

山西地区 C 波段新一代天气雷达 (CC) 联合雨量计降水效果对比与分析

曾正茂^{1,2}, 刘黎平²

(1. 成都信息工程大学电子工程学院, 四川 成都 610225; 2. 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: 雷达联合自动站进行降水估测是当前气象现代化业务应用的重要方向。使用山西 4 部 C 波段雷达 (CC) 和高密度的地面雨量计资料, 结合覆盖山西省的 3 次降水过程, 评估和分析山西区域范围内雷达定量降水估测精度, 并与南方 SA 雷达降水估测结果进行对比分析, 结果表明: (1) CC 雷达估测北方降水时, 不同的降水过程, 采用单一动态 $Z-R$ 关系拟合方案和云团 $Z-R$ 关系拟合方案评估结果基本一致, 而 SA 雷达估测南方降水在不同降水过程却有较大的差距, 相比单一动态 $Z-R$ 关系拟合方案, 云团 $Z-R$ 关系拟合方案平均偏差提高 5 % 左右, 平均绝对误差和均方根误差降低了 3 %, 平均相关系数由 0.83 提高到 0.86。因此, 南方地区采用云团 $Z-R$ 关系拟合方案进行 QPE 的误差分析, 取得较好的结果。(2) 在弱降水过程中, 采用云团 $Z-R$ 关系拟合方案和单一动态 $Z-R$ 关系拟合方案的评估结果基本接近, 没有太大的改善; (3) 对于混合性降水过程, 相比相对单一的动态 $Z-R$ 关系拟合方案, 云团 $Z-R$ 关系拟合方法可以更加有效地实时反映降水观测资料的时空分布特征, 这是提高雷达 QPE 精度的另一个重要原因, 这在南方地区的评估中较为显著。

关键词: 气象探测技术; 雷达气象; 定量降水估测; 单一 $Z-R$ 关系拟合; 云团 $Z-R$ 关系拟合

中图分类号: TN959.4

文献标志码: A

0 引言

近年来, 随着灾害天气的频繁发生, 新一代天气雷达三维组网拼图数据提供的高时空分辨率信息, 在暴雨、洪水、台风等灾害性天气的短时临近预警预报中发挥着越来越重要的作用。

多普勒天气雷达能大范围、实时估计雷达扫描范围内各点的雨强和一定区域上降水量的分布, 并且可以及时获取大面积定量降水资料^[1]。利用雷达进行降水估测, 关键的技术包括: 数据质量控制、回波强度的提取方法、 $Z-R$ 关系的确定、自动站和回波强度拟合 $Z-R$ 关系、利用雨量计数据进一步订正雨量等。虽然利用雷达定量观测降水是一个非常传统的研究课题, 但因涉及因素比较多, 目前还有很多问题需要研究, 降水估测的效果与雷达数据的质量、雨量计分布、降水类型等相关, 同时降水估测的方法也会变化。

早期传统的降水估测方法主要是基于单部雷达联合雨量站进行降水估测, 其方法主要有: Barnes 客观分析法, 距离校准法, 区域校准法, 以及后来逐渐的加入一些相对复杂的分析方法, 如变分法、卡尔曼滤波法, 克里金法和最优插值法等来确定权重系数。不管是采

用何种降水估测的方法, 主要的目标是降低降水估测的误差, 这也是雷达在洪灾、旱涝监测预报中至关重要的问题。为此利用雷达进行降水估测的效果评估是极其重要的。张培昌等^[2]利用武汉中心气象台的 WSR-81S 型雷达, 经使用变分法校准后, 雷达估测降水精度有所提高, 其相对平均误差在 20 % 左右; 戴铁丕等^[3]利用武汉中心气象台的 WSR-81S 型雷达, 采用距离加权法校准雷达测定区域的降水量, 其改善雷达测量降水的精度程度在 20 % ~ 26 %; 李建通等^[4]利用湖南省气象台 713 天气雷达, 将最优插值法引入雷达联合雨量站估测降水, 雨量计密集的地区降水精度的最大误差为 13.1 %, 比原有的变分法测量降水量效果更好; 林炳干等^[5]使用江苏气象台 713 天气雷达, 采用变分校准法进行雷达-雨量计联合估测降水量, 所测降水量的平均相对误差达到 3.9 %; 官莉等^[6]使用安徽合肥 SA 天气雷达, 采用统计权重集成方法进行降水估测效果的评估, 其得到的误差标准差比未集成分析时要低; 赵坤等^[7]使用阜阳地区 SA 天气雷达, 采用自适应卡尔曼滤波方法进行雷达精度的分析, 其相关系数平均值提高到 0.9, 平均相对均方根误差低于 35 %, 因此使用该方法进行降水校正, 取得一定的效果。黄小玉等^[8]使用长沙地区 SA 天气雷达, 采用漂移克里金法进行雷达联合雨量站的降水估测, 其估测值具有最

小的平均偏差和最小的标准差,提高了降水估测的精度;李健通等^[9]使用合肥地区 SA 天气雷达,采用分步校准法进行区域降水量估测,其估测精度的稳定度较好;东高红等^[10]使用天津地区 SA 天气雷达进行了雷达联合雨量站估测降水的相关性分析,讨论雨量站密度对校准效果的影响;张亚萍等^[11]使用重庆地区 SA 天气雷达对降水估测不同的校准方法进行了对比分析,表明局部地区分级平均校准法较为适合强降水的估测。以上对定量降水估测方法的改进,主要是针对地面固定的单部 SA 雷达,而单部雷达观测时存在很多局限,例如:探测范围小、静锥区、波速遮挡、波束展宽等,因此肖艳姣等^[12]分析单步雷达观测的局限性,同时提出采用雷达组网能很大程度改善这些问题。肖艳姣等^[13]依据混合扫描的策略选取最低有效的混合反射率因子,可以减小雷达波束受地物遮挡影响,提高雷达降水估算精度。肖艳姣等^[14]利用武汉地区 S 波段新一代天气雷达反射率因子数据中亮带自动识别和抑制的算法,降低了雷达反射率因子数据中零度层亮带污染对雷达降水估测的影响。吴翠红等^[15]利用武汉地区 S 波段新一代天气雷达回波强度垂直廓线来订正地面降水的技术,这对提高雷达定量估测降水有着积极的意义。赵果等^[16]指出传统的 $Z-R$ 关系有很多误差,其中最主要的误差是 $Z-R$ 关系随着雨滴的变化而变化,分析了不同区域雨滴的分布不同,通过本地区的雨滴谱的数据能计算出本地区的降水强度,从而提高降水估测的精度。上述的研究主要是基于单部雷达降水估测精度影响因素的整体上分析,然而针对雷达组网的三维数据进行降水估测效果分析较少。杨杰等^[17]利用浙江省 6 部 S 波段新一代天气雷达研究了混合扫描回波强度与地面雨量的关系,根据不同区域分析影响基于雷达三维组网拼图的降水估测精度几个因素,同时用部分自动站订正雷达估测降水,从而在一定程度上缓解降水估测的精度。勾亚彬等^[18]利用浙江省 6 部 S 波段新一代天气雷达研究雷达反射率因子垂直廓线(VPR)特征,分析了不同类型的降水过程中定量降水估测的误差,同时采用最优插值法校准动态 $Z-R$ 关系,从而有效降低了雷达定量降水估测的系统误差,提高了降水估测精度;勾亚彬等^[19]使用浙江地区 6 部 SA 天气雷达,分析对比单一动态 $Z-R$ 关系、简单分组 $Z-R$ 关系和云团分组 $Z-R$ 关系拟合方案对降水估测的优劣,云团分组 $Z-R$ 关系拟合方案比其他两种拟合方案得到较优的降水估测精度。上述的研究主要是针对 S 波段新一代天气雷达对南方大范围降水进行降水估测精度分析,且效果较好,而对于 C 波段新一代天气雷达在山西地区小范围降水进行降水估测精

度分析还较少。山西地区的整体降水空间分布从东南向西北递减,由盆地向高山递增的趋势,全年的降水量为 600 mm 左右。因此,利用 C 波段新一代天气雷达进行山西地区的降水估测效果分析是十分有必要的。

在中国气象科学研究院的雷达三维组网拼图处理软件基础上构建雷达定量降水估测(quantitative precipitation estimation, QPE)算法,利用山西的 C 波段新一代天气雷达数据和自动站数据,分析了现有不同 $Z-R$ 关系拟合方案在北方降水估测的效果,与南方的 SA 雷达降水估测效果进行对比,分析产生这种差别的原因,且分析不同降水估测方法的差异。

1 数据资料及方法

1.1 研究区域及雷达资料

山西省地处太行山之西,西依吕梁山、南靠黄河,北依古长城,与河北、河南、陕西、内蒙古等省区为界。全省轮廓呈东北斜向西南的平行四边形,地势东北高西南低,四周被海拔 1000 ~ 3000 m 的山脉所围绕,盆地内部地势低矮,海拔仅在 330 ~ 1000 m,这是不同类型降水天气过程较为丰富的地带,也是山西省最为重要的经济活动中心。

如图 1 所示,山西省 4 部 C 波段新一代天气雷达最大探测距离(黑色距离圈)可以覆盖大部分区域,但在西北和西南方向探测存在盲区,以及 4 部雷达重叠探测区域较少,以致三维组网拼图得到的混合反射因子的精度会较低,同时因复杂的地形,使得天气雷达的遮挡效应较严重。特别是较低高度层因雷达波束遮挡效应造成的观测资料空白。

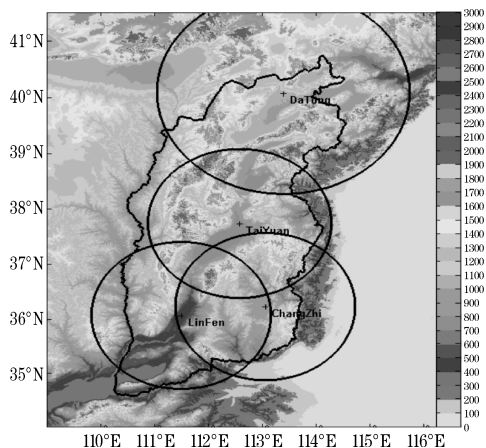


图 1 山西省的数字高程图(DEM)及雷达站点分布图(图中标出各雷达的最大探测距离圈)

如表 1 所示,山西地区采用的雷达都是 C 波段的,因雷达的参数设置不同,虽然最大探测距离有所差距,但体扫数据的时间分辨率都为 6 分钟。从表中的雷达最大探测距离可以看出,山西省的雷达站网,可以有效地监测山西地区的各类天气过程。

表 1 山西省的多普勒雷达站点				
站点名称	雷达型号	海拔高度/m	有效探测距离/km	径向分辨率/m
太原	CC	817	150	250
大同	CB	1096	200	500
长治	CC	1027	150	250
临汾	CC	484	150	250

1.2 地面雨量计资料

地面雨量计的数据采样分辨率为 1 min,平均空间间隔在 10 km 左右,测量雨量的分辨率为 0.1 mm。如图 2a 所示,山西地区的总体面积为 15.6 万平方公里,目前山西省境内已布设了雨量计站点为 1579 个,对比图 1 知,山西地区地形复杂,地势东北高西南低,因此,南部和中部的雨量计分布较密,北部因多高山,则雨量计的分布较疏。如图 2b 知,浙江地区的总体面积为 10.2 万平方公里,已布设了 2047 个雨量计站点,与山西地区相比,浙江地区的整体雨量计分布较为密集。

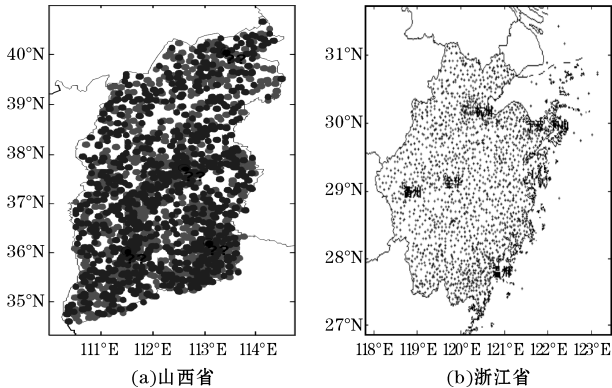


图 2 山西省和浙江省雨量计空间分布和数据划分

1.3 数据案例

山西省全省年降水量在 400 ~ 650 mm,但季节分布不均匀,夏季 6 ~ 8 月是降水高度集中且多暴雨的季节,降水量约占全年的 60 % 以上。降水的空间分布集中在南部地区,层显出明显的南多北少的趋势。考虑到山西省降水空间分布特点,将山西省的降水类型大致划分为弱降水过程(个例 1)、以层状云为主的混合性降水(个例 2)和以对流云为主的混合性降水(个例 3)。

表 2 2012 年 3 次影响山西地区的 3 次过程			
案例过程	起止时间(世界时)	时次总数	降水过程形势特征
个例 1	7 月 8 号 6 时 ~ 7 月 9 号 12 时	300	持续的时间为 30 个小时,其最大的降水量为 400 mm 左右
个例 2	7 月 21 号 4 时 ~ 7 月 21 号 10 时	60	降水持续的时间为 6 个小时,其最大降水量在 400 mm 左右
个例 3	7 月 30 号 4 时 ~ 7 月 31 号 3 时	230	降水持续时间为 23 个小时,其最大的降水量在 600mm 左右

为与南方 SA 雷达降水估测的效果对比分析,选取浙江地区 6 部 SA 雷达 3 次较为典型的降水过程,分别为 2012 年 06 月 22 日 02 点 00 分 ~ 2012 年 06 月 24 日 12 点 00 分的层状云降水(个例 4),2012 年 07 月 14 日 06 点 00 分 ~ 2012 年 07 月 15 日 12 时 00 分的以层状云为主的混合性降水(个例 5),2012 年 08 月 07 日 01 点 00 分 ~ 2012 年 08 月 09 日 24 时 00 分的以对流云为主的混合性降水(个例 6)。

2 降水估测方法和效果评估方法

2.1 雷达-雨量计联合 QPE 方案

雷达-雨量计联合 QPE 方案,采用先雷达组网拼图再降水估测的方式,联合雷达组网混合反射率因子数据场和逐分钟雨量计观测资料,集成 Z-R 关系拟合和最优插值校准 2 个算法环节。其中,最优插值法^[20]参照(1)式,校准 Z-R 关系反演得到的雷达 QPE 初始场。

$$R^a_{(k,l)} = R^r_{(k,l)} + \sum_{i=1}^N P_i (R^r_i - R^g_i) \tag{1}$$

(1)式中, $R^r_{(k,l)}$ 为格点坐标 (k,l) 上的雷达初始估测雨量; $R^a_{(k,l)}$ 为校准后的雷达估测雨量; R^g_i 和 R^r_i 分别是格点坐标 (k,l) 周围第 i 个雨量计的观测雨量和对应的雷达初始估测雨量, P_i 为二者均方差最小意义下的权重系数。根据(1)式,最优插值法根据雷达 QPE 初始场和雨量计观测雨量之间的差异,分析和计算新的 QPE 数据场;经最优插值校准后的降水估测误差,既和与校准使用的雨量计数量有关,又与雷达 QPE 初始场的精度有关。

由于雷达 QPE 初始场的重要性,目前采用两种不同的 Z-R 关系拟合方案,这两种方案分别与最优插值相结合,可以得到两种不同的雷达-雨量计联合方案:

单一动态 Z-R 关系拟合方案:在雷达回波覆盖范

围内,利用实时拟合 $Z-R$ 关系的一般关系式 $Z = AR^b$, 进行每个时次仅拟合一个 $Z-R$ 关系,并使用同一个 $Z-R$ 关系拟合反演地面降水信息。

云团分组 $Z-R$ 关系拟合方案:先将雷达回波划分为不同的云团,再将不同云团按回波强度划分为不同的分组,不同云团的不同数据分组内分别拟合和反演雷达降水估测初始场。基本步骤为:(1)回波分团。设置初始反射率因子阈值(15 ~ 20 dBz),使用风暴单 体识别多阈值段识别算法,进行雷达回波分团。(2)回波分组。在同一个云团内部,采用逐步增大反射率 因子阈值(5 dBz)的方式,根据新阈值识别区分不同回 波强度的降水区域。(3) $Z-R$ 关系拟合。在不同降水 云团的不同分组内,分别拟合对应的 $Z-R$ 关系及反演 地面降水信息。

2.2 评估方案

为客观地评估对比不同 $Z-R$ 关系方案的雷达 QPE 的效果,首先在图 2 中将覆盖山西省的 1579 个雨 量计按照所在经纬度格点的奇偶性,划分为两个相对 均匀的部分:黑色标识的站点 790 个(数据集 I),灰色 标识的站点 789 个(数据集 II)。采用数据集 I 进行 $Z-R$ 关系的拟合和累积 1 小时的降水量,用数据集 II 进 行评估雷达 1 小时 QPE。数据集 I 和数据集 II 相互独 立与互不干扰,因而可以保障雷达 QPE 效果评估对比 结果的客观性。采用偏差比率(Ratio)、平均绝对误差 (MAE)、均方根误差(RMSE)和相关系数(COR),并 结合雨量计数据集 I 和数据集 II 评估分析雷达 1 小时 QPE 数据,进行交叉评估验证。

Ratio = \sum_i^n R_i / \sum_i^n G_i \tag{3}

MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |G_i - R_i| \tag{4}

RMSE = \sqrt{\sum_i^n (R_i - G_i)^2 / n} \tag{5}

COR = \frac{\sum_i^n (R_i - \bar{R})(G_i - \bar{G})}{\sqrt{\sum_i^n (R_i - \bar{R})^2 \sum_i^n (G_i - \bar{G})^2}} \tag{6}

其中 G_i 为自动站的观测雨量, R_i 对应上空雷达小 时降雨量, \bar{R} 和 \bar{G} 分别为雷达估测和自动站估测雨量 的平均值。考虑到较小观测雨量对评估平均值得影 响,仅使用大于 0.1 mm 的雨量计估测雨量评估雷达 1 小时 QPE,且评估使用的雨量计数量应大于 10,是评 估的结果具有代表性。

根据上述 4 个评估标准,统计不同 $Z-R$ 关系拟合 方案在不同天气过程中的误差评估结果,若 Ratio 在 1

附近,说明该方案的雷达 1 小时 QPE 对估计面雨量误 差越小;若 MAE 和 RMSE 越小,相应方案的雷达 1 小 时 QPE 的局部误差越小;若 COR 越接近 1,相应方案 的雷达 1 小时 QPE 和雨量计实际观测值之间具有更 高的相关性和一致性。

3 效果评估对比与分析

3.1 综合对比分析

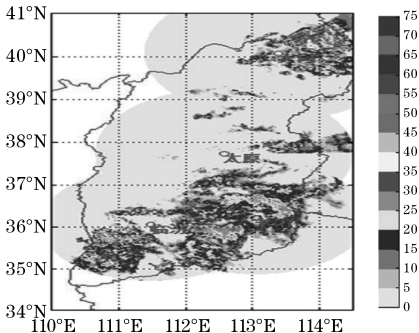
参照第 2 节的误差评估方法,使用黑色雨量计观 测雨量进行雨量校准订正,同时使用灰色雨量计观测 雨量评估,分别评估这 3 次天气过程中(表 3)。

表 3 山西地区雷达 1h 定量降水估测的综合评估					
降水 过程	不同降水 估测方法	评估结果平均值			
		Radio	MAE	RMSE	COR
个例 1	单一动态 $Z-R$ 关系拟合	0.86	1.13	1.67	0.60
	分团 $Z-R$ 关系拟合	0.89	1.13	1.63	0.61
个例 2	单一动态 $Z-R$ 关系拟合	1.00	1.24	1.94	0.75
	分团 $Z-R$ 关系拟合	0.93	1.14	1.78	0.78
个例 3	单一动态 $Z-R$ 关系拟合	0.91	1.29	1.88	0.67
	分团 $Z-R$ 关系拟合	0.90	1.23	1.78	0.68

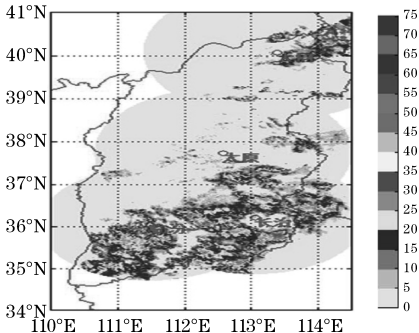
由表 3 可以看出,采用单一 $Z-R$ 关系拟合方案和 分团 $Z-R$ 关系拟合方案进行定量降水估测评估,单一 动态 $Z-R$ 关系拟合方案的结果为:比率偏差 0.92,平 均绝对误差 1.22,均方根误差 1.83,相关系数 0.67;分 团 $Z-R$ 关系拟合方案的结果为:比率 0.91,绝对平均 误差 1.17,均方根误差 1.53,相关系数 0.69。两种不 同的方案对个例 1、个例 2 和个例 3 这 3 个降水过程进 行降水评估可以看出,个例 1 相比个例 2 和个例 3 的 比率偏差较低,而 3 个降水过程的绝对平均误差都在 1.2 左右,均方根误差在 1.8 左右,相关系数在 0.7 左 右。

根据表 3 的综合评估知,3 次不同降水过程中,采 用云团分组 $Z-R$ 关系拟合方案比单一 $Z-R$ 关系拟合 方案评估效果有所提高,但是并不是很明显。图 3(a) 和 3(b) 所示雷达回波强度值在 25 dBz 左右,且从 图 3(c) 知雷达 1 小时的降水量在 5 mm 以下,且降水 的范围较小。同时由图 4(a) 可以看出,回波强度在 0 ~ 20 dBz 所占的比例大概为 77 % 左右,一般认为回波 强度在 20 dBz 以下的不构成降水信息,而回波强度在 20 ~ 30 dBz 所占的比例是 22 % 左右,且由图 5(a) 知, 降水强度在 0 ~ 5 mm/h 所占的比例达到 93 %,因此该 过程的降水信息大多是由弱回波造成的,且降水强度

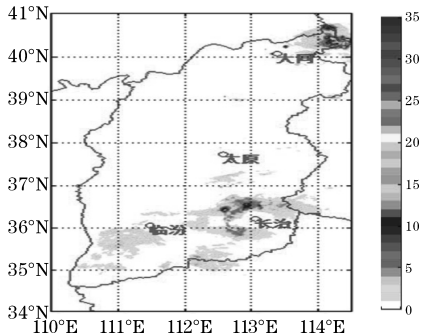
较低,所以此过程为弱降水过程;弱降水过程中,采用单一 $Z-R$ 关系拟合方案和分团 $Z-R$ 关系拟合方案对评估 QPE 的效果并不明显;图 6(a)和 6(b)所示,雷达的混合反射率因子的值在 40 dBz 左右,且从图 6(c)知雷达 1 小时的降水量在 10 mm 以下。同时由图 4(b)可以看出,回波强度在 0 ~ 20 dBz 所占的比例为 55%, 20 ~ 30 dBz 所占的比例为 32%, 30 ~ 40 dBz 所占的比例为 9%, 且由图 5(b)知,降水强度在 0 ~ 5 mm/h 所占的比例达到 85%, 因此该过程的降水信息主要由弱回波和较强回波造成,且降水过程中有较大过程的降水量,所以此过程为混合性降水;图 7(a)和 7(b)所示,雷达的混合反射率因子的值在 30 dBz 左右,且从图 7(c)知雷达 1 小时的降水量在 5 mm 左右,同时由图 4(c)可以看出,回波强度在 0 ~ 20 dBz 所占的比例是 54%, 20 ~ 30 dBz 所占的比例为 39%, 30 ~ 40 dBz 所占的比例 7% 左右,且由图 5(c)知,降水强度在 0 ~ 5 mm/h 所占的比例达到 87%, 因此该过程的降水信息也是由弱回波和较强回波强度造成,所以此过程也是属于混合型降水过程。个例 2 和个例 3 这两个过程属于混合性降水,采用单一 $Z-R$ 关系拟合方案和分团 $Z-R$ 关系拟合方案在比率偏差和相关系数上并没有多大的改善,而在绝对平均误差和均方根误差上有相对的改善。



(a) 14 时 00 分混合反射率因子

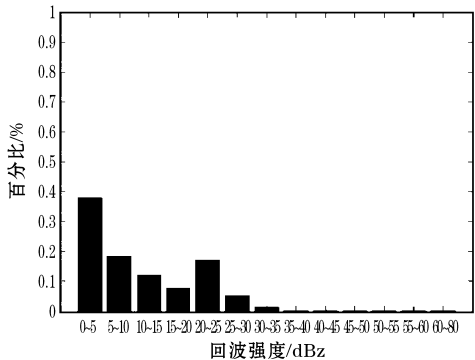


(b) 15 时 00 分混合反射率因子

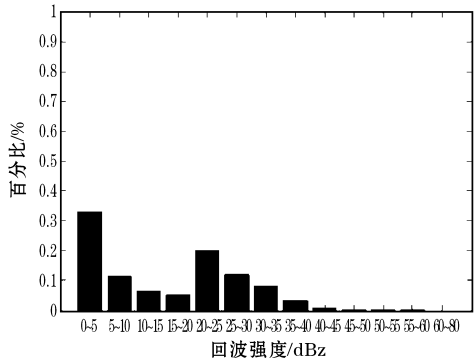


(c) 15 时 00 分雷达 1 小时定量降水估测向量

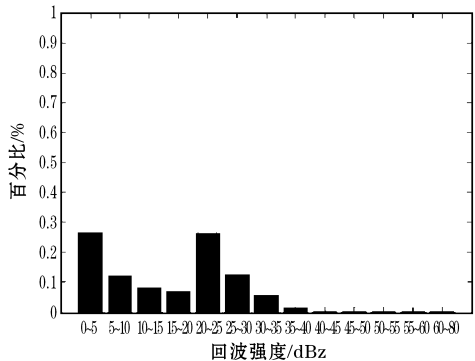
图 3 2012 年 7 月 8 日组网混合扫描反射率因子以及雷达 1 小时定量降水估测雨量



(a) 个例 1

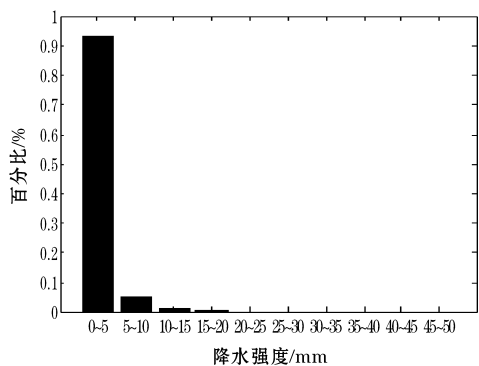


(b) 个例 2

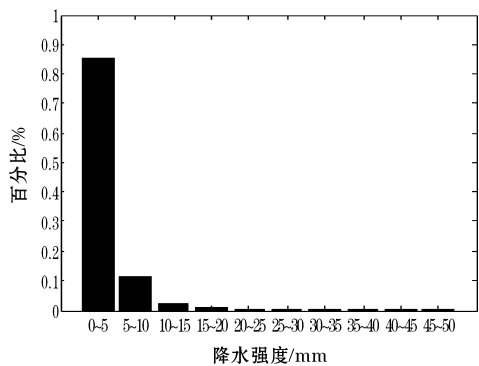


(c) 个例 3

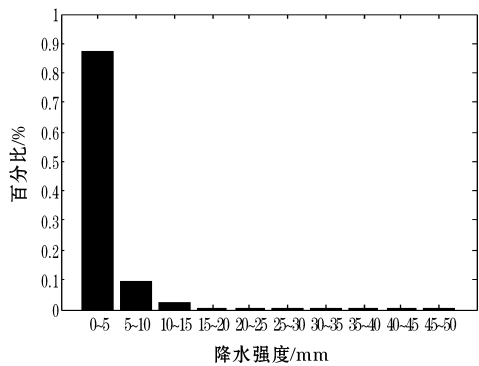
图 4 个例 1、个例 2 和个例 3 的降水过程回波强度分布



(a) 个例 1

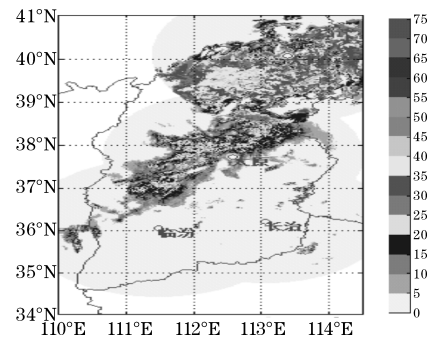


(b) 个例 2

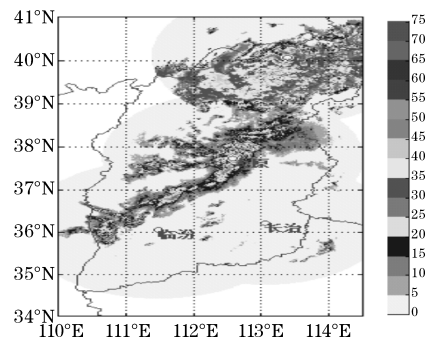


(c) 个例 3

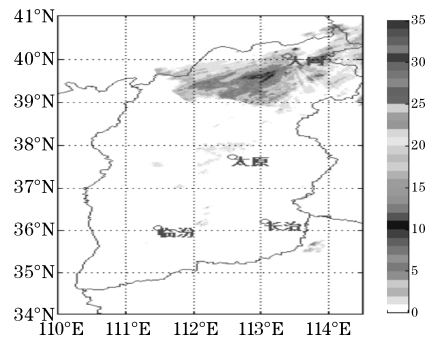
图 5 个例 1、个例 2 和个例 3 和降水强度分布



(a) 06 时 00 分混合反射率因子

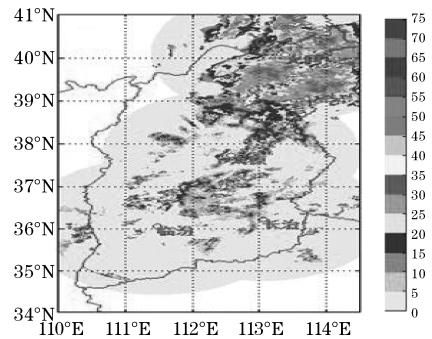


(b) 07 时 00 分混合反射率因子

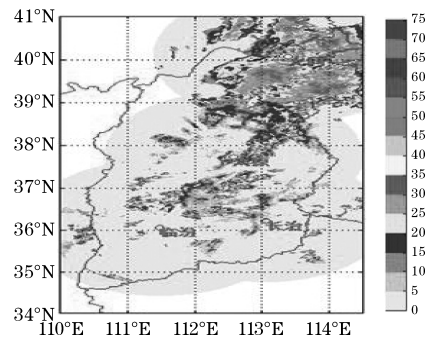


(c) 雷达 1 小时定量降水估测雨量

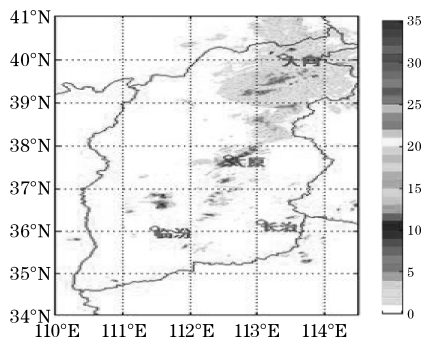
图 6 2012 年 7 月 21 日组网混合扫描反射率因子以及雷达 1 小时定量降水估测雨量



(a) 08 时 30 分混合反射率因子



(b) 09 时 30 分混合反射率因子



(c) 雷达 1 小时定量降水估测雨量

图 7 2012 年 7 月 30 日组网混合扫描反射率因子以及雷达 1 h 定量降水估测雨量

3.2 不同降水过程 Z-R 关系拟合方法的对比分析

由图 3 知,2012 年 7 月 8 日 15 时 00 分该时次的降水过程属于弱降水。根据图 8(a)和图 9(a)知,单一 Z-R 关系和分团 Z-R 关系取得的误差评估结果相当,从比率偏差和平均绝对误差看,雷达 1 h 定量降水估测的系统误差有所降低,但根据绝对平均误差和均方根误差的评估结果看,雷达定量降水估测仍存在着局部误差。由图 4 知,2012 年 7 月 21 日 07 时 00 分该时次的降水过程属于混合性降水。由图 8(b)和图 9(b)知,分团 Z-R 关系比单一 Z-R 关系的误差评估效果有所提高,从比率偏差和平均绝对误差看,采用分团 Z-R 关系拟合方案对雷达定量降水估测的系统误差有所降低,且对局部误差也有所改善。由图 5 知,2012 年 7 月 30 号 09 时 30 分该时次的降水过程属于层状云降水。由图 8(c)和图 9(c)知,相比单一 Z-R 关系拟合方案,分团 Z-R 关系拟合方案在系统误差和局部误差都有所改善。

根据不同时次的降水过程,山西地区定量降水估测的评估结果是有所差异的。对于弱降水过程,采用单一 Z-R 关系拟合方案和分团 Z-R 关系拟合方案的评估结果基本一致,而混合性降水过程,相比单一 Z-R 关系拟合方案,分团 Z-R 关系拟合方案在局部误差上有所改善。

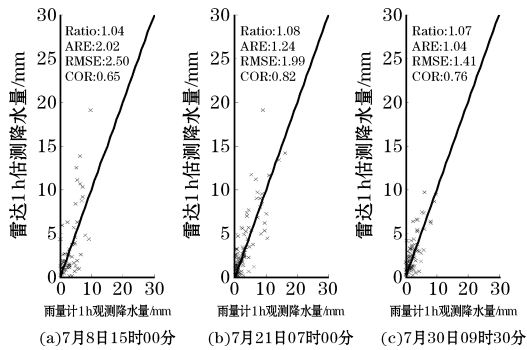


图 8 2012 年 7 月单一 Z-R 关系雷达-雨量计观测雨量

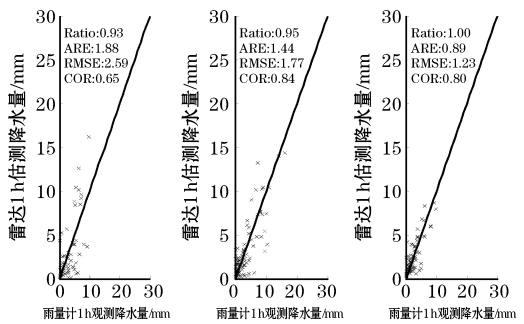


图 9 2012 年 7 月分团 Z-R 关系雷达-雨量计观测雨量

3.3 与南方 SA 雷达降水估测的结果对比分析

选取浙江地区 3 次较典型的降水过程,采用单一动态 Z-R 关系拟合方案和分团 Z-R 关系拟合方案分别对 3 次典型过程进行雷达 1 h 定量降水估测评估(表 4)。

		表 4 浙江地区雷达 1h 定量降水估测综合评估			
天气过程案例	不同降水估测方法	评估结果平均值			
		Radio	MAE	RMSE	COR
个例 4	单一动态 Z-R 关系拟合	1.02	0.78	1.34	0.88
	分团 Z-R 关系拟合	0.97	0.76	1.34	0.89
个例 5	单一动态 Z-R 关系拟合	1.06	1.27	2.27	0.79
	分团 Z-R 关系拟合	0.99	1.24	2.20	0.85
个例 6	单一动态 Z-R 关系拟合	1.05	1.50	2.37	0.81
	分团 Z-R 关系拟合	1.00	1.40	2.22	0.84

由表 3 可以看出,采用单一 Z-R 关系拟合方案和分团 Z-R 关系拟合方案进行定量降水估测评估,单一动态 Z-R 关系拟合方案的结果为:比率偏差 1.04,平均绝对误差 1.18,均方根误差 1.99,相关系数 0.83;分团 Z-R 关系拟合方案的结果为:比率 0.99,绝对平均误差 1.13,均方根误差 1.92,相关系数 0.86。对个例 1、个例 2 和个例 3 进行 1 h 定量降水估测综合评估,两种评估方案的比率偏差都在 1 左右,相关系数在 0.85 左右,而个例 4 相比个例 5 和个例 6 在绝对平均误差和均方根误差上有较大的差距,个例 5 和个例 6 的绝对平均误差和均方根误差是个例 1 的 2 倍。相比山西地区的评估结果,主要是由于浙江地区的降水范围较宽,雨量计空间分布较密,降水量大和云团分布较为复杂等原因。

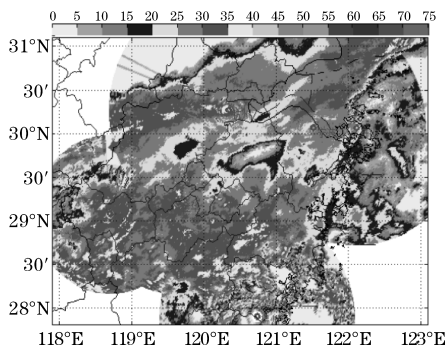
根据表 4 可以看出,不同的降水类型雷达定量降水估测的评估结果是有所不同的。由图 10(a)知,该过程降水空间分布较均匀,降水范围大,云系结构简单。个例 4 属于较典型的层状云降水。采用单一动态 Z-R 关系拟合方案和分团 Z-R 关系拟合方案的评估结果接近一致。个例 5 和个例 6 都是混合性降水,由

图 10(b)、图 10(c) 知,该过程的降水范围大,同时伴随着对流性降水,降水类型较为复杂,且云系分布较不均匀。采用分团 $Z-R$ 关系拟合方案比单一动态 $Z-R$ 关系拟合方案评估结果较优,降低了系统和局部误差。与山西地区雷达 1 h 定量降水估测的评估结果对比可以看出,若降水过程为层状降水时,采用单一动态 $Z-R$ 关系拟合方案和分团 $Z-R$ 关系方案的评估结果基本一致,并没多大改善。而若降水过程为混合性降水,因混合性降水的降水云团较复杂,且分布较为不均匀,会导致雷达定量降水估测的高估和低估,则采用云团 $Z-R$ 关系拟合方案比单一动态 $Z-R$ 关系拟合方案的评估结果较优,从表 3、表 4 可以看出,比率偏差在单一动态 $Z-R$ 关系拟合方案中明显有高估的趋势,而采用分团 $Z-R$ 关系拟合方案有效改善了系统误差,同时相关性也有所提高。

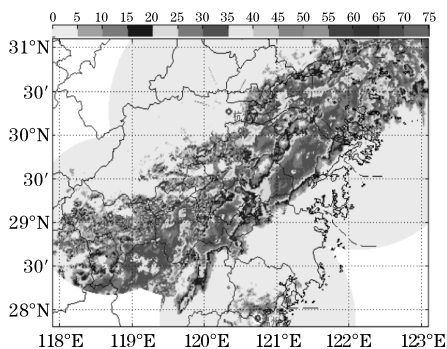
根据不同的降水类型特点,其得到的混合反射率因子和降水强度分布还是有很大差异的。南方降水的主要特点是降水范围大,降水空间分布不均匀,有着复杂的云团,这对于采用云团 $Z-R$ 关系拟合方案对雷达 1 h 定量降水估测的评估带来优势。由图 11(a) 知,混合反射率因子在 20 ~ 30 dBz 所占的比率为 40 %,同时从图 12(a) 知,降水强度在 0 ~ 5 mm/h 所占的比率为 88 %,因此该过程是由弱降水回波造成的,属于较为典型的层状云降水,与山西地区对比,采用云团 $Z-R$ 关系拟合方案和单一动态 $Z-R$ 关系方案对层状云降水的评估结果基本一致。由图 11(b)、11(c) 知,混合反射率因子在 20 ~ 30 dBz 所占比例为 30 %,在 30 ~ 50 dBz 所占比例为 20 % 左右,同时由图 12(b)、12(c) 知,降水强度在 0 ~ 5 mm/h 所占的比例为 78 %,在 10 ~ 15 mm/h 所占的比率为 5 % 左右,因此该过程主要是混合性降水,和山西地区评估结果对比,南方地区采用分团 $Z-R$ 关系拟合方案比单一动态 $Z-R$ 关系拟合方案对 QPE 评估结果较优,由表 3 和表 4 知,相比山西地区,南方地区采用云团 $Z-R$ 关系拟合方案对定量降水估测的系统误差和局部误差带来较明显的改善。

不同时次的降水过程,可以反映每个时刻雷达 1 h 定量降水估测的精度。由图 13(a)、图 14(a) 知,采用云团 $Z-R$ 关系拟合方案和单一动态 $Z-R$ 关系拟合方案的评估结果结果基本一致,相比山西地区的评估结果(图 8(c) 和图 9(c)) 知,对于层状降水,两种方案对于 QPE 的评估结果基本接近。由图 13(b) 和 14(b) 以及图 13(c) 和 14(c) 知,相比单一动态 $Z-R$ 关系拟合方案,云团 $Z-R$ 关系拟合方案在 QPE 评估结果有明显的改善,相比山西地区的评估结果(图 8(a) 和图 9(a) 以及图 8(b) 和图 9(b)) 知,云团 $Z-R$ 关系拟

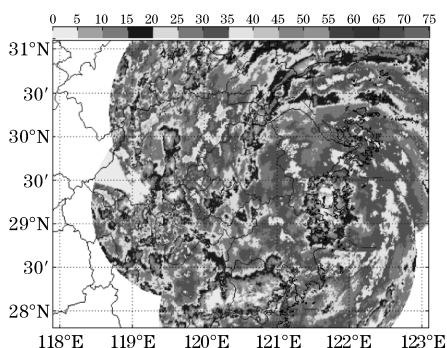
合方案并没给山西的带来明显的改善,这主要的原因是由于山西地区的降水量少,降水分布窄,云团较为不集中所造成。



(a) 6 月 22 日 08 时 30 分

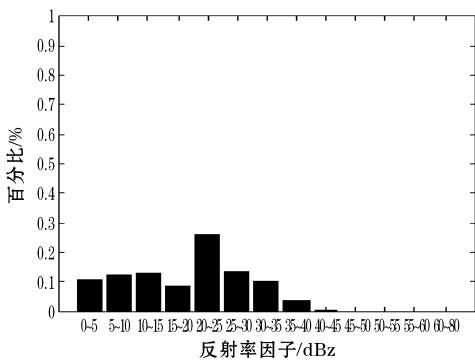


(b) 7 月 14 日 19 时 30 分

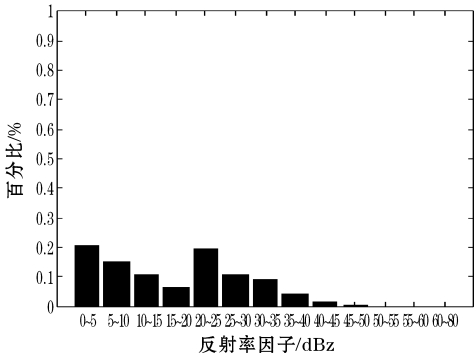


(c) 8 月 07 时 21 时 00 分

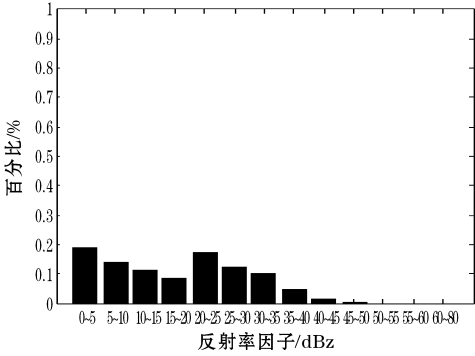
图 10 2012 组网混合反射率因子



(a) 个例 1

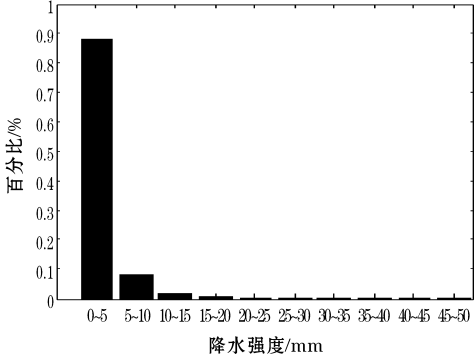


(b) 个例 2

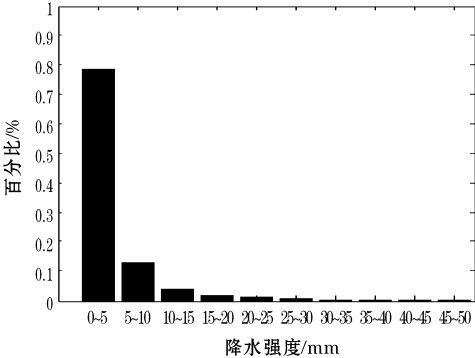


(c) 个例 3

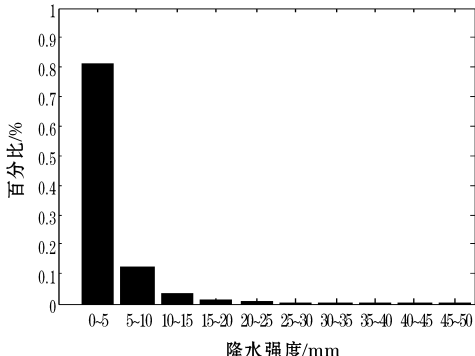
图 11 个例 1、个例 2 和个例 3 的降水过程回波强度分布



(a) 个例 1



(b) 个例 2



(c) 个例 3

图 12 个例 1、个例 2 和个例 3 的降水过程降水强度分布

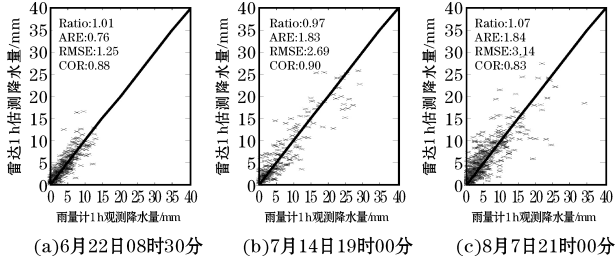


图 13 2012 年单一 Z-R 关系雷达-雨量计观测雨量

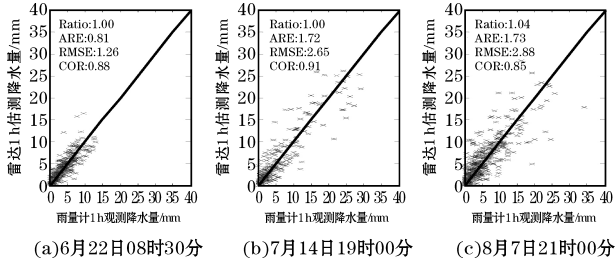


图 14 2012 年分团 Z-R 关系雷达-雨量计观测雨量

4 结束语

使用的是山西省业务应用的太原、大同、临汾和长治雷达以及山西省全省的地面雨量计观测资料,基于 2012 年影响山西省的 3 次不同类型的天气过程,统计分析单一 Z-R 关系拟合方案和分团 Z-R 关系拟合方案的降水评估结果,并与南方 SA 雷达降水估测结果进行对比分析,可以得到以下结论:

- (1)CC 雷达估测北方降水时,不同的降水过程,采用单一动态 Z-R 关系拟合方案和云团 Z-R 关系拟合方案评估结果基本一致,而 SA 雷达估测南方降水在不同降水过程却有较大的差距,相比单一动态 Z-R 关系拟合方案,云团 Z-R 关系拟合方案平均偏差提高 5 % 左右,平均绝对误差和均方根误差降低了 3 %,平均相关系数由 0.83 提高到 0.86。因此,南方地区采用云团Z-R关系拟合方案进行 QPE 的误差分析,取得较好的结果。
- (2)在弱降水过程中,采用云团 Z-R 关系拟合方

案和单一动态 $Z-R$ 关系拟合方案的评估结果基本接近,没有太大的改善;

(3)对于混合性降水过程,相比相对单一的动态 $Z-R$ 关系拟合方案,云团 $Z-R$ 关系拟合方法可以更加有效地实时反映降水观测资料的时空分布特征,这是提高雷达 QPE 精度的另一个重要原因,这在南方地区的评估中较为显著;

通过云团 $Z-R$ 关系拟合方案与单一动态 $Z-R$ 关系拟合方案的对比分析,给出了山西地区 QPE 的误差分析结果,同时通过对比南方地区的评估结果,可知造成北方降水评估精度不高的主要原因,这对气象和天文业务应用单位的工作人员而言,具有非常重要的参考意义。

参考文献:

- [1] 张培昌,杜秉玉,戴铁丕. 雷达气象学[M]. 北京:气象出版社,2000:175-182.
- [2] 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):248-256.
- [3] 戴铁丕,詹煜,刘玉洁. 在雷达—雨量计联合探测系统中距离加权和时间外推校准技术的研究[J]. 气象科学,1996,16(1):63-74.
- [4] 李建通,张培昌. 最优插值法用于天气雷达测定区域降水量[J]. 台湾海峡,1996,15(3):255-259.
- [5] 林炳干,张培昌,顾松山. 天气雷达测定区域降水量方法的改进与比较[J]. 南京气象学院学报,1997,20(3):334-340.
- [6] 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.
- [7] 赵坤,葛文忠,刘国庆,等. 在雷达测雨和洪水预报中自适应卡尔曼滤波法的应用[J]. 高原气象,2005,24(6):956-965.
- [8] 黄小玉,陈媛,熊毅,等. 漂移克里金方法在雷达和雨量计联合估测降水中的应用[J]. 气象学

报,2009,67(2):288-297.

- [9] 李建通,高守亭,郭林,等. 基于分步校准的区域降水量估测方法研究[J]. 大气科学,2009,33(3):501-512.
- [10] 东高红,刘黎平. 雷达与雨量计联合估测降水的相关性分析[J]. 应用气象学报,2012,38(9):1042-1052.
- [11] 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.
- [12] 肖艳娇,刘黎平. 新一代天气雷达网资料的三维格点化及拼图方法研究[J]. 气象学报,2006,64(5):647-656.
- [13] 肖艳娇,刘黎平,杨洪平. 基于天气雷达网三维拼图的混合反射率因子生成技术[J]. 气象学报,2008,66(3):470-473.
- [14] 肖艳娇,刘黎平,李中华,等. 雷达反射率因子数据中的亮带自动识别和抑制[J]. 高原气象,2010,29(1):197-205.
- [15] 吴翠红,万玉发,吴涛,等. 雷达回波垂直廓线及生成方法[J]. 应用气象学报,2006,17(2):232-239.
- [16] 赵果,楚荣忠,张彤,等. 偏振多普勒雷达定量测量降雨精度的改进[J]. 高原气象,2011,30(2):498-507.
- [17] 杨杰,刘黎平,勾亚彬. 影响浙江地区降水估测几个因素的分析[J]. 气象,2014,40(5):589-597.
- [18] 勾亚彬,刘黎平,杨杰,等. 基于雷达组网拼图的定量降水估测算法业务应用及效果评估[J]. 气象学报,2014,72(4):731-748.
- [19] 勾亚彬,刘黎平,仲凌志,等. 基于云团的分组 $Z-R$ 关系拟合方案及效果评估[J]. 暴雨灾害,2015,34(1):1-8.
- [20] 李建通,杨维生,郭林,等. 提高最优插值法测量区域降水量精度的探讨[J]. 大气科学,2000,24(2):263-270.

Comparison and Analysis of Next-generation C-band Radar(CC)-Gauge Merged Quantitative Precipitation Estimation in Shanxi Province

ZENG Zheng-mao^{1,2}, LIU Li-ping²

(1. College of Electronic Engineering, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China; 2. State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Science, Beijing 100081, China)

Abstract: Radar-Gauge merge scheme to forecast rainfall is an important direction in the current meteorology industry.

This paper estimates and analyzes the radar accuracy of QPE within Shanxi Province based on the data from 4 unit C-band radar(CC) installed in Shanxi province, high-density the gauge and three times of precipitation process covering Shanxi province, at the same time comparison and analysis of QPE result by using SA radar in South . The results show that (1) CC radar to estimate rainfall in the north, different precipitation process, single dynamic $Z-R$ relationship fitting scheme and storm-based $Z-R$ relationship fitting scheme evaluation results are basically consistent, and SA radar to estimate the southern precipitation in different precipitation process has a large gap, compared with single dynamic $Z-R$ relationship fitting scheme, storm-based $Z-R$ relationship fitting scheme increase 5 % in the average deviation, mean absolute error and root mean square error was reduced by 3 % , the average correlation coefficient increased from 0.83 to 0.83. Therefore, storm-based $Z-R$ relationship fitting scheme was used in the southern region QPE error analysis, obtained good results. (2) During the light precipitation process, the result of storm-based $Z-R$ relationship Fitting method is similar to the one of single dynamic $Z-R$ relationship method. Both of them do not do good to improve QPE accuracy. (3) During mixed precipitation, Storm-based $Z-R$ relationship Fitting method can reflect the spatial and temporal distribution features in real time and more effectively than single dynamic $Z-R$ relationship method, which is the main method to improve radar QPE accuracy, especially in the prediction in the South area.

Key words: quantitative precipitation estimation; single $Z-R$ relationship fitting; storm-based $Z-R$ relationship fitting; meteorological detection technology; radar meteorology