

漂移克里金方法在雷达和雨量计 联合估测降水中的应用^{* 1}

黄小玉^{1,2} 陈媛¹ 熊毅³ 陈波⁴ 夏正龙² 廖玉芳²

HUANG Xiaoyu^{1,2} CHEN Yuan¹ XIONG Yi³ CHEN Bo⁴ XIA Zhenglong² LIAO Yufang²

1. 湖南省气象防灾减灾重点实验室,长沙,410007

2. 湖南省气象台,长沙,410007

3. 中国气象局,北京,100081

4. 国防科学技术大学,长沙,410001

1. *Hunan Provincial Key Laboratory of Meteorological Disaster Reduction, Changsha 410007, China*

2. *Hunan Province Meteorological Office, Changsha 410007, China*

3. *China Meteorological Administration, Beijing 100081, China*

4. *National University of Defense Technology, Changsha 410001, China*

2007-09-04 收稿,2007-10-31 改回.

Huang Xiaoyu, Chen Yuan, Xiong Yi, Chen Bo, Xia Zhenglong, Liao Yufang. 2009. Merging radar and rain gauge data using Kriging with external drift (KED) for quantitative precipitation estimation. *Acta Meteorologica Sinica*, 67(2):288–297

Abstract A new spatial information statistical method, Kriging with external drift (KED), which merges radar and rain gauge data to make quantitative precipitation estimation, is introduced and analyzed. The essential of merging radar and rain gauge data to estimate rainfall is to calibrate the radar with rain gauge data and syncretize the result of the rain gauge records into the radar detection while keeping the meso and small scale features of radar data. High accuracy, low tempo-spatial resolution rain gauge data is successfully combined with the low accuracy, high tempo-spatial resolution radar data using the KED interpolation. The covariance function is used to reflect the spatial variance structure, and the spatial continuity of data is fully considered. As the spatial structure of KED predicted rainfall field is obtained by using variogram, the estimation precision can be improved and the processing speed can be accelerated by making full use of the spatial relation among the data. The KED method is expected to advance operational quantitative precipitation estimation. Three methods, namely the radar-based precipitation estimation (RAD), the variation adjustment precipitation estimation (VAR), and the KED estimation, are compared with each other and verified against the rain gauge data for three representative rainfall cases in Hunan Province. The results show that the mean-square deviation, absolute error and relative error from RAD are bigger than those from VAR, and those of KED are the smallest. The results from KED agree well with the rain gauge data. Error frequency calculations for the three methods and the rain gauge data show that KED has the smallest average error and standard deviation, and the error distribution for KED is located near 0. Moreover, the skewness and kurtosis of KED are the best, while those of VAR take the second place and RAD performs the worst. The magnitude of the KED calibrated precipitation field is close to the rain gauge record, meanwhile the precipitation distribution pattern detected by radar was well retained.

Key words Kriging with external drift (KED), Variogram, Radar, Rain gauge

摘要 文中介绍了一种新的融合雷达和雨量计数据开展定量估测降水研究的空间信息统计学方法—Kriging with external drift(KED)方法。该方法能很好地融合高精度、低时空分辨率的雨量计数据和低精度、高时空分辨率的雷达数据进行插值。

* 资助课题:湖南省气象局重点项目(022,026,028)。

作者简介:黄小玉,主要从事雷达资料应用、短时、短期天气分析预报工作。E-mail:hxyly@126.com

通过变异函数描述降水场的空间结构信息,能够充分利用数据间的空间相关性,来改进估测精度和提高处理速度。利用其优良的数学特性,以期在定量估测降水业务研究上进行新的探索和尝试。选用湖南省有代表意义的3次降水过程资料,通过雷达直接估测降水(RAD)、变分校准(VAR)以及KED 3种方法,分别与雨量计测量值进行对比分析,选用代表站进行交叉验证结果均表明:RAD的均方差、绝对误差、相对误差最大,VAR次之,而KED最小。KED估测的结果与雨量计测量降水最为接近,估测效果最好;3种方法与雨量计实测值计算一定范围的误差频率,KED估测值具有最小的均方差和最小的标准差,且误差分布相对集中在0值附近,斜度和峰度最佳,试验证明该方法不仅能提高降水估测精度,且优于其他方法,VAR均方差次之,RAD均方差效果相对较差。联合雷达、雨量计估测降水的实质是把雷达估测值与雨量计测量的结果相融合,以雨量计来校准雷达估测值,保留了雷达探测到降水的中、小尺度精细特征。校准后的雨量场数值接近雨量计测值,而且能够准确反映雷达测得的降水分布形式。

关键词 Kriging with external drift (KED), 变异函数, 雷达, 雨量计

中图法分类号 P412 P413.2⁺¹

1 引言

定量估测降水是国内外雷达天气学研究的热点和难点之一。天气雷达能够提供高时、空分辨率的雨强信息,但其精度有限。雨量计测量是最广泛使用的一种直接测量降水的简单方法,但站点密度有限。研究表明,融合上述两种不同来源的信息进行降水估计可以大大改进雷达定量估测降水。

Wilson(1970)和Brandes(1975)采用雨量计(G)和雷达(R)测量降水的比值(G/R)校准降水估计,提高了雷达估测降水的精度;Collier(1986a, 1986b)对G/R比值法进行改进,这一方法在英国的实时业务中沿用了20 a;Koistinen等(1981)进一步改进比值校准法,引进了空间校准因子来弥补雨量计网在空间分布上不连续的缺陷,从而修正Z-I关系中的系数。Sasaki(1970)把变分法引入气象领域后,Ninomiya等(1978)运用变分法,融合雷达和雨量计资料对暴雨进行客观分析取得了令人满意的结果。

Daley(1991)、Cressie(1993)提出了客观分析方法,也称为统计方法或最优插值方法并得到广泛应用(Seo, 1998;Pereira, 1998)。Ahnert等(1986)把卡尔曼滤波方法引入到雷达降水估计中;Fulton等(1998)融合雷达和雨量计1 h累积降水资料,生成“卡尔曼滤波估计器”来估测降水场平均偏差。Calheiros等(1987)提出了概率匹配算法(PMM),通过寻找基于雷达反射率对降雨量(雨量计测量)的一种概率密度函数,使得估测精度大大提高。Rosenfeld等(1994, 1995a, 1995b)进一步提出了窗概率匹配法(WPMM),对每个雨量计站点采用一个小的滑动时空窗并应用概率匹配算法进行估算,从而改善了精度;Steiner等(1995)结合Z-I关系和WPMM方法

研究澳大利亚北部风暴结构特征取得了很好的效果;Gabella等(2000)对Z-I关系法、简化的WPMM方法和加权多元回归(WMR)这3种方法进行了对比分析,发现在具有复杂地形的区域,WMR方法较其他两种方法更具优势。

20世纪90年代空间信息统计学方法被引入到联合雷达和雨量计估测降水算法中,目前仍在不断发展完善。与其他方法相比,它注重测量数据存在的随机误差,估值过程中更加充分考虑数据间的时间和空间相关性,估计精度较高。空间信息统计学中的Kriging方法还特别适用于处理同时包括稀疏高精度测量值(雨量计)和密集、误差较大的测量值(雷达、卫星)的数据。最早Kriging方法主要用于气候分析,如年降水量分布等(Dingman, 1988;Hevesi, 1992;Philips, 1992)。Krajewski(1987)定义指数模型为变异函数模型,采用Co-kriging技术模拟降水场;Creutin(1988)则采用3种不同的变异函数模型,这些模型根据每天的雷达和雨量计观测数据计算得到;Sun等(2000)定义高斯模型为变异函数模型,使用Kriging技术融合雷达和雨量计数据进行最优无偏估计。Seo等(1991a, 1991b)提出“Bayesian”技术,结合雨量计资料降低雷达降水估计的偏差,使得降水场估计的方差达到最小;Todizi(2001)提出新的“Block Kriging Bayesian”技术,即结合Block-Kriging技术和卡尔曼滤波来融合雷达和雨量计数据估计降水,试验效果比较理想。

中国基于雷达和地面雨量计的降水估计研究也较多(刘黎平等, 2007a, 2007b;胡志群等, 2008)。戴铁丕等(1995)用变分法把各雨量计资料内插到所选区域的各个网格点上,得到降雨量“真值场”;戴铁丕等(1996)采用距离加权时间外推方法校准天气雷达

估算降水强度和区域降水量, 简便易行; 李建通等(1996)将最优插值法引入该领域, 简单可靠; 楚荣忠等(1997)提出排序配对逼近法拟合雷达和雨量计资料, 既弥补了线性回归法的不足, 又提高了区域降水估测的精度; 林炳干等(1997)对变分校准法提出了改进; 官莉等(2004)利用主特征提取、统计权重、综合概率、 $Z-I$ 关系法、平均校准、最优插值、卡尔曼滤波和最优插值联合校准法、卡尔曼滤波校准法定量估测降水模式输出结果, 进行集成分析; 郑媛媛等(2004)采用卡尔曼滤波校准方法、最优化方法、概率配对方法分别得到不同区域的 $Z-I$ 关系。

目前国内尚无基于 Kriging 方法融合雷达、雨量计定量估算降水的文献, 本文基于漂移克里金(KED)进行了定量估算降水算法研究并完成了试验。结果表明 KED 方法具有较好的效果和良好的应用前景。

2 KED 方法的基本原理

Kriging 方法是建立在变异函数理论及结构分析基础上的一种最好的线性无偏估计方法(张仁铎, 2005), 即 BLUE (Best Linear Unbiased Estimator)。它与普通估计方法的区别在于: 它充分考虑了信息样本与待估点相互间的空间分布位置等几何特征, 以及样本间的空间相关性等结构特征。它是线性的, 因为估计值是根据已有样本的加权线性结合而获得; 是无偏的, 平均残差或误差接近于零; 是最好的, 它使估计误差的方差最小, 这也是它与其他估计方法相比最显著的特点。

KED 方法与传统 Kriging 方法不同之处在于引入了漂移函数(drift function) $m(x)$, 且漂移函数是通过第 2 类变量 $L(x)$ (雷达数据) 得到。应用 KED 方法必须满足两个条件: 首先, 主变量 $z(x)$ 要求具有精度高的特点、但对空间分辨率要求不高; 第 2 类变量 $L(x)$ 则相反(图 1)。其次, 主变量 $z(x)$ 和第 2 类变量 $L(x)$ 之间具有线性关系。雨量计数据精确、稀疏, 符合第 1 类变量的条件, 雷达资料空间分辨率高但精度有限, 符合第 2 类变量的条件, 且反射率因子与雨强通过对数变换可以转换为线性关系, 满足 KED 的两个条件。

考虑一个定义在研究区域 Ω 中, 在位置 x 上的区域变量 $z(x)$ (雨量计数据), 假定它由一个确定性漂移 $m(x)$ 和一个残差部分 $R(x)$ 构成

$$z(x) = m(x) + R(x) \quad (1)$$

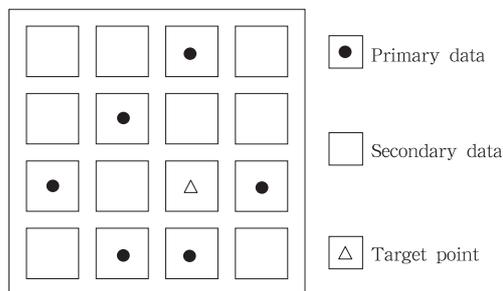


图 1 主变量观测值与第 2 类变量观测值分布
Fig. 1 Distribution of observations of the primary and the secondary variable

漂移定义为 $z(x)$ 在 x 的期望值, 即 $m(x)$, 它反映了随机函数 $z(x)$ 在点 x 的主要特征, 即

$$E[z(x)] = m(x) = aL(x) + b \quad (2)$$

则残差为

$$R(x) = z(x) - m(x) = z(x) - aL(x) - b \quad (3)$$

a, b 为系数, 通过最小二乘法进行线性拟合获取。

KED 估计公式为

$$z^*(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i z(x_i) = \sum_{i=1}^n \lambda_i (m(x_i) + R(x_i)) \quad (4)$$

x_0 是待估点, λ 为权重系数, i 是用于估计过程的雨量计站点 ($i=1, 2, \dots, n$), n 是参与估计过程雨量计站点总数。

估计值误差的方差表达式可简化为下式, 详细原理见文献(张仁铎, 2005)。

$$F = \text{Var}[z^*(x_0) - Z(x_0)] = 2 \sum_{i=1}^n \lambda_i \gamma(x_i - x_0) - \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \lambda_i \lambda_j \gamma(x_i - x_j) \quad (5)$$

其中 γ 是变异函数, 它是空间信息统计学中最重要的工具, 反映随机函数的结构特点。

空间信息统计学通过大量实验建立变异函数理论模型, 通过获取有效的变异函数求得权重。常用的变异函数理论模型见表 1。

对于气象场, 由于各物理量的空间相关性随距离的增长逐渐衰减, 一般采用球面模型。考虑到计算的效率, 使用协方差函数。二者之间存在如下关系

$$C(h) = \sigma^2 - \gamma(h) \quad (6)$$

式中 $C(h)$ 是协方差函数, σ^2 是方差, $\gamma(h)$ 是变异

表 1 常用理论模型
Table 1 Common models of geostatistics

理论模型	表达式	备注
球状模型	$\gamma(h) = \begin{cases} 0 & h = 0 \\ C_0 + C(\frac{3}{2} \cdot \frac{h}{a} - \frac{1}{2} \cdot \frac{h^3}{a^3}) & 0 < h \leq a \\ C_0 + C & h > a \end{cases}$	空间相关特性随距离的增长逐渐衰减, 当距离大于相关尺度后, 空间相关性消失。
指数模型	$\gamma(h) = \begin{cases} 0 & h = 0 \\ C_0 + C(1 - e^{-\frac{h}{a}}) & h > 0 \end{cases}$	空间相关随距离的增长以指数形式衰减, 空间相关性消失于无穷远。
高斯模型	$\gamma(h) = \begin{cases} 0 & h = 0 \\ C_0 + C(1 - e^{-\frac{h^2}{a^2}}) & h > 0 \end{cases}$	空间相关随距离的增长而衰减, 并消失于无穷远。曲线起始一段的形状是抛物线, 变量的空间变化比较平滑。
幂函数模型	$\gamma(h) = Ah^\theta \quad 0 < \theta < 2$	$\theta=1$ 时幂函数模型就是常用的线性模型。
对数模型	$\gamma(h) = A\lg h$	当 $h \rightarrow 0$ 时, $\lg h \rightarrow -\infty$ 。由于变异函数大于零, 对数模型不能描述点支撑的区域化变量结构。

注: h 为待估点与参与估计各雨量站之间的距离。

函数。

为使方差 F 达到最小, 利用条件极值的拉格朗日乘数法引入拉格朗日算子 μ_1, μ_2 , 代入漂移函数和协方差函数, 对式(5) F 求导, 得到如下方程, 见文献(Hans Wackernagel, 2002)。

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^n \lambda_j C_r(x_i, x_j) + \mu_1 + L(x_i) \mu_2 = C_r(x_i, x_0) \quad \forall i = 1, 2, \dots, n \\ \sum_{i=1}^n \lambda_i = 1 \\ \sum_{i=1}^n \lambda_i L(x_i) = L(x_0) \end{cases} \quad (7)$$

式中 C_r 为残差 $R(x)$ 的协方差函数, KED 权重 λ_i 则可以通过以上 $n+2$ 个线性方程得到。

由此可知, KED 的物理意义是使降水估计误差具有线性、无偏以及方差最小的特点。引入漂移函数来融合雷达、雨量计数据; 通过协方差以获取降水场的空间结构信息; 引入理论变异函数, 使协方差函数保持正定, 通过 KED 方程组求取权重系数。

3 个例结果分析

选用 2002 年 5 月 13 日 08:00—18:00(北京时, 下同) 西风带积层混合云降水过程、2007 年 8 月 22 日 08:00—20:00“圣帕”台风降水天气过程和 2007 年 9 月 9 日 08:00—20:00 层状云降水天气过程, 长沙天气雷达、湖南省地面降水资料进行试验。

雷达资料经去除孤立回波和其他杂波等质量控

制(毛紫阳等, 2006), 选取 0.5° 仰角反射率基数据用于雷达定量估算降水; 雷达降水资料以估测点位置为中心选取周围 5 个点平均。地面雨量计资料剔除小于 0.1 mm 的降水。其中 KED 方法的协方差函数模型基于变异函数的球面模型确定, 表达式为

$$C(h) = -C_1 h + C_2 h^3 \quad (8)$$

$C(h)$ 为协方差函数, C_1, C_2 为待估系数, h 为待估点与参与估计各雨量站之间的距离。

3.1 估算结果分析

利用 RAD、G、KED 3 种方法生成 3 次天气过程逐时定量估算图。图 2a—2c 分别是 2002 年 5 月 13 日 08:00—09:00 的 RAD、G、KED 方法估算降水图。

根据雷达测得的反射率因子, 采用 $Z=200I^{1.4}$ 关系换算得到降水强度显示在 PPI 图上(图 2a)。从图中可以清楚地看到, 整个降水场分布有层次感, 能探测到较为精细的降水结构场。降水资料由雷达资料实时生成, 可定性反映降水区域内各点的雨强, 对于降水的定性判断具有显著意义, 尤其是在没有雨量计的区域更为重要。利用雷达资料每 6 min 可以生成一张降水分布图, 时间分辨率高。通过对雷达估测与雨量计实况资料对比分析, 发现 RAD 估测值对于积层混合云、层状云降水普遍偏低, 尤其对于远距离降水估计明显偏低, 这主要是由于雷达只能探测远距离较高层的降水回波。对于对流性降水, 降水估计常偏高。因此尽管 RAD 估测降水具有很高的时空分辨率, 精度却有待提高。

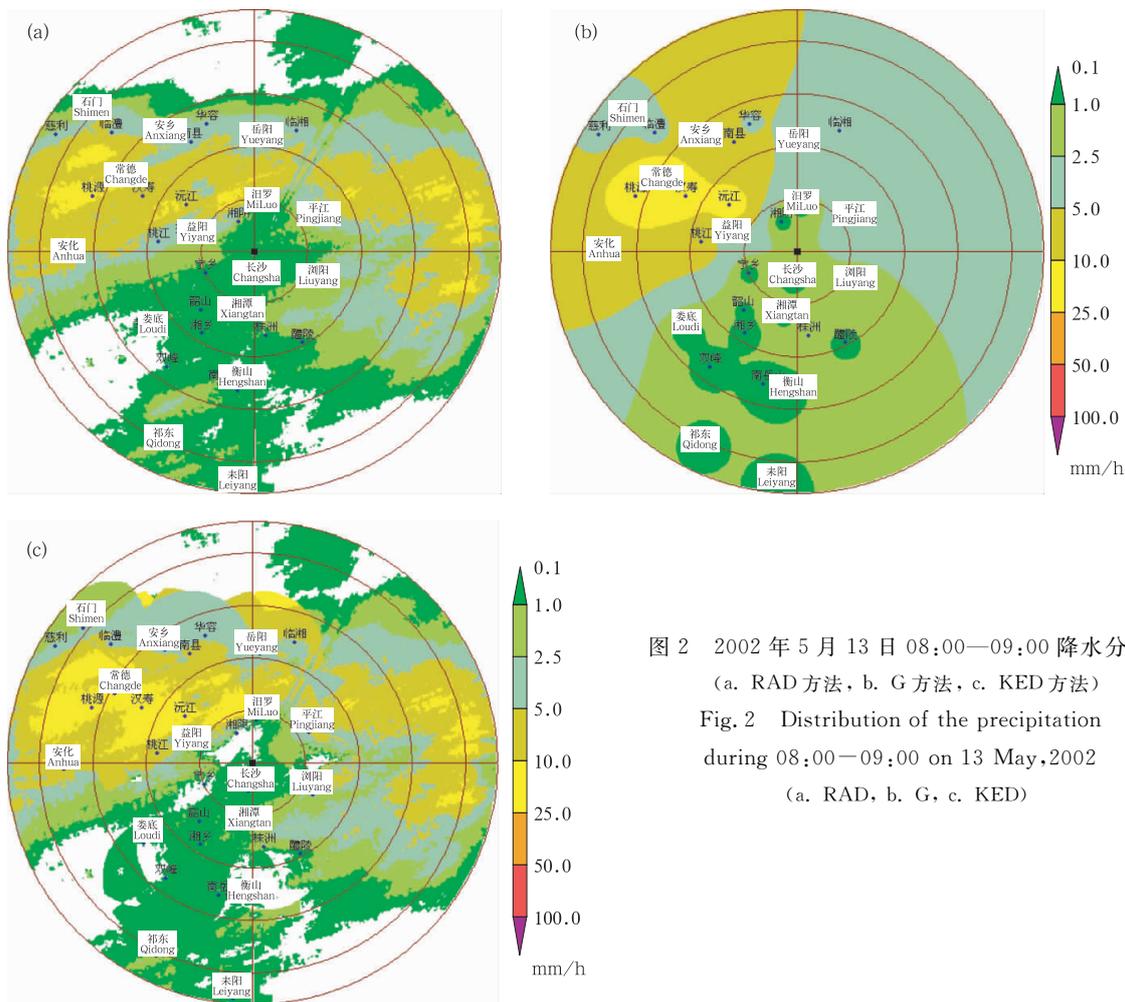


图2 2002年5月13日08:00—09:00降水分布
(a. RAD方法, b. G方法, c. KED方法)
Fig. 2 Distribution of the precipitation
during 08:00—09:00 on 13 May, 2002
(a. RAD, b. G, c. KED)

由雨量计资料插值得到的降水分布(图2b)可见除单站的降水是测值外,其他地区误差比较大,分布层次不分明且不连续,不能反应出降水的精细结构。

KED估测降水分布见图2c。其反映的降水场结构(包括降水中心的位置与面积)与雷达探测到的降水结构基本一致,但强度比RAD估计普遍增强,尤其是距雷达较远的区域,KED降水估计明显增强,对RAD估计进行了有效的补偿。与雨量计资料对比分析可知,KED降水估计方法能较好地体现降水场的实况分布。因此,KED方法有效地融合了雷达和雨量计各自的长处,充分利用空间信息统计学的优势对降水场进行估计,结果优于前两者。

3.2 KED方法验证

为了检验KED方法的特点,对于2002年5月13日08:00—18:00预留岳阳、长沙、汉寿3站,

2007年8月22日08:00—20:00“圣帕”台风降水天气过程预留安化、衡阳,2007年9月9日08:00—20:00层状云降水天气过程选取浏阳、株洲进行估算验证。预留站雨量计资料不参与估算训练,只用于估算检验。3次过程结果表明(图3a—3g),KED估测值的趋势与雨量计实测值一致性较好。此外,从参数的区间估计来看,当置信区间为 2σ (σ 为标准差)时,KED估测值的置信概率接近95%,7个预留检验站雨量计实测值均落在此区间内。说明几个检验站在每个时段的估测效果都相当理想,其中长沙站最好,与雨量计值的偏差很小。

用上述3个过程的资料采用RAD、VAR(变分校准法)及KED3种不同方法对7个检验站计算均方差(表2),每个检验站的KED估测值与观测值均十分接近,RAD所得的均方差最大,KED所得的均方差最小,效果最好。

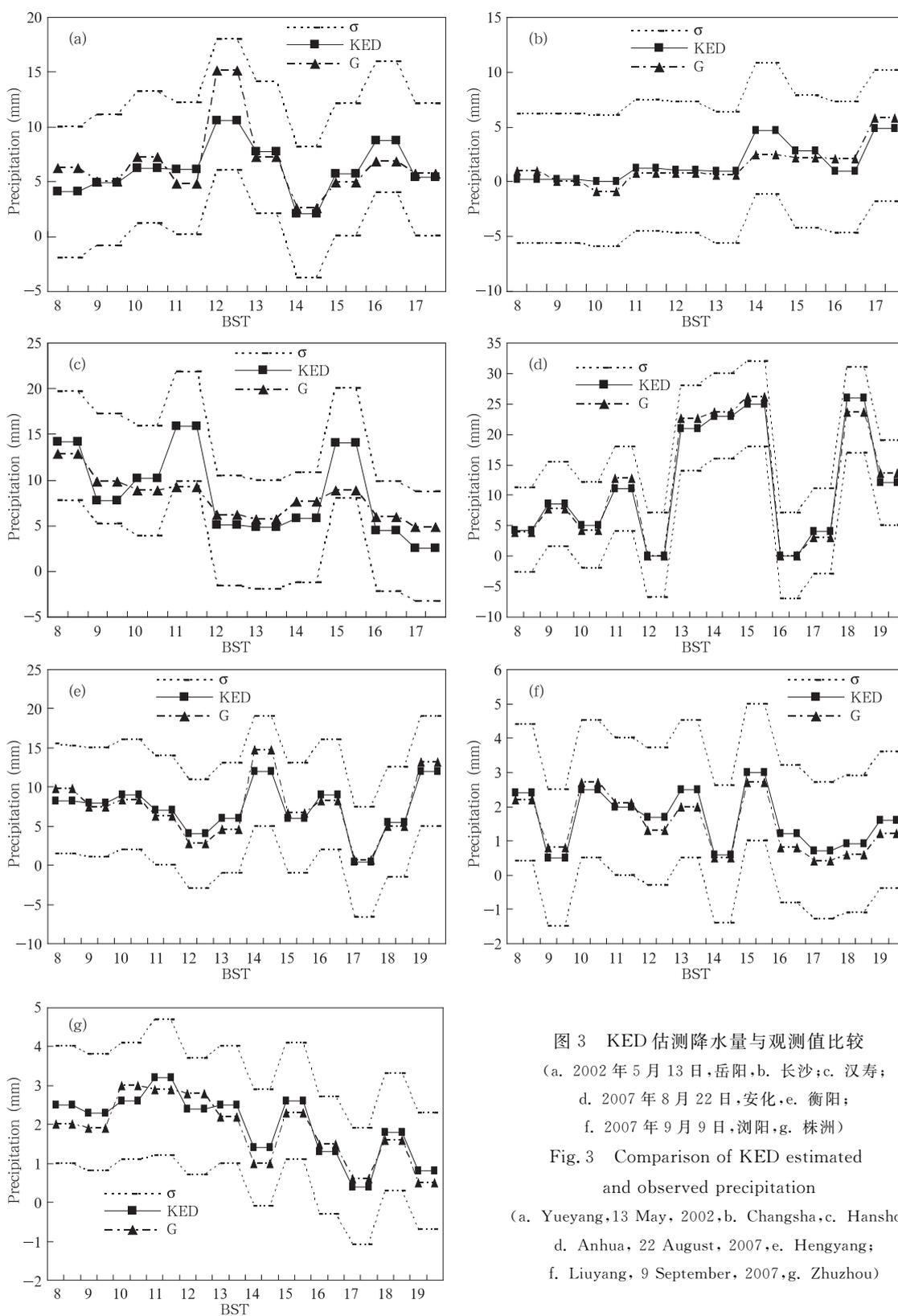


图3 KED 估测降水量与观测值比较
 (a. 2002年5月13日, 岳阳, b. 长沙; c. 汉寿;
 d. 2007年8月22日, 安化, e. 衡阳;
 f. 2007年9月9日, 浏阳, g. 株洲)
 Fig. 3 Comparison of KED estimated
 and observed precipitation
 (a. Yueyang, 13 May, 2002, b. Changsha, c. Hanshou;
 d. Anhua, 22 August, 2007, e. Hengyang;
 f. Liuyang, 9 September, 2007, g. Zhuzhou)

表2 3种不同估测方法的均方差
Table 2 Mean-square deviation of 3 different estimation methods (mm)

站名(Station)	MSE(RAD)	MSE(VAR)	MSE(KED)
岳阳(Yueyang)	5.4976	4.5012	3.2091
长沙(Changsha)	0.7170	0.6801	0.6339
汉寿(Hanshou)	16.9919	10.4325	8.4349
安化(Anhua)	18.3356	11.2486	9.4563
衡阳(Hengyang)	4.8792	3.2567	2.7834
浏阳(Liuyang)	2.4536	1.6725	0.9732
株洲(Zhuzhou)	1.3672	0.9756	0.7832
平均	7.2472	4.7465	3.7958

3.3 3种不同估测方法的对比分析

3.3.1 时段资料分析

选取2002年5月13日08:00—18:00资料。用交叉验证法对KED算法计算出每个雨量计站点的估测值分别与RAD、VAR方法进行对比分析。所谓交叉验证法就是在每一个有观测值的点,将此观测值去除不参与运算,用其他观测值输入克里金方程组,求出该点的估计值,然后与雨量计值进行比

较。用交叉验证法分别对25个站进行KED估测,再把KED、RAD、VAR估测值与实测值进行相对误差、绝对误差等的对比分析(表3)。

从表3可以看出:无论是采用KED方法,还是采用VAR方法,经雨量计数据融合订正后,雷达测值(RAD)与雨量计测值相比,误差均有了很大幅度的降低。如常德站未订正前,RAD比实际测值低估了7.61 mm,其相对误差为31.19%,经雨量计数据融合订正后,KED估测降水与雨量计测值的绝对误差仅为0.026 mm,VAR估测降水与雨量计测值的绝对误差为-0.39 mm,相对误差分别为0.11%和1.60%。由此可见,融合雷达与雨量计降水资料能很大程度提高降水估算精度,尤其采用KED方法得到的结果与实测值更为接近。其他大部分站点都有类似结果。分析RAD、VAR和KED方法的平均绝对误差(分别为-0.9138 mm、-0.0033 mm和-0.0002 mm)以及平均相对误差(分别为43.60%、5.78%和0.49%),KED方法在定量估测降水方面优于VAR和RAD方法。

表3 2002年5月13日08:00—09:00雨量计值(G)与RAD、VAR、KED估测降水量
Table 3 Comparison of rain gange precipitation (G) and precipitation estimation from RAD, VAR, KED during 08:00—09:00 on 13 May, 2002

站名	降水量 (G)(mm)	降水量 (R)(mm)	降水量 (V)(mm)	降水量 (K)(mm)	绝对误差 (R)(mm)	绝对误差 (V)(mm)	绝对误差 (K)(mm)	相对误差 (R)(%)	相对误差 (V)(%)	相对误差 (K)(%)
长沙	0.20	0.1500	0.21	0.1984	-0.0500	0.0100	-0.0016	25.00	5.00	0.80
常德	24.40	16.7900	24.01	24.4260	-7.6100	-0.3900	0.0260	31.19	1.60	0.11
衡山	0.20	0.6925	0.23	0.1969	0.4925	0.0300	-0.0031	246.25	15.00	1.55
华容	4.80	3.0824	4.76	4.8096	-1.7176	-0.0400	0.0096	35.78	0.83	0.20
临澧	3.30	4.4922	3.41	3.2928	1.1922	0.1100	-0.0072	36.13	3.33	0.22
临湘	4.70	4.0364	4.63	4.7000	-0.6636	-0.0700	0.0000	14.12	1.49	0.00
娄底	0.10	0.1634	0.12	0.0994	0.0634	0.0200	-0.0006	63.40	20.00	0.60
南县	5.30	4.4859	5.36	5.3039	-0.8141	0.0600	0.0039	15.36	1.13	0.07
平江	4.70	2.6181	4.65	4.7	-2.0819	-0.0500	0.0000	44.30	1.06	0.00
双峰	0.10	0.0652	0.12	0.1003	-0.0348	0.0200	0.0003	34.80	20.00	0.30
桃源	13.60	10.9510	13.59	13.5990	-2.6490	-0.0100	-0.0010	19.48	0.07	0.01
湘潭	0.80	0.6885	0.79	0.8078	-0.1115	-0.0100	0.0078	13.94	1.25	0.97
益阳	1.50	2.0377	1.66	1.4653	0.5377	0.1600	-0.0347	35.85	10.67	2.31
岳阳	4.20	4.3828	4.26	4.2007	0.1828	0.0600	0.0007	4.35	1.43	0.02
株洲	1.30	0.8567	1.35	1.2970	-0.4433	0.0500	-0.0030	34.10	3.85	0.23
平均	/	/	/	/	-0.9138	-0.0033	-0.0002	43.60	5.78	0.49

3次过程分别选取25个站点统计降水估计误差(图4),可以看到,KED误差曲线在零线附近波动,而VAR误差曲线剧烈振荡,进一步说明KED方法估测降水与雨量计值更为接近、稳定,即KED方法优于VAR方法。

3.3.2 不同估计算法误差频率统计

对3次过程分别进行不同估计算法误差的统计分析。5月13日08:00—18:00获得103个有效样本,“圣帕”台风过程163个有效样本,2007年9月9日过程106个有效样本,对3次过程分别进行误差

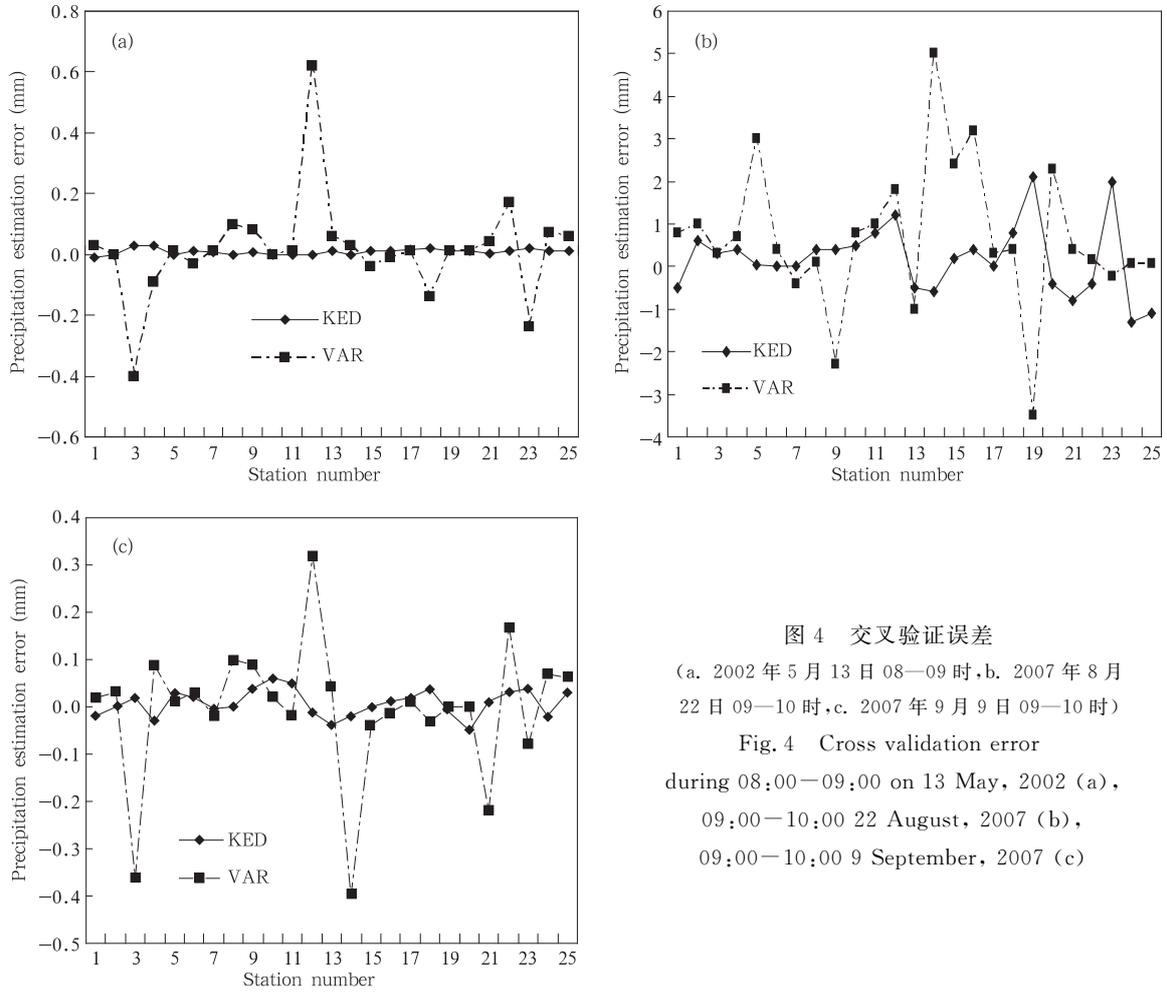


图4 交叉验证误差
 (a. 2002年5月13日08—09时, b. 2007年8月22日09—10时, c. 2007年9月9日09—10时)
 Fig. 4 Cross validation error during 08:00—09:00 on 13 May, 2002 (a), 09:00—10:00 22 August, 2007 (b), 09:00—10:00 9 September, 2007 (c)

频率统计,即降水估计误差某个范围内出现的次数。图5a—5c是3次过程中不同方法估测降水与实测值的误差频率分布。对于强降水,误差范围分布较广,积层混合云降水次之,层状云降水误差范围最小。3次过程中RAD具有最大的平均偏差和最大的标准差,定量估算降水效果相对较差;VAR方法次之;KED估测值具有最小的平均偏差和最小的标准差,且误差分布相对集中在0附近,斜度和峰度最佳。进一步说明KED优于RAD、VAR方法。

4 结论与讨论

(1) KED方法引入反映空间结构的变异函数(协方差函数),充分体现了各类数据的空间连续性和相关性。能够很好地融合高精度、低时空分辨率的雨量计资料及高时空分辨率、低精度的雷达资料进行定量估算降水,可有效提高雷达定量估算降水精度。

(2) 雨量计和雷达测量降水各有所长,雨量计单点测量准确,但站网分布密度稀疏,对于局地性强、尺度小、降水量分布极不均匀的强对流性降水,强降水中心往往被漏掉,难以准确反映雨区中降水强度分布和演变情况。

(3) 仅用雷达资料通过Z-I关系测量降水时空分辨率高,能探测到小尺度的降水分布,但由于Z-I关系难以适应不同季节、不同类型降水,此种方法定量估测降水误差较大。

(4) KED与RAD估测降水所反映的雨区形状、降水结构基本吻合,表明融合雷达、雨量计估计降水的实质是以雨量计来校准雷达。校准后的雨量场数值接近雨量计测值,而且能够保留雷达测得的降水量分布形式,即保留了雷达探测到降水的中、小尺度特征。

(5) 与变分校准方法进行比较分析,通过校验站的验证,结果表明KED方法的均方差最小。在进

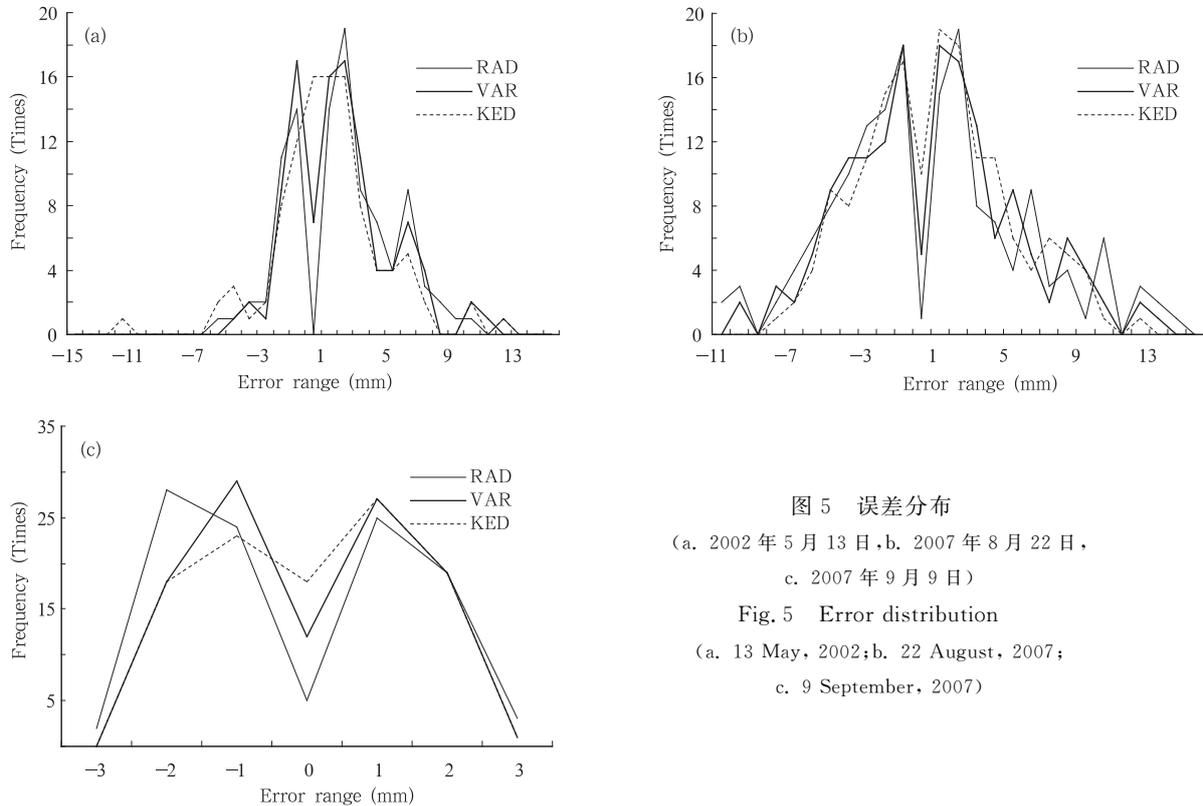


图5 误差分布

(a. 2002年5月13日, b. 2007年8月22日,
c. 2007年9月9日)

Fig. 5 Error distribution

(a. 13 May, 2002; b. 22 August, 2007;
c. 9 September, 2007)

行大量样本实验时, KED 估测值具有最小的平均偏差和最小的标准差, 且误差分布相对集中在 0 附近, 斜度和峰度最佳。试验证明其不仅能提高降水估测精度, 且方法优于变分校准法。

(6) 球形变异函数是经验正定函数, 为理论模型。而实际上降水场变异函数随时间变化而变化, 因此有必要寻找一种新的方法既能体现降水场变异函数随时间演变, 又能保证其正定性使 KED 方程有解。

References

- Ahnert P R, Krajewski W F, Johnson E R. 1986. Kalman filter estimation of radarrainfall field bias//Preprints, 23th Conference on Radar Meteorology. Amer Meteor Soc, 33-37
- Brandes E A. 1975. Optimizing rainfall estimates with the aid of radar. J Appl Meteor, 14: 1339-1345
- Calheiros R V, Zawadzki I. 1987. Reflectivity-rain rate relationships for radar hydrology in Brazil. J Climate Appl Meteor, 26: 118-132
- Chu Rongzhong, Wang Zhijun, Liu Liping, et al. 1997. Precipitation estimate using dual linear polarization radar. Acta Meteor Sinica (in Chinese), 55(1):103-109
- Collier C G. 1986a. Accuracy of rainfall estimates by radar, Part I: Calibration by telemetering raingauges. J Hydrology, 83: 207-223
- Collier C G. 1986b. Accuracy of rainfall estimates by radar, Part II: Comparison with raingauge networks. J Hydrology, 83: 225-235
- Cressie N A C. 1993. Statistics for spatial data//Wiley Series in Probability and Mathematical Statistics. John Wiley & Sons, 928pp
- Creutin J D, Delrieu G, Lebel T. 1988. Rain measurement by rain-gauge-radar combination: a geostatistical approach. J Atmos Oceanic Tech, 5: 102-115
- Dai Tiepei, Yuan Zhaohong, Wang Zifa, et al. 1995. A study of estimation of regional rainfall by using CAPPI and vertical profiles of reflectivity factor Z. J Nanjing Inst Meteor (in Chinese), 18(1): 119-125
- Dai Tiepie, Zhan Yi, Liu Yujie. 1996. Examination of distance weighing and time extrapolation calibration techniques joint detection system by radar and the auto-raingauge network. Scientific Meteor Sinica (in Chinese), 16(1): 63-73
- Daley R. 1991. Atmospheric Data Analysis. New York: Cambridge University Press, 457pp
- Dingman S L, Seely-Reynolds D M, Reynolds III R C. 1988. Application of kriging to estimate mean annual precipitation in a region of orographic influence. Water Resources Bull, 24: 329-339
- Fulton R, Breidenbach J, Seo D J, et al. 1998. The WSR-88D rainfall algorithm. Wea Forecasting, 13: 377-395
- Gabella M, Amitai E. 2000. Radar rainfall estimates in an alpine environment using different gage-adjustment techniques. Phys Chem Earth (B), 25(10-12): 927-931
- Guan Li, Wang Zhenghui, Pei Xiaofang. 2004. The consensus

- methods and effects of estimating rainfall using radar. *Scientific Meteor Sinica* (in Chinese), 24(1): 104-111
- Hans Wackernagel. 2002. *Multivariate Geostatistics*. Springer, 387pp
- Hevesi J A, Istok J D, Flint A L. 1992. Precipitation estimation in mountainous regions using multivariate geostatistics. Part I. Structural analysis. *J Appl Meteor*, 31: 661-676
- Hu Zhiqun, Liu Liping, Chu Rongzhong, et al. 2008. Comparison of different attenuation correction methods and their effects on estimated rainfall using x-band dual linear polarimetric radar. *Acta Meteor Sinica* (in Chinese), 66(2): 251-261
- Koistinen J, Puhakka T. 1981. An improved spatial gauge-radar adjustment technique//Preprints, 20th Conference on Radar Meteorology. Amer Meteor Soc, 179-186
- Krajewski W F. 1987. Cokriging radar-rainfall and rain gauge data. *J Geophys Res*, 92 (d8): 9571-9580
- Li Jiantong, Zhang Peichang. 1996. Optimum interpolation method used for measuring regional precipitation with weather radar. *J Oceanography Taiwan Strait* (in Chinese), 15(3): 255-259
- Lin Binggan, Zhang Peichang, Gu Songshan. 1997. Improvement of weather radar-measured regional rainfall with comparison to other techniques. *J Nanjing Inst Meteor* (in Chinese), 20(3): 334-340
- Liu Liping, Mu Rong, Xu Xiaoyong, et al. 2007a. Dynamic and microphysical structures of a squall line system and effects of rain drop size distribution on precipitation. *Acta Meteor Sinica* (in Chinese), 65(4): 601-611
- Liu Liping, Wu Linlin, Yang Yinming. 2007b. Development of fuzzy-logical two-step ground clutter detection algorithm. *Acta Meteor Sinica* (in Chinese), 65(2): 252-260
- Mao Ziyang, Duan Chongwen, Cheng Lizhi, et al. 2006. The application of fuzzy feature in technique to quality control CINRAD reflectivity data. *Fuzzy Systems and Mathematics*, 20(6): 154-158
- Ninomiya K, Akiyama T. 1978. Objective analysis of heavy rainfalls based on radar and gauge measurement. *J Meteor Soc, Japan*, 50: 206-210
- Pereira A J, Crawford K C, Hartzel C L. 1998. Improving WSR-88D hourly rainfall estimates. *Wea Forecasting*, 13: 1016-1028
- Philips D, Dolph J, Marks D. 1992. A comparison of geostatistical procedures for spatial analysis of precipitation in mountainous terrain. *Agric Forest Meteor*, 58: 119-141
- Rosenfeld D, Atlas D, Amitai E. 1994. The window probability matching method for rainfall measurements with radar. *J Appl Meteor*, 33: 682-693
- Rosenfeld D, Amitai E, Wolf D B. 1995a. Classification of rain regimes by the three dimensional properties of reflectivity fields. *J Appl Meteor*, 34: 198-211
- Rosenfeld D, Amitai E, Wolf D B. 1995b. Improved accuracy of radar WPMM estimated rainfall upon application of objective classification criteria. *J Appl Meteor*, 34: 212-223
- Sasaki Y. 1970. Some basic formulas in numerical variation analysis. *Mon Wea Rev*, 98: 875-883
- Seo D J. 1998. Real-time estimation of rainfall fields using radar rainfall and rain gage data. *J Hydrol*, 208: 37-52
- Seo D J, Smith J A. 1991a. Rainfall estimation using raingauges and radar A Bayesian approach: 1. Derivation of estimators. *Stoch Hydrol Hydraul*, 5: 17-29
- Seo D J, Smith J A. 1991b. Rainfall estimation using raingauges and radar A Bayesian approach: 2. An application. *Stoch Hydrol Hydraul*, 5: 31-44
- Steiner M, Houze R A, Yuter S E. 1995. Climatological characterization of three dimensional storm structures from operational radar and rain gauge data. *J Appl Meteor*, 34: 1978-2007
- Sun X R G, Mein T D, Keenan J F, et al. 2000. Flood estimation using radar and raingauge data. *J Hydrol*, 239: 4-18
- Todini E. 2001. Bayesian conditioning of RADAR to rain gauges. *Hydrol Earth System Sci*, 5: 225-232
- Wilson J W. 1970. Integration of radar and raingauge data for improved rainfall measurement. *J Appl Meteor*, 9: 489-498
- Zhang Renduo. 2005. *The theory and application of spatial variability*. Beijing: Science Press, 188pp
- Zheng Yuanyuan, Xie Yifeng, Wu Linlin. 2004. Comparative experiment with several quantitative precipitation estimator techniques based on Doppler radar over the Huaihe valley during rainy season. *J Tropical Meteor* (in Chinese), 20(2): 192-197

附中文参考文献

- 楚荣忠, 王致君, 刘黎平等. 1997. 双偏振雷达降雨估测分析. *气象学报*, 55(1): 103-109
- 戴铁丕, 袁招洪, 王自发等. 1995. 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*, 18(1): 19-125
- 戴铁丕, 詹煜, 刘玉洁. 1996. 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. *气象科学*, 16(1): 63-73
- 官莉, 王振会, 裴晓芳. 2004. 雷达估测降水集成方法及其效果比较. *气象科学*, 24(1): 104-111
- 胡志群, 刘黎平, 楚荣忠. 2008. X 波段双线偏振雷达不同衰减订正方法对比及其对降水估测影响研究. *气象学报*, 66(2): 251-261
- 李建通, 张培昌. 1996. 最优插值法用于天气雷达测定区域降水量. *台湾海峡*, 15(3): 255-259
- 林炳干, 张培昌, 顾松山. 1997. 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*, 20(3): 334-340
- 刘黎平, 牟容, 许小永等. 2007a. 一次飑线过程的动力和微物理结构及滴谱变化对降水估测的影响研究. *气象学报*, 65(4): 601-611
- 刘黎平, 吴林林, 杨引明. 2007b. 基于模糊逻辑的分步式超折射地物回波识别方法的建立和效果分析. *气象学报*, 65(2): 252-260
- 毛紫阳, 段崇雯, 成礼智等. 2006. 模糊特征在天气雷达反射率基数据质量控制中的应用. *模糊系统与数学*, 20(6): 154-158
- 张仁铎. 2005. *空间变异理论及应用*. 北京: 科学出版社, 188pp
- 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