

应用多普勒雷达制作近海台风 临近预报技术研究

赵 放^{1,5} 冀春晓² 任鸿翔³ 杨 军¹ 朱 景⁴

(1. 浙江省气象台, 杭州 310017, 2. 浙江省气象科学研究所; 3. 浙江省气象局;
4. 浙江省温州市气象局; 5. 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室)

提 要: 台风、局地暴雨等灾害性天气是浙江省夏季汛期的主要气象灾害。利用新一代天气雷达探测的重要特征, 将浙江省近年来收集的台风雷达资料进行试验研究, 应用雷达基数据数字组网 3-D 数据, 通过回波自动识别与跟踪、动态定量估测降水、台风旋转环流结构快速诊断分析等技术, 进行省级台站基于雷达的台风临近预警预报技术的应用研究。根据台风主体回波螺旋带形状的结构, 及其回波系统(团)移动过程中又具有明显的旋转性运动的特点, 对交叉相关法进行了适当改进。首先, 在矩心跟踪法进行强对流回波团识别跟踪的基础上, 利用多普勒速度场及其与台风旋转环流的逻辑一致性建立第一猜测场, 对外推出的回波在移动方向上加以控制和修正; 其次, 结合雷达覆盖范围内自动雨量站实时数据, 应用最佳概率窗求得最配合的 $Z-I$ 关系进行动态降水量估测, 再将估测的降水强度与格点化的自动站雨量强度进行变分订正(尽量减少降水强度不均匀引起的误差); 最后, 在回波追踪与外推基础上结合估测降水强度作出 0~1 小时的降水临近预报和监测预警。对近海台风, 采用基于地基速度示踪法(GBVTD)对台风中心、旋转环流结构作快速诊断。研究表明, 针对性地开展和建立基于雷达的台风临近预报应用技术的探索, 可以对正面登陆或临近的台风预报服务及相关研究提供更多的依据和帮助。通过对台风的连续定位、位置移动、结构演变、暴雨落区、流场变化等特征的分析, 对台风的临近预报和气象服务具有重要的作用。

关键词: 新一代天气雷达 台风 临近预报 GBVTD 方法

中国气象局项目(CMATG2005M32、CMATG2006Y09、CMATG2006Z11)等联合资助。

中国气象局预报员专项“台风暴雨强回波识别跟踪预警技术研究 CMATG2006Y09”、浙江省科技重点“小流域致灾强风暴监测预警技术研究”及“浙江省强台风精细预报关键技术研究及应用 2007C13G1610002”项目联合资助。

收稿日期: 2007 年 2 月 11 日; 修定稿日期: 2008 年 2 月 22 日

Research on Tropical Cyclone Fine Nowcasting System Based on Doppler Radar

Zhao Fang^{1,5} Ji Chunxiao² Ren Hongxiang³ Yang Jun¹ Zhu Jing⁴

(1. The Meteorological Observatory of Zhejiang Province, Hangzhou 310017;

2. Zhejiang Meteorological Research Institute; 3. Zhejiang Meteorological Bureau;

4. Wenzhou Meteorological Office; 5. State Key Laboratory of Severe Weather CAMS)

Abstract: Typhoon and local rainstorm are the primary meteorological disaster in summer flood season in Zhejiang. The principal method is based on the primary radar information in the three-dimensional variation assimilation for typhoon nowcasting technique and research. Automatic echo identification, echo-tracking and precipitation estimation are developed by researching the radar information of last years and modulating the parameter for local. The cross-correlation technique and centroid method are used for strong convection echo identification and tracking. The moving direction tendency of the mesoscale convective cloud clusters and the real-time data of auto-precipitation station are considered. The dynamic precipitation is evaluated by applying the best-probability-windows to get the most suited $Z-I$ relationship. Through the retrieved variation correction, the rainstorm nowcasting within 1 hour is made by use of linear extrapolation. Considering the requirement of typhoon short-time forecast service, the system contains the rapid diagnostic analysis for typhoon center and mesoscale circulation pattern based on GBVTD (Ground-base Velocity Track Display method). As a working platform, the system can be used for disaster weather forecasting and service.

Key Words: CINRAD typhoon nowcasting GBVTD method

引 言

新一代多普勒天气雷达可以获得高时空分辨率的降水强度信息,是监测台风、强对流等天气,并进行临近预报的重要手段之一。在美国等发达国家,临近预报的经验已有 10~20 年。有的临近预报系统不仅使用雷达资料,同时还融合了地面中尺度观测资料、探空资料、闪电资料、风廓线资料以及中尺度数值模式预报等,以试图提高临近预报的时空精度。概念模型预报技术,再结合数值模式分析预报和其它外推技术来预报雷暴的发

生、发展和消亡已经成为一个研究的热点。例如,美国发展的基于雷达资料为主的 Auto-Nowcast System(ANC)系统。香港天文台研发了一套预测 1~3 小时内香港境内降雨的暴雨临近预报系统(简称小涡旋)。“小涡旋”系统利用气象雷达探测所得降雨分布情况,计算降雨区的移动速度,从而推算香港境内的雨量^[1-2]。2000 年悉尼奥运会期间,世界天气研究计划预报示范项目(WWRP-FDP)试验并展示了当今国际上几个先进的临近预报系统,对临近预报技术的发展起到了很大的推动作用,不但在国际气象界而且在社会、经济等领域产生了深远的影响^[3-5]。

近年来,我国气象工作者对临近预报的研究已越来越重视,各种临近预报技术和方法研究已逐步增多。2003年由北京市气象局牵头组织北京2008奥运会FDP/RDP项目包含有短时临近预报示范和中尺度集合预报等内容。上海市、广东省气象局还以中尺度数值预报模式预报产品为基础,综合使用了卫星、雷达、自动站及高空地面观测等资料,结合预报员经验建立了短时预报系统^[6]。另外,Dixon M^[7],肖艳姣等^[8]利用多普勒雷达体扫资料对风暴进行实时的自动识别、跟踪、结构分析和临近预报。应冬梅^[9]对江西的飑线雷达回波特征进行了分析。陈家慧^[10]等讨论了利用BP模型进行临近预报的方法,并与傅立叶描绘方法作了比较,说明了人工神经网络方法用于临近预报的可行性。汤达章等^[11]分析了矩不变量法和相关亮度综合分析法跟踪雷达回波的精度。王改利等^[12]将一种暴雨云团的多尺度识别方法——层级聚类法,应用于中 β 尺度对流系统识别及临近预报中。刘黎平等^[13-15]分析认为大部分局地性的、小流域灾害都和中尺度对流系统有关,这些对流云降水在中尺度系统的组织下构成中尺度对流回波系统,产生暴雨甚至大暴雨。

台风、局地暴雨等灾害性天气是东南沿海地区夏季汛期的主要气象灾害。利用雷达对台风进行监测和临近预报是最重要的手段之一。对台风暴雨强回波的识别与追踪、降水估测以及环流结构快速诊断分析技术的研究和应用具有重要意义。台风中的螺旋云带是台风结构中的重要特征之一,其形成的回波带中常出现中尺度扰动,相应一些地区伴随出现强对流活动。Lee等^[16-17]在许多登陆的台风研究中证明,应用GBVTD方法能有有效的反演台风运动结构的特征。Wood等^[18]和张保亮^[19]的研究工作指出,对于具有近似轴对称与类似“兰金”涡旋特性的台风近中心

环流而言,其多普勒雷达径向速度场经常有相当特殊的偶极型态分布特征。周仲岛等^[20]在台风风场存在最大风速的假设前提下,提出了一种用雷达观测的多普勒径向速度场值与观测点至雷达中心距离的乘积作为新的参数场来确定台风中心位置的方法,取得了很好的效果。许映龙等^[21]对近海台风雷达定位方法作了综合分析研究。魏应植等^[22]应用多普勒雷达对“艾利”台风风场的不对称结构进行了分析。赵放等^[23]对新一代天气雷达在正面登陆台风的预警应用进行了探讨。

1 主要技术方法

随着气象探测技术、计算机技术以及临近预报技术研究的进一步发展,临近预报处理气象常规和非常规资料的运算量日益庞大,临近预报正在向自动化、快速化、高时空分辨率方向发展。其中,雷达基数据组网、实时三维数字化处理、雷达回波的自动识别与跟踪、动态定量估测降水、台风中心自动定位和中尺度环流结构快速诊断分析等临近预警预报方法的研究是重要组成部分。将浙江省雷达基数据进行3-D数字组网和时空同化处理,采用改进的交叉相关法识别强对流回波团、矩心跟踪法进行强对流回波团跟踪,并充分考虑螺旋带中尺度对流群系统性移向趋势,结合全省自动雨量站实时数据,应用最佳概率窗求得最配合的 $Z-I$ 关系后进行动态降水量估测,经过变分订正后,再用线性外推方法作0~1小时的降水临近预报。同时,利用台风旋转环流的特点,应用基于GBVTD方法对台风中心、旋转环流结构作快速诊断分析,以期进一步加强临近预报服务的技术和能力。

1.1 雷达基数据处理

对全省各雷达基数据进行时空同化和集

成处理,采用并行计算方法作质量控制、格式转换、退模糊等预处理后,形成基数据数字组网 3-D 数据。雷达资料联网处理主要针对资料的物理属性、空间属性、时间属性等一致性问题展开。为满足资料时间尺度的一致性,以某一部雷达所获得的基数据序列为基准,将其余雷达资料重新生成基数据流后与之组网集成,得到时间连续的雷达组网 3-D 数据。在取得资料时空一致性后,订正站网雷达之间的误差。利用相邻雷达在探测重叠区域数据进行统计对比分析,根据不同雷达测量参数精度,选取基准雷达资料进行调整,取得不同雷达对探测目标描述的一致性。统计表明,全省雷达对同一目标强度误差一般在 3~5dB 内。

1.2 TREC 方法改进及回波的识别追踪处理

在取得了连续性的组网基数据后,以传统的 TREC (Tracking Reflectivity Echoes by Correlation) 技术为基本方法,计算并跟踪整个区域内每块回波的移动。

TREC 方法是:使用一定时间间隔 Δt 内的 CAPPI 资料,将雷达扫描的反射率场分成若干个大小相当的“区域”,这些“区域”具有相同的像素点。将这些在 t_1 时刻的“区域”分别与下一时刻 t_2 ($t_2 = t_1 + \Delta t$) 的各个“区域”作交叉相关,求取第一时刻回波图像与第二时刻图像之间的最大交叉相关系数 R 。

$$R(p, q) = \left\{ \sum_i \sum_j [m_{i+p, j+q, t+\Delta t} - \bar{m}_{(t+\Delta t)}] [m_{(i, j, t)} - \bar{m}_{(t)}] \right\} / \left\{ \sum_i \sum_j [m_{i+p, j+q, t+\Delta t} - \bar{m}_{(t+\Delta t)}]^2 \sum_i \sum_j [m_{(i, j, t)} - \bar{m}_{(t)}]^2 \right\}^{\frac{1}{2}}$$

式中 $m_{(i, j, t)}$ 为 t 时刻横坐标为 i , 纵坐标为 j 的网格上回波值。在 t 时刻回波的分布为 $m_{(i, j, t)}$, 在 $t + \Delta t$ 时刻为 $m_{(i, j, t+\Delta t)}$ 。以此外推

15 分钟、30 分钟、60 分钟的回波或暴雨位置及降水强度。

在实际业务中,此类方法在台风螺旋带状回波的追踪应用上具有一定的缺陷性,仅由 TREC 方法并不能保证每一块回波的追踪外推都与实际回波的移动趋势相吻合,有些甚至会出现相反的结果,这也是各类识别追踪方法需要改进的地方。经实验分析,发现在台风过程中对回波的追踪计算用猜测场进行控制,并辅以移动方向上的修正,可以极大地减少外推方向及旋转效应引起的误差。为此,对 TREC 方法进行如下改进:

一是将雷达多普勒径向速度作为基础取得第一猜测场。对计算出的回波块(点)移动方向与猜测场作比较,若计算出的移动方向与该点及其相邻点的多普勒径向速度在逻辑上均不相符,则搜寻出与该点距离最近,且与径向速度逻辑上相一致的周边点取而代之,从而剔除奇异值。

二是在 TREC 的方法中引入方向变量因子。若单纯依靠线性外推的方法,外推超过 30 分钟回波的位置便会与实际结果产生较大的偏离。根据台风螺旋状强回波单体的移动既有系统性的线性运动变化又具有明显的旋转性的特点,采用连续三个体扫资料判断出回波块在两个时段内移动方向的变化,在线性外推的同时,累计叠加上旋转方向的修正,从而提高了螺旋带状结构回波移动的预报时效,外推效果基本符合螺旋带回波的实际移动情况。

其三,将聚类算法应用于雷达回波的划分,可以实现结构比较复杂的暴雨回波的识别。聚类分析的原理方法,能将中 γ 尺度的系统按类(群)分别进行外推预报,以减少中小尺度系统生消频繁引起的预报误差。实验表明,基于 K-Means 的聚类方法能够实现对结构比较复杂的暴雨回波(如台风、飑线)的识别,能够识别不同系统的云团,这比较适合

引发我国主要降水的中 β 尺度对流系统的识别^[12]。台风暴雨回波发展演变特征的提取,是根据最优匹配的原则对识别的暴雨回波团进行跟踪,对其发展演变过程中的特征参量进行提取。对于识别的每一个回波团,通过相邻时刻回波团特征值的变化,将回波的变化趋势分为增长、维持和减弱三种情况,选择不同的强度预报曲线对强度做出预报。

1.3 融合雨量计动态估测降水

Wilson 在 1970 年代初就提出了平均校准方法,结果比较理想^[24],但遗憾的是降水分布场被平滑了。戴铁丕等^[25]在此基础上又提出了“平均订正因子校准法”的新思路。这两种方法具有简便、校准后区域总降水量较准确等优点,但会使强、弱降水中心平滑,导致降水分布场失真。Sasaki^[26]把变分法引入气象领域后,Ninomiya 等^[27]运用变分法原理,使用雷达和雨量计观测资料做暴雨的客观分析,结果令人满意。台风等大面积降水往往范围广、强度大,雨强分布极不均匀^[28-31]。这时利用常规密度的雨量计站网难以准确测定区域降雨量,而且经常会漏掉暴雨的强中心,不能准确反映雨区中降雨强度分布、演变情况。为此,依据组网基数据形成的离地面最近的基本反射率资料和自动站雨量资料,采用改进的最佳窗概率配对法,求取 Z-R 关系中的 a 、 b 系数获得一小时降水强度,再采用变分技术,根据每小时自动站雨量资料对降水强度进行格点化误差分析和校准^[32]。然后,在回波追踪外推的基础上,获得不同时间的降水落区和降水临近预报。

1.4 台风中心确定和 GBVTD 方法

在正面和临近正面登陆的台风,需要快速而便捷的环流结构分析手段。掌握和了解台风中心、环流结构等随高度的变化有利于

预报员认识台风的结构特性。

台风中心的计算,是假设台风为环流轴对称,不直接使用多普勒径向速度场本身作为分析的对象,而是使用雷达观测体积内每一多普勒水平径向速度值(V_r)与观测点至雷达中心之距离(D)的乘积,得到新参数场($V_r * D$)作为分析的对象。由($V_r * D$)场的极大值与极小值的位置,快速决定台风中心的位置与估计最大风速半径的大小。新的参数场($V_r * D$)分布的极大值与极小值对称于台风环流中心,台风环流中心位于此两极值位置的中点,从而消除平均环境气流速度在多普勒速度场的效应^[18]。

图 1 为 GBVTD 方法的概念图(γ 与 ψ 坐标参见图 1)。GBVTD 的基本原理,是假设台风的风场是由切向旋转环流、径向速度(内流或外流)和平均环境风场所组成,根据台风环流本身具有近似轴对称的特性,利用雷达体扫获得的径向速度场与台风旋转环流之间形成的几何关系以傅立叶级数展开进行求解,进而求取台风环流的切向风速和径向风速的对称性平均值,以及较高次项的振幅和相位值,从而得到台风中尺度环流三维结构的切向风和径向风。如仅考虑等风速情况下的环流切向风场时,以 ψ 为横轴,多普勒速度为纵轴,结果将呈负正弦曲线分布;如仅考虑等风速的径向风场(内流)时,结果将呈负余弦曲线分布。当两者叠加考虑时负正弦曲线出现相位偏移,相位偏移的大小正比于径向风速和切向风速的比值,并且径向风为内(外)流时发生正(负)的相位偏移^[16-20]。

雷达测得的多普勒速度场,包括水平速度场、垂直速度场以及雨滴下落末端速度场。GBVTD 方法建立在等高面上,因此必先求得等高面上的多普勒速度。定义等高面上的多普勒速度为 $\hat{V}_r$,可表示为:

$$\frac{\hat{V}_r}{\cos\phi} = V_r - (w - v_r) \sin\phi \quad (1)$$

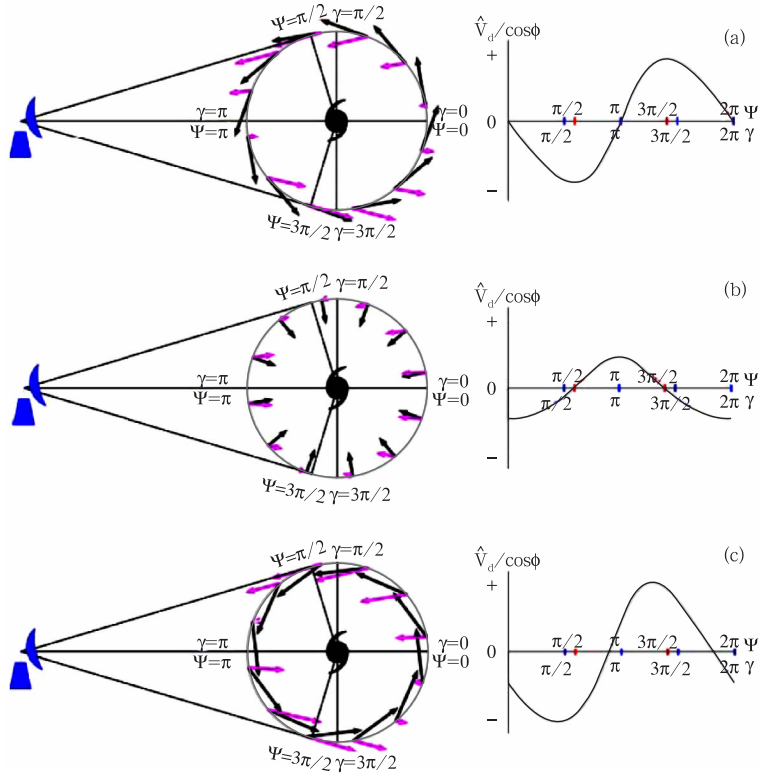


图1 GBVTD方法概念图(引自 Lee et al.)

左侧为雷达观测平面示意图,右侧为同半径雷达多普勒径向速度相对 ψ 坐标展开示意图

(a) 仅考虑环流切向风场时;(b) 仅考虑内流径向风场时;(c) 综合考虑切向风场与径线风场时

$\hat{V}_r$:除去垂直速度、雨滴下落末端速度后的多普勒速度; ϕ :雷达电子波束的仰角; V_r :雷达电子波束的仰角 ϕ 时测得的多普勒速度; w :垂直速度(向上为正); v_t :雨滴下落末端速度(向下为正)。

其中,雨滴下落末端速度 v_t 可由回波估计予以扣除,忽略垂直速度 w (仰角小于 20° 时)。

图2为GBVTD方法雷达观测与台风环流平面几何关系示意图,其中台风风场可分为切向风、径向风及环境平均风三个分量。因此距离台风中心 R 、雷达仰角为 ϕ 、方位角 θ 的 E 点的平面多普勒速度可表达为:

$$\frac{\hat{V}_r}{\cos\phi} = V_M \cos(\theta - \theta_M) -$$

$$V_T \sin\Psi + V_R \cos\Psi \quad (2)$$

Ψ :雷达波束与台风径向速度的夹角($0^\circ \sim 360^\circ$); $V_R(R, \phi, z)$:台风的切向速度(向外为正); $V_T(R, \phi, z)$:台风的切向速度(逆时针为正); $V_M(z)$:环境风场; θ :方位角(与正东的夹角); θ_M :环境风场的角度(与正东的夹角); θ_T :台风环流中心的方位角; α :通过台风中心的雷达波束与任一雷达波束的方位角夹角。

式中, $(\theta - \theta_M)$ 可以表示成 $(\theta_T + \alpha - \theta_M)$,因此:

$$V_M \cos(\theta - \theta_M) = V_M [\cos(\theta_T - \theta_M) \cos\alpha - \sin(\theta_T - \theta_M) \sin\alpha] \quad (3)$$

其中, $\sin\alpha = \sin\alpha_{\max} \sin\phi$ ($\alpha_{\max}$ 为 α 的最大值)

由此可得:

$$\frac{\hat{V}_r}{\cos\phi} \approx V_M \left[\cos(\theta_T - \theta_M) \left(\frac{1 - \cos\alpha_{\max}}{2} \right) + \cos 2\Psi + \frac{1 + \cos\alpha_{\max}}{2} \right] - \sin(\theta_T - \theta_M) \sin\alpha_{\max} \sin\Psi - V_t \sin\Psi + V_R \cos\Psi$$

当半径固定时, $\alpha_{\max}$ 为常数, $\hat{V}_r/\cos\phi$ 为 ψ 的函数。同时, 将 V_T 、 V_R 以自然数 ψ 予以傅立叶级数进行展开, 如此以来, 根据等高面上的多普勒速度 (即 $\hat{V}_r/\cos\phi$), 便求得台风的切向风场、径向风场及平均风。

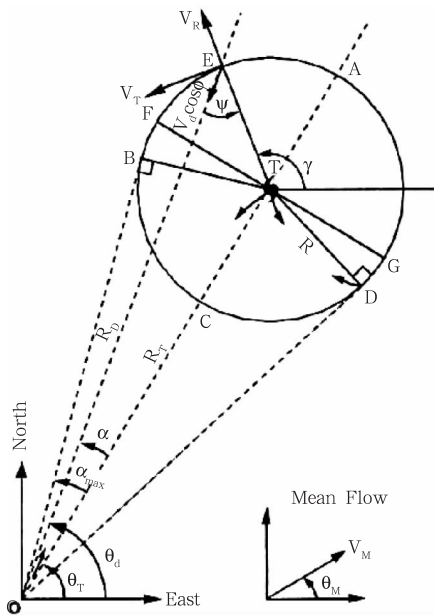


图2 GBVTD方法平面几何关系示意图
其中台风风场可分为切向风、
径向风及环境平均风三个分量

2 实例应用

2.1 台风麦莎降水估测与回波外推

图3(见彩页)给出了麦莎(Matsa, 0509)台风2005年8月5日20时03分(UTC)的基本反射率和20—21时降雨量。从图上可以发现, 台风麦莎云系围绕台风眼呈螺旋状分布, 结构密实, 40dBz以上的强回波区主要

分布在台风眼的西北方。另外, 从麦莎台风登陆后回波演变来看(图略), 台风麦莎的螺旋云带仍然很明显, 回波强度变化很小。表现在Z-R关系上, 其A、b系数随时间的改变基本呈稳定的状态。

图4(见彩页)给出了“麦莎”台风在2005年8月5日20—21时(UTC)的估测小时降雨量(阴影区)与实况(虚线)的对比图。在图4a上与台风“麦莎”的螺旋云带相对应的是螺旋雨带, 其中包含着多个中小尺度雨团。20mm以上的估测螺旋雨带分布在台风中心的西北侧。估测的小时降雨量值为33mm左右, 小于实况37.2mm, 但其落区与实况基本吻合。经过变分校准后(图4b)估测的降雨量得到了很大改进。20mm以上的暴雨区与实况基本一致, 暴雨中心的估测雨量由校准前的33mm提高到35mm, 与实况量值更接近, 暴雨中心位置也与实况相重合。从总的情况看, 使用雷达联合雨量计作实时动态变分订正进行降水估测后, 对降水临近预报效果有了极大的改善。

图5(见彩页)是台风麦莎在2005年8月5日18:02(UTC)的组合反射率强度与TREC风场的叠加显示。通过连续对强度与TREC风场叠加产品的观察分析, 发现台风麦莎螺旋带上强回波降水也有与多单体强对流系统近似的“列车效应”。所不同的是在线状排列的中尺度系统(如飑线)其强回波呈“传播”的特点, 大多数强回波核的移动与中尺度系统的整体移动方向存在一定的夹角(多数为右移)。而台风螺旋带上的强回波核的移动则基本上沿着螺旋带本身旋向台风的主体。在台风的移动过程中, 旋向台风“眼墙”的主螺旋带状强回波(群)、以及与之邻近的次螺旋带状强回波(群), 常常对某一站点或区域会形成连续不断的“覆盖”现象, 排列成螺旋带状的强回波核像“列车”一样对当地

产生短时间的持续强降水,这种“列车效应”式的现象也是造成台风正面袭击的地区降水分布极为不均的原因之一。对台风 TREC 产品观察还发现,各螺旋带状回波之间常出现辐合(或辐散)趋势的“交叉”移动现象。回波除了上述方向性的辐合(或辐散)现象外,还具有速度性的辐合(或辐散)现象,另有一些强回波核“生”、“消”频繁、相对于螺旋带整体的移动较为独立。在台风回波中,“眼壁”和“眼墙”周边的强回波核伴随着台风整体移动的同时还有气旋式的旋转运动,台风麦莎“眼壁”和“眼墙”周边的强回波核绕台风中心旋转运动的周期大约是 3~4 小时。TREC 风场与地面自动站要素场叠加(图略)后发现,台风麦莎还具有明显的“风雨同步震荡”的现象,即站点的 TREC 风速、地面风速、降水强度的振幅和周期具有随时间同步变化的特点。

图 6(见彩页)给出了台风麦莎 2005 年 8 月 5 日 13:05(UTC)回波强度预报时效 0~1 小时的预报结果。结果表明,对于台风螺旋带强回波位置的 0~1 小时预报,追踪算法预报绝大多数对流单体位置的平均误差在 10~25km,平均误差在 15km 以内。在此基础上所作的小时降水量落区外推预报具有相似的结果。

2.2 台风桑美旋转环流速度分析

2006 年 8 月 10 日 17 时 25 分台风桑美(SAOMAI, 0608)登陆浙江苍南,登陆时地面测得的极大风速达 $68\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上。雷达观测表明,台风桑美眼圆而规则且清楚,直径约 20km,眼壁离最外层约 80~100km,形状规则、基本上构成一个比较完整的几何圆,整个台风云系的面积约 2000km^2 ,主要的降水集中在台风核区域,适合应用 Wood and

Brown 的改进方法计算台风中心。图 7a、7b(见彩页)分别为 2006 年 8 月 10 日 16:50 时刻 2.4km 高度的雷达径向速度场和使用 GB-VTD 方法计算的桑美环流切向风场分布图。对 2006 年 8 月 10 日 16:50—20:03 台风在登陆期间的资料进行连续计算分析表明,在登陆期间(16:50—17:14),其最大相对切向风速大约出现在 1.6~2.4km 的高度,旋转环流的最大风速值约 $82\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$,有两个极大值风速区分别呈环型和弓型,分布在台风的眼壁周围和眼区偏北一侧。另外,系统对台风桑美中心的计算发现,登陆期间台风中心上下层出现明显的偏离现象,在低层到中低层高度之间偏离现象尤为剧烈。在 17:08—17:45 台风中心在 0.84km 高度层比 2.4km 的高度层上,向西南偏离为 3.1~4.7km、从中低层到高层则较为陡直($<2\text{km}$)。登陆后,最大相对切向风速逐步减弱。这些结果有待今后做进一步地验证和分析研究。

“桑美”登陆后,台风切向环流最大风速半径逐渐减小。以 2.4km 高度结果进行比较:在 16:50 时,平均半径($70\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 切向环流风速)为 42km、平均半径($50\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 切向环流风速)为 67km;在 18:03 时,平均半径($63\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 切向环流风速)为 51km、平均半径($50\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 切向环流风速)为 61km;在 20:00 时,平均半径($50\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 切向环流风速)为 49km。实际上,台风切向环流在同一半径上分布是不同的。登陆前后,切向环流最大值风速分布也有很大变化,由登陆前两个极大值风速区比较分明。登陆后大约半小时,极大值风速区($65\sim70\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)面积缩小,18:03 眼壁周围的极大值风速区趋向眼壁偏北一侧。随着台风的整体上岸,以台风环流为中心的极大值风速区面积逐渐扩散(极大值减小),从 20:03 时可以看到,极大值风速区

($50 \sim 55 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)基本上呈环形、自台风中心向外扩散(图略)。

对“桑美”中心计算发现,台风登陆后其中心向西南回落移动。其极大值风速区在台风登陆前后,造成中心路径周边数十公里范围内风速风向短时间剧烈改变,在台风中心附近地区,先是受到极强的偏北风,随后出现短暂的弱风甚至静风(台风眼区内),紧接着偏南风陡然来临,造成极其强烈地破坏力。这次“桑美”登陆时几小时内,海堤决口,渔排漂散,船只损毁,屋舍坍塌,交通、通讯、电力中断……,其中仅福鼎市沙埕港口沉没船只就达 952 艘,损坏 1139 艘,对浙南和闽北造成严重的人员伤亡和财产损失,这种风力极强且风向短时间内急剧改变的现象,应该是造成损失的重要原因之一。

2.3 台风罗莎降水预报效果评估

2007 年第 16 号台风罗莎于 10 月 6 日下午 3 点 30 分登陆台湾,并于 7 日下午 15 时 30 分在浙闽沿海登陆。此次台风风力强、路径怪异、影响范围广、降雨量大。

图 8(见彩页)为 2007 年 10 月 7 日 11:58—14:58(UTC)雷达估测每一小时降水量(est)和相应的每一小时自动雨量站雨量(sta)分布。

图 9 为 2007 年 10 月 7 日 10:00—11:00 UTC 临近预报一小时降水分布和 11:00 UTC 自动雨量站雨量分布。

以地面雨量计为标准对预报结果进行评估:取浙江省范围内现有 931 个雨量计(雨量计分布图略),计算地面雨量分布时用到了距离联网雷达范围(在 2007 年 10 月 7 日参与实际雷达基数据数字组网的为杭州、温州、金华三部雷达)以外的雨量计测值。对于某一地面雨量计,其对应点的外推或雷达反演值

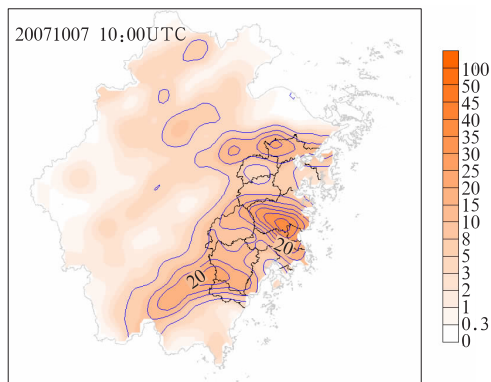


图 9 2007 年 10 月 7 日 10:00UTC 临近预报一小时降水分布(阴影)与 11:00UTC 自动雨量站雨量分布(等值线,间隔 5mm)对比
粗实线为主观预报 20mm

取为其上空 9 点的平均值(取 $5 \text{ km} \times 5 \text{ km}$ 分辨率)。假定雨量计与外推或雷达反演值同时达到给定阈值(I)的数目为 YY,雨量计未达到阈值(或雷达反演值达到阈值的)数目为 YN,雨量计达到阈值(或雷达反演值未达到阈值)的数目为 NY,采用以下指标对外推小时降水和雷达反演的累积小时降水进行评估:

$$RH = YY / (YY + NY) \quad (1)$$

$$RFA = YN / (YY + YN) \quad (2)$$

$$PNA = NY / (YY + NY) \quad (3)$$

$$ICS = YY / (YY + YN + NY) \quad (4)$$

其中 RH(Hit Rate)为命中率,RFA(False Alarm Rate)为虚警率,PNA 为漏报率,ICS(Critical Success Index)为临界成功指数,指在有雨情况下预报的成功率。表 1 为 2007 年 10 月 7 日 10:00UTC 临近预报精度评估。

表 1 2007 年 10 月 7 日 10:00UTC 临近预报精度评估

$I(\text{mm})$	RH	RFA	PNA	ICS
5.0	89.9	23.0	10.1	70.8
20.0	71.4	37.5	28.6	48.4

误差的主要来源,一是系统本身计算方

法引起的,特别是对台风强回波的生消变化没有考虑;二是由于自动站雨量格点数据与联网雷达覆盖范围格点数据存在差异;三是雨量站的密度分布与雷达仰角遮挡和探测距离差异等原因所造成。从预报结果的形态对比和预报服务的角度看,实验取得了积极进展和一定的效果,今后在临近预报精度评估的方法上有待作进一步地探索。

3 结语与讨论

充分利用新一代天气雷达系统,研究和建立适合本区域的精细化短时临近预报系统是有效预防和减少台风、暴雨、强对流等灾害天气的一项重要保障。当台风正面登陆或临近时,通过对台风的连续定位、位置移动、结构演变、暴雨落区、流场变化等特征的分析,可以对台风的临近预报和气象服务提供极为重要的指导依据,特别是台风降水强度的发生常常极不均匀,每小时滚动输出的精细预报等信息,对于政府决策等部门在指挥抢险救灾、水库错峰排洪、官兵警力的调动和部署等方面的工作都十分重要。做好台风等灾害天气的监测和预警,准确快速地识别、跟踪台风、暴雨等强对流性回波团的移动,利用自动雨量站资料及时估测降水强度,有利于预报员及时准确地把握和预报灾害性天气的具体落区和强度变化。

通过上述讨论和个例分析结果,可以得到以下几点结论:

(1) 对 TREC 方法进行改进并结合聚类方法等手段,可以对螺旋带形状强回波进行有效地识别跟踪,能够识别台风暴雨中较强的对流单体。通过一些个例过程的雷达资料的试验研究,有利于将该方法应用于台风及不同的天气情况临近预报中。

(2) 利用多普勒雷达径向速度场资料进行近海台风雷达定位和台风环流场结构的客

观分析方法,其快速诊断结果对台风实时业务定位和预报具有很好的参考价值。

(3) 对台风中心和旋转环流的计算技术的研究与开发,并结合实时动态降水强度估测等其他分析手段的综合利用,在实际的业务中具有很好的实用性。如何将雷达与其他手段配合、综合利用各种观测资料,通过建立概念模型,结合数值预报等以获取风暴和降水移动及发展的信息,并把握回波在不同天气背景下的生消变化趋势,并建立一个比较精细的客观评估检验方法是今后工作需要进一步考虑和改进的问题。

致谢:在工作中,中国气象科学研究院刘黎平研究员、王改利、王红艳博士给予了极大的帮助,在此深表感谢。

参考文献

- [1] 陈明轩,俞小鼎. 对流天气临近预报技术的发展与研究进展[J]. 应用气象学报,2004,15(6):754-766.
- [2] 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,2005,24,456-464.
- [3] Keenan T, Wilson J, Joe P, et al. The World Weather Research Program (WWRP) Sydney 2000 Forecast Demonstration Project: Overview[R]. Preprints 30th International Conference on Radar Meteorology, Munich, Germany, 2001.
- [4] Keenan T, Joe P, Wilson J, et al. The Sydney 2000 World Weather Research Program Forecast Demonstration Project: Overview and Current Status[J]. Bull Amer Meteor Soc, 2003, 84: 1041-1054.
- [5] Linda Anderson-Berry, Keenan T, Bally J, et al. The Societal, Social, and Economic Impacts of the World Weather Research Programme Sydney 2000 Forecast Demonstration Project (WWRPS2000FDP) [J]. Weather and Forecasting, 2004, 19: 168-178.
- [6] 杜秉玉,官莉,姚祖庆,等. 上海地区强对流天气短时预报系统. 南京气象学院学报, 2000, 23(2): 242-250.
- [7] Dixon M, 徐传玉. 利用雷达进行风暴的识别,跟踪,分析和临近预报的方法[J]. 气象科技, 1994, 4: 39-45.
- [8] 肖艳姣,汤达章,李中华,等. 风暴的自动识别,跟踪

- 与预报[J]. 南京气象学院学报, 1998, 21(2): 223-229.
- [9] 应冬梅, 郭艳. 江西省飕线的雷达回波特征分析[J]. 气象, 2001, 27(3): 42-45.
- [10] 陈家慧, 张培昌. 用天气雷达回波资料作临近预报的 BP 网络方法[J]. 南京气象学院学报, 2000, 23(2): 284-287.
- [11] 汤达章, 周咏梅, 胡明宝. 雷达回波跟踪的两种方法及精度比较[J]. 应用气象学报, 1994, 5(3): 304-311.
- [12] 王改利, 刘黎平. 暴雨云团的多尺度识别方法及其在临近预报中的应用[J]. 大气科学, 2007, 31(3): 400-409.
- [13] 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(02): 278-284.
- [14] 牟容, 刘黎平, 许小永, 等. 四维变分方法反演低层风场能力研究[J]. 气象, 2007, 33(1): 11-18.
- [15] 许小永, 郑国光. 多普勒雷达反演技术及雷达资料在数值模式中的应用[J]. 气象, 2005, 31(3): 7-11.
- [16] Lee, W. -C., and F. D. Marks. Tropical cyclone kinematic structure retrieved from single-Doppler radar observations. Part II: The GBVTD-simplex center finding algorithm[J]. Mon. Wea. Rev., 2000, 128, 1925-1936.
- [17] Lee, W. -C., B. J. -D. Jou, P. -L. Chang, et al. Tropical cyclone kinematic structure retrieved from single-Doppler radar observations. Part III: Evolution and Structure of Typhoon Alex(1987)[J]. Mon. Wea. Rev., 2000, 128: 3982-4001.
- [18] Wood V T, Brown R A. Single Doppler velocity signatures: An atlas of patterns on clear air/ widespread precipitation and convective storms[J]. NOAA Tech. Memo. ERLNSSL-95, Nation Severe Storms Laboratory, Norman, Okla., 1983. 71
- [19] 张保亮. 登陆中台风环流变化分析: 贺伯(1996)台风个案研究[D]. 中国台湾大学大气科学研究所博士学位论文, 2000.
- [20] 周仲岛, 张保亮, 李文兆. 多普勒雷达在台风环流中尺度结构分析的应用[J]. 大气科学(台湾), 1994, 22: 163-187.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] 赵放, 冀春晓, 钟建锋. 新一代天气雷达在正面登陆台风预警中的应用. 气象, 2006, 32(2): 46-51.
- [24] Wilson, J. W. Radar Measurement of rainfall summary[J]. Bull. Amer. Soc. 1979, 60(9): 1048-10581.
- [25] 戴铁丕, 傅德胜. 天气雷达—雨量计网联合探测区域降水量的精度[J]. 南京气象学院学报, 1990, 13(4): 592-5971.
- [26] Sasaki, Y. Some basic formulas in numerical variation analysis[J]. Mon. Wea. Rev. 1970, 98: 875-8831.
- [27] Ninomiya, K. And Akiyama, T. Objective analysis of heavy rainfalls based on radar and gauge measurement[J]. J. Meteor. Soc., Japan, 1978, 50: 206-2101.
- [28] 张培昌, 戴铁丕, 傅德胜, 等. 用变分方法校准数字化天气雷达测定区域降水量基本原理和精度[J]. 大气科学, 1992, 16(2): 248-2561.
- [29] 郑媛媛, 谢亦峰, 吴林林, 等. 多普勒雷达定量估测降水的三种方法比较试验[J]. 热带气象学报, 2004, 20(2): 192-197.
- [30] 邓雪娇, 黄浩辉, 吴兑. 变分法在校准雷达定量估测降水中的应用[J]. 应用气象学报, 2000, 11(2): 255-2561.
- [31] 楚荣忠, 王致君, 刘黎平, 等. 双线偏振雷达降雨估测分析[J]. 气象学报, 1997, 55(1): 103-109.
- [32] 冀春晓, 陈联寿, 赵放. 雷达动态估测台风定量降水[J]. 热带气象学报(待发表).

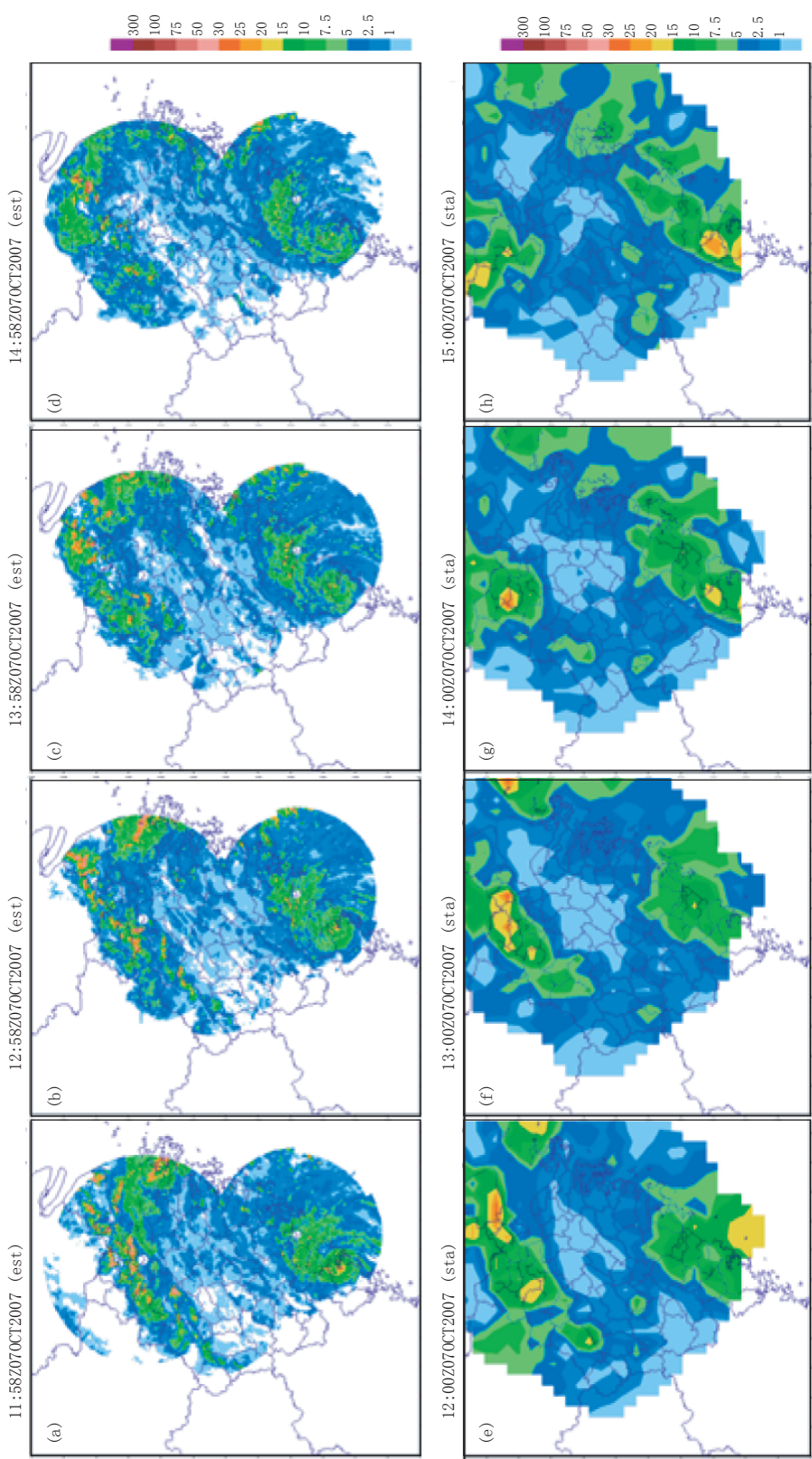


图 8 2007 年 10 月 7 日 11:58—14:58 (UTC) 雷达估测每一小时降水量 (est) 和相应的每一小时自动雨量站雨量 (sta) 分布

赵放等：应用多普勒雷达制作近海台风临近预报技术研究

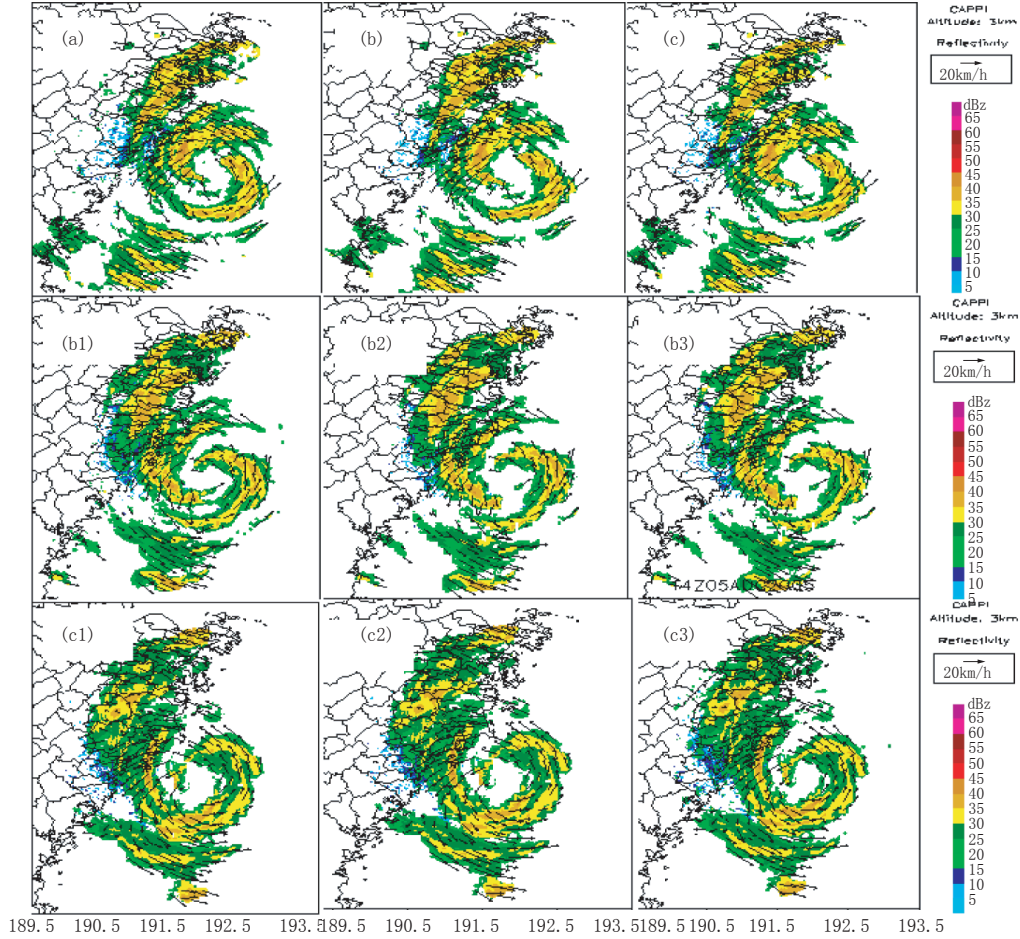


图6 台风麦莎2005年8月5日13:05 (UTC) 回波强度外推预报

(a)、(b1)、(c1) 分别为13:05、13:35和14:05回波实况, (b)、(b2)、(c2) 为30min外推, (c)、(b3)、(c3) 为60min外推预报

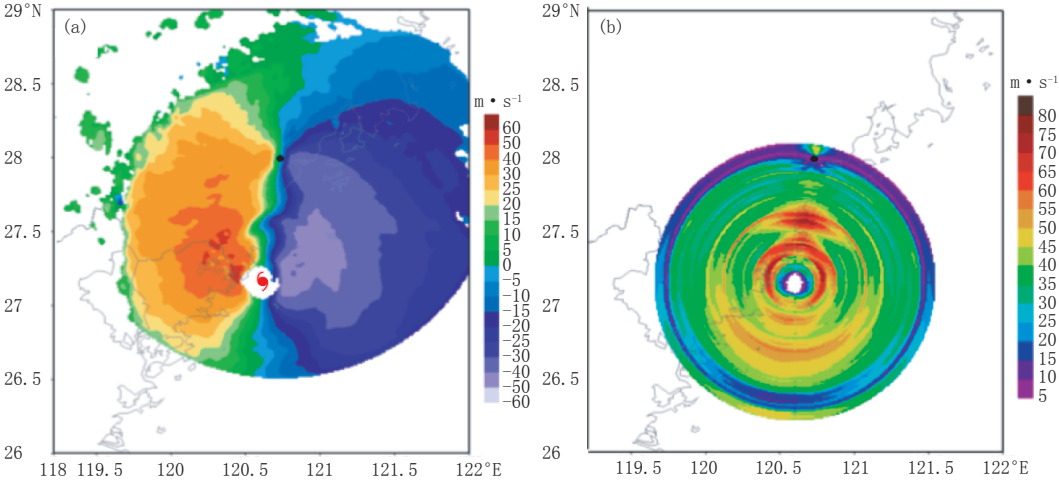


图7 2006年8月10日16:50台风桑美多普勒速度与切向速度场对比

(a) 雷达CAPPI径向速度 (●为台风中心定位, 2.4 km高度) (b) GBVTD方法计算的桑美环流切向风场分布 (2.4 km高度)

赵放等：应用多普勒雷达制作近海台风临近预报技术研究

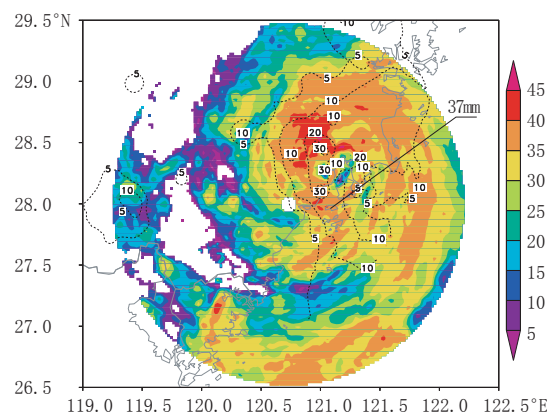


图3 台风麦莎2005年8月5日20时03分(UTC)的基本反射率(dBz)和20—21时(UTC)降雨量(mm, 虚线)实况图

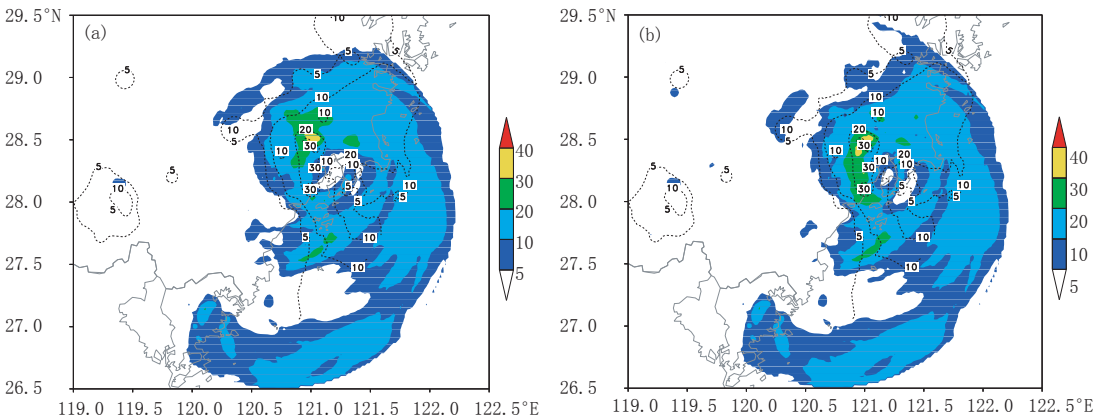


图4 台风麦莎校准前(a)、后(b)2005年8月5日20—21时(UTC)估测小时降雨量和实况(虚线)图

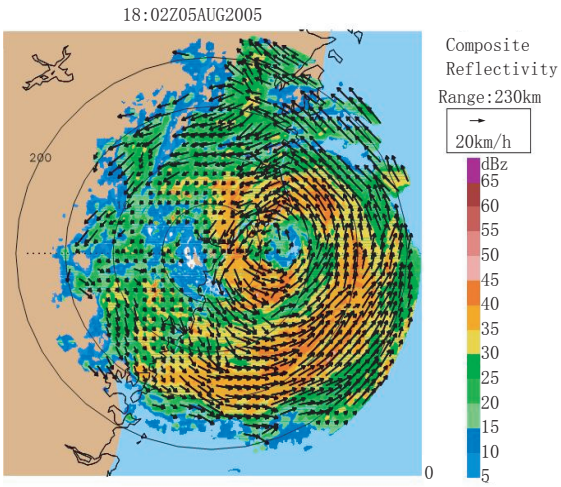


图5 台风麦莎2005年8月5日18:02(UTC)组合反射率与TREC(2.4 km高度)风场