

盛日锋, 王俊, 李欣, 等. 山东省一次积层混合云暴雨三维风场的双多普勒雷达探测 [J]. 南京气象学院学报, 2008, 31(5): 731-737.

山东省一次积层混合云暴雨三维风场的双多普勒雷达探测

盛日锋¹, 王俊¹, 李欣², 龚佃利¹

(1 山东省人工影响天气办公室, 山东 济南 250031; 2 山东省蒙阴县气象局, 山东 蒙阴 276200)

摘要: 使用地基双多普勒天气雷达监测资料和常规探测资料, 对 2005 年 9 月 19 日凌晨发生在鲁中地区的一次暴雨进行分析, 结果表明: 本时段暴雨是积层混合云降水所致, 中低层存在切变线和辐合线, 风场中尺度结构造成小尺度对流单体发展, 这些对流单体以带状结构组成回波群镶嵌在大面积的层状云中; 伴随弱冷空气侵入, 风场中尺度结构主要出现在 4 km 以下的层次, 中低层切变线和冷空气的侵入是强回波单体发展的动力因素; 在垂直方向上, 强回波区有明显的垂直运动。风场中尺度结构对鲁中强降水的发生和维持有重要作用。

关键词: 双多普勒雷达; 暴雨; 三维风场; 中尺度结构

中图分类号: P407; P458.121 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-2022(2008)05-0731-07

Mesoscale Wind Structures of a Mixed Cloud Heavy Rain in Shandong by Dual-Doppler Radar

SHENG Rì-feng¹, WANG Jun¹, LIX in², GONG Dian-li¹

(1. Shandong Weather Modification Office, Jinan 250031, China)

2 Mengyin Meteorological Bureau of Shandong Province Mengyin 276200, China)

Abstract The three-dimensional wind fields of the heavy rain on September 19th, 2005 in middle Shandong Province are retrieved and explored with ground-based dual-Doppler radar data and conventional observations. Results show that the heavy rain is caused by the cumulus-stratus mixed cloud with the shear and convergence lines in the low level. Development of the small-scale convective cell is induced by the mesoscale structure of wind field, and the cells nested in the large stratus are organized to echo bands. Along with cold air diffusing southeastward, the mesoscale structure of wind field mainly locates in the layer below 4 km. Kinetic factors of the cell with a strong echo are shear lines in the low and middle levels and cold air diffusion. Moreover, it is found that the marked vertical motion happens in the strong echo area. The wind mesoscale structure plays an important role in initiating and maintaining the heavy rain.

Key words dual-Doppler radar; heavy rainfall; three-dimensional wind field; mesoscale structure

0 引言

夏季是我国暴雨的多发季节, 每年暴雨都给我国造成巨大的经济损失, 因此研究暴雨的成因、物理机制和活动规律具有重要意义。许多学者从天气分析、数值模拟等角度对暴雨的成因、物理机制等方面进行了深入的研究^[1-5], 但是, 由于受观测资料的限

制和高时空分辨率遥测资料的缺乏, 难以探测到暴雨发生时的动力学特征及空间细微结构。多普勒雷达能够探测降水粒子的反射率因子和多普勒速度信息, 这有助于提高灾害性天气的临近预报和预警能力, 有助于人工影响天气实时指挥和决策。同时, 利用这些具有高时空分辨率的物理量反演得到的二维或三维风场可以较细致地解释云形成暴雨的动力结

收稿日期: 2007-06-11; 改回日期: 2007-10-23

基金项目: 武汉暴雨所暴雨研究开放基金项目 (IHR2006G06); 山东省自然科学基金项目 (Y2006E08); 山东省局 2005 年重点攻关项目; 国家科技支撑计划资助项目 (2006BAC12B02); 山东省局 2008 年科技项目 山东积层混合云宏观结构特征研究

作者简介: 盛日锋 (1977), 男, 山东日照人, 硕士, 工程师, 研究方向为强对流和人工影响天气研究, rifengsl@126.com.

构,这是常规资料无法比拟的。

双多普勒雷达是目前探测风场中小尺度结构最有效和可靠的手段,国外已将这一方法应用于灾害性天气中尺度的观测和研究^[6]。为研究暴雨的三维中尺度结构,2001—2002年国家重点基础研究发展规划项目“我国重大气象灾害形成机理和预测理论研究”在长江流域开展了梅雨锋中尺度暴雨外场试验。中国科学家利用国产多普勒雷达对江淮流域的暴雨中尺度风场结构进行观测研究,得到了一些较清晰的认识^[7-9],即中低层的中尺度切变线或中尺度气旋是触发和维持暴雨的重要动力机理,并总结出了一定概念模型^[10-11],如周海光等^[10]对安徽2001年7月的一次暴雨研究发现,暴雨动力模型是低层气流旋转辐合并前倾上升,中低层干冷空气被阻抬升后,只形成单一方向的前向出流。但上述研究的重点区域主要集中在南方地区,目前利用双多普勒雷达研究北方暴雨三维动力结构还比较少,因此开展此方面的研究工作是很必要的。本文主要利用地基双多普勒天气雷达监测资料,对2005年9月19日凌晨鲁中暴雨系统进行三维风场反演,希望得到北方暴雨三维动力结构的一些初步认识。

1 资料和方法

所用资料为常规探空、加密探空、地面自动站观测资料和多普勒雷达体扫资料。雷达分别是济南齐河(116°46′51″E, 36°48′10″N)的 CNRAD/SA 和滨州(118°01′00″E, 37°22′00″N)的 CNRAD/SC 雷达,两部雷达相距 125.5 km。

在利用双多普勒雷达反演三维风场时,首先要对两部雷达资料的回波位置、回波强度和径向速度进行对比,并退速度模糊,然后将以球坐标方式表示的多普勒雷达的原始资料(回波强度和径向速度)用双线性方法插值到水平格距为 1 km,垂直格距为 0.5 km 的直角坐标上,垂直方向分 30 层。王俊等^[12]曾对两部雷达的探测结果进行了对比分析,发现二者探测结果在误差范围之内。双多普勒雷达风场反演方法与直接合成法类似,具体方法见文献[13]。

根据雷达探测范围、降水性质及反演方法限制,本文所选区域为鲁中地区,时间为 19 日凌晨前后的强降水时段,利用双多普勒雷达资料反演的三维风场分析本次暴雨的中小尺度动力学特征。

2 天气形势和降水实况

2.1 天气形势

2005 年 9 月 18—21 日,受弱冷空气、切变线和副热带高压边缘西南暖湿气流的共同影响,山东省出现了一场秋季罕见的持续性暴雨过程。9 月 17—18 日,副高加强西伸北抬,脊线维持在 30°N 附近。17 日 08 时(北京时,下同) 500 hPa 上 588 dagpm 线位于苏皖北部,有利于水汽向山东输送,但低层 850 hPa 山东位于反气旋环流中,对降水不利。17 日 20 时—18 日 08 时,588 dagpm 线横贯山东中南部,700 hPa 和 500 hPa 暖湿气流输送更加有利,500 hPa 风场在副热带高压外围形成高空西南急流,低层 850 hPa 形势对降水仍不利,山东处于西北气流中,但在河南和安徽中部有切变线生成。18 日 20 时,700 hPa 和 500 hPa(图 1a)西南气流水汽输送持续,850 hPa(图 1b)切变线在高空气流引导下移到鲁中南部,这样不但在鲁中南部有切变辐合,而且沿黄河一带也有东南风和西南风的辐合。济南章丘 18 日 20 时探空表明,济南周围大气层结稳定,中低层(1 000~730 hPa)干燥,温度露点差大于 4℃。19 日 08 时,500 hPa(图略)副高略微西伸,中纬度环流变平,850 hPa(图略)莱州湾—济南—鲁西南有浅槽生成,槽前是西南气流,槽后西北气流引导弱冷空气侵入。而且在 18 日 08 时到 19 日 08 日期间,中纬度北京、天津地区环流比较平直,这样有利于西南暖湿气流在山东的积聚。分析 19 日 02 时济宁加密探空发现,山东南部已有不稳定能量集结,400 hPa 以下层次水汽达到饱和;19 日 02 时潍坊加密探空表明周围大气层结稳定,从低层到 500 hPa 有冷平流,说明冷空气从北往南侵入,不稳定能量在偏南风的携带下从南往北推进,二者相遇导致 19 日凌晨前后鲁中强降水的发生,而且从实况可知凌晨前后伴有雷暴。因此从天气形势上分析,18 日 20 时—19 日 08 时,鲁中附近受副热带高压外围、切变线和弱冷空气共同影响,从而引发本时段的强降水过程。

2.2 降水实况

本次降水从 19 日 20 时开始一直持续到 21 日 10 时,山东平均降水量 104.8 mm。分析鲁中地区逐时雨量发现,降水主要发生在两个时段:第 1 个时段从 18 日 20 时到 19 日 12 时(图 2a),为积层混合云降水;第 2 个时段从 19 日 21 时开始一直持续到 21 日 10 时,为层状云降水。在第 1 降水时段,19 日

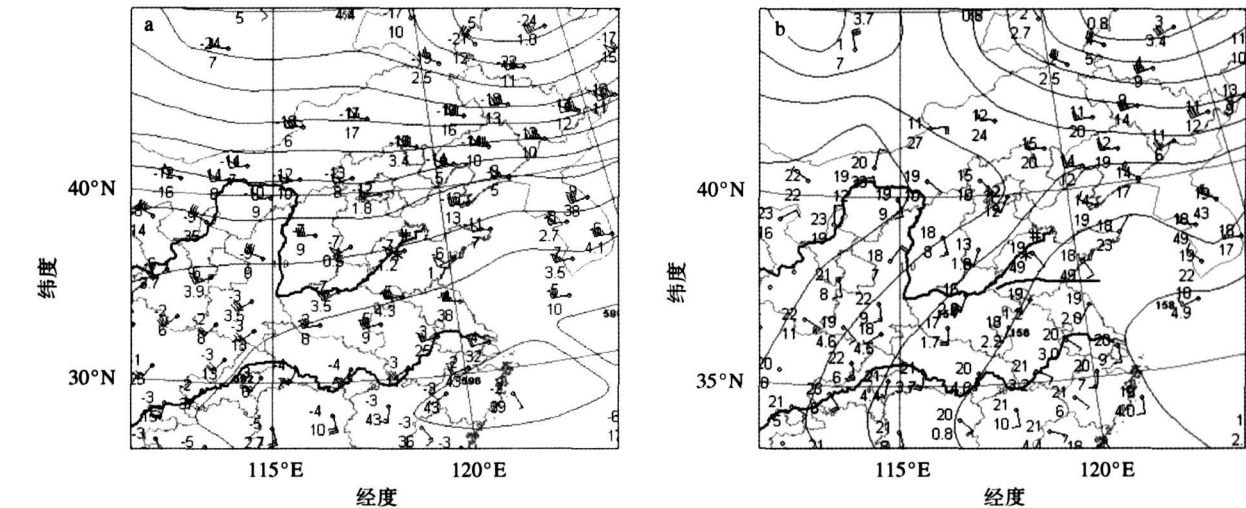


图 1 2005 年 9 月 18 日 20 时 500 hPa (a) 和 850 hPa (b) 高空形势 (* : 表示济南位置; # : 表示滨州位置)

Fig 1 (a) 500 hPa and (b) 850 hPa synoptic maps at 20 00 BST 18 September 2005 (* : Jinan City # : Binzhou City)

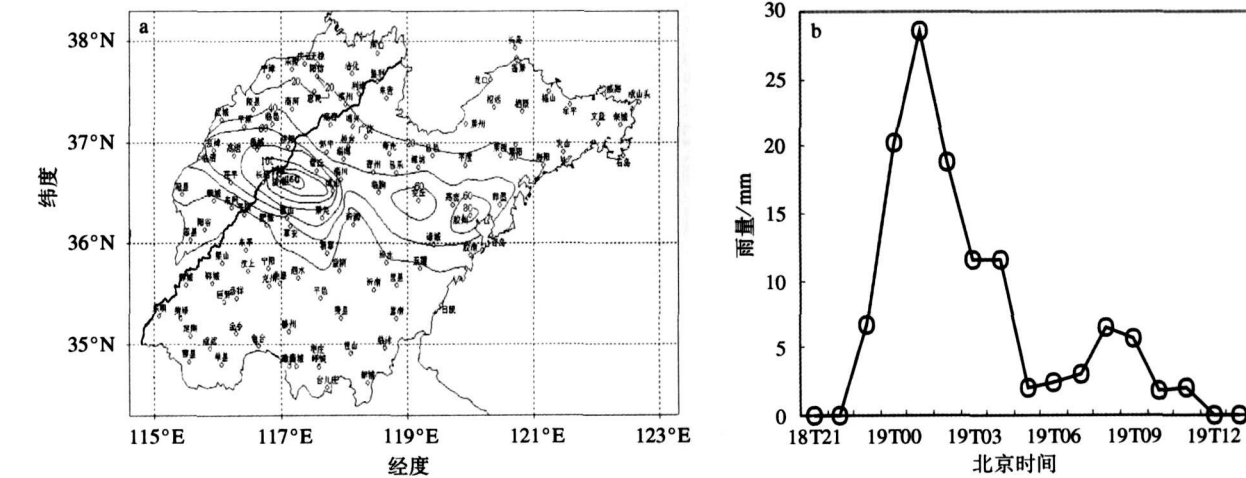


图 2 山东 2005 年 9 月 18 日 20 时 19 日 12 时 12 h 降水量分布 (a 单位: mm) 和博山自动站逐时雨量变化 (b 单位: mm)

Fig 2 (a) 12-hr precipitation (mm) spatial distribution and (b) hourly precipitation observed by Boshan AWS from 20 00 BST 18 to 12 00 BST 19 September 2005 in Shandong Province

凌晨前后济南附近地区雨强达到极值, 1 h 左右降水中心移到博山附近 (图 2b), 之后降水逐渐减弱。

3 雷达观测分析

3.1 回波演变分析

从雷达回波演变图 (图略) 上来看, 9 月 18 日 22 时左右, 降水回波主要位于河北南部和聊城一带, 鲁中地区基本被 15 dBZ 以下的回波控制。23: 02 山东中北部基本被强度大于 20 dBZ 回波控制, 在鲁中地区聊城 济南 淄博一带有一条呈东西走向的强回波带, 其中嵌有多个大于 45 dBZ 强对流单体, 而且强回波带南侧泰安附近不断有小尺度

对流单体生成。23 26 强回波带变化不大, 形状、强度和前一时刻基本一致。23 56 强回波带仍稳定少动, 反演区西侧和北侧的回波强度有所减弱, 但在鲁中博山、莱芜附近, 由于泰安附近的回波单体与强回波带的合并, 强回波中心范围增大。19 日 00 40 强回波带变为西北 东南向, 鲁中地区回波强度基本小于 35 dBZ, 主要以层状云为主。

3.2 三维风场分析

利用齐河和滨州多普勒雷达同步体扫数据对本次暴雨进行三维风场反演, 分析三维风场的结构与回波强度场的配置, 以便了解风场演变及风场中小尺度结构与降水发展的关系。

图 3 给出了 9 月 18 日 23 时 02 分反演得到的三维风场, 图中叠加了回波强度。从图 3a 可以看出, 在 2 km 高度 117.2 E 以东地区为东南风的风速辐合, 117.2 E 以西地区为西南风和东南风的风向辐合, 两种辐合形成一近乎东西走向的辐合带, 与强回波带相对应, 济南市附近 (117.25 E, 36 N) 已经有多个大于 45 dBZ 的强回波单体生成。在 2.5 km 高度 (图 3b), 强回波中心北侧开始有冷空气侵入, 这样西北风、西南风和东南风在济南附近汇合, 生成大于 40 dBZ 回波单体, 辐合中心和降水中心配置比较一致。从 3 km 及以上高度反演风场 (图略) 得知, 反演区风向为较一致的偏南风, 说明冷空气的侵入只发生在 2.5 km 高度。根据前面天气形势分析可知, 高低层反演风场和 18 日 20 时实况基本一致, 但较探空资料反映的形势场更细致, 能够分析出 2.5 km 高度的弱冷空气。图 3c 反映了

2.5 km 高度垂直速度与回波的配置关系。从图上可以看出对应于强回波带或强回波中心为上升运动。从沿 117.25 E 的南北方向垂直剖面 $v-w$ 速度合成 (图 3d) 来看, 低层潮湿气流从南部涌入, 南部充沛水汽不断向鲁中地区输送, 由于偏南气流的风速辐合, 在中低层济南附近形成了较强回波单体; 在中高层 36.5 N 附近, 有一支下沉气流, 下沉干冷空气的侵入在强回波中心北侧 (36.6 N 附近) 形成上升气流, 造成水汽的向上垂直输送。

23 时 26 分 (图略), 强回波中心继续东移, 在向东移动的过程中, 风场结构变化不大, 大于 35 dBZ 的强回波带仍保持为东西走向, 大于 45 dBZ 的强回波中心移到 117.4 E 附近, 强降水也随之东移。值得注意的是: 此时间段内, 在 2 km 高度大于 45 dBZ 强回波中心的东北侧开始有弱冷空气侵入, 冷空气厚度为 0.5 km 左右 (2~2.5 km), 较前一时刻增

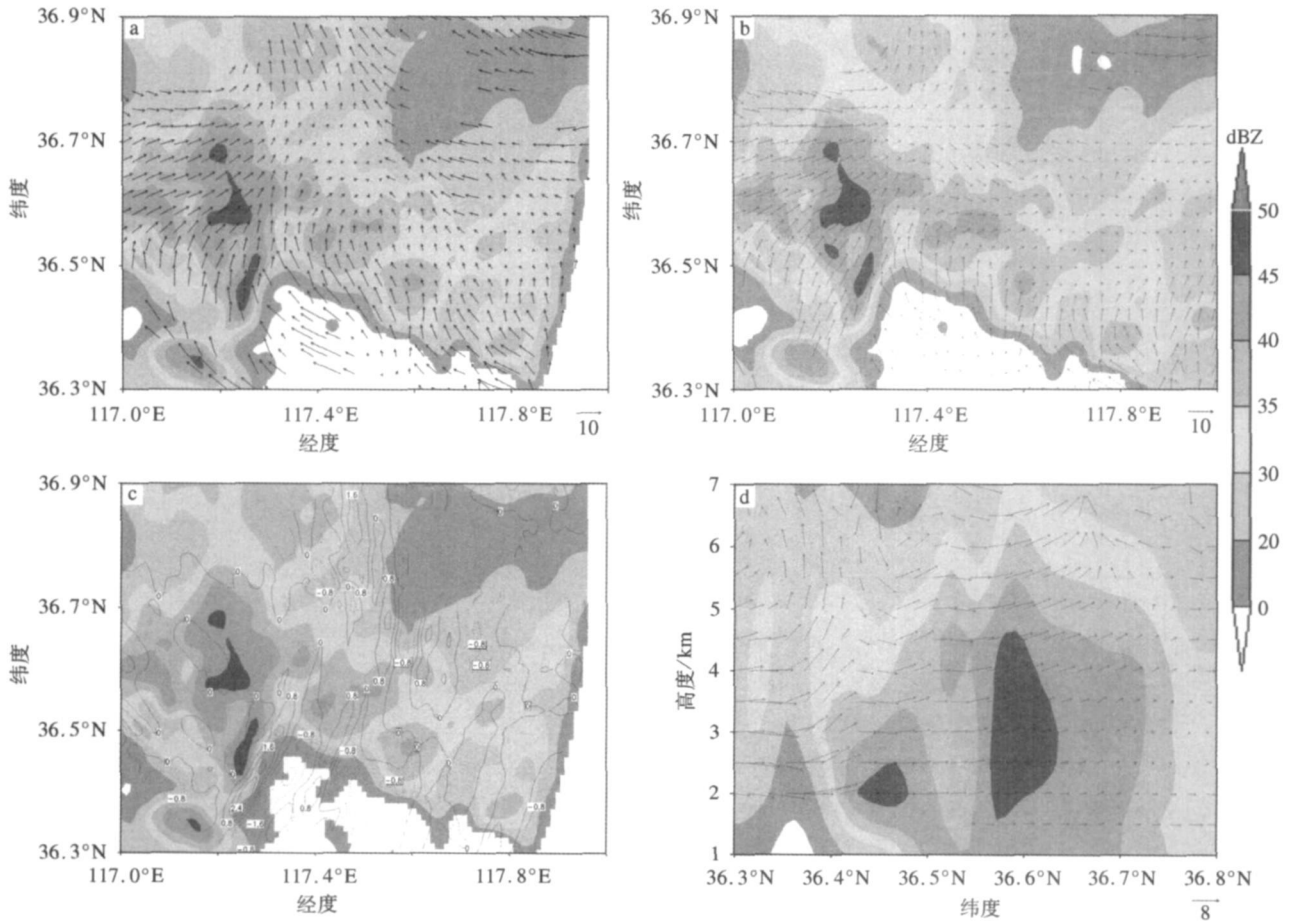


图 3 2005 年 9 月 18 日 23:02 雷达反演的三维风场 (单位: m/s ; 阴影为回波强度, 单位: dBZ)

a $z = 2$ km 水平风场; b $z = 2.5$ km 水平风场; c $z = 2.5$ km 垂直速度; d 117.25 E 的垂直剖面 $v-w$ 速度合成

Fig 3 Horizontal wind fields retrieved by Doppler radar data at (a) $z = 2$ km and (b) $z = 2.5$ km; and (c) vertical velocity at $z = 2.5$ km; and (d) meridional section of $v-w$ along 117.25 E at 23:02 BST 18 September 2005 (units m/s ; shadings denote the reflectivity with units of dBZ)

强。

图 4 给出了 9 月 18 日 23 时 56 分反演得到的三维风场和散度场。在 2 km (图 4a) 高度上, 西南风较前一时刻增强, 同时在反演区北侧 (117.7°E, 36.8°N) 附近有一小尺度水平辐散场 (图 4c)。2.5 km (图 4b) 高度, 辐散场减弱, 重合于强回波带为西南风和西北风切变形成的辐合带。3.5~4 km 高度, 在 (117.6°E, 36°N) 回波强度达 45 dBZ 以上, 回波中心对应着西南风和偏西风切变, 反演区其它地方风向基本转为西南风。4.5 km 高度以上, 整个反演区风向为一致的西南风。对比各层的风场分析发现, 反演区强回波中心北侧干冷空气在垂直方向上的厚度继续加深, 为 1.5 km 左右 (2~3.5 km)。从沿 117.55°E 的南北向垂直剖面 $v-w$ 速度 (图 4d) 来看, 南北方向上有两个大于 45 dBZ 的强回波中

心, 北侧强回波中心对应着 3 km 以下的冷空气风速辐合, 3.5~6 km 高度冷暖空气在 36.7°N 附近交汇, 形成一支上升气流。南侧回波中心附近, 中低层弱冷空气与携带大量潮湿水汽的西南气流在 36.5°N 附近汇合抬升; 在高层, 下沉气流把高空水平动量下传, 在中层加强了抬升作用, 并在 4 km 高度形成了较强回波单体。这种高低空的配置结构更有利于把暖空气上抬, 触发降水系统的发展。

9 月 19 日 00 时 10 分和 41 分反演风场 (图略) 可以看出, 冷空气势力继续加强南侵, 回波强度逐渐减弱。00 时 10 分低层 (2.5 km) 鲁中地区虽有中尺度风切变, 但中低层基本被南下冷空气控制。00 时 41 分风场反演结果表明, 随着时间推进, 博山及其附近地区 4 km 以下层次完全被冷空气控制。

后期高层仍受西南气流影响, 中低层冷空气减

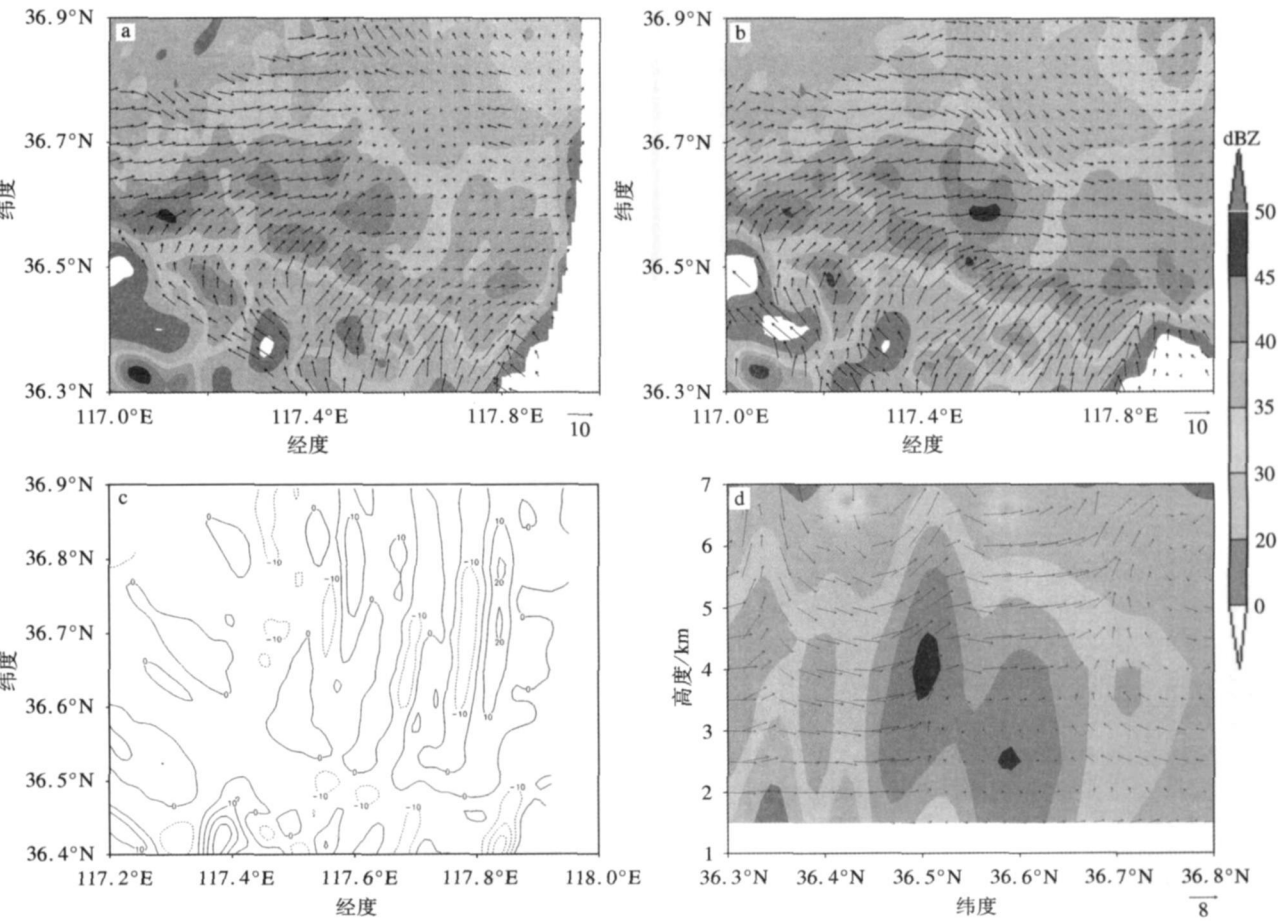


图 4 2005 年 9 月 18 日 23 时 56 分雷达反演的三维风场 (单位: m/s) 和散度场 (单位: 10^6 s^{-1}) (阴影为回波强度, 单位: dBZ)

a $z = 2 \text{ km}$ 水平速度; b $z = 2.5 \text{ km}$ 水平速度; c $z = 2 \text{ km}$ 散度场; d 117.55°E 的垂直剖面 $v-w$ 速度合成

Fig 4 Horizontal wind fields (m/s) retrieved by Doppler radar data at (a) $z = 2 \text{ km}$ and (b) $z = 2.5 \text{ km}$; and (c) divergence (10^6 s^{-1}) at $z = 2 \text{ km}$ and (d) meridional section of $v-w$ (m/s) along 117.55°E at 23 56 BST 18 September 2005 (Shadings denote the reflectivity with units of dBZ)

弱消失,降水转为稳定的层状云降水,强度减弱。降水一直持续到 19 日 11 时左右,同时也表征第 1 时段的降水结束。

4 自动站观测资料分析

自动站逐时雨量资料(图 5)分析表明,18 日 23 时降水中心位于济南附近,降水强度大于 15 mm/h,淄博附近处于降水前沿。从 18 日 22~23 时自动站分析的地面流场(图 5a)来看,地面风辐合带位于济南~长清一带,呈东北~西南向,辐合带两侧的风向分别为东南偏东风和西南风。此外,辐合带基本与强降水中心对应。

18 日 23 时~19 日 00 时(图 5b),雨区继续向

东移动,博山雨强为 20.3 mm。地面流场表明,风场辐合有所减弱,而在强降水中心的前沿(东部)出现风场辐散区。此时,强降水中心位于双多普勒雷达反演区域(图 5b 中矩形框)西侧,从上面双多普勒雷达反演结果(图 3、4)可知,此时段这一地区的中下层对应风场辐合中心。综合地面自动站流场和双多普勒雷达反演风场,可以看出,处于发展加强时段的雨区中心,从地面到 700 hPa 高度,为一致的辐合区,而在其前侧的地面开始出现弱辐散区。

图 5c 揭示了 19 日 00~01 时反演区降水分布和地面流场的动力特征。此时段降雨中心东移到博山、莱芜附近,博山雨强达 28.5 mm。地面流场表明风场辐合继续减弱,但从图上可以看出,博山、莱芜

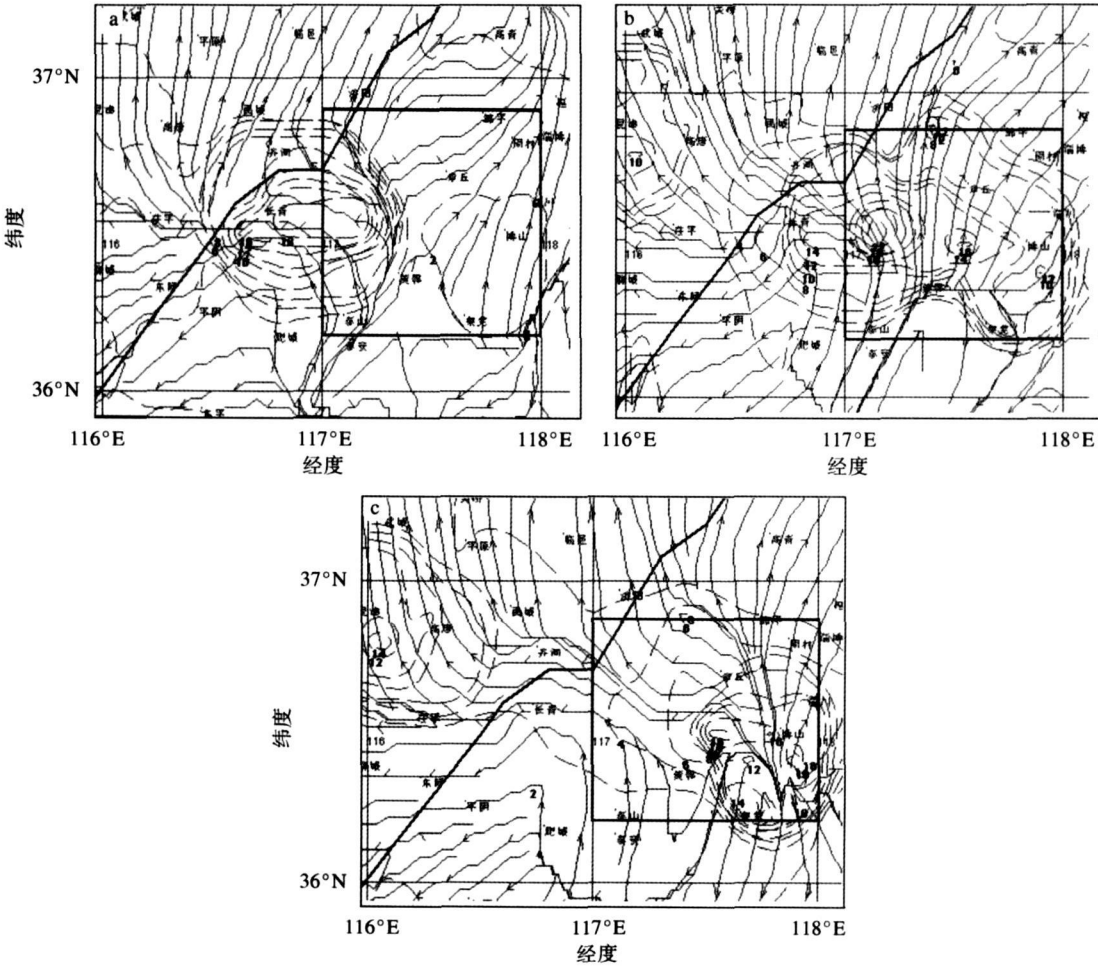


图 5 2005 年 9 月 18 日 22 时~19 日 01 时自动站逐时雨量和地面流场
(短线为降水等值线,粗实线为黄河,黑框为反演区)

a 18 日 22~23 时; b 18 日 23 时~19 日 00 时; c 19 日 00~01 时

Fig. 5 Hourly precipitation observed by A W S and surface stream fields

at (a) 22:00~23:00 BST 18th, (b) 23:00 BST 18~00:00 BST 19, and (c) 00:00~01:00 BST 19 September 2005
(broken line rainfall; thick solid line the Yellow River; black rectangle retrieved zone)

附近的强降水诱发的下沉气流在地面形成一幅散中心。

5 结论和讨论

通过分析本次暴雨过程回波强度、风场的中尺度信息和自动站实况资料得到如下结论:

(1)从回波强度来看, 本次暴雨过程为积层混合云降水, 在层状云中镶嵌着对流云, 回波强度和风场分布在空间上不均匀, 风场水平和垂直结构与回波强度及其演变匹配得比较好; 冷空气侵入是对流单体发展的重要因素, 随着中低层冷空气逐渐加深南压, 并且在中尺度环流中逐渐占据主导地位, 强降水也随之结束。

(2)本次过程 4 km 以上风场比较均匀, 为一致的西南风; 中低层的偏南风与西北风形成的中尺度切变线是此次暴雨的重要动力结构特征, 这有利于暴雨系统的发生、发展和维持; 垂直剖面上, 暴雨系统存在明显的上升气流, 有利于水汽的向上垂直输送。

(3)双多普勒雷达监测资料较常规观测资料更能细致地揭示暴雨系统的动力结构。它能够反映冷空气的逐渐侵入过程, 这是常规资料无法比拟的。

(4)自动站观测资料分析表明, 降水前期, 地面流场辐合带基本与强降水中心对应; 降水后期, 强降水中心和辐散中心相对应。

(5)由于两部雷达完成一个体扫所需的时间不同, 因此有相当一部分双多普勒雷达资料所处的时间段不一致, 无法用于双多普勒雷达风场反演, 有待进一步改进雷达体扫模式, 以便全面细致地反演和

研究暴雨系统的动力结构。

参考文献:

- [1] 洪延超, 黄美元, 吴玉霞. 梅雨锋云系中尺度系统回波结构及其与暴雨的关系 [J]. 气象学报, 1987, 5(1): 56-64
- [2] 许焕斌. 湿中性垂直运动条件和中- 系统的形成 [J]. 气象学报, 1997, 55(5): 602-610.
- [3] 王建捷, 李泽椿. 1998 年一次梅雨锋暴雨的中尺度对流系统的模拟与诊断分析 [J]. 气象学报, 2002, 60(2): 146-155.
- [4] 何宇翔, 肖辉, 杜秉玉, 等. 双多普勒雷达反演强风暴三维风场的数值试验 [J]. 南京气象学院学报, 2005, 28(4): 461-467.
- [5] 石燕, 冯晋勤, 魏鸣. 一次强降雨过程的简化伴随模式风场反演 [J]. 南京气象学院学报, 2006, 29(4): 533-539.
- [6] Hubbert J, Bringi V N, Carey L D. CSU-CHILL polarimetric radar measurements from a severe hail storm in Eastern Colorado [J]. J Appl Meteor, 1998, 37(8): 749-775.
- [7] 刘黎平, 邵爱梅, 葛润生, 等. 一次混合云暴雨过程风场中尺度结构的双多普勒雷达观测研究 [J]. 大气科学, 2004, 28(2): 278-284
- [8] 周海光, 郭富德. 7.23 大暴雨动力机理的双多普勒雷达反演 [J]. 南京气象学院学报, 2005, 28(4): 468-476
- [9] 古金鑫, 顾松山, 陈钟荣, 等. 双多普勒天气雷达反演大气三维风场的个例研究 [J]. 南京气象学院学报, 2005, 28(6): 833-839.
- [10] 周海光, 张培源. 一次局地大暴雨三维风场的双多普勒雷达探测研究 [J]. 大气科学, 2005, 29(3): 373-386.
- [11] 周海光, 郭富德. 梅雨锋暴雨中尺度对流系统结构模型的双多普勒雷达研究 [J]. 南京气象学院学报, 2007, 30(1): 1-8
- [12] 王俊, 朱君鉴, 任钟冬. 利用双多普勒雷达研究强飑线过程的三维风场结构 [J]. 气象学报, 2007, 65(2): 241-251.
- [13] Peter S R, Conrad L Z, et al. Single- and multiple-Doppler observations of tornado storms [J]. Mon Wea Rev, 1980, 108(10): 1607-1625