

王红艳, 王改利, 刘黎平, 等. 2015. 利用雷达资料对自动雨量计实时质量控制的方法研究 [J]. 大气科学, 39 (1): 59–67, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1403.13295. Wang Hongyan, Wang Gaili, Liu Liping, et al. 2015. Development of a real-time quality control method for automatic rain gauge data using radar quantitative precipitation estimation [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 39 (1): 59–67.

利用雷达资料对自动雨量计实时质量控制的方法研究

王红艳^{1,2} 王改利¹ 刘黎平¹ 江源³ 王丹³ 李丰¹

1 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室, 北京 100081

2 南京信息工程大学, 南京 210044

3 中国气象局国家气象中心, 北京 100081

摘 要 自动雨量计资料是对降水的直接测量, 在流域面雨量计算、气候研究、气象服务等方面具有重要意义。但是, 由于风力、蒸发、灌溉、校准、漏斗堵塞、机械故障、信号传输等原因往往造成其存在不同类型的系统误差和随机误差, 自动雨量计数据在定量使用前需要进行质量控制。目前, 天气雷达以其高时空分辨率的优势已经成为监测降水的重要手段, 本文首先采用两步校准法改善雷达估测降水, 然后对雷达—雨量计对之间的差异进行统计学的分析, 确定自动雨量计质量控制的一些标准, 从而对雨量计进行质量控制。最后用两个降水过程对自动雨量计质量控制的结果进行了检验, 结果表明: 两步校准法改善了雷达估测降水的系统性偏差, 并减小了雨量计站点上的相对误差; 可以利用雷达估测降水实现对自动雨量计的实时质量控制, 就整个数据集而言, 约 0.1% 的数据被怀疑为误判, 误判的自动雨量计主要位于雨带的边缘。但该质量控制算法同时也存在一定的局限性: 在雨带的边缘或没有天气雷达覆盖的区域, 以及雷达资料存在数据质量问题的情况下, 往往会造成对雨量计的误判。

关键词 雷达估测降水 两步校准法 雨量计 质量控制

文章编号 1006-9895(2015)01-0059-09

中图分类号 P412

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1403.13295

Development of a Real-Time Quality Control Method for Automatic Rain Gauge Data Using Radar Quantitative Precipitation Estimation

WANG Hongyan^{1,2}, WANG Gaili¹, LIU Liping¹, JIANG Yuan³, WANG Dan³, and LI Feng¹

1 State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

2 Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing, 210044

3 National Meteorological Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081

Abstract Automatic rain gauges measure precipitation directly and are important in areal rainfall calculation, climate research, and meteorological services. However, a system for quality control is required when using automatic rain gauge data quantitatively due to various types of systematic and random errors caused by wind, evaporation, splashing, calibration, funnel blockage, mechanical failure, finite sampling, signal transmission interference, power failure, and other factors. Doppler radar has become an important method for monitoring precipitation in recent decades due to its high spatial and temporal resolution. In this study, a two-step calibration method was used to improve radar quantitative precipitation estimation. Then, the differences between radar-gauge pairs were statistically analysed to determine an effective criterion for rain gauge quality control. Finally, two heavy rain events were studied to assess the proposed quality control procedure. The results showed that the two-step calibration method can improve radar quantitative

收稿日期 2013-10-30; 网络预出版日期 2014-03-19

资助项目 公益性行业(气象)科研专项 GYHY201006042, 中国气象科学研究院基本科研业务费项目 2011Y004

作者简介 王红艳, 女, 1974 年出生, 高级工程师, 主要研究方向为雷达气象应用与研究。E-mail: whyan@cams.cma.gov.cn

通讯作者 王改利, E-mail: wgl3111@cams.cma.gov.cn

precipitation estimations by removing systematic bias and eliminating relative errors in space. Thus, radar quantitative precipitation estimation can be applied in real-time automatic rain gauge quality control. With respect to the entire set of gauge data, the percentage of false quality control results was as suspected, approximately 0.1%, with the wrongly rejected gauges located mainly on the edges of rain bands. The real-time rain gauge data quality control method, however, causes the incorrect rejection of gauges not only in regions where rain gauges are located on the edges of rain bands but also in regions where radar data are unavailable or are not under quality control.

Keywords Radar quantitative precipitation estimation, Two-step calibration method, Rain gauge, Quality control

1 引言

随着气象现代化的快速发展,为了加强对中小尺度天气系统的监测和预警能力,2009年底,气象部门已经在全国建成国家级自动站和区域自动站30000左右(任芝花等,2010)。降水资料在流域面雨量计算、气候研究、气象服务等方面具有重要意义,随着我国新一代天气雷达网的布设,及气象卫星资料的应用,这些遥感数据融合了雨量计观测数据形成的格点化降水资料,也已经越来越广泛地应用于气象服务、精细化农业、模式验证、水利和城市管理等方面。但是,自动雨量计由于风力、蒸发、灌溉、校准、机械故障、信号传输等原因往往造成其存在不同类型的系统误差和随机误差(Habib et al., 2001; Yeung et al., 2010)。因此,在定量使用自动雨量计测量的降水数据之前,需要对其进行质量控制。一直以来,国际上针对地面日或月气候统计资料质量控制方法的研究及其应用相对比较广泛(Feng et al., 2004; 任芝花等, 2010; Sciuto et al., 2009),而针对小时观测资料尤其是降水资料质量控制方法的研究比较有限。目前,应用到的逐小时降水资料质量控制方法主要为气候学界限值检查,其他检查方法的研究与应用还较少(任芝花等, 2010),但在雨量计的随机误差中,由于机械故障、信号传输或雨量计堵塞造成的被污染数据,往往在气候极值以内,很难利用气候极值法对其进行质量控制,从而在强降水的监测和评估中带来严重的影响。基于极值法的局限性,岳艳霞等(2009)根据翻斗式雨量计在测量地面降雨时出现误差的原因,利用均值与范围值对雨量计观测值进行检查,并在空间一致性检查过程中采用了时间一致性和内部一致性,来对雨量计数据进行质量控制。任芝花等(2010)利用降水的界限值及时空一致性对全国区域自动站和国家级自动站实时上传的逐小时降水资料进行了质量控制。基于极值法和时空一致性的检查方法相对于单纯的极值法是一

种进步,但如果雨量计比较稀疏或者相邻的几个雨量计都存在测量仪器故障或雨量计漏斗部分堵塞的情况,则显得有点无能为力。

目前,随着我国天气雷达网的建成,天气雷达以其高时空分辨率的优势已经成为监测降水的重要手段,雷达定量估测降水一直伴随着天气雷达的发展,国内外也已经在在此方面进行了大量的研究(林炳干等, 1997; 李建通等, 2005, 2009; Xu et al., 2008; Wang et al., 2012; Qi et al., 2013)。因此,本研究利用雷达定量估测的降水,对雷达—雨量计对之间的差异进行统计学的分析,确定雨量计质量控制的一些标准,从而实时地对雨量计进行质量控制。

本文结构如下:第二部分介绍了研究中用到的资料,第三部分介绍了雷达雨量计联合估测降水方法,雷达—雨量计对之间的残差统计特征在第四部分介绍,第五部分介绍了雨量计质量控制的标准及过程,性能评估及结论在第六和第七部分介绍。

2 资料

本研究的区域为江淮流域,考虑到雷达覆盖范围以及自动雨量站的布设情况,选择的矩形研究区域为(31°N~36°N, 115°E~120°E)。雷达资料由我国气象部门业务布点的新一代天气雷达提供,采用了郑州、合肥、蚌埠、南京、上海、杭州、徐州、连云港八部雷达站的基数据,雷达站位置如图1所示,这八部雷达均为S波段多普勒天气雷达,资料格式、探测模式等参数均采用标准的VCP21降水观测模式。体扫时间间隔为6分钟。

研究中采用的雷达数据是笛卡尔坐标下的混合扫描反射率因子拼图数据,该数据是由中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室开发的多普勒天气雷达三维数字组网系统及每个格点的高度信息生成,主要过程如下:在单站雷达资料质量控制(去除地物杂波、孤立回波点、电磁干扰等)的基础上,完成区域的多普勒天气雷达基数据组网,提供经、纬度及海拔高度网格的三维回波强度资料,数据的

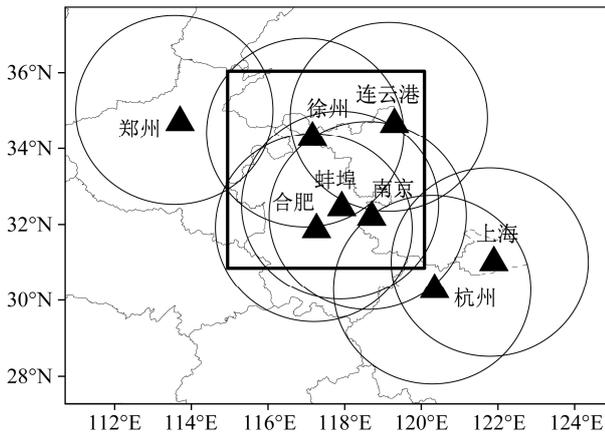


图1 研究区域(矩形区域)及多普勒雷达位置(三角形)

Fig.1 The study domain (marked with rectangle) and locations of Doppler radars (marked with triangle)

水平分辨率为 $0.01^\circ \times 0.01^\circ$, 垂直分辨率在低层为 0.5 km, 中层为 1 km, 高层为 2 km, 时间分辨率为 6 min (王红艳等, 2009)。基于这种三维回波强度资料, 再根据等射束高度拼图, 得到每个格点的高度信息, 生成混合扫描反射率因子拼图数据。混合扫描反射率因子拼图数据用于雷达定量估测降水。

雨量计数据为我国气象部门上传的逐时降水数据, 研究区域范围内的雨量计数据达到了 2000 多个, 平均空间间隔在 10 km 左右, 雨量计的灵敏度为 0.1 mm。

研究中选取了 2009 年 6~8 月的 6 次降水过程为基础来发展雨量计的质量控制算法, 采用 2 次降水过程进行算法的评估, 表 1 给出了这 8 次降水过程的发生时间、持续时间及降水面积的一些信息。

表 1 研究中的降水过程

Table 1 Precipitation events used in this study

序号	降水过程	开始时间 (UTC)	持续时 间/h	降水面积/ 10^4 km^2
1	2009 年 6 月 7~8 日	03:00	46	18
2	2009 年 7 月 5 日	05:00	12	6
3	2009 年 7 月 10~11 日	10:00	28	13
4	2009 年 8 月 26 日	05:00	9	3
5	2009 年 8 月 28 日	01:00	10	5
6	2009 年 9 月 24 日	00:00	23	11
7	2009 年 6 月 19 日	02:00	18	6
8	2009 年 8 月 16~17 日	00:00	40	10

3 雷达定量估测降水方法

由于雨量计是对降水的直接测量, 通常被认为

是降水的真值, 从上世纪 70 年代开始, 先后发展出许多不同的雷达—雨量计联合估测降水方法, 用来校准雷达估测降水 (Ahnert et al., 1986; Bhargava and Danard, 1994; Seo, 1998; Anagnostou and Krajewski, 1999; Ware, 2005; 李建通等, 2005, 2009; Wan et al., 2010)。本文采用两步校准法来改善雷达定量估测降水, 即先采用雷达反射率因子和地面雨量计观测数据实时拟合出反射率因子和雨强 ($Z-R$) 关系, 在时间域上对雷达—雨量计的平均偏差场进行校准, 然后再利用反距离插值校准法在空间上做第二次校准, 实现对雷达—雨量计观测误差的二次校准, 最大限度地减小雷达—雨量计之间的观测误差, 达到更好的校准效果, 下面简单地介绍两步校准法。

3.1 实时拟合 $Z-R$ 关系

$Z-R$ 关系的一般表达式可以表示为 $Z=AR^b$, 对两边取对数得

$$10\log Z=10\log A+b10\log R, \quad (1)$$

其中, Z 为雷达反射率因子, 单位为 $\text{mm}^6 \text{ m}^{-3}$; R 为雨强, 单位为 mm h^{-1} , 研究中 R 采用雨量计的小时累计降水量 R_G 。对雷达资料和雨量计资料经过简单的质量控制, 形成雷达—雨量计对。利用雷达—雨量计对, 实时拟合 $Z-R$ 关系的流程图如图 2 所示。通过最小二乘拟合得到 $Z-R$ 关系的 A, b 值。如果相关系数 (CC) 大于 0.7, 则输出 A, b 值, 否则, 将大于 2 倍标准差的雷达—雨量计对去除, 重新拟合 $Z-R$ 关系的 A, b 值。由于不同大小的雨滴下落速度不同, 以及数据上传会有些延时, 因此每小时拟合一次 $Z-R$ 关系。

3.2 反距离插值校准法

雷达通过 $Z-R$ 关系在雨量计位置估测的降水与雨量计观测的误差可以表示为

$$e_i=R_{Gi}-R_{Ri}, \quad (2)$$

其中, e_i 为在第 i 个雨量站的误差, R_{Ri} 为雷达在第 i 个雨量站的估测值, R_{Gi} 为第 i 个雨量站的雨量值。通过公式 (3) 将这些误差插值到每个雷达格点。

$$R_e = \frac{\sum_{i=1}^n e_i w_i}{\sum_{i=1}^n w_i}, \quad (3)$$

其中, R_e 为雷达格点插值得到的校准因子, e_i 为在第 i 个雨量站的误差, w_i 为第 i 个雨量站的权重, n 为匹配的雷达—雨量计对数目, 通过 R_e 对每个格点

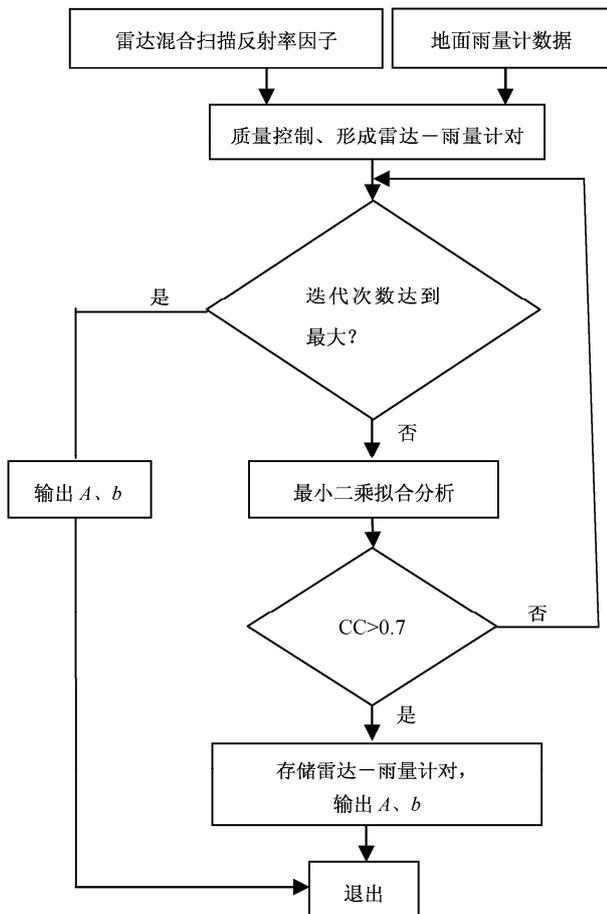


图2 雷达—雨量计对实时拟合 Z-R 关系流程图

Fig. 2 A flow chart of the real-time adjustments to Z-R relationships on radar-gauge pairs

的雷达估测降水值进行校准。反距离加权法被用来计算校准权重，公式如下：

$$w_i = \begin{cases} 1/d_i^k & d_i \leq D \\ 0 & d_i > D \end{cases}, \quad (4)$$

其中， w_i 为第 i 个雨量站的权重， d_i 为雷达格点到第 i 个雨量站的距离（单位为经纬度）， k 为指数。 d_i 和 k 可以通过交叉验证的方法得到（Ware, 2005）。

4 雷达—雨量计对的残差特性

为了定量描述雷达估测降水和雨量计之间的一致性和不一致性，研究中计算了雷达—雨量计对之间的残差 ζ ，计算公式如下：

$$\zeta = 10 \log(R_G / R_R) = 10 \log R_G - 10 \log R_R, \quad (5)$$

研究中以分贝（dB）来研究残差的分布特征， R_G 为雨量计的小时累计降水， R_R 为对应的采用两步

校准法得到的雷达定量估测降水。研究中同时考虑了雷达—雨量计的线性误差 D ，计算公式如下：

$$D = R_G - R_R. \quad (6)$$

为了使 ζ 能够反映所有可能的雨量计观测和雷达估测的降水，如果雷达—雨量计对中有一个降水为零，则增加一个小于雨量计灵敏度（0.1 mm）的偏移量（0.05 mm）。研究中计算了 2009 年 6~8 月 6 次降水过程的残差 ζ 和线性误差 D ，统计结果如图 3 所示。可以看到在线性误差分布图的尾部 41 mm 处出现了峰值，就雷达估测的小时降水量而言，雨量计出现了不合理的大值，这个峰值可以作为雨量计质量控制的标准之一。对于错误的零观测值或者不合理的较小的雨量计观测值，这种异常往往隐藏在偏差分布的中间峰值处，很难被检测出来。为了发掘这些隐藏的错误值，需要剔除那些估测误差较小的数据。因此，用雷达估测降水的方差 σ 对雷达—雨量计对之间的绝对误差进行标准化，标准化参数 δ 定义为

$$\delta = |R_G - R_R| / \sigma. \quad (7)$$

可以采用公式（7）来选择样本，当雷达估测的降水远远大于趋于零的雨量计观测时，如果方差 σ 比较小，那么 δ 则特别大。图 3c 和 d 为剔除掉 $\delta \leq 2$ 和 $\delta \leq 3$ 样本后的残差分布。从图 3c 可以看出，在残差分布的尾部两侧大约 +17 dB 和 -17 dB 处出现了峰值，这意味着雷达估测降水和雨量计观测之间存在一些不合理的值，在雨量计观测到较强降水的一些地方，雷达估测降水的值为零或者较小，而在雨量计观测降水为零的一些地方，雷达估测降水则较大。当进一步减少样本（ $\delta > 3$ ）时，残差分布尾部的峰值依然存在。

5 雨量计质量控制方法

基于以上的讨论和结果，提出了雨量计小时雨量的质量控制过程：

(i) 对于超过区域界限值的数据，则认为雨量计错误；

(ii) 空间的连续性检查

首先用两步校准法计算参考的雨量值，然后计算雷达—雨量计对之间的残差、线性误差和标准差，与设定的阈值（ D_c ， δ_c ， ξ_c ）进行对比；

(iii) 如果 $D \geq D_c$ ，则认为雨量计错误；

如果 $\delta \geq \delta_c$ ，并且 $\xi \geq \xi_c$ （ $\xi_c > 0$ ），则认为雨量计错误；

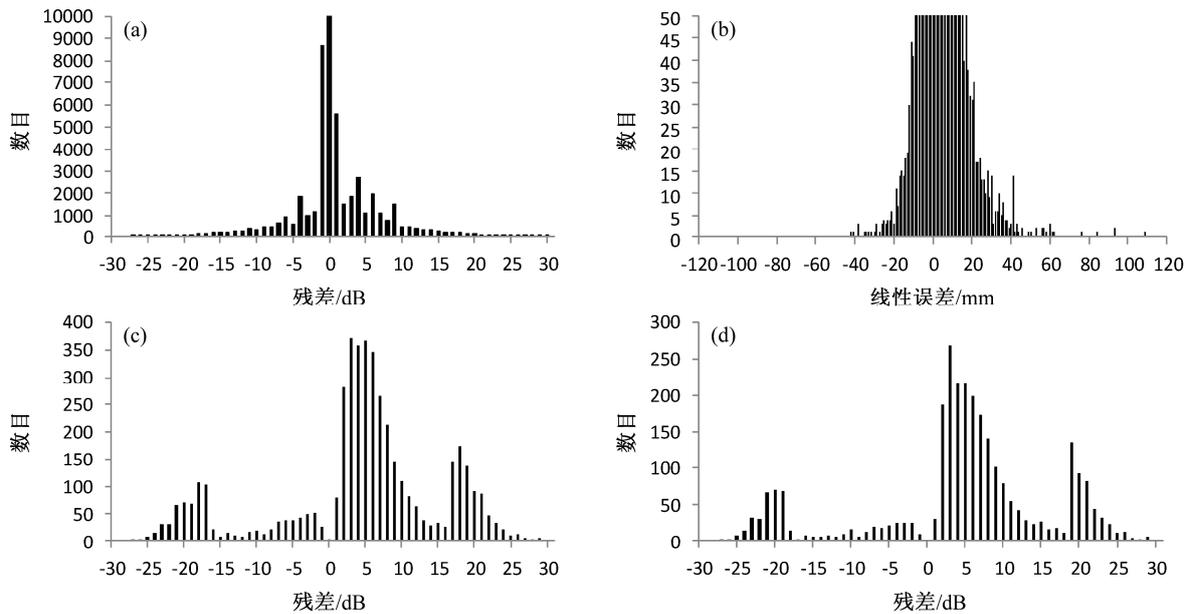


图3 雷达—雨量计的残差分布：(a) 所有样本的残差分布；(b) 所有样本的线性误差分布；(c) $\delta > 2$ 的样本的残差分布；(d) $\delta > 3$ 的样本的残差分布

Fig. 3 Distributions of $R_G - R_R$ residuals: (a) All data samples; (b) all data samples in linear scale (departures); (c) data samples with $\delta > 2$ only; (d) data samples with $\delta > 3$

如果 $\delta \geq \delta_c$ ，并且 $\xi \leq \xi_{c-}$ ($\xi_{c-} < 0$)，则认为雨量计错误。

根据上一节的统计结果，对于小时雨量来说， $D_c = 41 \text{ mm}$ ， $\delta_c = 2$ ， ξ_{c+} ， ξ_{c-} 分别代表残差分布尾部的正、负峰值， $\xi_{c+} = 17 \text{ dB}$ ， $\xi_{c-} = -17 \text{ dB}$ 。由于这些参数对于 δ 不太敏感，也可以采用高一点的数值 (Yeung et al., 2010)。先检查数据是否超过界限值是必要的，否则的话，一些不合常理的雨量计数据会影响雨量计对雷达估测降水的校准，从而影响雨量计质量控制的结果。界限值范围的上限参数设置是否合理直接决定了界限值检查的效果。设置太低，则个别极端大的正确数据可能会被作为错误数据处理，而这部分数据对于气象预警、极端天气研究非常关键；设置太高，则错误数据又可能被当作正确数据处理，这种大的错误数据在应用中起明显的误导作用。根据任芝花等 (2010) 提到气候学界界限值范围和区域界限值范围，将本研究区域的界限值设为 $0 \sim 140 \text{ mm h}^{-1}$ 。

6 性能评估

为了对两步校准法的性能进行简单地评估，研究中将所有的雨量计样本间隔地分成两个样本组，即序数为奇数的雨量计为校准组，序数为偶数的雨

量计为评估组。同时为了避免错误的雨量计数据在校准雷达估测降水时引起错误地订正，在采用反距离加权校准的过程中，对于地面雨量观测值与雷达估测降水的相对误差值大于 200% 的数据，作为不可信数据而没有参加校准 (李建通等, 2009)。图 4 给出了 2009 年 7 月 10 日 23:00 (UTC) 两步校准法和传统的 $Z=200R^{1.6}$ 估测的小时累计降水分布及与雨量计对比的散点图。从图 4 可以看出，采用传统的 $Z=200R^{1.6}$ 估测的降水在降水较强时存在严重的低估现象，偏差 (B_s) 为 0.69，相关系数 (CC) 为 0.80，均方根误差 (RMSE) 为 3.74，相对误差 (E) 为 43%。两步校准法改善了低估问题，区域降水量与雨量计观测相当，偏差 (B_s) 为 1.0，消除了系统性的平均偏差，离散度和相对误差也明显减小 (RMSE=3.37 mm, $E=31\%$)，改善了空间上的误差分布。

为了检验雨量计质量控制的效果，研究中首先采用 2009 年 6 月 19 日的降水过程来检验，主要的降水发生在 02:00~18:00 (UTC) 时间段，质量控制过程应用于 35740 个逐小时降水记录数据。29543 个降水数据为 0.0 mm，6197 个小时雨量记录大于等于 0.1 mm，在 29543 个降水为零的记录中，质量控制算法拒绝了 190 个降水记录 (0.6%)，通过眼

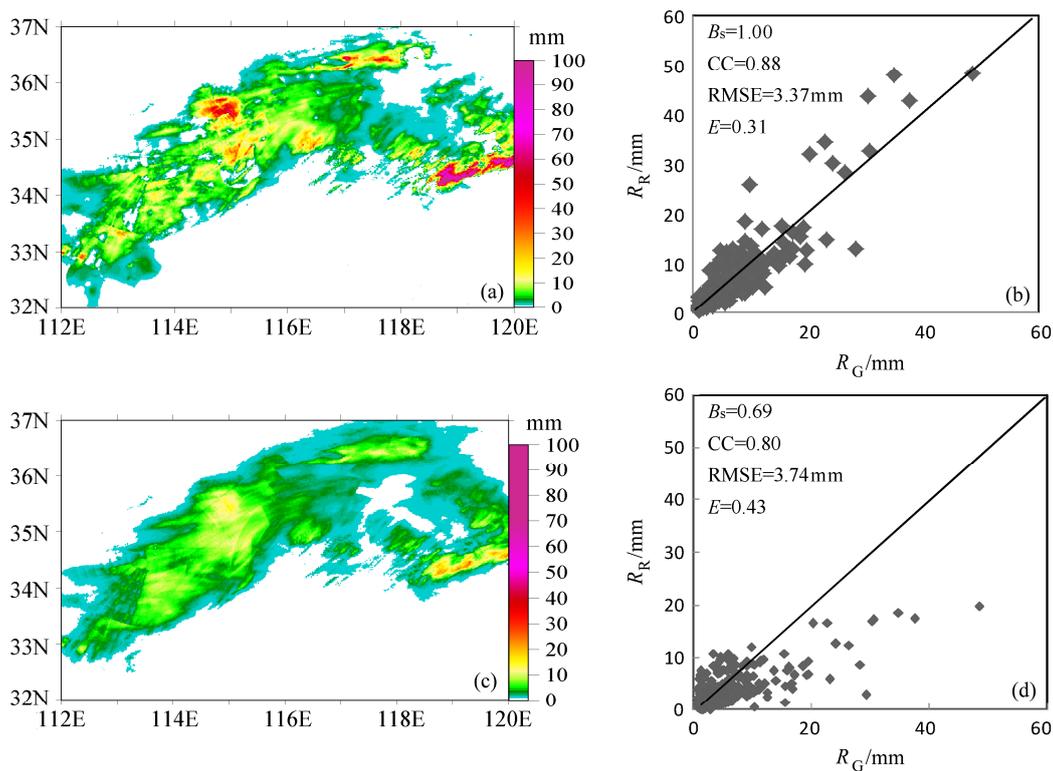


图4 2009年7月10日22:00~23:00(UTC)雷达定量估测降水分布及与雨量计对比。(a)和(b)为两步校准法估测降水分布及与雨量计的散点图;(c)和(d)为采用 $Z=200R^{1.6}$ 估测的降水分布及与雨量计的散点图

Fig. 4 1-h radar quantitative precipitation estimations (QPEs) between 2200 UTC and 2300 UTC 10 July 2009 were obtained using (a) the two-step correction scheme, (c) $Z=200R^{1.6}$. The scatter plots (b, d) show distributions of the 1-h QPEs vs. rain gauge observations

睛检查和时间、空间连续性检查,其中有9个雨量计应该保留下来,这些雨量计处于雨带边缘或者移过来雨带的前方。在6197个非零的降水记录中,质量控制算法拒绝了63个降水记录(1.0%),用眼睛检查和时间、空间连续性检查保留了17个雨量计,同样的,这些雨量计大多处于雨带边缘或者移过来雨带的后方。总的来说,拒绝率为0.7% (253/35740),在这些被拒绝的雨量计数据中,通过人工检查,10% (26/253)可能是被错误拒绝的数据。就整个数据集而言,0.1% (26/35740)的数据被怀疑是质量控制程序弄错了。图5给出了2009年6月19日08:00(UTC)、10:00(UTC)和15:00(UTC)三个时次经过质量控制后被拒绝的雨量计与雷达估测降水的叠加图,从图5a、b和c可以看出,在一些雷达估测降水较强的地方,自动雨量计的测量值为零或者几乎为零,排除位于雨带边缘可能被误判的雨量计之外,其余的雨量计有理由认为存在数据质量问题。另一方面,在一些站点,雨量计测量值相对于雷达估测降水明显偏大,例如图5b中有两个雨量计的小时累计降水量分别为34.5 mm

和35.8 mm,而雷达估测的小时累计降水却只有0.4 mm和0.2 mm,经过与其周围雨量计的数值进行空间连续性检查(图5d),可以认为这两个雨量计测量值明显偏大,应被剔除。

另外,研究中采用了2009年8月16~17日的降水过程来检验雨量计质量控制的效果,质量控制过程应用于44558个逐小时的降水记录数据。33950个降水数据为0.0 mm,10608个雨量记录大于等于0.1 mm,在33950个降水为零的记录中,质量控制算法拒绝了128个降水记录(0.4%),通过眼睛检查和时间、空间连续性检查,其中有11个雨量计应该保留下来。在10608个非零的降水记录中,质量控制算法拒绝了55个降水记录(0.5%),用眼睛检查和时间连续性检查保留了14个雨量计。总的来说,拒绝率为0.4% (183/44558),在这些被拒绝的雨量计数据中,通过人工检查,9% (25/283)是可能被错误拒绝的数据。就整个数据集而言,0.06% (25/44558)的数据被怀疑是质量控制程序弄错了。图6给出了2009年8月17日15:00(UTC)和17:00(UTC)两个时次经过质量控制后被拒绝的雨量计

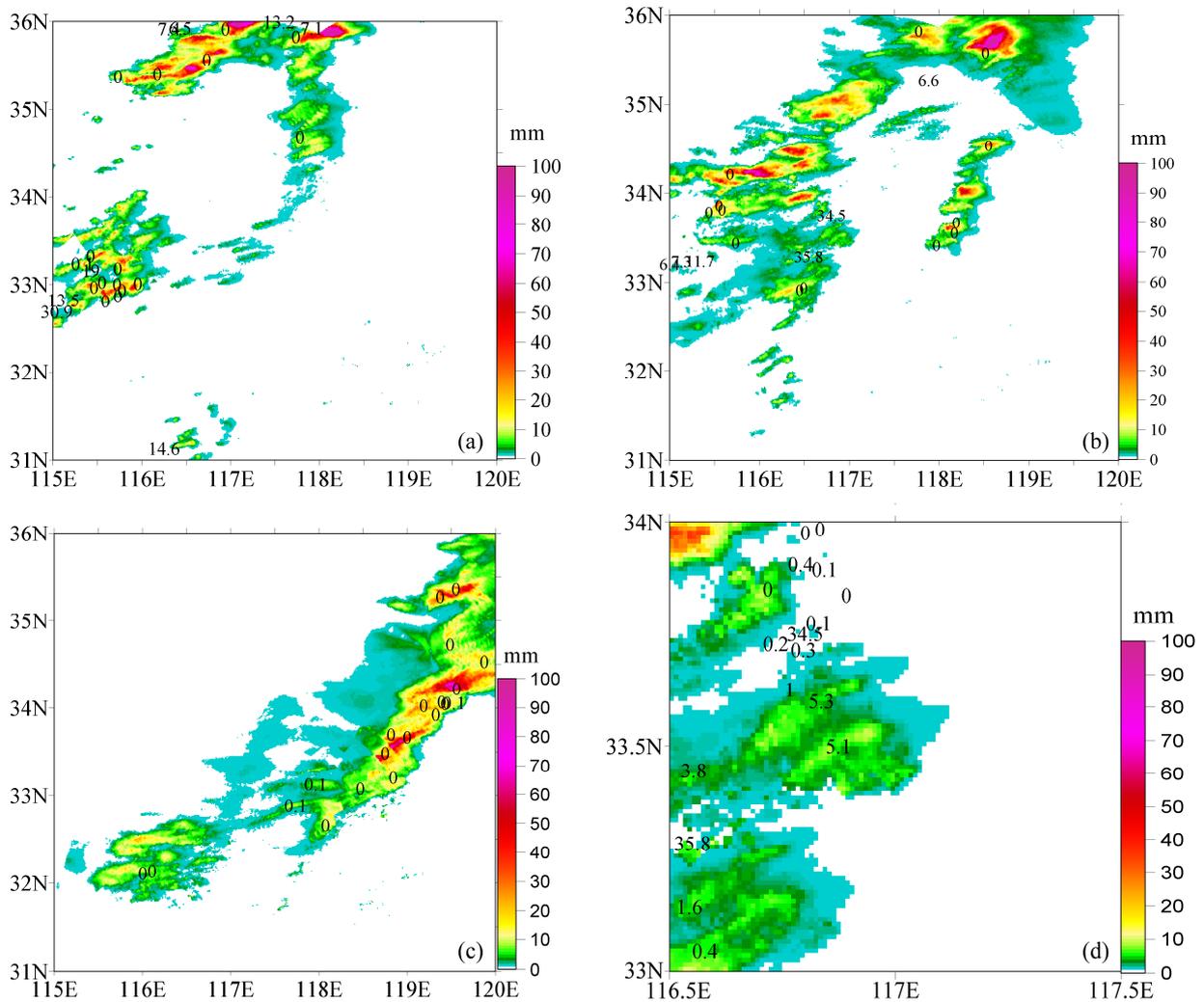


图5 2009年6月19日 (a) 08:00 (UTC)、(b) 10:00 (UTC)、(c) 15:00 (UTC) 经质量控制后被拒绝的雨量计与雷达估测降水量的叠加, (d) 为 (b) 中被拒绝的两个测值明显偏大的雨量计 (测值为 35.8 和 34.5 的雨量计) 及其周围雨量计与雷达估测降水量的叠加
 Fig. 5 1-h radar QPEs were overlapped the rejected rain gauge data on 19 June 2009 at (a) 0800 UTC, (b) 1000UTC and (c) 1500 UTC, the rejected two rain gauges with significantly larger measurements (rain gauges marked with 35.8 and 34.5 in pattern (b)) and their surrounding rain gauges overlapped 1-h radar QPEs (d)

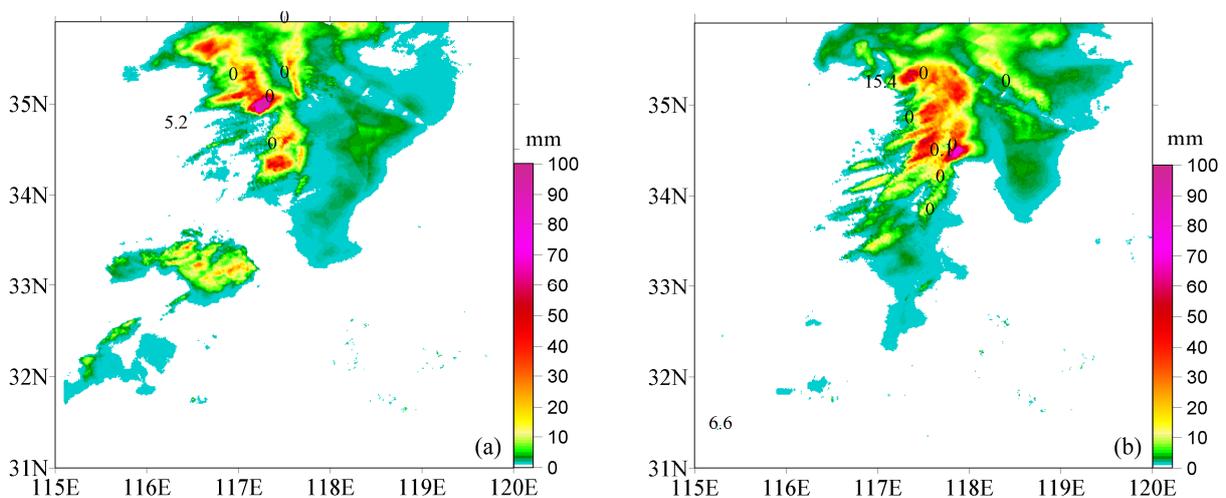


图6 2009年8月17日 (a) 15:00 (UTC)、(b) 17:00 (UTC) 经质量控制后被拒绝的雨量计与雷达估测降水量的叠加
 Fig. 6 1-h radar QPEs were overlapped the rejected rain gauge data on 17 August 2009 at (a) 1500 UTC and (b) 1700 UTC

与雷达估测降水的叠加图。

7 结论与讨论

本文利用雷达资料对雨量计进行实时质量控制, 主要包括两步: 第一步利用两步校准法改善雷达估测降水, 第二步是基于雷达估测降水而设计的雨量计实时质量控制算法。通过上述分析, 得到以下结论:

(1) 两步校准法改善了雷达估测降水的系统性误差, 同时减小了在雨量计站点上的相对误差。

(2) 利用雷达估测降水可以实时对雨量计数据进行质量控制, 通过眼睛检查及时间、空间连续性检查, 就整个数据集而言, 约 0.1% 的数据被怀疑为误判, 被错误拒绝的雨量计大多处于雨带的边缘。

(3) 在被拒绝的雨量计中, 观测数据为零的记录多于观测数据不为零的记录, 说明雨量计漏斗堵塞、机械故障、信号传输等是造成雨量计异常的主要原因。

利用雷达估测降水对雨量计进行实时质量控制, 可以提醒设备维护人员对雨量计进行及时检查及维护, 以提高雨量计逐时资料在流域面雨量计算、气候研究、气象服务等方面的应用水平。需要说明的是, 研究中的数据集还需要进一步扩展。另外, 采用雷达定量估测降水对雨量计数据进行实时质量控制也存在一定的局限性: 首先, 还不能确定位于降水边缘的雨量计, 因此对处于雨带边缘的雨量计有时会存在误判现象; 其次, 本研究选择的区域为江淮流域, 雷达覆盖比较好, 同时雷达资料经过了质量控制。如果在雷达波束被遮挡的山区或者不能被雷达覆盖的地区以及雷达数据质量存在问题的情况下, 将会导致对雨量计数据的误判。因此, 反过来, 也可以利用雨量计数据来发现雷达数据的质量问题, 从而完善雷达资料的质量控制。

参考文献 (References)

- Ahnert P R, Krajewski W F, Johnson E R. 1986. Kalman filter estimation of radar-rainfall field bias [C]// Preprints, 23rd Conf. of Radar Meteorology and the Conference on Cloud Physics, Boston, Mass, Amer. Meteor. Soc., 33-37.
- Anagnostou E N, Krajewski W F. 1999. Real-time radar rainfall estimation. Part II: Case study [J]. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 16 (2): 198-205.
- Bhargava M, Danard M. 1994. Application of optimum interpolation to the analysis of precipitation in complex terrain [J]. *J. Appl. Meteor.*, 33 (4): 508-518.
- Feng S, Hu Q, Qian W H. 2004. Quality control of daily meteorological data in China, 1951-2000: A new dataset [J]. *Int. J. Climatol.*, 24 (7): 853-870.
- Habib E, Krajewski W F, Kruger A. 2001. Sampling errors of Tipping-Bucket rain gauge measurements [J]. *J. Hydrol. Eng.*, 6 (2): 159-166.
- 李建通, 郭林, 杨洪平. 2005. 雷达—雨量计联合估测降水初值场形成方法探讨 [J]. *大气科学*, 29 (6): 1010-1020. Li Jiantong, Guo Lin, Yang Hongping. 2005. A study of the formation of initial radar field in estimating areal rainfall using radar and rain-gauge [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 29 (6): 1010-1020.
- 李建通, 高守亭, 郭林, 等. 2009. 基于分步校准的区域降水量估测方法研究 [J]. *大气科学*, 33 (3): 501-512. Li Jiantong, Gao Shouting, Guo Lin, et al. 2009. The two-step calibration technique of estimating areal rainfall [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 33 (3): 501-512.
- 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 [J]. *南京气象学院学报*, 20 (3): 334-340. Lin Binggan, Zhang Peichang, Gu Songshan. 1997. Improvement of weather radar-measured regional rainfall with comparison to other techniques [J]. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese)*, 20 (3): 334-340.
- Qi Y C, Zhang J, Zhang P F. 2013. A real-time automated convective and stratiform precipitation segregation algorithm in native radar coordinates [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 139 (677): 2233-2240.
- 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 [J]. *气象*, 36 (7): 123-132. Ren Zhihua, Zhao Ping, Zhang Qiang, et al. 2010. Quality control procedures for hourly precipitation data from automatic weather stations in China [J]. *Meteorological Monthly (in Chinese)*, 36 (7): 123-132.
- Sciuto G, Bonaccorso B, Cabelliere A, et al. 2009. Quality control of daily rainfall data with neural networks [J]. *J. Hydrol.*, 364 (1-2): 13-22.
- Seo D J. 1998. Real-time estimation of rainfall fields using rain gage data under fractional coverage conditions [J]. *J. Hydrol.*, 208 (1-2): 25-36.
- Wan Y F, Wu C H, Jin H X. 2010. Real-time synchronously integrated technique for radar and raingauge based on concept of quasisame rain volume sample [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 66 (2): 262-273.
- 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 [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 29 (3): 575-584.
- 王红艳, 刘黎平, 王改利, 等. 2009. 多普勒天气雷达三维数字组网系统开发及应用 [J]. *应用气象学报*, 20 (2): 214-224. Wang Hongyan, Liu Liping, Wang Gaili, et al. 2009. Development and application of the Doppler weather radar 3-D digital mosaic system [J]. *Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese)*, 20 (2): 214-224.
- Ware E C. 2005. Corrections to radar-estimated precipitation using observed rain gauge data [D]. M.S. thesis, Cornell University, 87pp.
- Xu X Y, Howard K, Zhang J. 2008. An automated radar technique for the identification of tropical precipitation [J]. *J. Hydrol.*, 9 (5): 885-902.

Yeung H Y, Man C, Seed A, et al. 2010. Development of a localized radar-raingauge Co-Kriging QPE scheme for potential use in quality control of real-time rainfall data. The 3rd WMO International Conference on Quantitative Precipitation Estimation, Quantitative Precipitation Forecasting and Hydrology, 18–22 October 2010, Nanjing, China.

岳艳霞, 陈静, 郭志斌. 2009. 区域自动站雨量资料质量控制方法及应用 [J]. 气象科技, 37 (4): 452–456. Yue Yanxia, Chen Jing, Guo Zhibin. 2009. Techniques and application of regional rainfall data quality control [J]. Meteorological Science and Technology (in Chinese), 37 (4): 452–457.