

邵月红, 张万昌, 刘永和, 等. 2009. 沂沭河流域不同多普勒雷达降水量估算方法的效果评估 [J]. 大气科学, 33 (5): 971-980. Shao Yuehong, Zhang Wanchang, Liu Yonghe et al. 2009. Evaluation of the precision of Doppler radar rainfall estimation using different algorithms in the Yishu River watershed [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 33 (5): 971-980.

沂沭河流域不同多普勒雷达降水量 估算方法的效果评估

邵月红¹ 张万昌^{2*} 刘永和² 张京英³

1 南京大学国际地球系统科学研究所, 南京 210093

2 中国科学院大气物理研究所东亚区域气候-环境重点实验室, 全球变化东亚区域研究中心, 北京 100029

3 山东省临沂市气象局, 临沂 276004

摘要 利用 2005 年和 2006 年九次大型降雨过程的多普勒雷达体扫复合仰角的回波强度资料及相应的雨量计观测资料, 通过改进的最佳窗概率配对比法、遗传算法和最优化法分别得到沂沭河流域多普勒雷达降水 $Z-R$ 关系, 对不同算法的优化结果和降水误差进行比较分析及验证, 并将最优的 $Z-R$ 关系用于估算区域降水量。同时利用雨量计资料采用卡尔曼滤波、变分等 6 种估测方法进行面雨量估算的校正, 并对上述几种方法的估测精度进行比较分析。结果表明: 将地面雨量计观测值作为真值, 在站点降水的估测上, 卡尔曼最优插值法和卡尔曼变分法估测的降水量计算精度最高, 最优插值法和变分法次之, 卡尔曼滤波法和平均校准法的计算精度要低于最优插值和变分法, $Z-R$ 关系法的精度最低。在区域面降水量的估测上, 雷达探测到的降水量的分布形势与雨量计得到的降水场比较一致, 但中心的降水强度上有较大的偏差。 $Z-R$ 关系法的平均相对误差为 70.51%。经过雷达雨量计联合校正后, 使估算精度明显提高, 其中卡尔曼最优法计算精度最高。平均校准法、卡尔曼滤波法、最优插值法、变分法、卡尔曼最优法和卡尔曼变分法的平均相对误差分别为: 16.55%、16.27%、13.44%、13.86%、13.16%、13.51%;

关键词 沂沭河流域 多普勒雷达 区域降水 精度评估

文章编号 1006-9895 (2009) 05-0971-10

中图分类号 P414

文献标识码 A

Evaluation of the Precision of Doppler Radar Rainfall Estimation Using Different Algorithms in the Yishu River Watershed

SHAO Yuehong¹, ZHANG Wanchang^{2*}, LIU Yonghe², and ZHANG Jingying³

1 *International Institute for Earth System Science, Nanjing University, Nanjing 210093*

2 *Key Laboratory of Regional Climate-Environment Research for Temperate East Asia of Chinese Academy of Sciences, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029*

3 *Linyi Meteorological Bureau, Shandong Province, Linyi 276004*

Abstract By means of the Doppler radar measurements and automatic precipitation station data collected during nine precipitation processes in the Yishu River watershed in 2005 and 2006, the improved window probability matching

收稿日期 2008-04-03, 2008-11-13 收修定稿

资助项目 国家重点基础研究发展规划项目 2006CB400502, 中国科学院“百人计划”择优支持项目 8-057493

作者简介 邵月红, 女, 1977 年出生, 博士研究生, 主要从事水文、地理信息系统与遥感的研究。E-mail: shaoyh@tea.ac.cn

* 通讯作者 E-mail: zhangwc@tea.ac.cn

method (WPMM), improved genetic algorithm (IGA) and the optimization method (OM) are employed to determine the relationship between radar echo intensity (Z) and precipitation intensity (R). The evaluation of the $Z-R$ relation from WPMM, IGA and OM is analyzed and compared with that of the empirical $Z-R$ relation. The optimum $Z-R$ relation is used to estimate the regional precipitation. The regional precipitation is estimated and quantitatively compared with those observed by automatic precipitation observatories of the region by using average calibration, Kalman filter, optimum interpolation, variation method, optimum Kalman filter (combine Kalman filter with optimum interpolation) and variation Kalman filter (combine Kalman filter with variation method). The results suggest that if the value of ground raingauge is taken as truth, algorithms of the optimum Kalman filter and the variation Kalman filter perform best and excess the algorithm of the least root mean square errors, the $Z-R$ relation method is superior than the largest root mean square errors algorithm, the precision of optimum interpolation and variation method is higher than that of average calibration and Kalman filter. For regional rainfall estimation, it is found that the spatial rainfall distributions are in good agreement with those interpolated by raingauge network measured precipitation to a large extent, however, the intense rainfall centers exhibit different patterns compared with those interpolated with raingauge network measurements, the algorithm of $Z-R$ relation yields the largest mean relative error of about 70.51% among the selected algorithms. After adjustments are made to the radar estimated precipitation by using in site measurements with the automatic raingauge networks, radar rainfall estimations were improved dramatically on precision either in the spatial distribution or in the location of intense precipitation centers, the mean relative errors of the estimated regional rainfall by each above-mentioned algorithm adjusted respectively with in site raingauge measurements are evidently less than that by only $Z-R$ relation algorithm being employed. The mean relative error for algorithm of the average calibration, Kalman filter, variation method, optimum interpolation, optimum Kalman filter and variation Kalman filter being about 16.55%, 16.27%, 13.44%, 13.86%, 13.16%, 13.51%, respectively. The optimum Kalman filter performs best, can truly reflect the precipitation status over the ground surface, and might be used to estimate the regional precipitation for the study region.

Key words Yishu River watershed, Doppler radar, regional precipitation, accuracy evaluation

1 引言

雨量计能在点上比较精确地测量降水,但不能大面积地及时精确地反映降水的空间分布。由于雨量计网的密度不够及降水过程在时间和空间上具有很大的不确定性,因此用雨量计测得的点雨量估计整个流域的降水将会带来很大的误差(Ciach et al., 1999; Set, 1998)。雷达相对于雨量计而言,具有测量范围广、时空分辨率高、及时获取大面积降水资料等优点而越来越多地被应用到降水定量估测中(刘力等, 1998; 郗秀书, 2008)。目前,新一代天气雷达 CINRAD 估测降水统一使用 Z (雷达反射率)与 R (雨强)的关系 $Z=300R^{1.4}$ 估算,但降水强度受季节、地域、降水性质等影响很大,使得估测结果往往与实际雨量存在较大的偏差。建立本地化的 $Z-R$ 关系可在一定程度上提高雷达定量估测降水的精度,然而由于 $Z-R$ 关系和雷达参数的不稳定性、雨区衰减及风的影响等因素密切相关使得使用 $Z-R$ 关系定量估算降水仍存在较大的误差(李

柏等, 2007; Siriluk et al., 2003), 利用雨量计观测资料来纠正雷达估测降水,进一步减小误差、提高雷达估测精度,是使雷达估测的结果更符合实际的有效途径。本研究以 2005 年和 2006 年山东临沂地区获取的九次大型降雨过程的多普勒雷达多仰角反射率因子资料和相应的雨量计资料,利用一种改进的最佳窗概率配对法修订传统的 $Z-R$ 关系式法(zil 或 ZIL)进行降水估测。同时,采用雷达雨量计联合校准,通过平均校准法(avg 或 AVG)、卡尔曼滤波法(klm 或 KLM)、最优插值法(opt 或 OPT)、变分法(var 或 VAR)、卡尔曼最优法(kop 或 KOP)和卡尔曼变分法(kvr 或 KVR)对上述九次混合型降水过程进行校准,并对不同校准方法的点及面估测精度进行分析和比较,对上述几种不同的多普勒雷达降水量估算方法的效果进行了评估。

2 研究区域和处理方法

2.1 试验区域和资料

试验区域位于山东省临沂地区雷达半径 230 km

之内, (34. 37°N~36. 38°N, 117. 40°E~119. 18°E) 沂沭河流域, 流域的面积为 20773 km²。雨量计资料来自山东临沂地区的 10 个气象站和 127 个自动雨量站, 雨量计的分布密度约为 150 km²/个。雷达回波资料取自投入实际业务运行的 CINRAD/SC 多普勒天气雷达, 取样间隔时间为 6 分钟。由于雷达波束高度随距离增加而增加, 雷达有效照射体积随距离增加可能出现波束未充塞, 因此, 雷达反射率因子随距离增加一般情况下是递减的。从空间上考虑, 把雷达中心定为零点可划分 4 个圈带: 分别为 0~20 km、20~35 km、35~50 km、50~230 km 不等, 雷达中心所在地的坐标为: (35. 051° N, 118. 348°E), 海拔高度为 184. 1 m。根据经验, 总结出了针对不同圈带的最具代表性的雷达扫描仰角, 0~20 km 用 3. 4°仰角 PPI (Plan Position Indicator) 数据, 20~35 km 用 2. 4°仰角 PPI 数据, 35~50 km 用 1. 5°仰角 PPI 数据, 50~230 km 用 0. 5°仰角 PPI 数据, 将不同仰角的 PPI 数据组合成 1. 2 km 高度上的反射率因子场作为 Z-R 关系转换处理的基本场。建立 Z-R 关系用 2005 年 6~9 月六次大型降雨过程和 2006 年 6~8 月三次大型降雨过程观测到的回波进行分析计算, 把每 1 h 降水定为一个样本, 选取其中 6 个气象站建立 Z-R 关系, 其余的 4 个气象站对 Z-R 关系进行检验。样本按降水性质基本一致的原则选取, 9 次降雨过程均为积层混合云降雨。

2.2 改进的最佳窗概率配对法

由于 Z 与 R 呈指数关系 ($Z=AR^b$), 因此大的雨强对应大的反射率因子, 考虑到降水分布的随机性, 假设雨强及雷达反射率为随机变量, 通过观测, 得到这些点的雷达反射率与雨量计测值的配对。将整个降水区观测到的 Z、R 分别按大小排序, 并以滑动窗的形式进行配对 (WPMM-window probability matching method) (Rosenfeld et al., 1994, 1998), 然后通过遗传优化算法 (徐枝芳等, 2006; 胡娅敏等, 2006) 得出 A 和 b。

利用每一小时的实测资料配对 (雷达的每 6 分钟资料作 1 小时平均, 雨量为 1 小时累积), 首先将观测到的雷达和雨量计资料配对分别按大小顺序排列起来:

$$\begin{aligned} Z_1 > Z_2 > Z_3 > \dots > Z_n > \dots, \\ R_1 > R_2 > R_3 > \dots > R_n > \dots. \end{aligned}$$

从左到右取滑动窗 (滑动窗长为 L), 将 $[Z_{\min}, Z_{\max}]$ 划分为多个小窗 $[Z_1, Z_l], [Z_2, Z_{1+l}], \dots [Z_{n-l+1}, Z_n]$; 同样对应的 R 窗为 $[R_1, R_l], [R_2, R_{1+l}], \dots, [R_{n-l+1}, R_n]$, 分别求对应窗的滑动平均值 $\overline{Z}_k, \overline{R}_k$, 得到一组对应的配对值。利用遗传优化算法可以得到一组配对的 A 和 b。用求得的 A 和 b 及已知的 R 求出一组 Z'_k , 将 Z'_k 按落在第一步中 Z_n 的各个滑动窗中进行分组, 并取出每一窗口内 Z'_k 的最大值和最小值, 用来与对应窗口 R_n 滑动窗中的最大值和最小值对应, 这将得到一组新的 Z、R 的配对, 再重复第一步的过程, 通过遗传优化算法算出一组更为精确的 A 和 b。

3 不同算法建立的 Z-R 关系精度分析

利用多普勒雷达观测到的资料及自动站雨量计统计数据, 对 2005 年六次降雨过程 (6 月 18 日 18~23 时、6 月 26 日 02~13 时、7 月 8 日 13~19 时、8 月 17 日 22 时~18 日 10 时、8 月 29 日 11~至 20 时、9 月 20 日 03~15 时) 和 2006 年三次降雨过程 (6 月 29 日 01~9 时、8 月 6 日 05~13 时、8 月 28 日 19 时~29 日 11 时) 观测到的回波进行分析计算, 所有降雨过程的时间都是北京时。降雨过程的天气形势的影响系统主要是江淮切变、副热带高压西侧西南气流造成的, 9 次降雨过程均为积层混合云降雨。样本选取较均匀, 降雨性质也基本一致, 有利于 Z-R 关系的稳定性。使用最佳窗概率配对法、最优化法 (OM—optimization method)、遗传算法 (GA—genetic algorithm) 分别建立该流域的 Z-R 关系, 并对不同算法的优化效果进行检验分析。把研究区域的其中的 6 个雨量站点的样本用来参与优化计算建立 Z-R 关系, 其余四个站点的样本作为检验样本。最优化法、遗传算法和最佳窗概率配对法建立的 Z-R 关系分别为: $Z=85R^{1.82}$ 、 $Z=65R^{1.84}$ 、 $Z=112R^{1.77}$ 。

为了评估不同算法的测雨精度, 我们定义了四个雷达雨量计的统计参数来进行评估。分别为平均相对误差 (W)、平均偏差 (B)、平均相对均方根差 (R_{mse}) 和相关系数 (ρ)。W 和 B 表示了雷达估测值相对于雨量计测量值的偏离程度, R_{mse} 表示雷达估测值与雨量计测量值的接近程度, ρ 表示雷达估测值与雨量计测量值相关程度好坏, 即二者相关时

的联系紧密程度,通过这些参数反应雷达估测值相对于雨量计测量值的准确度和精密程度。

$$W = \frac{1}{n} \sum_i^n |R_i - G_i| / \bar{G},$$

$$B = \sum_i^n G_i / \sum_i^n R_i,$$

$$R_{\text{mse}} = \left(\frac{1}{n} \sum_i^n (R_i - G_i)^2 \right)^{\frac{1}{2}} / \bar{G},$$

$$\rho = \left(\frac{1}{n} \sum_i^n G_i R_i - \frac{1}{n} \sum_i^n G_i \frac{1}{n} \sum_i^n R_i \right) /$$

$$\left\{ \left[\frac{1}{n} \sum_i^n G_i^2 - \left(\frac{1}{n} \sum_i^n G_i \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \right.$$

$$\left. \left[\frac{1}{n} \sum_i^n R_i^2 - \left(\frac{1}{n} \sum_i^n R_i \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \right\},$$

其中, n 表示总样本数, i 表示雷达-雨量计对的序号。 G_i 、 R_i 和 \bar{G} 分别为实测、雷达估测雨量和实测平均雨量。

由表 1 的统计结果表明:不同算法估测的雨量平均相对误差为 35%~51%、总雨量偏差为 0.97~1.45、相对均方根误差为 0.62~0.87、相关系数为 0.74~0.87。三种优化算法建立的当地的 $Z-R$ 关系要明显地优于目前新一代天气雷达统一使用的 $Z-R$ 关系。三种算法中,改进的最佳窗概率配对法估测结果最优。检验样本的结果和优化样本的结果相似,只是估测精度要比优化样本低一些。通过对不同算法的精度比较分析后,将效果最优的窗概率配对法建立的 $Z-R$ 关系用来估算 2006 年 7 月 2 日这次降雨过程的区域降水量。并在此 $Z-R$ 关系的基础上,采用平均校准法(张培昌等,1988)、最优插值法(李建通等,2000,2005)、卡尔曼滤波校准法(Hamill et al., 2002; 赵坤等,2001; Siriluk et al., 2006)、变分校准法(张培昌等,1992; Ni-nomiya et al., 1978)、卡尔曼变分法和卡尔曼最优

表 1 不同算法的雨量估测结果比较

Table 1 The statistics of the estimated rainfall from each algorithm

	优化样本				检验样本			
	W	B	R_{mse}	ρ	W	B	R_{mse}	ρ
WPMM	0.35	0.97	0.66	0.87	0.36	0.94	0.68	0.85
GA	0.37	0.99	0.62	0.85	0.37	1.03	0.68	0.84
OM	0.38	1.10	0.66	0.83	0.38	1.15	0.75	0.81
$Z-R$	0.51	1.45	0.87	0.74	0.51	1.46	0.90	0.78

法 6 种不同的雷达雨量计联合校准法来估测降水,进一步提高区域降水量的估测精度。

4 雷达估测值和雨量计观测值比较

4.1 评估方法

本研究采用列联表法(Contingency Table Approach, CTA)(Sasaki, 1970; 何宇翔等, 2004),将雨量计观测值作为“真”值对采用不同的雷达-雨量计联合校准方法得出的 1 h 累积降水量的精度进行评估。偶发事件表代表一个 2×2 的矩阵。矩阵的每个元素代表某时段内雨量计观测值和雷达估测值是否达到或超过某阈值。

为了评估不同算法的测雨精度,基于列联表,定义以下四个雷达雨量计的统计评估参数。分别为偏差评分(B_{ias})、Threat Scores 评分(T)、百分率偏差(B_{p})和平均均方差(R_{mse})。

$$B_{\text{ias}} = (A + B) / (A + C),$$

$$T = A / (A + B + C),$$

$$B_{\text{p}} = \sum_{n=1}^{N_{\text{tot}}} P_n / \sum_{n=1}^{N_{\text{tot}}} X_n,$$

$$R_{\text{mse}} = \left[\sum_{n=1}^{N_{\text{obs}}} (P_n - X_n)^2 / N_{\text{obs}} \right]^{\frac{1}{2}},$$

其中, A 为各雨量计处的雷达估测降水值和雨量计观测值同时大于等于给定阈值的数目, B 为各雨量计处的仅雷达估测值大于等于给定阈值的数目, C 为各雨量计处的仅雨量计值大于等于给定阈值的数目, D 为各雨量计处的雷达估测值和雨量计值都没有达到给定阈值的数目, X_n 为某点雨量计观测的降水量, P_n 为对应点雷达的降水量, N_{tot} 为观测值和雷达估测值均达到给定阈值的总数目, N_{obs} 为观测值达到给定阈值的总数目。 B_{ias} 为对多个个例进行平均后雷达估测值相对于观测值的系统偏高(偏差 > 1)或偏低(偏差 < 1)。 T 反映了对某一阈值而言,雷达估测值与观测值的位置是否相符合。

4.2 资料来源

雷达资料来自山东省临沂市气象局时间间隔为 6 分钟的多普勒雷达体扫资料。以 2006 年 7 月 3 日 00~20 时的这次典型暴雨过程为例展开分析。暴雨过程的天气形势和降水情况主要如下:7 月 2 日 08 时,500 hPa 大的环流形势为南高北低,副热带高压呈东西带状,脊线位于 26°N 附近,588 线北缘到达长江流域,边缘强盛的西南气流伸至 35°N ;

中西伯利亚为低值区, 贝加尔湖到河套地区有弱西风槽。700 hPa 上 16 m/s 的西南急流到达 33°N; 850 hPa 四川东部有低涡环流, 存在超过 12 m/s 的西南急流。7 月 3 日 08 时副热带高压短暂南压约一到两个纬距, 贝加尔湖到河套地区西风槽加深东移, 本站处在西风槽前和副热带高压北缘的西到西南气流中; 7 月 3 日 20 时, 500 hPa 副热带高压再次明显加强, 其西侧西南气流更为强盛, 形成 20 m/s 的偏西风急流, 西风槽逐渐顺转为东北东-西南西走向。850 hPa 随着副热带高压西伸北抬, 其北侧的江淮切变线北抬至河套东南部到山东省东南部, 表现为东南风和西南风之间的东西向暖式切变线, 并且存在强盛的低空西南急流, 受上述系统影响, 暴雨过程非常明显。临沂市自南向北普降暴雨, 24 小时全市平均降水 115.2 mm, 最大降水量为临沭县的石门镇 229.4 mm, 切变线影响过程中, 临沂市区降水量 103.2 mm, 最大 1 小时降水 54.1 mm, 超过了历史同期极值。

在进行评估时, 位于以临沂雷达站为中心、230 km 为半径范围内的沂沭河流域共有雨量站 137 个, 选取 70 个站用于雷达雨量计联合校准, 另外 67 个站用于评估。采用偶发事件表法对雷达估测的降水量进行评估。本研究采用 7 种 1 小时雨量阈值: 0.1 mm、1.0 mm、2.5 mm、5.0 mm、7.5 mm、10.0 mm、12.5 mm。对 0.1 mm 阈值, 当降水在 20 个站以上时进行评估; 对 1.0 mm 阈值, 当降水在 10 个站以上时进行评估; 对其余阈值, 当降水在 5 个站以上时进行评估。所有参加评估的时次见表 2。

4.3 结果分析

图 2a 为不同时次的偏差评分结果。偏差评分为各观测点的雷达估测降水值大于等于给定阈值的数目与雨量计值大于等于给定阈值的数目的比值, 由图 2a 可知, 不同估测方法的偏差表明: 卡尔曼变分法偏差最接近 1, 估测精度最高; 其次是最优插值法和卡尔曼最优法, 变分法次之, $Z-R$ 关系法最差, 估测精度最低。在雨强较小时, $Z-R$ 关系法得到的面降水量接近雨量计的面降水量, 但是随着阈值的增加, 偏差评分迅速减小, 到 7.5 mm 时已减小到 0.2 以下, 说明雨强越大, $Z-R$ 关系法得到的降水范围与实际的降水范围相差越大, 造成 $Z-R$ 关系法对较强降水范围的计算偏低相当严重

表 2 参加评估的时次 (7 月 3 日) 及达到各阈值的雨量计站数

Table 2 Evaluation time levels (3 Jul) and numbers of rain-gauge stations reaching thresholds

	雨量计站数						
	0.1 mm	1.0 mm	2.5 mm	5.0 mm	7.5 mm	10.0 mm	12.5 mm
02:00	28	20	13	7	5		
03:00	33	22	12	7			
04:00	46	33	16	5			
05:00	57	44	31	17	12	10	6
06:00	56	43	36	31	23	18	13
07:00	59	47	41	32	25	22	20
08:00	61	53	41	27	15	11	10
09:00	61	55	28	12	7	6	5
10:00	63	42	25	13	10	9	8
11:00	62	39	21	8	7		
12:00	61	30	14	10	7	5	
13:00	60	34	19	13	8	8	6
14:00	61	39	16	6	6	6	5
15:00	62	45	19	13	9	5	5
16:00	63	44	32	22	11	8	6
17:00	63	60	53	43	31	25	14
18:00	63	63	54	44	33	28	19
19:00	62	51	37	31	25	19	17
20:00	54	40	31	23	15	12	11

是 $Z-R$ 关系系数固定的原因。其余的 6 种校准方法由于用地面雨量计进行了校准, 因而都明显优于 $Z-R$ 关系法, 精度得到明显的提高, 得到的面降水量与实际的面降水量比较接近。卡尔曼滤波和平均校准法在 5.0 mm 阈值左右 B_{ias} 约为 1, 在小于 5.0 mm 阈值的情况下 B_{ias} 小于 1, 大于 5.0 mm 阈值时, B_{ias} 大于 1 并且随着阈值的增加而增加, 到 7.5 mm 阈值时 B_{ias} 达到最大, 随后略有降低, 说明当小于 5.0 mm 阈值时, 这两种方法估算的降水范围略小于实际的降水范围, 当大于 5.0 mm 阈值时, 雷达出现高估现象, 并在 7.5 mm 阈值时偏差最大; 最优插值法、变分法及卡尔曼最优法在所有的阈值得到的降水范围都比实际的降水范围稍高, 当大于 5.0 mm 阈值时, 变分法的偏差随着阈值的增加而明显增加, 即出现明显的高估现象。在整个降水过程中, 卡尔曼变分法估测的降水范围与实际最接近, 效果最好, 几乎不随阈值的变化而变化。

图 2b 为不同时次的 T 评分结果。 T 评分为雷

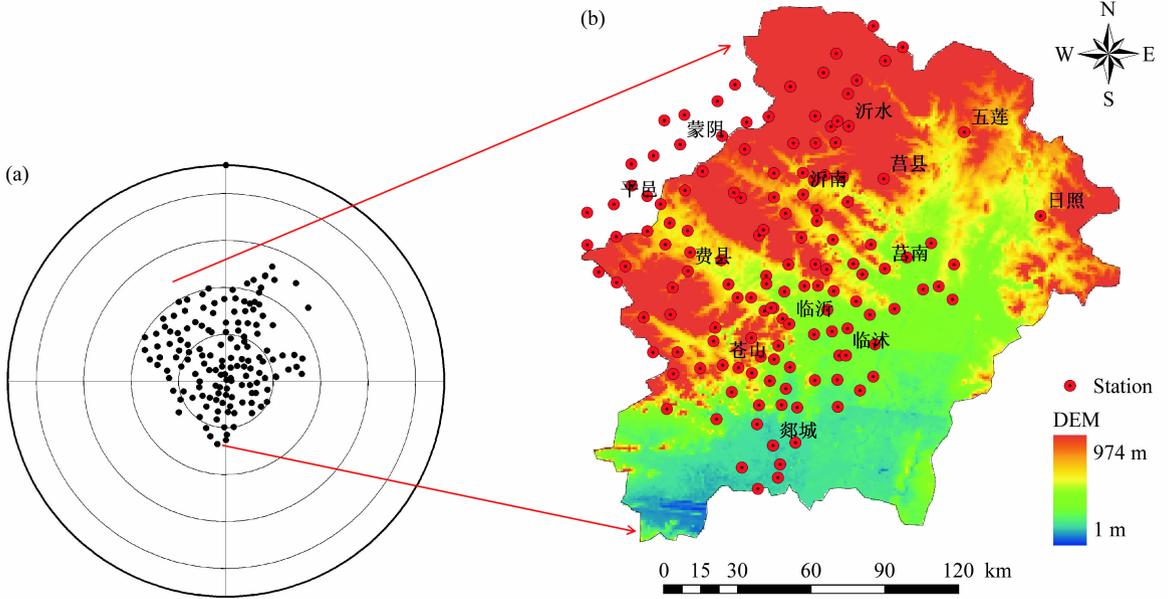


图 1 (a) 以雷达为中心的 230 km 范围内的雨量计分布图; (b) 沂沭河流域气象站的空间分布图 (彩色表示地形的海拔高度)
Fig. 1 (a) Raingauge distribution within a radius of 230 km from the radar; (b) distribution of meteorological stations in the Yishu River watershed

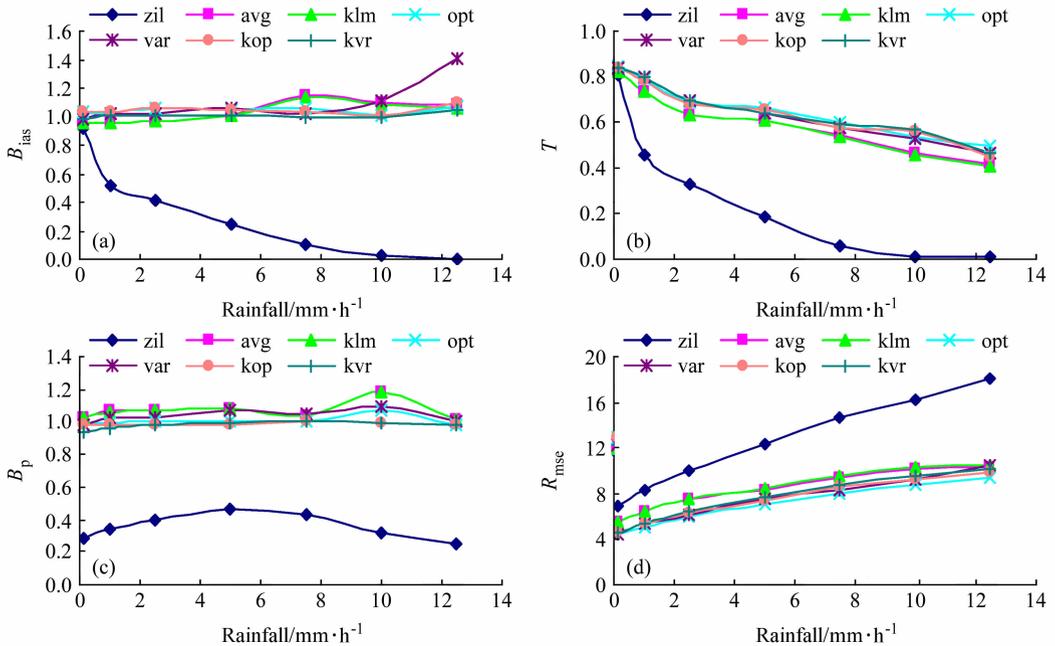


图 2 不同阈值的所有时次的平均 (a) B_{ias} 、(b) T 、(c) B_p 、(d) R_{msc} 评分结果
Fig. 2 (a) B_{ias} , (b) T , (c) B_p and (d) R_{msc} averaged over all time levels for different thresholds

达估测降水值与观测值同时达到大于等于某一阈值的数目在雷达估测值与观测值至少有一种大于等于某一阈值的总数目中所占的比例。由图 2b 可知: 所有方法的 T 评分都随着阈值的增加而降低。即随着阈值增加, 所有方法得出的降水量与实际降水

量相比, 在位置的符合程度上都越来越差, 所有方法对强降水中心的估测偏离较大。6 种校准方法得出的降水量与实际降水量相比, 在位置的符合程度上要明显好于 $Z-R$ 关系法。分析其原因主要为: $Z-R$ 关系法没有进行雨量计的校准, 它的系数又

固定,因此在位置的符合程度上要明显低于其他校准方法;6种校准方法中,最优插值、变分、卡尔曼最优和卡尔曼变分法的效果要好于平均校准和卡尔曼滤波法。由于最优插值考虑了降水的空间分布不均匀性,采用均方差最小意义下的最优线性插值,避免一般加权方案的任意性。变分法则从泛函极值的观点对雷达雨量计场进行曲面拟合得到更佳的降水分布场使实际订正量与理论量更加接近一致。而平均法和卡尔曼滤波法都只考虑了系统平均偏差,因此,最优插值、变分、卡尔曼最优和卡尔曼变分法在位置的符合程度上要优于平均法和卡尔曼滤波法。

图 2c 为不同时次的百分率偏差评分结果,由图 2c 可知:在整个降水过程中, $Z-R$ 关系法得到的降水量相对于观测值而言偏离程度较大,具有明显的低估现象。通过 6 种雷达雨量计联合校准后,偏离程度有了明显的降低,都比较接近 1。6 种校准方法的估测精度分别为:卡尔曼最优、卡尔曼变分法 > 最优插值法 > 变分法 > 卡尔曼滤波法、平均校准法;卡尔曼最优和卡尔曼变分法的偏差几乎不随阈值的增加而变化,整个过程都非常接近 1,最优插值法在阈值小于 7.5 mm 时估测的降水量与实际非常接近,当阈值大于 7.5 mm 时偏离程度随着阈值增加而增加,出现高估现象。变分法、卡尔曼滤波法和平均校准法得到的降水量相对于观测值在整个过程都普遍偏高,偏离程度较大,在阈值 10.0 mm 时偏差达到最大。分析造成其结果的原因:一是由于雷达观测到的回波位于高空,而雨量计位于地面,水滴在降落过程中由于蒸发作用而不一定能降落到地面的原因造成;二是由于平均法和卡尔曼滤波法都只考虑了系统平均偏差,最优插值法和变分法从空间上考虑降水场分布不均匀性,而卡尔曼最优和卡尔曼变分法既利用卡尔曼滤波的优点,滤除了测量过程的噪声,对整个范围的回波做了订正,又利用变分和插值法充分考虑了降水的时空分布随机的特点,再一次对降水做空间上的校正,突出降水的结构,从而得到更为精确的结果。

图 2d 为不同时次的平均均方差评分结果。所有方法的 R_{mse} 均随着阈值的增加而增大,即随着雨强的增大,所有方法估测降水量的误差都增大,其计算精度也随着下降。不同方法的均方差大小为: $Z-R$ 关系法 > 平均法、卡尔曼滤波法 > 卡尔曼变

分法、变分法和卡尔曼最优 > 最优插值法。说明 $Z-R$ 关系法得出的降水量与观测值相比,计算误差最大,精度最低;最优插值法是采用均方差最小意义下的最优线性插值,因此它得出的降水量相对于雨量计而言,误差最小,计算精度最高。

5 不同方法估算区域降水量的比较分析

使用山东省临沂市气象台 CINRAD/SC 多普勒天气雷达的三维体扫资料,研究区域半径为 230 km 的雷达扫描范围。分析区域为 (34.37°N~36.38°N, 117.40°E~119.18°E) 的沂沭河流域,雨量及资料来自研究区域内的各气象台站及加密自动雨量计站共 137 个台站。采用以雷达站为原点的直角坐标系,向东为 X 轴正方向、向北为 Y 轴正方向将分析区域划分成许多格距相等的网格,每个网格的面积为 1 km × 1 km。雨量计网的降水场通过反距离加权插值法 (IDW) 得到 (Haberlandt, 2007)。它以插值点与样本点之间的距离为权重的插值方法,插值点越近的样本点赋予的权重越大,其权重贡献与距离成反比。可用下式表示:

$$G = \sum_{i=1}^n G_i / (D_i)^p / \sum_{i=1}^n 1 / (D_i)^p,$$

其中, G : 待估栅格点降雨量, G_i : 雨量计站点的降雨量, n : 参与计算的站点数, D_i : 待测点与第 i 个站点间的距离, p : 距离的幂。

以 2006 年 7 月 2~3 日的一次暴雨为例展开分析比较。以雨量计通过反距离加权插值得到的降水场作为标准,将之与 $Z-R$ 关系法得到的雷达反演的降水场、采用不同方法经过雷达雨量计联合校准后的雷达反演的降水场这几种情况进行分析比较。图 3 为 2006 年 7 月 3 日 17:00~18:00 不同方法得到的雷达反演的降水场。由图 3 可知:雷达探测到的降水量的分布形势及降水中心位置都与雨量计得到的降水场比较一致,较强的降水中心位置,雨量计和雷达探测结果比较吻合,但在中心的降水强度上有较大的偏差,即以 $Z-R$ 关系法得到的降水强度明显比雨量计的偏低。说明用雷达来估算降落的区是比较合理的,但在计算区域降水量时,将会出现大的误差。经过雷达雨量计联合校准后得到的降水场在中心的降水强度上有了明显的改观,与雨量计的中心强度比较接近,6 种校准法得到的雨强

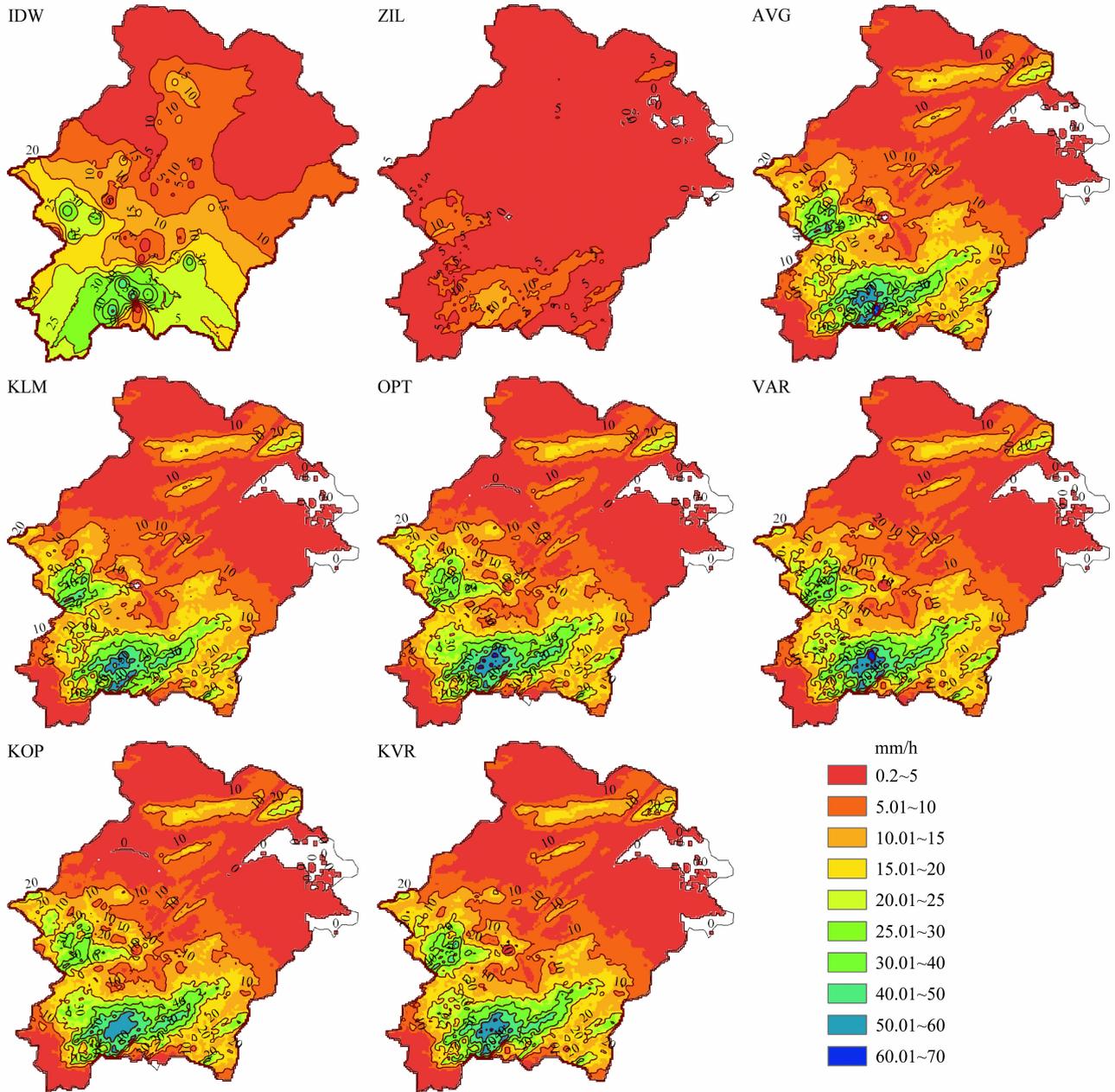


图3 2006年7月3日17:00~18:00沂沭河流域降水空间分布

Fig. 3 Distributions of rainfall from different techniques in the Yishu River watershed for 1700-1800 LST 3 Jul 2006

中心强度比实际偏高,由此说明, $Z-R$ 关系法能够比较真实地反映地面的降水空间情况,经过不同方法的校准后,使得误差大大减少,探测的结果在强度和空间分布上比较符合实际情况。

图4为不同方法估测的7月3日各个时次的平均面降雨量(即区域平均降雨量)及其相对误差。平均面降雨量的相对误差指绝对误差的绝对值与雨量计场的平均面降雨量的比值。其中,绝对误差指

雷达估测的平均面降雨量与雨量计场的平均面降雨量的差值。通过 $Z-R$ 关系法估测的区域面平均降雨量与通过反距离权重插值得到的雨量计网面平均降雨量相比,具有明显的偏低现象,产生的相对误差也最大,平均相对误差达到70.51%。误差较大的原因是 $Z-R$ 关系是从多次降水过程,统计整个分析区总体样本获得,它在这个总体过程是最优的 $Z-R$ 关系,但由于 $Z-R$ 关系在时间空间上的不确

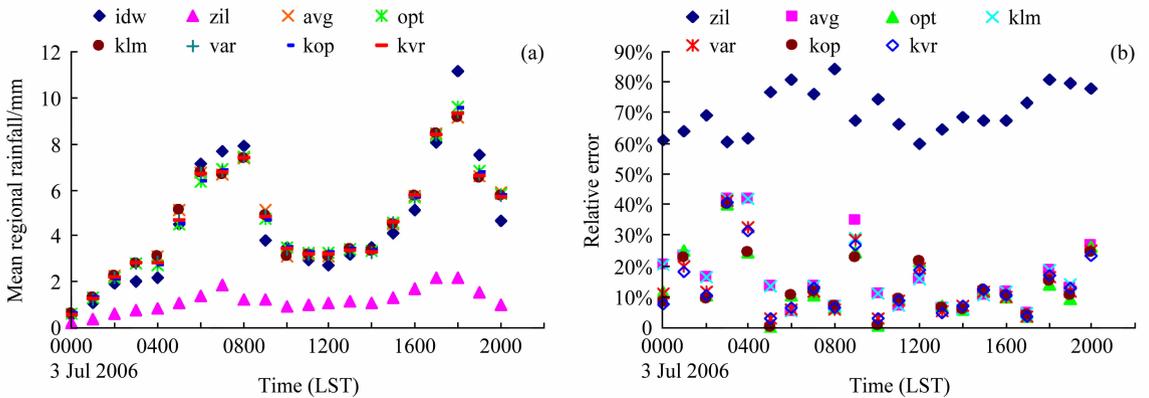


图4 不同方法估测的平均面降雨量及其相对误差

Fig. 4 The mean regional rainfall and its relative error from different algorithms

定性, 对某一个过程或某一区域来说, 这种关系就不一定是最优的, 因此在估算降水时会造成较大的误差; 通过雷达雨量计联合校正后, 6 种校准方法估测的区域总降水量和面平均降雨量与雨量计网的插值得到的面雨量比较吻合, 估测精度有了明显的提高, 6 种校准方法之间的差别不是很大。平均校准法、卡尔曼滤波法、最优插值法、变分法、卡尔曼最优法和卡尔曼变分法在所有时次的平均相对误差分别为: 16.55%、16.27%、13.44%、13.86%、13.16%、13.51%; 由图 4 可知, 卡尔曼最优法的平均相对误差最小, 估测效果最好。在整个过程中, 除 03 时的相对误差较大外, 其他所有时次的相对误差都在 25% 以下, 大部分在 10% 左右, 经过系统偏差和时空分布两次校正后, 极端偏高的时次很少, 因而计算精度最高。

6 结论

通过对上述不同方法估算降水量的结果进行比较分析, 可以得出以下主要结论: (1) 在整个降水过程中, 卡尔曼变分法估测的降水范围与实际最接近, 效果最好; 最优插值法、变分法及卡尔曼最优法对降水总范围 (阈值 > 0.1 mm) 的计算均稍偏高, 变分法在阈值 > 5.0 mm 出现明显的高估现象; 卡尔曼滤波和平均校准法估测的降水范围 (阈值 < 5.0 mm) 与实际范围较吻合, 在阈值 > 5.0 mm 时与实际相比偏高; $Z-R$ 关系法对较强降水范围 (阈值 > 7.5 mm) 的计算偏低相当严重。(2) 随着阈值增加, 所有方法得出的降水量与实际降水量相比, 在位置的符合程度上都越来越差, 所有方法对

强降水中心的估测偏离较大。最优插值、变分、卡尔曼最优和卡尔曼变分法得出的降水量与实际降水量相比在位置的符合程度上要优于平均法和卡尔曼滤波法。 $Z-R$ 关系法最差。(3) 在雷达反演降水值和观测值都达到某一阈值的站点中, 雷达反演降水值与观测值相比, $Z-R$ 关系法偏离程度较大, 出现明显的低估现象。6 种校准方法与实际比较接近, 6 种校准方法的估测精度分别为: 卡尔曼最优、卡尔曼变分法 $>$ 最优插值法 $>$ 变分法 $>$ 卡尔曼滤波法、平均校准法。(4) 随着雨强的增大, 所有方法估测降水量的误差都增大, 其计算精度也随着下降。最优插值法是采用均方差最小意义下的最优线性插值, 因此它得出的降水量相对于雨量计而言, 误差最小, 计算精度最高。 $Z-R$ 关系法的精度最低。(5) 不同方法估算区域降水量的结果表明: 雷达探测到的降水量的分布形势及较强的降水中心位置都与雨量计得到的降水场比较一致, 但中心的降水强度上有较大的偏差。 $Z-R$ 关系法估测的区域降水量的平均相对误差为 70.51%。经过雷达雨量计联合校正后, 使得中心的降水强度和区域总降水量的估算精度明显提高。平均校准法、卡尔曼滤波法、最优插值法、变分法、卡尔曼最优法和卡尔曼变分法在所有时次的平均相对误差分别为: 16.55%、16.27%、13.44%、13.86%、13.16%、13.51%。其中卡尔曼最优法计算精度最高, 如果在实际业务中采用此方法估算面降水量, 可以保证较高的估测精度。(6) 该研究中, 由于目前收集的具有代表性的短时强降水过程较少, 难免带来一些偏差。用一个过程对结果的检验略显不足, 要消除

或尽量减小其偏差,得到更有价值的结果并使其业务化,还需要更多过程的检验,今后还须进行更深层次的研究。

致谢 感谢唐洵昌高级工程师对本论文的指导,王庆华对论文资料的搜集和整理,以及赵登忠博士和陈炯烽博士对本论文的修改和帮助。

参考文献 (References)

Chumchean S, Sharma A, Seed A. 2003. Radar rainfall error variance and its impact on radar rainfall calibration [J]. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 28 (1-3): 27-39.

Chumchean S, Seed A, Sharma A. 2006. Correcting of real-time radar rainfall bias using a Kalman filtering approach [J]. *Journal of Hydrology*, 317 (1-2): 123-137.

Ciach G J, Krajewski, Witold F. 1999. On the estimation of radar rainfall error variance [J]. *Advances in Water Resources*, 22 (6): 585-595.

Haberlandt U. 2007. Geostatistical interpolation of hourly precipitation from rain gauges and radar for a large-scale extreme rainfall event [J]. *Journal of Hydrology*, 332 (1-2): 144-157.

Hamill T M, Snyder C. 2002. Using improved background error covariances from an ensemble Kalman filter for adaptive observations [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 130 (6): 1552-1572.

何宇翔, 张亚萍, 刘术艳. 2004. 天气雷达定量估测降水量不同方法效果评估 [J]. *南京气象学院学报*, 27 (6): 743-752. He Yuxiang, Zhang Yaping, Liu Shuyan. 2004. Evaluation of the precision of weather radar rainfall estimation algorithms [J]. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese)*, 27 (6): 743-752.

胡娅敏, 丁一汇, 沈桐立. 2006. 基于遗传算法的四维变分资料同化技术的研究 [J]. *大气科学*, 30 (2): 248-256. Hu Yamin, Ding Yihui, Shen Tongli. 2006. A research of four-dimensional variational data assimilation based on genetic algorithm [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 30 (2): 248-256.

李柏, 周玉淑, 张沛源. 2007. 新一代天气雷达资料在 2003 年江淮流域暴雨模拟中的初步应用: 模拟降水和风场的对比 [J]. *大气科学*, 31 (5): 826-838. Li Bai, Zhou Yushu, Zhang Peiyuan. 2007. Application of the China new generation weather radar data to the torrential rain simulation over the Yangtze River-Huaihe River basin in 2003: Contrast of precipitation and wind [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 31 (5): 826-838.

李建通, 杨维生, 郭林, 等. 2000. 提高最优插值法测量区域降水量精度的探讨 [J]. *大气科学*, 24 (2): 263-270. Li Jiantong, Yang Weisheng, Guo Lin, et al. 2000. A study of improving precision of measuring regional precipitation in optimum interpolation method [J]. *Chinese Journal of Sciences (in Chinese)*, 24 (2): 263-270.

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.

刘力, 邓华秋. 1998. 多参数雷达在气象观测中的应用 [J]. *大气科学*, 22 (3): 363-370. Liu Li, Deng Huaqiu. 1998. Application of multi-parameter radar in meteorological observation [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 22 (3): 363-370.

Ninomiya K, Akeyama T. 1978. Objective analysis of heavy rainfalls based on radar and gauge measurement [J]. *J. Meteor. Soc. Japan*, 50: 206-210.

鄧秀书, 吕达仁, 陈洪滨, 等. 2008. 大气探测高技术及应用研究进展 [J]. *大气科学*, 32 (4): 867-881. Qie Xiushu, Lü Daren, Chen Hongbin, et al. 2008. Advances in high technology of atmospheric sounding and application researches [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 32 (4): 867-881.

Rosenfeld D, Wolff D B, Amitai E. 1994. The window probability matching method for rainfall measurements with radar [J]. *J. Appl. Meteor.*, 33: 682-693.

Rosenfeld D, Amitai E. 1998. Comparison of WMPP versus regression for evaluating Z-R relationships [J]. *J. Appl. Meteor.*, 37: 1241-1249.

Sasaki Y. 1970. Some basic formalisms in numerical variational analysis [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 98 (12): 875-883.

Set D J. 1998. Real-time estimation of rainfall fields using rain gauge data under fractional coverage conditions [J]. *Journal of Hydrology*, 208: 25-36.

徐枝芳, 熊军, 葛文忠. 2006. 使用遗传算法优化雷达测量降水 Z-R 关系 [J]. *高原气象*, 25 (4): 710-715. Xu Zhifang, Xiong Jun, Ge Wenzhong. 2006. Application of genetic algorithm in optimizing the Z-R parameter to radar rainfall estimation [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 25 (4): 710-715.

张培昌, 戴铁丕, 杜秉玉. 1988. 雷达气象学 [M]. 北京: 气象出版社. Zhang Peichang, Dai Tiepi, Du Bingyu. 1988. *Radar Meteorology (in Chinese)* [M]. Beijing: China Meteorological Press.

张培昌, 戴铁丕, 伍志芳. 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 [J]. *大气科学*, 16 (2): 248-256. Zhang Peichang, Dai Tiepi, Wu Zhifang. 1992. Principle and accuracy of adjusting the area precipitation from digital weather radar through variational method [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica) (in Chinese)*, 16 (2): 248-256.

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 [J]. *气候与环境研究*, 6 (2): 180-185. Zhao Kun, Liu Guoqing, Ge Wenzhong. 2001. Precipitation calibration by using Kalman filter to determine the coefficients of the variational equation [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 6 (2): 180-185.