

周海光. 超强台风韦帕 (0713) 螺旋雨带中尺度结构双多普勒雷达研究 [J]. 大气科学学报, 2010, 33 (3): 271-284.

Zhou Hai-guang Mesoscale spiral rainband structure of super typhoon W ipha (0713) observed by dual-Doppler radar [J]. Trans Atmos Sci, 2010, 33 (3): 271-284.

超强台风韦帕 (0713) 螺旋雨带中尺度结构双多普勒雷达研究

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)

摘要: 超强台风“韦帕”(W ipha) 是 2007 年登陆中国大陆最强的台风, 在浙江省造成了特大暴雨。利用宁波和舟山双多普勒天气雷达同步观测资料, 对“韦帕”的两条螺旋雨带进行了双雷达三维风场反演; 并综合利用组网雷达拼图数据等资料, 对螺旋雨带的三维精细结构进行了分析。研究表明: (1) 两条螺旋雨带的三维结构有很多相似之处。螺旋雨带内部低层有多个强回波区, 水平速度大值区主要分布在强回波带上; 强回波带的低层有较强的上升气流, 最强上升气流超过 4 m/s 。在螺旋雨带中存在多个辐合辐散对、上升下沉气流对, 这对于螺旋雨带的维持和进一步发展具有重要作用。在沿着台风中心的垂直剖面内, 螺旋雨带内部的强回波区向雨带外侧倾斜。雨带外侧 2 km 高度以下的低层有较强的内流, 最大值为 5 m/s ; 雨带内侧有较强的外流, 2 km 高度以上均受外流控制; 内流和外流在雨带中部低层汇合抬升。切向速度的强中心出现在 3 km 高度, 速度值随高度增加而逐渐减小。(2) 两个时段的螺旋雨带也存在差异。前一个时段的螺旋雨带对流发展更旺盛, 45 dBZ 的回波高度为 4.8 km , 而后一个时段的螺旋雨带 45 dBZ 的回波高度仅 3.2 km 。垂直剖面内, 前一个时刻螺旋雨带低层辐合更强, 最强辐合值超过 $-15 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$, 正是由于低层的强辐合和充足的水汽供应, 才使得雨带内部中低层的回波发展旺盛。

关键词: 台风; 螺旋雨带; 双多普勒天气雷达; 风场反演; 三维结构

中图分类号: P412.25 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-7097 (2010) 03-0271-14

Mesoscale Spiral Rainband Structure of Super Typhoon W ipha (0713) Observed by Dual-Doppler Radar

ZHOU Hai-guang

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

Abstract: The super typhoon W ipha (0713) was the strongest typhoon that landed on China mainland in 2007, which caused heavy precipitation in Zhejiang Province. The three-dimensional wind fields of two outer spiral rainbands were retrieved from Ningbo and Zhoushan dual-Doppler radar data. The 3-D structure of the rainbands was analyzed with the retrieved wind. The result clearly shows that the two rainbands have some similarities. There are some strong reflectivity zones in the low level of the spiral rainbands, and the strong horizontal wind speed zones correspond with the strong reflectivity zones. There are some strong updrafts in the low and middle levels of the stronger reflectivity bands where some convergence centers are found. There are downdrafts in both outer sides of the rainbands. The convergence-divergence couple and the updraft-downdraft couple play important roles in the maintenance and development of the heavy rainfall. In the vertical-cross section along the radial direction of the

收稿日期: 2009-10-13; 改回日期: 2010-01-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (40605014); 科技部国家重点基础研究发展规划项目 (2004CB418305); 科技部国家高技术研究发展计划 (2007AA061901); 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室基本科研项目 (2008LASWZ101)

作者简介: 周海光 (1971—), 男, 内蒙古呼和浩特人, 博士, 副研究员, 研究方向为雷达气象学和中度气象学, zhg@cma.gov.cn

typhoon center, the reflectivity core in the spiral rainband tilts outward with height. There is a strong inflow toward the typhoon center below 2 km level on the outer side and outer edge of the rainband whose maximum value is 5 m/s. There is a strong outflow away from the typhoon center on the inner side and the inside of the rainband. The outflow and the inflow at the low level cause the convergence above the center of the rainband. The maximum tangential speed exists at the low level of the rainband. There are also some differences between the two spiral rainbands. The convergence at the low level of the first rainband is stronger than that of the second one. In the vertical cross-section, the maximum convergence is more than $-15 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ in magnitude at the low level of the first rainband. Due to the stronger convergence and the abundant water vapour at the low level, the convection of the first spiral rainband is more active than that of the second one. The reflectivity core of the first spiral rainband greater than 45 dBZ is 4.8 km high while the reflectivity core of the second spiral rainband is only 3.2 km.

Key words: typhoon; spiral rainband; dual-Doppler weather radar; wind retrieval; 3-D structure

0 引言

我国是受台风影响比较频繁的国家,台风经常引发暴雨。气象学家对其进行了深入研究,取得了重要进展,陈联寿等^[1]、陈玉林等^[2]对近些年台风研究做了全面综述。龚龔等^[3]研究了热带气旋登陆后的统计特征,王蔚等^[4]则根据热带气旋形成的环流背景进行统计研究。陆汉城等^[5]提出了混合涡旋波的概念。台风预报的难点包括路径预报和降水预报等,管兆勇^[6]利用台风移速方程讨论了影响移速的因素;马镜嫻等^[7]发现偶极子流对台风移向和移速突变有重要影响。李峰等^[8]指出 TCRM 反演的云迹风在台风路径反演时,效果较好。余贞寿等^[9]发现水平螺旋度对台风降水时效预报效果最好,垂直螺旋度对降水落区预报更具优势。数值模拟在台风强度变化、结构研究方面发挥着重要作用。周嘉陵和罗哲贤^[10]分析了中尺度涡旋和台风涡旋相互作用及其对台风强度的影响。黄新晴等^[11]的研究揭示了台风三维结构的演变特征。Yu等^[12]的研究表明地形等高线与水汽输送路径正交是暴雨成因之一,地形使暴雨增幅明显。马玉芬等^[13]指出地形抬升机制在台风登陆时最强。气象卫星已成为研究台风的一种重要手段,河惠卿等^[14]讨论了不对称环流对台风强度变化的影响;钟敏等^[15]发现台风降水云系的对流性降水与层状云降水的雨强廓线差异明显。

多普勒雷达探测资料具有很高的时空分辨率,是中尺度气象学研究的一种重要手段^[16-17]。耿建军等^[18]利用晴空回波谱宽研究强对流天气的前兆特征。雷达估测降水对于降水预报具有重要作用,杜秉玉和高志球^[19]提出了估测精度高的综合雷达

资料等多种数据的多因子估计降水算法;官莉等^[20]的研究表明统计权重法估测雨强精度高。雷达资料在灾害天气结构研究方面具有重要作用,杜秉玉等^[21-22]研究了梅雨锋暴雨中尺度回波的形态、结构及相伴随的中尺度天气系统,提出了梅雨锋内弱低层辐合下的中尺度回波增强区概念;朱君鉴等^[23]研究了冰雹云的三维结构。雷达数据同化是雷达资料应用的重要方向,万齐林等^[24]和杨艳蓉等^[25]的研究均表明,同化雷达数据可以明显改善预报效果。雷达资料还是临近预报中不可或缺的数据,杜秉玉等^[26]融合雷达探测数据等多种资料建立了强对流短时预报系统,提高了预报准确率。

近些年,在使用单雷达资料研究台风定位、螺旋雨带结构方面也取得了很多进展。李伟等^[27]完善了基于径向速度的台风中心探测算法。魏应植等^[28]利用雷达观测数据,验证了“艾利”台风风场遵循波数为 1 的非对称分布。闵爱莲等^[29]指出外围雨带低层和中高层风场的叠加造成低层到高层风向变化。

多普勒雷达探测到的径向速度是气象目标物在雷达径向上的速度分量,通过风场反演技术可以得到三维风场。彭霞云等^[30]提出了极值订正、时空订正等风场质量控制算法,提高了反演风场质量。陈列等^[31]、石燕等^[32]采用简单伴随模式反演风场,揭示了强降水系统的三维结构。

双多普勒雷达三维风场反演精度较高,国内在反演技术等方面进行了深入研究。Tao^[33]详细分析了单雷达和双雷达风场反演误差分布。周海光和张沛源^[34]将机载雷达风场反演算法应用于地基双雷达风场反演。刘舜和邱崇钱^[35]针对雷达资料非同时性的特点,改进反演算法,提高了反演精度。何宇

翔等^[36]对迭代反演算法进行了模拟研究。黄思训等^[37]提出变分法和正则化方法相结合的反演算法,由于引入正则化项提高了反演精度。近些年,国内还利用双雷达资料研究暴雨等灾害性天气的风场结构。Shao等^[38]、古金霞等^[39]和盛日锋等^[40]的研究均表明中低层切变线、辐合线对强降水的发生和维持有重要作用。周海光等对梅雨锋暴雨^[41-42]、热带风暴引发的暴雨^[43]、华南暴雨^[44]风场反演的研究,也揭示了中低层的中 γ 尺度涡旋^[41]、中 β 尺度辐合线^[43-44]以及中 γ 尺度辐合线^[44]对于暴雨的生成、维持和发展具有重要作用。王俊等^[45]利用双雷达风场数据研究北方飚线的结构。

国外从 20 世纪 80 年代开始使用机载多普勒雷达研究台风眼壁、螺旋雨带的三维风场结构。Barnes等^[46]首次使用机载雷达风场反演数据揭示了螺旋雨带的风场结构,发现雨带中的气流呈准二维特征,即气流变化主要发生在跨越雨带方向上。Barnes等^[47]的研究还表明螺旋雨带附近的上升运动区,在低层多发生在回波梯度最大的地方,而在上层则发生在最强回波区;Marks等^[48]指出台风内核区风场呈不对称分布,且不对称分布特征随高度变化。地基双雷达也成为研究台风结构的一种重要工具,Ishihara等^[49]的研究揭示气流沿着螺旋雨带方向呈现明显的二维结构,最大辐合区随着高度由雨带内侧向外侧倾斜;蔡雅婷和陈台琦^[50]的个例研究表明台风登陆时风场具有非轴对称分布特征。这些研究成果加深了对台风结构的认识。由于我国大陆地区多普勒雷达布设较晚,使用双雷达研究螺旋雨带结构的工作很少;最近,赵坤等^[51]对螺旋雨带进行了双雷达风场反演研究。因此,开展上述研究对于深化台风三维精细结构的认识非常必要。

2007 年第 13 号超强台风“韦帕”(0713)在华东地区造成了强降水,其螺旋雨带恰好穿越浙江省宁波和舟山双多普勒雷达观测区,这为研究螺旋雨带的三维动力结构提供了极好的机会。本文使用双多普勒雷达三维风场反演技术研究“韦帕”螺旋雨带的三维精细动力结构,以加深对螺旋雨带三维结构的认识水平,这对于提高台风暴雨临近预报也有一定的帮助。

1 数据和反演方案

使用的主要数据包括:2007 年 9 月 18 日 10:42—19 日 05:35 (北京时,下同)的常规观测资料,建阳、长乐、温州、金华、宁波、舟山 S 波段新一

代多普勒天气雷达基数据。

使用舟山和宁波双多普勒雷达时间同步体扫数据进行三维风场反演,这两部雷达的探测模式均为 VCP21 (Volume Coverage Pattern) 立体扫描模式,该模式每个体扫包含 9 层仰角,完成一个体扫需要 6 min 左右。图 1 是舟山、宁波双多普勒雷达同步体扫探测示意图,双雷达基线长 58.7 km,满足双多普勒雷达最佳探测布局要求。风场反演区左下角为 (121.18°E, 29.08°N),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, x 方向范围为 110 km, y 方向范围为 100 km;三维椭圆 Cressman 插值函数的水平和垂直半径分别取 2.5 km 和 1.2 km。使用软件系统^[52]首先对双多普勒雷达时间同步体扫数据进行质量控制,然后使用 MUSCAT 技术进行三维风场反演。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。周海光和张沛源^[34]已经将其进行改进,用于地基双雷达风场反演,并将其用于梅雨锋暴雨、华南暴雨和强热带风暴引发暴雨的三维风场结构研究^[41-44],较好地揭示了暴雨的精细三维动力结构。

2 台风韦帕概述

2007 年第 13 号台风“韦帕”于 9 月 16 日 08 时在菲律宾东北部洋面上生成,图 2 给出了台风“韦帕”移动路径。“韦帕”9 月 17 日 02 时加强为台风,18 时加强为强台风,18 日 05 时加强为超强台风。19 日 02:30 在浙江省苍南县霞关镇登陆,登陆时中心附近最大风力 14 级 (45 m/s),中心气压 950 hPa,为强台风。登陆之后,“韦帕”沿着西北路径移动,其强度迅速减弱,19 日 05 时减弱为台风,07 时减弱为强热带风暴,11 时减弱为热带风暴,19 时以后沿着东北路径移动,20 日 14 时停编。

“韦帕”是 2007 年登陆中国大陆最强的台风,具有发展迅速、强度强、路径西折、风大雨强、影响范围大的特点。受“韦帕”及其减弱的低压环流和冷空气的共同影响,台湾、福建、浙江、上海、江苏、安徽、山东等地出现了暴雨到大暴雨,局部地区特大暴雨。福建和浙江东部沿海、上海等地还出现了 8~11 级、阵风 13~15 级的大风。9 月 17—21 日,浙江东部、上海、江苏北部及山东东南部降水量达 100~200 mm,其中温岭 315.2 mm、临海 322.8 mm、永嘉 326.8 mm。“韦帕”造成了严重的洪涝灾害,1253.5 万人受灾,转移 281.1 万人,直接经济损失 79.7 亿

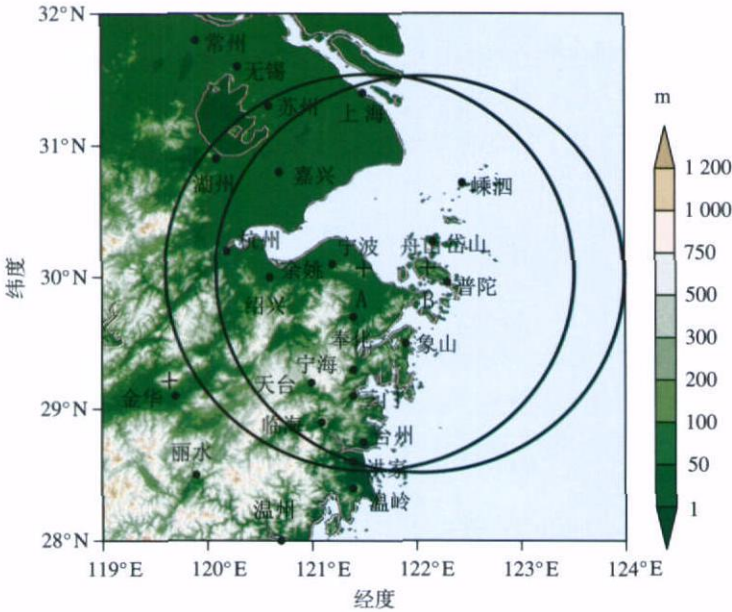


图 1 舟山、宁波双多普勒天气雷达扫描探测区示意图 (彩色背景表示地形高度; 色标表示海拔高度; +表示多普勒天气雷达站; 圆 A 和 B 分别表示宁波、舟山雷达探测区)

Fig 1 Topographic map and locations of the dual-Doppler radar at Zhoushan and Ningbo (The color shades denote the topographic altitude; units: m; + represent the Doppler radar stations; the circles A and B indicate the radar scan range in Ningbo and Zhoushan, respectively)

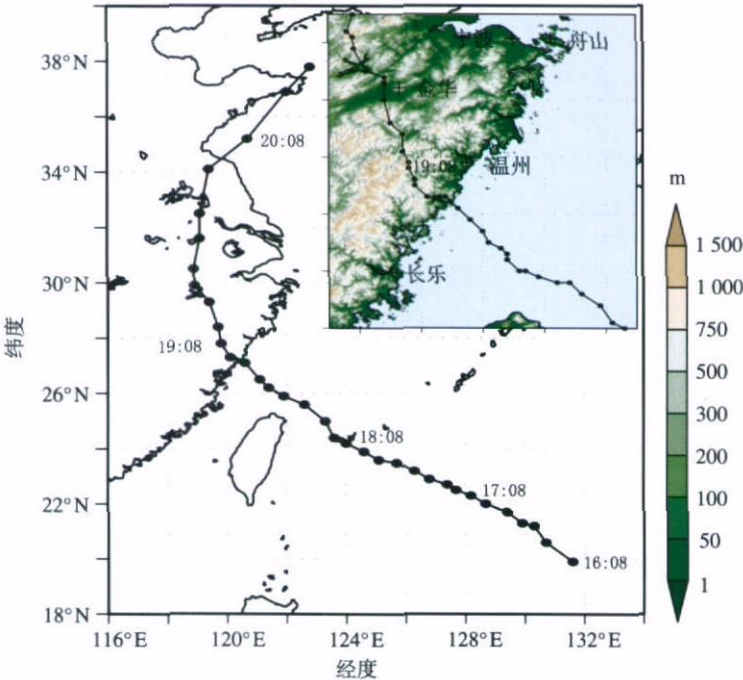


图 2 “韦帕”(0713)台风路径 (图上标注时间为北京时; 彩色背景表示地形高度; 色标表示海拔高度)

Fig 2 The track of TC W ipha (0713) (The time is Beijing Time, the color shades denote the topographic altitude)

元^[53]。浙江省的强降水主要集中在 18—19 日,图 3 是 18 日 08 时—19 日 08 时的降水量分布,余姚、奉化、宁海、新昌、三门、温岭、天台、温州和临海降水量分别为 123、126、132、162、206、218、232、276 和 286 mm。

3 螺旋雨带回波演变特征分析

使用建阳、长乐、温州、金华、宁波、舟山 S 波段新一代多普勒天气雷达基数据进行回波强度三维数字拼图^[54],研究“韦帕”登陆前后螺旋雨带的演变特征,图 4 给出了“韦帕”登陆前后 3 km 高度的回波强度时间演变。图 4a 是 18 日 10:42 的回波强度,此时“韦帕”为超强台风,台风中心位于 (123.3 E, 24.9 N),中心气压 925 hPa,中心最大风速 55 m/s。此时台风中心距离陆地较远,本文所使用的 6 部雷达还不能探测到台风全貌。在浙江省沿海地区有一条东北—西南走向的螺旋雨带,其上最强回波在 45 dBZ 以上,在海面上强回波基本呈东西走向,而在陆地上强回波呈东北—西南分布。此后,台风向西北方向移动,螺旋雨带也向西北方向移动,逐渐进入双多普勒雷达反演区。11:21 (图 4b),螺旋雨带上的强回波 (>40 dBZ)呈带状分布,强回波带东段仍呈东西走向,强回波带的西段呈东北—西南走向;双多普勒雷达风场反演区南部回波发展旺盛,强回波呈东西向分布。螺旋雨带继续向西北方向移动,反演区内部的强回波带也逐渐向西北移动,

但其形态基本保持不变;由于降水的持续,11:39 螺旋雨带上的强回波带的强度开始减弱 (图 4c);此后,雨带逐渐远离双雷达探测区。19 日 02:30,“韦帕”登陆,此时为强台风,中心气压 950 hPa,中心最大风速 45 m/s。图 4d 是 02:28 的回波强度。此时,强台风即将登陆,在台风中心东北侧有两条雨带 RA 和 RB,雨带 RA 主体位于陆地;RA 东北侧的雨带 RB 发展迅速,雨带 RB 上的最强回波位于雨带的东南段,强度在 50 dBZ 以上,强回波主要分布在海面上。随着强台风沿着西北路径移动,雨带 RA 和 RB 也向西北方向移动,雨带 RA 的西段开始减弱,雨带 RB 逐渐进入双多普勒雷达风场最佳反演区。05:35 虽然雨带 RB 开始减弱,但其西段恰好位于双雷达反演区,其上强回波带 (>40 dBZ)呈东南—西北向分布,最强回波在 50 dBZ (图 4e)。此后,随着台风向西北移动,雨带 RA 和 RB 在向西北移动过程中逐渐减弱并远离双雷达探测区。

4 螺旋雨带三维风场结构分析

对宁波和舟山时间同步的双多普勒雷达探测数据进行双雷达三维风场反演,研究“韦帕”登陆前后双雷达同步观测区内螺旋雨带的三维动力结构特征和维持机理。

图 5 是 9 月 18 日 11:21 的回波强度、反演的风场和散度场,图 5a 中线段 AB 是图 6 垂直剖面所在的位置,两端点的坐标依次是 (65.1, 23.8)、(51.5,

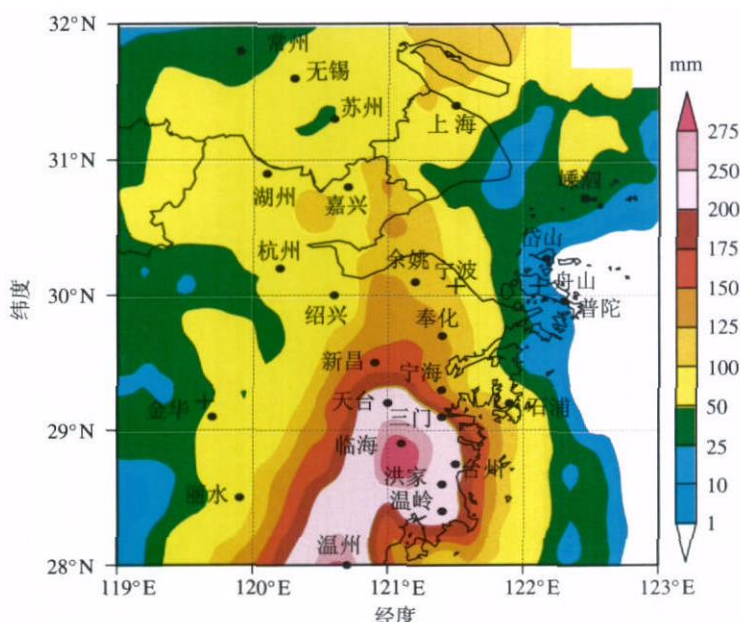


图 3 2007 年 9 月 18 日 08 时—19 日 08 时 24 h 雨量 (单位:mm; + 表示雷达站)

Fig 3 The observed rainfall from 08:00 BST 18 to 08:00 BST 19 September 2007 (units:mm; + represent the radar stations)

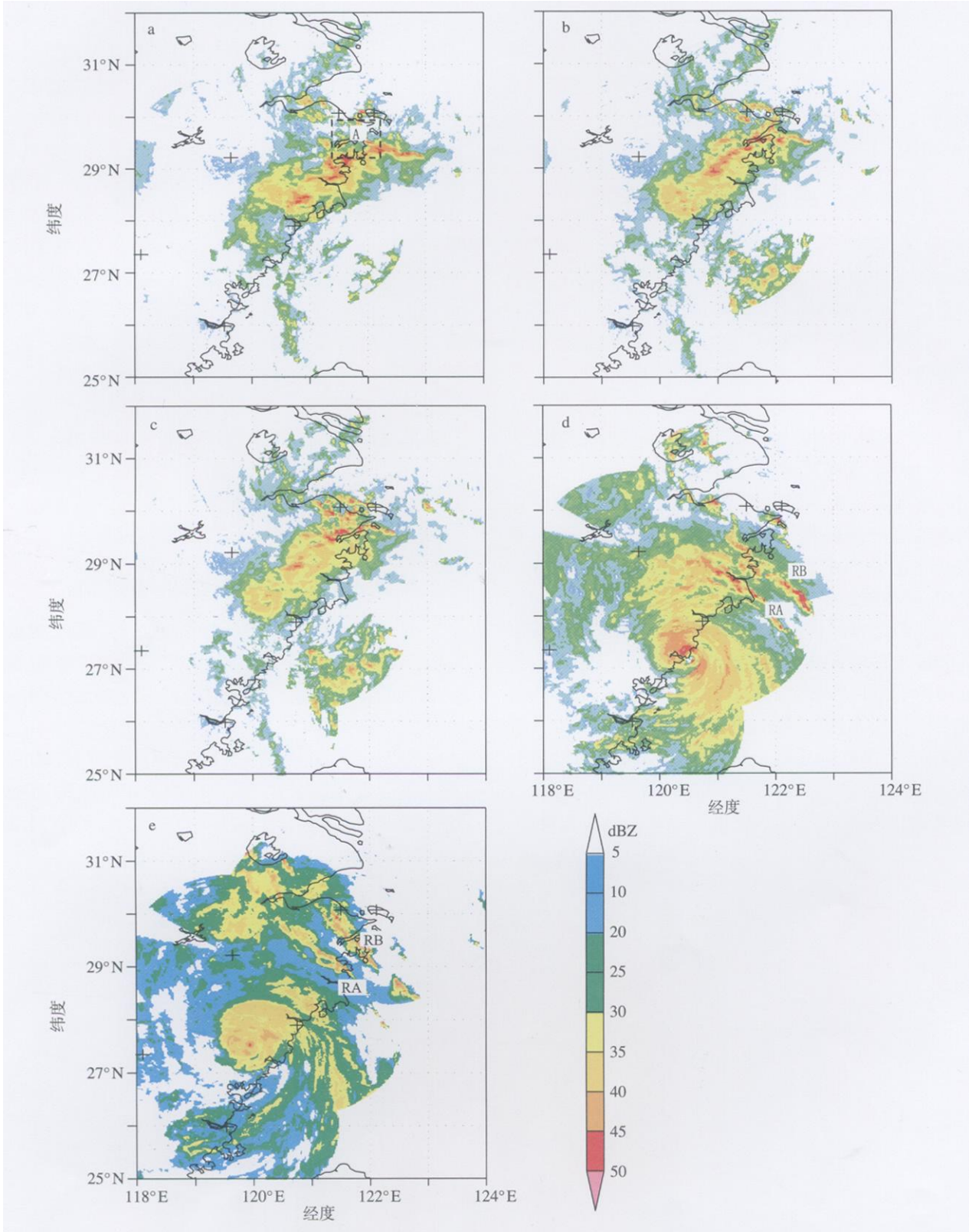


图 4 3 km 高度 6 部多普勒雷达回波强度拼图图像 (a-c 为 2007 年 9 月 18 日, d-e 为 2007 年 9 月 19 日; 彩色背景为回波强度, 以下各图同; 矩形 A 表示双多普勒雷达风场反演区; “ + ” 表示雷达站) a 10: 42; b 11: 21; c 11: 39; d 02: 28; e 05: 35

Fig 4 Six radars mosaic reflectivity at $z = 3$ km at (a) 10: 42 BST 18, (b) 11: 21 BST 18, (c) 11: 39 BST 18, (d) 02: 28 BST 19, (e) 05: 35 BST 19 September 2007 (Color shades denote the radar reflectivity, the same below; rectangle A indicates the 3-D retrieval domain; + represent the Doppler radar stations)

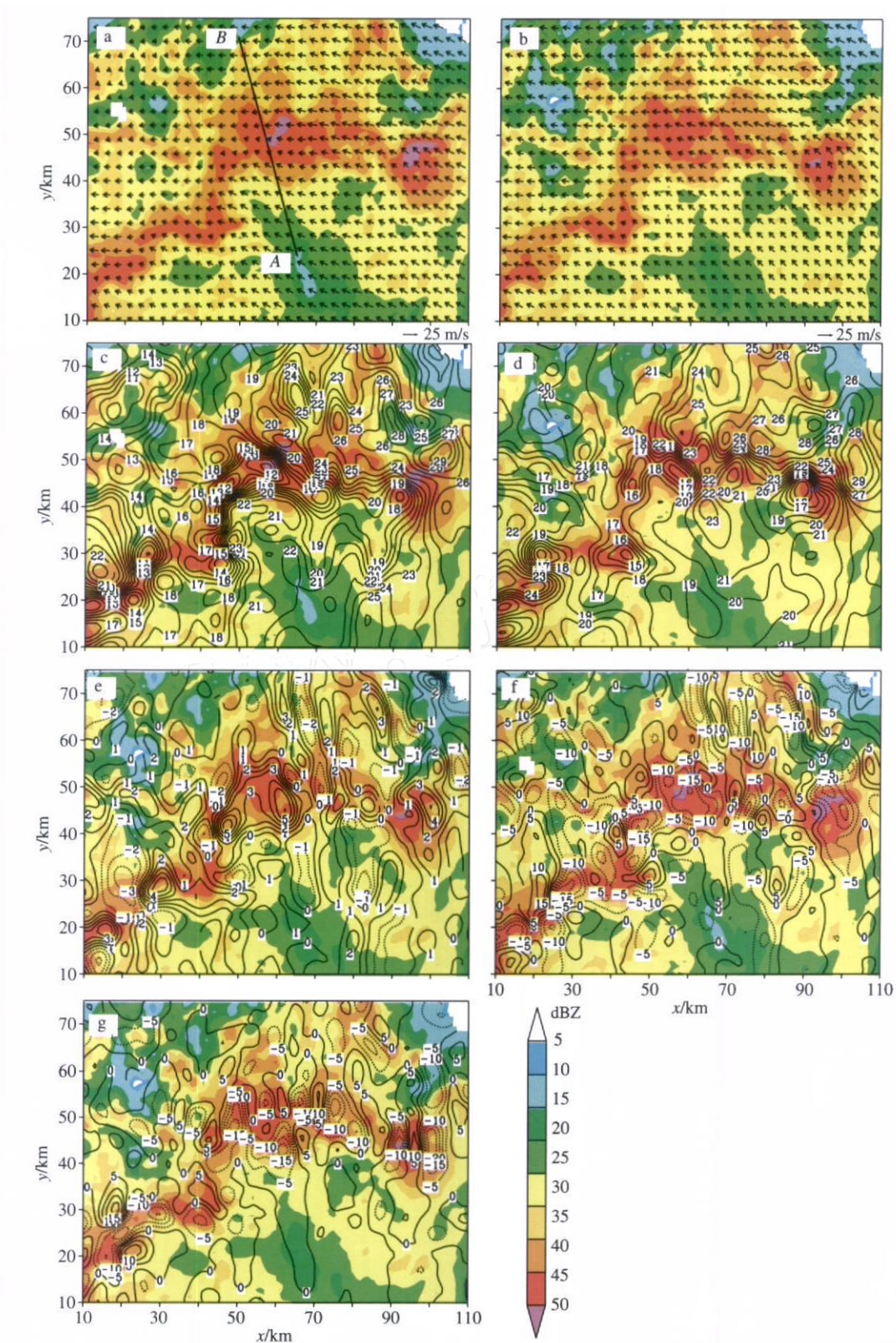


图 5 2007年 9月 18日 11:21回波强度、反演风场 (单位: m/s)和散度场 (单位: 10^{-4}s^{-1}) a $z=1.5 \text{ km}$ 的水平速度; b $z=3 \text{ km}$ 的水平速度; c $z=1.5 \text{ km}$ 的水平速度等值线; d $z=3 \text{ km}$ 的水平速度等值线; e $z=3 \text{ km}$ 的垂直速度等值线 (实线代表上升运动,虚线代表下沉运动); f $z=1.5 \text{ km}$ 的散度场; g $z=3 \text{ km}$ 散度场 (f和 g中虚线代表辐合,实线代表辐散)

Fig 5 Horizontal wind fields at (a) $z=1.5 \text{ km}$, and (b) $z=3 \text{ km}$; horizontal velocity (m/s) contour at (c) $z=1.5 \text{ km}$, and (d) $z=3 \text{ km}$; (e) vertical velocity (m/s) contour at $z=3 \text{ km}$; divergence (10^{-4}s^{-1}) fields at (f) $z=1.5 \text{ km}$, and (g) $z=3 \text{ km}$ at 11:21 BST 18 September 2007

71.9)。此时“韦帕”为超强台风,中心最低气压 925 hPa,中心最大风速 55 m/s。1.5 km 高度(图 5a),螺旋雨带恰好位于反演区中部,台风的环流结构清晰,水平风场呈逆时针旋转。螺旋雨带上游(东部)位于海面上,回波发展旺盛,强回波带(>40 dBZ)呈东南—西北向分布,与风场走向基本一致;雨带东段和中段各有一个强回波中心,回波强度在 50 dBZ 以上。雨带中段呈东西向分布,宽度逐渐加大。螺旋雨带东段处于海面上,水平风速较大,由于陆面摩擦作用,雨带中段和西段风速逐渐减小;强回波带上强弱风速中心呈相间分布特征,速度值在强回波带上变化最大(图 5c)。3 km 高度(图 5b),回波强度略有减弱,但强回波带形态与低层的基本类似;水平风速增大,强弱风速中心仍呈现相间分布特征;雨带东段水平风速比雨带中段和西段的水平风速大(图 5d)。

螺旋雨带中低层的对流运动活跃,3 km 高度(图 5e),强回波带(>40 dBZ)基本对应上升气流区,最大上升气流在 5 m/s 左右,强上升气流区附近的回波较强;强上升气流区之间也交替分布着一些较弱的下沉气流区;在强回波带的南北两侧有多支下沉气流和弱的上升气流。雨带内部的上升气流和雨带内外两侧的下沉气流形成了多个上升下沉气流对,上升气流有利于加强螺旋雨带内部的对流活动,同时也是雨带中低层强回波形成的动力原因;气流在螺旋雨带内部低层辐合抬升,在高层辐散并在螺旋雨带内外两侧形成下沉气流,形成了有利于强回波发展的低层辐合、高层辐散的动力配置结构;上升下沉气流对也形成了明显的垂直环流结构,这种动力配置结构对于螺旋雨带的维持和进一步发展非常重要。

1.5 km 高度(图 5f),螺旋雨带上有多个辐合中心,最强辐合在 $-20 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 左右,辐合主要分布在强回波带(>40 dBZ)上,强辐合中心基本与强回波中心相对应。强回波带的南北两侧也交替地分布着一些辐合、辐散区,但辐合强度比强回波带上的弱一些;此时,这些辐合区对应的回波并不强,这表明上述区域的对流单体可能处在发展阶段,后面相继时刻回波演变证实了上述判断。3 km 高度(图 5g),散度场分布特征与 1.5 km 高度的分布特征基本一致。螺旋雨带内部的辐合和雨带内外两侧的辐散区形成了明显的辐合辐散对,即雨带内部低层水汽辐合,水汽向上输送;在高层辐散流出,部分气流下沉,形成向外的辐散气流;这些辐合辐散对于水汽的汇合、雨带的维持具有重要意义。

下面研究螺旋雨带气流的垂直结构,图 6 是沿图 5a 斜线 AB 的垂直剖面,线段 AB 的延长线过台风中心,即垂直剖面通过台风中心;使用相对于雨带的速度研究其动力结构,该速度场描述雨带垂直剖面内的气流结构更清晰,这种方法在研究台风螺旋雨带垂直剖面结构时经常使用^[46-51]。

图 6a 是垂直剖面内的径向风场,此处的径向风场是相对于雨带的速度在垂直剖面内沿着台风中心径向上的投影分量,正速度表示内流(流入气流,即风向沿着螺旋雨带外侧指向台风中心),负速度表示外流(流出气流,即风向由台风中心指向螺旋雨带外侧)。在主雨带内部,回波随高度略向雨带外侧倾斜,对流发展非常活跃,40 dBZ 的回波高约 6.4 km,强回波核(>45 dBZ)高度达 4.8 km。2 km 高度以下,雨带外侧为内流($r > 520$ km),气流由螺旋雨带外侧指向台风中心;内流在雨带外侧沿着台风中心方向逐渐增强,在 $r = 530$ km 处达到 5 m/s,而在雨带内部接近强回波处沿着台风中心方向则开始减弱,在强回波核中心区($r = 520$ km)流入气流已经不存在。雨带内侧低层为外流,最大外流为 11 m/s,高度在 3 km 左右;雨带 2 km 以上高度均受外流控制。以往的研究表明^[46-50],台风螺旋雨带有明显的次级环流特征,即雨带低层为入流、高层是出流,次级环流对于螺旋雨带的维持和发展、对流运动的维持和发展具有重要作用。雨带外侧的内流和雨带内侧的外流在雨带中心区的低层辐合抬升,是雨带内部强回波区形成的原因之一;也正是由于这样的配置结构,使得雨带内部对流发展非常活跃,从而造成局地强降水。这与 Ishihara 等^[49]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 6b 是垂直剖面内的垂直速度分布。在主雨带内部低层有一支较强的上升气流,在中高层则存在两个强上升运动中心,这两个上升气流中心分别向雨带两侧倾斜。上升气流区为强回波区,这表明低层的辐合和上升运动造成水汽的局地汇合和抬升。在上升气流区的外侧低层(雨带内部强回波区偏外一侧)有一支下沉气流,其速度值在 1 m/s 左右,这支下沉气流是由于雨带内部上升运动所形成的补偿性下沉、雨滴蒸发冷却及螺旋雨带的次级环流共同作用形成的。

图 6c 是垂直剖面内由水平速度计算的散度 $(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y})$,图 6d 是垂直剖面内径向速度(V_r)计算

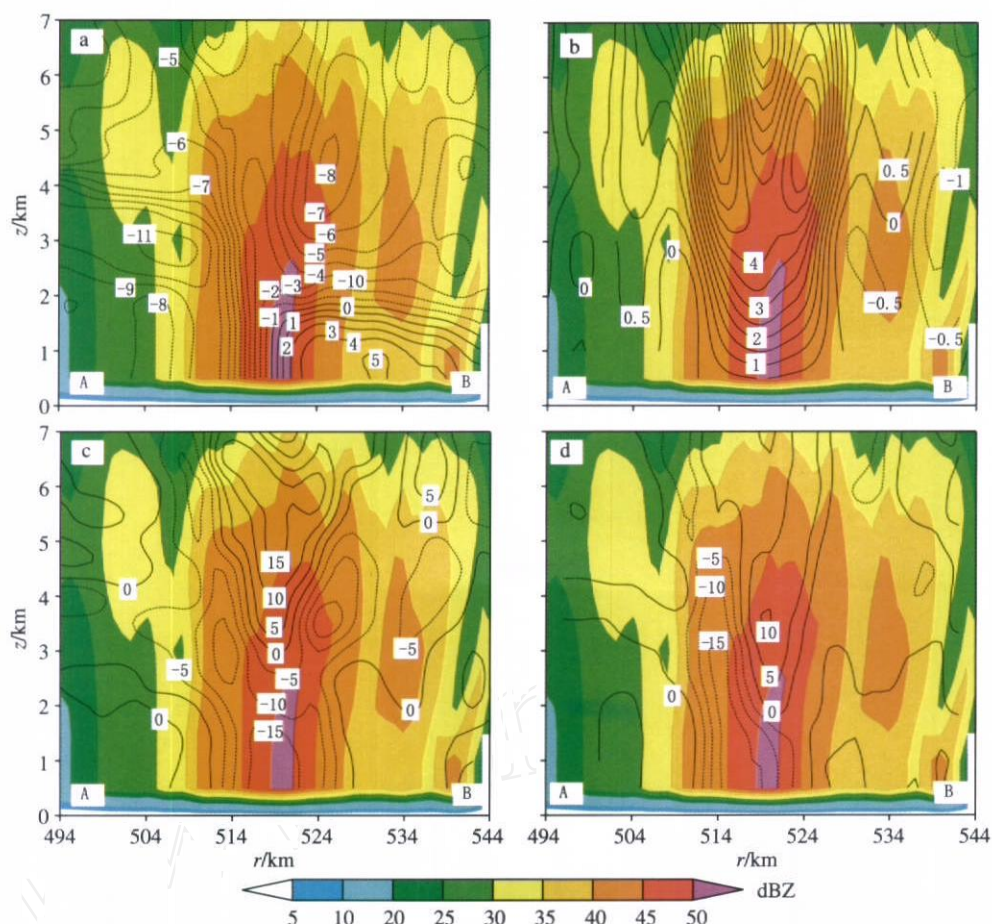


图 6 2007 年 9 月 18 日 11:21 垂直剖面内的回波强度、反演风场 (单位: m/s) 和散度场 (单位: 10^{-4}s^{-1}) (剖面位置沿图 5a 线段 AB) a 径向速度 (实线表示朝向台风中心, 虚线表示远离台风中心); b 垂直速度 (实线表示上升速度, 虚线表示下沉速度); c 水平速度计算的散度; d 径向速度计算的散度分量 (c 和 d 的虚线代表辐合, 实线代表辐散)

Fig 6 Composite vertical cross-section (AB in Fig 5a) of (a) radial component of rainband-relative horizontal wind (m/s), (b) vertical velocity (m/s) contour, (c) divergence (10^{-4}s^{-1}) calculated with u and v , and (d) divergence (10^{-4}s^{-1}) deduced from V_r at 11:21 BST 18 September 2007

的散度分量 ($-\frac{\partial v_r}{\partial r}$)。图 6c、d 的散度分布特征均显示, 雨带内部中低层的强回波区是强辐合区, 最大辐合超过 $-15 \times 10^{-4} \text{s}^{-1}$ 。雨带的外侧为辐散区, 该区域对应着下沉气流区。雨带低层的辐合区和高层的辐散区形成了辐合辐散对, 这对于螺旋雨带上对流发展具有重要作用。

由图 6c 可知, 在主雨带中低层是强辐合区, 且辐合区在较高层分别向雨带两侧倾斜, 而在高层为辐散区; 这种辐合辐散对的空间配置结构, 有利于强对流的形成和发展, 使得高层的上升气流向雨带的两侧倾斜, 从而形成两个强上升运动中心。综合图 6a 和 6b 可知, 气流从雨带外侧低层进入雨带并逐渐减速, 并与雨带内侧的外流辐合抬升, 形成主雨带中低层的强回波区, 强降水主要发生在螺旋雨带的

强回波区 (即 r 在 504 ~ 544 km 之间的地面层); 在高层部分气流转为外流, 并随高度增加向雨带外侧倾斜, 逐渐在雨带外侧形成下沉气流。

图 7 是 19 日 05:35 的回波强度、反演风场和散度场, 此时台风中心位于 (120.0°E , 27.4°N), 即反演区的西南, 反演区位于台风的第一象限, 台风中心最低气压 965 hPa, 中心最大风速 37m/s 。2.5 km 高度 (图 7a), 螺旋雨带呈东南—西北走向分布, 与气流方向基本一致, 雨带内部强回波 ($> 40 \text{dBZ}$) 也呈东南—西北向分布, 最强回波超过 50dBZ 。风场逆时针旋转, 基本为东南风。水平风速较图 5 明显增强, 强回波带上的平均速度值超过 30m/s , 最强风速值 39m/s , 中心位于 (42, 63) 处。水平风速值沿着螺旋雨带走向呈现强弱区相间分布特征, 强回波带外侧的速度值比其内侧速度值略大一些。

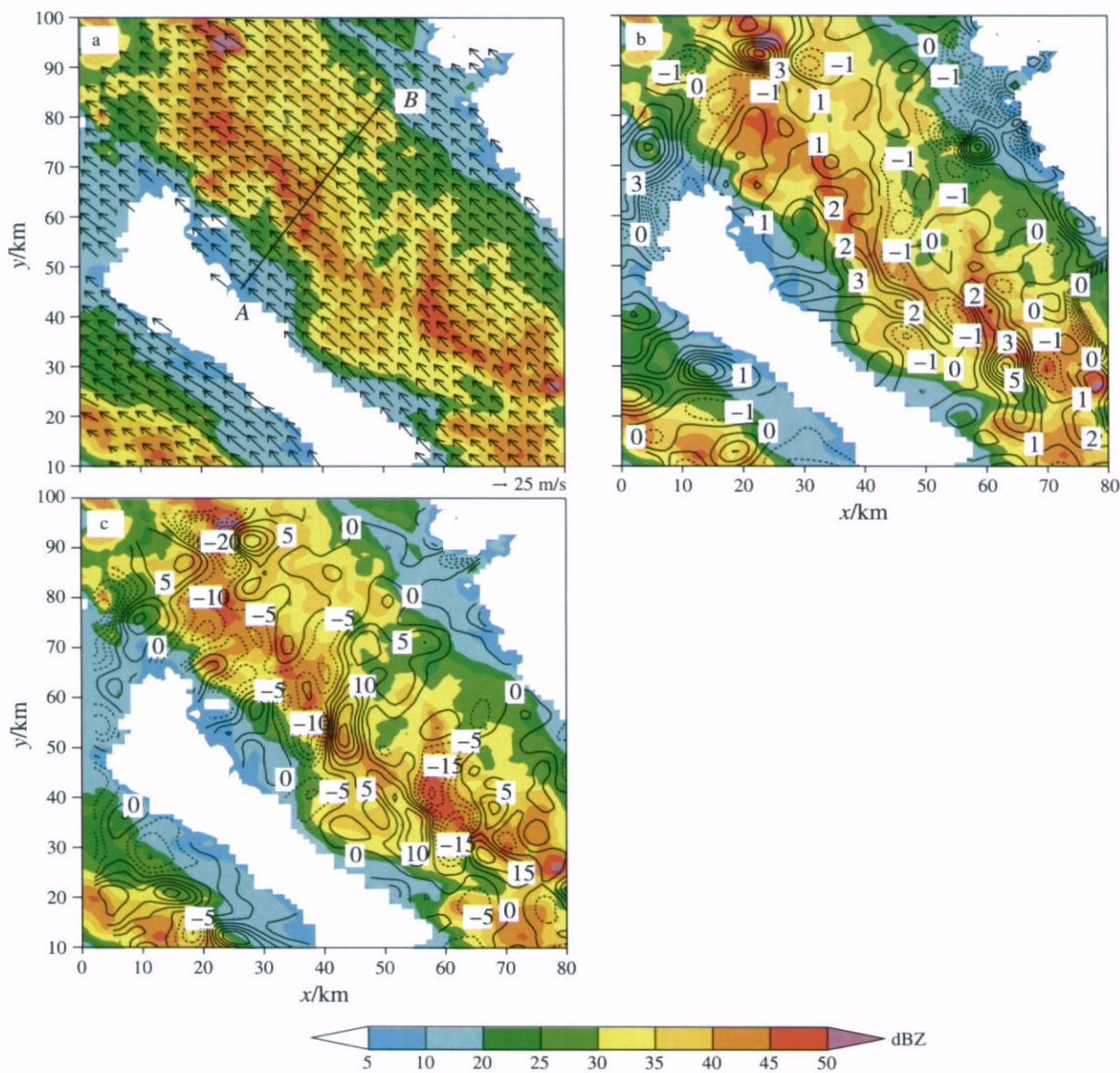


图 7 2007 年 9 月 19 日 05: 35 的 $z = 2.5$ km 回波强度、反演风场 (单位: m/s) 和散度场 (单位: 10^{-4} s^{-1}) a. 水平速度; b. 垂直速度等值线 (实线代表上升运动, 虚线代表下沉运动); c. 散度场 (虚线代表辐合, 实线代表辐散)

Fig 7 (a) Horizontal wind fields, (b) vertical velocity (m/s) contour, and (c) divergence (10^{-4} s^{-1}) fields at $z = 2.5$ km at 05: 35 BST 19 September 2007

螺旋雨带内部的对流比较活跃,垂直运动强烈。 2.5 km 高度 (图 7b), 强回波带内部有多个上升运动区, 垂直速度最大值为 5 m/s 左右; 在雨带内部也有多支较弱的下沉气流区, 上升气流和下沉气流区呈相间分布。螺旋雨带外侧下沉气流较强, 但也有些上升气流区。螺旋雨带内部的上升气流和雨带外侧的下沉气流形成了多个上升下沉气流对, 有利于螺旋雨带中较强对流的维持。

图 7c 是 2.5 km 高度的散度场, 螺旋雨带上有

多个辐合中心, 最强辐合超过 $-15 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$, 这些辐合区对应的回波均较强, 且强辐合区基本与上升运动区相对应, 这也验证了这些区域对流活跃; 在辐合区之间也交替地分布着较强的辐散区。螺旋雨带的强回波带外侧基本为辐散气流区, 而其内侧则呈现辐散区和辐合区相间分布的特征。雨带内部的辐合区和雨带外侧辐散区构成了多个辐合辐散对, 这些辐合辐散对对于低层水汽的汇合抬升、高层的气流辐散流出以及螺旋雨带的进一步发展非常重要。

图 8是沿图 7a斜线 AB 的垂直剖面内的回波强度、反演的风场和散度场,类似于图 6,线段 AB 的延长线过台风中心,即垂直剖面通过台风中心;也使

用相对于雨带的速度进行分析。图 8a是径向风垂直剖面图,负速度表示内流(流入气流,即风向沿着螺旋雨带外侧指向台风中心),正速度表示外流(流

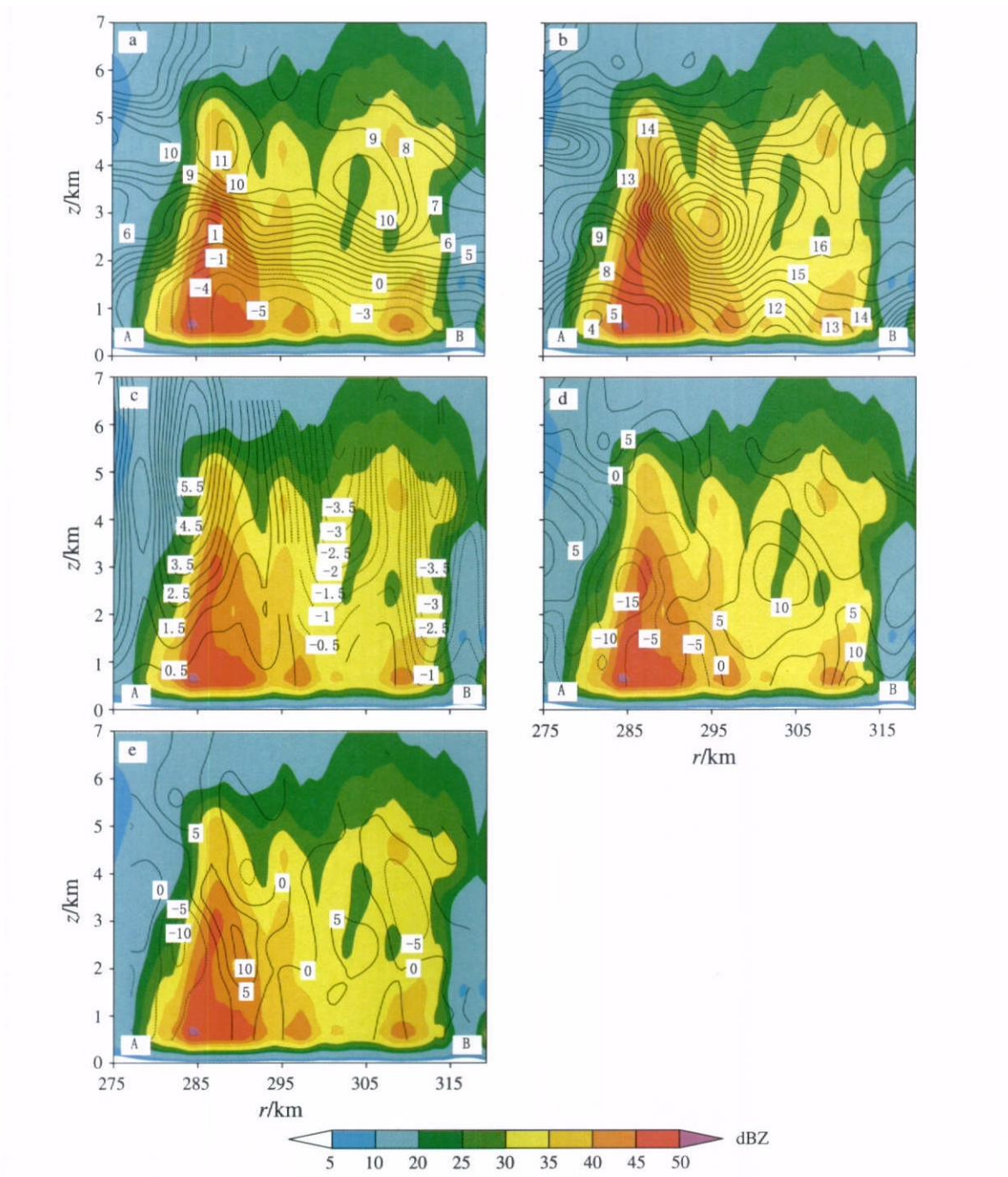


图 8 2007年 9月 19日 05: 35垂直剖面内的回波强度、反演风场 (单位: m/s)和散度场 (单位: $10^{-4} s^{-1}$) (剖面位置沿图 7a线段 AB) a 径向速度 (虚线表示朝向台风中心,实线表示远离台风中心); b 切向速度; c 垂直速度 (实线表示上升速度,虚线表示下沉速度); d 水平速度计算的散度; e 径向速度计算的散度分量 (d 和 e 的虚线代表辐合,实线代表辐散)

Fig 8 Composite vertical cross-section (AB in Fig 7a) of (a) radial component (m/s) of rainband-relative horizontal wind (m/s), (b) tangential component (m/s) of rainband-relative horizontal wind, (c) vertical velocity contour (m/s), (d) divergence ($10^{-4} s^{-1}$) calculated with u and v , and (e) divergence ($10^{-4} s^{-1}$) deduced from V_r at 05: 35 BST 19 September 2007

出气流,即风向由台风中心指向螺旋雨带外侧)。在螺旋雨带中心区,40 dB Z 的回波高度约 3.8 km,强回波核(>45 dB Z)高度为 3.2 km,且随高度略向雨带外侧倾斜;螺旋雨带在高层也向台风外侧倾斜。2 km 高度以下的低层,气流由螺旋雨带外侧吹向台风中心。螺旋雨带的次级环流特征明显,即螺旋雨带低层是内流,而雨带中层和高层为外流。沿着台风中心方向,内流在螺旋雨带外侧逐渐增强,在强回波核的外侧速度达到 5 m/s 的极值;而在强回波核的内侧,内流沿着台风中心方向则逐渐减弱;在 $r = 278$ km 附近流入气流已不存在。在雨带内侧($r < 285$ km),外流随高度增加而逐渐增强。螺旋雨带内部中低层的强回波区正是由于雨带内流和外流在该处辐合抬升而形成的。

图 8b 是垂直剖面内的切向风场,正速度表示风向为逆时针方向(气旋式分量)。最大切向速度区位于主雨带强回波区偏外一侧,高度 3 km 左右。强回波区外侧风切变比其内侧风切变的强度要大。

图 8c 是垂直剖面内的垂直速度场,螺旋雨带内部的上升、下沉气流均很强。在螺旋雨带内侧有一支较强的上升气流,上升气流区与强回波区相对应;最强上升气流约为 5.5 m/s,位于强回波区 5 km 高度附近;上升气流区在高层略向雨带外侧倾斜。在上升气流区的外侧是较强的下沉气流区,此下沉气流区位于雨带内部强回波区偏外一侧。综合图 8a 可知,螺旋雨带的次级环流特征明显,即气流从雨带外侧低层加速进入螺旋雨带强回波区后逐渐减速;在强回波区内部与螺旋雨带内侧的外流辐合抬升,而后在中层转为一致的外流,随高度增加向雨带外侧倾斜并在雨带外侧形成下沉。由此可见,次级环流是螺旋雨带中上升和下沉气流形成的主要原因之一。

图 8d 和图 8e 分别是垂直剖面内水平速度计算的散度($\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y}$)和径向速度(v_r)计算的散度分量($-\frac{\partial v_r}{\partial r}$)。二者散度的分布特征类似,螺旋雨带内部强回波区的中低层是强辐合区,最大辐合约 $-15 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$,强辐合中心高度在 2.5 km 左右;辐合区略向螺旋雨带外侧倾斜;强回波区的外侧和高层为辐散区。综合图 8a 和图 8c 可见,强辐合区是由于内流和外流汇合抬升而形成的,而在强回波区外侧由于气流向外辐散下沉而形成辐散区。

在螺旋雨带内部垂直方向存在辐合辐散对,螺

旋雨带内的强上升气流与边界层的气流辐合、高层辐散紧密相联,图 8c 中的强上升和下沉气流就是由次级环流、辐合辐散对共同作用形成的。

Bames 等^[46-47]和 Ishihara 等^[49]在研究台风螺旋雨带的三维结构时均发现,螺旋雨带附近的上升运动区,在中低层有时并不处在强回波核内部,而是分布在回波强度梯度最大区域附近,中低层的强辐合也有着类似的分布特征;图 8 中上升运动区、辐合中心与强回波的分布与上述文献揭示的基本一致。Bames 等^[46-47]和 Ishihara 等^[49]进一步指出,这种分布特征与雨带的内流和外流的分布、径向速度的垂直切变有关。综合图 8a 可知,上述特征同气流从雨带外侧低层进入雨带,至雨带强回波内侧边缘附近(回波强度梯度最大处)才与雨带内侧低层的外流辐合上升有关;因此回波强度梯度最大区域附近的低层形成强辐合中心区,而高层为较强的辐散区;这种辐合辐散对的垂直配置结构也有利于强对流的形成,从而使得该区域的上升运动最强。

本节对“韦帕”台风的两条螺旋雨带的三维动力结构进行了反演研究,二者有很多相似之处,也有一些差异。两条螺旋雨带的低层均有多个强回波区,这些区域的上升气流较强,辐合也较强;在沿着台风中心的垂直剖面内,两条螺旋雨带内流和外流的分布特征比较相似。差异主要表现在:前一个时段的螺旋雨带发展更旺盛,中低层的辐合更强;而且由于低层的上升运动比较强烈,中低层回波也更强。

5 结论

综合使用布网雷达三维数字拼图数据、双多普勒雷达三维风场反演数据,对“韦帕”台风登陆前后两条螺旋雨带的三维精细动力结构进行了研究,主要结论如下。

(1) 两条螺旋雨带的三维结构有很多相似之处。两条螺旋雨带内部低层均有多个强回波区,水平速度大值区主要分布在强回波带上;强回波带的低层有较强的上升气流,最强上升气流超过 4 m/s,该区域同时也是强辐合区。在螺旋雨带中存在多个辐合辐散对、上升下沉气流对,这些动力配置结构对于螺旋雨带中对流的维持和进一步发展具有重要作用。在沿着台风中心的垂直剖面内,螺旋雨带内部的强回波区向雨带外侧倾斜。雨带外侧 2 km 高度以下的低层有较强的内流,最大值 5 m/s;雨带内侧有较强的外流,2 km 高度以上均受外流控制;内流和外流在雨带中部低层汇合抬升,形成强回波区。

(2)两个时段的螺旋雨带也存在差异。前一个时段的螺旋雨带对流发展更旺盛, 45 dB Z 的回波高度为 4.8 km, 而后一个时段的螺旋雨带 45 dB Z 的回波高度仅 3.2 km。垂直剖面内, 前一个时刻螺旋雨带低层辐合更强, 最强辐合值超过 $-15 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$, 正是由于低层的强辐合和比较强烈的上升运动, 才使得雨带内部中低层的回波发展旺盛。

(3)本文主要使用雷达反演技术研究了台风螺旋雨带的三维动力结构和维持机理; 由于双多普勒雷达反演区域较小, 本文得到的风场结构还不能反映台风的全貌, 这也是本文的一个局限; 今后需要综合数值模拟技术等对两条螺旋雨带结构的异同及其形成原因进行更深入的研究。

致谢: 两位审稿专家对本文提出了宝贵修改建议, 在此深表谢意!

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 陈玉林, 周军, 马奋华. 登陆我国台风研究概述 [J]. 气象科学, 2005, 25 (3): 319-329.
- [3] 龚龔, 陆维松, 陈东升. 浙江省登陆热带气旋气候特征初探 [J]. 南京气象学院学报, 2003, 26 (6): 773-779.
- [4] 王蔚, 朱伟军, 端义宏, 等. 大尺度背景下西北太平洋热带气旋的统计分析 [J]. 南京气象学院学报, 2008, 31 (2): 277-286.
- [5] 陆汉城, 钟玮, 张大林. 热带风暴中波动特征的研究进展和问题 [J]. 大气科学, 2007, 31 (6): 1140-1150.
- [6] 管兆勇. 台风移动的控制因子分析 [J]. 气象科学, 1991, 11 (3): 252-261.
- [7] 马镜娴, 马奋华, 王咏青. 偶极子流在台风异常路径形成中的作用 [J]. 南京气象学院学报, 2001, 24 (3): 338-342.
- [8] 李峰, 王振会, 官莉, 等. 两种导风方法在台风路径分析中的应用比较研究 [J]. 气象科学, 2009, 29 (3): 330-334.
- [9] 余贞寿, 倪东鸿, 闵锦忠. 超强台风“圣帕”(0709)特大暴雨过程的完全螺旋度分析 [J]. 南京气象学院学报, 2009, 32 (1): 45-53.
- [10] 周嘉陵, 罗哲贤. 台风最大风速增强的数值研究 [J]. 南京气象学院学报, 2002, 25 (2): 199-206.
- [11] 黄新晴, 罗哲贤, 滕代高. 台风形成过程中三维结构变化的初步分析 [J]. 南京气象学院学报, 2007, 30 (5): 648-657.
- [12] Yu Zhenshou, Ni Donghong, Gao Shouting, et al. A numerical study of the severe heavy rainfall associated with typhoon Haitang (2005) [J]. Acta Meteor Sinica, 2008, 22 (2): 224-238.
- [13] 马玉芬, 沈桐立, 丁治英, 等. 台风“桑美”的数值模拟和地形敏感性试验 [J]. 南京气象学院学报, 2009, 32 (2): 277-286.
- [14] 河惠卿, 王振会, 金正润. 不对称环流对台风强度变化的影响 [J]. 热带气象学报, 2008, 24 (3): 249-253.
- [15] 钟敏, 吕达仁, 杜秉玉. 9914号台风降水云系雨强的三维结构初探 [J]. 南京气象学院学报, 2006, 29 (1): 41-47.
- [16] 张培昌, 杜秉玉, 戴铁丕. 雷达气象学 [M]. 2版. 北京: 气象出版社, 2001: 417-466.
- [17] 雷恒池, 洪延超, 赵震, 等. 近年来云降水物理和人工影响天气研究进展 [J]. 大气科学, 2008, 32 (4): 967-974.
- [18] 耿建军, 顾松山, 陈钟荣, 等. 新一代天气雷达谱宽资料分析晴空回波特征的探讨 [J]. 南京气象学院学报, 2007, 30 (6): 814-818.
- [19] 杜秉玉, 高志球. 雷达反射率因子垂直廓线研究和多种遥感资料综合估计降水 [J]. 南京气象学院学报, 1998, 21 (4): 729-736.
- [20] 官莉, 王振会, 裴晓芳. 雷达估测降水集成方法及其效果比较 [J]. 气象科学, 2004, 24 (1): 104-111.
- [21] 杜秉玉, 陈钟荣, 张卫青. 梅雨锋暴雨的 Doppler 雷达观测研究: 边界层中尺度涡旋系统 [J]. 南京气象学院学报, 1998, 21 (2): 201-207.
- [22] 杜秉玉, 陈钟荣, 张卫青. 梅雨锋暴雨的 Doppler 雷达观测研究: 中尺度对流回波系统的结构和特征 [J]. 南京气象学院学报, 1999, 22 (1): 47-55.
- [23] 朱君鉴, 郑国光, 王令, 等. 冰雹风暴中的流场结构及大冰雹生成区 [J]. 南京气象学院学报, 2004, 27 (6): 735-742.
- [24] 万齐林, 薛纪善, 庄世宇. 多普勒雷达风场信息变分同化的试验研究 [J]. 气象学报, 2005, 63 (2): 129-142.
- [25] 杨艳蓉, 王振会, 张沛源. 利用多普勒天气雷达资料对一次暴雨过程的同化模拟 [J]. 南京气象学院学报, 2008, 31 (5): 633-639.
- [26] 杜秉玉, 官莉, 姚祖庆, 等. 上海地区强对流天气短时预报系统 [J]. 南京气象学院学报, 2000, 23 (2): 242-250.
- [27] 李伟, 汤达章, 苏卫东. 单多卜勒雷达对台风的自动定位方法 [J]. 南京气象学院学报, 1999, 22 (2): 232-237.
- [28] 魏应植, 汤达章, 许健民, 等. 多普勒雷达探测“艾利”台风风场不对称结构 [J]. 应用气象学报, 2007, 18 (3): 285-294.
- [29] 闵爱莲, 牛生杰, 雷恒池, 等. 一次台风外围雨带多普勒天气雷达回波及风场结构分析 [J]. 气象科学, 2008, 28 (6): 619-624.
- [30] 彭霞云, 闵锦忠, 周振波, 等. 单多普勒雷达反演风场的质量控制 [J]. 南京气象学院学报, 2007, 30 (1): 79-85.
- [31] 陈列, 寿绍文, 林开平, 等. 应用单多普勒雷达资料反演风场作暴雨中尺度分析 [J]. 南京气象学院学报, 2003, 26 (3): 358-363.
- [32] 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.
- [33] Tao Zuyu. Error comparison of wind field retrieval from single and Dual Doppler radar observations [J]. Acta Meteor Sinica, 1994, 8 (3): 337-345.
- [34] 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.
- [35] 刘舜, 邱崇践. 双 Doppler 雷达非同时性资料反演三维风场的改进方案 [J]. 高原气象, 2003, 22 (4): 329-336.
- [36] 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.
- [37] 黄思训,曹小群,闵锦忠. 变分方法反演双多普勒雷达低层二维风场[J]. 南京气象学院学报, 2008, 31(4): 453-459.
- [38] Shao A m ei, Q iu Chongjian, L iu L i p ing. Kinematic structure of a heavy rain event from dual-Doppler radar observations[J]. *Adv Atmos Sci*, 2004, 21(4): 609-616.
- [39] 古金霞,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.
- [40] 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.
- [41] 周海光,王玉彬. 2003年6月30日梅雨锋大暴雨中 β 和 γ 结构的双多普勒雷达反演[J]. 气象学报, 2005, 63(3): 301-312.
- [42] 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.
- [43] 周海光. 强热带风暴Bilis引发的特大暴雨中尺度结构多普勒雷达资料分析[J]. 大气科学, 2008, 32(6): 1289-1308.
- [44] 周海光. 6-12华南局地暴雨中 β 和 γ 结构的双多普勒雷达反演试验[J]. 热带气象学报, 2007, 23(2): 117-125.
- [45] 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.
- [46] Bames G M, Z ipser E J, Jorgensen D, et al. Mesoscale and convective structure of a hurricane rainband[J]. *J Atmos Sci*, 1983, 40(9): 2125-2137.
- [47] Bames G M, Gamache J F, Lemone M A, et al. A convective cell in a hurricane rainband[J]. *Mon Wea Rev*, 1991, 119(3): 776-794.
- [48] Marks F D J, Houze R A J, Gamache J F. Dual-aircraft investigation of inner core of hurricane Norbert. Part I: Kinematic structure[J]. *J Atmos Sci*, 1992, 49(11): 919-942.
- [49] Ishihara M, Yanagisawa Z, Sakakebara H, et al. Structure of typhoon rainband observed by two Doppler radars[J]. *J Meteor Soc Japan*, 1986, 64(6): 923-939.
- [50] 蔡雅婷,陈台琦. 纳莉台风登陆时的结构演变之都卜勒雷达资料分析[J]. 台湾大气科学, 2007, 35(3): 167-187.
- [51] 赵坤,周仲岛,胡东明,等. 派比安台风(0606)登陆期间雨带中尺度结构的双多普勒雷达分析[J]. 南京大学学报:自然科学, 2007, 43(6): 606-620.
- [52] 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.
- [53] 姜允迪. 强台风韦帕登陆浙江,滇桂局地遭暴雨洪涝[J]. 气象, 2007, 33(12): 126-127.
- [54] 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.

(责任编辑:张福颖)