

王坚红^{1,2} 肖雯^{1,3} 曹正⁴ 苗春生¹ 张俞⁵

华南前汛期暴雨 C 波段雷达特征应用研究

摘要

运用广州白云机场 C 波段雷达回波强度及径向风资料对华南前汛期强降水过程进行雨带降水估计及其移动特征预测。C 波段雷达在雨量充沛地区的强降水背景下,尽管回波强度被衰减,但是近距离范围内其探测云雨精细化结构的能力较强。所采取的雷达数据质量控制系列处理,能够保留雷达数据原有特征,有效滤去杂波和噪声并缓解雷达低仰角数据杂波多、体扫面上沿径向远近高度差较大的问题,并对降水估测提供了技术保障。最优化雷达 Z-I 强降水估测方法基于单次过程体扫信息,具有计算简洁快速的特点,但是同一体扫面上云状差异对最优化方法参数值比较敏感,混用相同参数,影响降水估测效果。对同一体扫面上雷达云状回波进行区域划分,并选择对应测雨站点,做最优化参数分别确定,有效改善最优化雷达降水估测,提高了 C 波段雷达在机场近距离范围的应用效果。运用雷达体扫时间分辨率高的特点,识别雷达径向风辐合线以及强回波中心位置,并分别应用外推法预测雨带走向、移速等,验证效果良好。

关键词

C 波段多普勒天气雷达;华南前汛期强降水;最优化 Z-I 关系;径向风辐合线

中图分类号 P412.25

文献标志码 A

收稿日期 2014-05-28

资助项目 国家自然科学基金(41276033);国家自然科学基金青年基金(41805033);南京气象雷达开放实验室研究基金(BJG201105)

作者简介

王坚红,女,教授,研究方向为中小尺度天气动力学.1597706505@qq.com

- 1 南京信息工程大学 气象灾害预报预警与评估协同创新中心,南京,210044
- 2 南京信息工程大学 海洋科学学院,210044
- 3 江西省气象服务中心,南昌,330096
- 4 中南空管局 广州白云机场气象台,广州,510405
- 5 华云信息技术工程有限公司,北京,100081

0 引言

目前常用的气象多普勒雷达有 10 cm 波长的 S 波段雷达和 5 cm 波长的 C 波段雷达等。短波长的雷达电磁波易受云雨影响而衰减,但是对于同样半径的降水粒子,雷达波长越短,越容易产生后向散射,更容易探测到弱的气象目标,具有更高的灵敏度。因此短波雷达对近距离的云雨探测更为精细。在气象部门,S 波段雷达多安置在降水频繁降水量大的东南省份,C 波段雷达多用于较为干旱的西北地区,而在航空领域的机场则多使用 C 波段雷达。刘雨佳等^[1]对比了济南 S 波段天气雷达与泰山山顶的 C 波段雷达,显示在降水回波强度偏弱的部位,C 波段雷达能给出较细致的降水特征探测。

在雷达回波降水估测方面,万玉发等^[2]、汪瑛等^[3]和高晓荣等^[4]指出,根据雷达探测的反射率因子强度 Z 值估算降水强度 I,是将 Z 值与 I 值分级,再通过方程配对,这将涉及到分级的动态方法和统计方法。涉及到离散的实际雨量测值与雷达体扫回波面积强度对应,因此存在差异(误差)与不确定性。近年来有许多对基础 Z-I 关系的改善研究。徐芬等^[5]采用分类型最优法建立相应的 Z-I 关系,有效提高了过程雨量和分段雨量的估测能力。张亚萍等^[6]对比分析了天气雷达联合地面雨量计定量降水估测的局地平均校准法和局地分级平均校准法两种方法,结果显示分级方法效果好于平均方法。杨杰等^[7]分析了对流性降水的雷达估测,指出强回波的边缘地区即单点回波强度随时间变化较大的区域,降水估测误差较大,突发的强降水容易造成强回波中心雨量站观测值的显著误差。汪瑛等^[3]还指出雷达回波基于 Z-I 关系进行数学校正法通过卡尔曼滤波、变分校正等不断逼近降水实况使降水估算效果更加理想,但计算相对复杂,消耗的计算机资源较大。这些方法依赖于 Z-I 关系的初始场降水估测,误差小的 Z-I 关系反演的降水初估场能节省这类算法的计算时间并提高计算精度,因此研究误差小的 Z-I 关系法十分必要。目前雷达降水估测改善研究多讨论降水量估测偏低的改善,而降水位置和降水分布的讨论还有待加强。

在降水过程同时刻雷达径向风信息运用方面,王丽荣等^[8]、马秀梅等^[9]进行了雷达径向风数值同化试验,指出同化后的格点风场上,与强降水对应的风向及风速的辐合更清晰,径向风同化对于模式中低层的辐合上升特征描述具有一定贡献,提高了模式对垂直方向上

温度和风速的预报效果. Uyeda 等^[10]和 Hermes 等^[11]利用多普勒雷达速度沿径向减小的区域来表征辐合区,并且指出沿径向的最大速度梯度区为阵风锋的位置,以此来自动识别和追踪阵风锋的运动. Wilson 等^[12]、王福侠等^[13]、王丽荣等^[14]研究了与暴雨对应的径向风辐合线,指出雷达径向风体扫面上有几类中尺度径向风辐合线,它们往往比暴雨灾情提前出现,提前时段在 20~60 min 范围,因此雷达径向风的分析具有降水预报意义.但是雷达径向风辐合线的追踪还存在许多具体技术问题,需要深入分析研究.

本文采用广州白云机场 C 波段雷达回波及径向风资料,应用于华南地区前汛期强降水过程,探讨降水丰沛地区 C 波段雷达信息与强降水过程特征的对应关系,包括雷达回波降水估测动态优化以及强回波带和径向风辐合线对强降水雨带移动的追踪与预测,为我国日益增加的机场所需短时强降水预报和机场 C 波段雷达定量信息应用提供实用参考.

1 资料与方法

1.1 广州白云机场雷达基本信息

广州白云机场的雷达是德国 METEOR 1500 C 波段多普勒天气雷达,位于广州白云机场西北方向 4 km 处,中心经纬度坐标为 113.26°E, 23.40°N. 雷达体扫模式为:1) 自下而上,10 个仰角分别为 0.3°、1.2°、2.8°、5.0°、7.5°、10.5°、14.0°、18.0°、24.0°、33.0°. 提供产品为回波反射率 (dBZ)、径向风速 (V)、谱宽 (W), 时间 255 s. 2) 以 1.2°、2.8° 两个固定仰角值进行两次单仰角扫描过程,每次扫描所需时间约为 30 s,以上两项雷达体扫有效半径均为 125 km,要素项目也相同. 径向数据库个数均为 500, 距离库库长为 0.25 km, 因此扫描半径均为 125 km. 方位角为 360 个,方位角分辨率 1°,体扫面上分辨率为 0.25 km×1°. 其扫描模式示意如图 1 所示. 3) 雷达再次运行一次耗时为 255 s 的体扫,此次 10 个仰角信息改变为 0.3°、1.2°、2.2°、3.4°、5.3°、7.7°、10.6°、14.4°、18.5°、23.8°. 该体扫项目仅有回波反射率强度,体扫有效半径增大到 250 km.

1.2 白云机场 C 波段雷达与广州 SA 雷达对比

广东气象局广州站的 SA 雷达,中心经纬度坐标为 113.36°E, 23.00°N, 位于白云机场雷达站偏东南方向约 45 km 处. 与白云机场德国 METEOR 1500 C 波段多普勒天气雷达相比,广州站 SA 雷达时间分辨率为 6 min, 径向分辨率为 1.0 km, 方位角分辨率为

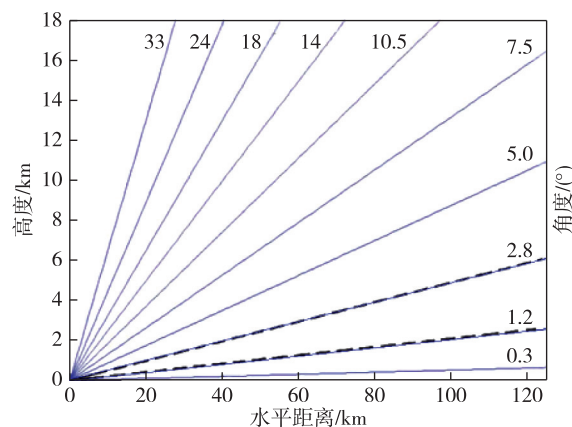


图 1 广州白云机场雷达体扫方案示意
(细实线为多仰角体扫位置,粗虚线为 2 次单仰角体扫位置)

Fig. 1 Radar scanning scheme of Guangzhou Baiyun Airport, thin lines are positions of multi-angle scanning, bold dash lines indicate 2 single scanning positions

1°. 雷达体扫模式的仰角信息分别为 0.5°、1.5°、2.4°、3.4°、4.3°、6.0°、9.9°、14.6°、19.5°, 共 9 层,分辨率为 1 km×1°, 体扫范围在径向上最大距离为 230 km. 对比显示,白云机场 C 波段雷达低仰角的角度更低,高仰角层次更多,体扫面分辨率是 S 波段的 4 倍. 对于对流性单体来讲,能够更好地反演出其低层特征与高层伸展,以及更多结构特征. 图 2 是同一时刻广州站雷达和广州白云机场雷达 0.5° 仰角体扫面反射率强度图. 广州白云机场雷达虽然水平探测范围小于广州站 SA 雷达,但是其分辨率较高. 图中圆线指示出的强回波带(在图 2a 中为圈中红色,在图 2b 中为圈中绿色和黄色),显示出 C 波段对云雨区云结构放大和呈现更多色谱细致分布,说明 C 波段雷达尽管强度有所衰减(S 波段 50 dBZ, 而 C 波段为 40 dBZ),但对强回波细节展示能力更强,用于对流性天气的临近预报预警方面有其优势. 图 2 还显示,白云机场 C 波段雷达低仰角地物杂波明显少于广州站 SA 雷达,这种 C 波段雷达回波特色对反射率数据的质量控制提供了良好的基础.

王丽荣等^[14]指出降水强度越大,反射率因子核心高度越低,建议选取 1.5~3.5 km 为估测降水的最佳高度范围. 本文主要选用低层体扫面数据.

1.3 华南前汛期降水相关资料

本文采用广州白云机场自动雨量计记载的降水资料,以及每日 4 次分辨率为 1°×1° 的全球再分析资料. 资料时间序列为 2009—2011 年 4、5、6 月,资料所用时间体系均为世界时,要素为风场 u 、 v , 气温 T , 比

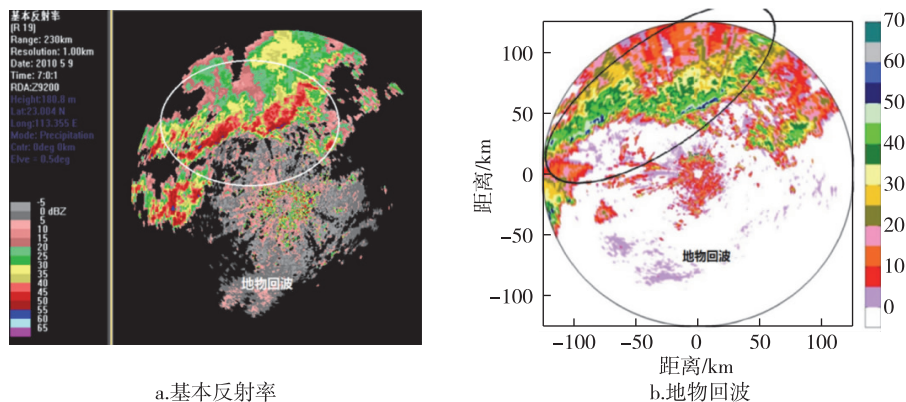


图2 2010年5月9日07:00(北京时间)雷达回波反射率(单位: dBZ)对比
Fig.2 Radar echo intensity at 07:00(BJT) of May 9th,2010 (unit: dBZ)

湿 Q , 位势高度 H 等, 并且在雷达有效扫描范围, 即经度 $112.03^{\circ} \sim 114.47^{\circ}E$ 、纬度 $22.28^{\circ} \sim 24.53^{\circ}N$ 内采用自动站站点降水资料. 自动站站点名称以及其经纬度信息如表 1 所示. 此外还采用了中国自动站与降水产品融合的格点降水资料 CMORPH, 分辨率为 $0.1^{\circ} \times 0.1^{\circ}$.

表 1 广州白云机场雷达体扫范围内的雨量自动站
Table 1 Rainfall gauge stations within Guangzhou
Baiyun airport radar scanning scope

序号	站点	位置	序号	站点	位置
1	韶关	113.8°E 24.8°N	6	东源	114.8°E 23.8°N
2	佛冈	113.9°E 23.9°N	7	增城	113.8°E 23.1°N
3	广宁	112.4°E 23.1°N	8	惠阳	114.4°E 23.1°N
4	高要	112.4°E 23.0°N	9	连平	114.5°E 24.4°N
5	广州	113.2°E 23.2°N	10	深圳	114.1°E 22.5°N

2 雷达回波数据质量控制与处理

2.1 资料质量控制

首先对体扫面上的回波无效数据进行剔除. 依据雷达回波值与降水量的统计关系分析, 小于 5 dBZ 的雷达回波强度对应的降水量很小, 而大于 50 dBZ 强度的雷达回波对应的可能是冰雹等剧烈强对流天气现象, 如果将此类强回波数据转化为降水率, 往往会导致地面降水被严重高估, 因此对这两类数据以及数据中以 -32 代表的无效探测数据和所有的负回波数据均赋值为 0 予以剔除.

其次过滤孤立噪点^[15]. 其方法为对每一个有效回波数据, 检测其周边相邻 8 个回波数据点, 设定阈值为 75%, 如果相邻 8 个回波点中有效回波值的比率不到 75%, 也即少于 6 个, 则视其为孤立点, 予以剔除, 否则保留; 然后对雷达回波沿径向进行中值滤波^[16], 进一步消除噪声和保留气象信息. 在雷达径向方向上进行单向快速中值滑动滤波, 滤波窗口大小为 5.

降水回波与非降水回波在雷达反射率的水平和垂直方向上的结构变化有所不同, 因此, 采用水平反射率结构 (T_h) 和垂直反射率差 (V_d) 对其结构特征进行非降水回波剔除, 其表达式^[17]分别为

$$T_h = \frac{\sum_{j=1}^{N_h} \sum_{i=1}^{N_g} (Z_{i,j} - Z_{i,j-1})^2}{N_g N_h}, \quad (1)$$

$$V_d = \frac{Z_{up} - Z_{low}}{\theta_{low} - \theta_{up}}, \quad (2)$$

式中, i, j 分别为反射率距离库和方位序号, $Z_{i,j}$ 为当前库的反射率值, N_g, N_h 分别为以反射率因子库为中心的扇形窗口的距离库数和方位库数, 均定为 3. 垂直反射率差通常只计算两个最低仰角, 对应同一距离库的上下两个仰角. z_{low} 为低仰角 θ_{low} 的反射率, z_{up} 为较高仰角 θ_{up} 的反射率.

2.2 雷达回波分级

雷达数据的存储形式是以雷达径向距离和方位角来度量的极坐标形式, 而降水数据是以经纬度网格笛卡儿坐标存储, 因此在对雷达信息进行定量提取分析前, 需要将雷达数据插值成笛卡尔坐标格式. 通过最近邻法 (KNN 算法) 插值, 将雷达回波强度数据从极坐标转换到笛卡尔坐标网格上, 原雷达坐

标系分辨率为 $0.25 \text{ km} \times 1^\circ$, 插值后的分辨率为 $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$.

通常认为获取雷达估测降水的回波反射率因子的最佳高度是在雷达以上 $1.0 \sim 1.5 \text{ km}$ 左右, 因此在利用雷达回波估计降水量时, 应由近及远地取一个近距离高仰角和远距离低仰角的混合扫描平面来进行计算, 同时也去除了地物杂波. 选取的混合扫描平面的方案为: $0 \sim 20 \text{ km}$ 范围内取 5.0° 仰角数据, $20 \sim 50 \text{ km}$ 范围取 2.8° 仰角数据, 50 km 以外范围取 1.2° 仰角数据.

进一步地对雷达回波强度进行分级处理^[15], 再次平滑减少噪声, 并形成分级序列便于与降水强度分级序列计算相关性. 此时将某一范围内的回波值均处理成该回波范围的中值, 具体分级处理如表 2 所示. 处理后将回波简化成 $5, 15, 25, 35, 45 \text{ dBZ}$ 5 个等级, 雨带也依照同样的分类方法, 分成 $5, 15, 25, 35, 45 \text{ mm/h}$ 5 个等级. 对雷达回波和雨带简化分级后, 找出相同时刻强回波区域中心点所在坐标以及降水最大值区域的中心点坐标, 求两者之间的相关性.

表 2 回波强度分级情况

Table 2 Simplified grades of the radar echo

回波反射率因子范围	取值/dBZ
(0, 10]	5
(10, 20]	15
(20, 30]	25
(30, 40]	35
(40, 50)	45

经过质量控制和分级处理后的雷达图像和雷达原始回波的对比结果如图 3 所示. 在雷达中心区域

北侧由山脉造成的强地物回波被消除, 回波数据中的孤立点得到了抑制. 强回波带更明显, 各等级回波之间的分界线也更清晰, 雷达回波对降水的指示特征更明确. 因此系统性的质量控制对 C 波段雷达的信息提取和应用提供了技术保障.

2.3 雷达回波估测降水

雷达对降水的估测一般通过 $Z-I$ 关系式, 是雷达反射率因子大小与降雨率之间关系的方程. 一般有:

$$Z = AI^b, \quad (3)$$

其中 Z 表示雷达反射率因子 (度量单位是 mm^6/m^3), I 表示降雨率 (单位是 mm/h).

在实际应用中, 一般在雷达图像中看到是雷达回波强度, 它的单位用 dBZ 来表示, 它与反射率因子 Z 的关系为

$$\text{dBZ} = 10 \log(Z). \quad (4)$$

由两个关系式 (3) 和 (4) 可以得到雷达反射率因子 Z 与降水率 I 之间的关系:

$$I = \exp(\ln(Z/A)/b), \quad (5)$$

式中系数 A 和指数 b 随地区、季节、降水类型、降水性质等变化而变化.

雷达估测降水方法有很多种, 本文对比的是固定 $Z-I$ 关系法和最优化方法. 固定 $Z-I$ 关系法指根据雷达出厂时的设定, 取 $A = 300, b = 1.4$, 即 $Z = 300I^{1.4}$ 对降水进行估测. 在最优化方法中, 采用最佳判别函数式^[5]

$$C_{TF} = \min(\sum_i (H_i - G_i)) \quad (6)$$

来确定 A, b 值的大小. 式 (6) 中 H_i 为雷达估计各个样本的雨强值, G_i 为自动站雨量计测量的雨强值. 不断调整式 (5) $Z-I$ 关系中的参数 A 和 b 值, 直到判别函数 C_{TF} 达到最小值为止, 此时雷达估计值最逼近实测

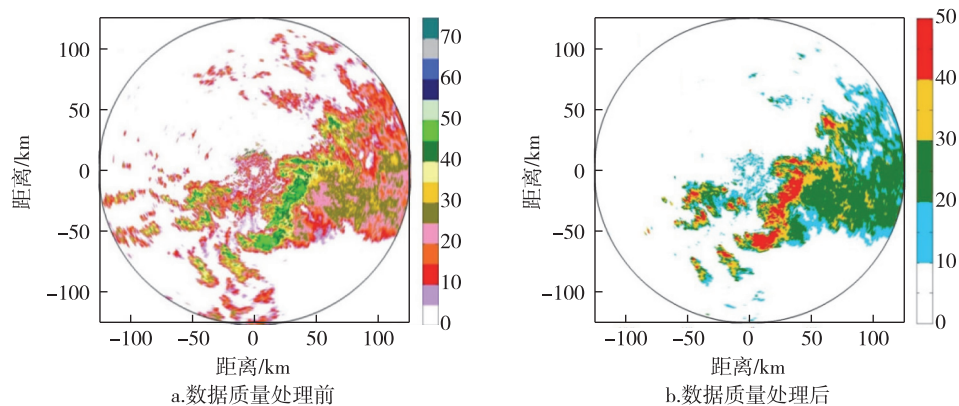


图 3 回波样本质量控制前后的雷达图像对比 (单位: dBZ)

Fig. 3 Comparison of the radar echo images (unit: dBZ) between before and after quality control treatment

值.本项中参数 A 的动态调整范围从 15 到 1 200,步长为 5;参数 b 从 1 到 3,步长为 0.05.其中, H_i 为 $Z-I$ 关系反演降水, G_i 为实测降水, i 为自动站序列.在本研究中,对每个过程所采用的体扫面均进行动态调整,充分运用雨量站的验证信息,获得当前最佳降水回波匹配.

3 华南前汛期强降水过程及雨带雷达特征

对广州白云机场雷达扫描半径 125 km 范围内 2009—2011 年前汛期 4、5、6 月的降水过程进行分析,定义 >16 mm/h 的降水量级为短时强降水,并以此为标准来选择广州白云机场的强降水个例,共获得 11 次强降水过程.这 11 次强降水过程在 850 hPa 上的形势比较接近,主要为副高北侧气旋,而在雷达回波上的反映则表现出层状云降水为主的混合性降水回波、积状云降水为主的混合降水回波、飚线系统回波、超级对流单体回波等几类.

对这 11 次强降水过程进行分析,挑选出具有持续时间长、累计降水量大、影响严重等特点的 3 次强

降水过程,时间分别为 2010 年 5 月 6 日 0—23 时过程累计降水中心强度达到 200 mm,局部地区小时降水达到 50 mm/h 以上;2010 年 5 月 9 日 0 时—10 日 5 时过程持续时间长影响范围大,过程累计降水中心强度达到 120 mm 以上,局部地区小时降水达到 50 mm/h 以上;2010 年 5 月 14 日 0—23 时过程累计降水中心强度达到 160 mm,局部地区小时降水达到 50 mm/h 以上.在影响范围上,9 日的最大,6 日的次之,14 日的略小.3 次强降水过程的 850 hPa 风场及水汽通量散度场形势如图 4 所示.

图 4 显示 3 次强降水过程均为副高西北侧气旋活动,广州处于气旋中心附近,以及水汽通量散度辐合中心附近,有利于强降水活动.环流形势与水汽条件均比较相近.但是 3 次过程广州强降水的具体差异,则由雷达探测提供.雷达回波显示前 2 次过程具有飚线系统回波降水,第 3 次过程属积状云混合降水.对比相应的强降水过程雷达回波强度和降水量分布(图 5),强降水过程的雷达回波大值中心和雨带大值中心相对应,强回波带的形状、大值区形态也

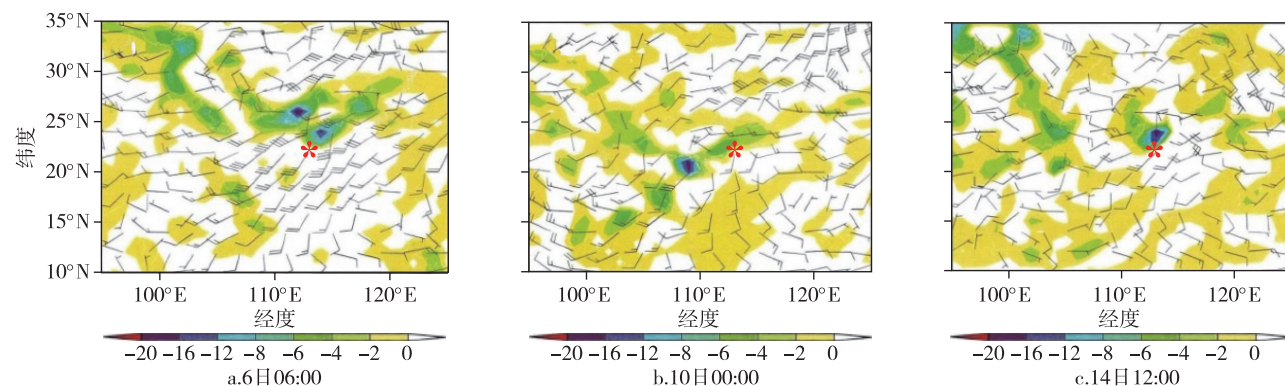


图 4 3 次强降水过程 850 hPa 风场(单位: $m \cdot s^{-1}$)和水汽通量散度(单位: $g \cdot cm^{-2} \cdot hPa^{-1} \cdot s^{-1}$)(星号为广州)

Fig. 4 The 850 hPa wind fields (unit: $m \cdot s^{-1}$) and moisture flux divergence (unit: $g \cdot cm^{-2} \cdot hPa^{-1} \cdot s^{-1}$) of three severe rainfall events, the star indicates Guangzhou

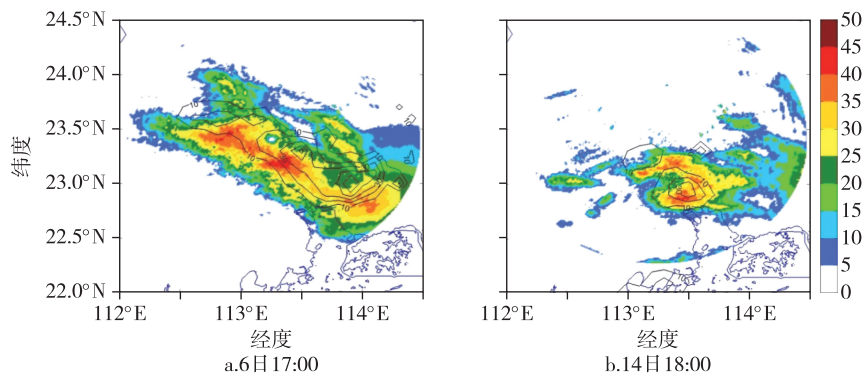


图 5 强降水天气过程中的雷达回波(阴影,单位: dBZ)与降水实况(实线,单位: mm)对比

Fig. 5 Comparison between radar echo (shadow, unit: dBZ) and precipitation (contour, unit: mm) distribution in heavy rainfall processes

都和雨带的形状、大值中心的分布对应,显示在强积状云降水过程中,雷达强回波带的分布和降水强中心的分布有着密切对应关系.环流形势与雷达回波两者配合,提供了多尺度的强降水信息.进一步地,由于自动站降水资料的时间分辨率为1 h,而雷达体扫数据的时间分辨率为10 min,因此可利用高时间分辨率的雷达信息(包括回波强度及径向风特征)估测雨量及推测雨带动态.

4 C波段雷达数据信息提取及应用

4.1 雷达回波估测降水方法对比

在雷达回波质量控制处理之后,利用方程(3)~(6),计算常规降水估测和采用最优化方法动态调整 A 、 b 值得到相应的不同判别函数 C_{TF} ,再取 C_{TF} 最小值时的 A 、 b 值反演不同过程的最优 $Z-I$ 关系.表3给出了3次前汛期强降水过程的最优化 A 、 b 值.3次降水过程的雨量分布以及雷达回波强度特征具各自特点,最优化方法适应这种特点,特别是参考了自动站的降水记录进行动态调整,获得过程“降水-回波”最佳参数.这些系数的值更趋近每次过程实际情况,对回波降水估测将更为合理.考虑到雷达回波敏感于环境因子的影响,基于单次过程,不依托历史统计信息,所以计算简洁快速.

表3 3次强降水过程最优化方法获得的 A 、 b 值

Table 3 Coefficient A , b for three severe rainfall events obtained by the optimization method

降水过程	A	b
2010年5月6日	210	2.60
2010年5月9—10日	285	2.05
2010年5月14日	197	1.55

图6显示了强降水过程2010年5月6日18:00分别采用固定 $Z-I$ 关系和最优化方法对雷达扫描范围内的降水估测,以及估测结果与同时刻降水实况分布的对比.图6a为固定 $Z-I$ 关系的雷达回波降水计算估测结果,图6b为最优化关系法动态调整得到的雷达回波降水估测.图6中彩色色谱表示的是雷达估测降水结果,等值线为实况降水分布.对比图6a和6b,对于雨量,实况降水大值中心达到50 mm/h以上,固定 $Z-I$ 关系的估测降水最大值大约25~30 mm/h,而最优化关系的估测降水最大值可以达到50 mm/h.在降水的空间分布上,固定 $Z-I$ 关系估测的降水位置与实际雨带基本相符,但是范围远小于实况降水范围.而最优化关系方法动态反演估测的降水位置与实况雨带符合较好,尤其是强降水范围和形态,与实况降水对应较好,3个估测大值中心与实况3个大值中心比较接近.因此,最优化方法的雷达降水估测效果更佳.

图7显示了2010年5月9日14:00和2010年5月14日17:00两次降水过程的两种雷达降水估测结果.对于5月9日的估测降水(图7a,7b),最优化方法均优于固定参数方法.不过在此次过程中,最优化方法对9日14:00东南区域的降水量估测偏高,降水大值中心达到50 mm/h以上,而实况的最强降雨强仅有30 mm/h;对西北方位上的降水估测范围也偏大.因此对此时刻的雷达回波进行反查,注意到雷达西北方位的回波属于层状云降水回波(层状云回波范围大,回波分布较均匀,纹理清晰且回波梯度差较小,回波移速小),而东南方位的回波则属于积状云降水为主的回波(回波纹理较杂乱,反射率因子空间梯度大、强度高,回波移速较快).两类回波在降水估测时的 A 、 b 值应有差异.但是在最优化方法计算

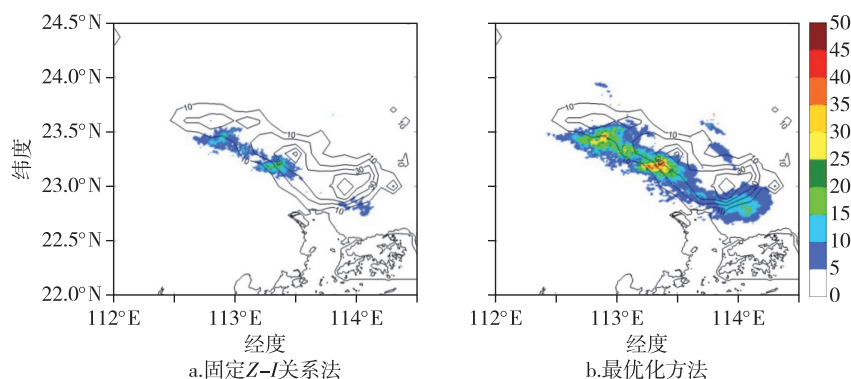


图6 2种方法对5月6日18:00(北京时)小时估测降水(彩色阴影,单位:mm/h)与实况降水(实线,单位:mm/h)对比

Fig. 6 Comparison between the estimated (colored shadow, unit: mm/h) and real precipitation (contour, unit: mm/h) at 18:00 of May 6th

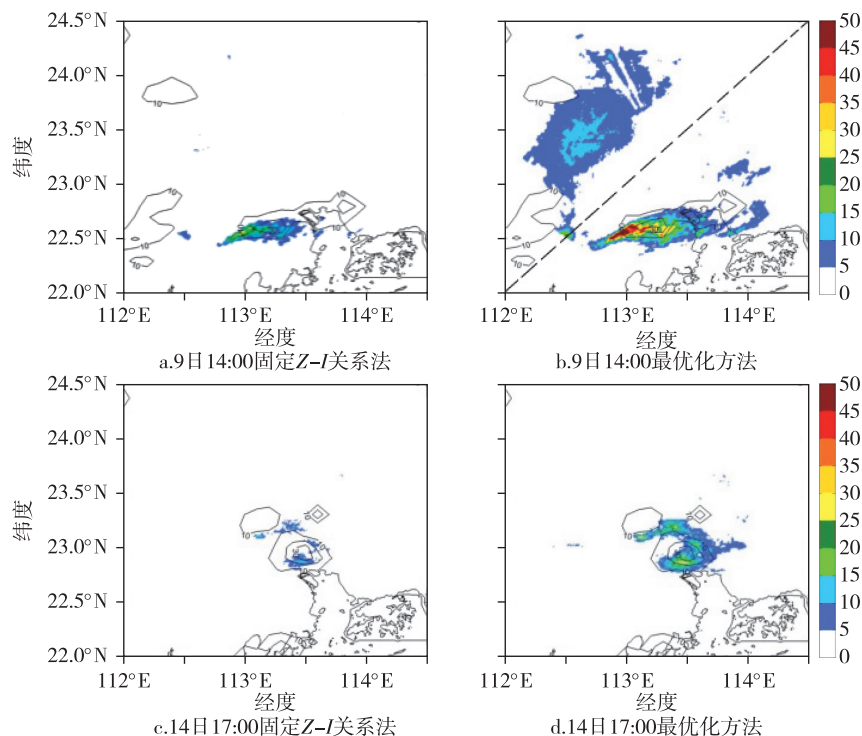


图7 2种方法对5月9日14:00和5月14日17:00的小时估测降水(彩色阴影,单位:mm/h)与实况降水(实线,单位:mm/h)对比

Fig. 7 Comparison between the estimated (colored shadow, unit:mm/h) and real precipitation (contour, unit:mm/h) at 14:00 of May 9th (a,b) and 17:00 of May 14th (c,d)

时,对同一体扫面没有考虑不同属性云状回波的差异,以及两类云体覆盖范围雨量测站的区分,因此得出的 A 、 b 值在此次强降水过程的降水估测出现了某种程度的偏差。

图7c、7d是2010年5月14日17:00降水过程的两种估测方法与实况降水的对比。此次降水过程降水较集中,强度也较大,显然固定 $Z-I$ 关系法的降水估测与实况存在着明显差异,因此固定 $Z-I$ 关系法对降水的估测只能做大致参考。而最优化方法的降水估测较为合理,此时对流性雷达降水回波为主导,因此降水估测的位置、范围和强度与实况符合程度较高。

最优化方法对固定 $Z-I$ 关系法有明显改善,但是若在使用时对同一体扫面上的积云对流回波和层状云回波分别做 A 、 b 参数计算处理,将有利于提高最优化方法的计算质量与效果。尽管对不同云状回波的客观识别比较复杂^[18],但是对5月9日的降水回波,其层状云与对流云各自占据了体扫面的西北半面和东南半面,因此将层状云与对流云按区域划分(图7b中虚线所示),对于对流云的区域,考虑该区域对应的测站降水,再次运用最优化方法,获得

$A=250$ 、 $b=1.2$,则降水强度获得改善,估测最大降水在30 mm/h,与实况接近。而层状云的降水在9日14:00过程中位置与回波梯度对应,而非与回波强中心对应,降水范围小,强度也仅在10 mm/h左右,这类层状云回波的降水估测仍需深入研究。

4.2 雷达回波及径向风雨带移动估测

对分级处理后的强回波带和雨带进行中心坐标信息提取及统计,两者中心位置坐标相关性可达88.9%,显示雷达强回波带和雨带的分布密切相关,但是强回波带的时间变化显著,包括色谱浓淡、范围大小、位置走向等。而在雷达径向风场上,径向风辐合线相对易于辨识,主要表现为径向上风向的流出(正速度)与流入(负速度)相向汇合区,如图8中的黄色框指示的地区,这种辐合线显示的是不同高度上的径向风辐合,并且辐合线走向与径线夹角越大(垂直),则辐合越强。径向风辐合线与局地降水关系密切,追踪径向风辐合线对强降水分析具有实际意义。王福侠等^[13]强调尽管径向风不是真实的全风速,但是径向风辐合线常与局地暴雨或强对流降水对应。

雷达探测数据的时间分辨率为10 min,相比于

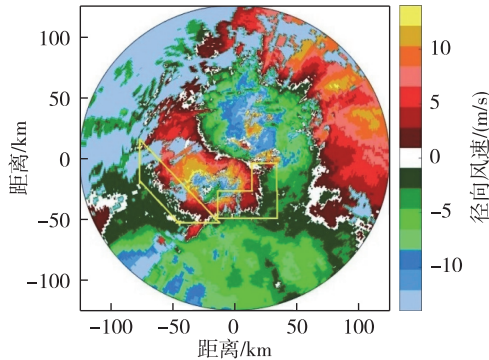


图8 C波段雷达径向风辐合线
(黄色框内为径向风辐合线位置)

Fig. 8 Radial wind convergence lines of C band radar, the yellow frames indicate their positions

降水资料的小时降水(1 h)有着更高精度的时间分辨率,而且雷达数据在空间分辨率上也高于降水资料.通常,在分钟级的过程中,可以利用雷达 10 min 一次的径向风或回波强度资料序列进行雨带特征的等速外推或加速外推预测.

图9为径向风辐合线的外推预测个例.图9a中径向风辐合线位置走向与图6中的相同时刻(18:00)雨带分布对应.图9显示辐合线位移的平均速度是递减的,图9a—9b约30 km/h,图9b—9c约20 km/h,并外推下一时刻约10 km/h(图9c—9d).此外辐合线的移向图(9a—9c)是顺时针的,并外推下一时刻辐合线的走向继续顺时针旋转,将呈现偏南或偏东南(图9c—9d).

另外,提取雷达强回波带中心所在位置,利用相邻时刻的雷达回波资料,对下一时刻的雷达回波带位置进行等速外推或加速外推,得到下一时刻雷达回波带位置的预报,并由此对雨带位置的移动方向、速度进行预测.表4是通过对3次强降水过程的雷达回波带位置计算并利用外推法进行预测后得到的预

测位置与实况降水中的强降水中心位置的相关系数结果.表4显示,2010年5月14日的降水过程预测效果最好,预报的雨带位置与实况强降水中心位置的相关性达到了75.96%,而2010年5月9—10日的相关系数最小,仅为58.83%,5月6日降水过程预报和实况降水中心位置的相关系数也达到了66.93%.显然位置预测效果受到雷达回波降水估测效果的影响.综合回波与径向风辐合线的预测效果,将对临近雨带活动预测提供较可靠的参考.

表4 预报雨带位置与实际雨带位置的相关系数

Table 4 Correlation coefficients between the forecast and real rain belt positions

降水过程	相关系数/%	显著性检验
2010年5月6日	66.93	通过0.01(99%)
2010年5月9—10日	58.83	通过0.01(99%)
2010年5月14日	75.96	通过0.01(99%)

5 结论与讨论

通过对降水充沛地区C波段雷达数据的处理与信息提取,并应用于雷达强降水估测以及雨带分布预测,得出结论如下:

1) C波段雷达在雨量充沛地区的强降水背景下,虽然回波强度易于衰减,但是其探测云雨精细化结构的能力在近距离范围内有其优势.雷达数据质量控制系列处理过程,包括无效回波剔除、去超折射回波、孤立回波点处理、径向快速中值滤波、非降水回波剔除、回波强度分级等,能够保留雷达数据原有特征,有效滤去杂波和噪声.此外采用混合扫描法对雷达体扫数据进行组合,也缓解了雷达低仰角数据杂波多以及体扫倾角造成远近高度差较大的问题.这些对后续依据回波估测降水提供了必要的技术支持.

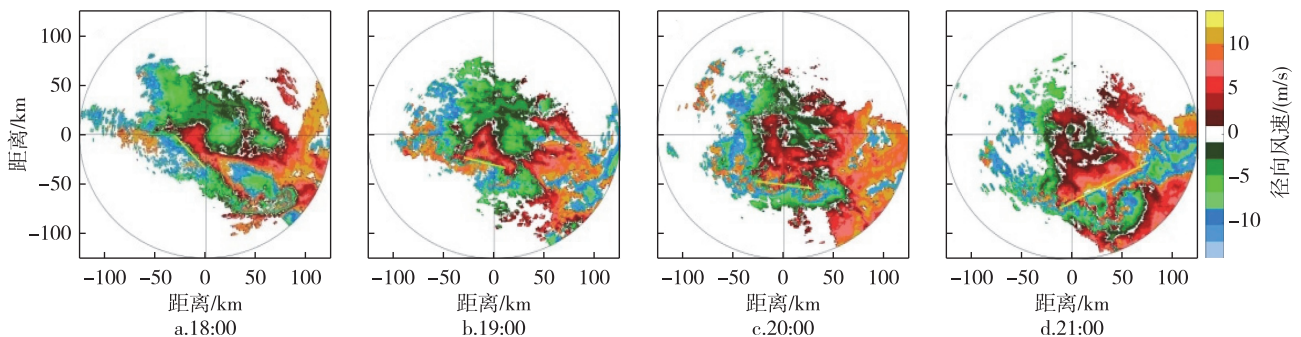


图9 C波段雷达径向风辐合线时间演变(黄色粗实线指示辐合线)

Fig. 9 Evolution of a radial wind convergence line (yellow solid line)

2)最优化雷达 $Z-I$ 强降水估测方法效果良好,优于固定 $Z-I$ 参数方法,并且考虑雷达回波敏感于环境因子影响,此方法基于单次过程,不依赖历史统计信息,具有计算简洁快速的特点.对3次强降水过程的最优化方法估测在位置对应上较好,范围和强度上有一些低估.尤其是同一扫描面上云状差异对最优化方法参数值比较敏感,层状云与积状云混用相同参数,对降水估测效果有影响.因此利用C波段雷达在反映积状云和层状云的差异方面的优势,对同一扫描面上雷达云状回波进行区分,并选择对应降水测站进行最优化参数分别确定,对最优化降水估测具有进一步的改善效果.

3)运用雷达体扫时间分辨率高的特点,识别雷达径向风辐合线以及强回波中心位置,并分别应用外推法预测雨带走向、移速等,验证效果良好.3次强降水过程预测的雨带分布与实况降水中的强降水中心位置相关系数在99%可信度下分别为66.93%、58.83%和75.96%.径向风辐合线与强回波中心位置的外推结合,对临近雨带活动特征预测提供了较可靠的应用参考.

参考文献

References

- [1] 刘雨佳,陈洪滨,朱君鉴.山东省S波段与C波段天气雷达回波强度的对比分析[J].气象科学,2014,34(1):87-95
LIU Yujia, CHEN Hongbin, ZHU Junjian. Comparative analysis of s and C-band radar reflectivity data in Shandong province [J]. Journal of the Meteorological Sciences, 2014, 34(1): 87-95
- [2] 万玉发,王珏,金鸿祥.雷达与雨量计同步结合区域型估算降水方程的误差分析[J].气象学报,2013,71(2):332-343
WAN Yufa, WANG Jue, JIN Hongxiang. Error analysis of the regional radar-raingauge synchronously integrated precipitation estimation equation [J]. Acta Meteorologica Sinica, 2013, 71(2): 332-343
- [3] 汪瑛,冯业荣,蔡锦辉,等.雷达定量降水动态分级 $Z-I$ 关系估算方法[J].热带气象学报,2011,27(4):601-608
WANG Ying, FENG Yerong, CAI Jinhui, et al. An approach for radar quantitative precipitation estimate based on categorical $Z-I$ relations [J]. Journal of Tropical Meteorology, 2011, 27(4): 601-608
- [4] 高晓荣,梁建茵,李春晖.雷达定量降水估计技术及效果评估[J].热带气象学报,2012,28(1):77-88
GAO Xiaorong, LIANG Jianyin, LI Chunhui. Radar quantitative precipitation estimation techniques and effect evaluation [J]. Journal of Tropical Meteorology, 2012, 28(1): 77-88
- [5] 徐芬,慕熙昱,王卫芳,等.分类型最优法在江苏沿江地区降水估测中的应用与讨论[J].气象科学,2013,33(1):51-58
XU Fen, MU Xiyu, WANG Weifang, et al. The application and discussion of classified optimization method on estimating precipitation in the region around Yangtze River in Jiangsu province [J]. Journal of the Meteorological Sciences, 2013, 33(1): 51-58
- [6] 张亚萍,张勇,廖峻,等.天气雷达定量降水估测不同校准方法的比较与应用[J].气象,2013,39(7):923-929
ZHANG Yaping, ZHANG Yong, LIAO Jun, et al. Comparison and application of different adjustment methods for quantitative precipitation estimate by weather radar [J]. Meteorological Monthly, 2013, 39(7): 923-929
- [7] 杨杰,刘黎平,赵城城,等.雷达估测对流性降水的误差空间分布及 $Z-R$ 关系的优化[J].高原气象,2015,34(6):1785-1796
YANG Jie, LIU Liping, ZHAO Chengcheng, et al. Spatial distribution of error from the convective precipitation estimation of radar and optimization of $Z-R$ relationship [J]. Plateau Meteorology, 2015, 34(6): 1785-1796
- [8] 王丽荣,刘黎平,王立荣,等.“09.11.10”石家庄特大暴雪中尺度风场分析[J].气象,2013,39(8):1023-1030
WANG Lirong, LIU Liping, WANG Lirong, et al. Analysis on mesoscale wind field of “09. 11. 10” blizzard in Shijiazhuang [J]. Meteorological Monthly, 2013, 39(8): 1023-1030
- [9] 马秀梅,欧登格力,辛渝,等.C波段雷达在新疆区域数值预报系统中的应用初探[J].沙漠与绿洲气象,2015,9(6):19-26
MA Xiumei, OU Denggeli, XIN Yu, et al. A study of the application of C-band radar observation in numerical forecasting system in the Xinjiang region [J]. Desert and Oasis Meteorology, 2015, 9(6): 19-26
- [10] Uyeda H, Zrnić D S. Automatic detection of gust fronts [J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 1986, 3(1): 36-50
- [11] Hermes L G, Witt A, Smith S D, et al. The gust-front detection and wind-shift algorithms for the terminal doppler weather radar system [J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 1993, 10(5): 693-709
- [12] Wilson J W, Schreiber W E. Initiation of convective storms at radar-observed boundary-layer convergence lines [J]. Monthly Weather Review, 1986, 114(12): 2516-2536
- [13] 王福侠,俞小鼎,王宗敏,等.河北暴雨的多普勒天气雷达径向速度特征[J].气象,2014,40(2):206-215
WANG Fuxia, YU Xiaoding, WANG Zongmin, et al. Characteristics of doppler rader velocity field in severe rainstorms in Hebei [J]. Meteorological Monthly, 2014, 40(2): 206-215
- [14] 王丽荣,胡志群,汤达章,等.多普勒雷达径向速度资料在对流天气预报中的应用[J].气象科学,2007,27(6):695-701
WANG Lirong, HU Zhiqun, TANG Dazhang, et al. An application of doppler radar radial velocities to convectonal weather forecast [J]. Scientia Meteorologica Sinica, 2007,

- 27(6):695-701
- [15] 肖雯.华南前汛期暴雨过程 C 波段天气雷达信息特征研究[D].南京:南京信息工程大学,2014
XIAO Wen.Research on characteristics of the heavy rainfalls in south China with C-band weather radar[D].Nanjing:Nanjing University of Information Science & Technology,2014
- [16] 崔哲虎,程明虎,乌秋力,等.快速中值滤波方法及其在 Doppler 雷达资料处理中的应用[J].高原气象,2005,24(5):727-733
CUI Zhehu, CHENG Minghu, WU Qiuli, et al. A technique of fast median filtering and its application to data quality control of doppler radar[J].Plateau Meteorology,2005,24(5):727-733
- [17] 冷亮.天气雷达降水回波与非降水回波识别研究[D].南京:南京信息工程大学,2011
LENG Liang.Study on precipitation echo and non-precipitation echo recognition of weather radar [D].Nanjing:Nanjing University of Information Science & Technology,2011
- [18] 韩文字,杨丽丽,杨毅.C 波段雷达资料在强降水过程中的应用[J].干旱气象,2016,34(1):154-162,172
HAN Wenyu, YANG Lili, YANG Yi. Application of C-band weather radar data in heavy precipitation process [J]. Journal of Arid Meteorology, 2016, 34 (1): 154-162, 172

Characteristics of C-band weather radar and application on heavy rainfall estimation in the first flood season of South China

WANG Jianhong^{1,2} XIAO Wen^{1,3} CAO Zheng⁴ MIAO Chunsheng¹ ZHANG Yu⁵

1 Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of

Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044

2 School of Marine Sciences, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044

3 Jiangxi Meteorology Service Center, Nanchang 330096

4 Meteorological Station of Guangzhou Baiyun Airport, Central South Air Traffic Control Bureau, Guangzhou 510405

5 Huayun Information Technique & Construction Inc., Beijing 100081

Abstract Based on the C-band radar echo intensity and radial wind data of Guangzhou Baiyun Airport, the precipitation amount estimation and the rain belt moving prediction are carried out for the heavy precipitation process in South China during the first flood season. In the strong precipitation background of abundant rainfall areas, the C-band radar has better ability to detect cloud rain refinement structures, although the echo intensity is attenuated. The radar data quality control processing can preserve the original characteristics of the radar data, effectively filter out clutter and noise, and alleviate the problem that the radar data has many clutter at low elevation angle scanning surface and the altitude difference along radial direction. The data processing provides a technique support for precipitation estimation. The optimized radar *Z-I* precipitation estimation method is only based on information of each scanning procedure, so its calculation is simple and fast. However, the cloud type difference on the same scanning surface is sensitive to the parameter values of the optimization method, when the same parameters are used in different clouds that will affect the estimation effect of precipitation. By separating areas of the radar cloud echoes on the same scanning surface and selecting rainfall stations, the optimization parameters can be determined according to different cloud echoes, which can improve the optimal radar precipitation estimation. According to the short characteristics of radar scanning time, the radar radial wind convergence line and the strong echo center position are identified, and the extrapolation method is used to predict the rain belt orientation, position and moving speed. The verification effect is good.

Key words C band Doppler weather radar; heavy rainfall during the first flood season in South China; the optimal *Z-I* relationship; convergence line of radial wind