

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.

文章编号: 1004-4965(2011)04-0601-08

## 雷达定量降水动态分级 Z-I 关系估算方法

汪瑛<sup>1</sup>, 冯业荣<sup>1</sup>, 蔡锦辉<sup>2</sup>, 胡胜<sup>1</sup>

(1. 广东省气象台, 广东 广州 510080; 2. 顺德市气象局, 广东 顺德 528300)

**摘 要:** 利用高时空分辨率的雷达定量降水估测和预报(RQPE 和 RQPF)对洪水监测、发布洪水警报起重要指导作用, 目前国内外对其研究的方法主要采用概率配对法、Z-I 关系法和基于 Z-I 关系的数学算法校正法, 这些方法均存在强调某一因素忽略其它因素的问题, 并且对短时强降水, 尤其是极强降水低估严重。从统计和个例两方面对比分析了四种雷达定量降水方法的误差, 致力于寻找一种将雷达回波反射率预报场反演为降水场时误差较小的技术方法, 能改进对短时强降水、特别是极强降水严重低估问题的方法, 并且该方法也能在业务应用中方便、快速、精确实现。对比研究结果表明: 动态分级 Z-I 关系法是一种对雷达 QPE 和回波反射率预报场反演降水场都较好的方法, 并且改进了对短时强降水、尤其是大于 55 mm/h 的短时极强降水低估的问题; 在业务计算中仅需 15 秒, 能满足 6 分钟更新一次计算结果的需要, 而且不依赖气候统计, 便于移植。

**关键词:** RQPE; RQPF; Z-I 关系; 动态; 分级

**中图分类号:** P426.62

**文献标识码:** A

**Doi:** 10.3969/j.issn.1004-4965.2011.04.018

### 1 引 言

高时空分辨率的雷达定量降水估测(Radar-based Quantitative Precipitation Estimate, RQPE)和预报(Radar-based Quantitative Precipitation Forecast, RQPF)对洪水监测和预警有重要指导作用, 常应用于地球水循环研究和各种水文及大气数值模式研究, 如降水变化研究、地质灾害预警、环境生态学、地-气水收支、陆面和大气耦合模式的降水预报<sup>[1]</sup>和洪水预报等; RQPF的研究更为重要, 对发布洪水警报、地质灾害预警等有重要指示作用。

RQPF从技术上包括两部分: 雷达回波反射率因子场的外推预报(落区预报)和将回波反射率预报场反演为降水量(降水反演)。目前关于RQPF的研究更多关注于如何准确预报雷达反射率场。对于从回波反射率预报场反演为降水场的技术方法研究较少, 实际上采用何种方案进行降水反演是非常关键的。本文着重研究

后者, 即降水场的反演方案。

雷达定量估测降水(RQPE)和雷达定量降水预报(RQPF)表面上看都是利用雷达反射率因子估算降水量, 实际上RQPE是对已发生的降水进行估算(实况估测), 而RQPF则是对未来可能发生的降水量进行估算(降水预报)。因此RQPF计算方法可借鉴RQPE的方法, 但由于关注的目标不同, 研究的技术和方法也不同。

关于利用雷达开展降水估算的研究国内外已经开展了很多年, 主要分为三类: 概率配对法、Z-I关系法和基于Z-I关系的数学校正法。三类方法都是根据雷达观测的反射率因子Z估算降水强度I。概率配对法由Zawadzki等<sup>[2]</sup>、Atlas等<sup>[3]</sup>提出, 该方法假设任一点任一时刻出现雨强为I的可能性与出现雷达反射率因子为Z的可能性相等, 根据两者概率相等的原则可配出一系列的Z<sub>i</sub>和I<sub>i</sub>对, 针对每个配对统计确定Z与I的对应关系。例如郑媛媛等<sup>[4]</sup>根据雷达不同距离段不同仰角PII资料与雨强I建立概率配对序列, 然后对所有Z和I的配对利用线性回归统计方法建立它们之间的对应关系。

收稿日期: 2009-09-21; 修订日期: 2011-02-28

资助项目: 2007年公益性行业(气象)科研专项“东南地区强降水诱发地质灾害预警报技术研究”(GYHY200706037); 广东省自然科学基金项目“广东省0-3小时短时定量降水预报技术研究”(5001121); CMATG2008Z10; GRMC2007Z03; 2006A02共同资助

通讯作者: 汪瑛, 女, 安徽省人, 硕士, 从事天气预报及雷达定量降水研究。E-mail: loquatwang@163.com

王艳兰等<sup>[5]</sup>进一步简化该方法,不刻意寻找雷达反射率因子 $Z$ 与雨强 $I$ 之间的函数关系,而是将不同的 $Z$ 和 $I$ 进行简单数值对应,他们将回波反射率 $5 \sim 55$  dBZ以间距 $5$  dBZ划分为8个等级,根据统计确立了上述8个回波等级分别对应 $0、2、5、10、17、25、36$ 和 $48$  mm 8个降水值。这种做法的好处在于计算简单,可迅速估算出降水量,其缺点也是显而易见的,将一些反射率区间与有限的几个雨量值对应显然存在不合理性。

$Z$ - $I$ 关系法根据 $Z=al^b$ 指数关系进行雷达估测降水计算。 $Z$ - $I$ 关系法可分几类:固定 $Z$ - $I$ 关系法、动态 $Z$ - $I$ 关系法、分型 $Z$ - $I$ 关系法。固定 $Z$ - $I$ 关系法通过对历史资料进行统计,确定一个固定的 $Z=al^b$ 指数关系并据此进行雷达降水估测;动态 $Z$ - $I$ 关系法不使用历史统计的 $Z$ - $I$ 关系,而是利用实况资料频繁建立动态的 $Z=al^b$ 关系;分型 $Z$ - $I$ 关系法将降水回波性质分为对流云、层状云、冰雹、暖雨区等情况建立不同的 $Z=al^b$ 关系并计算定量降水<sup>[6-13]</sup>。

上述几类方法各有特点,但均存在强调某一因素忽略其它因素的问题,并且对短时强降水尤其是极强降水低估严重。固定 $Z$ - $I$ 关系法计算简单快速,但其关系式不能适应降水系统的变化,且需要大量历史资料来建立统计关系;动态 $Z$ - $I$ 关系法能够适应天气形势的演变,这种做法比使用单一 $Z$ - $I$ 关系合理,缺点是没有对回波分类进行降水估测;分型 $Z$ - $I$ 关系法考虑了不同类型回波对 $Z$ - $I$ 关系的影响,效果更好些,但业务应用中却很难实现自动划分降水回波类型。

基于 $Z$ - $I$ 关系进行数学校正法是通过卡尔曼滤波、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。该方法依赖于 $Z$ - $I$ 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。

雷达定量降水预报在业务上有不少需要研究的问题,目前世界各地建立的短临预报系统一般都包含RQPF产品<sup>[14]</sup>。但与雷达RQPE一样,存在对低量级降水高估、高量级降水严重低估的问题,例如香港的“小涡旋”系统利用高频雨量计资料动态校正 $Z$ - $I$ 关系来计算RQPF<sup>[14]</sup>,检验结果表明对大于 $50$  mm/h的强降水反演效果不佳。

本文针对当前雷达定量降水估测和预报算法研究存在的问题,利用广东省2007—2008年的雷达资料,基于 $Z$ - $I$ 关系法寻找一种新的雷达定量降水估算方案,该算法能自动区分降水回波类型,改善短时强降水低估的问题,且不受局地气候特征影响,便于移植;在雷达RQPF的应用中能减小低量级高估和高量级降水低估的误差。

## 2 资料及其质量控制

本文用到两类资料:1小时降水观测实况和3公里高度的雷达CAPPI拼图。资料收集针对2007和2008年的强降水日进行。由于强降水日样本比一般降水日样本少得多,因此如果把所有一般降水样本参与计算会使统计结果向小量级降水倾斜,容易出现强降水低估的情况。一般来说广东出现一次强降水过程,往往伴有不同量级降水,选取强降水日作为样本,实际也兼顾了不同量级的降水。本文制定强降水日标准为:广东省在雷达覆盖范围内至少有一个雨量站日雨量 $\geq 50$  mm,2007年和2008年总共有154天满足标准,这些降水日都分布在3—11月之间。

目前广东有1600多个区域自动站和86个遥测自动站。采用上述两类站整点1小时雨量作为研究资料集。对雨量资料进行质量控制,通过雷达回波、周围雨情和天气现象剔除伪资料。对可靠的1小时雨量统计分析极大值,并利用极大值剔除奇异值。将1小时降水量分为8个量级:1~5、5~15、15~30、30~45、45~55、55~65、65~85和85 mm以上,小于1 mm的降水不参与统计。质量控制后,总样本量约为28万,各量级的样本数如图1所示,其中1~5 mm的样本超过了21万,占样本数的绝大部分。降水量级越大,样本数越少。

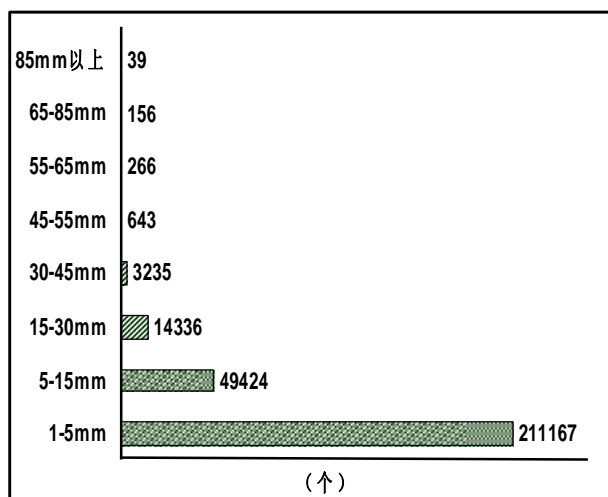


图1 各降水量级样本数分布

雷达资料取广州、汕头、梅州、韶关、阳江5部多普勒雷达,采用2007—2008年3 km CAPPI雷达的拼图资料<sup>[15]</sup>。拼图的网格点数为 $500 \times 400$ ,起止边界为: $108.98 \sim 118.96$  °E,  $19.32 \sim 27.30$  °N;网格点的等经纬网间距为 $0.02 \times 0.02$  °;拼图时间间隔为10分钟。拼图前雷达回波进行了质量控制和插值,剔除超

折射、地物的影响。对 10 dBZ 以下和 75 dBZ 以上的回波不进行降水反演。对一些孤立的极值回波采用 9 点平滑进行滤波。

统计和方法研究的所有雨量计资料为整点的 1 小时雨量资料, 与雷达资料的匹配方式为:  $T$  时刻录得过去 1 小时雨量( $T-1$  小时到  $T$  小时的 1 小时累计雨量)与  $T-1$  到  $T$  之间的雷达回波反射率反演的降水相匹配。

### 3 方 法

相对于概率配对法, Z-I 关系法是一种物理意义比较清晰的估算方法, 但是  $Z=al^b$  中参数  $a$  和  $b$  如何选择存在技术困难。日常业务中有的用统计得到的固定  $a$ 、 $b$  值, 有的用实验得到的  $a$ 、 $b$  值, 或者动态统计的  $a$ 、 $b$  值, 导致  $a$ 、 $b$  的取值范围相差很大,  $a$  的取值范围为 16~1 200,  $b$  的取值范围为 1~2.87<sup>[15]</sup>。

为了便于对比和寻找最优方案, 本文设计了 4 种雷达定量降水估算方案, 以解决  $a$ 、 $b$  取值问题: 固定 Z-I 关系法、动态 Z-I 关系法、分型 Z-I 关系法和动态分型 Z-I 关系法。为了得到每一种雷达定量降水估算方法的最合理  $a$ 、 $b$ , 且节省计算时间, 本文将  $a$  从 16 开始到 1 200 之间以 20 为间隔(60 个  $a$  值)、 $b$  从 1.0 开始到 2.87 之间以 0.05 为间隔(38 个  $b$  值)计算  $60 \times 38$  组  $Z=a_m l^{b_n}$  ( $m=1, 2, \dots, 60; n=1, 2, \dots, 38$ ), 同时计算  $60 \times 38$  个判别函数<sup>[16]</sup>CTF2, 当 CTF2 最小时的  $Z=al^b$  作为最优 Z-I 关系。

$$CTF2 = \min \left\{ \sum_i ((H_i - G_i)^2 + (H_i - G_i)) \right\},$$

其中  $H_i$  为 Z-I 关系反演降水,  $G_i$  为实测降水,  $i$  为自动雨量站序列。

然而利用外推预报做降水量反演时包含了外推技术的误差, 对衡量降水反演不客观, 因此本文利用雷达回波实况代替外推场, 则计算的雷达 RQPF 误差代表的是降水反演技术的误差。将回波反射率外推场反演为降水的方法与雷达 RQPE 方法类似, 区别在于雷达 RQPE 可用实况雨量进行校正, 而雷达 RQPF 只能利用无雨量校正的 RQPE 方法进行反演。

#### 3.1 固定 Z-I 关系法

利用 2007—2008 年强降水日的雷达反射率因子和 1 小时降水历史资料, 统计得到一个适合广东地区的 Z-I 关系。具体做法是: 假设总共有  $N$  个小时的资料, 每小时都计算  $60 \times 38$  组 Z-I 关系和 CTF2, 取 CTF2 最小的 Z-I 关系作为该时次的最优 Z-I 关系, 最后得到一个长度为  $N$  的最优 Z-I 关系(包含  $a$  和  $b$  值)数组, 对  $a$ 、 $b$  值分别进行加权平均, 得到广东地区的固定 Z-I

关系,  $Z=220.8l^{2.23}$ , 这个统计结果可直接用于雷达 RQPE 和反射率预报场计算为降水场中。显然采用固定 Z-I 关系运算速度快; 缺点是前期需要做很多统计工作, 且由于各地气候背景的差异, 业务移植不方便。

#### 3.2 动态 Z-I 关系法

动态 Z-I 关系建立在逐时快速更新资料的基础上, 利用上一个小时雷达反射率资料和 1 小时降水实况资料, 计算  $60 \times 38$  组  $Z=a_m l^{b_n}$  ( $m=1, 2, \dots, 60; n=1, 2, \dots, 38$ ) 雷达 RQPE 和 CTF2, 选择 CTF2 最小的 Z-I 关系作为该时次最优 Z-I 关系; 将上一小时最优 Z-I 关系应用在下一小时雷达回波反射率预报反演为降水场中。从理论上来说该方法的优点是前期不需要收集大量的资料样本做统计准备, 只需统计上一个小时的最优 Z-I 关系, 便于移植, 虽然比固定 Z-I 关系法计算速度慢, 但是相比一些数学算法校正的速度要快; 缺点是对同一时刻的降水类型没有进行分类, 所有降水类型都用同一个  $a$ 、 $b$  值的 Z-I 关系。

#### 3.3 分型 Z-I 关系法

由于降水强度与回波强度密切相关, 不能用一个通用的 Z-I 关系来计算不同回波强度下的降水, 应对降水进行分型, 但是业务应用中区分对流云和层状云比较困难, 故本文对分型法采取一种替代处理: 使用分级 Z-I 关系, 即针对不同回波强度建立不同 Z-I 关系反演降水。将回波反射率从 10 到 75 之间以 5 dBZ 为间隔分为 13 个等级; 根据  $Z=a_m l^{b_n}$  ( $m=1, 2, \dots, 60; n=1, 2, \dots, 38$ ), 对每小时每个等级进行  $60 \times 38$  组的雷达 RQPE 和 CTF2, 然后根据 CTF2 最小原则判断选取最优的一组  $Z=a_k l^{b_k}$  ( $k=1, 2, \dots, 13$ ); 假设有  $N$  个小时的资料, 计算  $N$  小时的最优 Z-I, 得到序列  $Z=a_{j,k} l^{b_{j,k}}$  ( $j=1, 2, \dots, N; k=1, 2, \dots, 13$ ); 对 13 个等级的 Z-I 关系进行  $N$  小时的加权平均, 得到最终的统计分型  $Z=a_k l^{b_k}$  ( $k=1, 2, \dots, 13$ )。最终统计分型 Z-I 关系可直接用于雷达回波反射率预报场反演为降水场。分不同回波强度等级的统计方法与分降水类型的统计原理类似, 因此该方法的优点是对雷达拼图上的降水进行了简单的分类统计, 但是由于使用了两年资料进行统计平均, 平滑了短时极强降水等小概率事件。

图 2 给出分型法中 Z-I 关系随回波反射率的变化曲线。 $a$  值随回波强度增大而增大,  $b$  值在 30~45 dBZ(在 45 dBZ 以下)内变化不大, 比较平稳, 回波强度大于 45 dBZ 则随着回波强度变强也快速增大。不同等级回波取不同的  $a$ 、 $b$  值, 一定程度描述了回波增强对降水的影响。

#### 3.4 动态分级 Z-I 关系法

尽管前面的分级 Z-I 关系考虑不同等级的降水,

但是一个平均意义下(两年资料)的分级处理极可能忽略同一等级回波强度在不同的季节(如前后汛期)和不同的天气系统下(热带系统和西风带系统)的降水差异,因此,一个更好的定量降水估测算法,不一定非要建立在长期的观测资料基础上,即定量降水算法的统计代表性可能不在于遍历各种资料,而在于能否实时刻画降水系统的时间变化。基于以上考虑,本文建立了动态分级 Z-I 关系法。将回波反射率从 10 到 75 之间以 5 dBZ 为间隔分为 13 个等级;根据  $Z=a_m I^{b_m}$  ( $m=1, 2, \dots, 60; n=1, 2, \dots, 38$ ), 对上一时刻每个等级进行  $60 \times 38$  组的雷达 QPE 和 CTF2, 然后根据 CTF2 最小原则判据选取最优的一组  $Z=a_k I^{b_k}$  ( $k=1, 2, \dots, 13$ ); 将上一时刻的最优分级 Z-I 关系用于雷达回波反射率预报场反演降水场中。

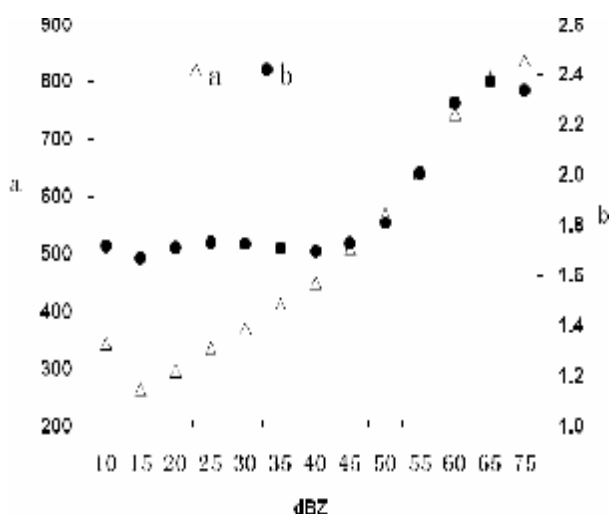


图2 分型 Z-I 关系统计的  $a$ 、 $b$  随 dBZ 变化

在业务应用中,该方法可以以频繁更新的方式(6分钟更新)将回波强度进行分类,分别建立各个回波等级的 Z-I 关系。该方法只考虑降水强度和降水性质在很短时间(6分钟)内的延续性,因此能精准抓住一些极强的短时强降水的回波点。另外,该方法不需要历史资料,能够很快(6分钟)根据当地的资料建立 Z-I 关系,非常便于移植,能降低短时强降水尤其是极强降水的反演误差,而且没有涉及复杂的计算,运算速度较快。有可能某些等级范围内的回波在上一时刻没有出现,而下一时刻出现了,在动态分级统计中可能没有该回波等级的 Z-I 关系对应,那么在下一时刻该等级回波的 Z-I 关系用分型 Z-I 关系统计的结果代替。

### 3.5 RQPE 和雷达回波反射率预报场反演降水技术方法的讨论

本文设计的方法能用于雷达 QPE 的计算,也能将雷达回波反射率预报场反演为降水(RQPF 算法的一部

分)。而固定 Z-I 关系法和动态 Z-I 关系法对 RQPE 的反演技术方法相同,分型 Z-I 关系法和动态分级法相同,因此本文的雷达 QPE 只有两种方法:固定 Z-I 关系法和分型 Z-I 关系法。而上文所描述的四种方法在雷达回波反射率反演降水中是不同的,因此有 4 种雷达回波反射率预报场反演降水方法。

本文的研究目的是寻找一种将雷达回波反射率预报场更精确反演为降水的方法,是雷达 QPF 的最后一个步骤,而雷达回波反射率预报场存在误差,用预报场反演的 RQPF 也包含了预报场的误差,对评定本文的技术方法好坏不客观,因此本文用雷达回波反射率的实况作为预报场计算 RQPF,通过分析该 RQPF 评定雷达定量降水方法的好坏。

## 4 结果分析

用绝对误差和相对误差表示雷达定量降水的误差。所有误差都在站点上计算。

$$AE=QPE-OBS$$

$$RE=(|QPE-OBS|/OBS) \times 100\%$$

AE: 绝对误差, RE: 相对误差, QPE: 雷达定量降水估测, OBS: 实测雨量。

对 1~5、5~15、15~30、30~45、45~55、55~65、65~85 和 85 mm 以上的 8 个降水量级分析绝对误差和相对误差,分析各方法在各降水量级的反演效果。

### 4.1 RQPE

根据 2007 和 2008 年的 1 小时实况雨量和广东拼图资料,计算每小时雷达 QPE,将雷达 QPE 插值到站点与实况进行对比。每个小时的自动站雨量实况分为两部分:2/3 和 1/3,2/3 雨量实况用于寻找最优 Z-I 关系,1/3 的雨量实况用于检验所找到最优 Z-I 关系。图 3 是 1/3 检验样本的固定 Z-I 关系和分型 Z-I 关系的 RQPE 与实况对比结果。

固定 Z-I 关系的 RQPE 随着降水强度增强也同步增强;对 1~5 mm/h 的降水高估,高估 40%;对 5 mm/h 以上的降水低估,低估幅度随降水量级增大,5~45 mm/h 的降水低估幅度为 1%~8%,大于 45 mm/h 的 QPE 低估 19%~30%,平均估测误差达到 20%。

分型 Z-I 关系的 RQPE 在各个量级与实况更接近,对 1~5 mm 高估,且高估程度大于平均固定 Z-I 的 RQPE,而 5~45 mm 仅是略有高估;对 45~65 mm 的 RQPE 估测误差较小,相对误差在 2%左右;对 65 mm 以上的降水低估,相对误差在 11%~13%之间;估测的平均相对误差仅为 4%左右。

因此固定 Z-I 关系法对 1~5 mm/h 的雷达 RQPE 优于分型 Z-I 关系法,对其余降水量级的估测效果比

分型 Z-I 关系法差, 尤其是短时极强降水低估明显。分型 Z-I 关系法对雷达 QPE 的反演效果优于固定 Z-I 关系法。

### 4.2 雷达定量降水结果和误差分析

图 4 给出了四种方法的实测雨量和雷达定量降水散点图。固定 Z-I、动态 Z-I、分型 Z-I 和动态分级 Z-I

关系法的估测降水和实测降水的相关性逐渐升高, 相关系数分别为 0.53、0.61、0.78 和 0.87。越接近直线的点表明雷达定量降水的效果越好, 高于直线说明高估, 低于直线的点为低估。表 1 给出了四种方法在各降水量级的误差分析。

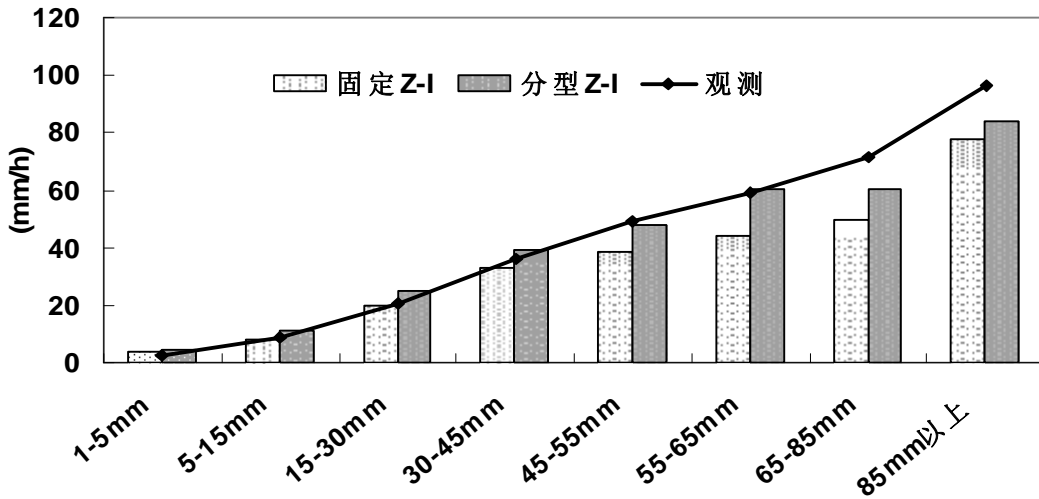


图 3 1/3 检验样本的 QPE 和实况降水对比

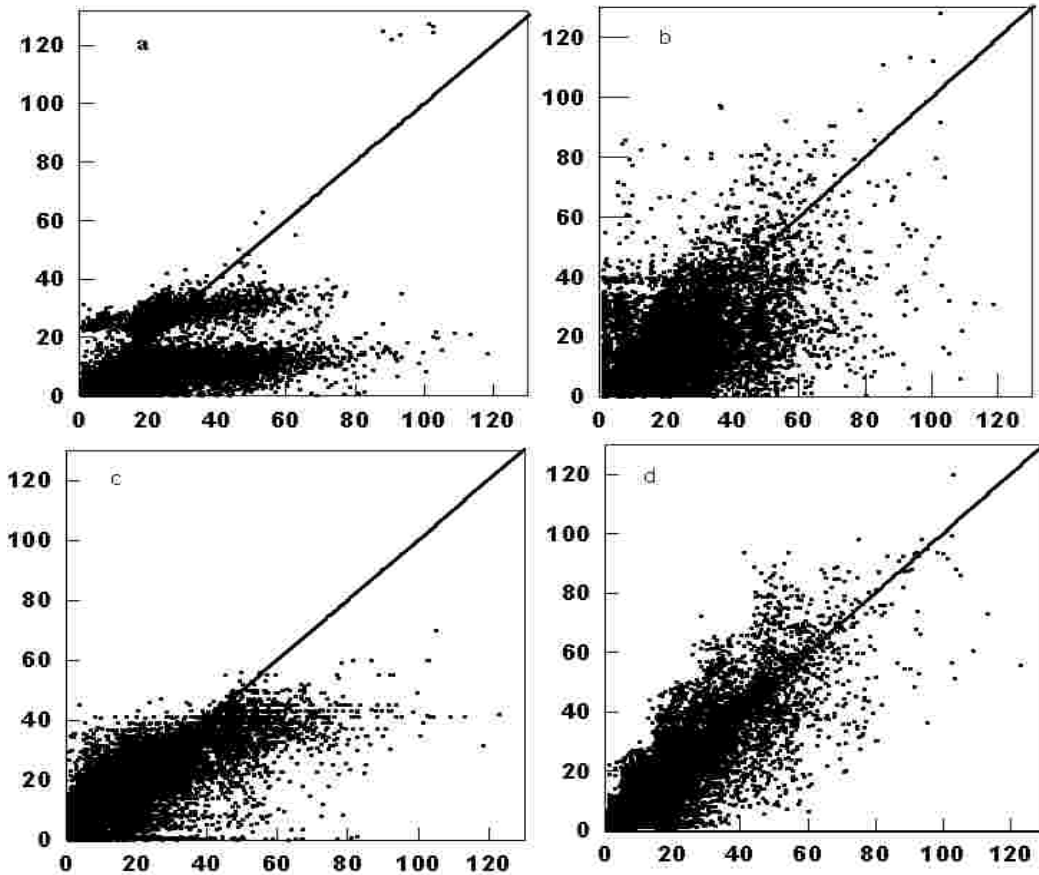


图 4 实测雨量和雷达定量降水散点图 a. 固定 Z-I; b. 动态 Z-I; c. 分型 Z-I; d. 动态分级。

固定 Z-I 关系法对雷达定量降水的反演存在低估, 随降水强度增大, 低估程度趋于明显, 对 85 mm 以上的降水低估误差达到 59.9 mm, 各量级的平均误差为 -25.72 mm。

动态 Z-I 关系法反演的降水与实况的相关系数略有提高, 对大于 30 mm 的降水低估明显, 相比固定 Z-I 关系法, 对 1~5 mm 高估明显, 对 85 mm 以上低估显著, 而对 5~85 mm 之间的降水量级反演效果优于固定 Z-I 关系法; 各量级的平均误差为 -17.89 mm。

分型 Z-I 关系法计算的雷达定量降水与降水实况的相关性显著, 达到 0.78, 散点图也显示集中性较好, 但是仍然存在低量级高估、高量级低估。对 85 mm 以上的低估仍然在 50 mm 以上。

动态分级 Z-I 关系法的结果集中, 随降水实况增

大, 雷达定量降水同步同幅度增大, 在各个量级反演的降水误差大幅降低, 雷达定量降水和实况降水的相关系数达到 0.87。小于 30 mm 的平均估测误差在 0.5 mm 以内, 30 mm 以上也存在低估现象, 随降水量级增大, 低估程度也增大, 低估最大的是 85 mm 以上的量级, 但是误差比前几种方法显著减小, 为 17.48 mm。

对 2007—2008 年 1 小时降水实况的统计表明, 75.6% 的样本是在 1~5 mm 量级的, 17.7% 为 5~15 mm 量级, 而大于 45 mm 的样本数仅为 864 个, 占总样本数的 0.3% 左右, 大于 85 mm 的仅有 39 个。样本在各降水量级的分布是降水低估明显的最主要原因; 在统计的过程中, 根据最小 CTF2 判据, 统计的 a、b 组合向低量级的降水倾斜, 因此统计出的最优 Z-I 关系会使雷达定量降水普遍偏小。

表 1 各降水量级的雷达定量降水误差

误差分析		1~5 mm	5~15 mm	15~30 mm	30~45 mm	45~55 mm	55~65 mm	65~85 mm	85 mm 以上	平均
固定 Z-I	AE/mm	1.22	-2.11	-8.13	-17.83	-31.35	-41.76	-45.91	-59.90	-25.72
	RE/%	50.21	24.43	39.68	49.82	63.62	70.78	63.36	62.15	59.74
动态	AE/mm	3.08	0.92	0.02	-10.75	-17.07	-26.58	-14.37	-60.36	-17.89
	RE/%	127.45	10.68	0.09	29.95	34.61	45.07	-9.83	62.67	40.78
分型	AE/mm	1.06	1.11	-1.87	-7.87	-16.45	-23.91	-36.49	-55.44	-17.48
	RE/%	43.62	12.78	9.13	21.91	33.39	40.52	50.33	57.55	40.59
动态分级	AE/mm	0.52	0.20	0.10	-0.61	-2.83	-5.04	-13.95	-17.48	-5.14
	RE/%	21.12	2.31	0.49	1.71	5.74	8.53	19.24	18.38	11.97

而动态分级 Z-I 关系法能有效减小样本数量对结果的影响: 动态法没有平滑掉一些极端降水; 分级相当于对回波按降水类型分类, 因此动态分级 Z-I 关系法相当于将降水类型分型统计 Z-I 关系, 而且是通过上一时刻雨量站的校正实现动态的分型统计, 能显著减小雷达定量降水误差。

通过对固定 Z-I、动态 Z-I、分型 Z-I 和动态分级 Z-I 关系法的结果分析表明单纯的动态优于固定 Z-I 关系法, 而分型法优于动态法, 动态分级法最优; 误差分析表明动态分级法对各个量级的降水估测误差都小于其它三种方法, 对 1 小时大于 30 mm 的短时强降水的估测优势明显, 减小了大于 55 mm/h 的极强短时降水的反演误差。

## 5 个例分析

图 5 给出了 2007 年 6 月 9 日 22 时的雷达定量降水和 22—23 时的 1 小时雨量实况。1 小时实况雨量最大值为 61.9 mm, 位置为 113.41 °E, 23.61 °N。存在两个高值区, 分别分布在 112.2~112.7 °E, 23.3~23.6 °N 和 113.1~113.7 °E, 23.4~23.7 °N 之间, 极值区的

范围约为 50~60 mm。

图 5A 中固定 Z-I 关系法对降水的反演与实况相比降水分布形态和落区一致, 也存在两个极值中心, 但是量级上相差太多, 两个极值中心的降水在 10~16 mm 之间, 与 50~60 mm 实况相比有 30~40 mm 的误差。

图 5B 动态 Z-I 关系法对降水的反演比固定 Z-I 关系法好。降水落区与实况一致, 降水极值中心一个明显一个不明显, 一个在 30~45 mm 之间, 另一个在 35~55 mm 之间, 虽然比实况小, 但是比固定 Z-I 的结果在量级上有了 20~35 mm 的改进。

图 5C 中分型 Z-I 关系法反演的雷达定量降水比固定 Z-I 关系有了微小的改进, 30~40 mm 的降水落区比实况大, 但是降水的极值中心并没有反应出来, 极值中心低估了 10~20 mm。

图 5D 的动态分级 Z-I 关系反演的降水在量级上比前三种方法有改进, 降水极值中心与实况接近, 但是对中间量级(10~20 mm)的降水有高估现象, 高估约 10 mm 左右。

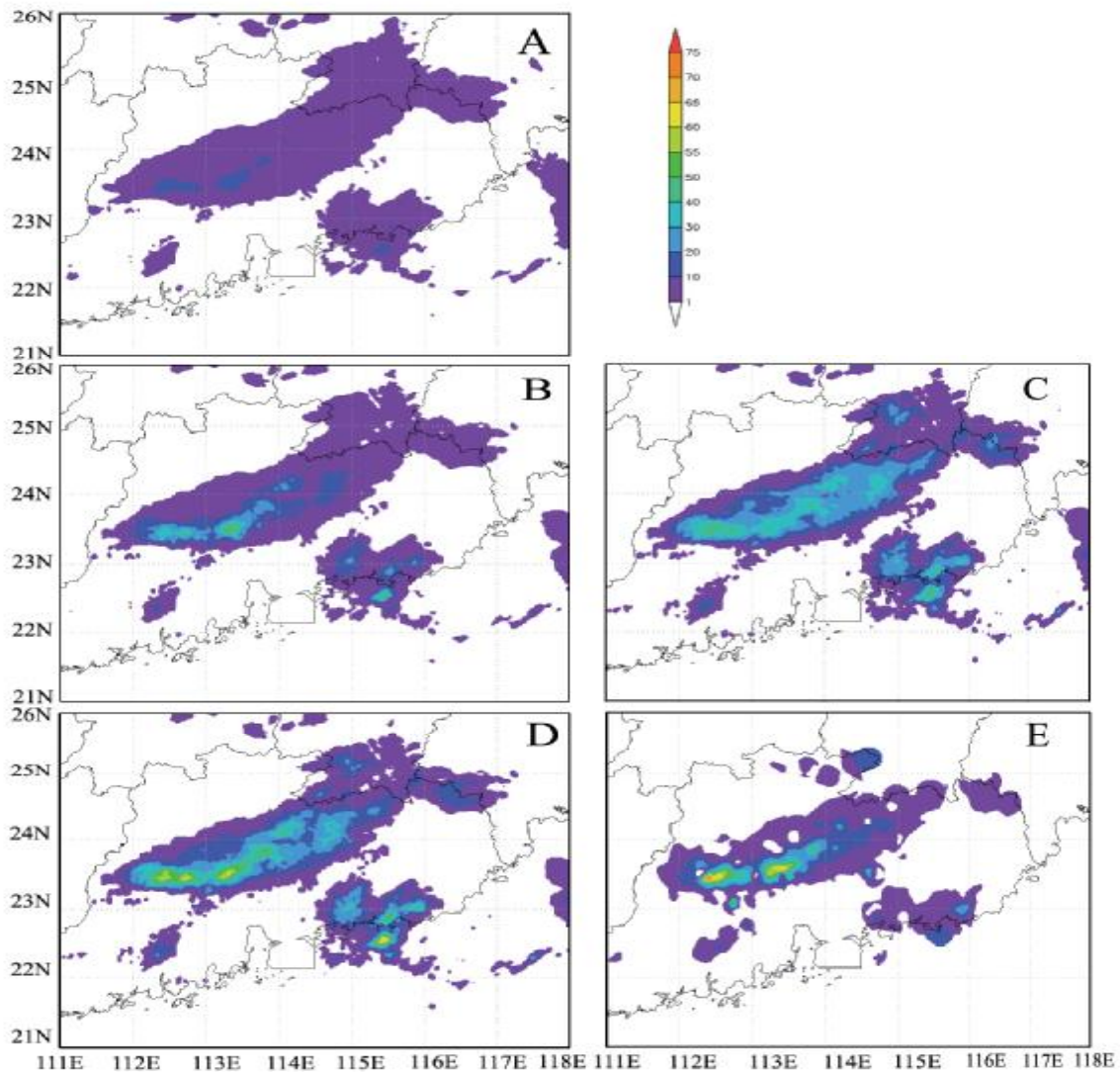


图 5 雷达定量降水结果和实测降水 A. 固定 Z-I; B. 动态 Z-I; C. 分型 Z-I; D. 动态分级 Z-I; E. 雨量站实况。

## 6 结 论

本文对雷达 QPE 的研究表明, 固定 Z-I 关系法对 1~5 mm/h 降水量级的高估, 但优于分型 Z-I 关系法; 分型 Z-I 关系法对 5 mm/h 以上的降水估测比固定 Z-I 关系好, 随降水量级增大其优势越明显。

对四种雷达定量降水的误差分析和个例计算表明, 动态法优于固定 Z-I 法, 分型优于动态, 动态和分型结合-动态分级 Z-I 关系法对各降水量级的误差较小; 动态和分型法能避免统计结果向低量级降水倾斜, 但是动态法对雷达定量降水的估测不稳定, 对降水回波面较大、处在降水过程的中间阶段、前后时刻降水性质变化不大的时段反演效果好, 而在降水的生消或者局部强降水时效果都不理想, 误差十分大; 动态分

级法对降水各量级的平均估测误差为 12% 左右, 比固定 Z-I 关系法提高了 47%, 而比动态 Z-I 和分型 Z-I 提高 28% 左右。

利用两年的完整资料, 通过对几种雷达定量降水的分析对比表明, 找到了一种对雷达 QPE 和回波反射率预报场反演降水场的较好方法: 动态分级 Z-I 关系法。该方法在业务应用中能实现降水类型自动分型, 并统计不同降水类型的 Z-I 关系, 而且通过上一时刻雨量站的校正进行实时校正; 对各降水量级的反演效果好, 尤其改善了对短时强降水、尤其是大于 55 mm/h 的短时极强降水低估的问题; 并且在业务应用中仅需 15 秒, 能满足 6 分钟更新一次计算结果的需要; 不依赖气候统计, 便于移植。

## 参 考 文 献:

- [1] BRYAN C Young, ALLEN A Bradley, WITOLD F krajewski. evaluating NEXRAD multisensor precipitation estimates for operational hydrologic forecasting[J]. J Hydrometeor, 2000, 1(3): 241-253.
- [2] CALHEIROS RV, ZAWADZKI T J. Reflectivity rain-rate relationships for radar hydrology in Brazil[J]. Climate Apple Meteor, 1987, 26(1): 118-132.
- [3] ATLAS D, ROSENFELD D, WOLFF D B. A climatologically tuned rain rate relations and links to area-time integrals[J]. Journal of Applied Meteorology, 1990, 29: 1 120-1 135.
- [4] 郑媛媛, 谢亦斌, 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(3): 192-197.
- [5] 王艳兰, 唐伍斌, 周文志, 等. 利用多普勒雷达资料作站点雨量及面雨量临近预报. 气象科学, 2008, 28(3): 322-327.
- [6] ZHANG J, HOWARD K, XU X. A warm season radar QPE algorithm using adaptive Z-R relationships[C]. Proc World Environmental and Water Resources Congress 2008, Honolulu, HI, USA, Amer Soc Civil Engineers, CD-ROM, 420.pdf.
- [7] GERSTNERA E -M, HEINEMANN G. Real-time areal precipitation determination from radar by means of statistical objective analysis[J]. Journal of Hydrology, 2008, 352: 296-308.
- [8] 陈秋萍, 刘锦绣, 余建华等. 雷达定量估测不同类型降水[J]. 气象科技, 2008, 36(2): 233-236.
- [9] 冀春晓, 陈联寿, 徐祥德, 等. 多普勒雷达资料动态定量估测台风小时降水量的研究[J]. 热带气象学报, 2008, 24(2): 147-155.
- [10] 陈秋萍, 余建华, 杨林增, 等. 闽中北前汛期多普勒雷达定量估测降水分析[J]. 气象, 2006, 32(4): 56-61.
- [11] 王叶红, 崔春光, 赵玉春. 变分技术在校准数字化天气雷达定量估测降水中的应用[J]. 气象, 2001, 27(10): 3-7.
- [12] 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, 16(2): 255-256.
- [13] 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.
- [14] LI P W, EDWIN S T Lai. Short-range quantitative precipitation forecasting in Hong Kong[J]. Journal of Hydrology, 2004, 288: 189-209.
- [15] 胡胜, 伍志方, 刘运策, 等. 新一代多普勒天气雷达广东省区域拼图初探[J]. 气象科学, 2006, 26(1): 74-80.
- [16] 张培昌, 杜秉玉, 戴铁丕. 雷达气象学[M]. 北京: 气象出版社, 2001: 181-187.

## AN APPROACH FOR RADAR QUANTITATIVE PRECIPITATION ESTIMATE BASED ON CATEGORICAL Z-I RELATIONS

WANG Ying<sup>1</sup>, FENG Ye-rong<sup>1</sup>, CAI Jin-hui<sup>2</sup>, HU Sheng<sup>1</sup>

(1. Guangdong Meteorological Observatory, Guangzhou 510080, China;

2. Shunde District Meteorological Office, Shunde 528300, China)

**Abstract:** Radar-based quantitative precipitation estimate (RQPE) and forecast (RQPF) with high spatial and temporal resolutions are playing very important role in flood monitoring and warning. Nowadays, researches on RQPE and RQPF are focused on probability-fitting, Z-I relations and mathematic algorithms for correction based on Z-I relations. Deficiencies somehow were found in the above methods, of which all underestimate precipitation amount in nowcasting of torrential rain, and especially seriously in extremely heavy downpour. In order to find a better way to calculate precipitation from the radar echo reflectivity, statistics and case studies are made in this article on errors of four methods on radar-based quantitative precipitation estimate and forecast. The better way will alleviate underestimation of precipitation and can be applied with easiness, readiness and improved accuracy in operational forecasting. The results show that the method of categorical Z-I relations is the best one among the four available on RQPE and RQPF. It improves the estimation of short-range precipitation for torrential rain, especially precipitation greater than 55 mm/h. The elapsed time in calculating RQPE and RQPF is only 15 seconds, thus satisfies requirement of updated observation every six minutes. In particular, the calculation doesn't depend on climatic statistics, therefore makes it easy to be implemented elsewhere.

**Key words:** RQPE; RQPF; Z-I relations; adjusting; Categorization