

变形率与能量锋生*

张 元 箴

(北京大学地球物理系)

在天气分析中通常都用散度(D)和涡度(ζ)来描述大气运动的基本特征,并用来诊断一些天气过程的发展。关于它们和暴雨分布的关系,已有不少工作,但大气运动除了具有辐散(辐合)和旋转的特征外,还具有变形的特征。Bergeron(1928, 1930)和 Petterssen(1956)^[1]等曾强调过变形在天气系统发展中的作用。最近 Bluestein(1977)^[2]讨论了天气尺度流场的变形量与热带云带走向的关系,解释了东风波倒V型云带的形成问题。本文通过对两类不同天气过程的例子进行分析,从一般流场中分离出变形分量来计算能量锋生,并讨论与暴雨的关系,试图说明流场的变形量可以作为暴雨诊断分析的一个有用的工具。

按照 Petterssen 提出的流场分解公式,风速 u, v 可以分解成:

$$u = u_0 + \frac{1}{2}(D + F)x + \frac{1}{2}(R - \zeta)y \quad (1)$$

$$v = v_0 + \frac{1}{2}(R + \zeta)x + \frac{1}{2}(D - F)y$$

上式中:

$$F = \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial v}{\partial y} \quad \text{为伸长变形或膨胀率} \quad (2)$$

$$R = \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \quad \text{为切变变形} \quad (3)$$

$$\text{令} \quad \theta = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{R}{F} \right) \quad (4)$$

F 和 R 符号相同时坐标轴作反时针旋转 θ 角, F 和 R 符号相反时坐标轴作顺时针旋转 θ 角, 变形率 def, D 由下式决定:

$$\text{def}, D = F \sec 2\theta$$

当 $\text{def}, D > 0$ 时坐标旋转后 X 轴为膨胀轴方向, 当 $\text{def}, D < 0$ 时坐标旋转后 Y 轴为膨胀轴方向, 由以上步骤求出膨胀轴的走向^[3]。变形率绝对值 $|\text{def}, D|$ 为:

$$|\text{def}, D| = \sqrt{R^2 + F^2} \quad (5)$$

如认为在湿斜压过程中 θ_{se} 是守恒的, 则 θ_{se} 梯度的个别变化为:

$$\frac{d}{dt} |\nabla \theta_{se}| = \frac{1}{2} |\nabla \theta_{se}| (|\text{def}, D| \cos 2\theta - D) \quad (6)$$

* 本文于 1980 年 7 月 14 日收到, 1981 年 9 月 30 日收到修改稿。

X轴沿膨胀轴取时, 式中 β 为 θ_{se} 等值线和膨胀轴的夹角, $\frac{d}{dt} |\nabla \theta_{se}|$ 通常称为锋生强度即能量锋生值, 称(6)式右边第一项为变形率锋生值, 第二项为散度场锋生值。

1977年7月26日08时, 7704号台风登陆后带来的暖湿空气与河套地区西来槽槽前的弱冷空气相汇于华北东部和辽宁南部, 24小时内导致一场较大范围的大暴雨^[4]。对此例取正方形网格, 格距为150公里, 20×20 个格点, 用实测风计算了 F , R , θ 和 $|\text{def}, D|$ 值。图1a为1977年7月26日08时850毫巴上膨胀轴和膨胀率分布, 在河套以东有一段不太长的 θ_{se} 密集带(图1a上A—B), 在这个密集带附近的膨胀轴与 θ_{se} 等值线的交角大部分小于 45° , 而在密集带以外地区膨胀轴大部分与 θ_{se} 等值线交角大于 45° 。膨胀率等值线最大值地区也位于 θ_{se} 密集带附近。膨胀轴与等值线间的交角小于 45° 为锋生场, 交角大于 45° 为锋消场, 因此膨胀轴的这种分布形势对能量锋生区的形成是有利的。26日20时(图1b)这个 θ_{se} 密集带在原地附近转向SW—NE向, 梯度加大并且变长(图1b上A—B), 可以认为这时能量锋生区形成, 膨胀轴和能量锋生区的交角仍小于(或等于) 45° , 而膨胀率等值线最大值地区位于能量锋生区附近。这对于能量锋在原地维持和加强, 以及暴雨的产生和维持是有利的。

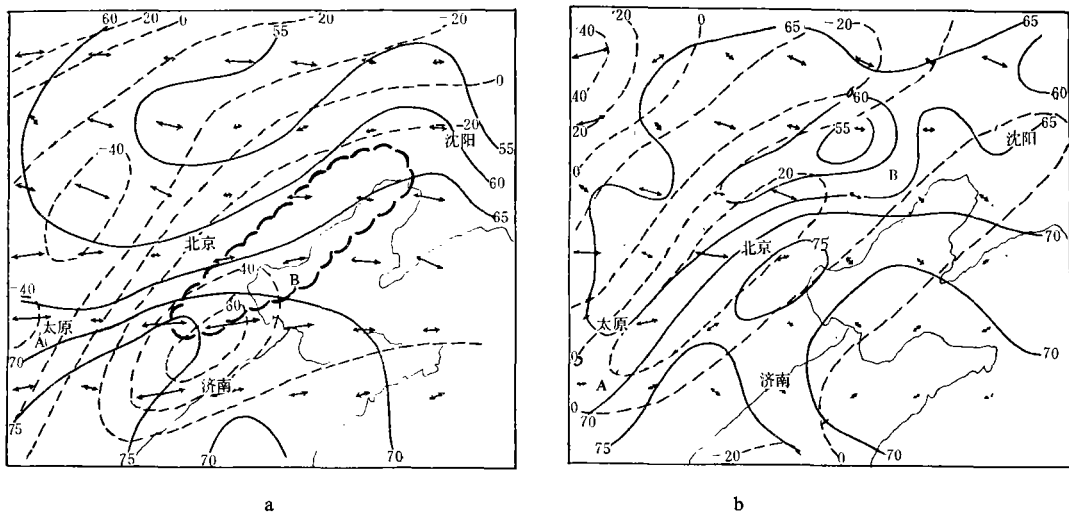


图1 1977年7月26日08时(a)、20时(b)850毫巴 θ_{se} 、膨胀轴、膨胀率分布
(实线为 θ_{se} 线, 单位: $^\circ\text{K}$, 已减去 273°K ; 虚线为膨胀率等值线, 单位: $10^{-8}/\text{秒}$; 带箭头小短线表示膨胀轴走向, 短线长度正比于膨胀率; 圆弧线为26日10时N-5卫星云图上产生暴雨的主要云区)

由(6)式右边两项之和计算能量锋生, 图2a为26日08时850毫巴上能量锋生等值线分布, 在河套以东有一片锋生最大的地区, 中心值达 277×10^{-3} 度/100公里·时, 相当于12小时内 θ_{se} 梯度增大2.3度/100公里, 但这时在这个地区大部分位于水汽通量辐散区, 在太原南边的一片最大值处于水汽通量辐合区, 与25时08时至26日08时的雨区相配合(图略)。26日20时850毫巴能量锋生等值线分布图上(图2b), 锋生最大值地区基本上位于原来地区, 但这时变成一条狭长的带, 由于水汽通量辐合区的西进, 使这条

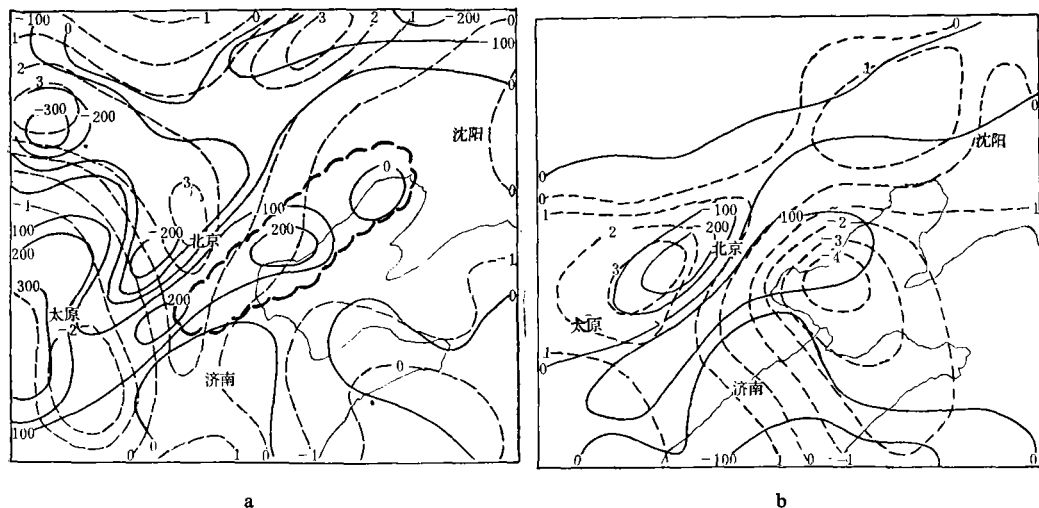


图 2 1977 年 7 月 26 日 08 时(a)、20 时(b)850 毫巴能量锋生等值线和水汽通量散度分布

(实线为能量锋生等值线,单位: 10^{-3} 度/100 公里·时;虚线为水汽通量散度等值线,单位: 10^{-7} 克/秒·米²·毫巴;圆弧线为 26 日 10 时 N-5 卫星云图上产生暴雨的主要云区)

锋生带基本上位于水汽通量辐合的地区,而暴雨区也位于这个地区内(见图 3 a 上雨带位置)。可见,在能量锋生带与水汽通量辐合重叠的地区,为有利于暴雨产生的地区。

此外,1977 年 7 月 26 日 10 时 N-5 卫星云图上(图略),在河套以东为一大片云区,这片云区中最密实的云区(图 1a 和图 2a 上圆弧区)也就是未来产生暴雨的主要云区,正好位于流场伸长变形(或膨胀率)最大值区域(图 1a),也位于能量锋生最大值区域(图 2a)。说明流场的变形量与暴雨云带的形成有一定的关系。

图 3a 分析 26 日 20 时变形率锋生等值线,最大值地区与暴雨区位置配合较好,但是

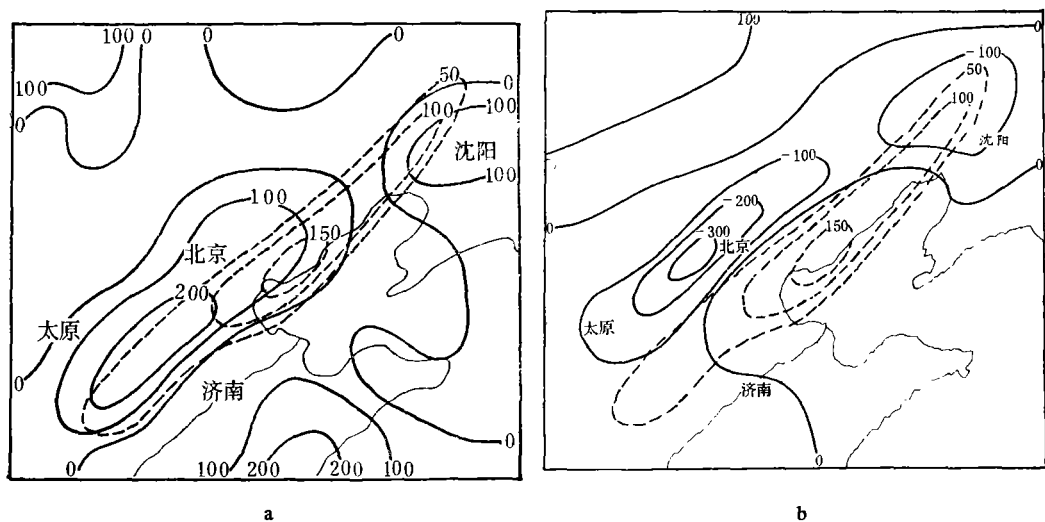


图 3 1977 年 7 月 26 日 20 时 850 毫巴变形率锋生值(a)、散度场锋生值(b)。(单位: 10^{-3} 度/100 公里·时;虚线为 26 日 08 时至 27 日 08 时等雨量线;单位:毫米)

暴雨最大中心不在变形率锋生最大值处。散度场锋生值(图 3b) 在暴雨区大部分为正值, 但比变形率锋生值数值小得多, 最大中心处锋生值 51×10^{-3} 度/100 公里·时, 约为变形率锋生最大值 227×10^{-3} 度/100 公里·时的四分之一。因而与散度项比较, 变形率对能量锋生起主要作用。由两项之和计算的 26 日 20 时锋生值(图 2b) 与雨区位置配合更好。说明变形率和散度场两项结合起来考虑对能量锋生过程描述得更清楚。分别计算 26 日 08 时这两项与暴雨区位置的对比(图略) 也得到上述类似的结论。

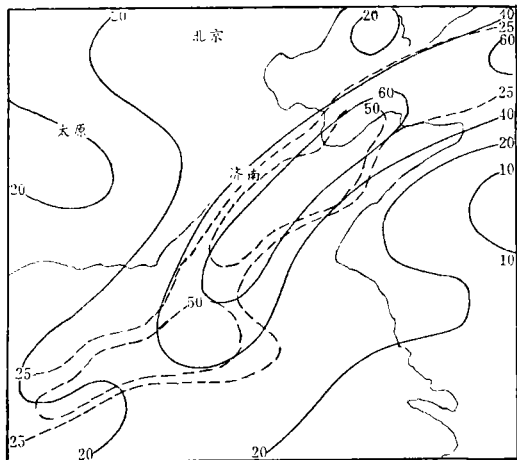


图 4 1978 年 6 月 25 日 20 时 850 毫巴变形率和雨量分布
(实线为变形率等值线, 单位: 10^{-6} /秒; 虚线为 25 日 05 时至 26 日 05 时等雨量线, 单位: 毫米)

图 4 为 1978 年 6 月 25 日 20 时一次气旋暴雨的降水过程的变形率分布, 其最大值区域基本上位于 24 小时雨区最大值地区, 这进一步说明变形率的分析对于暴雨预报是有用的工具。

应该指出, 前面计算是采用实测风资料, 如果引入地转风关系, 根据高度场资料计算 F , R 值, 又由于散度项为零, 只考虑地转变形率对锋生的贡献。如 1977 年 7 月 26 日 20 时暴雨区大部分位于地转变形率锋生值正值区(图略), 但锋生最大值与暴雨最大值地区位置配合不够好, 暴雨中心偏南位于锋生值负值中心附近。而用实测风资料计算的非

地转情况下, 由变形率得到的锋生最大值区(图 3a) 与暴雨区配合较好, 位置基本重合。可见对暴雨过程应主要考虑 850 毫巴非地转情况下变形率对能量锋生的作用。

通过对两类不同天气过程的暴雨系统分离出变形分量, 发现流场的变形量与暴雨云带的形成有一定的关系, 由变形率计算的锋生值可以对能量锋生作出定量的估计, 在能量锋生过程中 850 毫巴非地转过程是主要的。

致谢: 本文承蒙陈受钧同志的热情指导, 谢安同志提供了选例所用的资料, 作者在此表示衷心感谢。

参 考 文 献

- [1] Petterssen, S., "Weather Analysis and Forecasting", 2nd ed., 1 (1956), Chapter 2 and 11.
- [2] Bluestein, H. B., Synoptic-scale deformation and tropical cloud bands, *J. Atmos. Sci.*, 34, 891—900, 1977.
- [3] Saucier, W. J., "Principles of Meteorological Analysis", Chapters 10, 355—365, 1955.
- [4] 张玉玲, 暴雨与次天气尺度扰动和低空急流的生成, *气象学报*, 39(3), 257—266, 1981.