

王东海, 杨帅, 钟水新, 等. 2009. 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, 33 (6): 1238–1246. Wang Donghai, Yang Shuai, Zhong Shuixin, et al. 2009. The application of shearing wind helicity and thermal wind helicity in northeastern cold vortex rainfall event [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 33 (6): 1238–1246.

切变风螺旋度和热成风螺旋度在 东北冷涡暴雨中的应用

王东海¹ 杨帅² 钟水新¹ 韩瑛³

1 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室, 北京 100081

2 中国科学院大气物理研究所云降水物理与强风暴实验室, 北京 100029

3 中国气象局国家气象中心, 北京 100081

摘 要 引入切变风螺旋度和热成风螺旋度, 并将其应用于东北冷涡暴雨的诊断分析。理论上, 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。相对于切变风螺旋度, 热成风螺旋度的计算只需要单平面层的资料即可, 避免了垂直差分计算, 这大大弥补了台站观测中垂直层密度稀疏或者边界层的处理等问题的不足, 使得计算大大简化, 便于业务应用。在以上定义和理论分析的基础上, 选取一次东北冷涡降水过程进行数值模拟, 利用模式输出的中尺度资料, 诊断分析这次降水过程中的切变风螺旋度和热成风螺旋度。分析表明, 降水中心位于切变风螺旋度的正值和负值区的边界, 与降水的强度变化一致; 而作了热成风近似后的切变风螺旋度中的扭转项(即热成风螺旋度), 与切变风螺旋度相似, 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, 而且其对暴雨的诊断优于传统的螺旋度。

关键词 切变风螺旋度 热成风螺旋度 东北冷涡 暴雨

文章编号 1006-9895 (2009) 06-1238-09

中图分类号 P445

文献标识码 A

The Application of Shearing Wind Helicity and Thermal Wind Helicity in Northeastern Cold Vortex Rainfall Event

WANG Donghai¹, YANG Shuai², ZHONG Shuixin¹, and HAN Ying³

1 State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

2 Laboratory of Cloud-Precipitation Physics and Severe Storms, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

3 National Meteorological Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081

Abstract The shearing wind helicity and thermal wind helicity are introduced and applied to a northeastern cold vortex rainfall event. In theory, shearing wind helicity is defined as the dot product between vertical wind shear and absolute vorticity vector, which represents the twisting effect of nonuniform distribution of wind vector in the vertical direction on vorticity tube. It includes two terms, torsion and the divergence of vertical vorticity. By use of geostrophic relation and thermal wind relation, the shearing wind helicity is simplified as thermal wind helicity. Its in-

收稿日期 2008-05-14, 2009-04-20 收修定稿

资助项目 国家自然科学基金资助项目 40633016、40805001

作者简介 王东海, 1965 年出生, 男, 博士, 研究员, 研究领域: 天气动力。E-mail: wangdh@cma.gov.cn

tensity and sign are determined by the collocation between the upward air stream and warm-moist air. Compared with shearing wind helicity, thermal wind helicity is calculated at a single level, which avoids vertical differential and offsets the shortage of data in the boundary and sparse vertical layers. Thus the calculation is simplified largely and conveniently applied to operation. Based on the above definitions and theory analyses, a case study is performed. A northeastern cold vortex rainfall event is simulated. By using the mesoscale model output, shearing wind helicity and thermal wind helicity are analyzed. It is found that, large-value centers of precipitation are located at the interface between positive and negative shearing wind helicity values. The intensity variation of shearing wind helicity is identical with that of precipitation. Similar to shearing wind helicity, by using the thermal wind approximation, the torsion term in the shearing wind helicity formula (i. e., thermal wind helicity) has indicative sense to precipitation and the development of convection, especially for strong precipitation and convection. Furthermore, it corresponds with precipitation and the development of strong convection better than the traditional helicity does.

Key words shearing wind helicity, thermal wind helicity, northeastern cold vortex, storm rainfall

1 引言

螺旋度是对气流边旋转边前进的运动状态的描述,系统持续时间与螺旋气流对能量的频散的抑制和约束能力密切相关,因此螺旋度与天气系统的生命史有关。螺旋度的研究由来已久。Etling (1985) 讨论总结了大气中存在的几种典型螺旋流,并指出流体稳定性与螺旋性密切相关。Lilly (1986a, 1986b) 指出高螺旋度阻碍了扰动能量串级,对超级单体风暴的维持有重要作用,而超级单体风暴的传播又使得螺旋度的作用达到最优。Woodall (1990) 提出了风暴相对螺旋度的概念。Mead (1997) 将螺旋度与反映能量作用的对流有效位能结合起来,即能量螺旋度,分析诊断暴雨的发生发展。国内对螺旋度的理论研究也相当广泛。伍荣生和谈哲敏 (1989) 推导出完全的螺旋度方程,并指出若不计摩擦,在准地转运动中螺旋度具有守恒性。Wu et al. (1992) 对切变热对流扰动中螺旋度的产生以及螺旋度与非线性能量传输之间的关系进行了研究。Tan and Wu (1994) 讨论、研究了螺旋度在边界层和锋区的动力性质。刘式适和刘式达 (1997) 研究指出定常准地转模式中的螺旋度与温度平流和垂直运动有关。陆慧娟和高守亭 (2003) 从无摩擦的运动方程出发,利用量纲分析的方法,导出简化的螺旋度方程和不同方向上的螺旋度方程,并对影响它们变化的各因子进行了讨论。

除了理论研究,螺旋度在中国的暴雨和强对流天气分析及预报中也有广泛的应用。杨越奎等 (1994) 用螺旋度分析了 1991 年 7 月江淮的梅雨暴雨,发现螺旋度与几次中尺度暴雨过程有很好的对

应关系。吴宝俊等 (1996) 用地转螺旋度分析了三峡大暴雨过程,也发现螺旋度的垂直分布结构与暴雨过程有一定的联系。李英 (1999) 用风暴螺旋度对滇南的冰雹大风天气进行分析,结果表明:低层螺旋度的演变与滇南冰雹大风天气有一定的关系,低层螺旋度的大值中心比较靠近降雹区。陈华和谈哲敏 (1999) 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进行了研究。李耀辉和寿绍文 (1999) 利用风速的旋转风分量来计算螺旋度,并用来研究江淮梅雨锋暴雨过程及与其紧密联系的中尺度气旋的发生发展。结果表明,正的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,较大的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,螺旋度的强度变化对暴雨发生有一定的指示意义。Fei and Tan (2001) 讨论了风暴发展过程中螺旋度和超螺旋度的空间结构和时间演变特征,以及其在强风暴系统的对流发展过程中的动力学作用。侯瑞钦等 (2003) 对“98.7”低涡切变线暴雨进行了螺旋度诊断分析,结果表明,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,垂直结构是一对符号相反而又互伴的螺旋度柱。李耀东等 (2004) 综述了螺旋度、风暴相对螺旋度等动力参数在强对流天气预报中的应用研究状况。郑峰等 (2008) 分析了一次东风波及其诱生低涡的螺旋度特征。

伍荣生和谈哲敏 (1989) 提出的广义涡度概括了位涡、螺旋度和涡度拟能的一般形式,其表达式为 $\Psi \cdot \omega_a$, 这里 Ψ 代表一任意矢量, ω_a 是绝对涡度。

当 ψ 取值为位温(相当位温)梯度、涡度、速度,广义位涡代表位涡(湿位涡)(Hoskins et al., 1985)、涡度拟能(Wu, 1984)和螺旋度(Lilly, 1986a, 1986b, 1990; Tan et al., 1994)。Han et al. (2006)用风速垂直切变 $\partial \mathbf{V}/\partial z$ 代替 ψ ,引入了一个与天气系统强度变化直接相关的新变量——切变风螺旋度,并将其应用于台风的分析中。与台风降水相似,东北冷涡降水具有大的气旋性环流,而且也可能产生与台风降水相似的螺旋雨带,既然切变风螺旋度在台风降水中得以较好的应用,那么对于东北冷涡降水将会如何呢?本文先回顾切变风螺旋度和热成风螺旋度的定义及其物理意义,再选取一次东北冷涡降水过程,诊断分析这次降水过程中的切变风螺旋度和热成风螺旋度,并将其应用于降水的预报。

2 切变风螺旋度和热成风螺旋度

Han et al. (2006) 将切变风螺旋度定义为

$$H_s = \boldsymbol{\omega}_a \cdot \frac{\partial \mathbf{V}}{\partial z}. \quad (1)$$

它有清晰的物理意义,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。

将(1)式展开为

$$\begin{aligned} H_s &= \left(\frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial z} \right) \frac{\partial u}{\partial z} + \left(\frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial x} \right) \frac{\partial v}{\partial z} + \\ &\quad \left(\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} + f \right) \frac{\partial w}{\partial z} = \left(\frac{\partial w}{\partial y} \frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial x} \frac{\partial v}{\partial z} \right) + \\ &\quad \left(\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} + f \right) \frac{\partial w}{\partial z}. \end{aligned} \quad (2)$$

由(2)式, H_s 的计算涉及风速的垂直差分,需要多层资料。它由扭转项和垂直涡度辐合辐散项组成。

Dutton (1976) 发现,用地转风的垂直切变来代替风速垂直切变,比直接用地转风来代替风速更为精确。因此,本文采用下面的近似,

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial z} &\approx \frac{\partial u_g}{\partial z}, \\ \frac{\partial v}{\partial z} &\approx \frac{\partial v_g}{\partial z}. \end{aligned}$$

这里风速的垂直切变用地转风的垂直切变来代替,而风速的水平切变则仍然用实际风的水平切变来代替。

H_s 的表达式简化为

$$H_{sg} = \left(\frac{\partial w}{\partial y} \frac{\partial u_g}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial x} \frac{\partial v_g}{\partial z} \right) + \left(\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} + f \right) \frac{\partial w}{\partial z}.$$

利用热成风近似

$$\begin{aligned} \frac{\partial u_g}{\partial z} &= -\frac{g}{f} \frac{\partial}{\partial y} \ln T, \\ \frac{\partial v_g}{\partial z} &= \frac{g}{f} \frac{\partial}{\partial x} \ln T, \end{aligned}$$

(3)式变为

$$\begin{aligned} H_{sg} &= -\frac{g}{f} (\nabla \ln T \cdot \nabla w) + \\ &\quad \left(\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} + f \right) \frac{\partial w}{\partial z} = H_1 + H_2. \end{aligned} \quad (4)$$

这里

$$H_1 = -\frac{g}{f} (\nabla \ln T \cdot \nabla w), \quad (5)$$

$$H_2 = \left(\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} + f \right) \frac{\partial w}{\partial z}. \quad (6)$$

H_1 定义为热成风螺旋度,很明显

$$H_1 = \boldsymbol{\omega}_g \cdot \frac{\partial \mathbf{V}_g}{\partial z}.$$

因此,它也是另一种广义涡度的形式。它具有清晰的物理意义,表示温度梯度在垂直速度梯度方向上的投影,综合体现了大气的热力效应和动力效应,其强度取决于上升气流和暖湿空气的配置。当暖侧上升冷侧下沉, H_1 为负值;反之为正。而且,由表达式(5), H_1 的计算只需要单平面层的资料即可,避免了垂直差分计算,这大大弥补了台站观测中垂直层密度稀疏或者边界层的处理等问题的不足,使得计算大大简化,便于业务应用。利用连续方程, H_2 可以写为

$$H_2 = -\left(\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} + f \right) \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right),$$

即为涡度方程中的辐合辐散项,它直接与系统的涡度变化相联系,从而影响系统的发展。从 H_2 本身的表达式,它的符号取决于绝对垂直涡度和水平散度的配置,正的绝对垂直涡度配合对流层中低层(或高层)的水平辐合(或辐散)时, H_2 在中低层(或高层)为正值(或负值),系统发展。下面,通过个例分析来探讨切变风螺旋度和热成风螺旋度在实际个例中的应用。

3 个例分析

3.1 环流背景

2007年7月9日00时~10日00时(国际协

调时，下同)的降水发生在典型的东北冷涡控制之下(图1a、b)，冷涡的中心位于(44°N, 118°E)处；高层200 hPa上(图1c)为一槽一脊型分布，降水区发生在槽前脊后。槽线由(55°N, 113°E)位置东北西南向伸展至(48°N, 111°E)处，后转为西北东南向。本文利用WRF(V2.2)模式对2007年7月9日00时~10日00时我国东北地区的一次降水过程进行了数值模拟。

3.2 数值模拟

WRF模式采用全可压、非静力方程和Arakawa C格点。本次模拟选用质量坐标(Eulerian mass coordinate)，Runge-Kutta 3阶时间积分方案(Louis and William, 2002)，模式微物理过程采用Ferrier方案(Ryan, 1996)和Kain-Fritsch积云对流参数化方案(Kain and Fritsch, 1990)；同时采用MRF边界层方案(Hong and Pan, 1996)、Dudhia短波辐射(Dudhia, 1989)和RRTM长波辐射方案(Mlawer et al., 1997)。模式选取1°×1°分辨率NCEP/NCAR(National Center for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research)分析资料(间隔6 h)，并将初始时刻的常规地面、探空资料通过WRF-3DVAR模块引入模式来改善初始场，进行模拟。模拟采用水平分辨率分别为27 km和9 km的双重嵌套方案，网格点数分别为121×115(D01)，177×168(D02)，模式积分区域中心为D01(41.7°N, 119.7°E)，D02(41.8°N, 119.9°E)垂直方向上分为31个不等距的σ层，时间积分步长30 s，模拟的初始时间为2007年7月9日00时，共积分24小时。模式输出资料间隔为1 h。

图2为2007年7月9日00时~10日00时的实际观测和模拟的(D02)24 h地面累积降水量的分布。由图2可见，模拟24 h降水量分布图上最大降水区域位于(42°N~45°N, 121°E~124°E)之间，最大降水量超过80 mm，其位置与强度与实况基本一致。模拟和实况的雨带均沿东北冷涡的右侧边缘呈弧形伸展(图3)，45°N以北的降水较弱，但(49°N, 129°E)和(48°N, 122°E)处的降水中心在模拟图上也有所体现(图2)。此外，模式模拟的流场尤其是东北冷涡的模拟(图3)，水平风场、温度场等与实况均较吻合(图略)，这里不再详述。

通过以上对比分析，我们认为，WRF模式模

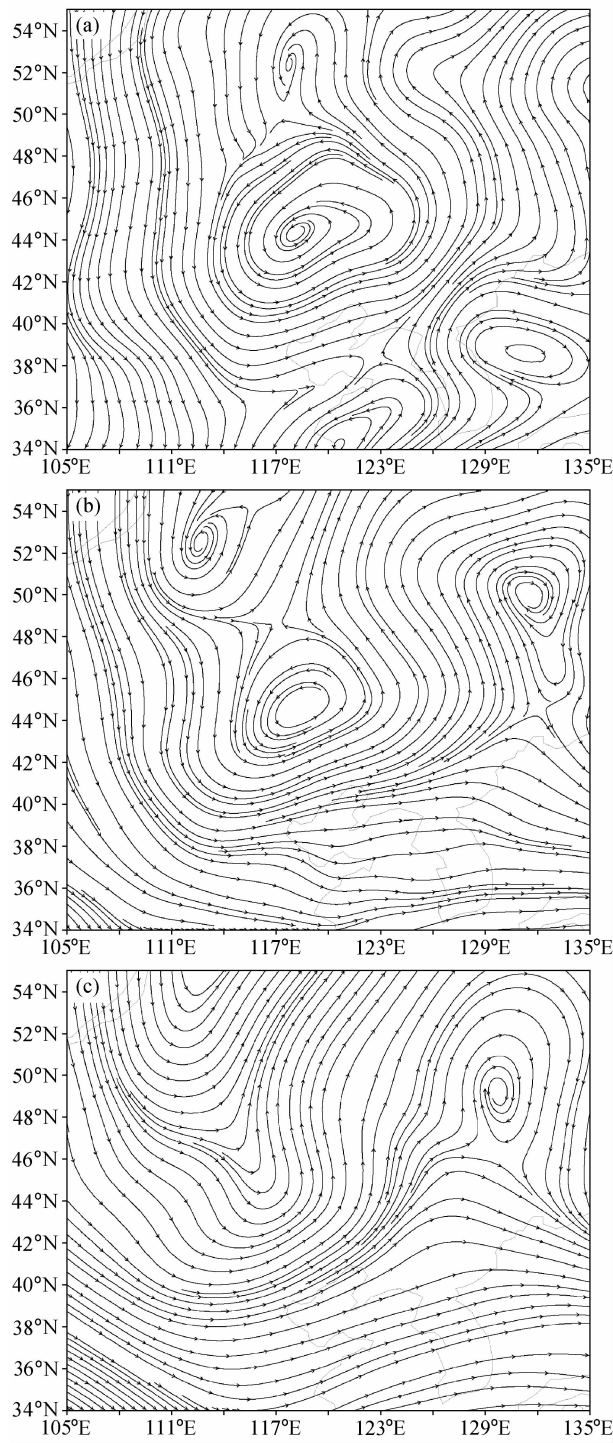


图1 2007年7月9日00时(a)700 hPa、(b)500 hPa和(c)200 hPa的流场
Fig. 1 Streamline fields at (a) 700 hPa, (b) 500 hPa, and (c) 200 hPa at 0000 UTC 9 Jul 2007

拟的此次过程无论降水、大气热力场还是动力场都比较成功，因此，我们下面用来作诊断分析的WRF模式输出资料是可信的。

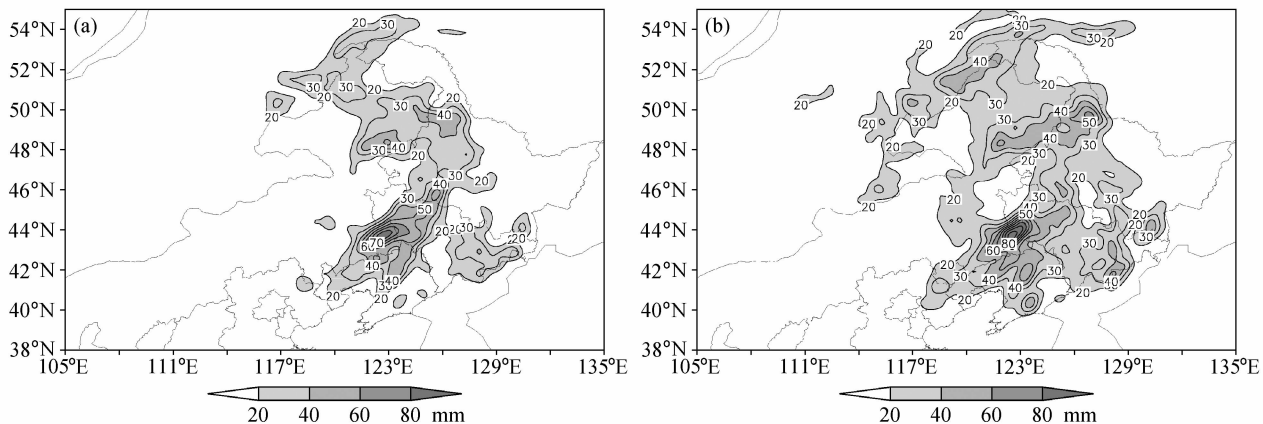


图2 2007年7月9日00时~10日00时(a)观测和(b)模拟的累积24小时降水(单位: mm)

Fig. 2 (a) Observed and (b) simulated accumulated 24-h rainfall from 0000 UTC 9 Jul to 0000 UTC 10 Jul 2007

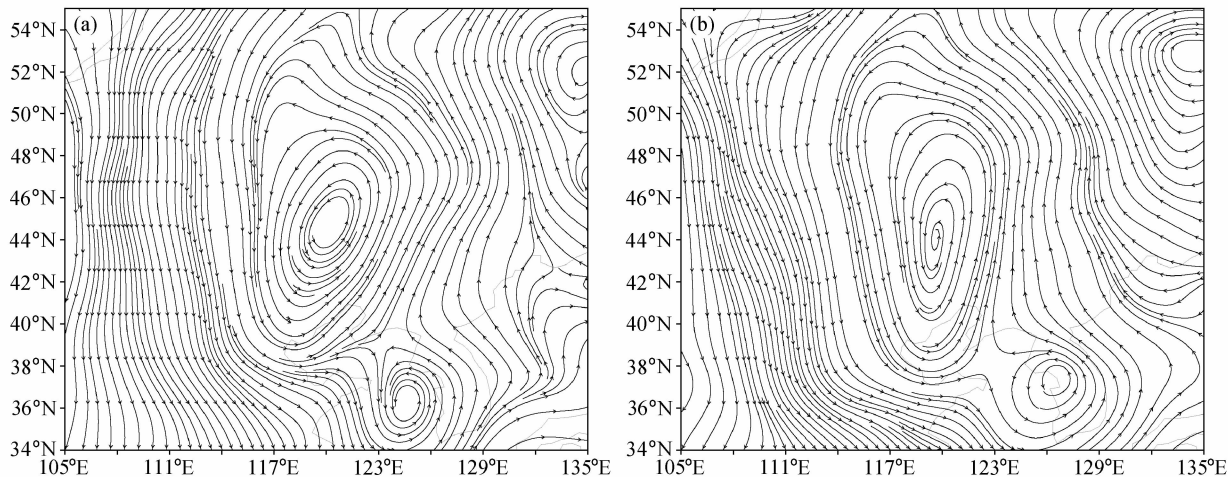


图3 2007年7月10日00时(a)观测和(b)模拟的700 hPa 流场

Fig. 3 (a) Observed and (b) simulated streamline fields at 700 hPa at 0000 UTC 10 Jul 2007

3.3 东北冷涡暴雨中切变风螺旋度和热成风螺旋度的分布特征

先以 6.853 km 高度层为例来看切变风螺旋度和热成风螺旋度的水平分布特征。图 4 是用模式输出资料计算的 2007 年 7 月 9 日 12 时、18 时 H_s [公式 (2)]、 H_1 [公式 (5)]、 H_2 [公式 (6)] 在 6.853 km 高度层 (约 500 hPa) 上的分布 (等值线) 和 1 小时降水 (阴影)。图 4 表明, 大的降水中心与 H_1 极值中心匹配较好 (图 4c、d), 在弱降水区无明显的信号; 而 H_s 分布图上, 降水中心位于 H_s 的正值和负值区的边界 (图 4a、b), 其范围比 H_1 范围要大, 而且在弱降水区也有信号; H_2 在 6.853 km 高度层上与降水的匹配稍差 (图 4e、f)。2007 年 7 月 9 日 12 时至 18 时, H_s (图 4a、b)、 H_1 (图 4c、d)、

H_2 (图 4e、f) 强度减小, 相应的降水量由 12 时的 12 mm/h, 6 小时之后减小为 9 mm/h, 可见 H_s 、 H_1 、 H_2 与降水的强度变化一致。这里以 6.853 km 高度层为例, 分析了切变风螺旋度和热成风螺旋度的水平分布, 在整个对流层中低层, 切变风螺旋度和热成风螺旋度均能较好的诊断降水, 有类似的分布特征。

本次降水过程的最大累积 6 小时时段降水发生在 2007 年 7 月 9 日 06 时~12 时, 降水中心位于 (43.5°N, 122°E)。图 5 是利用模式输出资料计算的 9 日 12 时过降水中心 122°E 的 H_s 、 H_1 、螺旋度 (等值线) (图 5b~d), $x-z$ 涡度矢量 (矢量)、 $u-w$ 风速矢量 (流线) (图 5a) 和 1 小时降水 (直方图) 的纬度-高度剖面图。

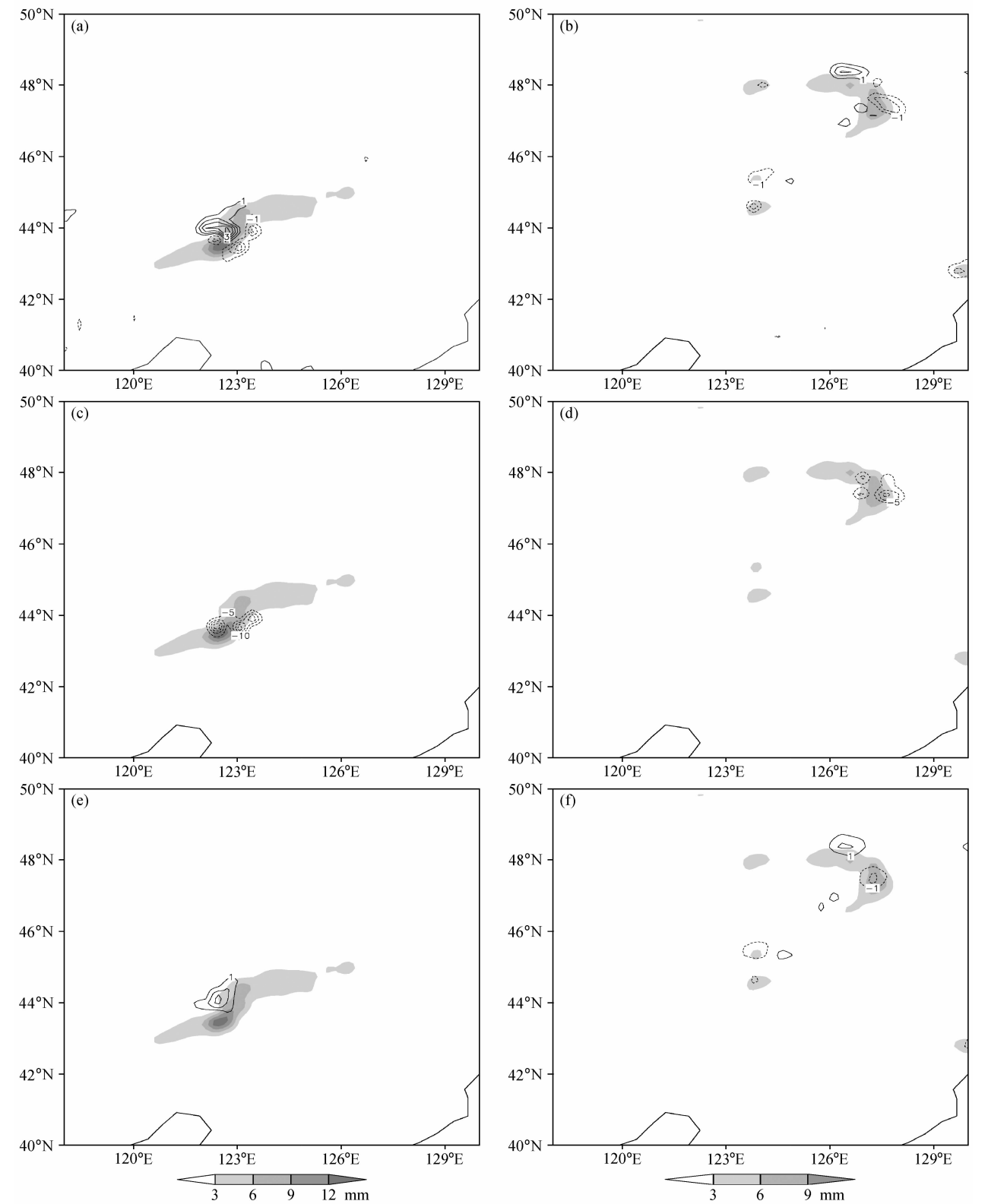


图4 2007年7月9日 (a、b) H_s (单位: 10^{-8} s^{-2})、(c、d) H_1 (单位: 10^{-9} s^{-2})、(e、f) H_2 (单位: 10^{-8} s^{-2}) 在6.853 km 高度层上的分布和累积1小时降水(阴影): (a、c、e) 12时; (b、d、f) 18时

Fig. 4 The distributions of (a, b) $H_s(10^{-8} \text{ s}^{-2})$, (c, d) $H_1(10^{-9} \text{ s}^{-2})$, and (e, f) $H_2(10^{-8} \text{ s}^{-2})$ at 6.853-km height along with accumulated 1-h precipitation (shaded) at (a, c, e) 1200 UTC and (b, d, f) 1800 UTC 9 Jul 2007

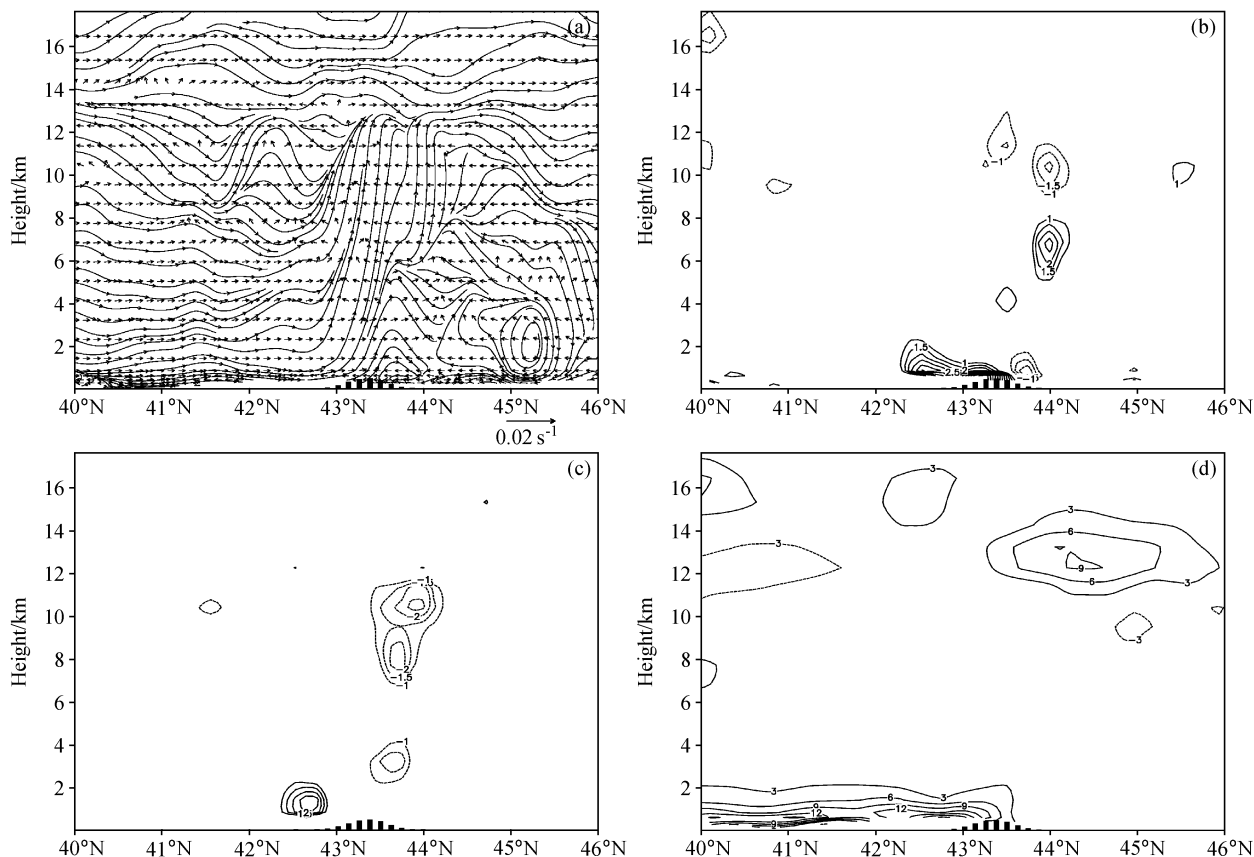


图5 2007年7月9日12时沿122°E各物理量的垂直剖面 and 1小时降水直方图: (a) $x-z$ 涡度矢量 (矢量, 单位: 10^{-3} s^{-1}) 和 $u-w$ 流场; (b) H_s (单位: 10^{-8} s^{-2}); (c) H_1 (单位: 10^{-8} s^{-2}); (d) 螺旋度 (单位: 10^{-2} m/s^2)

Fig. 5 The meridional-vertical cross sections of physical variables and 1-h precipitation (mm) histogram along 122°E at 1200 UTC 9 Jul 2007: (a) $x-z$ vorticity vector (arrow) and $u-w$ streamline field; (b) H_s (10^{-8} s^{-2}); (c) H_1 (10^{-8} s^{-2}); (d) helicity (10^{-2} m/s^2)

垂直剖面图上, 由于风速对强对流区的涡度矢量的扭转 (图 5a), 低层 4 km 以下的涡度矢量为水平伸展, 至 4 km 以上扭转至垂直伸展, 使得水平涡度向着垂直涡度发展, 根据 H_s 的定义, H_s 在雨区上空有强信号, H_s 的垂直分布图上 (图 5b) 的确有 H_s 的大值区垂直向上伸展至 12 km 高度层 (图 5b)。 H_1 (图 5c) 与 H_s 的分布相似, 量级一致。说明作了热成风近似后的 H_s 中的扭转项, 与 H_s 相似, 也能较好地体现降水和对流 (尤其是强降水和强对流) 的分布特征, 而且切变风螺旋度和热成风螺旋度对暴雨的诊断优于传统的螺旋度 (图 5d)。

下一步将选取更多的个例进行分析, 以期将其投入业务的应用, 为诊断降水的发生发展进而对降水预测提供一种新思路。

4 小结

广义涡度将位涡、涡度拟能、螺旋度的表达式

统一为 $\Psi \cdot \omega_a$ (Ψ 代表一任意矢量, ω_a 是绝对涡度) 的一般形式。位涡 (湿位涡) 是综合表征大气的动力因素和热力因素的参数, 因在于 (湿) 绝热无摩擦大气中具有守恒性而得以广泛的应用; 涡度拟能描述了旋转的强度; 螺旋度是对气流边旋转边前进的运动状态的描述, 系统持续时间与螺旋气流对能量的频散的抑制和约束能力密切相关, 因此, 螺旋度与天气系统的生命史有关。将风速垂直切变 $\partial \mathbf{V} / \partial z$ 代替 Ψ , 引入一个与天气系统强度变化直接相关的变量, 切变风螺旋度 (H_s), 它与涡度和风速垂直切变有关, 表示风速垂直方向的分布不均匀对涡管的扭转的效应。切变风螺旋度由两部分组成——扭转项和垂直涡度的辐合辐散项。用地转风的垂直切变代替风场的垂直切变, 再利用热成风关系, 扭转项可简化为

$$H_1 = \omega_g \cdot \frac{\partial \mathbf{V}_g}{\partial z}.$$

因此, 它也是另一种广义涡度的形式, 其强度和符号取决于上升气流和暖湿空气的配置。相对于切变风螺旋度, 热成风螺旋度的计算只需要单平面层的资料即可, 避免了垂直差分计算, 这大大弥补了台站观测中垂直层密度稀疏或者边界层的处理等问题的不足, 使得计算大大简化, 便于业务应用。

选取 2007 年 7 月的东北冷涡降水过程进行数值模拟, 利用模式输出的中尺度资料, 诊断分析这次降水过程中的切变风螺旋度和热成风螺旋度。分析表明, 降水中心位于 H_s 的正值和负值区的边界, 与降水的强度变化一致; 而作了热成风近似后的 H_s 中的扭转项, 与 H_s 相似, 也能较好地诊断降水尤其是强降水和强对流的发展, 而且其对暴雨的诊断优于传统的螺旋度。

参考文献 (References)

陈华, 谈哲敏. 1999. 热带气旋的螺旋度特性 [J]. 热带气象学报, 15 (1): 81–85. Chen Hua, Tan Zhemin. 1999. Helicity dynamics in tropical cyclone [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 15 (1): 81–85.

Dudhia J. 1989. Numerical study of convection observed during the winter monsoon experiment using a mesoscale two-dimensional model [J]. J. Atmos. Sci., 46 (20): 3077–3107.

Dutton J A. 1976. The ceaseless wind [R]. McGraw-Hill. 579pp.

Etling D. 1985. Some aspects of helicity in atmosphere flows [J]. Beitr. Phys. Atmos., 58: 88–100.

Fei Shiqiang, Tan Zhemin. 2001. On the helicity dynamics of severe convective storms [J]. Adv. Atmos. Sci., 18 (1): 67–86.

Han Ying, Wu Rongsheng, Fang Juan. 2006. Shearing wind helicity and thermal wind helicity [J]. Adv. Atmos. Sci., 23: 504–512.

Hong S Y, Pan H L. 1996. Nonlocal boundary layer vertical diffusion in a medium-range forecast model [J]. Mon. Wea. Rev., 124 (10): 2322–2339.

Hoskins B J, McIntyre M E, Robertson A W. 1985. On the use and significance of isentropic potential vorticity maps [J]. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 111: 877–946.

侯瑞钦, 程麟生, 冯伍虎. 2003. “98. 7” 特大暴雨低涡的螺旋度和动能诊断分析 [J]. 高原气象, 22 (2): 203–208. Hou Ruiqin, Cheng Linsheng, Feng Wuhu. 2003. Diagnostic analysis of the helicity and kinetic energy for a low vortex of “98. 7” extraordinary heavy rainfall [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 22 (2): 203–208.

Kain J S, Fritsch J M. 1990. A one-dimensional entraining/detraining plume model and its application in convective parameterization [J]. J. Atmos. Sci., 47 (23): 2784–2802.

李耀东, 刘健文, 高守亭. 2004. 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, 62 (4): 401–409. Li Yaodong, Liu Jianwen, Gao Shouting. 2004. On the progress of application for dynamic and energetic convective parameters associated with severe convective weather forecasting [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 62 (4): 401–409.

李耀辉, 寿绍文. 1999. 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, 22 (1): 95–102. Li Yaohui, Shou Shaowen. 1999. Rotational wind helicity and its effects on torrential rain processes [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese), 22 (1): 95–102.

李英. 1999. 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, 22 (2): 164–169. Li Ying. 1999. Helicity analysis for high-wind and hail processes over South Yunnan in spring [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese), 22 (2): 164–169.

Lilly D K. 1986a. The structure, energetics and propagation of rotating convective storms. Part I: Energy exchange with the mean flow [J]. J. Atmos. Sci., 43: 113–125.

Lilly D K. 1986b. The structure, energetics and propagation of rotating convective storm. Part II: Helicity and storm stabilization [J]. J. Atmos. Sci., 43: 126–140.

Lilly D K. 1990. Numerical prediction of thunderstorms—Has its time come? [J] Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 116: 779–798.

刘式适, 刘式达. 1997. 大气运动的螺-极分解和 Beltrami 流 [J]. 大气科学, 21 (2): 151–160. Liu Shikuo, Liu Shida. 1997. Toroidal-poloidal decomposition and Beltrami flows in atmosphere motions [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica) (in Chinese), 21 (2): 151–160.

陆慧娟, 高守亭. 2003. 螺旋度及螺旋度方程的讨论 [J]. 气象学报, 61 (6): 684–691. Lu Huijuan, Gao Shouting. 2003. On the helicity and the helicity equation [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 61 (6): 684–691.

Mead C M. 1997. The discrimination between tornadic and nontornadic supercell environments: A forecasting challenge in the southern United States [J]. Wea. Forecasting, 12 (3): 379–387.

Mlawer E J, Taubman S J, Brown P D, et al. 1997. Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres: RRTM, a validated correlated-k model for the long-wave [J]. J. Geophys. Res., 102 (D14): 16633–16682.

Ryan B F. 1996. On the global variation of precipitation layer clouds [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 77 (1): 53–70.

Tan Zhemin, Wu Rongsheng. 1994. Helicity dynamics of atmospheric flow [J]. Adv. Atmos. Sci., 11 (2): 175–188.

Wicker L J, Skamarock W C. 2002. Time-splitting methods for elastic models using forward time schemes [J]. Mon. Wea. Rev., 130 (8): 2088–2097.

Woodall G R. 1990. Qualitative forecasting of tornadic activity using storm-relative environmental helicity [C]. 16th Conf. on Severe

Local Storms, Amer. Meteor. Soc., 311–315.

吴宝俊, 许晨海, 刘延英, 等. 1996. 一次三峡大暴雨的地转螺旋度分析 [J]. 气象科学, 7 (2): 144–150. Wu Baojun, Xu Chenhai, Liu Yanying, et al. 1996. Application of the geostrophic helicity to analysis of a heavy rainfall event over the Gorges of the Yangtze River [J]. Scientia Meteorologica Sinica (in Chinese), 7 (2): 144–150.

Wu Rongsheng. 1984. On the change of enstrophy in the atmosphere [J]. Chinese Science Bulletin, 24: 1384–1386.

伍荣生, 谈哲敏. 1989. 广义涡度与位势涡度守恒定律及其应用 [J]. 气象学报, 47: 436–442. Wu Rongsheng, Tan Zhemin. 1989. Conservative laws on generalized vorticity and potential vorticity and its application [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chi-

nese), 47: 436–442.

Wu R S, Lilly D K, Kerr R M. 1992. Helicity and thermal convection with shear [J]. J. Atmos. Sci., 49: 1800–1809.

杨越奎, 刘玉玲, 万振拴, 等. 1994. “91.7”梅雨锋暴雨的螺旋度分析 [J]. 气象学报, 52 (3): 379–384. Yang Yuekui, Liu Yuling, Wan Zhenshuan, et al. 1994. The helicity analysis of Mei-yu front storm rainfall during July, 1991 [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 52 (3): 379–384.

郑峰, 徐海明, 丁一汇. 2008. 一次东风波及其诱生低涡的螺旋度特征分析 [J]. 大气科学, 32 (1): 175–183. Zheng Feng, Xu Haiming, Ding Yihui. 2008. Characteristics of helicity variation during a low vortex event caused by easterly wave [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 32 (1): 175–183.