

# 单块积云降水参数的直接估算

王治平

刘耀宗

(湖南省人工影响天气办公室,长沙 410007) (湖南省气象研究所)

## 提 要

介绍了单块积云的雷达回波参数与降雨参数的一元、二元回归分析,分析结果表明,单块积云的降雨量、雨强和持续时间与雷达回波的顶高、面积的相关性较好。

**关键词:** 回波参数 降水 单块积云 回归分析

## 引 言

应用雷达测量某个区域的降雨量的方法是根据雷达测得反射因子利用  $Z=A \cdot I^b$  关系式测出各点的雨强,然后对降雨的时间和面积进行积分,由于  $A, b$  的数值因地形和降水的类型不同而变化很大,加之雷达参数的不稳定性和难以精确测定,所以该方法的适用性不广。作者根据积云云体越高大,其降雨量和雨强通常也越大的观测事实,采用 1979—1985 年人工催化(AgI)降雨试验期间观测获取的单块积云雷达观测资料与地面雨量观测网收集的雨量自记资料,直接建立回波顶高、面积、强度、体积与该云的降雨量、雨强等降雨参数的一元和二元回归关系式,结果表明它们之间相关较好,然后用此关系式检验了未催化对比云的降雨量、雨强等因子,结果表明,对降雨量的结算精度比  $Z-I$  关系式高,且计算简便。

## 1 基本资料与正态性检验

### 1.1 基本资料

1979—1985 年在湖南湘中、湘东山区(新化县、安化县、浏阳县)进行积云随机催化

试验,711 型测雨雷达在这一期间共观测到 139 块自然积云,对应雨量观测网内有完整降雨过程的有 65 块云,试验区及雨量自记观测网的设置与雨量资料处理见文献[1]、[2]。由于某些积云地面降雨过程观测不完整或回波记录不全(即只观测到消散部分),本文仅分析有较完整的雷达观测并且降雨基本在试验区的 21 块自然积云和 10 块对比云资料。

本文所指的回波面积是指消除地物回波后  $3^\circ$  仰角的  $PPI$  剖面面积,回波顶高是指对在  $PPI$  上强中心方位剖面上的最大回波顶高,回波体积为底面积与顶高之乘积。由于雷达参数随时间不断变化,文中所指雷达诸参数均指观测过程中的最大值。

### 1.2 降雨参数的正态性拟合度检验

由于回归分析中要求参数的统计变量具有正态分布,将参数作原假设  $H_0$ ,即降雨参数均值服从对数正态分布。利用柯尔莫哥洛夫定理作检验,令  $\alpha=0.50$ ,则  $y_\alpha=0.83$ ,若  $\sqrt{n} D_n \geq y_\alpha$ ,则拒绝  $H_0$ ,若  $\sqrt{n} D_n < y_\alpha$ ,则接受  $H_0$ 。计算详见表 1。

表 1 降雨参数正态性检验计算表(n=21)

	$\bar{x}$	$\log \bar{x}$	$s(x)$	$D_n(x)$	$\sqrt{n} D_n(x)$	$y_\alpha$	原假设 $H_0$
总降雨量/ $10^6 \text{kg}$	1298	2.765	0.6132	0.1606	0.7363	<0.83	接受
雨强/ $\text{mm} \cdot (10\text{min})^{-1}$	8.3	/	6.9402	0.1644	0.7534	<0.83	接受
降雨持续时间/min	73.5	/	39.613	0.1171	0.5366	<0.83	接受
时段降雨量/ $10^6 \text{kg}$	407.6	2.195	0.6148	0.1258	0.5626	<0.83	接受

从表 1 可知,总降雨量及雷达观测期间的时段降雨量、雨强、降雨持续时间对数均值

都在  $\alpha=0.50$  情况下出现  $\sqrt{n} D_n(x) < y_\alpha$ ,所以均认为参数服从对数正态分布。

2 相关分析

各雷达参数与降雨参数的一元回归关系式见表2。

2.1 雷达回波单因子与降雨参数

表2 雷达回波参数与降雨参数的一元回归方程

	雨量/ $10^6\text{kg}$		雨强/ $\text{mm} \cdot (10\text{min})^{-1}$		降雨持续时间/ $\text{min}$	
	回归方程	R	回归方程	R	回归方程	R
顶高/ $\text{km}$	$Q=0.0844H^{3.9714}$	0.71	$I=-10.405+1.959H$	0.69	$T=2574e^{0.094H}$	0.38
面积/ $\text{km}^2$	$Q=146.66e^{0.0114A}$	0.70	$I=0.418A^{0.5791}$	0.57	$T=30.34+0.336A$	0.78
强度/ $\text{dBz}$	$Q=-1053.15+3064.4z$	0.34	$I=0.8782+1.913\ln z$	0.05	$T=8.05+16.94\ln z$	0.19
体积/ $\text{km}^3$	$Q=0.1703V^{1.1992}$	0.81	$I=2.643+0.0044V$	0.70	$T=2.231V^{0.492}$	0.77

由表2得知,回波体积与降雨参数的相关性最好,相关系数R为0.70至0.81,顶高与雨量和雨强的相关系数分别为0.71和0.69,较面积与它们的相关性好,回波面积与降雨持续时间的相关系数为0.78,比顶高与降雨持续时间的相关性好,而回波强度与降雨的相关性较差,最大R只有0.34。

2.2 雷达回波多因子与降雨参数

经单因子的相关分析表明,回波顶高、面积与积云的降雨参数之间存在着较好的相关,为了综合考虑它们的影响,可作多元回归分析。假定降雨参数与雷达参数有如下关系:

$$y = b_0 + b_1H + b_2A \quad (1)$$

式中y为降雨参数,可为单块积云最大降雨量或该块云降水最大10分钟雨强,H为该块单块积云雷达跟踪观测过程中最大回波顶高,A为该块单块积云回波最大面积, $b_0, b_1, b_2$ 为待定系数。

据表1对降雨参数的正态检验结果,将雨量和面积取常用对数后代入式(1),组成线性回归方程组,然后通过最小二乘法对系数矩阵求解后定出 $b_0, b_1$ 及 $b_2$ 。计算结果其回波参数与雨量、雨强的回归方程分别是:

$$\lg Q = -0.38 + 0.1445H + 0.8907\lg A \quad (2)$$

$$I = -22.179 + 1.695H + 7.217\lg A \quad (3)$$

上述二式复相关系数分别为0.89和0.79,高于单因子与雨量、雨强的相关系数,但它们与降雨持续时间的相关系数仅0.64,反而低于回波体积与降雨持续时间的相关系数(0.78)。

2.3 回波参数与时段降雨量

多年观测实践中发现,由于积云发展非常迅速,从生成至出现降水的时间一般为几

分钟至几十分钟,除距离离测站非常近的浓积云外,711测雨雷达往往只观测到积云降水后到消散前的某一时段的情况,为了充分利用回波观测资料,可对这一时段降雨量作出估算。

基于降水质点必然通过低层某一截面降落,该截面实际为雷达开机后第一次观测的PPI的回波底面积。如果该截面越大,维持的时间越长,则降雨量也必然大,这也被多年雷达与雨量网配套观测的经验所证实。因此可以根据回波低层截面积对观测时段的积分值建立与该时段对应的降雨量的一元回归方程:

$$Q_1 = b_0 + b_1 \int_0^T A(t) dt \approx b_0 + b_1 \sum_{i=1}^n A_i \Delta T \quad (4)$$

$A_i$ 是第*i*次观测时的回波低层(底)面积, $\Delta T$ 是*i-i+1*次平显观测的时间间隔,取值不超过5分钟。 $0-T$ 是PPI在一块云的观测过程中的起止时间。 $Q_1$ 为时段降水量, $b_0, b_1$ 是待定系数。

降雨质点从空中某一高度降落至地面需一定的时间,并且取决于回波截面离地面的高度*h*和雨滴的落速。其中*h*考虑了回波中心位置离雷达的距离及天线波束的仰角。雨滴落速(单位: $m \cdot s^{-1}$ )采用下式:

$$V = 9.65 - 10.3 \exp(-600D) \quad (5)$$

其中*D*为雨滴直径,在误差小于3%情况下,*D*的取值范围为 $6 \times 10^{-4} - 5.8 \times 10^{-3} m$ <sup>[3]</sup>。根据湖南1979年对积云降雨雨滴谱的探测资料,为了简便起见,取具有代表性的 $1.07 \times 10^{-3} m$ <sup>[4]</sup>值代入式(5)求得该直径在云中落速为 $4.2 m \cdot s^{-1}$ ,并可计算出不同高度该*D*的降水质点降至地面所需时间。

将每块积云在雷达观测期间所观测到的

回波低层(底)截面积与时间乘积的累加值与对应该时段的实测降雨量代入式(4),应用最小二乘法便可求出系数  $b_0, b_1$ , 得到回波参数与时段降雨量的一元回归方程。

$$Q_1 = -207.057 + 16.105 \left( \sum_{i=1}^n A_i \Delta T \right) \quad (6)$$

回归方程(6)相关系数  $R=0.95$ , 经  $F$  检验  $\alpha < 0.01$ , 表明回归方程等式两边相关是明显的。由式(6)看出, 当回波面积很小或维持时间很短时, 即  $\sum A \Delta T < 12.857$ , 雨量出

现负值, 这时可用下式计算:

$$Q_1 = 4.577 \left( \sum_{i=1}^n A_i \Delta T \right)^{1.124} \quad (7)$$

经计算式(7)相关系数  $R=0.80$ 。

### 3 检验结果

为了检验所得到的回归方程估算积云降雨的准确程度, 采用式(2)、(3)和表1中的面积与降雨时间的关系式以及式(7)计算的10块对比云的雨量、雨强、降雨持续时间和时段降雨量, 其实测值与计算值结果如表3所示。

表3 自然云(对比云)降雨参数

日期	雷达回波			雨 量			雨 强			降雨持续时间			回波落入试验区面积比				
				10 <sup>6</sup> kg			mm · (10min) <sup>-1</sup>			min							
年·月·日	顶高/km	面积/km <sup>2</sup>	$\Sigma A \Delta T$ / km <sup>2</sup> · h <sup>-1</sup>	实测	订正	估算	相对误差(%)	实测	估算	相对误差(%)	实测	估算	相对误差(%)				
79.8.12	14.7	58	19.7	828	1656	2065	25	3.9	15.5	297	98	50	49	414	110	73	1/2
79.8.27	11.7	84	71.2	1512	2016	1058	48	12.6	11.5	9	58	59	2	1512	940	38	3/4
80.8.28	15.3	84	65.3	2620	2620	3506	34	12.3	17.6	43	98	58	41	2543	847	67	4/5
81.7.21	7.4	62	12.4	140	175	193	10	1.8	3.3	83	22	51	132	111	78	30	2/3
81.7.31	8.2	49	18.2	184	276	204	26	2.2	3.9	77	36	46	27	180	86	52	1
81.7.31	12.0	34	6.7	38	38	523	1276	0.5	9.2	1740	54	41	24	1.5	39	2500	1
81.8.12	9.9	134	74.2	727	909	881	3	3.5	10.0	186	84	75	11	594	988	66	4/5
84.8.29	10.5	66	20.8	398	597	573	4	4.3	8.7	102	120	52	57	68	128	88	2/3
81.7.18	8.4	104	9.4	617	612	426	30	5.2	4.1	21	48	65	35	245	57	77	1
85.8.29	5.9	53	17.3	116	116	102	12	4.0	0.3	93	68	48	29	34	73	115	1
平均值	10.4	72.8	31.5	718	902	953	6	5.0	8.4	68	69	55	20	570	334	41	/
标准差	3.1	29.4	27.2	804	846	1067	/	4.1	5.7	/	31	10	/	826	409	/	/

由表3得知, 实测与估算值的平均值的相对误差降雨量为最小即6%, 其次为降雨持续时间为20%, 雨强、时段降雨量分别为40%、41%, 可见多元回归方程估算的单块积云降雨量、降雨持续时间与实测值较为接近, 同时也说明多元回归方程用来估算总体降水和总降水时间比估计时段降水要稳定和精确。

其中误差较大的1981年7月31日回波顶高为12km, 水平面积为34km<sup>2</sup>的瘦长型积云, 其实际降雨少, 而估算值较大。

### 4 问题与讨论

我们在检验雷达估算的准确性时是以雨量计的实测和计算机的计算结果为标准的, 由于积云的移动性和试验区面积的有限性,

往往有些积云的降水部分不在试验区内, 这时计算机算得的结果与实际情况有一定误差, 因此在分析估算时需要注意。

在单相关分析时可以看出, 回波强度与降雨参数的相关性较差, 这可能是降水参数不仅与回波强度有关, 回波强度本身的变化较大及不易准确测定也是一个原因。

由于降水质点平均落速应是各种大小质点速度的加权值, 即  $\bar{V}(D) = \sum_{D_0}^D n(D)V(D)$   $\Delta D / \sum_{D_0}^D n(D)\Delta D$ , 此方面工作有待资料不断积累后加入计算, 可望对估算精度进一步提高。

当积云处于消散阶段时往往会出现低层(底)面积大, 维持时间相对长, 降雨量少的情

况,因此在对时段降雨量进行估算时最好是对整个降雨时段进行估算。如当回波呈瘦高型时,因蒸发作用,降至地面雨量少,将会出现估算值偏大情况。

我们对积云虽是连续跟踪观测,但积云发展的全过程观测资料仍不很多,如果能把回波底及地的整个时间作为降雨持续时间用作估算降雨量的自变量,也能进一步提高估算精度。如果能事先估算出积云发展的最大顶高、面积,则可指望用方程对积云降水作出定量预报。如果人工催化不影响积云的顶高、面积,则可根据回波方程计算出积云如果不催化的降雨量、雨强等因子,因此方程可用于检验人工增雨的效果。

## 5 结论

5.1 根据自然积云降雨与其体积成正比的观测事实,对湖南省人工降雨试验中的自然积云的雷达回波参数和降雨参数进行了回归分析,分析表明积云降雨量的对数值、雨强和降雨时间符合正态分布。

5.2 经一元回归分析表明,回波体积与降雨量、降雨持续时间和雨强的相关系数分别为0.81、0.77、0.7。其中回波顶高与降雨量、雨强的相关较好,而回波面积与降雨时间的相

关性较为密切。回波强度与降雨参数的相关性较差。

5.3 经二元回归分析表明,回波顶高和回波面积与雨量和雨强的相关系数分别为0.81、0.79,经F检验方程显著。所建立的回波低层(底)截面积与间隔时间乘积累加值与降雨量的一元回归方程显著,相关系数为0.95。

5.4 用回归方程计算了回波面积大部分在试验区内的10块对比云的雨量、降雨持续时间、时段降雨量和雨强,结果降雨量的估算较准确,平均相对误差6%,其次是降雨持续时间,而对时段降雨量与雨强的估算误差较大。

## 参考文献

- 1 Liu Yaozun, Wang Zhiping and Chen Lishu. Effect Analysis of Rain Enhancement Single Cumulus Randomized Seeding Experiment in Hunan Province. "The Fifth WMO Scientific Conference on Weather Modification and Applied Cloud Physics" 1989, II: 559-562.
- 2 刘国生,王治平.高炮人工增雨随机试验雨量分析系统.气象,1989,15(2).
- 3 Richard J, Doviak and Dusan S. Zrnic. Doppler Radar and Weather Observation. NSSL and NOAA and Univ of Oklahoma pr. 1984, 187.
- 4 徐永胜.湖南夏季个体积云降水强度的雷达测定,湖南气象科技情报,1983,(1):1-2.

## Estimating Rainfall with Parameterization Method for Single Cumulus Cloud

Wang Zhiping

(Weather Modification Office of Hunan, Changsha 410007)

Liu Yaozong

(Hunan Meteorological Institute, Changsha 410007)

### Abstract

The univariate and bivariate regression analysis between the radar echo and the rainfall parameters of single cumulus is presented. The analysis results show that correlations between amount, intensity and persistence of the precipitation and top high and area of the radar echo are well consistent. The precipitation estimates using the regression method are accurate, and the calculation is simple.

**Key Words:** echo parameter rainfall single cumulus cloud regression analysis