

岳彩军,郭煜,寿绍文,等.螺旋度在我国多种灾害性天气研究中的应用进展[J].暴雨灾害,2011,30(2):107-116

## 螺旋度在我国多种灾害性天气研究中的应用进展

岳彩军<sup>1,2</sup>,郭煜<sup>3</sup>,寿绍文<sup>3</sup>,曹钰<sup>3</sup>

(1.中国气象局上海台风研究所,上海 200030;2.中国气象局台风预报技术重点开放实验室,上海 200030;  
3.南京信息工程大学 大气科学学院,南京 210044)

**摘要:**螺旋度是描述大气动力性质的一个重要物理量。伴随着其理论上研究的不断深入,对其应用研究也取得显著进展,尤其在台风、暴雨、暴雪、沙尘暴、强对流等灾害性天气诊断及预报工作中得到了广泛应用。本文对螺旋度理论在上述灾害性天气应用中的研究工作进行了全面、系统地归纳、总结,并对未来关于螺旋度的应用研究工作进行了有意义的展望。

**关键词:**螺旋度;灾害性天气;应用研究

**中图分类号:**P43 **文献标识码:**A **文章编号:**1004-9045(2011)02-0107-10

## Progress in Application Study of Helicity to Severe Weathers

YUE Caijun<sup>1,2</sup>, GUO Yu<sup>3</sup>, SHOU Shaowen<sup>3</sup>, CAO Yu<sup>3</sup>

(1.Shanghai Typhoon Institute of the China Meteorological Administration, Shanghai 200030;  
2.Laboratory of Typhoon Forecast Technique/CMA, Shanghai 200030; 3.School of Atmospheric Sciences,  
Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044)

**Abstract:** Helicity is an important physics reflecting atmospheric dynamics. Along with the helicity theory has been developed and perfected step by step, a marked progress has been made in its application research, more specifically, it has been widely used to diagnose and analyze the genesis of severe weather such as typhoon, torrential rainfall, snow storm, sand-dust storm, severe convection, and so on. It plays a role in weather forecast to some degrees. The application research on helicity to above all disaster weather is reviewed completely and systematically along with a prospective study in this field.

**Key words:** Helicity; Severe weather; Application study

### 1 引言

螺旋度概念最早源自流体力学中研究湍流问题<sup>[1]</sup>。在大气科学中,Lilly<sup>[2]</sup>最早引入到强风暴研究。通常人们所说的螺旋度是指单位体积的螺旋度 $h$ ,定义为 $h=V \cdot \nabla \times V$ ,即螺旋度密度。螺旋度 $h$ 仅是一种描述大气流动 $V$ 某类特征的物理量,仅由 $V$ 所确定,它显示了这样一种特征:在旋转方向上有流动或在流动方向上有旋转,与涡度和散度一起是三种描述大气流动不同特征的物理量,且互为独立。近20年来,我国气象工作者对螺旋度在大气科学中的应用进行了诸多研究。2006年,岳彩军等<sup>[3]</sup>曾对此作了初步综述。近几年,又出现不少有关螺旋度研究的新成果,这里再次作全面

综合。螺旋度不仅考虑了大气旋转的特性,同时又考虑了水平和垂直方向的输送作用,是一个极好的可用于天气预报及分析研究的动力因子。由于大气中许多流动具有螺旋性特征,而螺旋度是表征流体边旋转边沿旋转方向运动的动力性质的物理量,因此,为了揭示螺旋度与大气运动的某些特有现象在动力学、运动学性质之间的内在联系,许多学者从理论上<sup>[4-12]</sup>对螺旋度进行了深入研究。目前,螺旋度种类丰富,主要有完全螺旋度(同时包括了水平螺旋度和垂直螺旋度)、水平螺旋度、风暴相对螺旋度(SRH)(平均风暴相对螺旋度、局地风暴相对螺旋度、旋转风螺旋度、水汽螺旋度)、垂直螺旋度(局地垂直螺旋度(地转螺旋度、地转风螺旋度)、积分垂直螺旋度、湿螺旋散度)、切变风螺

收稿日期:2011-02-16;修订日期:2011-03-30

资助项目:国家自然科学基金项目(40875025、40875030、40921160381);中国气象局2009年气象新技术推广重点项目(09A13)

第一作者:岳彩军,男,1972年生,博士,副研究员,主要从事中尺度动力学、海气相互作用研究。E-mail: yuecaijun2000@163.com

旋度、(第一、二类)热成风螺旋度、超螺旋度等。李耀东等<sup>[13,14]</sup>、郑峰<sup>[15]</sup>、岳彩军等<sup>[3]</sup>、高守亭等<sup>[16]</sup>及孙淑清等<sup>[17]</sup>曾先后从不同角度、不同侧重点对螺旋度理论及应用工作进行了有意义的总结性研究。但是,还有待于对我国螺旋度的应用研究进行全面、系统地总结。

随着螺旋度理论研究的逐步深入,螺旋度在实际天气分析及预报工作中也逐步得到认可并被广泛应用。众所周知,我国地域辽阔,天气现象复杂,台风、暴雨、暴雪、沙尘暴、强对流等灾害性天气频发,给国民经济和人民生命财产造成重大损失。然而,现有的气象业务预报水平对上述灾害性天气的预报水平还很难满足实际需要。因此,为了进一步提高预报能力,认识上述灾害性天气成因、丰富对其预报的手段是非常迫切和必要的。鉴于螺旋度自身诊断特色及其理论研究日趋成熟,因此,其被广泛应用于台风、暴雨、暴雪、沙尘暴、强对流等灾害性天气的分析与预报研究。本文将全面、系统地总结、归纳螺旋度理论在上述多种灾害性天气中应用研究成果,并对未来应用研究工作进行有意义的展望,以期有助于提高螺旋度在多种灾害性天气中的应用水平。

## 2 各种螺旋度简介

### 2.1 完全螺旋度

螺旋度是表征流体边旋转边沿旋转方向运动的动力性质的物理量。螺旋度严格定义为风速和涡度点积的体积分<sup>[1,5]</sup>:

$$H = \iiint_{\tau} \mathbf{V} \cdot \nabla \times \mathbf{V} d\tau \quad (1)$$

其中,  $\mathbf{V}$  为三维风速矢量,  $\nabla$  为三维微分算子,  $\nabla \times \mathbf{V}$  是涡度。

通常人们所说的螺旋度是局地或单位体积的螺旋度  $h$ , 它表示单位体积中所包含的螺旋度, 故又称作螺旋度密度。定义为:

$$h = \mathbf{V} \cdot \nabla \times \mathbf{V} \quad (2)$$

为了区别起见, (1) 式中  $H$  称为总螺旋度, (2) 式中  $h$  称为完全螺旋度。

采用相对涡度矢量代替绝对涡度矢量,  $z$  坐标系中的完全螺旋度定义为<sup>[18,19]</sup>:

$$\begin{aligned} h &= \left( \frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial z} \right) u + \left( \frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial x} \right) v + \left( \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right) w \\ &= h_x + h_y + h_z \end{aligned} \quad (3)$$

采用与 (3) 式相似的定义方式, 可直接将  $p$  坐标系的完全螺旋度定义为<sup>[20,21]</sup>:

$$h = \left( \frac{\partial \omega}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial p} \right) u + \left( \frac{\partial u}{\partial p} - \frac{\partial \omega}{\partial x} \right) v + \left( \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right) \omega$$

$$= h_x + h_y + h_p \quad (4)$$

式 (3)、式 (4) 中,  $h_x$ 、 $h_y$  以及  $h_z$ 、 $h_p$  分别代表完全螺旋度  $h$  在  $i$ 、 $j$  以及  $k$  三个方向的分量。且  $h_{xy} = h_x + h_y$  称为水平螺旋度,  $h_z$ 、 $h_p$  称为垂直螺旋度。

### 2.2 风暴相对螺旋度 (SRH)

#### 2.2.1 风暴相对螺旋度定义

为了定量描述沿气流方向上的水平涡度大小与入流强弱对风暴旋转性的贡献, 提出了“风暴相对螺旋度 (Storm Relative Helicity, 简称 SRH)”的概念, 即风暴相对螺旋度是一个用来衡量风暴入流强弱以及沿入流方向上的水平涡度分量的参数, 定义为<sup>[2,22]</sup>:

$$SRH = \iiint_{\tau} (\mathbf{V} - \mathbf{C}) \cdot \nabla \times \mathbf{V} d\tau \quad (5)$$

其中,  $\mathbf{V}$ 、 $\mathbf{C}$  分别为三维的环境风矢量和风暴的移动速度,  $\nabla \times \mathbf{V}$  为三维的相对涡度。

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, 故对于气层厚度为  $h$  的风暴相对螺旋度可定义为:

$$SRH = \int_0^h (\mathbf{V} - \mathbf{C}) \cdot \boldsymbol{\omega} dz \quad (6)$$

其中,  $\boldsymbol{\omega} = \nabla \times \mathbf{V} = \left( \frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial z} \right) \mathbf{i} + \left( \frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial x} \right) \mathbf{j} + \left( \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right) \mathbf{k}$ 。由于  $\boldsymbol{\omega} \approx \boldsymbol{\omega}_h = \mathbf{k} \times \frac{\partial \mathbf{V}_h}{\partial z}$ , 其中  $\mathbf{V}_h = (u(z), v(z))$  为水平环境风场,  $\boldsymbol{\omega}_h = \mathbf{k} \times \frac{\partial \mathbf{V}_h}{\partial z}$  为水平涡度矢量, 因此, (6) 式可简化为:

$$SRH = \int_0^h (\mathbf{V}_h - \mathbf{C}) \cdot \boldsymbol{\omega}_h dz \quad (7)$$

其中,  $\mathbf{C} = (C_x, C_y)$  为风暴传播速度。

风暴相对螺旋度可以理解为由低层大气中相对于风暴的风速与风随高度顺转的乘积。大的正值螺旋度是有利于长生命期对流风暴发生发展的环境条件。

#### 2.2.2 平均风暴相对螺旋度

(1) 整层平均风暴相对螺旋度 (ASRH)<sup>[23]</sup>:

$$\begin{aligned} ASRH &= \frac{1}{h} \int_0^h (\mathbf{V}_h - \mathbf{C}) \cdot \boldsymbol{\omega}_h dz \\ &= \frac{1}{h} \int_0^h (\mathbf{V}_h - \mathbf{C}) \cdot \mathbf{k} \times \frac{\partial \mathbf{V}_h}{\partial z} dz \end{aligned} \quad (8)$$

(2) 分别考虑低层入流旋转、高层出流旋转的平均风暴螺旋度<sup>[23]</sup>:

① 低层平均风暴相对螺旋度 (ASRH1)

$$\begin{aligned} ASRH1 &= \frac{1}{h_l - h_{1000}} \int_{h_{1000}}^{h_l} (\mathbf{V}_h - \mathbf{C}) \cdot \boldsymbol{\omega}_h dz \\ &= \frac{-1}{h_l - h_{1000}} \int_{h_{1000}}^{h_l} \mathbf{k} \cdot (\mathbf{V}_h - \mathbf{C}) \times \frac{\partial \mathbf{V}_h}{\partial z} dz \end{aligned} \quad (9)$$

其中,  $h_{1000}$  是 1000 hPa 的高度,  $h_1$  是在积分下限 1000 hPa 之上, 其散度必须小于零的条件下, 由下而上积分的第一个无辐散层的位势高度。

② 高层平均风暴相对螺旋度 (ASRH2)<sup>[23]</sup>

$$ASRH2 = \frac{1}{h_2 - h_{1000}} \int_{h_{1000}}^{h_2} (\mathbf{V}_h - \mathbf{C}) \cdot \boldsymbol{\omega}_h dz$$

$$= \frac{-1}{h_2 - h_{1000}} \int_{h_{1000}}^{h_2} \mathbf{k} \cdot (\mathbf{V}_h - \mathbf{C}) \times \frac{\partial \mathbf{V}_h}{\partial z} dz \quad (10)$$

其中,  $h_{1000}$  是 100 hPa 的高度,  $h_2$  是在积分下限 100 hPa 之上, 其散度必须小于零的条件下, 由上而下积分的第一个无辐散层的位势高度。

2.2.3 局地风暴相对螺旋度

如果风暴相对螺旋度不考虑垂直方向的积分, 则得到局地风暴相对螺旋度 (SRHD)<sup>[11]</sup>, 即:

$$SRHD = (\mathbf{V}_h - \mathbf{C}) \cdot \boldsymbol{\omega}_h = (\mathbf{V}_h - \mathbf{C}) \cdot \mathbf{k} \times \frac{\partial \mathbf{V}_h}{\partial z} \quad (11)$$

由 (6) — (11) 式知, 风暴相对螺旋度和平均风暴相对螺旋度指的是一定气层厚度内螺旋度的总的大小和平均大小。局地风暴相对螺旋度是某一高度的单位气层厚度内的总螺旋度大小, 可以分析其空间变化特征。

此外, 用无辐散风来计算风暴相对螺旋度, 则得到旋转风螺旋度<sup>[24]</sup>。在风暴相对螺旋度的基础上, 考虑水汽因子, 则得到水汽螺旋度<sup>[25]</sup>。

2.3 垂直螺旋度

垂直螺旋度是垂直涡度和垂直速度的积, 它的大小反应了垂直方向上旋转与沿旋转轴方向运动的强弱程度。其中, 垂直涡度大的系统与剧烈大气现象联系紧密, 垂直速度是实际大气中造成大气现象最直接的原因。单有涡旋缺乏垂直上升运动, 大气辐散辐合, 天气现象不会发生; 而单有垂直上升运动缺乏涡旋, 大气辐散辐合, 运动难以维持, 系统持续时间不长、影响小。垂直螺旋度充分反映了两个与天气现象紧密联系的物理量的配合情况, 在一定程度上不仅能反映系统的维持状况, 还能反映系统发展、天气现象的剧烈程度。

通常情况下, 垂直螺旋度在  $z$  坐标系、 $p$  坐标系中的计算表达式分别定义为<sup>[20,21]</sup>:

$$h_z = \left( \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right) w = w\zeta \quad (12)$$

$$h_p = \left( \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right) (-\omega) = -\omega\zeta \quad (13)$$

(12) 式是在  $z$  坐标系中对垂直螺旋度的直接定义且符合右手准则, 类似地, (13) 式 (不含负号部分) 是在  $p$  坐标系中对垂直螺旋度的直接定义, 但同时又考虑到右手准则的判别习惯, 于是又加上了负号。式

(12) — (13) 有时又称为局地垂直螺旋度。

对于 (12) 式、(13) 式来讲, 若用地转涡度  $\zeta_g$  代替实测风涡度铅直分量  $\zeta$ , 则可得到地转垂直螺旋度<sup>[21]</sup>; 若用地转风  $V_g$  替代实测风  $V$ , 则可得到地转风垂直螺旋度<sup>[6]</sup>, 但二者物理意义存在不同。

此外, 通过考虑水汽因子, 还得到了  $p$  坐标系中的湿螺旋散度<sup>[26]</sup>, 即:

$$F_{700} = \omega\zeta \nabla \cdot (\mathbf{V}q) = \omega \left( \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right) \left[ \frac{\partial (uq)}{\partial x} + \frac{\partial (vq)}{\partial y} \right] \quad (14)$$

其中,  $q$  为比湿。  $F_{700}$  为在垂直螺旋度的基础上进一步考虑了水汽通量散度。其在  $2 \times 10^{-14}$  hPa/s<sup>3</sup> 以上一般会有暴雨, 并且一般情况下正值越大, 降水越强。

为了在实际应用中, 特别是在大量使用我国数值预报产品时, 计算方便, 定义  $p$  坐标系中积分垂直螺旋度的计算表达式为<sup>[27]</sup>:

$$h_{pi} = - \int \omega \left( \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right) dp \quad (15)$$

简单地说, 积分垂直螺旋度  $h_{pi}$  就是局地垂直螺旋度  $h_p$  在一定约束条件下沿垂直方向上的积分。相对于局地垂直螺旋度  $h_p$  来讲, 计算工作量明显减小了, 天气意义也较为明确。通过计算局地垂直螺旋度  $h_p$  可以得到每一层的垂直螺旋度, 因此也造成计算量相对较大, 但如果想细致了解天气现象过程中螺旋度垂直剖面结构, 那么逐层计算局地垂直螺旋度  $h_p$  还是较为合适的。

2.4 切变风螺旋度及热成风螺旋度

切变风螺旋度定义为风速垂直切变与绝对涡度矢量的点积, 表示风速垂直方向的分布不均匀对涡管的扭转效应, 由扭转项和垂直涡度的辐合辐散项两部分组成。热成风螺旋度是在切变风螺旋度的基础上利用地转关系和热成风关系得出的简化形式, 其强度和符号取决于上升气流和暖湿空气的配置。

2.4.1 切变风螺旋度

基于 (2) 式完全螺旋度定义, 利用风速垂直切变替换风场, 考虑绝对涡度场, 则得到切变风螺旋度, 具体定义为<sup>[28-30]</sup>:

$$h_s = \boldsymbol{\omega}_a \cdot \frac{\partial \mathbf{V}}{\partial z} \quad (16)$$

其中,  $\boldsymbol{\omega}_a = \left( \frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial z} \right) \mathbf{i} + \left( \frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial x} \right) \mathbf{j} + \left( \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} + f \right) \mathbf{k}$  为绝对涡度。

(16) 式表示由于风速垂直切变对涡管的扭转, 可以使得水平涡度向垂直涡度转换。而垂直涡度发展与天气系统的发展密切相关。

2.4.2 第一类热成风螺旋度

第一类热成风螺旋度<sup>[28-31]</sup>是水平风速取地转近似

的切变风螺旋度,即:

$$h_1 = \omega_{\text{qth}} \cdot \frac{\partial \mathbf{V}_{hg}}{\partial z} + (\zeta + f) \frac{\partial w}{\partial z} \quad (17)$$

其中,  $\omega_{\text{qth}} = \left( \frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\partial v_g}{\partial z} \right) \mathbf{i} + \left( \frac{\partial u_g}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial x} \right) \mathbf{j}$ ,  $\mathbf{V}_{hg} = u_g \mathbf{i} + v_g \mathbf{j}$ ,  $\zeta = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y}$ 。

利用热成风关系式:  $\frac{\partial u_g}{\partial z} = -\frac{g}{f} \frac{\partial \ln T}{\partial y}$  及  $\frac{\partial v_g}{\partial z} = \frac{g}{f}$

$\frac{\partial \ln T}{\partial x}$ , 则(17)式变为:

$$h_1 = -\frac{g}{f} (\nabla \ln T \cdot \nabla w) + (\zeta + f) \frac{\partial w}{\partial z} \quad (18)$$

第一类热成风螺旋度  $h_1$  是在热成风关系成立的前提下得到的,其大小反映的是涡度与风速垂直切变之间的配置对涡度变化的影响。

#### 2.4.3 第二类热成风螺旋度

第二类热成风螺旋度  $h_2$  定义为<sup>[31]</sup>:

$$h_2 = -u \frac{\partial v}{\partial z} + v \frac{\partial u}{\partial z} \quad (19)$$

(19)式表征了水平环境风垂直切变形成的水平涡管和天气系统风矢的纽结。

采用地转风( $u_g, v_g$ )代替( $u, v$ ),并考虑热成风关系:  $\frac{\partial u_g}{\partial z} = -\frac{g}{f} \frac{\partial \ln T}{\partial y}$  及  $\frac{\partial v_g}{\partial z} = \frac{g}{f} \frac{\partial \ln T}{\partial x}$ , 则(19)式变为:

$$h_2 = -u \frac{\partial v_g}{\partial z} + v \frac{\partial u_g}{\partial z} = -\frac{g}{fT} \left( u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right) \quad (20)$$

由(20)式可以看出,  $h_2$  能反映温度场水平不均匀分布产生的风垂直切变和风矢之间的相互作用,相当于温度平流的作用,可以大致反映出大气的热力状况。

#### 2.5 超螺旋度

基于(2)式完全螺旋度定义,利用涡度场替换风场,则得到超螺旋度,具体定义为<sup>[9]</sup>:

$$h = (\nabla \times \mathbf{V}) \cdot \nabla \times (\nabla \times \mathbf{V}) \quad (21)$$

超螺旋度在流体粘性作用的影响下,可反映出螺旋度密度空间积分的时间变化趋势,负的超螺旋度可使螺旋度增加。

### 3 螺旋度在台风研究中的应用

我国海岸线绵长,是受台风影响最为严重的国家之一。台风是一个强气旋性涡旋,它的中下层近中心区处是上升运动,而上层中心是反气旋弱下沉,因而整体犹如“正螺旋度流体”。1999年,陈华等<sup>[32]</sup>将螺旋度概念引入热带气旋,对热带气旋螺旋度的结构特征及其在热带气旋发展过程中的演变过程研究表明,热带气旋这种具有较强螺旋性的天气系统,其发展过程

也就是螺旋度增强过程。螺旋度对热带气旋稳定过程的维持及其长久的生命期具有重要的作用。Yang等<sup>[33]</sup>利用完全螺旋度诊断分析了0505号“海棠”台风非对称结构。余贞寿等<sup>[34]</sup>对0709超强台风“圣帕”特大暴雨过程进行了完全螺旋度分析,并探讨各垂直层上水平螺旋度与强降水时间演变的关系、水平螺旋度与强降水落区的关系以及垂直螺旋度时间演变与强降水发生、发展的关系。杨宇红等<sup>[35]</sup>用风暴相对螺旋度诊断分析0418号台风“艾利”造成福建省特大暴雨的物理成因表明,台风暴雨区位于总风暴相对螺旋度中心。陈艳等<sup>[36]</sup>对0509号台风“麦莎”造成2005年8月8—10日期间河北东部地区大暴雨天气过程进行局地风暴相对螺旋度、风暴相对螺旋度分析表明,局地风暴相对螺旋度极大值中心对未来强降水区有一定指示作用,强降水区发生在风暴相对螺旋度的大值中心或其东南部的等值线密集区域。范学峰等<sup>[37]</sup>用积分垂直螺旋度对0418号台风“艾利”造成河南东部大暴雨过程作诊断分析指出,对流层低层螺旋度为正、高层为负的配置关系,同时还指出,925 hPa垂直螺旋度大值带的移动和发展能示踪倒槽位置,且对暴雨落区有较好指示意义。章征茂等<sup>[38]</sup>用垂直螺旋度诊断分析0510号台风“珊瑚”在2005年8月14—15日期间造成湖北十堰市一次大暴雨过程表明,螺旋度正值中心的出现对未来3 h强降水出现有一定预示作用,螺旋度正值对暴雨落区有较好的指示性,主要暴雨区出现在螺旋度正值中心前方。此外,杜小玲等<sup>[31]</sup>利用第二类热成风螺旋度,研究2001年8月5—6日发生在上海地区的热带低压特大暴雨(简称“0185”)维持机理。上述分析表明,螺旋度理论在台风结构、台风暴雨等方面有着很好的应用,且取得了有意义发现。

### 4 螺旋度在暴雨研究中的应用

我国地源辽阔,暴雨直接带来的洪水及其引发的泥石流等次生自然灾害,常常给国民经济、人民生命财产造成重大损失。暴雨形成的主要条件是上升运动和水汽供应。而形成暴雨的各种天气系统,多数具有气旋性涡度和上升运动,由此考虑螺旋度来综合。杨越奎等<sup>[19]</sup>用完全螺旋度分析1991年7月长江中下游地区梅雨锋暴雨表明,500 hPa螺旋度演变与未来24 h雨量变化有较好对应关系,且垂直螺旋度水平分布与同期雨区的恰当配合,有利于暴雨系统发展及暴雨维持。侯瑞钦等<sup>[39]</sup>对1998年7月20—23日湖北特大暴雨过程进行完全螺旋度诊断分析指出,与强暴雨区和切变线低涡相应的是一对符号相反而又紧邻的螺旋度带,它们的垂直结构是一对符号相反而又互伴的螺

旋度柱。其实,风暴相对螺旋度在暴雨研究中有着广泛应用。寿绍文等<sup>[40]</sup>用风暴相对螺旋度诊断研究 1991 年 7 月上旬贵州地区暴雨过程物理机制指出,暴雨发生发展与风暴相对螺旋度增强等过程密切相关,较大螺旋度对应较大降水,当强降水发生时,相对螺旋度常处于峰值。郑峰等<sup>[41]</sup>利用风暴相对螺旋度对 2001 年 8 月 3—4 日发生在浙南闽北东风波及其诱生中尺度低涡暴雨过程诊断分析表明,螺旋度大值中心强度和位置的演变较好地反映了暴雨落区和中尺度低涡的诱生、移动,且螺旋度时空演变对暴雨发生有一定预示意义。慕建利等<sup>[42]</sup>对 2002 年 6 月 8—9 日发生在陕西省和四川北部一次突发性大暴雨过程进行了风暴相对螺旋度诊断分析。郑仙照等<sup>[43]</sup>对 2002 年 8 月 10—11 日闽东一次暴雨过程进行风暴相对螺旋度分析表明,暴雨中心位于低层正螺旋度中心附近,而且雨强变化与正螺旋度变化近于一致。陈艳等<sup>[44]</sup>对 2003 年 10 月 10—12 日华北地区一次罕见秋季大暴雨进行风暴相对螺旋度诊断分析表明,大暴雨中心位于低层局地风暴螺旋度大值中心南部等值线密集区。廖胜石等<sup>[45]</sup>应用风暴相对螺旋度分析 2003 年 7 月 4—5 日一次江淮梅雨暴雨过程指出,螺旋度分布和时间演变很好地反映了中低层中尺度低涡发生发展演变情况。针对此次暴雨过程,王颖等<sup>[25]</sup>利用水汽螺旋度进行了诊断分析。覃丽等<sup>[46]</sup>用风暴相对螺旋度诊断分析 2005 年 5 月 9 日华南暖区暴雨过程指出,较大螺旋度可用来判断降水系统的形成和移动。覃丽等<sup>[47]</sup>还对 2005 年 4 月 25 日一次“北涡南槽”型广西强降水过程进行风暴相对螺旋度诊断分析,发现螺旋度对强降水落区以及造成强降水的中尺度系统发展有较好指示性。周慧等<sup>[48]</sup>对 2005 年 5 月 31 日湖南新邵一次特大暴雨进行风暴相对螺旋度诊断分析表明,螺旋度对特大暴雨预报有指示意义,特大暴雨产生在低层正螺旋度中心与高层负螺旋度中心相配合区域。针对 2003 年 6 月 24—25 日江南地区出现的一次特大暴雨过程,张芳华等<sup>[49]</sup>计算分析了 1000—700 hPa 气层内各层局地风暴相对螺旋度表明,低涡切变线上局地风暴相对螺旋度大值中心对应强降水中心预报有一定指示意义。黄勇等<sup>[23]</sup>利用平均风暴相对螺旋度  $ASRH$  诊断分析 2003 年 6 月 30 日至 7 月 4 日发生在江淮地区、河南和陕西一带的一次大暴雨过程表明,当高低层  $ASRH$  匹配较好时, $ASRH$  大值中心及其演变较好地对应暴雨中心位置及演变。垂直螺旋度在暴雨研究中也备受青睐。吴宝俊等<sup>[20,21]</sup>用(地转)垂直螺旋度分析 1982 年 7 月 16 日三峡区间(重庆至宜昌间)特大暴雨表明,大暴雨区上空螺旋度呈现“上负下正”型分布。杨晓霞等<sup>[50]</sup>对

1996 年 6—7 月山东省境内 3 次不同系统产生的大暴雨天气过程进行垂直螺旋度分析表明,暴雨区上空 700 hPa 以下螺旋度为正,300 hPa 以上为负。暴雨产生在低层正螺旋度中心与高层负螺旋度中心相配合、中低层高温高湿和有对流不稳定能量储存的高能舌区。杨克明等<sup>[51]</sup>利用垂直螺旋度对 2004 年 7 月 16—17 日出现在河南中东部、鲁西和皖北的一次特大暴雨过程诊断分析表明,暴雨区上空对流层中下层和上层螺旋度呈“下正上负”的垂直结构,螺旋度正的大值区与强降水区有很好的对应关系,对暴雨落区预报有指示意义。方建刚等<sup>[52]</sup>利用垂直螺旋度分析 2005 年 9 月 26 日至 10 月 3 日秦岭近邻地区连阴雨中暴雨成因表明,螺旋度强度变化对暴雨发生发展有一定指示意义,暴雨发生前对流中底层有较大螺旋度值,且呈下正上负垂直结构,暴雨一般发生在对流层低层螺旋度正值中心的前方。上述研究揭示出暴雨区上空螺旋度呈现“上负下正”型分布特征。也有很多研究发现,700 hPa 螺旋度对暴雨落区及强度有很好的指示作用。黄泓等<sup>[53]</sup>对 1998 年 8 月 5—6 日我国东北地区一次降雨过程进行垂直螺旋度诊断分析表明,暴雨发生时,强降水出现在 700 hPa 螺旋度为负、200 hPa 为正的区。在暴雨过程中,700 hPa 负螺旋度分布与雨团演变有很好的对应关系,负螺旋度的形状决定了降水区域的大致形状,大的降水中心与负螺旋度的大值中心相对应,当该雨团分裂时,螺旋度的等值线也会分裂成几个相应的闭合中心。丁建军等<sup>[54]</sup>对 2003 年 7 月 31 日宁夏固原暴雨过程进行垂直螺旋度诊断分析表明,700 hPa 螺旋度正值区对预报低涡移动有很好指示性意义,且降水中心位于正螺旋度轴线略偏北地区。马鸿青等<sup>[55]</sup>用垂直螺旋度分析 2009 年 5 月 8—10 日河北中南部一次大暴雨过程指出,同一经度相邻正负螺旋度中心存在有利于正螺旋度区域暴雨强度增大。金琪等<sup>[56]</sup>计算分析 2005 年 6 月 25—27 日湖北省暴雨到大暴雨过程中垂直螺旋度演变分布特征表明,700 hPa 螺旋度强弱变化及移动与暴雨落区和强度有很好一致性,对强降水预报有一定启示作用。胡燕平等<sup>[57]</sup>对 2007 年 7 月 5 日和 14 日沙澧河流域两场大暴雨过程诊断对比分析表明,700 hPa 正垂直螺旋度中心移向和强度变化与降水落区及趋势变化有很好对应关系,暴雨区出现在正垂直螺旋度中心移动前方,对流域大暴雨落区有一定指示意义。此外,刘惠敏等<sup>[27]</sup>计算分析安徽省 2000 年及 2001 年汛期 6 月、7 月逐日 6 h 积分垂直螺旋度场发现,在配合考虑高层螺旋度的情况下,低层垂直螺旋度可以很好地反映降水落区,尤其是暴雨落区。李耀辉等<sup>[24]</sup>利用旋转风螺旋度诊

断分析 1991 年 7 月 5—6 日江淮梅雨锋暴雨过程成因指出,正旋转风螺旋度大值中心及其演变较好地对应和反映了暴雨中心及造成暴雨的中尺度涡旋的发生位置及演变,较大螺旋度值是暴雨及低层中尺度低涡和地面气旋系统发生发展的机制之一。螺旋度强度变化对暴雨发生有一定指示意义。黄治勇等<sup>[58]</sup>对 2006 年 5 月 8 日湖北省东南部大暴雨过程分析表明,风暴相对螺旋度对强降水发生、发展有较好潜势预报指示意义。张端禹等<sup>[59]</sup>应用湿螺旋度诊断分析 2006 年 5 月 24 日夜间江汉平原南部一场突发性大暴雨、局部特大暴雨过程指出,特大暴雨发生之前低层正值湿螺旋散度增加明显。王东海等<sup>[30]</sup>基于 WRF 模式对 2007 年 7 月 9—10 日一次东北冷涡暴雨过程的模拟资料,诊断分析了此次降水过程中的切变风螺旋度和热成风螺旋度,结果表明,降水中心位于切变风螺旋度的正值和负值区的边界,热成风螺旋度也能较好地诊断降水和对流(尤其是强降水和强对流)的发展。可见,螺旋度用于暴雨研究取得了很多意义的发现。

## 5 螺旋度在暴雪研究中的应用

一般来讲,暴雪天气出现并不频繁,但随着国民经济的快速发展,雪灾的破坏性却越发明显。开展暴雪研究有助于防灾减灾。康志明等<sup>[60]</sup>分析 2005 年 10 月青藏高原特大暴雪成因指出,高原上空垂直螺旋度“下正上负”垂直结构与强暴雪有密切关系。而与此相反的是,赵桂香等<sup>[61]</sup>用垂直螺旋度对 2006 年 1 月 18—19 日(下称第一类)和 2 月 26—27 日(下称第二类)山西省中南部两次暴雪天气过程对比分析表明,垂直螺旋度分布均存在中高层为正、低层为负的特征,但出现时间、强度和分布形式上均存在明显差异,螺旋度强度变化对第一类暴雪出现有明显先兆意义,而对第二类暴雪则不明显。可见,不同个例之间,螺旋度的垂直分布特征也会存在明显差异。此外,马秀玲等<sup>[62]</sup>诊断分析 2007 年 3 月 3—4 日华北地区一次局地暴雪过程指出,垂直螺旋度的高低空配置和时空变化是暴雪天气发生、发展的动力条件。上述研究表明,我国气象学者目前主要使用垂直螺旋度开展暴雪天气研究。

## 6 螺旋度在沙尘暴研究中的应用

沙尘暴天气是一种严重的灾害性天气现象,它的发生不仅给工农业生产、交通运输带来危害,而且还造成严重的大气污染,威胁到人们的生存环境,因而迫切需要对沙尘暴天气进行研究。目前,螺旋度也同样是开展沙尘暴研究的主要工具之一。陶健红等<sup>[63]</sup>、王劲松等<sup>[64]</sup>对 2000 年春季我国西北“4.12”沙尘暴进行垂

直螺旋度诊断分析表明,沙尘暴区上空螺旋度垂直分布为高层负值、低层正值,且高层螺旋度负值的演变与沙尘暴的出现有一定对应关系,可为沙尘暴预报提供参考依据。申红喜等<sup>[65]</sup>对 2000 年 4 月 6 日和 4 月 9 日北京地区两次沙尘(暴)天气过程的垂直螺旋度对比分析指出,沙尘暴区上空垂直螺旋度垂直分布为高层为负值、低层为正值,且对流层中低层(700 hPa、500 hPa)螺旋度正大值区与沙尘暴区具有较好一致性,对沙尘暴预报有一定指示意义。杨莲梅等<sup>[66]</sup>用垂直螺旋度分析 2003 年 4 月 8—9 日南疆盆地翻山型沙尘暴表明,沙尘暴区上空螺旋度垂直分布低层为正值、高层为负值,揭示出强的旋转上升运动是大范围沙尘暴发生的动力条件。上述研究表明,沙尘暴区上空螺旋度呈高层负值、低层正值分布特征。许多研究也表明,螺旋度与沙尘暴出现存在一定对应关系,有很好的指示作用。王建鹏等<sup>[67]</sup>用垂直螺旋度诊断分析 2001 年 4 月 8—9 日西北地区强沙尘暴天气过程表明,螺旋度量值演变与沙尘暴出现有一定对应关系,分析螺旋度特征可以进一步判断沙尘暴的爆发时间、持续过程和移动路径,为准确预报沙尘暴提供参考依据。王益柏等<sup>[68]</sup>用完全螺旋度、垂直螺旋度诊断分析了 2002 年 3 月 18—22 日华北地区强沙尘暴过程,重点研究了北京及周边地区水平与垂直方向螺旋度和完全螺旋度的结构变化及演变特征,结果表明,螺旋度的演变与强沙尘暴天气的发生、发展有较好的对应关系。众所周知,沙尘暴先是垂直“起沙”、“扬沙”,再是沙尘水平传输,垂直螺旋度只能“起沙”,沙尘直上云霄。水平螺旋度既可“起沙”,又可水平传输。王锡稳等<sup>[69]</sup>对 2003 年 7 月 20 日甘肃河西走廊一次区域性夏季沙尘暴天气进行水平螺旋度分析表明,水平螺旋度对夏季沙尘暴预报有较好指示意义,螺旋度正值越大,沙尘暴越强。程鹏等<sup>[70]</sup>分析 2009 年 4 月 29 日甘肃河西走廊区域性强沙尘暴天气过程指出,水平螺旋度对沙尘暴爆发区有较好指示意义。李岩瑛等<sup>[71]</sup>基于 2002—2006 年高空流场和地面观测资料,通过计算近地面至 500 hPa 风暴相对螺旋度,来探讨风暴相对螺旋度与沙尘暴的动力学关系,结果表明,风暴相对螺旋度负值中心值越大,500 hPa 到近地面风速越大,西风增强,风速垂直切变越大,辐合上升运动越强,形成沙尘暴的强度就越强。风暴相对螺旋度负值中心常常在河西走廊附近最强,导致其下游东南方发生沙尘暴。风暴相对螺旋度负值中心与其下游沙尘暴发生强度有一致的对应关系。岳平等<sup>[72]</sup>分析 2004 年 5 月 23—24 日甘肃民勤沙尘暴天气过程表明,风暴相对螺旋度与沙尘暴的强度有很好对应关系。陈艳等<sup>[73]</sup>对 2006 年 3 月 27 日

河北省南部邢台、邯郸等地一次强沙尘暴天气过程进行风暴相对螺旋度分析表明,低层螺旋度正值中心变化对强沙尘暴预报有一定指示作用,并指出,沙尘暴区始终位于低层螺旋度正的极大值中心南侧,沙尘暴爆发时,沙尘暴区上空螺旋度值出现次大值中心,随着螺旋度中心值增大沙尘暴强度增强。

## 7 螺旋度在强对流天气研究中的应用

强对流天气(短时强降水、雷雨大风、龙卷风、冰雹和飏线等)具有突发性、移动迅速、天气剧烈、破坏力极大等特点,一直是天气预报中的难点,开展强对流天气科学研究具有重要的现实意义。其中以龙卷风最为典型,它可当作一条涡管,管中具有极强的向上抽吸的上升气流,简直就是一条极强的螺旋度管。因此,许多气象学者将螺旋度用于强对流天气研究。李英<sup>[74]</sup>对 1997 年 3 月中下旬滇南冰雹、大风天气进行水平螺旋度分析表明,低层螺旋度演变对冰雹大风天气有一定指示意义,其大值中心与降雹区比较靠近,同时指出,螺旋度垂直分布反映了降雹区大气的一些动力和热力特征。张苏等<sup>[75]</sup>基于常规探空资料,计算分析皖西南地区强风暴天气的风暴相对螺旋度表明,风暴相对螺旋度对皖西南非孤立龙卷、大范围冰雹及距测站 50 km 内的局地龙卷有较好的预报能力。张霞等<sup>[76]</sup>用风暴相对螺旋度诊断分析 2002 年 7 月 19 日河南郑州地区强冰雹过程表明,低空风暴相对螺旋度和差动位温平流与此次强雹落区有较好对应关系。李晓霞等<sup>[77]</sup>用风暴相对螺旋度分析 2005 年 5 月 28 日甘肃中部强对流天气过程表明,风暴相对螺旋度和能量螺旋度指数高值区对暴雨、冰雹等强对流天气有很好的指示预警作用,强对流天气往往出现在风暴相对螺旋度极大值中心的右侧,出现时间较能量螺旋度最大值出现时间滞后 1~2 h。王建兵等<sup>[78]</sup>诊断分析 2006 年 8 月 30—31 日甘南高原一次突发性强对流天气表明,700 hPa 垂直螺旋度对这次强对流天气的落区有很好的指示意义。胡润山<sup>[79]</sup>基于山西大同 2006 年 7 月 1—31 日逐日 08 时探空资料计算,计算 1000—100 hPa 各层热成风螺旋度且分析表明,强对流灾害性天气出现前,当地到邻近上游地区有正热成风螺旋度高值区(中心)存在,当高值中心数值很大、正值区垂直方向层次较厚时,出现的对流性灾害天气强度较大,出现站点数较多。并指出,热成风螺旋度正值中心出现在强对流灾害天气产生以前,且有 6 h 以上的提前量,可以用热成风螺旋度诊断强对流灾害天气,作为预报指标,建立预报概念模型,为强对流灾害天气预报提供依据。王珏等<sup>[80]</sup>对 2004—2005 年发生在武汉附近五次灾

害性大风过程进行风暴相对螺旋度分析表明,强的低层垂直风切变下,风暴相对螺旋度较大,在强风暴发展过程中,强风暴伴随有中气旋存在,天气也较剧烈。此外,王咏薇等<sup>[81]</sup>分析 2003 年 7 月 10 日南京及苏州地区对流有效位能及能量螺旋度指数值指出,强风暴天气既可以发生在低螺旋度( $SRH < 150 \text{ m}^2/\text{s}^2$ )结合高有效位能( $E_{CAP} > 2000.0 \text{ J/kg}$ )的环境中,也可以发生在高螺旋度、低有效位能的环境( $SRH > 200 \text{ m}^2/\text{s}^2$ ,  $E_{CAP} < 1500.0 \text{ J/kg}$ )中。并指出,高有效位能和高螺旋度并非强天气发生的充分必要条件。张玲等<sup>[82]</sup>分析 2004 年 7 月 12 日江苏南通一次强中尺度对流系统(龙卷)表明,能量螺旋度在判定本次强对流天气类别和发生位置方面均有较好指示意义。

## 8 展望

前文分析表明,螺旋度理论已经广泛应用于台风、暴雨、暴雪、沙尘暴及强对流灾害性天气研究,并取得可喜成果。螺旋度对上述多种灾害性天气均有很好的指示性作用,且发现在暴雨、沙尘暴上空基本上呈现出“上负、下正”的垂直分布特征。但是仔细分析会发现,不同螺旋度用来诊断不同的灾害性天气,其结果有的是一致的,有的是相反的。一方面可能由于台风、暴雨、暴雪、沙尘和强对流天气各有其物理成因和机制,另一方面在于我们对螺旋度的计算处理可能是不一样的,如垂直螺旋度的计算公式就有多种表示方式, $p$  坐标系与  $z$  坐标系的差异、计算表达式中正负号的差异,均会引发分析结果的差异。并且,在应用研究工作中,螺旋度与天气系统之间的关系是对应关系,不是因果关系,因此,尽量避免说成螺旋度是某种灾害性天气发生发展的主要机制。同时,螺旋度这种沿旋转方向的流动或沿流动方向的旋转,在以上五类天气过程中的应用水平也存在明显差异,如目前,用于暴雨研究的螺旋度主要有完全螺旋度、垂直螺旋度、风暴相对螺旋度、旋转风螺旋度、切变风螺旋度和热成风螺旋度,而用于暴雪研究的螺旋度仅有垂直螺旋度,显然,随着螺旋度理论的发展,其应用水平仍有进一步提升的空间。此外也应注意到,在 21 世纪头十年的中期(即 2005 年前后)我国开展了大量的螺旋度应用研究工作,但多数为诊断结果的分析,而用于业务预报的研究则较少,即使是概念性的应用研究也少见。因此,未来针对螺旋度在多种灾害性天气中的应用研究工作,可着重考虑以下几个方面:

(1) 在计算风暴相对螺旋度时,需要确定天气系统的移速  $C$ ,  $C$  的计算方法不同将直接影响风暴相对螺旋度的计算结果,因此,有必要建立针对不同灾害

性天气的  $C$  的计算方法,从而提高风暴相对螺旋度的应用能力。

(2) 在计算垂直螺旋度时,需要确定垂直速度,而垂直速度目前仍是一个不可直接观测得到的物理量。因此,对垂直运动估算方法将直接影响到垂直螺旋度的计算结果。 $Q$  矢量被视为估算垂直运动的先进工具,今后可尝试开展  $Q$  矢量在垂直螺旋度计算中的应用研究工作。

(3) 不同螺旋度产生的假设条件有所不同,具体计算表达式也存在差异,如水平螺旋度和风暴相对螺旋度存在明显差异,垂直螺旋度和垂直积分螺旋度也有明显不同,这意味着,不同螺旋度擅长诊断(适用)的天气现象也可能不同,即使对同一个天气个例诊断结果也可能存在差异。目前,对于同一类型灾害性天气使用不同类型的螺旋度来进行诊断分析,以及用同一种螺旋度诊断分析不同类型灾害性天气现象的都大为存在,因此,尝试开展何种类型螺旋度最适用于何种灾害性天气的研究是有意义的。

(4) 水平螺旋度和垂直螺旋度揭示的物理意义侧面不同,反映的现象也有所不同。水平螺旋度和垂直螺旋度的相对重要性到底如何?现有研究对二者数值相对大小认识还不完全一致。其实,数值大小也并不一定能说明问题,数值大不一定就与天气现象的发展演变有联系,数值小也并不代表对天气现象的发生、发展没有指示作用。况且,螺旋度的大小、正负,并不能直接说明天气的剧烈程度。在何种情况下分析水平螺旋度?在何种情况下分析垂直螺旋度?在何种情况下二者均要分析、缺一不可?谈哲敏等<sup>[6]</sup>从理论角度进行过阐述分析。最近,陆慧娟等<sup>[10]</sup>研究指出,水平螺旋度和垂直螺旋度既相互区别又相互联系,而且可以相互影响,二者并不是彼此孤立存在的。因此,在以后的螺旋度具体研究及应用工作中应全面分析考虑不同方向上螺旋度的演变特征,并将二者有机地结合考虑,这样可能会更好地发挥其在灾害性天气诊断分析中的作用。

(5) 单一依靠螺旋度并不能完全解决所有天气现象问题,还需要与其它物理量一并使用,才可能获得更好的效果,接近预期目的,如能量螺旋度指数(EHI) ( $S_{EHI}=E_{CAPE}\times H(C)/160000$ )<sup>[81,82]</sup>就是很好的典范。依此类推,今后可尝试将螺旋度与  $Q$  矢量、位涡等多种物理量联系起来,作综合性考虑。

(6) 目前,对于螺旋度研究还是处在理论研究、数值模拟和诊断分析阶段。应用研究基本上为诊断分析,且太多不尽人意。至于用在业务预报,还是一个努力方向和目标。因此,今后应积极开展其与数值模式

预报产品相结合,或者说对数值模式预报产品进行“再加工”的释用研究,同时,通过基于实时雷达、风廓线资料计算所得螺旋度,对释用产品作进一步修正,从而促进螺旋度在灾害性天气预报业务工作中的实际应用。

(7) 超螺旋度<sup>[9]</sup>在流体粘性作用的影响下,可反映出螺旋度密度空间积分的时间变化趋势,在理论上具有一定的优越性,可在实际应用工作中并不多见。因此,今后可积极开展其在多种灾害性天气中的应用研究。

#### 参考文献:

- [1] Moffat H K. The degree of knottedness of tangled vortex lines[J]. *J Fluid Mech*, 1969, 35: 117-129.
- [2] Lilly D K. The structure, energetics and propagation of rotating convective storms. Part II: Helicity and storm stabilization [J]. *J Atmos Sci*, 1986, 43: 126-140.
- [3] 岳彩军, 寿亦萱, 寿绍文, 等. 我国螺旋度的研究及应用[J]. *高原气象*, 2006, 25(4): 754-762.
- [4] 伍荣生, 谈哲敏. 广义涡度与位势涡度守恒定律及其应用[J]. *气象学报*, 1989, 47(4): 436-442.
- [5] 伍荣生. 大气动力学[M]. 北京: 气象出版社, 1990, 96-101.
- [6] Tan Zhemin, Wu Rongsheng. Helicity dynamics of atmospheric flow[J]. *Adv Atmos Sci*, 1994, 11(2): 175-188.
- [7] 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.
- [8] 刘式适, 刘式达. 大气运动的螺-极分解和 Beltrami 流[J]. *大气科学*, 1997, 21(2): 151-160.
- [9] Fei Shiqiang, Tan Zhemin. On the helicity dynamics of severe convective storms[J]. *Adv Atmos Sci*, 2001, 18(1): 67-86.
- [10] 陆慧娟, 高守亭. 螺旋度及螺旋度方程的讨论[J]. *气象学报*, 2003, 61(6): 684-691.
- [11] 寿绍文, 励申申, 姚秀萍. 中尺度气象学[M]. 北京: 气象出版社, 2003: 285-291.
- [12] 高守亭. 大气中尺度运动的动力学基础及预报方法[M]. 北京: 气象出版社, 2007: 32-39.
- [13] 李耀东, 刘健文, 高守亭. 动力和能量参数在强对流天气预报中的应用研究[J]. *气象学报*, 2004, 62(4): 401-409.
- [14] 李耀东, 刘健文, 高守亭. 螺旋度在对流天气预报中的应用研究进展[J]. *气象科技*, 2005, 33(1): 7-11.
- [15] 郑峰. 螺旋度应用研究综述[J]. *气象科技*, 2006, 24(2): 119-123.
- [16] 高守亭, 周非凡. 基于螺旋度的中尺度平衡方程及非平衡流诊断方法[J]. *大气科学*, 2006, 30(5): 854-862.
- [17] 孙淑清, 周玉淑. 近年来我国暴雨中尺度动力分析研究进展[J]. *大气科学*, 2007, 31(6): 1171-1188.
- [18] Woodall G R. Qualitative forecasting of tornadic activity using storm-relative environmental helicity[C]// Preprint of the 16th conference on severe local storm, Kananaskis, Alta, Canada. Amer Meteor Soc, Oct 22-26, 1990, 311-315
- [19] 杨超奎, 刘玉玲, 万振拴, 等. “91.7”梅雨锋暴雨的螺旋度分析[J]. *气象学报*, 1994, 52(3): 379-384.

- [20] 吴宝骏, 许晨海, 刘延英, 等. 螺旋度在分析一次三峡大暴雨中的应用[J]. 应用气象学报, 1996, 7(1): 108-112.
- [21] 吴宝骏, 许晨海, 刘延英, 等. 一次三峡大暴雨的地转螺旋度分析[J]. 气象科学, 1996, 16(2): 144-150.
- [22] Davies-Jones R, Burgess P. Test of helicity as a tornado forecast parameter [C]//Preprint of the 16<sup>th</sup> conference on severe local storm, Kananaskis, Alta, Canada. Amer Meteor Soc, Oct 22-26, 1990: 588-593.
- [23] 黄勇, 张晓芳, 陆汉城. 平均螺旋度在强降水过程中的诊断分析[J]. 气象科学, 2006, 26(2): 171-176.
- [24] 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[J]. 南京气象学院学报, 1999, 22(1): 95-102.
- [25] 王颖, 寿绍文, 周军. 水汽螺旋度及其在一次江淮暴雨分析中的应用[J]. 南京气象学院学报, 2007, 30(1): 101-106.
- [26] 钮学新, 董加斌, 杜惠良. 华东地区台风降水及造成异常降水机制的分析 [C]. 第十三届全国热带气旋科学讨论会论文摘要文集. 中国气象局上海台风研究所编, 2004.
- [27] 刘惠敏, 郑兰芝. 螺旋度诊断分析与短时强降水雨量预报[J]. 气象, 2002, 28(10): 37-40.
- [28] 伍荣生, 方娟, 韩瑛. 热成风螺旋度及其在天气动力学中的应用[C]. 中国气象学会 2004 年年会大会特邀报告汇编, 2004: 30-35.
- [29] Han Ying, Wu Rongsheng, Fang Juan. Shearing wind helicity and thermal wind helicity[J]. Adv Atmos Sci, 2006, 23: 504-512.
- [30] 王东海, 杨帅, 钟水新, 等. 切变风螺旋度和热成风螺旋度在东北冷涡暴雨中的应用[J]. 大气科学, 2009, 33(6): 1238-1246.
- [31] 杜小玲, 喻自凤, 鲁崇明, 等. 上海“0185”热带低压特大暴雨维持机理研究[J]. 南京大学学报(自然科学), 2007, 43(6): 621-632.
- [32] 陈华, 谈哲敏. 热带气旋的螺旋度特性[J]. 热带气象学报, 1999, 15(1): 81-85.
- [33] Yang Shuai, Ki-Ryong K, Cui Xiaopeng, et al. Diagnostic analysis of the asymmetric structure of the simulated landfalling typhoon “Haitang”[J]. Progr Natur Sci, 2008, 18(10): 1249-1260.
- [34] 余贞寿, 倪东鸿, 闵锦忠. 超强台风“圣帕”(0709)特大暴雨过程的完全螺旋度分析[J]. 南京气象学院学报, 2009, 32(1): 45-53.
- [35] 杨宇红, 沈新勇, 林两位, 等. 0418 号台风艾利暴雨成因分析[J]. 气象, 2006, 32(7): 81-87.
- [36] 陈艳, 宿海良, 寿绍文, 等. 麦莎台风造成冀东大暴雨的数值模拟和诊断分析[J]. 应用气象学报, 2008, 19(2): 209-218.
- [37] 范学峰, 吴葵, 席世平. ARER 台风远距离降水形成机制分析[J]. 气象, 2007, 33(8): 12-16.
- [38] 章征茂, 沈桐立, 马月枝. “05.8”十堰大暴雨的数值模拟与诊断分析[J]. 暴雨灾害, 2008, 27(1): 24-31.
- [39] 侯瑞钦, 程麟生, 冯伍虎. “98.7”特大暴雨低涡的螺旋度和动能诊断分析[J]. 高原气象, 2003, 22(2): 202-208.
- [40] 寿绍文, 王祖锋. 1991 年 7 月上旬贵州地区暴雨过程物理机制的诊断研究[J]. 气象科学, 1998, 18(3): 231-238.
- [41] 郑峰, 徐海明, 丁一汇. 一次东风波及其诱发低涡的螺旋度特征分析[J]. 大气科学, 2008, 32(1): 175-183.
- [42] 慕建利, 李泽椿, 寿绍文, 等. 高原东侧突发性大暴雨过程中螺旋度的诊断分析[J]. 气象科学, 2009, 29(2): 181-186.
- [43] 郑仙照, 寿绍文, 沈新勇. 一次暴雨天气过程的物理量分析[J]. 气象, 2006, 32(1): 102-106.
- [44] 陈艳, 寿绍文, 宿海良. CAPE 等环境参数在华北罕见秋季大暴雨中的应用[J]. 气象, 2005, 31(10): 56-60.
- [45] 廖胜石, 寿绍文. 一次江淮暴雨中尺度低涡的数值模拟及分析[J]. 南京气象学院学报, 2004, 27(6): 753-759.
- [46] 覃丽, 寿绍文, 夏冠聪, 等. 华南暖区一次暴雨中尺度系统的数值模拟[J]. 高原气象, 2009, 28(4): 906-914.
- [47] 覃丽, 寿绍文, 刘泽军, 等. 一次“北涡南槽”型广西强降水过程的数值模拟与诊断分析[J]. 热带气象学报, 2007, 23(1): 27-34.
- [48] 周慧, 李象玉, 黎祖贤, 等. AREM3.0 模式对“5.31”天气过程的模拟分析[J]. 热带气象学报, 2008, 24(1): 88-93.
- [49] 张芳华, 马旭林, 杨克明. 2003 年 6 月 24-25 日江南特大暴雨数值模拟和诊断分析[J]. 气象, 2004, 30(1): 28-32.
- [50] 杨晓霞, 华岩, 黎清才, 等. 螺旋度在暴雨天气分析与预报中的应用[J]. 南京气象学院学报, 1997, 20(4): 499-504.
- [51] 杨克明, 林建, 康志明, 等. 2004 年 7 月黄淮特大暴雨的天气动力学分析[J]. 高原气象, 2006, 25(5): 781-791.
- [52] 方建刚, 侯建忠, 陶建玲, 等. 秦岭近邻地区秋季暴雨的天气动力学分析[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2007, 43(4): 31-36.
- [53] 黄泓, 张铭. 一次东北暴雨过程的诊断分析[J]. 解放军理工大学学报, 2004, 5(5): 83-87.
- [54] 丁建军, 胡文东, 陈晓娟, 等. 2003 年 7 月 31 日固原暴雨天气数值模拟[J]. 干旱气象, 2004, 22(1): 38-43.
- [55] 马鸿青, 丁治英. 河北中南部一次大暴雨两个例的成因诊断[J]. 干旱气象, 2009, 27(3): 54-262.
- [56] 金琪, 王丽, 孟英杰, 等. “6.25”湖北省暴雨过程观测及 AREM 数值模拟资料分析[J]. 气象科学, 2008, 28(3): 276-282.
- [57] 胡燕平, 田秀霞, 赵规划, 等. 沙澧河流域两场大暴雨过程的对比分析[J]. 气象, 2008, 34(8): 95-103.
- [58] 黄治勇, 王珏, 王兴涛, 等. 鄂东南一次大暴雨过程成因分析与潜势预报[J]. 暴雨灾害, 2007, 26(2): 125-129.
- [59] 张端禹, 张兵. 江汉平原一次突发性特大暴雨的诊断分析[J]. 暴雨灾害, 2008, 27(2): 121-126.
- [60] 康志明, 罗金秀, 郭文华, 等. 2005 年 10 月西藏高原特大暴雪成因分析[J]. 气象, 2007, 33(8): 60-67.
- [61] 赵桂香, 许东蓓. 山西两类暴雪预报的比较 [J]. 高原气象, 2008, 27(5): 1140-1148.
- [62] 马秀玲, 彭九慧, 杨雷斌, 等. 华北地区一次局地暴雪天气过程的诊断分析[J]. 干旱气象, 2008, 26(1): 64-68.
- [63] 陶健红, 王劲松, 冯建英. 螺旋度在一次强沙尘暴天气分析中的应用[J]. 中国沙漠, 2004, 24(1): 83-87.
- [64] 王劲松, 李耀辉, 康凤琴, 等. “4.12”沙尘暴天气的数值模拟及诊断分析[J]. 高原气象, 2004, 23(1): 89-96.
- [65] 申红喜, 李秀连, 石步鹤. 北京地区两次沙尘(暴)天气过程对比分析[J]. 气象, 2004, 30(2): 12-16.
- [66] 杨莲梅, 张广兴, 杨青. 南疆盆地翻山型沙尘暴环流动力结构分析[J]. 中国沙漠, 2006, 26(1): 71-76.
- [67] 王建鹏, 沈桐立, 刘小英, 等. 西北地区一次沙尘暴过程的诊断及地形影响的模拟试验[J]. 高原气象, 2006, 25(2): 259-267.
- [68] 王益柏, 费建芳, 黄小刚, 等. “2002. 3”华北地区强沙尘暴天气的螺旋度分析[J]. 气象科学, 2009, 29(3): 368-374.
- [69] 王锡稳, 刘治国, 黄玉霞, 等. 河西走廊盛夏一次强沙尘暴天气综合分析[J]. 气象, 2006, 32(7): 102-109.
- [70] 程鹏, 李光林, 刘抗, 等. 河西走廊一次区域性大风强沙尘暴天气诊断[J]. 干旱气象, 2009, 27(3): 245-249.

- [71] 李岩瑛, 张强, 李耀辉, 等. 水平螺旋度与沙尘暴的动力学关系研究[J]. 地球物理学报, 2008, 51(3): 692-703.
- [72] 岳平, 牛生杰, 张强. 民勤一次沙尘暴天气的观测分析[J]. 高原气象, 2008, 27(2): 401-407.
- [73] 陈艳, 宿海良, 张婉莹, 等. 一次强沙尘暴天气的成因分析[J]. 中国沙漠, 2009, 29(4): 757-765.
- [74] 李英. 春季滇南冰雹大风天气的螺旋度分析[J]. 南京气象学院学报, 1999, 22(2): 164-169.
- [75] 张苏, 王甲生.  $s-r$  螺旋度在皖西南强风暴预报中的应用[J]. 气象, 1995, 21(9): 37-39.
- [76] 张霞, 周建群, 申永辰, 等. 一次强冰雹过程的物理机制分析[J]. 气象, 2005, 31(4): 13-17.
- [77] 李晓霞, 康凤琴, 张铁军, 等. 甘肃一次强对流天气的数值模拟和分析[J]. 高原气象, 2007, 26(5): 1077-1085.
- [78] 王建兵, 王振国, 李晓媛, 等. 甘南高原一次突发性强对流天气的诊断分析[J]. 干旱气象, 2007, 25(3): 54-60.
- [79] 胡润山. 用热成风螺旋度诊断强对流灾害性天气[J]. 气象科技, 2008, 36(1): 15-19.
- [80] 王珏, 张家国, 王佑兵, 等. 鄂东地区雷雨大风多普勒天气雷达回波特征[J]. 暴雨灾害, 2009, 28(2): 143-146.
- [81] 王咏薇, 寿绍文, 阎凤霞. ECAP 等环境参数在强对流天气分析中的应用[J]. 南京气象学院学报, 2005, 28(6): 847-854.
- [82] 张玲, 张艳玲, 陆汉城, 等. 不稳定能量参数在一次强对流天气数值模拟中的应用[J]. 南京气象学院学报, 2008, 31(2): 192-199.