

# 初夏青藏高原低涡发展东移的动力过程

孙国武 陈保德\*

(甘肃省气象局气象科学研究所)

## 提 要

通过对1980—1983年6月青藏高原低涡发展东移和原地生消过程的分析 and 计算, 提出高原300hPa西南风急流与低涡发展并东移相联系的事实。又指出散度方程中 $A$ (平流作用)项和 $f\zeta'$ (非地转效应)项的作用。而急流的存在直接导致 $A$ 和 $f\zeta'$ 的增大, 构成了低涡发展东移的动力因素。最后用平流变化方程和调整变化方程进一步论述了由于高原上空300hPa西南风急流的存在, 低涡沿急流轴北侧发展东移的动力过程。

## 一、前 言

青藏高原(以下简称高原)低涡是夏季高原重要的降水天气系统。原地生消的高原低涡, 主要影响高原西部、中部的降水; 发展东移的高原低涡则影响高原东部及其下游地区的降水天气。过去有关高原低涡的研究<sup>[1-5]</sup>大多数限于低涡的生消问题。而对低涡发展东移的研究较少。发展东移的高原低涡又恰恰是高原东部和高原以东地区重要的降水系统。

初夏和盛夏, 高原低涡的性质有所不同。据统计<sup>[1]</sup>, 初夏以斜压涡居多; 盛夏以暖性涡为主。这与副热带西风急流的季节变化有关。本文仅讨论初夏高原低涡发展东移的问题。预报实践经验表明, 初夏高原低涡往往沿300hPa等压面上SW—NE走向急流东移, 并且解释为高层西南气流的引导作用。文献[1]曾提出这样的事实: 当SW—NE走向的急流云系插入低涡时, 低涡往往加速东移。

本文分析高原低涡与300hPa急流的联系, 并在此基础上, 论述原地生消和发展东移的高原低涡与300hPa急流的关系的差异。

## 二、高原低涡与300hPa急流相联系的事实

首先对有关的定义说明如下:

发展东移的低涡: 生成于 $92.5^\circ\text{E}$ 以西的高原主体地区, 东移到 $92.5^\circ\text{E}$ 以东的高原东部及其以东地区, 且持续36小时以上。

原地生消的低涡: 生成于 $92.5^\circ\text{E}$ 以西的高原主体地区, 并在该地区生消, 并不移到高原东部, 且持续36小时以上。

我们对1980—1983年6月全部12次发展东移的低涡过程共41个低涡日的低涡和急流进行了统计; 另外选取原地生消的2次低涡过程共4个低涡日, 对其低涡和急流也进

本文1986年5月9日收到, 1986年8月8日收到修改稿。

\*参加工作的有兰州空军司令部气象处刘东汉、吴继成、付恒亮

行了统计。

对于发展东移的低涡过程:

(1) 低涡的移向: 12 次发展东移的低涡过程中, 有 10 次低涡过程的低涡向 E—NE 方移动, 与文献 [1] 指出的 6 月份低涡向 NE 方移动频率最大的结论是一致的, 这种移向的低涡, 主要造成西北地区东部及其下游地区的降水。

(2) 低涡与急流的相对位置: 12 次发展东移的低涡过程中, 其中 10 次低涡位于西南风急流轴北侧, 沿急流轴向 NE 偏 E 方向移动。另外 2 次低涡过程分别发生在 1981 和 1983 年 6 月底, 接近盛夏的环流特征。

(3) 低涡与最大风速中心的相对位置和平均距离: 低涡在 102.5°E 以西的高原地区时, 位于西南风急流轴上最大风速中心的左后方, 低涡与最大风速中心的平均距离约 7 个经距 (以 35°N 纬线上的经度距离为准, 下同)。低涡移到 102.5°E 以东的高原下游地区时, 位于西南风急流轴上最大风速中心的左前方, 低涡与最大风速中心的距离约 10 个经距。

下面给出根据上述 10 次低涡过程归纳的低涡与西南风急流最大风速中心的相对位置、平均距离的示意图, 见图 1。图 1a 的急流位置比较稳定, 图 1b 的急流位置东移明显。

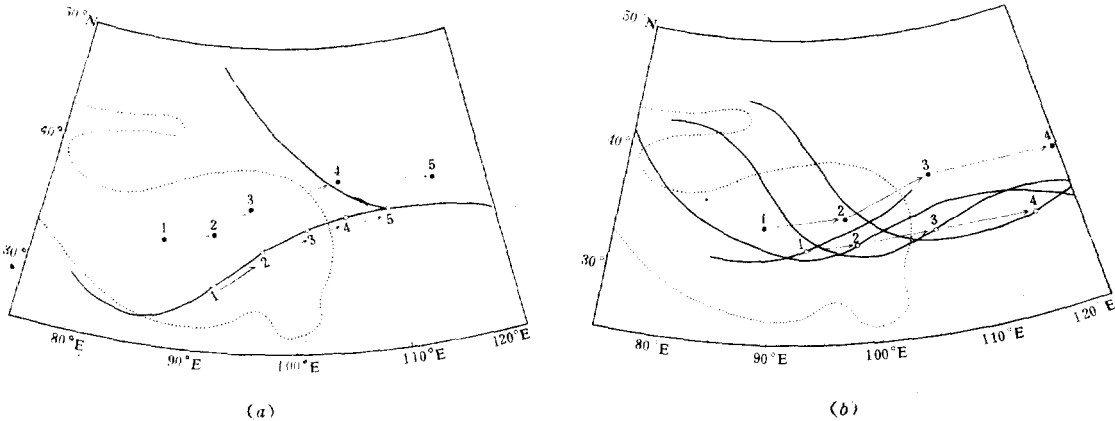


图 1 发展东移低涡与急流相对位置图

圆点: 低涡中心; 粗实线: 急流; 圆圈: 最大西南风速中心; 点线: 高原地形线; 1, 2... 分别表示第一、第二... 天。

原地生消的低涡过程和急流的关系(图略)与发展东移的低涡过程和急流的关系的主要差别是:

1. 95°E 以西的高原主体地区不存在西南风急流, 或西南风急流位于高原东南部。
2. 最大西南风速中心位置不在高原上, 且低涡距离最大风速中心较远 (>15 个经距)。

从以上 10 个低涡过程共 41 个低涡日的分析表明, 低涡与急流联系的事实是存在的, 低涡沿 300hPa 西南风急流向 NE 偏 E 方向发展东移, 在西北风急流与西南风急流的汇合处消失。下面通过两个实例来分析讨论低涡与急流相互联系的动力过程。

### 三、300hPa 急流在低涡发展东移中的动力作用

#### 1. 实例(1981年6月4日08时—8日20时)

图 2 给出该例高原低涡每隔 12 小时的移动路径。气旋环流 1984 年 6 月 4 日 08 时(北京时,下同)生成于羌塘高原,5 日 20 时以前,在 92.5°E 以西的高原主体地区活动;5 日 20 时以后,向 E 或 NE 方移动,经青海省东北部,甘肃省中部到达宁夏,8 日 20 时在河套地区消失。

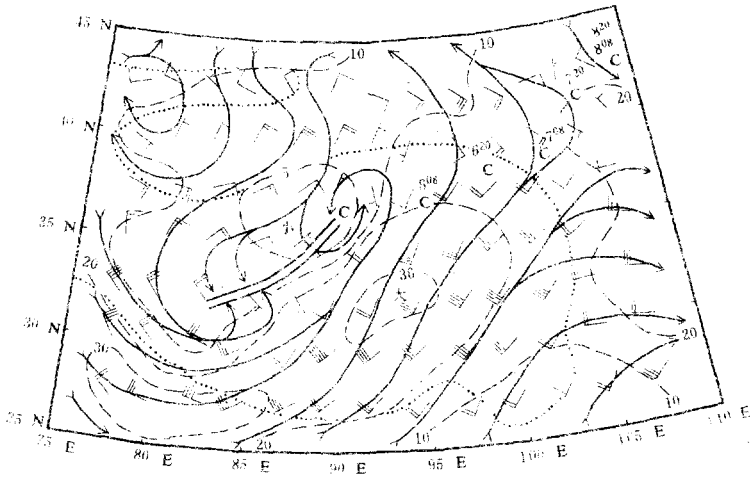


图 2 1981 年 6 月 5 日 20 时 500hPa 图

矢线:流线;虚线:300hPa 等风速线;双实线:高原切变线;C:低涡中心;点线:高原地形线。

分析可知,300hPa 西南风急流始终在低涡移动方向的右侧,与低涡移动路径基本平行。急流轴上的最大风速中心逐日向 NE 方传播。

除了上例的低涡过程(以下简称个例 1)外,为了对比,另选取 1982 年 6 月 12 日 08 时到 14 日 08 时原地生消的低涡过程(图略,以下简称个例 2)。

#### 2. 计算与分析

本文用散度方程对个例 1 和个例 2 进行计算,散度方程可以写成如下的形式:

$$\begin{aligned} \frac{\partial D}{\partial t} = & -\frac{\partial}{\partial x} \left[ u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right] - \frac{\partial}{\partial y} \left[ u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right] \\ & - \omega \frac{\partial D}{\partial p} - \left[ \frac{\partial \omega \partial u}{\partial r \partial p} + \frac{\partial \omega \partial v}{\partial y \partial p} \right] - f \zeta' - \beta u \end{aligned} \quad (1)$$

(1)式中均为常用符号,方程右端前两项用 A 表示,令:

$$A = - \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) \right] \quad (2)$$

方程右端第五项  $f \zeta' = f \zeta - \nabla^2 \phi \quad (3)$

(3)式中,  $\zeta$  为风场涡度,  $\phi$  为位势高度。

计算结果表明, (1) 式中各项的量级分别为:  $A \sim 10^{-9}$ ,  $\omega \frac{\partial D}{\partial p} \sim 10^{-11}$ ,  $\nabla \omega \cdot \frac{\partial V}{\partial p} \sim 10^{-10}$ ,  $f\zeta' \sim 10^{-9}$ ,  $\beta u \sim 10^{-11}$ 。

由此可见, 散度方程中的主要项是: 由于惯性加速不均匀造成的散度变化 ( $A$  项) 和非地转涡度引起的散度变化 ( $f\zeta'$  项), 以及垂直速度在水平方向分布不均匀与风速切变所造成的散度变化 ( $\nabla \omega \cdot \frac{\partial V}{\partial p}$  项)。

(1)  $A$  项的作用:

图 3 是个例 1, 1981 年 6 月 6 日, 8 日 300hPa 等压面上低涡所在区域的  $A$  值分布图。

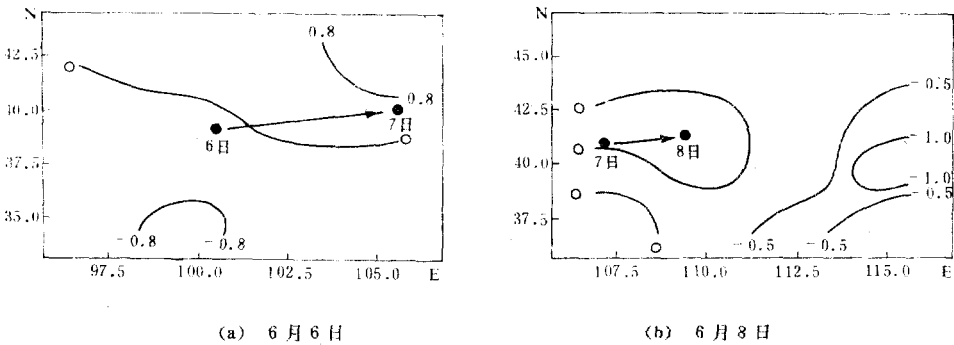


图 3 发展东移低涡过程的  $A$  值

圆点: 低涡中心(单位:  $10^{-9} \cdot s^{-2}$ ), 箭头: 低涡移动方向

从图 3 可以看出, 6 日在低涡的 NE 方, 有正  $A$  中心出现。分析可知, 5 日到 6 日, 6 日到 7 日, 低涡朝正  $A$  方向移动。图 3b 中 8 日在低涡的偏 E 方, 出现了负  $A$  中心。7 日到 8 日, 低涡移动不大, 并很快消失。

图 4 是个例 2, 1982 年 6 月 12 日 300hPa 等压面上低涡区附近的  $A$  值分布图。从图中可以看出, 低涡处于负  $A$  值区。从 12 日到 14 日, 低涡都未东移, 并在  $92.5^\circ E$  以西的高原地区生成和消失。

为什么低涡向其前部的正  $A$  中心方向移动, 若其前部出现负  $A$  中心则消失呢? 由于正  $A$  的作用使高层  $\partial D / \partial t > 0$ , 500hPa 低涡向其前部高层辐散加强的区域移动。若为负  $A$ , 则  $\partial D / \partial t < 0$ , 其前部高层辐合加强, 低涡仅在原地生成和消失, 并不东移。  $A$  值的大小或正负决定于惯性加速项的水平分布。西南风急流的存在使惯性加速项在小范围内

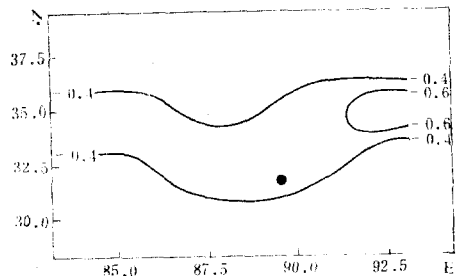


图 4 1982 年 6 月 12 日 300hPa 上原地生成低涡过程的  $A$  值分布图(说明同上图)

(急流轴上最大风速中心北侧的风速切变最强的区域)显著增大, 造成局地辐散场的加强。

本文第二节曾指出,低涡位于西南风急流轴上最大风速中心的左后方平均约 7 个经距处(图 1),最大正 A 中心也是出现在低涡 NE 方 5—6 个经距处(图 3a,b)。

(2)  $f\zeta'$  项的作用:

图 5 给出个例 1, 300hPa 等压面上  $f\zeta'$  的时间剖面, 图中横坐标是低涡的逐日位置。

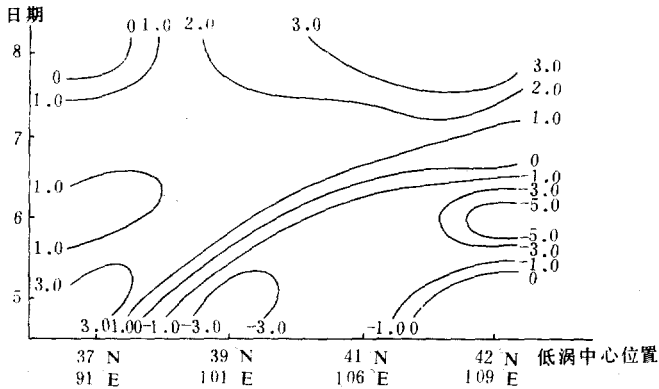


图 5 发展东移低涡过程的  $f\zeta'$  时间剖面图(单位:  $10^{-8} S^{-2}$ )

从图中可以看出,低涡移动的方向和  $f\zeta'$  最大正值中心移动的方向基本平行,低涡向  $f\zeta'$  最大正值中心移动。表明当风场涡度比高度场涡度大时,同样使得  $\partial D/\partial t > 0$ ,有利于  $t > 0$ ,有利于低涡的发展东移。而  $f\zeta'$  的大小和正负,又与西南风急流有关,当西南风急流北侧有限区域内(急流轴上最大风速中心附近风速切变最强的区域)非地转作用最强时,  $f\zeta'$  正值也最大。所以这种非地转作用是和急流北侧的强风速切变相联系的,当然也与低涡中积云对流,摩擦效应等中小尺度系统活动所引起的非地转运动相联系,不过这不是本文所要讨论的内容。

个例 2 的  $f\zeta'$  值在低涡附近为负值,使得  $\partial D/\partial t < 0$ ,对低涡的发展起负贡献,故低涡仅在  $92.5^\circ E$  以西的高原地区生消活动。

从以上分析来看,低涡的发展东移是与 300hPa 急流的动力作用有密切联系,由于这支急流的存在,在急流轴上最大风速中心北侧附近的风速切变最强的区域内,一方面由于惯性加速不均匀引起的散度变化和另一方面由于非地转作用引起散度变化,都使得  $\partial D/\partial t > 0$ ,在低涡前部形成强烈的辐散中心,低涡向其发展东移。

顺便指出,高原上空 300hPa 等压面上的散度,在低涡发展东移中是一个非常活跃的物理因子,这与 Fankhauser,孙淑清等人<sup>[6,7]</sup>强调的在次天气尺度和中尺度系统分析中,要特别重视散度变化的结论是一致的。

#### 四、对 300hPa 急流作用的进一步讨论

从上节分析来看,平流作用和非地转效应是低涡发展东移的两个重要因素。为了进一步讨论急流和低涡的动力作用过程,我们把运动方程分成调整变化和平流变化两部分。

调整变化方程(略去摩擦):

$$\frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} = -f\mathbf{k} \times \mathbf{V} - \nabla \varphi \quad (4)$$

平流变化方程:

$$\frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} = -\mathbf{V} \cdot \nabla \mathbf{V} - \omega \frac{\partial \mathbf{V}}{\partial P} \quad (5)$$

高原上空 300hPa 西南风急流为带状分布,急流的水平尺度远大于垂直尺度,取  $x$  方向和急流平行,  $y$  方向和急流垂直,这时  $x$  方向近似向东,  $y$  方向近似向北。

(4)式可写成:

$$\begin{cases} \frac{\partial u}{\partial t} = fu \\ \frac{\partial v}{\partial t} = -fu - \frac{\partial \varphi}{\partial y} \end{cases} \quad (6)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} = -fu - \frac{\partial \varphi}{\partial y} \quad (7)$$

(7)式对  $p$  微商,并设热成风偏差  $u'_\tau$  为:

$$u'_\tau = -\frac{\partial u}{\partial p} - \left(-\frac{\partial u_g}{\partial p}\right) = -\frac{\partial u}{\partial p} - \frac{1}{f} \frac{\partial}{\partial p} \left(\frac{\partial \varphi}{\partial y}\right) \quad (8)$$

则  $\frac{\partial}{\partial t} \left(-\frac{\partial v}{\partial p}\right) = -fu'_\tau \quad (9)$

下面给出个例 1 (从低涡到急流轴上最大风速中心之间的区域) 300—500hPa 等压面之间  $-\frac{\partial u}{\partial p}$  和  $-\frac{\partial u_g}{\partial p}$  的计算值,它们分别为  $5.6 \times 10^{-2}$  和  $4.3 \times 10^{-2}$  (单位:米·秒<sup>-1</sup>·百帕<sup>-1</sup>)。所以在 300hPa 急流下部  $u'_\tau (=1.3 \times 10^{-2}) > 0$ , 则  $\frac{\partial}{\partial t} \left(-\frac{\partial v}{\partial p}\right) < 0$ 。这时加强或产生急流北侧上升、南侧下沉的逆环流圈。由于调整和惯性作用,产生重力惯性波,当扰动水平尺度  $L < L_0$  时,重力惯性波可能发生不稳定现象,这时非热成风和垂直环流都不断发展,垂直环流的加强有利于低涡的发展,这是在高原 300hPa 急流北侧多低涡发展的重要原因之一。

(5)式对  $P$  微商(略去垂直运动项),

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(-\frac{\partial \mathbf{V}}{\partial P}\right) = -\mathbf{V} \cdot \nabla \left(-\frac{\partial \mathbf{V}}{\partial P}\right) - \left(-\frac{\partial \mathbf{V}}{\partial P}\right) \cdot \nabla \mathbf{V} \quad (10)$$

根据热力学方程得:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial \mathbf{V}_g}{\partial P}\right) = -\mathbf{V} \cdot \nabla \left(-\frac{\partial \mathbf{V}_g}{\partial P}\right) + \left(-\frac{\partial \mathbf{V}_g}{\partial P}\right) \cdot \nabla \mathbf{V}_g \quad (11)$$

由(10)、(11)两式可以看出,当平流过程满足地转平衡时,等式右边第一项是相等的,仍能保持热成风平衡。而第二项大小相等,符号相反,故平流过程必产生非热成风。用自然坐标  $\mathbf{V} = V_t$  ( $t$  不依赖  $P$  并和急流平行), (10)式右边第二项可写成:

$$S\mathbf{V} = -\left(-\frac{\partial \mathbf{V}}{\partial P}\right) \frac{\partial \mathbf{V}}{\partial S}$$

(11)式右边第二项可写成:

$$S\mathbf{V}_g = \left(-\frac{\partial \mathbf{V}_g}{\partial P}\right) \frac{\partial \mathbf{V}_g}{\partial S}$$

在 300hPa 急流轴北侧下方(即低涡的 NE 偏 E 方),  $S\mathbf{V} < 0$ ,  $\frac{\partial}{\partial t} \left(-\frac{\partial \mathbf{V}}{\partial P}\right) < 0$ ,

而

$$SV_y > 0, \frac{\partial}{\partial t} \left( -\frac{\partial V_y}{\partial P} \right) > 0,$$

使得  $u'_y$  增加, 产生上升运动, 而低涡就向这个方向移动。

在实际大气中, 同时存在平流和调整两种过程, 由平流过程产生的非热成风将在适应过程中向热成风调整。由于调整和平流过程的共同作用, 在 300 hPa 急流北侧下方不断产生上升运动, 低涡就沿着急流北侧不断发展东移。

## 五、结 语

1. 高原低涡沿 300hPa 西南风急流北侧与最大风速中心一起向 NE 偏 E 方向移动, 消失于西北风急流与西南风急流的汇合处。

2. 初夏高原低涡发展东移的动力过程分析表明, 300hPa 西南风急流轴上最大风速中心北侧的强风速切变区内, 惯性加速不均匀和非地转作用, 引起该区域内散度变化, 出现强烈的辐散中心, 500hPa 高原低涡向其前部上层最强的辐散中心发展东移。而原地生消低涡相反, 其前部没有这种作用。

3. 调整过程引起的急流北侧上升、南侧下沉的逆环流圈和重力惯性波及其不稳定现象, 有利于低涡发展; 平流过程引起热成风偏差增大, 不断在急流轴北侧即低涡的 NE 偏 E 方产生上升运动, 有利于低涡东移。

4. 根据本文分析结果, 建议在预报高原低涡的东移时, 要重视与 300hPa 急流有关的散度变化; 在数值预报模式设计中, 预报高原低涡的发展, 要考虑 300hPa 急流所引起的惯性重力波的作用。

致谢: 本文得到陶诗言先生的热情指导并修改原稿, 作者表示深切的谢意。

## 参 考 文 献

- (1) 青藏高原气象科学研究拉萨会战组, 夏半年青藏高原上空 500 百帕低涡切变线的研究, 科学出版社, 1981 年。
- (2) Sun Guowu et al. A study of the lows at 500Mb level over the Qinghai—Xizang Plateau in summer, Geological and ecological studies of Qinghai—Xizang Plateau, Science Press, Beijing, 1547—1551, 1981.
- (3) 叶笃正, 高由禧等, 青藏高原气象学, 科学出版社, 102—126, 1979 年。
- (4) 青藏高原气象科学实验文集编辑组, 青藏高原气象科学实验文集(一), 科学出版社, 218—242, 1984 年。
- (5) 青藏高原气象科学实验文集编辑组, 青藏高原气象科学实验文集(二), 科学出版社, 182—205, 1984 年。
- (6) Pankhauser, J. C. The derivation of consistent fields of wind and geopotential height from mesoscale rawinsonde data, *J. A. M* 13, 6, 1974.
- (7) 孙淑清, 低层风场在暴雨发生中的动力作用, 大气科学, 6, 4, 394—403, 1982。

## DYNAMIC PROCESSES OF THE MOVING AND DEVELOPING LOWS ON THE QINGHAI—XIZANG PLATEAU DURING THE EARLY SUMMER

San Guowu    Chen Baoda

*(Institute of Meteorological Science, Gansu Province)*

### Abstract

Through analysis of the processes of the developing and disappearing lows on the Qinghai—Xizang Plateau in June 1980—1983, the relationships between 300 hPa southwest jet and the moving and developing lows on Qinghai—Xizang Plateau have been obtained, and the action of  $A$  (advection) and  $f\zeta'$  (nongeostrophic) terms in divergence equation have been discussed. The existence of jet determines directly an increase in  $A$  and  $f\zeta'$  terms. It is an important dynamic cause for the lows eastward moving and developing. Finally, the dynamic processes of the lows developing and moving along the northern side of jet's axis have been detailed by advection equation and adjustment equation.