

对流云总降水量和降水效率估测*

陈秋萍¹⁾ 曾光平²⁾ 冯宏芳²⁾ 隋平²⁾ 朱炜灵¹⁾

¹⁾(福建省建阳雷达站,建阳 354200)

²⁾(福建省气象科学研究所,福州 350001)

1 对流云定量降水估测多元回归分析

为使雨量资料和雷达资料在空间上取得较好一致性,设定雷达资料取样原则为:①考虑到距离衰减作用,在50~100 km内使用相同阈值15 dBz(即 Z_i 为15 dBz),小于该强度的回波认为是非降水事件;②为了使雷达资料在空间上有较好连续性,雷达回波参数值采用5点平均方法。根据上述原则2001年和2002年7~9月在福建省建阳雷达站共收集到与地面自记雨量站(气象站和自动雨量站)同步对应的多普勒雷达资料样本223个。多普勒雷达强度产品分辨率为1 km×1 km。

为使雷达体扫资料与地面降雨观测资料时间上同步,在收集自记雨量资料时必须考虑雨滴从云底落到地面时间。地面观测经验表明,研究区域7~9月对流云降水时云底高度一般在1000~2000 m左右,以中等降水强度水滴直径取1.0~3.0 mm,下落速度取4.03~8.06 m/s,则雨滴从云底落到地面时间约为3~6 min,为此对应与雷达观测时间地面雨量资料相应推迟6 min(即如雷达观测时间为10:00,认为观测到的回波参数值代表09:57~10:03的回波参数值,则对应地面雨量站资料取10:00~10:06)。

对流云降水估测的经典方法是建立雷达回波和降水量 $Z-I$ 关系,即 $Z = AI^B$ 。然而,利用该式估测的降水量往往不够理想。为此,我们建立了如下关系式,即 $I = A + B_i Z_i$ (Z_i 为雷达回波参数, A 为常数, B_i 为系数)。本文在建立降水量与新一代天气雷达多种回波参数多元回归方程同时还挑选这些参数的变化值(即前后一个体扫的变化),因为这些变化值表示云体的变化,它与降水有直接的关系。运用CINRAD产品有如下6个参数:1.5°、2.4°和3.4°反射率因子、回波高度、回波面积、垂直累积液态含水量以及这些参数的变化量。由于这些参数与降水量之间不是呈线性相关,因此在逐步回归之前先分析各单因子和降水量之间取不同变换时的相关性,然后再将相关性最好的变换确定为逐步回归时的变换。经过逐步回归取得降水量(I)与各因子的多元回归方程为:

$$\lg_{10} I = -0.383 + 0.016 X_1 + 0.006 X_2 - 0.024 X_3 + 0.021 X_4 + 0.043 X_5^{1/2} - 0.121 X_6 + 0.276 X_7^{1/2} + 0.037 X_8^{1/3} \quad (1)$$

式(1)中, X_1 、 X_3 、 X_4 分别是扫描仰角为1.5°、2.4°和3.4°时的反射率因子(单位:dBz); X_2 和 X_5 分别为 X_1 和 X_4 的变化量(单位:dBz); X_6 为回波高度(单位:km); X_7 为垂直

* 本研究获得科技部2001BA6101-01.05专题和福建省科技厅自然科学基金项目D0410025及福建省科技厅重大项目2000Z024共同资助。

2004-05-27收到,2004-11-04收到再改稿。

累积液态含水量(单位: kg/m^2); X_8 为 ≥ 30 dBZ 回波面积(单位: km^2)。复相关系数 $r_{\text{复}} = 0.6965$ ($\alpha < 0.001$)。

将式(1)和传统的 $Z-I$ 关系相比较,可以看出本文建立的多元回归方程不仅包含中低层云体反射率因子,还包含它们的变化值;此外从式(1)还可以看出垂直累积液态含水量和回波面积对降水量有一定影响,而且垂直累积液态含水量这一因子的系数在众多因子中最大,表明该因子对降水影响最大。

2 对流云总降水量的估算

利用式(1)得出对流云降水量与 CINRAD 各参数的多元回归方程,估测对流云不同发展阶段降水量和对流云整个生命史的总降水量。

(1) 单体对流云:2003年8月4日13:00(北京时,下同)在测站 201° 、65 km 处新生一块对流云单体,尺度 3 km^2 ,强度 5 dBZ,高度不到 5 km,云底 2.5 km,向偏西方向移动。13:07 强度增强为 30 dBZ,面积增大为 8 km^2 ,30 dBZ 强度回波面积约 3 km^2 ,高度发展到 5.6 km,云底也向下伸到 2 km 以下。此后云体继续向上向下发展,强度增强,尺度增大,13:13 回波及地,13:19 云体强度达 50 dBZ,30 dBZ 强回波面积约 30 km^2 ,是 13:07 的 10 倍,此时回波高为 7.0 km,50 dBZ 最强区处于 3.4 km 高度附近,最大 VIL 值为 $7.5 \text{ kg}/\text{m}^2$,整块云体液态水总量为 $2.8 \times 10^8 \text{ kg}$,及地时间约 18 min(13:13 ~ 13:31)。13:37 后回波明显减弱,云底上抬,VIL 也降为 $2.5 \text{ kg}/\text{m}^2$,整块云体的液态水总量为 $1.2 \times 10^8 \text{ kg}$ 。13:56 已基本消亡,生命史 50 多分钟。图 1 是单体移动路线图。单体于 13:13 ~ 13:25 过顺昌县。

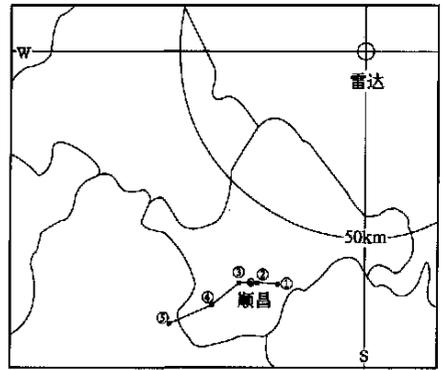


图 1 单体对流云移动路线图

(①②③④⑤)分别是单体初生、及地、发展成熟、减弱、消亡阶段,对应时间分别是 13:00、13:13、13:19、13:37、13:56)

表 1 列出单体经过顺昌站时根据式(1)计算出 6 min 降水量和测站实测值。

由表 1 可以看出,由式(1)计算得出雨量资料与实测值误差在雨量小时误差大。过测站三个体扫时间(18 min)实测雨量值共计 3.4 mm,估算值为 2.9 mm,偏少 0.5 mm,相对误差为 -14.7%,从这一个例可以看出采用式(1)估算的雨量与实测雨量较接近。

该单体降水时间(即雷达观测到回波接地时间)为 13:13 ~ 13:31,用式(1)计算出三个不同阶段整块对流云降水量,发展阶段为 $8.21 \times 10^3 \text{ m}^3$,成熟阶段为 $110.24 \times 10^3 \text{ m}^3$,减弱阶段仅有 $4.56 \times 10^3 \text{ m}^3$ 。整个生命史总降水量为 $123.01 \times 10^3 \text{ m}^3$ 。

(2) 单体合并对流云:2003年8月31日14:24在测站 33° 、83 km 处新生一块对流云

表 1 单体对流云过顺昌站时实测雨量 ($I_{\text{实}}$) 和计算雨量 ($I_{\text{计}}$) mm/6 min

雷达观测时间	13:13	13:19	13:25	合计
$I_{\text{计}}$	0.7	2.0	0.2	2.9
$I_{\text{实}}$	0.9	2.4	0.1	3.4
相对误差/%	-22.2	-16.7	+50.0	-14.7

注:相对误差 = $\frac{I_{\text{计}} - I_{\text{实}}}{I_{\text{实}}} \times 100\%$

单体,强度 10 dBz,云高 4.0 km,云底 3.0 km,尺度约 2 km²,14:30 在测站 38° 30 km 附近另一块强度 10 dBz,尺度约 4 km² 的对流云小单体新生,这两块单体各自在原地附近发展加强。14:54 第一块对流单体及地,该云体强度达 60 dBz,最强区位于 4~6 km 的空中,云高 10 km, VIL 为 32.5 kg/m², 50 dBz 的回波尺度 50 km²。15:00 两个单体合并,合并后块体增大,结构更加紧密,单体向西南偏西方向移动,12 min 后,50 dBz 的回波尺度增大为 65 km²,此时顶高达 14.5 km, 60 dBz 强区位于 3.5~6.0 km 高度处, VIL 为 37.5 kg/m²,整块云体的液态水总量为 2.72 × 10⁹ kg。15:31 回波明显减弱消散,强度减弱为 50 dBz,50 dBz 的强区面积仅 11 km² 左右,是 15:12 的六分之一左右,顶高降到 10 km 下,最强回波高度降低到 4 km 以下, VIL 也降为 12.5 kg/m²,整块云体的液态水总量为 6.0 × 10⁸ kg。15:55 回波基本消失,生命史 100 min 左右。图 2 是对流云移动路径图。对流云 15:06~15:37 过浦城县。

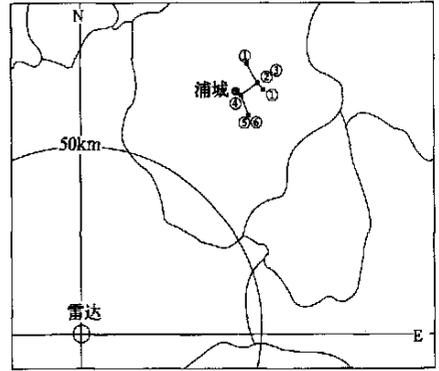


图 2 单体合并对流云移动路径图

(①、②、③、④、⑤、⑥分别是单体初生、及地、合并、发展成熟、减弱、消亡阶段,对应时间分别是 14:24~14:30、14:54、15:00、15:12、15:31、15:55)

表 2 列出两块单体合并后经过测站时根据式(1)计算出的降雨量和实测雨量值。从表 2 可以看出用方程(1)估测对流云经测站降水量在雨小时误差大,随雨强增大相对误差较小,该对流云经过测站 6 个体扫合计相对误差为 -9.4%。可以认为实测值与估算值吻合较好。

表 2 对流云经过浦城站时实测降雨量 ($I_{实}$) 和计算降雨量 ($I_{计}$) mm/6 min

时间	15:06	15:12	15:19	15:25	15:31	15:37	合计
$I_{计}$	7.2	5.3	1.1	0.7	0.1	0.0	14.4
$I_{实}$	8.4	4.8	1.5	1.0	0.2	0.0	15.9
相对误差(%)	-14.3	10.4	-26.7	-30.0	-50.0	0.0	-9.4

对流云整个过程(14:54~15:37)降水量计算值表明,多单体合并对流云成熟阶段每 6 min 整个云体降水量为 10⁵ m³ 量级,最大达 4.43 × 10⁵ m³。发展阶段和减弱阶段仅为 10⁴ m³ 量级,在整个生命史降水总量达到 1.456 × 10⁶ m³,比单体对流云大一个量级。

3 对流云降水效率

本文将降水效率定义为:单位时间内降水量与云内凝结液态水含量之比。

$$\text{即 } W = \frac{I}{Q} \quad (2)$$

地面降水量 I 通过式(1)计算在 Δt 时间(本文为雷达一次体扫间隔时间 $\Delta t = 6$ min)降水量; Q 为 Δt 时间内云内凝结水汽量,它包括 Δt 时间内离开云体降到地面降水量 I 和云内液态水变化量,后者可通过雷达提供垂直累积液态含水量获得。

由式(2)计算 2003 年 8 月 4 日 13:00 所测的单体对流云在不同阶段降水效率(表 3)。从表 3 可以看出发展成熟阶段 Δt 时间内(本文为雷达一次体扫时间即 6 min) $\Delta VIL > 0$, 即在这一阶段由于辐合, 云中液态水总量明显增大, 而且其降水效率随云体发展增大, 发展阶段为 4.41%, 到成熟阶段增加到 20.93% 和 36.13%, 平均为 28.25%, 减弱阶

表 3 单体对流云降水效率

时间	发展阶段		成熟阶段		减弱阶段
	13:13	13:19	13:25	小计	13:31
降水量($10^3 \text{ m}^3/6 \text{ min}$)	8.21	42.36	67.88	110.24	4.56
$\Delta VIL(10^3 \text{ m}^3/6 \text{ min})$	178.00	160.00	120.00	280.00	- 80.00
凝结液态水($10^3 \text{ m}^3/6 \text{ min}$)	186.21	202.36	187.88	390.24	- 75.44
降水效率(%)	4.41	20.93	36.13	28.25	

段云体处于消散阶段云体降水量明显减少, ΔVIL 是负值。

同样, 用式(2)计算出了 2003 年 8 月 31 日 14:00 后多单体合并对流云不同阶段的降水效率(表 4)。分析表 4 可以看出, 多单体合并的对流云在成熟阶段降水效率明显大于发展阶段, 大于 20%, 最大达 65.53%, 平均为 38.29%; 无论是发展阶段和成熟阶段均明显大于单体对流云; 与单体对流云一样在减弱阶段由于辐散和下沉作用垂直累积液态水含量明显减少。

表 4 多单体合并对流云降水效率

时间	发展阶段			成熟阶段			减弱阶段		
	14:54	15:00	15:06	15:12	15:19	15:25	小计	15:31	15:37
降水量 ($10^3 \text{ m}^3/6 \text{ min}$)	35.61	116.37	301.75	442.52	289.98	207.20	1357.82	52.35	10.33
ΔVIL ($10^3 \text{ m}^3/6 \text{ min}$)	238.00	440.00	1000.00	380.00	260.00	109.00	2189.00	- 580.00	- 970.00
凝结液态水 ($10^3 \text{ m}^3/6 \text{ min}$)	273.61	556.37	1301.75	822.52	549.98	316.20	3546.82		
降水效率(%)	13.01	20.92	23.18	53.80	52.18	65.53	38.29		