

基于雷达测雨的降水数据同化研究

李璐¹ 夏军^{1,2} 叶爱中¹ 张利平¹

(1. 武汉大学 水资源与水电工程科学国家重点实验室, 湖北 武汉 430072; 2. 中国科学院 地理科学与资源研究所 陆地水循环及地表过程重点实验室, 北京 100101)

摘要: 提出了基于雷达测雨数据的 R - G 联合法(即: 雷达 - 雨量计联合法)。雨量站的点雨量数据精度高, 雷达站测的数据空间分布合理。该方法的思想是: 结合两者的优点, 得到面上分布合理并且精度高的降水数据。该方法对雨量站分布密度要求不高, 受资料等客观条件的限制较小, 也无参数选取的限制, 更重要的是操作简单方便, 结果符合实际降雨情形, 在很多方面都优于国内外其他现有的利用雨量计资料订正雷达估测降水的方法。选择站网密度比较理想的湖北东部区域对各方法进行实际应用, 通过与传统数据同化方法的对比分析研究, 证明 R - G 联合法明显提高了降水分布形式的合理性和数据同化精度。

关键词: 数据同化; 雷达测雨; 空间分布; 降水

中图分类号: P332.1 **文献标识码:** A

降水是水文循环中的一个重要要素。降水的多少与其空间分布直接决定流域产流的多少。以前由于科技水平有限, 我们只能得到雨量站测得的点雨量数据, 为了得到流域面上的数据就必须通过数据同化技术。数据同化技术有时发挥了很重要的作用, 但都存在一定的缺陷。本文将进行详细分析。

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, 随着雷达技术在水文行业的运用, 我们能够获得更高精度的流域面雨量的空间分布形式, 以弥补传统数据同化方法计算得到的面雨量与实际雨量分布失真这一不足。

雷达联合雨量计估测区域降水分布, 可以实时给出降水的时空连续变化、瞬时雨强分布及降水总量等等^[1-3]。目前, 国内外利用雨量计资料订正雷达估测降水主要有: 平均校准法(系数法)、插值法和变分法等等^[4,5]。平均校准法起到一种平滑作用, 可能平滑掉强降水中心; 插值法将雷达探测区网格化, 采用线性内插公式, 其中最重要的就是权重因子 P_k 的取值, 最优插值就是寻找使分析场方差达最小值的 P_k 。在这些方法中以变分法效果最好, 但是在变分计算中, 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, 因此受资料客观条件的限制, 而且该法对地面雨量计站密度要求较高, 计算中涉及系数设置、边界处理和叠代方案等诸多问题^[6]。

本文提出雷达联合雨量计估测降水的 R - G 联合法来估测区域降水分布, 通过实测资料分析, 证明采用 R - G 联合法能达到较好的效果, 而此法对雨量站的密度和分布要求不太高, 计算简单。联合雨量站和雷达进行降水估测, 点与面的结合, 充分发挥各自的优点, 弥补不足, 是今后进行降水测量的业务方向。

1 雷达联合雨量计估测降水的方法

1.1 计算降水强度 I 的基本方法

可以利用反射率因子 Z 和降水强度 I 间的关系直接测量降水。由于

$$Z = \int_{D_{\min}}^{D_{\max}} N(D) D^6 dD$$
$$I = \frac{1}{6} \int_{D_{\min}}^{D_{\max}} N(D) D^3 V(D) dD$$

式中 D 为雨滴直径; D_{\min} 为雨滴的最小直径; D_{\max} 为雨滴的最大直径; $N(D)$ 为雨滴的分布密度; $V(D)$ 为雨滴的下落末速度; V 为雨滴水的密度。从上式可以看出 Z, I 都是 D 的函数, 所以 Z 和 I 存在着一定的函数关系, 假设为:

$$Z = AI^b$$
$$\bar{P}_r = CZ/R^2$$

因此只要知道了 $Z \sim I$ 关系, 就可以直接根据距雷达 R 处的平均回波功率来计算降水强度 I 。

1.2 $Z \sim I$ 关系的确定

根据理论推导可得 $Z \sim I$ 关系, 但是在一般的实际雷达定量测量降水中, 除参考理论关系外, 都根据当时当地的情况, 利用实测的滴谱资料, 具体统计 $Z \sim I$ 关系中的系数 A 和 b 值。现在工作中确定 $Z \sim I$ 关系的方法主要有: 实际统计的 $Z \sim I$ 关系及其变化和概率配对的气候 $Z \sim I$ 关系。

1.3 用雨量资料校准雷达估测降水

由上小节可知, 用 $Z \sim I$ 关系可得出雷达探测的降雨量值,

收稿日期: 2006 - 05 - 10

作者简介: 李璐, 女, 武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 博士研究生。

然后选出与地面有限站点对应的一系列雷达探测点,再将该流域的实测降雨量与对应的雷达探测降雨量作相关分析,再用实测值对雷达探测值进行校准,最后得到该流域所有网格点的降雨量数据。R-G联合法估测区域降雨的基本方法步骤如下:

(1) 假设在雷达探测区有 n 个雨量计。 $I_g(x, y)$, $I_r(x, y)$ 分别表示雨量计测值和对应的雷达估测值,由两组数据作线性回归分析,得到相关系数 r 。并定义校准系数 a 、 b 如下: $I_g(x, y) = a \times I_r(x, y) + b$,该式为 $I_g(x, y)$ 与 $I_r(x, y)$ 回归方程。

形如: $y = a + bx$,式中 x 为自变量, y 为倚变量。待定常数 a 、 b 由观测点与直线拟合最佳,通过最小二乘进行估计。最后得到如下形式的回归方程:

$$y - \bar{y} = r \frac{y - \bar{y}}{x - \bar{x}} (x - \bar{x})$$

$$x = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}$$

$$y = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

式中 s_x 、 s_y 分别为 x 、 y 系列的均方差; \bar{x} 、 \bar{y} 分别为 x 、 y 系列的均值; r 为相关系数,表示 x 、 y 两系列间的密切程度,计算式为:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}$$

此式称为 y 倚 x 的回归方程,即 $I_g(x, y)$ 倚 $I_r(x, y)$ 的回归方程,可得到校准系数 a 、 b 。

(2) 总体不相关 ($r = 0$) 的两变量,由于抽样原因,样本的相关系数不一定等于零。为此,需要对相关系数进行显著性检验^[11]。检验相关系数在一定的信度水平下进行,信度(计为 α) 是以概率的形式给出,一般取 $\alpha = 5\%$,对于给定的 n 值,就可从已制成的相关系数检验表中查取一个临界的相关系数 r_α 。只有当相关系数 $|r| > r_\alpha$ 时,可以认为两组数据是相关的,这时的校准系数 a 、 b 才有意义,才可继续进行数据同化;否则,无相关关系,计算得出的校准系数 a 、 b 无意义,则不能进行下一步计算。

(3) 用整个雷达探测场值 $I(x, y)$ 作为自变量,代入 $I_g(x, y)$ 倚 $I_r(x, y)$ 的回归方程中: $I_{g,r}(x, y) = a \times I(x, y) + b$ 便得到雷达探测区域降雨的订正分析场 $I_{g,r}(x, y)$ 。

1.4 检验方法和检验指标

本文在对几种方法进行空间效率比较时,采用了交叉检验法。该法基本思想是假定每一站点的降水量未知,都用周围站点的值来估算,计算估算值与实际观测值的误差。

为了比较不同插值方法的优劣,我们采用了以下 5 个指标来检验插值的效果:效率系数、相关系数、绝对误差、水量平衡系数和空间分布特征。

2 实例应用分析

2.1 资料

本文采用湖北东部区域 2003 年 6 月 26 日 14:00 的雨量计和雷达探测降水资料。该区域降雨量较大,计算误差相对较小,比较理想。实测雨量计是 6 h 记录 1 次数据,而雷达探测数据是每小时 1 次。本文选取了该区域中的雷达探测区中心的 54 个实测站点,并对这些站点的控制流域中的网格点进行插值计

算。

为了使雷达探测数据与雨量计数据保持一致,需要将雷达探测的 6 h 的数据进行累加。其中要特别注意的是,雷达探测的数据时间与实测站时间有 8 h 的时差,比如:雷达探测数据时间是 2003 年 6 月 26 日 6:00,而实际上是雨量计时间 2003 年 6 月 26 日 14:00。

2.2 计算及检验结果

(1) 计算结果图。采用软件 ArcView6.0,由各方法计算的结果作出区域的降雨量分布如图 1 至图 6。空间插值方法计算点降雨量需要其四周的实测站测值,所以实测站点的选取范围要比插值计算的网格区域稍大,这样才能较准确地插值出区域边缘点的降雨量。雷达联合雨量站估测降水不需要实测站点范围比计算网格的区域大。

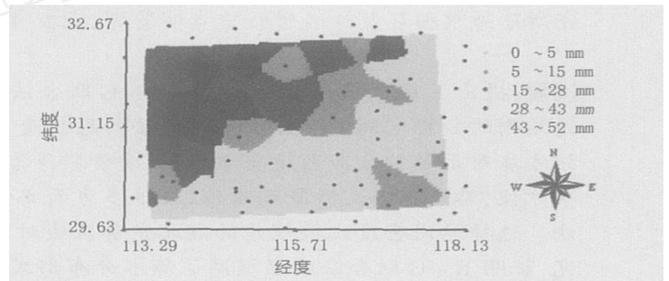


图 1 泰森多边形法插值区域降雨量

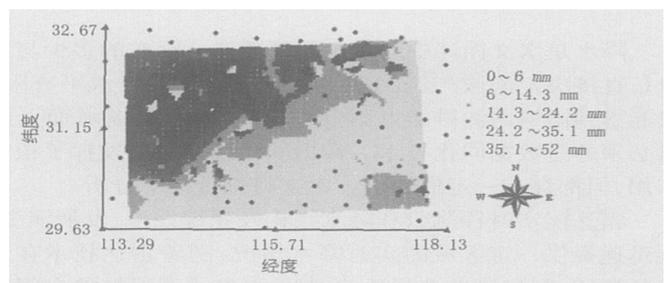


图 2 三角剖分法插值区域降雨量

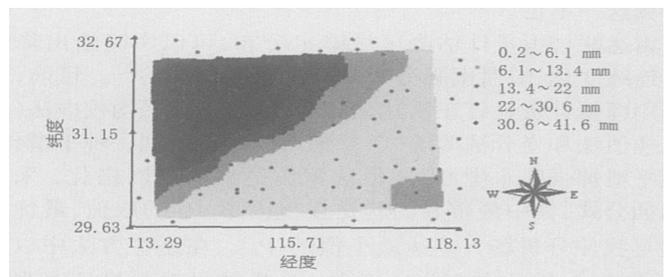


图 3 距离方向加权平均法插值区域降雨量

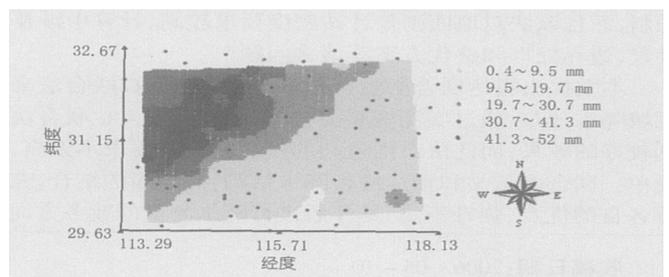


图 4 距离倒数平方插值区域降雨量

(2) 检验结果对比。各种方法检验结果见表 1。

表 1 各方法检验结果比较

方法分类	方法名称	效率系数	相关系数	绝对误差/mm	水量平衡误差
降水空间插值基本方法	泰森多边形法	0.563	0.788	6.494	0.049
	三角剖分线性插值法	0.265	0.61	8.027	0.085
	距离倒数平方方法	0.779	0.885	5.161	0.058
	距离加权平均法	0.759	0.872	5.192	0.041
雷达估测降水方法	R-G 联合法	0.964	0.981	1.936	0.041

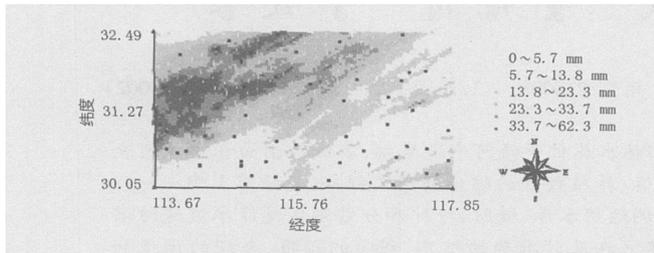


图 5 雷达探测区域降雨分布

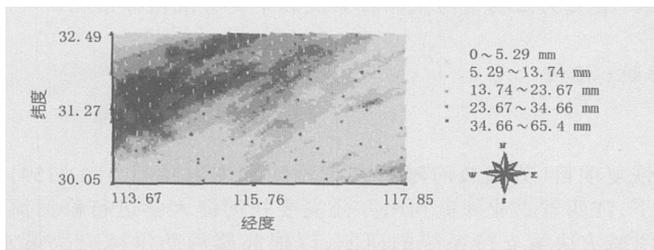


图 6 R-G 联合法计算区域降雨分布

(3) 检验实用性。为了检验 R-G 联合法的普遍实用性,再选取该区域 2003 年 6 月 26 日 20:00、2003 年 7 月 8 日 14:00、2003 年 7 月 8 日 20:00,这 3 场降水的数据资料进行计算分析,其结果见表 2。

表 2 各方法检验结果比较

时间/ (年.月.日.时)	效率系数	相关系数	绝对误差/ mm	水量平衡 误差
2003.06.26.20:00	0.901	0.949	1.580	7.78×10^{-5}
2003.07.08.14:00	0.959	0.979	2.935	0.0004
2003.07.08.20:00	0.906	0.952	4.527	0.0021

采用 R-G 联合法对后 3 场降雨进行数据同化的精度也较高,水量平衡误差都很小,有一场几乎为零。R-G 联合法进行数据同化操作简单、快捷而且可以大大提高精度。

3 结论

本文对 4 种降水数据同化方法与 R-G 联合法进行了比较,由各方法检验结果比较表分析,可以发现 R-G 联合法的效率系数、相关系数、绝对误差和水量平衡误差指标都明显优于其他基本数据同化方法。从比较降水分布图可以看出,R-G 联合法计算的网格降水空间变异特性明显,与雷达探测的降雨分布相一致,能很好地体现出一个区域降水的空间变异性。R-G 联合法在计算时间上也明显优于其他方法,因为它计算方法简单直接,在实际工作中运用方便快捷。比较起来 R-G 联合法也有其不利的地方,它需要雷达探测数据作为计算基础,而其他方法可以直接利用实测雨量计的数据。R-G 联合法需要雨量计测值和雷达测值有较好的相关性才能进行校准,否则无法校准,所以在实际运用中有一定的局限性。

现在遥感测雨精度还不是很高,由于其分辨率和目前的资料普及情况,还无法十分理想地用于降水资料的空间插值,但从本文可以看出,具有很好的发展前景。雷达信息可以准确的提供出降水的暴雨中心和流域的降雨分布,这是降水资料的空间插值十分重要的信息。如何更好地利用雷达探测信息和雨量计实测联合来得到流域的降雨资料将是一个很有发展前景的研究方向。

参考文献:

- [1] Troch, P. A., Paniconi, C., McLaughlin, D. Catchment - scale hydrological modeling and data assimilation. *Advances in Water Resources*, 2003, (2).
- [2] 刘晓阳,毛节泰,李纪人等.雷达联合雨量计估测降水模拟水库入库流量. *水利学报*, 2002, (4).
- [3] 戴铁丕,詹煜,刘玉洁.在雷达-雨量计联合探测系统中距离加权和时间外推校准技术的研究. *气象科学*, 1996, (3).
- [4] Seo D j, Breidenbachj P, Johnson E R. Real - time estimation of mean field bias in radar rainfall data. *Journal of Hydrology*, 1999, (223): 131 ~ 147.
- [5] 李建通,张培昌.最优插值法用于天气雷达测点区域降水量. *台湾海峡*, 1996, 15(3).
- [6] 谈戈,夏军,李新.无资料地区水文预报研究的方法与出路. *冰川冻土*, 2004, 26(2).

(编辑:常汉生)

简讯

过去 10 年 4 亿国际资金助力长江防洪

过去 10 年,在水利部、商务部支持下,长江水利委员会积极开展全方位的水利国际合作,与包括世界银行在内的 20 个国际组织建立合作关系,先后引进了总价值达约 4 亿人民币国际合作项目,占中国水利国际合作援助项目资金总数的 80% 以上。

涉及长江防洪的项目是“十五”期间国际合作的重大头戏。中澳、中日项目投入过亿,均为水利系统历史上最大的援助项目,将世界银行向长江防洪大模型的 970 万美元贷款算在内,涉及长江防洪项目总投入达到 2 亿多人民币。在外援资金、技术的支持下,2005 年,长江委所属 118 个中央水文报讯站在全国率先

全面实现自动报讯,当今世界规模最大、功能最全的长江防洪大模型基本建成并投入使用。

“十五”期间,长江委对外交流合作盛况空前,包括三峡工程、南水北调、长江防洪等长江治理开发的重大课题受到国际上的广泛关注。通过中澳长江防洪与管理和日本政府无偿援助汉江中下游区间洪水预警系统装备计划等项目的实施,长江委培养了一大批洪水预测预报专业技术人才,洪水预报的精度大大提高,预见期也大大延长。

(摘自《人民长江报》第 1532 期)