

# 散度变化在中尺度对流系统分析预报中之应用

孙淑清

(中国科学院大气物理研究所)

## 提 要

本文介绍了近年来国内外进行中尺度系统的分析和预报中,对风场的散度变化的研究和应用。提出中尺度散度场的配置及变化与中尺度天气(如强天气和暴雨)有十分密切的关系,它往往能预示中尺度天气的出现。在此基础上,还介绍了利用散度方程某些特征项来研究未来中尺度散度场的变化,从而达到定性地应用的目的。从近年来国内外的应用看,这种努力是成功的。

## 一、前言

观测事实和理论研究表明,低层风场的涡度和散度的结构与强对流天气系统的形成有密切关系。对这些动力场的研究有的仍沿用大尺度运动的诊断方程。众所周知,大尺度运动主要是一种准地转和准无辐散的涡流,涡度具有十分重要的意义,但对中尺度运动场来说,势流部分相当明显,即运动的非地转性突出,散度与涡度同量级。在中尺度系统活跃地区,散度变化迅速而激烈,必然破坏原来的动力平衡关系。近年来,人们利用散度及其变化与中尺度系统的特殊对应关系,分析和预报中尺度系统的发生和发展。本文介绍近十几年来国内外在这方面的研究和应用情况。

## 二、散度与中尺度强天气系统

大量的计算事实表明,盛夏在我国东部沿海地区频繁出现的低涡并不全部与暴雨有很好的对应关系,只有当低涡与低层强辐合中心相配合时,才有可能带来暴雨。以1979年5月27—28日广州地区一次局地性暴雨过程为例,表1给出暴雨区上空各层的涡度( $\zeta$ )和散度(D)的变化。此次暴雨范围小,强

度大,最强时段发生在27日20时。在暴雨发生前后,低层的正涡度并不明显,除27日20时700hPa以下为弱的正涡度外,其余时段多为负值。但散度却不一样。降水开始时就可见到低层的辐合,直至降水结束才转成辐散。在850hPa图上,广州地区从27日08时至28日08时都有一个小区域的辐合中心,以后转为辐散;而涡度场则无此变化(图略)。

散度场的变化与对流云团的发展有相当好的对应关系。强雨团与辐合中心一致。我们曾对一次长江流域暴雨过程作了分析<sup>(1)</sup>,对比了流场散度、涡度、地转风涡度与对流云团的关系,雨团的活动路径及位置与散度

表1 1979年5月27—28日广州地区 $\zeta$ 和D值  
(单位:  $10^{-5}s^{-1}$ )

日期 hPa	$\zeta$				D			
	27 0 8	27 2 0	28 0 8	28 2 0	27 0 8	27 2 0	28 0 8	28 2 0
100	-6	-4.9	-2.8	-4.6	3.0	-0.4	3.5	4.4
300	-3.3	-2.6	-2.6	-1.6	1.9	1.2	1.2	1.3
500	-2.5	0	-1.3	-2.1	-0.7	1.1	1.2	1.3
700	-3.1	0.7	-0.6	1.7	-3.0	-2.1	-1.7	-1.9
850	-2.2	2.8	0	0.4	-2.7	-1.0	-2.0	1.5
1000	-0.8	1.0	0.1	-1.4	-2.1	-1.9	-1.3	-1.7

负值中心的活动十分一致，而与涡度场的对应关系较差，与地转涡度也即位势高度场的对应关系更差。

用散度场分析中尺度系统，能取得更好的效果。1971年和1973年在美国佛罗里达州南部进行了两次加密观测，以研究风暴的消过程。在 $20 \times 33 \text{ km}^2$ 范围内，地面站平均间隔为 $6.5 \text{ km}$ ，时间间隔为5分钟，计算100天内每5分钟的散度和涡度，然后进行一小时平均，绘出每小时的平均散度和涡度图。在这些图上不但显示出散度与强降水的良好对应关系，而且可以看出散度的变化先于强降水的出现。图1(2)给出了1973年6月16日的一次强对流降水的散度、涡度及观测区

中强降水总量的时间演变，图中绘出的散度与涡度是观测区中出现的不同中心的值(对每一中心编号)。可以看出地面辐合(D为负值)出现在降水开始之前90分钟、在雷达回波之前75分钟。而涡度则无预示性，只在降水发生之后，气旋性涡度(正值)才迅速增强。地面中尺度辐合中心先于降水出现的事实也为其它许多研究所证实。如在GATE的 $\beta$ 中尺度观测中，12次深厚对流系统加强之前，低层都已有显著的辐合加强，且低空辐合值通常大于涡度值。在对流系统的初生阶段，低层的上升速度达到最大值，以后最大值向上发展。这说明动力边界层的强迫辐合作用先于云系或风暴的发展。在1973年佛罗里达州试验中，降水之前出现辐合中心的个例占观测区内个例的92%。辐合中心的强度越强，未来风暴或降水也越强。

1984年8月8—9日北京的地面风辐合与强降雨团的关系也证实了上述理论\*。辐合中心的移动和停滞与雨团的活动完全一致。该测站散度、涡度的演变还说明，在强降水出

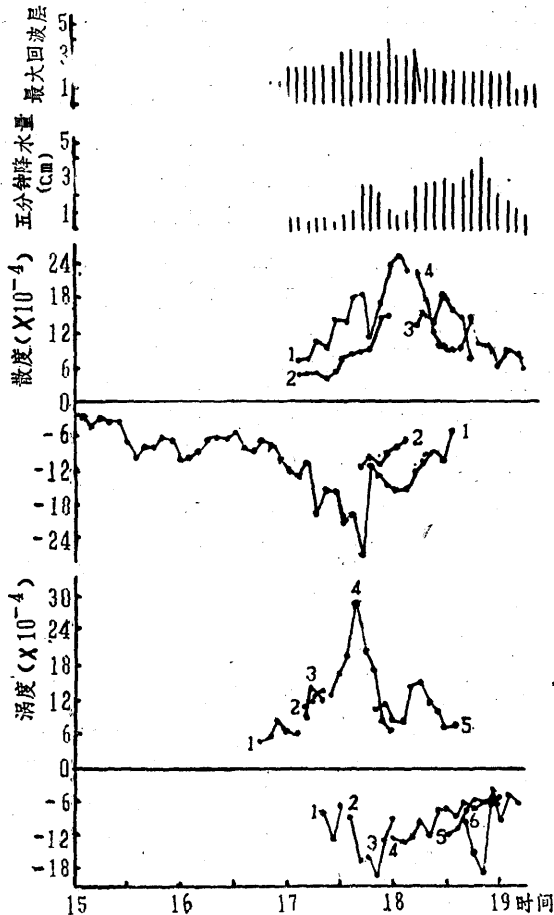


图1 1973年6月16日15—19时的散度、涡度、雷达回波及降水的时间序列图

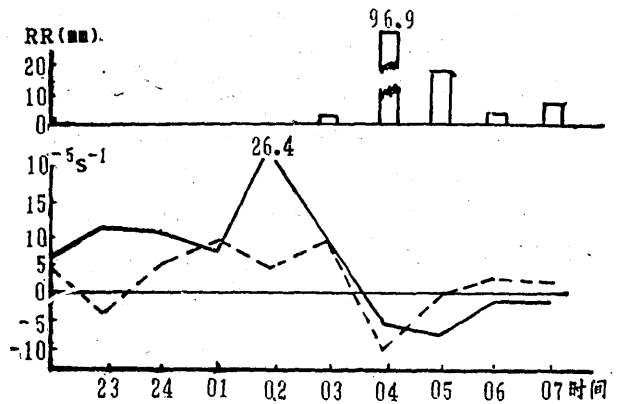


图2 朝阳站1984年8月8—9日地面散度、涡度和降水的时间序列

\* 米季德，1984年8月9日暴雨的中尺度分析，“科研报告”，北京市气象局短时报课题组，1987，12。

现之前就有地面强辐合发生。图2给出了北京朝阳气象站的散度、涡度及降水的时间曲线。该测站9日04时的降水达96.0mm,而地面辐合先于降水出现,在02时达最大,为 $-26.4 \times 10^{-5} s^{-1}$ ,比降水提前约2个小时。降水开始以后各测站上的辐合都转为辐散或辐合明显减弱,这可能与降水带来的局地下冲气流有关。

所有这些工作有力地说明了风场散度,尤其是低层的散度,在中尺度系统的发展中起了重要的作用。

### 三、散度方程及其在对流天气预报中的应用

中尺度系统发展时,散度有很大的变化,且与强烈天气有较好的对应关系,因而研究造成散度激烈变化的各种因子十分重要。散度方程中造成散度变化的项很多,可写成

$$\begin{aligned} \frac{\partial D}{\partial t} = & -\vec{V} \cdot \nabla D - \omega \frac{\partial D}{\partial p} - \frac{\partial \vec{V}}{\partial p} \cdot \nabla \omega \\ & - \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 - \left( \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \\ & - 2 \frac{\partial u}{\partial y} \cdot \frac{\partial v}{\partial x} - f\zeta' - \beta u \end{aligned}$$

其中 $f\zeta' = \nabla^2 \phi - f\zeta$ ,为非地转涡度,其余皆

为常用符号。在大尺度运动中,散度倾向及右端前三项皆在 $10^{-11} - 10^{-12} s^{-2}$ 量级,后面几项则为 $10^{-9} - 10^{-10} s^{-2}$ 量级左右。因而作为一级近似略去小项,散度方程即演变为平衡状态下的风压关系——平衡方程。在中尺度系统发展时,散度倾向以及与散度、垂直速度有关项的量级皆变大,可达到 $10^{-9}$ 以上。Fankhauser<sup>(3)</sup>曾对一次中尺度飑线过程的环境场计算了完全的散度方程。结果表明,方程右端各项皆可达到 $10^{-8} s^{-2}$ ,而一离开对流活动区,其值就大大减小。从各项的比较看,三维平流项(第1、2项)和与水平风速分布不均匀有关的项(第4、5、6项)在高层和低层较大,是使低层辐合增大的主要项。而 $\frac{\partial \vec{V}}{\partial p} \cdot \nabla \omega$ 项则主要在对流层中层

较大,因为 $\omega$ 在该处到最大。汪钟兴\*\*对我国长江下游一次暴雨过程计算了以上各项。该次暴雨发生在1982年6月19—21日,最大降水达298.5mm。表2给出了各层上的值。由于是暴雨区上36个格点(相当于约40万 $km^2$ 地区)的平均值,因而数值较小,为 $10^{-10} s^{-2}$ 。 $\frac{\partial D}{\partial t}$ 项也特别小,所有资料的时间间隔为12小时,不能反映中尺度散度场的变化。从表2可以看出散度平流 $\vec{V} \cdot \nabla D$ 各

表2 散度方程各项的平衡

(单位:  $\times 10^{-10} s^{-2}$ )

层次 (hPa)	$\frac{\partial D}{\partial t}$	$\vec{V} \cdot \nabla D$	$\omega \frac{\partial D}{\partial p}$	$\left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2$	$2 \frac{\partial u}{\partial y} \frac{\partial v}{\partial x}$	$f\zeta'$	$\frac{\partial \omega}{\partial x} \frac{\partial u}{\partial p} + \frac{\partial \omega}{\partial y} \frac{\partial u}{\partial p}$	$\beta u$
200	0.8	-1.6	—	5.1	-1.9	-53.1	—	2.7
300	0.5	-1.5	2.4	4.4	-0.8	-39.5	1.3	2.0
400	0.2	-2.0	2.6	2.8	-0.4	-17.2	-0.5	2.2
500	-0.4	-1.4	1.8	2.7	0.6	-13.0	-1.4	2.1
600	-0.4	-1.8	1.6	1.3	1.4	-6.1	-2.0	1.8
700	0.5	-3.4	1.5	2.2	2.8	4.7	-0.6	1.5
800	0.6	-2.0	0.9	3.2	1.6	9.4	-0.4	1.2
900	-0.2	-1.2	0.2	2.9	0.4	7.0	0.3	0.7
1000	-0.7	-0.8	—	1.0	0.3	8.1	—	-0.3

\*\* 汪钟兴、孙淑清,暴雨过程中散度场与涡度场的相互作用,气象学报(待发表)。

层皆为负值，几乎与垂直输送 $\omega \frac{\partial D}{\partial P}$ 项相抵消。只有非地转涡度 $\zeta'$ 项和非线性项

$2 \frac{\partial u}{\partial y} \cdot \frac{\partial v}{\partial x}$  的分布为下层正值上层负值，即在下层有利于辐合生成 $(\frac{\partial D}{\partial t} < 0)$

和上层有利于辐散的增加 $(\frac{\partial D}{\partial t} > 0)$ 。

这种结构有利于对流活动的发展。

这些结果表明，散度方程中有的项对于暴雨或强天气过程的发生有更为密切的关系。因而有可能以此为线索来作强天气过程的预报。1977年Schaefer(4)曾提出一个用散度方程中的某些项作对流风暴预报的方法。他把散度方程写成如下形式：

$$\begin{aligned} \frac{\partial D}{\partial t} + \omega \frac{\partial D}{\partial P} + \frac{\partial \vec{V}}{\partial P} \cdot \nabla \omega \\ = -\nabla^2 \left( \phi + \frac{\vec{V} \cdot \vec{V}}{2} \right) - \nabla \cdot \left( \vec{k} \times \vec{V} \right. \\ \left. (\zeta + f) \right) = U \end{aligned}$$

把U称作不平衡场，可以看出等号左边各项是不易计算的，右边各项与高度场和风场有关的项则较易计算，可靠性也好。用1973年发生在美国中西部的强风暴为例计算U值。发现大多数风暴（包括大风、龙卷和冰雹）发生前U值皆为正值，其值在 $0 - 1.8 \times 10^{-9} \cdot s^{-2}$ 之间。图3为1973年5月23—30日一周内风暴与U值的对应关系。实线直方图为所有强风暴次数，虚线则为龙卷数。U值为风暴发生前12小时之值。有93%的风暴和92%的龙卷在其发生前U场皆达到 $0 - 1.8 \times 10^{-9} \cdot s^{-2}$ 。值得注意的是，Schaefer所取的样本是大量的，包含406个风暴，因此具有一定的代表性。美国强风暴预报中心应用同样的方法对1977年1—4月的资料进行了验证，效果也是好的。

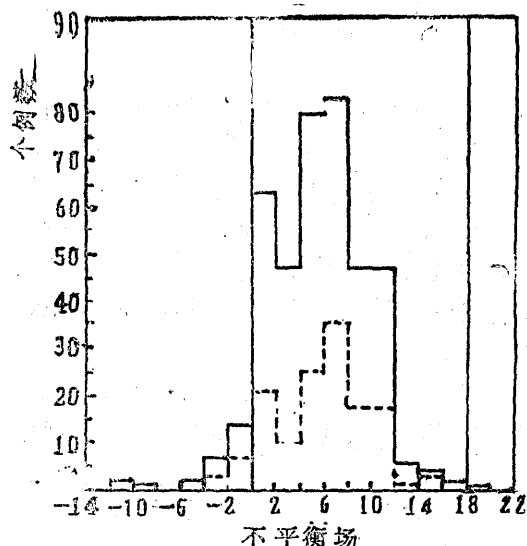


图3 U值与风暴数的相关图

横坐标为U值，纵坐标为风暴个数，实线为所有风暴数，虚线为龙卷数

我们根据低层风场，特别是低空急流在中国暴雨过程中的重要性这个事实，计算散度方程中与水平风场分布不均匀有关的项(1)。即 $A \equiv \frac{\partial}{\partial x} \left( u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) +$

$$\frac{\partial}{\partial y} \left( u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right)$$

并与局地暴雨区进行比较，发现A值的正、负号及大小与未来强降水有较密切的对应关系。 $A > 0$ 区即 $\frac{\partial D}{\partial t} < 0$ 区与暴雨区相一致。图4给出了1980年7月30日至8月1日

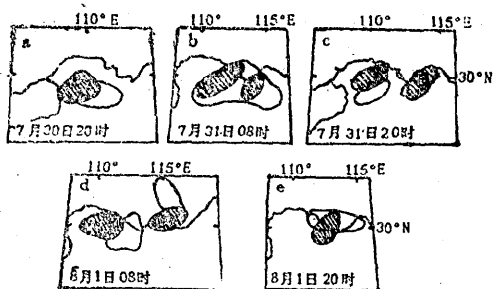


图4 1980年7月30日至8月1日850 hPa A值 $\geq 1.0 \times 10^{-9} \cdot s^{-2}$ 区与未来12小时降水量 $\geq 25mm$ 区(阴影区)

长江中游暴雨期850hPa  $A > 1.0 \times 10^{-9} \cdot s^{-2}$

(实线)区与未来12小时降水大于25mm区(阴影区),从所给出的五个时刻看,它们之间的对应关系很好,基本上重合并一致东移,这说明A项使  $\frac{\partial D}{\partial t} < 0$ ,即辐合增长,

有利于对流活动的发展。由于降水是未来12小时内的值,因此计算A项的大小就有一定的预示性。

汪钟兴、范东光<sup>[5]</sup>等从表2出发,直接计算非线性项  $B = 2 \frac{\partial u}{\partial y} \cdot \frac{\partial v}{\partial x}$ ,研究它

与未来暴雨的关系。发现也可得到十分满意的结果。考察1979—1983年5个夏半年的长江流域的暴雨日中850hPa B值的分布,发现195次区域性大暴雨中,B项有正贡献的占83.7%,且正值先于暴雨出现。两者的位置也比较一致。事实上,在我国暴雨过程中,大多伴有低空急流过程,急流轴附近水平风速分布的极不均匀,很易使A值或B值变大,造成低层的辐合增长,在如急流轴的左前方很

易满足  $\frac{\partial u}{\partial y} < 0$  和  $\frac{\partial v}{\partial x} < 0$ ,即  $B > 0$ ,其物理

意义也是清楚的。上述这些研究无疑为散度方程各诊断项在实际暴雨预报中的应用,开辟了很好的途径。

近年美国又有人提出了用散度及其变化的量来作风暴超短时预报。Doneaud, A. A.<sup>[6]</sup>对16次风暴和10个无对流日的散度及其

变量值进行对比研究,散度变量(即  $\frac{\partial D}{\partial t}$ )

是用15分钟间隔在一个小时内的平均值,发

现在  $D$  和  $\frac{\partial D}{\partial t}$  的某一临界值下,可以区分有

无对流活动。如  $\frac{\partial D}{\partial t} < -5 \times 10^{-8} \cdot s^{-2}$ ,并

持续45分钟以上时,即可有对流活动发生。美国肯尼迪空间中心(KSC)成功地运用中

尺度散度场的激烈变化来预报云-地间闪电雷击<sup>[7]</sup>。发现在一次辐合突然增长后,即有频繁的雷电活动。他们对1985—1986年夏季244天地面中尺度辐合场与云-地闪电在空间、时间上的分布进行研究。图5给出其中的一次过程,从两个序列的比较可见,在一次辐合事件(Convergence Event)以后,即发生高频率的闪电活动。所谓辐合事件是指辐合增量超过  $75 \times 10^{-6} \cdot s^{-1}$  的一次过程。用这个关系作云-地间雷击的预报,取得了十分满意的效果。预报时效为近一个小时。

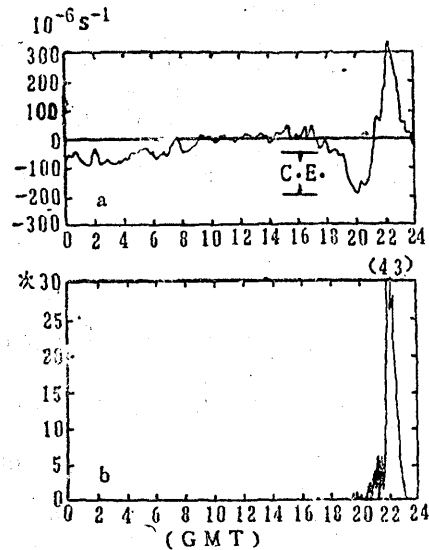


图5 1985年6月16日美国肯尼迪空间中心地区地面辐合(a)与云-地闪电次数(b)序列图  
C.E.代表辐合事件

#### 四、结语

从动力学观点看,对于中尺度系统来说,风场是一个活跃的因素,比气压变化快而强。风场中的势流部分比涡旋部分重要。散度场及由此而造成的上升运动(直接结果,非次级环流)与暴雨或强对流活动区一致。散度的变化是触发中尺度波系(如重力波)的必要条件,无论从理论或本文所列举的事实都表明,在研究中尺度天气的演变时,注意散度场的变化是十分必要的。

通过计算散度方程的各项及用稠密的中尺度资料直接计算散度倾向  $\frac{\partial D}{\partial t}$  值都是要找出  $\frac{\partial D}{\partial t} < 0$ , 即未来的辐合增长区, 以了解对流活动可能发展的位置。本文所介绍的中外学者的工作表明, 这样的尝试是成功的, 特别是对于尺度小, 变化迅速、烈剧的系统, 其对应关系更好。以此来作短期或超短期预报是一个可取的有效途径。

### 参考文献

- (1) 孙淑清, 低层风场在暴雨发生中的动力作用, 大气科学, Vol. 6 394—404, 1982.
- (2) Vlanski, S.L., et al. The role of surface divergence and vorticity in the life cycle of convective rainfall. Part I, Part I. J. Atmos. Sci. Vol. 35, 1047—1069. 1978.
- (3) Fankhauser, J. C., The derivation of consistent fields of wind and geopotential data. J. Appl. Met. Vol. 13. 637—646 1974.
- (4) Schaefer, J. T., On the applicability of the divergence equation to the severe storm forecasting. Tenth conference on severe local storms. 358—363 1977.
- (5) 范东光, 散度方程在区域性大暴雨短期预报方面的应用研究, 中国气象学会六十周年大会交流材料。
- (6) Doneaud, A. A., et al. The variance of the net divergence fields: A potential mesoscale indicator of convective storms in a dry environment. IUGG XIX General Assembly, Vancouver, Abstracts V3 P. 806. 1987.
- (7) Watson, A. L., et al. Short term forecasting of lightning based on the surface field at Kennedy Space Center, Mesoscale Analysis and Forecasting—Proceedings of An International Symposium. 401—406. 1987.

## The application of divergence variation to analysis and forecasting of mesoscale convective systems

Sun Shuqing

(Institute of Atmospheric Physics, Academia Sinica)

### Abstract

The recent study of divergence variation of wind fields and its application to mesoscale system are introduced. It is indicated that the pattern of mesoscale divergence and its change are closely related to the severe weather, which could often predict the appearance of mesoscale weather. Certain terms of divergence equation have been practised in severe weather. The successful results are also described here.