

大尺度强降水的基本物理条件 和天气形势配置

孙 岚

(中国气象科学研究院)

提 要

本文利用1988—1989年两年夏季京津冀中尺度试验基地的常规探空资料和物理量诊断场，分析了与大尺度强降水关系最密切的三个基本物理条件与天气形势的配置。这三个条件是高空辐散、低层水汽通量辐合和低层暖平流。文中给出了有利于产生强降水的典型图例，有助于在短时预报中将物理量诊断资料和常规天气图的有机结合。

一、引 言

目前诊断分析可以提供高层辐散、低层水汽通量辐合、低层暖平流这三个物理量的分布，但由于个别记录的误差，常常造成诊断结果缺乏代表性。为了更合理地使用诊断资料，应将诊断资料和天气形势结合起来使用。为此有必要了解在什么样的天气形势下会产生大尺度强降水的物理量分布。本文所用的物理量诊断场为用有限元方法将95—135°E，30—50°N范围内67个站的探空资料内插到格距为 $214 \times 200 \text{ km}^2$ 的 13×16 个网格点上，用差分法计算的1000—200hPa层次的涡度、涡度平流、散度、温度平流、水汽通量散度等物理量。利用1988—1989年京津冀中尺度试验基地常规天气图和诊断分析图，归纳了几种有利于暴雨过程出现的与高空强正涡度平流、低空强暖平流和水汽通量辐合相配合的天气形势，可供业务预报中使用。在没有诊断资料的情况下，也可用本文所归纳出来的天气形势定性估计是否具备降水的物理条件。

二、与大尺度降水强度关系较密切的三个物理量

由降水强度公式：

$$R = \int_{p_0}^0 \nabla \cdot \left(\frac{1}{g} \vec{V} q \right) dp$$

由于500hPa以上水汽只占整个气柱水汽的10%，可以略去，故可认为大尺度降水强度和低层（850hPa或700hPa）水汽通量散度 $\nabla \cdot \left(\frac{1}{g} \vec{V} q \right)_L$ 成正比。

略去500hPa以上水汽通量散度对降水强度的贡献，利用降水强度公式，将水汽通量散度分解成比湿平流和湿空气辐合两项后，降水强度公式可改写成：

$$R = \int_{p_0}^{500} \frac{1}{g} \vec{V} \cdot \nabla q dp +$$

$$\int_{p_0}^{500} \frac{1}{g} q \nabla \cdot \vec{V} dp$$

略去比湿平流项，利用连续方程，降水强度公式可简化为：

$$R = - \frac{1}{g} \bar{q} \omega_{500}$$

其中 \bar{q} 为地面到500hPa平均比湿，可见，大尺度降水强度和 ω_{500} 成正比。

根据准地转 ω 方程：

$$\omega \propto \nabla^2(A_T) \quad \text{或} \quad \omega \propto -A_T \text{低}$$

$$\text{及 } \omega \propto \frac{\partial A\xi}{\partial p} \quad \text{或} \quad \omega \propto -A\xi \text{高}$$

即大尺度降水强度与低层暖平流及高层正涡度平流成正比。

据以上考虑可以认为，低层的水汽通量散度、低层的暖平流和高层的正涡度平流是考察大尺度降水强度的三个基本物理量。高空正涡度平流及低空暖平流引起高空辐散、低空辐合及上升运动。低空水汽通量辐合一方面反映了水汽来源，同时也与上升运动相联系。

三、具有强正涡度平流和辐散的 200hPa风场

我们选用200hPa风场诊断高空是否具备大尺度强降水物理条件，因为200hPa强的正涡度平流，将伴有高空辐散和中层上升运动。由涡度表达式

$$\xi = c \frac{\partial \theta}{\partial s} - \frac{\partial c}{\partial n}$$

可知，曲率涡度 $c \frac{\partial \theta}{\partial s}$ 和风速 c 成正比，因此，在有急流的情况下，一般曲率涡度和切变涡度都较大，因此，在有急流时，高空容易出现强的正涡度平流。根据所选的暴雨个例发现，按照风场分布的特点，高空出现较强辐散或正涡度平流的流场，可分为有高空急流和无急流两种类型。

1. 有高空急流

大尺度强暴雨个例中的高空急流按其走向有SW—NE、W—E、S—N、N—S 4类。

(1) SW—NE急流

以1989年8月19日08时为例(图1a)。华北上空有一条SW—NE走向的高空急流($115^\circ\text{E}, 40^\circ\text{N}$)，中心风速 $60\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。与此急流相伴随的涡度和涡度平流分布有以下

几个特点：(a) 急流轴两侧有一对带状强正、负涡度区($+8.2 \times 10^{-5}\text{s}^{-1}, -7.8 \times 10^{-5}\text{s}^{-1}$)，且最大正、负涡度带的走向与急流轴平行；(b) 强正涡度平流区位于正负涡度之间的强涡度梯度区，辐散区和正涡度平流区重合，两个辐散中心($+7.2 \times 10^{-5}\text{s}^{-1}, +6.2 \times 10^{-5}\text{s}^{-1}$)分别位于急流轴中心的左前方和右后方。

(2) 纬向急流

以1989年8月15日20时为例(图1b)。有一条中心风速为 $60\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ($110^\circ\text{E}, 42^\circ\text{N}$)的近于W—E向高空急流。急流中心两侧各有一个主要由切变涡度构成的正、负涡度中心，但正涡度平流区分布于急流轴左侧正涡度中心的下游到右侧负涡度中心的上游。与正涡度平流区相对应的辐散中心有两个：其一位于急流轴附近的风向辐散区($+3.5 \times 10^{-5}\text{s}^{-1}$)，其二位于急流南侧负涡度中心的上游($+2.8 \times 10^{-5}\text{s}^{-1}$)。

(3) 经向南风急流

以1989年7月30时20时为例。由图1c可见，在武汉至黄河下游为中心风速仅为 $38\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ($113^\circ\text{E}, 25^\circ\text{N}$)的南风急流。右侧系强盛的经向型副高，左侧为深厚的冷涡。相应地涡度场表现为急流两侧的一对正、负涡度中心。在急流中心左前方的正涡度区下游有一片正涡度平流和辐散区，且两者的中心位置几乎重合。

(4) 经向偏北风急流

以1989年7月21日08时为例。图1d中 $110^\circ\text{E}-122^\circ\text{E}, 50^\circ\text{N}-30^\circ\text{N}$ 在青藏高压东北缘有一条NW—SE走向的偏北风急流(中心 $45\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)。急流轴左侧有由切变构成的正涡度($+9.8 \times 10^{-5}\text{s}^{-1}$)和右侧由曲率和切变构成的负涡度($-9.6 \times 10^{-5}\text{s}^{-1}, -9.8 \times 10^{-5}\text{s}^{-1}$)。正涡度平流位于负涡度中心的上游。辐散区和正涡度平流几乎重合。

2. 无高空急流

在200hPa风速没有达到高空急流的标

准时，由于流线存在较大的曲率，200 hPa流场中仍可以存在较强的涡度中心。例如1989年8月4日20时和1988年8月4日20时，由于反气旋曲率很大，200hPa负涡度中心都达到 $-7.5 \times 10^{-5} s^{-1}$ ，在负涡度中心的上

游强的正涡度平流都达到 $10^{-9} s^{-2}$ 的量级，从而仍可造成相当强的高空辐散。这两个例子除了风速较小外，200hPa风场和涡度、涡度平流及散度分布的配置和图1b和c相似，这里不再给出。

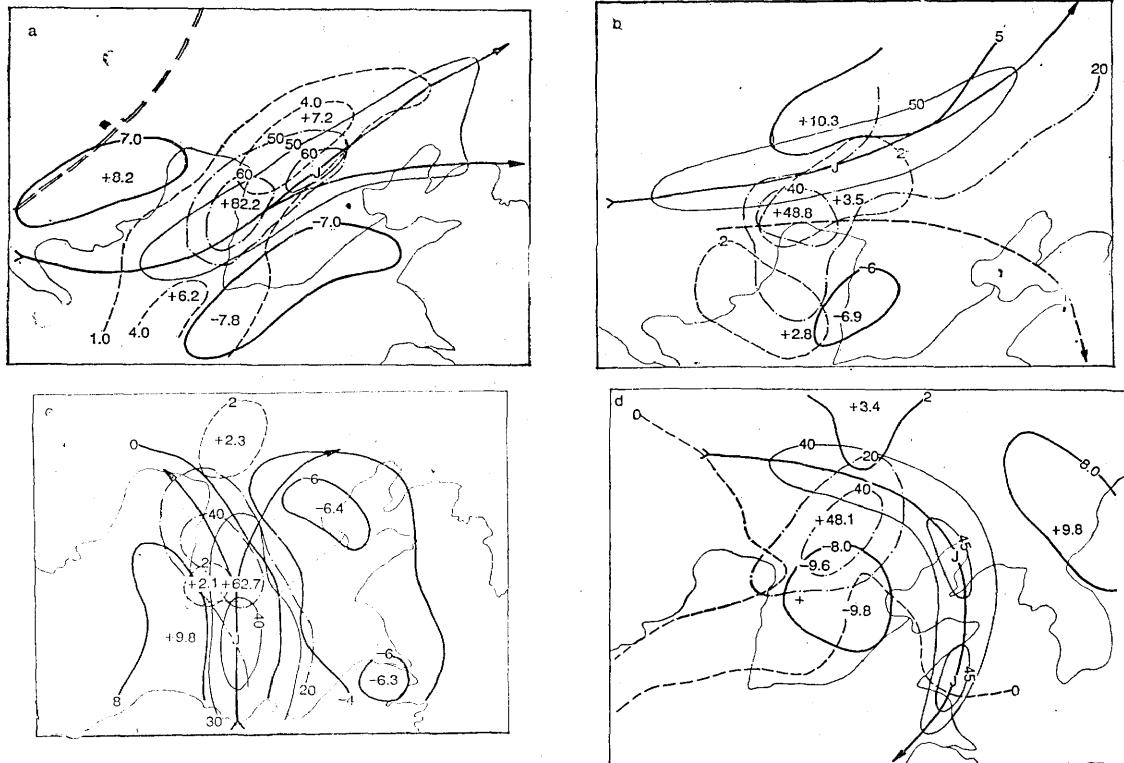


图 1 200hPa SW—NE向急流(a.1989年8月19日), 纬向急流(b.1989年8月15日), 南风急流(c.1989年7月30日)和北风急流(d.1989年7月21日)的物理量配置

粗实线: 涡度($10^{-5} \cdot s^{-1}$); 点划线: 涡度平流($10^{-10} \cdot s^{-2}$); 断线: 散度($10^{-5} \cdot s^{-1}$); 细实线: 风速($m \cdot s^{-1}$)

综上可见，200hPa风场代表性较好，风场、涡度、涡度平流及散度的配置大多比较合理。同时，高空风场形势虽可有不同类型式，但造成高层辐散的动力学机制都是涡度平流。较强的正涡度平流可以位于正、负涡度区之间的强涡度梯度区，也可位于正涡度中心的下游及负涡度中心的上游。而正、负涡度的分布可用曲率涡度和切变涡度来判断。

四、具有强暖平流的850hPa风场和温度场

根据850hPa上等温线的疏密、风向和

等温线的夹角及风速的大小，可以判断暖平流区的位置和强度。通过分析、对比发现，具有显著暖平流的风场和温度场可有如下不同组合形式。

1. 与暖式切变线相伴随的暖平流中心

根据风场和温度场的配置，形成强暖平流中心有以下两种情形：

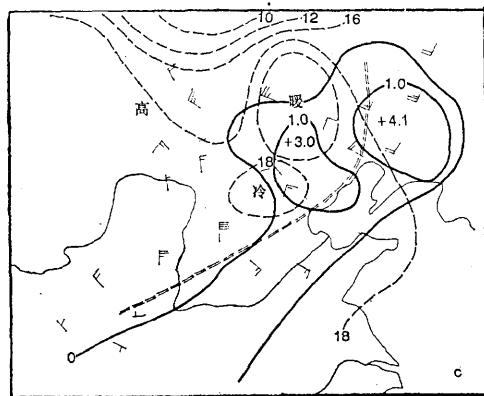
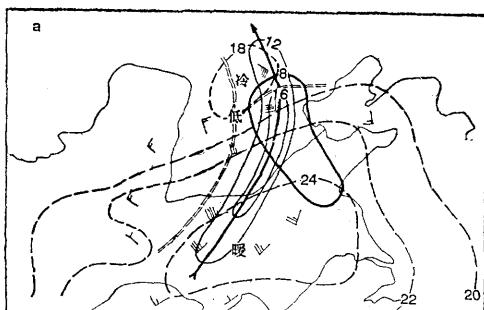
①有低空急流和锋区：以1989年7月17日08时为例。由图2a可见，暖切变线北部有弱冷空气堆，南部有暖中心，使得切变线南侧的等温线比较密集。由于切变线南侧有低空急流存在，并且急流与等温线正交，因

此，在暖切变线附近存在很强的暖平流 ($+10.6 \times 10^{-5} \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$ ，该值是本文所有个例中最强的)。

②有强温度梯度，但无急流：以1989年8月19日08时为例。此例中切变线南侧的暖区中南风较弱，只有 $2-6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ，但因暖切变线北侧NE气流中有冷空气南下，使得在暖切变线附近温度梯度相当大，近 $2.8 \text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{km}$ ，切变线上的暖平流强度仍可达 $4.4 \times 10^{-5} \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$ (图略)。

2. 与冷切变线相伴随的暖平流中心

①南侧：以1988年8月14日08时为例，由图2b可见，切变线南侧的低空偏南风速虽然只有 $8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ，但等温线和流线几乎正交且温度梯度很大，达 $2.4 \text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{km}$ ，形成强暖平流($+7.7 \times 10^{-5} \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$)。值得特别指出的是：在切变线北部有强冷平流($-4.1 \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$)。



$\times 10^{-5} \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$ ），使得 $\nabla^2 A_T$ 大。根据准地转 ω 方程，这对形成强上升运动非常有利。此例表明强温度梯度的形成和切变线北侧NE气流带来的冷空气有关。

②北侧：虽然冷切变线北侧的偏北气流中常常是冷平流区，但在某种温压场的配置下，北风中也可有暖平流。以1989年8月15日20时为例。由图2c可见，蒙古高原暖脊东伸，使得槽后雨区北部为暖中心，切变线北侧的东北气流造成冷切变线后部的暖平流。

3. 台风倒槽

以1989年8月14日20时为例。由图2d可见，有一冷舌与台风倒槽相配合，而其东侧为暖性的副高，形成了东西向 ∇T 。台风倒槽东侧南北走向的等温线分布与倒槽东侧的偏东气流几乎正交，因此，在台风倒槽东侧形成了与台风倒槽走向一致的南北向暖平流带。

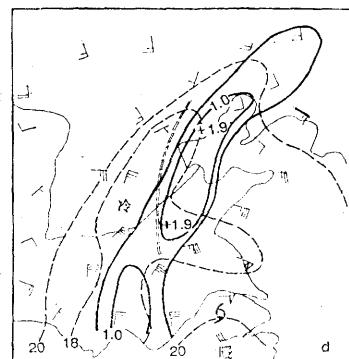
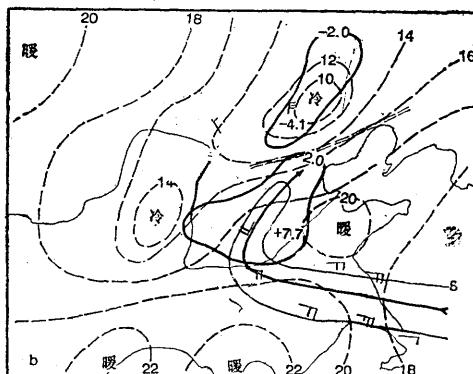


图 2 暖切变和低空急流(a.1989年7月17日), 冷切变南侧(b.1988年8月14日), 冷切变北侧(c.1989年8月15日)和台风倒槽(d.1989年8月4日)的850hPa暖平流(粗实线, $10^{-5} \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$)。温度(断线, $^{\circ}\text{C}$)和风速(细实线, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)。双虚线为切变线

4. 东风波

以1989年7月30日20时为例。由于东风波的西侧有一较强的冷中心存在，在东风波的东侧形成了东西向的温度梯度，而且主流线和等温线近于垂直。因此虽然东风的强度只有 $8-10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ，但在东风波的槽后，暖平流的强度达到 $+7.9 \times 10^{-5} \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$ 。该例除了风速较小， ∇T 较上一例大外，850hPa风场、温度场及暖平流分布的配置和图2d相似，这里不再给出。

五、具有充沛水汽辐合的低层风湿场

暴雨研究表明，暴雨前湿度场的变化极为迅速，湿度指标的出现往往距暴雨开始时间不到一天⁽¹⁾。由水汽通量散度方程：

$$\nabla \cdot (\frac{1}{g} \vec{V} q) = \frac{1}{g} q \nabla \cdot \vec{V} + \frac{1}{g} \vec{V} \cdot \nabla q$$

其第一项可根据散度在自然坐标系中的表达式：

$$\nabla \cdot \vec{V} = \frac{\partial c}{\partial s} + c \frac{\partial \theta}{\partial n}$$

即为纵向、横向散度之和。通过风速和风向的分布分别判断纵向散度 $c \frac{\partial \theta}{\partial n}$ 和横向

散度 $c \frac{\partial \theta}{\partial n}$ 。此项除了使水汽集中外，还和上升运动及水汽的垂直输送相联系。由于等压面上的比湿 q 是露点 T_d 的函数，故上式右端第二项可以从等露点线和风场的配置作出判断。具有强水汽辐合的低层流场和湿度场有以下三种类型。

1. “人”字形切变流场

以1989年7月16日20时为例。由图3a可见，暖切变线南侧伴有低空急流和高温高湿中心。在等露点线密集带附近，有低空急流左前方由风速辐合 $(\frac{\partial c}{\partial s})$ 构成的水汽辐合区 $(-3.4 \times 10^{-7} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1})$ ，及低涡东侧附近由风向辐合 $(c \frac{\partial \theta}{\partial n})$ 构成的横向

水汽辐合区 $(-3.3 \times 10^{-7} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1})$ 。

2. 冷切变

以1989年8月15日20时为例。由图3b可见，冷切变线两侧风向切变较大，故有横向散度对水汽辐合的贡献。辐合中心 $(-4.2 \times 10^{-7} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1})$ 位于冷切变线南侧暖区里湿舌边缘上等露点线密集带附近，其走向与冷切变线一致。

3. 台风倒槽

以1989年8月4日08时为例。由图3c可见，台风倒槽顶端西北部较干燥，东部有湿中心，其间等露点线很密集，且风向和 ∇T_d 几乎重合，故在倒槽顶端风速纵向辐合 $(\frac{\partial c}{\partial s})$ 处的等露点线密集带附近造成水汽辐合 $(-1.6 \times 10^{-7} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1})$ 。

六、小结

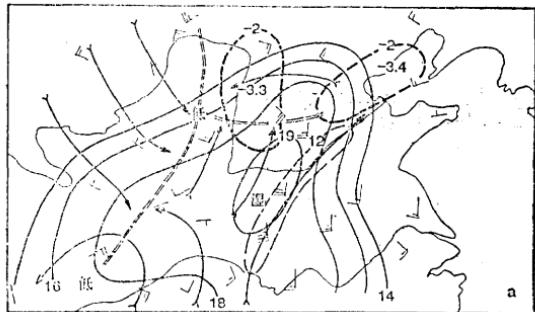
综上所述，可见：

1. 由高、低空环流形势特点结合物理量诊断分析可揭示出与暴雨密切相关的三个基本物理条件——高空辐散、低层暖平流和水汽通量辐合。

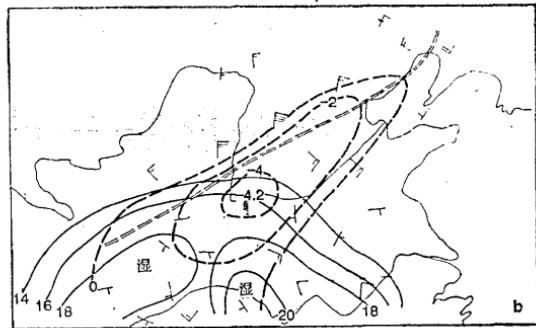
2. 造成高空强辐散的动力学原因是正涡度平流。它可以位于正、负涡度区之间的强涡度梯度区，也可位于强正涡度区的下游或强负涡度区的上游。从高空风场的风速切变和流线曲率可以定性判断涡度的分布。

3. 强暖平流和暖切变线、冷切变线、台风倒槽和东风波等天气系统相联系。暖平流中心位于主流线和等温线正交的地区，它可以位于南暖北冷的南风气流中，也可位于南冷北暖的北风气流及东暖西冷的东风气流中。

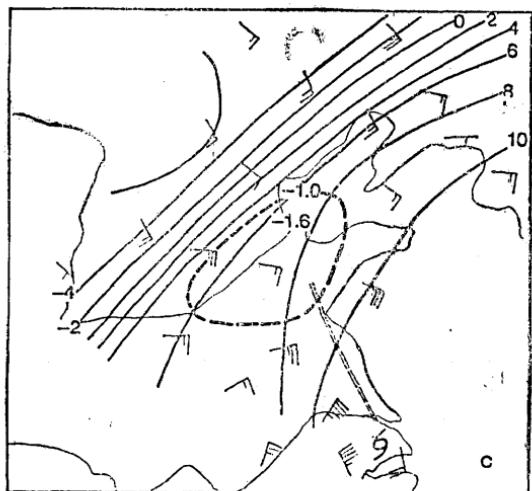
4. 强水汽辐合可从风的纵向、横向散度及风场和比湿梯度或风场和比湿梯度间夹角大小来定性判断。辐合系统与不同流场——“人字形”切变、冷切变、暖切变、低



a



b



c

图 3 1989年7月16日850hPa“人字形”切变线(a), 1989年8月15日850hPa冷切变线(b)和1989年8月4日700hPa台风倒槽的水汽辐合(断线, $10^{-7} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$). 露点(细实线)和风场(c)

空急流、台风倒槽等相联系。强水汽辐合区位于风向或风速的辐合区及等露点线密集并和风向近于正交的区域。

致谢：本文是在北京大学陶祖钰老师的具体指导下完成的，谨致以诚挚的谢意。

参 考 文 献

- (1) 中国科学院大气物理所暴雨组, 《中国之暴雨》, 科学出版社, 1980年。