

夏、秋积云的雷达回波和降水特征 及其估算

徐永胜 刘耀宗 韩嗣荧

(湖南省气象科学研究所,长沙,410007)

提 要

利用湖南 1979—1988 年夏秋外场观测的资料,分析了积云雷达回波和降水的特征,建立了用雷达回波参数估算单站积云降水量、水层厚、总降水量和雨强的回归关系式,并用湖南积云降水资料和广东积云降水资料进行了检验。结果表明:这种估算积云降水的方法对我国南方的广大地区有一定实用性。

湖南夏秋多干旱,积云既是这个期间的主要降水云,又是人工增雨的主要对象。弄清积云的降水特征,有助于更好地设计人工增雨试验,研究用雷达回波参数估算积云降水的方法。我国曾有一些学者作过用雷达回波参数估算降水方面的研究^[1,2]。八十年代初期美国也有人用雷达回波面积和时间积分估算降水^[3]。但是该方法对下午发生的降水估算精度欠佳,而我国南方人工增雨的云多数发生在下午。鉴于这种情况,本文应用 1979 年以来九年夏秋季外场观测的积云雷达回波和地面降水资料作了以下工作:(1)自然积云降水的雷达回波参数和地面降水参数的统计分析;(2)用雷达回波参数估算积云单站降水;(3)用雷达回波参数估算单块积云总降水。

一、试验区概况和资料收集与处理

1. 试验区概况

1979—1981 年和 1983—1987 年湖南省气象科研所在新化和安化县交界的柘溪水库上游山区(简称 I 区)和长沙、浏阳交界的丘陵区(II 区)进行了高炮人工增雨和积云降水客观估计外场试验。I 区:南北长 30km,东西宽 60km,区内设有 50 台雨量自记仪和 18 个雨量筒。II 区:南北长 65km,东西宽 50km,区内设有 120 台雨量自记仪。在两个区域内还分别设有两门三七高炮和一部 711 型测雨雷达。

1990 年 7 月 7 日收到,1991 年 5 月 29 日收到修改稿。

* 本试验 1979—1985 年由国家气象局科教司资助;1986—1988 年由国家气象局云物理基金资助。

2. 资料收集与处理

雷达资料是由试验区内的 711 型雷达对距离雷达站 60km 范围内的积云以不长于 5 分钟的观测周期连续获取的。

地面降水资料是由雨量自记收集的,雨量筒观测资料仅供分析参考,不加入统计。自记雨量纸上的记录曲线以 2 分钟间隔读取,再输入 IBM-PC/XT 型计算机进行处理。计算单站降水量、降水总量、降水面积和单站最大雨强等参数。检验时还用了广东 1983—1985 年的积云降水雷达回波和地面雨量资料。

二、自然积云雷达回波和降水参数的统计分析

1. 积云雷达回波参数的统计

在 9 年试验中,雷达观测时地面对应有降水资料的自然积云共 96 块。以其中降水区全部或绝大部分在试验区的积云(73 块)和降水区有一半在试验区的积云(8 块)为样本,对其雷达回波参数进行了统计,结果见表 1。

表 1 降水积云雷达回波参数的统计特征

回波参数	极大值	极小值	平均值	标准差	离差系数
最大回波顶高(km)	15.8	4.5	9.8	3.03	0.31
云顶温度(°C)	6.6	-63.8	-28.2	20.5	0.73
回波面积(km ²)	402	4	117.5	100.7	0.86
回波强度(dBz)	71	17	47	13.0	0.28
回波强度(mm ⁶ /m ³)	1.26×10 ⁷	5×10 ¹	5.01×10 ⁴	/	/

2. 积云地面降水参数的统计特征

对降水全部或大部分落在试验区内的 73 块积云的降水参数进行了以下统计分析,表 2 列出了统计特征值。

表 2 积云地面降水统计特征值

降雨参数	极大值	极小值	平均值	标准差	离差系数
降雨持续时间(min)	192	8	72.0	46.0	0.64
降雨面积(km ²)	738.9	14.1	207.1	160.9	0.77
最大降雨量(mm)	56.2	0.6	12.4	12.9	1.04
总降水量(mm)	6883.0	6.3	995.7	1324.6	1.33
水层厚(mm)	23.2	0.03	4.3	4.5	1.04
最大雨强(mm/10min)	26.3	0.5	7.5	6.5	0.87
平均雨强(mm/10min)	2.9	0.01	0.6	0.6	0.97
平均总降水强度(10 ⁶ kg/10min)	565.6	3.1	114.3	113.7	0.99
最大总降水强度(10 ⁶ kg/10min)	1641.6	6.1	295.2	308.2	1.04

(1) 积云降水的时间分布

根据自然积云观测发现降水最早发生在 9 时 10 分(北京时,下同),最迟在 19 时 26 分,其中 12 时后至 18 时前发生的占 91.3%,这表明夏秋积云降水主要发生在午后到傍

晚。

(2) 积云降水参数的频率分布

积云降水最大雨强为 0.5—4mm/10min 的频率为 42.5%，0.5—8mm/10min 的频率为 61.6%，0.5—20mm/10min 的频率为 93.2%，20mm/10min 以上的仅占 6.8%，而最大雨强极大值为 26.3mm/10min。

积云总降水量为 100—300 千吨的频率为 23%，大于或等于 1000 千吨的频率为 37%，相当于一个小型水库的库容量。

(3) 积云降水参数频率分布的拟合函数

统计分析表明，积云地面总降水量和雨强等各降水参数的频率呈偏斜分布，即小值居多，大值较少，近似呈 Γ -分布，拟合结果见表 3。对积云最大雨强、最大总降水强度、平均总降水强度和总降水量等参数的 Γ -分布进行了 χ^2 -检验，显著性水平平均达到 0.01，与 Simpson 等^[5]的结果一致。也与王治平等^[6]关于长沙地区单块积云地面降水的统计特征分析结果类似。

表 3 单块积云地面降水 Γ -分布拟合参数

参 数	\bar{x}	s^2	α	β	$\Gamma(\alpha)$	分布密度 $f(x)$
最大雨强(mm/10min)	7.31	41.04	1.3019	0.1781	0.8972	$0.35 \times 10^{-1} x^{0.302} e^{-\beta x}$
最大总降水强度(10^6 kg/10min)	296.57	96515.88	0.9194	0.0031	1.0533	$0.91 \times 10^{-5} x^{-0.08} e^{-\beta x}$
平均总降水强度(10^6 kg/10min)	112.67	12970.89	0.9802	0.0087	1.0170	$0.75 \times 10^{-4} x^{-0.02} e^{-\beta x}$
总降水量(10^6 kg)	1008.9	1683565.45	0.6053	0.0006	1.4771	$0.243 \times 10^{-6} x^{-0.3947} e^{-\beta x}$
平均雨强(mm/10min)	0.615	0.356	1.0624	1.7275	0.9698	$0.3083 \times 10^{-1} x^{0.0624} e^{-\beta x}$
水层厚(mm)	4.25	19.86	0.9095	0.2140	1.0610	$0.432 \times 10^{-1} x^{-0.0905} e^{-\beta x}$
最大雨量(mm)	12.39	167.56	0.9156	0.0739	1.056	$0.57 \times 10^{-2} x^{-0.0844} e^{-\beta x}$

三、用雷达回波参数估算积云降水参数

1. 用雷达回波参数估算积云单站雨强和降水量

(1) 积云样本选取的规定

(a) 积云距雷达站的距离 D 不得超过 60km；(b) 雷达回波强中心的水平位置偏离地面雨量计不得超过 5km；(c) 该积云与雷达站间无其它云、降水和障碍物遮挡；(d) 雷达的 PPI 和 RHI 观测周期不长于 5 分钟；(e) 雷达回波参数均有对应的地面降水资料。

本节所用回波参数一般均为对一次观测周期而言。雷达最大雨强由雨滴谱的 $Z=A I^b$ 关系和雷达最大反射率因子 Z_M 确定，即 $I_{r,M} = \lg^{-1}(\frac{\lg Z_M - \lg A}{b})$ ，单位为 mm/h。实测最大雨强系 10 分钟最大降水量，记为 $I_{r,m}$ ，单位为 mm/h。

(2) 雨强和降水量估算关系式

根据 1979—1987 年观测的 65 块积云(150 个站次)雷达回波资料和对应的地面降水资料，建立了估算积云单站降水的单参数和多参数关系式。经检验，显著性水平达 0.01 和相关系数 r 大于 0.6 的关系式有 144 个，单参数或多参数均以幂指数形式为好。这里仅列

出估算最大雨强、平均雨强和降水量幂指数形式的部分关系式。式中, n 为样本数, H_b 为波束高度(km), T 为持续时间(min)。

(a)用雷达回波参数估算(直接法)

单参数:

$$I = 8.47 \times 10^{-2} Z^{0.5408}, n = 150, r = 0.787. \quad (1)$$

$$I_M = 1.983 \times 10^{-1} Z_M^{0.4541}, n = 114, r = 0.685 \quad (2)$$

$$R = 9.6 \times 10^{-3} Z^{0.628}, n = 150, r = 0.64 \quad (3)$$

双参数:

$$I = 5 \times 10^{-2} H^{0.2861} Z^{0.5302}, n = 150, r = 0.804 \quad (4)$$

$$I_M = 1.016 \times 10^{-1} H_M^{0.5318} Z_M^{0.3972}, n = 114, r = 0.68 \quad (5)$$

$$R = 4.6 \times 10^{-3} H^{0.3218} Z^{0.6312}, n = 150, r = 0.682 \quad (6)$$

多参数:

$$I = 9.7 \times 10^{-2} D^{-0.331} T^{0.0603} H_b^{0.05} A^{0.1443} H^{0.148} Z^{0.5146}, n = 137, r = 0.824 \quad (7)$$

$$I_M = 7.47 \times 10^{-2} D^{-0.274} T^{0.3559} H_b^{0.073} A^{0.2187} H_M^{0.26} Z_M^{0.3742}, n = 104, r = 0.73 \quad (8)$$

$$R = 1.9 \times 10^{-3} D^{-0.3399} T^{1.057} H_b^{0.055} A^{0.1338} H^{0.113} Z^{0.5098}, n = 137, r = 0.92 \quad (9)$$

(b)用雨滴谱的 $Z-I$ 关系估算(间接法)

$$I = 1.3589 \times 10^0 D^{-0.174} T^{0.07} H_b^{-0.087} H^{0.294} I_r^{0.722}, n = 150, r = 0.89 \quad (10)$$

$$I_M = 5.244 \times 10^{-1} D^{-0.1839} T^{0.3457} A^{0.206} H_b^{-0.71} H_M^{0.217} I_{rm}^{0.503}, n = 104, r = 0.74 \quad (11)$$

$$R = 6.111 \times 10^{-1} D^{-0.3897} T^{0.3758} A^{0.1527} H_b^{0.1287} H^{0.0947} R_r^{0.6514}, n = 137, r = 0.91 \quad (12)$$

(3)估算关系式的检验

应用(7)一(12)式对1979—1985年湖南安化和长沙等地24块积云(41个站点)的降水进行了估算,另外还用(7)一(9)式对广东106块积云的最大雨强、81块积云的平均雨强和60块积云的降水量逐一进行了估算,并与地面实测值比较。总的平均相对误差在10%以下(表4),80%概率时的最大相对误差在75%以下。

表4 积云降水实测值与估算值的误差

地名	估算关系式	样本数	平均实测值 (mm/h, mm)	平均估算值 (mm/h, mm)	误差(%)
湖 南	(7)	41	18.87	17.47	7.43
	(8)	29	31.07	33.51	7.89
	(9)	41	7.82	7.98	2.05
	(10)	41	18.87	17.72	6.10
	(11)	29	31.07	29.21	5.9
	(12)	41	7.82	7.91	1.15
广 东	(7)	81	17.86	16.73	6.3
	(8)	106	18.58	18.86	1.5
	(9)	60	24.12	25.72	6.6

2.用雷达回波参数估算单块积云总降水

(1)用雷达回波单参数估算降水参数

根据降水大部分在试验区内的 27 块自然积云的雷达回波参数与降水参数建立的回归关系式如表 5 所示。

表 5 雷达回波单参数与降水参数的回归关系式

回波参数	降水持续时间 $T(\text{min})$	水层厚 $L(\text{mm})$	雨强 $I(\text{mm}/10\text{min})$	总降水量 $Q(10^6\text{kg})$
顶高(km)	$2.9606+7.6853H$ $r=0.37$	$-5.3056+0.9998H$ $r=0.72$	$-9.4792+1.758H$ $r=0.66$	$9.3446e^{0.14197H}$ $r=0.73$
面积(km ²)	$-73.9211+34.004\ln A$ $r=0.56$	$1.9459+0.0216A$ $r=0.57$	$0.3128A^{0.6412}$ $r=0.60$	$3.1648A^{1.1611}$ $r=0.68$
体积(km ³)	$-140.38+32.499\ln V$ $r=0.60$	$1.8048+0.0022V$ $r=0.71$	$0.0557V^{0.6829}$ $r=0.72$	$0.1454V^{1.2302}$ $r=0.81$

(2)用雷达回波多参数估算降水参数

经单参数相关分析表明,回波顶高、面积与积云的降水参数之间存在着较好的关系,为了综合考虑雷达回波多参数与降水参数的关系,将 27 块云的资料与雷达回波多参数进行回归分析,建立的总降水量、雨强、水层厚和降水持续时间的回归关系式分别是:

$$\lg Q = -0.41 + 0.146H_M + 0.8895\lg A_M, \quad r = 0.88 \quad (13)$$

$$I = -21.39 + 1.444H_M + 7.713\lg A_M, \quad r = 0.78 \quad (14)$$

$$L = -10.89 + 0.8522H_M + 3.621\lg A_M, \quad r = 0.81 \quad (15)$$

$$T = -10.4 + 4.863H_M + 6.925\lg A_M, \quad r = 0.61 \quad (16)$$

(13)—(16)式的 F 值均大于 $F_{0.01}(5.61)$, 回归效果比单参数显著。

用(13)—(16)式估算了 1979—1985 年湖南新化和长沙等地人工增雨试验取得的 11 块积云的总降水量、雨强、水层厚和降水持续时间,并与实测值作了比较,其平均相对误差分别为 12%、49%、55%、0; 80% 概率时相对误差的最大值分别为 49%、166%、227% 和 57%。由此可见对总降水量和降水持续时间的估算效果较好。

上述统计分析结果和估算方法已在湖南人工增雨试验中应用。

致谢: 感谢陈历舒副研究员对本工作的指导。参加雷达和降水观测的有王治平、熊华南、王英才、刘凤姣、田亚龙和贾缙云等同志,一并致谢。

参 考 文 献

- [1] 陈历舒,用雷达回波参数估算积云降雨的一种方法及其在人工降雨中的应用,中国南方云物理学和人工降雨论文集,气象出版社,1986年。
- [2] 张令钊,用雷达回波平均参量检验福建古田流域人工降雨效果,气象学报,47,2,1989。
- [3] Rauli, E. L., Jack Thomas, D. O. Blanchard and R. L. Holle, Estimation of rainfall over an extended region using only measurements of the area covered by radar echoes, 21 st Conference on Radar Meteorology, 681—686, September 19—23, 1983.
- [4] 刘国生、王治平,高炮人工增雨随机试验雨量分析系统,气象,15,2,1989。
- [5] Simpson, J., W. Woodley, A. Olsen and J. C. Eden, Bayesian statistics applied to dynamic modification experiments on Florida cumulus clouds, *J. Atmos. Sci.*, 30, 6, 1180—1182, 1973.
- [6] 王治平,卓仁荣,陈历舒,长沙地区单块积云地面降水统计特征分析,热带气象,3,1,1987。
- [7] 徐永胜,毛伟康,用雷达回波参数估算积云降水的交叉检验,气象,17,2,1991。

**STUDY ON THE FEATURES OF RADAR ECHO AND
RAINFALL OF NATURAL CUMULUS IN SUMMER AND AUTUMN
AND THE ESTIMATION OF RAINFALL**

Xu Yongsheng Liu Yaozun Han Siying

(Institute of Meteorology, Hunan Province, Changsha, 410007)

Abstract

The features of radar echo and rainfall of cumulus are analysed by using the field observational data obtained in Hunan Province in summer and autumn, 1979—1988. The regression relations of radar echo parameters with the rainfall amount of single station, depth of rainfall, total rainfall amount and rainfall density are then established. The test of such relations using the cumulus rainfall data in Hunan and Guangdong Provinces indicates that they are applicable, to a certain degree, in estimating cumulus rainfall in the vast areas of southern China.