

基于贝叶斯融合方法的高分辨率地面-卫星-雷达三源降水融合试验^{*1}

潘 旻 沈 艳 宇婧婧 熊安元
PAN Yang SHEN Yan Yu Jingjing Xiong Anyuan

国家气象信息中心,北京,100081

National Meteorological Information Center, Beijing 100081, China

2014-02-17 收稿,2014-09-19 改回.

潘旻,沈艳,宇婧婧,熊安元. 2015. 基于贝叶斯融合方法的高分辨率地面-卫星-雷达三源降水融合试验. 气象学报,73(1): 177-186

Pan Yang, Shen Yan, Yu Jingjing, Xiong Anyuan. 2015. An experiment of high-resolution gauge-radar-satellite combined precipitation retrieval based on the Bayesian merging method. *Acta Meteorologica Sinica*, 73(1): 177-186

Abstract In order to develop a method for combining different precipitation sources such as gauge, radar and satellite with high resolution, the Bayesian merging method, which has been used to retrieve high-resolution surface moisture from radar and satellite sensors, was adopted to combine gauge, radar and satellite precipitation data at hourly and $0.05^{\circ} \times 0.05^{\circ}$ lat/lon resolutions over the Jiang-huai region. The errors statistics of the three sources of precipitation was performed via the samples in August of 2009. The CMORPH was set to the first guess, and the radar and gauge precipitations were merged as the observations together. The verification at the independent stations showed that the Bayesian merging method can be effectively applied to the combination of gauge-radar-satellite precipitations, and the accuracy of the combined precipitation was higher than any of the three sources of precipitation.

Key words Bayesian merging method, Gauge-Radar-Satellite combined data, High resolution precipitation

摘 要 为了探讨一种适用于区域性的地面、雷达、卫星等多源降水资料融合的方法,一种曾用于高分辨雷达、卫星土壤湿度产品反演的贝叶斯融合(Bayesian Merging)方法被尝试应用于江淮地区 $1\text{ h}-0.05^{\circ} \times 0.05^{\circ}$ 经纬度高分辨率的雷达估测降水、卫星反演降水与地面站点观测降水 3 种资料的融合。在应用该方法时,通过 2009 年 8 月样本统计分别估计卫星和雷达反演降水的误差关系,通过曲线拟合建立误差方程,并以卫星资料作为背景场,但在融合时将雷达估测降水作为新的观测信息与地面观测降水同时引入。融合试验检验结果表明:贝叶斯融合方法能够有效实现雷达、地面、卫星 3 种不同来源资料的融合,该方法生成的多源融合产品的精度均优于任何单一来源的降水产品。

关键词 贝叶斯融合方法,地面-雷达-卫星融合资料,高分辨率降水

中图法分类号 P468

1 引言

高质量高分辨率的降水资料是中尺度天气数值预报和模式检验、水文监测预报的基础,对气象及水文的防灾、减灾工作具有重要作用。目前的降水资

料源主要有 3 种:一是雨量计观测,它能够精确测量地面的降水,但空间代表性差;二是卫星反演降水资料,其空间覆盖广,但精度较低;三是雷达估测降水,其具有很高的时空分辨率,但精度较地面雨量计观测差。如何有效结合不同来源降水资料的优势,发

* 资助课题:中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室开放课题(2013LASW-B11)、公益性行业(气象)科研专项(GYHY201006042)。

作者简介:潘旻,主要从事气象资料多源数据融合和质量控制方面的研究。E-mail:pany@cma.gov.cn

展高分辨率的降水融合产品,是解决气象及水文业务和科研迫切需求的有效途径,因而越来越受到气象资料基础研究领域的关注和重视。中国国家气象信息中心采用概率密度函数+最优插值(PDF+OI)两步订正法建立了中国区域逐日 $-0.25^{\circ}\times 0.25^{\circ}$ 经纬度卫星与地面降水资料融合的概念模型(Xie, et al, 2011),并利用该方法在逐小时 $-0.1^{\circ}\times 0.1^{\circ}$ 经纬度分辨率上研制了由3万自动气象站观测与CMORPH卫星反演降水的融合产品(潘旻等,2012;宇婧婧等,2013;沈艳等,2013;Shen, et al,2014),实现了中国区域的全覆盖,并具有较高的时空分辨率和质量,满足了一定的业务科研需求。

然而现有的卫星产品和地面站网密度并不能满足制作更高分辨率降水产品的精度要求。中国地面观测站网分布极不均匀,尤其是在西部青藏高原地区站点分布非常稀疏。即使在站点分布密集的东部地区,5 km分辨率上网格内有站点分布的格点数仅为总网格数的1/10。卫星产品只能够提供10 km左右分辨率的降水信息,要进一步提高降水产品的分辨率而同时又保证降水产品的精度,则需要引入雷达探测的信息。雷达产品的空间分辨率高达1 km,能够弥补站点空间取样造成的代表性误差,但是雷达反演降水量的精度相对较差,需要靠地面观测降水来订正。另外,雷达产品易受地形遮挡等因素影响造成空间覆盖不完全,这时还是需要卫星产品来弥补。而目前缺乏的正是通过不断试验,寻找适用于中国区域站网分布情况下的针对降水量的地面-雷达-卫星等多源数据融合技术。

国际上针对高质量、高分辨率降水产品的科研业务需求,美国国家海洋大气局(NOAA)国家强风暴实验室(NSSL)和美国国家气象局(NWS)水文发展办公室(Office of Hydrologic Development)联合发展了NMQ计划(The National Mosaic and Multisensor QPE Project),在该计划的推动下,发展了一系列针对雷达和卫星估测降水资料的误差订正技术,包括空间一致情况下的平均场误差订正(Seo, et al,1999)和针对单部雷达特性的局地误差订正(Seo, et al,2002)等,以及雷达、卫星与地面观测资料的融合技术(Seo, 1998; Kondragunta, et al, 2004),并实时推出了各种高分辨率定量降水估测(QPE)产品。其中就涉及到了针对地面-雷达-卫星三源降水融合的尝试,其思路是先去除雷达和卫星

估测降水产品的系统偏差,再将卫星填满雷达覆盖不到的区域形成一个覆盖完整的初始场,最后采用最优插值与地面资料融合。

中国对不同来源降水资料融合方面也有一定的研究。例如利用地面测雨雷达来校准卫星估计的降水,以获取大尺度流域降水场(阿迈德等,2004)。而雷达估测降水中通常采用地面雨量计观测来建立雷达反射率因子(Z)和雨强(I)的统计关系,不过 $Z-I$ 关系在不同的区域、不同的气候条件及不同的天气系统中差异很大,单纯从 $Z-I$ 关系上估测的雷达降水具有很大的误差,需要联合雨量计资料进行校准(梁建茵等,2011)。可采用的方法有很多,例如平均校准法(张培昌等,1988)、最优 $Z-I$ 法(林炳干等,1997)、变分校准法(张培昌等,1992)、卡尔曼滤波校准法(赵坤等,2001;徐燕,2008)、最优插值校准法(李建通等,1996)以及卡尔曼变分组合(赵坤等,2001)等。鉴于中国复杂地形和雷达型号差异造成雷达组网的技术困难,鲜有将卫星-雷达-地面三源融合的产品问世。不过,近年来已有研究开始关注三源降水的融合技术(段旭等,2010;高晓荣等,2013)。总的说来,中国的研究缺乏一定的系统性和延续性,且这些技术主要应用在某一区域某些个例的分析上,并没有推出相应的业务化产品。

总结相关研究中所采用的多源降水融合方案,结合已掌握的概率密度函数误差订正和最优插值误差分析技术基础,本研究提出了一个地面-雷达-卫星资料融合思路,即先采用概率密度函数(PDF)技术订正雷达和卫星估测降水的系统误差,再采用贝叶斯融合方法将三者进一步融合。该融合方法曾在土壤湿度的卫星、雷达资料反演融合中取得很好的应用效果(Zhan, et al,2006),不仅可以同时融合多种不同来源的观测数据,在实际应用中还可以沿用最优插值方法中误差的定义方法,考虑误差相关性。采用该方法在 $1\text{ h}-0.05^{\circ}\times 0.05^{\circ}$ 经纬度分辨率上针对江淮地区开展地面-雷达-卫星多源资料融合的试验,探讨此方法在降水融合方面的适用性。

2 资料及预处理

地面观测资料采用的是中国国家气象信息中心利用3万多个自动气象站观测的逐时降水资料分析的 $1\text{ h}-0.05^{\circ}\times 0.05^{\circ}$ 经纬度的格点降水分析产品(沈艳等,2012),称为CPA(Chinese Precipitation Analyses)。自动站降水资料在格点分析前进行了

严格的质量控制(任芝花等,2010)。其中,在 $0.05^\circ \times 0.05^\circ$ 经纬度网格内有站点观测的格点称为“有效格点”,参与融合分析,江淮地区站网密度分布如图1所示。资料时段取自2009年8月1日01时(世界时,下同)至2009年8月31日23时。

雷达资料采用同时段中国气象科学研究院提供的基于区域自动站小时降水资料实时订正 $Z-I$ 关系拟合得到的雷达估测降水(Wang, et al, 2012),范围设定在江淮流域($30^\circ\text{--}35^\circ\text{N}$, $112^\circ\text{--}120^\circ\text{E}$),该区域内分布有7部雷达,覆盖全面。雷达估测降水资料的时空分辨率为 1 h 、 $0.01^\circ \times 0.01^\circ$ 经纬度网格,将其按网格平均成 $0.05^\circ \times 0.05^\circ$ 经纬度网格的降水场。

卫星资料采用的是美国 NOAA 气候预测中心(CPC)发展的 CMORPH 卫星反演降水产品(Joyce, et al, 2004),在中国区域有较高的精度(Shen, et al, 2010)。产品时空分辨率为 30 min 、 8 km ,将其累加成逐时降水后再插值成 $0.05^\circ \times 0.05^\circ$ 经纬度网格的降水场。

3 基于贝叶斯理论的融合试验

3.1 雷达、卫星降水的系统误差订正

卫星反演和雷达估测降水具有明显的系统偏差,且呈现非独立性的特征,故这两种来源的资料在进行贝叶斯融合之前都分别通过概率密度函数匹配法进行了系统误差的订正(宇婧婧等,2013)。

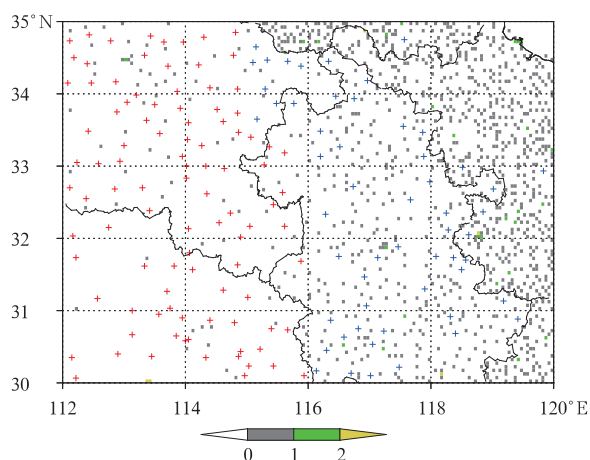


图1 江淮地区 $0.05^\circ \times 0.05^\circ$ 经纬度网格内观测站点数的分布(蓝色、红色“+”分别表示区域I、区域II的检验站点位置)

Fig. 1 Gauge numbers in the $0.05^\circ \times 0.05^\circ$ lat/lon resolution grid boxes over the Jiang-huai region (The blue and red crosses are the verification stations for area I and area II, respectively)

具体方案是:匹配样本的时间滑动窗口采用的是当前时次并前后各取若干小时(雷达取 1 h ,卫星取 6 h);空间滑动窗口采用的是以分析点为中心 $5^\circ \times 5^\circ$ 网格内所有有效格点;同时,要求非0降水的样本至少有120对匹配样本才做概率密度函数订正。

如图2a—e所示,订正之前的雷达和卫星资料均能抓住降水的空间分布信息,特别是雷达估测降水,其形态分布与地面非常相似,但是量值明显偏小;经过概率密度函数订正后,雷达和卫星资料降水空间形态变化不大,但降水中心的量值与地面观测的降水强度更加接近。从江淮地区降水的偏差时间序列上看,采用概率密度函数方法对原始的雷达和卫星估测降水进行订正后,绝大多数时刻,其系统偏差减小幅度都比较明显,更加接近0线(图3),说明该方法能够一定程度消除资料的系统偏差。

3.2 贝叶斯融合

3.2.1 贝叶斯理论和公式

贝叶斯理论提供了一套基于概率统计方法来融合各种不同来源信息的思路,由此可以推导出最优插值、克里金插值、卡尔曼滤波、变分等一系列资料同化的方法(Wikle, et al, 2007)。贝叶斯公式为

$$p(x|y) = \frac{p(y|x)p(x)}{p(y)} \quad (1)$$

式中, $p(y|x)$ 为数据分布,代表当“真值”为 x 时,测量得到的一组观测值 y ; $p(x)$ 为先验分布,表示“真值” x 出现的概率,一般从历史数据(气候态)或者模式预报中给出 x 的分布; $p(y)$ 为边缘分布,表示无论真值 x 为多少用仪器均测量 y 的概率,对于观测测量 y 来说,可以看作是“标准化常量”,常被忽略; $p(x|y)$ 为后验分布,代表当仪器测量到 y 时,“真值”为 x 的概率。

贝叶斯理论从单变量气象观测的角度来说,就是将 x 看作无法测量到的“真值”,将 y 看作仪器测量得到的观测值,则 $p(x|y)$ 表示 y 能准确代表(测量到) x 的概率分布。贝叶斯方法所求的 $p(x|y)$ 也可以理解为当有一个预先估计 $p(x)$,然后收集观测资料 y ,通过新增加的信息来更新(或订正)原先的估计。进一步将其拓展到多元正态分布的情况。假设需要一组 $n \times 1$ 的向量 $\mathbf{X}$ (例如 n 个站点上的 u 风分量),其先验分布 $\mathbf{X} \sim N(\mu, \mathbf{P})$ 满足正态分布,均值 μ 和协方差阵 $\mathbf{P}$ 是已知的。另外,通过测量获得一

组 $p \times 1$ 的观测向量 $\mathbf{Y}$, 它满足 $\mathbf{Y} | \mathbf{x} \sim N(\mathbf{H}\mathbf{x}, \mathbf{R})$, $\mathbf{H}$ 是 $p \times n$ 的观测矩阵, $\mathbf{R}$ 是 $p \times p$ 的观测误差协方差

阵。则后验分布也满足正态分布

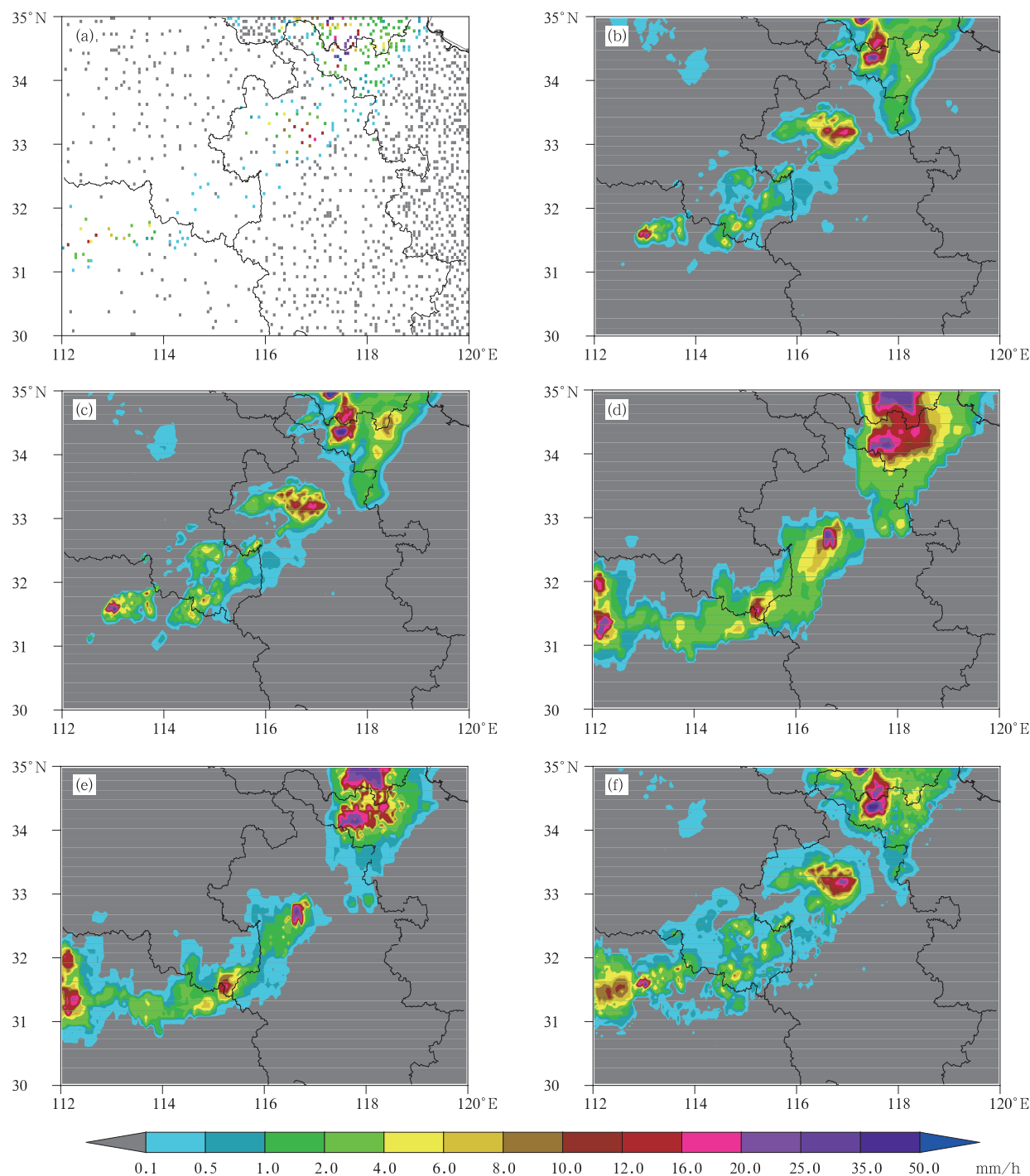


图2 2009年8月17日15时江淮地区雨强分布

(a. 地面观测, b. 雷达估测降水, c. 概率密度函数订正后的雷达估测降水, d. CMORPH 卫星反演降水, e. 概率密度函数订正后的 CMORPH, f. 地面-雷达-卫星融合降水)

Fig. 2 Hourly precipitation at 15:00 UTC 17 Aug 2009 over the Jiang-huai region

(a. Gauge, b. Raw Radar QPE, c. Radar QPE after PDF corrected, d. CMORPH, e. CMORPH after PDF corrected, f. combined gauge-radar-satellite precipitation)

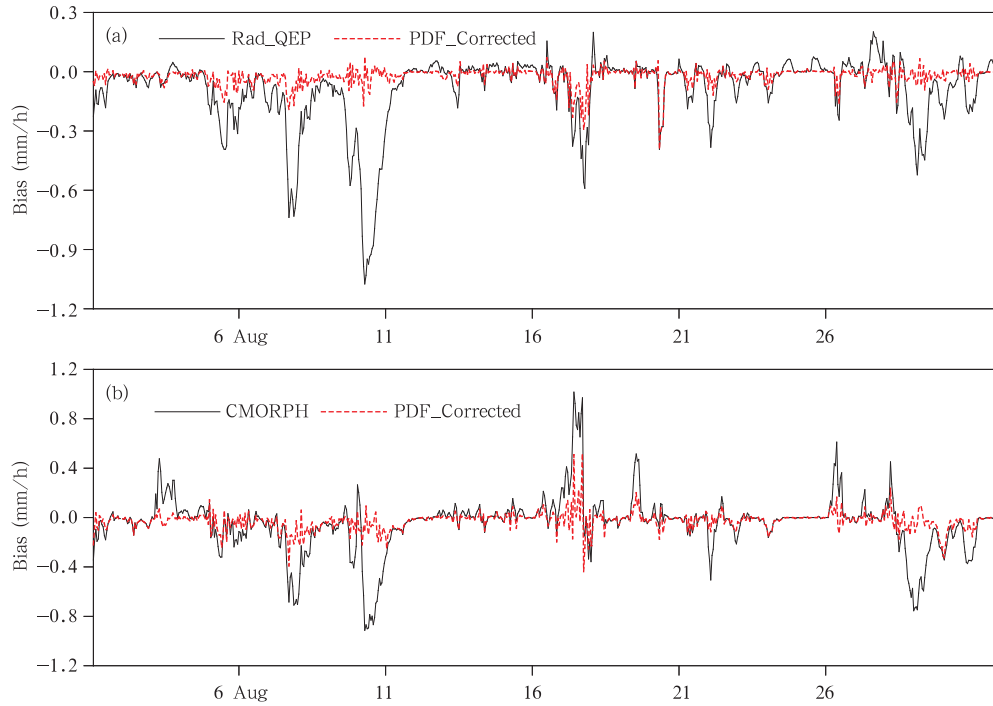


图3 2009年8月(a)雷达(Rad_QPE)和(b)卫星(CMORPH)降水概率密度函数订正前后偏差随时间变化
(黑色实线表示订正前,红色虚线表示订正后)

Fig.3 Hourly bias of (a) Radar QPE, and (b) CMORPH precipitation on August of 2009
(The black/red lines denote before/after PDF corrected)

$$\mathbf{X} | \mathbf{y} \sim N((\mathbf{H}'\mathbf{R}^{-1}\mathbf{H} + \mathbf{P}^{-1})^{-1}(\mathbf{H}'\mathbf{R}^{-1}\mathbf{y} + \mathbf{P}^{-1}\boldsymbol{\mu}), (\mathbf{H}'\mathbf{R}^{-1}\mathbf{H} + \mathbf{P}^{-1})^{-1}) \quad (2)$$

则 $\mathbf{X}$ 期望值为

$$E(\mathbf{X} | \mathbf{y}) = (\mathbf{H}'\mathbf{R}^{-1}\mathbf{H} + \mathbf{P}^{-1})^{-1}\mathbf{H}'\mathbf{R}^{-1}\mathbf{y} + (\mathbf{H}'\mathbf{R}^{-1}\mathbf{H} + \mathbf{P}^{-1})^{-1}\mathbf{P}^{-1}\boldsymbol{\mu} = \boldsymbol{\mu} + \mathbf{K}(\mathbf{y} - \mathbf{H}\boldsymbol{\mu}) \quad (3)$$

式中, $\mathbf{K}$ 称为权重或者增益矩阵, 表达式为

$$\mathbf{K} = \mathbf{P}\mathbf{H}'(\mathbf{R} + \mathbf{H}\mathbf{P}\mathbf{H}')^{-1} \quad (4)$$

后验协方差矩阵表示为

$$\text{Var}(\mathbf{X} | \mathbf{y}) = (\mathbf{I} - \mathbf{K}\mathbf{H})\mathbf{P} \quad (5)$$

由式(3)–(5)可以看出, 贝叶斯方法的公式与最优插值的公式是一致的。与最优插值方法的误差分析类似, 只要通过统计方法合理确定初估值误差协方差 $\mathbf{P}$ 和观测场误差协方差 $\mathbf{R}$, 进而计算权重 $\mathbf{K}$, 这样对于各点上所关心的变量期望值 $\mathbf{X}$ 都可以用一组初估值 $\boldsymbol{\mu}$ 和一组观测值 $\mathbf{Y}$ 计算得到。

3.2.2 贝叶斯融合思路

贝叶斯融合方法是一种基于贝叶斯统计理论发展而来的资料同化方法(Zhan, et al, 2006)。其特点是: 可以融合多种不同观测变量的信息; 误差既可以通过实时变化的样本训练确定, 也可以根据历史

数据的统计关系来定义; 但误差估计准确性会影响融合结果的精度; 当计算区域较大、分辨率较高时, 逆矩阵求解困难。

借助图4的格点示意图来说明贝叶斯方法的融合思路。图中4个圆点表示分析格点, 其上分别有

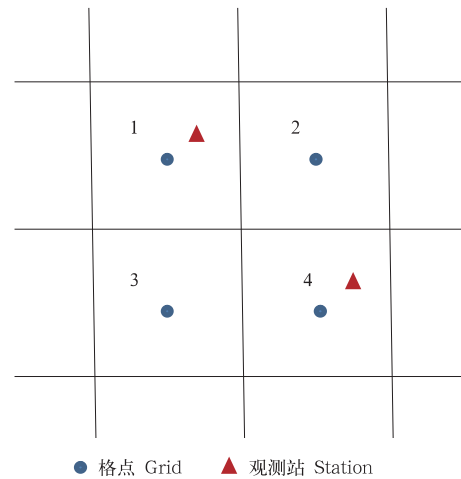


图4 格点示意图

Fig.4 Grid schematic diagram

一组初估值和观测值,而三角点表示 2 个有额外观测信息的格点。贝叶斯融合方法的公式可以改写成

$$\mathbf{X}^a = \mathbf{X}^b + \mathbf{K}[\mathbf{Y} - \mathbf{H}(\mathbf{X}^b)] \quad (6)$$

以卫星资料为初估场 $\mathbf{X}^b$, $\mathbf{X}^b = (x_1, x_2, \dots, x_n)'$, $n=4$; 初估场误差协方差矩阵 $\mathbf{P}$ 的形式可以表现为

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} \epsilon_{11} & \epsilon_{12} & \epsilon_{13} & \epsilon_{14} \\ \epsilon_{21} & \epsilon_{22} & \epsilon_{23} & \epsilon_{24} \\ \epsilon_{31} & \epsilon_{32} & \epsilon_{33} & \epsilon_{34} \\ \epsilon_{41} & \epsilon_{42} & \epsilon_{43} & \epsilon_{44} \end{bmatrix}$$

将相对准确的地面观测和雷达资料同时作为新的信息场 $\mathbf{Y}$ 引入,则

$$\mathbf{Y} = (y_1, y_2, y_3, \dots, y_p)' \quad p=6$$

其中, $p=1, 2$ 时表示地面观测, $p=3-6$ 时表示雷达探测信息。

假设雷达估测的降水与地面观测的降水无差异,则观测矩阵 $\mathbf{H}$ 和观测误差协方差矩阵 $\mathbf{R}$ 可以构建成

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} \sigma_{11} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{22} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{33} & \sigma_{34} & \sigma_{35} & \sigma_{36} \\ 0 & 0 & \sigma_{43} & \sigma_{44} & \sigma_{45} & \sigma_{46} \\ 0 & 0 & \sigma_{53} & \sigma_{54} & \sigma_{55} & \sigma_{56} \\ 0 & 0 & \sigma_{63} & \sigma_{64} & \sigma_{65} & \sigma_{66} \end{bmatrix}$$

其中, σ_{11} 和 σ_{22} 表示地面观测误差协方差, σ_{ij} ($i, j=3-6$) 表示雷达探测信息的误差协方差。由已知的 $\mathbf{P}$ 、 $\mathbf{H}$ 和 $\mathbf{R}$ 可以求解权重 $\mathbf{K}$, 具体形式同式(4)。

通过统计方法定义出 $\mathbf{P}$ 和 $\mathbf{R}$, 则可以由已知的 $\mathbf{P}$ 、 $\mathbf{H}$ 和 $\mathbf{R}$ 求解权重 $\mathbf{K}$ 。考虑到计算效率, 目前选取以分析格点为中心 25 km 以内的数据参与贝叶斯融合分析。

3.2.3 不同降水资料的误差定义

本研究中各种降水资料的误差估计方法参考了潘旸等(2012)最优插值融合方法中的统计方法。地面格点分析产品的误差依然考虑随降水量增大而增

大、随样本数增大而减小的统计关系。雷达估测降水的误差主要源于雷达反射率信号受到如径向距离衰减、高度、地形遮挡等因素的影响, 但经过组网技术处理之后上述影响应该会大幅减弱, 故这里假设雷达降水与卫星类似, 误差只与降水量本身有关, 且存在误差空间相关性。卫星和雷达降水误差随降水量值增加而增大, 其变化形式可以采用二次多项式拟合(图 5a), 且雷达估测降水的误差基本为 CMORPH 误差的 20%—50%, 说明江淮地区雷达估测降水的质量要比 CMORPH 产品高很多。卫星和雷达降水误差的空间相关性均考虑的是随距离变化的关系(图 5b), 相关系数随距离负指数单调递减, 衰减距离约在 25 km。通过上述关系的拟合方程量化误差, 代入式(4)求解权重系数 $\mathbf{K}$ 。

3.3 融合试验结果检验

3.3.1 检验方法

融合结果检验从空间分布检查和统计分析两方面入手, (1)考察融合降水的空间形态是否合理, 是否既能保持雷达降水高分辨率的精细结构又能达到地面降水的精度; (2)通过样本统计评估该融合方法和降水产品的精度水平。在统计检验时, 为了保证检验数据的独立, 将江淮区域内 252 个国家级自动站保留, 去掉与校正站距离在 10 km 以内的 62 个站, 用余下的 181 个站作为检验站, 只用 1334 个区域自动站进行格点插值或融合分析, 然后将格点上的融合降水值和各个降水产品通过距离平方反比加权法插值到检验站上与降水“真值”对比。

另外, 由于 2009 年 8 月江淮地区西部的区域自动站降水数据尚未完成实时收集, 造成数据缺失, 形成了这一时期江淮地区站点东密西疏的分布, 为了同时考察站点疏密程度对降水空间分析及融合精度的影响, 根据站点分布特征将试验区分成东西两个检验区(图 1), 东部为站点密集区(检验站 103 个, 区域站 942 个, 站点数与格点数的比例约为 1:10, 记为区域 I), 西部为站点稀疏区(检验站 78 个, 区域站 392 个, 站点数与格点数的比例约为 1:80, 记为区域 II)。

3.3.2 空间分布检查

从某一时次融合降水的空间形态分布(图 2f)可见, 在西部站点较为稀疏的地区, 卫星反演与雷达估测降水的空间形态存在较大的差异, 融合后的降水基本保持了雷达降水的空间结构, 而量值与地面

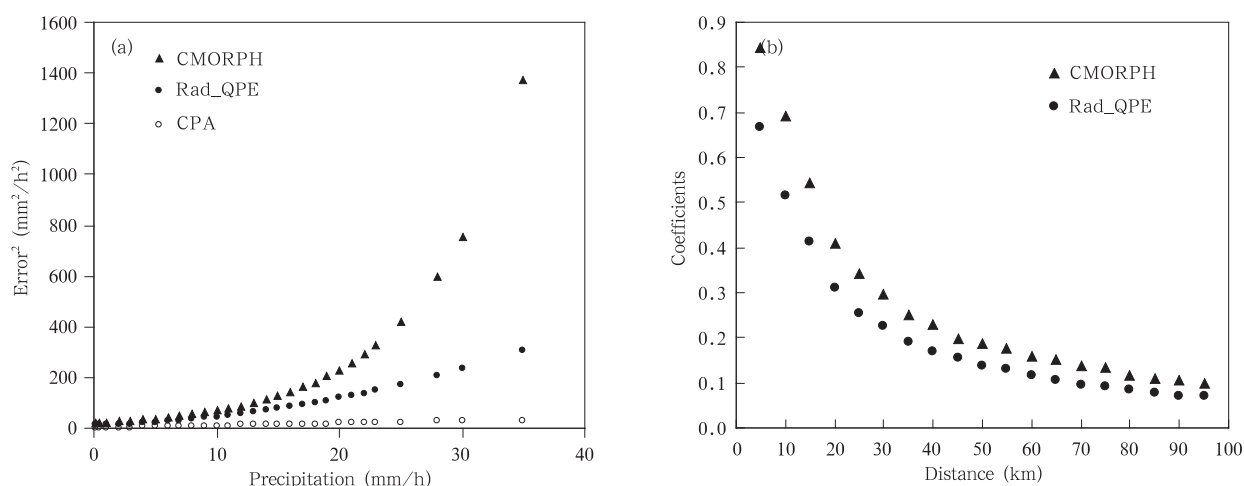


图5 (a)地面格点分析降水(CPA)、雷达估测降水(Rad_QPE)以及CMORPH降水的均方根误差分别与降水强度的关系,
(b)任意不同两个格点上雷达、卫星降水误差的相关系数与格点间距离的关系

Fig.5 (a) Mean square errors vs. the precipitation, and
(b) correlation coefficients of the mean square errors vs. the distance

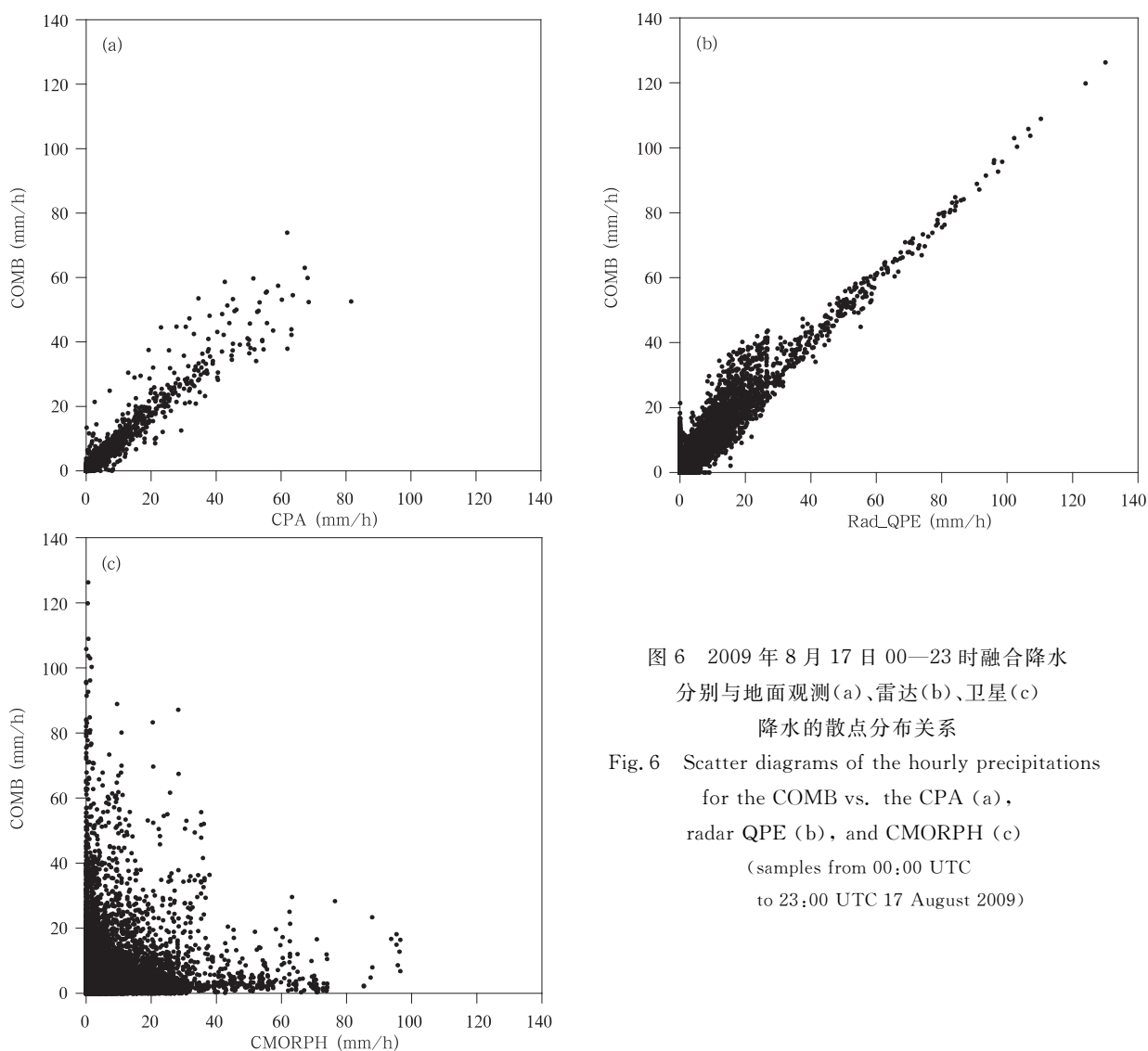


图6 2009年8月17日00—23时融合降水
分别与地面观测(a)、雷达(b)、卫星(c)
降水的散点分布关系

Fig.6 Scatter diagrams of the hourly precipitations
for the COMB vs. the CPA (a),
radar QPE (b), and CMORPH (c)
(samples from 00:00 UTC
to 23:00 UTC 17 August 2009)

更为接近。而在东部站点密集区,可以发现它与稀疏区的结果一致,空间形态上与雷达很相似,量值与地面接近,在局部地区还保留了一定的卫星信息(如 $(31.5^{\circ}\text{N}, 112.5^{\circ}\text{E})$ 附近的降水中心)。说明该方法能够实现三者降水的融合。

从降水量散点分布(图6)上也可以清楚地看到,在有站点的地方融合降水值非常接近地面观测降水(图6a),两者相关系数为0.964,能较好地保留地面观测的信息;而在无站点的地区,由于该地区雷达覆盖全面,基本反映的是雷达资料的信息(图6b),融合降水与雷达估测降水的相关系数为0.951,而与卫星降水的相关仅为0.21,这是因为与雷达估测降水相比,卫星反演降水的误差较大,卫星遥感的信息对该试验区域最终融合降水的影响很小。

3.3.3 融合降水精度检验

图7是2009年8月江淮区域所有检验站点上降水均方根误差(RMSE)和相关系数的逐日变化。三者融合产品(图中COMB所示)的均方根误差均比单一的地面格点分析产品CPA、雷达估测降水(Rad_QPE)和CMORPH卫星反演降水的要低,而

其相关系数均比CPA和CMORPH的高,并且在绝大多数情况下也比Rad_QPE的要高。同时可以看到,在 $0.05^{\circ} \times 0.05^{\circ}$ 分辨率上CPA和Rad_QPE的精度水平是比较接近的。

从相对偏差上看(表1),三者融合产品均比单一的地面格点分析产品CPA、雷达估测降水和CMORPH卫星反演降水大幅减小。三者融合产品主要表现在区域I的负偏差和区域II的正偏差,这是因为区域II的平均小时降水强度要弱于区域I的,而卫星和雷达产品均有小雨强高估、大雨强低估的问题,因此也影响到了最终融合降水的偏差,造成多源融合降水亦对强降水略有低估,而对小强度降水更容易高估。

3.3.4 站网密度的影响分析

从相关系数上看(表1),雷达降水在区域I和区域II中的精度水平相当,相关系数分别为0.746和0.733,而地面观测的格点分析产品CPA的精度受站点密度影响比较明显,密集区的相关系数为0.696,接近雷达的(Rad_QPE),而稀疏区只有0.523。从均方根误差上看,密集区CPA(1.031 mm/h)要略低于雷达的(1.078 mm/h),在稀疏区情况则反之,说明就目

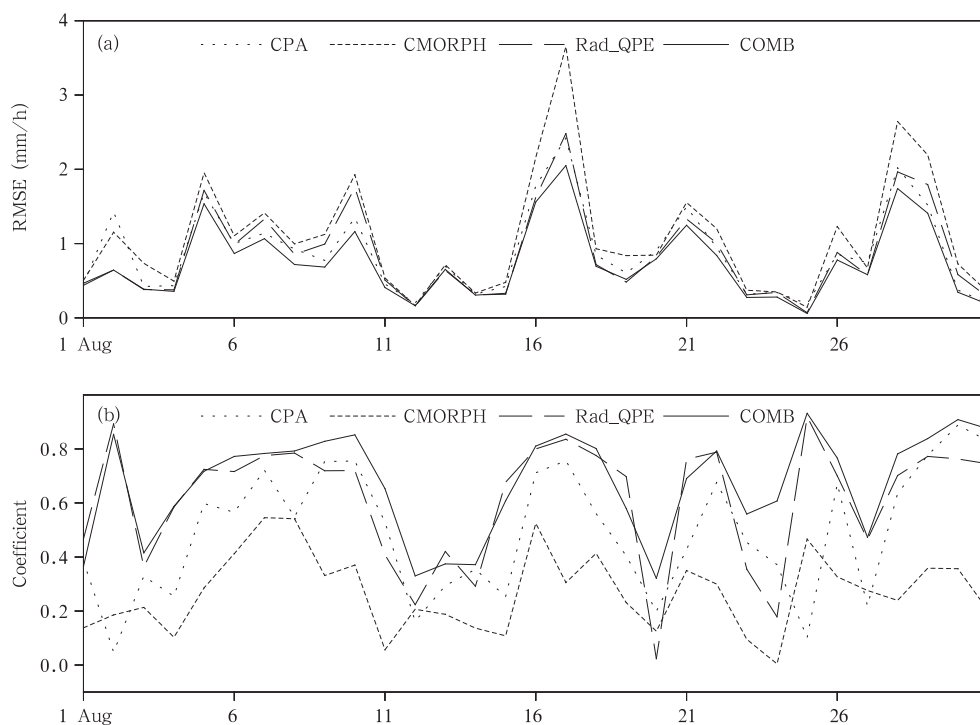


图7 2009年8月各种降水产品的(a)均方根误差(mm/h)和(b)相关系数的逐日变化

Fig. 7 Daily (a) RMSE (mm/h), and (b) correlation coefficients for the different precipitation products in August of 2009

前区域自动站的密度而言, $0.05^{\circ} \times 0.05^{\circ}$ 的格点分析产品精度与雷达降水产品的精度是基本相当的,

但在站点相对稀疏的地区, 雷达降水的精度较高, 比其他两种单一来源的降水产品优势明显。

表1 2009年8月不同降水产品的相关系数、均方根误差和相对偏差统计结果
Table 1 The statistics correlation coefficient, root mean square error, and relative bias
for the different precipitation products over the regions I and II in August of 2009

降水产品	区域 I			区域 II		
	相关系数	均方根误差(mm/h)	相对偏差(%)	相关系数	均方根误差(mm/h)	相对偏差(%)
CPA	0.696	1.031	-10.94	0.523	1.102	62.61
Rad_QPE	0.746	1.078	-40.56	0.733	0.950	-29.90
CMORPH	0.302	1.371	-22.71	0.371	1.216	-9.04
CMP+CPA	0.653	1.068	-3.48	0.560	1.056	24.93
CMP+CPA+Rad	0.785	0.924	-5.41	0.764	0.854	19.22

CMORPH 卫星产品的原始分辨率不高, 其精度比 CPA 和雷达降水要低很多, 相关系数不到 0.4、均方根误差不低于 1.3 mm/h。CMORPH 与地面观测融合后(CMP+CPA), 精度均有明显提高。但与 CPA 格点分析相比, 在区域 II 精度有所提高, 相关系数从 0.523 提高到 0.560, 均方根误差由 1.102 mm/h 减至 1.056 mm/h, 在区域 I 精度却略有降低, 说明在站点稀疏区引入 CMORPH 卫星降水信息可以改进格点分析场的质量, 但是在站网足够密集的地区作用不大。采用贝叶斯融合方法进一步引入雷达信息后(CMP+CPA+Rad), 区域 I 和区域 II 的相关系数分别提高至 0.785 和 0.764, 均方根误差减小至 0.924 和 0.854 mm/h, 且与任何一种单一来源降水产品相比, 降水的精度均明显提高。

综上分析可知, 一方面, 无论地面观测站网疏密, 采用贝叶斯融合方法进行多源降水融合都能有效提高降水产品的精度; 另一方面, 引入高分辨率雷达探测信息对改进站点稀疏区降水的精度尤为重要, 而卫星产品只在雷达覆盖不到而站点稀疏的情况下有改进作用。

4 结论与讨论

本研究尝试将贝叶斯融合方法应用于 $1\text{ h}-0.05^{\circ} \times 0.05^{\circ}$ 经纬度高分辨率上的雷达估测降水、卫星反演降水与地面站点观测降水 3 种资料的融合, 并从空间分布和统计分析等检验了该方法的有效性, 探讨了站网疏密情况下地面格点分析、卫星、雷达以及融合降水产品的精度。主要结论有:

(1) 概率密度函数匹配法能够有效减小雷达和卫星降水的系统偏差, 贝叶斯融合方法能够实现雷

达、地面、卫星 3 种不同来源降水资料的融合, 其生成的多源降水融合产品的精度均优于任何单一来源的降水产品。

(2) 在 $0.05^{\circ} \times 0.05^{\circ}$ 经纬度空间分辨率上, 就目前东部地区站网密度(即站网密集的条件下), 格点分析产品的质量与雷达产品的相当。但是, 在站网稀疏且没有雷达产品覆盖的情况下, 引入卫星产品信息对融合降水精度的提高也有一定帮助。

本研究旨在探讨贝叶斯融合方法在多源降水融合中的可行性, 为了易于实现, 做了一定简化和假设, 即雷达资料估测出来的降水与地面观测降水无差异, 观测算子 H 中两者表示均为 1。该方法在应用上还有可改进和发展的空间。一方面, 在融合试验中, 雷达产品的误差估计考虑的因子相对简单, 实际上在组网过程中仍然带来了很多误差, 误差分析可以进一步细化; 另一方面, 发挥该方法可以融合与降水相关变量的特点, 直接将雷达反射率作为观测变量引入, 构造雷达反射率与地面观测降水量的对应关系。下一步可以从上述两方面入手, 希望借此进一步提高该方法的精度。

参考文献

- 阿迈德·迪狄安·迪阿罗, 刘晓阳, 毛节泰等. 2004. 卫星雷达联合重构大尺度流域降水场. 高原气象, 23(1): 11-17. Diallo A T, Liu X Y, Mao J T, et al. 2004. Precipitation field in large scale catchment reconstructed by combination of GMS satellite and weather radar data. Plateau Meteor, 23(1): 11-17 (in Chinese)
- 段旭, 王曼, 张杰等. 2010. 低纬高原地区多元信息综合变分分析试验. 高原气象, 29(3): 712-718. Duan X, Wang M, Zhang J, et al. 2010. Variational assimilation experiment on the multi-source information analysis over the low latitude plateau. Plateau Meteor, 29(3): 712-718 (in Chinese)

- 高晓荣, 梁建茵, 李春晖等. 2013. 多平台(雷达、卫星、雨量计)降水信息的融合技术初探. 高原气象, 32(2): 549-555. Gao X R, Liang J Y, Li C H, et al. 2013. Preliminary studies on the techniques to merge precipitation information from multiple platforms (radar, satellite and rain gauge). Plateau Meteor, 32(2): 549-555 (in Chinese)
- 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. Li J T, Zhang P C. 1996. Optimum interpolation method used for obtaining regional precipitation from weather radar measurements. J Oceanography Taiwan Strait, 15(3): 255-259 (in Chinese)
- 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. Liang J Y, Hu S. 2011. A strategy for radar-rainfall estimate and its validation. J Trop Meteor, 27(1): 1-10 (in Chinese)
- 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. Lin B G, Zhang P C, Gu S S. 1997. Improvement of the weather radar-measured regional rainfall with comparison to other techniques. J Nanjing Inst Meteor, 20(3): 334-340 (in Chinese)
- 潘畅, 沈艳, 宇婧婧等. 2012. 基于最优插值方法分析的中国区域地面观测与卫星反演逐时降水融合试验. 气象学报, 70(6): 1381-1389. Pan Y, Shen Y, Yu J J, et al. 2012. Analysis of the combined gauge-satellite hourly precipitation over China based on the OI technique. Acta Meteor Sinica, 70(6): 1381-1389 (in Chinese)
- 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. Ren Z H, Zhao P, Zhang Q, et al. 2010. Quality control procedures for hourly precipitation data from automatic weather stations in China. Meteor Mon, 36(7): 123-132 (in Chinese)
- 沈艳, 潘畅, 徐宾等. 2012. 最优插值法在对中国自动站降水量空间分析中的参数优化. 成都信息工程学院学报, 27(2): 219-224. Shen Y, Pan Y, Xu B, et al. 2012. Parameter improvements for hourly automatic weather stations precipitation analysis by optimal interpolation over China. J Chengdu Univ Info Technol, 27(2): 219-224 (in Chinese)
- 沈艳, 潘畅, 宇婧婧等. 2013. 中国区域小时降水量融合产品的质量评估. 大气科学学报, 36(1): 37-46. Shen Y, Pan Y, Yu J J, et al. 2013. Quality assessment of hourly merged precipitation product over China. Trans Atmos Sci, 36(1): 37-46 (in Chinese)
- 徐燕. 2008. 卡尔曼滤波法在西峰雷达估测降水中的应用. 干旱气象, 26(1): 78-82. Xu Y. 2008. Application of Kalman filter in Radar precipitation estimation. Arid Meteor, 26(1): 78-82 (in Chinese)
- 宇婧婧, 沈艳, 潘畅等. 2013. 概率密度匹配法对中国区域卫星降水资料的改进. 应用气象学报, 24(5): 544-553. Yu J J, Shen Y, Pan Y, et al. 2013. Improvement of satellite-based precipitation estimates over China based on probability density function matching method. J Appl Meteor Sci, 24(5): 544-553 (in Chinese)
- 张培昌, 戴铁丕, 林秉玉. 1988. 雷达气象学. 北京: 气象出版社, 329pp. Zhang P C, Dai T P, Lin B Y. 1988. Radar Meteorology. Beijing: China Meteorological Press, 329pp (in Chinese)
- 张培昌, 戴铁丕, 傅德胜等. 1992. 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, 16(2): 248-256. Zhang P C, Dai T P, Fu D S, et al. 1992. Principle and accuracy in obtaining the area precipitation from digital weather radar through variational method. Scientia Atmos Sinica, 16(2): 248-256 (in Chinese)
- 赵坤, 刘国庆, 葛文忠. 2001. 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, 6(2): 180-185. Zhao K, Liu G Q, Ge W Z. 2001. Precipitation calibration by using Kalman filter to determine the coefficients of the variational equation. Climatic Environ Res, 6(2): 180-185 (in Chinese)
- Kondragunta C, Seo D J. 2004. Toward integration of satellite precipitation estimates into the multi-sensor precipitation estimator algorithm//18th Conf. on Hydrology. Seattle: Amer Meteor Soc
- Joyce R J, Janowiak J E, Arkin P A, et al. 2004. CMORPH: A method that produces global precipitation estimates from passive microwave and infrared data at high spatial and temporal resolution. J Hydrometeor, 5(3): 487-503
- Seo D J. 1998. Real-time estimation of rainfall fields using radar rainfall and rain gage data. J Hydrol, 208(1-2): 37-52
- Seo D J, Breidenbach J P, Johnson E R. 1999. Real-time estimation of mean field bias in radar rainfall data. J Hydrol, 223(3-4): 131-147
- Seo D J, Breidenbach J P. 2002. Real-time correction of spatial non-uniform bias in radar rainfall data using rain gauge measurements. J Hydrometeor, 3(2): 93-111
- Shen Y, Xiong A Y, Wang Y, et al. 2010. Performance of high-resolution satellite precipitation products over China. J Geophys Res, 115(D2): D02114, doi: 10.1029/2009JD012097
- Shen Y, Zhao P, Pan Y, et al. 2014. A high spatiotemporal gauge-satellite merged precipitation analysis over China. J Geophys Res, 119(6), doi: 10.1002/2013JD020686
- Wang G L, Liu L P, Ding Y Y. 2012. Improvement of radar quantitative precipitation estimation based on real-time adjustments to Z-R relationships and inverse distance weighting correction schemes. Adv Atmos Sci, 29(3): 575-584
- Wikle C K, Berliner L M. 2007. A Bayesian tutorial for data assimilation. Elsevier, Physica D, 230(1-2): 1-16
- Xie P P, Xiong A Y. 2011. A conceptual model for constructing high-resolution gauge-satellite merged precipitation analyses. J Geophys Res, 116 (D21): D21106, doi: 10.1029/2011JD016118
- Zhan X W, Houser P R, Walker J P, et al. 2006. A method for retrieving high-resolution surface soil moisture from hydros L-band radiometer and radar observations. IEEE Trans Geosci Remote Sens, 46(6): 1534-1544