

# “99.8” 山东特大暴雨的螺旋度分析

谭志华 杨晓霞

(山东省气象台, 济南 250031)

## 提 要

应用螺旋度理论结合湿度和稳定度条件对1999年8月11~12日产生在鲁东南和鲁中北部的大暴雨、特大暴雨天气过程进行了诊断分析。结果表明:暴雨产生在高温、高湿和不稳定大气中;500hPa以下低层k-螺旋度正值较大。暴雨产生在850hPa螺旋度中心附近。螺旋度的变化对天气系统的移动、发展及暴雨的落区和强度有较好的指示性;螺旋度还反映了大气垂直运动分布特征和旋转状况。

**关键词:** 特大暴雨 螺旋度 稳定度

## 引 言

1999年8月10~13日,由9907号热带风暴减弱而成的低压在山东东南部停滞与冷空气结合,在鲁东南和鲁中北部产生了一次大暴雨和特大暴雨天气过程。这次降雨过程强度大、时段集中,主要强降雨出现在11~12日上午,暴雨高峰期在11日后半夜,有两个大暴雨中心,一个位于鲁东南的诸城,降雨集中时段的24小时降雨量为589.2mm,另一个在鲁中北部的高青,降雨集中时段的24小时降雨量为190.7mm。可以看出,鲁中北部暴雨区范围较大,而鲁东南暴雨区范围

相对较小(图略),但降水强度很强,诸城最大1小时降雨量达106.7mm,具有明显的中小尺度天气特征。众所周知,产生暴雨的条件是充足的水汽、大气层结不稳定及动力触发机制。螺旋度是一个描述环境风场气流沿运动方向的旋转程度和运动强弱的物理参数,它反映了大气的动力场特征,能够很好地描述大气运动的性质和特点,研究表明<sup>[1~5]</sup>,它对强对流及大暴雨天气的预报具有一定的指示意义。本文试用螺旋度结合湿度和稳定度条件对这次特大暴雨过程作一诊断分析。

## 1 螺旋度的计算

螺旋度定义为风速与涡度点积的体积分<sup>[1,6]</sup>

$$H = \iiint_V \mathbf{V} \cdot (\nabla \Delta \mathbf{V}) \, d\tau \quad (1)$$

$P$  坐标的局地螺旋度定义为

$$H = \mathbf{V} \cdot (\nabla \Delta \mathbf{V}) = \left( \frac{\partial \omega}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial P} \right) u + \left( \frac{\partial u}{\partial p} - \frac{\partial \omega}{\partial x} \right) v + \left( \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right) \omega \quad (2)$$

式中右方三项分别与  $\vec{i}$ 、 $\vec{j}$ 、 $\vec{k}$  方向的风速和涡度分量联系在一起,不妨称之为  $i$ -螺旋度,  $j$ -螺旋度,  $k$ -螺旋度,分别记为  $H_x$ 、 $H_y$ 、 $H_z$ 。其中  $\partial \omega / \partial y$  和  $\partial \omega / \partial x$  相对于  $\partial v / \partial p$  和  $\partial u / \partial p$  来说很小,可以忽略不计。

为了与已有的习惯一致,使符合右(左)手定则的螺旋度取正(负)号,也就是涡度方向与风向一致时螺旋度为正,相反时为负,转换成  $z$  坐标中的螺旋度表达式为:

$$H \approx \left( -\frac{\partial v}{\partial z} \right) u + \left( \frac{\partial u}{\partial z} \right) v + \left( \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right) \left( -\frac{w}{\rho g} \right) \approx H_x + H_y + H_z \quad (3)$$

由于在暴雨区上空有深厚的上升运动 ( $w > 0$ ),所以若有正涡度 ( $\zeta > 0$ ),则有正  $H_z$ ,若有负涡度 ( $\zeta < 0$ ),则有负  $H_z$ 。为了突出暴雨区的这一特点,计算时规定,若  $w < 0$  时,则  $H_z = 0$ ,只计算有上升运动时的螺旋度。

应用 HLAFS 数值预报分析场  $0.5^\circ \times 0.5^\circ$  经纬度资料,计算暴雨过程期间  $32 \sim 42^\circ\text{N}$ 、 $113 \sim 127^\circ\text{E}$  范围内各标准等压面上的  $H_z$ ;取上下层等压面上风速的算术平均值作为该层的平均风速,计算各等压面层中的  $H_x$  和  $H_y$ 。

## 2 形势背景简述

暴雨期间,500hPa 副热带高压位于  $125^\circ$

E 以东,主体强大、且稳定,脊线偏北,位于  $38 \sim 40^\circ\text{N}$  之间。低层 850hPa 上,从日本南部、经朝鲜半岛南部至山东半岛维持一风速为  $4 \sim 10 \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$  的东南气流。11 日 20 时,山东半岛南部近海东南风加大到  $12 \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。由 9907 号热带风暴减弱的低压,沿副热带高压边缘的东南气流北移至青岛和日照之间停滞,并与西风带冷空气相互作用。地面图上表现为低压倒槽在山东省稳定少动。在此期间,卫星云图上在地面辐合线附近不断有云团生成,在鲁东南合并、发展、西移(图略)。

## 3 特大暴雨的螺旋度分析

### 3.1 $k$ -螺旋度的演变及水平分布特征

分析发现,暴雨期间  $k$ -螺旋度 ( $H_z$ ) 在 700hPa 以下正值较大,与暴雨区对应较好。850hPa  $k$ -螺旋度水平分布图上,11 日 08 时螺旋度有两个正值中心,一个位于江苏北部,中心值为  $786 \times 10^{-9} \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ ,另一个位于山东半岛的中部,中心值为  $647 \times 10^{-9} \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ ,该中心长轴呈近南北向,与低层的南北向切变线和地面倒槽辐合线走向一致,且位于辐合线的东侧。此时,鲁东南的暴雨产生在两个螺旋度中心之间的  $200 \times 10^{-9} \sim 400 \times 10^{-9} \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$  的等值线区域内,螺旋度正值较小(图略),并与  $850 \text{hPa} > 17.3 \text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$  的比湿中心和  $\Delta \theta_{se, 500-850}$  为  $-13.9^\circ\text{C}$  的不稳定能量中心相对应。说明,大气近于饱和,并有不稳定能量蓄积,只需较弱的动力触发,就可使不稳定能量释放,产生暴雨。

11 日 20 时 850hPa 上,两个正螺旋度中心合并,在鲁中形成一个  $1300 \times 10^{-9} \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$  的强中心,后半夜,在正螺旋度中心的东南侧  $500 \times 10^{-9} \sim 1200 \times 10^{-9} \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$  的等值线密集区(鲁东南)和西北侧  $100 \times 10^{-9} \sim 700 \times 10^{-9} \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$  等值线密集区(鲁中北部)分

别出现了特大暴雨和大暴雨(图1)。湿度场上大于  $12\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$  的比湿区自山东半岛伸至鲁西(图2), 两个暴雨区均产生在正螺旋度区与高湿区和不稳定能量区重叠处, 并位于

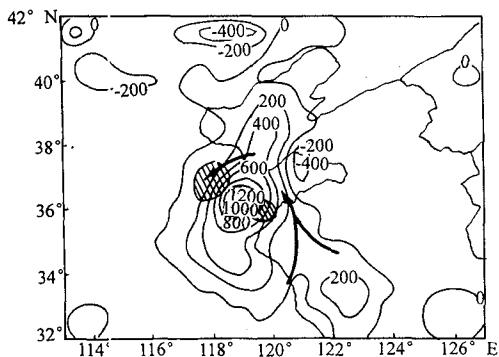


图1 1999年8月11日20时850hPa  $k$ -螺旋度分布(单位:  $10^{-9}\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ , 斜线区为暴雨区)

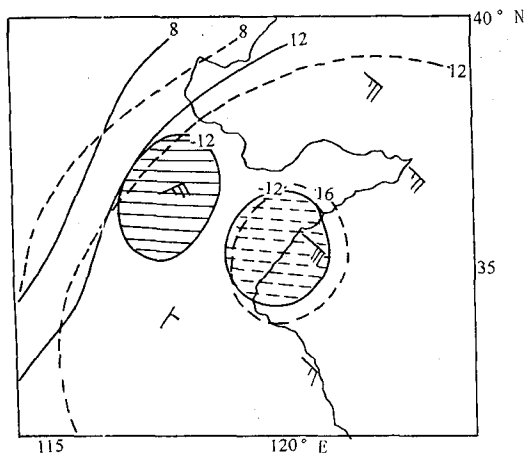


图2 1999年8月11日08时比湿场(实线)、 $\Delta\theta_{se\ 500-850} < -12^\circ\text{C}$ 区(实斜线)和20时比湿场(虚线)和 $\Delta\theta_{se\ 500-850} < -12^\circ\text{C}$ 区(虚斜线,  $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )

水汽通量大值轴附近及左侧。可见, 在高湿和有不稳定能量储存条件下, 11日夜间两个暴雨区雨量增强与螺旋度加大有着明显的关系。12日08时, 正螺旋度中心移至滨州附近

(图略), 虽然强度仍然很强, 但  $\Delta\theta_{se\ 500-850}$  已为正值, 气层转为稳定, 水汽通量也减小, 相应的暴雨站数减少。鲁中北部暴雨区位于较强的螺旋度中心附近, 螺旋度作为动力条件, 对这一地区暴雨的维持起了主要作用。而鲁东南上空螺旋度迅速减弱, 但海上东南暖湿气流依然存在, 水汽充沛, 只有诸城和五莲两站仍然有暴雨产生, 显然, 在大尺度动力条件减弱的环境下, 这两站降雨仍然较强与地形作用形成的动力抬升有关。

### 3.2 $k$ -螺旋度的垂直分布

穿越两片暴雨区作NW~SE向的螺旋度垂直剖面(图3)发现, 暴雨产生在低层较强的正螺旋度中心附近。暴雨区上空, 螺旋度呈中低层正、高层负的配置。正螺旋度

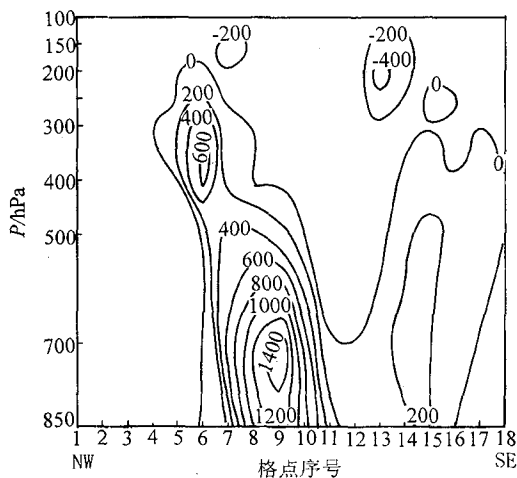


图3 1999年8月11日20时穿过暴雨区( $40^\circ\text{N}$ 、 $113^\circ\text{E} \sim 32^\circ\text{N}$ 、 $125^\circ\text{E}$ )螺旋度垂直剖面(单位:  $10^{-9}\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ )

图下横线为暴雨区跨度

高值区主要在500hPa以下, 700hPa最强, 中心比850hPa稍偏北, 中心值为  $1400 \times 10^{-9}\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ , 250hPa以上为负值。低层正螺旋度远大于高层负螺旋度, 即低层正涡度辐合远大

于高层负涡度辐散,这说明暴雨主要是由低层正涡度辐合作用而产生的。

### 3.3 $j$ -螺旋度分布特征

分析  $H_y$ 、 $H_z$  的分布发现,在 850 ~ 700hPa 层中, $H_y$  正高值区与鲁东南特大暴雨区有明显的对应关系,而且与 850hPa 的上升运动区相一致,这说明该区上空有明显的风垂直切变,表现出中小尺度天气动力特征;而  $H_z$  与暴雨区无明显的对应关系。因此我们用  $H_y$  来讨论暴雨区上空大气垂直运动的分布。暴雨期间,山东省上空 500hPa 以下一直维持偏东风,分析  $H_y$  分布可知,850 ~ 700hPa 层暴雨区上空  $H_y$  为正值区,鲁西为负值区(图 4),1000 ~ 850hPa 则相反。根据  $H_y \approx \partial u / \partial z \cdot v$ ,在 850 ~ 700hPa 层中,鲁东

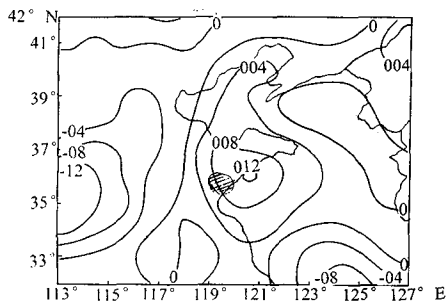


图 4 1999 年 8 月 11 日 20 时 850~700hPa  $j$ -螺旋度分布 (单位:  $10^{-3} \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ )  
斜线区为鲁东南暴雨区

南上空  $H_y > 0, v > 0$  则有  $\partial u / \partial z > 0$ ,鲁中北部上空  $H_y < 0, v < 0$  则有  $\partial u / \partial z > 0$ ,即上述区域东风均随高度减小,产生的垂直切变形成了与 Y 轴同方向的水平涡度分量,绕 Y 轴空气微团呈顺时针旋转,而在其下的 1000 ~ 850hPa 之间则相反,东风随高度增大,绕 Y 轴空气微团呈逆时针旋转。在 850hPa 附近为一股偏东风急流。沿  $36^\circ \text{N}$  过鲁东南暴雨区,作  $u$ 、 $w$  合成风的垂直流场剖

面图可看出,暴雨区上空为一股偏东风的斜升气流(图 5),上升气流在 850~700hPa 最大,到 500hPa 减小并转为偏西气流。在 500 ~ 400hPa 之间  $119.5^\circ \text{E}$  附近,即鲁东南暴雨区上空形成一个顺时针旋转的纬向垂直环流。而在上升气流的西侧 700hPa 以下形成一股逆时针旋转的气流。大暴雨产生在低层逆时针环流与中层顺时针环流之间的斜升气流中。可见,螺旋度还反应了大气垂直运动分布特征、旋转状况以及产生特大暴雨的中小尺度天气的动力条件。

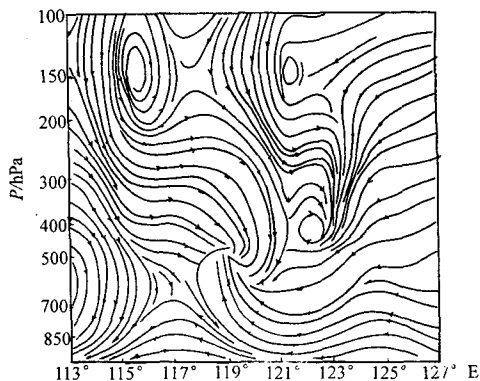


图 5 1999 年 8 月 11 日 20 时穿过鲁东南暴雨区沿  $36^\circ \text{N}$  的流场垂直剖面图

图下横线为暴雨区跨度

### 3.4 螺旋度对暴雨的作用机制分析

螺旋度分布与低层天气系统有很好的对应关系,暴雨过程中  $k$ -螺旋度( $H_z$ )正值区长轴始终与地面倒槽辐合线、低层南北向切变线走向一致,并且中心位于地面倒槽顶端的辐合线附近。在这一区域有风的气旋式旋转和上升,而上升气流的气旋性旋转来源于环境风场沿气流方向的水平涡度<sup>[4]</sup>,在上述区域里流入旋转的空气微团最强烈,然后倾斜上升,产生绕垂直轴的气旋性旋转运动,进而导致强烈的上升运动,为暴雨的产生和加

强创造了有利的动力条件。

#### 4 结论

(1) 850hPa  $k$ -螺旋度正值区长轴与南北向切变线和地面倒槽辐合线走向一致,螺旋度的强弱和移动对天气系统的移动、发展有一定的指示意义。

(2) 暴雨区上空  $k$ -螺旋度的分布为,中低层正、高层负,且低层正值区强度远大于高层负值区,700hPa 正螺旋度最强。

(3) 暴雨首先产生在高湿中心与不稳定能量中心相重叠区域,随着低层正  $k$ -螺旋度的增大而增强,雨区位于正螺旋度中心附近的等值线密集区,并与水汽输送区相对应。

(4) 螺旋度反映了低层大气垂直流动分

布特征和旋转状况。

#### 参考文献

- 1 Woodal G R. Qualitative forecasting of tornadic activity using storm-relative environmental helicity. Preprint, 16th conference on severe local storm, Oct. 22~26, 1990: 311~315.
- 2 杨越奎,吴宝俊,沈文海等. “91.7”梅雨锋暴雨的螺旋度分析. 气象学报, 1994, 52 (3): 379~384.
- 3 吴宝俊,许晨海,刘延英等. 螺旋度在一次三峡大暴雨中的应用. 应用气象学报, 1996, 7 (1): 108~111.
- 4 章东华. 螺旋度-预报强风暴的风场参数. 气象, 1993, 19 (8): 46~48.
- 5 李英. 春季滇南冰雹大风天气的螺旋度分析. 南京气象学院学报, 1998, 22 (2): 164~169.
- 6 伍荣生. 大气动力学. 北京: 气象出版社, 1990.

## Helicity Analysis on the Torrential Rain in Shandong in August 1999

Tan Zhihua Yang Xiaoxia

(Shandong Meteorological Observatory, Jinan 250031)

#### Abstract

By using of the helicity theory, humidity and stability condition, the torrential rain in the southeast and the northern of the central Shandong province during August 11—12, 1999 was diagnosed. The analysis results show that the rainstorm is produced in higher temperature, higher humidity and unstable atmosphere. There is higher positive  $k$ - helicity at 500hPa and at low levels. Rainstorm occurs near the positive center of helicity at 850hPa. The variation of helicity indicates weather systems moving developing and falling area and intensity of torrential rain. Helicity also reflects the distribution of vertical moving and rotation status of atmosphere.

**Key Words:** torrential rain helicity stability