

# 应用雷达产品计算风暴相对螺旋度

王丽荣<sup>1</sup> 胡志群<sup>2</sup> 匡顺四<sup>1</sup>

(1. 河北省石家庄市气象局, 050081; 2. 南京信息工程大学)

**提 要:** 风暴相对螺旋度 (SRH) 反映了一定气层厚度内环境风场的旋转程度和输入到对流体内部环境涡度的多少, 对雷暴、龙卷和大范围暴雨的分析与预报有一定的实用价值。首先探讨了由多普勒天气雷达提供的垂直风廓线 (VWP) 产品计算 SRH 的方法和步骤。根据此方法, 分别计算、分析了暴雨、冰雹、大风三个天气个例的 SRH。结果表明: SRH 与大面积降水过程的暴雨雨强有很好的对应关系, 降水强度的变化滞后 SRH 强度的变化约半小时左右, 可以由 SRH 大致估计降水加强及消亡的时间; SRH 对尺度非常小的冰雹、大风等强对流天气有提前 10~20 分钟的预报作用。应用 VWP 产品计算出的 SRH, 可以作为实际业务工作中暴雨、冰雹、大风等强对流天气的预报因子, 给预测人员预报强对流天气提供宝贵时间。  
**关键词:** 多普勒雷达 垂直风廓线 (VWP) 产品 风暴相对螺旋度 (SRH) 强对流天气

## Calculation of Storm Relative Helicity with Radar Products

Wang Lirong<sup>1</sup> Hu Zhiqun<sup>2</sup> Kuang Shunsi<sup>1</sup>

(1. Shijiazhuang Meteorological Observatory, Hebei Province 050081;  
2. Nanjing University of Information Science & Technology)

**Abstract:** Storm relative helicity (SRH) reflects eddies in environment wind field and surrounding vorticities inputted into convective cell in an air layer, which is useful to analyze and forecast thunderstorm, tornado, large-area heavy rainfall as well. A method and steps of calculating SRH are presented, first, with Doppler radar vertical wind profile (VWP) product. Then, the SRH of three cases of heavy rain, hail, gale are discussed. Results indicate

that the SRH is well corresponding to the intensities of the heavy rain in large area, the change of intensities lags the SRH change about 30 minutes, the time of precipitation strengthening or disappearing, therefore, can be approximately estimated by it. In addition, the SRH has effectivity about 10 to 20 minutes ahead to forecast micro-scale hail and gale, and then the SRH calculated with VWP can be used as a forecast index for strong convective weather such as a heavy rain, hail, gale, etc.

**Key Words:** doppler radar vertical wind profile (VWP) storm relative helicity (SRH) strong convective weather

## 引 言

螺旋度 (helicity) 是近年来引入天气分析和预报的一个重要的物理量, 它的大小反映了旋转与沿旋转轴方向运动的强弱程度, 是一个对天气发展过程诊断和预报相当有用的物理量。后来, Woodall<sup>[1]</sup> 将计算公式中的水平风速改为相对于风暴的风速, 提出了风暴相对螺旋度的概念。许多研究<sup>[2~5]</sup> 表明, 风暴相对螺旋度对雷暴、龙卷和大范围暴雨的分析与预报有一定的实用价值。

以往大都是利用单站探空风资料计算风暴相对螺旋度, 而常规探空观测网距离大于 100km, 且每 12 小时进行一次观测, 这样的空间、时间间隔相对于大多数强对流风暴的生命史来说太长了, 一些强度较弱, 或者范围较小的灾害性天气过程就被忽略或平滑掉了。

目前的多普勒天气雷达每 6 分钟进行一次体积扫描, 可以给用户提供准确的、时间密度大的径向速度资料。本文就是利用多普勒雷达提供的时、空高分辨率的风场资料 (垂直风廓线产品) 来计算风暴相对螺旋度, 将风暴相对螺旋度作为强对流的一个预报参数, 研究其在暴雨、冰雹、大风中的应用。

最后应用该计算方法分别对出现在雷达站附近的暴雨、冰雹、大风三个个例进行了分析。结果表明: 风暴相对螺旋度与暴雨雨

强有很好的对应关系, 对冰雹、大风有提前 10~20 分钟的预报作用。

## 1 风暴相对螺旋度简介

螺旋度是一个用来衡量风暴入流气流的强弱及沿入流方向的涡度分量大小的参数。1961 年 Betch 首先提出了螺旋度的概念, 1978 年 Moffert 将螺旋度定义为风速度矢和涡度矢点积的体积分, 称为局地螺旋度。

后来, Woodall<sup>[1]</sup> 提出了风暴相对螺旋度 (storm relative helicity, 缩写为 SRH) 的概念, 认为只有相对于风暴的螺旋度才真正对风暴维持和发展有实际意义。风暴相对螺旋度异于局地螺旋度在于其表达式中水平风速为相对于风暴的风速。

风暴相对螺旋度的概念提出以后, 即被用于风暴发生环境条件评估及风暴类型的预报研究。在强风暴发生前, 涡度的垂直分量一般比风的垂直切变小一个量级以上, 因而垂直涡度分量相对于水平涡度分量可以忽略掉; 同时, 在强天气发生之前, 可以认为垂直速度本身及其在水平方向上的变化不大, 可以略去。另外, 考虑到风暴入流空气主要来自于对流层低层几公里范围内, Davies Jones 等<sup>[5]</sup> 发展了一个利用单站探空风资料计算低层总体风暴相对螺旋度的公式:

$$H \equiv \int_0^h (\mathbf{V} - \mathbf{C}) \cdot \boldsymbol{\omega}_h dz \quad (1)$$

式中： $V = (u(z), v(z))$  为环境风场； $C = (C_x, C_y)$  为风暴运动速度； $\omega_h = k \times \frac{dV}{dz} = \left(-\frac{\partial v}{\partial z}, \frac{\partial u}{\partial z}\right)$  为水平涡度矢量； $h$  为气层厚度；螺旋度  $H$  的单位是  $m^2 \cdot s^{-2}$ 。

由式 (1) 可见，对于局地中小尺度对流风暴而言，在低层螺旋度可以理解为相对于风暴的风速与风随高度顺转（或逆转）数值的乘积，当风向顺转时，风暴相对螺旋度为正；反之，风暴相对螺旋度为负。其物理意义为：风暴相对螺旋度反映了一定气层厚度内环境风场的旋转程度和输入到对流体环境涡度的多少，其量值反映了旋转沿运动方向运动的强弱。风暴相对螺旋度可以用以估算垂直风切变环境中风暴运动所产生的旋转潜势，也就是说，气流入流层上沿流线方向的涡度可以进入并与上升气流核作用，在风暴的相当深层产生强大持久的旋转。当沿流线方向的强涡度与低层强风暴相对气流相结合时，风暴相对螺旋度或旋转潜势尤其大。

实际工作中常将式 (1) 转换为：

$$H = \sum_{n=0}^{N-1} [(u_{n+1} - C_x)(v_n - C_y) - (u_n - C_x)(v_{n+1} - C_y)] \quad (2)$$

$N$  为计算  $H$  时取环境风的层数。以往的研究，大多用探空资料标准等压面（1000hPa、925hPa、850hPa、700hPa、500hPa、400hPa、300hPa 等）上的风场资料。

风暴运动速度  $C$  目前确定的方法不统一，Maddox<sup>[6]</sup> 估计风暴运动以平均风速 75% 的速度，移向为平均风右侧的  $30^\circ$  方向，这种方法对于北美经典超级单体应用效果较好。我国的研究中，考虑暴雨系统和孤立的强对流系统在尺度、移动等方面的差异，把暴雨区中的强对流系统看做是相对于环境系统准静止或者是缓慢移动的系统。一

般情况下，这种系统的移动与 850~300hPa 的等厚度或者对流层中层的平均风有关，将  $C$  的大小取为 850~300hPa 的平均风  $V$ ，方向定为  $V$  的方向右偏  $40^\circ$ <sup>[7,8]</sup>。

## 2 应用雷达产品计算风暴相对螺旋度方法

### 2.1 多普勒雷达垂直风廓线 (VWP) 产品简介

VWP (VAD WIND PROFILE) 产品是在 VAD 技术的基础上，应用体积扫描资料，得到 30km 的水平区域中不同高度上的平均风向和平均风速<sup>[9]</sup>。应用相继时间的体积扫描资料，将各个高度上计算结果（即每个高度上的平均风向风速）用类似于天气图上的风向杆形式绘在一张图上，横坐标为时间轴，纵坐标为高度轴，即可获得平均风向和平均风速随高度和时间变化的剖面图形（图略），图形与一般天气图中的风向风速表示形式相同。

在 VWP 产品中，每个风向杆是由某个体扫某层高度的一圈探测资料点通过 VAD 技术得到的，每一个资料代表某一时刻、某一圈层的平均风向和平均风速。如果与某高度相应的斜距圈上有资料，但资料点少于 25 个，则在该高度上不显示平均风向风速符号，而是用“ND”字样显示。如果没有资料可供分析，则用“X”符号表示。

### 2.2 应用雷达产品计算风暴相对螺旋度

由 2.1 可知，多普勒天气雷达的 VWP 产品可以提供各个高度层的风向、风速，时空密度远远高于探空资料。本文利用此产品提供的风场信息，计算得到风暴相对螺旋度，主要方法和步骤如下：

(1) 由 VWP 图像产品读出某个体扫每 300m 高度层的风向  $\alpha$ （正北方为  $0^\circ$  度，单

位: 度)、风速  $V$  (单位:  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )。  $h$  取值视 VWP 资料而定, 选取计算时段内均不出现“ND”的最高层, 但一般不低于 3km。风向  $\alpha$  逆时针方向, 按 32 个方位取值。

(2) 由下述公式计算第  $n$  层的环境风分量  $u_n$ 、 $v_n$ <sup>[10]</sup>:

$$\begin{cases} u_n = |V_n| \sin(\alpha_n - 180^\circ) \\ v_n = |V_n| \cos(\alpha_n - 180^\circ) \end{cases} \quad (3)$$

(3) 风暴移动速度  $C$  的确定: 计算时风暴运动速度  $C$  的大小取  $h$  厚度内的平均风速  $V$ , 方向定为平均风向的方向 ( $\beta$ ) 右偏  $40^\circ$ 。即:

$$\begin{cases} C_x = V \sin(\beta + 40^\circ) \\ C_y = V \cos(\beta + 40^\circ) \end{cases} \quad (4)$$

$$\text{式中: } V = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |V_i|, \beta = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \alpha_i, N$$

为读取环境风的层数。

(4) 将  $C_x$ 、 $C_y$  以及逐层的  $u_n$ 、 $v_n$  带入式 (2) 计算该时刻的风暴相对螺旋度  $H$ 。

### 3 实例分析

分别选取石家庄市 2004 年 6 月 15—16 日 (未加特别说明, 全部为北京时) 的暴雨过程、2005 年 5 月 31 日的冰雹以及 2005 年 5 月 21 日的大风过程进行分析。VWP 产品选取新乐多普勒天气雷达站探测的资料。

#### 3.1 暴雨过程

2004 年 6 月 15 日下午到 16 日下午, 受低涡切变的影响, 石家庄出现了大到暴雨<sup>[11]</sup>。雷达站所在的新乐过程降水量为 65.7mm, 逐小时降水量如图 1 虚线所示。

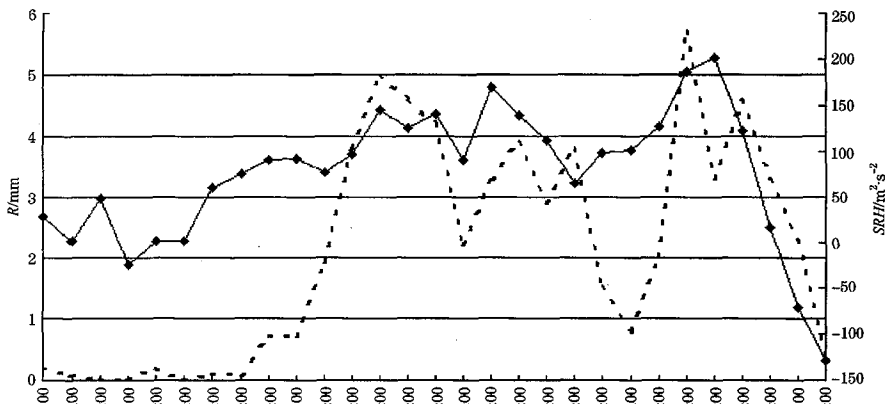


图 1 2004 年 6 月 15 日 13 时—16 日 17 时逐时降水量 (虚线) 和 SRH (实线) 变化

首先由 VWP 产品 (图略) 得到逐时风的分布, 分析时, 取半点前后的数据资料。由 VWP 产品图像看出, 自始至终有风向、风速资料层在 0.6~6.1km 之间, 此即为计算 SRH 的厚度。后期, 中层间或有“ND”层, 计算时风向、风速均取为 0。

图 1 为由上述方法计算得到的 SRH

(实线) 和对应时次内的逐小时降水量 (虚线)。先来看 SRH 的变化: 15 日 18 时之前, SRH 较小, 且有正有负; 19 时开始 SRH 全部大于  $60\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ , 且逐时增大; 16 日 1 时开始增大到  $100\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$  以上, 并一直维持到 14 时, 16 日 13 时最大达到  $202.2\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ ; 14 时以后 SRH 又迅速减

小为负值。

再看降水量的变化：15 日 20 时之前，降水强度非常小，逐时最大降水量才 0.2mm；20 时开始，降水强度逐渐加大；15 日 23 时—16 日 15 时逐时降水量基本维持在 3mm 以上；15 时以后降水减弱停止。

比较降水强度和 SRH 的变化，降水前期：15 日 19 时开始  $SRH > 60\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ ，而雨强 20 时开始加大；降水末期，16 日 15 时  $SRH < 20\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ ，降水 16 时以后停止。可以看出，雨强的变化滞后 SRH 强度变化约半小时左右（因为 VWP 产品取的是半点资料）。因此可以由 SRH 大致估计降水加强及消亡的时间：SRH 随时间由负到正变化，且逐渐加大，是雨强加强的先兆；SRH 持续大于  $100\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ ，较强降水维持；SRH 随时间迅速减小，甚至由正值变为负值，则雨强减弱，降雨很快停止。

### 3.2 冰雹过程

2005 年 5 月 31 日 18:20，受高空冷涡影响，新乐雷达站附近的曲阳站（距雷达站 27km 左右）出现了冰雹天气。图 2 为出现冰雹前后的 VWP 产品分布廓线，表 1 为根据此产品计算的 SRH 的变化。由于冰雹和大风等强对流天气主要是由低层辐合引起的，因此将 SRH 分为上、下两层来计算。下层取 2.1km 以下，上层取 2.1km 以上。

表 1 2005 年 5 月 31 日 17:56—18:33 的 SRH 分布 (单位:  $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ )

	17:56	18:02	18:09	18:15	18:21	18:27	18:33
0.3~2.1km	-1.0	6.4	39.1	36.5	12.7	0	-6.1
2.1~6.1km	17.7	58.7	54.8	35	65.8	169.3	114.5

由图 2 的 VWP 产品分布廓线可以看出，计算 SRH 的最高高度取在 6.1km。分析表 1：冰雹出现前 20 分钟，低层的 SRH

开始由负值转为正值，前 10 分钟又由正的最大值 ( $39.1\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ ) 开始下降，冰雹发生后迅速下降到负值。上层的 SRH 则在冰雹出现前 20 分钟之内一直减小，冰雹发生后迅速增加，最大达到  $169.3\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ 。

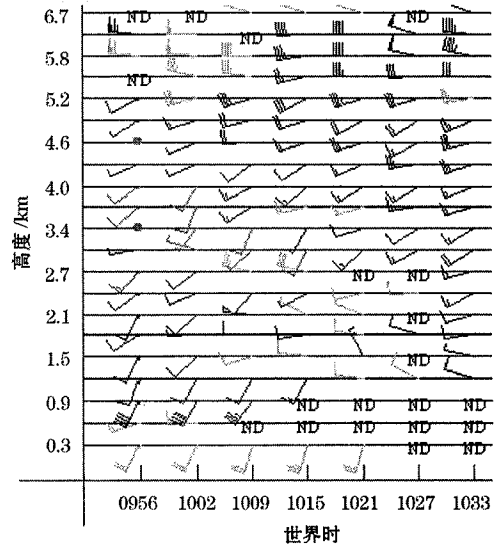


图 2 2005 年 5 月 31 日 17:56—18:33 垂直风廓线 (VWP) 产品

### 3.3 大风过程

2005 年 5 月 21 日 16:28 受冷涡外围云系影响，雷达站所在的新乐出现大风天气。图 3 为出现大风前后的 VWP 产品分布廓线，可以看出计算 SRH 的最大高度取在 6.1km。同冰雹过程一样，分上下两层来计算 SRH，计算结果见表 2。

分析表 2 看到：大风出现前 10 分钟左右，低层的 SRH 迅速由负值 ( $-31.9\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ ) 转为较大正值 ( $142.7\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ )，大风出现前几分钟又开始下降，大风持续期间 SRH 均为正值。上层的 SRH 则在大风出现前以及持续的几分钟之内一直为负值，且在大风出现时达到最大值 ( $-137.3\text{m}^2 \cdot$

$s^{-2}$ ), 大风出现 18 分钟后,  $SRH$  转为正值。

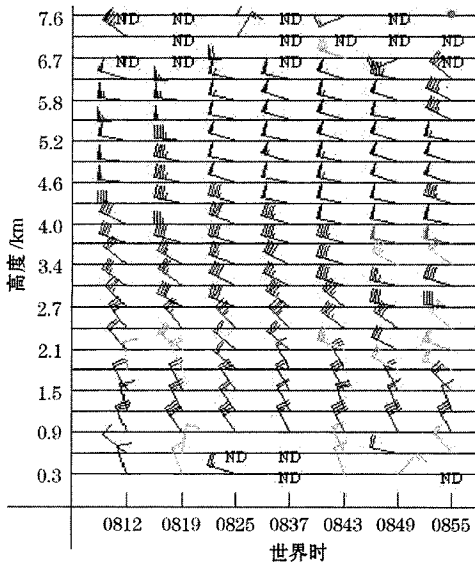


图 3 2005 年 5 月 21 日 16:12—16:55 垂直风廓线 (VWP) 产品

表 2 2005 年 5 月 21 日 15:53—16:55 的  $SRH$  分布 (单位:  $m^2 \cdot s^{-2}$ )

	16:12	16:19	16:25	16:37	16:43	16:49	16:55
0.9~2.1km	-31.9	142.7	97.2	8.2	32.1	5.8	-41.5
2.1~6.1km	-53.7	-77.6	-137.3	-33.8	171.6	72	277.4

### 3.4 综合分析

由上述暴雨两个例的分析可以看出雨强和  $SRH$  有很好的对应关系:  $SRH$  增大, 雨强增强;  $SRH$  减小, 雨强减弱;  $SRH$  维持在  $100m^2 \cdot s^{-2}$  以上, 较强降水维持。降水强度的变化滞后  $SRH$  强度变化, 可以根据  $SRH$  推断降水的生消。暴雨加强、维持时,  $SRH$  一直为正值, 说明风随高度顺转, 有暖平流, 对降水发展非常有利。

冰雹和大风的灾害性天气个例分析可见, 在灾害性天气出现前的 10~20 分钟,

低层的  $SRH$  迅速由负值转为较大正值, 灾害性天气出现后  $SRH$  迅速下降, 甚至变为负值。上层的  $SRH$  的表现与下层相反: 在灾害性天气出现前呈减小趋势, 灾害性天气发生后迅速增大。

这种上、下层配置与对流的发展是一致的。由风暴相对螺旋度的物理意义,  $SRH$  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  $SRH$  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。灾害性天气发生前, 低层有正的涡度输送, 垂直切变加强, 有利于风暴发展, 引发强对流天气出现。灾害性天气发生后, 低层正涡度输送减弱, 甚至转为输送负涡度, 垂直切变减弱, 风暴发展受到抑制, 对流天气结束。

理论上讲, 冰雹或大风天气出现时低层的  $SRH$  应该达到最大, 而在上述的两个个例中则都有所减弱。造成这种情况的原因是: 首先, 出现冰雹或大风等强对流天气时, 在雷达近距离处, 速度回波容易产生距离折叠, 在速度图像上以紫颜色表示 (图略), 在 VWP 产品中则因为较大的回波缺口表示为 “ND”, 这可以从图 2 和图 3 中看到。在计算中取值为 0, 导致  $SRH$  比实际值减小。再者, 利用 VWP 产品得到的是 30km 范围内的平均风, 对于非常小范围的强对流来说, 计算的  $SRH$  有一定的误差。

### 4 结 语

(1) 根据多普勒雷达的垂直风廓线 (VWP) 产品可以计算得到时间密度非常高的风暴相对螺旋度, 在实际业务运行中, 有一定的预报价值。

(2) 由  $SRH$  大小的变化可以推断暴雨雨强的强弱:  $SRH$  增大, 雨强增强;  $SRH$  减小, 雨强减弱; 降水强度的变化滞后

SRH强度变化约半小时左右。SRH对冰雹或大风等强对流天气有10~20分钟的预报提前量。

(3) 通过VWP产品计算出来的SRH, 可以作为实际业务工作中暴雨、冰雹、大风等强对流天气的一个预报因子, 但是, 对产生强对流天气的临界值指标还有待于通过更多的个案, 进一步的分析研究。

(4) 受VWP产品算法的限制, 根据此产品计算的风暴相对螺旋度, 主要适用于雷达站周围30km范围或者水平风场比较均匀的大面积天气过程中的暴雨、冰雹、大风等强对流天气。

#### 参考文献

- 1 Woodall G R. Qualitative forecasting of tornadic activity using storm relative environmental helicity. Preprints, 16th Conf. on Severe Local Storms, Boston, MA, Amer. Meteor. Soc., 1990. 311—315.
- 2 李耀辉, 寿绍文. 旋转风螺旋度及其在暴雨演变过程中的作用. 南京气象学院学报, 1999, 22 (1): 95~102.
- 3 张霞, 周建群, 申永辰等. 一次强冰雹过程的物理机制分析. 气象, 2005, 31 (4): 13~17.
- 4 张芳华, 张涛, 周庆亮等. 2004年7月12日上海飑线天气过程分析. 气象, 31 (5): 47~51.
- 5 Davies Jones R, Burgess D, Foster M. Test of helicity as a tornad forecast parameter. Preprints, 16th Conf. on Severe Local Storms, Boston, MA, Amer. Meteor. Soc., 1990. 588—592.
- 6 Maddox R A. An evaluation of tornado proximity wind and stability data. Mon. Wea. Rev., 1976, 104: 133—142.
- 7 孙伟, 应冲雄. 用螺旋度对一次暴雨过程的分析. 陕西气象, 2001 (4): 14~16.
- 8 胡园春, 戴京笛, 张艳红. 一次暴雨过程的螺旋度场分析. 山东气象, 2005, 25 (1): 17~18.
- 9 胡明宝, 高太长, 汤达章. 多普勒天气雷达资料分析与应用. 北京: 解放军出版社, 2000: 168~169.
- 10 朱乾根, 林锦瑞, 寿绍文等. 天气学原理和方法. 北京: 气象出版社, 1992: 855.
- 11 刘惠敏, 郑兰芝. 螺旋度诊断分析与短时强降水雨量预报. 气象, 2002, 28 (10): 37~40.