

高空和低空急流与暴雨关系的实例分析

肖文俊 陈秋士

(北京大学地球物理系)

提 要

本文分析了暴雨和低空急流发展过程的一次天气个例。当高空急流中心自西向东移到我国东部沿海,在最大风速中心上游的入口区南面,对应副高北侧的高温潮湿的空气,当扰动的相当水平尺度小于适应过程的特征尺度时,在高空急流入口区南面550公里处的700毫巴等压面图上,引起了低空急流的迅速加强。强的降水区和流场的水平切变线,出现在两支急流之间的地区。这一个例分析的天气事实,可从平流过程和调整过程的相互作用,以及调整过程中重力惯性波的不稳定性来说明。

一、引 言

暴雨的发生与高空和低空急流以及切变线有着密切的关系,揭示它们之间的内部联系对提高暴雨预报的准确率有着十分重要的意义。在梅雨时期,最常见到的低空急流,往往出现在700毫巴副热带高压西北侧的西南气流中。低空急流的北侧常有辐合上升区,并常伴有明显的流场水平切变(可以是切变线或低涡)。而低空急流南侧为副高内部,通常是辐散下沉的晴好天气区。我们发现这种形势的出现,和高空副热带急流有着非常密切的联系。陈秋士(1982)^[1]曾经从重力惯性波的不稳定讨论了高低空急流的耦合过程,指出当高空急流南侧水汽供给充分,并满足条件不稳定大气时,在高空急流入口区南侧(或急流的右侧后方),由于平流过程所产生的非地转风,在适应过程中引起低空急流的发展。强烈的上升运动则发生在高低空两支急流之间的地区。本文则从天气事实分析来说明高低空急流之间的联系。

应该指出,低空急流和暴雨的关系,无论在时间上和空间上都有着各种不同的情况。有时低空急流形成在暴雨出现之前,有时它是随着暴雨过程的发展而形成和发展的。在本文中,我们只讨论后一种情况,即低空急流的发展和加强是和暴雨过程的发展同时出现的。我们通过个例来说明这一特殊情况的内联系,将有助于了解暴雨和低空急流联系的更一般的规律。

二、一次天气个例分析

下面我们将讨论1969年7月10日20时—7月11日20时的一次天气过程的实例。

1982年4月26日收到,7月7日收到修改稿。

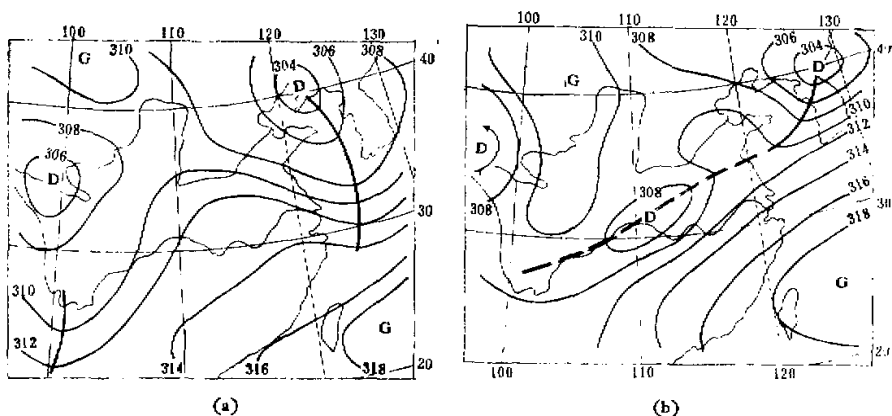


图1 700 毫巴等压面图 (a) 1969 年 7 月 10 日 20 时 (b) 1969 年 7 月 11 日 20 时

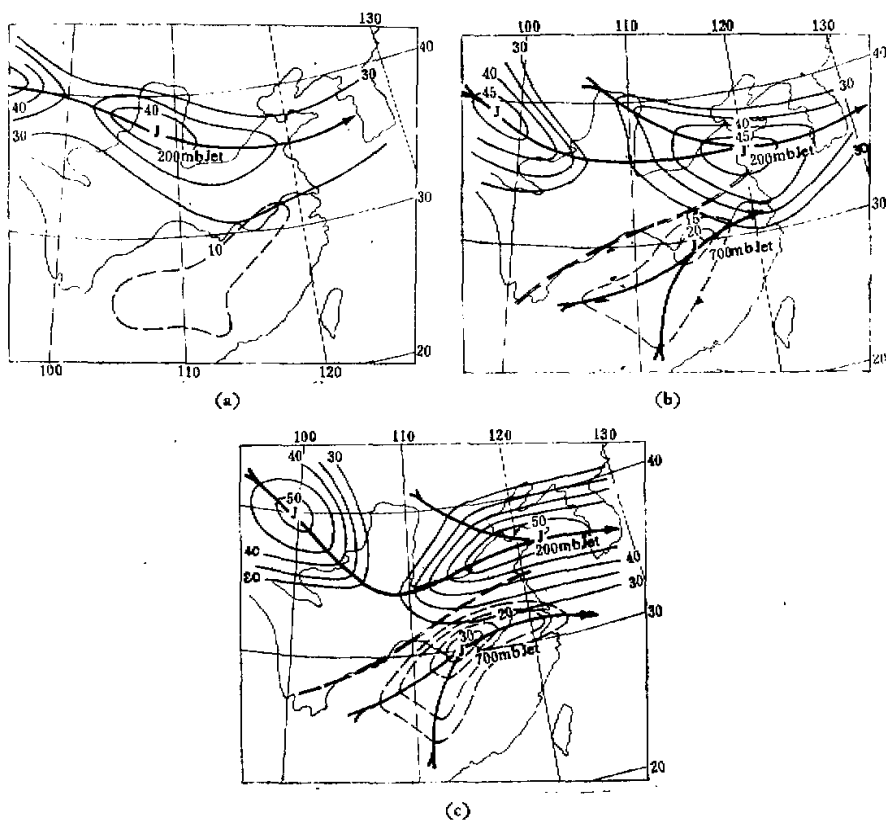


图2 200 毫巴和 700 毫巴急流分布图

实线为 200 毫巴等风速线, 虚线为 700 毫巴等风速线, 双虚线为 700 毫巴切变线。

(a) 1969 年 7 月 10 日 20 时 (b) 1969 年 7 月 11 日 08 时 (c) 1969 年 7 月 11 日 20 时

图 1(a) 为 7 月 10 日 20 时 700 毫巴等压面图。这时, 长江中上游为高压脊所控制, 天气晴好。图 2(a) 中虚线表示该时刻 700 毫巴上等风速线, 从此图可以看出, 在副高脊西北侧, 风速分布比较均匀, 如果把 15 米/秒以上的风速区看成是急流的话, 这时不存在低空急流。24 小时以后图 1(b), 形势有了很大的变化。这时在副高西北侧, 淮河和长江中上游地区, 发展了一条东北-西南走向水平流场的切变辐合区, 并在其上有低涡发展。图 2(b) 和 2(c) 中的虚线分别表示 7 月 11 日 08 时和 20 时 700 毫巴上流场的等风速线。从它们可以看出, 在这时期 700 毫巴上低空急流是逐渐加强的, 它们中心风速分别超过 20 米/秒和 30 米/秒。而水平风速的切变辐合带出现在低空急流的北侧, 并和低空急流的走向近于平行。

为了说明低空急流和切变辐合带的加强和发展是和高空急流的影响有着紧密的联系, 我们同时给出了 200 毫巴等压面上副热带急流变化的特点。图 2(a)~(c) 的实线表示 200 毫巴等压面上流场的等风速线。在 7 月 10 日 20 时的图 2(a) 上, 有一高空副热带急流的中心出现在我国西北陕西省的上空。7 月 11 日 08 时的 200 毫巴上副热带急流的中心移到我国东部沿海地区, 如图 2(b) 所示。这时 700 毫巴上低空急流的加强, 出现在高空急流入口区南侧, 和高空急流轴相距大约 5—6 个纬度。7 月 11 日 20 时图 2(c), 低空急流在高空急流入口区南侧进一步加强, 最大风速中心超过 30 米/秒。并且高空急流轴和低空急流轴近于平行, 它们相距约 5 个纬距(约 550 公里)。而流场的切变辐合线则位于两支急流的中间。随着高空急流中心的东移, 和伴随着高空急流入口区南侧低空急流和切变辐合带发展。在江淮流域和长江中上游地区, 同时出现了大范围的强降水区。图 3 是 7 月 11 日 08 时—7 月 12 日 08 时 24 小时内的降水量分布图。从它可以看出, 在相当大范围的地区, 出现了降水量在 100 毫米 24 小时以上的强降水区。最大的强降水区出现在高空急流和低空急流之间的切变轴合线地区。最大降水区呈东北-西南走向, 并和高空和低空急流轴以及切变辐合线相平行。

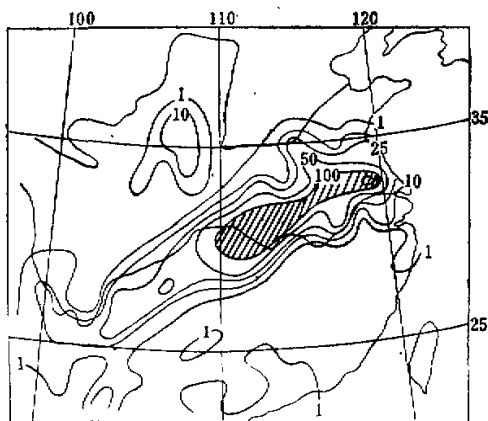


图 3 7 月 11 日 08 时—12 日 08 时 24 小时降水量分布图

三、低空急流与暴雨和重力惯性波的不稳定性

陈秋士(1982)^[1]曾经从平流过程和调整过程相互作用的观点讨论了急流的动力学特性。说明如果在初始时刻,满足地转风平衡,任何急流在平流变化的影响之下,由于流场平流造成风的垂直切变 $\left(-\frac{\partial u}{\partial p}\right)$ 的变化,和温度平流引起的地转风随高度改变

$$\left(-\frac{\partial u_x}{\partial p} - \frac{1}{f} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial \phi}{\partial p}\right) = -\frac{R}{fp} \frac{\partial T}{\partial x}\right)$$

的变化,两者总是不相一致的(这里 u 表示沿急流方向的风速,并把急流轴的走向,近似地取为 x 轴)。在急流入口区的下面,平流变化将造成 $-\frac{\partial u}{\partial p} < -\frac{\partial u_x}{\partial p}$ 的非热成风,而在

出口区的下面,则造成相反的 $-\frac{\partial u}{\partial p} > -\frac{\partial u_x}{\partial p}$ 的非热成风。实际形势变化是平流变化和调整变化之和。在急流入口区的下面,它是通过南部上升,北部下沉的热力直接环流向地转风调整的。在绝热情况下,一方面可通过下沉增温和上升降冷来减弱南北温差从而减小 $-\frac{\partial u_x}{\partial p}$; 另一方面通过上层偏南风,下层偏北风,由地转偏向力增强流场的垂直切变

$-\frac{\partial u}{\partial p}$ 。两者的共同作用将 $-\frac{\partial u}{\partial p} < -\frac{\partial u_x}{\partial p}$ 的不平衡趋于减小,从而向热成风平衡调

整。但对于水汽供给充分近于饱和的条件不稳定大气,即 $r > r_m$ 的大气(r_m 为饱和湿绝热递减率)这时上升运动由于凝结潜热的释放可以不仅不造成降冷,而且还可造成增温。这样就改变了在绝热情况下垂直环流使不平衡趋于减少的特性。根据文献[1]中对重力惯性波不稳定的理论分析:当扰动的相当水平尺度 $R < L_0$ 时(L_0 为适应过程的特征尺度),重力惯性波是不稳定的。这种不稳定性是由热成风不平衡和垂直环流之间的正反馈造成的。一方面由非热成风加速垂直环流,另一方面由于上升凝结增温使垂直环流反过来又增强非热成风,这两者之间的相互作用可造成垂直环流、非热成风和水平环流的迅速发展。这一过程的能源是水汽凝结潜热的释放。

这里相当水平尺度为:

$$R = \sqrt{\frac{L_y^2}{L_x^2} + \frac{L_y^2}{16\pi^2}} \quad (1)$$

L_y 为急流分布在垂直于急流轴方向的波长, L_x 为以均质大气高度为单位的垂直波长,当急流的高度为 200 毫巴时,这时 $\frac{1}{2} L_x = 1.61$ 。

从图 2(a)~(c) 的天气实例可以看出,当高空急流的最大中心移到如图 2(b) 所示的沿海地区时,由于高空急流入口区南侧,水汽供给充分并近于饱和,和条件不稳定大气,可能出现重力惯性波不稳定。根据文献[1]的理论分析,当不稳定发生时,可引起如图 4 所示垂直环流的迅速发展,并在高空急流以南半个水平波长 $\left(\frac{1}{2} L_y\right)$ 地方的对流层下层,引起低空急流的形成和加强。同时高空急流本身也加强并在这两支急流之间形成一条切变辐合带。最大的上升运动和降水将发生在两支急流之间的水平流场切变辐合区地方。

由图 2 (a)–(c) 表示的天气形势的变化, 和由图 4 所示的理论结果是很相似的。从图 2 所示, 两支急流相距约为 5 个纬度, 即 $\frac{1}{2} L_y \approx 550$ 公里。根据 200 毫巴急流的 $\frac{1}{2} L_x = 1.61$, 由 (1) 式得 $R = 352.7$ 公里。

L_0 与纬度以及 $\gamma - \gamma_m$ 的依赖关系如表 1 所示, 在 30° 纬度附近, 当 $\gamma - \gamma_m = 0.03^\circ\text{C}/100$ 米时, $L_0 = 365.8$ 公里。因此, 对于 $\frac{1}{2} L_y = 550$ 公里, 也即 $R = 352.7$ 公里的扰动, $R < L_0$ 成立。

应该指出, 重力惯性波不稳定的产生和饱和湿空气凝结上升造成局地增温有很大的关系。但这种凝结增温是有限度的, 因在假湿绝热过程中, 空气中相当位温是守恒的, 在

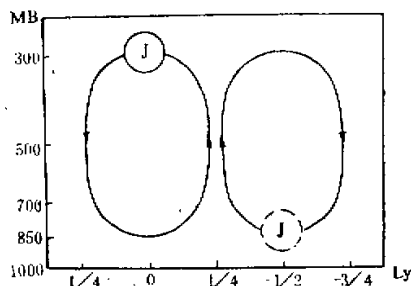


图 4 不稳定重力惯性波引起的垂直环流示意图

表 1 适应过程特征尺度 L_0 与纬度和 $\gamma - \gamma_m$ 的关系

L_0 (公里) \ 纬度	15°	20°	25°	30°	35°	40°	c_m 米/秒
$\gamma - \gamma_m$							
0.01°C/100 米	407.8	306.7	249.8	211.1	184.1	164.2	15.39
0.03°C/100 米	706.8	534.8	432.8	365.8	318.9	284.0	26.67
0.05°C/100 米	912.4	690.4	558.7	472.2	411.6	367.2	34.43

凝结上升区中的相当位温不可能超过起始存在于空气中的最大值(一般在近地面层)。另一方面在凝结上升区中 γ 本身也要向 γ_m 转变。因此, 重力惯性波的不稳定只可能在一个有限时段内发生, 而后就会转变为稳定的。然而, 根据理论计算, 即使一个有限时段(例如 24 小时)的不稳定也会给流场系统和暴雨发生带来重大的影响。

在高空急流入口区平流变化造成的

$$-\frac{\partial u}{\partial p} < -\frac{\partial u_E}{\partial p}$$

由高空温度场平流锋生所产生。实际分析表明这个例子中是伴随着高空锋生过程的, 因而它将加强单纯由于急流入口区的平流过程造成的不平衡。

前面的结果是从一个个例分析来讨论的, 为了说明更一般的情况, 我们选取

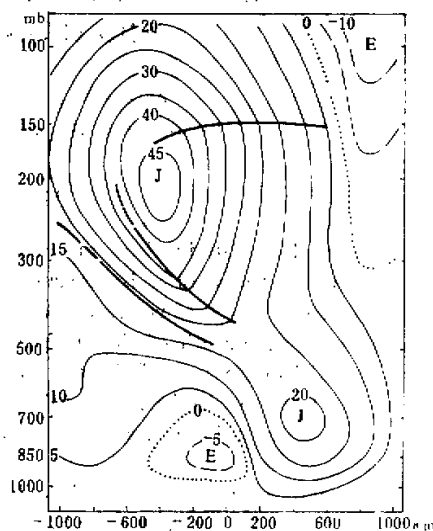


图 5 垂直于切变线综合平均剖面图(单位: 米/秒)

了1968—1971年八个具有切变线降水的个例,以700毫巴切变线的位置作为横坐标的中心,制作了垂直于切变线综合平均剖面图,如图5。从图5可以看出,尽管我们所选取的八个例子,它的地理位置不一样,有的出现在江淮流域,有的出现华南地区,此外降水强度也不一样,但在综合平均图上仍然具有很清楚的高空急流和低空急流的中心。高空急流中心位于200毫巴高度,强度为48米/秒,低空急流在700毫巴高度,中心强度约20米/秒。切变线则位于两支急流之间的地区。图5表明,高低空急流和切变线之间的联系不是偶然的,它们之间存在着密不可分的联系。黄安丽和高坤^[2](1982)根据6年的164次低空急流的资料统计,发现,当低空急流出现,同时伴有高空急流出现的约占85%。低空急流出现在高空急流的右后方(入口区南侧)约占其中的76%。从统计事实,可以看出,上述高低空急流的联系是梅雨期暴雨过程中比较普遍和重要的。

在图5上,两支急流之间的距离为800公里,对应的水平尺度为513公里,比图2所示的水平尺度要大些,这可能和包含有纬度较低以及和重力惯性波处稳定的情况有关。

参 考 文 献

- [1] Chen Qiushi (陈秋士), The instability of the gravity-inertia wave and its relation to low-level jet and heavy rainfall, *Jour. of Met. Soc. of Japan*, 60, 1041—1057, 1982.
 [2] 黄安丽、高坤, 对流层高、低空急流耦合作用的动力学分析, *杭州大学学报*, 9, 3, 356—364, 1982.

SYNOPTIC ANALYSIS OF THE RELATIONSHIP OF COUPLING BETWEEN UPPER AND LOW-LEVEL JETS AND HEAVY RAINS

Xiao Wenjun Chen Qiushi

(Department of Geophysics, Beijing University)

Abstract

A synoptical case study about the relationship between coupling of the upper and low-level jets and heavy rains is discussed in this paper. When the maximum of wind speed in upper level jet moves eastward to the east coast of China, it is found that a LLJ appears in the south of the entrance region on 700 mb level. The axis of LLJ is nearly parallel to the upper jet's axis. Heavy rains and a horizontal shear line occur in the region between two jets. The relationship between coupling of upper and low-level jets and heavy rains can also be clearly shown in a composite cross-section of wind fields.

The observed results can be explained by the unstable gravity-inertia wave in the adjustment process when we use the splitting analysis method between the advection and adjustment processes.