

周海光. 罗莎(0716)台风外围螺旋雨带中尺度结构的双多普勒雷达试验研究[J]. 气象, 2010, 36(3): 54-61.

罗莎(0716)台风外围螺旋雨带中尺度 结构的双多普勒雷达试验研究^{*}

周海光

中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室, 北京 100081

提 要: 强台风罗莎(Krosa)于 2007 年 10 月 7 日 15:30 在福建省福鼎和浙江省苍南交界处第三次登陆, 登陆期间, “罗莎”外围螺旋雨带恰好穿越宁波和舟山双多普勒雷达同步观测区。利用双多普勒雷达三维风场反演技术对双雷达时间同步探测资料进行风场反演, 研究了螺旋雨带的三维风场结构。在螺旋雨带内部低层有多个强回波区。3 km 高度以下, 在雨带上游, 雨带外侧水平速度与雨带夹角较小, 内流较弱; 雨带下游, 水平速度与雨带夹角逐渐增大, 内流较强; 在雨带内侧有明显的外流。垂直剖面内, 雨带外侧低层有明显的内流, 气流从雨带外侧 2 km 高度以下的低层进入雨带; 而在雨带内侧存在明显的外流, 两支气流在雨带内部低层辐合, 在雨带内部形成强回波区; 外围螺旋雨带切向速度分量随高度增加而逐渐减小, 最大速度区在 2 km 高度。

关键词: 台风, 螺旋雨带, 双多普勒雷达, 风场反演, 三维结构

Structure of Typhoon Krosa (0716) Outer Rainband Observed by Dual-Doppler Radars

ZHOU Haiguang

State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

Abstract: The typhoon No. 0716 (Krosa) landed on the vicinity region between Zhejiang Province and Fujian Province at 1530 BT 7 October 2007 for the third time. An outer spiral rainband passed through the dual-Doppler radar observation domain that was composed of Ningbo and Zhoushan Doppler radars. Three dimensional wind field was retrieved by the dual-Doppler radar data. The mesoscale structure of the spiral rainband was investigated by the 3D wind. It shows that there were some strong reflectivity areas in the low level of the rainband region. The inflow in the upstream of the rainband outside was weak. On the other hand, the inflow in the downstream of the rainband outside was strong. There was outflow in the inside of the rainband at the low level. In the vertical cross-section, there was inflow in the low level of the outside rainband. The inflow entered the rainband at low level ($z < 2$ km) from the outside rainband. On the contrary, there was outflow in the inner side of the rainband. These flows converged at the low level of the rainband central region. The tangential component of the wind decreased with height and the maximum wind region was at 2 km level.

Key words: typhoon, spiral rainband, dual-Doppler weather radars, wind retrieval, three dimensional structure

* 国家自然科学基金项目(40605014), 科技部国家高技术研究发展计划项目(2007AA061901), 科技部国家重点基础研究发展规划项目(2004CB418305), 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室基本科研课题项目(2008LASWZ101), 上海台风研究所台风基金(200603)资助

2008 年 11 月 17 日收稿; 2010 年 1 月 22 日收修定稿

第一作者: 周海光, 主要从事中尺度气象学及雷达气象学研究. Email: zhg@cams.cma.gov.cn

引言

我国地处太平洋西岸,台风活动频繁,台风暴雨经常造成严重的洪涝灾害,气象学家对台风结构、台风暴雨的形成机理和结构特征等进行了极其广泛的研究,取得了很重要研究成果^[1-19]。

多普勒天气雷达探测资料时空分辨率很高,目前已经成为研究台风、暴雨等灾害性天气系统三维中尺度结构的重要工具之一^[20-28]。近些年,在使用多普勒雷达资料研究灾害性天气中尺度结构^[29-39]、资料同化^[40-42]等方面均取得了重要进展^[43]。在使用雷达资料研究台风定位、台风结构等方面也成果颇丰^[44-46]。

多普勒雷达探测的径向速度场为研究灾害性天气的动力结构提供了便利条件,通过风场反演技术反演二维和三维风场,可以提高对灾害性天气动力结构的认识水平;国内在单多普勒雷达风场反演技术及应用方面进行了大量研究^[47-52]。由于双多普勒雷达风场反演技术精度较高,国内也开展了相关研究^[53-54],并将其应用到暴雨中尺度动力结构的研究^[55-56]。

目前对于台风外围螺旋雨带风场研究最关注的问题之一是其精细的三维空间结构,精细三维风场结构是研究外围螺旋雨带中尺度结构特征和维持机理的重要途径之一;由于双多普勒雷达风场反演技术反演精度高、分辨率高,为研究外围雨带的精细三维结构和维持机理提供了很好的机会。国外学者使用地基双多普勒雷达^[57-58]、机载多普勒雷达^[59]对台风眼壁及螺旋雨带三维风场演变特征进行了研究,我国台湾学者也使用双多普勒雷达研究台风登陆前后三维结构演变特征^[60]。由于客观条件所限,大陆地区在这方面的研究很少。

2007年第16号超强台风罗莎在第三次登陆期间其外围螺旋雨带在成熟阶段恰好穿越宁波和舟山双多普勒雷达观测区,宁波和舟山两部雷达相距58.7 km,满足双多普勒雷达反演的最佳距离区间要求,这为研究螺旋雨带的精细三维结构提供了极好的机会。本文对宁波和舟山双多普勒雷达观测资料进行三维风场反演,在此基础上,对台风外围螺旋雨带的回波结构和三维风场结构进行研究,以期揭示螺旋雨带的三维动力结构特征。

1 台风罗莎(0716)概述

超强台风罗莎于2007年10月2日08时(北京

时,以下同)在菲律宾以东洋面上生成,4日02时加强为强台风,5日凌晨加强为超强台风。10月6日15:30在我国台湾省宜兰登陆,登陆时减弱为强台风,其移动路径复杂,又于22:30在宜兰第二次登陆。此后,“罗莎”进入台湾海峡,又出现了先向正西、后向正北急转弯的过程。7日02时减弱为台风,15:30在福建省福鼎和浙江省苍南交界处第三次登陆,登陆之后向偏东北方向移动,17时减弱为强热带风暴,8日02时减弱为热带风暴,20时停止编号,这是自1949年以来每年登陆浙江省时间最晚的台风。“罗莎”给福建省北部和浙江省带来暴雨到特大暴雨,浙江省沿海地区还出现大风天气。“罗莎”在宁波、舟山及其南部地区造成强降水,部分地区特大暴雨,强降水主要集中在7日07时至8日20时。

NCEP再分析资料显示,7日02时,500 hPa的西风带主要位于35°N以北,在蒙古高原和华北地区有一低压槽。台风中心位于副热带高压的西侧,台风中心的暖心一直伸展至200 hPa。此后,副高西移,台风中心也向西移动。14时,在台风登陆之前,台风中心在200 hPa仍然维持着暖心结构。

2 雷达回波演变分析

为了研究台风登陆前后的雷达回波特征,使用长乐、建阳、温州、金华、宁波、舟山六部多普勒雷达基数据进行三维数字拼图^[61],这六部雷达均为业务布网的S波段多普勒天气雷达。图1给出了台风第三次登陆前后4 km高度的回波强度时间演变图。7日14:27(图1a),台风中心位于27.0°N、120.55°E,台风云系呈现明显的不对称结构特征。在台风中心的北侧有一条外围螺旋雨带(Outer Rainband,简称OR),雨带主要位于第一象限,螺旋雨带在海面上呈东南—西北向分布,位于陆地上的雨带中段也呈东南—西北走向,而后逐渐转为第四象限的东北—西南向分布。由于海面上水汽充沛,雨带上游(位于海洋上)回波较强,而雨带下游(位于陆地上)回波比较零散。在双多普勒雷达南部反演区已经有强对流单体生成,回波强度在40 dBz以上。此后,OR继续向西北方向移动,雨带中游部分进入双多普勒雷达观测区,观测区内对流得到进一步发展,并形成一条东南—西北走向的雨带(RA),其上最强回波超过45 dBz(图1b)。与此同时,雨带上游的强对流单体持续不断地向雨带中游移动,雨带发展迅速。15:30台风第三次登陆时(图1c),2~3 km高度上的最强

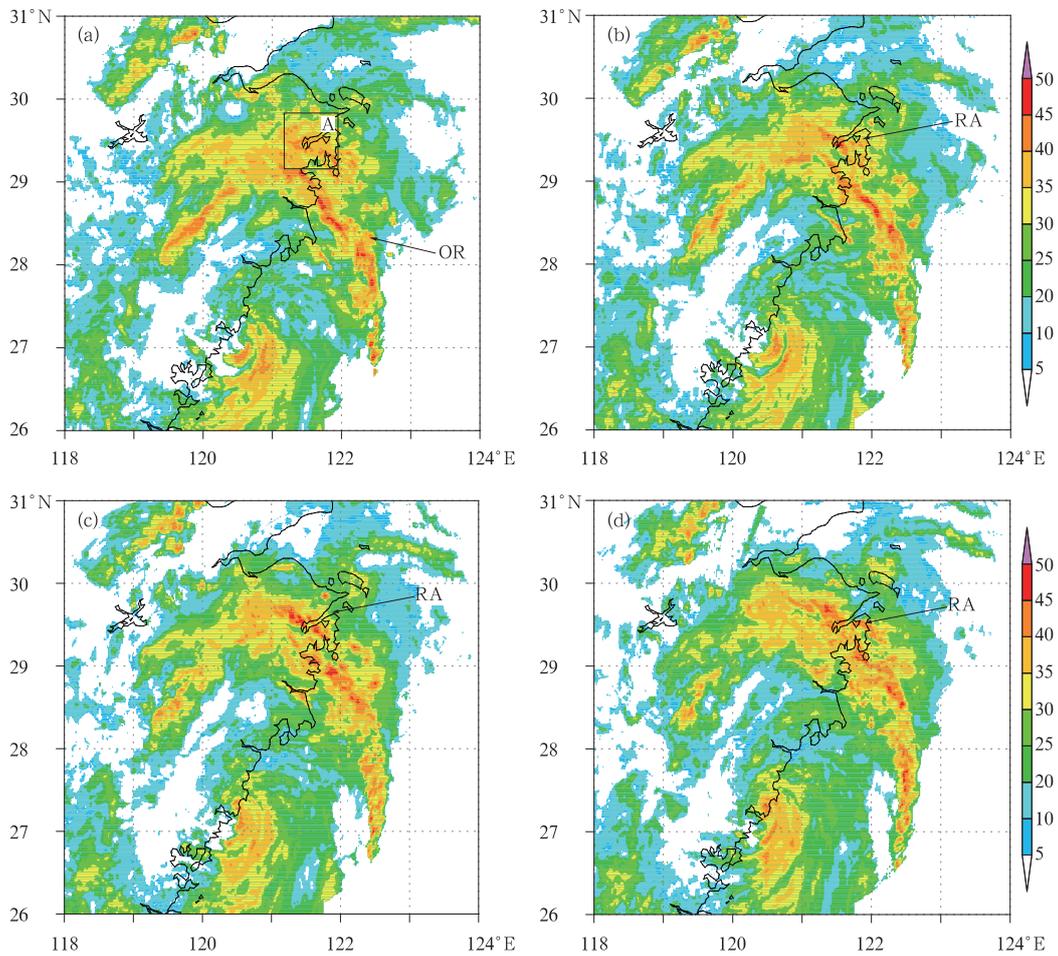


图 1 2007 年 10 月 7 日 4 km 高度的组网多普勒雷达数据拼图
(a) 14:27, (b) 14:58, (c) 15:30, (d) 16:00 (彩色背景为回波强度, 矩形 A 表示双多普勒雷达风场反演区)

Fig. 1 Radar's mosaic reflectivity at $z=4$ km on
(a) 14:27 BT, (b) 14:58 BT, (c) 15:30 BT, (d) 16:00 BT 7 October 2007
(Color shades show the radar reflectivity, rectangle A shows the 3D retrieval domain)

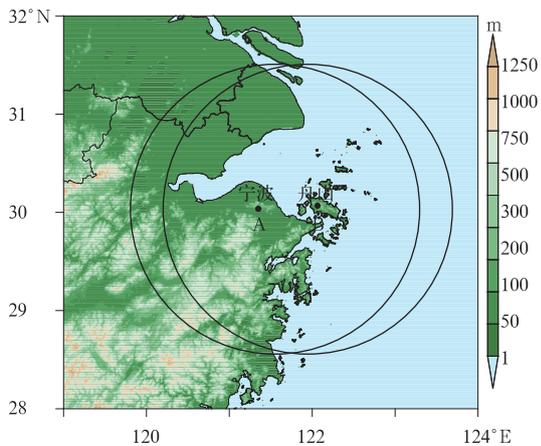


图 2 宁波、舟山双多普勒雷达同步体扫探测覆盖区示意图

(彩色背景表示地形, 色标表示海拔高度, 单位: m, 圆 A 和 B 分别表示宁波、舟山雷达探测区)
Fig. 2 Topographic map and locations of the dual-Doppler radars at Ningbo and Zhoushan
(The color shades represent the topographic, units: m, circles A and B show Ningbo and Zhoushan radar scan range, respectively)

回波均超过 50 dBz, 雨带上有多个强度大于 45 dBz 的强对流单体, RA 处于成熟阶段。此后, 外围螺旋雨带继续向略偏西北方向移动, 雨带 RA 也向西北方向移动, 由于降水的持续, RA 上的较强回波开始减弱(图 1d), 雨带在逐渐移出双雷达探测区的过程中消散。

3 螺旋雨带三维风场结构分析

使用宁波和舟山双多普勒雷达时间同步体扫资料进行三维风场反演, 在此基础上, 研究“罗莎”外围螺旋雨带的三维结构。宁波和舟山多普勒天气雷达在此次暴雨过程中使用 VCP 21 立体扫描工作模式, 每个体扫包括 9 层仰角, 完成一个体扫需要 5 分钟左右。图 2 是宁波、舟山双多普勒雷达同步体扫探测覆盖区示意图, 圆 A 和 B 分别表示两部雷达各自的探测区。三维风场反演区左下角为 29.27°N、

121.20°E,正东为 x 轴正方向,正北为 y 轴正方向,垂直向上为 z 轴。水平和垂直分辨率分别取1 km和0.5 km,这样的空间分辨率能够满足中尺度分析的需求;三维椭球 Cressman 插值函数的水平和垂直半径分别取2.5 km和1.2 km。首先使用软件系统^[62]对时间同步体扫资料进行质量控制,由于径向速度退模糊比较复杂,采用人机交互方式处理,以保证退模糊的正确性;然后再进行三维风场反演。本文使用 MUSCAT 技术进行双雷达风场反演,该技术是在研究机载雷达风场反演时提出的,反演精度较高。周海光等已经将其进行改进,用于地基双雷达风场反演^[54],并将其用于暴雨三维风场结构研究^[56],较好地揭示了暴雨的精细三维结构。

15:30 台风登陆时,其中心位于 27.20°N、120.45°E,距离宁波雷达站 335 km,台风最大风速 $33 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。此时,“罗莎”外围螺旋雨带恰好穿越双多普勒雷达南部观测区,观测区内雨带最强回波超过 50 dBz,对流发展旺盛,雨带处在成熟阶段,本节使用相对雨带的移动速度研究其三维动力结构。首先由双多普勒雷达时间同步探测资料反演三维风场,而后扣除雨带的移动速度($302.3^\circ, 13.6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$),将差值定义为相对移动速度,使用该速度场比较容易刻画外围雨带的气流结构特征,这种方法在 Tabata 等^[58]和蔡雅婷等^[60]的研究中均得到应用。

图 3 给出了 15:30 不同高度层水平相对速度图,图 3a 的斜线 AB 表示图 4 的垂直剖面所在位置。2 km 高度(图 3a),在雨带内部,气流方向基本与雨带走向一致,且风速出现强弱区相间分布特征。雨带外侧的气流方向为东南向,也即水平风向从螺旋雨带的上游指向雨带的下游,水平风场呈现气旋性旋转;在上游($x > 40 \text{ km}$),雨带外侧风向与雨带走向的夹角较小,这表明相对于雨带的内流(风向由螺旋雨带外侧吹向螺旋雨带内侧)较弱;在雨带下游气旋性切变进一步加大,雨带外侧风向与雨带夹角增大,表明内流逐渐加强。雨带内侧水平风为西南风,其上游风向与雨带夹角较大,这表明有较强的相对雨带的外流(风向由螺旋雨带内侧吹向螺旋雨带外侧)。而雨带下游内侧风向与雨带夹角逐渐减小,这说明下游内侧出流逐渐减弱;当靠近雨带时,东风分量逐渐加大,风向与雨带的交角逐渐减小;在主雨带内部则转为东南风,与雨带走向一致,而且在接近主雨带过程中,其风速逐渐增大。雨带上游主要盛行东南气流,将洋面上丰富的水汽源源不断地输送至降水区。沿着雨带方向,从上游至下游,风速逐渐减小,这就在螺旋雨带上形成风速辐合,对于水汽集

中、雨带的发展非常有利。在雨带上游(45,15)(相对于左下角的坐标,单位:km,下同)附近时有一水平速度大值区,其中心区速度大于 $15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。雨带内部回波较强,强回波带呈东南—西北走向,与水平风场方向基本一致,其上最强回波大于 50 dBz;强回波区对应着强辐合区和正涡度大值区,最强辐合中心在 $-20 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$,最大涡度值在 $25 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 以上。强回波带略偏外一侧是水平速度大值区,而且对应着上升速度区。数值模拟也表明^[63],热带风暴的动量主要集中在螺旋雨带中,螺旋雨带和强风速区的这种配置,和暴雨研究中发现的对流雨团附近存在中尺度低空急流类似;这种配置结构对于螺旋雨带的发展和强降水的维持极为有利。

2.5 km 和 3 km 高度(图 3b、3c),雨带内侧气流也指向雨带外侧,出流较强;内侧气流在接近雨带过程中逐渐增强。雨带上游外侧气流与雨带夹角较小,在下游交角则逐渐增大。相对低层而言,较高层雨带外侧气流与雨带夹角逐渐变小,这说明内流逐渐减弱。雨带内部风速比低层略有减弱,但上游的强风速中心依然维持在 $13 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 左右;沿着雨带方向,下游风速比上游风速弱,这就在主雨带上形成了风速辐合区。在雨带内部,强回波区附近辐合较强,且对应着上升气流区,此处的对流发展活跃。

4 km 高度(图 4d),雨带内侧的气流仍指向雨带,这表明在雨带内侧仍有较强的出流。而雨带上游外侧气流气旋式切变与低层的相比有所减弱,距离雨带强回波越远的区域气流的气旋性切变越弱。在下游,雨带内部气流与雨带走向基本一致,雨带外侧气流的气旋性旋转依然较强。

在高层,雨带内部气流的气旋性旋转逐渐减弱,风向随高度顺时针旋转,雨带逐渐转为受外流控制。8 km 高度,反演区基本为西南气流,外流明显。

从图 3 中不同高度水平风场反演结果可见强雨带处具有一定的风速辐合,即存在雨带外侧风速较大、而雨带内侧风速相对较小的特点,这是该螺旋雨带水平风场的最显著特征之一,这对于水汽的集中、螺旋雨带的发展以及强降水的发展和维持非常有利。朱佩君等^[63]曾使用数值模拟发现强风速带偏于螺旋雨带外侧,本文利用观测事实对其进行了验证。他们还给出形成原因^[63],这是因为螺旋带外侧的气压高于内侧的气压,外侧的辐合气流向气压低的方向运动,气压梯度力会使气流加速。而且由于螺旋带低层有气压低值扰动,高层有气压高值扰动,更加加速了外侧的辐合气流;相反,内侧的辐合气流是向气压高的方向运动,气压梯度力使气流减速。

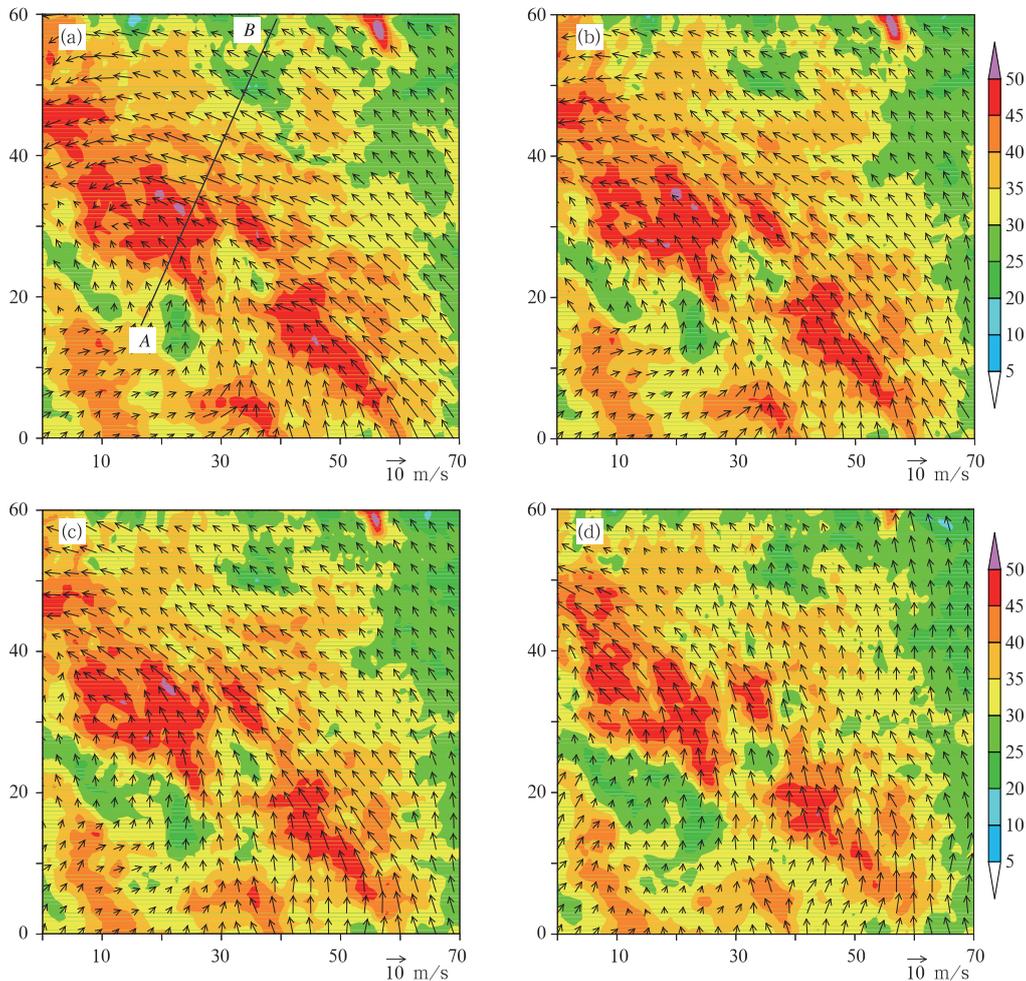


图 3 2007 年 10 月 7 日 15:30 反演的水平相对风场
(a) $z=2$ km, (b) $z=2.5$ km, (c) $z=3$ km, (d) $z=4$ km
(彩色背景为回波强度,下同)

Fig. 3 Horizontal wind fields retrieved at 15:30 BT 7 October 2007
(a) $z=2$ km, (b) $z=2.5$ km, (c) $z=3$ km, (d) $z=4$ km
(Color shades show the radar reflectivity, the same below)

为了更好地研究螺旋雨带气流的垂直结构特征,图 4 给出了沿图 3a 中斜线 AB 的垂直剖面内的速度场,线段 AB 的延长线过台风中心,也即垂直剖面通过台风中心。图 4a 给出了径向风(V_r)的垂直剖面,其中负速度表示内流(朝向台风中心),正速度表示外流(远离台风中心)。在雨带中心区,强回波核(>45 dBZ)高度为 5.5 km,且随高度略向雨带外侧倾斜。2 km 高度以下,雨带外侧为内流($x > 17$ km),雨带内侧和雨带内部接近台风中心区域($x < 17$ km)均为外流。雨带最大内流(负速度)为 $5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,高度在 2 km 左右。内流在雨带外侧沿着台风中心方向加速,而在雨带内部沿着台风中心方向则减速,并与雨带内侧的外流在雨带中心区形成强辐合,水汽在此处汇合抬升,这也是雨带内部中低层强回波区形成的原因之一;雨带内部对流活跃。正是由于这样的动力配置结构,雨带内部 40 dBZ 的

较强回波高度接近 6 km,造成局地强降水。这与 Ishihara 等^[57]使用双多普勒雷达揭示的台风外围螺旋雨带垂直剖面内径向速度场的结构特征基本一致。

图 4b 给出了垂直剖面内的切向风场(V_t),正速度表示风向为逆时针方向(气旋式分量)。图中清晰地显示切向速度分量随高度减小,最大速度区位于主雨带内部偏外一侧,约 $14 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,高度 2 km。雨带内侧风切变比雨带外侧风切变的强度大。

图 4c 给出了垂直剖面内的垂直速度场(W),正速度表示上升运动,负速度表示下沉运动。在雨带内部有一支较强的上升气流,上升气流区对应着雨带内部的强回波区,这表明低层的辐合和上升运动造成水汽的局地集中和抬升,雨滴在此上升气流区内增长;最大上升气流约为 $3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,位于雨带内部强回波区 5 km 高度附近。在上升气流区的外侧

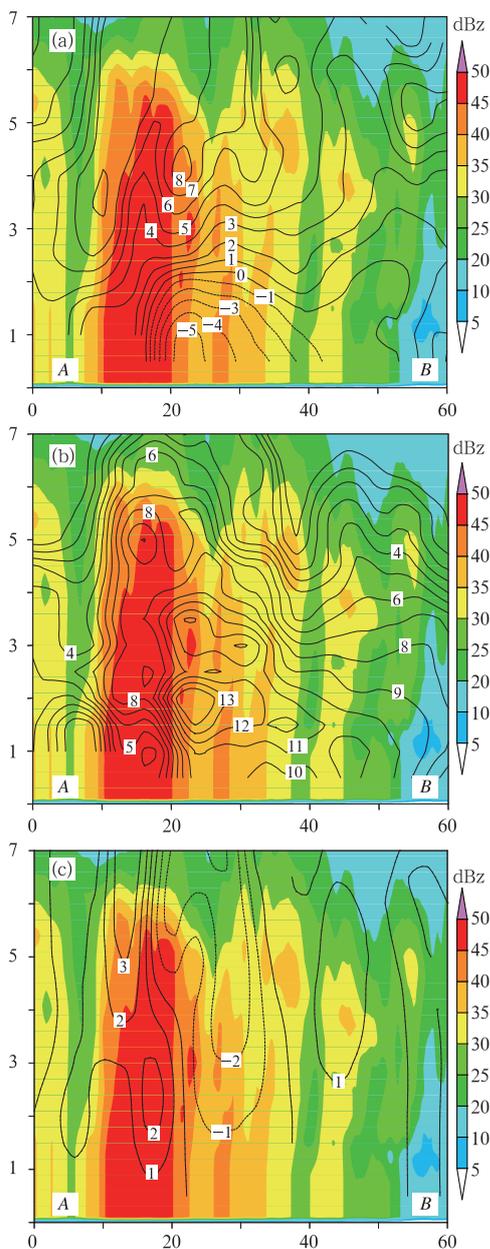


图4 2007年10月7日15:30沿图3a斜线AB的垂直剖面内的速度场

(a) 径向速度(正速度表示远离台风中心, 负速度表示朝向台风中心),
(b) 切向速度, (c) 垂直速度(实线表示上升速度, 虚线表示下沉速度)

Fig. 4 Composite vertical cross-section (along AB in Fig. 3a) for (a) radial component of rainband-related horizontal wind ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$), (b) tangential component ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) of rainband-related horizontal wind, and (c) vertical velocity ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) contour at 15:30 BT 7 October 2007

有一支下沉气流,其速度在 $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 左右,下沉气流区位于雨带内部强回波区偏外一侧,这支下沉运动是由于雨带内部上升运动所形成的补偿性下沉和

降水拖曳共同作用形成的。垂直速度分布特征和量级与 Tabata 等^[58]使用双雷达揭示的台风外围螺旋雨带的特征类似。图4c也表明,热带风暴中最强的上升运动集中在螺旋雨带内部,而其他区域的上升运动均不强。综合图4b可见,气流从雨带外侧2 km高度以下进入雨带并逐渐减速,这支气流与雨带内侧的外流在雨带内部强回波处形成辐合上升,部分转为向外的气流,随高度向雨带外侧倾斜并在雨带外部形成下沉气流,部分下沉气流转为内流重新进入螺旋雨带;强降水就发生在雨带强回波区内。

此后,螺旋雨带向西北移动,其上强回波($>45 \text{ dBz}$)的面积逐渐减小,由于水汽的输送和低层风场的辐合,螺旋雨带下游的回波仍然较强。16:39, 2 km高度(图略),雨带内部水平风场方向与雨带走向一致,且风速也出现强弱区相间分布特征,这与图3a的特征基本一致;但水平风速有所减小,最强速度中心为 $11 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 左右。螺旋雨带外侧气流方向为东南向,速度值比15:30的速度值平均小 $1 \sim 2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。雨带上游外侧风向同雨带夹角较小,雨带下游外侧风向与雨带夹角逐渐增大,内流加强。雨带外侧风速较大,而雨带内侧风速相对较小,在螺旋雨带内部形成强辐合,这对于强降水的维持和发展非常有利。雨带内部有较强的上升气流,上升气流主要位于螺旋雨带下游强回波区域,最强中心位于(30, 40);在雨带内外两侧均有多支下沉气流,且下沉气流区面积较前面时刻明显增大。强回波区仍然是强辐合区和正涡度大值区,虽然辐合有所减弱,但其中心最强辐合仍在 $-15 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 左右。

3 km高度,雨带内侧气流指向雨带,出流依然较强;内侧气流在接近雨带强回波区过程中逐渐减速,在雨带内部形成较强的速度辐合,辐合中心在 $-15 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 左右。雨带外侧气流在上游与雨带夹角较小,在下游交角逐渐增大。雨带内侧和外侧的水平速度比低层的弱一些;雨带内部风速也比低层略有减弱,但最强风速中心仍在 $11 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 左右。

4 km高度,雨带回波进一步减弱。螺旋雨带内侧有较强的出流,雨带外侧的内流已经消散,逐渐转为气旋性旋转。螺旋雨带下游强回波区域仍然维持较强的上升气流,该区域为辐合区,最强辐合在 $-10 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 左右。高层水平风场的变化特征与前面时刻的基本一致,但风速略小一些。

在通过台风中心的垂直剖面内的径向速度场上,内流和外流比前面时刻弱一些。螺旋雨带内部

强回波区偏外一侧和雨带外侧下沉气流区面积逐渐增大。

螺旋雨带强度逐渐减弱,在继续往西北移动过程中移出双多普勒雷达观测区。

4 结 论

在“罗莎”第三次登陆期间,其外围螺旋雨带在成熟阶段恰好穿越宁波和舟山双多普勒雷达观测区,本文利用上述两部雷达时间同步体扫资料,对其进行三维风场反演,并对螺旋雨带的回波结构和三维风场结构进行了研究。

(1) 在螺旋雨带内部低层有多个强回波区,强回波区基本同水平风速较大区相对应;在雨带内部,水平风场与雨带走向基本一致;雨带内部水平速度强弱区存在着相间分布的特征;不同高度水平风场反演结果表明强降雨带处具有一定的风速辐合,即存在雨带外侧风速较大,而雨带内侧风速相对较小的特点,这对于强降水的发展和维持非常有利。

(2) 3 km 高度以下,雨带上游外侧水平速度场与雨带夹角较小,这表明上游内流较弱;在雨带下游外侧,水平速度与雨带夹角逐渐增大,这表明雨带下游内流较强;在雨带内侧有明显的外流。

(3) 在沿着台风中心的垂直剖面内,雨带外侧低层有明显的内流,气流从雨带外侧低层进入雨带;而在雨带内侧有明显的外流,两支气流在雨带内部辐合,水汽在雨带内部辐合抬升,在雨带内部中低层形成强回波区。螺旋雨带内部的强回波略向外侧倾斜,较强的上升运动位于雨带内部强回波区的内侧;正是这种动力结构,造成了螺旋雨带内的强降水。

(4) 外围螺旋雨带切向速度分量随高度增加逐渐减小,最大速度区在 2 km 高度层。

(5) 由于资料所限,本文只对螺旋雨带在成熟期间的三维风场结构进行了初步分析,今后还需利用更多的观测资料在上述方面开展研究。

参考文献

- [1] 陈联寿,丁一汇. 西太平洋台风概论[M]. 北京:科学出版社,1979.
- [2] 倪允琪,薛宗元. 应用数值预报的结果作西太平洋台风路径统计预报的尝试[J]. 气象学报,1980,38(1):36-43.
- [3] 方宗义. 台风发生发展过程中的云型特征与高空环境流场的关系[J]. 大气科学,1982,6(3):274-282.
- [4] 丁一汇,孔军. 三维热带气旋的数值模拟及辐射对其影响的研究[J]. 中国科学(B辑),1988,18(8):887-898.
- [5] 陶祖钰,王洪庆,黄伟,等. 9216号台风登陆后的云系结构变化[J]. 应用气象学报,1995,6(2):146-152.
- [6] 马鹤年,李泽椿,裘国庆. 台风暴雨监测预报研究成果业务化和推广应用的研究技术文集[M]. 北京:气象出版社,2001.
- [7] 陈联寿,徐祥德,罗哲贤,等. 热带气旋动力学引论[M]. 北京:气象出版社,2002.
- [8] Chen Lianshou, Luo Zhexian. A study of the effect of topography on the merging of vortices[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2004, 21(1): 13-22.
- [9] Duan Yihong, Wu Rongsheng, Yu Hui, et al. The role of β -effect and a uniform current on tropical cyclone intensity[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2004, 21(1): 75-86.
- [10] Chen Lianshou, Luo Huibang, Duan Yihong, et al. An overview of tropical cyclone and tropical meteorology research progress[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2004, 21(3): 505-51.
- [11] 陈联寿,罗哲贤,李英. 登陆热带气旋研究的进展[J]. 气象学报,2004,62(5):541-549.
- [12] 端义宏,余晖,伍荣生. 热带气旋强度变化研究进展[J]. 气象学报,2005,63(5):636-645.
- [13] 麻素红,王建捷,万丰. 人造台风模型及资料同化对 T-213(L31)模式台风路径预报能力的影响[J]. 热带气象学报,2007,23(2):141-145.
- [14] 董林,端义宏. 热带气旋经过台湾岛强度变化特征[J]. 气象,2008,34(7):10-14.
- [15] 黄亿,寿绍文,傅灵艳. 对一次台风暴雨的位涡与湿位涡诊断分析[J]. 气象,2009,35(1):65-73.
- [16] 高柱柱,孟智勇,杨贵名. 台风麦莎渤海转向的可预报性研究[J]. 气象,2009,35(2): 8-14.
- [17] 应明,余晖,梁旭东,等. 2007年西北太平洋热带气旋活动综述[J]. 气象,2009,35(2): 94-100.
- [18] 尹尽勇,李泽椿,杜秉玉. 9617号热带风暴 Tom 变性过程数值模拟分析[J]. 气象,2009,35(8): 16-26.
- [19] 李勋,李泽椿,赵声蓉,等. “浣熊”强度变化的环境背景和卫星观测分析[J]. 气象,2009,35(12): 21-29.
- [20] 彭治班,刘健文,郭虎,等. 国外强对流天气的应用研究[M]. 北京:气象出版社,2001.
- [21] 许小峰. 中国新一代多普勒天气雷达网的建设与技术应用[J]. 中国工程科学,2003,5(6):7-13.
- [22] 俞小鼎. 新一代天气雷达对局地强风暴预警的改善[J]. 气象,2004,30(8):3-7.
- [23] 李泽椿,毕宝贵,朱彤,等. 近30年中国天气预报业务进展[J]. 气象,2004,30(12):4-10.
- [24] 俞小鼎,王迎春,陈明轩,等. 新一代天气雷达与强对流天气预警[J]. 高原气象,2005,24(3):456-464.
- [25] 沈宏彬,陶祖钰,张义. 成都双流机场一次多雷暴天气的雷达回波分析[J]. 北京大学学报(自然科学版),2003,39(1):58-67.
- [26] 漆梁波,陈雷. 上海局地强对流天气及临近预报要点[J]. 气象,2009,35(9):11-17.
- [27] 刘娟,朱君鉴,魏德斌,等. 070703天长超级单体龙卷的多普勒雷达典型特征[J]. 气象,2009,35(10):32-39.
- [28] 吴庆梅,郭虎,杨波,等. 地形和城市热力环流对北京地区一次 β 中尺度暴雨的影响[J]. 气象,2009,35(12):58-64.

- [29] 矫梅燕,毕宝贵. 夏季北京地区强地形雨中尺度结构分析[J]. 气象, 2005, 31(6): 9-14.
- [30] 郑秀云,王建捷,何金海,等. 2003年7月淮河流域暴雨中- β 尺度特征的观测分析[J]. 气象, 2006, 32(1): 36-43.
- [31] 俞小鼎,张爱民,郑媛媛,等. 一次系列下击暴流事件的多普勒天气雷达分析[J]. 应用气象学报, 2006, 17(4): 385-393.
- [32] 俞小鼎,郑媛媛,张爱民,等. 安徽一次强烈龙卷的多普勒天气雷达分析[J]. 高原气象, 2006, 25(5): 914-924.
- [33] 矫梅燕,毕宝贵,鲍媛媛,等. 2003年7月3~4日淮河流域大暴雨结构和维持机制分析[J]. 大气科学, 2006, 30(3): 475-490.
- [34] 宋斌,李泽椿,刘奇俊,等. 山东省一次冰雹云过程的数值模拟[J]. 气象, 2008, 34(2): 3-9.
- [35] 赵玮,王建捷. 北京2006年夏季接连两场暴雨的观测对比分析[J]. 气象, 2008, 34(8): 3-14.
- [36] 夏文梅,陈楠,程婷,等. 降水过程中多普勒天气雷达风廓线产品特征[J]. 气象, 2008, 34(10): 20-26.
- [37] 俞小鼎,郑媛媛,廖玉芳,等. 一次伴随强烈龙卷的强降水超级单体风暴研究[J]. 大气科学, 2008, 32(3): 508-522.
- [38] 慕建利,王建捷,李泽椿. 2005年6月华南特大连续性暴雨的环境条件和中尺度扰动分析[J]. 气象学报, 2008, 66(3): 437-451.
- [39] 段丽,卞素芬,俞小鼎,等. 用SA雷达产品对京西三次局地暴雨落区形成的精细分析[J]. 气象, 2009, 35(3): 21-28.
- [40] 马清云,李泽椿,陶士伟. 单部多普勒天气雷达风场反演及其在数值预报中的应用试验[J]. 应用气象学报, 2001, 12(4): 488-493.
- [41] 盛春岩,浦一芬,高守亭. 多普勒天气雷达资料对中尺度模式短时预报的影响[J]. 大气科学, 2006, 30(1): 93-107.
- [42] 张林,倪允琪. 雷达径向风资料的四维变分同化试验[J]. 大气科学, 2006, 30(3): 433-440.
- [43] 倪允琪,周秀骥,张人禾,等. 我国南方暴雨的试验与研究[J]. 应用气象学报, 2006, 17(6): 690-703.
- [44] 许映龙,矫梅燕,毕宝贵,等. 近海台风雷达定位方法应用研究[J]. 大气科学, 2006, 30(6): 1119-1128.
- [45] 高拴柱,矫梅燕,毕宝贵,等. 相关法雷达反演风场在台风监测和分析中的应用[J]. 气象, 2007, 33(1): 38-44.
- [46] 余贞寿,高守亭,任鸿翔. 台风“海棠”特大暴雨数值模拟研究[J]. 气象学报, 2007, 65(6): 864-875.
- [47] 陶祖钰. 从单 Doppler 速度场反演风矢量的 VAP 方法[J]. 气象学报, 1992, 50(1): 81-90.
- [48] 陶祖钰. 关于 Doppler 雷达 VAD 技术的讨论[J]. 应用气象学报, 1995, 6(1): 109-113.
- [49] 陶祖钰. 以单多普勒雷达观测资料反演冷锋流场的试验[J]. 热带气象学报, 1995, 11(2): 142-149.
- [50] 朱立娟,龚建东. OIQC 技术在雷达反演 VAD 廓线资料退模糊中的应用研究[J]. 高原气象, 2006, 25(5): 862-869.
- [51] 孙健,刘淑媛,陶祖钰,等. 1998年6月8~9日香港特大暴雨中尺度对流系统分析[J]. 大气科学, 2004, 28(5): 713-721.
- [52] 樊利强,王迎春,陈明轩. 利用雷达资料反演方法对北京地区一次强对流天气过程的分析[J]. 气象, 2009, 35(11): 9-16.
- [53] Tao Zuyu. Error comparison of wind field retrieval from single and dual Doppler radar observations[J]. Acta Meteorologica Sinica, 1994, 8(3): 337-345.
- [54] 周海光,张沛源. 笛卡尔坐标系的双多普勒天气雷达三维风场反演技术[J]. 气象学报, 2002, 60(5): 585-593.
- [55] 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.
- [56] 周海光,张沛源. 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): 372-386.
- [57] Ishihara M, Yanagisawa Z, Sakakebara H, et al. Structure of typhoon rainband observed by two Doppler radars[J]. Journal of the Meteor Society Japan, 1986, 64(6): 923-939.
- [58] Tabata A, Sakakibara H, Ishihara M, et al. A general view of typhoon 8514 observed by dual-Doppler radar: From outer rainbands to eyewall clouds[J]. Journal of the Meteor Society of Japan, 1992, 70(5): 879-917.
- [59] Reasor D, Montgomery T. Low-wave-number structure and evolution of the hurricane innercore observed by airborne dual-Doppler radar[J]. Monthly Weather Review, 2000, 128(6): 1653-1680.
- [60] 蔡雅婷,陈台琦. 纳莉台风登陆时的结构演变之多普勒雷达资料分析[J]. 台湾大气科学, 2007, 35(3): 167-187.
- [61] 周海光. 新一代多普勒天气雷达三维数字化拼图系统研究[J]. 计算机应用研究, 2007, 24(12): 226-227.
- [62] 周海光,王玉彬. 多部多普勒雷达同步探测三维风场反演系统[J]. 气象, 2002, 28(9): 7-11.
- [63] 朱佩君,郑永光,王洪庆,等. 台风螺旋雨带的数值模拟研究[J]. 科学通报, 2005, 50(5): 486-494.