

# 雷达-雨量计联合估测降水初值场形成方法探讨

李建通<sup>1, 2, 3</sup> 郭 林<sup>2</sup> 杨洪平<sup>4</sup>

1 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029

2 厦门市气象局, 厦门 361012

3 中国科学院研究生院, 北京 100049

4 中国气象局武汉暴雨研究所, 武汉 430000

**摘 要** 在雷达-雨量计联合估测区域降水量中, 参加校准的雷达初值场代表性好坏在很大程度上影响了最终的估测精度和雨量分布。作者从参加校准的雷达初值场的基本要求出发, 分析了先前几种预处理方法的优缺点, 提出一种新的资料预处理方法——时间权重平均法, 并用 1996~1997 年的雷达和地面雨量站实测资料进行了分析。结果表明: 该方法充分考虑了雷达和雨量计观测的时间一致性, 能够在一定程度上改善雷达估测降水的初值场, 提高了估测区域降水量的精度。

**关键词** 雷达 雷达降水估测 区域降水量 精度

**文章编号** 1006-9895(2005)06-1010-11

**中图分类号** P412

**文献标识码** A

## A Study of the Formation of Initial Radar Field in Estimating Areal Rainfall Using Radar and Rain-gauge

LI Jian-Tong<sup>1, 2, 3</sup>, GUO Lin<sup>2</sup>, and YANG Hong-Ping<sup>4</sup>

1 Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences Beijing 100029

2 Xiamen Meteorological Bureau, Xiamen 361012

3 Graduate School of the Chinese Academy of Science, Beijing 100049

4 Institute of Heavy Rain, China Meteorological Administrator, Wuhan 430000

**Abstract** It has been the focus for meteorologist to estimate the distribution and amount of regional rainfall by using weather radar, but the previous work mainly depends on the statistic relationship between radar reflectivity factor ( $Z$ ) and rainfall rate ( $I$ ). Since the 1970s, much effort has been put in the study of combining radar and rainfall-gauge to estimate regional rainfall. However, the performance of the radar initial field used for calibration largely affects the ultimate accuracy of estimation and rainfall distribution in this combination. Thus, this paper focuses on the capability of the radar initial field to describe the spatial distribution of the rainfall, which is very important for improving the precision of estimating regional rainfall by radar and rain-gauge.

After analyzing the disadvantage of the radar initial field formed by using the four previously methods—Plan Position Indicator (PPI) product of low angle, Constant Altitude Plan Position Indicator (CAPPI) product of three kilometer, PPI product of Hybrid Scan, and profiles of radar reflectivity, it is found that the time-consistency is not considered enough in above four methods by us. Therefore, based on the demands of initial field, a new method to form the initial field of radar data, Time Weight Average (TWA) Method, is proposed. The theoretical analysis of the new method indicates that it can overcome the random error of the radar initial field and eliminate the influence of

ground clutter on the estimation precision to some extent. Furthermore, it can recover the actual rainfall distribution in the area without the radar echo due to blocking effect of ground-based target, and reflect the migration of the rainfall echo. As a result, the composite radar initial field shows in good accordance with the actual rainfall distribution. Analysis of the actual radar and rain-gauge data collected during 1996 – 1997 indicates as follows:

(1) The TWA method sufficiently considers the time consistency between the radar detection and the observation of rain-gauge, so it can improve the capability of the radar data to describe the strong center and the spatial distribution of the rainfall. Thus, it meets the demands of regional rainfall estimation by radar and rain-gauge on the initial field of radar echo.

(2) The initial field of radar echo formed using the new method accords with the surface observation in the characteristics of the center location, scope and the values of rainfall, and its accuracy of single point is higher than other initial fields. More than 70 percent of the initial error of the composite radar initial fields is under the initial error at every observational time. It means that the initial error is decreased.

(3) The TWA method shows the clear physical concept and can be treated simply.

The principle is used to form the initial field of the CINRAD/SA radar data in the Huanghe River and Huaihe River valleys rainstorm forecasting system in 2003. The result indicates that the TWA method is able to improve the initial field for estimating rainfall by radar, and reflect the actual rainfall distribution preferably, thus improves the accuracy of estimating regional rainfall.

**Key words** radar, radar rainfall estimation, areal rainfall, precision

## 1 引言

利用天气雷达定量估测降水分布和降水量一直是气象工作者关注的焦点。前期工作主要是用统计的雷达反射率因子( $Z$ )-雨强( $I$ )关系进行估算,从20世纪70年代起,雷达气象工作者重点考虑了综合利用雷达可以连续监测大范围降水及其分布和地面雨量计具有较高的单点测量精度的优点,开展雷达-雨量计联合估测区域降水量的研究。提高雷达-雨量计联合估测的精度主要考虑三个方面:一个是提高参加校准的雷达观测降水场(以下称雷达初值场)真实反映降水空间的分布特征能力,即对地面降水主要特征的描述能力;第二是提高地面雨量站网密度和雨量资料的时间分辨率;第三是误差的客观分析方案。对于误差的客观分析方案,已发展了大量的校准算法,如平均校准法<sup>[1]</sup>、最优 $Z-I$ 法<sup>[2]</sup>、变分校准法<sup>[3]</sup>、卡尔曼滤波校准法<sup>[4]</sup>、最优插值校准法<sup>[5]</sup>以及卡尔曼滤波变分组合<sup>[4]</sup>等,努力提高估测的精度。无论采用哪种方法校准,都是基于这样一个假设:用于参加校准的雷达初值场能够真实描述实际降水的分布。因此,用于校准的雷达初值场与假设的符合程度对估算的精度影响很大。针对提高雷达初值场反映降水的空间分布特征的能力,Shedd等<sup>[6]</sup>提出了扇区混合扫描策略(Sector-

ized Hybrid Scan Strategy)产品, Breidenbach等<sup>[7]</sup>提出了CAPPI(Constant Altitude Plan Position Indicator)产品,其他如O'Bannon<sup>[8]</sup>和Fulton等<sup>[9]</sup>用优化的混合扫描产品, Joss等<sup>[10]</sup>和Vignal等<sup>[11]</sup>提出了垂直反射率廓线订正(Vertical Reflectivity Profile Corrections)产品等作为雷达初值场。国内,戴铁丕等<sup>[12, 13]</sup>也开展了CAPPI和垂直反射率廓线订正做雷达初值场的试验。国内外的研究结果表明:通过改进雷达初值场可以有效提高估测区域降水量的精度。

## 2 雷达-雨量计联合估测区域降水量的方法

为了测量某区域 $S$ 在 $T$ 时段内的降水总量和雨量分布,将 $S$ 区域分为 $m$ 个面积元为 $\Delta S_i$ ,将 $T$ 时段分为 $k$ 个时间间隔,则区域内的降水总量 $M$ 为<sup>[1]</sup>

$$M = \rho \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^k I_{ij} \Delta T_j \Delta S_i, \quad (1)$$

其中, $\rho$ 为水的密度, $I_{ij}$ 为第 $i$ 个面积元在第 $j$ 个时间间隔内的降水强度, $\Delta T_j$ 为第 $j$ 个时间间隔的时间长度。

从式(1)可知:区域降水总量的精度取决于各个面积元、各个时间间隔中的估测精度。雷达-雨量计联合估测区域降水总量就是用地面一个时段内

雨量计的测值去校准雷达初值场,得到各个面积元的降水量和区域降水总量。在实际的业务应用中,都是用有限数量的地面雨量站作为标准,对雷达初值场进行校准。早期有平均校准法、空间校准法,最近几年使用的有变分校准法、最优插值法、自适应最优插值法<sup>[14]</sup>等。1988年, Joss 等<sup>[10]</sup>对此进行了研究,发现用位于雨量计网中心的单部雷达每年平均测量的降水仅为整个瑞士 60 个雨量计测值的 25%,在我国武汉地区使用 WSR-81 型数字化雷达的彩色分层资料,对于大范围降水的雷达估测值仍比雨量站网少。研究还表明<sup>[7]</sup>:纯粹由  $Z-I$  关系参数选择不合适造成的误差不会超过 30%~40%。有些学者认为<sup>[11]</sup>产生上述误差的重要原因是由雷达和雨量站取样空间不一致和反射率因子值( $Z$ )垂直廓线变化引起。

从理论和实际业务应用来看:雷达初值场代表性的好坏对最终估测的降水总量和雨量分布有很大影响。

### 3 降水估测的雷达初值场

#### 3.1 雷达初值场的基本要求

雷达-雨量计联合校准法估测区域降水是充分利用雷达能够连续监测降水的空间分布结构和雨量站单点测量准确性的优点,应用客观分析方法,将有雨量站点上的雷达和雨量计观测值之间的差异分析到每个格点,最终得到降水估测场。因此,对雷达初值场的基本要求是:能够描述反映降水的空间结构特点,而雷达的观测误差主要通过地面雨量计校准加以订正。

从上面的分析可知:雷达初值场资料的时间间隔越短,每个场描述的降水空间结构和实际的地面降水越一致,用相应时段的雨量计资料校准后,其估测的精度就越高,相应 1 小时内的雨量分布和区域降水总量精度也越高。前人的工作<sup>[1]</sup>表明:资料间隔不超过 15 min 为宜,这样的间隔充分考虑地面雨量站采集空间和雷达测量的有效照射体积的时空一致性,即地面测量的降水和雷达测量的该点上空降水的回波是一致的。

现有的业务系统无法实现地面雨量站网资料 15 min 准实时收集,因此,用 0~15 min 间隔的雨量站和雷达资料进行降水估测不具有现实性,业务上通常使用 1 h 的地面雨量站资料(或自动站资料)

作为校准的依据。地面站资料代表的是 1 h 该测量点的降水量,对应该点的雷达初值场也要代表 1 个小时平均强度,其代表性越好,校准后的测量精度也越高。

#### 3.2 形成雷达初值场的几种常用方法

##### 3.2.1 低仰角的平面显示产品(PPI)——方法 I

用估测降水时段中某一观测时刻低仰角全方位雷达扫描数据的 PPI 产品作为降水观测的初值场,这种方法最简单,但缺点也最明显,主要有以下三点:

(1) 雷达回波高度不一致。当雷达以非零度仰角作 PPI 扫描时,是一种圆锥面扫描,随着距离的增加,观测高度增加,雷达的有效照射体积随之增大,充塞系数降低。随着观测的回波高度增加、有效照射体积增大、充塞系数降低,地面雨量站和雷达的采样空间随距离增加一致性逐渐减弱。

(2) 地物影响。通常在雷达站的四周或多或少存在地物遮挡,当用低仰角观测时,不可避免造成地物后面的扫描线上无降水回波。当地物后面有降水发生时,由于地物遮挡使雷达上没有回波,从而导致降水的过低估测。

(3) 时间代表性差。每个点上的回波随时间是变化的,此刻的强中心未必是当前小时的强中心,由于校准方法的限制,使最终估测的雨量分布不合理,甚至错误(详见 4.2 节的讨论)。因此,用某一时刻的雷达观测的回波强度来代表 1 小时的平均降水强度,其时间代表性差。

用方法 I 的数据作为雷达初值场效果最差,一般只在没有更好资料的情况下勉强使用。

##### 3.2.2 等高位置平面显示(CAPPI)产品——方法 II

为了克服方法 I 中的前两个缺点,一些研究者用 1 小时中某一时刻的不同仰角全方位扫描组合的体积扫描(VOL)资料经过插值处理成高度为 1 km 或 3 km 的 CAPPI 反射率因子场资料,即将雷达初值场订正到一个较低的等高面上,克服由于雷达圆锥扫描而造成的校准平面不等高的缺点,由于采用 VOL 资料,在一定程度上可以克服由于地物造成的无回波、零度层亮带以及脉冲体积未充满等情况。戴铁丕等<sup>[12]</sup>的研究表明:用 CAPPI 资料比用 PPI 资料进行校准无论从降水总量还是降水量的分布形式等方面均较理想。但 CAPPI 的资料处理麻烦,而且与 CAPPI 的算法有一定的关系,并且也

同样存在时间代表性问题。

### 3.2.3 混合扫描(Hybrid Scan)的 PPI 资料<sup>[6]</sup>——方法 III

方法 III 是对 VOL 资料不同的仰角分段截取资料而获得, 如 0~50 km 取最高仰角 0~50km 的资料, 51~100 km 取第二仰角的 51~100km 资料, 依此类推, 合成一个回波初值场, 其精度同方法 II 相当, 但计算处理简单, 这种方法实际上是方法 II 的一种近似。

### 3.2.4 强度垂直廓线订正<sup>[10]</sup>——方法 IV

上述的三种方法, 都假设某一高度上雷达测量的有效照射体积和雨量站测量空间是一致的, 事实上还存在一定的高度误差。为了进一步取得采样空间的一致性, 一些学者或者统计  $Z$  值随高度变化的气候规律, 或者通过实时的  $Z$  随高度变化来校准上述获得的初值场, 将上述的  $Z$  值订正到近地面, 从而取得更好的空间采样一致性。

上述的四种方法, 都是侧重考虑雷达和地面雨量站采样体积的空间一致性, 但对时间一致性考虑得较少。当回波在发展较快或移动较快的情况下, 无论上述哪种方法, 其代表性受到制约, 仍有较大的时空不一致性。针对上述问题, 本工作从雷达初值场的物理意义出发, 强调两种资料的时间一致性, 提出一种合成雷达初值场的新方法——时间权重平均法。

## 3.3 雷达回波场的集合-时间权重平均法的介绍

### 3.3.1 时间权重平均法公式的推导

时间权重平均法就是将 1 个小时内所有低仰角(厦门资料取仰角小于  $2.5^\circ$ )的 PPI 资料按时间权重进行加权平均。例如: 在 08 时~09 时(国际协调时, 下同)的 1 小时内有三张满足条件的 PPI 数据资料(如图 1 所示), 其相应的观测时刻分别为  $t_1$ 、 $t_2$ 、 $t_3$ , 那么, 在该小时内的降水是由三段(A、B、C)雷达测量累积造成的, 其中  $a$ 、 $b$  分别为线段的

中点。 $t_1$ 时刻观测值用于估测 $[t_1 + 0.5 \times (t_2 - t_1)]$ 时段的降水,  $t_2$ 时刻雷达观测值用于估测 $[0.5 \times (t_2 - t_1) + 0.5 \times (t_3 - t_2)]$ 时段的降水,  $t_3$ 时刻雷达观测值用于估测 $[(60 - t_3) + 0.5 \times (t_3 - t_2)]$ 时段的降水。类似的原理, 如果 1 个小时内有  $N$  个满足条件的 PPI 数据, 那么合成的雷达初值场是用  $N$  个时段的 PPI 数据按时间权重进行平均生成。

为了推导和说明的方便, 我们只采用雷达回波上的一点进行讨论。 $t_1$ 、 $t_2$ 、 $t_3$ ...分别代表雷达测量该点的时刻(单位: min),  $Z_1$ 、 $Z_2$ 、 $Z_3$ ...分别代表雷达测量该点的雨强值(单位:  $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ ),  $R$  代表该点 1 小时的雨量。

(1) 当只有一张 PPI 时, 资料不作其他处理, 直接作为雷达初值场,

$$R = Z_1. \quad (2)$$

(2) 当有两张 PPI 时, 该点的雷达初值场通过下面计算获得,

$$R = \frac{[t_1 + 0.5 \times (t_2 - t_1)] \times Z_1}{60} + \frac{[60 - t_2 + 0.5 \times (t_2 - t_1)] \times Z_2}{60}. \quad (3)$$

(3) 当有三张 PPI 资料时, 可以有

$$R = \frac{0.5 \times (t_1 + t_2) \times Z_1}{60} + \frac{0.5 \times (t_3 - t_1) \times Z_2}{60} + \frac{[60 - 0.5(t_3 + t_2)] \times Z_3}{60}. \quad (4)$$

(4) 类似地, 当有  $N$  张资料时( $N \geq 3$ ),

$$R = \frac{\frac{1}{2}(t_1 + t_2)Z_1}{60} + \frac{\frac{1}{2}\sum_{n=3}^N [(t_n - t_{n-2})Z_{n-1}]}{60} + \frac{\left(60 - \frac{1}{2}[t_{N-1} + t_N]\right)Z_N}{60}. \quad (5)$$

从实际的物理概念来看, 地面雨量计测量的降水量是该小时内所有降水回波经过该点的综合贡献, 而时间权重平均法正是通过对该小时内所有雷

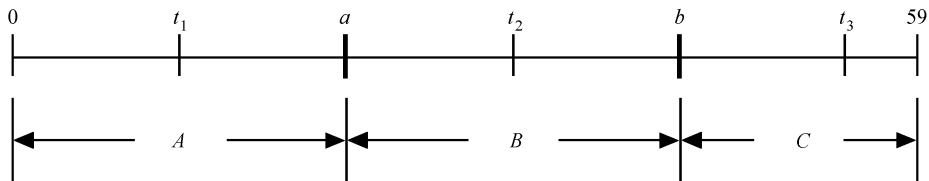


图 1 时间权重平均法合成示意图

Fig. 1 The sketch map of time-weighted average method

达观测回波强度的时间权重合成来代表该小时雷达测量的降水强度。通过这种方法生成的初值场可以改进雷达对 1 个小时内降水空间结构的描述的准确性,尽可能满足降水估测初值场的基本要求,提高估测精度。

### 3.3.2 时间权重平均法对不同回波分布情况的讨论

(1) 1 个小时内所有的观测仰角都相同 当测量点所有观测时刻都有降水回波,通过该法的处理,可以将各个时段的雷达估测的降水量进行累加,得到该点的逐时雨量;当测量点不是所有的时刻都有降水回波,通过该法的处理可以将有降水时刻的降水量累加,形成 1 小时的雨量,那些没有回波的时段则对该小时雨量没有贡献,这克服了某一时段雷达初值场的随机性;对于测量点所有时刻均无降水回波,经过处理后仍无降水回波,不会影响估测。因此,无论当前小时的降水强弱如何变化,均能较好地反映雷达观测的平均强度变化。

(2) 1 个小时内所有的观测仰角不相同 对于地物后的降水回波,高仰角观测可以探测到地物后的降水,通过合成,地物后的降水在雷达观测上有反映,在一定程度上克服地物的影响造成的无降水回波。对于地物,随着仰角的抬高,地物回波的强度随之减弱,合成后的地物回波强度减弱,有效防止地物造成的强回波而导致的降水过高估测和估测精度降低,它对地物影响有消减作用。从降水的生命史可以知道:不同的发展阶段, $Z$  值的垂直分布是不同的。降水回波在高度上具有一定的垂直分布,强回波高度在不同的降水发展阶段高度是不同,当强中心随时间从高处向下移动,降水强度逐渐加强。当强中心在低处对当前时段的降水贡献大,而在高处时强中心对下一时段的降水贡献大,通过该法的处理,能基本代表该处的平均情况。

### 3.3.3 时间权重平均的物理意义

时间权重平均法充分利用了 1 个小时内所有对降水有贡献的雷达观测资料的集合,从上面的分析可知:它能够克服雷达初值场的随机性,在一定程度上能够消除地物对测量精度的影响,恢复由于地物阻挡而造成的无降水回波区的实际降水分布,反映降水回波的移动情况,合成的雷达初值场与实际

的降水分布场具有较好的时间、空间一致性。从集合的角度而言,1 小时内所有低仰角的 PPI 代表了该小时内降水的不同发展阶段,通过对这些 PPI 集合的时间权重平均,也能较好地反映降水过程的落区、强中心和分布的特征。因此,通过该法处理后的雷达初值场具有较好的代表性,可为进一步提高估测区域降水量精度提供更接近实际分布的信息。

## 4 实际资料应用分析

### 4.1 资料来源<sup>①</sup>

采集了厦门雷达站 1996~1997 年天气过程的数字化雷达资料和雷达站四周的漳州、泉州、龙岩、莆田等地区 26 个地面站逐时雨量,地面站雨量大于等于每小时 0.1 mm 的数据样本 1132 个,我们仅对 1 小时内有多张低仰角(仰角小于  $2.5^\circ$ ) PPI 数据的资料进行分析,可用地面雨量站数据样本共 604 个(当 1 个小时内只有一张低仰角的 PPI 资料时,使用的效果同一般的方法,本文不加讨论)。定义地面站网 1 个小时雨量和相应的 1 个小时内的雷达资料为 1 个时次资料,两年总共有 113 个时次。

### 4.2 雷达资料的预处理流程

#### 4.2.1 天气背景简况

为了讨论和说明的方便,我们用 1997 年 5 月 6 日 15 时~1997 年 5 月 6 日 16 时的资料作个例分析。

2000 年 5 月 6 日 00 时的天气图上,华南地区 500 hPa 高空上有南支槽缓慢东移,850 hPa 的暖湿切变在长江流域,广东和福建南部有大范围偏南风低空急流,造成 6~7 日福建南部地区大范围大到暴雨天气过程。雷达回波上表现为混合型的降水特征,即层状云降水中有对流发展的特征。

#### 4.2.2 雷达资料预处理

在该时段内满足条件(仰角小于  $2.5^\circ$ )的 PPI 资料,共有 4 张,观测时刻分别为 15 时 02 分、15 时 22 分、15 时 33 分和 15 时 39 分,观测仰角分别为  $2.49^\circ$ 、 $1.55^\circ$ 、 $1.55^\circ$ 、 $2.49^\circ$ 。程序首先将极坐标转化为直角坐标,库长由原来的 300 m 按算术平均转化为 1 km,再将  $5\text{ km}\times 5\text{ km}$  内所有的不为零的

<sup>①</sup> 厦门雷达站雷达型号 714SD,成都 784 厂生产,1995 年投入业务使用,每月雷达标定一次。

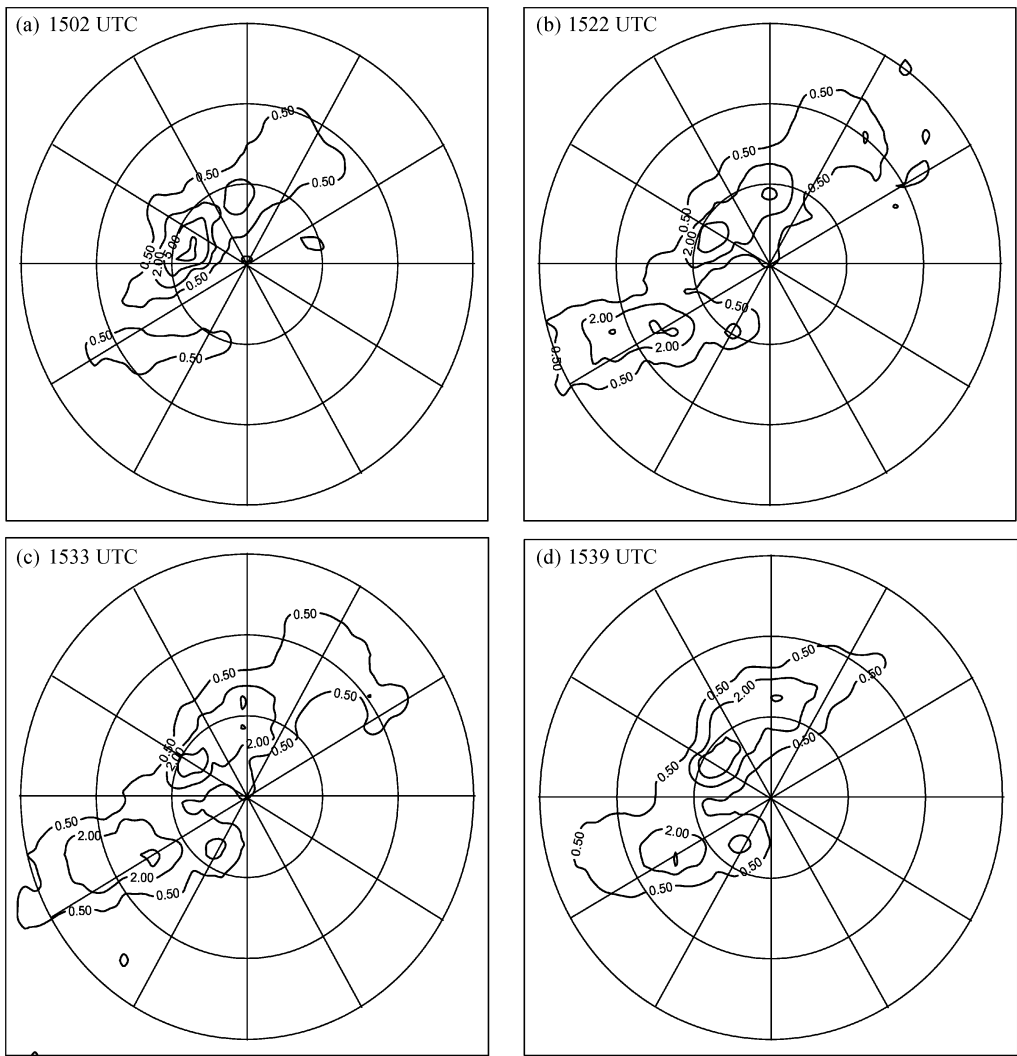


图 2 不同观测时刻雷达估测的降水分布 (单位: mm)。等雨量线的数值为 0.5、2、5、10  
Fig. 2 Distribution of rainfall estimated by radar at different time (units: mm). Rainfall contour lines are 0.5, 2, 5, 10

强度资料进行算术平均, 得到格距为 5 km 的直角坐标的雷达资料, 用  $Z=200I^{1.6}$  转化后的雨量分布如图 2(图中的中心点为雷达观测点, 每个距离圈为 50 km, 正方形区域为估测降水区, 大小为 330 km × 330 km。图 3、图 4 与此相同)。

图 3 是用图 2 为最优校准的雷达初值场, 用自适应最优法校准<sup>[4]</sup>后的雨量分布。图 4a 是按(5)式合成的雷达初值场, 图 4b 是以图 4a 为初值场经最优校准后的雨量分布场。图 5 是雷达站周围的雨量站网分布, 站点左上角数据为雨量计实测雨量值。为了进行误差比较, 我们将雨量站各时刻所对应的雷达数据取出, 并按  $Z=200I^{1.6}$  转化为雨量, 再同地面雨量站各时刻的测量值作精度比较。相对误差

按下式计算:

$$\text{相对误差}(\%) = \frac{|\text{地面雨量站测值} - \text{回波转化的雨强值}|}{\text{地面雨量估测值}} \times 100\%.$$

(6)

表 1 和表 2 分别将雨量站对应的雷达测量值取出, 并按(6)式估算的误差。

4.2.3 图表分析

(1) 从图 5 和图 2 可以看出: 降水主要呈东北—西南走向, 地面降水分布的空间结构分布具有两个强中心的特点, 一个在长泰和漳州附近, 另一个在平和、漳浦、云霄三角地带。另外, 华安县位于降水边界。

(2) 图 2a、d 观测仰角为 2.49°, 其观测的降水

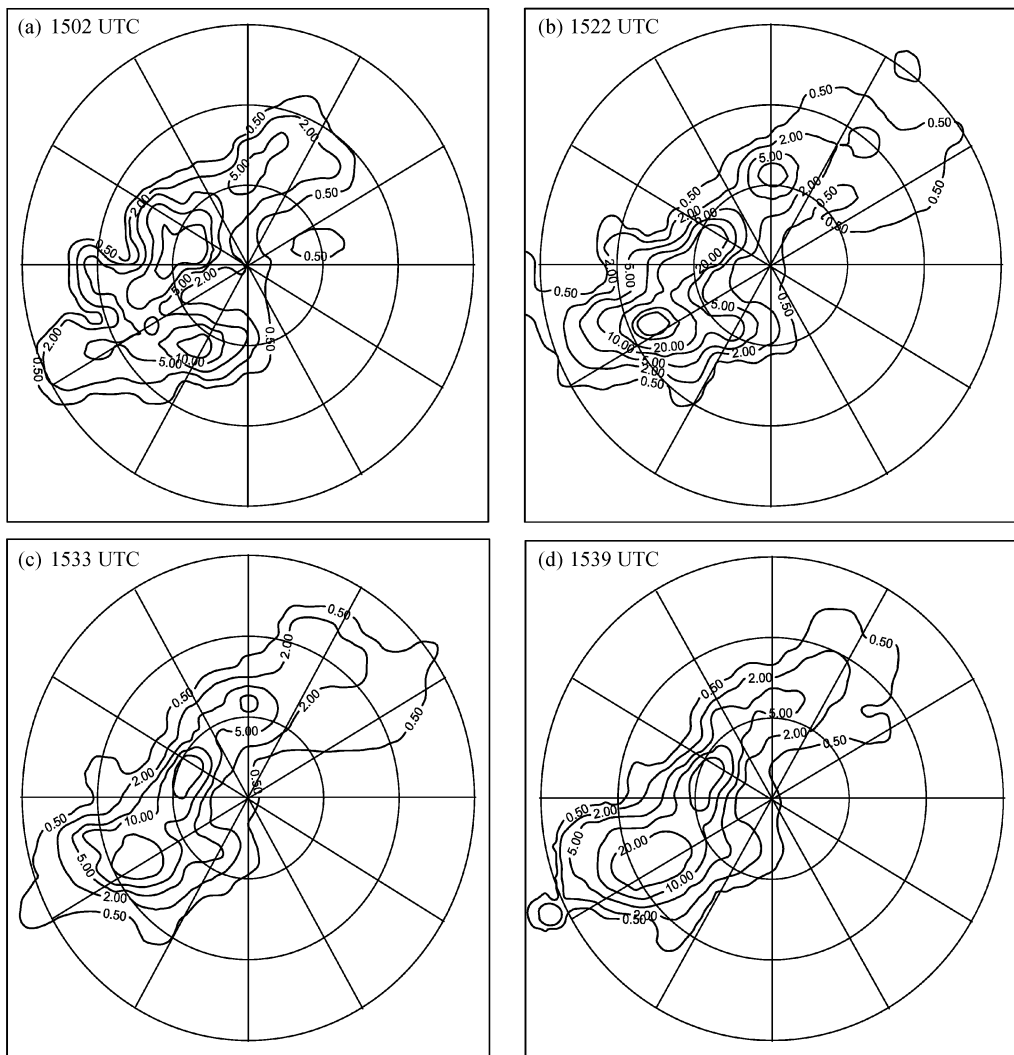


图 3 不同观测时刻雷达资料经校准后的雨量分布 (单位: mm)。等雨量线的数值为 0.5、2、5、10、20、30

Fig. 3 Distribution of rainfall after calibrated at different time (units; mm). Rainfall contour lines are 0.5, 2, 5, 10, 20, 30

面积小于实际降水范围; 图 2b、c 的观测仰角是  $1.55^\circ$ , 其有降水回波的面积和实际降水情况较为吻合。这与前面讨论的要尽可能用接近地面的 Z 分布雷达观测场来作为校准初值场是一致的。图 2a 丢失了一个强降水中心, 而图 2b 和 d 出现了较多的中心, 场的随机性较大, 无法真实反映降水的空间结构特点。从图 2a~d 来看, 降水过程的回波变化较快, 无论用哪个时刻的雷达观测场作为雷达初值场都无法反映该小时地面降水的平均状况, 更无法反映该小时降水空间结构特征, 因此, 无论哪个作为雷达初值场都无法满足雷达-雨量计联合估测降水方法中对雷达初值场的基本要求, 其最终估测的精度也是十分有限的。造成代表性不好的主要

原因就是前面所讨论的时间一致性不足。

(3) 将图 4a 和图 5 进行比较, 可以看出尽管在数值上有较大的误差, 合成的雷达初值场(图 4a)能够反映实际降水中的两个强降水中心位置, 真实反映了实际降水的空间结构特征; 同时雷达初值场也较好反映地面有无降水的情况, 降水的区域一致性也较好。由此可见, 合成的初值场较好地满足了雷达-雨量计联合估测区域降水对初值场的基本要求, 能够较好地代表该小时内地面降水的空间结构特征, 又充分利用了雷达监测连续的优点。

(4) 将图 5 和图 4b 进行比较, 可以看出通过地面雨量站网的校准, 图 4b 无论在强中心位置、降水分布还是估测的数值都与地面雨量站的实际观测

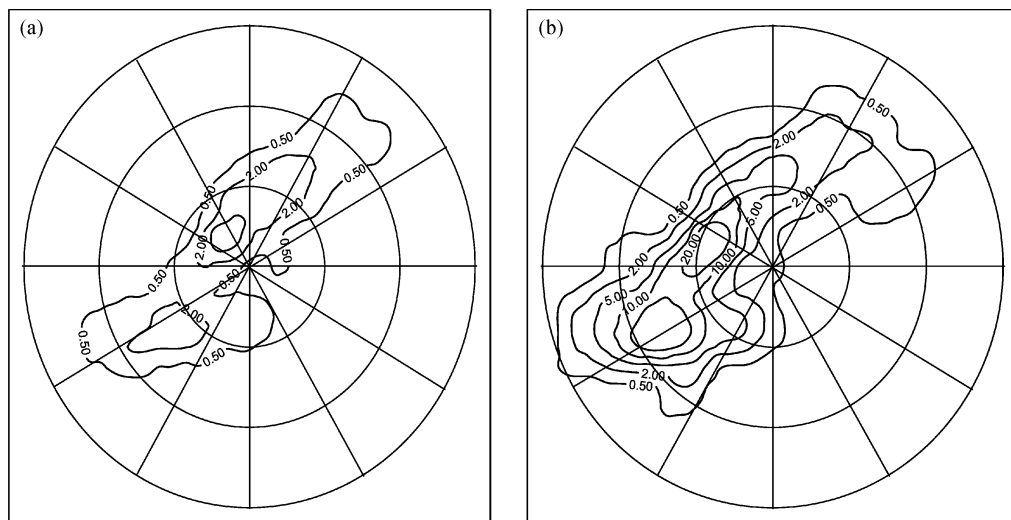


Fig. 4 Distribution of rainfall estimated by composite radar data (units; mm): (a) Before calibrated; (b) after calibrated. Rainfall contour lines are 0, 5, 2, 5, 10, 20, 30

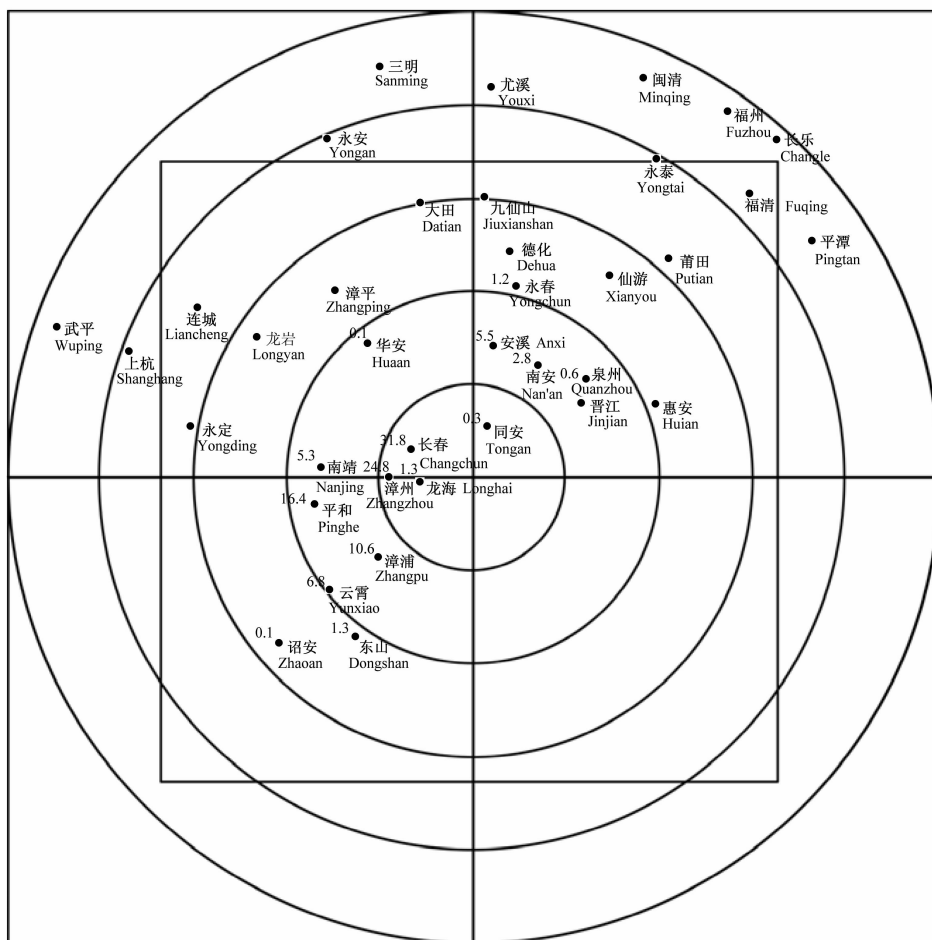


Fig. 5 Distribution of rain-gauge around radar station and its observed value (The data in left-top corner of station's value is observed by gauge, units; mm)

较为一致，地面雨量计单点测量的准确性优点也得到了发挥，能较好改进估测区域降水量的精度。若将图 5 和图 3a~d 分别比较，尽管采用了相同的校准方法，由于图 3 的雷达初值场的代表性不好，满足不了雷达初值场的基本要求，使得最终的估测场

要么少了强中心，要么出现过多中心，都与地面实际的观测情况无论在分布和数值上都有较大出入。

(5) 从表 1 可以知道：雷达估测的降水存在明显的误差，且不稳定、随机性大。造成这种误差的主要因素是雷达本身测量误差、雨滴谱变化、雷达

表 1 不同初值场估测降水的相对误差  
Table 1 Relative errors of rainfall estimated by different initial fields

| 站名<br>Station |           | 雨量实测值<br>Accumulation of<br>gauges /mm | 相对误差 Relative error/% |       |       |       |                                 |
|---------------|-----------|----------------------------------------|-----------------------|-------|-------|-------|---------------------------------|
|               |           |                                        | 时间权重合成                |       |       |       |                                 |
|               |           |                                        | 15:02                 | 15:22 | 15:33 | 15:39 | Composed by time-weight average |
| 华安            | Hua'an    | 0.1                                    | 64                    | 64    | 265   | 64    | 44                              |
| 平和            | Pinghe    | 16.4                                   | 96                    | 95    | 86    | 89    | 89                              |
| 南靖            | Nanjing   | 5.3                                    | 97                    | 96    | 71    | 84    | 91                              |
| 云霄            | Yunxiao   | 6.8                                    | 85                    | 89    | 92    | 96    | 93                              |
| 东山            | Dongshan  | 1.3                                    | 90                    | 88    | 79    | 90    | 91                              |
| 诏安            | Zhao'an   | 0.1                                    | 64                    | 54    | 64    | 64    | 51                              |
| 漳浦            | Zhangpu   | 10.6                                   | 97                    | 92    | 83    | 83    | 87                              |
| 漳州            | Zhangzhou | 24.8                                   | 54                    | 90    | 97    | 98    | 94                              |
| 长泰            | Changtai  | 31.8                                   | 64                    | 69    | 80    | 76    | 73                              |
| 龙海            | Longhai   | 1.3                                    | 88                    | 88    | 68    | 68    | 76                              |
| 同安            | Tong'an   | 0.3                                    | 21                    | 87    | 21    | 21    | 9                               |
| 安溪            | Anxi      | 5.5                                    | 86                    | 82    | 63    | 23    | 57                              |
| 永春            | Yongchun  | 1.2                                    | 65                    | 28    | 65    | 74    | 53                              |
| 南安            | Nan'an    | 2.8                                    | 69                    | 64    | 69    | 69    | 52                              |
| 泉州            | Quanzhou  | 0.6                                    | 70                    | 78    | 61    | 54    | 74                              |

表 2 不同初值场经最优校准后的相对误差  
Table 2 Relative errors of rainfall estimated by using optimal correction in different initial fields

| 测站<br>Station |           | 雨量实测值<br>Accumulation of<br>gauges / mm | 相对误差 Relative error/% |       |       |       | 时间权重合成<br>Composed by time weight average |
|---------------|-----------|-----------------------------------------|-----------------------|-------|-------|-------|-------------------------------------------|
|               |           |                                         |                       |       |       |       |                                           |
|               |           |                                         | 15:02                 | 15:22 | 15:33 | 15:39 |                                           |
| 华安            | Hua'an    | 0.1                                     | 64                    | 78    | 265   | 64    | 15                                        |
| 平和            | Pinghe    | 16.4                                    | 6                     | 6     | 6     | 6     | 6                                         |
| 南靖            | Nanjin    | 5.3                                     | 6                     | 6     | 6     | 6     | 6                                         |
| 云霄            | Yunxiao   | 6.8                                     | 5                     | 5     | 5     | 5     | 5                                         |
| 东山            | Dongshan  | 1.3                                     | 2                     | 2     | 2     | 2     | 2                                         |
| 诏安            | Zhao'an   | 0.1                                     | 64                    | 54    | 64    | 64    | 0                                         |
| 漳浦            | Zhangpu   | 10.6                                    | 6                     | 6     | 6     | 6     | 6                                         |
| 漳州            | Zhangzhou | 24.8                                    | 5                     | 5     | 5     | 5     | 5                                         |
| 长泰            | Changtai  | 31.8                                    | 14                    | 1     | 26    | 26    | 1                                         |
| 龙海            | Longhai   | 1.3                                     | 2                     | 2     | 11    | 2     | 2                                         |
| 同安            | Tong'an   | 0.3                                     | 5                     | 116   | 5     | 5     | 5                                         |
| 安溪            | Anxi      | 5.5                                     | 2                     | 2     | 2     | 2     | 2                                         |
| 永春            | Yongchun  | 1.2                                     | 4                     | 4     | 4     | 4     | 4                                         |
| 南安            | Nan'an    | 2.8                                     | 2                     | 2     | 2     | 2     | 2                                         |
| 泉州            | Quanzhou  | 0.6                                     | 6                     | 6     | 6     | 6     | 6                                         |

和雨量站观测时空不一致等因素。经过时间权重平均后,除了东山站的合成资料的误差大于所有时刻的误差外,其他的合成误差都小于 4 个时刻中的最大误差,占 93%。对所有的 604 个样本进行相同的处理,经过处理后的精度优于各个时刻的初始精度有 209 个;精度介于各个时刻中间的有 261 个;大于或等于各个时刻最大误差的有 134 个。因此,通过这种处理后,精度不劣于各个时刻初始精度的占 77%以上。

(6) 从表 2 可以看出,利用雨量计单点准确性对雷达初值场进行最优校准,可以有效将雷达和雨量计的误差订正到雷达初值场,使雷达估测场的误差显著减小,联合校准中雨量计单点的准确性优点得到充分体现。其中,时间权重平均法合成的雷达初值场经校准后各点的估测误差都比其他时刻的误差要小,各点上的测量精度也高,相应区域降水量的测量精度随之提高。从此也可以看出,最优校准法可以在单点上有效订正雷达的观测误差,当雷达初值场对降水空间结构的分布特征描述越好,经校准后雷达估测精度也越高。

其中,华安站在 15:33 有很大的相对误差。造成的主要原因是:华安站位于主要降水区的边界,地面降水的强度很弱,仅 0.1 mm,而 15:33 在华安站的上空雷达观测资料转化后雨强为 0.365 mm。这和前面 3.3.2 节中的分析一致,即空中的回波和地面降水不一致,某个时刻观测的回波强度不足以代表 1 个小时平均状况,通过时间权重平均后其相对误差也相应降到了 44%,也反映了时间权重平均法对大误差抑制的有效性。小降水的相对误差容易出现极端的情况,在联合估测降水的算法中当有较多的地面站网时一般能在质量控制中进行剔除,不参加校准。

## 5 结论和应用情况

本文围绕提高雷达-雨量计联合估测区域降水量精度中一个重要的方面——雷达初值场对降水空间分布的描述能力开展研究。首先,对之前的四种雷达初值场特点进行分析,并指出了其主要不足是对时间一致性考虑不够。在此基础上提出了侧重考虑时间一致性的时间权重平均法,从观测模型和物理意义进行理论上分析,推导了相应的计算公式。并应用 1996~1997 年的实际观测资料进行检验,

得出如下结论:

(1) 时间权重平均法充分考虑了雷达和雨量计观测的时间一致性,物理意义明确,可以提高雷达资料对实际降水强中心、降水范围等空间分布特征的能力,更好地满足联合估测对雷达初值场的要求,可以有效提高估测区域降水量的精度。

(2) 新方法生成的雷达初值场用地面雨量站网的资料进行自适应最优插值后,无论在中心位置、降水区域等特征上,还是数值上都和地面实际的情况相一致。同时单点的精度比其他的初值场高。

(3) 合成雷达初值场上点的初始误差 70%以上不大于各个时刻的初始误差,它降低了初值场的误差。

(4) 该方法具有处理简单、物理概念清楚的特点。

在 2003 年的黄河淮河暴雨洪水监测预报系统项目研究中,我们利用上述的原理对合肥 CINRAD/SA 雷达的数据进行初值场生成,取得了较好的效果。试验结果表明,用该原理生成的雷达初值场能够较好代表实际降水的分布情况,可以提高估测区域降水量的精度。

## 参考文献 (References)

- [1] 张培昌,戴铁丕,杜秉玉,等. 雷达气象学. 北京:气象出版社,1988. 329pp  
Zhang Peichang, Dai Tiepei, Du Bingyu, et al. *Radar Meteorology* (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 1988. 329pp
- [2] 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. 南京气象学院学报,1997,20(3): 334~340  
Lin Binggan, Zhang Peichang, Gu Songshan. Improvement of weather radar-measured regional rainfall with comparison to other techniques. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology* (in Chinese), 1997, 20(3): 334~340
- [3] 张培昌,戴铁丕,伍志芳,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. 大气科学,1992,16(2): 248~256  
Zhang Peichang, Dai Tiepei, Wu Zhifang, et al. Principle and accuracy of adjusting the area precipitation from digital weather radar through variational method. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica)* (in Chinese), 1992, 16(2): 248~256
- [4] 赵坤,刘国庆,葛文忠. 用卡尔曼滤波确定变分方法中的权重系数进行雨量校正. 气候与环境研究 2001,6(2): 180~185  
Zhao Kun, Liu Guoqing, Ge Wenzhong. Precipitation cali-

- bration by using Kalman filter to determine the coefficients of the variational method. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2001, **6**(2): 180~185
- [5] 李建通, 张培昌. 最优插值法用于天气雷达测定区域降水量. 台湾海峡, 1996, **15**(3): 255~259  
Li Jiantong, Zhang Peichang. Optimum interpolation method used for measuring regional precipitation with weather radar. *Journal of Oceanography in Taiwan Strait* (in Chinese), 1996, **15**(3): 255~259
- [6] Shedd R, Smith J, Walton M. Sectorized hybrid scan strategy of the NEXRAD precipitation-processing system. *Hydrological Applications of Weather Radar*, I. Cluckie and C. Collier, Eds., *Ellis Horwood Limited*, 1991, 151~159
- [7] Breidenbach J P, Seo D J, Fulton R, et al. Improving WSR-88D precipitation estimates through optimization of the hybrid scan. Preprints, 27th Intl. Conf. Radar Meteor., Amer. Meteor. Soc., Boston, 1995. 243~245
- [8] O'Bannon T. Using a 'terrain-based' hybrid scan to improve WSR-88D precipitation estimates. Preprints, 28th Conf. On Radar Meteorology, Austin, TX, Amer. Meteor. Soc., 1997. 506~507
- [9] Fulton R A, Breidenbach J P, Seo D-J, et al. The WSR-88D rainfall algorithm. *Weather and Forecasting*, 1998, **13**: 377~395
- [10] Joss J, Waldvogel A. Precipitation estimates and vertical reflectivity profile corrections. 24th Conf. Radar Meteor., Florida: AMS, 1989. 682~688
- [11] Vignal B, Andrieu H, Creutin J D. Identification of vertical profile of reflectivity from volume scan radar data. *J. Appl. Meteor.*, 1999, **38**: 1214~1228
- [12] 戴铁丕, 詹煜, 刘婉莉. 用 CAPPI 和 PPI 资料测定区域降水量精度比较. 气象, 1995, **21**(7): 9~14  
Dai Tiepei, Zhan Yu, Liu Wanli. An accuracy comparison of estimated precipitation by CAPPI and by PPI data. *Meteorology* (in Chinese), 1995, **21**(7): 9~14
- [13] 戴铁丕, 袁招洪, 王自发, 等. 用 CAPPI 的资料估算区域降水量和雷达反射率因子垂直廓线初探. 南京气象学院学报, 1995, **18**(1): 19~125  
Dai Tiepei, Yuan Zhaohong, Wang Zifa, et al. A study of estimation of regional rainfall by using CAPPI and vertical profiles of reflectivity factor Z. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology* (in Chinese), 1995, **18**(1): 19~125
- [14] 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. 大气科学, 2000, **24**(2): 263~270  
Li Jiantong, Yang Weisheng, Guo Lin, et al. A study of improving precision of measuring regional precipitation in optimum interpolation method. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2000, **24**(2): 263~270