

文章编号: 1000-2022(2004) 06-0743-10

## 天气雷达定量估测降水量不同方法效果评估

何宇翔, 张亚萍, 刘术艳, 顾松山

(南京信息工程大学 电子工程系, 江苏 南京 210044)

**摘要:** 将黄河淮河洪水暴雨监测预报系统降水估测模式得出的规则网格点上的降水与雨量计实测值进行比较, 结果表明: 将地面雨量计值作为真值, 则联合校准法和最优插值校准法得出的降水量计算精度最高, 变分法得到的结果不是很理想, 卡尔曼滤波校准法和平均校准法的计算精度低于联合校准法和最优插值校准法,  $Z-I$  关系法的精度最低。

**关键词:** 天气雷达; 区域降水; 方法评估

**中图分类号:** P406      **文献标识码:** A

雷达的测量结果受到多方面干扰因素的影响, 使得雷达测值存在着相当大的误差。只有对雷达的测值进行校准后, 雷达测得的降水信息才能被接受。不用雨量计进行校准的措施有: 调整  $Z-I$  关系法<sup>[1]</sup>、概率配对法<sup>[2]</sup>、面积时间积分法<sup>[3]</sup>, 它们的优点是使用方便, 但没有考虑到某一次降水过程的具体特点。本文只对其中的  $Z-I$  关系法进行评估。用雨量计进行联合校准措施, 把雨量计和雷达进行点面结合, 可以弥补无雨量计参加校准的方法的不足。在雷达—雨量计进行联合校准的各种方法中, 本文涉及的有: 平均校准法<sup>[4]</sup>、卡尔曼滤波校准法<sup>[5]</sup>、最优插值法<sup>[6]</sup>、变分校准法<sup>[7-9]</sup>、卡尔曼滤波和最优插值联合校准法、卡尔曼变分校准法。

## 1 黄河淮河洪水暴雨监测预报系统降水估测模式

### 1.1 资料预处理

预处理包括构成复合平面、超折射检测、阻挡订正、孤立点剔除、畸异回波检测等。对每一个雷达体扫描资料, 从用户设定的最低仰角开始, 向上搜索至第4个有强度场的平面扫描资料。利用雷达周边地形资料, 构成最佳复合平面。利用最低两个PPI检测超折射。如果存在超折射, 剔除最低层资料, 用另外3个平面扫描资料构成复合平面, 并将雷达资料由极坐标转换成直角坐标。对每一个网格内的有效回波, 检测其8个相邻点, 如果在它周围只有一个有效回波大于噪声最大阈值(缺省为10 dBZ, 可调), 则视其为孤立点, 予以剔除。对每一个大于回波最大阈值的点, 检测其8个相邻点, 如果在它周围没有一个点大于回波最大阈值, 则视其为超强畸异回波, 用周围8个相邻点的均值代替。

收稿日期: 2003-04-03; 改回日期: 2003-07-31

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40275010)

作者简介: 何宇翔(1976-), 男, 四川南江人, 博士生, 现在中国科学院大气物理所工作。

# 1.2 雷达雨量计配对

在雷达雨量计进行配对时, 由于受到天气类型、降水性质、不同降水阶段的丰水区的高度以及背景场如风场、气压场等的影响, 造成地面雨量计和其上空雷达测值不对应, 如雨滴在下落过程中受到重力分选、风垂直切变等的作用, 使得雷达反射率因子  $Z$  值变得垂直分布不均匀, 所以用不同高度的测量值  $Z$  作为地面  $Z$  值来反演地面降水会导致一定的误差。本文采取如图 1 所示的方法构成复合平面和配对。

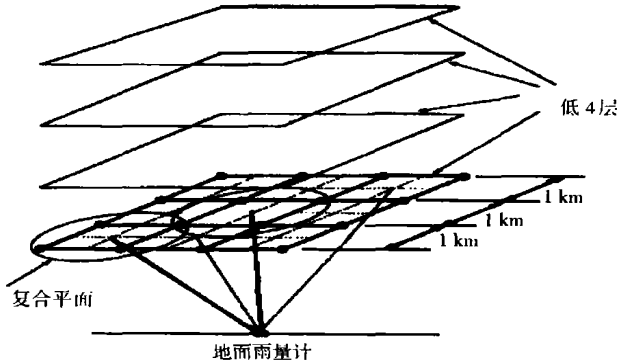


图 1 雷达复合平面和雷达—雨量计配对方法

Fig. 1 Radar compound plane and radar-rain gauge matching

首先计算雨量计正上方复合平面内相邻的 9 点平均风速。用 VAP 方法, 求出风矢量:

$$\tan\alpha = -\frac{v_{r1} - v_{r2}}{v_{r1} + v_{r2}} \cot\Delta\theta, \quad (1)$$

$$V = \left| \frac{v_{r1} + v_{r2}}{2\cos\alpha\cos\Delta\theta} \right|.$$

或

$$V = \left| \frac{v_{r1} - v_{r2}}{2\sin\alpha\sin\Delta\theta} \right|. \quad (2)$$

其中,  $V$  是水平风速矢量的模,  $\alpha$  是  $V$  矢量与雷达射线径向的夹角,  $\Delta\theta$  为相邻方位角差,  $v_{r1}$ 、 $v_{r2}$  是相邻两径向上的 Doppler 速度。

按下面的公式分别求出这 9 点风速的两个分量  $u$ 、 $v$ 。

当  $v_{r1} + v_{r2} < 0$  时,

$$u = V \sin(\theta + \alpha); \quad v = V \cos(\theta + \alpha).$$

当  $v_{r1} + v_{r2} > 0$  时,

$$u = V \sin(\theta + \pi + \alpha); \quad v = V \cos(\theta + \pi + \alpha). \quad (3)$$

然后, 把 9 个点的风速按分量求和, 得到平均风速  $\bar{u}$ 、 $\bar{v}$ ,

$$\bar{u} = \left( \sum_{i=1}^9 u_i \right) / 9; \quad \bar{v} = \left( \sum_{i=1}^9 v_i \right) / 9. \quad (4)$$

然后估测粒子的下落速度  $v_i$ ,

$$v_i = 3.8(Z)^{0.072}. \quad (5)$$

粒子到达地面的垂直距离  $H$ ,

$$H = h + 1\,000R\sin\delta + 0.058\,9R^2\cos^2\delta. \quad (6)$$

其中,  $h$  为雷达天线高度,  $R$  为地球半径,  $\delta$  为雷达天线仰角。

粒子下落的时间  $t$  大约为

$$t = \frac{H}{v_{\downarrow}} \tag{7}$$

粒子向前的距离  $S$  的两分量为

$$S_x = \bar{u} \times t; \quad S_y = \bar{v} \times t \tag{8}$$

根据风向、风速和雨滴的下落速度, 计算出应该是哪个方位的 9 个点参与平均, 从而得到与地面雨量计配对的复合平面上的雷达强度值。

1.3 1 h 累积降水量

积分 1 h 内所有体扫数据获得的瞬时降水强度, 两次体扫间隔期间的降水强度取为两次体扫时刻的降水强度平均值, 用于累积降水的体扫数据至少覆盖该时段 3 000 s。对于估测的第 1 小时, 用估测开始时刻至整点的平均降水强度估计 1 h 的降水量。相邻两次体扫的时间间隔最大不超过 3 600 s, 如果相邻两次体扫的时间间隔大于 3 600 s, 其时间间隔按 3 600 s 计算。

如果当前体扫的雨区面积小于数据质量控制中设定的过程降水初始面积, 则不作处理, 继续等待下一个可用的体扫, 如果等待时间超过 5 400 s, 将终止当前过程, 并重新开始一个新的降水估测过程。

进行平均校准时, 依据体扫观测时间, 查询 10 min 雨量计数据, 并对每一个雷达—雨量计数据配对进行质量控制。如果两者的反射率因子差大于 20 dBZ (缺省为 20 dBZ, 可调), 或者雷达无回波, 该处的雨量计资料不参与雨强校准。对于参与校准的雨量计, 根据雨量计和雷达之间的距离, 每 50 km 为一档, 按距离分段订正。将反射率因子  $Z$  值转换到雨强  $I$  时, 采用  $Z = aI^b$  关系。一个可用的雷达平面扫描资料至少有 300 根径向, 用于估计 1 h 降水量的雷达资料至少覆盖 3 000 s 的时间段。降水过程之间的间隔时间不低于 5 400 s, 即相邻两次降水之间相隔 1.5 h 以上视为两次降水过程。在计算过程降水时, 每个雷达扫描的最大控制时间为 3 600 s, 最大可处理雨量计数为 455。

2 雷达测值与雨量计实测值比较

2.1 评估方法

本文采用偶发事件表法(Contingency Table Approach, CTA)<sup>[7]</sup>, 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。在将雨量计观测值作为真值的基础上, Brian 等<sup>[8]</sup>曾用 CTA 法对 MM5 模式和 Eta-10 模式预报的降水精度进行了评估。

假设雨量计观测值(以下简称观测值)为真值, 对采用不同方法得到的雷达估测的降水量值(以下简称雷达值)进行评估。偶发事件表代表一个  $2 \times 2$  的矩阵(图2)。这里, 矩阵的每个元素代表某时段内观测值和雷达值是否达到或超过某阈值。例如, 如果在某一点的观测值和雷达值都达到或超过了某一阈值, 则“A”处的数目增加 1。

基于偶发事件表, 可得到偏差评分  $B_{\text{ias}}$  和  $T$  (Threat scores) 评分。偏差评分定义为:

$$B_{\text{ias}} = \frac{F}{O} = \frac{A + B}{A + C} \tag{9}$$

|      |   | 雨量计观测值 |   |
|------|---|--------|---|
|      |   | 是      | 否 |
| 雷达测值 | 是 | A      | B |
|      | 否 | C      | D |

图2 偶发事件表布局  
Fig.2 Distribution of  
accidental events

式中,  $B_{ias}$  为偏差评分,  $F$  为各观测点(各雨量计处)的雷达值等于或超过给定阈值的数目,  $O$  为各观测点的雨量计测值等于或超过给定阈值的数目。偏差评分反映了对多个个例进行平均后雷达值相对于观测值的系统偏高( $B_{ias} > 1$ )或偏低( $B_{ias} < 1$ )。

$T$  评分定义为

$$T = \frac{A}{A + B + C}. \quad (10)$$

$T$  评分反映了某一时次雷达值和观测值同时达到或超过某一阈值的点数在雷达值或观测值至少有一种达到或超过某一阈值的总点数中所占的比例, 是对某一阈值雷达值与观测值位置是否符合的反映。

用偶发事件表验证雷达测得的降水量时, 由于对每次降水事件都同样处理(一旦雷达值或观测值达到阈值, 则偶发事件矩阵的对应元素简单地增加 1), 雷达值的  $B_{ias}$  评分和  $T$  评分不会受到少数极端不准确的值的严重影响。

但是, 基于偶发事件表的偏差和  $T$  评分只能反映在某一阈值以上雷达值的偏离程度, 而不能确定雷达测量降水的误差大小。因此, 还必须计算百分率偏差  $B_p$  和平均均方差  $R_{mse}$  (Root Mean Squared Error)。对于某一给定阈值,  $B_p$  和  $R_{mse}$  分别定义为

$$B_p = \frac{\sum_{n=1}^{N_{tot}} P_n}{N_{tot}}, \quad (11)$$

$$R_{mse} = \frac{\sum_{n=1}^{N_{obs}} (P_n - X_n)^2}{N_{obs}}, \quad (12)$$

这里,  $X_n$  是某点雨量计观测的降水量,  $P_n$  是对应点雷达测得的降水量,  $N_{tot}$  是观测值和雷达值均达到给定阈值的总数目,  $N_{obs}$  是观测值达到给定阈值的总数目。因此,  $B_p$  为雷达值与观测值之间的百分率偏差,  $R_{mse}$  给出了雷达值与观测值之间差别的大小, 而且  $R_{mse}$  受到虽然数量不多但其雷达值误差却很大的那些点的影响。

## 2.2 资料来源

安徽合肥多普勒雷达站 2000 年 6 月 1 日 21 时至 6 月 2 日 14 时的雷达原始数据格式文件(新一代天气雷达基本数据格式, 2.0 版本, VOL 扫描数据格式), 间隔时间约 5 min。

5 月 29 日夜, 华西有一低槽东移, 同时副热带高压稳定加强, 脊线到达 20°N 以北, 江淮之间有一东西向暖式切变线生成; 5 月 30 日 08 时到 31 日 08 时, 沿江江南 13 站为暴雨(指气象部门的雨量站, 下同), 1 站为大暴雨。6 月 1 日副热带高压北抬, 6 月 1 日 08 时到 2 日 08 时, 淮西南部到江淮 9 站为暴雨, 2 站为大暴雨, 最大雨量在全椒(以合肥雷达站为中心时, 方位为 74.7°, 距离为 98.8 km), 为 223.5 mm。6 月 1 日 20 时到 2 日 14 时, 全椒 18 h 雨量为 335.2 mm。6 月 2 日 08 时到 3 日 08 时, 江淮中部及以北 35 站为暴雨, 其中 15 站为大暴雨。6 月 3 日 08 时到 4 日 08 时, 沿淮河及淮河以南 13 站为暴雨。4 日 08 时副热带高压明显减弱, 切变线南压, 安徽全省的强降水过程结束。从合肥雷达回波上可以看出: 5 月 30 日至 31 日降水回波的主体在沿江以南, 从 6 月 1 日下午开始降水回波区由安徽的西部逐步进入淮河流域。6 月 2 日凌晨, 回波主体在江淮之间、沿淮淮北以及河南省的东南部。6 月 3 日下午 17 时以后, 回波随切变线南压到合肥以南地区。6 月 4 日 07 时降水区在沿江江南。

雨量计资料是与雷达资料相对应的10 min 雨量计资料。雨量计资料由黄河水利委员会和淮河水利委员会提供, 共453 站, 其中位于以合肥雷达站为中心、230 km 为半径范围内的雨量站有254 个。在进行评估时, 选取127 站用于雷达—雨量计联合校准, 另外127 站用于评估。

1 h 累积降水量是在上述的雷达资料和用于雷达—雨量计联合校准的雨量计资料的基础上, 在本地方式下运行REP(Radar Estimating Precipitation)模式, 得到的1 h 累积降水量。

评估时, 将用于评估的雨量计的经纬度坐标转换成直角坐标。用雷达—雨量计联合校准的1 h 累积降水量和相应时次雨量计的1 h 累积雨量, 采用2.1 节中描述的评估方法对雷达估测的降水量进行评估。

本文采用7 种1 h 雨量阈值: 0.5 mm, 1.0 mm, 2.5 mm, 5.0 mm, 7.5 mm, 10.0 mm, 12.5 mm。对0.5 mm 阈值, 当降水在30 个站以上时进行评估; 对1.0 mm 阈值, 当降水在20 个站以上时进行评估; 对其余阈值, 当降水在10 个站以上时进行评估。所有参加评估的时次见表1。

表1 参加评估的时次及达到各阈值的雨量计站数(6月1日22时至6月2日14时)

Table 1 Evaluation time levels and number of raingauge stations reaching thresholds  
( from 22:00BST, June 1 to 14:00BST, June 2)

| 时次         | 0.5 mm | 1.0 mm | 2.5 mm | 5.0 mm | 7.5 mm | 10.0 mm | 12.5 mm |
|------------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|
| 1 日 22: 00 | 57     | 24     |        |        |        |         |         |
| 1 日 23: 00 | 60     | 23     | 13     |        |        |         |         |
| 2 日 00: 00 | 51     | 25     |        |        |        |         |         |
| 2 日 01: 00 | 57     | 23     | 13     |        |        |         |         |
| 2 日 02: 00 | 57     | 26     | 13     |        |        |         |         |
| 2 日 03: 00 | 56     | 33     | 11     |        |        |         |         |
| 2 日 04: 00 | 62     | 33     | 13     |        |        |         |         |
| 2 日 05: 00 | 70     | 42     | 32     | 12     |        |         |         |
| 2 日 06: 00 | 70     | 51     | 28     | 10     |        |         |         |
| 2 日 07: 00 | 68     | 48     | 30     | 15     |        |         |         |
| 2 日 08: 00 | 63     | 45     | 33     | 25     | 20     | 18      | 15      |
| 2 日 09: 00 | 52     | 40     | 34     | 30     | 25     | 17      | 15      |
| 2 日 10: 00 | 56     | 46     | 38     | 37     | 29     | 22      | 15      |
| 2 日 12: 00 | 74     | 62     | 54     | 36     | 28     | 24      | 19      |
| 2 日 13: 00 | 76     | 67     | 57     | 44     | 26     | 19      | 13      |
| 2 日 14: 00 | 75     | 65     | 53     | 36     | 31     | 19      | 12      |

以6月2日12 时为例, 表2 给出了对该时次的评估结果( $A, B, C, D$  的含义见图2), 其中除 $Z-H$  关系法外, 均有雨量计参加校准。

表 2   6 月 2 日 12 时评估结果

Table 2   Evaluation results at 12:00BST, June 2

| 方法        | 阈值/mm | $A$ | $B$ | $C$ | $D$ | $B_{\text{ias}}$ | $T$   | $B_{\text{p}}$ | $R_{\text{mse}}/\text{mm}$ |
|-----------|-------|-----|-----|-----|-----|------------------|-------|----------------|----------------------------|
| 平均校准法     | 0.5   | 53  | 32  | 21  | 21  | 1.149            | 0.500 | 2.145          | 10.704                     |
|           | 1.0   | 36  | 32  | 26  | 33  | 1.097            | 0.383 | 0.946          | 12.524                     |
|           | 2.5   | 14  | 23  | 40  | 50  | 0.685            | 0.182 | 1.169          | 14.229                     |
|           | 5.0   | 4   | 19  | 32  | 72  | 0.639            | 0.073 | 0.688          | 17.781                     |
|           | 7.5   | 2   | 13  | 26  | 86  | 0.536            | 0.049 | 0.859          | 18.549                     |
|           | 10.0  | 2   | 11  | 22  | 92  | 0.542            | 0.057 | 0.859          | 20.623                     |
|           | 12.5  | 2   | 7   | 17  | 101 | 0.474            | 0.077 | 0.859          | 22.164                     |
| 卡尔曼滤波法    | 0.5   | 55  | 32  | 19  | 21  | 1.176            | 0.519 | 2.153          | 10.657                     |
|           | 1.0   | 35  | 32  | 27  | 33  | 1.081            | 0.372 | 1.025          | 12.464                     |
|           | 2.5   | 15  | 24  | 39  | 49  | 0.722            | 0.192 | 1.171          | 14.160                     |
|           | 5.0   | 4   | 22  | 32  | 69  | 0.722            | 0.069 | 0.797          | 15.693                     |
|           | 7.5   | 2   | 12  | 26  | 87  | 0.500            | 0.050 | 0.957          | 17.463                     |
|           | 10.0  | 2   | 11  | 22  | 92  | 0.542            | 0.057 | 0.957          | 18.546                     |
|           | 12.5  | 2   | 7   | 17  | 101 | 0.474            | 0.077 | 0.957          | 20.078                     |
| 联合校准法     | 0.5   | 58  | 33  | 16  | 20  | 1.230            | 0.542 | 1.736          | 9.799                      |
|           | 1.0   | 37  | 32  | 25  | 33  | 1.113            | 0.394 | 0.688          | 10.609                     |
|           | 2.5   | 27  | 23  | 27  | 50  | 0.926            | 0.351 | 0.700          | 11.346                     |
|           | 5.0   | 9   | 15  | 27  | 76  | 0.667            | 0.176 | 0.769          | 13.818                     |
|           | 7.5   | 5   | 8   | 23  | 91  | 0.464            | 0.139 | 0.868          | 14.514                     |
|           | 10.0  | 3   | 7   | 21  | 96  | 0.417            | 0.097 | 0.855          | 15.556                     |
|           | 12.5  | 2   | 6   | 17  | 102 | 0.421            | 0.080 | 0.995          | 16.166                     |
| 最优插值校准法   | 0.5   | 59  | 33  | 15  | 20  | 1.243            | 0.551 | 1.668          | 9.804                      |
|           | 1.0   | 38  | 33  | 24  | 32  | 1.145            | 0.400 | 0.705          | 10.619                     |
|           | 2.5   | 27  | 23  | 27  | 50  | 0.926            | 0.351 | 0.694          | 11.347                     |
|           | 5.0   | 9   | 13  | 27  | 78  | 0.611            | 0.184 | 0.762          | 12.820                     |
|           | 7.5   | 5   | 9   | 23  | 90  | 0.500            | 0.135 | 0.867          | 13.513                     |
|           | 10.0  | 3   | 8   | 21  | 95  | 0.458            | 0.094 | 0.853          | 14.558                     |
|           | 12.5  | 2   | 5   | 17  | 103 | 0.368            | 0.083 | 0.992          | 16.163                     |
| $Z-I$ 关系法 | 0.5   | 44  | 25  | 30  | 28  | 0.932            | 0.444 | 1.018          | 10.999                     |
|           | 1.0   | 13  | 22  | 49  | 43  | 0.565            | 0.155 | 0.746          | 11.981                     |
|           | 2.5   | 5   | 12  | 49  | 61  | 0.315            | 0.076 | 0.705          | 14.823                     |
|           | 5.0   | 1   | 8   | 35  | 83  | 0.250            | 0.023 | 0.277          | 17.549                     |
|           | 7.5   | 0   | 1   | 28  | 98  | 0.036            | 0     | 0              | 20.362                     |
|           | 10.0  | 0   | 1   | 24  | 102 | 0.042            | 0     | 0              | 22.438                     |
|           | 12.5  | 0   | 0   | 19  | 108 | 0                | 0     | 0              | 25.008                     |
| 变分法       | 0.5   | 45  | 35  | 29  | 18  | 1.081            | 0.413 | 2.145          | 10.704                     |
|           | 1.0   | 31  | 33  | 31  | 32  | 1.032            | 0.326 | 1.946          | 11.524                     |
|           | 2.5   | 28  | 28  | 26  | 45  | 1.037            | 0.341 | 1.169          | 12.229                     |
|           | 5.0   | 15  | 22  | 21  | 69  | 1.028            | 0.259 | 1.380          | 14.781                     |
|           | 7.5   | 10  | 19  | 18  | 80  | 1.038            | 0.213 | 1.259          | 16.549                     |
|           | 10.0  | 9   | 16  | 15  | 87  | 1.042            | 0.225 | 1.290          | 17.623                     |
|           | 12.5  | 9   | 13  | 10  | 95  | 1.158            | 0.281 | 1.159          | 19.244                     |
| 卡尔曼-变分法   | 0.5   | 60  | 30  | 14  | 23  | 1.216            | 0.577 | 2.153          | 10.657                     |
|           | 1.0   | 42  | 29  | 20  | 36  | 1.145            | 0.462 | 1.025          | 11.464                     |
|           | 2.5   | 21  | 24  | 33  | 49  | 0.833            | 0.269 | 1.171          | 12.160                     |
|           | 5.0   | 8   | 20  | 28  | 71  | 0.777            | 0.143 | 0.797          | 14.693                     |
|           | 7.5   | 4   | 10  | 24  | 89  | 0.500            | 0.050 | 0.957          | 16.463                     |
|           | 10.0  | 3   | 9   | 21  | 94  | 0.542            | 0.057 | 0.957          | 17.546                     |
|           | 12.5  | 2   | 7   | 17  | 101 | 0.474            | 0.077 | 0.957          | 19.078                     |

### 3 结果分析

在表1中,有6个时次的1 h雨量达到12.5 mm阈值的站数仍在10站以上,因此将这6个时次作为第1组进行统计;其余时次的1 h雨量达到10站以上的阈值最多只到5.0 mm,因此将这些时次全部归入第2组进行统计;最后再对所有时次进行统计。可见,第1组代表的是雨强较大的降水过程,第2组代表的是雨强较小的降水过程。图3给出了评估结果。

在雨强较大的降水中(以下简称第1组,见图3a),除变分方法一直偏大以外,其他方法,对0.5 mm阈值的 $B_{\text{ias}}$ 均大于1,说明雷达得到的面降水量大于实际(雨量计)的面降水量。但随着阈值增加, $Z-I$ 关系法的 $B_{\text{ias}}$ 迅速减小,在1.5 mm左右开始小于1,到12.5 mm时已减小到0.2以下,说明用 $Z-I$ 关系法得到的大于1.5 mm雨强的降水范围小于实际的大于1.5 mm雨强的降水的范围,并且雨强越大, $Z-I$ 关系法得到的降水范围与实际的降水范围相差越大。其余5种方法在4.0 mm阈值左右 $B_{\text{ias}}$ 约为1,之后虽略有降低,但直到12.5 mm时仍在0.6左右,说明这5种方法得到的5.0 mm以上的降水范围比实际的降水范围稍小。在所有方法中,卡尔曼最优法得到的结果最好,变分法与卡尔曼滤波法基本上成负相关,所以得到的卡尔曼变分法结果与最优插值法相当。在雨强较小的降水中(以下简称第2组,见图3b),所有方法的 $B_{\text{ias}}$ 均大于1,且 $B_{\text{ias}}$ 的值比第一组中对应阈值的值要大,在2.5 mm处 $B_{\text{ias}}$ 达到最大。说明在雨强较小的降水中,所有方法得到的降水范围都大于实际的降水范围, $Z-I$ 关系法尤为严重。平均而言(见图3c),除变分法得到的降水总范围一直偏高外,其他方法对降水总范围的计算均是在小阈值时偏高,大阈值时偏低,除 $Z-I$ 关系法外的4种方法对较强降水范围(如6.0 mm以上)的计算与实际相比稍有偏低,但还是较为接近,而 $Z-I$ 关系法对较强降水范围(如6.0 mm以上)的计算偏低相当严重。分析造成图3的结果的原因,由于雷达观测到的回波位于高空,水滴在降落过程中由于蒸发作用不一定能降落到地面,较小的水滴可能完全蒸发而根本不能降落到地面,较大的水滴由于蒸发作用而变小,因此,对较低的阈值(如5.0 mm以下)的降水范围的计算就会偏高。各种评估方法对参数的选取关系很大,在变分方法中,地面雨量计和高空雷达观测值的对比参数是很重要的。 $Z-I$ 关系法对较弱降水范围(如5.0 mm以下)的计算偏高较为严重而对较强降水范围(如6.0 mm以上)的计算偏低相当严重是经验 $Z-I$ 关系的系数固定的原因。除 $Z-I$ 关系法外的4种方法由于用地面雨量计进行了校准,因而都优于 $Z-I$ 关系法。

在所有方法中, $T$ 评分随阈值的增加而降低。对第1组而言(见图3d),卡尔曼最优校准法和最优插值校准法的 $T$ 评分最高, $Z-I$ 关系法的 $T$ 评分最低。其他4种依次是:卡尔曼变分法、变分法、卡尔曼滤波校准法和平均校准法,但卡尔曼滤波校准法和平均校准法的曲线在2.5 mm和10.0 mm之间,前者的 $T$ 评分低于后者的 $T$ 评分,这说明在雨强较大的降水过程中,卡尔曼最优校准法和最优插值校准法得出的降水量与实际降水量相比,在位置的符合程度上好于卡尔曼滤波校准法和平均校准法,而卡尔曼滤波校准法和平均校准法又好于 $Z-I$ 关系法。但是,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,说明降水强度越大,对强降水中心的估测偏离越大。对第2组而言(见图3e),卡尔曼最优校准法和最优插值校准法的 $T$ 评分最高, $Z-I$ 关系法最差。说明在降水强度较小的过程中,卡尔曼最优校准法和最优插值校准法得出的降水量与实际降水量相比,在位置的符合程度上好于其他5种方法。平均而言(见图3f),卡尔曼最优校准法和最优插值校准法得出的降水量与实际降水量相比,在位置的符合程度上好于卡尔曼变分校准法、卡尔曼滤波校准法,而他们

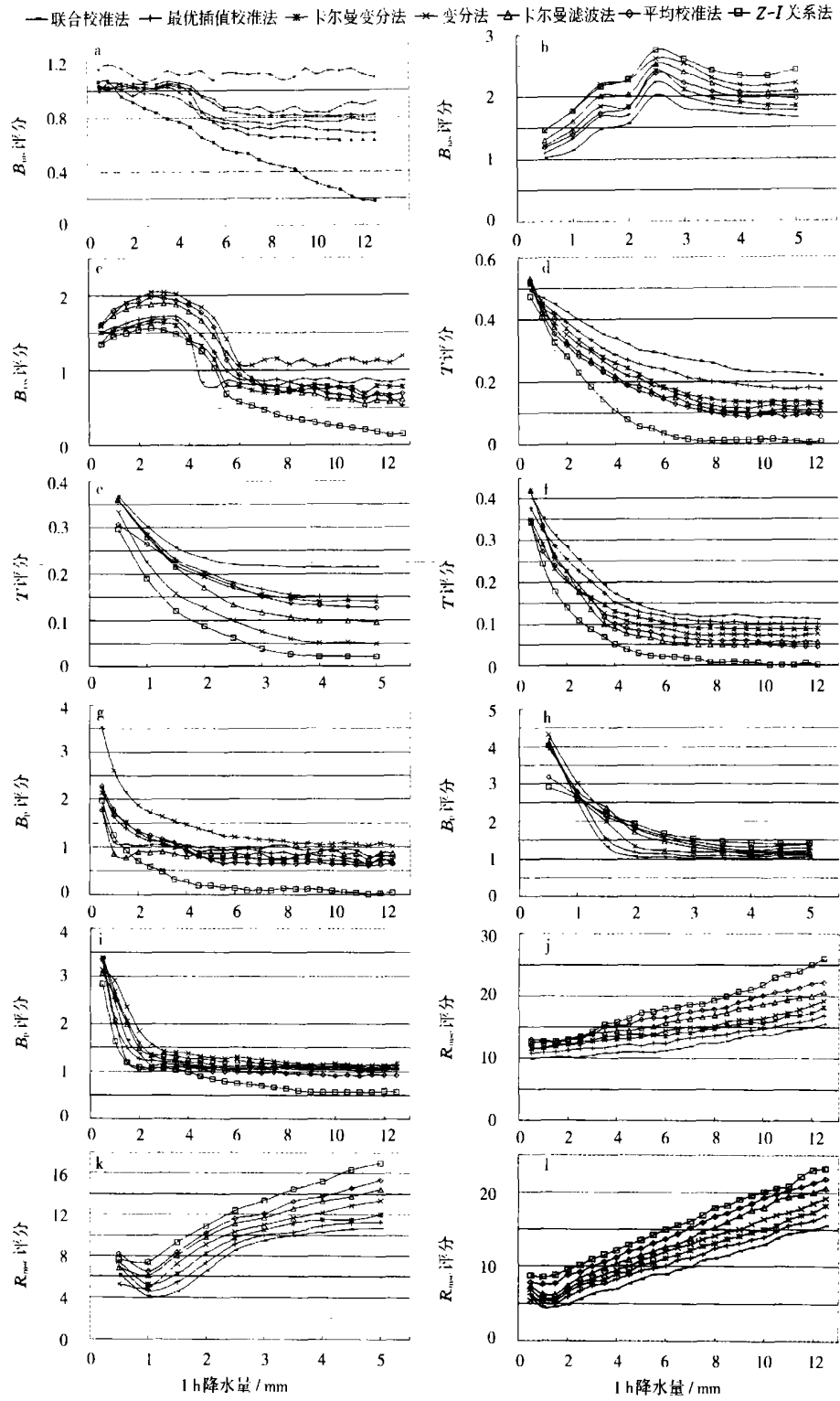


图 3 各组的  $B_{iss}$ ,  $T$ ,  $B_p$ ,  $R_{mse}$  评分

a. 第 1 组的  $B_{iss}$  评分结果; b. 第 2 组的  $B_{iss}$  评分结果; c. 所有时次的  $B_{iss}$  评分结果;  
d. 第 1 组的平均  $T$  评分结果; e. 第 2 组的平均  $T$  评分结果; f. 所有时次的平均  $T$  评分结果;

g. 第1组的平均 $B_p$ 值; h. 第2组的平均 $B_p$ 值; i. 所有时次的平均 $B_p$ 值;  
j. 第1组的平均 $R_{mse}$ 值; k. 第2组的平均 $R_{mse}$ 值; l. 所有时次的平均 $R_{mse}$ 值

Fig. 3  $B_{ias}$ ,  $T$ ,  $B_p$ ,  $R_{mse}$  grading of each group

- a.  $B_{ias}$  grading results for the first group; b.  $B_{ias}$  grading results for the second group;  
c.  $B_{ias}$  grading results for all time levels; d.  $T$  grading results for the first group;  
e. Average  $T$  grading results for the second group; f. Average  $T$  grading results for all time levels;  
g. Average  $B_p$  for the first group; h. Average  $B_p$  for the second group;  
i. Average  $B_p$  for all time levels; j. Average  $R_{mse}$  for the first group;  
k. Average  $R_{mse}$  for the second group; l. Average  $R_{mse}$  for all time levels

又好于平均校准法、 $Z-I$ 关系法。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,即降水强度越大,对强降水中心的估测偏离越大。分析造成图3d-f的结果的原因,由于 $Z-I$ 关系法没有进行雨量计联合校准,其系数又固定,在位置的符合程度上必然低于其他进行雨量计联合校准的方法。由于最优插值用地面雨量计场作为真值场并采用均方差最小意义上的最优线性插值,避免了一般加权方案的任意性,变分法是雷达和地面雨量计场进行曲面拟合得到更佳的降水量分布场,由于雷达和雨量计各自的不足、雷达和雨量计匹配的缺陷以及雷达和雨量计对比参数的选取等,从而造成了评估的误差。而平均法和卡尔曼滤波法都只考虑了平均偏差,因此,最优插值校准法得出的降水量在位置的符合程度上优于卡尔曼滤波校准法和平均校准法。

对第1组而言(见图3g),在雷达值和观测值都达到某一阈值的站点中,对于0.5 mm 阈值,除变分法外,其他方法的雷达值与观测值相比均偏高,对于1.0 mm 以后的阈值, $Z-I$ 关系法偏低,其余方法也有一定的偏低,但总的说来还可以。对第2组而言(见图3h),所有方法的雷达值与观测值相比均偏高,对于1.5 mm 以后的阈值,卡尔曼最优插值法和最优插值校准法的 $B_p$ 接近于1,其余方法偏高, $Z-I$ 关系法偏高程度稍大。平均而言(见图3i),在2.0 mm 以后,联合校准法和最优插值校准法的 $B_p$ 都接近于1,卡尔曼滤波校准法和平均校准法的 $B_p$ 从4左右逐渐接近1, $Z-I$ 关系法从5.0 mm 左右降到1以下。说明在雷达值和预报值都达到某一阈值的站点中,雷达值与观测值相比,除 $Z-I$ 关系法有时会有偏低外,所有方法普遍偏高。这也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不一定能降落到地面的原因造成。

在第1组中(见图3j),对所有阈值、所有方法, $R_{mse}$ 均随阈值的增加而增大,但卡尔曼最优插值校准法和最优插值校准法的 $R_{mse}$ 小于卡尔曼变分校准法、变分法、卡尔曼滤波校准法和平均校准法的 $R_{mse}$ ,而 $Z-I$ 关系法的 $R_{mse}$ 最大。在第2组中(见图3k),卡尔曼最优插值校准法和最优插值校准法的 $R_{mse}$ 最小。平均而言(见图3l),也是卡尔曼最优插值校准法和最优插值校准法的 $R_{mse}$ 小于卡尔曼变分法、变分法、卡尔曼滤波校准法和平均校准法的 $R_{mse}$ ,而 $Z-I$ 关系法的 $R_{mse}$ 最大。说明卡尔曼最优插值校准法和最优插值校准法得出的降水量与雨量计值相比,计算误差最小,极端的偏低或偏高也较小,因而计算精度最高,卡尔曼滤波校准法和平均校准法的计算精度低于联合校准法和最优插值校准法, $Z-I$ 关系法的精度最低。

4 小 结

(1) 所有方法对降水总范围(0.5 mm 以上)的计算均偏高,除 $Z-I$ 关系法外的6种方法对较强降水范围(如7.5 mm 以上)的计算与实际相比稍有偏低,但还是较为接近,而 $Z-I$ 关系法

对较强降水范围(如 7.5 mm 以上)的计算偏低相当严重。(2) 卡尔曼最优插值校准法和最优插值校准法得出的降水量与实际降水量相比,在位置的符合程度上好于其他 6 种校准法,其中  $Z-I$  关系法最差。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,即降水强度越大,对强降水中心的估测偏离越大。(3) 在雷达值和预报值都达到某一阈值的站点中,雷达值与观测值相比,除  $Z-I$  关系法有时会有偏低外,所有方法普遍偏高。(4) 卡尔曼最优校准法和最优插值校准法得出的降水量与雨量计值相比,计算精度最高,卡尔曼滤波校准法和平均校准法的计算精度低于联合校准法和最优插值校准法, $Z-I$  关系法的精度最低。(5) 本文用到的各种方法的参数,都是前人们总结出的经验参数,有必要在调节各个参数的基础上,使各种方法都工作在最优状态下,以进一步比较各种方法的优劣。

## 参考文献:

- [1] Brands F A. Rainfall measurements with radar in "Next generation weather radar"[C]. Meteorological Institute of China, 1985: 61-70.
- [2] Marks F D. Probability matched  $Z-R$  relations for hurricanes from aircraft observations[R]. 25th Conference on Radar Met, 1991: 778-781.
- [3] Rosenfeld D. Method to relate observed radar reflectivity to surface rainfall based on intensity distributions[R]. 25th Conference on Radar Met, 1991: 836-839.
- [4] Barnston A G. An empirical method of estimating raingage and radar rainfall measurement bias and resolution[J]. J Appl Meteor, 1991, 30(3): 282-296.
- [5] Ahnert P A. Kalman filter estimation of radar-rainfall field bias[R]. 24th Conference on Radar Met, 1986: 33-37.
- [6] Seaman R S. Some read data tests of the Interpolation accuracy of Bratseth's successive correction method[J]. Tellus, 1988, 40(1): 173-176.
- [7] Sasaki Y. Some basic formalisms in numerical variational analysis[J]. Mon Wea Rev, 1970, 98(2): 875-883.
- [8] Brian A C, Clifford F M, Kenneth J W. MM 5 precipitation verification over the Pacific Northwest during the 1997-99 cool seasons[J]. Wea Forecasting, 2000, 15(2): 730-744.
- [9] 伍志方. 用 WSR-81S 型数字化天气雷达测定区域降水量及其校准方法[D]. 南京: 南京气象学院大气物理系, 1988.

# Evaluation of the Precision of Weather Radar Rainfall Estimation Algorithms

HE Yu-xiang, ZHANG Ya-ping,  
LIU Shu-yan, GU Song-shan

(Department of Electronic Engineering, NUIST, Nanjing 210044, China)

**Abstract:** Precipitation on ordered grid point, which is obtained from the Radar Estimating Precipitation model (REP) of Huanghe River and Huaihe River, is compared with the in situ data of a raingauge network. Results show that if the value of ground raingauge is taken as real value, then the optimal interpolation and joint calibration methods have the least root mean square errors, while the results of variational method are not very well due to parameter choosing. The calculating precision of Kalman filter method and average method is lower than the joint calibration method and optimal interpolation method. The method of  $Z-I$  has the largest root mean square errors.

**Key words:** weather radar; regional precipitation; evaluation of methods