

陈静, 钤伟妙, 韩军彩, 等. 2015. 基于动态  $Z-I$  关系雷达回波定量估测降水方法研究. 气象, 41(3):296-303.

# 基于动态 $Z-I$ 关系雷达回波定量估测降水方法研究<sup>\* 1</sup>

陈 静<sup>1</sup> 钤伟妙<sup>1</sup> 韩军彩<sup>1</sup> 连志鸾<sup>2</sup>

1 石家庄市气象局, 石家庄 050081

2 河北省气象台, 石家庄 050021

**提 要:** 选取石家庄市新一代天气雷达 2009—2012 年 29 个降水过程雷达二次产品数据(低层 5 个仰角及组合反射率因子)和加密自动站逐分钟降水资料, 依据与雷达回波强度最相近及与自动站位置距离最近的原则, 建立随时空变化的动态  $Z-I$  关系, 来定量估测无自动站观测格点的降水量, 从而实时获取高分辨率雷达估测降水资料; 对雷达定量估测降水与自动站观测降水的空间分布进行了对比, 利用交叉检验方法分析了雷达定量估测降水的误差, 结果表明: 该方法反演降水的平均误差较小, 为  $-0.6 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ , 能较好地表现出降水的时空分布特征, 显示出不同等级降水的面积和演变, 具有反演  $40 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$  以上的强降水中心的能力, 表明该方法具有业务应用价值, 对强降雨灾害的评估具有指导作用。

**关键词:** 雷达回波, 二次产品, 加密自动站, 逐分钟降水, 动态  $Z-I$  关系, 误差分析

中图分类号: P412

文献标志码: A

doi: 10.7519/j.issn.1000-0526.2015.03.004

## An Approach for Radar Quantitative Precipitation Estimate Based on $Z-I$ Relations Varying with Time and Space

CHEN Jing<sup>1</sup> QIAN Weimiao<sup>1</sup> HAN Juncai<sup>1</sup> LIAN Zhiluan<sup>2</sup>

1 Shijiazhuang Meteorological Bureau of Hebei, Shijiazhuang 050081

2 Hebei Meteorological Observatory, Shijiazhuang 050021

**Abstract:** Minutely rain data from the regional Automatic Weather Stations (AWSs) and composite reflectivity, the five lower-angles radar reflectivity from Shijiazhuang radar second products are used to estimate radar-based quantitative precipitation. Twenty-nine rain processes in 2009—2012 are selected. According to the principle of the most similar intensity to radar echoes and the nearest distance to the AWSs, a new approach for radar quantitative precipitation estimate based on dynamic  $Z-I$  relations varying with time and space is presented. Grid precipitation without observation is calculated from radar echo reflectivity using this method. A series of quantitative assessments ensure the quality of radar-based precipitation estimates. Horizontal distribution of the hourly estimated rainfall data has been visually verified against the corresponding AWS rainfall reports. Cross validation is used to analyze the errors. The results show high quality of the radar-based precipitation estimates in terms of small errors, high correlation and hourly rainfall pattern and evolution, including rainfall extremes more than  $40 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ . Therefore, the approach of dynamic  $Z-I$  relations is shown valuable to be applied in meteorological operation and instructive for assessing severe rainfall disaster.

**Key words:** radar echoes, second products, automatic weather stations (AWSs), minutely rain data, dynamic  $Z-I$  relations, errors analysis

\* 河北省气象局科研项目(13ky04, 10ky21, 12ky25)和中国气象局业务项目(SH-2012-02-07)和石家庄市科技计划项目(12155443A)共同资助

2014 年 3 月 12 日收稿; 2014 年 8 月 13 日收修定稿

第一作者: 陈静, 主要从事气象预报及应用. Email: Cj640212@163.com

## 引言

近年来,利用新一代多普勒天气雷达反演降水技术已成为雷达资料应用研究的重点,也是发展雷达技术的主要研究方向之一(李柏等,2013)。通过雷达反演降水可及时获取大面积高分辨率降水信息,弥补降水观测站点稀疏的不足。雷达反演降水是精细化气象服务的基础资料,对天气气候的监测和分析、强降雨灾害的评估、数值预报模式的检验和校准以及水文分析等具有很高的应用价值(姚燕飞等,2007;白先达等,2011;万玉发等,2013;彭涛等,2010;庄薇等,2013)。

雷达定量估测降水是利用雷达回波资料建立雷达回波与降水的  $Z-I$  关系,间接获得降水资料。雷达回波是对空中雨滴大小及密度的一种电磁学间接测量,由于雨滴粒径分布及雨滴下落末速度的变化性很大,不同性质的降水适用不同的  $Z-I$  关系,即使相同的回波强度所对应的降水强度也可能不同(仲凌志等,2007)。雨滴谱的自然可变性是雷达测量降水不确定性的一个重要原因(万玉发等,2013;李峰等,2014;施红蓉等,2014)。2006年全国自动站资料开始实时上传(任芝花等,2010),降水观测的时间和空间密度加大,加密降水资料与雷达回波时空分布有很好的对应关系(刘雨佳等,2014;Luo et al, 2013),使雷达估测降水的精度不断提高并稳定,尤其有利于提高积云降水过程降水反演的精度(东高红等,2012b)。目前建立  $Z-I$  关系的方法主要分为两种,一种是统计学方法,如采用最优化法(袁晓清等,2010;东高红等,2012a)、概率配对法(郑媛媛等,2004;王丽荣等,2008)等统计多个降水过程资料建立经验  $Z-I$  关系。此外,一些研究还根据降水天气形势、不同季节、雷达探测距离和不同降水类型(仲凌志等,2007;陈小华等,2013)对雷达回波进行分类,建立本地化的  $Z-I$  关系。为进一步提高估测降水精度,研究者还利用平均校准法(张亚萍等,2013)、变分同化法(马慧等,2008)及卡尔曼滤波校准法(邵月红等,2009;王春青等,2010)进行订正,这些均可在一定程度上改善估测降水的精度,但校正方法一般计算复杂,消耗时间长。另一种方法是动态分级  $Z-I$  关系法(汪瑛等,2011),该方法建立在快

速更新资料的基础上,实时频繁变动  $Z-I$  关系中的  $A$ 、 $b$  值,不依赖于长期历史资料,只考虑很短时间(6 min)内降水强度和降水性质的延续性。动态分级  $Z-I$  关系方法将上一时段雷达回波反射率因子按强度分级,根据最优化方法选取最优的一组  $A$ 、 $b$  值,将该最优分级  $Z-I$  关系用于下一时刻估测降水中,该方法能改进对短时强降水的估测,尤其是强降水低估严重的问题(胡胜等,2012)。

本文在以前研究成果的基础上,提出了利用日常业务应用的雷达二次产品回波反射率因子和加密自动站降水资料,确定随时间和空间变化的动态  $Z-I$  关系,通过自动站分钟降水数据和雷达回波数据建立动态  $Z-I$  关系,来定量估测无自动站观测格点的降水量。与汪瑛等(2011)不同,本文不仅考虑了  $Z-I$  关系时间上变化,还考虑了其空间上的动态变化,利用最优化方法得到某时段自动站位置上的  $A$ 、 $b$  值,同时依照与雷达回波强度最接近及与自动站距离最接近的原则,将得到的  $A$ 、 $b$  值延伸应用到该时段无自动站观测的雷达回波格点上,从而实时得到具有业务应用价值的高分辨率定量估测降水资料,为精细化预报服务及强降雨积涝风险评估提供支撑。

## 1 资料和方法

### 1.1 资料

本文以石家庄市为研究区域,包括石家庄市区和周边 17 个县(市),石家庄位于太行山东麓,地形比较复杂,西部为太行山区,东部为平原。降水资料为石家庄市 191 个自动站观测的逐分钟雨量数据,雷达数据为石家庄新一代天气雷达 CINRAD-SA 逐 6 min 分辨率的雷达二次产品数据,包括组合反射率因子和低层 5 个仰角(0.5°、1.5°、2.4°、3.4°和 4.3°)反射率因子。自动站雨量观测数据和雷达二次产品数据分别经过检验订正和剔除杂波等质量控制,为日常业务应用数据。自动站和雷达站分布见图 1,图中字母为 17 个县(市)的首字母简称,雷达站位于石家庄新乐市。

选择 2009—2012 年 4 年共 29 个降水过程为研究对象,其中 21 个降水过程出现在主汛期 7—8 月,

8个过程出现在4、5、6、9月。根据降水性质划分,21个降水过程为对流降水,8个降水过程为层云降水。

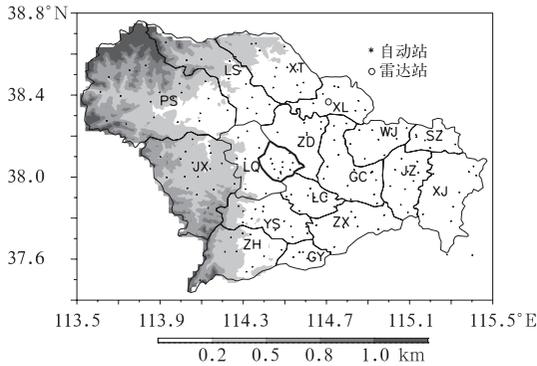


图1 石家庄市自动站和雷达站分布图  
(阴影区域为地形高度,加粗黑曲线  
边界区为石家庄市市区)

Fig. 1 Distribution of automatic weather stations (AWSs) (black dots) and weather radar (black circle) in Shijiazhuang  
(Shading represents terrain height, thick black border region for the city of Shijiazhuang)

## 1.2 方法

### 1.2.1 数据预处理

在建立  $Z-I$  关系之前,首先将雷达回波与自动站降水数据在时间和空间上建立一一对应关系。第一步,将原始极坐标雷达数据转化到经纬度坐标上,空间分辨率为  $0.01^\circ \times 0.01^\circ$ 。第二步,空间上,取自动站周围半径为  $0.015^\circ$  范围(9个格点)内雷达回波反射率因子的平均值与区域自动站降水建立数据对(以下简称雷达-自动站数据对)。这与袁晓清等(2010)和梁建茵等(2011)选取方法一致,他们的研究发现自动站上空9个格点的平均雷达回波强度与地面降水强度关系最为密切;时间上,参照梁建茵等(2011)方法,认为雷达资料与该分钟观测到的前6分钟降水量相对应,即雷达资料扫描过程中的降水量,从而得到一一对应的逐6 min 雷达-自动站数据对。

### 1.2.2 动态 $Z-I$ 关系算法

动态  $Z-I$  关系算法是以  $Z = A \times I^b$  关系式为基础,利用逐6 min 的雷达-自动站数据对资料调节  $A, b$  系数,使估测降水与区域自动站观测降水的误差最小,从而确定该雷达回波-自动站降水数据对的

系数  $A, b$  值,并将该系数延伸应用到适用范围内。该算法主要分为以下两个步骤:

(1)基于  $Z-I$  关系,将每组逐6 min 雷达-自动站数据对资料应用到该关系式中,调节动态变化的  $A, b$  值,选取雷达回波反演降水与自动站降水误差最小时的  $A, b$  值为适用于该时刻该组雷达回波-自动站降水数据对  $Z-I$  关系的系数。为确保  $A, b$  变动范围合理性,限定  $A, b$  的调节范围分别为  $[150, 400]$  和  $[0.8, 2.4]$ ,调节间隔分别取0.1和0.01。

(2)每组雷达-自动站数据对都能得到一组  $A, b$  值,每6 min 可得到191组  $A, b$  值,将  $A, b$  值延伸到该时刻各个雷达回波格点上,延伸的原则为与雷达回波反射率因子值最接近的合理距离范围内,当该格点内有自动观测站点时,该格点降水直接使用自动站观测降水。

为减小雷达回波从极坐标转换为经纬度坐标可能造成的误差,用雷达格点周围半径为  $0.015^\circ$  范围内(9个格点)雷达回波反射率因子的平均值代替该格点值。考虑到中小尺度降水系统的空间尺度,在雷达格点周围半径为  $0.5^\circ$  的范围,找到与该雷达回波反射率因子平均值最接近,且差值不大于5 dBz 的雷达-自动站数据对,取对应的  $A, b$  值,即考虑雷达回波强度的分级;如果  $0.5^\circ$  范围内没找到,继续扩展到整个研究区域,同样找与该雷达回波反射率因子平均值最接近,且差值不能大于5 dBz 的雷达回波-自动站降水数据对,取对应的  $A, b$  值;如果整个区域都没有找到对应自动站,重新在限定区域范围内寻找匹配格点来确定对应  $A, b$  值,代入  $Z-I$  关系进行降水反演,得到整个研究区域内的  $0.01^\circ \times 0.01^\circ$  分辨率的降水资料。

### 1.2.3 误差检验方法

交叉检验是检验数据精度的常用评估方法,本文使用交叉检验方法(Chen et al, 2008)对雷达估测降水的精度进行对比检验。首先从所有自动站中随机抽取10%的站点做为检验站点,再从剩下的自动站中抽取10%,重复9次,形成10小组自动站,即每组站点数均为全部站点的10%(本文前9组19个自动站,最后一组20个),直到所有的自动站均被抽取过一次。考虑地形因素的影响,要求随机抽取的10组自动站空间分布均匀。利用动态  $Z-I$  关系方法,利用每个小组自动站抽取后剩余的90%自动

站降水与雷达回波数据,生成每个时刻所有格点上的反演降水量,利用检验站点自动观测降水与雷达估测降水进行对比检验,直到所有站点全部完成检验。选择以自动站点滑动 1 小时累积降水量为单位,将以自动站为中心半径  $0.015^\circ$  范围内的雷达估测降水平均值与自动站观测降水进行对比,分析其误差。

## 2 结果分析

### 2.1 雷达回波定量估测降水的空间分布

为检验动态 Z-I 关系估测降水的精度,对比不同仰角雷达估测降水和自动站观测降水的空间分布。图 2 和图 3 分别给出了 2012 年 7 月 4 日对流性和 9 月 25 日稳定性两个降水过程中 1 小时雷达反演降水和自动站降水空间分布图。2012 年 7 月 4 日降水空间分布不均匀,局部地区降水强度大,持续时间短,14:36—15:36 的 1 小时降水量主要分布特征为石家庄中心位置有一条南北向,跨越  $0.5^\circ$  经度,且降水量大于  $10 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$  的降水带;9 月 25 日

降水强度较均匀,全区均有降水,但降水持续时间长,10:42—11:42 的 1 小时降水量大部分地区在  $5 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$  以下,市南北中间位置有一条东北—西南向降水量大于  $10 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$  窄降水带。通过对比图 2 和图 3 中(b)与(c)~(g)表明,组合反射率因子及 5 个仰角反射率因子估测降水均能基本反映出地面降水的分布特征,反演出强降水中心,明显改善反演降水偏小的问题,说明动态 Z-I 关系方法估测降水在空间分布上能抓住地面降水的主要特征,但不同仰角强降水中心的强度和降水范围有所不同。其中, $0.5^\circ$  和  $1.5^\circ$  仰角估测降水分布特征与实况最接近,组合反射率因子反演降水显示的强降水范围和强度均较观测实况偏大, $2.4^\circ \sim 4.3^\circ$  仰角则随着仰角的增大,反演降水的强度逐渐减少,降水范围也逐步缩小并集中,已不能显示距离雷达站较远地区[如赞皇(ZH)]的降水分布特征。

从空间分布上看,表明雷达低层  $0.5^\circ$  和  $1.5^\circ$  仰角反射率估测降水与自动站观测降水最接近,低层仰角的雷达数据对天气监测的应用价值更大,这与陈垚森(2011)的结果一致。以下选取  $0.5^\circ$  和  $1.5^\circ$  仰角雷达估测降水资料进行对比检验。

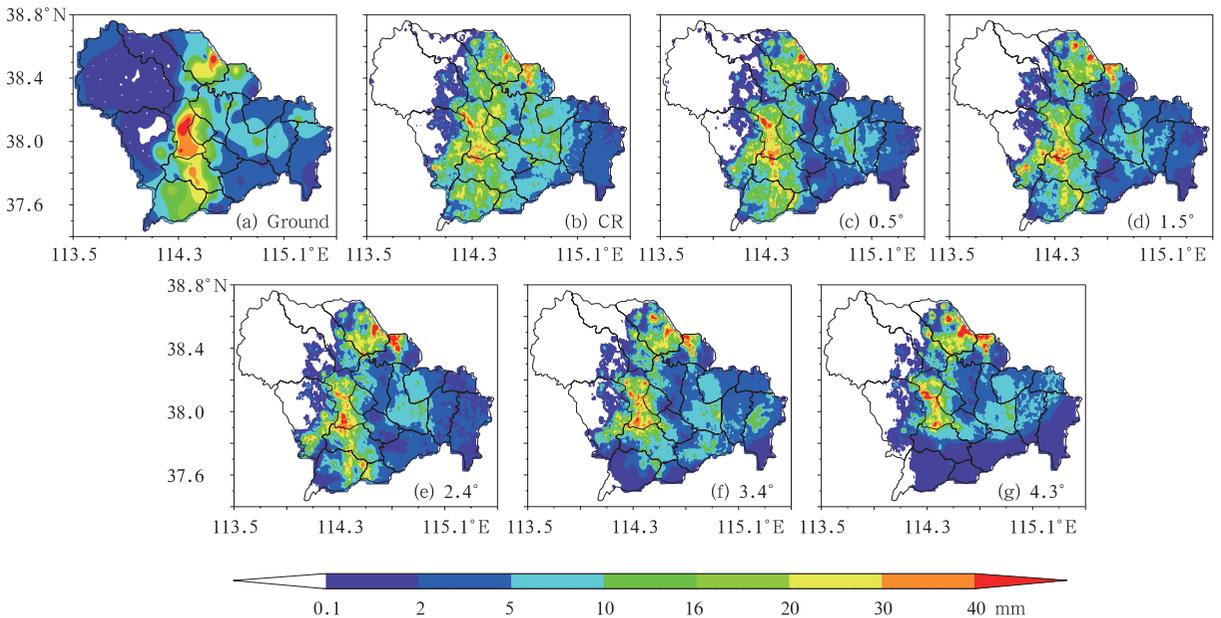


图 2 2012 年 7 月 4 日 14:36—15:36 的 1 小时累积降水量

(a) 自动站观测降水, (b) 组合反射率因子及 (c, d, e, f, g) 雷达低层 5 个仰角的定量估测降水  
 Fig. 2 Hourly rainfall from 14:36 BT to 15:36 BT 4 July 2012 at (a) AWS observations, (b) estimated rainfall of composite reflectivity, (c, d, e, f, g) estimated rainfall of 5 lower-angle radar reflectivity

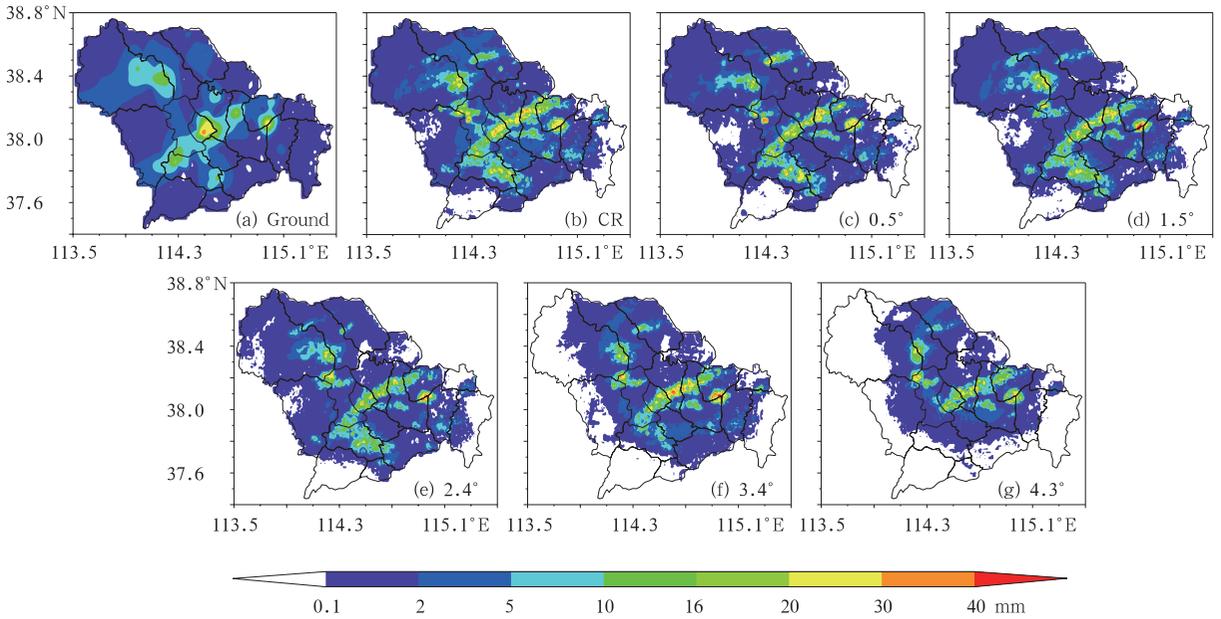


图3 同图2,但为2012年9月25日10:42—11:42

Fig. 3 As in Fig. 2, but the hourly rainfall from 10:42 BT to 11:42 BT 25 September 2012

## 2.2 雷达定量估测降水误差分析

利用交叉检验方法综合分析29个降水过程,分析滑动1小时 $1.5^\circ$ 仰角雷达回波定量估测降水与自动站观测降水的误差,图4为绝对误差的频率分布图。由图可见,绝对误差在 $\pm 0.1 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 之间的

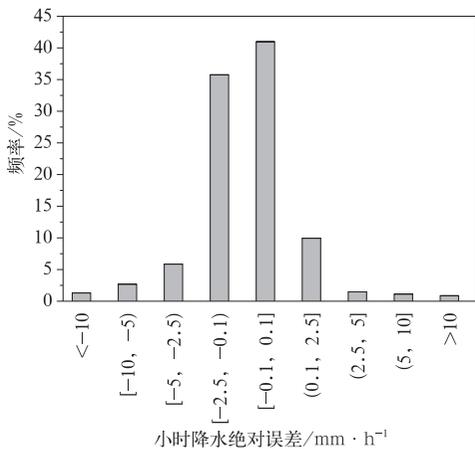


图4 滑动1小时雷达定量估测降水与自动站观测降水绝对误差(雷达估测降水-自动站降水)的频率分布

Fig. 4 Frequency distribution of absolute errors in hourly rainfall between the observations of AWSs and the radar estimated rainfall

发生频率为41%,绝对误差在 $\pm 2.5 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 之间的发生频率为87%,仅2%的绝对误差超过 $10 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 。从误差分析来看,动态 $Z-I$ 关系雷达定量估测降水方法得到的降水与地面观测降水比较接近,精度较高。

除综合分析所有降水过程的误差外,根据降水过程的性质,区对流降水和层云降水,检验动态 $Z-I$ 方法对不同类降水类型的估测能力。计算各过程 $1.5^\circ$ 仰角反射率反演降水与实况降水的误差和相关系数,结果表明,对流降水和层云降水绝对误差分别为 $-0.54$ 和 $-0.65 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ ,平均为 $-0.60 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ ,对流降水误差小于层云降水,估测降水与实况的相关系数达到了0.64和0.66,说明该方法对对流降水的估测能力较层状云稳定性降水的精度偏高。

## 2.3 不同大小等级降水的估测能力

以前雷达估测降水方法往往无法估测出强降水区域,大雨估测偏小,而强降水对于灾害的预防和评估至关重要(汪瑛等,2011;张亚萍等,2013)。本文对1小时降水按大小分级,检验该方法对不同等级降水量的估测能力。参照(寿绍文等,2006)1小时降水等级表,将自动站实测的滑动1小时降水分为中雨( $2 \sim 5 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ )、大雨( $5 \sim 10 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ )、暴

雨( $10\sim 20\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ )和大暴雨( $>20\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ ),在一次降雨过程中按照不同降水量级的降水随机选取 100 个样本,检验雷达回波反射率对不同等级降水的估测能力(图 5)。从图中可见,雷达估测降水与实测降水的变化趋势基本一致,经过相关性  $t$  检验,相关系数通过了 0.01 的显著性水平检验。说明动态估测降水能反映降水实况的时空分布,较好反演出不同等级降水量,显示强降雨中心,说明该方法具有一定的实用性,弥补了强降雨明显低估的不足。

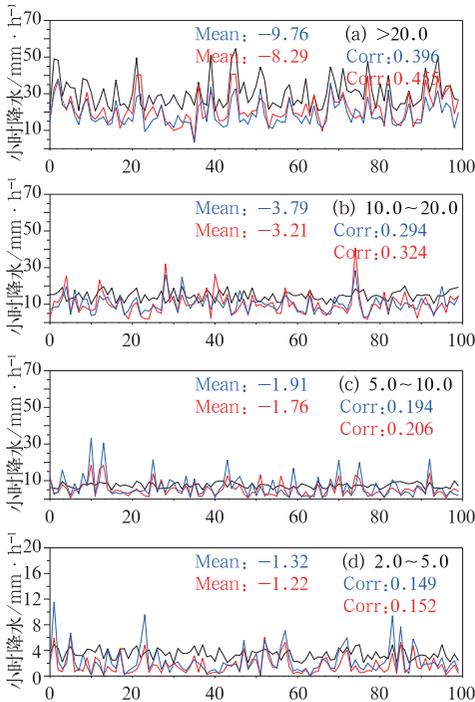


图 5 2009 年 8 月 25 日降雨过程不同降水量级自动站降水与雷达估测降水对比 (黑线为自动站实测降水,蓝线是  $1.5^\circ$  仰角反射率估测降水,红线为  $0.5^\circ$  仰角反射率估测降水)  
Fig. 5 Comparison of hourly rainfall derived from the AWS observations and radar reflectivity at different rainfall intensity categories on 25 August 2009 (Black lines represent precipitation from AWSs. Blue and red lines represent the estimates derived from  $1.5^\circ$  and  $0.5^\circ$  elevation radar reflectivities respectively)

表 1 给出两种性质降水中不同等级降水的绝对误差分析,可以看出,两种性质降水误差均在一个较小范围,在层云和对流降水过程中一致,说明动态 Z-I 关系反演降水能抓住降水的强度变化,对  $10$

$\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$  以上的降水反演结果有明显的改善,误差明显减少,尤其能表现出  $20\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$  的降水大值中心,且对流云降水相对误差小于层云降水,说明动态 Z-I 关系对对流降水估测能力高于层云降水,这主要表现为对  $10\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$  以上大值降水估测能力的提高。

表 1 不同性质降水不同等级降水的绝对误差分析

Table 1 Absolute errors from convective and stratiform precipitation on different rainfall intensity categories

小时降水级别/ $\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$	绝对误差(对流云)	绝对误差(层云)
0~2	0.16	-0.12
2~5	-1.15	-1.76
5~10	-2.68	-3.07
10~20	-4.67	-5.84
$>20$	-8.23	-10.13

### 3 个案例分析

选取石家庄 2011 年 8 月 9 日强降雨过程,利用  $0.5^\circ$  和  $1.5^\circ$  仰角反射率估测降水,从空间分布和时间序列上与自动站实测降水对比检验。由 2011 年 8 月 9 日 15:42—16:42 的 1 小时降水量空间分布图(图 6)可以看到,该小时降水的主要特点是有一条南北向偏西倾斜且穿过石家庄市,降水量大于  $10\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$  的降水带(图 6b),这与雷达回波分布图(图 6a)上的强回波区域一致。其中,石家庄市及南部元氏县(YS)存在两个强降雨中心( $>40\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ ),雷达反演降水显示的不同等级降水量面积,形态和落区基本与自动站降水相同,尤其强降雨中心的位置和强度也一致,该方法明显改善了反演降水偏小的问题。地面观测降水(图 6b)无井陘(JX)西南角的强降雨中心,可能由于该地区为山区,地面无观测数据所致。

除了检验雷达估测降水的空间分布外,选取不同的自动站点,检验了雷达反演降水与自动站观测降水的时间分布序列(图 7),除 B1010、B1014 和 B1031 站为降水双峰极值外,大部分站点观测降水均为明显的单峰极值,反演降水曲线与自动站观测降水形状相近,能显示该站点的降水强度变化,从开始出现降水到小时降水量增大为  $50\sim 70\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ ,两者都有较好的拟合。

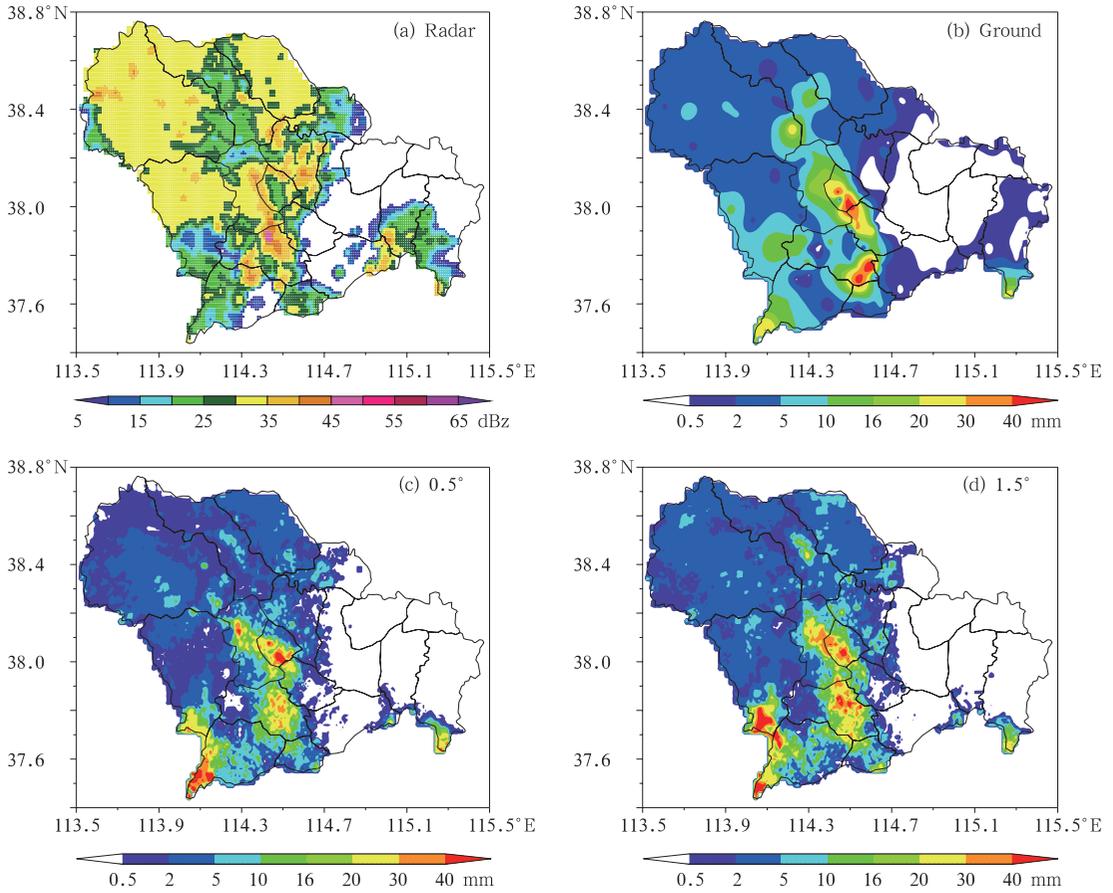


图 6 2011 年 8 月 9 日 15:42—16:42 一小时降水量

(a)15:42 雷达回波分布图, (b)自动站观测降水、(c)0.5°和(d)1.5°仰角反射率估测降水分布图

Fig. 6 (a) Distribution of radar echoes (shaded in dBz) of 1.5° elevation at 15:42 BT 9 August 2011;

hourly rainfall ending at 16:42 BT 9 August 2011 from (b) AWS observations,

(c) 0.5° angle radar reflectivity and (d) 1.5° angle radar reflectivity

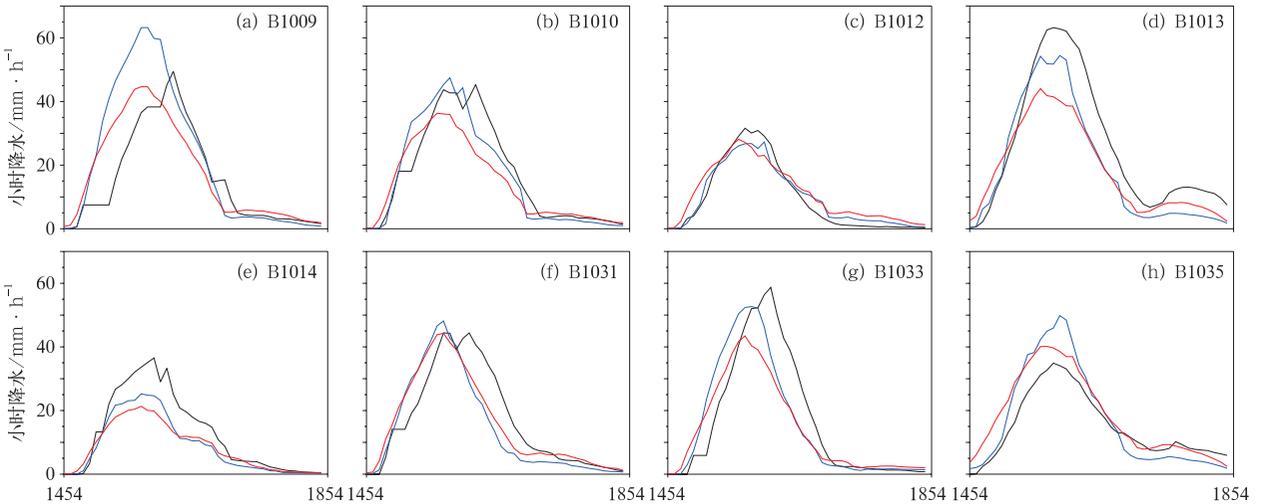


图 7 2011 年 8 月 9 日降水过程不同自动站降水时间序列图

(黑线为自动站观测降水, 红线为 0.5°仰角估测降水, 蓝线为 1.5°仰角估测降水, 右上角为自动站号)

Fig. 7 The time series of sliding hourly rainfalls from different AWSs at 9 August 2011

(Black lines represent precipitations from AWSs, red and blue lines represent estimates derived from 0.5°, 1.5° elevation radar reflectivities, respectively; Names of the AWSs are put on upper-right corner in every panel)

## 4 结论与讨论

(1)本文利用日常业务应用的雷达二次产品组合反射率因子和低层5个仰角反射率因子资料与加密自动站降水资料,建立了随时间和空间变化的动态  $Z-I$  关系,利用最优化方法得到某一时次自动站位置上的  $A$ 、 $b$  值,依据与雷达回波强度最接近及距离自动站最接近的原则,将  $A$ 、 $b$  值延伸应用到该时次无自动站观测的雷达回波格点上,从而获取实时高分辨率定量估测降水资料,提高了雷达二次产品资料在业务应用中的价值。

(2)通过对比检验雷达估测降水的空间分布特征、误差分析及对不同等级降水量的表现能力,表明动态  $Z-I$  关系估测降水能抓住降水的时空分布特征,其空间形态和落区基本与自动站观测降水相同,尤其强降水中心的位置和强度两者具有一致性;对不稳定性对流降水和稳定性层云降水的估测精度较高,明显提高了对  $10 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$  以上降水的反演能力,能够反演  $40 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$  以上的强降水,弥补了一般雷达估测降水方法明显低估强降水的不足,可在业务中实时监测降水过程,这为强降雨积涝及山洪地质灾害等风险评估提供了数据支撑。

(3)虽然动态  $Z-I$  关系估测降水能力有明显的改进,但部分自动站点上的误差仍然存在,这可能由于两者的观测方式、时空分布存在的差异、自动站布局的非均匀性和地形等因素影响所致,另外,雷达资料坐标转换也可能对反演降水产生误差,需要在业务应用中不断优化。

## 参考文献

白先达,王艳兰,孙莹. 2011. 雷达定量测量降水. 气象科技, 39(1): 61-65.

陈垚森. 2011. 多普勒天气雷达不同仰角数据定量估测降水对比分析. 广东水利水电, 2: 28-31.

陈小华,段旭. 2013. 基于卫星和雷达资料估测滇中地区降水量方法研究. 气象, 39(2): 203-209.

东高红,吕江津. 2012a. 不同校准方法检验雷达定量估测降水的效果对比. 气象与环境学报, 28(4): 38-42.

东高红,刘黎平. 2012b. 雷达与雨量计联合估测降水的相关性分析. 应用气象学报, 23(1): 30-39.

胡胜,罗聪,黄晓梅,等. 2012. 基于雷达外推和中尺度数值模式的定

量降水预报的对比分析. 气象, 38(3): 274-280.

李柏,古庆同,李瑞义,等. 2013. 新一代天气雷达灾害性天气监测能力分析及未来发展. 气象, 39(3): 265-280.

李峰,施红蓉. 2014. 一次多相态天气过程的风廓线雷达探测资料特征分析. 气象, 40(8): 992-999.

梁建茵,胡胜. 2011. 雷达回波强度拼图的定量估测降水及其效果检验. 热带气象学报, 27(1): 1-10.

刘雨佳,陈洪滨,金德镇,等. 2014. 加密自动气象站雨量计资料的质量控制及其相关关系的研究. 大气科学, 38(1): 159-170.

马慧,万齐林,陈子通,等. 2008. 基于  $Z-I$  关系和变分校正法改进雷达估测降水. 热带气象学报, 24(5): 546-549.

彭涛,宋星原,殷志远,等. 2010. 雷达定量降水估算在水文模式汛期洪水预报中的应用试验. 气象, 36(12): 50-55.

任芝花,赵平,张强,等. 2010. 适用于全国自动站小时降水资料的质量控制方法. 气象, 36(7): 123-132.

邵月红,张万昌,刘永和,等. 2009. 沂沭河流域不同多普勒雷达降水量估算方法的效果评估. 大气科学, 33(5): 971-980.

寿绍文,励申申,王善华,等. 2006. 天气学分析. 北京: 气象出版社, 361.

施红蓉,李峰,吴蕾,等. 2014. 风廓线雷达对降水相态变化的观测分析. 气象, 40(10): 1259-1265.

王玉发,王珏,金鸿祥. 2013. 雷达与雨量计同步结合区域型估算降水方程的误差分析. 气象学报, 71(2): 332-343.

王丽荣,裴宇杰,王立荣,等. 2008. 概率配对比法在雷达定量估测降水中的应用. 气象与环境科学, 31(增刊): 195-199.

王春青,赵坤,张勇,等. 2010. 黄河三花区间天气雷达测雨技术应用研究. 水文, 30(2): 62-65.

汪瑛,冯业荣,蔡锦辉,等. 2011. 雷达定量降水动态分级  $Z-I$  关系估算方法. 热带气象学报, 27(4): 601-608.

姚燕飞,程明虎,杨洪平,等. 2007. 优化  $Z-I$  关系及其在淮河流域面雨量测量中的应用. 气象, 33(6): 37-43.

袁晓清,倪广恒,潘安君,等. 2010. 基于最优化算法的北京市新一代天气雷达  $Z-R$  关系研究. 水文, 3(1): 1-6.

张亚萍,沃伟峰,刘德,等. 2013. 基于精细化降水分布的山洪气象条件分析. 气象, 39(1): 101-111.

郑媛媛,谢亦峰,吴林林,等. 2004. 多普勒雷达定量估测降水的三种方法比较试验. 热带气象学报, 20(2): 192-197.

庄薇,刘黎平,胡志群. 2013. 青藏高原零度层亮带的识别订正方法及在雷达估测降水中的应用. 气象, 39(8): 1004-1013.

仲凌志,刘黎平,顾松山. 2007. 层状云和对流云的雷达识别及在估测雨量中的应用. 高原气象, 26(3): 593-602.

Chen M Y, Shi W, Xie P P, et al. 2008. Assessing objective techniques for gauge-based analyses of global daily precipitation. J Geophys Res, 113: D04110, doi:10.1029/2007JD009132.

Luo Yali, Qian Weimiao, Zhang Renhe, et al. 2013. Gridded hourly precipitation analysis from high-density rain gauge network over the Yangtze-Huai Rivers Basin during the 2007 Mei-yu season and comparison with CMORPH. J Hydrometeorol, 14: 1243-1257.