

一次东风波及其诱生低涡的螺旋度特征分析

郑峰¹ 徐海明² 丁一汇³

1 温州市气象局, 温州 325027

2 南京信息工程大学, 南京 210044

3 中国气象局国家气候中心, 北京 100081

摘 要 利用美国国家环境预报中心 NCEP $1^\circ \times 1^\circ$ 再分析资料, 详细阐述了 2001 年 8 月 3~4 日浙南闽北的东风波暴雨过程的螺旋度的计算方法, 并根据螺旋度 (Helicity) 和 Q 矢量 (Q vector divergence) 分析了过程中的暴雨演变以及雁荡山脉诱生中尺度低涡发生发展的原因。同时, 利用中尺度有限区域模式 MM5V2 对该东风波诱生中尺度低涡进行模拟。结果表明: 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, 螺旋度的时空演变对暴雨发生有一定的预示意义, 螺旋度计算较中尺度模式诱生低涡的初生位置、路径预报准确率高, 两者集成可以提高诱生低涡的预报准确率。同时, 螺旋度梯度大值区和 Q 矢量散度梯度大值区叠加区的时空演变对暴雨发生、诱生低涡的初生位置预示准确, 说明该叠加区对降水和系统的诊断能力强, 具有很好的指示意义。

关键词 东风波 中尺度低涡 螺旋度 Q 矢量 MM5 模拟

文章编号 1006-9895 (2008) 01-0175-09

中图分类号 P448

文献标识码 A

Characteristics of Helicity Variation during a Low Vortex Event Caused by Easterly Wave

ZHENG Feng¹, XU Hai-Ming², and DING Yi-Hui³

1 Wenzhou Meteorological Bureau, Wenzhou 325027

2 Department of Atmospheric Science, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

3 National Climate Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081

Abstract This paper showed mainly the process of the heavy shower occurring in the southern seacoast of Zhejiang Province caused by the easterly wave from 3 to 4 August 2001. Based on the meteorological satellite pictures, the authors analyzed the evolution of the stronger convective cloud, and further discussed the weather background in which the synoptic systems cause the heavy shower in the seacoast of Fujian and Zhejiang provinces to develop.

The analysis of thermodynamic and dynamic conditions showed that after the low cyclonic vortex emerged, it evolved and moved from the northland of Fujian Province to the southern seacoast of Zhejiang Province from 3 to 4 August 2001. Using NCEP (National Centers for Environmental Prediction) $1^\circ \times 1^\circ$ reanalysis data and meteorological satellite data, the authors discussed the low cyclonic vortex and the most heavy shower caused by the easterly wave. Helicity, Q vector and their effects on the all process were investigated.

The heavy shower was successfully simulated by MM5V2. The helicity and Q vector divergence were calculated using the NCEP $1^\circ \times 1^\circ$ reanalysis data. The results show that there exists close relationship between helicity and the heavy shower, which presents that the higher helicity may be one of the mechanisms for rain storm development.

High-level helicity together with low-level helicity can trigger a heavy shower. In this process, high-level helicity is as important as low-level helicity. Helicity and used MM5 model together can offer more accurate low cyclonic vortex forecasting and rain storm forecasting. It is obvious that the overlapped region of the evolvement of center intensity and position of $\mathbf{Q}$ vector divergence maximum and the evolvement of center intensity and position of helicity maximum can forecast low cyclonic vortex and rain storm better. Therefore, the overlapped region is a good index of the weather forecast. Using $\mathbf{Q}$ vector divergence, helicity and MM5 together can offer a new method to forecast rain storm. The results also show that the evolvement of center intensity and position of $\mathbf{Q}$ vector divergence maximum and the evolvement of center intensity and position of helicity maximum can well reflect the heavy shower and the emerging of cyclonic vortex, and the forecasting is more accurate than that of MM5 model. Therefore, the combination of $\mathbf{Q}$ vector divergence, helicity and MM5 model can offer more accurate weather forecasting in the similar weather process. On the other hand, a substantial review of the developments on the theories of helicity, $\mathbf{Q}$ vector and their main application results is a complete and systematical conduct, along with a prospective study in this field.

Key words easterly wave, low cyclonic vortex, MM5 model, helicity, $\mathbf{Q}$ vector

1 引言

20 世纪 80 年代后期, Lilly^[1] 提出一个反映风场旋转性的新的物理概念——螺旋度 (Helicity)。与涡度不同的是, 螺旋度不仅表达风场旋转性的强弱, 而且还能反映出对旋转性的输送。近年来, 在国外, 尤其在美国, 螺旋度被广泛用来研究强风暴的发生与发展。例如, Davies 等^[2] 的研究指出转向风暴的移动 (可能沿着某一条锋面) 对于中尺度气旋的发展是重要的, 螺旋度非常大的环境中可能出现龙卷风暴。Kelven 等^[3] 用一个三维模式模拟了 11 个风暴个例, 分析结果表明, 在有较高螺旋度的环境中发展起来的风暴, 生命史比较长 (>2 h)。在我国的台风暴雨中, 对流性降水是暴雨的重要组成部分, 中小尺度对流体是暴雨发生的直接因素之一。因此, 螺旋度同样可以被用来对暴雨及其系统进行研究。中国气象学者较早研究了螺旋度的性质、应用, 基于螺旋度的理论研究^[1, 4, 5] 及后来的数值模拟结果^[6~10] 和观测资料分析^[11~15], 螺旋度逐渐成为引入天气分析预报中的一个重要物理量。例如, 伍荣生^[16] 指出在准地转运动中, 大气的螺旋度性是守恒的。刘式适等^[17] 研究指出定常准地转模式中的螺旋度紧密地与大气垂直运动有关, 即对于定常的大气大尺度运动, 稳定层结下的上升运动对应正螺旋度, 下沉运动对应负螺旋度。同样, 螺旋度也紧密地与温度平流有关, 暖平流对应正螺旋度, 冷平流对应负螺旋度。杨晓霞等^[18]、刘惠敏等^[19] 和侯瑞钦等^[20] 利用螺旋度对暴雨进行诊断分

析, 得到不少有意义的结果。本文将对 2001 年 8 月浙南闽北沿海的一次东风波及其诱生低涡的发生发展进行研究, 8 月 3 日浙闽沿海受东风波的影响, 浙江南部 3 日夜里发生大到暴雨、局部大暴雨; 4 日 8 时东风波减弱的同时, 在浙闽交界处生成一个低涡, 低涡所到之处, 相继发生了大雨或暴雨; 其后, 低涡在高空东南气流引导下向西北偏北方向移动, 中尺度系统在其中起了关键作用。首先用 NCEP $1^\circ \times 1^\circ$ 再分析资料计算整个过程螺旋度, 然后利用 T106 资料、中尺度 MM5V2 模式对这次过程进行数值模拟, 将过程中的东风波暴雨及其诱生的低涡发生发展的原因做一些初步的探讨。

2 计算方法

螺旋度的物理概念首先是由 Lilly^[1] 提出, 其严格的定义为:

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

式中, $\mathbf{V}$ 为三维的环境风矢量, $\mathbf{C}$ 为研究对象 (风暴、强对流体等, 以下统称为对流系统) 的移动速度, $\nabla \times \mathbf{V}$ 为三维的相对涡度, 则 $\mathbf{V} - \mathbf{C}$ 就是相对于对流系统的速度, 因而也有将 (1) 式叫做相对风暴螺旋度 (storm-relative Helicity)。由 (1) 式可见, 螺旋度不仅表征环境场的旋转程度, 而且还表示输入到对流系统中的环境涡度的多少。其大小反映了旋转与沿着旋转方向运动的强弱程度。用一个简单的示意图^[9] (图 1) 表示, 可以看出在具有旋转

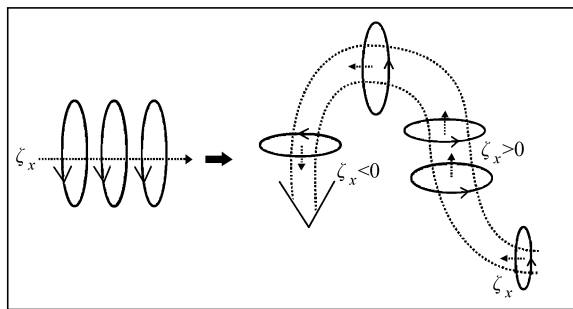


图1 环境风的螺旋性示意图。左边表示环境涡度的水平分量, 右边表示对流系统相对速度 ($\mathbf{V}-\mathbf{C}$) 把环境水平涡度输送到对流系统并将水平涡度变为垂直涡度(引自文献[9])

Fig. 1 Schematic diagram for the Helicity of the environmental wind field. The left part shows the horizontal component of environmental vorticity and the right part delineates the conversion from the environmental horizontal vorticity to the vertical vorticity in the convective system

性的大气里, 对流系统相对速度 $\mathbf{V}-\mathbf{C}$ 把环境涡度输送到对流系统中, 上升气流又将进入对流系统的水平涡度变为垂直涡度, 而垂直涡度对于对流系统的产生具有至关重要的作用。所以, 螺旋度大的环境有利于强对流系统以至低涡气旋的生成和发展。

以 (1) 式为基本依据, 在具体应用中, 螺旋度的计算方法很多, 其中广为采用的是 Devies-Jones 等^[2]使用探空资料根据解析几何性质得出的计算公式:

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

并把 $H \geq H_0$ ($H_0 = 150 \text{ m}^2/\text{s}^2$) 作为强的对流性风暴发生的判据。国内已有人用 (2) 式对暴雨进行过诊断, 发现暴雨发生前或发生时, 螺旋度有较大值。沿用 (2) 式计算螺旋度, 考虑到东风波及其诱生的低涡垂直发展旺盛, 可观察到的风暴入流顶较通常的对流系统高, 为了利于剖析诱生低涡的垂直结构, 使用 NCEP 再分析资料时, N 取为 17 层 (1000~300 hPa)。如前所述, 对流系统的移速 $\mathbf{C}$ 是非常重要的, 由于暴雨系统和孤立的强对流系统在尺度、移动等方面的差异, 即一般来说, 在中纬度暴雨系统中, 常常包含天气尺度的降水区、中尺度的降水区 (带) 及小尺度的对流单体。天气尺度

系统水平尺度宽约 10^2 km , 长约 10^3 km , 持续时间 $>12 \text{ h}$, 东风波当属此类。而孤立的强对流系统是中纬度中常见的中尺度对流系统 (MCS) 的组织形式之一, 其水平尺度宽约 $10^{3/2} \text{ km}$, 长约 10^2 km , 持续时间 $2 \sim 5 \text{ h}$ 。该对流系统有三种基本类型, 即普通单体雷暴、单体风暴以及超级单体风暴。按运动状态则可分为移动性和准静止对流系统两类^[4]。东风波登陆后诱生的低涡属此类。由于对流复合体的运动是单体运动速度和传播速度的矢量和。如果传播速度出现在单体前面, 则出现加速效应。相反, 如果传播速度出现在单体后面则出现减速效应。如果传播速度和单体运动方向相反 (即新单体产生在与单体运动方向相反的方向上), 而且二者大小相等, 则风暴就呈现“静止”状态。这时对流单体不断随着平均气流向前移动, 但是新的对流单体却不断在风暴后侧产生和发展。因此, 风暴的“形心”保持静止或移动缓慢。这种情况下, 在对流复合体中新单体产生和发展的部分是风暴中最活跃的部分。而且由于它移动缓慢或呈准静止状态, 因此常常产生局地暴雨和洪水^[21]。本次东风波及其诱生低涡在温州发生了大到暴雨或大暴雨, 甚至特大暴雨, 造成稻田受淹、房屋倒塌、山体滑坡, 因而在分析研究时把暴雨区中的强对流系统认为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 850~300 hPa 的等厚度或者对流层中层的平均风有关^[22], 孤立的强对流系统产生的对流是 U 型对流, 该对流与暖输送带的上升部分相联系, 一般发生在对流层中、上层, 通常在 700 hPa 和 500 hPa 之间, 而且 700 hPa 附近有从四面八方进入系统的相对入流, 700~400 hPa 则是风暴整个入流气流层。故在本例中 $\mathbf{C}$ 的大小取为 700~400 hPa 的平均风 $\mathbf{V}$, 方向定为 $\mathbf{V}$ 的方向右偏 40° 。

准地转 $\mathbf{Q}$ 矢量的定义:

Hoskins 等^[23]从准静力、准地转、绝热、无摩擦、 f 平面的 p 坐标系运动方程组出发, 推导出下列新形式的准地转 ω 方程:

$$-A^2 \omega = -2 \nabla \cdot \mathbf{Q}.$$

上式表明, 在 f 平面上准地转的垂直运动仅由 $\mathbf{Q}$ 矢量的散度决定。A 是拉普拉斯算子, 当 ω 场具有波状特征时, ω 与 $\mathbf{Q}$ 矢量散度正相关。所以可推断

出,当 Q 矢量散度小于零时, ω 小于零为上升运动,反之为下沉运动。这种以 Q 矢量散度为唯一强迫项的新形式的准地转 ω 方程避免了传统方程的大量计算,而且具有物理意义清楚、计算简便的特点^[21]。

3 数值模式简介

中尺度数值模式为第五代美国 NCAR 宾州州立大学的中尺度数值模式 (MM5V2),其水平网格距取 54 km,水平区域的中心点设在 (36°N , 105°E),东西向格点数 129 个,南北向格点数 121 个,嵌套内域网格距取 18 km,东西向格点数 85 个,南北向格点数 85 个,垂直方向为 21 个非均匀 σ 层,地形分辨率 $10'$,积云对流参数化方案为 BETLS/MILLER 的积云对流参数化方案,行星边界层方案取 MRF 方案,且考虑由云引起的长、短波辐射。时间步长为 2 分钟,积分 48 小时所需机时约 2 个多小时。

4 天气概况

2001 年 8 月 3 日我国沿海从 400~850 hPa 受高压脊控制,浙南闽北受脊底部深厚东风气流影响^[24],20 时 (北京时,下同)起东风波登陆浙江南部沿海,发生了大到暴雨或大暴雨,8 月 4 日 08 时东风波减弱的同时,在浙闽交界处诱生一个低涡,该低涡在高空东南偏南气流引导下向西北偏北方向移动,低涡经过的地方相继发生暴雨。据统计,8 月 3 日 20 时到 4 日 14 时,18 小时降水量有四个县 (市) 九个乡镇超过 150 mm,其中 200 mm 以上有 5 个乡镇。瑞安市西部宁益乡达 298 mm,平阳县敖江镇 8 月 4 日 08 时 1 小时降水量达 98 mm。这次特大暴雨造成稻田受淹、房屋倒塌、山体滑坡,直接经济损失达 5000 多万元。

5 诊断分析

5.1 螺旋度对两个时段大降水落区的预示

8 月 3 日 08 时,700 hPa 螺旋度 (图 2) 显示有两个螺旋度大值中心区,一个在温州北面台州沿海,另一个在浙闽交界,该螺旋度大值中心区的分布特征可能与地形有关^[25]。对照 8 月 3 日 08 时~8 月 4 日 08 时 24 小时实况降水量 (主要降水从 8 月 3 日 20 时开始) (图 3),有南北两个大降水中

心,均位于螺旋度梯度大值区内。

8 月 3 日 08 时,700 hPa Q 矢量散度的分布 (图 4) 显示,在浙闽交界处有一个强辐合区与未来 24 小时的南面大降水中心有较好指示作用,但是温州北部乐清上空是辐散区,实况北面有大降水中心, Q 矢量散度却没有显示。中尺度有限区域模式 MM5V2 (图 5) 预测 24 小时大降水中心在温州市区附近,位置偏向温州市北部,南部无大降水区。

对比上述三个预报工具,表明螺旋度正确预示了温州南北两个大降水落区,MM5 模式只报出北面一个、 Q 矢量散度只显示出南面一个大降水落区。本例说明螺旋度对暴雨落区的预测能力较 MM5

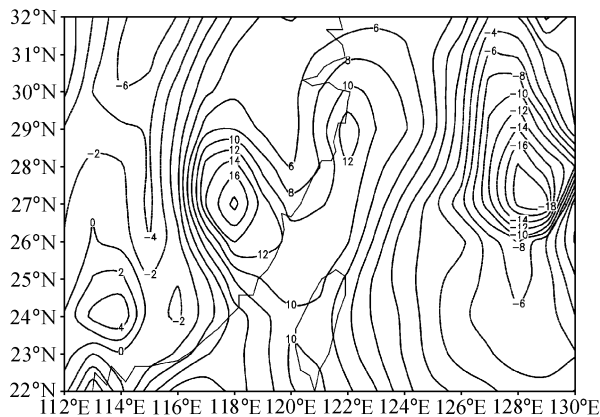


图 2 8 月 3 日 08 时 700 hPa 螺旋度的分布 (单位: m^2/s^2)

Fig. 2 700-hPa helicity (m^2/s^2) at 0800 LST on 3 Aug 2001

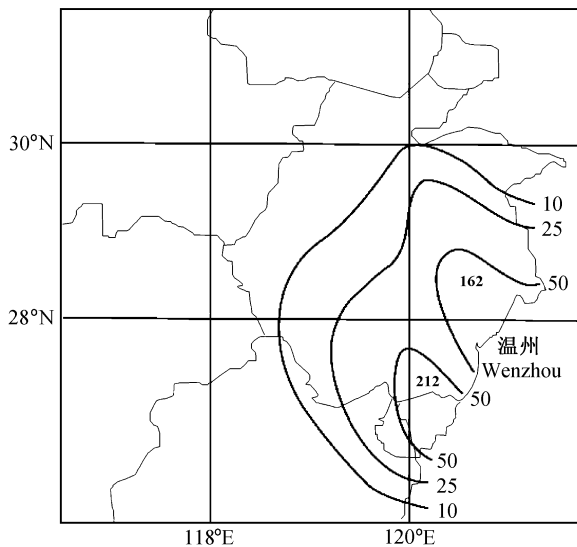


图 3 8 月 3 日 08 时~8 月 4 日 08 时 24 小时雨量分布 (单位: mm)

Fig. 3 Observed 24-h rainfall (mm) from 0800 LST 3 Aug to 0800 LST 4 Aug

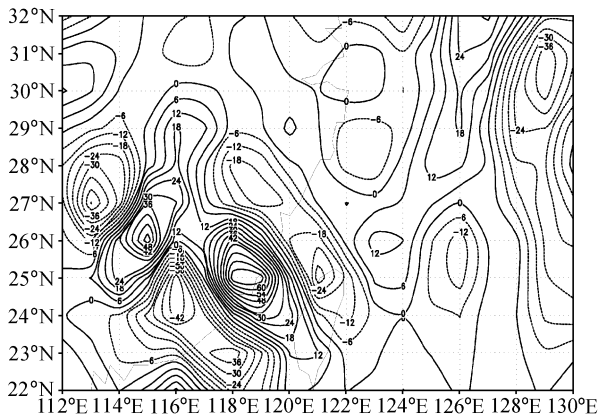


图4 8月3日08时700 hPa Q 矢量散度的分布 (单位: $10^{-17} \text{ hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)

Fig. 4 700-hPa Q vector divergence ($10^{-17} \text{ hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$) at 0800 LST 3 Aug 2001

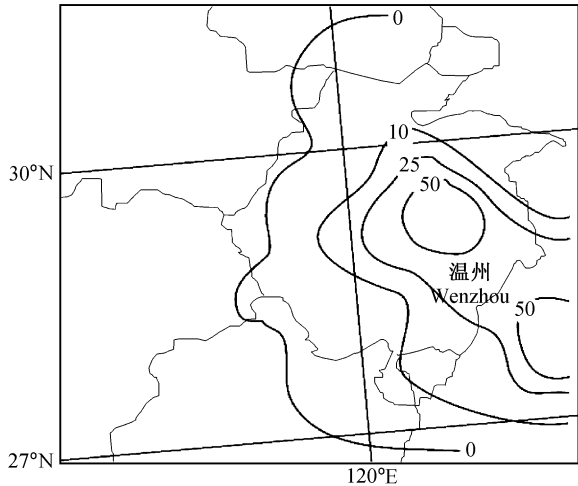


图5 MM5 预报从8月3日08时开始24小时雨量 (单位: mm)
Fig. 5 Simulated 24-h rainfall (mm) from 0800 LST 3 Aug to 0800 LST 4 Aug

模式、 Q 矢量散度优越。从图6的8月3日08时螺旋度和8月3日20时 Q 矢量散度叠加可知,螺旋度在大陆的高值中心被 Q 矢量散度辐散区覆盖,该区域8月3日08时之后虽然有垂直运动潜势,但垂直运动并没有得到发展。两个大降水落区正好发生在螺旋度梯度大值区和 Q 矢量散度梯度大值区叠加区内,所以不同预报工具的预测雨区的交集,可信度较高,对实际预报服务有一定的指示意义。另外,8月4日08时螺旋度高值中心(图7)与8月4日08时~8月5日08时24小时的实况降水落区(图8)有很好的对应。综上所述,螺旋度对暴雨的发生、落区的预报能力较强,而且提前12小时

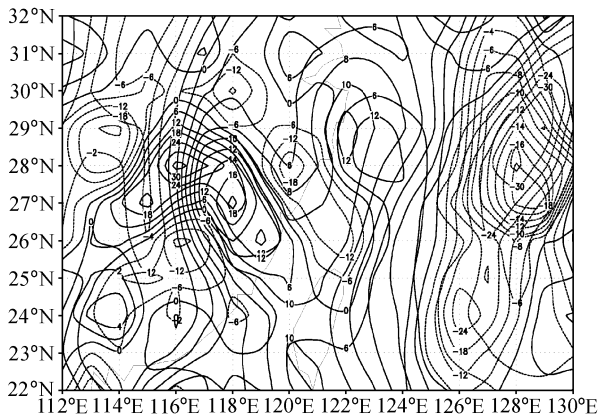


图6 8月3日08时700 hPa螺旋度 (单位: m^2/s^2) 与8月3日20时 Q 矢量散度 (单位: $10^{-17} \text{ hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$) 的叠加

Fig. 6 Combination of 700-hPa helicity (m^2/s^2) at 0800 LST 3 Aug 2001 and 700-hPa Q vector divergence ($10^{-17} \text{ hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$) at 2000 LST 3 Aug 2001

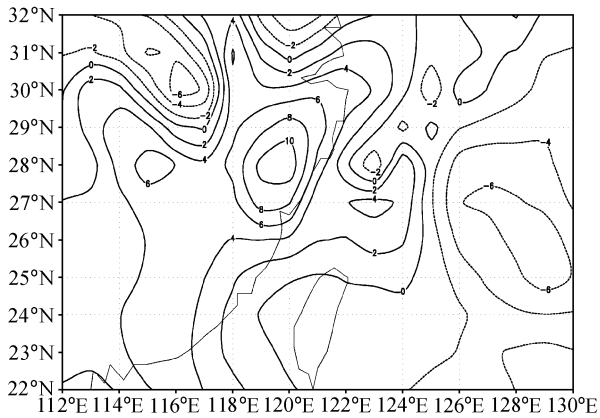


图7 8月4日08时700 hPa螺旋度的分布 (单位: m^2/s^2)

Fig. 7 700-hPa helicity (m^2/s^2) at 0800 LST 4 Aug

就有强信号出现,敏感度高。

5.2 螺旋度强度演变与暴雨强弱的可能机理

选取温州市苍南上空对流层低层700 hPa每隔6小时的螺旋度值与苍南气象站3小时降水量进行对照,发现8月3日08时螺旋度有一个高值,提前12小时给出未来大降水的强信号(图9)。8月3日20时后随着螺旋度强度逐渐增强,测站降水强度不断增大,从图9分析可知,螺旋度的峰值和暴雨的峰值出现不同步,暴雨发生之前的螺旋度的增长,即环境风场对正涡度和暖湿气流的输送,为此后暴雨的发生发展提供了足够的水汽和能量,创造了有利条件,这也是螺旋度可以作为一个暴雨预报参数的根据所在,螺旋度强度逐渐加强并达最强后,降水拖曳作用和蒸发冷却作用加剧,螺旋度减

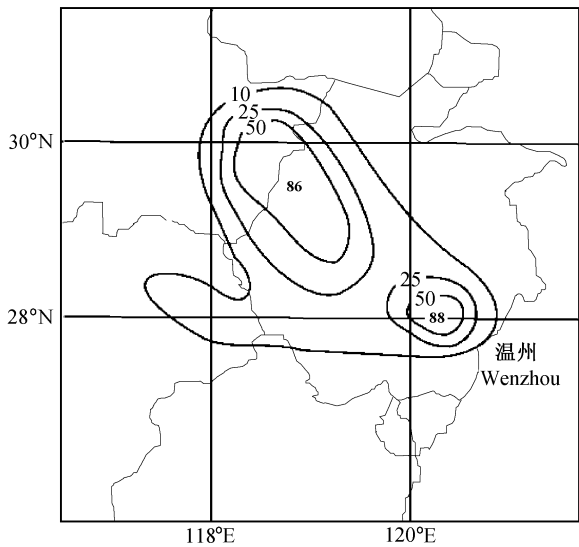


图8 8月4日08时~8月5日08时24小时的实况降水(单位: mm)

Fig. 8 Observed 24-h rainfall (mm) from 0800 LST 4 Aug to 0800 LST 5 Aug

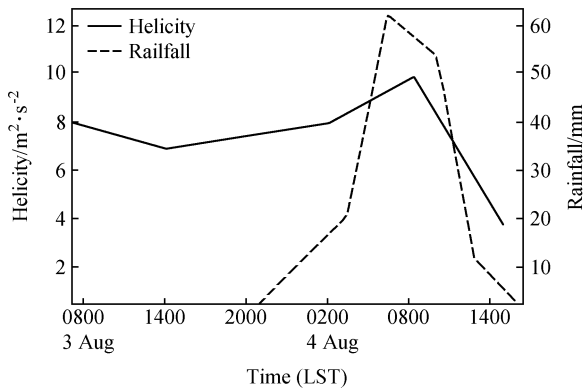


图9 8月3~4日苍南上空螺旋度与降水演变趋势

Fig. 9 Relation between helicity and rainfall at Cangnan during 3-4 Aug

小加快,最终切断了正涡度和水汽向对流体的输送,降水正反馈机制遭到破坏,此后的降水迅速衰减。可见,螺旋度大值是暴雨系统发生发展的机制之一。

5.3 螺旋度的高低层配置与降水发生的关系

从分析中发现低层螺旋度可以很好地反映降水落区,尤其是暴雨落区。从低涡诱生地温州市苍南上空高低层螺旋度对降水的贡献看,高、低层螺旋度的配合至关重要(表1)。从8月3日08~14时,低层螺旋度大值已显现,而高层(300 hPa)保持0值;当8月3日20时高层出现-3时,降水开始明

表1 8月3日08时至4日20时300 hPa和700 hPa低涡诱生地温州市苍南螺旋度的分布(单位: m^2/s^2)

Table 1 300-hPa helicity and 700-hPa helicity at Cangnan of Wenzhou (where the low vortex occurred) from 0800 LST 3 Aug to 2000 LST 4 Aug (m^2/s^2)

时间	300 hPa	700 hPa
8月3日08时	0	8
8月3日14时	0	7
8月3日20时	-3	7
8月4日02时	-8	8
8月4日08时	-3	9
8月4日14时	-6	5
8月4日20时	1	0

显起来,而且随着低层螺旋度值增大而增大,相应出现大降水;至4日14时之后在高、低层螺旋度迅速衰弱的同时,降水减弱很快。可以看出,高层负螺旋度的生消与降水的出现和结束、强弱演变是同步的。在本例中,高、低层螺旋度的演变首先是低层旋转得到增强,随着气流辐合上升带动高空气流辐散,低层辐合增强螺旋度加大,相应高空气流辐散螺旋度负值增大,同样,高、低层亦同步衰弱。整个过程高、低层螺旋度强度演变趋势基本一致,但低空略早于高空。降水与高层负螺旋度相伴而生,其强度与降水强度呈正相关。说明在考虑低层螺旋度对降水落区的贡献时,不能忽视高层螺旋度在暴雨中的作用,高、低层螺旋度的低层正值辐合与高层负值辐散的配置是引起降水的重要机制。在风暴成熟阶段,高层螺旋度对对流单体的能量维持至关重要,如果高层没有较深厚的辐散,即使低层有强的辐合,也不可能形成长生命期的对流单体,不可能有强降水出现。

5.4 螺旋度计算和MM5模式对诱生中尺度低涡移动路径的对比

8月4日08时,从高度场来看,东风波已经减弱消亡。而在浙江的东南角,有一个较强的正涡度中心存在,中心位置位于(27°N , 121°E)附近(图10)。对应于8月4日08时红外卫星云图(图略)上,原来的涡旋云系已经减弱,而另一个新的云团已经生成,这说明东风波引发的高空低涡已经形成。正是由于高空低涡形成,造成温州市平阳县敖江镇8月4日08时1小时降水量达98 mm。可以

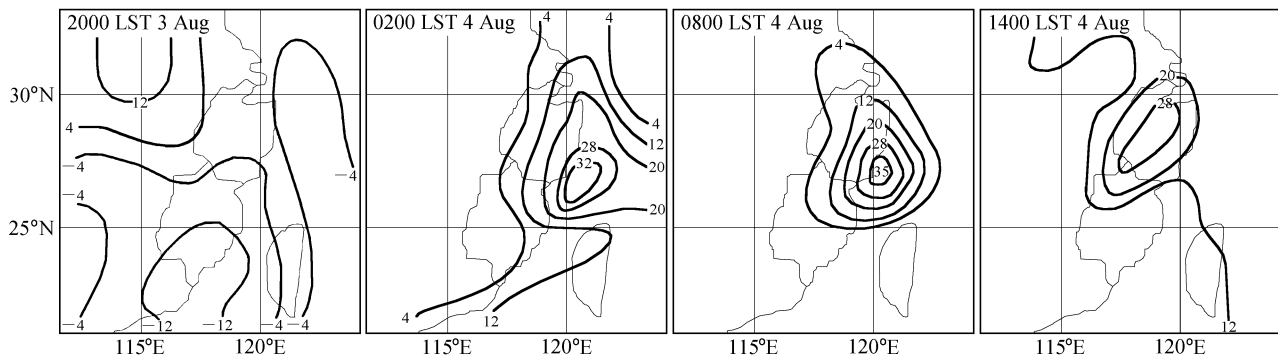


图 10 8月3~4日 MM5 预报 850 hPa 涡度演变过程 (单位: 10^{-6}s^{-1})

Fig. 10 850-hPa vorticity (10^{-6}s^{-1}) simulated with MM5 from 2000 LST 3 Aug 2001 to 1400 LST 4 Aug 2001

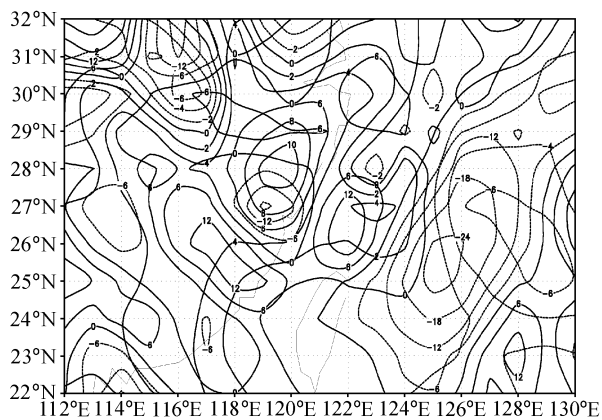


图 11 8月4日 08时 700 hPa 螺旋度 (单位: m^2/s^2) 与 8月4日 08时 Q 矢量散度 (单位: $10^{-17} \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$) 的叠加

Fig. 11 Combination of 700-hPa helicity (m^2/s^2) at 0800 LST 4 Aug 2001 and 700-hPa Q vector divergence ($10^{-17} \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$) at 0800 LST 4 Aug 2001

看出 MM5 预报正涡度中心的位置与新生云团偏差较大, 可见 MM5 模式诱生低涡生成预报较好^①, 但预报初生的位置偏向实况东南, 当然低涡移动的路径有偏离从海上西北北移向陆地。实况与螺旋度计算结果相比, 螺旋度计算结果 (图 7) 显示螺旋度大值中心在 (28°N, 120°E) 附近, 与实况在苍南 (27.6°N, 120.4°E) 附近位置很接近, 此后中心向北缩。螺旋度轴线的指向对未来低涡移动有指示意义。螺旋度计算较 MM5 模式预报低涡初生的位置准确, 若集成两种运算结果可以提高对该低涡的初生位置和移动的预测能力。图 11 显示实际低涡位置正好落在 Q 矢量散度梯度大值区和螺旋度梯度大值区的叠加区内, 可见螺旋度梯度大值区和 Q 矢

量散度梯度大值区叠加区对降水和系统的诊断能力强, 具有很好的指示意义。

低涡初生位置出现偏差的原因可能与初始资料的分辨率以及模式本身水平网格距大小引起的计算结果误差有关。MM5 模式经过嵌套网格距从 54 km 提高到 18 km, 模式空间分辨率得到改善, 但是低涡初生位置的模拟结果偏差仍较大。可见, 单纯提高模式空间分辨率效果并不理想, 可能通过进一步恰当描述物理过程、资料优化等途径对提高模式的预报能力有帮助。将螺旋度计算和中尺度模式结合起来可以提高风暴路径的预报准确率^[26]。

6 结语

(1) 螺旋度大值中心强度和螺旋度梯度大值区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; 较大螺旋度可能是暴雨及其中尺度系统发生发展的机制之一; 螺旋度的时空演变对暴雨发生有一定的预示意义。

(2) 在考虑低层螺旋度对降水落区的贡献时, 不能忽视高层螺旋度在暴雨中的作用。高、低层螺旋度的低层正值辐合与高层负值辐散的配置是引起降水的重要机制。

(3) 螺旋度梯度大值区和 Q 矢量散度梯度大值区的叠加区对降水落区有更好的指示意义, 所以不同的预报工具的预测雨区的交集, 可信度较高, 对实际预报服务有一定的指示意义。

(4) 螺旋度计算结合中尺度模式可以提高预报

① 叶子祥, 冀春晓. 一次由东风波引发的特大暴雨过程。

低涡和雨区的准确率, 所以, 在日常的业务预报中可以将螺旋度计算和中尺度模式结合起来, 这对短期天气预报的订正和短时或超短时预报水平的提高都将是一个值得做的新的尝试。

参考文献 (References)

- [1] Lilly D K. The structure, energetics and propotation of rotating convective storms. Part II: Helicity and storm stabilization. *J Atmos Sci*, 1986, **43** (2): 126~140
- [2] Davies-Jones R, Burgest D, Foster M. Test of helicity as a tornado forcast parameter. Preprints, 16th Conf. on Severe Local Storms. Kananaskis Park, AB, Canada, *Amer. Meteor. Soc.*, 1990. 588~592
- [3] Lazarus S M, Droegemeier K K. The influence of helicity on the stability and morphology of numerically simulated storms. Preprints, 16th Conf. on Severe Local Storms. Kananaskis Park, Alberta, Canada, *Amer. Meteor. Soc.* 1990. 269~274
- [4] Davise-Jones R. Streamwise vorticity: The origin of updraft rotation in supercell storms. *J. Atmos. Sci.*, 1984, **41**: 2991~3006
- [5] Lilly D K. The structure, energetics and propagation of rotating convective storms. Part I: Energy exchange with the mean flow. *J Atmos Sci*, 1986, **43**: 113~125
- [6] Brooks H E, Wilhelmson R B. The effect of low-level hodograph curvature on supercell structure. Preprints, 16th Conf. on Severe Local Storms, Kananaskis Park, AB, Canada, *Amer. Meteor. Soc.*, 1990. 34~39
- [7] Brooks H E, Doswell C A III, Davies-Jones R P. Environmental helicity and the maintenance and evolution of low-level meso-cyclones. *The Tornado: Its Structure, Dynamics, Prediction and Hazards* (Geophys. Monogr. No. 79), C Church, Ed. Amer Geophys Union, 1993, 97~104
- [8] Droegemeier K K, Lazarus S M, Davies-Jones R. The influence of helicity on numerically simulated convective storms. *Mon. Wea. Rev.*, 1993, **121**: 2005~2029
- [9] 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
Li Yaohui, Shou Shaowen. Rotational wind helicity and its effects on torrential rain processes. *Journal of Nanjin Meteorological Institute* (in Chinese), 1999, **22** (1): 95~102
- [10] Fei Shiqiang, Tan Zhemini. On the helicity dynamics of severe convective storms. *Adv. Atmos. Sci.*, 2001, **18** (1): 67~86
- [11] Leftwich P W. On the use of helicity in operational assessment of severe local storm potential. Preprints, 16th Conf. on Severe Local Storms. Kananaskis Park, AB, Canada, *Amer. Meteor. Soc.*, 1990. 306~310
- [12] Johns R H, Davies J M, Leftwich P W. Some wind and instability parameters associated with strong and violent tornadoes. Part II: Variations in the combinations of wind and instability parameters. *The Tornado: Its Structure, Dynamics, Prediction, and Hazards* (Geophys. Monogr.)., No. 79, Amer Geophys Union, 1993. 583~590
- [13] 杨越奎, 刘玉玲, 万振拴, 等. “91.7” 梅雨锋暴雨的螺旋度分析. 气象学报, 1994, **52** (3): 379~384
Yang Yuekui, Liu Yuling, Wan Zhenshuan, et al. The helicity analysis of Mei-yu front storm rainfall during July 1991. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 1994, **52** (3): 379~384
- [14] Hales J E, Vescio M D. The March 1994 Tornado outbreak in the southeast U S. “The forecast process from an SPC perspective.” Preprints, 18th Conf. on Severe Local Storms, San Francisco, CA, *Amer. Meteor. Soc.*, 1996. 32~36
- [15] 吴宝俊, 许晨海, 刘延英, 等. 螺旋度在分析一次三峡大暴雨中的应用. 应用气象学报, 1996, **7** (1): 108~112
Wu Baojun, Xu Chenhai, Liu Yanying, et al. Applying helicity to analysis of torrential rain over the Changjiang Gorges. *Quarterly Journal of Applied Meterology* (in Chinese), 1996, **7** (1): 108~112
- [16] 伍荣生. 大气动力学. 北京: 高等教育出版社, 2004. 84 pp
Wu Rongsheng. *The Atmosphere Dynamics* (in Chinese). Beijing: Higher Education Press, 2004. 84 pp
- [17] 刘式适, 刘式达. 大气运动的螺-极分解和 Beltrami 流. 大气科学, 1997, **21** (2): 151~160
Liu Shikuo, Liu Shida. Toroidal-poloidal decomposition and Beltrami flows in atmosphere motions. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (*Scientia Atmospherica Sinica*) (in Chinese), 1997, **21** (2): 151~160
- [18] 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. 南京气象学院学报, 1997, **20** (4): 500~504
Yang Xiaoxia, Hua Yan, Li Qingcai, et al. Analysis of helicity in rainstorm processes with the application to forecasting. *Journal of Nanjing Institute of Meterology* (in Chinese), 1997, **20** (4): 500~504
- [19] 刘惠敏, 郑兰芝. 螺旋度诊断分析与短时强降水面雨量预报. 气象, 2002, **28** (10): 37~40
Liu Huimin, Zheng Lanzhi. Helicity diagnosis and short-time extraordinary area rainfall forecast. *Meteorological Monthly* (in Chinese), 2002, **28** (2): 37~40
- [20] 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. 高原气象, 2003, **22** (2): 202~208
Hou Ruiqin, Cheng Linsheng, Feng Wuhu. Diagnostic analysis of the helicity and kinetic energy for a low vortex of “98.7” extraordinary heavy rainfall. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 2003, **22** (2): 202~208
- [21] 寿绍文, 励申申, 姚秀萍. 中尺度气象学. 北京: 气象出版社, 2003. 133~268
Shao Shaowen, Li Shenshen, Yao Xiuping. *The Mesoscale Meteorology* (in Chinese). Beijing: China Meteorological

Press, 2003. 133~268

[22]

寿绍文, 杜秉玉, 肖稳安, 等. 中尺度对流系统及其预报. 北京: 气象出版社, 1993. 99~104

Shou Shaowen, Du Bingyu, Xiao Wenan, et al. *The Mesoscale Convective Systems and Forecasting* (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 1993. 99~104

[23]

Hoskins B J, Draghici I, Davies H C. A new look at the ω -equation. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 1978, **104**: 31~38

[24]

项素清. 热带低压环流引发的中尺度特大暴雨过程分析. 气象科技, 2003, **31** (1): 38~41

Xiang Suqing. Analysis of a mesoscale torrential rainstorm triggered by the tropical depression system. *Meteorological Science and Technology* (in Chinese), 2003, **31** (1): 38~41

[25]

段丽, 陈联寿. 热带风暴“菲特”(0114)特大暴雨的诊断研究. 大气科学, 2005, **29** (3): 343~353

Duan Li, Chen Lianshou. Diagnostic analysis and numerical study of torrential rain associated with the tropical storm Fitow (0114). *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2005, **29** (3): 343~353

[26]

陆慧娟, 高守亭. 螺旋度及螺旋度方程的讨论. 气象学报, 2003, **61** (6): 684~691

Lu Huijuan, Gao Shouting. On the helicity and the helicity equation. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2003, **61** (6): 684~691