

“倾斜”高空急流轴在大暴雨过程中的作用

徐海明, 何金海, 周 兵

(南京气象学院大气科学系, 南京 210044)

摘要: 从理论分析和实例计算两方面探讨了高空急流轴的倾斜对急流出口处右侧辐散场形成的作用。理论分析和实例计算都表明, 一旦高空急流轴发生倾斜, 则由于其出口处水平风场的分布不均匀势必会在“倾斜”急流轴出口处的右侧出现较强的辐散场。实例计算也表明, 高空急流轴倾斜以及急流出口处右侧强辐散场的出现明显早于大暴雨的产生, 因此, 高空急流轴走向的变化对于预报暴雨的发生发展具有很好的指示意义。

关键词: 倾斜高空急流轴; 出口处右侧辐散; 大暴雨

中图分类号: P442⁺.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-2022(2001)02-0155-07

暴雨是一种深对流系统, 与高、低空的环流形势有着密切的联系。因此, 研究高低空环流的相互作用是暴雨研究的一个重要的内容。早在 70 年代, 人们就已注意到低空急流与暴雨有很好的相关性以及在暴雨过程中的作用^[1], 同时, 人们也开始注意到对流层高层环流场在暴雨发生发展中作用^[2]。Uccellini 等^[3]在研究北美强对流风暴时发现, 由于水平风速分布的不均匀可在高空急流轴出口处出现向南的地转偏差气流, 该气流在急流轴出口处的左侧产生辐散上升运动, 而在急流轴出口处的右侧产生辐合下沉运动, 并通过高低层环流之间的质量和动量的调整, 在高空急流轴出口处形成一个垂直于急流轴的横向反环流, 从而导致高空急流出口区低层西南急流的形成。

在我国夏季的大暴雨过程中, 高低层环流之间是否也存在以上相类似的关系呢? 陶祖钰等^[4]通过对 1991 年 7 月上旬发生在长江中游的一次大暴雨过程的分析研究, 发现该次大暴雨区发生在高空急流轴出口处右侧气流辐散区的下方, 即与大暴雨过程相联系的高空急流轴, 在其出口处的右侧存在强辐散上升运动, 这种情况与 Uccellini^[3]所揭示的高空急流轴出口处右侧存在辐合下沉运动刚好相反。最近, 徐海明等^[1]对 1983~1991 年发生在长江中游的 8 次大暴雨过程的合成分析也清楚表明, 在大暴雨发生前, 高空急流轴出口处右侧存在强辐散并配合有较强烈的上升运动出现, 大暴雨将发生在高空急流轴出口处右侧强辐散区的下方。本文试图从理论和实例两方面来探讨高空急流轴的走向与急流轴出口处右侧辐散场形成的关系以及在大暴雨发生发展过程中的作用。

收稿日期: 2000-09-04; 修订日期: 2000-12-28

基金项目: “我国重大天气灾害的形成机理和预测理论研究”项目 G1998040908 资助

作者简介: 徐海明, 男, 1964 年 12 月生, 博士, 副教授

1) 徐海明, 何金海, 周 兵. 长江中游大暴雨过程中天气系统的共同特征. 应用气象学报, 2001, 即将发表

1 “倾斜”急流轴对出口处右侧辐散场形成的作用——实例计算

图 1 给出了 1981 ~ 1991 年发生在长江中游的 8 次大暴雨过程以大暴雨发生之时为 0 时合成以后得到的前期 48 ~ 12 h 200 hPa 高度场、急流轴和辐散场的演变特征(引自文献 1))。

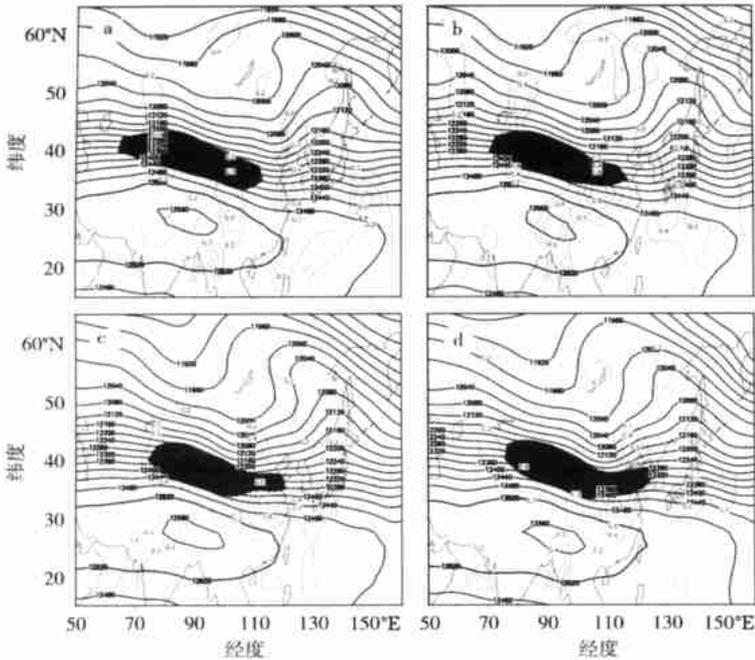


图 1 长江中游大暴雨发生前 200 hPa 高度场、急流轴和散度场的分布特征
实线为等高线,单位: gpm; 虚线标出了散度大于 0 的区域,单位: 10^{-5}s^{-1} ;
阴影区为风速大于 $35 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的急流轴

a. - 48 h; b. - 36 h; c. - 24 h; d. - 12 h

Fig. 1 Distribution of 200 hPa height, jet's axis and divergence field prior to the occurrence of the rainstorm over the mid Yangtze valleys
(Solid line is height, units: gpm;

the sectors of divergence > 0 are enclosed by dotted line, units: 10^{-5}s^{-1} ;
shaded areas denote wind speed $> 35 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)

a. - 48 h; b. - 36 h; c. - 24 h; d. - 12 h

由图可见,大暴雨发生前(-48 ~ -12 h),在中高纬的日本海至东西伯利亚地区为一稳定的高压脊,而在贝加尔湖至我国的华北地区上空为一宽广的低压槽,在该槽的槽后则存在一高空急流轴,此急流轴明显呈东南-西北走向的“倾斜”状,急流中心风速达 $40 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上。在-48 h 时,倾斜急流轴的中心位于(80 E, 40 N)附近的我国新疆上空,在急流轴出口处的右侧等高线呈明显的辐散状,并伴有较强的辐散(图中虚线区)。从-48 ~ -12 h,倾斜急流轴明显自西北向东南方向移动,随高空急流轴的东移,急流轴出口处右侧的辐散场也随之东移,到-12 h 时,急流轴中心区已移至(90 E, 38 N)附近,其出口处右侧的辐散区也随之移至我国长江中游上空。为了更好地表征高空急流轴走向与辐散场之间的关系,对大暴雨发生前 6 个时次

1) 徐海明,何金海,周 兵. 长江中游大暴雨过程中天气系统的共同特征. 应用气象学报, 2001, 即将发表

的风场和高度场取平均以去除短波槽的影响(图略),发现在倾斜高空急流轴出口处的右侧仍同样存在较强辐散场。那么,急流出口处右侧的辐散场到底由什么原因造成,是否是高空急流轴的倾斜有关?下面我们将从引起大气产生辐合辐散的各个因子来探讨这个问题。

众所周知,大气中散度场是由地转偏差风的辐合辐散所造成的,而地转偏差风可写成

$$V_{ag} = \frac{1}{f}k \times \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{1}{f}k \times (V \cdot \nabla) V + \frac{1}{f}k \times \omega \frac{\partial V}{\partial p} \quad (1)$$

对上式取散度以后的得到

$$D = D_1 + D_2 + D_3 \quad (2)$$

其中 D 为总的散度, D_1 、 D_2 、 D_3 分别表示由风场的局地变化项、惯性平流项和对流项相联系的地转偏差风而形成的散度。

图 2 给出了大暴雨发生前 24 h 在 200 hPa 上与局地变化项、惯性平流项相联系的地转偏差风所形成的散度场和总的散度场的分布特征。由图可见,与局地变化项相联系的地转偏差风所引起的散度相对总的散度场而言是很小的。由图还可以清楚看到,与惯性平流项相联系的地转偏差风可在高空急流轴出口处的右侧产生较强的辐散场。比较图 2b 和图 2c,可以发现,“倾斜”高空急流轴出口处右侧的辐散场主要与惯性平流项相联系的地转偏差风辐合辐散有关,即与“倾斜”高空急流轴出口处风场的水平分布不均匀有关。

为了进一步说明与惯性平流项相联系的地转偏差风为何在急流出口处的右侧产生强辐散,计算了与惯性平流项相联系的东西向和南北向的地转偏差风。大暴雨发生前 24 h, 200 hPa 上与惯性平流项相联系的东西向地转偏差风主要出现在急流轴上(图略),在急流出口处及其南北两侧东西向地转偏差相对急流轴几乎成对称分布,表明与惯性平流项相联系的东西向地转偏差风可在急流轴的出口处及其南北两侧都可引起一定强度的高空辐散,而前面提到的急流轴出口处右侧存在的高空强辐散显然主要不是由东西向地转偏差风所造成的。图 3 给出了大暴雨发生前 24 h 在 200 hPa 上与惯性平流项相联系的南北向地转偏差风。由图可见,经向地转偏差风主要出现在急流出口处的右侧(图 3c),即在急流出口处的右侧出现一致向南的地转偏差风,该向南的地转偏差风自急流轴出口处的右侧向南渐渐增强,并在 28°N 附近达到最强。由此可见,正是由于在高空急流出口处右侧存在这样的南北向地转偏差风分布势必会导致在急流轴出口处的右侧产生了较强的高空辐散场。比较图 3b 和图 3c,不难发现,急流轴出口处右侧的经向地转偏差风主要与惯性平流项 $\frac{v}{f} \frac{\partial u}{\partial y}$ 有关。对于“倾斜”高空急流轴而言,在急流出口处的右侧,由于 $\frac{\partial u}{\partial y} > 0$, 而 $v < 0$, 则在急流出口处的右侧自然会出现向南的地转偏差风。又由于高空急流轴右侧的北风分量往南是渐渐增强的,所以,向南的地转偏差风量也同样自急流出口处的右侧靠近急流处往南渐渐增强,并在 28°N 处达到最强,从而在高空急流轴的右侧出现较强的辐散。

根据以上的诊断分析结果,可知:“倾斜”高空急流轴出口处右侧的辐散场主要与惯性平流项相联系的地转偏差风辐合辐散有关,即与“倾斜”高空急流轴出口处风场的水平分布不均匀有关。这充分表明“倾斜”高空急流轴出口处右侧出现的强辐散场与高空急流轴的西北-东南走向密切相关。

2 高空急流轴走向与出口区两侧散度场间的关系——理论分析

散度场是由地转偏差风的辐合辐散所造成的,而地转偏差风与风场的个别变化间满足

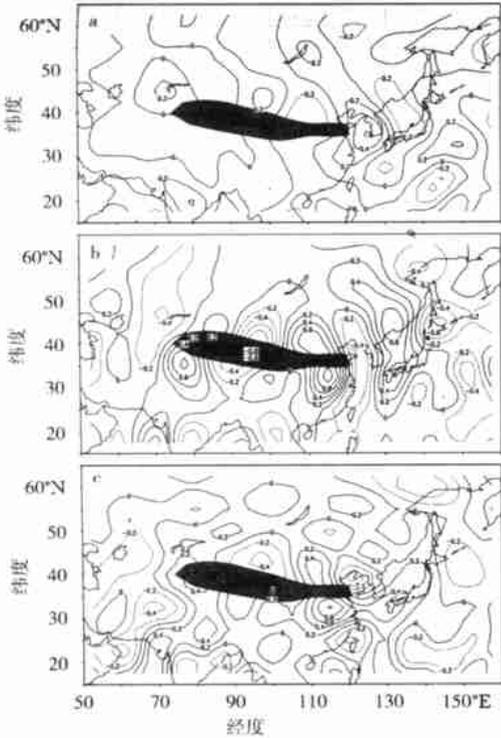


图 2 大暴雨发生前 24 h 在 200 hPa 上与局地变化项 (a) 和惯性平流项 (b) 相联系的地转偏差风所引起的散度场和总的散度场 (c) 的分布

(单位: 10^{-5}s^{-1} ;

阴影区为风速大于 $35 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的急流轴)

Fig. 2 200 hPa divergence associated with the windfield's local change term (a) and the advection term (b) and total divergence field (c) 24 hrs prior to the rainstorm

(Units: 10^{-5}s^{-1} ;

200 hPa jet axis is shaded with wind speed $> 35 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)

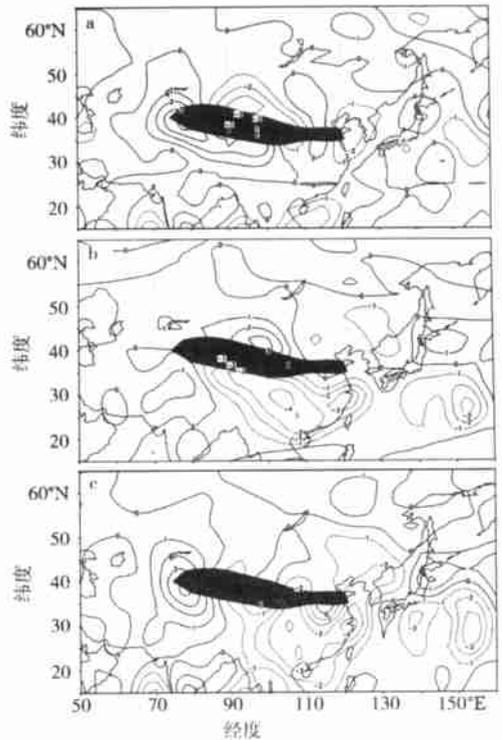


图 3 大暴雨发生前 24 h 在 200 hPa 上

分别与 $\frac{u}{f} \frac{\partial u}{\partial x}$ (a)、 $\frac{v}{f} \frac{\partial v}{\partial y}$ (b) 相联系的经向地转偏差及两项之和 (c) 的分布

(单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$;

阴影区为风速大于 $35 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的急流轴)

Fig. 3 Horizontal distribution of meridional ageostrophic wind associated with

$\frac{u}{f} \frac{\partial u}{\partial x}$ (a) and $\frac{v}{f} \frac{\partial v}{\partial y}$ (b) and their sum (c)

at 200 hPa 24 hrs ahead of

the rainstorm happening (Units: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$;

200 hPa jet axis is shaded with wind speed $> 35 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)

$$V_{ag} = \frac{1}{f} \mathbf{k} \times \frac{d\mathbf{V}}{dt} \quad (3)$$

由前一节的诊断分析可知,大暴雨发生前,高空急流轴及两侧的强辐合辐散场主要是由与惯性平流项相联系的地转偏差造成的。因此,忽略(3)式中的局地变化和垂直输送项的影响,则(3)式可改写为

$$V_{ag} = \frac{1}{f} \mathbf{k} \times (\mathbf{V} \cdot \nabla \mathbf{V}) \quad (4)$$

为了简单起见,下面我们从经向地转偏差风来讨论急流轴的走向与急流轴出口处左右两侧辐合辐散的关系,由(4)式可知经向地转偏差风满足

$$v_{\text{转}} = \frac{1}{f} u \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{f} v \frac{\partial u}{\partial y} \quad (5)$$

对于 Uccellini 等^[3]所研究的平直急流轴而言(图 4a), 在急流轴出口处的左右两侧均满足 $u \frac{\partial u}{\partial x} < 0$ 和 $v \frac{\partial u}{\partial y} < 0$, 但由于经向风速(v)很小, $v \frac{\partial u}{\partial y}$ 与 $u \frac{\partial u}{\partial x}$ 相比要小的多。因此, 对于平直的急流轴, 急流轴出口处的经向地转偏差风主要与 $u \frac{\partial u}{\partial x}$ 有关。又由于纬向风自急流轴往急流轴两侧迅速减少, $\frac{\partial u}{\partial x}$ 的绝对值在急流轴上最大, 因此, $u \frac{\partial u}{\partial x}$ 在急流轴出口处达到最大。由以上分析并结合(5)式, 可以得到, 对于东西向的平直急流轴而言, 由于水平风场的分布不均匀可在急流轴出口处及其左右两侧出现向南的地转偏差气流, 而该向南的地转偏差气流在急流轴的出口处达到最强。这样的地转偏差气流的分布势必在急流轴出口处右侧产生辐合, 并导致对流层中层产生下沉运动, 而在急流轴出口处的左侧产生辐散, 导致对流层中层产生上升运动, 从而在平直急流轴的出口处形成一个横越急流轴的垂直反环流。Uccellini^[3]用这一垂直反环流很好解释了与北美强对流风暴相联系的高低空急流的耦合关系。

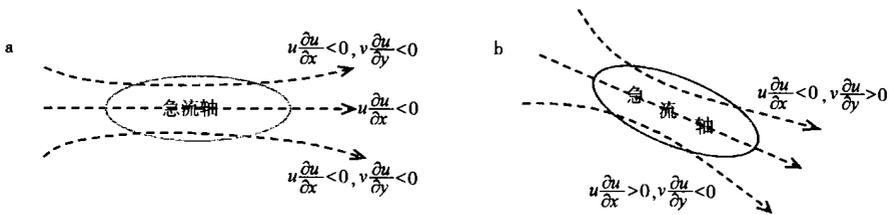


图 4 对流层高层急流轴形态及其与之相对应的惯性平流项各项符号的分布

a. 平直急流轴; b. 东南-西北走向的“倾斜”急流轴

Fig. 4 Upper-tropospheric jet axis's orientation and the distribution of associated positive and negative inertial advection terms a. W-E; b. NW-SE

当高空急流轴变成西北-东南走向的“倾斜”状时(图 4b), 急流轴出口处左右两侧的风场则相应发生了明显的改变, 沿急流轴不再吹一致的西风, 而是盛行一致的西北风。由图 4b 可见, 在急流轴的出口处的左侧, 由于 $v < 0$, $\frac{\partial u}{\partial y} < 0$, 则 $v \frac{\partial u}{\partial y} > 0$, 它与 $u \frac{\partial u}{\partial x} > 0$ 的符号刚好相反。当高空急流轴倾斜到一定程度并满足 $v \frac{\partial u}{\partial y} > u \frac{\partial u}{\partial x} > 0$ 时, 在急流轴出口处的左侧甚至会出现向北的地转偏差气流, 而不再是向南的地转偏差气流。在急流出口处的右侧, 由于急流轴的倾斜, 则会出现 $\frac{\partial u}{\partial x} > 0$, 即 $u \frac{\partial u}{\partial x} > 0$; 由于 $v < 0$ 和 $\frac{\partial u}{\partial y} > 0$, 即 $v \frac{\partial u}{\partial y} < 0$, 在急流轴出口处的右侧同样出现了 $u \frac{\partial u}{\partial x}$ 和 $v \frac{\partial u}{\partial y}$ 两项符号相反的情况。由前面大暴雨发生前 200 hPa 纬向风和经向风的分布(图略)知, 在高空急流轴出口处的右侧纬向风速(西风)往南是渐渐减小的, 而经向风(北风)则刚好相反, 其风速往南则有一个增强的过程, 因此, $u \frac{\partial u}{\partial x}$ 与 $v \frac{\partial u}{\partial y}$ 两项之和在高空急流轴出口处的右侧自北往南经历一个渐渐减少的过程, 即经向地转偏差风在急流轴出口处的右侧可能存在以下 3 种情况: 1) 在急流出口处右侧靠近急流轴处出现向北的地转偏差气流, 其值往南渐渐减小; 2) 在急流出口处右侧靠近急流轴处出现向北的地转偏差气流, 往南则出现向南的地转偏差气流; 3) 在急流出口处右侧靠近急流轴处出现向南的地转偏差气流, 其风速往南渐渐增强。以上 3 种情形, 无论哪一种情形都会在急流轴出口处的右侧产生辐散场, 即高空

急流轴一旦发生“倾斜”成为西北-东南走向时,在其出口处的右侧一定会产生相应的辐散场。另外,由(5)式可知,经向地转偏差风与科氏参数 f 成反比,而科氏参数在北半球随纬度是增加的,因此,对于以上后两种情况,科氏参数随纬度的变化更有利于高空急流轴出口处右侧强辐散场的形成。

综上所述表明:一旦高空急流轴变成东南-西北走向的“倾斜”状时,由于高空急流轴出口处水平风场的分布不均匀,势必会在出口处右侧出现辐散场。而已有的研究^[5,6]表明对流层高层的辐散是对流层低层的辐合、低空急流以及暴雨发生发展的先决条件,即高层的辐散是暴雨发生发展的促发因素。因此,高空“倾斜”急流轴出口处右侧出现的辐散场对大暴雨的发生发展应起了非常重要的作用。

3 小结和讨论

本文从理论分析和实例计算两方面来探讨了高空急流轴的倾斜对急流出口处右侧辐散场形成的作用。理论分析和实例计算都表明,一旦高空急流轴发生倾斜,则由于其出口处水平风场的分布不均匀势必会在“倾斜”急流轴出口处的右侧出现较强的辐散场,再结合前人已有的研究成果^[5,6],即低层辐合是对高层辐散的响应、高层辐散是暴雨发展的促发因素,那么高空急流轴的倾斜以及急流出口处右侧强辐散的形成势必会诱使低层低值系统、低空急流以及暴雨的发生发展。实例计算也表明,高空急流轴倾斜以及急流出口处右侧强辐散场的出现也明显早于大暴雨的产生,因此,高空急流轴走向的变化对于预报暴雨的发生发展具有很好的指示意义。至于高空急流轴为什么会产生倾斜以及急流出口处右侧的辐散场又是如何影响暴雨发生发展的,这将是我们接下来要做的研究工作。

参考文献:

- [1] 孙淑清, 翟国庆. 低空急流的不稳定性及其对暴雨的触发作用[J]. 大气科学, 1980, 4(4): 327~337
- [2] 俞樟孝, 李法然, 杨厥正, 等. 一次高空急流中心引起的梅雨锋暴雨分析[J]. 杭州大学学报, 1981, 8(1): 104~112
- [3] UCCELLINI L W, JOHNSON D R. The coupling of upper and lower tropospheric jet streaks and implications for the development of severe convective storms[J]. Mon Wea Rev, 1979, 107(6): 682~703
- [4] 陶祖钰, 黄伟. 大暴雨过程中与急流相关气块的三维运动分析[J]. 气象学报, 1994, 52(3): 359~367
- [5] 斯公望, 杜立群. 南亚高压北缘的高空气流发散与梅雨锋暴雨发展的关系[J]. 杭州大学学报, 1987, 14(2): 233~244
- [6] 俞樟孝, 翟国庆, 王泽厚, 等. 长江中下游低空急流中心产生暴雨的条件[J]. 气象学报, 1983, 41(3): 365~371

Role of the NW-SE oriented upper-tropospheric jet axis in rainstorm development

XU Hai-ming, HE Jin-hai, ZHOU Bing

(Department of Atmospheric Sciences, NIM, Nanjing 210044)

Abstract: Theoretical and numerical studies are conducted of the effect of the NW-SE oriented upper-tropospheric jet axis on divergence genesis to the right of its exit region, showing that as soon as the axis lies in such a direction, vigorous divergence will certainly be formed there owing to the inhomogeneity of the horizontal wind distribution there under the influence of the advection terms. Composite analysis and case study indicate that the NW-SE oriented jet axis and strong divergence happening are considerably earlier compared to the rainstorm occurrence. As such, the change of the orientation of upper-tropospheric jet axis is a good indicator in the prediction of rainstorm.

Key words: NW-SE oriented upper-tropospheric jet axis, divergence to the right of the exit region, rainstorm