_{crst}^N (the “crossstream stretching” that represents the effect of confluence and diffluence of the wind, i. e., the intensification/weakening of the cross-flow thermal gradient forced by confluence and diffluence of the wind) four components in a natural coordinate system that follows the isohypses (hereafter referred to as PG partitioning), and the four terms have specific physical meanings respectively. The application of Q^N PG partitioning to analyze the MYFC torrential rain indicates that Q^N PG partitioning can disclose the potential physical mechanism of synoptic process, which is difficult for “total” Q^N (which is equal to Q^N) to display. Specifically, the horizontal distribution characteristic of $2\nabla \cdot Q_{\text{alst}}^N$ is always similar to counterpart of $2\nabla \cdot Q^N$ and accounts for high proportion on the differing stages of MYFC, which means that the former has large contribution to the latter in the context of exciting and forcing vertical motion generation and plays a primary forcing role in occurrence of MYFC precipitation. During the whole evolution of the heavy rain of MYFC, the effect of Q_{curv}^N on the genesis of rain gets little by little until plays a restrained role. While the counterpart of Q_{shdv}^N gets strong with developing of MYFC and gets weak rapidly until almost disappears as MYFC moves eastward to sea and decays. To Q_{crst}^N , it has no effect on the generation of the precipitation during the developing and strong stages of MYFC in such a manner that it plays a leading role on the MYF decaying stage. In addition, Q_{alst}^N and Q_{curv}^N , Q_{shdv}^N and Q_{crst}^N are analogous respectively on the basis of the divergence horizontal distribution feathers with only difference in intensity and no obvious mutual cancellation during the MYFC developing and strong stages, however, they are basically on the contrary and have marked mutual cancellation on the decaying stage of the MYFC. Obviously, the Q^N PG partitioning can disclose clearly the fact that the forcing factors of precipitation generation are different on differing stages of MYFC.

Key words Q vector analysis, Q^N vector, Q^N vector partitioning, Meiyu front cyclone, Heavy rainfall

^{*} 资助课题: 国家自然科学基金项目(40405009, 40075009, 40205008), 上海市气象局科研开发项目(04A06), 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)。

作者简介: 岳彩军, 主要从事中尺度动力学、海气相互作用研究。Email: yuecaijun2000@163.com

摘要 文中对修改的 Q 矢量(Q^*)进行转化、处理后,所得 Q 矢量(记为 Q^N 矢量)与准地转 Q 矢量具有类似的计算表达式,但其完全用实际风场资料进行计算。结合 1991 年 7 月 5 日 20:00—6 日 20:00 BST 的一次典型江淮梅雨锋气旋暴雨过程比较分析表明, Q^N 矢量诊断能力较准地转 Q 矢量优越,且 700 hPa Q^N 矢量散度辐合场对同时期地面降水场的水平分布特征具有较好指示作用。将 Q^N 矢量沿以等高线为参照线的自然坐标系进行分解(简称为 PG 分解),所得各项 Q_{alst}^N 矢量(沿流伸展项)、 Q_{curv}^N 矢量(曲率项)、 Q_{shdv}^N 矢量(切变平流项)及 Q_{crst}^N 矢量(穿流伸展项)具有明确物理意义。对 1991 年 7 月 5 日 20:00—6 日 20:00 BST 此次江淮梅雨锋气旋暴雨过程进行 Q^N 矢量 PG 分解研究表明, Q^N 矢量 PG 分解可以揭示出天气现象过程中“总”的 Q^N 矢量(即 Q^N 矢量)难以揭示的潜在物理机制。具体地讲,在梅雨锋气旋不同阶段, Q_{alst}^N 矢量散度场的水平分布特征都与总 Q^N 矢量散度场相似,其散度辐合场在总 Q^N 矢量散度辐合场中都占有较大比例,对总 Q^N 矢量散度对垂直运动产生的激发与强迫作用贡献大,对梅雨锋气旋引发降水的发生始终都起着主要的促进强迫作用。 Q_{curv}^N 矢量在整个梅雨锋气旋暴雨演变过程中,对降水发生的促进作用逐渐减小,直至起到抑制作用。 Q_{shdv}^N 矢量对降水发生的促进作用则随着梅雨锋气旋发生发展而明显增强,但随着梅雨锋气旋的东移衰亡,其对降水发生的促进作用迅速减弱,直至对降水的发生基本无影响。对于 Q_{crst}^N 矢量来讲,其在梅雨锋气旋的发生发展及强盛阶段对降水的发生基本不起作用,但在梅雨锋气旋衰亡阶段其对降水发生起着主要促进作用。另外,在梅雨锋气旋发生发展及强盛时期, Q_{alst}^N 矢量与 Q_{curv}^N 矢量、 Q_{shdv}^N 矢量与 Q_{crst}^N 矢量的散度水平分布特征相似,只不过强度上存在差异,但无明显相互抵消现象,而在梅雨锋气旋衰亡阶段就不同了, Q_{alst}^N 矢量与 Q_{curv}^N 矢量、 Q_{shdv}^N 矢量与 Q_{crst}^N 矢量的散度水平分布特征基本相反,且存在明显的相互抵消现象。可见,通过 Q^N 矢量 PG 分解可以揭示出梅雨锋气旋不同阶段降水的强迫因子是不同的。

关键词 Q 矢量分析, Q^N 矢量, Q^N 矢量分解, 梅雨锋气旋, 暴雨

中图法分类号 P44

1 引言

Q 矢量被认为是诊断垂直运动的一种有效方法,它包含动力学和热力学信息,在天气诊断分析工作中备受青睐。中国学者白乐生等(1988)在 20 世纪 80 年代后期将准地转 Q 矢量(Hoskins, et al., 1978)引入并应用于强对流天气诊断分析。之后,国内学者对 Q 矢量理论及应用展开广泛而深入研究。先后有人(李柏,1997; Davies-Jones, 1991; 张兴旺,1998,1999; 姚秀萍,2000,2001; Yao, et al., 2004; 岳彩军等,2003)提出半地转 Q 矢量、修改的 Q 矢量、湿 Q 矢量以及改进的湿 Q 矢量概念。与此同时, Q 矢量分析方法在梅雨锋暴雨、西南涡暴雨、登陆台风暴雨及数值预报产品释用等方面都得到较好应用。关于 Q 矢量分析方法在中国应用情况,以及不同 Q 矢量诊断特性差异情况,岳彩军(1999)、岳彩军等(2005)还专门对此作过综述及分析比较研究。一般来讲,对 Q 分析方法应用主要针对“总”的 Q 矢量,许多学者(Keyser, et al., 1988, 1992; Kurz, 1992; Barnes, et al., 1993; Schar, et al., 1993; Martin, 1999; Morgan, 1999)研究发现,将 Q 矢量分解在以等位温线为参照线的自然坐标系(简称为 PT 分解)中,可以揭示出“总”的 Q 矢量难以揭示的天气过程中潜在的物理机制,但他们的工

作主要针对准地转 Q 矢量,由于准地转 Q 矢量诊断能力的局限性,致使 Q 矢量 PT 分解应用范围受到了限制。最近,Yue 等(2003)将 PT 分解思想应用于湿 Q 矢量,从而拓展了该分解思想的应用范围。多数情况下, Q 矢量分解就是指 PT 分解。但 Jusem 和 Atlas(1998)、Donnadille 等(2001)提出另外一种 Q 矢量分解方法,即将 Q 矢量分解在以等高线为参照线的自然坐标系(简称为 PG 分解)中。两种不同 Q 矢量分解方法各有其特点,PT 分解方法主要用于定量诊断分析不同天气尺度对垂直运动场产生的强迫作用,而 PG 分解思想则主要关注于流场的几何结构(如等高线的汇合、疏散、水平切变造成的温度平流以及曲率等)对垂直运动产生的激发与强迫作用。同样,由于 Jusem 和 Atlas(1998)、Donnadille 等(2001)对该方法的研究是基于准地转 Q 矢量,因而使其应用范围有限。如何拓展这种先进诊断分析方法的应用领域是一项非常值得研究的工作。本研究首先对张兴旺(1999)修改的 Q 矢量进行转化、处理,所得 Q 矢量记为 Q^N 矢量,由于 Q^N 矢量完全用实际风场计算,因而 Q^N 矢量诊断特性将较准地转 Q 矢量优越,不仅能用于研究大尺度特征明显的天气过程,也能用于诊断分析中尺度特征明显的天气过程。同时, Q^N 矢量与准地转 Q 矢量具有类似的计算表达式,这样保证对其进行 PG 分解后,各分解项

具有明确的物理意义。众所周知,梅雨锋系统是夏季东亚地区最重要的天气系统之一,而梅雨锋气旋是一类与梅雨期暴雨密切相关的天气系统(廖捷等, 2005; 陈丽芳等, 2006; 赵玉春等, 2007)。1991年7月5日20:00—6日20:00(北京时间,下同)发生了一次典型的江淮梅雨锋气旋暴雨过程。该过程主要由梅雨锋气旋引起。许多人(陶祖钰等, 1994; 寿绍文等, 2001)分析研究过这次天气过程。Yue等(2003)也曾用湿 \mathbf{Q} 矢量 PT 分解对其进行诊断分析,发现不同天气尺度在暴雨演变过程中所起的作用不同。但梅雨锋气旋的流场几何结构对此次暴雨过程演变究竟起什么样作用,这方面的研究并不多见,尤其是定量化研究尚未见到。为此,本文将 \mathbf{Q}^N 矢量 PG 分解用于诊断分析此次江淮梅雨锋气旋暴雨过程,以定量揭示梅雨锋气旋的流场几何结构,对此次暴雨演变过程中垂直运动场产生的激发与强迫作用。

2 对修改的 \mathbf{Q} 矢量(记为 \mathbf{Q}^*)转化、处理

张兴旺(1999)从准静力、绝热、无摩擦、 f 平面 p 坐标系的原始方程组出发,得到一种修改的 \mathbf{Q} 矢量(\mathbf{Q}^*),其在 p 坐标系的计算表达式为

$$\mathbf{Q}_x^* = \frac{1}{2} \left[f \left(\frac{\partial v}{\partial P} \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial P} \frac{\partial v}{\partial x} \right) - h \frac{\partial \mathbf{V}}{\partial x} \cdot \nabla \theta \right] \quad (1)$$

$$\mathbf{Q}_y^* = \frac{1}{2} \left[f \left(\frac{\partial v}{\partial P} \frac{\partial u}{\partial y} - \frac{\partial u}{\partial P} \frac{\partial v}{\partial y} \right) - h \frac{\partial \mathbf{V}}{\partial y} \cdot \nabla \theta \right] \quad (2)$$

其中 $h = \frac{R}{P} \left(\frac{P}{1000} \right)^{R/c_p}$, $\theta = T \left(\frac{1000}{P} \right)^{R/c_p}$, $\mathbf{V} = ui + vj$,其他为气象上常用物理参数。

实际上,式(1)、(2)可分别表示为:

$$\mathbf{Q}_x^* = \frac{1}{2} \left[f \left(\frac{\partial v}{\partial P} \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial P} \frac{\partial v}{\partial x} \right) - \left(\frac{\partial u}{\partial x} \frac{\partial \alpha}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial x} \frac{\partial \alpha}{\partial y} \right) \right] \quad (3)$$

$$\mathbf{Q}_y^* = \frac{1}{2} \left[f \left(\frac{\partial v}{\partial P} \frac{\partial u}{\partial y} - \frac{\partial u}{\partial P} \frac{\partial v}{\partial y} \right) - \left(\frac{\partial u}{\partial y} \frac{\partial \alpha}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \frac{\partial \alpha}{\partial y} \right) \right] \quad (4)$$

其中 $\alpha = \frac{1}{\rho} = \frac{RT}{P}$ 。Dutton(1976)曾指出,替换平衡近似用地转风垂直切变代替实际风垂直切变,要比用地转风代替实际风更为精确。于是令 $\frac{\partial u}{\partial P} \approx \frac{\partial u_g}{\partial P}$,

$\frac{\partial v}{\partial P} \approx \frac{\partial v_g}{\partial P}$,则式(3)、(4)可分别记为

$$\mathbf{Q}_x^N = \frac{1}{2} \left[\frac{\partial(fv_g)}{\partial P} \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial(fu_g)}{\partial P} \frac{\partial v}{\partial x} - \left(\frac{\partial u}{\partial x} \frac{\partial \alpha}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial x} \frac{\partial \alpha}{\partial y} \right) \right] \quad (5)$$

$$\mathbf{Q}_y^N = \frac{1}{2} \left[\frac{\partial(fv_g)}{\partial P} \frac{\partial u}{\partial y} - \frac{\partial(fu_g)}{\partial P} \frac{\partial v}{\partial y} - \left(\frac{\partial u}{\partial y} \frac{\partial \alpha}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \frac{\partial \alpha}{\partial y} \right) \right] \quad (6)$$

其中,我们将经转化、处理后的 \mathbf{Q}^* 矢量记为 \mathbf{Q}^N ,且 \mathbf{Q}_x^N 和 \mathbf{Q}_y^N 分别为 \mathbf{Q}^N 矢量在 x 方向和 y 方向分量。 \mathbf{Q}^N 矢量与 \mathbf{Q}^* 矢量之间的差异仅在于 $\frac{\partial u_g}{\partial P}$ 和 $\frac{\partial u}{\partial P}$ 、 $\frac{\partial v_g}{\partial P}$ 和 $\frac{\partial v}{\partial P}$ 。

利用地转风平衡关系 $fv_g = \frac{\partial \varphi}{\partial x}$ 和 $fu_g = -\frac{\partial \varphi}{\partial y}$,

以及将 $\frac{\partial \varphi}{\partial P} = -\alpha$ 代入,且整理合并式(5)、(6)得到

$$\mathbf{Q}^N = (\mathbf{Q}_x^N, \mathbf{Q}_y^N) = -i \left(\frac{\partial u}{\partial x} \frac{\partial \alpha}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial x} \frac{\partial \alpha}{\partial y} \right) - j \left(\frac{\partial u}{\partial y} \frac{\partial \alpha}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \frac{\partial \alpha}{\partial y} \right) \quad (7)$$

式(7)即为 \mathbf{Q}^N 矢量的计算表达式,相似于 Jusem 和 Atlas(1998)的式(2.5),两者差异仅在于式(7)中为实际风而 Jusem 和 Atlas(1998)的式(2.5)中为地转风。如果用地转风代替实际风,则 \mathbf{Q}^N 矢量就完全退化为 Hoskins 所定义的准地转 \mathbf{Q} 矢量。

以 \mathbf{Q}^N 矢量散度为强迫项的 ω 方程为

$$\nabla^2(\alpha\omega) + f^2 \frac{\partial^2 \omega}{\partial P^2} = -2 \nabla \cdot \mathbf{Q}^N \quad (8)$$

当 ω 场具有波状特征时,式(8)左边与 $-\omega$ 成正比,由此可知 $\nabla \cdot \mathbf{Q}^N \propto \omega$ 。当 $\nabla \cdot \mathbf{Q}^N < 0$,则 $\omega < 0$,上升运动;当 $\nabla \cdot \mathbf{Q}^N > 0$,则 $\omega > 0$,下沉运动。

3 天气过程及资料介绍

3.1 天气过程概况

1991年7月5日20:00—6日20:00是一次典型的江淮梅雨锋气旋暴雨过程。此次暴雨过程是由准静止锋上气旋波动的发展移动而引发的江淮流域大暴雨。5日20:00左右是梅雨锋气旋发展期,在700 hPa 高空图(图1a)上,沿112°E有一狭长的低压区,此时地面降水(图2a)刚开始,雨区呈块状散

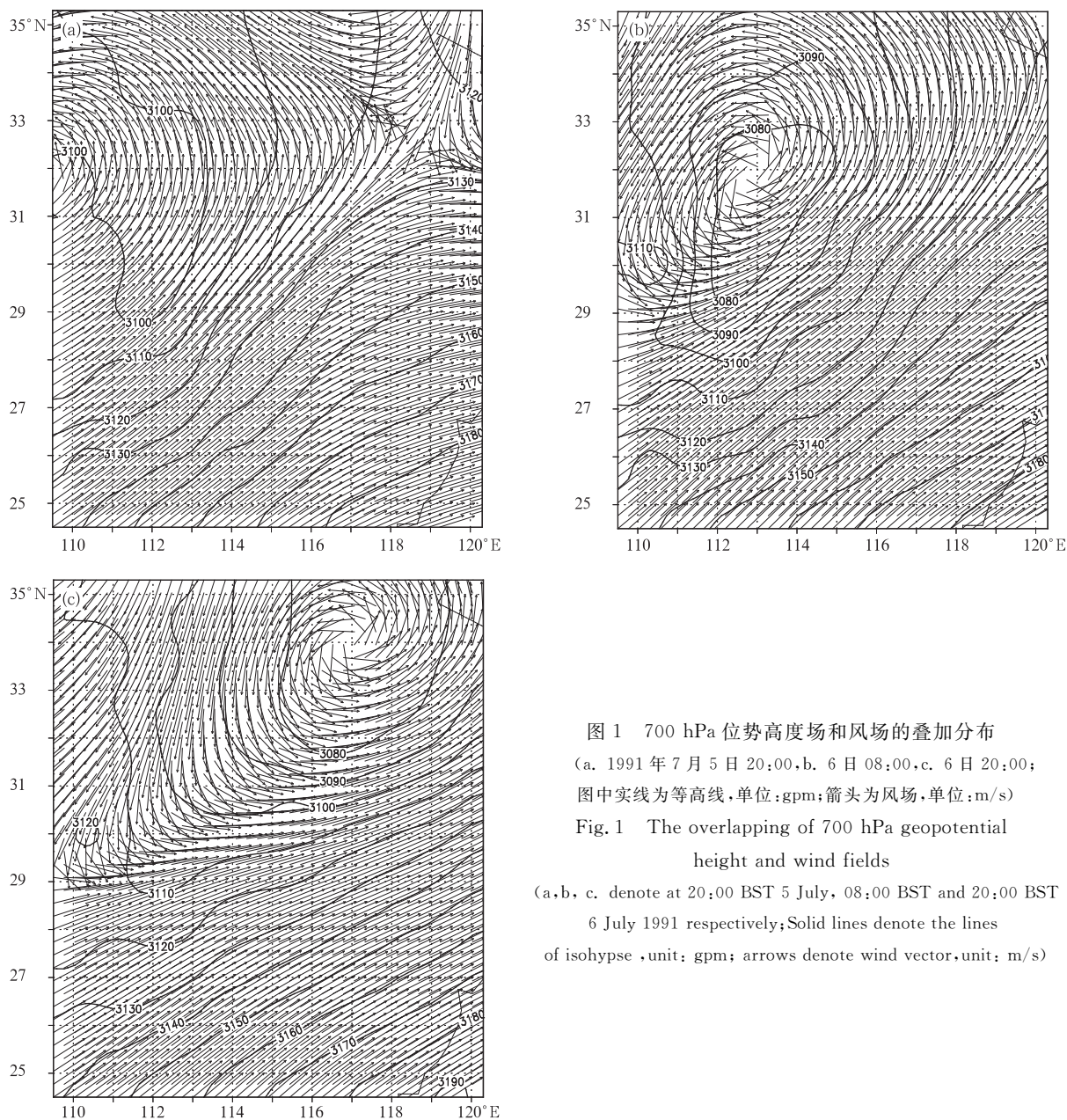


图1 700 hPa 位势高度场和风场的叠加分布

(a. 1991年7月5日20:00, b. 6日08:00, c. 6日20:00;
图中实线为等高线,单位:gpm;箭头为风场,单位:m/s)

Fig. 1 The overlapping of 700 hPa geopotential
height and wind fields

(a, b, c. denote at 20:00 BST 5 July, 08:00 BST and 20:00 BST
6 July 1991 respectively; Solid lines denote the lines
of isohypse, unit: gpm; arrows denote wind vector, unit: m/s)

乱分布,主要有 A(30°N, 110.5°E)、B(30.1°N, 112.2°E)、C(32.0°N, 112.1°E)及 D(31.5°N, 113.9°E) 4个降水中心存在。5日20:00以后至6日08:00 低压东移并发展加强,地面降水也逐渐增强。6日08:00 是此次降水过程的一个明显转折点,此时刻江淮之间已有一明显的梅雨锋气旋形成,在700 hPa 高空图(图1b)上,在(31.5°N, 113°E)附近有一个明显的气旋中心存在,与此同时,地面降水(图2b)也突然增幅,雨区呈片状分布,雨区中有非

常强的局区域性降水分布,以 E(32.5°N, 116.2°E)强降水中心为主,构成一条呈东西向分布的主降水雨带。6日08:00至6日20:00之前是降水最强、最集中阶段,降水在时、空分布上表现的都非常密集,也是梅雨锋气旋发展的最强盛时期,具有非常典型的中尺度特征。6日20:00左右,梅雨锋气旋渐东移入海,700 hPa(图1c)上仅为—南北向的槽,此次降水过程基本结束,地面仅出现—暴雨雨团(图2c)。

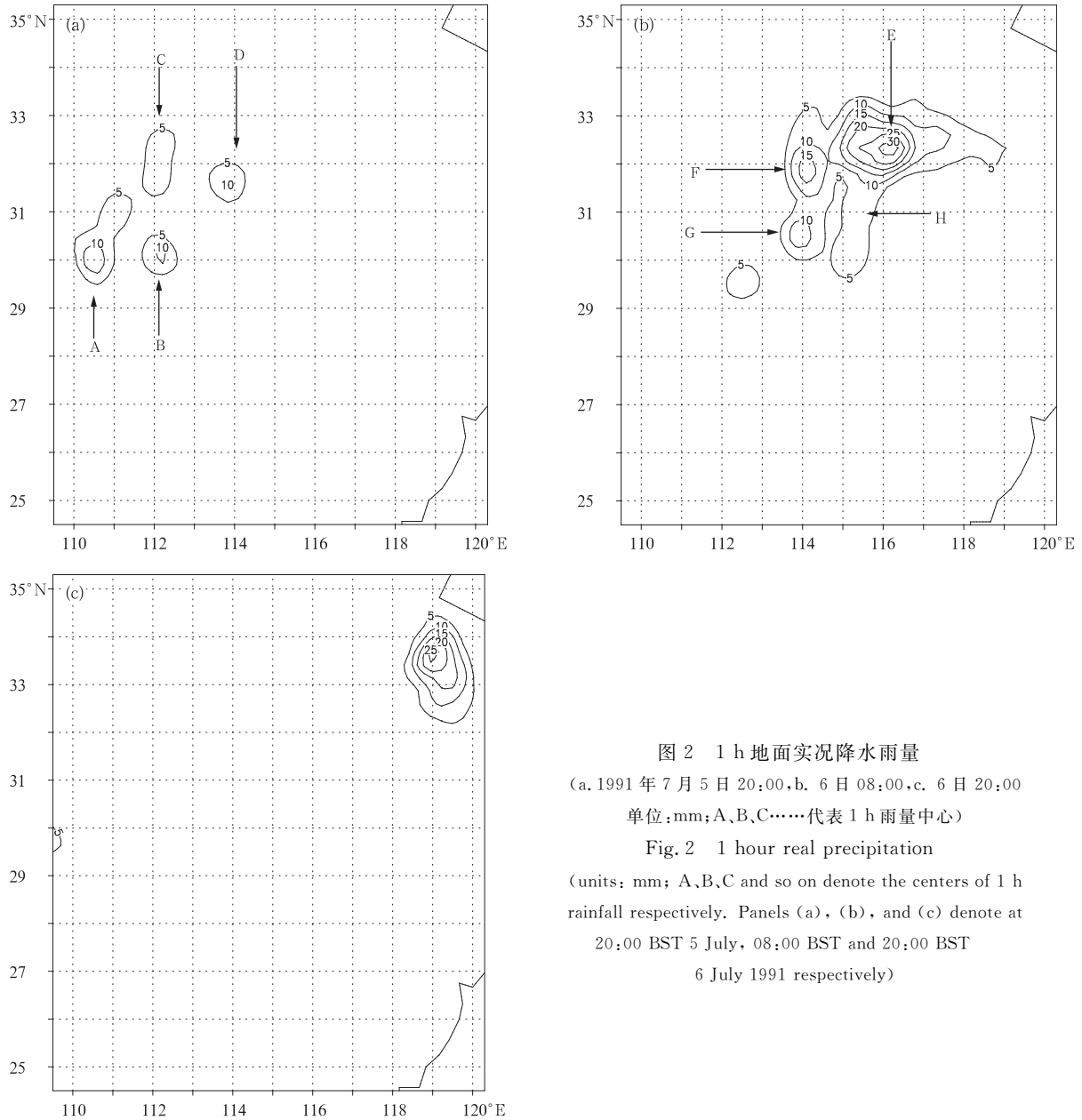


图2 1 h地面实况降水雨量
(a. 1991年7月5日20:00, b. 6日08:00, c. 6日20:00
单位:mm; A、B、C……代表1 h雨量中心)

Fig. 2 1 hour real precipitation
(units: mm; A, B, C and so on denote the centers of 1 h
rainfall respectively. Panels (a), (b), and (c) denote at
20:00 BST 5 July, 08:00 BST and 20:00 BST
6 July 1991 respectively)

3.2 资料介绍

1991年7月5日20:00、6日08:00 BST及20:00 BST基本上代表了这次江淮梅雨锋气旋暴雨和梅雨锋气旋的发展、强盛、衰弱3个阶段。我们采用5日20:00、6日08:00 BST及6日20:00 BST实况资料作为我们的诊断分析资料。经客观分析处理成水平分别率为 $30\text{ km} \times 30\text{ km}$ ，垂直方向共15层(1000、950、900、850、750、700、650、600、550、500、400、300、200、100 hPa)。由于实况主要降水范围约为 $29.25^{\circ}\text{--}34.80^{\circ}\text{N}$ 、 $109.72^{\circ}\text{--}120.33^{\circ}\text{E}$ ，因而这

个区域成为本文主要分析范围。

4 Q^N 矢量 PG 分解及应用

4.1 Q^N 矢量 PG 分解

参照 Jusem 和 Atlas(1998)的工作思路,将式(7)中 Q^N 矢量分解在以等高线为参照线的自然坐标系中,则有

$$Q^N = -t \left(\frac{\partial S^*}{\partial s} \frac{\partial \alpha}{\partial s} + K_s S^* \frac{\partial \alpha}{\partial n} \right) - n \left(\frac{\partial S^*}{\partial n} \frac{\partial \alpha}{\partial s} + K_n S^* \frac{\partial \alpha}{\partial n} \right) \quad (9)$$

上式中 s 轴与局地等高线平行,单位矢量为 t ,且 t 为风场方向。 n 轴与局地等高线正交,单位矢量为 n 。 (t, n, k) 符合右手法则,其中 k 为垂直方向上单位矢量。 K_s 为等高线曲率,对于北半球来讲,逆时针运动(气旋) $K_s > 0$,顺时针运动(反气旋) $K_s < 0$ 。 K_n 为等高线的正交曲率,即 K_n 曲率线正交于等高线,分流时 $K_n > 0$,汇合时 $K_n < 0$ 。 S^* 为实际水平风速大小即 $S^* = \sqrt{u^2 + v^2}$, α 为比容。需要强调的是,式(9)与(7)是等同的,二者表达方式上的差异只不过是因为各自处于不同的自然坐标系中而已。

式(9)可分为以下4个部分:

$$Q_{\text{alst}}^{\text{N}} = -t \frac{\partial S^*}{\partial s} \frac{\partial \alpha}{\partial s} \quad (10)$$

$$Q_{\text{curv}}^{\text{N}} = -t S^* K_s \frac{\partial \alpha}{\partial n} \quad (11)$$

$$Q_{\text{shdv}}^{\text{N}} = -n \frac{\partial S^*}{\partial n} \frac{\partial \alpha}{\partial s} \quad (12)$$

$$Q_{\text{crst}}^{\text{N}} = -n S^* K_n \frac{\partial \alpha}{\partial n} \quad (13)$$

由于 Q^{N} 矢量与准地转 Q 矢量的差异仅在于前者用实际风计算、后者用地转风计算,因此上述四项物理意义清楚。式(10)称为沿流伸展项(along-stream stretching),表示等高线之间的水平空间收缩/伸展致使沿着气流的温度梯度增强/减弱。式(11)称为曲率项(curvature),描述曲率效果,即等高线的气旋曲率在下游方向增加(减小)将引起下沉(上升)运动。式(12)称为切变平流项(shear advection),表示由水平风切变所引起的温度平流。式(13)称为穿流伸展项(crosstream stretching),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。有关上述四项物理含义的详细解释和说明请参见 Jusem 和 Atlas (1998)、Donnadille 等(2001)工作。 $Q_{\text{alst}}^{\text{N}}$ 矢量、 $Q_{\text{curv}}^{\text{N}}$ 矢量、 $Q_{\text{shdv}}^{\text{N}}$ 矢量、 $Q_{\text{crst}}^{\text{N}}$ 矢量与 Q^{N} 矢量具有同样的诊断特性。

Jusem 和 Atlas(1998)在将其文中式(2.10)——(2.13)转换到直角坐标系的推导过程中,大多数用到了地转风平衡关系式,而我们计算使用的是实际风,因此本文需要使用与 Jusem 和 Atlas(1998)类似但又不同的推导方法,重新推导式(10)——(13)在直角坐标系中的计算表达式,具体计算公式及其推导过程详见附录。

4.2 具体应用

结合 1991 年 7 月 5 日 20:00—6 日 20:00 发生的江淮梅雨锋气旋暴雨过程,比较 Q^{N} 矢量与准地转 Q 矢量发现(图略), Q^{N} 矢量的诊断能力明显较准地转 Q 矢量强,在梅雨锋气旋暴雨的强盛阶段尤为明显。进一步比较 850 hPa(图略)、700 hPa(图 3e、图 4e、图 5e)及 500 hPa(图略) Q^{N} 矢量散度场发现,700 hPa Q^{N} 矢量散度辐合场对同期地面降水不均匀分布特点有较好反映能力。因此,基于 700 hPa Q^{N} 矢量散度场,利用 Q^{N} 矢量 PG 分解来诊断分析 1991 年 7 月 5 日 20:00—6 日 20:00 此次江淮梅雨锋气旋暴雨过程。

(1) 5 日 20:00 BST

由图 3a、3b 可以看到,A、B、C 降水中心都处在 $2\nabla \cdot Q_{\text{alst}}^{\text{N}}$ 和 $2\nabla \cdot Q_{\text{curv}}^{\text{N}}$ 辐合区中。B、C 降水中心也处在 $Q_{\text{shdv}}^{\text{N}}$ 矢量散度(图 3c)辐合区中。而 $Q_{\text{crst}}^{\text{N}}$ 矢量散度场(图 3d)的辐合、辐散特征不明显,对雨区基本无反映(表 1)。

表 1 1991 年 7 月 5 日 20:00 700 hPa Q 矢量散度辐合场对同期 1 h 雨量中心位置
Table 1 The reflecting ability of convergence field of 700 hPa Q vector divergence to synchronous 1 h rain center at 20:00 BST 5 July 1991

1 h 雨量中心位置	700 hPa Q 矢量散度辐合强度(单位: $10^{-15} \text{ hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-3}$)			
	$2\nabla \cdot Q_{\text{alst}}^{\text{N}}$	$2\nabla \cdot Q_{\text{curv}}^{\text{N}}$	$2\nabla \cdot Q_{\text{shdv}}^{\text{N}}$	$2\nabla \cdot Q_{\text{crst}}^{\text{N}}$
A(30.0°N, 110.5°E)	-0.6	-0.2	/	/
B(30.1°N, 112.2°E)	-0.6	-0.2	-0.2	/
C(32.1°N, 112.1°E)	-0.4	-0.4	-0.2	/
D(31.5°N, 113.9°E)	/	/	/	/

注:“/”代表基本无 Q 矢量散度辐合

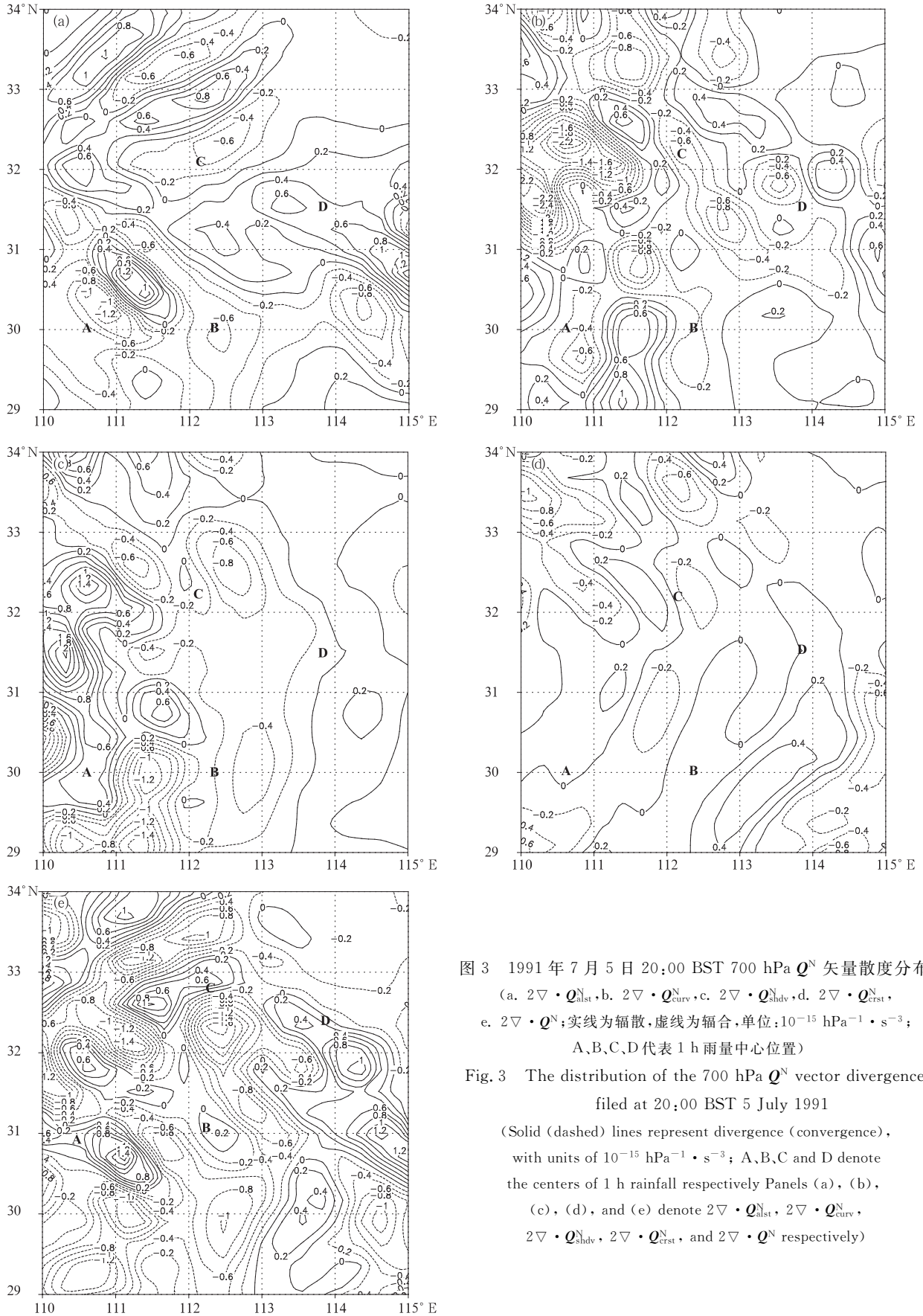


图 3 1991 年 7 月 5 日 20:00 BST 700 hPa Q^N 矢量散度分布
 (a. $2\nabla \cdot Q^N_{ist}$, b. $2\nabla \cdot Q^N_{curv}$, c. $2\nabla \cdot Q^N_{shdv}$, d. $2\nabla \cdot Q^N_{crst}$,
 e. $2\nabla \cdot Q^N$; 实线为辐散, 虚线为辐合, 单位: $10^{-15} \text{ hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-3}$;
 A、B、C、D 代表 1 h 雨量中心位置)

Fig. 3 The distribution of the 700 hPa Q^N vector divergence
 filed at 20:00 BST 5 July 1991
 (Solid (dashed) lines represent divergence (convergence),
 with units of $10^{-15} \text{ hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-3}$; A、B、C and D denote
 the centers of 1 h rainfall respectively Panels (a), (b),
 (c), (d), and (e) denote $2\nabla \cdot Q^N_{ist}$, $2\nabla \cdot Q^N_{curv}$,
 $2\nabla \cdot Q^N_{shdv}$, $2\nabla \cdot Q^N_{crst}$, and $2\nabla \cdot Q^N$ respectively)

相对来讲, $2\nabla \cdot \mathbf{Q}_{\text{alst}}^{\text{N}}$ 和 $2\nabla \cdot \mathbf{Q}_{\text{curv}}^{\text{N}}$ 辐合场与雨区对应关系较好,二者占“总”的 \mathbf{Q}^{N} 矢量散度 ($2\nabla \cdot \mathbf{Q}^{\text{N}}$) (图 3e) 辐合场的比重也相对较大。 $2\nabla \cdot \mathbf{Q}_{\text{shdv}}^{\text{N}}$ 对雨区的反映能力较前二者略差些,但明显好于 $2\nabla \cdot \mathbf{Q}_{\text{crst}}^{\text{N}}$ 。另外,我们也注意到,A降水中心处在 $2\nabla \cdot \mathbf{Q}_{\text{alst}}^{\text{N}}$ 、 $2\nabla \cdot \mathbf{Q}_{\text{curv}}^{\text{N}}$ 辐合区中,表明A处降水主要由 $\mathbf{Q}_{\text{alst}}^{\text{N}}$ 矢量和 $\mathbf{Q}_{\text{curv}}^{\text{N}}$ 矢量强迫产生的垂直运动造成的。对于B、C降水中心来讲,都处在 $2\nabla \cdot \mathbf{Q}_{\text{alst}}^{\text{N}}$ 、 $2\nabla \cdot \mathbf{Q}_{\text{curv}}^{\text{N}}$ 、 $2\nabla \cdot \mathbf{Q}_{\text{shdv}}^{\text{N}}$ 辐合区中,表明它们主要由 $\mathbf{Q}_{\text{alst}}^{\text{N}}$ 矢量、 $\mathbf{Q}_{\text{curv}}^{\text{N}}$ 矢量、 $\mathbf{Q}_{\text{shdv}}^{\text{N}}$ 矢量共同强迫所造成的。而对于 $\mathbf{Q}_{\text{crst}}^{\text{N}}$ 矢量来讲,其对该阶段降水基本不起作用。因此,对于在此次梅雨锋气旋暴雨的发展阶段, $\mathbf{Q}_{\text{alst}}^{\text{N}}$ 矢量、 $\mathbf{Q}_{\text{curv}}^{\text{N}}$ 矢量对降水的发生起主要强迫作用, $\mathbf{Q}_{\text{shdv}}^{\text{N}}$ 矢量强迫作用仅次于前二者,而 $\mathbf{Q}_{\text{crst}}^{\text{N}}$ 矢量对降水的发生基本无影响。对于D降水中心来讲,在 $2\nabla \cdot \mathbf{Q}^{\text{N}}$ 场上也反映不出来,其可能主要是由对流凝结潜热造成的。

表 2 1991年7月6日08:00 700 hPa \mathbf{Q} 矢量散度辐合场对同期1h雨量中心位置

Table 2 The reflecting ability of convergence field of 700 hPa \mathbf{Q} vector divergence to synchronous 1 h rain center at 08:00 BST 6 July 1991

1 h 雨量中心位置	700 hPa \mathbf{Q} 矢量散度辐合强度(单位: $10^{-15} \text{ hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-3}$)			
	$2\nabla \cdot \mathbf{Q}_{\text{alst}}^{\text{N}}$	$2\nabla \cdot \mathbf{Q}_{\text{curv}}^{\text{N}}$	$2\nabla \cdot \mathbf{Q}_{\text{shdv}}^{\text{N}}$	$2\nabla \cdot \mathbf{Q}_{\text{crst}}^{\text{N}}$
E(32.5°N, 116.2°E)	-0.4	-0.2	-0.6	/
F(32.0°N, 114.2°E)	/	/	/	/
G(30.5°N, 114.0°E)	-0.6	/	-1.0	/
H(31.0°N, 115.5°E)	-1.2	/	-0.4	/

注:“/”代表基本无 \mathbf{Q} 矢量散度辐合

合场对主要降水中心有较好反映能力,但反映不出主雨带的东西向带状分布特征。结合 $2\nabla \cdot \mathbf{Q}^{\text{N}}$ (图 4e) 来看, $2\nabla \cdot \mathbf{Q}_{\text{alst}}^{\text{N}}$ 、 $2\nabla \cdot \mathbf{Q}_{\text{shdv}}^{\text{N}}$ 水平分布特征与 $2\nabla \cdot \mathbf{Q}^{\text{N}}$ 最为相似,二者占有较大比重。 $\mathbf{Q}_{\text{curv}}^{\text{N}}$ 矢量散度辐合场只是对主雨带有所反映,但与雨区对应的辐合强度较弱。这表明,降水主要由 $\mathbf{Q}_{\text{alst}}^{\text{N}}$ 矢量、 $\mathbf{Q}_{\text{shdv}}^{\text{N}}$ 矢量及 $\mathbf{Q}_{\text{curv}}^{\text{N}}$ 矢量共同强迫产生,其中 $\mathbf{Q}_{\text{alst}}^{\text{N}}$ 矢量、 $\mathbf{Q}_{\text{shdv}}^{\text{N}}$ 矢量的贡献更大,降水中心主要由二者共同强迫所致。 $\mathbf{Q}_{\text{crst}}^{\text{N}}$ 矢量对整个降水的发生基本无贡献。

相对于5日20:00来讲, $\mathbf{Q}_{\text{alst}}^{\text{N}}$ 矢量对降水的发生依然起主要的强迫作用,而 $\mathbf{Q}_{\text{curv}}^{\text{N}}$ 矢量的强迫作用明显减弱,相反, $\mathbf{Q}_{\text{shdv}}^{\text{N}}$ 矢量的强迫作用显著增强。 $\mathbf{Q}_{\text{crst}}^{\text{N}}$ 矢量依旧对降水发生不起作用。

(2) 6日08:00

由图 4a 可知,雨区基本都处在 $\mathbf{Q}_{\text{alst}}^{\text{N}}$ 矢量散度辐合区中, $2\nabla \cdot \mathbf{Q}_{\text{alst}}^{\text{N}}$ 辐合场将降水分布的不均匀性很好地体现出来了。 32° — 33°N 的主雨带也处在弱的 $\mathbf{Q}_{\text{curv}}^{\text{N}}$ 矢量散度(图 4b)辐合区中,与雨区对应的 $2\nabla \cdot \mathbf{Q}_{\text{curv}}^{\text{N}}$ 辐合强度较 $2\nabla \cdot \mathbf{Q}_{\text{alst}}^{\text{N}}$ 弱,对该主雨带的不均匀特征也基本无反映。同时主雨带以南的雨区在 $2\nabla \cdot \mathbf{Q}_{\text{curv}}^{\text{N}}$ 辐合场上也基本体现不出。图 4c 中 $2\nabla \cdot \mathbf{Q}_{\text{shdv}}^{\text{N}}$ 辐合区将主要降水区很好地反映出来了,对于位于 32° — 33°N 的主雨带来讲,其所包含的 E 强降水中心也被 $2\nabla \cdot \mathbf{Q}_{\text{shdv}}^{\text{N}}$ 辐合中心很好反映出来了,但主雨带东西向狭长分特征在 $2\nabla \cdot \mathbf{Q}_{\text{shdv}}^{\text{N}}$ 辐合场上体现不出来。整个雨区上空 $2\nabla \cdot \mathbf{Q}_{\text{crst}}^{\text{N}}$ (图 4d) 的辐合、辐散特征仍不明显,也即此时的 $2\nabla \cdot \mathbf{Q}_{\text{crst}}^{\text{N}}$ 场对雨区仍无反映(表 2)。

简而言之, $\mathbf{Q}_{\text{alst}}^{\text{N}}$ 矢量散度辐合场对整个雨区的片状及主雨区的带状分布特征反映能力强,对降水分布的不均匀性也有较强反映。 $\mathbf{Q}_{\text{shdv}}^{\text{N}}$ 矢量散度辐

(3) 6日20:00 BST

由图 5a、5d 可知,在 $\mathbf{Q}_{\text{alst}}^{\text{N}}$ 矢量、 $\mathbf{Q}_{\text{crst}}^{\text{N}}$ 矢量散度场中都有明显的辐合中心与“总”的 \mathbf{Q}^{N} 矢量散度(图 5e)辐合中心对应,且辐合场的水平分布特征也非常相似,表明 $2\nabla \cdot \mathbf{Q}_{\text{alst}}^{\text{N}}$ 、 $2\nabla \cdot \mathbf{Q}_{\text{crst}}^{\text{N}}$ 在 $2\nabla \cdot \mathbf{Q}^{\text{N}}$ 中占有较大比例,对此时的降水起主要强迫作用。而对于 $\mathbf{Q}_{\text{curv}}^{\text{N}}$ 矢量来讲,与 $2\nabla \cdot \mathbf{Q}^{\text{N}}$ 辐合区对应的为 $2\nabla \cdot \mathbf{Q}_{\text{curv}}^{\text{N}}$ (图 5b) 辐散区,表明 $\mathbf{Q}_{\text{curv}}^{\text{N}}$ 矢量对降水的发生不仅没有起到促进作用,相反,其引发的下沉运动不利于降水的发生。在 $2\nabla \cdot \mathbf{Q}^{\text{N}}$ (图 5e) 辐合区内 $2\nabla \cdot \mathbf{Q}_{\text{shdv}}^{\text{N}}$ (图 5c) 的辐合、辐散特征为相间分布,强度都较弱,对降水发生的促进或抑制作用不明显。同时我们也注意到,在这个阶段, $2\nabla \cdot \mathbf{Q}_{\text{alst}}^{\text{N}}$ 与 $2\nabla \cdot \mathbf{Q}_{\text{curv}}^{\text{N}}$

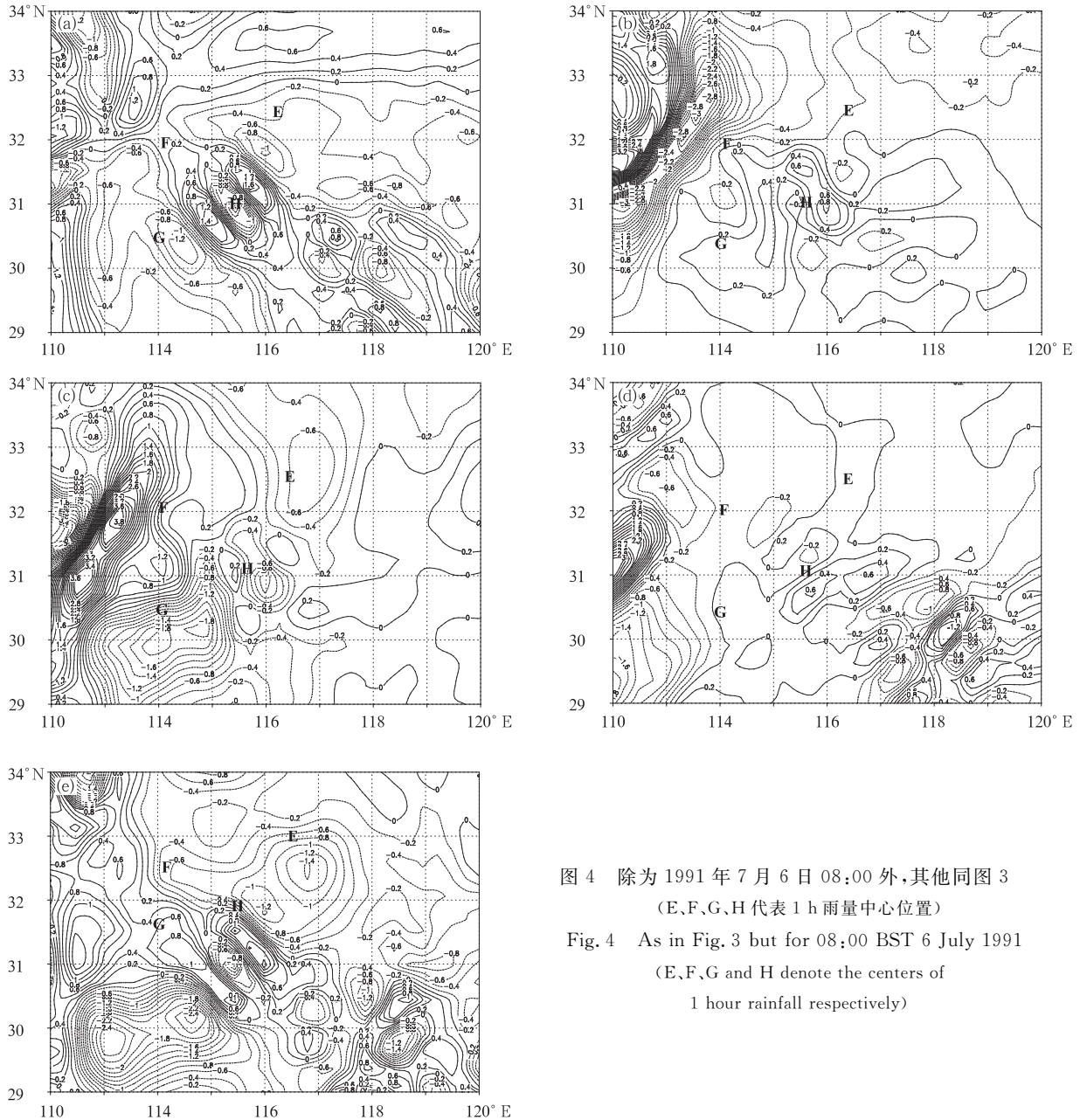


图4 除为1991年7月6日08:00外,其他同图3

(E、F、G、H代表1 h雨量中心位置)

Fig. 4 As in Fig. 3 but for 08:00 BST 6 July 1991

(E、F、G and H denote the centers of 1 hour rainfall respectively)

的辐合、辐散特征几乎呈反位相,二者之间存在明显的相互抵消现象,同时在 $2\nabla \cdot \mathbf{Q}_{shdv}^N$ 与 $2\nabla \cdot \mathbf{Q}_{crst}^N$ 之间也存在上述类似现象。而这种明显的相互抵消现象在5日20:00和6日08:00都未曾出现过。

综合上述分析结果表明,在梅雨锋气旋的各个阶段, \mathbf{Q}_{alst}^N 矢量都有助于梅雨锋气旋引发降水发生; \mathbf{Q}_{curv}^N 矢量的强迫作用与梅雨锋气旋的演变位相基本是反位相,即在梅雨锋气旋的发展阶段,其对梅雨锋气旋引发降水起明显的促进作用,在梅雨锋气旋的

强盛阶段,其促进作用明显减弱,到衰亡阶段,其对降水的发生起抑制作用; \mathbf{Q}_{shdv}^N 矢量的促进作用与梅雨锋气旋发展基本是同位相,随着梅雨锋气旋发展、强盛,其对梅雨锋气旋引发降水的促进作用明显增强,随着梅雨锋气旋东移减弱,其对降水的促进作用也迅速减弱; \mathbf{Q}_{crst}^N 矢量的强迫作用较为特殊,其在梅雨锋气旋的发生及强盛时期,对降水的发生基本无贡献,但到梅雨锋气旋衰亡阶段,它对降水的发生却起了明显的促进作用。这一方面揭示出,在整个

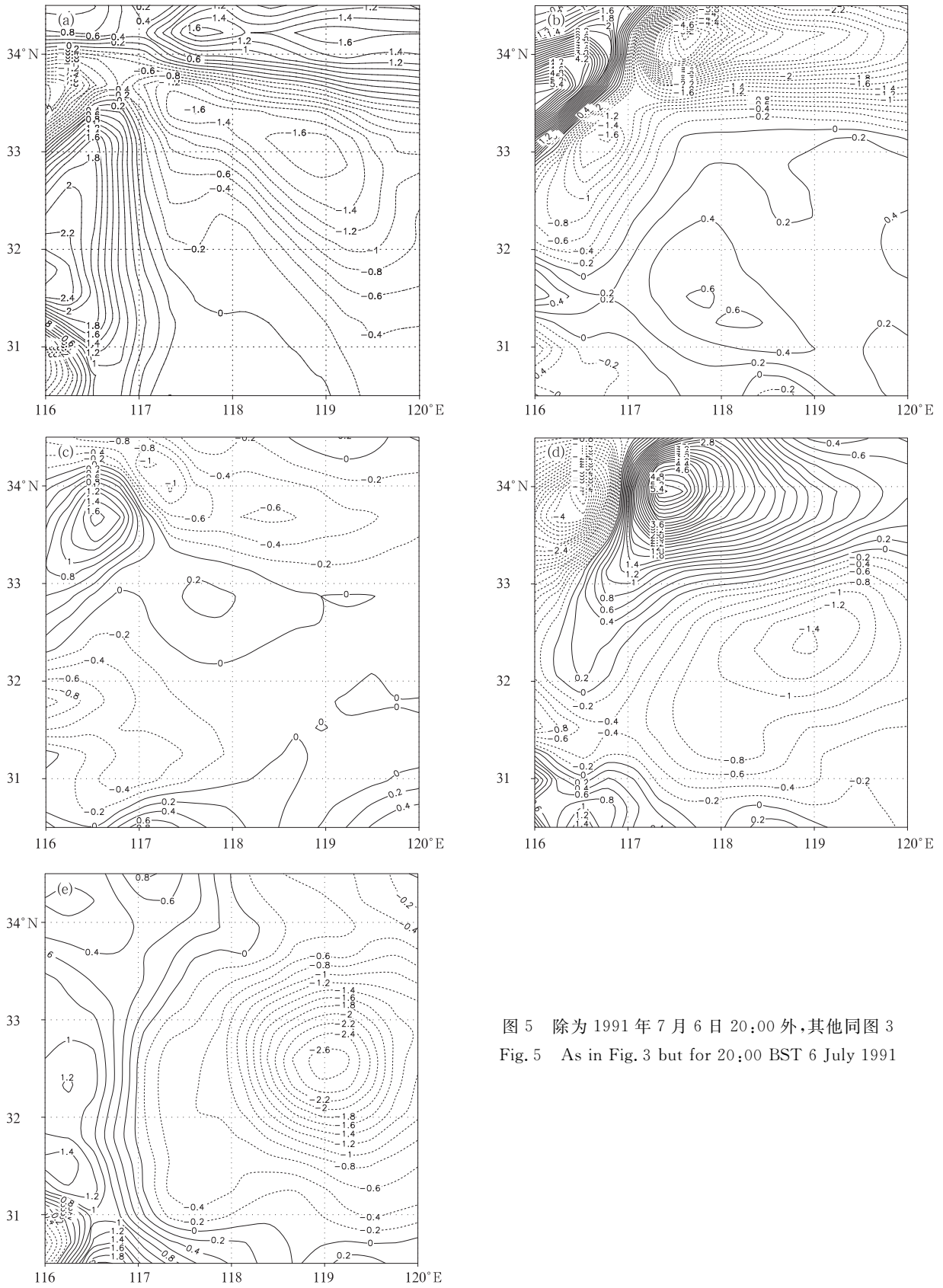


图5 除为1991年7月6日20:00外,其他同图3
 Fig. 5 As in Fig. 3 but for 20:00 BST 6 July 1991

梅雨锋气旋过程中都有降水发生, 主要是因为在这个过程中一直都有促进降水发生的强迫因子存在。另一方面揭示出, 在梅雨锋气旋的不同阶段降水分布及强度特征又存在明显的差异, 这主要是由于不同阶段导致降水发生的各个强迫因子存在明显的差异所致。其实, 即使处在梅雨锋气旋同一个阶段, 降水也会存在明显的不均匀分布特征, 这可能是由于引发不同区域降水产生的强迫因子及其强度不同所致。这些具体内在强迫因素通过“总”的 Q^N 矢量是无法揭示出来的, 且在以往的研究中也很难对其进行量化描述。

5 结 语

对修改的 Q 矢量进行转化、处理后, 所得 Q 矢量(记为 Q^N)与准地转 Q 矢量具有类似计算表达式, 将其沿以等高线为参照线的自然坐标系进行分解, 结合一次典型的江淮梅雨锋气旋暴雨过程诊断分析表明:

(1) 完全用实际风场资料进行计算的 Q^N 矢量, 其诊断能力较准地转 Q 矢量优越, 更适合诊断分析非地转特征明显的天气过程。

(2) 700 hPa Q^N 矢量散度辐合场对同时期地面降水场的水平分布特征有较好的指示作用。

(3) 将 Q^N 矢量进行 PG 分解, 可以揭示出“总”的 Q^N 矢量难以揭示的在天气现象形成过程中所存在的物理机制。

(4) 在整个梅雨锋气旋暴雨发生、发展、强盛、衰亡的演变过程中, 无论在梅雨锋气旋的哪个阶段, Q_{alst}^N 矢量散度辐合场的水平分布特征与“总” Q^N 矢量散度辐合特征都很相似, 在“总” Q^N 矢量散度场中占有较大的比例, 对“总” Q^N 矢量的强迫作用贡献较大, 对降水的发生始终起着主要的促进强迫作用, 是梅雨锋气旋引发降水的主要强迫因子。在梅雨锋气旋的演变过程中, Q_{curv}^N 矢量对降水的促进作用在逐渐减弱并转为抑制作用。 Q_{shdv}^N 矢量对降水的作用随着梅雨锋气旋发展而表现出明显的不同, 伴随着梅雨锋气旋有发生到强盛, Q_{shdv}^N 矢量对降水的促进作用是明显增强, 随着梅雨锋气旋东移减弱, 其对降水的促进作用也是迅速减弱, 直至对降水的发生基本不起作用。 Q_{crst}^N 矢量在梅雨锋气旋的发展及强盛时期对降水的发生基本无作用, 但在梅雨锋气旋的衰亡阶段其对降水的发生起明显的促进作用, 促进强度与同期 Q_{alst}^N 矢量接近。

6 讨 论

本文对 Q^* 矢量转化、处理后所得的 Q^N 矢量, 与准地转 Q 矢量具有相似的计算表达式, 二者的差异在于前者用实际风进行计算而后者用地转风进行计算, 这一方面意味着 Q^N 矢量的诊断特性将优越于准地转 Q 矢量, 同时也隐含着该 Q 矢量进行 PG 分解后各分解项具有明确的物理含义。将实际风变为地转风那么 Q^N 矢量也将蜕变为准地转 Q 矢量。关于准地转 Q 矢量进行 PG 分解后各项的物理含义, 在 Jusem 和 Atlas(1998)工作中有详细的文字说明和图形解释。其实, Jusem 和 Atlas(1998)最后也强调指出, 基于准地转 Q 矢量的 PG 思想也可用于 AB(alternative balance(替换平衡))近似平衡条件下所得的广义 Q 矢量(Davies-Jaones, 1991)。因此, 我们的研究是可行的、合乎情理的。另外, 准地转 Q 矢量、AB 近似平衡下的广义 Q 矢量及本研究所得 Q^N 矢量都有一个共同特点, 即它们都是在非绝热条件下得到的, 都不包括非绝热加热信息, 也就是我们没有直接将湿 Q 矢量(包括了大尺度稳定水汽凝结潜热)(张兴旺, 1998; 姚秀萍等, 2000, 2001; Yao, et al., 2004)甚至改进的湿 Q 矢量(包括了大尺度稳定水汽凝结潜热和对流水汽凝结潜热)(岳彩军等, 2003)进行 PG 分解的原因, 因为对于包括了非绝热加热信息的 Q 矢量来讲, 对其进行 PG 分解后各项的物理意义是什么, 目前我们尚不清楚。本研究工作主要是对 Jusem 和 Atlas(1998)思想的延续和拓展。

通过 Q^N 矢量 PG 分解可以揭示出梅雨锋气旋不同阶段降水的强迫因子是不同的。在梅雨锋气旋的发生发展阶段, Q_{alst}^N 矢量、 Q_{curv}^N 矢量及 Q_{shdv}^N 矢量都对降水发生起着主要促进作用, 尤其是 Q_{alst}^N 矢量和 Q_{curv}^N 矢量的促进作用更为明显。在梅雨锋气旋的强盛时期, Q_{alst}^N 矢量与 Q_{shdv}^N 矢量对降水发生起主要强迫作用。在梅雨锋气旋的衰亡阶段, Q_{alst}^N 矢量与 Q_{crst}^N 矢量对降水发生起主要强迫作用。也就是说, 对于此次梅雨锋气旋暴雨过程来讲, 通过 Q^N 矢量 PG 分解诊断分析研究, 我们可以清楚地发现, 哪些因子会一直促进降水的发生, 哪些因子在梅雨锋气旋的不同阶段会起不同的作用。在梅雨锋气旋的不同阶段都有降水发生, 是因为一直都有促进降水发生的因子存在, 但在不同阶段导致降水发生的强迫因子是明显的不同。即使在梅雨锋气旋的同一个阶段, 引发不同区域降水产生的促进因子及其强度也并非完

全相同。这些都可以通过 Q^N 矢量 PG 分解定量地揭示出来,这也正是进行 Q 矢量 PG 分解的魅力所在。它可以揭示出“总”的 Q 矢量难以揭示的物理潜在机制,又完全不同于 Q 矢量 PT 分解,从而为达到所需研究目的提供了一种非常有效的手段。尽管在本研究工作中没有考虑非绝热加热作用,但也揭示出了许多以往研究中所没有揭示出来的潜在物理机制。

最后需要指出的是, Q_{alst}^N 矢量与 Q_{curv}^N 矢量都是沿等高线方向即 s 轴方向, $2\nabla \cdot Q_{\text{alst}}^N$ 与 $2\nabla \cdot Q_{\text{curv}}^N$ 之间可发生相互增强或抵消作用。同样, Q_{shdv}^N 矢量与 Q_{crst}^N 矢量都是沿穿越等高线方向即 n 轴方向, $2\nabla \cdot Q_{\text{shdv}}^N$ 和 $2\nabla \cdot Q_{\text{crst}}^N$ 之间也可发生相互增强或抵消作用。

诚然,本研究所得结论仅针对一次梅雨锋气旋暴雨两个例而言,是否具有普遍意义有待进一步研究。

致谢:审稿老师提出了许多宝贵建议,《气象学报》编辑给予了热情帮助,在此一并表示由衷的感谢!

References

- Bai L. 1988. Quasi-geostrophic Q -vector analysis and its application in short-term forecasting. Meteor Mon (in Chinese), 14(8): 25-30
- Barnes S L, Colman B R. 1993. Quasigeostrophic diagnosis of cyclogenesis associated with a cut off extratropical cyclone: The Christmas 1987 storm. Mon Wea Rev, 121(6):1613-1634
- Chen L, Gao K. 2006. The simulation of the uneven characteristics of Meiyu front structure. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 64(2): 164-179
- Davies-Jones R. 1991. The frontogenetical forcing of secondary circulations, Part I: the duality and generalization of the Q vector. J Atmos Sci, 48(4): 497-509
- Donnadille J, Cammas J-P, Mascart P, et al. 2001. FASTEX IOP 18: a very deep troopause fold. II: quasi-geostrophic omega diagnoses. Quart J Roy Meteor Soc, 127(577): 2269-2286
- Dutton J A. 1976. The Ceaseless Wind. McGraw-Hill, 579pp
- Hoskins B J, Dabigci I, Darics H C. 1978. A new look at the ω -equation. Quart J Roy Meteor Soc, 104(1): 31-38
- Jusem J C, Atlas R. 1998. Diagnostic evaluation of vertical motion forcing mechanism by using Q -vector partitioning. Mon Wea Rev, 126(8): 2166-2184
- Keyser D, Reeder M J, Reed R J. 1988. A generalization of Pettersen's frontogenesis function and its relation to the forcing of vertical motion. Mon Wea Rev, 116(3-4):762-780
- Keyser D, Schmidt B D, Duffy D G. 1992. Quasi-geostrophic vertical motions diagnosed from along- and cross-isentrope components of the Q vector. Mon Wea Rev, 20(5):731-741
- Kurz M. 1992. Synoptic diagnosis of frontogenetic and cyclogenetic processes. Meteor Atmos Phys, 48(1):77-91
- Li B, Li G. 1997. Application of the semi-geostrophic Q vector in study of the Meiyu front heavy rain. Atmospheric Science Research and Application (in Chinese), 12(1): 31-38
- Liao J, Tan Z. 2005. Numerical simulation of a heavy rainfall event along the Meiyu front: Influences of different scale weather systems. Acta Meteor Sinica (in Chinese), 63(5):771-789
- Martin J E. 1999. Quasi-geostrophic forcing of ascent in the occluded sector of cyclones and the trowal airstream. Mon Wea Rev, 127(1): 70-88
- Morgan M C. 1999. Using piecewise potential vorticity inversion to diagnose frontogenesis. Part I: a partitioning of the Q vector applied to diagnosing surface frontogenesis and vertical motion. Mon Wea Rev, 127(12):2796-2821
- Schar C, Wernli H. 1993. Structure and evolution of an isolated semi-geostrophic cyclone. Quart J Roy Meteor Soc, 119(509): 57-90
- Shou S, Li Y, Fan K. 2001. Isentropic potential vorticity analysis of the mesoscale cyclone development in a heavy rain process. Acta Meteor Sinica (in Chinese), 59(6): 560-568
- Tao Z, Huang W. 1994. 3-D trajectory analysis of air parcel associated with high and low level jets in heavy rain. Acta Meteor Sinica (in Chinese), 52(3):359-367
- Yao X, Yu Y, Shou S. Diagnostic analyses and application of the moist ageostrophic Q vector. Adv Atmos Sci, 2004, 21(1): 96-102
- Yao X, Yu Y. 2000. Non-geostrophic wet Q -vector analysis and its application to typhoon torrential rain. Acta Meteor Sinica (in Chinese), 58(4):436-446
- Yao X, Yu Y. 2001. Perfect Q -vector and its diagnoses. Plateau Meteorology (in Chinese), 20(2):208-213
- Yue C, Shou S, Lin K, et al. 2003. Diagnosis of the heavy rain near a Meiyu front using the wet Q vector partitioning method. Adv Atmos Sci, 20(1): 37-44
- Yue C, Shou Y, Shou S, et al. 2003. The improvement and perfection of Q vector. J Tropical Meteor (in Chinese), 19(3): 308-316
- Yue C, Shou Y, Yao X, et al. 2005. Application and research on Q -vector analytic method in China. Plateau Meteor (in Chinese), 24(3):450-455
- Yue C. 1999. The advances on the Q vector and its application to synoptic diagnosis. Meteor Mon (in Chinese), 25(11):3-8
- Zhang X. 1998. An expression of the wet Q vector and application. Meteor Mon (in Chinese), 24(8):3-7
- Zhang X. 1999. The expression of the modified Q vector and its application. J Tropical Meteor (in Chinese), 15(2):162-167
- Zhao Y, Li Z, Xiao Z, et al. 2007. A PV inversion diagnostic study on a quasi-stationary Meiyu front with successive rainstorms. Acta Meteor Sinica (in Chinese), 65(3): 353-371

附中文参考文献

- 白乐生. 1988. 准地转 Q 矢量分析及其在短期天气预报中的应用. 气象, 14(8): 25-30
- 陈丽芳, 高坤. 2006. 梅雨锋结构的数值模拟. 气象学报, 64(2): 164-179
- 李柏, 李国杰. 1997. 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, 12(1):31-38
- 廖捷, 谈哲敏. 2005. 一次梅雨锋特大暴雨过程的数值模拟研究:

不同尺度天气系统的影响作用. 气象学报, 63(5):771-789
 寿绍文, 李耀辉, 范可. 2001. 暴雨中尺度气旋发展的等熵面位涡分析. 气象学报, 59(6):560-568
 陶祖钰, 黄伟. 1994. 大暴雨过程中与急流相关气块的三维运动分析. 气象学报, 52(3): 359-367
 姚秀萍, 于玉斌. 2000. 非地转湿 Q 矢量及其在华北特大台风暴雨中的应用. 气象学报, 58(4):436-446
 姚秀萍, 于玉斌. 2001. 完全 Q 矢量的引入及其诊断分析. 高原气象, 20(2): 208-213
 岳彩军, 寿亦萱, 寿绍文等. 2003. Q 矢量的改进与完善. 热带气象

学报, 19(3): 308-316
 岳彩军, 寿亦萱, 姚秀萍等. 2005. 中国 Q 矢量分析方法的应用与研究. 高原气象, 24(3):450-455
 岳彩军. 1999. Q 矢量及其在天气诊断分析中应用研究的进展. 气象, 25(11):3-8
 张兴旺. 1998. 湿 Q 矢量表达式及其应用. 气象, 24(8):3-7
 张兴旺. 1999. 修改的 Q 矢量表达式及其应用. 热带气象学报, 15(2):162-167
 赵玉春, 李泽椿, 肖子牛等. 2007. 准静止梅雨锋连续暴雨两个例的位涡反演诊断. 气象学报, 65(3):353-371

附录: Q^N 分解后的各分量在 p 坐标系中表达式推导过程如下

基本关系式定义

$$\mathbf{t} = c\mathbf{i} + s\mathbf{j} \quad (\text{A1})$$

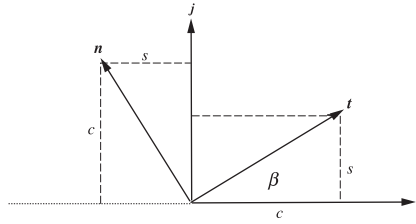
$$\mathbf{n} = -s\mathbf{i} + c\mathbf{j} \quad (\text{A2})$$

$$c = \frac{u}{S^*} = \cos\beta \quad (\text{A3})$$

$$s = \frac{v}{S^*} = \sin\beta \quad (\text{A4})$$

由式(A1)和(A2)可知: $\mathbf{t} \cdot \mathbf{n} = 0$

\mathbf{t} 、 \mathbf{n} 、 \mathbf{i} 、 \mathbf{j} 及 c 、 s 、 β 关系示意图



$$S^* = cu + sv \quad (\text{A5})$$

$$S^* = \sqrt{u^2 + v^2} \quad (\text{A6})$$

$$c^2 + s^2 = 1 \quad (\text{A7})$$

$$\frac{\partial}{\partial s} = c \frac{\partial}{\partial x} + s \frac{\partial}{\partial y} \quad (\text{A8})$$

$$\frac{\partial}{\partial n} = -s \frac{\partial}{\partial x} + c \frac{\partial}{\partial y} \quad (\text{A9})$$

由式(A8)可知

$$\frac{\partial S^*}{\partial s} = c \frac{\partial S^*}{\partial x} + s \frac{\partial S^*}{\partial y} \quad (\text{A10})$$

因为 $\frac{\partial S^*}{\partial x} = c \frac{\partial u}{\partial x} + s \frac{\partial v}{\partial x} \quad (\text{A11})$

及 $\frac{\partial S^*}{\partial y} = c \frac{\partial u}{\partial y} + s \frac{\partial v}{\partial y} \quad (\text{A12})$

将式(A11)、(A12)代入(A10)可得

$$\frac{\partial S^*}{\partial s} = c^2 \frac{\partial u}{\partial x} + cs \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) + s^2 \frac{\partial v}{\partial y} \quad (\text{A13})$$

由式(A9)可知:

$$\frac{\partial S^*}{\partial n} = -s \frac{\partial S^*}{\partial x} + c \frac{\partial S^*}{\partial y} \quad (\text{A14})$$

将式(A11)、(A12)代入式(A14)可得

$$\frac{\partial S^*}{\partial n} = c^2 \frac{\partial u}{\partial y} + cs \left(\frac{\partial v}{\partial y} - \frac{\partial u}{\partial x} \right) - s^2 \frac{\partial v}{\partial x} \quad (\text{A15})$$

因为 $K_s = \frac{\partial \beta}{\partial s} = c \frac{\partial \beta}{\partial x} + s \frac{\partial \beta}{\partial y} = \frac{\partial s}{\partial x} - \frac{\partial c}{\partial y}$ (A16)

又 $\frac{\partial s}{\partial x} = \frac{c}{S^*} \left(c \frac{\partial v}{\partial x} - s \frac{\partial u}{\partial x} \right)$ (A17)

及 $\frac{\partial c}{\partial y} = \frac{s}{S^*} \left(s \frac{\partial u}{\partial y} - c \frac{\partial v}{\partial y} \right)$ (A18)

将式(A17)、(A18)代入式(A16)可得

$$K_s = \frac{1}{S^*} \left[c^2 \frac{\partial v}{\partial x} + cs \left(\frac{\partial v}{\partial y} - \frac{\partial u}{\partial x} \right) - s^2 \frac{\partial u}{\partial y} \right] \quad (\text{A19})$$

于是 $S^* K_s = c^2 \frac{\partial v}{\partial x} + cs \left(\frac{\partial v}{\partial y} - \frac{\partial u}{\partial x} \right) - s^2 \frac{\partial u}{\partial y}$ (A20)

因为 $K_n = \frac{\partial \beta}{\partial n} = -s \frac{\partial \beta}{\partial x} + c \frac{\partial \beta}{\partial y} = \frac{\partial c}{\partial x} + \frac{\partial s}{\partial y}$ (A21)

又 $\frac{\partial c}{\partial x} = \frac{s}{S^*} \left(s \frac{\partial u}{\partial x} - c \frac{\partial v}{\partial x} \right)$ (A22)

及 $\frac{\partial s}{\partial y} = \frac{c}{S^*} \left(c \frac{\partial v}{\partial y} - s \frac{\partial u}{\partial y} \right)$ (A23)

将式(A22)、(A23)代入式(A21)可得

$$K_n = \frac{1}{S^*} \left[c^2 \frac{\partial v}{\partial y} - cs \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) + s^2 \frac{\partial u}{\partial x} \right] \quad (\text{A24})$$

于是 $S^* K_n = c^2 \frac{\partial v}{\partial y} - cs \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) + s^2 \frac{\partial u}{\partial x}$ (A25)

最后,再分别利用式(A8)、(A9)可得

$$\frac{\partial \alpha}{\partial s} = c \frac{\partial \alpha}{\partial x} + s \frac{\partial \alpha}{\partial y} \quad (\text{A26})$$

$$\frac{\partial \alpha}{\partial n} = -s \frac{\partial \alpha}{\partial x} + c \frac{\partial \alpha}{\partial y} \quad (\text{A27})$$

基于上述基本关系式,则可得到文中式(10)、(11)、(12)及(13)在 p 坐标系中的计算表达式,具体情况为:

将式(A1)、(A13)及(A26)代入文中式(10)得

$$\mathbf{Q}_{\text{alst}}^{\text{N}} = -\mathbf{t} \frac{\partial S^*}{\partial s} \frac{\partial \alpha}{\partial s} = -(\mathbf{ci} + \mathbf{sj}) \left[c^2 \frac{\partial u}{\partial x} + cs \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) + s^2 \frac{\partial v}{\partial y} \right] \left(c \frac{\partial \alpha}{\partial x} + s \frac{\partial \alpha}{\partial y} \right) \quad (\text{A28})$$

令 $\mathbf{Q}_{\text{alst}}^{\text{N}} = \mathbf{Q}_{\text{alstx}}^{\text{N}} \mathbf{i} + \mathbf{Q}_{\text{alsty}}^{\text{N}} \mathbf{j}$, 则

$$\mathbf{Q}_{\text{alstx}}^{\text{N}} = - \left[c^2 \frac{\partial u}{\partial x} + cs \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) + s^2 \frac{\partial v}{\partial y} \right] \left(c \frac{\partial \alpha}{\partial x} + s \frac{\partial \alpha}{\partial y} \right) c \quad (\text{A29})$$

$$\mathbf{Q}_{\text{alsty}}^{\text{N}} = - \left[c^2 \frac{\partial u}{\partial x} + cs \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) + s^2 \frac{\partial v}{\partial y} \right] \left(c \frac{\partial \alpha}{\partial x} + s \frac{\partial \alpha}{\partial y} \right) s \quad (\text{A30})$$

将式(A3)、(A4)、(A6)及 $\alpha = RT/P$ 代入式(A29)、(A30)得

$$\mathbf{Q}_{\text{alstx}}^{\text{N}} = - \left[u^2 \frac{\partial u}{\partial x} + uv \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) + v^2 \frac{\partial v}{\partial y} \right] \left(u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right) \cdot \frac{uR}{P(u^2 + v^2)^2} \quad (\text{A31})$$

$$\mathbf{Q}_{\text{alsty}}^{\text{N}} = - \left[u^2 \frac{\partial u}{\partial x} + uv \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) + v^2 \frac{\partial v}{\partial y} \right] \left(u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right) \cdot \frac{vR}{P(u^2 + v^2)^2} \quad (\text{A32})$$

同理,将式(A1)、(A20)及(A27)代入文中式(11)得

$$\mathbf{Q}_{\text{curv}}^{\text{N}} = -\mathbf{t} S^* K_s \frac{\partial \alpha}{\partial n} = -(\mathbf{ci} + \mathbf{sj}) \left[c^2 \frac{\partial v}{\partial x} + cs \left(\frac{\partial v}{\partial y} - \frac{\partial u}{\partial x} \right) - s^2 \frac{\partial u}{\partial y} \right] \left(-s \frac{\partial \alpha}{\partial x} + c \frac{\partial \alpha}{\partial y} \right) \quad (\text{A33})$$

令 $Q_{\text{curv}}^N = Q_{\text{curvr}}^N i + Q_{\text{curvy}}^N j$, 则

$$Q_{\text{curvr}}^N = - \left[c^2 \frac{\partial v}{\partial x} + cs \left(\frac{\partial v}{\partial y} - \frac{\partial u}{\partial x} \right) - s^2 \frac{\partial u}{\partial y} \right] \left(-s \frac{\partial \alpha}{\partial x} + c \frac{\partial \alpha}{\partial y} \right) c \quad (\text{A34})$$

$$Q_{\text{curvy}}^N = - \left[c^2 \frac{\partial v}{\partial x} + cs \left(\frac{\partial v}{\partial y} - \frac{\partial u}{\partial x} \right) - s^2 \frac{\partial u}{\partial y} \right] \left(-s \frac{\partial \alpha}{\partial x} + c \frac{\partial \alpha}{\partial y} \right) s \quad (\text{A35})$$

将式(A3)、(A4)、(A6)及 $\alpha = RT/P$ 代入式(A34)、(A35)得

$$Q_{\text{curvr}}^N = - \left[u^2 \frac{\partial v}{\partial x} + uv \left(\frac{\partial v}{\partial y} - \frac{\partial u}{\partial x} \right) - v^2 \frac{\partial u}{\partial y} \right] \left(-v \frac{\partial T}{\partial x} + u \frac{\partial T}{\partial y} \right) \cdot \frac{uR}{P(u^2 + v^2)^2} \quad (\text{A36})$$

$$Q_{\text{curvy}}^N = - \left[u^2 \frac{\partial v}{\partial x} + uv \left(\frac{\partial v}{\partial y} - \frac{\partial u}{\partial x} \right) - v^2 \frac{\partial u}{\partial y} \right] \left(-v \frac{\partial T}{\partial x} + u \frac{\partial T}{\partial y} \right) \cdot \frac{vR}{P(u^2 + v^2)^2} \quad (\text{A37})$$

同理, 将式(A2)、(A14)及(A26)代入文中式(12)得

$$Q_{\text{shdv}}^N = -n \frac{\partial S^*}{\partial n} \frac{\partial \alpha}{\partial s} = -(-si + cj) \left[c^2 \frac{\partial u}{\partial y} + cs \left(\frac{\partial v}{\partial y} - \frac{\partial u}{\partial x} \right) - s^2 \frac{\partial v}{\partial x} \right] \left(c \frac{\partial \alpha}{\partial x} + s \frac{\partial \alpha}{\partial y} \right) \quad (\text{A38})$$

令 $Q_{\text{shdv}}^N = Q_{\text{shdvr}}^N i + Q_{\text{shdvy}}^N j$, 则

$$Q_{\text{shdvr}}^N = \left[c^2 \frac{\partial u}{\partial y} + cs \left(\frac{\partial v}{\partial y} - \frac{\partial u}{\partial x} \right) - s^2 \frac{\partial v}{\partial x} \right] \left(c \frac{\partial \alpha}{\partial x} + s \frac{\partial \alpha}{\partial y} \right) s \quad (\text{A39})$$

$$Q_{\text{shdvy}}^N = - \left[c^2 \frac{\partial u}{\partial y} + cs \left(\frac{\partial v}{\partial y} - \frac{\partial u}{\partial x} \right) - s^2 \frac{\partial v}{\partial x} \right] \left(c \frac{\partial \alpha}{\partial x} + s \frac{\partial \alpha}{\partial y} \right) c \quad (\text{A40})$$

将式(A3)、(A4)、(A6)及 $\alpha = RT/P$ 代入式(A39)、(A40)得:

$$Q_{\text{shdvr}}^N = \left[u^2 \frac{\partial u}{\partial y} + uv \left(\frac{\partial v}{\partial y} - \frac{\partial u}{\partial x} \right) - v^2 \frac{\partial v}{\partial x} \right] \left(u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right) \cdot \frac{vR}{P(u^2 + v^2)^2} \quad (\text{A41})$$

$$Q_{\text{shdvy}}^N = - \left[u^2 \frac{\partial u}{\partial y} + uv \left(\frac{\partial v}{\partial y} - \frac{\partial u}{\partial x} \right) - v^2 \frac{\partial v}{\partial x} \right] \left(u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right) \cdot \frac{uR}{P(u^2 + v^2)^2} \quad (\text{A42})$$

同理, 将式(A2)、(A25)及(A27)代入文中式(13)得

$$Q_{\text{crst}}^N = -nS^* K_n \frac{\partial \alpha}{\partial n} = -(-si + cj) \left[c^2 \frac{\partial v}{\partial y} - cs \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) + s^2 \frac{\partial u}{\partial x} \right] \left(-s \frac{\partial \alpha}{\partial x} + c \frac{\partial \alpha}{\partial y} \right) \quad (\text{A43})$$

令 $Q_{\text{crst}}^N = Q_{\text{crstr}}^N i + Q_{\text{crsty}}^N j$, 则

$$Q_{\text{crstr}}^N = \left[c^2 \frac{\partial v}{\partial y} - cs \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) + s^2 \frac{\partial u}{\partial x} \right] \left(-s \frac{\partial \alpha}{\partial x} + c \frac{\partial \alpha}{\partial y} \right) s \quad (\text{A44})$$

$$Q_{\text{crsty}}^N = - \left[c^2 \frac{\partial v}{\partial y} - cs \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) + s^2 \frac{\partial u}{\partial x} \right] \left(-s \frac{\partial \alpha}{\partial x} + c \frac{\partial \alpha}{\partial y} \right) c \quad (\text{A45})$$

将式(A3)、(A4)、(A6)及 $\alpha = RT/P$ 代入式(A44)、(A45)得

$$Q_{\text{crstr}}^N = \left[u^2 \frac{\partial v}{\partial y} - uv \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) + v^2 \frac{\partial u}{\partial x} \right] \left(-v \frac{\partial T}{\partial x} + u \frac{\partial T}{\partial y} \right) \cdot \frac{vR}{P(u^2 + v^2)^2} \quad (\text{A46})$$

$$Q_{\text{crsty}}^N = - \left[u^2 \frac{\partial v}{\partial y} - uv \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) + v^2 \frac{\partial u}{\partial x} \right] \left(-v \frac{\partial T}{\partial x} + u \frac{\partial T}{\partial y} \right) \cdot \frac{uR}{P(u^2 + v^2)^2} \quad (\text{A47})$$

通过式(A31)与(A32)、(A36)与(A37)、(A41)与(A42)以及(A46)与(A47)则可在 p 坐标系中分别计算出 Q_{alst}^N 、 Q_{curv}^N 、 Q_{shdv}^N 及 Q_{crst}^N 。

此外, 在 p 坐标系中 Q_{alst}^N 、 Q_{curv}^N 、 Q_{shdv}^N 及 Q_{crst}^N 的散度计算可分别通过以下各式

$$\nabla \cdot Q_{\text{alst}}^N = \frac{\partial Q_{\text{alstr}}^N}{\partial x} + \frac{\partial Q_{\text{alsty}}^N}{\partial y} \quad (\text{A48})$$

$$\nabla \cdot Q_{\text{curv}}^N = \frac{\partial Q_{\text{curvr}}^N}{\partial x} + \frac{\partial Q_{\text{curvy}}^N}{\partial y} \quad (\text{A49})$$

$$\nabla \cdot Q_{\text{shdv}}^N = \frac{\partial Q_{\text{shdvr}}^N}{\partial x} + \frac{\partial Q_{\text{shdvy}}^N}{\partial y} \quad (\text{A50})$$

$$\nabla \cdot Q_{\text{crst}}^N = \frac{\partial Q_{\text{crstr}}^N}{\partial x} + \frac{\partial Q_{\text{crsty}}^N}{\partial y} \quad (\text{A51})$$