

文章编号: 1000-2022(2006)03-0358-06

一次江淮梅雨中的涡旋合并过程分析

雷正翠^{1,3}, 任健², 马镜娴¹, 周慧¹

(1. 南京信息工程大学 大气科学系, 江苏 南京 210044;

2. 江苏省气象局, 江苏 南京 210008 3. 常州市气象局, 江苏 常州 213001)

摘要: 利用 2003 年 7 月每日 4 个时次的 $1^\circ \times 1^\circ$ NCEP 风场、湿度场、高度场等再分析资料, 对 2003 年 7 月 8—9 日江淮流域暴雨过程进行了分析, 结果表明: (1) 江淮流域上空的中尺度涡旋合并与此暴雨过程密切相关。涡旋合并使得低层辐合、高层辐散加强, 垂直速度、水汽输送、湿螺旋度加强, 从而导致暴雨增幅。(2) 低层辐合、高层辐散的高低空配置有利于强上升运动的维持, 强上升气流所携带的水汽和能量有利于对流云团的发生发展, 有利于暴雨的维持。(3) 来自孟加拉湾和南海的暖湿气流为江淮流域提供了充足的水汽。

关键词: 江淮流域; 涡旋合并; 暴雨

中图分类号: P447 **文献标识码:** A

A Case Analysis of Vortex-Merging Process in a Jianghuai River Valley Meiyu Rainstorm

LEI Zheng-cui^{1,3}, REN Jian², MA Jing-xian¹, ZHOU Hui¹

(1. Department of Atmospheric Sciences, NUIST, Nanjing 210044, China

2. Jiangsu Meteorological Bureau, Nanjing 210008, China

3. Changzhou Meteorological Bureau, Changzhou 213001, China)

Abstract A strong rainstorm occurred in the Jianghuai River Valley from 8th to 9th July 2003. The rainstorm case has been analyzed using the NCEP/NCAR reanalyzed data (4 times per day) including wind, humidity and height fields. The results show that the heavy rain was mainly associated with the merging of mesoscale vortices. The strengthening of the lower level convergence and upper level divergence was associated with the vortex-merging, enhanced the updraft, moisture transfer and moist helicity, resulting in heavy precipitation. The allocation of lower level convergence and upper level divergence was favorable to the maintenance of strong updrafts, and the moisture and energy carried by the updrafts was in turn favorable to the genesis and development of convective cloud cluster. The warm moist flow from the Bay of Bengal and the South China Sea provided the rainstorm sufficient moisture.

Key words Jianghuai River; vortex merger; heavy rainfall

收稿日期: 2005-02-21; 改回日期: 2005-04-18

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目 (40333028)

作者简介: 雷正翠 (1970-), 女, 湖北松滋人, 硕士, 研究方向: 涡旋动力学. E-mail: lzc6903@sohu.com.

0 引 言

2003年夏季江淮流域梅雨期,江淮流域出现了持续性特大暴雨。6月下旬至7月下旬初,雨带在江淮流域徘徊^[1],江淮流域先后出现6次降雨过程,过程降雨量普遍有400~500 mm,其中江苏、安徽两省沿淮地区及河南东南部的部分地区达500~600 mm,较常年同期偏多1~2倍,主汛期流域平均降水量仅次于1954年,为近50 a来第2位。由于雨势强,降雨时段、雨区都很集中,酿成了特大洪涝灾害,使国民经济和人民生命财产遭受了巨大的损失。因此对暴雨灾害性天气的研究成为气象工作的重要课题,也是气象业务中急需解决的难题之一。然而,无论是大范围的暴雨还是一些突发性的强降水过程,其发生机制和成因目前都还未得到完全清楚的认识,有待于进一步深入研究。

关于涡旋合并,已有一些文献提到过,也受到许多气象工作者的关注^[2-23]。Melander等^[2]用数值方法研究了二维对称涡旋合并的原因及初始条件。罗哲贤等^[3]用正压原始方程模式对多个涡旋同时存在条件下涡旋合并情况进行了研究,指出涡旋是否合并除与涡旋之间距离有关外,还与涡旋数目、排列方式和强度分布有关。徐枝芳等^[4]用MM5对98年江淮暴雨中的涡旋合并进行了数值模拟,分析研究了合并时流场演变特征。公颖等^[5]利用数值模式MM5模拟了2002年7月的一次强梅雨暴雨过程,分析出了此次过程中的正涡度区的合并情况。翟国庆等^[6]、王智等^[7]对 α 、 β 、 α 中尺度涡旋的演变及它们之间的关系进行了研究,但未进行合并的研究。由于常规观测资料的时空分辨率较低,一般无法识别出 β 中尺度系统,所以一般情况是通过卫星云图、多普勒雷达资料分析出对流单体、对流云团的合并^[8-13]或利用降水等资料分析出雨团的合并^[14]等。对暴雨中涡旋合并进行物理量分析,尤其是对涡旋合并与暴雨的关系的研究比较少见。

本文利用NCEP再分析资料,从暴雨发生前后的涡度、散度、垂直速度、水汽条件、湿螺旋度等方面分析了2003年7月8—9日江淮流域出现暴雨的成因,着重考虑了涡旋合并对暴雨的作用,从另一角度揭示了暴雨产生、维持和增幅的原因,这对于提高暴雨预报水平和减少暴雨灾害具有积极意义。

1 中尺度涡旋演变及过程降水量特征

2003年7月8日00时(世界时UTC,下同)在

贵州重庆一带和两湖地区生成了两个中尺度涡旋A和B,其中心位置分别为A(107.7°E, 28.4°N)、B(112.3°E, 29.7°N),强度分别为 $10.8 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 和 $12.02 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$,长轴分别为64.2 km、193.5 km,短轴分别为29.6 km、66.6 km,面积分别为 $9\ 257.9 \text{ km}^2$ 、 $29\ 287.4 \text{ km}^2$,属中 β 尺度涡旋。这两个涡旋一边发展,一边向东北方向移动,其轴向逐渐转为东北—西南走向,与西南气流的方向基本一致(图略)。8日06时其中心位置为A(109°E, 28.2°N)、B(113.5°E, 30.5°N),中心强度分别为 $12.1 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 和 $17.2 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 。8日12时这两个涡旋已经开始合并,涡旋A的中心强度减弱,涡旋B的中心强度增强,此时涡旋A、B中心强度分别为 $6.96 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 和 $18.82 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$,到8日18时几乎完全合并,其中心位置位于(118.3°E, 32.7°N),中心强度达到 $20.4 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$,长轴达到442.96 km,属中 α 尺度涡旋,原涡旋A处出现切变线,至此两涡旋合并过程完成。以后涡旋强度减弱,随后逐渐移出江淮地区(图1)。

通过对过程降水分析,发现7月8日00时—7月9日00时24 h降水量最大值为安徽蚌埠104.9 mm,其次是安徽寿县88.9 mm,江苏高邮69.9 mm,江苏盱眙65.6 mm,江苏射阳53.4 mm,安徽合肥44.1 mm,江苏南京42.0 mm,安徽阜阳34.0 mm。由于 β 中尺度系统的时间尺度一般约为几个小时^[24],所以分析6 h降水更为合理。通过对6 h降水分析,发现7月8日18时降水最大值是安徽蚌埠79.2 mm,其次寿县64.0 mm,阜阳17.0 mm,合肥、安庆15.0 mm。7月9日00时降水最大值是江苏盱眙52.0 mm,射阳48.0 mm,南京17.0 mm,东台17.0 mm,常州16.0 mm,等。图2为6 h降水量分布。

2 涡旋合并前后物理量场分析

2.1 涡度和散度

图3a是涡旋的相对涡度最大值随时间的变化图。由图3a可知,从7月8日00时—7月9日00时,相对涡度最大值经历了由弱变强,再由强变弱的演变过程:从8日06—18时几乎是直线上升,到8日18时达到最大,以后减小,系统进入减弱消亡阶段。涡旋合并发生时涡旋强度显著加强,这与暴雨在这一时段的加强有很好的对应关系,而且正涡度区中心位置与暴雨中心位置是一致的。从沿暴雨中心相对涡度纬向剖面图(图略)可知,8日12时正涡

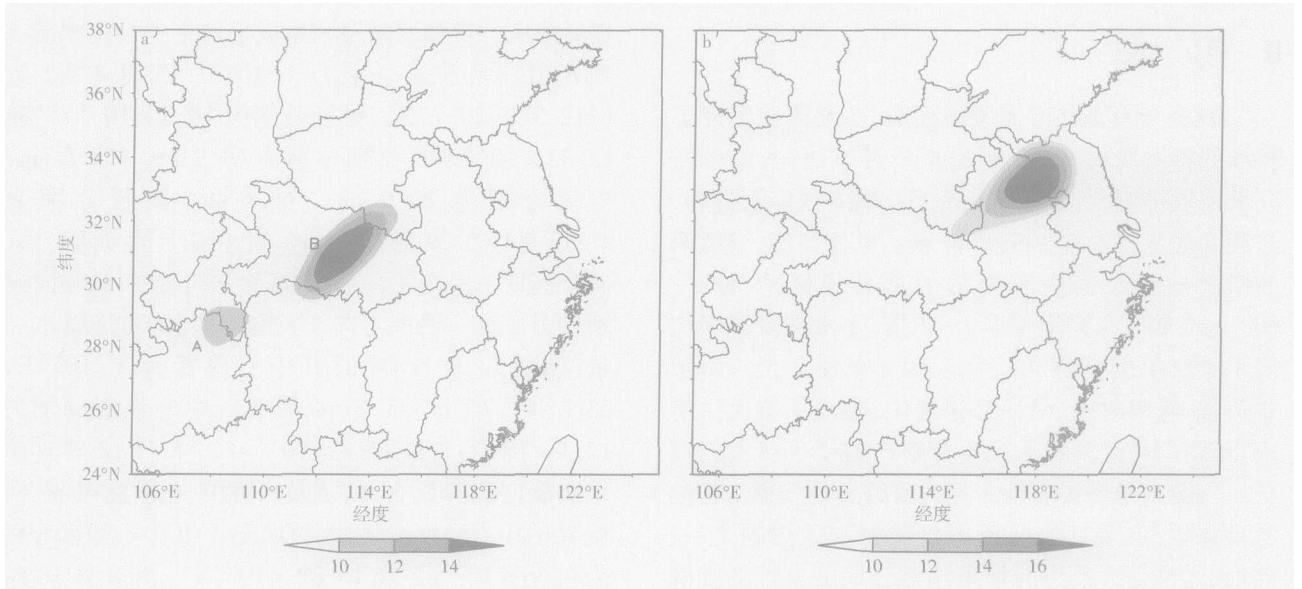


图 1 7月 8日 06时 (a)和 18时 (b) 850 hPa相对涡度分布 (单位: $10^{-5} s^{-1}$)

Fig 1 Relative vorticity at 850 hPa at 0600Z (a) and 1800Z (b) on 8th July 2003 (units $10^{-5} s^{-1}$)

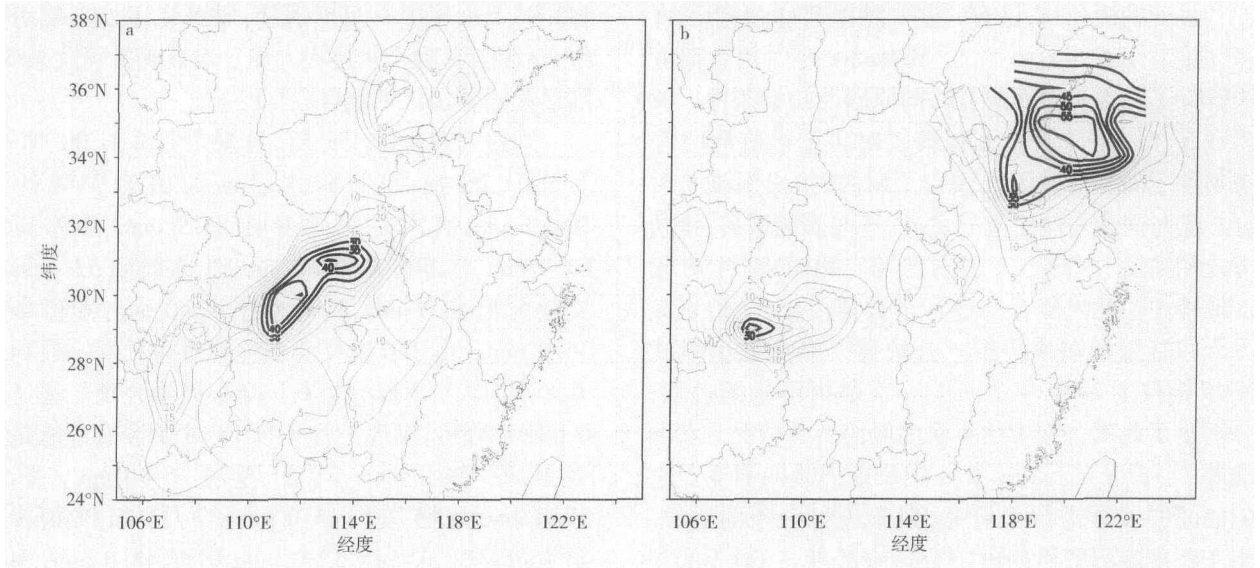


图 2 7月 8日 00—06时 (a)和 8日 18时—9日 00时 (b) 6 h降雨量分布 (单位: mm, 等值线最小值为 5 mm)

Fig 2 6-hour precipitation distributions from 0000Z to 0600Z on 8th July (a) and

from 1800Z on 8th July to 0000Z on 9th July (b) 2003 (units mm; the minimum value of contour is 5 mm)

度值向上一直延伸到大约 100 hPa高度, 8日 18时也达到 300 hPa高度, 而且强度很强, 形成了一个强的涡柱, 这对强降水的发生是极为有利的。进一步比较了各层涡旋合并的显著性, 结果发现 850 hPa这一层最显著, 强度最强, 涡旋合并最早出现, 这一结果与徐枝芳等^[4]的结果不完全一致。

图 3h 3c分别是高层涡旋的散度最大值、低层涡旋的散度最大值 (由于原数值是负值, 纵坐标取为原数值的相反数) 随时间的变化图。由两图可知, 8日 00、06时低层散度最大值变化很小, 而 12时增强, 18时急剧增强, 约为原来的两倍, 该时刻之

后迅速减弱; 高层也可看出, 18时散度最大值比前面几个时刻大许多, 而且 8日 00、06、12、18时、9日 00时几个时次的值均较大, 这说明合并前后均满足低层辐合、高层辐散的动力条件, 同时合并时这种条件进一步得到了加强。另外由沿暴雨中心散度纬向垂直剖面图 (图略) 可知, 8日 12时, 在 116°E附近大约 150 hPa 高度有一正的散度最大值中心, 850 hPa高度处有一负的散度最大值中心。18时, 在 117°E倾斜向上大约 900 hPa高度和 600 hPa高度有两个负的散度最大值中心, 250 hPa高度有一正的散度最大值中心, 充分说明暴雨发生时完全满

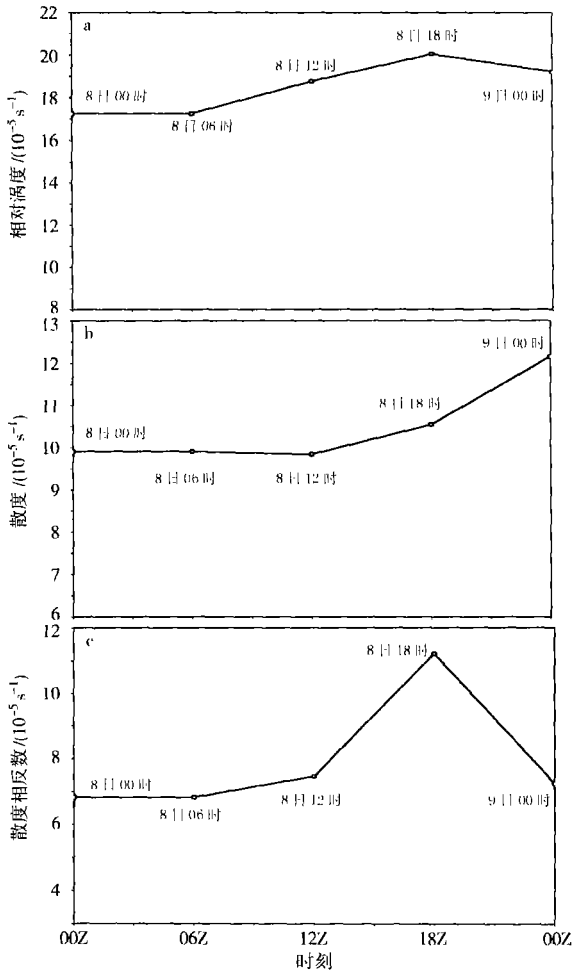


图 3 相对涡度最大值 (a) 及高层 (b) 和低层 (c) 涡旋散度最大值随时间的变化

Fig 3 Temporal evolution of the maximum relative vorticity (a), and the maximum divergence of the vortex at higher level (b) and lower level (c)

足低层辐合、高层辐散的高低空配置; 而且还发现, 18时低层辐合散度区向上一直达到约 300 hPa 高层辐散散度区从 700 hPa 一直向上延伸到 100 hPa 形成了一个强散度柱, 这为强降水的发生提供了极为有利的动力条件。

比较涡旋合并前后涡度、散度中心强度最大值, 发现涡旋合并时涡度、低层散度强度最大, 这说明, 由于中尺度涡旋具有抽吸作用, 涡旋合并一方面使得涡旋加强, 另一方面使得低层辐合、高层辐散加强, 从而使得强对流系统维持和加强, 最终导致暴雨维持和增幅。

2.2 垂直速度

通过对涡旋的垂直速度最大值 (由于原数值是负值, 纵坐标取为原数值的相反数) 随时间的变化 (图 4) 的分析也可看出, 8日 00时、06时其值直线

上升, 两个时刻的值分别为 $1.88 \times 10^{-2} \text{ hPa/s}$ $2.12 \times 10^{-2} \text{ hPa/s}$ 然后继续增强, 12时最大值为 $2.14 \times 10^{-2} \text{ hPa/s}$ 然后急剧上升, 到 18时达到最大, 为 $2.6 \times 10^{-2} \text{ hPa/s}$ 然后急速下降。比较强度大小, 发现 18时比 06时垂直速度增强较多。对沿暴雨中心垂直速度纬向垂直剖面图 (图略) 分析也可看出, 8日 12时, 在 117°E 附近 650 hPa 高度有一负的垂直速度最大值中心, 此后该中心向东北移动, 18时, 在 119°E 附近, 垂直运动上升区从地面一直达到 100 hPa 是一个深厚、旺盛的垂直运动上升区。由此可见, 涡旋合并加强了垂直上升速度, 它对暴雨的产生和加强起到了“催化剂”的作用, 它通过对垂直上升运动的增强来使暴雨增幅。

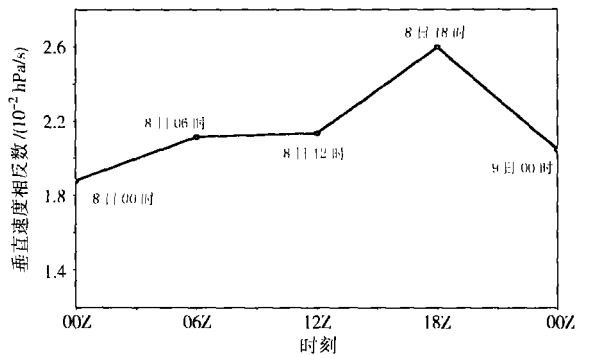


图 4 涡旋垂直速度最大值随时间的变化

Fig 4 Temporal evolution of the maximum vertical velocity of the vortex

2.3 涡旋合并前后水汽的分布和输送

充足的水汽是产生强降水的必要条件。从 950 ~ 700 hPa 水汽通量平均图 (图 5) 上可以看出, 在这次过程中一直维持着一条显著的水汽通量输送带, 江淮流域强对流降水的水汽一部分来自东南气流转向为西南气流携带的南海暖湿水汽输送, 一部分来自孟加拉湾地区北上的西南气流携带的孟加拉湾水汽。由水汽通量平均图 (图略) 可知, 8日 00时在 ($116^\circ\text{E}, 31^\circ\text{N}$) 附近已经有一强的水汽中心, 06时此中心维持和加强, 并向东北移, 12时此中心继续增强, 到 18时达最强, 以后下降。由此可见, 水汽中心随着涡旋的移动而移动, 当涡旋发生合并时, 由于涡旋的抽吸作用, 使得水汽输送加强, 从而使水汽集聚达到最大。同时从图上还可发现, 水汽中心与涡旋合并中心以及暴雨雨量中心都有很好的对应关系。由水汽通量散度最大值 (由于原数值是负值, 纵坐标取为原数值的相反数) 随时间的变化 (图 6) 可知, 8日 00时、06时, 水汽通量散度最大值变化很

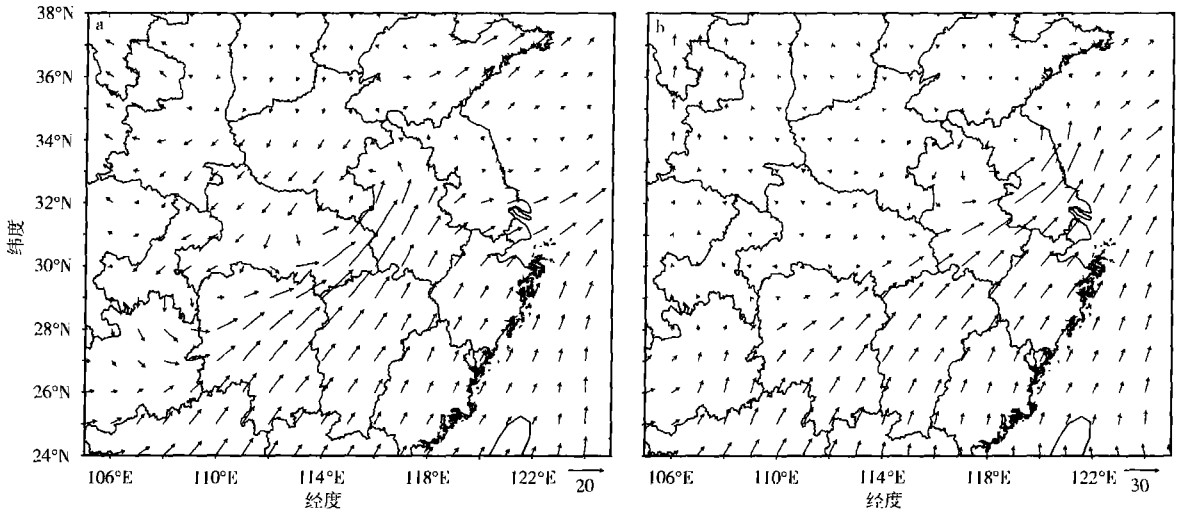


图 5 7月 8日 06时 (a)和 18时 (b) 950~700 hPa水汽通量平均分布 (单位: $g \cdot cm^{-1} \cdot s^{-1} \cdot hPa^{-1}$)

Fig 5 Distributions of the mean moisture flux over 950—700 hPa at 0600Z (a) and 1800Z (b) on 8th July 2003 (units $g \cdot cm^{-1} \cdot s^{-1} \cdot hPa^{-1}$)

小, 12时之后, 散度值增加很快, 6 h之内增加近 1 倍, 达到 $20.68 \times 10^{-8} g \cdot cm^{-2} \cdot s^{-1} \cdot hPa^{-1}$ 。由此可见, 由于涡旋合并的发生, 水汽的输送大大加强, 从而为暴雨的维持和增幅提供了充足的水汽条件。

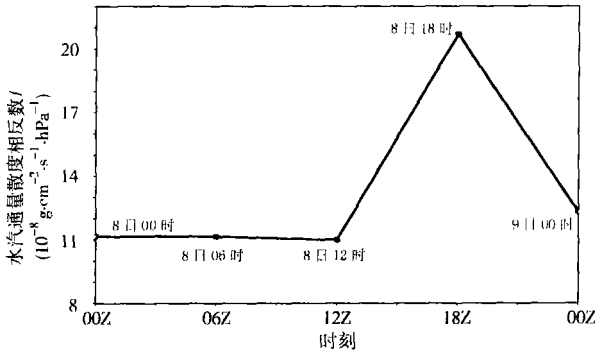


图 6 水汽通量散度最大值随时间的变化

Fig 6 Temporal evolution of maximum moisture flux divergence

2.4 湿螺旋散度

螺旋度是表征流体沿运动方向旋转程度和运动强弱的物理量, 垂直螺旋度则由垂直速度和垂直涡度所决定, 它更能反映出大气在垂直空间上的旋转上升和运动特征, 是反映天气系统的维持状况和系统发展、天气现象剧烈程度的一个参数。螺旋度对诊断分析预报强对流天气很有用, 但是由于其中不含水汽因子, 因此对于诊断分析降水尚有不足之处, 为此使用加进水汽因子的湿螺旋散度来诊断。湿螺旋散度^[25]:

$$F_{700} = \omega \zeta \cdot \nabla q = \omega (\partial v / \partial x - \partial u / \partial y) (\partial u q / \partial x + \partial v q / \partial y)。$$

式中: ω 为垂直速度, ζ 为相对涡度, q 为比湿。 F_{700} 在 $2 \times 10^{-14} hPa \cdot s^{-3}$ 以上一般会有暴雨, 并且一般情况下正值越大, 降水越强。

图 7 是 7月 8日 00 06 12 18时、9日 00时涡旋合并前后 5个时次的 700 hPa湿螺旋度的变化。

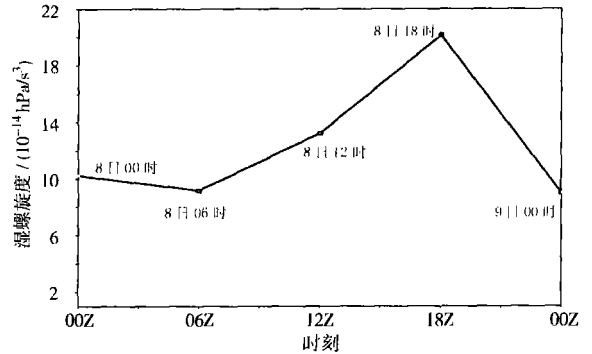


图 7 湿螺旋度最大值随时间的变化

Fig 7 Temporal evolution of the maximum moist helicity at 700 hPa on 8th July 2003

由图 7以及湿螺旋度时间演变 (图略) 可知, 8日 00、06时分别存在极大值中心, 强度分别为 $10.24 \times 10^{-14} hPa \cdot s^{-3}$ 、 $9.17 \times 10^{-14} hPa \cdot s^{-3}$, 12时在 ($118^\circ E, 33^\circ N$) 存在一个极大值中心, 强度为 $13.22 \times 10^{-14} hPa \cdot s^{-3}$, 以后这个中心逐渐向东北方向移动, 强度逐渐增强, 到 18时位于 ($120^\circ E, 33^\circ N$), 强度达到了最大值 $20.13 \times 10^{-14} hPa \cdot s^{-3}$, 其值增大到 06时的 2.2倍, 以后继续向东北方向移动, 强度急速下降。由湿螺旋度也可知, 涡旋合并使得湿螺旋度增强, 而且湿螺旋度大值区与雨强大值区相对应。

3 结论和讨论

(1) 2003 年 7 月 8—9 日在江淮流域发生了暴雨, 研究发现在这段时间内江淮流域上空存在两个中尺度涡旋合并的情况, 江淮流域上空的中尺度涡旋合并与此次江淮暴雨密切相关, 它们的合并对此次暴雨过程的产生起到了非常重要的作用。涡旋合并时涡度、散度、垂直速度都比合并前后大大增强, 同时湿螺旋度也存在同样的情况, 涡旋合并对水汽输送和分布也有较大贡献, 水汽的输送显著加强。由于涡旋的抽吸作用, 使得以上各个物理量均显著加强, 从而触发产生了此次暴雨。

(2) 西南气流携带的来自孟加拉湾的水汽和南海季风携带的南海水汽为此次暴雨提供了有利的水汽条件。

(3) 深厚的涡柱以及高层辐散、低层辐合的高低空配置为此次暴雨提供了有利的动力条件。

认识涡旋合并的成因和物理机制, 以及研究它在暴雨过程中的作用具有现实意义, 但是其合并的物理机制还不十分清楚, 我们今后还将致力于与此有关的研究。

参考文献:

[1] 王 凌. 2003 年度我国天气气候特点 [J]. 气象, 2004, 30(4): 29-32

[2] Melander M V, Zabusky N J, McWilliams J C. Symmetric vortex merger in two dimensions: causes and conditions [J]. J Fluid Mech, 1988, 195(10): 303-304.

[3] 罗哲贤, 徐祥德, 陈联寿. 涡旋合并过程的数值研究 [J]. 大气科学, 2002, 26(6): 807-816

[4] 徐枝芳, 党人庆, 葛文忠. 两个 β 中尺度气旋性涡旋合并的数值研究 [J]. 气候与环境研究, 2001, 6(2): 174-179

[5] 公 颖, 周 军, 胡伯威, 等. 一次强梅雨暴雨过程的数值模拟和伴随的中尺度系统分析 [J]. 南京气象学院学报, 2004, 27(6): 760-767

[6] 翟国庆, 王 智, 何 斌. 长江中下游梅雨期中小尺度涡旋族发生演变分析 [J]. 气象学报, 2003, 61(6): 661-672

[7] 王 智, 翟国庆, 何 斌. 长江中游一次 β 中尺度低涡的数值模拟 [J]. 气象学报, 2003, 61(1): 66-77.

[8] 杨金锡, 冯志娴, 郑媛媛. 1991 年 6 月 12—16 日江淮特大暴雨中尺度天气过程分析 [J]. 气象学报, 1994, 52(2): 187-193.

[9] 程艳红, 潘晓滨, 何宏让, 等. 一次江淮大暴雨过程中尺度系统结构分析 [J]. 气象科学, 2002, 22(3): 313-320

[10] 陈 静, 矫梅燕, 李 川, 等. 青藏高原东侧一次 β 中尺度对流系统的数值模拟 [J]. 高原气象, 2003, 22(增刊): 90-101.

[11] 张腾飞, 鲁亚斌, 普贵明. 低涡切变影响下云雨强降水的中尺度特征分析 [J]. 气象, 2003, 29(12): 29-33

[12] 张家国, 廖移山, 李德俊, 等. “ 98. 7 ” 鄂东连续特大暴雨的中尺度分析 (一) [J]. 气象科学, 2001, 21(2): 169-177

[13] 胡伯威, 崔春光, 房春花. 1998 年 7 月 21—22 日鄂东沿江连日特大暴雨成因探讨 [J]. 大气科学, 2001, 25(4): 480-491.

[14] 周 军, 闫冠华, 唐 镭. 梅雨锋强暴雨中低层系统物理图像研究 : 特大暴雨的雨团活动与地面流型 [J]. 南京气象学院学报, 2000, 23(2): 175-181.

[15] 王玉清, 朱永褪. 双热带气旋相互作用的机制分析及数值研究 (一): 物理机制分析 [J]. 大气科学, 1992, 16(5): 573-581

[16] 王玉清, 朱永褪. 双热带气旋相互作用的机制分析及数值研究 (二): 数值模拟 [J]. 大气科学, 1992, 16(6): 659-668

[17] 郭 霞, 党人庆, 葛文忠. 雷达资料在江淮流域暴雨数值模拟中的应用 [J]. 热带气象学报, 1999, 15(4): 356-362.

[18] Dritschel D G. A general theory for two-dimensional vortex interaction [J]. J Fluid Mech, 1995, 293(12): 269-281

[19] Ritchie E A, Holland G J. On the interaction of tropical cyclone-scale vortices: II Discrete vortex patches [J]. Q J R Meteorol Soc, 1993, 119(514): 1363-1379

[20] Lander M, Holland G J. On the interaction of tropical cyclone-scale vortices : Observations [J]. Q J R Meteorol Soc, 1993, 119(514): 1347-1361

[21] Meunier P, Ehrenstein V, Leveke T, et al. A merging criterion for two-dimensional co-rotating vortices [J]. Physics of Fluids, 2002, 14(8): 2757-2766

[22] Dong K, Neumann C J. On the relative motion of binary tropical cyclones [J]. Mon Wea Rev, 1983, 111(5): 945-953.

[23] Carr L E, Elsberry R L. Objective diagnosis of binary tropical cyclone interactions for the western north Pacific basin [J]. Mon Wea Rev, 1998, 126(6): 1734-1749

[24] 寿绍文, 励申申, 姚秀萍. 中尺度气象学 [M]. 北京: 气象出版社, 2003.

[25] 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. 上海: 中国气象局上海台风研究所, 2004