

利用雷达回波资料对夏季对流云降水的初步探讨*

陈秋萍

(福建省建阳气象雷达站, 建阳 354200)

曾光平 冯宏芳 隋平 郑淑贞

(福建省气象科学研究所, 福州 350001)

提 要

2000 年 7~9 月在福建省建阳气象雷达站利用“713-C”数字化雷达完整地观测到 101 块对流云生成、发展、消亡过程。通过对这些资料分析,探讨夏季对流云降水机制。分析表明:夏季对流云中初始回波出现在 0℃层以下,单体对流云占 89.2%,多单体对流云占 77.8%,其中回波及地时,主体回波扩展到冷暖区多单体明显高于单体(各为 77.8%和 63.9%)。由于多单体对流云其回波强度、尺度及降水时长都大于单体对流云,是夏季降水和人工催化的重要云系。

关键词: 雷达回波 对流云 降水机制

引 言

我国淡水资源短缺,人均占有淡水量只有世界平均值的 1/4,加强对水资源开发研究,特别是对空中水资源开发研究是极为重要的。

我国北方春旱期降水云系主要以层状云为主,这类云降水稳定,云上部在 0℃层以上,可通过冷云催化达到增雨目的。南方夏旱期间降水云系主要以对流云(包括暖积云和混合性积云)为主,云结构和降水过程比北方层状云更为复杂。由于这些云中对流强,穿云探测尚有一定难度。至今,国内对这类云的云水资源分布、开发潜力(特别是对暖云水资源)、降水物理机制及播云技术途径尚未开展过系统的研究。特别是福建省已开展的前期研究表明:南方夏旱期间对流云中暖积云占较大比例,对这类暖积云的自然降水物理机制和人工催化影响的原理和技术途径也未开展系统研究,因而限制了学科的发展,影响了人工增雨在抗旱减灾中的应用。

针对上述问题我们于 2000 年 7~9 月在建阳气象雷达站利用“713-C”数字化雷达对夏季对流云生成、发展、消亡过程开展了大量连续跟踪观测。本文根据云和降水物理学基本原理对所获得的大量样本进行分析,探讨南方对流云自然降水机制及人工影响的技术途径。

* 本研究为福建省科技厅支持的重大科研项目。福建省建阳气象雷达站参加本项研究。

2001-02-06 收到,2001-08-14 收到修改稿。

1 资料观测

1.1 观测要求

利用福建省北部建阳市的“713-C”数字化雷达对夏季对流云进行连续跟踪观测。观测规定如下：

- (1) 观测区域处在副热带高压或大陆高压控制下或在其边缘；
- (2) 雷达观测的降水性对流云具有完整的生命史(初生→发展→接地→消亡)；
- (3) 根据对流云发展演变快,生命史短的特点,规定每 2~3 min 取一套完整的 PPI 和 RHI 回波资料。

1.2 观测结果

从 2000 年 7 月到 9 月中旬共观测到完整的降水性对流云 101 块。根据对流云是否合并分成两大类即单体和多单体。对每一大类又按初始回波生成位置,回波接地时回波主体位置进行分类。

(1) 按初始回波位置分成 3 类：

- I-1 初始回波出现在 0℃层以下(即暖区)；
- I-2 初始回波出现在 0℃层以上(即冷区)；
- I-3 初始回波出现在 0℃层附近(即冷暖区)。

(2) 按回波接地时回波顶位置分成 3 类：

- II-1 回波接地时,回波顶在 0℃层以下为暖云过程降水；
- II-2 回波接地时,回波主体(即强区,回波强度 ≥ 30 dBz 部分,下同)在 0℃层以上为冷云过程降水；
- II-3 回波接地时,回波主体在 0℃层上下以及虽然主体在 0℃层以下,但回波顶已超过 0℃层以上均为混合云过程降水。

表 1 降水性单体对流云(I类)观测结果(83 个个例)

| 个数 | 0℃层以下 (I-1)类 | | | | 0℃层以上 (I-2)类 | | | | 0℃层附近 (I-3)类 | | | |
|----|-----------------|------|------|----|-----------------|------|------|---|-----------------|------|------|---|
| | 暖区 | 冷区 | 冷暖区 | 小 | 暖区 | 冷区 | 冷暖区 | 小 | 暖区 | 冷区 | 冷暖区 | 小 |
| | I-1a | I-1b | I-1c | 计 | I-2a | I-2b | I-2c | 计 | I-3a | I-3b | I-3c | 计 |
| | 21 | 0 | 53 | 74 | 0 | 2 | 0 | 2 | 0 | 0 | 7 | 7 |

表 2 多个降水性单体对流云合并后的对流云(II类)观测结果(18 个个例)

| 个数 | 0℃层以下 (II-1)类 | | | | | 0℃层以上 (II-2)类 | | | | 0℃层附近 (II-3)类 | | | |
|----|------------------|-------|------|-----|----|------------------|-------|-------|---|------------------|-------|-------|---|
| | 暖区 | 冷区 | 冷暖区 | | 小 | 暖区 | 冷区 | 冷暖区 | 小 | 暖区 | 冷区 | 冷暖区 | 小 |
| | II-1a | II-1b | 合并后* | 合并前 | 计 | II-2a | II-2b | II-2c | 计 | II-3a | II-3b | II-3c | 计 |
| | 0 | 0 | 4 | 10 | 14 | 0 | 1 | 1 | 2 | 0 | 0 | 2 | 2 |

* 初始回波出现在 0℃以下,合并前回波接地时回波顶在暖区,合并后回波发展到 0℃层以上,统计时归入冷暖区(下同)。

表 1、表 2 为降水性对流云观测结果。由表可见:

① 夏季在副热带高压和大陆高压影响下降水性对流云以单体为主,占 82.17% (83/101)。

② 初始回波出现在 0℃层以下占全部个例的 87.13%。即大部分对流云最初在暖区生成。其中单体回波占 73.27%,多个单体回波占 13.86%。初始回波出现在 0℃层附近占全部个例的 8.91%,其中单体回波占 6.93%,多个单体回波占 1.98%。初始回波出现在 0℃层以上最少,仅占 3.96%。

③ 初始回波出现在 0℃层以下,回波接地(即出现降水)时,回波在暖区占全部个例的 20.79%,全部是单体回波;多个单体对流云合并后的对流云,合并后的回波均发展到 0℃层以上;主体在 0℃层附近(处于冷暖区)占全部个例的 66.34%(67/101),其中单体回波占 52.48%(53/101),多个单体合并的回波占 13.86%;主体在 0℃层以上(处于冷区)的情况未出现。

④ 初始回波出现在 0℃层附近,回波接地时回波主体全部出现在 0℃层附近,未出现在暖区和冷区。

⑤ 初始回波出现在 0℃层以上(冷区),回波接地时回波主体也基本出现在冷区,占全部个例的 2.97%(3/101),出现在冷暖区仅占全部个例约 1%。

2 夏季对流云回波特征

表 3 和表 4 列出二大类(单体、多个单体合并)对流云统计特征。

表 3 夏季单体对流云回波特征

| | | 0℃层以下 (I-1)类 | | | 0℃层以上 (I-2)类 | | | 0℃层附近 (I-3)类 | | |
|--------|-----------------------|-----------------|------|------|-----------------|------|------|-----------------|------|------|
| | | 暖区 | 冷区 | 冷暖区 | 暖区 | 冷区 | 冷暖区 | 暖区 | 冷区 | 冷暖区 |
| | | I-1a | I-1b | I-1c | I-2a | I-2b | I-2c | I-3a | I-3b | I-3c |
| 生命史 | 平均 | 41 | | 42 | | 63 | | | | 46 |
| | (min) 最长 | 107 | | 119 | | 63 | | | | 62 |
| 水平尺度 | 平均 | 61 | | 68 | | 108 | | | | 83 |
| | (km ²) 最大 | 256 | | 300 | | 143 | | | | 240 |
| 强度 | 平均 | 41 | | 44 | | 48 | | | | 45 |
| | (dBz) 最强 | 45 | | 50 | | 50 | | | | 50 |
| 最高高度 | 平均 | 5.3 | | 8.3 | | 15.3 | | | | 10.0 |
| | (km) 最高 | 5.5 | | 11.0 | | 15.5 | | | | 15.0 |
| 强中心高度 | 平均 | 4.0 | | 7.5 | | 12.3 | | | | 8.4 |
| | (km) 最高 | 4.7 | | 10.0 | | 12.5 | | | | 12.0 |
| 接地时强中心 | 平均 | 4.0 | | 7.0 | | 9 | | | | 9.4 |
| | 高度(km) 最高 | 4.5 | | 9.5 | | 10 | | | | 13.0 |
| 回波接地时长 | 平均 | 15 | | 18 | | 28 | | | | 15 |
| | (min) 最长 | 35 | | 69 | | 28 | | | | 37 |

表4 夏季多个对流云单体合并后的对流云回波特征

| | | 0℃层以下 (II-1)类 | | | 0℃层以上 (II-2)类 | | | 0℃层附近 (II-3)类 | | |
|----------------------------|----|------------------|-------|-------|------------------|-------|-------|------------------|-------|-------|
| | | 暖区 | 冷区 | 冷暖区 | 暖区 | 冷区 | 冷暖区 | 暖区 | 冷区 | 冷暖区 |
| | | II-1a | II-1b | II-1c | II-2a | II-2b | II-2c | II-3a | II-3b | II-3c |
| 生命史 (min) | 平均 | | | 109 | 58 | 53 | | 76 | 95 | |
| | 最长 | | | 163 | 58 | | 76 | 95 | | |
| 水平尺度 (km ²) | 平均 | | | 273 | | | 600 | 270 | | |
| | 最大 | | | 500 | | | 600 | 270 | | |
| 强度 (dBz) | 平均 | | | 46 | 45 | 45 | 45 | 45 | | |
| | 最强 | | | 55 | 45 | 45 | 45 | 45 | | |
| 最高高度 (km) | 平均 | | | 10.4 | 13.0 | 13.0 | 12.0 | 10.0 | | |
| | 最高 | | | 13.0 | 13.0 | 13.0 | 12.0 | 10.0 | | |
| 强中心高度 (km) | 平均 | | | 8.2 | 10.0 | 9.0 | 9.0 | 7.5 | | |
| | 最高 | | | 12.5 | 10.0 | 9.0 | 9.0 | 7.5 | | |
| 接地时强中心 高度(km) | 平均 | | | 7.6 | 10.0 | 9.0 | 9.0 | 7.0 | | |
| | 最高 | | | 11.5 | 10.0 | 9.0 | 9.0 | 7.0 | | |
| 回波接地时长 (min) | 平均 | | | 63 | 34 | 26 | 38 | 42 | | |
| | 最长 | | | 117 | 37 | 37 | 47 | 53 | | |

分析表3和表4可得出:

① 初始回波出现在暖区(即0℃层以下)回波接地时回波顶位于暖区的单体对流云(第(I-1a)类)其生命史、回波强度、尺度均不及初始回波出现在暖区,合并前回波已接地时回波顶也位于暖区,但合并后发展到0℃以上的多单体合并对流云(第(II-1c)类)。

a 第(I-1a)类平均生命史仅为41 min,第(II-1c)类生命史长达109 min,为第(I-1a)类云的2.5倍。

b 第(II-1c)类对流云水平尺度远大于第(I-1a)类对流云,是它的4倍,前者平均值为273 km²,后者平均仅为61 km²。

c 第(II-1c)类对流云回波强度也强于第(I-1a)类对流云,前者平均回波强度比后者大5 dBz。

d 接地时长(即降水延续时间)第(I-1a)类对流云平均仅为15 min,第(II-1c)类平均长达63 min,这表明多个对流云单体合并后对流云自然降水条件优于单体对流云。

② 初始回波出现在暖区,回波接地时主体位置在冷暖区(即混合型降水)的单体对流云(第(I-1c)类)其生命史、回波强度、高度等也弱于多个对流云单体合并后的对流云回波(第(II-1c)类)。

a 第(I-1c)类平均生命史为42 min,第(II-1c)类平均生命史为109 min,后者为前者的2.5倍。

b 水平尺度第(II-1c)类平均为273 km²是第(I-1c)类的4倍。

c 这两类对流云平均回波强度无大差异。

d 降水延续时间,第(I-1c)类对流云平均为18 min,第(II-1c)类平均长达63 min,可见多个对流云单体合并后的对流云自然降水条件优于单体对流云。

e 对流云发展高度、强中心高度等各回波参数,多个对流云单体合并后的对流云均比单体对流云强。

③ 其他类型对流云,由于样本过少,代表性差,本文不作详细讨论。

④ 101 块对流云中仅有 9 块获取地面降水资料。其中纯暖云降水 3 块,初始回波在暖区,回波接地时回波主体在冷暖区的混合云降水 5 块。多个对流云单体合并的对流云 1 块。降水资料表明:纯暖云降水降水量最少仅几毫米至十几毫米,混合云降水量在十几毫米至 20 mm。

3 夏季对流云降水机制的初步分析

在云物理学中按温度将降水云系分为暖云降水、冷云降水和混合云降水。根据云和降水理论,这三种类型降水过程云和降水机制有本质差别^[1,2]。雷达回波通常是由云中的降水粒子产生的,因此,雷达的初始回波反映降水已开始形成。根据初始回波在云中的位置、回波扩展和增强的速率,并配合温度观测,可以了解降水的发展和演变,分析降水形成的物理过程。

3.1 暖云降水

从表 1 可以看出有 87.13% 的降水性对流云(包括单体和多单体合并的对流云)初始回波出现在 0 °C 以下,其中 23.86% 回波接地(降水着地)时云体回波主体(强中心部分)仍在 0 °C 以下。这说明降水粒子是液态的,是由凝结-碰并过程形成的。

图 1 是 8 月 26 日在建阳气象雷达站观测到方位 46.1°, 距离雷达站 54 km 处的一块对流云单体。当天 0 °C 层高度为 5.5 km。从图中可以看出在 15:10(北京时,下同)观测到初始回波,回波迅速向上向下发展,9 min 后回波中心强度达到 40 dBz,水平尺度为 8 km × 10 km,开始接地(即出现降水);此时回波顶仍在 0 °C 以下,到 16:19 消散,生命史为 69 min。降水延续时间为 21 min。这次对流云单体初始回波出现在暖区(0 °C 层以下),从初始回波出现直至回波消失(包括回波接地出现降水)回波均处于 0 °C 层以下,显然这是一块纯暖云降水对流云。

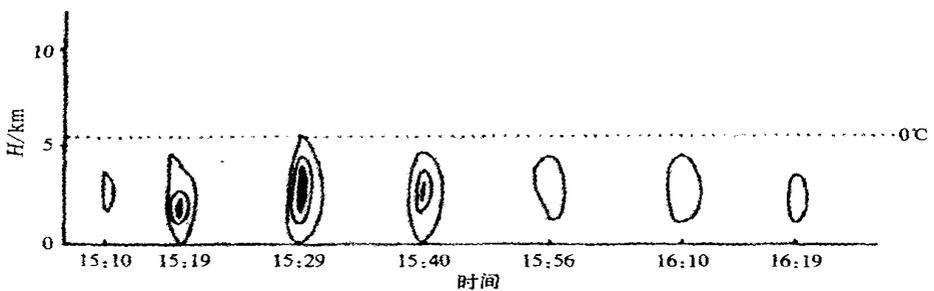


图 1 2000 年 8 月 26 日 15:10 ~ 16:19 位于测站 46.1°, 54 km 处
雷达回波时间剖面图(雷达回波强度间隔为 10 dB)

3.2 多个对流云单体合并降水

图 2 是 8 月 2 日在建阳气象雷达站观测的一次 2 块单体对流云合并的降水性积云的

生消过程。当天 0°C 层高度为 5.5 km 。从回波演变过程看出在 $15:34$ 离测站 95 km , 方位 63° 和 108 km , 方位 62.8° 处分别出现 2 块对流云单体初始回波, 经 14 min 后 2 块回波同时接地。此时 2 块回波基本在 0°C 以下, 强度均达 $40\sim 45\text{ dBz}$ 。水平尺度达 $6.0\text{ km}\times 8.0\text{ km}$ 和 $8.0\text{ km}\times 10.0\text{ km}$, 属暖云降水。 $16:25$ 两块对流单体合并, 合并后的对流云又迅速发展, 水平尺度增大到 $12\text{ km}\times 20\text{ km}$, 高度达 7.5 km 以上; 强度达 45 dBz 以上, 降水继续出现, 属混合云降水。合并后生命史延长, 达 134 min , 降水延续时间达 100 min 。

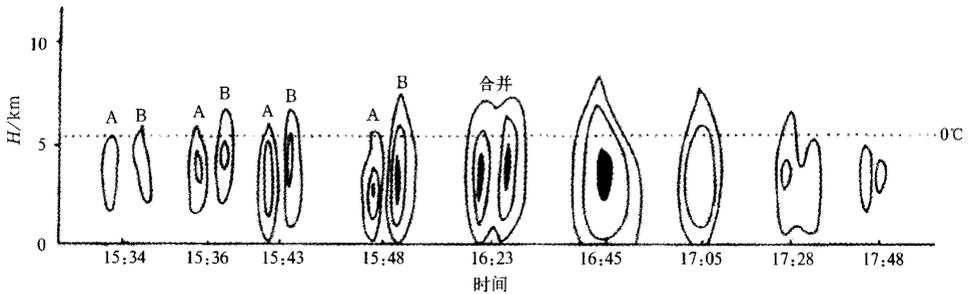


图2 2000年8月2日 $15:34\sim 17:48$ 位于测站 $63^{\circ}, 95\text{ km}$ 和 $62.8^{\circ}, 108\text{ km}$ 处
雷达回波时间剖面图(雷达回波强度间隔为 10 dB)

从回波生消过程可以看出合并前 2 块对流云单体均是纯暖积云。合并后云体有明显的发展, 回波高度达 7.5 km , 0°C 层以上最强部分为 30 dBz , 其水平尺度为 $2\text{ km}\times 1\text{ km}$, 厚度为 1 km 。这表明合并后在云体上部存在冰晶和过冷水, 冰相参与降水形成过程, 而在 0°C 以下存在大量的水滴。合并前后云体的变化表明从合并前暖云降水过程合并后发展为混合云降水。

3.3 混合型对流云降水

混合型对流云降水(包括单体和多个单体合并, 下同)在夏季对流云降水中占 76.2% , 其中有 87.01% 初始回波仍出现在 0°C 层以下, 表明降水形成的初始阶段仍是凝结碰并过程, 随着对流云向上向下发展, 当云体向上发展进入 0°C 层以上后, 原来的暖对流云成为混合型对流云。

图3是8月4日观测到的这类云的典型例子, 当天 0°C 层高度为 5.5 km 。下午

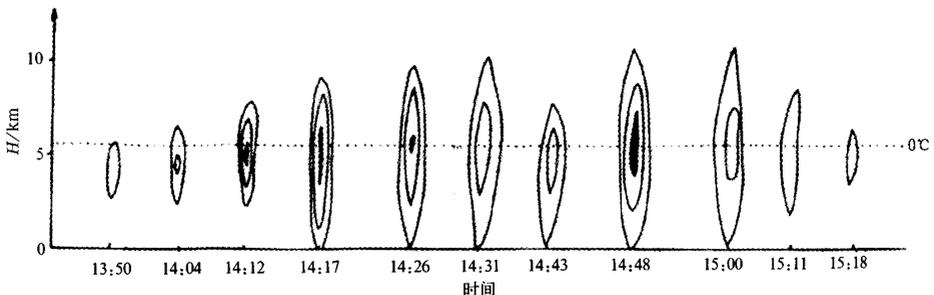


图3 2000年8月4日 $13:46\sim 15:20$ 位于测站 $266.4^{\circ}, 130\text{ km}$ 处
雷达回波时间剖面图(雷达回波强度间隔为 10 dB)

13:46 在方位 266.4° 离测站 130 km 处 0°C 层下出现对流云初始回波,回波迅速向上向下发展,14 min 后回波发展到 0°C 层以上。31 min 后回波接地,此时回波高度达 8.5 km ,水平尺度为 $8\text{ km}\times 10\text{ km}$,62 min 回波高度最高达 10.0 km ,强中心强度为 45 dBz , $> 30\text{ dBz}$ 回波在 $2.5\sim 7.5\text{ km}$ 之间。整个生命史为 94 min 。降水持续时间为 43 min 。

从回波生消发展过程可以看出:初始回波在 0°C 层以下生成,表明最初降水形成是凝结-碰并过程;当云体发展到 0°C 层以上,随着冰晶和过冷却水出现,冷云降水的冰水转化过程即出现。冰晶增大下落到 0°C 层以下溶化成雨滴,在暖区触发凝结-碰并,整个云体降水过程为混合云降水。

4 结 论

通过雷达对降水性对流云回波生消过程大量观测结果分析,揭示了南方夏季降水性对流云特征和降水机制,为进一步探讨人工影响原理和技术途径提供科学依据。

(1) 观察资料表明,20.79%的降水性对流云不仅初始回波出现在暖区(即 0°C 层以下),而且回波接地(即出现降水)时回波也在暖区。这表明夏季降水性对流云暖云降水是不可忽视的,这类降水性对流云水滴胚胎的凝结增长是形成初始云滴的重要物理过程,同时从云滴转化为雨滴主要依靠云滴碰并增长。由于云滴的形成、增长、直至降水都出现在暖区,因此无冰相过程参与,属于纯暖云降水。

(2) 多个对流性单体合并的降水性对流云虽然只占 17.82%,但是这类对流云无论是回波强度、水平尺度、高度、生命史及降水时长等都远比单体降水性对流云大。显然其自然降水条件优于后者,是夏季降水和人工催化的主要对象。

(3) 混合型降水性对流云占夏季对流性降水云中 76.23%(包括单体对流云和多个降水性单体对流云合并的对流云),但它们发展较高,回波强度也较强,降水时长也较长,比纯暖云的对流云发展成熟,是夏季自然降水主要云型,也是人工催化的主要对象。这类云中初始回波出现在 0°C 层以下占该类 87.01%,初始回波出现在 0°C 层附近占 11.69%,初始回波出现在 0°C 以上仅占 1.30%。这表明这类对流云大部分是通过水滴凝结增长过程而形成云滴的。随着对流云的发展,云体进入 0°C 以上,冷云降水过程也随之出现。

(4) 为进一步探讨夏季对流云降水特征,应进一步开展包括数值模拟、多普勒雷达等其他探测工具综合研究。

参 考 文 献

- 1 梅森 B J. 云物理学. 中国科学院大气物理研究所译. 北京: 科学出版社, 1978.
- 2 曾光平, 吴章云. 人工降水. 福州: 福建省科学技术出版社, 1997.

DISCUSSION ON CONVECTIVE CLOUD PRECIPITATION IN SUMMER USING RADAR ECHO DATA

Chen Qiuping

(*Jianyang Weather Radar Station, Fujian Province, Jianyang 354200*)

Zeng Guangping Feng Hongfang Sui Ping Zheng Shuzhen

(*Fujian Research Institute of Meteorological Science, Fuzhou 350001*)

Abstract

By using "713" digitized radar, the formation, development and dissipation processes of 101 convective clouds have been observed from July to September 2001 in the Jianyang weather radar station. Through analyzing these data, the convective cloud precipitation mechanisms in summer are discussed. The results indicate that initial echoes of 89.2% convective and 77.8% multiple-cell convective clouds appear below the 0 °C level; when the echoes reach the ground, compared to convective cells, the major echoes of obviously more multiple-cell convective clouds would expand to the cold/warm zone. Because the echo intensity, scale, precipitation time of multiple-cell convective clouds are greater than the convective cells, they are key precipitation cloud systems in summer and important to artificial precipitation.

Key words: Radar echo Convective cloud Precipitation mechanism