

## 福建省古田试验区云系回波特征与人工增雨作业条件分析

林长城<sup>①\*</sup>,姚展予<sup>②</sup>,林文<sup>①</sup>,陈彬彬<sup>①</sup>,李丹<sup>①</sup>,江善赐<sup>③</sup>

① 福建省气象科学研究所,福建 福州 350001;

② 中国气象科学研究院,北京 100081;

③ 古田县气象局,福建 宁德 352200

\* 联系人,E-mail:changcheng\_lin@163.com

2014-08-05 收稿,2014-11-27 接受

科技部公益性行业(气象)科研专项(GYHY201406033);中国气象局气象关键技术集成与应用(CMAGJ2013M24);华东区域气象科技协同创新基金合作项目(QYHZ201406);福建省气象局开放式气象科学研究基金项目(2013K03;2016K04)

**摘要** 利用2008—2012年4—6月古田试验区的新一代天气雷达、探空及地面雨量观测等资料,结合天气形势分析,研究古田试验区云系的回波特征与人工增雨作业条件,结果表明:影响古田试验区的主要天气系统分别为低涡切变、暖区辐合、高空槽和大陆高压。降水云系以积层混合云为主,其次为积状云。天气系统所对应的云系回波类型及降水情况有明显差异,积层混合云的结构有利降水;积层混合云大于25 dBz的回波面积明显比积状云大,且平均回波顶高和最大回波顶高均比积状云低;积状云的垂直积分液态水含量明显比积层混合云大;积状云和积层混合云的负温层厚度超2 km;积层混合云的最大回波强度、大于25 dBz的回波面积和负温层厚度与区域平均日雨量有着明显的对应关系。古田试验区积层混合云的作业指标为回波强度大于25 dBz,大于25 dBz的回波面积 $S_{>25\text{ dBz}}$ 要大于400 km<sup>2</sup>,回波顶高大于5.5 km,负温层厚度大于1.5 km,垂直积分液态水含量大于1 kg/m<sup>2</sup>。

**关键词**  
福建古田  
雷达回波特征  
作业条件

福建省古田水库流域人工增雨效果检验随机试验研究起始于20世纪70年代,前后长达12 a(1975—1986年)。除了统计检验外,还进行雷达回波、雨滴谱、大气冰核和雨水中Ag<sup>+</sup>含量观测等项目的物理检验研究,为统计检验取得的结论提供一定的科学佐证。其中积层混合云的增雨效果最明显,也是古田试验区的主要降水云系(曾光平等,1993)。随着人工影响天气业务和科研水平的不断提高,天气雷达在人工增雨中的广泛应用,对云系结构特征、人工增雨作业技术的需求日趋强烈,与人工增雨作业相关的物理证据研究更受重视,尤其是作业对象云的自然结构特征、增雨潜力及相应人工增雨的作业条件的分析等。国内外学者对此进行了不少相关领域的研究,如对地形云中嵌入的对流泡开

展观测研究(Fuhrer and Schaer,2005)。在浓密的层状云中嵌入发展浓厚、旺盛的对流云,Hobbs et al.(1980)认为催化供给云机制和强对流对降水的产生都有重要作用。Silverman(2001)针对对流云催化作业的增雨效果进行评估。刘莹莹等(2012)通过多普勒雷达和飞机穿云观测发现积层混合云是由对流单体多次并合形成的带状对流云团减弱后形成的,云中嵌有明显的对流泡。张佃国等(2010)通过飞机观测发现积层混合云催化后,小云滴尺度在低层减小、高层增加,整层液态水含量减小;大云滴浓度增加,尺度增大,出现降水粒子,固态粒子类型增多。陈冰等(2003)、仲凌志等(2010)、林长城等(2011)、崔丹等(2012)利用新一代天气雷达资料分别开展混合型降水过程中层状云和对流云识别、闽

**引用格式:**林长城,姚展予,林文,等,2017.福建省古田试验区云系回波特征与人工增雨作业条件分析[J].大气科学学报,40(1):138-144.

Lin C C, Yao Z Y, Lin W, et al., 2017. Analysis on cloud echoes characteristics and operational conditions of precipitation enhancement in Gutian of Fujian[J]. Trans Atmos Sci, 40(1): 138-144. doi: 10.13878/j.cnki.dqkxxb.20140805001. (in Chinese).

西北地区降水回波特征、人工增雨作业效果分析。蔡兆鑫等(2013)在河北张家口地区的人工增雨作业综合观测中指出积层混合云的可播性与雷达回波有一定的对应关系。王广河和姚展予(2003)在综合南方夏季对流云人工增雨潜力区识别技术的基础上,优选和集成出人工增雨成套技术。李玉林和李梅(2006)通过对夏季对流云结构特征的分析,为江西人工增雨作业提供了科学依据。张建军等(2010)提出利用雷达等探测资料 and 不同分析手段来识别不同类型降水云的方法。于翡和姚展予(2009)在一次积层混合云降水实例的数值模拟分析中发现,积层混合云具有冷云过程和暖云过程共存的相态混合的特征。洪延超和周非非(2005)、洪延超(2012)利用层状云模式对冷锋降水性层状云云系“催化—供给”降水机制的微物理分析来探讨其人工增雨的条件,也提出了采用常规观测资料判断人工增雨条件的具体方法。

本文利用2008—2012年4—6月古田试验区的新一代天气雷达、探空及地面雨量观测等资料,结合对应的天气形势分析,进一步探讨古田试验区云系的回波特征与人工增雨作业条件,为制定对应的人工增雨作业指标,及下一阶段继续开展古田试验区人工增雨随机试验做准备。

## 1 数据处理

为了更客观反映古田试验区的云雨分布特征情况,取一个面积约为24 000 km<sup>2</sup>的区域作为古田试验区,见图1。探空、雷达和雨量资料的观测时间取2008—2012年的4—6月,4—6月为福建省前汛期,降水过程多,适合开展人工增雨科学试验研究。探空资料分别取自位于试验区西北角、东南角的邵武探空站和福州探空站,以两个探空站08时(北京时间,下同)和20时的0℃高度层的平均值作为古田试验区的0℃高度层。雷达为位于古田试验区西北角的建阳新一代天气雷达,主要观测资料为古田试验区内云系的回波强度( $Z$ )、回波面积( $S$ )、回波顶度( $H$ )、垂直积分液态水含量( $VIL$ )和回波移向等参量,并与探空资料结合,计算出云系的负温层厚度( $-\Delta H$ ),以云系结构特征确定云系的回波类型。 $Z$ 、 $H$ 、 $VIL$ 、 $-\Delta H$ 取每日降水过程中回波特征量的最大值和平均值来反映整个降水过程的特征。雨量资料取自2008—2012年的4—6月古田试验区范围的16个县级气象站日雨量观测资料,站点位置分布见图1,主要用来反映古田试验区的区域平均日雨量

( $R_{avg}$ )和日降水时数( $T_{avg}$ )等参量的变化情况,其中 $R_{avg}$ 、 $T_{avg}$ 分别是以16个气象站中出现降水的雨量和降水时间的站点进行统计。

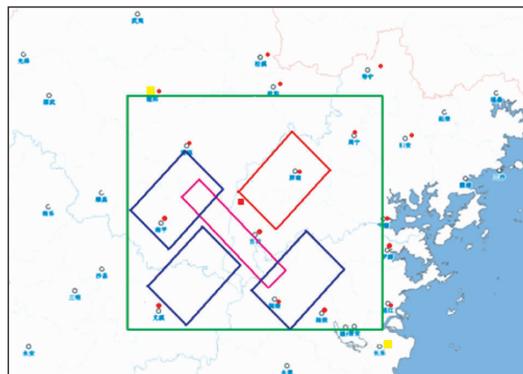


图1 古田试验区(绿框为试验区范围、红框为影响区、蓝框为对比区、黄方块为雷达观测点、红色圆点为雨量站)

Fig.1 Gutian experiment area

每年4—6月影响福建古田试验区的天气系统分别有低涡切变、暖区辐合、高空槽、大陆高压、副热带高压边缘、热带辐合带外围和台风或台风外围7类降水天气系统。

4—6月在古田试验区内云系回波特征分积状云回波、层状云回波和积层混合云3种,其中层状云极为少见。积状云回波强度大,其强中心回波强度多数大于40 dBz,块状结构明显,垂直发展旺盛,水平尺度与垂直尺度相当(图略)。积层混合云多数是为大片层状云回波中嵌夹对积状云回波,局部强中心回波强度也大于40 dBz,结构多数为絮状回波(图略)。

## 2 结果分析

### 2.1 降水天气系统和云系回波类型

福建古田试验区地处福建省东北部,具有中亚热带海洋性季风气候特征,4—6月是福建省前汛期,降水过程频繁,是一个适合开展人工增雨科学研究的试验区。按照500 hPa和850 hPa的天气形势分析及云系回波结构特征分类,2008—2012年期间影响古田试验区的主要降水天气系统和对应的云系回波类型的统计结果见表1。

由表1可见,2008—2012年4—6月古田试验区的主要降水天气系统为低涡切变、暖区辐合、高空槽和大陆高压,而热带辐合带外围和台风或台风外围的降水系统多数是在6月才出现。4—6月试验区的云系回波结构特征以积层混合云回波为主,而

表 1 2008—2012 年 4—6 月古田试验区降水天气系统和云系回波类型统计结果

Table 1 Statistical results of precipitation weather system and cloud echo characteristic in Gutian experiment area during April and June in the years 2008—2012

时间	降水天气系统							回波类型	
	低涡切变	暖区辐合	高空槽	大陆高压	副热带高压边缘	热带辐合带外围	台风或台风外围	积状云回波	积层混合云回波
4 月	34	27	31	34	5	0	0	6	125
5 月	45	24	26	23	4	0	1	13	110
6 月	35	32	14	13	10	21	13	23	115
总计	114	83	71	70	19	21	14	42	350

积状云回波随着地面气温的升高,出现的机会逐月增多。因此,在 4—6 月古田试验区人工增雨作业的有利天气系统为低涡切变系统、暖区辐合、高空槽和大陆高压;云系以积层混合云为主。

2.2 降水天气系统下的云系回波特征与降水关系

4—6 月北方冷空气南下的势力开始减弱,而北上的西南暖湿空气势力却逐渐加强,冷暖空气在福建省上空交汇,除了构成不同的降水天气系统外,同时在降水天气系统影响下形成了不同云系的回波结构特征,并伴随不同程度的降水。表 2 为 2008—2012 年 4—6 月古田试验区的降水天气系统及对应的云系回波结构特征及降水情况统计结果。

由表 2 可见,4—6 月在古田试验区内,不同降水天气系统所对应的云系回波类型及降水情况有较大的差异,其中低涡切变系统控制下的云系回波基本为积层混合云回波,对应云系覆盖时间( $T_{avg}$ )长达 9 h,且区域平均日雨量( $R_{avg}$ )达到 15.3 mm,云系移动方向主要介于东北至偏东方向;暖区辐合和高空槽也是试验区的主要降水天气系统,因暖区和

高空槽槽前的热力条件作用,局地性对流活动比较活跃,积状云回波出现的机会相对低涡切变系统有明显增多,约超过 10%,对应的  $T_{avg}$  低于 3 h,  $R_{avg}$  介于 1.9~3.4 mm,且多数积状云回波是在原地发生、发展至消亡。而对应的积层混合云回波的  $T_{avg}$  相对积状云回波多出近 1 倍,  $R_{avg}$  却在 10 mm 左右,移动方向偏东北;大陆高压系统影响时的云系回波结构状况虽然与高空槽相似,但对应积层混合云回波的  $R_{avg}$  和  $T_{avg}$  却减少近一半;副热带高压边缘、热带辐合带外围和台风或台风外围系统虽然影响的次数较少,但其对应的  $R_{avg}$  都比较大,特别是副热带高压边缘的对流活动往往可以给古田试验区带来明显的局地性降水;台风或台风外围系统的积层混合云回波降水不仅持续时间也长,同时日雨量也大。总之,古田试验区云系的降水回波结构是以积层混合云回波为主。低涡切变、暖区辐合和高空槽都是古田试验区的人工增雨作业的有利天气系统,同时 4—6 月古田试验区的云系多向偏东北方向移动,作业点选在试验区的西南方向最为合适。

表 2 2008—2012 年 4—6 月古田试验区降水天气系统下的云系回波类型及降水情况

Table 2 Characteristics of cloud echo and precipitation under different weather systems in Gutian experiment area during April and June in the years 2008—2012

天气系统	积状云回波				积层混合云回波			
	个数	$T_{avg}/h$	$R_{avg}/mm$	移向/ $(^\circ)$	个数	$T_{avg}/h$	$R_{avg}/mm$	移向/ $(^\circ)$
低涡切变	2	1.4	0.6	原地	112	9.0	15.3	45~70
暖区辐合	10	2.9	3.4	60~75	73	6.5	11.6	50~75
高空槽	8	2.8	1.9	原地	63	6.1	8.9	60~90
大陆高压	8	2.5	1.4	原地	62	3.3	4.5	50~90
副热带高压边缘	4	2.3	10.6	335~20	17	3.6	8.6	45~60
热带辐合带外围	4	3.3	4.8	原地	15	3.8	5.6	45~90
台风或台风外围	6	2.4	4.9	原地	8	7.3	14.6	45~60

### 2.3 不同回波类型特征分布

鉴于古田试验区所开展的人工增雨试验属于冷云人工增雨作业范畴,因此对于云系的作业指标制定主要侧重对云系的回波强度、回波面积、回波顶高、垂直积分液态水含量和负温层厚度的分析。为此将2008—2012年4—6月在古田试验区内观测的两种云系相应回波特征量进行统计分析,结果见表3。

由表3可见,4—6月份期间古田试验区内云系回波特征总体表现为:

1) 积状云回波和积层混合云回波的最大回波强度( $Z_{\max}$ )基本相近,均达到54 dBz左右,说明积层混合云回波内所嵌夹的对流单体同样具备积状云回波的特点,其云系结构配置本身更有利于降水。

2) 大于25 dBz的回波面积( $S_{>25\text{ dBz}}$ )是以往福建省人工增雨业务中的一项作业判别指标,其标准为大于400 km<sup>2</sup>。因为作业云的回波面积过小,即使其他作业指标满足,其作业后的影响范围也有限。4—6月试验区内的积状云回波的 $S_{>25\text{ dBz}}$ 平均在900 km<sup>2</sup>左右,而积层混合云回波的 $S_{>25\text{ dBz}}$ 则高达6 800 km<sup>2</sup>以上,其覆盖面积比积状云回波大近6倍,说明积层混合云回波云系是古田试验区降水的主要云系,也是古田试验区人工增雨作业试验的主要选择对象。

3) 4—6月古田试验区积状云回波和积层混合云回波的回波平均顶高( $H_{\text{avg}}$ )都接近6 km,相对而言积层混合云的 $H_{\text{avg}}$ 会比积状云的要低一点,且在 $H_{\max}$ 的比较中同样如此。因为积状云回波多数是在对流不稳定天气下形成,其云内上升气流比积层混

合云回波强,更易将水粒子输送到更高的位置。

4) 在垂直积分液态水含量(VIL)方面,积状云回波的 $VIL_{\max}$ 和 $VIL_{\text{avg}}$ 值均比积层混合云回波大,其中最大垂直积分液态水含量多出近三分之一,而平均垂直积分液态水含量则相差近一倍,说明积状云回波云系的辐合上升气流较积层混合云回波云系强,更有利于水粒子的聚集与云内的垂直输送。

5) 负温层厚度( $-\Delta H$ )是冷云人工增雨作业的重要条件。古田试验区内的积状云回波和积层混合云回波的 $-\Delta H_{\max}$ 基本接近,都达到4.8 km以上;两者的 $-\Delta H_{\text{avg}}$ 也达到2 km,说明古田试验区内积状云回波和积层混合云回波云系的负温层厚度基本都满足冷云人工增雨作业条件。

### 2.4 雷达回波特征量与降水的关系

雷达获取的云降水结构资料主要表征的是云内大粒子降水的回波信息,回波强度越强,说明云体内大粒子的尺度或其数浓度就越大;回波面积可用来反映云体降水的影响范围;云体的负温层厚度则更能反映出云体冷云过程的降水能力,因为负温层厚度越大,越有利过冷却层中水粒子的富集及冰相过程的增长,也是冷云人工增雨作业选择的关键部位。选取2008—2012年4—6月期间古田试验区积层混合云的最大回波强度、回波强度大于25 dBz的回波面积和最大负温层厚度三个回波特征量与对应的区域降水量进行比较。

由图2可见,在古田试验区内,降水过程中积层混合云的 $Z_{\max}$ 基本与区域降水能力有明显的对应关系。当云体的 $Z_{\max}$ 低于25 dBz时, $R_{\text{avg}}$ 低于1 mm;随着云体 $Z_{\max}$ 从25 dBz增长至40 dBz, $R_{\text{avg}}$ 出现一

表3 2008—2012年4—6月古田试验区不同云系的回波特征量分布情况

Table 3 Distribution of cloud echo parameters in different cloud systems in Gutian experiment area during April and June in the years 2008—2012

回波类型	$Z_{\max}$			$S_{>25\text{ dBz}}$			$H_{\max}$			$H_{\text{avg}}$		
	个数	均值/ dBz	变化范围/ dBz	个数	均值/ km <sup>2</sup>	变化范围/ km <sup>2</sup>	个数	均值/ km	变化范围/ km	个数	均值/ km	变化范围/ km
积状云回波	42	54.7	15~60	41	912	25~8 800	42	9.1	3~17	42	6.3	2~11
积层混合云回波	350	54.4	5~60	310	6 885	100~24 000	350	8.7	2~17	350	5.8	2~9
回波类型	$VIL_{\max}$			$VIL_{\text{avg}}$			$-\Delta H_{\max}$			$-\Delta H_{\text{avg}}$		
	个数	均值/ (kg·m <sup>-2</sup> )	变化范围/ (kg·m <sup>-2</sup> )	个数	均值/ (kg·m <sup>-2</sup> )	变化范围/ (kg·m <sup>-2</sup> )	个数	均值/ km	变化范围/ km	个数	均值/ km	变化范围/ km
积状云回波	26	21.2	1~45	26	6.1	1~15	39	4.8	0.1~12.7	33	2.6	0.1~6.7
积层混合云回波	299	14.2	1~60	299	2.8	1~15	318	4.9	0.2~12.4	286	2.0	0.1~5.3

个缓慢的增长过程,由 2.6 mm 增长至 3.9 mm;当云体的  $Z_{\max}$  超过 40 dBz 后,  $R_{\text{avg}}$  出现陡增,达到 10 mm 以上,并维持在 15 mm 左右波动,说明积层混合云  $Z_{\max}$  的强弱基本可以反映出其降水能力。同时古田试验区有三分之一混合云的  $Z_{\max}$  低于 40 dBz,所对应的  $R_{\text{avg}}$  也低于 4 mm,此部分的积层混合云是人工增雨作业关注的主要对象。

由图 3 可见,在古田试验区,当积层混合云  $S_{>25 \text{ dBz}}$  小于 400 km<sup>2</sup> 时,  $R_{\text{avg}}$  只有 2.8 mm;当面积增至 1 200 km<sup>2</sup>,  $R_{\text{avg}}$  并没有明显增加,仍低于 3 mm;当  $S_{>25 \text{ dBz}}$  超过 1 200 km<sup>2</sup> 之后,对应  $R_{\text{avg}}$  随面积增大成线性增长,其中在  $S_{>25 \text{ dBz}}$  介于 1 200~2 400 km<sup>2</sup> 的  $R_{\text{avg}}$  为 7.5 mm,  $S_{>25 \text{ dBz}}$  介于 2 400~4 800 km<sup>2</sup> 的  $R_{\text{avg}}$  为 13 mm,而  $S_{>25 \text{ dBz}}$  面积超过试验区面积的五分之一时,  $R_{\text{avg}}$  达到 20 mm 以上。可见 4—6 月古田试验区混合云降水过程中有近 60% 的  $S_{>25 \text{ dBz}}$  主要集中在 1 200~4 800 km<sup>2</sup> 范围内,可借助冷云人工增雨技术,增大积层混合云的  $S_{>25 \text{ dBz}}$  范围,实现增雨的目的。

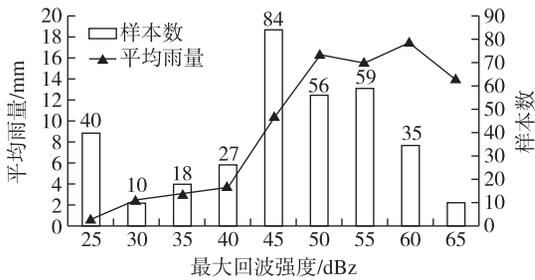


图 2 最大回波强度与降水关系  
Fig.2 Relationship between the maximum echo intensity and precipitation

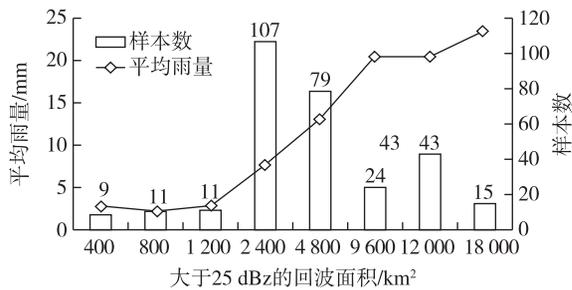


图 3 回波强度大于 25 dBz 的回波面积与降水关系  
Fig.3 Relationship between the strong echo area  $S_{>25 \text{ dBz}}$  and precipitation

目前南方冷云人工增雨作业多数采用地面火箭作业,属静力催化范畴,其作业条件着眼于云体过冷层厚度及所含的过冷水量,以增加 AgI 作为人工冰核来加速“冰—水”转换过程的发生,促使降水形成或提高云体的降水效率,达到增雨的目的。由图 4 可见,在古田试验区内,当积层混合云的  $-\Delta H_{\max}$  低于 1.5 km 时,  $R_{\text{avg}}$  低于 3 mm;  $-\Delta H_{\max}$  再增高 0.5

km,其  $R_{\text{avg}}$  快速增至 5 mm;之后  $R_{\text{avg}}$  随着  $-\Delta H_{\max}$  增加而迅速增大,特别是当  $-\Delta H_{\max}$  超过 6 km 后,  $R_{\text{avg}}$  保持在 15 mm 以上,说明了此阶段的混合云云体高度普遍比较高,同时具备积状云的结构特征,自身具有“自我催化”的能力,因此负温层厚度大的混合云降水效率高,对应  $R_{\text{avg}}$  自然也大。

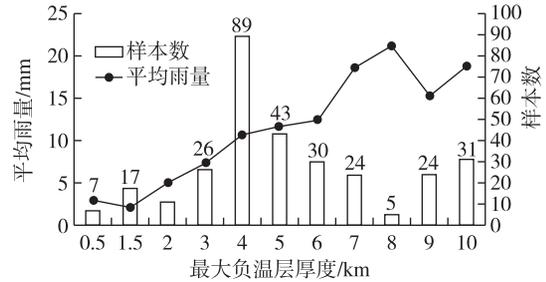


图 4 最大负温层厚度与降水关系  
Fig.4 Relationship between the maximum depth of negative temperature layer and precipitation

### 2.5 福建古田试验区人工增雨作业时机与作业指标

综上,古田试验区人工增雨作业时机可选择在低涡切变、暖区辐合、高空槽和大陆高压这四类降水天气系统控制下进行。考虑到积状云降水多数是在局地热力作用下形成,且维持原地发生、发展及消亡,影响范围有限,因此在古田试验区内进行人工增雨科学试验,主要选择积层混合云条件下进行。积层混合云的作业指标:回波强度大于 25 dBz,且  $S_{>25 \text{ dBz}}$  大于 400 km<sup>2</sup>,回波顶高大于 5.5 km,负温层厚度大于 1.5 km,垂直积分液态水含量大于 1 kg/m<sup>2</sup>。

### 3 结论

1) 4—6 月影响古田试验区的主要天气系统分别为低涡切变系统、暖区辐合、高空槽和大陆高压;降水云系有积状云和积层混合云,以积层混合云为主。

2) 4—6 月古田试验区的降水天气系统所对应的云系回波类型及降水情况有明显差异。低涡切变系统控制时以积层混合云回波为主,区域平均日雨量大且云系覆盖时间长;暖区辐合和高空槽影响下对流活动最为活跃,多为局地性降水,生命史短,而积层混合云的区域平均日雨量在 10 mm 左右,云系覆盖时间平均超过 6 h;大陆高压系统影响下的云系回波分布状况与高空槽相似,但积层混合云的区域平均日雨量和云系覆盖时间却减少近一半;副热带高压边缘、热带辐合带外围和台风或台风外围系统影响次数少,但对应积层混合云的区域平均日雨量和云系覆盖时间都比较大。

3)古田试验区积状云和积层混合云的最大回波强度相近,积层混合云的结构配置更有利于降水。积层混合云大于 25 dBz 的回波面积比积状云多近 6 倍,为古田试验区降水的主要云系;积层混合云的平均回波顶高和最大回波顶高均比积状云低;积状云的垂直积分液态水含量明显比积层混合云大;积状云和积层混合云的平均负温层厚度超 2 km,满足冷云人工增雨作业条件。

4)古田试验区内,积层混合云的最大回波强度与区域平均日雨量有着明显的对应关系,当云体的

最大回波强度超过 40 dBz,对应区域平均日雨量出现陡增;回波强度大于 25 dBz 的回波面积少于 1 200 km<sup>2</sup>,区域平均日雨量少且变化不明显,大于 1 200 km<sup>2</sup> 则成线性增长;负温层厚度低于 1.5 km 时的区域平均日雨量少,高于 1.5 km 的区域平均日雨量随负温层厚度增加而迅速增大。

5)4—6 月古田试验区积层混合云的作业指标为:回波强度大于 25 dBz,  $S_{>25 \text{ dBz}}$  大于 400 km<sup>2</sup>,回波顶高大于 5.5 km,负温层厚度大于 1.5 km,垂直积分液态水含量大于 1 kg/m<sup>2</sup>。

## 参考文献(References)

- 蔡兆鑫,周毓荃,蔡森,2013.一次积层混合云系人工增雨作业的综合观测分析[J].高原气象,32(5):1460-1469. Cai Z X,Zhou Y Q,Cai M, 2013.Analysis on comprehensive observation of artificial precipitation enhancement operation for a convective-stratiform mixed cloud[J].Plateau Meteor,32(5):1460-1469.(in Chinese).
- 陈冰,张深寿,冯晋勤,2003.一代天气雷达产品在人工增雨作业中的应用[J].气象,29(1):23-26. Chen B,Zhang S S,Feng J Q,2003. Application of CINRAD data to artificial precipitation enhancement in the west of Fujian[J].Meteor Mon,29(1):23-26.(in Chinese).
- 崔丹,黄彦彬,肖辉,等,2012.多普勒雷达数据在海南省人工增雨效果评估中的应用[J].大气科学学报,35(1):87-94. Cui D,Huang Y B,Xiao H,et al.,2012.Application of Doppler-radar data in the effect evaluation of artificial precipitation enhancement in Hainan Province[J].Trans Atmos Sci,35(1):87-94.(in Chinese).
- Fuhrer O,Schaer C,2005.Embedded cellular convection in moist flow past topography[J].J Atmos Sci,62(8):2810-2828.
- Hobbs P V,Matejka T J,Herzogh P H,et al.,1980.The mesoscale and microscale structure and organization of clouds and precipitation in midlatitude cyclones I:A case study of a cold front[J].Atmos Sci,37:568-596.
- 洪延超,2012.层状云结构和降水机制研究及人工增雨问题讨论[J].气候与环境研究,17(6):937-950. Hong Y C,2012.Research progress of stratiform cloud structure and precipitation mechanism and discussion on artificial precipitation problems[J].Climatic Environ Res,17(6):937-950.(in Chinese).
- 洪延超,周非非,2005.“催化供给”云降水形成机理的数值模拟研究[J].大气科学,29(6):885-896. Hong Y C,Zhou F F,2005.A numerical simulation study of precipitation formation mechanism of "seeding-feeding" cloud system[J].Chinese J Atmos Sci,29(6):885-896.(in Chinese).
- 李玉林,李梅,2006.利用 CINRAD WSR-98D 探测夏季对流云特征[J].热带气象学报,22(6):654-660. Li Y L,Li M,2006.Making use of CINRAD WSR-98D for probing into summer convective cloud characteristics[J].J Trop Meteor,22(6):654-660.(in Chinese).
- 林长城,陈彬彬,隋平,等,2011.西北地区降水回波特征和人工增雨作业条件分析[J].气象科技,39(6):697-702. Lin C C,Chen B B,Sui P,et al.,2011.Characteristics of precipitation echoes and conditions for rocket precipitation enhancement operations in northwest Fujian[J].Meteorological Science and Technology,39(6):697-702.(in Chinese).
- 刘莹莹,牛生杰,封秋娟,等,2012.一次积层混合云的形成过程和微物理观测[J].大气科学学报,35(2):186-196. Liu Y Y,Niu S J,Feng Q J,et al.,2012.Observation of the formation and microphysics of a convective-stratiform mixed cloud[J].Trans Atmos Sci,35(2):186-196.(in Chinese).
- Silverman B A,2001.A critical assessment of glaciogenic seeding of convective clouds for rainfall enhancement[J].Bull Amer Meteor Soc,82:903-923.
- 王广河,姚展予,2003.人工增雨综合技术研究[J].应用气象学报,14(S1):2-10. Wang G H,Yao Z Y,2003.Study of comprehensive techniques for precipitation enhancement[J].J Appl Meteor Sci,14(S1):2-10.(in Chinese).
- 于翥,姚展予,2009.一次积层混合云降水实例的数值模拟分析[J].气象,35(12):3-11. Yu F,Yao Z Y,2009.Numerical study on the complex of the stratiform and embedded convective cloud precipitation:A case study[J].Meteor Mon,35(12):3-11.(in Chinese).
- 曾光平,吴明林,林长城,等,1993.古田水库人工降雨效果的综合评价[J].应用气象学报,4(2):154-161. Zeng G P,Wu M L,Lin C C,et al., 1993.A comprehensive evaluation of the effect of artificial precipitation in Gutian reservoir area[J].J Appl Meteor Sci,4(2):154-161.(in Chinese).
- 张佃国,樊明月,龚佃利,等,2010.一次降水性积层混合云系的微物理特征分析[J].大气科学学报,33(4):496-503. Zhang D G,Fan M Y, Gong D L,et al.,2010.An analysis of microphysical characteristics on precipitation cumulus-stratus mixed clouds system[J].Trans Atmos Sci,33(4):496-503.(in Chinese).
- 张建军,赵小艳,黄勇,2010.基于遥感探测的不同类型降水云识别方法[J].气象科技,38(5):588-593. Zhang J J,Zhao X Y,Huang Y,2010.Review of monitoring methods for rainfall cloud remote sensing[J].Meteorological Science and Technology,38(5):588-593.(in Chinese).
- 仲凌志,刘黎平,顾松山,2007.层状云和对流云的雷达识别及在估测雨量中的应用[J].高原气象,26(3):593-601. Zhong L Z,Liu L P,Gu S S,2007.A algorithm identifying convective and stratiform in mixed precipitation and its application to estimating precipitation[J].Plateau Meteor, 25(1):128-137.(in Chinese).

## Analysis on cloud echoes characteristics and operational conditions of precipitation enhancement in Gutian of Fujian

LIN Changcheng<sup>1</sup>, YAO Zhanyu<sup>2</sup>, LIN Wen<sup>1</sup>, CHEN Binbin<sup>1</sup>, LI Dan<sup>1</sup>, JIANG Shanci<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Fujian Institute of Meteorological Science, Fuzhou 350001, China;

<sup>2</sup> Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100086, China;

<sup>3</sup> Gutian Observatory of Ningde Meteorological Bureau, Gutian 352200, China

The randomized statistical experiments of precipitation enhancement performed in the Gutian Reservoir for 12 years (1975—1986) has gained achievements for scientific research, and have had international influence in the world. For the continuous study of precipitation enhancement in the Gutian Reservoir, the cloud echo characteristics and operational conditions of precipitation enhancement in the Gutian experiment area are analyzed based on the weather analysis and data of Doppler weather radar, sounding, ground rainfall and other observations from April to June of 2008—2012. The cloud echo characteristics in this study include echo intensity ( $Z$ ), echo area ( $S$ ), echo top ( $H$ ), vertical integrated liquid water (VIL) and echo moving direction by Doppler radar, located in Jianyang, on the northwest side of the Gutian experiment area. Combining the sounding data and echo characteristics, the depth of the negative temperature layer is calculated, and the cloud echo types are also confirmed by the echo characteristics. The results show that the weather systems influencing the Gutian experiment area include the low vortex shear, warm-sector convergence, upper trough, continental high, subtropical high pressure, and typhoon or intertropical convergence zones. There are evident differences between the cloud echo characteristics and precipitation features in the different weather systems. Under low vortex shear, the stratus-cumulus mixed clouds are more numerous than cumulus, the rainfall intensity is greater, and the cloud cover time is longer. The convection clouds are more active under warm-sector convergence, upper trough and continental high than the others, indicating local precipitation and short lifecycle. Unlike warm-sector convergence and upper trough, the rainfall intensity and cloud cover time of stratus-cumulus mixed clouds are nearly half the size as under continental high. The weather systems in the above-mentioned influenced the Gutian experiment area mainly from April to June of 2008—2012. Then the subtropical high pressure zone and typhoon or intertropical convergence zone occurred rarely in the Gutian experiment area, but they all had much higher rainfall intensity and more cloud cover time than the others. Overall, the precipitation cloud systems in the Gutian experiment area are mainly stratus-cumulus mixed clouds, followed by cumulus. The echo intensity of the cumulus clouds are higher than the stratus-cumulus mixed clouds, whose center intensity are mostly higher than 40 dBz, presented as block structures with vigorously vertical development. The horizontal scales of the cumulus clouds in the Gutian experiment area are nearly equal to the vertical scales. The stratus represents many small cumulus clouds embedded in the large area of stratus. The echo center intensity of the stratus can also be higher than 40 dBz partially. The structure of the stratus-cumulus mixed clouds is favorable to rainfall. Its strong echo area  $S_{>25 \text{ dBz}}$  ( $S_{>25 \text{ dBz}}$  referring to the area where the echo intensity is larger than 25 dBz) is clearly larger than that of the cumuliform clouds, while its average echo height and echo top are both lower than those of the cumuliform clouds. The vertical integrated liquid water in the cumuliform clouds is much greater than that in the stratus-cumulus mixed clouds, and the depth of the negative temperature layer of both types of clouds exceeds 2 km. The maximum echo intensity, strong echo area  $S_{>25 \text{ dBz}}$  and depth of negative temperature layer of the stratus-cumulus mixed clouds all correspond well to the regional mean daily rainfall. The operational indexes of the stratus-cumulus mixed clouds in the Gutian experiment area are as follows: the echo intensity should be larger than 25 dBz,  $S_{>25 \text{ dBz}}$  larger than 400 km<sup>2</sup>, echo top higher than 5.5 km, depth of negative temperature layer larger than 1.5 km, and vertical integrated liquid water more than 1 kg/m<sup>2</sup>.

**Gutian in Fujian Province; radar echo characteristic; operational condition**

doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.20140805001

(责任编辑:刘菲)