

“91.7”梅雨锋暴雨的螺旋度分析*

杨越奎 刘玉玲 万振拴

(空军气象研究所, 北京, 100085)

吴宝俊 沈文海

(中国气象科学研究院, 北京, 100081)

螺旋度(Helicity)是近年来引入天气分析预报中的一个非常重要的物理量,其严格的定义式为风速和涡度点积的体积分^[1,2]:

$$H = \iiint_V \vec{v} \cdot \nabla \wedge \vec{v} \, d\tau \quad (1)$$

其中 $\nabla \wedge \vec{v}$ 是相对涡度(以下简称涡度)。

可以看出,螺旋度的大小反映了旋转与沿旋转轴方向运动的强弱程度。虽然有关该量应用的研究目前在国内外刚刚起步,但是已展现了广阔的前景。伍荣生^[1]曾经给出了螺旋度的平衡方程式,并指出:在准地转运动中大气螺旋度是守恒的,许多研究还表明^[2-4],螺旋度对雷暴、龙卷等天气现象的预报具有一定的指示意义。

1991年7月(集中在6月30日至7月12日)的梅雨锋暴雨给长江中下游地区带来了严重的洪涝灾害,图1给出该时段的平均24h降水量。本文对这一时段暴雨的螺旋度进行了分析,得出了一些有意义的结果,发现螺旋度作为一个新的诊断量,在暴雨研究中是有一定应用价值的。

1 螺旋度在 p -坐标系中的表达式

根据 Woodall^[2]的观点,我们可以定义局地螺旋度(以下简称螺旋度)为:

$$h = \vec{v} \cdot \nabla \wedge \vec{v} = (u\vec{i} + v\vec{j} + w\vec{k}) \cdot (\zeta_x\vec{i} + \zeta_y\vec{j} + \zeta_z\vec{k}) \quad (2)$$

其中 $\zeta_x, \zeta_y, \zeta_z$ 分别为涡度在三个方向的分量,余为惯用符号。

为应用 p 坐标系中的资料进行计算,经过坐标变换后式(2)可以写成:

$$h = \left\{ -\frac{1}{g} \left[\frac{\partial(\omega/\rho)}{\partial y} - f\rho u_s \frac{\partial(\omega/\rho)}{\partial p} \right] + \rho g \frac{\partial v}{\partial p} \right\} + \left\{ \frac{1}{g} \left[\frac{\partial(\omega/\rho)}{\partial x} + f\rho v_s \frac{\partial(\omega/\rho)}{\partial p} \right] - \rho g \frac{\partial u}{\partial p} \right\} + \left[\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} + \rho f \left(v_s \frac{\partial v}{\partial p} - u_s \frac{\partial u}{\partial p} \right) \right] \quad (3)$$

其中 $\rho = \frac{p}{RT}$ 为空气密度, ω 为垂直速度,由修正的运动学方法得出。

2 资料来源及处理

我们所采用的资料为气象台站日常业务中的实时观测资料。客观分析用逐步订正方

* 1992年10月9日收到原稿,1993年3月3日收到修改稿。由“85-906国家科技攻关项目”资助。

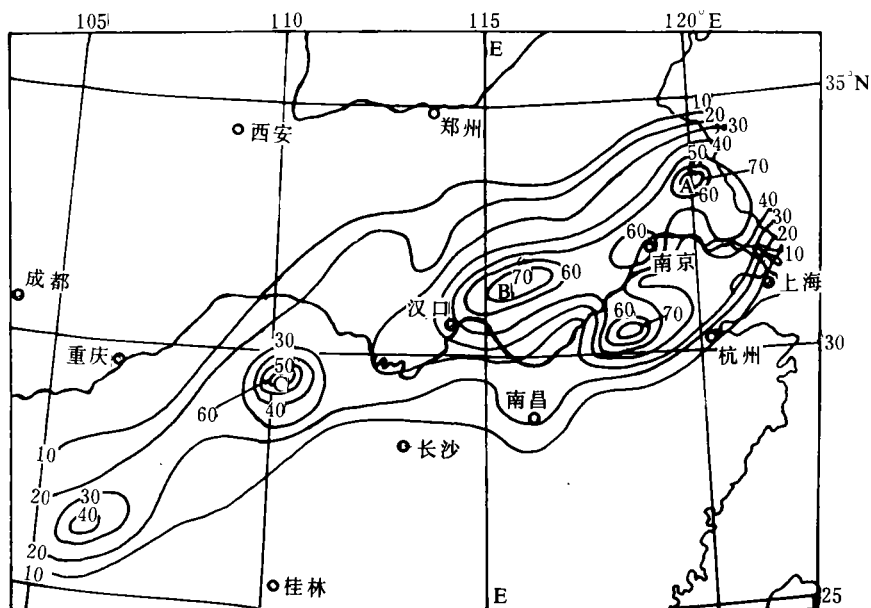


图1 1991年6月30日至7月12日时段内的平均24h降水量
(单位:mm, A, B, C为降水中心; EE'为本文所取剖面的基线)

案^[6], 网格设计采用 Lambert 平面投影直角坐标系, 水平格距为 75km, 格点数为 36×30, 垂直方向格距为 100hPa, 将 1000—100hPa 分为 10 层, 非标准层的量由对数插值得到。

在应用实测风之前, 我们采用文献[7]的方法对实测风进行了订正。

3 计算结果分析

3.1 螺旋度的演变与暴雨的关系

根据式(3), 我们利用 1991 年 6 月 30 日至 7 月 12 日的资料, 计算了逐日 08 时局地螺旋度的值, 图 2 给出了这一时段内扬州附近 500hPa 的局地螺旋度及每天 9 时以后 24h 降水量的变化情况。可以看出: 螺旋度的波峰出现以后, 24h 降水量也大都出现波峰, 这表明: 在该时段的降水过程中, 螺旋度的演变对暴雨有一定的指示意义。但同时, 我们也注意到, 螺旋度的演变同 24h 降水量的对应关系并非十分严格, 在中心配置等方面, 它们之间的关系是比较复杂的, 假若将螺旋度与水汽条件或热力、能量等因子相结合, 效果也许更好些, 这方面的研究还有待于进一步深入。

3.2 z-螺旋度的水平分布与暴雨区的关系

根据向量分析中的定义, 螺旋度属于假标量^[8], 式(3)右端三项有着各自不同的意义, 它们分别与 x, y, z 方向的风速和涡度的分量联系在一起, 我们不妨称之为 x-螺旋度, y-螺旋度, z-螺旋度, 分别记为 h_1, h_2, h_3 , 并有:

$$\begin{aligned}
 h_1 &= -\frac{1}{g} \left[\frac{\partial(\omega/\rho)}{\partial y} - f\rho u_{\kappa} \frac{\partial(\omega/\rho)}{\partial p} \right] + \rho g \frac{\partial v}{\partial p} \\
 h_2 &= \frac{1}{g} \left[\frac{\partial(\omega/\rho)}{\partial x} + f\rho v_{\kappa} \frac{\partial(\omega/\rho)}{\partial p} \right] - \rho g \frac{\partial u}{\partial p} \\
 h_3 &= \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} + f\rho \left(v_{\kappa} \frac{\partial v}{\partial p} - u_{\kappa} \frac{\partial u}{\partial p} \right)
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

研究中发现, z-螺旋度有着清楚而重要的意义, 我们将1991年6月30日至7月12日08时的资料进行平均(简称为平均资料), 然后计算了该时段平均的 z-螺旋度。图3给出了它在800hPa 等压面上的分布。将图3同图1对比可以发现, 800hPa z-螺旋度的水平分布, 大体上反映了雨带的分布, z-螺旋度的正大值中心 A'、B'、C'同平均的雨量中心 A、B、C 有着较好的对应关系。

从整层的情况来看, 上述结论在对流层中下层(500hPa 以下)均成立, 对流层上层(500hPa 以上)暴雨中心位置上出现了 z-螺旋度的负值中心, 这一点在下面 z-螺旋度的垂直结构分析中将得到进一步的证明。

1991年6月30日至7月12日逐日资料的计算结果也表明, 在对流层中下层, z-螺旋度的正大值区, 基本上对应着当时的雨量中心, 两者之间配合得比较好。

3.3 z-螺旋度的垂直结构

在垂直方向上, z-螺旋度也有着非常明显的特点, 图4给出了用平均资料算出的沿图1中基线 EE' 的 z-螺旋度的垂直剖面图, EE' 经过武汉附近的降水中心。图4中引人注目的是, 在暴雨区附近上空 z-螺旋度低层表现为正中心, 高层为负中心, 由于:

$$h_3 = \omega \zeta_{\kappa} \tag{5}$$

图4说明在1991年6月30日至7月12日的暴雨期间对流层中下层垂直速度与垂直涡度呈正相关, 对流层上层垂直速度与垂直涡度呈负相关。

图5给出了采用订正的运动学方法, 利用平均资料算出的沿 EE' 剖线的垂直速度(ω)分布图。

可以看出, 在暴雨区上空为整层的上升运动, 中心在500hPa 左右, 这样综合图4和图5, 可知在暴雨区上空, z-螺旋度的正值区, 对应着正涡度区, z-螺旋度的负值区对应着负涡度区, 利用实际资料计算出的涡度分布也确实如此(图略)。以上分析表明, 在1991年6月30日至7月12日梅雨锋暴雨期间平均涡度场分布的明显特征是, 暴雨区上空对流层中下层

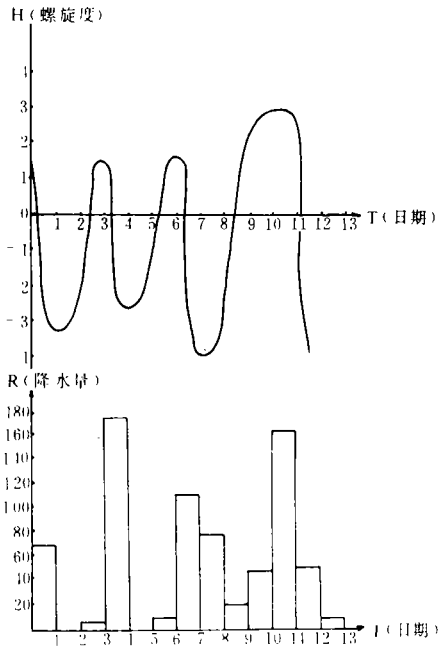


图2 螺旋度与雨量的演变关系
(上图为1991年6月30日至7月12日扬州附近500hPa 螺旋度的演变情况, 单位: 10^{-2}ms^{-2} ; 下图为该格点每日09时至第2日09时降水量直方图; 单位: mm)

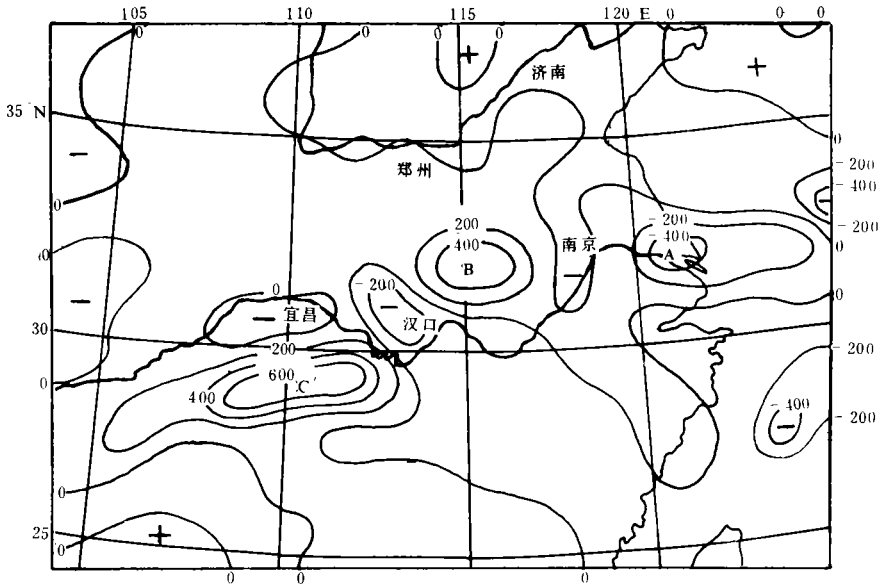


图3 用1991年6月30日至7月12日平均资料计算出的 z -螺旋度在 800hPa 等压面上的分布
 (单位: $10^{-8}ms^{-2}$, 等值线间隔 $200 \times 10^{-8}ms^{-2}$, A', B', C' 为 z -螺旋度的 z 值中心)

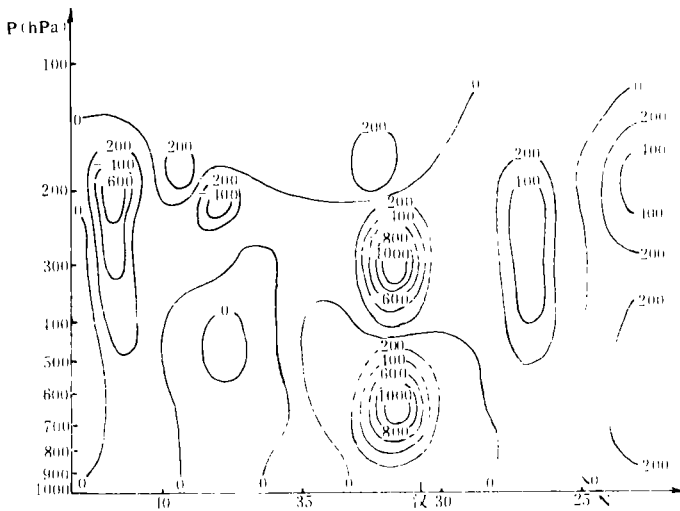


图4 沿图1中基线 EE' 平均 z -螺旋度的垂直剖面图
 (单位: $10^{-8}ms^{-2}$, 等值线间隔 $200 \times 10^{-8}ms^{-2}$)

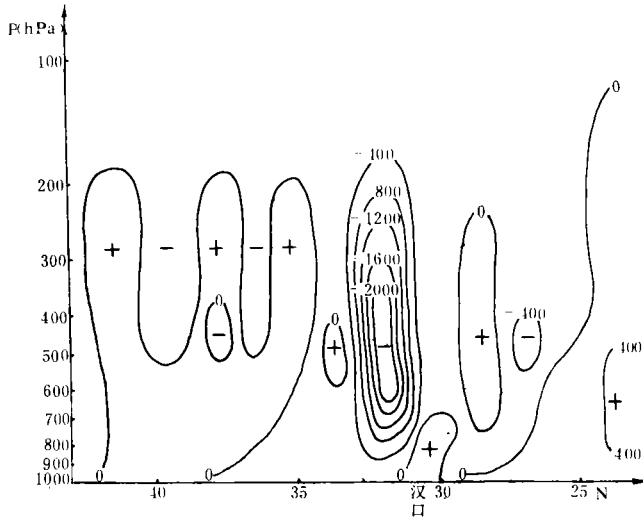


图5 利用平均资料算出的沿图1中 EE' 剖线和修正的运动学垂直速度(ω)

(单位: 10^{-3}Pas^{-1} , 等值线间隔 $400 \times 10^{-3}\text{Pas}^{-1}$)

为气旋式涡度区, 对流层上层为反气旋式涡度区, 这种结构对系统的自身发展及暴雨的维持是十分有利的。有人形象地称图4这种结构的作用为“动力飞轮”效应^[9]。

4 结论

通过上述1991年7月梅雨锋暴雨的螺旋度分析, 可以得到以下的初步认识:

(1) 500hPa 面上的螺旋度的演变同其后24h 降水量变化有较好的对应关系, 这可能有助于暴雨的预报;

(2) z -螺旋度的水平分布同当时雨区的恰当配合, 有利于暴雨系统的发展及暴雨的维持。

参考文献

- [1] 伍荣生. 大气动力学. 北京: 气象出版社. 1990. 96—101.
- [2] Woodall G R. Qualitative forecasting of tornadic activity using storm—relative environmental helicity. Preprint. 16th conference on severe local storm. 1990. 311—315.
- [3] Lazarus S M and Droegemeier K K. The influence of helicity on the stability and morphology of numerically simulated storms. Preprint. 16th conference on severe local storm. 1990. 269—275.
- [4] Davies-Jones R and Donald Burgess. Test of helicity as a tornado forecast parameter. Preprint. 16th conference on severe local storm. Oct. 22—26. 1990. 588—593.
- [5] 杨大升等. 动力气象学. 北京: 气象出版社. 1980. 114—117.
- [6] 杨越奎等. 用多层非线性平衡 ω 方程分析“91.7”梅雨锋暴雨. 气象. 1993. (1): 3—8.
- [7] 郑良杰等. 中尺度天气系统的诊断分析和数值模拟. 第三章. 北京: 气象出版社. 1989.
- [8] H E 柯青. 向量计算及张量计算初步. 北京: 商务印书馆. 1954. 54—56.

[9] 林民生, 林熹闵. TAMEX 第一阶段中尺度对流系统之个案研究. 大气科学(台湾), 1989, (9): 257—269.

THE HELICITY ANALYSIS OF MEI-YU FRONT STORM RAINFALL DURING JULY, 1991

Yang Yuekui Liu Yuling Wan Zhenshuan

(The Meteorological Research Institute of the Air Force, Beijing, 100085)

Wu Baojun Shen Wenhai

(Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing, 100081)

Abstract

In this paper, the evolution of the helicity during the period of Mei-yu of July, 1991, is analyzed. The results show that the evolution of helicity is a indicator of storm rainfall in a certain sense. And the horizontal distribution of the z -helicity is corresponding to the storm rainfall region properly in the middle and lower troposphere (below 500hPa). The vertical structure of z -helicity above the precipitation center is advantageous to the maintenance of the storm rainfall. The effect of this kind of structure is called "dynamic flywheel"

敬告读者

改革开放以来,气象科学研究工作取得了长足的进展,大量有创见的气象科研论文急待发表。为适应这一形势,加速学术交流,自1995年起《气象学报》编辑部将积极筹措经费,适时出版《气象学报》增刊或其它出版物,以满足需要和缩短出版周期。为加强编辑部和读者的联系,及时传递出版信息,我编辑部决定建立《气象学报》订户档案,迫切希望本刊订户将(1)姓名、(2)通讯地址、(3)邮政编码(如系单位订户则将(1)单位名称、(2)通讯地址、(3)邮政编码、(4)联系人、(5)订阅份数)通知《气象学报》编辑部备案,以备今后联系。来信请寄北京市海淀区白石桥路46号,中国气象学会《气象学报》编辑部,邮政编码100081。

《气象学报》编辑部

1994年7月7日