

# 变分法在校准雷达定量估测降水中的应用\*

邓雪娇 黄浩辉 吴 兑

(广州热带海洋气象研究所, 广州 510080)

雨量计可以直接测量单点雨强随时间的连续变化, 测量精度较高, 但雨量计站网的密度不够, 往往漏掉强降水、暴雨中心。雷达能实时探测云和降水结构及系统发生、发展演变情况, 能迅速提供一定区域的实时降水情况, 但雷达测量误差较大, 测定局地降水量精度不高, 因此雨量计和雷达进行点面结合, 采用一定的数学方法将雨量计单点测量精度较高和雷达能测量降水时空分布的优点结合起来, 利用雨量计测量校准雷达定量测量降水, 可获得比单纯用雷达方法在精度上有很大提高的降水测量结果。

## 1 变分法校准雷达定量估测降水的原理

将雷达探测区网格化, 在网格点  $(i, j)$  上,  $R^a_{(i, j)}$  表示分析雨量值,  $R^r_{(i, j)}$  表示雷达初估雨量值,  $R^g_{(i, j)}$  表示雨量计测得的降水值, 构造如下的泛函:

$$J[R^a_{(i, j)}] = \iint_{\sigma} \{ \alpha (R^a_{(i, j)} - R^g_{(i, j)})^2 + \beta (R^a_{(i, j)} - R^r_{(i, j)})^2 + \lambda [ (\frac{\partial R^r_{(i, j)}}{\partial x} - \frac{\partial R^a_{(i, j)}}{\partial x})^2 + (\frac{\partial R^r_{(i, j)}}{\partial y} - \frac{\partial R^a_{(i, j)}}{\partial y})^2 ] \} dx dy \quad (1)$$

上式变分方程有三项调整项, 第一项表明分析场尽量与雨量计值靠近, 第二项表明分析场与雷达初估场的偏差最小, 第三项表明分析场与雷达场的水平梯度尽量一致, 这样求取的分析场既满足与雨量计值接近同时又保持雷达探测到的降水形势分布, 解上式变分方程求得分析场。

因为并不是所有格点上都有雨量计测值, 所以根据分析场中雨量计网的测值进行客观分析得到  $R^g_{(i, j)}$  场。本文雨量计资料的客观分析采用 Barnes 方案, 客观分析的内插方案对分析结果十分敏感, 另外,  $\alpha, \beta, \lambda$  参数的选取对分析结果也很敏感。在雨量计比较密的地方, 客观分析的结果比较可靠,  $\alpha$  的权重取相对大值, 取信于地面雨量计的降水分布场; 在雨量计比较稀的地方, 客观分析的结果精度不高,  $\beta$  的权重取相对大值, 取信于雷达的降水形势场。这样由雷达反射因子与降水强度  $Z-R$  关系式转换得到的雷达初估场的精度直接影响分析场的精度, 特别是热带沿海地区及洋面, 雨量计稀少, 雨量分析场的精度依赖于雷达的测雨能力, 因此, 选用何种  $Z-R$  关系是关键问题, 本文采用珠江三角洲历史统计的  $Z-R$  关系。

## 2 个例试验

(1) 1997 年 5 月 8 日特大暴雨分析 受低压槽影响, 广州地区从化、花都和清远市 1997 年 5 月 8 日凌晨开始降特大暴雨。本文利用香港雷达资料 (3km CAPP) 和广东省中尺度自动站网资料, 对这次降水过程进行分析研究, 虽然地面的雨区与雷达探测的雨区基本吻合, 但雨量计记录的强降水中心与雷达的强降水中心并不对应, 两者存在空间差。根据研究, 不同天气类型、不同降水性质、不同降水阶段丰水区的高度是不一样的。云雨的微物理过程十分复杂, 如对流云垂直结构不均匀, 层状云垂直结构中具有明显的  $0^\circ\text{C}$  层回波亮带等, 雨滴在下落过程中的重力分选、风垂直切变分选等作用说明雷达反射因子  $Z$  值的垂直分布是不均匀的, 所以用不同高度上的测量  $Z$  值作为地面的  $Z$  值来反演地面的降水会导致一定

\* 1998-06-18 收到, 1999-08-23 收到再改稿。

的误差。

这次特大暴雨过程是从凌晨开始,雨势约集中在 13h 内,地面雨量站及雨情报告表明 04:00~07:00 的雨势强大,07:00 后雨强相对较小,但是从 3km CAPPI 回波情况来看,07:00 后的回波总的来说比 07:00 前的还要强。前人的工作经验表明地面的降水与近地面的回波或高空的丰水区比较一致。对应地面的降水量,高空类似是“水库源”的作用。因此在变分调整中,参数的选取偏向于取地面的权重较大些,高空的权重取相对小值。对比参数 1( $\alpha=0.6, \beta=0.4, \lambda=0.2$ )和参数 2( $\alpha=0.8, \beta=0.2, \lambda=0.2$ )变分调整后的降水分布,总的说来,变分调整后的场结合了地面和高空的降水形势分布。在有雨量计的地方,分析值与雨量计测值接近,保持了雨量计之间雷达探测的降水形势,整个分析场的值及降水强中心得到调整。变分调整参数的选取对分析结果影响很大,参数 2 的结果更加趋向于地面雨量计的降水分布,对雷达估测的降水削弱许多,参数 2 对雷达降水强中心的削弱十分明显,说明变分方案中参数的选取是关键,在具体应用中  $\alpha/\beta$  的值选取  $4/1 \sim 3/2$  之间为宜,对于本文实例,鉴于雨量计和雷达资料的代表性问题,认为参数 2 的结果比较客观。

(2) 误差分析 为了比较变分校准后雷达测定区域降水量的精度,我们详细分析了 1997 年 5 月 8 日 04:00~08:00 的降水情况(降水区雨量计网密度约为 1 个雨量计/ $1412 \text{ km}^2$ ,把雨量计网所测的区域降水量作为真值)。分析表明,雷达估测的降水量普遍偏小,04:00~05:00,06:00~07:00 地面雨势较强,雷达与雨量计的测雨偏差较大,分别达 56%、72%。经变分校准后精度有较大的改进,分别为 18%、27% (参数 1)和 9.9%、14.8% (参数 2),由分析对比可见参数 2 的结果较好。

### 3 结 语

变分法在校准雷达定量估测降水中的应用实现了雨量计和雷达点与面的结合,变分法校准时不但把雷达的探测结果造型成雨量计的结果,而且保留了雨量计之间雷达探测到的降水形势,说明了联合雨量计网和雷达进行降水估测的优越性;在变分计算方案中,分析结果对雨量计客观分析方案和变分调整参数的选取十分敏感,因为受获取资料客观条件的限制,本文未能分析采用不同高度雷达产品的计算结果,雷达初估场的选取应该运用何种产品以减小初始误差,有待累积资料进一步研究讨论。