

暴雨天气动力学一些问题的探讨(Ⅱ)

——暴雨落区天气和动力学分析

罗会邦

(中山大学地理系)

王两铭

(中央气象局研究所)

摘 要

本文在总结暴雨落区预报经验的基础上,对预报指标进行了动力学的初步分析。在假相当位温守恒条件下,用低层的涡度方程推导出诊断方程。表明,850MB的正涡度平流、低层暖湿空气平流的最大中心、850MB正涡度区的辐合作用、暖湿空气铅直输送的最大中心和低层正涡度,是形成低空西南急流左前方暖湿区暴雨的主要因子。从动力气象角度论证了所用指标的物理意义,为改进暴雨落区预报和进一步的理论研究提供参考。

1977年华南前汛期暴雨试验预演中的暴雨落区预报方法,吸取了华南地区广大预报员对前汛期暴雨预报的丰富经验,将这些经验概括为反映潮湿空气的位势不稳定,和促使这种不稳定能量释放的外力这两方面的预报指标。预演后又进行了研究改进。本文将对这些行之较为有效的预报指标进行一些理论分析,研究它们本质上反映了什么样的物理过程,探讨形成暴雨落区的基本理论,以便促使落区预报方法不断改善,为进一步的研究工作创造条件。

一、暴雨落区天气形势和预报指标

首先,这里所指的天气形势已不是高压、低压、冷槽、暖脊,而是指西南急流轴及急流中心,暖湿脊和干冷槽及其中心。

作为24小时华南前汛期暴雨落区预报所考虑的天气形势,其范围是 $100^{\circ}E-125^{\circ}E$, $15^{\circ}N-35^{\circ}N$ 。在这个区域内出现的暴雨天气形势为: $\theta_{0.0}$ 主要锋区已进入 $26^{\circ}N-28^{\circ}N$,其槽脊分布大体上分为三类。一类是广西、福建地区同时下暴雨, $\theta_{0.0}$ 为二槽一脊的分布,西部干冷槽在芷江贵阳一线,东部槽在福州、厦门沿海地区;暖湿舌中分二个中心,一个在柳州到梧州地区,另一个在广东的东北部至福建

西南部,对应的急流轴自越南经广西南部到梧州地区分支,一支经广州直指福州,另一支经梧州北上直指湖南零陵,急流中心一个在梧州附近,另一个在梅县附近。这是桂北和龙岩地区暴雨的主要天气形势。第二类是二脊一槽型,主要干冷槽经长沙至桂林一线,主要暖湿中心在梧州、广州、韶关地区,主要急流轴自海南经广州连平以东沿武夷山西侧北上,或经武夷山南侧向东直指福州,急流中心在广州附近。这一类是粤北暴雨的主要天气形势。第三类波长较短,常出现三槽二脊形势,暖湿中心分裂为二至三个小中心或暖湿脊,分别有850MB急流中心与之配合,且在暖湿中心的右方; θ_{se} 槽脊的波长在800—1300公里左右,急流中心(最初一根等风速线)的尺度一般为400—600公里,小的200公里也有,但强度很大,距离暖湿中心位置较近。以上就是华南地区前汛期暴雨天气形势的主要特征。

在上述天气形势下出现的暴雨,用七条指标所作的落区预报基本上是成功的,它反映了暴雨形成所必须的条件:

1. 暴雨常出现在低空850MB西南风急流轴和左侧西南风零线之间,尤其是出现在急流中心的左前方;

2. 850MB, $\theta_{se} \geq 75$ 度*;
3. $\theta_{se850} - \theta_{se600} \geq 5$ 度;
4. 低层850MB或地面应该为辐合区;
5. $q_{850} \geq 14$ 克/千克;
6. 理查逊数

$$R_{i_{850}} = \frac{g}{\theta_{se}} \frac{\frac{\partial \theta_{se}}{\partial z}}{\left(\frac{\partial u}{\partial z}\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z}\right)^2}$$

的负数最大中心区常常是暴雨区;

7. 暴雨常常在低空暖湿中心的下风侧。

上述指标按物理特征归类,2、5已包含在7中,3是6的一部分,因此又可归结为1、4、6、7共4个指标。

去年在应用这些指标进行试报过程中,发现下面几个特点对于考虑暴雨落区预报很重要:

1. 用850MB实测风场按东北方向作X轴进行分解后,等风速线所确定的急流轴及其中心与850MB假相当位温场,似乎能抓住暴雨比较主要的特征。

2. 850MB的暖湿空气及其 θ_{se} 场的锋区与地面高能区和能量锋区*配合较好,表明850MB以下 θ_{se} 的分布特征比较一致。

3. 暴雨主要发生在低空急流中心左前方的暖湿空气中(其主要特征是暖区

*注:这里是用总温度计算的物理量。

降水)。

为了弄清落区预报指标所反映的物理过程,下文将根据上述特征进一步对这些指标进行动力学的分析。

二、暴雨落区动力学初步分析

落区预报指标2、5、7反映了空气的暖湿程度,指标3、6反映了这种潮湿空气的不稳定程度,指标1、4反映了强迫抬升。

实践表明,大气低层的特征对暴雨的预报极为重要。下面将主要讨论低层大气的动力学特征。在低层850MB以下某个等压面 p_0 上,假定摩擦力正比于风速,涡度方程为:

$$-(f + \zeta_0)D_0 = \frac{\partial \zeta_0}{\partial t} + \vec{V}_0 \cdot \nabla (\zeta_0 + f) + k\zeta_0 \quad (1)$$

式中下标“0”表示该物理量在 p_0 等压面上取值(下同)。其中 D_0 、 ζ_0 、 \vec{V}_0 分别为该等压面上的散度、涡度和水平风速矢, f 为柯氏参数, k 为摩擦系数。方程(1)表明:在无摩擦的条件下,在 p_0 等压面上绝对涡度为正值辐合区范围内,空气块绝对涡度的个别变化大于零,即在 p_0 等压面上绝对涡度的正值区中,空气块在运动过程中绝对涡度将随时间增大。在下面的动力学分析中,我们将以低层 p_0 等压面上的散度 D_0 作为研究落区的对象,并配合涡度场,讨论它与哪些因子有关。讨论中所用的物理量就是本文[1]中提出的实测风场和假相当位温场。

方程(1)中的 $\partial \zeta_0 / \partial t$ 可以表示为:

$$\frac{\partial \zeta_0}{\partial t} = \frac{\partial \zeta_1}{\partial t} - \frac{\partial \zeta_q}{\partial t} \quad (2)$$

式中下标“1”表示该量在850MB等压面上取值(下同),下标“q”表示该量与风场从 p_0 等压面到850MB等压面的铅直切变有关。其中 $\zeta_q = \zeta_1 - \zeta_0$, ζ_1 是850MB等压面上的相对涡度。因为:

$$\begin{cases} \zeta_0 = \vec{k} \cdot \nabla \wedge \vec{V}_0 \\ \zeta_1 = \vec{k} \cdot \nabla \wedge \vec{V}_1 \end{cases} \quad (3)$$

$$\text{故} \quad \zeta_q = \vec{k} \cdot \nabla \wedge \vec{V}_q \quad (4)$$

$$\text{其中} \quad \vec{V}_q = \vec{V}_1 - \vec{V}_0 \quad (5)$$

是 p_0 等压面到850MB等压面风速矢的铅直切变矢量。由(4)式可见,二个等压面上的涡度差值,正是该二个等压面上风速铅直切变矢量 \vec{V}_q 的涡度。我们称为铅直切

变风涡度。

(2)式中的 $\partial \zeta_1 / \partial t$ 可以用850MB等压面上的涡度方程来决定:

$$\frac{\partial \zeta_1}{\partial t} = -\vec{V}_1 \cdot \Delta(\zeta_1 + f) - (f + \zeta_1)D_1 \quad (6)$$

铅直切变风的涡度变化 $\partial \zeta_a / \partial t$ 可以用整层平均的假相当比温 $\bar{\theta}_{se}$ 来表示,符合“—”表示从 p_0 等压面到850MB等压面的平均(下同)。

根据切变风场 \vec{V}_a 和平均假相当位温 $\bar{\theta}_{se}$ 之间存在着类似于热成风与平均温度场的关系。

我们假定这种关系为:

$$\vec{V}_a = c \vec{k} \wedge \nabla \bar{\theta}_{se} \quad (7)$$

其中 c 为系数,为了定性讨论,我们假定 c 在暴雨地区变化不大,将 c 看作常数,则从(4)式便有:

$$\frac{\partial \zeta_a}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} (\vec{k} \cdot \nabla \wedge \vec{V}_a) = c \frac{\partial}{\partial t} [\vec{k} \cdot \nabla \wedge (\vec{k} \wedge \nabla \bar{\theta}_{se})] = c \nabla^2 (\frac{\partial \bar{\theta}_{se}}{\partial t}) \quad (8)$$

假定暴雨地区附近的大气运动是遵从假绝热过程,则:

$$\frac{d\theta_{se}}{dt} = 0 \quad (9)$$

考虑到 p_0 到850MB这一大气低层 θ_{se} 场分布比较一致的特征,设各高度等 θ_{se} 线互相平行,并设这一层中 $\partial \theta_{se} / \partial p$ 的符号不随高度变化,亦即该层中任一高度的假相当位温梯度 $\nabla \theta_{se}$ 可以用850MB的假相当位温梯度 $\nabla \theta_{se1}$ 表示为 $\nabla \theta_{se} = a(p) \nabla \theta_{se1}$,而任一高度的假相当位温随高度变化 $\partial \theta_{se} / \partial p$ 亦可以用850MB高度的假相当位温随高度变化 $(\partial \theta_{se} / \partial p)_1$ 表示为 $\partial \theta_{se} / \partial p = k(p) (\partial \theta_{se} / \partial p)_1$,其中 $a(p)$ 和 $k(p)$ 为比例系数,又由于任一高度的风速 \vec{V} 可用850MB的风速 \vec{V}_1 和其间的切变风速矢来表示,因此,将(9)式从 p_0 到850MB积分求平均便得

$$\frac{\partial \bar{\theta}_{se}}{\partial t} = -b \vec{V}_1 \cdot \nabla \theta_{se1} - \bar{\omega} \left(\frac{\partial \theta_{se}}{\partial p} \right)_1 \quad (10)$$

$$\text{其中 } b = \frac{1}{p_0 - 850\text{MB}} \int_{850\text{MB}}^{p_0} a(p) dp, \bar{\omega} = \frac{1}{p_0 - 850\text{MB}} \int_{850\text{MB}}^{p_0} k(p) \omega(p) dp.$$

即 $\bar{\omega}$ 为 p_0 到850MB这一层铅直速度的加权平均。将(10)式代入(8)式得

$$\frac{\partial \zeta_a}{\partial t} = -c \nabla^2 (\vec{V}_1 \cdot \nabla \theta_{se1}) - c \nabla^2 \left[\bar{\omega} \left(\frac{\partial \theta_{se}}{\partial p} \right)_1 \right] \quad (11)$$

其中 $d = C_b$ 。最后, 将 (2), (6), (11) 三式代入 (1) 式, 得

$$\begin{aligned} -(f + \zeta_0)D_0 &= -\vec{V}_1 \cdot \nabla(\zeta_1 + f) - (f + \zeta_1)D_1 + \\ &+ dF^2 (\vec{V}_1 \cdot \nabla \theta_{se1}) + CF^2 \left[-\omega \left(\frac{\partial \theta_{se}}{\partial p} \right)_1 \right] + \vec{V}_0 \cdot \nabla(\zeta_0 + f) + k\zeta_0 \end{aligned} \quad (12)$$

或简写为:

$$-(f + \zeta_0)D_0 = W_1 + S_1 + J + Q + W_0 + M_0 \quad (12')$$

其中:

$$\left. \begin{aligned} W_1 &= -\vec{V}_1 \cdot \nabla(\zeta_1 + f) \\ S_1 &= -(f + \zeta_1)D_1 \\ J &= dF^2 (\vec{V}_1 \cdot \nabla \theta_{se1}) \\ Q &= CF^2 \left[-\omega \left(\frac{\partial \theta_{se}}{\partial p} \right)_1 \right] \\ W_0 &= \vec{V}_0 \cdot \nabla(\zeta_0 + f) \\ M_0 &= k\zeta_0 \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

下面用本文(I)中提出的分析工具实测风场和假相当位温场来讨论(12)各式项的意义。

首先讨论 $|\zeta_0| < f$ 的情况。此时 $(\zeta_0 + f) > 0$ 。

1. 850MB 等压面上涡度平流的作用

取东北方向为 x 轴西北方向为 y 轴 \vec{i} 、 \vec{j} 分别为其单位矢量, 则850MB等压面上急流附近沿 y 轴的风速分量很小, $\vec{V}_1 = \vec{i}u_1 + \vec{j}v_1 \approx \vec{i}u_1$
故

$$\begin{aligned} W_1 &= -\vec{V}_1 \cdot \nabla(\zeta_1 + f) \approx \\ &\approx -u_1 \frac{\partial}{\partial x} \left(-\frac{\partial u_1}{\partial y} \right) - \vec{V}_1 \cdot \nabla f = \\ &= u_1 \frac{\partial^2 u_1}{\partial x \partial y} - \frac{\sqrt{2}}{2} u_1 \beta \end{aligned} \quad (14)$$

式中 $\beta = \frac{2\Omega \cos \varphi}{a}$, 为罗斯贝参数, φ 为纬度, a 为地球半径, Ω 为地球自转角速度。

如图1所示, 在850MB急流轴左侧, $\partial u_1 / \partial y < 0$, 切变涡度在通过急流中心的 y 轴上最大, 因此在850MB急流轴左前方, $u_1 \frac{\partial^2 u_1}{\partial x \partial y} > 0$, 说明在850MB急流轴左

前方的正涡度平流区, 对应于 p_0 等压面上应为一相应的辐合区, 即有利暴雨的形成, 而在850MB急流轴左后方, $u_1 \frac{\partial^2 u_1}{\partial x \partial y} < 0$, 说明在850MB急流轴左后方的负涡度平流区对应于 p_0 等压面上应为相应的辐散区, 不利于暴雨的发生, 同样, 可以讨论850MB急流轴右侧的涡度平流, 将使850MB急流轴右前方不利暴雨形成, 而右后方有利暴雨形成。

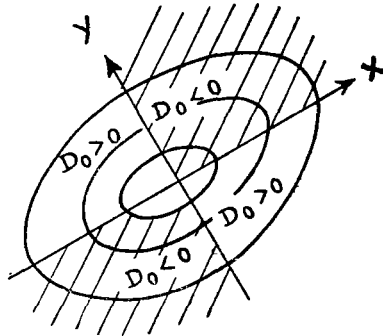


图1. 由850MB 涡度平流 $u_1 \frac{\partial^2 u_1}{\partial x \partial y}$ 决定的 p_0 等压面上的散度场符号
(斜线区表示 $D_0 < 0$, 其他部分 $D_0 > 0$, 下同)

(15) 式中右边第二项表示由于地球自转引起的牵连涡度的平流, 因为 $u_1 > 0$, 所以这一项总是使 p_0 等压面上有相应的正散度, 不利暴雨的形成。

2. 850MB等压面上散度场的作用

$$S_1 = -(f + \zeta_1)D_1 = -\left(f - \frac{\partial u_1}{\partial y}\right) \frac{\partial u_1}{\partial x} = -f \frac{\partial u_1}{\partial x} + \frac{\partial u_1}{\partial y} \frac{\partial u_1}{\partial x} \tag{15}$$

$-f \frac{\partial u_1}{\partial x}$ 项表示, 在850MB等压面急流出口区, 因 $\partial u_1 / \partial x < 0$, 将有 p_0 等压面上对应的辐合区存在, 而在850MB急流入口区, 则由 $\partial u_1 / \partial x > 0$, 对应 p_0 等压面上应有辐散区(图2), 亦即850MB急流出口区有利于暴雨的形成, 入口区不利暴雨形成。

(15)式右边第二项 $\frac{\partial u_1}{\partial x} \frac{\partial u_1}{\partial y}$ 在850MB急流轴左前方(或右后方), $\frac{\partial u_1}{\partial x}$ 与 $\frac{\partial u_1}{\partial y}$ 的

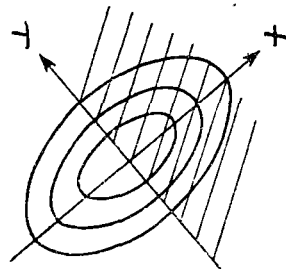


图2. 由850MB散度场 $-f \frac{\partial u_1}{\partial x}$ 决定的 D_0 符号(说明见图1)

符号相同, $\frac{\partial u_1}{\partial x} \frac{\partial u_1}{\partial y} > 0$, 对应 p_0 等压面上应有辐合区, 在850MB急流轴的左后方(或右前方), $\frac{\partial u_1}{\partial x}$ 与 $\frac{\partial u_1}{\partial y}$ 的符号相反, $\frac{\partial u_1}{\partial x} \frac{\partial u_1}{\partial y} < 0$, 对应 p_0 等压面上应有辐散区(图3)。亦即这一项的作用与 $u_1 \frac{\partial^2 u_1}{\partial x \partial y}$ 项的作用相同, 使850MB急流轴左前方和右后方有利于暴雨形成, 850MB急流轴右前方和左后方不利暴雨形成, 这与暴雨多出现在850MB急流中心左前方的预报指标是一致的。

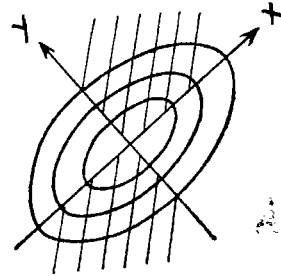


图3 由850MB等压面上散度场 $\frac{\partial u_1}{\partial x} \frac{\partial u_1}{\partial y}$ 决定的 D_0 符号(说明见图1)

3. 假相当位温平流作用

$$J = d\nabla^2 (\vec{V}_1 \cdot \nabla \theta_{se1}) = d\nabla^2 (u_1 \frac{\partial \theta_{se1}}{\partial x}) \quad (16)$$

在 θ_{se1} 的最大中心下风方向, $u_1 \frac{\partial \theta_{se1}}{\partial x} < 0$, 其极

小值出现的地方 $\nabla^2 (u_1 \frac{\partial \theta_{se1}}{\partial x}) > 0$, 对应 p_0 等压面上应有辐合区; 反之, 在 θ_{se1} 最大中心上风方向, $u_1 \frac{\partial \theta_{se1}}{\partial x} > 0$, 其极大值出现的地方, $\nabla^2 (u_1 \frac{\partial \theta_{se1}}{\partial x}) < 0$, 对应 p_0 等压面上

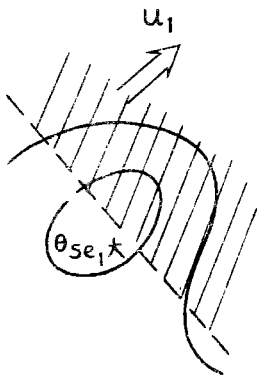


图4 假相当位温平流决定的 D_0 符号(说明见图1)

应为辐散区。也就是说, 在正的假相当位温平流最大的地方, 有利于暴雨的形成, 这与暴雨区常出现在 θ_{se1} 最大中心下风方向的预报经验是一致的, 由于暖湿中心常出现在850MB急流中心的左侧附近, 故这一项的作用也是有利于850MB急流出口区, 特别是急流轴左前方出现暴雨, 而在急流入口区则不利暴雨的形成。

4. 铅直稳定度的作用

$$Q = c\nabla^2 \left[\bar{\omega} \left(\frac{\partial \theta_{se}}{\partial p} \right)_1 \right] \quad (17)$$

在位势不稳定区, 下层假相当位温比上层假相当位温大, $(\partial \theta_{se} / \partial p)_1 > 0$, 此时若 $\bar{\omega} < 0$, 有上升运动存在时, $\bar{\omega} (\partial \theta_{se} / \partial p)_1 < 0$, 在其极小值出现的地方 $\nabla^2 [\bar{\omega} (\partial \theta_{se} / \partial p)_1] > 0$, 对应 p_0 等压面应为辐合区, 有利于暴雨的产生, 这与暴雨经常出现在有上升运动的位势不稳定区的预报经验是一致的, 当

$\bar{\omega} > 0$, 有下沉运动存在时, $\bar{\omega} (\partial\theta_{se}/\partial p)_1 > 0$, 则在极大值出现的地方 $\nabla^2 (\bar{\omega} (\partial\theta_{se}/\partial p)_1) < 0$, 对应 p_0 等压面上应为辐散区, 不利暴雨的形成。

在位势稳定区, $(\partial\theta_{se}/\partial p)_1 < 0$, 当 $\bar{\omega} < 0$ 有上升运动时, $-\bar{\omega} (\partial\theta_{se}/\partial p)_1 > 0$, 则在其极大值出现的地方 $\nabla^2 [\bar{\omega} (\partial\theta_{se}/\partial p)_1] < 0$, 对应 p_0 等压面上应为辐散区, 不利暴雨的产生。当 $\bar{\omega} > 0$ 时, $\bar{\omega} (\partial\theta_{se}/\partial p)_1 < 0$, 其极小值出现的地方 $\nabla^2 [\bar{\omega} (\partial\theta_{se}/\partial p)_1] > 0$, 有利于暴雨的形成。

5. p_0 等压面上涡度平流的作用

$$W_0 = \vec{V}_0 \cdot \nabla (\zeta_0 + f) \tag{18}$$

(18)式表示, 在 p_0 等压面上, 反气旋式涡度中心的下风方向与气旋式涡度中心的上风方向之间, 对应于该等压面上应为相应的辐合区, 有利暴雨的发生; 而在 p_0 等压面上气旋式涡度中心下风方向与反气旋式涡度中心上风方向之间, 不利于暴雨的产生。

6. p_0 等压面上的摩擦作用。

$$M_0 = h\zeta_0 \tag{19}$$

如果摩擦层内是气旋式涡度区, 则 $M_0 > 0$, 对应的 $D_0 < 0$, 即为辐合区, 有利于暴雨的发生。如果摩擦层内是反气旋式涡度区, 则 $M_0 < 0$, 对应的 $D_0 > 0$, 即为辐散区, 不利于暴雨的产生。如果假定 p_0 等压面上的涡度同 850 MB 上的涡度符号相同, 则在急流轴左侧摩擦辐合, 右侧摩擦辐散。

综上所述, 可以看到, 为什么暴雨落区预报指标反映出急流中心的左前方暖湿中心的下风方向, 暴雨最有可能发生。为便于比较, 我们用 850 MB 急流中心的 x 轴和 y 轴将 850 MB 急流地区划分为急流中心左前方, 左后方, 右前方, 右后方四个区, 将各区中方程(12)右边各项对应的 D_0 符号列表如下:

表1: 方程(12)中各项在850MB急流不同部位对应的 D_0 符号

D ₀ 符号 方程(12)中对应项	急流部位			
	左前方	左后方	右前方	右后方
W_1 中的 $u_1 \partial^2 u_1 / \partial x \partial y$	-	+	+	-
W_1 中的 $-\frac{\sqrt{2}}{2} u_1 \beta$	+	+	+	+
S_1 中的 $-f \frac{\partial u_1}{\partial x}$	-	+	-	+
S_1 中的 $\frac{\partial u_1}{\partial x} \frac{\partial u_1}{\partial y}$	-	+	+	-
$J = d p^2 (u_1 \frac{\partial \theta_{se1}}{\partial p})$	-	+	-	+
$M_0 = h\zeta_0$	-	-	+	+

另外,对于稳定度项 Q 来说,在急流中心左前方一般是位势不稳定区,而且又有强烈上升运动(由 $D_1 < 0$ 及其他项对应的 $D_0 < 0$),故对暴雨的发生也是有贡献的。

由此可见,除 β 项外,方程(12)中几乎所有各项在急流中心左前方都对降水有利,在急流其他部位将视各项的相对大小而定。

当 $|\zeta_0| > f$ 时,若850MB急流中心左前方对应的 p_0 等压面上为正涡度区,则(12)式知,急流该部位仍然是有利暴雨生成的地区;但若850MB急流中心左前方对应的 p_0 等压面上为负涡度区,则急流该部位便不利于暴雨的发生。

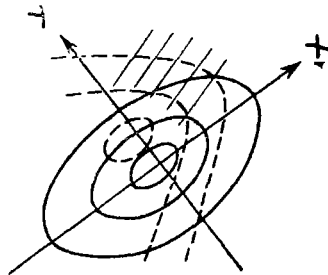


图5 850MB急流与暴雨落区(实线为等风速线,虚线为等假相当位温线,其他同图1)

三、结论

暴雨落区预报指标虽然是从个例分析中得到的,但它来自广大预报员的丰富经验,并经过了多次反复实践,证明它确实反映了暴雨动力过程的许多侧面,具有一定的物理意义。

方程(12)是一个诊断方程,从850MB实测风场,低空 θ_{se} 场和上升运动的分布情况,我们就能定性判断,哪些地区低层辐合比较强烈。从分析中,我们看到850MB急流轴左前方,由于存在正的涡度平流和正涡度区的辐合作用,又处于 θ_{se_1} 最大中心下风方向和 $(\partial\theta_{se}/\partial p)_1 < 0$ 的上升运动区,加上低层气旋性涡度的分布,有利于低层强烈辐合,而强烈的低层辐合与强烈的上升运动是相关联的,因此850MB急流中心左前方正好是暴雨落区的所在。图5

弄清了上述暴雨落区预报指标反映的物理本质,就使我们可能在这个基础上进一步探讨一般暴雨预报规律,并提供降水定量预报的可能性。使暴雨落区预报方法不断得到改进。