

多普勒天气雷达数据质量控制及流域降雨 定量估算应用研究^{*}

邹 强¹, 陈洋波²

(1. 西南科技大学环境与资源学院, 四川 绵阳 621010;

2. 中山大学水灾害研究中心, 广东 广州 510275)

摘 要: 为了充分发挥多普勒天气雷达在防洪减灾中的应用优势, 数据质量控制的研究有着深远的意义。针对多普勒雷达数据短缺、异常点、晴空回波等质量问题, 提出了数据短缺的插补延长方法、异常点回波处理方法和格网点基础回波处理法。并应用 GIS 方法实现了流域格网化和子流域划分, 对比分析了多普勒雷达估测降雨数据和雨量计自记雨量数据, 研究结果表明, 多普勒雷达和雨量计对降雨过程的监测能力相关性较好, 多普勒雷达更能展现流域降雨的时空分布。

关键词: 多普勒天气雷达; 数据质量控制; 流域格网; 定量估算

中图分类号: P415. 2; P49 **文献标识码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2009) 03-0122-07

Application of Doppler Weather Radar Data Quality Control and Quantitative Estimation for Basin Rainfall

ZOU Qiang¹, CHEN Yangbo²

(1. School of Environmental and Resource College, Southwest University of Science
and Technology, Mianyang 621010, Sichuan, China;

2. Natural Disaster Research Center, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China)

Abstract: The research on radar data quality control is significant for exerting the advantages of Doppler Weather Radar in preventing flood and mitigating disaster. On the basis of displaying and analyzing radar data, this study has found some data problems, such as data drop, abnormal echo, and fine day echo. In order to improve radar data quality, the study introduces interpolation method for data drop, smoothness method for abnormal point echo and a method called grid basis echo processing which could eliminate fine day echo through analyzing radar data. The study has also carried out basin gridding and sub-basin division. Additionally, radar precipitation estimation and rain-gauge precipitation have been compared. The results show that both radar and rain gauge have ability for surveiling precipitation, and radar precipitation estimation has a better representation for the spatial distribution of the precipitation over the whole basin.

Key words: Doppler weather radar; data quality control; basin grid; quantitative estimation

多普勒天气雷达是中小尺度灾害性天气的新型监测工具。在中小尺度系统直接作用下产生的暴雨, 具有历时时间短、强度大、局部性强等特点, 一旦出现常常在非常短的时间内造成严重的洪涝灾

害^[1]。面对这样的灾害性天气, 常规气象观测网由于条件限制如地面雨量站空间分辨率低, 容易在恶劣天气情况下受到干扰和破坏等, 常常不能准确及时地捕捉到这些天气信息, 更难进行预警和预

^{*} 收稿日期: 2008-07-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50479033); 北京大学为新研究基金资助项目(W08DB01)

作者简介: 邹强(1982年生), 男, 硕士, 助教; E-mail: zouqiang@swust.edu.cn

报。然而,多普勒天气雷达的高时间分辨率(探测周期为5~6 min)和高空间分辨率(可估测1 km²左右的降雨量,相当于1 km²左右有1个雨量站)则表现出相当的优势,从而提高短期和短时天气监测及预报的能力。

目前,国内外在数字化雷达的应用方面积累了大量经验,包括回波图像识别、Z-R关系研究、雷达拼图研究和联合地面观测的估测降水研究等^[2-7]。然而,在雷达资料的反演同化预报方面,工作相对很少,方法也较简单,且大部分研究成果尚未实现业务应用。本文通过广州多普勒雷达数据在流溪河流域的应用,提出了多普勒雷达数据质量控制方法和流域降雨定量探测方法,同时,通过比较分析雷达测雨与雨量计自记雨量结果,探讨了多普勒雷达在洪水预报预警中的作用。

1 多普勒雷达及流域信息

1.1 广州多普勒雷达

广州市多普勒雷达站位于番禺区南村镇大镇岗山上,属于CINRAD/SA型号的新一代多普勒天气雷达。该雷达站的站址海拔高度143 m,雷达架设高度37.3 m,雷达探测距离460 km,雷达中心所处的位置为东经113°21'18",北纬23°0'14",波束宽度0.99°。雷达完成一次扫描平均需要6 min。本次选用的是LEVEL II多普勒雷达降雨反射率因子,共有9个扫描仰角。

1.2 子流域划分

流溪河流域位于广州市北部,东临增江流域,西临北江流域,地跨北回归线,流域呈东北至西南向的狭长形,其上、中游多为山区和高丘区,间中有大片平坦地,下游多为低丘和平原区。流溪河流域现有32个地面雨量站,在流域上的分布如图1所示。从图中可以看出,雨量站在流域内的分布不均。

为了更好地分析流域降雨特征,根据流域数字地形因素(包括数字地形高程模型、流向、累积流、河流线及子流域边界等),本文利用ArcGIS 9.0中空间分析工具的水文工具包(Hydrology Tools)用以确定流溪河流域的范围,然后将流溪河流域划分成3个子流域(如图1)。分析流程如下^[8]:①加载研究区域的DEM数据(范围的确定一定要比真实的范围略大);②洼地填充;③无洼地的河流流向的计算;④汇流累积流计算;⑤设置汇流点;⑥子流域划分生成。

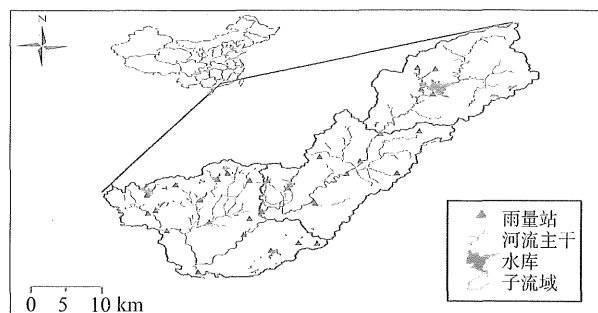


图1 流域雨量站与子流域分布图

Fig. 1 Rain gauges and Liuxihe River Sub-basin distribution

2 多普勒雷达数据质量控制

通过对雷达回波连续反演,本文对广州多普勒雷达降雨回波探测数据存在的质量问题进行了分析和归纳,发现其数据质量问题主要有:数据短缺、异常点和晴空回波。针对各类数据质量问题,本文提出了相应的处理方法。

2.1 数据短缺的插补延长方法

数据短缺的情况,可能是在雷达体扫过程中沿轴向整体短缺;也可能是单元点在一场暴雨过程中出现单独的一个或若干个单元数据丢失而其它体扫数据均正常的情况。

2.1.1 数据短缺点的检测。首先进行数据短缺点的检测,包括单点短缺和径向短缺。根据观察,径向短缺是主要的。对径向短缺数据的检测方法是沿轴向方向进行,检测过程如下:当检测到同一径向方向短缺数据点(即其值为255)等于460个时,则表明该径向方向的所有数据点均丢失。

对单点短缺数据检测主要通过判别其值是否为255,若一个点其值为255,则检查其相邻八个点的值是否也为255,若均不是,则该点为数据短缺点。

2.1.2 数据短缺处理。可采用径向短缺数据插补方法和单点短缺数据插补方法处理数据短缺。后者本文通过对其周围有效点的回波值求平均的方法进行插补;前者则采用空间插补延长法和时间插补延长法。

空间插补延长法即采用同时间的其它有效点的数据进行插补。具体方法是沿数据丢失点的同一径向在数据丢失点的左右方向进行检测,直到检测到两个方向上均有有效数据时,采用线性插值的方法计算数据丢失点的值。

时间插补延长法即采用同一单元在不同时间的有效点测值进行数据的插补延长,方法是查找数据

丢失点在前后2个测量时刻的有效测值,采用线性插值方法进行插补,计算公式为:

$$y_{i+1} = 2y_i - y_{i-1} \quad (1)$$

其中, y_{i+1} , y_i 及 y_{i-1} 分别为数据丢失点插补后的值,数据丢失前一时段和前二时段同一单元的雷达测值。

相邻时间的回波不一定相关,故本文以空间插补延长法进行插补延长计算。由于采用两个径向的雷达回波值对空缺径向进行插值,当 N 到 M 个径

向都丢失的时候,采用 $N-1$ 和 $M+1$ 两根径向来插值中间的 $M-N+1$ 个径向,可以看出如果间隔太大,插值就缺乏可靠性,本文通过分析发现,空缺径向一般在 $1^\circ \sim 4^\circ$,因此,本文设定空缺大于5个径向的时候就不进行插值。

图2为2005年6月21日1时53分通过空间插补延长法进行插补延长后的一幅降雨回波对比图。

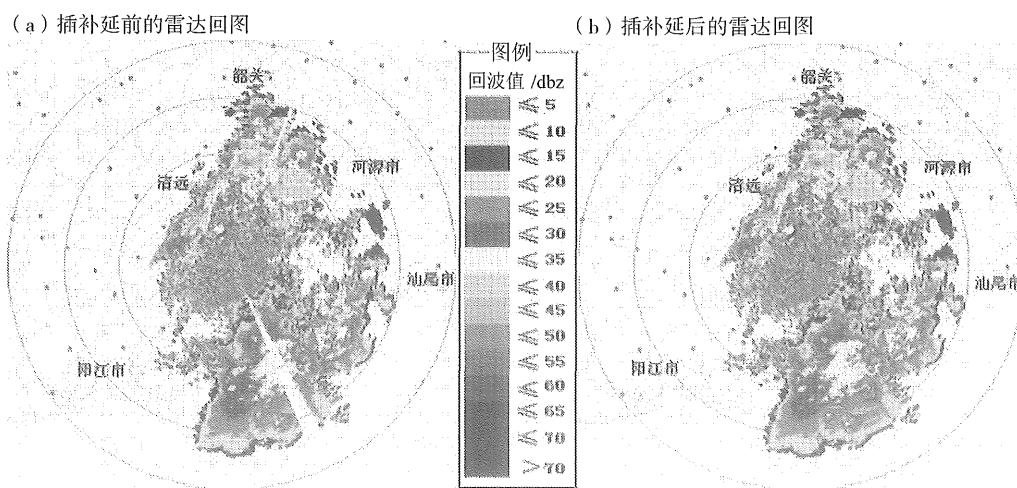


图2 空间插补延长结果对比图

Fig. 2 Missing data interpolation

2.2 异常点回波处理

采用 3×3 模板对多普勒实测数据进行强回波分析,发现一些点回波值突变现象严重,与周围8个回波值相差过大。此外,一些时段出现某一个或几个非正常体扫波束。为了数据质量控制的方便,本文将这些不合理的测值归纳到一起,统称为异常点或孤立点。异常点的一个明显特点是较孤立,即以一个点或若干点出现,很少以一大片点出现,在雷达回波图上很难用肉眼观察到。

2.2.1 有效回波阈值的确定。根据标准的 $Z-R$ 关系 ($Z = aR^b$) 反推,为分析降雨率随回波强度的变化情况,得出标准 $Z-R$ 模型 ($a = 300$, $b = 1.4$) 下不同回波强度与降雨率的变化关系 (表1)。由表1可知,当回波值等于 53 dbz 时,降雨率为 103.83 mm/h,而当回波值等于 54 dbz 时,降雨率为 122.40 mm/h。对 2005-2006 年发生在流溪河流域的各场大洪水相应的暴雨过程的分析,发现流溪河流域各测站的最大降雨率为 100 mm/h 左右,为留有一定裕度,本文将 54 dbz 定义为广州市多普勒雷达在流溪河流域的有效降雨回波阈值。

2.2.2 异常点的检测。

异常点检测分2步进行:首先检查每一个网格内的有效回波,判断其值是否大于有效降雨回波阈值,若大于,则该点为异常点;其次,检查每一个网格内的有效回波,如果回波值大于 46 dbz,且比周围8个相邻点的有效回波值中最大值大 6 dbz,则该点为异常点。

2.2.3 异常点的处理方法。对于异常点回波,本文采用二维中值滤波法处理^[9],具体操作步骤如下:以 3×3 模板延每一雷达扫描径向漫游;读取模板范围内每一雷达坐标点的雷达回波值;判断模板中心点的回波值是否超过有效回波阈值;如果超过,则采用在二维下的中值滤波算法进行处理;如果大于 46 dbz,并且比周围8点任一有效回波值都大于 6 dbz,则采用在二维下的中值滤波算法进行处理;循环前面步骤,直至雷达扫描范围内的雷达回波处理完毕。对于异常波束,从其回波显示看,与周围回波联系性很差,本文视其为径向缺失回波,用前述的空间插补方法进行处理。

表 1 回波强度与降雨率的变化关系

Table 1 Radar reflectivity and precipitation rate relation

回波率/dbz	10	20	30	35	40	41	42	43	44	45	46	47
降雨强度/(mm · h ⁻¹)	0.09	0.46	2.36	5.38	12.24	14.43	17.01	20.05	23.63	27.86	32.84	38.71
回波率/dbz	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	60
降雨强度/(mm · h ⁻¹)	45.62	53.78	63.4	74.73	88.09	103.8	122.4	144.3	170.1	200.5	236.3	328.4

2.3 晴空回波剔除

雷达在大气中的无云区，或在由不可能被探测到的很小粒子所组成的云区内探测到的回波称为晴空回波^[10]。通过数据反演发现，在无雨的情况下，雷达中心点约 150 km 的范围内，也有一定强度的

回波。雷达回波测值很少有为零的情况出现，当地面雨量站测量的降雨量为零时，雷达一般都观测到一定的回波值，这种情况在流溪河流域的 32 个雨量站处都相当明显。图 3 绘出了两个不同时间第一层数据的晴空回波图。

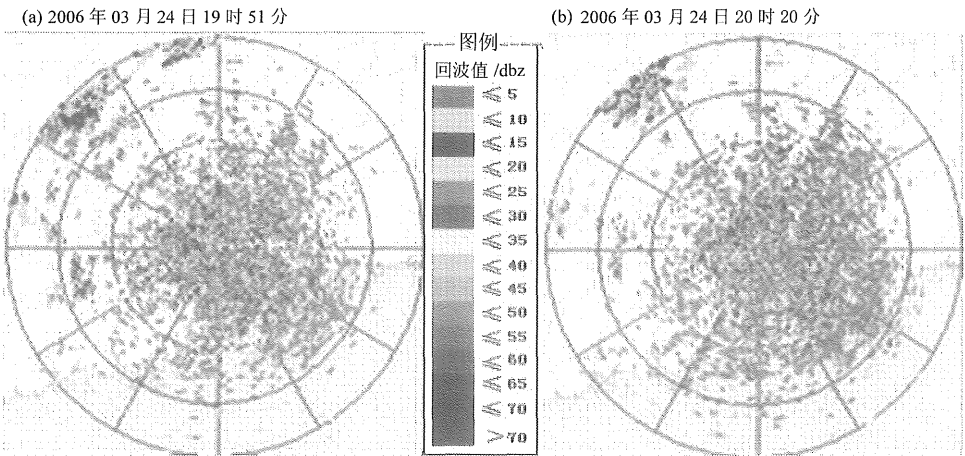


图 3 晴空回波（仰角 0.5°）

Fig. 3 Fine day reflectivity (Elevation angle is 0.5°)

为了减少晴空回波对流域降雨定量估测的影响，本文提出格网点基础回波处理法，首先确定基础回波，再进行晴空回波剔除。

2.3.1 格网点基础回波的确定。通过分析雷达回波与地面雨量站降雨量的关系来确定基础回波的大小，并且流域每个格网点确定一个不同的基础回波值。具体步骤：① 分析提取无降雨情况下流域雷达资料；② 计算流域格网点的基础回波 $Y_0 = \frac{\sum_{i=1}^n Y_i}{n}$ ($n \leq N$)，式中： Y_0 表示格网点基础回波， Y_i 表示格网点分钟回波， n 表示有效雷达资料个数， N 表示所有资料个数。

2.3.2 晴空回波剔除。对每一个网格内的回波，检测其数值，若其数值小于基础回波值，则该点为非降雨，即降雨量以零计，并将该点的有效回波值记为 0；若大于有效回波阈值，再使之与上一层雷达回波比较，如果变化超过 75%，则视为奇异点，

令该点的回波强度为 0。

3 普勒雷达降雨定量估算方法

为了将多普勒雷达测量的降雨回波与地面单元的降雨关联起来，必须建立雷达空间与地面测雨单元的对应关系。应用 ArcGIS 9.0 的空间数据转换功能，利用子流域图层数据实现流域格网化，为与雷达数据坐标对应，流域格网分辨率为 1 km × 1 km。

多普勒雷达各单元空间单元以极坐标 $\rho(\alpha, \gamma)$ 进行定位，地面雨量单元的空间坐标以经纬坐标来表示，即以 (X_k, Y_k) 表示雨量单元中心点的经纬坐标。根据雷达探测原理，地面雨量单元的经纬坐标与多普勒雷达各单元的极坐标间存在如下关系^[11]。

$$\cos Z_k = \sin Y_0 \sin Y_k + \cos Y_0 \cos Y_k \cos (X_0 - X_k)$$
$$\sin \alpha_k = \frac{\cos Y_0 \sin (X_0 - X_k)}{\sqrt{1 - \cos^2 Z_k}}$$

$$r_k = Z_k R \quad (2)$$

其中, R 为地球半径, Z_k 为各地面雨量单元(地面雨量站)到雷达中心点的弧线距离所对应的弧度。

根据上述公式,可计算出各地面雨量单元与多普勒雷达空间单元的对应关系,即每个地面雨量单元(X_k, Y_k)与唯一的一个多普勒雷达空间单元(α_k, γ_k)相对应。

利用多普勒雷达估算流域降雨量,主要是根据雷达所测量的降雨回波率,通过 $Z-R$ 关系^[10],估算流域降雨量。应用 $Z-R$ 关系反推 R ,可用如下的算式:

$$R = \exp(\ln(Z/a)/b) \quad (3)$$

确定了 $Z-R$ 关系参数并建立了雷达测雨单元与地面雨量单元的空间定位关系后,即可应用实测的降雨回波率(dbz)来估算降雨。

4 流域降雨定量估算案例分析

4.1 多普勒雷达流域降雨定量估算

根据上述的雷达数据质量控制方法和降雨估算方法,采用现行的 $Z-R$ 关系参数,即 $a=300$, $b=1.4$,对流溪河流域进行降雨估算,得出流域各单元的降雨量。图 4 绘出了全流域各单元部分时段的估算降雨。

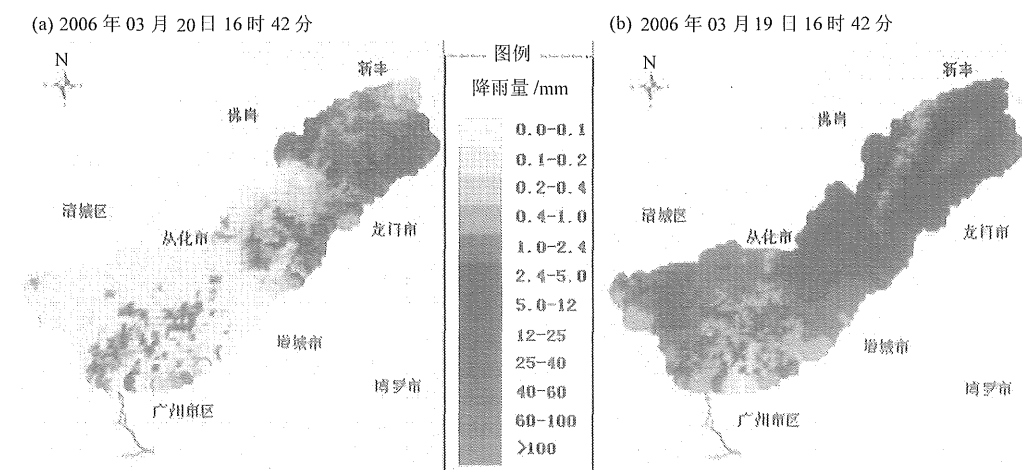


图 4 流溪河流域各单元的若干时段的雷达估算降雨

Fig. 4 Part results of the estimated precipitation for Liuxihe River Basin

4.2 结果对比分析

为分析雷达测雨的精度,本文将雨量计自记-雷达估测雨量结果进行对比分析。雨量计自记-雷达估测雨量对比是对利用雨量计和雷达的测雨量计算得到的流域和各子流域的面雨量进行对比。其具体计算过程是将一场洪水过程中全流域和各子流域的降雨量进行累加,得到一场洪水期间的总降雨量,再将两者进行对比,得到次洪累积偏差,本文称此法为次洪累积降雨对比,其计算公式为

$$D_i = (Pr_i - Pg_i)/Pg_i \quad (4)$$

其中, Pr_i , Pg_i 分别代表 i 子流域上一场洪水期间雷达和雨量计计算的平均流域累积降雨量, D_i 代表雷达-雨量计降雨量偏差, Pr_i 和 Pg_i 为

$$Pr_i = \sum_{t=1}^T \frac{1}{n1} \sum_{j=1}^{n1} Pr'_{j,i}, P_g_i = \sum_{t=1}^T \frac{1}{n2} \sum_{j=1}^{n2} P_g'_{j,i} \quad (5)$$

其中, $Pr'_{j,i}$ 代表 i 子流域上一场洪水期间第 t 小时雷达估算的第 j 个单元上的降雨量、 $n1$ 为 i 子流域上

单元总个数, $Pg'_{j,i}$ 代表 i 子流域上一场洪水期间第 t 小时第 j 个雨量站的降雨量, $n2$ 为 i 子流域上雨量站总个数。

对 2005 和 2006 年洪水期间 11 场降雨的起止时间分别为: No. 1 为 2005 年 4 月 23-27 日(简化 20050423-27, 其他同), No. 2 为 20050505-09, No. 3 为 20050602-04, No. 4 为 20050613-24, No. 5 为 20060323-26, No. 6 为 20060502-03, No. 7 为 20060527-29, No. 8 为 20060531-0602, No. 9 为 20060608-09, No. 10 为 20060715-17, No. 11 为 20060726-27。计算出各场降雨过程中雷达及雨量计在全流域及各流域的累积降雨,并绘出了雷达和雨量计估算的各子流域累积降雨对比图(如图 5)。对比以上结果,可以得出:①从定性分析,多普勒雷达和雨量计对灾害性天气的监测能力相关性较好。雨量计在正常情况下能测到的降雨过程,多普勒雷达一般都能监测到。②从定量分

析,雨量计与雷达测到的累积过程降雨量有一定的偏差,但偏差不稳定,多普勒雷达更能展现其时空分布。

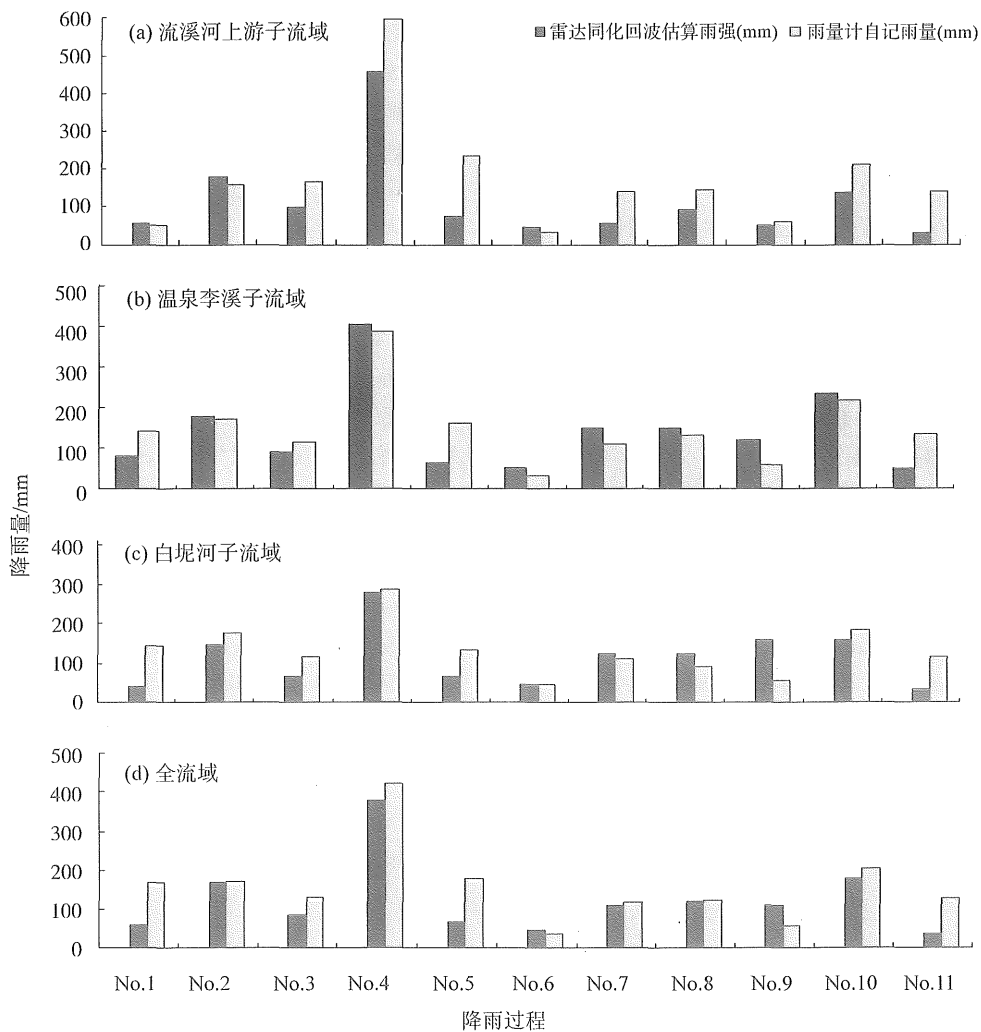


图5 次洪雷达-雨量计估算流域累积降雨对比图

Fig.5 Results comparison for the whole basin and the three sub-basins

5 结论

通过对多普勒雷达数据质量控制方法、流域降雨定量探测方法、雷达测雨与雨量计自记雨量结果的分析探讨,本文得出以下几点结论:

(1) 利用广州市多普勒天气雷达,可以对流溪河流域的雷暴天气过程进行监视;

(2) 广州市多普勒天气雷达测雨回波数据存在质量问题,主要包括数据短缺、异常点和晴空回波;本文提出的对数据短缺、异常点及晴空回波3个方面的数据质量进行控制的方法是可行的、合理的;

(3) 本文实现了流溪河流域的格网化和子流

域划分,并提出了应用广州市多普勒雷达测雨回波数据进行流溪河流域及子流域降雨估算的方法;

(4) 多普勒雷达提供高时空分辨率的降雨与雨量计提供的点降雨是有差别的,对于中小尺度灾害性天气的降雨,多普勒雷达更能展现其时空分布。

参考文献:

- [1] 寿绍文等. 中尺度气象学[M]. 北京:气象出版社, 2003: 120-140.
- [2] WALDTEUFEL P, CORBIN H. On the analysis of single-Doppler radar data[J]. Appl Meteor, 1979, 18: 532-542.
- [3] WU B, VERLINDE J, SUN J. Dynamical and micro-

- physical retrievals from Doppler radar observations of a deep convective cloud[J]. *Atmos Sci*, 2000, 57: 262 – 283.
- [4] SMITH J E, SEO D J, BAECK M L, et al. An intercomparison study of NEXRAD precipitation estimates [J]. *Water Resources Research*, 1996, 32(7): 2035 – 2045.
- [5] BYERS H R. The use of radar in determining the amount of rain falling over a small area[J]. *Trans Amr Geophys*, 1948, 29: 187 – 196.
- [6] 许小永, 刘黎平, 郑国光. 集合卡尔曼滤波同化多普勒雷达资料的数值试验[J]. *大气科学*, 2006, 30(4): 712 – 728.
- XU X Y, LIU L P, ZHENG G G. Numerical experiment of assimilation of doppler radar data with an ensemble kalman filter[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2006, 30(4): 712 – 728.
- [7] 孟昭林, 王红艳. 提高新一代多普勒天气雷达产品数据质量的途径与方法[J]. *气象科技*, 2006, 34(s1): 85 – 89.
- MENG Z L, WANG H Y. Methods for improving data quality for wsr-98d weather radar[J]. *Meteorological Science and Technology*, 2006, 34(s1): 85 – 89.
- [8] 刘登伟, 封志明, 杨艳昭. 海河流域降水空间插值方法的选取[J]. *地球信息科学*, 2006, 8(4): 75 – 79.
- LIU D W, FENG Z M, YANG Y Z. Selection of the Spatial Interpolation Methods for Precipitation in the Haihe River Basin[J]. *Geo-Information Science*, 2006, 8(4): 75 – 79.
- [9] 罗宁, 方向忠, 张文军. 一种带运动检测的去隔行中值滤波算法[J]. *计算机工程与应用研究*, 2004, 40(32): 62 – 72.
- LUO N, FANG X Z, ZHANG W J. A median filtering algorithm with motion detection for deinterlacing[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2004, 40(32): 62 – 72.
- [10] 张培昌, 杜秉玉, 戴铁丕编著. 雷达气象学[M]. 北京: 气象出版社. 2001: 30 – 33, 177 – 187.
- [11] 龙利民, 王建国, 汪应琼, 等. 多普勒天气雷达一小时累积降水产品估测能力检验[J]. *湖北气象*, 2004, 23(01): 19 – 20.
- LONG L M, WANG J G, WANG Y Q et al. A check on estimate of one-hour precipitation accumulation (OHP) from CINRAD/SA Weather Radar[J]. *Journal of Hubei Meteorology*, 2004, 23(1): 19 – 20.