

中国襄阳多普勒天气雷达回波强度估测降水分析

Precipitation Analysis of the Echo Intensity Estimation of the Doppler Weather Radar in Xiangyang, China

刘佳雯¹ 尤雪¹ 何永宁²

Jiawen Liu¹ Xue You¹ Yongning He²

1. 湖北省襄阳市气象局 中国·湖北 襄阳 441021

2. 广东省博罗县气象局 中国·广东 惠州 516100

1. Xiangyang Meteorological Bureau, Hubei Province, Xiangyang, Hubei, 441021, China

2. Boluo County Meteorological Bureau, Guangdong Province, Huizhou, Guangdong, 516100, China

摘要: 利用 2017—2020 年襄阳多普勒雷达体扫复合仰角的强度回波资料及 7 个县市国家气象站雨量资料, 以多仰角回波强度资料为预报因子, 以未来 1h 降雨量为预报对象, 结合小区域气候背景分站, 分距离、分仰角、分强度进行多种(次)试验, 最后选取较好的方程进行 1h 降雨量估计。

Abstract: Using the intensity echo data of Xiangyang Doppler radar body scan composite elevation from 2017 to 2020 and rainfall data from 7 national meteorological stations in counties and cities, with multi elevation echo intensity data as the prediction factor and future 1 hour rainfall as the prediction object, combined with small-scale climate background sub stations, multiple (multiple) experiments were conducted by distance, elevation, and intensity. Finally, the better equation was selected for 1 hour rainfall estimation.

关键词: 多普勒雷达; 回波强度; 降水估测

Keywords: Doppler radar; echo intensity; precipitation estimation

DOI: 10.12346/eped.v2i1.9269

1 引言

多普勒雷达的重要功能之一就是降水估计^[1], 能够业务应用的雷达估计降水的方法主要是雨量估计(雷达降雪估计误差很大, 难以满足业务应用的要求), 要求用来导出降雨率的反射率因子的取样位于零度层亮带以下的液态降水区并且设法排除冰雹的影响。目前, 国内外雷达估计降水方法主要有两类: 一类是利用雷达回波的统计特征和降水之间直接建立关系, 另一类是雨量计实时校准。第一类有最优化方法、概率配对法等^[2-5]; 第二类方法有变分法^[6]、卡尔曼滤波法^[7]等。

在雨量计布点比较稀疏的区域来说, 第二类方法不可行, 而第一类方法可以避免使用雨量站资料, 这在缺少地面雨量站的山区实用价值较大。实时监测山区降雨, 对预防崩塌、滑坡、泥石流等地质灾害有重要意义。

从已做过的研究工作可以看出两个共同点: 一是针对单部多普勒雷达采用上述方法对 $Z-I$ 关系本地化以后, 估测降水的准确率比标准法 $Z=300$ 都有不同程度的提高; 二是建立气候 $Z-I$ 关系采用的资料年限大都不长, 从一定程度上来说, 更大程度上是属于一种试验研究, 从雷达气候学的角度来说, 一种统计关系的建立, 样本序列时间越长、样本容量越大建立出来的统计关系应该更准确些。襄阳多普勒雷达 2002 年 9 月投入试运行, 如何建立适合本地的 $Z-I$ 关系以更好地通过雷达资料估计降水量是急需解决的问题。论文使用襄阳多普勒雷达回波强度(等效反射率因子)7 个县市区(国家站) 2017—2020 年汛期 4—10 月逐小时降雨量资料和对应的每 6min 一次雷达回波强度资料, 依据雷达气候学和统计学的原理首次建立了较适合本地的 $Z-I$ 关系, 由于这期间地面气象站分布稀疏, 所以采用的方法属于前述第一类方

【作者简介】刘佳雯(1996-), 女, 中国湖北襄阳人, 硕士, 工程师, 从事天气预报研究。

法, 得到一些有意义的结论, 对降水特别是强降水的短时临近预报有着较好的实际意义。随着今后襄阳市区域加密自动站网的建设, 论文所做的工作为今后采用自动站雨量资料实时校准类的方法奠定了一定的基础。

2 资料与方法

2.1 资料

采用襄阳 7 个县 2017—2020 年汛期 4—10 月逐小时降雨量资料和对应的每 6min 一次雷达回波强度资料。

2.2 原理和方法

降雨量估计的基本原理是基于反射率因子和降水率之间的正相关关系。反射率因子越大, 降雨率越大。建立反射率因子和降雨率之间的经验关系, 在雷达测得降雨回波的反射率因子后根据相应的经验公式可以求得降雨率, 对时间累加可以得到一段时间内的累积降雨量。

一元回归处理的就是两个变量之间的关系, 即一个预报量与一个因子之间的关系。一元线性回归模型如下:

$$y=ax+b$$

其中, y 为预报对象, x 为预报因子。

利用最小二乘法可确定此方程的回归系数^[8]。

$$a=\bar{y}-b\bar{x}$$

$$b=\frac{\sum_i^n x_i y_i - \frac{1}{n} \sum_i^n x_i \sum_i^n y_i}{\sum_i^n x_i^2 - \frac{1}{n} (\sum_i^n x_i)^2}$$

类似地, 处理一个预报量 y 与多个因子之间关系的多元回归模型为:

$$y=c_0+c_1x_1+c_2x_2+\dots+c_nx_n$$

回归系数 a 也是根据最小二乘原理通常用逆矩阵法来确定, 即:

$$(X'X)^{-1}X'y$$

其中:

$$y = \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{pmatrix}, c = \begin{pmatrix} c_0 \\ c_1 \\ \vdots \\ c_m \end{pmatrix}, X = \begin{pmatrix} x_{11} & \dots & x_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ x_{n1} & \dots & x_{nn} \end{pmatrix}$$

以单仰角回波强度资料作为预报因子的 $Z-I$ 关系 $Z=AI^B$ 的系数 A 和 B 就可通过 a 和 b 的值而反推确定。过程如下: 若反射率因子为 $Z (mm^6 \cdot mm^{-3})$, I 为降雨率 ($mm \cdot h^{-1}$), Ze 为等效反射率因子 (dBz), 则有:

$$Z=AI^B, Ze=10lgZ, Ze=10lgA+10BlgI$$

这样, 等效反射率因子 (回波强度) 就与降雨率 (小时降水) 联系起来。

$$\text{令: } a=10lgA, b=10B, I^*=lgI.$$

则: $Ze=a+bl^*$, 通过最小二乘法确定了上式中 a 和 b 中的值以后, 通过 $B=b/10$ 和 $A=10^{(a/10)}$ 就可求出 A 和 B 的值, 从而得出 $Z-I$ 关系式。实际工作中在读出回波强度 Ze 后, 通过式子 $I=10^{(Ze-a)/b}$ 得出降水率 I 的估计值。

3 襄阳多普勒雷达 $Z-I$ 关系本地化

3.1 小时雨强回归估计

以襄阳多普勒雷达多仰角回波强度资料为预报因子, 以未来 1h 降雨量为预报对象, 结合小区域气候背景分站、分距离、分仰角、分强度进行多种 (次) 试验, 最后选取较好的方程进行 1h 降雨量估计。

3.2 方程建立与筛选方法

回归方程建立步骤是:

第一步, 将降雨量按以下标准定级。

日降雨量: 1 级, 小雨: 1~9.9mm; 2 级, 中雨: 10~24.9mm; 3 级, 大雨: 25~50.0mm; 4 级, 大-暴雨: 38.0~74.9mm; 5 级, 暴雨: 50.0mm 以上。

1h 降雨量: 1 级, 小雨: 1~4.9mm; 2 级, 中雨: 5~14.9mm; 3 级, 大雨: 15~29.9mm; 4 级, 暴雨: 30.0mm 以上。

第二步, 以日降雨量和 1h 降雨量的绝对量值和分级资料为预报对象, 以 $1.5^\circ \sim 7.5^\circ$ 的站点周围 10km 范围内和站点上的最大回波强度及其组合分别建立回归方程。

第三步, 从上述回归方程中选取最佳方程进行 1h 降水估计。

由于雷达中心站距离东门口 (襄阳老站) 19km、枣阳 52km, 南漳 58km, 宜城、谷城、老河口均为 54km 左右, 保康 100km, 因此在根据距离建方程时, 将东门口、保康单独一组, 其他几个国家站放在同一组, 分别代表与雷达站直线距离 0~20km、20~60km、60~100km 区域。

3.3 方程及效果

表 1 和表 2 是以 2.4° 仰角站点上和站点周围 10km 范围内最大回波强度 (dBz) 为预报因子建立的回归方程的拟合效果及得出 $Z-I$ 关系式系数 A 和 B 的值。可以看出, 离雷达站 100km 以内, 方程拟合率一般能达到 80% 左右, 离雷达站距离越远, 方程的拟合率越低, 效果越差, 拟合率一般在 60% 左右。而且, 在降水小的情况下预报量级偏大, 在降雨量级大时预报量级偏小, 特别是对暴雨的情况, 一般根据预报方程做出来就只有大雨量级。

建立以其他各角度回波强度为预报因子的 $Z-I$ 关系, 此处不一一列举。

表 1 襄阳市各站 1h 降雨量与 2.4° 仰角站圈上最大回波强度回归方程效果

预报区域	系数 A	系数 B	相关系数	拟合率 /%
东门口 (襄阳老站)	164.38	1.68	0.88	86
枣阳	205.25	1.23	0.80	82
宜城	104.88	0.30	0.81	77
南漳	17.28	1.66	0.84	70
保康	7.69	1.12	0.75	65
谷城	20.58	1.74	0.85	71
老河口	10.44	0.79	0.74	75

表 2 襄阳市各站 1h 降水量与 2.4° 仰角站圈周围 10km 范围内最大回波强度回归方程效果

预报区域	系数 A	系数 B	相关系数	拟合率 /%
东门口 (襄阳老站)	177.38	1.88	0.89	86
枣阳	223.7	1.31	0.81	84
宜城	105.32	0.54	0.82	78
南漳	16.38	1.71	0.80	74
保康	7.98	1.23	0.79	68
谷城	20.59	1.82	0.88	73
老河口	10.03	0.81	0.77	76

4 日降雨量统计特征和外推预报

4.1 日降雨量 (20—20 时) 与小时最大降水的统计特征

统计结果表明, 日降雨量与整个降雨过程中 1h 最大降水的相关系数高达 0.86。各月相关系数略有不同: 4 月 0.83, 5 月 0.79, 6 月 0.85, 7 月 0.88, 8 月 0.86, 9 月 0.87, 10 月 0.80。在汛期的 6—9 月相对较高, 而处于环流转换的 4—5 月、10 月相对较低, 但最小也接近 0.8。1h 最大降水个例 4484 个, 跨天 (降水出现在 20 时前后) 的情况占 6% (264 个)。以下是一些有意义的统计特征值 (见表 3)。

75% 以上的个例: 1h 最大雨强 > 0.4mm, 日雨量 > 0.7mm, 接近 1h 最大雨强的降水持续时间为 1h, 小时最大雨强出现在降雨开始的第 1 个小时, 降雨持续时间 (不间断) > 2h, 持续时间跨天 (降雨出现在 20 时前后) 的情况下, 降雨总持续时间 > 6h。

50% 以上的个例: 1h 最大雨强 > 1.2mm, 日雨量 > 3.0mm, 接近 1h 最大雨强的降水持续时间为 1h, 小时最大雨强出现在降雨开始的第 2 个小时, 降雨持续时间 (不间断) > 3h, 持续时间跨天 (降雨出现在 20 时前后) 的情况下, 降雨总持续时间 > 10h。

25% 的个例: 1h 最大雨强 > 3.5mm, 日雨量 > 9.7mm,

接近 1h 最大雨强的降水持续时间为 1h, 小时最大雨强出现在降雨开始的第 3 个小时, 降雨持续时间 (不间断) > 6h, 持续时间跨天 (降雨出现在 20 时前后) 的情况下, 降雨总持续时间 > 16h。

4.2 日雨量外推预报

进一步分析还发现, 日降雨量与 1h 最大降水及接近此 1h 最大降水的持续时间存在一定意义上的统计关系, 即全天总降雨量的多少取决于雨强和持续时间, 基于此, 对日雨量的外推预报建立下列简单方程:

$$R_d = CtR_{h,max}$$

其中, R_d 为日降雨量 (20—20 时); $R_{h,max}$ 为当日 1h 最大降雨量; t 为接近 1h 最大降雨量的持续时间; C 为系数, 依据经验来确定:

①当 $R_{h,max} < 8.0\text{mm}$ 时, $C=1.0\sim 1.5$;

②当 $8.0 \leq R_{h,max} < 24.9\text{mm}$ 时, $C=2.0$;

③当 $R_{h,max} \geq 25.0\text{mm}$ 时, $C=1.5$ 。

统计结果表明 (见表 4), 接近 1h 最大降水的持续时间 t 的确定遵循下列一般性规律:

①当 $R_{h,max} < 8.0\text{mm}$ 时, t 平均为 1.3h (最大 5h), 降水总持续时间平均 4h, 一般在 2~6h;

②当 $8.0 \leq R_{h,max} < 19.9\text{mm}$ 时, t 平均为 1.2h (最大 4h), 降水总持续时间平均 7h, 一般在 3~10h;

③当 $20.0 \leq R_{h,max} < 24.9\text{mm}$ 时, t 平均为 1.1h (最大 2h), 降水总持续时间平均 7h, 一般在 3~10h;

④当 $R_{h,max} \geq 25.0\text{mm}$ 时, t 平均为 1.0h (最大 2h), 降水总持续时间平均 8h, 一般在 5~11h。

根据方程的预报决策过程及效果检验见表 5, 以日雨量预报值和实际值的差值大于某一临界值视为预报错误, 可见, 报错的概率大多低于 20%。如果 1h 最大降雨量可以确定, 对两头的量级 (小到中雨以下量级和大到暴雨) 的预报效果较好, 而对中间级 (大雨) 预报效果差些。但总体来说, 对实际短时临近预报工作中的降水估计有较好的指示意义。

表 3 小时降水的统计特征

项目	1h 最大雨 / mm	合计雨量 / mm	接近小时最大雨强 的持续时间 /h	小时最大雨强出现在降雨 开始的第几个小时	降雨持续时间 /h	持续时间 (跨天) /h
四分之一位数	0.3	0.6	1	1	2	6
四分之三位数	3.7	8.9	2	3	5	17
最大	68.8	125.7	5	22	22	43
中位数	1.3	2.8	2	2	4	8

表 4 1h 最大雨强与降水总持续时间的统计特征

$R_{h,max}$	降水总持续时间特征值				
	最大	最小	平均	中位数	四分之三位数
$R_{h,max} < 8.0\text{mm}$	23	1	2	3	6
$8.0 \leq R_{h,max} < 19.9\text{mm}$	18	1	4	5	10
$20.0 \leq R_{h,max} < 24.9\text{mm}$	20	1	4	6	8
$R_{h,max} \geq 25\text{mm}$	20	3	7	6	9

表5 日降水外推预报及效果检验

项目	$< 8.0\text{mm}$	$8.0 \leq R_{h,\max} < 14.9\text{mm}$	$15.0 \leq R_{h,\max} < 24.9\text{mm}$	$20.0 \leq R_{h,\max} < 24.9\text{mm}$	$R_{h,\max} \geq 25.0\text{mm}$
方程(1)系数 A	1.0~1.5	2.0	2.0	2.0	1.5
外推预报决策	预报日雨量为小到中雨	预报日雨量为大雨	预报日雨量为大雨	预报日雨量为大到暴雨	预报日雨量为大到暴雨
拟合效果(报错率)	绝对误差 10mm 以上的比率为 7%	绝对误差 15mm 以上的比率为 21%	绝对误差 20mm 以上的比率为 17%	绝对误差 25mm 以上的比率为 42%	绝对误差 30mm 以上的比率为 11%

5 小结

基于气候统计分析,利用回归分析方法,以襄阳多普勒雷达多仰角回波强度资料为预报因子,以未来 1h 降雨量为预报对象,结合小区域气候背景分站、分距离、分仰角、分强度进行多种(次)试验,建立了多个一元或多元回归方程,最后选取较好的方程进行 1h 降雨量估计,并结合自动站降雨量资料等进行总降雨量的外推预报,对小时降水估计和总降雨量的外推预报的拟合率可达到 60% 左右。

6 讨论

论文只对雷达定量估计降水从气候统计的角度做了一些初步的探索,并没有考虑冰雹、零速度带等其他各种复杂因素对雷达估计降水的影响,这是今后需要进一步深入进行的工作。

参考文献

- [1] 俞小鼎,姚秀萍,熊廷南,等.多普勒天气雷达原理和业务应用[M].北京:气象出版社,2006.
- [2] 李腹广,王芬.用天气雷达回波强度资料估测降水[J].气象科技,2007,35(2):285-288.
- [3] 王芬,李腹广,杨静,等.最优化处理法估测黔西南地区降水[J].贵州气象,2006(2):1-5.
- [4] 郑媛媛,谢亦峰,吴林林,等.多普勒雷达定量估测降水的三种方法比较试验[J].热带气象学报,2004,20(2):192-197.
- [5] 王丽荣,裴宇杰,王立荣,等.概率配对法在雷达定量估测降水中的应用[J].气象与环境科学,2008,11(S):195-199.
- [6] 尹忠海,王飞,唐明晖.变分校准法估测洞庭湖区域降水技术研究[J].广西气象,2005,26(S1):110-114.
- [7] 徐燕.卡尔曼滤波法在西峰雷达估测降水中的应用[J].干旱气象,2008,26(1):78-82.
- [8] 黄嘉佑.气象统计分析与预报方法[M].北京:气象出版社,2004.