

# CINRAD-SA 雷达在正面登陆台风 预警中的应用

赵放<sup>1</sup> 冀春晓<sup>2</sup> 钟建锋<sup>1</sup>

(1. 浙江省温州市气象局, 325000; 2. 浙江省气象科学研究所)

**提 要:** 新一代天气雷达 (CINRAD-SA) 具有丰富的产品和强大的功能。通过对云娜等正面或临近正面登陆温州的热带气旋的雷达资料分析, 发现一些独特的回波特征和风场结构。结果表明, 强台风具有明显的眼 (眼越小强度越强), 眼壁和螺旋雨带对流发展旺盛, 强度结构完整、紧密。台风暴雨强度与台风气旋性涡旋本身的动力辐合上升强度趋于一致。强降水常出现在台风前进方向的右前侧, 相同的垂直累积液态水含量受地形等因素影响“降水效率”差异极大。对于沿海一带, 利用新一代天气雷达更高的探测能力对于台风性质的判断、短时预警和决策服务会起到积极的重要作用。

**关键词:** 新一代天气雷达 热带气旋 回波特征

## Application of Wenzhou CINRAD/SA Radar to Typhoon Landing

Zhao Fang<sup>1</sup> Ji Chunxiao<sup>2</sup> Zhong Jianfeng<sup>1</sup>

(1. Wenzhou Meteorological Office, Zhejiang Province 325000; 2. Zhejiang Meteorological Institute)

**Abstract:** The weather Doppler Radar (CINRAD/SA) is of various application and powerful functions. With the observation data of Doppler Radar at Wenzhou, the intensity of radar echo and Doppler velocity about Typhoon Rananim ect., as well as their variation are analyzed, the features of radar echo and velocity are revealed. The facts are as follow: the smaller the Typhoon eye is, the stronger the typhoon is, the stronger the convection is. There

are spiral rain belts and close structure in the strong typhoon. The typhoon heavy rain is connected with convergence upward of cyclone vorticity. The strongest heavy rain distributed in the right head of typhoon track. Because of the impacts of topography, there is very different precipitation even though the vertically integrated liquid water in the same. In the coastal area, it is very important that the typhoon variation is detected by Doppler radar.

**Key Words:** CINRAD-SA typhoon echo characteristic

## 引言

登陆台风的发展和影响是近年来人们十分关注的重要问题,陈联寿等人的研究指出,台风中尺度结构变化对其强度突变有着直接影响<sup>[1]</sup>。新一代天气雷达除了能提供降水的强度信息之外,还可以获取降水区中气流运动的信息。对正面和临近正面登陆的热带气旋的回波进行分析,有助于台风的性质判别。云娜、环高、蒲公英在进入雷达监测范围后,分别以结构完整、螺旋云带为主体、结构非对称等特点表现出不同的结构特点和环流特征,为识别和判定台风风雨性质及强度影响范围提供了十分珍贵的资料。

自20世纪60年代起,新一代天气雷达在强对流天气方面的应用研究取得了系列成果和极大的进展。对于沿海一带,利用新一代天气雷达对台风等灾害性天气的监测和预警具有重要的意义。近年来,陈淑琴等应用卫星云图、雷达探测资料分析了威马逊台风的结构特点,发现在台风东北象限降水条件最好,西南象限最差<sup>[2]</sup>。苏卫东等利用多普勒雷达信息可明显提高台风定位的准确性<sup>[3]</sup>。周仲岛等利用台风风场近似轴对称结构特性,以单多普勒雷达径向风场资料定量分析了台风三维环流中尺度结构<sup>[4]</sup>。钟卓约、帅方红利用多普勒天气雷达资料分析了9914号台风在近海及登陆过程中强度场、多普勒速度场的分布特点和演变规律。分析结果表明,多普勒天气雷达在探测台风过程

中比一般天气雷达更具有优越性<sup>[5]</sup>。

## 1 反射率产品基本特征

不同的台风由于经历着不同的发生、发展过程,因此各个台风回波的分布之间有很大差异。即使是同一台风,在不同的发展阶段降水回波也不一样。但总的说来,对于一定的发展阶段,台风回波分布有许多共同点:台风中心是一个圆形的无回波区域,它与台风眼基本一致;“眼”外围环状强回波区是眼壁,由垂直发展旺盛的对流云构成;眼壁外是螺旋云带,是由较强对流云构成的中尺度螺旋状回波带;台风风雨区的外围有时有类似中纬度飚线的对流回波带,即台前飚线。

### 1.1 热带风暴环高基本特征

热带风暴环高于2003年20日02:30 UTC在平阳的鳌江登陆,其结构特征为:没有明显的眼区,以4条螺旋带状构成回波总体,范围在200km以上,回波主要分布在移动方向的前侧,而在后侧回波比较零散。回波带上强回波点达30~40dBz,其中最长一条长达400km以上。雨带层次明显,各雨带回波间有明显的空白区,雨带之间大致相距20~30km。观察发现环高的螺旋云带回波的曲率随着风暴移速加快变化明显,移速加快时螺旋云带最大曲率增大,且与移动方向基本趋于一致。分析表明,热带风暴环高强度不是很强,雨强分布不均匀,降水

间歇性大。2003 年 8 月 19 日 07:59UTC 台前飚线回波以 30~40min 的间隔从海面生成,沿海岸线推进到内陆约 100~200km 后消散(图 1a,见彩色附页),带状回波的强中心强度为 30dBz。14:17UTC 环高螺旋云带基本成熟(图 1b,见彩色附页)。15:00UTC 四条螺旋云带构成环高整体结构(图 1c,见彩色附页)。15:31UTC 风暴追踪产品和风暴相对移速产品反映出风暴整体移速由  $20\sim 25\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$  陡增到  $30\sim 35\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ (图 1d,见彩色附页)。17:02UTC 螺旋回波带最大曲率和螺旋带的走向密集区在  $315^\circ$ (图 1e,见彩色附页),结合风暴路径追踪产品可准确判定风暴的登陆点为瑞安至苍南之间。19:03UTC 回波有所加强,螺旋云带结构趋于紧凑密集(图 1f,见彩色附页)。

## 1.2 台风云娜基本特征

台风云娜于 2004 年 8 月 12 日 12:00 UTC 在浙江温岭沿海登陆后,穿过江西、湖南、湖北等省造成重大灾害损失。云娜临近登陆时强度结构具有如下特征:①有明显的圆形无回波“台风眼”,眼区直径 50~55km(自下到上),形状保持稳定。眼壁环形呈闭合环状,强度 60dBz 以上,高度在 12~15km。②眼壁外螺旋回波范围 700km 以上(更远处探测受到仰角限制),强度 45dBz 以上,大部分回波顶在 7~9km,强度强的螺旋状回波带的高度达 15km 以上。螺旋状回波带结构严密、汇集在眼壁上,强度向上过滤 30dBz 后可见到呈“9”分布的强主体结构(图略)。云娜在临近时,回波的强度开始持续加强,在台风移动路径的前侧或右前侧最为显著,强回波区面积亦明显增大,其眼壁和螺旋云带逐渐加宽、变厚,眼区附近的云带间隙逐渐消失。登陆过程中回波强度在台风移动路径的前侧和右前侧一

度出现两个强回波区域。自 12 日 06:00 UTC 直到 16:00UTC 当各螺旋云带和眼壁回波移到并“覆盖”在雁荡山和台州北部地区时,回波呈现明显的局地性增强变化的特点。台风眼几何形状由圆到不规则,直到登陆后被逐渐“堵塞”。回波演变显示出云娜台风具有强度强、范围广、旋转快、结构严密、雨带厚等强台风的结构特征(图 2,见彩色附页)。

## 1.3 台风蒲公英基本特征

台风蒲公英 2004 年 7 月 1 日到达巴士海峡与 0408 号台风婷婷形成双台风影响,7 月 2 日穿过台湾省北部地区后进入东南南部海面减弱为强热带风暴。7 月 3 日 01:30UTC 在浙江乐清沿海擦边北上。靠近温州时,台风中心回波由密闭的明显眼区结构演变成了“空心”的眼,眼的空心区域直径达 100km 以上,螺旋云带的结构也变得不清晰。在眼中心的东面和东南面 60~260km 处有约 200km 宽的带状回波,风暴整体回波结构呈明显的非对称。台风眼区的大小与台风的强弱即由外向内辐合旋转力的强度密切相关。强台风有小而密闭的眼;弱的热带风暴往往仅有大且不明显的眼区。眼的结构是判别台风强弱的较明显的标志之一,对比观察蒲公英和云娜的回波结构可以清楚地看到蒲公英强度明显偏弱(图 3,见彩色附页)。

## 2 径向速度产品

多普勒天气雷达能获得降水粒子相对于雷达的平均径向速度,它与实际水平风速有关但又不同。台风的最大风速通常出现在台风眼区外围附近,在台风中心附近区域的低层气流为一个气旋性旋转的气流结构,类似于兰金(Rankine)的中尺度气旋模式。实

际应用中应考虑到风暴本身的移动所造成的影响,要随时根据风暴移动速度和方向的变化对雷达相对速度产品的生成参数进行修正。如云娜登陆时环境平均风场大约为  $5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  东南风,因此台风中心与径向速度零线发生偏离,最大径向速度区域有向台风前进方向右侧偏离的趋势。

## 2.1 多普勒速度场特征与强降水的对应关系

多普勒径向速度场往往是各种运动的集中反映,雷达中心两侧零速度线随距离增加顺转(逆转)的弯曲程度不同,是几个风场迭加的结果。由此,可以直观地识别、判断和分析辐合辐散运动与冷暖平流的迭加风场<sup>[6,7]</sup>。观测发现,台风暴雨的多普勒径向速度场与大尺度运动的辐合辐散场和冷暖平流场迭加的一些特征基本相似。下面选取台州黄岩自动雨量站1小时降水量实况(图略)与云娜登陆前后的径向速度产品进行对比分析:2004年8月12日05:00~10:00UTC:零速度线随距离增加顺转加强,低层有暖平流与辐合的叠加,在高层有暖平流与辐散的叠加(图4a,见彩色附页),07:00~08:00UTC测站降水实况为  $22 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ ,螺旋雨带的降水强度在这一时段出现第一个峰值;10:00~11:00UTC:低层有暖平流与辐合的叠加,中高层零速度线近似直线为纯的暖平流,测站的降水实况为  $14 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ ,螺旋雨带的降水强度相对有所减弱;11:00~12:15UTC:从低层到中层发展为一致的暖平流和辐合叠加(图4b,见彩色附页),黄岩测站在10:00~11:00UTC降水为  $23 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ ,出现第二个峰值(随着螺旋雨带的移动,11:00~12:00UTC乐清出现了  $31 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$  峰值);14:15UTC随着高度的增加,零速度线在高度2~3km处开

始逆转呈反S形,表明在这一层有冷平流,15:00~16:00UTC零速度线弯向正区的逆转开始大于弯向负区的逆转,下暖上冷的形势使低层辐合进一步加强(图4c,见彩色附页),高层仰角( $3.4^\circ$ )暖、冷、暖平流交替出现,顶层表现为气流辐散(图4d,见彩色附页),16:00~17:00UTC黄岩出现了  $61 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$  的小时降水量最大峰值。这也说明冷平流的减压作用使斜压位能释放转为动能,台风环流在低层由此获得斜压能量而继续维持,为暴雨的产生和维持提供了有利的水汽条件和动力条件。

## 2.2 台风的中尺度环流结构

台风环流近似轴对称,其轴对称环流风场形成的径向速度场呈现出一对对称性很高的正负径向速度分布廓线。周仲岛提出了Wood and Brown改进方法(简称GBVTD, Ground-base Velocity Track Display method方法)<sup>[4]</sup>。使用雷达观测体积内多普勒水平径向速度值( $V_r$ )与观测点上至雷达中心之距离( $D$ )的点积得到新参数场( $V_r \cdot D$ )。由( $V_r \cdot D$ )场的极大值与极小值的位置可快速决定台风中心的位置与估计最大风速半径的大小。从而排除台风环流的多普勒径向速度场所产生的台风中心偏离零线的效应。当台风旋转环流的切向朝向雷达时,其切向风速与水平径向速度基本一致。下面用计算的数据对台风云娜登陆时的环流进行分析。在台风移动前进方向的前侧到稍偏右的区域,云娜台风的旋转环流在1.5km到4km高度上,存在一个大于  $49 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  的切向极大风速区(参见图4b沿台风旋转环流指向雷达的最大径向速度,见彩色附页)。2004年8月12日10:00UTC至12:30UTC,当台风在温岭登陆后向偏西方向移动时,台风中心经过温州乐清和永嘉,可能是受到地形等作用的影响,其最大风速半

径发生了较大变化。台风低层中心移速变慢,在 2km 的高度上台风切向环流最大风速(大于  $49 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  区域)半径由 81km 减到 53km。在 12:00UTC 至 22:00UTC 台风中心进入雁荡山区后,4km 高度台风中心位置较 8km 中心位置向南偏离超过 12km。台风环流上下层移动出现差异。12:30 UTC 至 12:42UTC 从雷达回波可清楚地看到,台风中心在西行时略有南压,且移速减缓,当台风移速再次加快时,台风最大风速半径也再次增大。受云娜影响,浙江共有 11 个站风速超过了  $40 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,最大为大陈的  $58.7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,其次为三门的三角塘  $46.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,内陆除湖州和衢州部分地区以外,其余地区都有 8 至 10 级大风,沿海海面均出现了 12 级以上的大风。

### 3 速度谱宽产品

以往有关台风的分析文献中,较少见到速度谱宽产品(SW)的分析。实际上谱宽产品能够很好地反映出台风环流状态的稳定性。在空气边界密度不连续、风切变明显或湍流强的地方具有较高的谱宽。台风由海上登陆陆地过程中,由于受到地形阻挡和摩擦效应的双重影响,台风眼壁前后和上下层部位的谱宽值发生规律性的快速变化。云娜登陆时(台风前进方向为前部)受到地形的影响,台风眼壁的谱宽值在低层(高度 2.5km 以下)和高层(高度 5km 以上)急剧增大( $9.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ )。随着台风眼区整体登陆“上岸”,眼壁后半部谱宽亦由低层到高层开始快速变大。值得注意的是在 3km 至 5km 高度层上呈现稳定的低谱宽( $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ )达数小时。说明云娜登陆后其中层环流仍保持着稳定状态,而中层环流是台风维持的主要内因,这种稳定的中层环流是云娜登陆后继续维持的重要内素,从而造成登陆

以后出现了持续十多个小时的强降水发生。图 5(见彩色附页)为 2004 年 08 月 12 日 11:42:29UTC 谱宽垂直剖面产品。

综合谱距产品(CM)是反射率因子、平均径向速度和谱宽数据组合产品,速度和谱宽用箭头加在反射率因子图上,箭头方向表示径向速度是朝向雷达还是远离雷达,箭头长表示谱宽大小。该产品能有效地反映中气旋中风(或风暴顶辐散)的大小。蒲公英临近时,从雷达速度图和综合谱距产品(图 6,见彩色附页)上可以判断,其流出层约在 4.0~5.5km 高度,与云娜相比其中层水汽输送通道较为浅薄(图略)。

### 4 垂直积分液态含水量和小时降水量产品

垂直累积液态水含量产品(VIL)和小时降水量产品(OHP)对降水主体趋势、降水量估测和降水落区可以进行极好的监测。图 7(见彩色附页)显示台风云娜登陆时含水量极大值( $25 \text{ kg} \cdot \text{mm}^{-1}$ )位于台风中心的前部和右前侧。统计表明,在温州地区垂直累积液态水含量(VIL)产品有以下几个特点:一是最大值“覆盖”区域的持续时间与该区域的降水量相关,持续时间越长降水量越大。二是不同来向的降水系统,垂直累积液态水含量具有的“降水效率”差异很大。例如,当垂直累积液态水含量(VIL)相同时,对西北向、西南向、南向、东向(包括台风)的天气系统降水效率在不同季节大约为 1:2:2.5:4 的关系,这与系统的水汽输送来源相吻合。三是受地形作用明显<sup>[8]</sup>,在云娜自东向西移动时,台风环流在乐清矾头、永嘉中堡等临近乡镇形成了两个喇叭口状的地形效应(图略);云娜西进后,又处在台风东南环流中。风向与北雁荡山脉形成较大的夹角,在风速随高度快速增大的情况下,造成的抬升作用持续维持,

从而引发两地出现历史罕见的暴雨及泥石流的发生。小时降水量产品的使用中  $Z-I$  关系参数的选取十分重要,不同季节不同的降水系统  $Z-I$  关系有很大差异。根据统计和经验,温州雷达在台风季节选取热带降水模式的  $Z-I$  关系对降水落区和实际降水量有比较好的吻合。当台风中心进入雁荡山区后,降水主体回波形状发生演变。 $VIL$  大于  $15\text{kg} \cdot \text{mm}^{-1}$ 、 $OHP$  大于  $45\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$  的区域,由螺旋云带集中到了眼壁,主要分布在台风眼前侧偏右,11:10 UTC 至 15:00 UTC 多个强对流单体合并成环型状持续时间达3个半小时;当中心移过雁荡山后,其后部的螺旋带在此地再次加强成为回波强主体,从12日21:30 UTC 至 24:00 UTC 又继续“覆盖”了近3个小时(图7、图8,见彩色附页)。从2004年8月11日20时至14日20时的过程累计雨量(自动气象观测站)来看,浙江省有35个测站出现了200mm以上的降水量,300mm以上的降水有17个测站,其中雨量最大为黄岩的沙埠454mm,其次为仙居的朱溪453mm,温岭的坞根436mm,都出现在台州市。另据水文站的资料统计,温州市的佛头24小时降雨量达到了874.7mm。

蒲公英、环高的垂直累积液态水含量产品( $VIL$ )和小时降水量产品( $OHP$ )与云娜比量值明显偏低, $VIL$  极大值区域在同一地点“覆盖”的时间短,且结构松散(图略)。因此,蒲公英、环高对温州地区未造成大的降水灾害。

## 5 结 语

(1) 强台风具有明显的眼(眼越小强度越强),眼壁和螺旋雨带对流发展旺盛,强台风强度结构完整、紧密。

(2) 台风暴雨的加强与台风气旋性涡旋

本身的动力辐合上升强度趋于一致,反映在速度图上,从低层到中层存在深厚的暖平流及强烈的风向辐合,高层存在气流辐散。中低层弱冷平流的侵入有利于台风云娜的增强和维持。

(3) 台风中层环流稳定维持时,在3km至5km高度层上呈现稳定的低谱宽。

(4) 强降水常出现在台风前进方向的右前侧,强降水落区与垂直累积液态水含量覆盖时间相吻合。相同的垂直累积液态水含量受地形等因素影响“降水效率”差异极大。

综上所述,台风临近时,应用新一代天气雷达提供的各类产品鉴别其回波的特征,监视其演变发展,结合风暴追踪信息,动态分析其移动方向和环流结构,密切关注 $VIL$ 和降水量产品分布情况的变化对判断风台的特性、提供及时准确的临近预报具有重要的积极作用。

## 参考文献

- 1 陈联寿. TC科学讨论会技术总结. TC科学讨论会文集. 北京:气象出版社,1990:1~7.
- 2 陈淑琴,黄辉,赵海林. “威马逊”台风的结构特征. 海洋预报,2004,21(3):9~14.
- 3 苏卫东,杨维生,李建通. 多普勒雷达资料在台风探测中的应用. 台湾海峡,1998,17(4):376~382.
- 4 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. 大气科学(台湾),1994,22:163~187.
- 5 钟卓约,帅方红. 9914号台风多普勒雷达资料分析. 气象,2001,27(7):41~44.
- 6 胡明宝,高太长,汤达章. 多普勒天气雷达资料分析与应用. 北京:解放军出版社,2000:90~118.
- 7 Wood V T, Brown R A. Single Doppler velocity signature interpretation of nondivergent environmental winds. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 1986, 3(1): 114~128.
- 8 钮学新,杜惠良,刘建勇. 0216号台风降水及影响降水机制的数值模拟实验. 气象科技发展论坛. 杭州:浙江省科学技术协会,2004:1~10.

赵放：温州 CINRAD-SA 雷达在正面和临近正面登陆台风中的应用

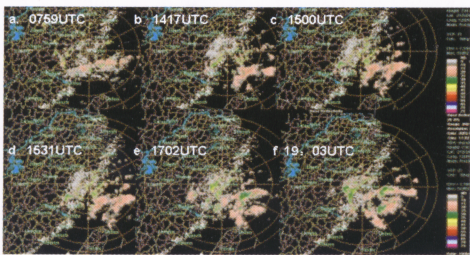


图1 2003年8月19日台风环高基本反射率图(0.5° 仰角)

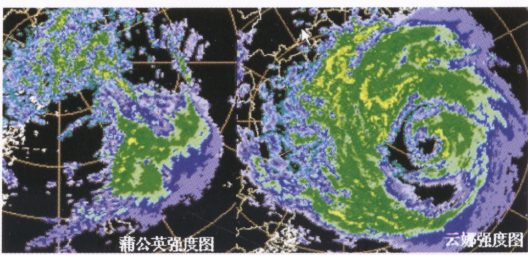
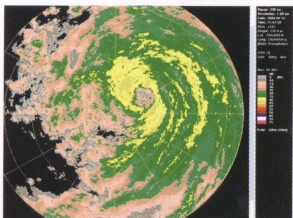
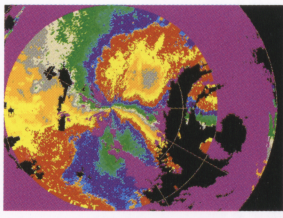


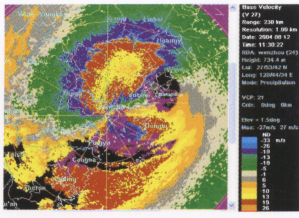
图3 台风蒲公英与云娜强度结构对比



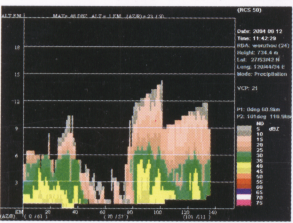
(a) 台风云娜组合反射率强度图



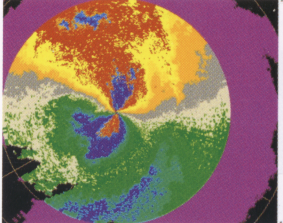
a 07:08UTC (1.5° 仰角)



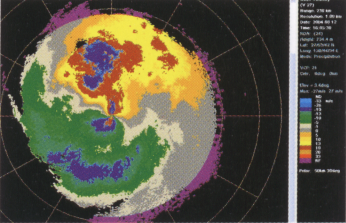
b 11:30UTC (1.5° 仰角)



(b) 台风眼剖面 (左侧为台风移动方向)



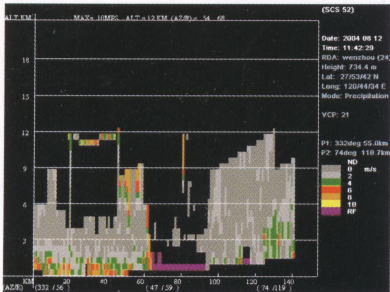
c 16:05UTC (1.5° 仰角)



d 16:05UTC (3.4° 仰角)

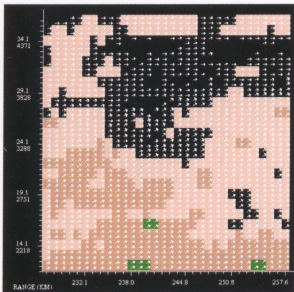
图2 2004年8月12日11:42UTC

图4 2003年8月12日台风云娜径向速度图



台风眼区谱宽垂直剖面

图5 2004年8月12日11:42:29UTC



台风蒲公英中心点的综合谱距产品 (6.0° 仰角)

图6 2003年7月2日18:17UTC

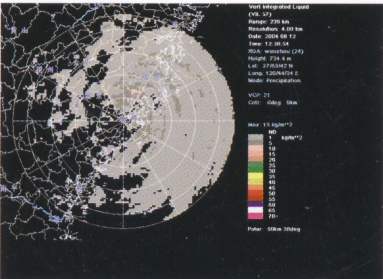


图7 2004年8月12日12:30UTC 台风云娜垂直积分液态水含量

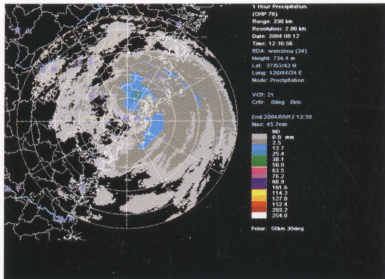


图8 2004年8月12日12:36 UTC 台风云娜1小时降水量产品