

## 春季滇南冰雹大风天气的螺旋度分析

李 英

(云南省气象台, 昆明 650034)

**摘要:**用螺旋度对 1997 年 3 月发生在滇南的冰雹大风天气进行分析。结果表明: 低层螺旋度的演变对冰雹大风天气有一定的指示意义; 低层螺旋度的大值中心与降雹区比较靠近; 螺旋度的垂直分布反映了降雹区大气的一些动力和热力特征。

**关键词:**滇南; 大风; 冰雹; 螺旋度

中图分类号 P458 文献标识码: A

在风暴出现的运动方向常有旋转, 或在旋转轴方向有移动的现象, 而螺旋度就是一个用于描述大气运动在其旋转轴方向的运动强弱或运动方向的旋转程度的参数<sup>[1]</sup>。螺旋度在强对流风暴中的应用正引起广泛重视, 研究表明, 它对强对流天气的预报具有一定指示意义<sup>[2,3]</sup>。

1997 年 3 月中旬至下旬中期, 云南的思茅、西双版纳、红河、临沧等地频繁发生大风、冰雹(下简称风雹)天气, 由于天气现象强烈, 涉及范围广, 持续时间长, 给农业生产和人民生活造成了十分严重的灾害, 仅思茅地区直接经济损失就达 1 亿元以上。为了进一步探讨它的物理特征, 本文用螺旋度对上述过程进行了分析, 发现螺旋度对分析、预报云南的强对流天气具有一定应用价值。

### 1 3 月中下旬的天气背景

分析 1997 年 3 月的天气形势, 发现滇南的冰雹大风天气与活跃的南支槽有关。500 hPa 天气图上, 仅 15~26 日期间便有 4 次南支槽经孟加拉湾北部东移过程, 在 700 hPa 上, 则表现为西南风低空急流( $16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  的强风速区)在云南南部地区频繁出现。在此期间, 北方不断有冷空气分裂南下, 地面图上昆明准静止锋也较为活跃, 3 月 15 日后经常维持在云南东部地区并作南北摆动。几次风雹过程分别出现在 3 月 15~19 日、23 日和 26 日, 降雹时间大多在午后和傍晚。云南南部的数十个县市先后受到了袭击, 其中 3 月 15~19 日发生的是连续 5 日的大范围降雹天气, 观测到最大雹径达 120 mm。图 1 以 3 月 17 日为例, 给出降雹日的天气形势综合图, 可以看出, 滇南风雹天气发生在南支槽与昆明准静止锋的共同影响下, 降雹中心处于锋前暖气流一侧。

## 2 螺旋度在 $p$ 坐标中的表达式

螺旋度严格的定义式为<sup>[5]</sup>:

$$H = \iiint_V \mathbf{v} \cdot (\nabla \times \mathbf{V}) d\tau$$

在  $p$  坐标系中展开为:

$$h = (u\mathbf{i} + v\mathbf{j} + w\mathbf{k}) \cdot (\xi\mathbf{i} + \eta\mathbf{j} + \zeta\mathbf{k}) = (\partial w / \partial y - \partial v / \partial p)u + (\partial u / \partial p - \partial w / \partial x)v + (\partial v / \partial x - \partial u / \partial y)w \quad (1)$$

对于强对流天气, 涡度的垂直分量一般比风的垂直切变小一个量级以上, 可以忽略掉<sup>[3]</sup>; 另外, 在强对流发生前, 与风的垂直切变相比, 垂直速度在水平方向上的变化不大, 这样, (1) 式可简化为:

$$h = \mathbf{V}_h \cdot (\mathbf{k} \times \partial \mathbf{V}_h / \partial p) = h_x + h_y = (\partial v / \partial p)u + (\partial u / \partial p)v \quad (2)$$

计算中, 850~700 hPa 为低层, 700~500 hPa 为中层, 500~300 hPa 为高层, 式中  $u$ 、 $v$  取各上下层的算术平均值作为该层的平均风速。使用 1997 年 3 月逐日 08 时  $1^\circ \times 1^\circ$  的客观分析资料, 范围为 18~36°N, 91~111°E。

## 3 计算结果分析

### 3.1 低层螺旋度的时间演变

图 2a 给出了 1997 年 3 月沿 101°E 南北向穿过雹区 (经向跨度约为 22~24°N) 低层螺旋度  $h$  的演变情况。可以看出, 3 月 3~14 日, 滇南雹区一直为较强的螺旋度负值区域, 15 日开始转为正值区, 三个正值中心分别出现在 3 月 15~19 日、3 月 21~23 日和 3 月 25~26 日, 正好与滇南的三次冰雹大风过程对应。26 日之后, 滇南又出现明显负值, 风雹过程结束。从 (2) 式看, 螺旋度的增长主要由于存在强的风垂直切变, 而强的风垂直切变又引起水平涡度的增大, 因此螺旋度的大小也反映风垂直切变的强弱, 其数值越大, 越有利于风暴的发展<sup>[6]</sup>。从天气形势来看, 1997 年 3 月屡次发生的强对流天气与活跃的西南风低空急流有关。但低空急流的出现不一定伴随冰雹大风天气, 这主要是因为暖湿气团只有在强的动力抬升条件下, 才能释放能量, 造成强对流天气。当云南东部有昆明准静止锋活动时, 近地层的东北气流往往与较高层的西南气流形成强的风垂直切变, 从而提供强对流天气的触发条件。由此看来, 滇南地区螺旋度的变化与该地风雹天气的出现有一定的关系, 通过计算和分析低层螺旋度的演变, 可以考察强对流天气发生的动力条件。

分析发现,  $h_x$ 、 $h_y$  在强对流天气中的变化也有一定特点, 图 2b 显示了 3 月份滇南区域 (9 格点平均) 08 时低层  $h$  和  $h_x$ 、 $h_y$  的逐日演变, 可以看出,  $h_x$ 、 $h_y$  和  $h$  的总体变化趋势较为相似: 风雹前, 三者均为负值, 3 月上旬至中旬前期, 螺旋度曲线为一个相对波谷区, 15~26 日三条曲线由波谷区转为相对波峰区, 即风雹过程前  $h_x$  和  $h_y$  的值都有一个较大增长。其中以  $h_y$  的增幅

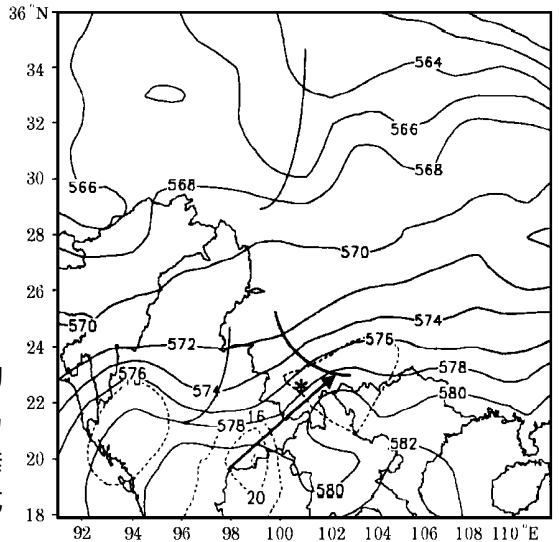


图 1 1997 年 3 月 17 日 08 时天气形势 (细实线为 500 hPa 高度、槽线, 虚线为 700 hPa 上  $16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  的等风速线, 粗实线代表地面静止锋, 长箭头为低空急流轴, \* 代表风暴中心)

Fig. 1 The 500 hPa synoptic map at 0800BST 17 March, 1997 (solid line: height; dashed line: wind speed of  $16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  at 700 hPa; thick line: front position; long arrow: the axis of low Level Jet; \*: central position of high-wind and hail event)

最为明显,但其值仍小于  $h_x$ 。在此期间,  $h_x$  的变化相对平稳,  $h_y$  则波动较大。在  $h_x$  保持正值的情况下,  $h_y$  的变化与冰雹大风天气有较好的相关,图中显示,  $h_y$  的三个锋值区与冰雹大风过程对应,而出现低值的 20 日、24 日和 27 日在滇南并无强对流天气发生。

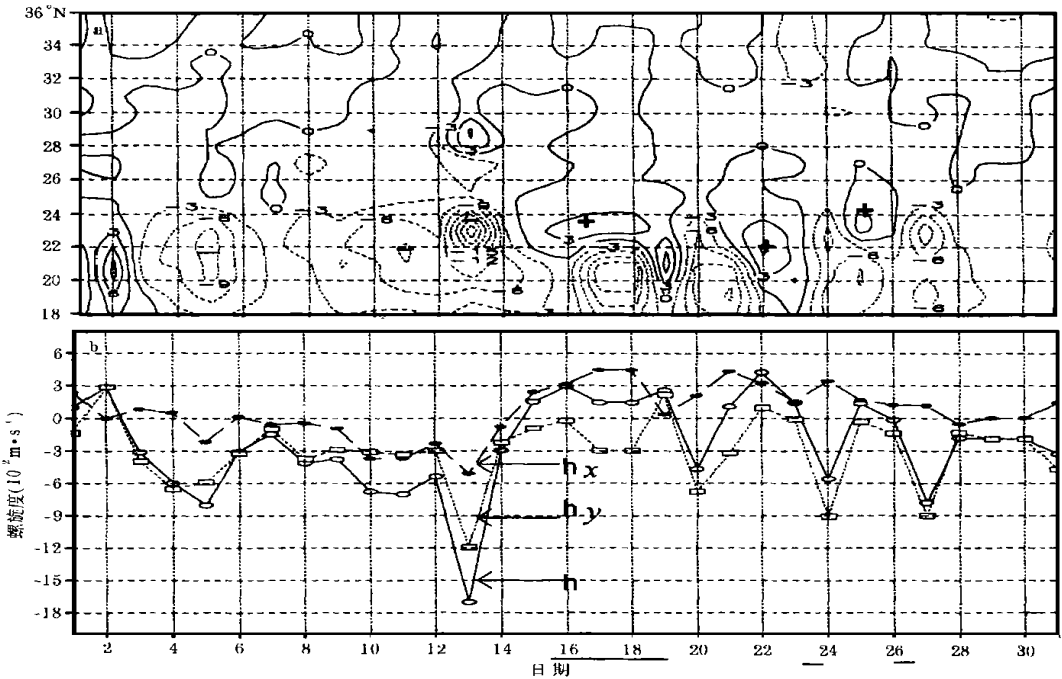


图 2 a. 沿 101°E 穿过雹区低层螺旋度( $h$ )的时间演变(单位:  $10^{-2} \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ );

b. 降雹区低层  $h$ 、 $h_x$ 、 $h_y$  的时间演变(图下粗实线为降雹日期)

Fig.2 a. Daily evolution of helicity( $h$ ) at 850~700 hPa along 101°E from 1 to 31 March, 1997;

b. Daily evolution of the mean  $h$ 、 $h_x$  and  $h_y$  over the hail area at 850~700 hPa from 1 to 31 March, 1997(units:  $10^{-2} \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ )

### 3.2 低层螺旋度的分布特征

考察低层  $h_x$  和  $h_y$  的分布,发现低层  $h_x$  的大值区与冰雹落区有较好的对应关系。在降雹日 08 时,一般滇南为  $h_x$  正值区域,其大值中心与未来 12 h 内的冰雹区域中心较为靠近; $h_y$  的情况有所不同,强天气下雹区  $h_y$  值虽有较大增长,但一般仍为弱的负值区,其分布与冰雹落区的关系并不是很好(图略)。雹区低层螺旋度  $h$  的分布特点与  $h_x$  的相似,冰雹区域中心位于  $h$  的一个大值区附近,如图 3a 所示,这个大值区域由东北向西南伸展,与近地面冷气流的入侵路径一致,这也说明近地层东北气流是造成 3 月中下旬螺旋度增大的原因之一。我们注意到,低层螺旋度与冰雹落区的关系并不十分紧密,若将螺旋度与水汽、能量等因子相结合,效果可能会更好些。

上述分析表明,  $h$  的值主要与  $h_x$  有关,下面以低层  $x$  螺旋度来讨论气团在纬向上的旋转状态。在风雹地区,低层大气有  $h_x = u\xi > 0$ , 同时  $u > 0$ , 故  $\xi > 0$ , 即水平涡度  $x$  分量的矢量方向与西风方向一致(与  $x$  轴同向),转化在  $x$  坐标系中则相反,有  $\xi < 0$ , 水平涡度  $x$  分量的矢量方向与东风方向一致(与  $x$  轴反向),根据右手定则可知,沿  $x$  轴方向空气微团是呈逆时针旋转的,即  $x$  轴南边相对暖的空气为上升,北边相对冷的空气下沉,考虑到近地面的偏北气流,推知:在风雹地区低层可能存在一个经向垂直环流圈。

用 15~19 日 08 时 5 天平均  $v$  和平均  $\omega$  制作南北向穿过雹区的垂直流场图, 发现雹区低层确实存在一个明显的垂直环流圈(图 3b)。由图中可见, 雹区南边近地面有一支暖气流, 这支气流向北倾斜上升至  $25^{\circ}\text{N}$  附近转为下沉, 到达近地面后又向南流, 至  $22^{\circ}\text{N}$  附近汇入上升气流中, 这样便在雹区上空形成了一个垂直环流圈。由此可以看出, 螺旋度隐含着触发强对流天气的动力条件, 其分布对滇南冰雹大风的出现有一定指示意义。

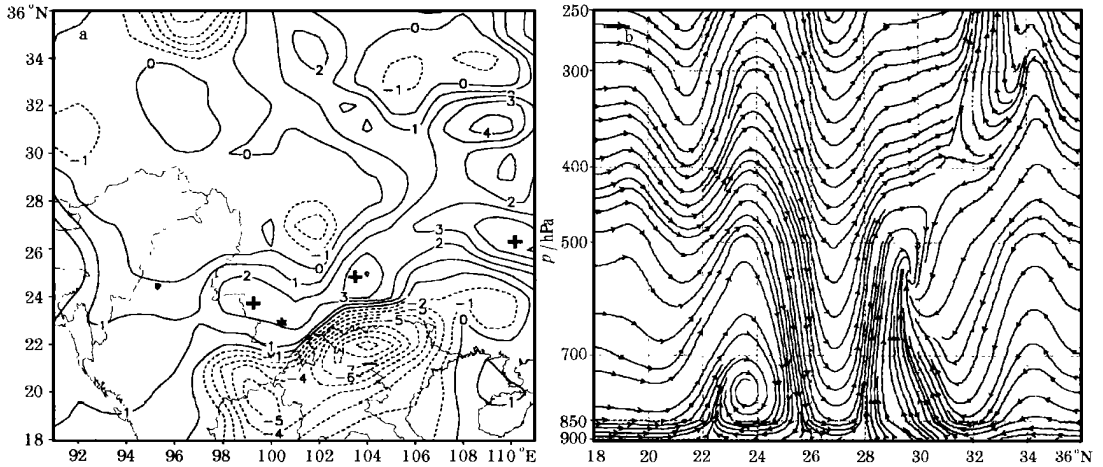


图 3 a. 3 月 15 日 08 时低层螺旋度的水平分布(单位:  $10^{-2}\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ );

b. 沿  $101^{\circ}\text{E}$  穿过雹区的垂直流场(900 hPa 代表地面, 图下粗实线示意雹区经向跨度)

Fig. 3 a. Distribution of helicity at 850~700 hPa at 0800 BST 15 March, 1997(units:  $10^{-2}\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ );

b. Meridional cross-section of stream field through the hail area along  $101^{\circ}\text{E}$

### 3.3 中、高层螺旋度的特征

图 4a、4b 为 3 月逐日 08 时沿  $101^{\circ}\text{E}$  穿过雹区的中、高层螺旋度时间演变, 图中表明: 在冰雹大风日, 滇南地区的中层(700~500 hPa)螺旋度为负值, 这与低层螺旋度的分布相反, 而在高层(300~500 hPa)降雹区又与  $-h$  正值区域对应(图 4b)。从垂直方向来看, 降雹日 08 时滇南地区螺旋度值大致呈低层和高层为正, 中层为负的配置结构。

## 4 强风雹天气中螺旋度分布的物理意义

根据  $p$  坐标中热成风的定义, 则(2)式可写为:

$$h = -(\mathbf{k} \cdot \mathbf{V}_t) \cdot \mathbf{V}_h = \mathbf{V}_h \left( \frac{R}{f} \frac{1}{p} \nabla_p T \right) = - \frac{R}{f} \frac{1}{p} (-\mathbf{V}_h \cdot \nabla_p T)$$

由上式可见, 螺旋度可近似地用温度平流( $-\mathbf{V}_h \cdot \nabla_p T$ )表示, 因此, 螺旋度的分布可以大致反映出大气的热力状况。

风雹过程中, 滇南地区低层和高层大气的螺旋度  $h$  值为正, 因此  $-\mathbf{V}_h \cdot \nabla_p T < 0$ ; 中层  $h$  为负值, 故有  $-\mathbf{V}_h \cdot \nabla_p T > 0$ 。这表示在降雹地区除中层有暖平流之外, 高、低层均有冷平流输送, 为进一步说明, 计算并分析了各层温度平流的分布。图 5 给出 3 月 15 日温度平流的垂直剖面图, 图中表明, 滇南上空 750~400 hPa 之间有深厚的暖平流, 这主要与南支槽前的暖湿气流有关; 在高层, 北部已受冷空气侵袭, 而近地层由于昆明准静止锋的活动, 冷平流已向南输送到  $22^{\circ}\text{N}$  附近。这与螺旋度垂直分布所反映的情况基本相符。从这种平流配置可以看出, 冰雹发生前, 雹区中、低层大气具有上层暖、下层冷的对流稳定性层结。在分析这次冰雹过程中昆

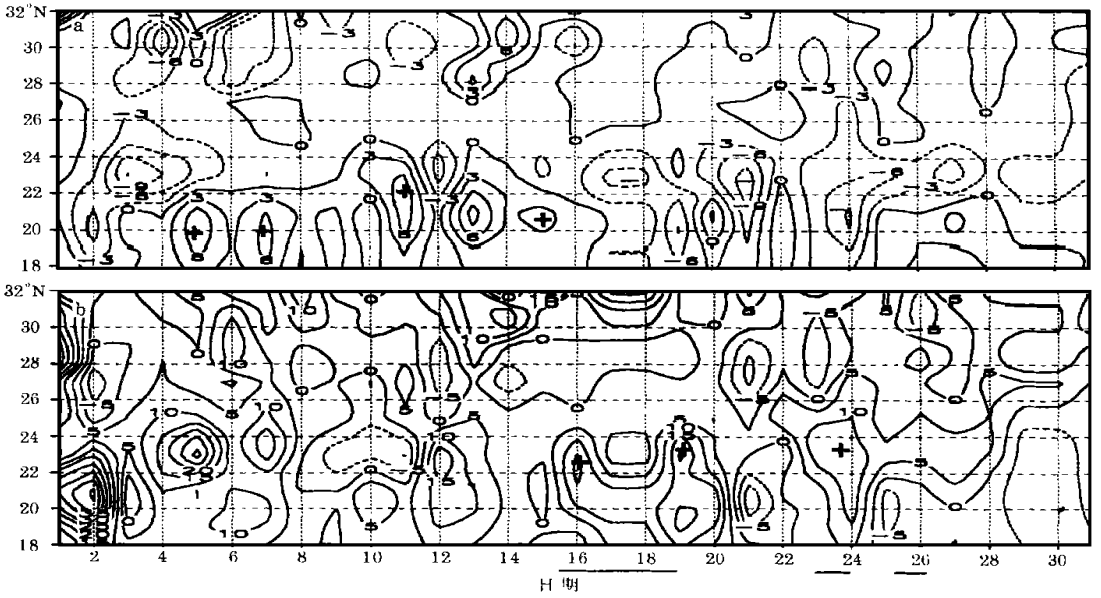


图 4 沿 101°E 穿过雹区中(a)、高(b)层螺旋度的时间演变图  
(图下粗实线为降雹日期,单位:  $10^{-2} \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ )

Fig. 4 Daily evolution of helicity through the hail area along 101°E(units:  $10^{-2} \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ )  
a. at 500~700 hPa; b. at 500~300 hPa

明准静止锋的结构时发现<sup>[7]</sup>: 降雹前的对流稳定性层结是该地低层存在“干暖盖”的反映,“干暖盖”的存在抑制了上下对流以及水汽、热量的交换,却有利于不稳定能量的积累;此时由于降雹区上空存在较强的风垂直切变,大气层结又具有明显的斜压不稳定特征,在垂直环流的作用下,倾斜对流强烈发展,“干暖盖”被穿透,不稳定能量释放产生风雹天气。由此可见,螺旋度不但能反映强对流发生的动力学特征,在一定假设条件下,也反映大气的热力状况,它的分布在某种程度上隐含着滇南春季风雹天气的成因。

### 5 小结

- (1) 08 时低层螺旋度的演变对未来 12 h 风雹天气的发生有一定指示意义。
- (2) 低层螺旋度的大值中心与冰雹大风落区存在一定关系。
- (3) 螺旋度及其分量的分析表明: 雹区低层存在一个垂直环流圈,可为强对流天气提供动力条件。
- (4) 雹区高、低层螺旋度的配置,能反映强对流发生前大气热力条件的垂直分布状况。

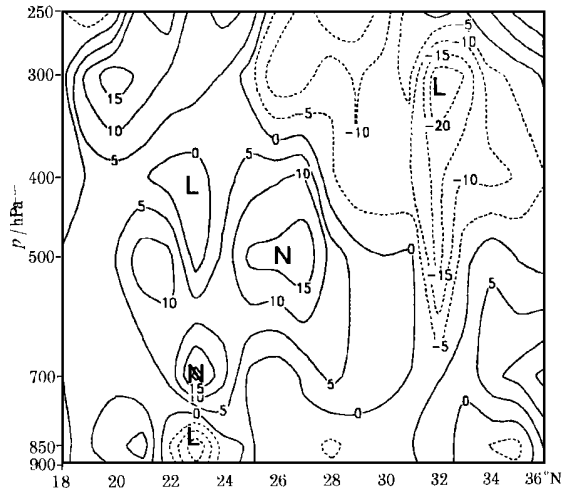


图 5 3 月 15 日 08 时沿 101°E 穿过雹区的温度平流剖面图(图下粗实线为雹区经向跨度,单位:  $10^{-5} \cdot \text{s}^{-1}$ )

Fig. 5 Meridional cross-section of  $-V_h \cdot \nabla_p T$  through the hail area along 101°E at 0800 BST 15 March, 1997 (unit:  $10^{-5} \cdot \text{s}^{-1}$ )

(5) 螺旋度是一个反映动力条件的物理参数, 在一定假设下, 它也相当于一个热力因子。螺旋度在云南春季冰雹大风的分析和预报中具有一定的参考价值。

### 参 考 文 献

- [1] 吕克利, 徐银梓, 谈哲敏. 动力气象学[M]. 南京: 南京大学出版社, 1997. 94- 97
- [2] 吴宝俊, 许晨海, 刘延英, 等. 螺旋度量在分析一次三峡大暴雨中的应用[A]. 应用气象学报, 1996, 7(1): 108- 111
- [3] 章东华, 舒慈勋. 螺旋度概念及其在强对流风暴预报中的应用试验[A]. 空军气象学院学报, 1994, 15(1): 20- 26
- [4] 段 旭, 李 英, 周 毅. 1997 年春季滇南大风冰雹天气环境场分析[A]. 气象, 1998, 24(6): 39- 43
- [5] 伍荣生. 大气动力学[M]. 北京: 气象出版社, 1990. 96- 101
- [6] 丁一汇. 高等天气学[M]. 北京: 气象出版社, 1991. 406- 410
- [7] 李 英, 段 旭. 冰雹天气下昆明准静止锋的结构分析[A]. 云南气象, 1998, (4): 36

## HELICITY ANALYSIS FOR HIGH-WIND AND HAIL PROCESSES OVER SOUTH YUNNAN IN SPRING

LI Ying

(Yunnan Meteorological Observatory, Kunming 650034)

**Abstract:** Helicity analysis was applied to several high-wind and hail processes, which occurred from 15 to 26 March 1997 over South Yunnan in spring. The results show that the change of helicity at the lower level has the indication of severe convection, and the positive maximum center of helicity is close to the central position of the high-wind and hail events. Moreover, the vertical distribution of helicity can reflect some dynamic and thermodynamic features of severe convection.

**Keywords:** south Yunnan; high-wind; hails; helicity