

# 西南低涡形成的气候特征与 角动量输送的关系<sup>①</sup>

王赛西

(四川省内江市气象局, 641000)

## 提 要

本文分析讨论了角动量方程中角动量平流项( $m = -\rho \vec{V} \cdot \nabla M - M \nabla \cdot \rho \vec{V}$ )与西南低涡生成的关系。指出角动量平流变化对西南低涡的生成具有促进或抑制作用。

**关键词:** 西南低涡; 气候特征; 角动量。

## 1 引 言

西南低涡是在青藏高原东侧特殊的地理环境和在一定的的大气环流形势下产生的中尺度系统。对其发生初期的物理机制, 广大气象工作者曾进行过多方面的研究<sup>(1) ②</sup>。本文试图通过低涡源地及其相邻地区的角动量水平输送对西南低涡生成的动力作用进行分析讨论。在对 1975—1986 年西南低涡生成及其分布状况的统计分析基础上, 结合低涡多发季与少发季平均角动量输送场的计算, 揭示出西南低涡的生成、涡源分布与角动量输送的对应关系; 同时通过对低涡生成和生成后消失两种不同情况个例的角动量输送场的空间结构分析, 探讨其在西南低涡形成时的重要作用。

## 2 角动量和角动量方程的讨论

大气环流得以维持, 必须有不断的能量供给, 这些能量在整层大气中保持平衡, 即热量平衡、动能平衡、角动量平衡。在此仅就大气角动量平衡及角动量输送对西南低涡生成的影响进行讨论。

在以地球为中心的绝对坐标中, 空气质点的动力学方程是

$$\frac{d \vec{V}_a}{dt} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \vec{g} + F \quad (1)$$

其中  $\vec{V}_a = \vec{V} + \Omega \times \vec{r}$  为绝对速度。

由于我们讨论和计算的范围仅限于中低纬度有限水平区域(即青藏高原及其相邻地

①1991年4月8日收到, 10月5日收到修改稿。

②徐裕华等, 西南低涡形成及涡源的初步研究, 青藏高原论文集, 青藏高原气象科研协作组, 1974 年, 86—105 页。

区), 与整个半球的范围比起来要小得多, 完全可以略去地球曲率的影响, 因此在如下的讨论中, 可近似地采用球坐标的简化形式, 即在局地坐标上进行。

因  $\vec{r} \times \vec{V}_a$  是空气质点的绝对角动量, 故以矢径  $\vec{r} \times (1)$  式得

$$\vec{r} \times \frac{d_a \vec{V}_a}{dt} = \vec{r} \times \left( -\frac{1}{\rho} \nabla p \right) + \vec{r} \times \vec{g} + \vec{r} \times \vec{F}$$

左端

$$\begin{aligned} \vec{r} \times \frac{d_a \vec{V}_a}{dt} &= \frac{d_a}{dt} (\vec{r} \times \vec{V}_a) - \frac{d\vec{r}}{dt} \times \vec{V}_a \\ &= \frac{d_a}{dt} (\vec{r} \times \vec{V}_a) \\ &= \frac{d_a}{dt} (\vec{r} \times \vec{V}_a) + \vec{\Omega} \times (\vec{r} \times \vec{V}_a) \\ &= \left[ -\frac{d(rv)}{dt} - 2ru\Omega \sin\varphi - \mu^2 \operatorname{tg}\varphi - r^2 \Omega^2 \cos\varphi \sin\varphi \right] \vec{i} \\ &\quad + \left[ \frac{d(ru)}{dt} + \frac{d}{dt} (r^2 \Omega \cos\varphi) - uv \operatorname{tg}\varphi - rv\Omega \sin\varphi \right] \vec{j} \\ &\quad + \left[ -rv\Omega \cos\varphi + rv\Omega \cos\varphi \right] \vec{k} \end{aligned}$$

右端

$$\begin{aligned} \vec{r} \times \left( -\frac{1}{\rho} \nabla p \right) &= -r\vec{k} \times \left( \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} \vec{i} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} \vec{j} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} \vec{k} \right) \\ &= \frac{r}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} \vec{i} - \frac{r}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} \vec{j} \end{aligned}$$

$$\vec{r} \times \vec{g} = r\vec{k} \times (-g)\vec{k} = 0$$

$$\vec{r} \times \vec{F} = r\vec{k} \times (F_x \vec{i} + F_y \vec{j} + F_z \vec{k}) = rF_x \vec{j} - rF_y \vec{i}$$

我们所需要的是沿地球自转轴的角动量方程,  $\vec{i}$  方向与此无关, 故只需将  $\vec{j}$  方向的分量方程投影到地球自转轴即可, 而地轴与  $\vec{j}$  的夹角是  $\varphi$ , 所以将  $\vec{j}$  方向的方程两端同乘  $\cos\varphi$ , 即得到沿地球自转轴的绝对角动量方程

$$\cos\varphi \frac{d}{dt} (ru + r^2 \Omega \cos\varphi) - uv \sin\varphi - rv \sin\varphi \cos\varphi = -\frac{r \cos\varphi}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + r \cos\varphi F_x$$

注意到速度  $v = r \frac{d\varphi}{dt}$ , 则上式可写成

$$\frac{d}{dt} \left[ (ru + r^2 \Omega \cos\varphi) \cos\varphi \right] = -\frac{1}{\rho} r \cos\varphi \frac{\partial p}{\partial x} + r \cos\varphi F_x \quad (2)$$

式中  $ru \cos\varphi$  为相对角动量;  $r^2 \Omega \cos^2\varphi$  为地转角动量;  $r = a + h$ ,  $a$  是地球半径,  $h$  表示空气质点至地表的距离。因此, 在任意纬度  $\varphi$  上单位质量空气相对地轴的绝对角动量可表示为

$$M = r \cos\varphi (u + \Omega r \cos\varphi) \quad (3)$$

于是(2)式可写成

$$\frac{dM}{dt} = -\frac{1}{\rho} r \cos \varphi \frac{\partial p}{\partial x} + r \cos \varphi F_x \quad (4)$$

由(3)式看出, 单位质量空气的绝对角动量的个别变化, 决定于两个因子: (1)沿纬圈方向气压梯度力所产生的力矩; (2)沿纬圈方向上湍流摩擦力所产生的力矩, 这个因子在近地面层较大。又

$$\rho \frac{dM}{dt} = \frac{d\rho M}{dt} - M \frac{d\rho}{dt}$$

由连续性方程

$$\frac{d\rho}{dt} = -\rho \nabla \cdot \vec{V}$$

可得

$$\begin{aligned} \rho \frac{dM}{dt} &= \frac{d\rho M}{dt} + \rho M \nabla \cdot \vec{V} = \frac{\partial \rho M}{\partial t} + \vec{V} \cdot \nabla \rho M + \rho M \nabla \cdot \vec{V} \\ &= \frac{\partial \rho M}{\partial t} + \nabla \cdot \rho M \vec{V} \end{aligned}$$

故(4)式可写为

$$\frac{\partial \rho M}{\partial t} = -\nabla \cdot \rho M \vec{V} - r \cos \varphi \frac{\partial p}{\partial x} + \rho F_x r \cos \varphi \quad (5)$$

即角动量倾向方程。 $\rho M$  为单位体积空气的绝对角动量。右边第一项为单位体积大气角动量平流变化即角动量通量项; 第二项表示同一纬圈上气压差引起的角动量变化。在大地形(如青藏高原)作用下, 同一纬度上地形东西两侧会产生较大的气压差异, 该项同时也反映了地形对角动量变化的作用; 第三项表示湍流摩擦力矩引起的角动量变化, 对运动的大气而言, 任何时刻  $F_x < 0$ , 它总是使角动量减小。下面我们重点讨论平流变化项即角动量输送的作用。令

$$\begin{aligned} m &= -\nabla \cdot \rho M \vec{V} = -(\vec{V} \cdot \nabla \rho M + \rho M \nabla \cdot \vec{V}) \\ &= -\rho \vec{V} \cdot \nabla M - M(\vec{V} \cdot \nabla \rho + \rho \cdot \nabla \cdot \vec{V}) \end{aligned} \quad (6)$$

又因  $w \ll u$  和  $v$ , 故在此仅考虑水平方向上的角动量输送, 将(3)式代入(6)式得某一水平区域内的角动量输送表达式

$$m = -\rho u r \cos \varphi \frac{\partial u}{\partial x} + \rho u v \sin \varphi - \rho v r \cos \varphi \frac{\partial u}{\partial y} + \rho f v r \cos \varphi - M \nabla_h \cdot \rho \vec{V} \quad (7)$$

式中  $f = 2\Omega \sin \varphi$ 。设任一物理量  $K$  可表示为

$$\bar{K} = \bar{K} + K'$$

$\bar{K}$  为该物理量沿纬圈的平均,  $K'$  为纬偏值, 且  $\bar{K}' = 0$ 。因此有

$$\begin{aligned} u &= \bar{u} + u', & v &= \bar{v} + v', & \rho &= \bar{\rho} + \rho' \\ \bar{u} &= \text{常数}, & \bar{\rho} &= \text{常数} \end{aligned}$$

利用微扰法, (7)式有

$$\begin{aligned} m &= -(\bar{\rho} + \rho')(\bar{u} + u') r \cos \varphi \frac{\partial(\bar{u} + u')}{\partial x} \\ &\quad + (\bar{\rho} + \rho')(\bar{u} + u') v' \sin \varphi - (\bar{\rho} + \rho') v' r \cos \varphi \frac{\partial(\bar{u} + u')}{\partial y} + (\bar{\rho} + \rho') f v' r \cos \varphi \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & -r\cos\varphi(\bar{u}+u'+\Omega r\cos\varphi)\left[\frac{\partial(\bar{\rho}+\rho')(\bar{u}+u')}{\partial x}+\frac{\partial(\bar{\rho}+\rho')v'}{\partial y}\right] \\
 & =(\bar{\rho}+\rho')(-\bar{u}r\cos\varphi\frac{\partial u'}{\partial x}+\bar{u}v'\sin\varphi+u'v'\sin\varphi \\
 & +f v'r\cos\varphi)+r\cos\varphi(\bar{u}+\Omega r\cos\varphi)\left[\bar{u}\frac{\partial\rho'}{\partial x}+\bar{\rho}\left(\frac{\partial u'}{\partial x}+\frac{\partial v'}{\partial y}\right)\right] \quad (8)
 \end{aligned}$$

式中第一项为由水平风速扰动在同一纬圈上的变化对角动量 $\bar{u}$ 的输送,若纬向环流扰动辐合( $\frac{\partial u'}{\partial x} < 0$ ),则 $-\bar{u}r\cos\varphi\frac{\partial u'}{\partial x} > 0$ ,将有利于正角动量输送,反之使角动量减小。第二项是经向扰动风速 $v'$ 对角动量 $\bar{u}$ 的输送,若经向扰动为偏南风( $v' > 0$ ),将使角动量增大,反之使角动量减小。第三项为水平扰动(槽脊)引起的角动量变化,若 $u' > 0$ , $v' > 0$ (偏西南风,槽前西南气流),或 $u' < 0$ , $v' < 0$ (低压环流后部或高压环流前部为东北气流)将有利于正角动量输送;反之,若为脊前西北气流或高压环流后部的东南气流,则使角动量减小,不利于角动量输送。第四项为经向环流扰动 $v'$ 对 $\Omega$ 角动量的输送,当经向扰动为偏南风( $v' > 0$ )时,将使角动量增大,反之角动量输送为负。第五项表示同一纬圈上单位体积大气质量变化引起的角动量输送,根据大气状态方程 $\rho = P/RT$ 可知,该项作用同(5)式右边第二项相同。第六项表明太气水平散度与西风角动量输送的关系,当水平散度为辐合( $\frac{\partial u'}{\partial x} + \frac{\partial v'}{\partial y} < 0$ )时,将使绝对角动量增加,有利于正角动量的水平输送;反之,角动量输送为负,使角动量减小,不利于角动量的输送。

从上述讨论中发现:除西风槽脊或高低压系统(即大气环流的纬向和经向扰动)是引起角动量输送的主要动力原因之外,大气水平散度也是引起角动量输送的另一种原因。这与前人的分析结果基本一致<sup>(2)</sup>。同时还反映出了西风角动量变化与大气源和汇的内在联系。这也表明了角动量的水平输送状况是大气环流形势和大气散度场的综合反映。根据人们对西南涡生成条件的大量研究结果<sup>(3)</sup>表明:引起较大正角动量输送的条件和西南低涡生成所必备的环境形势和散度场相吻合。即:高原东侧要有旺盛的偏南气流(低涡源地处于高空槽前),同时中低层存在明显的大气辐合,有利于低涡生成。

### 3 西南涡的出现频率与角动量输送的关系

分别对 1975—1986 年逐月西南涡的生成情况进行了统计,新生低涡的统计标准为:在  $25^{\circ} - 35^{\circ} \text{N}$ ,  $90^{\circ} - 110^{\circ} \text{E}$ , 700 或 850 hPa 出现明显的气旋式环流或闭合等高线,且前 24 小时该地区无低涡出现。按上述标准得到的统计结果是:西南涡以 3—6 月出现频率较大,其中以 6 月为最大,8—9 月出现频率较小,8 月最小。12 年中共出现新生低涡 342 次,其中 6 月 96 次,占出现总次数的 28.1%,8 月仅 25 次,占出现总次数的 7.2%。在此仅就低涡生成的气候特征与角动量输送的平均状况间的关系予以分析和讨论。

因采用实测风资料计算角动量输送平均值工作量大,故采用 500 hPa 月平均高度资料分别计算了 6 月和 8 月 500 hPa 青藏高原和以东地区的角动量输送平均状况(见图

1). 鉴于平均高度网格资料分辨率较低, 仅就西南涡形成的气候原因与角动量平流的关系进行定性研究。

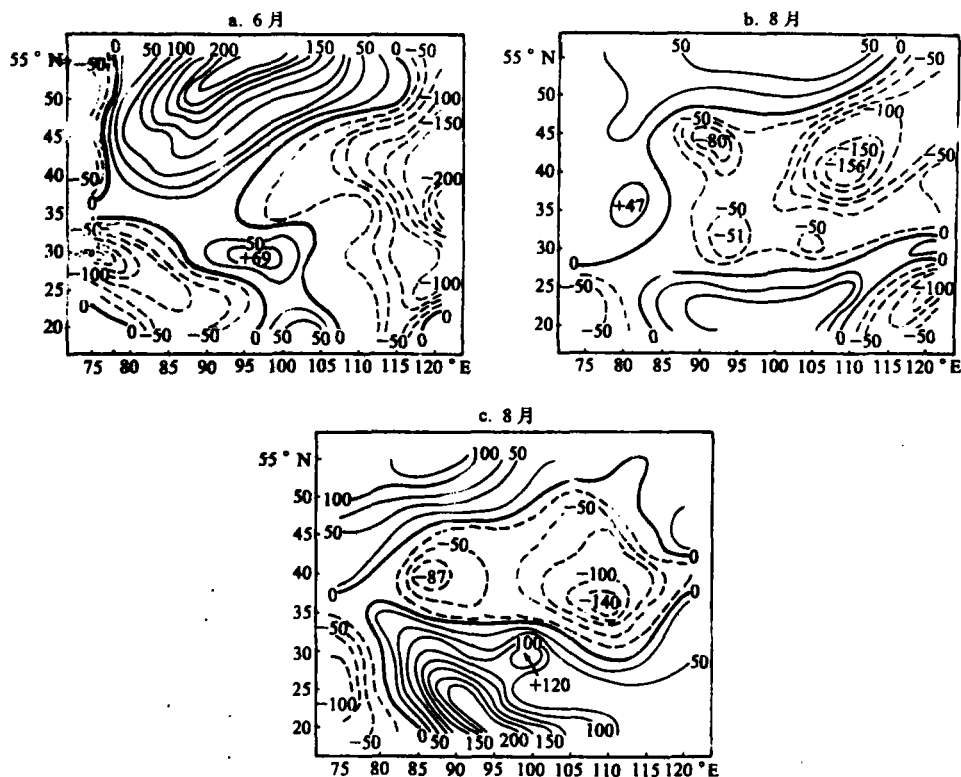


图 1 500 hPa 月平均角动量平流图(单位:  $\text{m}^2/\text{s}^2$ )

细实线为正角动量平流, 虚线为负角动量平流

Fig. 1 The 500 hPa monthly mean chart of advection of angular momentum(in:  $\text{m}^2/\text{s}^2$ ).

Thin solid lines are positive advection of angular momentum and dashed lines are negative.

a. June; b. August; c. August, 1980.

6 月是西南涡生成次数最多的时段。该月正值冬季风向夏季风过渡末期, 随着日照时数的增长, 南支西风急流向北收缩至  $40^\circ\text{N}$  与北支西风气流合并。副热带东风北抬至青藏高原南侧上空, 暖气团的交汇分界线位于  $30^\circ\text{N}$  附近。此时青藏高原东侧常有低槽活动(环流经向扰动), 且高空东风下的印度西南季风明显增强, 达高原东部及四川盆地一带。从第二部份的讨论中可以看出, 上述环流形势极有利于角动量向高原东部及西南地区输送, 因此在青藏高原东部及西南地区形成正角动量平流。其角动量输送大值区位于黑河—林芝—昌都—巴塘—西昌一线, 最大值位于林芝附近达  $69 \text{ m}^2/\text{s}^2$ , 高原其余地区及相邻部份区域均为负值(图 1a)。大量的正角动量输入可进一步促进该地区气旋式涡旋的生成与发展, 为西南低涡的生成提供了较大的不可缺少的能量, 故 6 月西南涡出现频率较高。

8 月西太平洋副高北抬至夏季最高位置, 脊线位于  $30^\circ\text{N}$  附近, 青藏高原和华北上空可出现大陆副高闭合中心。西南季风北跳至高原中部及华北一线, 低涡源地处于高

空反气旋环流控制, 使高原东部及西南地区角动量减小, 呈负角动量平流区。500 hPa 上林芝—黑河及四川盆地分别有 $-51$ 和 $-50 \text{ m}^2/\text{s}^2$ 中心(图 1b)。上述地区角动量急剧减小, 使气旋式环流得以维持的大气动量也随之减小, 便于反气旋环流维持与发展。当然, 若偶有较强冷空气南下, 迫使副高暂时南撤, 具有同 6 月相同的有利于西南涡产生的角动量输送形势, 也可有低涡生成。

对 1975—1986 年西南涡源头的统计表明, 6 月涡源相对集中于: (i) 昌都—巴塘—九龙一带; (ii) 西昌附近; (iii) 黑河—林芝一带(严格说该地区不应作为西南涡)。这同该月历年平均角动量平流正值区吻合极好, 12 年中绝大部分新生涡(90%左右)在 $> 25 \text{ m}^2/\text{s}^2$ 角动量平流区之内(图 2a)。

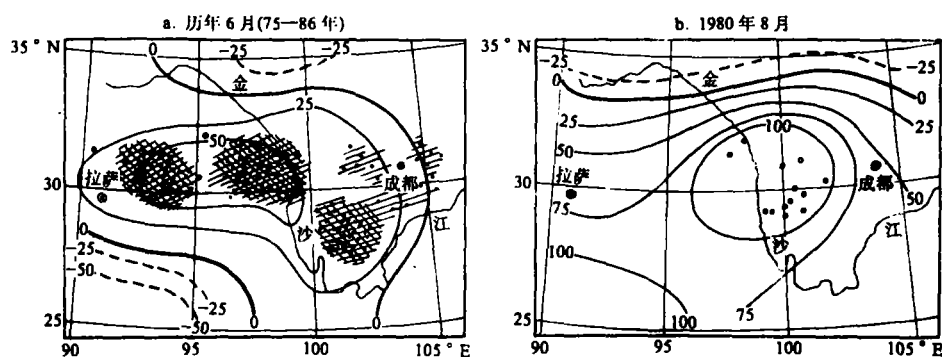


图 2 涡源分布与角动量输送合成图

Fig. 2 The composite map of the distribution of vortex source and the advection of angular momentum.

a June; b August, 1980.

1980 年 8 月西南涡活动频繁, 共出现新生低涡 13 个, 达历年该月平均值的 4 倍多。而该月西南季风与常年比较明显偏南, 位于高原东侧至四川盆地一线, 因此在西南风左侧的涡源地区造成较大的正角动量输送, 呈正角动量平流大值区(图 1c), 从而对本月西南涡的形成起到了不可忽视的动力作用。13 次新生低涡出现区域均在 $> 100 \text{ m}^2/\text{s}^2$ 区内(图 2b)。

#### 4 个例分析

1986 年 6 月 18 日 08 时 700 hPa 上雅安附近有一低涡生成, 有明显的气旋式环流及闭合等高线, 至 19 日 08 时低涡减弱消失(图 3a)。用(8)式采用实测风资料分别计算了 18 日 700, 500 hPa 的角动量输送场(图 4a)。700 hPa 低涡及其附近范围是角动量输送正值区, 虽然 700 hPa 低涡明显, 但 500 hPa 该区域却为 $< -200 \text{ m}^2/\text{s}^2$ 角动量输送负值中心, 表明在低涡上空存在一不利于低涡生成的辐散区及其相应环流形式, 迫使低涡逐渐减弱消失, 对低涡的发生和发展产生明显的抑制作用。

1986 年 6 月 21 日 08 时达县附近有一低涡生成(图 3b), 在 20 日 500 hPa 上低涡上空出现 $> 300 \text{ m}^2/\text{s}^2$ 角动量输送正值中心, 700 hPa 上未来低涡出现范围内也是角动量

输送大值区(图 4b)。因为在低涡出现前一天, 500 和 700 hPa 均出现了有利于低涡生成的环流形势和大气辐合场, 故 21 日即在该地区有低涡发生、发展。可见, 较大的正角动量输送对低涡的生成有一定促进作用。

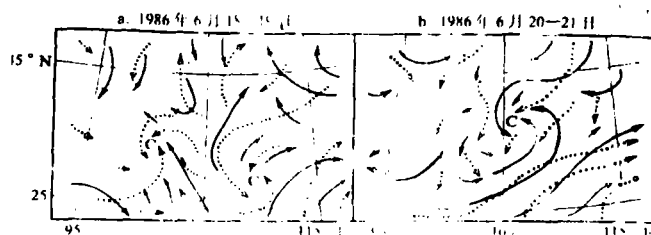


图 3 700 hPa 流场图

虚线为前一天, a. 1986 年 6 月 18—19 日, b. 1986 年 6 月 20—21 日

Fig. 3 700 hPa streamline field chart. The dashed line is before one day ago. a. June 18—19, 1986; b. June 20—21, 1986.

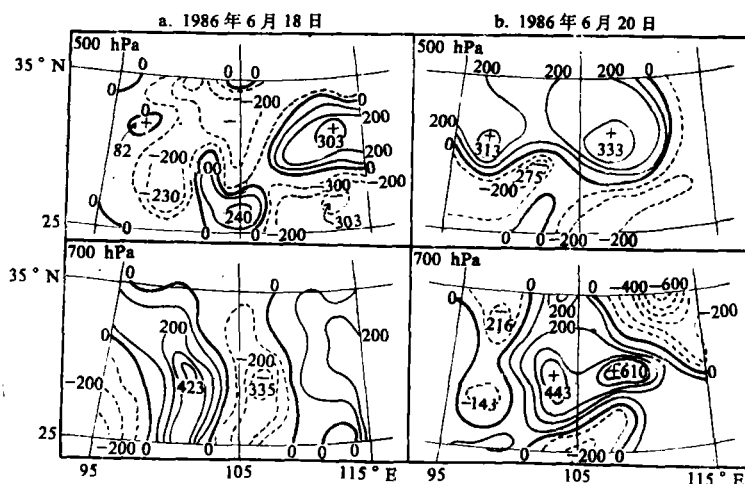


图 4 700, 500 hPa 角动量输送平流分布

a. 1986 年 6 月 18 日, b. 1986 年 6 月 20 日

Fig. 4 700 hPa and 500 hPa distribution of the advection of angular momentum. a. June 18, 1986; b. June 20, 1986.

## 5 结 语

上面的分析讨论说明, 造成较大正角动量输送(平流)的大气环流形势及气流辐合场特征与西南涡生成所必备的大气环流条件和中低层辐合场相同。低涡源地正角动量的大量增加为西南涡的形成提供了必须的动力, 对西南涡的生成具有一定的促进作用; 而该地区角动量减小, 则对低涡的形成产生明显的抑制作用。角动量输送变化是造成低涡逐

月出现频率不同的不可忽视的动力因素。同时, 角动量平流正值区与低涡出现源地有很好的对应关系。

对于低涡形成过程中角动量输送与其它因素作用的大小, 以及是否具有预报意义, 有待于今后进一步深入研究。

### 参 考 文 献

- (1) 卢敬华, 近三十年来我国关于西南涡的研究情况, 成都气象学院科技, 1982年(4), 26—49页。
- (2) 章基嘉等, 中长期天气预报基础, 北京: 气象出版社, 1983年, 158—164页。
- (3) 卢敬华, 西南低涡概论, 北京: 气象出版社, 1986年, 62—81页。

## THE RELATION BETWEEN THE CLIMATIC CHARACTERISTIC OF FORMATION OF SOUTH-WEST VORTEX AND THE ADVECTION OF ANGULAR MOMENTUM

Wang Saixi

(Neijiang Meteorological Bureau, Neijiang, Sichuan 641000)

### Abstract

In this paper, the relation between the advection of angular momentum ( $m = -\rho \vec{V} \cdot \nabla M - M \nabla \cdot \rho \vec{V}$ ) in the equations of angular momentum and formation of South-West Vortex is analysed. The result indicates that the changes of advection of angular momentum to generation of the vortex have advanced or restricted action.

**Key words:** South-west vortex; Climatic characteristic; Angular momentum.