

变分技术在校准数字化天气雷达定量估测降水中的应用^①

王叶红¹ 崔春光¹ 赵玉春² 闵爱荣¹

(1. 武汉暴雨研究所, 武汉 430074) (2. 武汉中心气象台)

提 要

利用 1998 年 7 月 20~22 日鄂东地区持续性特大暴雨的数字化天气雷达反演资料和雨量计网测量资料, 采用变分技术校准雷达定量估测降水, 结果表明: 经变分法校准后的雷达估测降水不仅保留了雷达探测到的降水形势, 并且与雨量计网测定的降水量之间的误差有明显的改进。

关键词: 变分法 数字化天气雷达 降水量

引 言

雨量计和雷达测定降水量各有所长。雨量计可以直接测量单点雨强随时间的连续变化, 局地测量精度高, 然而在站点密度和降水非均匀性的影响下, 雨量计网往往漏掉强降水中心。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, 但误差较大。为了提高雷达测量精度, 气象学家们提出了各种校准方法, 其中将雨量计和雷达进行点面结合, 利用平面拟合技术, 采用一定的数学方法将两者优点结合起来, 成为校准雷达估测降水行之有效的方

法之一。Wilson^[1]早在 70 年代初就提出了平均校准方法, 结果比较理想, 但遗憾的是降水分布场被平滑了。戴铁丕等^[2]在此基础上又提出了“平均订正因子校准法”的新思路。这两种方法具有简便、校准后区域总降水量较准确等优点, 但会使强、弱降水中心平滑, 导致降水分布场失真。Sasaki 把变分法引入气象领域后^[3], Ninomiya 等^[4]运用变分法原理, 使用雷达和雨量计观测资料做暴雨的客观分析, 结果令人满意。之后, 变分法被我国气象学者广泛应用于校准雷达定量估测降水^[5~8], 取得了大量研究成果, 但我国对这个课题的研究从总体上来讲还不充分, 特别是局地性非常强的强降水还有待于进一

1 变分法校准雷达定量估测降水的原理和方法

由变分原理可知, 在任意区域 R 上函数 $\phi(x, y, z, t)$ 的泛函 $J[\phi] = \iiint_R L(\phi, \phi_t, \phi_x, \phi_y, \phi_z) dx dy dz dt$ 的极值问题最终都等价于求解一个 Euler 方程^[9] $L_\phi - \frac{\partial L_{\phi_t}}{\partial t} - \frac{\partial L_{\phi_x}}{\partial x} - \frac{\partial L_{\phi_y}}{\partial y} - \frac{\partial L_{\phi_z}}{\partial z} = 0$ 。设有如下泛函^[7]

$$J = \sum_i \sum_j \left\{ \alpha (CR - \tilde{CR})^2 + \lambda \left[\left(\frac{\partial}{\partial x} CR \right)^2 + \left(\frac{\partial}{\partial y} CR \right)^2 \right] \right\} \quad (1)$$

其中:

$\tilde{CR}(i, j) = PS_g(i, j) - PS_r(i, j)$ (2)
 PS_g 、 PS_r 分别为雨量计测量降水量和雷达探测降水量, $\tilde{CR}(i, j)$ 为雨量计—雷达订正因子的实测值; $CR(i, j)$ 为调整后的订正因子; α 、 λ 分别为观测权重和约束权重。

为使调整的程度达到最小, 要求 J 达最小, 因此需

① 国家重点基础研究发展规划项目“我国重大气候和天气灾害形成机理与预测理论研究”G1998040910 号课题资助

$$\frac{\partial J}{\partial CR} = 0 \quad (3)$$

这样,得到如下 Euler 方程

$$\alpha(CR - \tilde{CR}) - \lambda \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} CR + \frac{\partial^2}{\partial y^2} CR \right) = 0 \quad (4)$$

采用超松弛迭代法求解式(4)得到订正因子场 $CR(i, j)$, 可知经变分校准后, 网格点 (i, j) 上雷达测量的降水量为

$$PS(i, j) = PS_r(i, j) + CR(i, j) \quad (5)$$

2 雷达和雨量计测量降水量资料的预处理

2.1 雨量计网测量到的降水量

采用湖北省 1998 年 7 月 20 日 21 时、21 日 07 及 08 时地面 76 个雨量计测站测量到的逐小时降水量, 利用 Cressman 内插函数将站点值插值到经纬网格点上, 格距为 0.05 个经纬度。

2.2 雷达探测到的降水量

数字化天气雷达图的直角坐标是一种斜轴等距离方位投影方式^[10], 它与客观分析的雨量计网的直角坐标方式不同, 因此首先对雷达和雨量计网进行坐标同化, 将雷达统一到雨量计网的直角坐标系中, 然后进行客观分析。

采用武汉中心气象台 WSR-81S 型数字化天气雷达反射因子资料, 该资料经处理转换成雨量值。资料大小为 432×432 , 格距为 $2\text{km} \times 2\text{km}$, 雷达站位于中心点。

设雷达图的直角坐标表示为 (x, y) , 对应的地理坐标表示为 (ϕ, λ) , 两者关系为^[10]:

$$\phi = \arcsin \left[\cos \left(\frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{R} \right) \cdot \sin \phi_r + \sin \left(\frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{R} \right) \cdot \cos \phi_r \cdot \frac{y}{\sqrt{x^2 + y^2}} \right] \quad (6)$$

$$\lambda = \arcsin \left[\frac{x \cdot \sin \left(\frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{R} \right)}{\sqrt{x^2 + y^2} \cdot \cos \phi} \right] + \lambda_r \quad (7)$$

式中 ϕ_r, λ_r 为雷达站纬度和经度, R 为地球半径, (x, y) 为雷达图任意点相对于雷达站的横纵坐标。

求出雷达图的地理坐标 (ϕ, λ) 后, 利用最优内插法^[7]将雷达探测到的降水量值内

插到分析区域内各个网格点上去。

3 个例分析

1998 年 7 月 20~22 日, 湖北省南部发生了历史罕见的连续两天的特大暴雨过程。特大暴雨区有两个, 一是鄂东南特大暴雨区, 沿长江呈西北-东南走向, 暴雨中心在黄石市和武汉市, 分别达到 499mm 和 457mm; 另一个特大暴雨区在鄂西南的南部, 只有来凤县出现 343mm 特大暴雨。湖北省南部其他地区雨量不大。可见, 这次特大暴雨过程具有强度大、持续时间长, 雨量分布极不均匀, 局地性强等特点^[11,12]。本文仅分析鄂东南的特大暴雨区。

3.1 1998 年 7 月 20 日 20 时 00 分~21 时 00 分

图 1a、b、c 分别为 1998 年 7 月 20 日 20

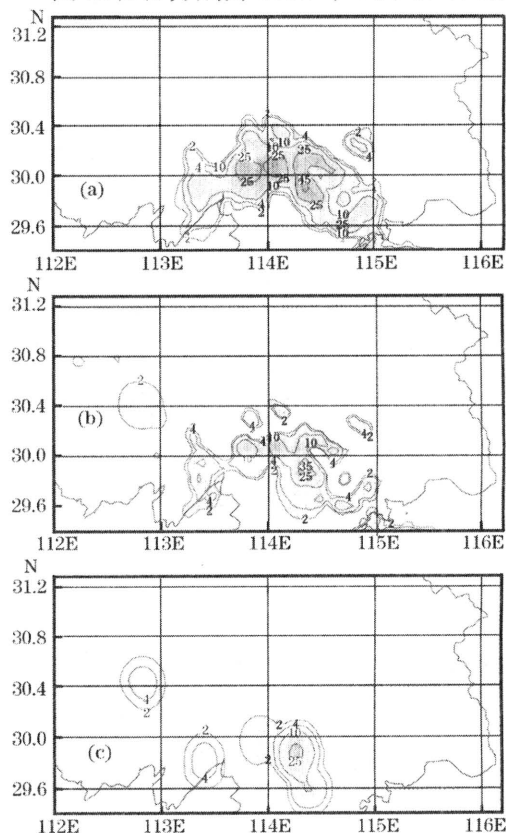


图 1 1998 年 7 月 20 日 21 时 (a) 雷达估测降水; (b) 变分法校准雷达估测降水; (c) 雨量计测量降水 (阴影区为大于 $2\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 的闭合等雨量线)

时~21 时 00 分未经过校准的雷达估测降水

场,经过变分校准后降水场和雨量计网测量值得到的区域降水量分布形势图。雷达探测到的降水分布形势中(图 1a),有一条长约 270km、宽约 55km 的倒“V”字型主降水带(大于 $2\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 的闭合等雨量线),其雨带走向与洪湖市至阳新市的长江河谷中喇叭口地形一致(图略)。其内降水很不均匀,有多个 $\geq 10\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 的强降水中心,中、小尺度结构非常明显。特别在 30°N 排列有三个 $\geq 25\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 的强降水中心(最大强降水中心为 $45\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$,位于咸宁以东),而雨量计测量(图 1c)只有 114.3°E 附近的一条降水带比较明显。同时雨量计测量的降水分布(图 1c)没有雷达探测的(图 1a)所呈现的“雨团”结构。

变分前、后雷达估测降水分布形势(图 1a、图 1b)大体相似,降水中心基本吻合。此外,变分后雷达估测降水(图 1b)中心强度与雨量计测量值(图 1c)很接近。

3.2 1998 年 7 月 21 日 06 时 00 分~07 时 00 分

由雷达探测降水分布形势(图 2a)可见,这次由对流层低层的切变线和切变线上低涡东移及低空西南风急流共同影响^[11]造成的降水量分布极不均匀,大致有 5 个降水中心,强降水中心位于汉口以东,最大降水在 $90\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 以上。在 $30\sim 30.5^\circ\text{N}$ 之间,排列有 4 个强降雨团(强降雨团定义为 $10\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 闭合等雨量线),中、小尺度结构非常明显。而在图 2c(雨量计测量)中,呈西北-东南走向的降水带的雨团分布与图 2a 有较大的差别,强降水中心也比雷达测得的少,为 $80\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 以上,图 2c 未能反映出中、小尺度结构的雨团。引起这些差异的基本原因是雨量计站网密度不够,测不到这些分布极不均匀的中、小尺度天气系统的降水。另外,雷达测得的强降水中心比雨量计测得的偏东。这是由于雷达测量到的是在空间某高度上的降水,雨量计测到的则是地面上的降水,两种测量取样空间不一致。在降水移动系统快时,造成了降水强中心位置的测量误差。在武穴、黄梅附近,雷达没有探测到大于 $10\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 的降水雨团,这可能是由于雷达的有效探测区域的限制所引起的。

变分校准前、后(图 2a 与 2b)雷达探测

降水量分布形势大致相似,变分后几个强降雨团仍存在,但降水量分布在数值上已接近雨量计网测得的降水量值,强降水中心位置也与雨量计测量的更接近。另外,从图 2b 还可看到,在图 2c 上,雨量计网没有测到的中、小尺度降水雨团,经变分后已有这几个雨团;另外,在图 2a 的西南方向雷达没有探测到的降水雨团,现在已有了降水量值,这从另一侧面反映了变分法校准的优越性:不仅能将雷达探测到的结果接近雨量计测量到的结果,而且保留了没有雨量计的地方雷达探测到的降水变化。

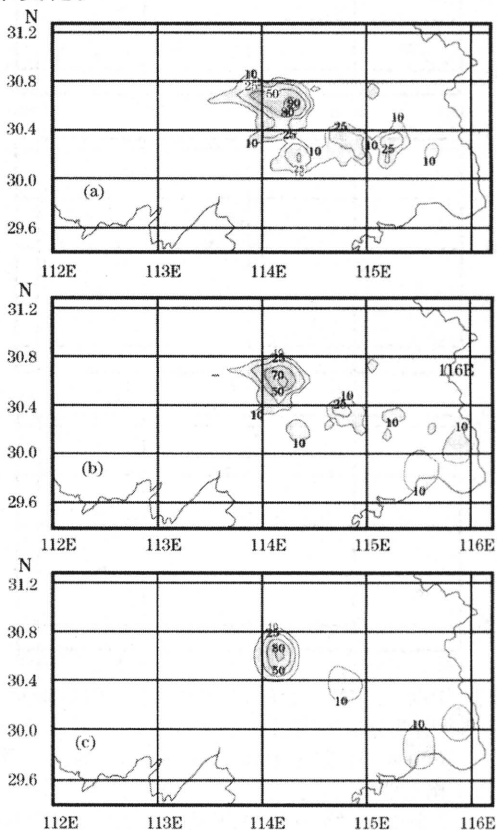


图 2 1998 年 7 月 21 日 07 时 (a) 雷达估测降水; (b) 变分法校准雷达估测降水; (c) 雨量计测量降水 (阴影区为大于 $10\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 的闭合等雨量线)

3.3 1998 年 7 月 21 日 07 时 00 分~08 时 00 分

比较雷达探测降水(图 3a)和雨量计测量降水(图 3c)分布形势可以发现,尽管这个时段降水量分布比较均匀,雷达和雨量计探

测到的降水量分布形势差异不大,但从总体上看,雷达探测到的降水分布中、小尺度结构仍比雨量计测得的多,强降水中心较雨量计测得的偏强、位置偏南。经变分校准后(图 3b);降水量分布形势与雷达探测(图 3a)到的比较相似,而降水量分布在数值上仍旧接近雨量计网探测到的结果(图 3c)。

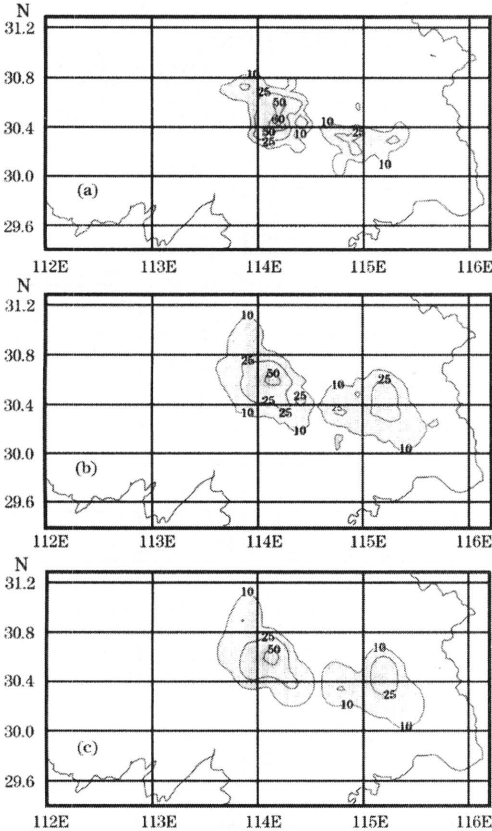


图 3 1998 年 7 月 21 日 08 时(a)雷达估测降水;(b)变分法校准雷达估测降水;(c)雨量计测量降水(阴影区为大于 $10\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 的闭合等雨量线)

三个时次的个例分析表明,雷达探测到的中、小尺度结构雨团总是比雨量计测量的多,而且由于雷达与雨量计测量空间取样不一致、降水系统移动快而造成了两者强降水振幅、位置的偏差。变分校准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了起来,不仅把雷达探测到的结果造型成雨量计测量的结果,而且保留了雨量计之间雷达探测到的降水的中、小尺度特征。

3.4 用变分法校准雷达测定区域降水量的误差

以雨量计网测量的降水量作为“真值”来衡量校准前、后雷达估测降水量的误差(见表 1)可见:①未校准时,雷达与雨量计测量差异较大,相对误差在 $71.4\% \sim 253.7\%$ 之间;②经变分法校准后,雷达探测降水的相对误差减小到 $15.0\% \sim 112.9\%$ 之间。平均相对误差由校准前的 142.4% 减小到 56.7% ,下降幅度达 $2/3$ 多。可见,经变分法校准后,雷达估测降水在精度上有很大提高。

表 1 用变分法校准雷达测定区域降水量精度/%

降水时间	1998.7.20	1998.7.21		三个时次平均相对误差
	19:00 ~20:00	06:00 ~07:00	07:00 ~08:00	
未校准雷达探测值	253.7	102.1	71.4	142.4
变分校准后的 雷达探测值	112.9	42.3	15.0	56.7

值得注意的是,以雨量计网测量值作为“真值”来衡量雷达估测降水的精度,本身就存在很大的误差。以 1998 年 7 月 20 日 21 时降水为例,该时次雷达与雨量计测量降水在分布形势上有很大差异(图 1a 及 1c),两者的相对误差高达 253.7% 。下面来分析一下误差的主要来源。除了雷达回波功率测量误差及雷达与雨量计空间取样不一致所造成的测量误差之外,雨量计网站密度不够是造成该时次雷达估测降水巨大误差的主要原因。图 1c 中,最大降水中心为 $25\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$,位于咸宁;而在图 1a 中,最大降水中心达 $45\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$,位于咸宁以东。对比后发现,两幅图中强降水中心位置的偏差,并不是由于降水系统移动快而造成的测量误差,而是由于雨量计网站密度不够,从而引起了强降水中心的“漏测”所造成的。另一方面,该时次雷达探测到的降水有很大一部分在位于西南侧的幕阜山上,那里没有雨量计测站,因而造成了雷达与雨量计测量结果的巨大差异。

基于以上分析,我们认为:利用雨量计来校准雷达探测结果时,可以利用卫星云图等作为辅助手段来考察雷达探测到的降水分布形势的可信度,以此作为变分校准时选择雷达探测资料权重系数的依据。

4 结论和讨论

(1)雨量计和雷达测量降水各有所长。雨量计局地测量准确,但站网分布密度不够,对于局地性强、尺度小、降水量分布极不均匀的强对流性降水,强降水中心往往被漏掉,不能准确反映雨区中降水强度分布和演变情况。雷达测量降水时空连续性好,能探测到小尺度的降水分布,但未校准时作定量测量降水误差大。

(2)变分法校准前后的雷达测值所反映的雨区形状、降水结构都基本吻合,这表明变分法校准雷达定量估测降水的实质是以雨量计来校准雷达,利用平面拟合技术,把雷达探测到的结果造型成雨量计测量的结果,且保留了雨量计之间雷达探测到的降水的中、小尺度特征。

(3)变分校准时,可以利用卫星云图等作为辅助手段来考察雷达探测到的降水分布形势的可信度,以此作为选择雷达和雨量计资料权重系数的依据。

(4)对鄂东1998年7月20~22日3个时次的降水分析表明,对降水量分布极不均匀的强对流性降水,变分法校准雷达测定区域降水量效果非常显著,使雷达测量降水的相对误差大大减小。

(5)由于客观条件的限制,以雨量计所测得的降水量作为“真值”来衡量变分法误差改

进的程度,本身就带有一定的误差。

参考文献

- 1 Wilson, J. W.. Radar Measurement of rainfall sammary. Bull, Amer, Soc., 1979, 60(9): 1048—1058.
- 2 戴铁丕,傅德胜. 天气雷达-雨量计网联合探测区域降水量的精度. 南京气象学院学报, 1990, 13(4): 592~597.
- 3 Sasaki, Y.. Some basic formulas in numerical variation analysis. Mon. Wea. Rev., 1970, 98: 875—883.
- 4 Ninomiya, K. And Akiyama, T.. Objective analysis of heavy rainfalls based on radar and gauge measurement. J. Meteor. Soc. Japan, 1978, 50: 206—210.
- 5 伍志芳等. 用变分法校准天气雷达测定区域降水量的数值计算和精度分析. 气象科学, 1989, 9(3).
- 6 傅德胜,戴铁丕. 变分法在校准天气雷达测定区域降水量中的应用. 南京气象学院学报, 1990, 13(4): 598~603.
- 7 张培昌,戴铁丕等. 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. 大气科学, 1992, 16(2): 248~256.
- 8 邓雪娇,黄浩辉等. 变分法在校准雷达定量估测降水中的应用. 应用气象学报, 2000, 11(2): 255~256.
- 9 刘式适,赵卫. 变分原理与大气波动的 Lagrange 函数. 大气科学, 1990, 14(3): 277~292.
- 10 万玉发,陈少林等. 雷达和卫星图像的坐标同化及其实现, 南京气象学院学报, 1990, 13(4): 638~643.
- 11 邓秋华,王登炎等. “98.7”鄂东南持续特大暴雨的分析. 暴雨·灾害, 1999, 3(1): 115~124.
- 12 胡伯威,崔春光,房春花. 1998年7月21~22日鄂东沿江连日特大暴雨成因探讨, 大气科学, 2001, 25(4): 479~491.

Application of Variational Method to Calibrating Precipitation Evaluated with Digital Weather Radar

Wang Yehong¹ Cui Chunguang¹ Zhao Yuchun² Min Airong¹

(1. Wuhan Heavy Rain Institute, 430074) (2. Wuhan Central Weather Office)

Abstract

With hourly special persisting rainstorm data from digital weather radar evaluations and gauge observations in the east of Hubei on the 20—22nd, July in 1998, the characteristics of radar-detecting precipitation calibrated by variational method is studied. Results prove that the radar estimations calibrated does not only keep the distribution condition of the rainfall before calibration, but also the errors from the comparison with gauge observations are improved remarkably.

Key Words: variational method digital weather radar precipitation