基于天气雷达的长江三峡区间降雨定量估测方法

李　哲[1]，杨大文[1]，洪　阳[2,3]，戚友存[4,5]，曹　庆[2,3]
（1. 清华大学水利水电工程系 水沙科学与水利水电工程国家重点实验室，北京　100084；
2. 俄克拉荷马大学土木工程与环境学院水文气象遥感实验室，美国　73072；
3. 俄克拉荷马大学高等雷达研究中心 美国 73072；4. 南京信息工程大学大气科学学院，南京　210044；
5. 美国国家大气和海洋局强风暴实验室，美国　73072）

摘　要：天气雷达能够提供高时空分辨率的降雨观测，但其观测误差来源较多，影响到降雨估测精度。本研究针对长江三峡区间开发了基于单部地面天气雷达的定量降雨估测方法，包括波束遮挡分析、地物杂波抑制、降雨类型自动识别及多种 Z-R 关系转换等关键环节，并结合地面雨量观测对雷达估测结果进行了检验。结果显示，雷达的降雨估测精度随探测距离增加呈现明显的衰减趋势，较好估测降雨的范围是 100 公里以内。通过比较不同算法的结果，发现波束遮挡是万县雷达估测误差的主要来源之一。地物杂波是另一类主要误差来源，导致 50 公里范围内雷达探测降雨的误报率较高。通过识别降雨类型，针对不同降雨类型采用不同 Z-R 转换关系，可以降低降雨估测的偏差。2010 年夏季降雨的观测结果表明，该算法对典型层状（对流）降雨会有低估（高估），总体上对逐时降雨量的估测略微偏低。

关键词：水文学；　天气雷达；　定量降雨估计；　精度评估；　误差来源
中图分类号：TV124　　**文献标识码：**A

Radar-based quantitative precipitation estimate in the Three Gorges region of Yangtze River

LI Zhe[1]，YANG Dawen[1]，HONG Yang[2,3]，QI Youcun[4,5]，CAO Qing[2,3]
（1. *Tsinghua University*, *Department of Hydraulic Engineering*, *State Key Laboratory of Hydro-science and Engineering*, *Beijing* 100084; 2. *Hydrometeorology and Remote Sensing Lab and Department of Civil Engineering and Environmental Science*, *University of Oklahoma*, *Norman*, *OK*, *USA*, 73072;
3. *Advanced Radar Research Center*, *National Weather Center* 4160 *Suite*, *Norman*, *OK*, *USA*, 73072;
4. *College of Atmospheric Sciences*, *Nanjing University of Information Science & Technology*, *Nanjing*, 210044;
5. *NOAA/ National Severe Storms Laboratory*, *Norman*, *OK*, *USA*, 73072）

Abstract： Weather radar can detect spatiotemporal variability of precipitation in high resolution, but it suffers several sources of error. In this study, over the Three Gorges region (TGR) in Yangtze River, we have developed a first version of single radar based quantitative precipitation estimation (QPE) algorithms including various critical procedures, such as beam blockage analysis, ground clutter filter, rain type identification, and multiple Z-R relations. Current radar based QPE shows obvious range dependent performance, which suggests it could only reliably retrieve rainfall within the range of 100 km. Further, comparison among three datasets processed with different algorithms reveals that beam blockage is one of major error sources; within the range of 50km, affected by ground clutters, false alarm is another typical error. Multiple Z-R relations have effectively reduced bias at various ranges. The overall performance indicates that radar QPE generally underestimates (overestimates) typical stratiform (convective) storm rainfall events, and as a whole, it tends to slightly underestimate hourly rainfall during the 2010 summer.

Key words： hydrometeorology; weather radar; quantitative precipitation estimate; evaluation; error sources

收稿日期：2013-12-24
基金项目：水沙科学与水利水电工程国家重点实验室开放课题（sklhse-2010-A-03）、灾害天气国家重点实验室开放课题。
作者简介：李哲(1986-)，男，博士生.
通信作者：杨大文(1966-)，男，教授．　E-mail: yangdw@tsinghua.edu.cn

0 研究背景

降雨信息是水文模拟和预报的关键输入，因此准确获得降雨的时空分布信息，是提高水文模拟和预测精度的重要途径[1]，这在强降雨诱发次生灾害（如洪水、泥石流、滑坡等）的预报中尤为重要[2]。降雨在不同时空尺度上均具有显著的变异性，这种时空异质性给降雨观测带来巨大挑战。长期以来，地面雨量站的观测数据一直是洪水预报的主要雨情信息来源。但是研究表明，受限于站网密度及站网布设格局，基于地面站网观测的插值结果并不能准确反映降雨空间分布及暴雨中心动态，因此，降雨输入是洪水预报的主要不确定性来源之一[3]。

天气雷达在水文气象研究中的重要作用日益凸显，雷达提供的高时空分辨率降雨信息较之于传统地面观测信息，具有极大的应用潜力[4, 5]。但是，天气雷达通过观测大气中云雨粒子的后向散射电子信号来估计地面的降雨量，受周围环境影响，雷达观测信息中包含多种来源的误差[6]，使得雷达降雨估计算法具有较大不确定性。因此，须要结合研究区域的具体情况，设计一套雷达观测的处理算法来降低不确定性，提高降雨估计精度。

山区复杂地形往往会增加降雨时空变异性，局部地形效应导致强化的地形雨出现。多数山区的地面雨量站网密度均不能达到世界气象组织建议的最低密度[7]，这给山区暴雨监测及洪水预报带来难题。天气雷达在很大程度上可以弥补地面雨量站网观测的不足，正确使用天气雷达观测结果可以有效提高区域水文预报的精度。在山区利用天气雷达定量估计降雨量时，须要特别考虑地形遮挡、地物杂波及降雨垂向结构变异性等典型误差来源，开发适合山区的雷达降雨估测算法[8, 9]。

重庆寸滩至湖北宜昌的长江三峡区间，位于大巴山南麓及鄂西北暴雨区内，是典型的复杂地形山区流域，虽然区间面积仅占宜昌控制流域面积的 5.6%，但区间暴雨形成的洪峰流量超过 10000m^3/s 的情况时有发生[10]。区间洪水对三峡水利枢纽的影响迅速而且直接，是进行三峡坝址洪水预报的重要边界条件。尽管在三峡区间已经布设了相对密集且具有自动遥测功能的雨情观测站网，但是时有不明来源的洪水出现。现有的地面雨量观测站网在地形十分复杂的三峡区间仍难以准确捕捉降雨的空间分布[11]，基于雨量站网短期洪水预报还存在较大不确定性[12]。

本研究利用长江三峡区间内万县 S 波段雷达在 2010 年汛期的观测资料，开发了基于单部天气雷达的三峡区间定量降雨估测方法，结合同期地面雨量站逐时观测数据，对雷达估测降雨结果进行了检验，讨论了不同误差来源对雷达定量估测降雨结果的影响。

1 研究区域与数据资料

三峡区间范围如图 1 所示，地面雨情信息来自于中国长江三峡集团公司在区间内布设的 78 个地面遥测雨量站，数据包含 2004-2010 年的逐时雨量，雨量站分布如图 1 所示。

采用的雷达观测数据来自于国家气象局布设于万县凤凰山的 S 波段多普勒天气雷达（位置见图 1）。雷达的降雨观测模式（VCP21）为：在 0.5 度至 19.5 度的 9 个观测仰角上，每 6 分钟完成半径 460 km 范围的降雨探测扫描。以万县雷达为中心的半径 230km 范围基本可覆盖整个三峡区间，因此本研究采用 230 km 范围内的观测数据。

万县雷达沿角度方向的空间分辨率为 1°，沿径向反射率因子（Z）的空间分辨率为 1km，而平均径向速度（V）及谱宽（S）的空间分辨率为 0.25km，主要参数见表 1。

2 基于雷达的降雨定量估测方法

复杂的地形环境可能在雷达观测中引入大量环境误差，因此在利用雷达反射率 Z（mm^6·m^{-3}）数据估测降雨之前，须要针对雷达数据进行一系列的校正处理，具体步骤如图 2 所示。以下结合三峡区间的具体问题，详细介绍关键步骤。

2.1 波束遮挡分析

波束遮挡是山区雷达定量降雨估测面临的重要问题，周围地形对雷达波束的遮挡程度决定了雷达观测信号的可靠程度。地形信息提取自美国地质调查局发布的 100m 数字高程数据，雷达波束的传播路径（正

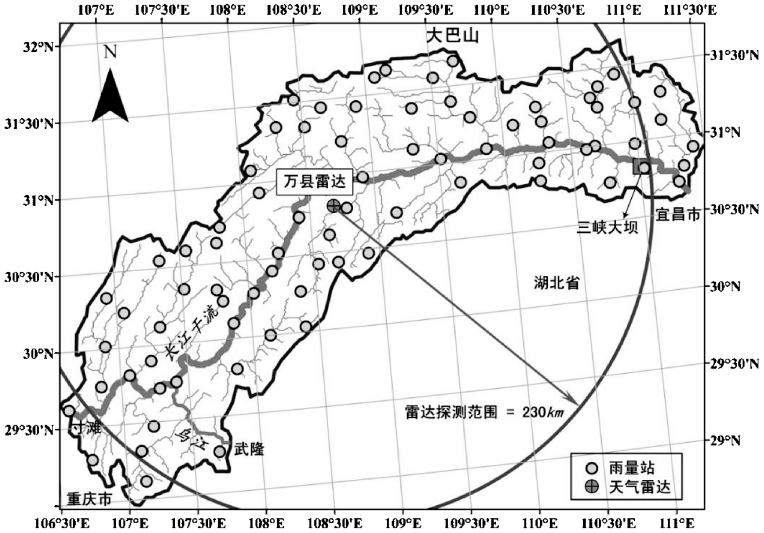

图 1　长江三峡区间内地面雨量站及万县天气雷达的分布示意图

Fig.1　Locations of ground rain gauges and WANXIAN radar in the Yangtze Three Gorges region (TGR)

常传播大气条件下）可以采用如下公式进行定量模拟[13]：

$$h=\sqrt{r^2+R'^2+2rR'\sin(e)}-R'+h_0 \tag{1}$$

式中：h（m）表示雷达波束中心海拔高度；R'为有效地球半径，近似为 8.5×10^6m；e 表示雷达观测仰角；h_0（m）表示雷达天线的海拔高度。

表 1　万县 S 波段天气雷达的基本参数

Table 1 Parameters of WANXIAN S-band radar

参数名称	参数值
所在位置的经纬度	108.68°*E*, 30.80°*N*
所在位置的海拔高度/米	1044
波长/厘米	10
雷达波束宽度/度	0.95
天线直径/米	8.5
观测仰角/度 (降雨模式 VCP21 包含 9 个仰角)	0.5, 1.5, 2.4, 3.4, 4.3, 6.0, 9.9, 14.6, 19.5

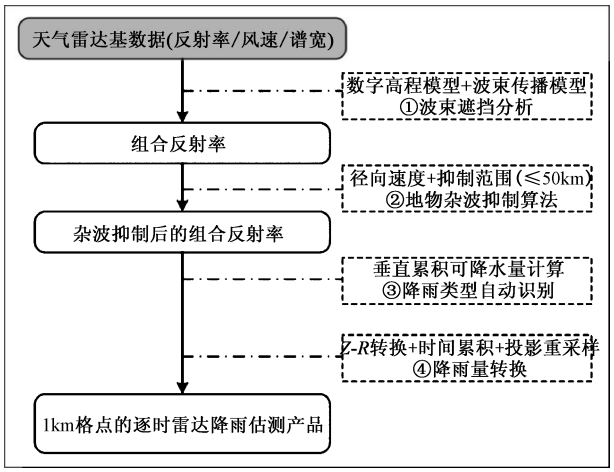

图 2　三峡区间雷达估测降雨系统的关键算法流程图

Fig.2　Flow chart of major algorithms contained in the radar rainfall estimates system of the Three Gorges region.

通过比较某地点的高程与雷达波束中心传播至当地的高度（假设波束内能量分布服从高斯分布），即可确定雷达波束被遮挡的程度。图 3（左）为采用 0.5°（最低）仰角观测时万县雷达的波束遮挡情况，其中白色区域表示完全无遮挡，浅灰色表示 50%被遮挡，深灰色表示 100%被遮挡。当观测仰角增加至 1.5°（第二）仰角时，整个观测范围内均无明显遮挡发生（图略）。根据尽量采用低仰角观测估计地面降雨，并保证不会发生波束遮挡的原则，确定组合反射率生成方案如图 3（右）所示：在无遮挡区域均采用最低仰角的反射率观测；对于存在遮挡区域，则采用第二仰角的反射率数据。

2.2　地物杂波抑制

地物杂波也是复杂地形条件下常见的误差来源之一，表现为高反射率因子会长期存在于某些固定位置，导致估测出现局部非真实的持续降雨，本研究中采用相对简单的利用径向速度信息的处理方法。

分析显示，万县雷达的地物杂波影响主要集中于雷达观测的 50km 范围内，因此将该范围内径向速度观测值接近零（±0.5 m/s）的地点的反射率因子观测值重新设定为空值。结果显示，该算法处理可以去除

36%的地物杂波。

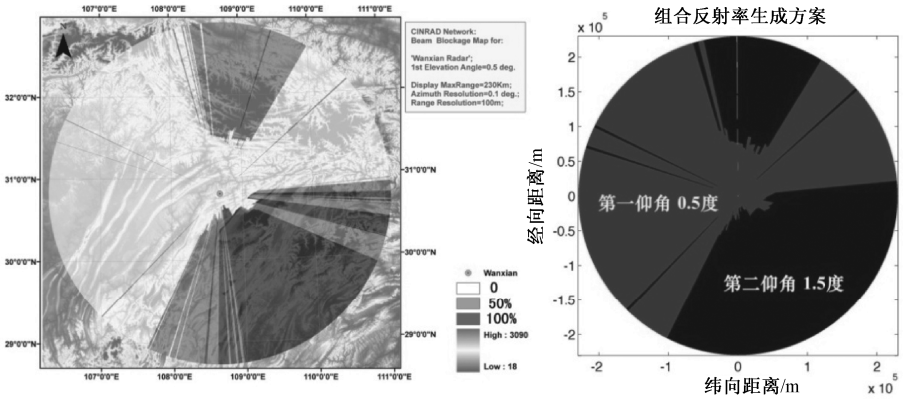

图 3 万县雷达的波束遮挡程度（左）及组合反射率生成方案（右）示意图

Fig.3 Maps of beam blockage level (left) and hybrid-scan strategy (right) for WANXIAN radar

2.3 降雨类型的自动识别

不同降雨类型中的雷达定量估测参数会表现出显著差异，同时不同降雨类型（如对流/层状降雨）的垂向结构也具有明显差别，因此须要根据雷达观测识别不同降雨类型。

本研究采用美国国家雷达拼图及下一代定量降雨估计系统的经验 [14, 15]，通过每个体扫的雷达反射率观测计算垂直累积可降水量（Vertical Integrated Liquid Water Content, *VIL*），以区分对流降雨和层状降雨：

$$VIL = \sum_k VIL_{par\,k} \tag{2}$$

$$VIL_{par} = LW \cdot DB \tag{3}$$

$$LW = 3.44 \cdot 10^3 Z^{4/7} \tag{4}$$

$$DB = \begin{cases} BH[\theta_{k_{top}} + 0.5BW] - BH[0.5(\theta_{k_{top}} + \theta_{k_{top}-1})] & k = k_{top} \\ BH[0.5(\theta_{k+1} + \theta_k)] - BH[0.5(\theta_k + \theta_{k-1})] & 1 < k < k_{top} \\ BH[0.5(\theta_2 + \theta_1)] & k = 1 \end{cases} \tag{5}$$

式中：*LW*（kg·km^{-3}）为根据反射率因子 *Z* 经验推求的液态水含量；*DB*（km）表示随雷达探测距离变化的雷达波束深度；*Z*（mm^6 ·m^{-3}）为雷达反射率因子；*BH*（km）表示标准大气折射情况下的雷达波束中心高度；*BW* 代表半功率波束宽度；θ_k 则表示第 *k* 个观测仰角对应的角度值。

通过上述计算，可以得到对应每个时刻雷达数据的 *VIL* 分布。然后将 *VIL* 大于 6.5 kg·m^{-2}（目前系统默认值）的像元自动识别为对流降雨，其他降雨区域则识别为层状降雨。图 4 为 2010 年 8 月 14 日 12 点 02 分（协调世界时）的降雨类型识别结果。

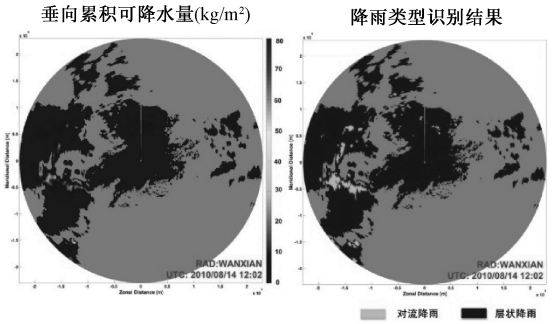

图 4 万县雷达在典型时刻的垂向累积可降水量（左）及降雨类型识别（右）结果

Fig.4 Vertical integrated liquid water content map (left) and rainfall type classification results (right) for WANXIAN radar

2.4 降雨量转换及时空重采样

降雨定量估测方法最终依据 *Z-R* 转换关系，经由反射率因子 *Z* 的观测值推导出降雨强度 *R*（mm·h^{-1}）：

$$Z = aR^b \tag{6}$$

式中，a 与 b 为经验性参数。通过区分对流降雨和层状降雨，分别采用不同的 Z-R 关系[16][17]：

$$\begin{cases} Z = 300R^{1.4} & \text{对流降雨} \\ Z = 200R^{1.6} & \text{层状降雨} \end{cases} \tag{7}$$

在转换降雨之前，对反射率数据采用上限阈值 55dBZ(对流降雨)和 40dBZ（层状降雨）进行控制，避免出现异常高的降水估测值。

对 2010 年夏季（6 月至 9 月）万县雷达的每个雷达观测数据均进行上述一系列处理，获得每 6 分钟的降雨定量估测结果。为降低观测随机误差，进一步对估测结果在时间上进行累积，获得逐时定量降雨估测结果。为适应水文分析及模拟的需求，最后将上述逐时估测结果（极坐标）重采样至 1km 空间分辨率的格点数据（笛卡尔坐标），从而与三峡区间分布式水文模拟计算网格[12]完全匹配。

3　精度评估与误差分析

以地面雨量站观测值为基准，分别以典型暴雨过程和整个夏季降雨过程为研究样本，对雷达的降雨估测精度进行了评价。由于雨量站的观测精度为 0.2mm，因此降雨探测阈值设定为 T=0.2（mm ·h^{-1}），即雷达估测（雨量站观测）大于该值时，认为该时刻探测到降雨。本研究采用的评估指标包括：

偏差
$$Bias = R / G \tag{8}$$

相关系数
$$Cor = \frac{\sum_{i=1}^{i=n}(G_i - \bar{G})(R_i - \bar{R})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{i=n}(G_i - \bar{G})^2 \sum_{i=1}^{i=n}(R_i - \bar{R})^2}} \tag{9}$$

命中率
$$POD = H / (H + M) \tag{10}$$

误报率
$$FAR = F / (H + F) \tag{11}$$

ETS 综合评分
$$ETS = (H - H_e) / (H + M + F - H_e) \tag{12}$$

式中：R 为雷达估测值；G 为雨量站观测值；$\bar{R}$ 和 $\bar{G}$ 分别为雷达估测和雨量站观测的平均值；H 表示雨量站探测到降雨同时雷达也探测到降雨的次数；M 表示雨量站探测到降雨但雷达没有探测到降雨的次数；F 表示雨量站没有探测到降雨而雷达探测到降雨的次数；H_e = $(H+M)\cdot(H+F)/N$，N 代表雷达（雨量站）观测的样本总数。

3.1　雷达估测精度分析

表 2 给出了雷达对 2010 年夏季 8 场典型暴雨过程的估测精度。结果显示，雷达既可能高估（6 月 18 日暴雨，平均偏差为 2.04）也可能低估（9 月 9 日暴雨，平均偏差为 0.63）暴雨累积降雨量；但相关系数大部分均高于 0.60，说明雷达估测累积降雨和地面观测具有较好的相关性。

表 2　2010 年夏季典型暴雨过程中雷达估测累积雨量的精度分析
Table 2　Evaluation statistics for accumulated rainfall amount during 2010 summer storms

日期/世界时	地面雨量站观测值			雷达估测的平均偏差*	相关系数*
	持续时间/小时	最大雨量*/mm	平均雨量*/mm		
6 月 18 日	11	48.2	10.2	2.04	0.70
7 月 3 日	13	45.4	16.8	1.18	0.35
7 月 8 日	10	85.4	25.2	0.85	0.61
7 月 17 日	9	98.2	14.3	0.94	0.87
8 月 1 日	15	65.8	11.6	1.31	0.42
8 月 14 日	21	131.2	58.7	0.72	0.68
9 月 5 日	13	66.2	26.7	0.71	0.80
9 月 9 日	21	114.6	33.1	0.63	0.87

注：* 表示最大（平均）降雨为雨量站在暴雨过程中的累积最大（平均）降雨量，偏差及相关系数也是比较雷达-雨量站累积雨量值得到。

如图 5 和图 6 所示，分别分析了在对流降雨（2010 年 7 月 3 日暴雨过程）和层状降雨（2010 年 9 月 9 日暴雨过程）中雷达对小时降雨量的估测精度。结果显示，雷达高估对流降雨，低估层状降雨；相对层状降雨而言，雷达对流降雨过程的观测结果离散程度更大。为了研究探测距离对降雨估测精度的影响，按雨量站距离雷达远近分为三类：0~50km、50~150km 和>150km。比较结果显示，雷达估测逐时降雨的精度随着探测距离增加而降低，尤其是当探测距离大于 150 km 时，降雨估测精度显著下降。

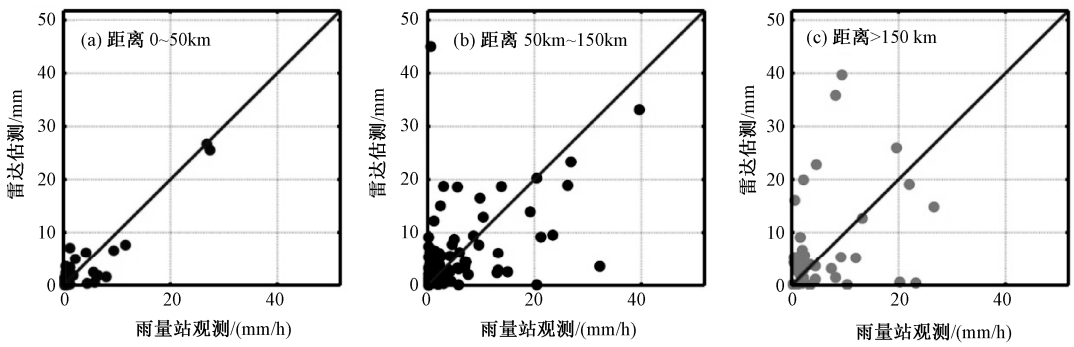

图 5　在 2010 年 7 月 3 日暴雨过程中雷达估测逐时降雨与该格网所在雨量站观测的雨量对比图
（a）雨量站距雷达 50km 以内；（b）雨量站与雷达的距离 50~150km；（c）雨量站与雷达的距离大于 150km
Fig.5　Comparison between the hourly radar estimates and gauge observations at different ranges for the event on 3 July, 2010

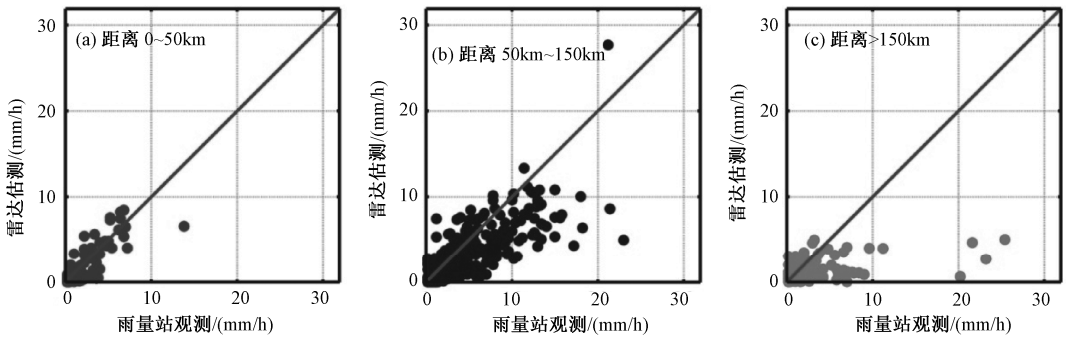

图 6　在 2010 年 9 月 9 日暴雨过程中雷达估测逐时降雨与该格网所在雨量站观测的雨量对比图
（a）雨量站距雷达 50km 以内；（b）雨量站与雷达的距离 50~150km；（c）雨量站与雷达的距离大于 150km
Fig.6　Comparison between the hourly radar estimates and gauge observations at different ranges for the event on 9 September, 2010

系统评估雷达在整个 2010 年夏季对逐小时降雨连续估测的精度，结果表明，雷达逐时估测降雨量略低于同期地面观测量， 68%的逐时降雨估测偏差在 0.43~2.30 之间，其余 32%则估测偏差更大。整个夏季逐时评估结果同样显示，雷达估测降雨的精度会随探测距离增加而下降。平均降雨命中率（*POD*）为 67%，而平均误报率（*FAR*）约 56%，未来还须要进一步改进算法提高逐时降雨的估测精度。

3.2　误差来源分析

为了区分雷达定量降雨估测中的不同误差来源及其影响，本研究依据不同算法得到三种逐时降雨估测结果：数据一（D1）：直接采用最低仰角（0.5°）反射率数据，采用单一 *Z-R* 关系 ($Z=200R^{1.6}$)，即完全不考虑地形遮挡、地物杂波抑制及降雨分类；数据二（D2）：考虑地形遮挡，采用组合反射率数据，但不考虑地物杂波抑制及降雨分类，采用单一 *Z-R* 关系($Z=200R^{1.6}$)；数据三（D3）：采用第 2 节介绍的完整处理算法和分类 *Z-R* 关系。

图 7 比较了三种雷达逐时降雨估测产品的精度评价指标在不同探测距离范围内的变化（其中估计偏差以分贝表示，记为 *DBias*，转换形式为 $DBias=10\cdot\lg[Bias]$），具体分析如下：

图 7（a）说明数据三的命中率最高，*POD* 值在 0.6 至 0.8 之间。考虑地形遮挡，可在 150km 范围内明显增加雷达探测的命中率，但是后续考虑地物杂波抑制、降雨类型识别等处理步骤并不能进一步提升该指标。总体而言，三种产品的 *POD* 随着探测距离增加呈逐渐下降趋势，表明雷达波束在远处被显著抬高而限制了其对地面降雨的探测能力。

由图 7（b）可见，数据一在 50km 范围内对降雨的误报率最高。考虑到地形遮挡，数据二的观测仰角

抬升后明显减弱了该范围内地物杂波影响，*FAR* 从 0.8 下降至 0.6 左右；数据三采用地物杂波抑制算法后，其 *FAR* 进一步降低至 0.5 左右，三种产品的 *FAR* 最低值均在 50~100 km 的观测范围内。由于三种产品均未考虑反射率剖面的垂向变异性，雷达波束在更远处的明显抬高会导致其观测无法有效代表地面降雨，因此误报率在 100km 范围以外都有所增加。

图 7(c)指出数据三能相对较好地捕捉 100km 范围的降雨，其 *ETS* 评分约为 0.4，本文的算法仅对 100km 范围内的降雨估测精度有明显提升。100km 以外由于波束抬升显著，反射率剖面的垂向变异性成为控制估测误差的关键因素。

图 7（d）显示，相对于数据一和数据二，数据三的估测偏差在不同探测距离范围内均有减小趋势，说明算法中的三个关键环节对减小降雨估测系统偏差都是有效的。

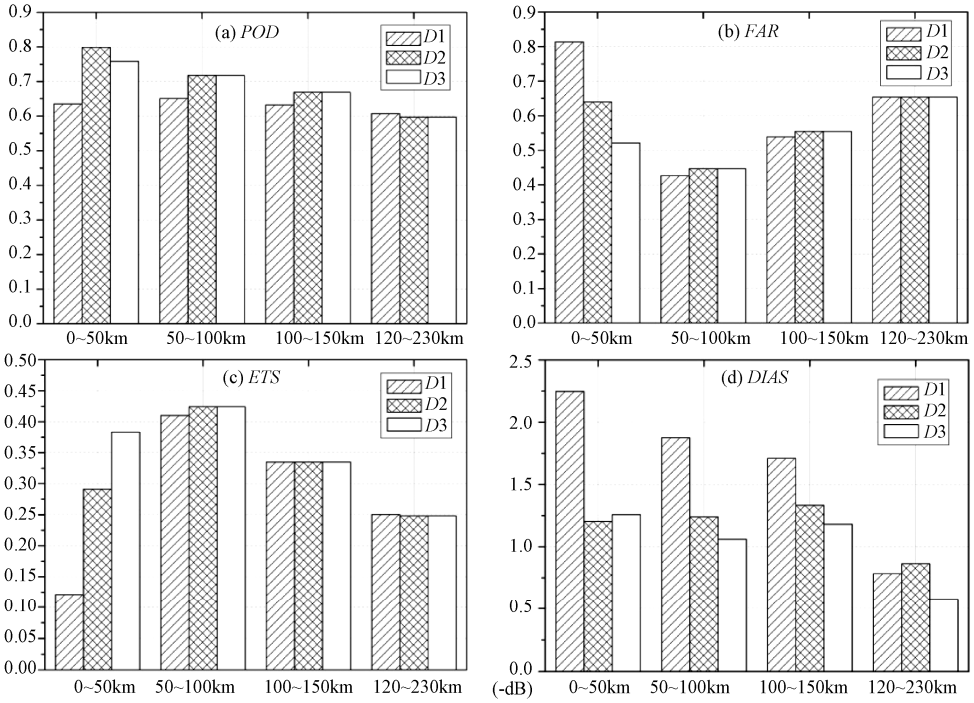

图 7　三种逐时雷达定量估测雨量在不同探测距离范围内的精度评价指标对比图

Fig.7　Comparison of evaluation scores at different range extents among three hourly radar rainfall estimates datasets

4　结论

本文利用万县天气雷达在 2010 年夏季的观测资料，初步开发了基于单部天气雷达的长江三峡区间降雨定量估测方法，包含了波束遮挡分析、地物杂波抑制、降雨类型自动识别及多种 Z-R 关系转化等关键步骤，可以生成空间分辨率为 1km 的逐时雷达降雨估测产品。

结合地面雨量站观测的评估结果显示，现有的雷达产品能够较好估测半径 100km 范围内的降雨量，累积降雨量的估计精度较好，但对逐时降雨的估测精度有待进一步提高。分析表明，波束遮挡、地物杂波是影响三峡区间雷达估测精度的重要因素，考虑降雨分类及不同 *Z-R* 关系可以有效降低雷达估测的系统偏差。

上述研究结果表明，基于雷达估测的降雨信息可以为三峡区间的暴雨监测及洪水预报提供服务。未来还须进一步提高雷达定量降雨估测精度，尤其是对远距离降雨的估测精度。此外降雨类型识别有助于捕捉小尺度降雨的变异性[14, 18]，进而可提高降雨估测精度，未来还须要考虑更加复杂的降雨类型识别及匹配局地适应的 *Z-R* 关系。

参考文献：

[1] Nijssen B, Lettenmaier D. P. Effect of precipitation sampling error on simulated hydrological fluxes and states: Anticipating the Global Precipitation Measurement satellites [J]. Journal of Geophysical Research, 2004, 109: D02103.

[2] Hong Y, Adler RF, Huffman GJ. Evaluation of the potential of NASA multi-satellite precipitation analysis in global landslide hazard assessment [J]. Geophysical Research Letters, 2006, 33: L22402.

（下转至第 54 页）