

适合飞机人工增雨作业天气系统的雷达回波特征分析

王吉宏¹ 韩江文² 胡伟¹ 盛永² 杜见微³

(1. 辽宁省人工影响天气办公室, 沈阳 110016; 2. 辽宁省气象台, 沈阳 110016; 3. 朝阳市农业局, 朝阳 122000)

摘要:应用2004~2005年沈阳辉山新一代天气雷达资料和常规气象资料,对实施飞机人工增雨作业的天气系统、增雨作业云系及其雷达回波特征进行了归纳和分析,并提出了飞机人工增雨作业条件和作业时机、作业区域等判别方法,为实施飞机人工增雨作业提供科学依据。

关键词:增雨作业;天气系统;雷达回波;人工影响天气

新一代天气雷达系统的建设是我国气象现代化建设的重要组成部分。与传统天气雷达相比,新一代天气雷达(CINRAD)除提供常规天气雷达所能提供的回波信息外,还利用多普勒效应测定降水粒子的径向运动速度,并通过这种速度信息,提供诸如风场结构特征、风廓线等信息。新一代天气雷达具有较高的灵敏度,有一定的晴空探测能力,是智能型的探测系统,有较丰富的软件支持,对获取的信息能进行综合处理。并且其不间断的连续观测资料为正确分析降水云系的回波强度、回波顶高度、上升气流区、垂直液态水含量高值区等提供了可能。因此,它被广泛地应用于人工增雨业务中。但由于多普勒天气雷达是一种新的探测工具,这方面的系统研究并不多见。

沈阳新一代天气雷达于2004年5月1日开始正式运行,并在飞机增雨作业中投入使用。为充分发挥新一代天气雷达在人工增雨指挥和效果分析中的作用,使飞机人工增雨作业更加科学化,本文对近2 a新一代天气雷达在实施飞机人工增雨作业中的应用进行了探讨和归纳,取得了一些有价值的成果。试图使这些成果对今后实施飞机人工增雨作业具有一定的指导意义。

1 飞机人工增雨作业的天气类型

辽宁飞机人工增雨作业期为4月初—8月末。对于影响这一时期降水的主要天气类型,辽宁曾有许多气象科技工作者进行过研究和探讨^[1-3],归纳出主要有以下5种天气系统^[4]。

1.1 高空西风槽型

在产生辽宁降水的各类天气系统中,以西风槽

型所占概率为最大,占49.0%。该型一年四季中均可出现,在飞机人工增雨作业期,以丁字槽型、横槽型、竖槽型及横竖组合槽型为多^[5]。其降水云系以层云、层积混合云为主。降水量一般可从几毫米到几十毫米不等。

1.2 东北冷涡型

东北冷涡型所占概率仅次于高空西风槽型,在产生辽宁降水的主要天气系统中占30.9%。该型一般出现在4~10月,以6~7月为最多。其降水云系以积云、层积混合云为主,降水量较大。

1.3 副热带高压后部型

在影响辽宁降水的天气系统中,副热带高压后部型所占概率相对较少,仅占14.5%,它多出现在7~8月。其降水云系以积云、层积混合云为主,可夹杂少量的层云。降水量一般比较大,最大的可达数百毫米^[6-8]。

1.4 切变线型

切变线型是影响辽宁降水天气系统中最少的一种,所占概率为3.6%,一般多出现在7~8月。其降水云系多以伴随对流性天气的积云为主。

1.5 其他类型

除以上4种天气类型外,还有一些没有明显特征的其他降水天气系统。这些类型,所占概率为2.0%。

表1中统计了近2 a辽宁实施飞机人工增雨作业并有明显增雨效果的几次增雨作业的天气过程的类型。

从表1可以看出,适合飞机人工增雨作业的天气系统中,以高空槽型为最多,其次为冷涡型,再次为高压后部型。在这3种天气系统下,选择好作业时机,可以实

表1 2004~2005年飞机人工增雨作业天气过程统计

时间	天气类型	飞行作业 时间段	地面 实况	作业区云系	作业区回波	作业高 度/m	飞行航线
2004年5月12日	高空槽	06:00~08:40	阴	Ns,Fn	均匀片状回波	3 000~3 500	沈阳-辽阳-鞍山-营口-盖州-岫岩-宽甸-草河口-本溪-王滨沟-沈阳
2004年5月12日	高空槽	10:02~13:10	小雨	Ns,Sc	带絮状回波	2 400~3 000	沈阳-熊岳-瓦房店-普兰店-庄河-桂云花-龙昌-王滨沟-沈阳
2004年5月17日	冷涡	11:20~13:10	小雨	Sc	均匀片状回波	2 000~3 000	沈阳-东羊角-辽阳-鞍山-本溪县-抚顺-铁岭-王滨沟-沈阳
2004年5月27日	高空槽	11:30~13:30	阴	Ac,Sc,Nc	带絮状回波	3 600	沈阳-东羊角-新民-北镇-盘山-鞍山-东羊角-王滨沟-沈阳
2004年5月27日	高空槽	20:30~23:25	阴	St,Sc	块絮状回波	2 400~3 600	沈阳-鞍山-营口-盖州-熊岳-桂云花-岫岩-草河口-本溪-抚顺-沈阳
2004年6月16日	高压后部	18:30~22:00	阴	Sc,Ns	带絮状回波	3 900~4 200	沈阳-熊岳-瓦房店-普兰店-锦州-庄河-大石桥-营口-沈阳
2004年6月17日	高压后部	19:50~22:20	阴	Sc	带絮状回波	2 200~4 200	沈阳-新民-法库-开原-清原-抚顺-沈阳
2004年7月1日	高空槽	05:00~07:00	小雨	Sc,Ns	均匀片状回波	2 500~4 200	沈阳-黑山-盘山-大洼-营口-盖州-草河口-本溪县-抚顺-沈阳
2005年4月6日	冷涡	07:20~09:40	阴	Sc,Ns	带絮状回波	2 800~3 000	沈阳-东羊角-鞍山-海城-本溪-抚顺-铁岭-沈阳
2005年4月9日	冷涡	04:05~07:50	小雨	Sc	均匀片状回波	3 500~3 600	沈阳-大虎山-锦州-葫芦岛-绥中-葫芦岛-锦州-盘山-沈阳
2005年5月5日	高空槽	12:40~14:56	阴	Sc	块絮状回波	2 000~4 500	沈阳-大虎山-阜新-盘锦-新民-沈阳
2005年5月7日	高空槽	07:58~10:48	阴	Sc,st	带絮状回波	2 400~3 600	沈阳-大虎山-阜新-盘锦-沈阳

施飞机人工增雨作业,并能取得较好的增雨效果。

2 增雨作业云系选择

利用2004~2005年计62次降水过程的新一代天气雷达观测资料,对降水云类型进行了统计分析。统计结果发现,辽宁的降水云系主要有3种类型,即层状云降水、积状云降水和层积混合云降水。在降水云系中,以层积混合云所占的比例为最大,为59.6%;积状云次之,为28.9%;纯层状云降水最少,只占11.5%。层积混合云是辽宁主要降水云系。

2.1 3种降水云系的雷达回波特征

2.1.1 强度

层状云降水。回波常呈片状,边界模糊,回波强度分布均匀,起伏不大;回波强度一般为35 dBz以下,降水强度为5 mm/h以下;回波高度大于4 km,最高不超过8 km,且空间分布均匀;常有水平0℃层亮带。

积云降水。回波一般多为块状,边界光滑清晰;回波强度一般为35 dBz以上,最强可达60 dBz,其所产生的降水强度为5 mm/h或以上,最强可以达到60 mm/h;空间分布梯度大,降水回波顶高多为6 km以上,最高可达17 km。

层积混合云降水。回波常呈片状,在大片的片状回波中镶嵌有强度为40 dBz以上的块状对流单体回波,是稳定性降水回波与对流性降水回波的混合体;有时候可见0℃层亮带;片状回波强度为20 dBz以上,但一般不超过45 dBz;降水回波顶高为5~14 km。如表2。

表2 不同降水云回波顶高和回波强度

回波类型	积层混合云	纯层状云	积云
高度/km	5~14	4~8	6~17
平均高度/km	9.5	6.5	11.5
强度/dBz	20~45	20~35	35~60
平均强度/dBz	32.5	27.5	47.5

2.1.2 速度场

层状云降水回波。速度分布均匀、起伏不大,正负速度区界限分明,零速度线完整。

积状云降水回波。速度分布杂乱无章,速度变化梯度大,正负速度区交错分布,零速度线断断续续。

层积混合云降水回波。速度分布比较均匀,正负速度区界限分明,零速度线完整,但在均匀速度场中常镶嵌有小片的速度不连续区。这些速度不连续

区对应的是块状对流单体回波。

2.1.3 垂直液态水含量

垂直液态水含量由于产品本身的局限性,与降水强度之间的对应关系不很明晰,但对于区分稳定性降水和对流性降水还是有一定的指示意义。统计表明,稳定性降水的垂直液态水含量一般为 15 kg/m^2 以下, 15 kg/m^2 以上的垂直液态水含量基本对应的是对流性降水,超过 35 kg/m^2 为冰雹回波。

2.2 增雨作业云的雷达回波和增雨潜力

飞机增雨作业主要是针对层状云和层积混合云2种降水过程^[9-12]。从表1中可看出。通过近2 a计20多次降水过程的雷达回波特征分析,初步得到了层状云和层积混合云的雷达回特征及不同的增雨潜力。

2.2.1 层状云回波结构

层状云降水回波在PPI上表现为大范围、长时间维持的均匀片状回波,边缘模糊不清,强度弱而均匀,一般小于 35 dBz 。有时抬高仰角,可见同等强度的回波呈环状或半环状分布。这类回波一般可造成地面小到中雨或中到大雨的降水,比较适宜实施飞机人工增雨作业。

有时均匀片状回波中间出现空隙和条纹结构,强度小于等于 10 dBz ,回波垂直高度为 5 km 左右,对应地面降水性质为间隔性小雨。此类回波,增雨潜力不大。

2.2.2 积层混合云回波结构

PPI上积层混合云边缘为满载大面积层状云降水的背景上存在着一个个块状的对流单体结构,或镶嵌有对流降水带。在RHI上,可以清楚地看到层状云降水回波镶嵌有对流单体或柱状回波。此类回波可造成大范围中到大雨,有时局部地区可达到大一暴雨。此类回波,增雨潜力很大。

3 利用雷达回波判断增雨作业时机

掌握好飞机人工增雨作业时机,是取得实施人工增雨作业成功的关键。

3.1 用回波移向移速来判断作业时机

通过对多次降水过程的雷达回波分析发现,移动缓慢或稳定维持的均匀片状回波,虽然强度不强,高度不高,但仍可能会造成大范围、分布均匀的小到中雨或中到大雨,部分地区可能会出现大到暴雨。移动较快的片状降水回波,虽然强度很大,但也只能造成大范围小到中雨。

经过对降水回波的研究发现,在回波发展的成熟期,一般稳定少动或缓慢东移;当回波减弱趋于消散时,移速加快。因此,利用回波的移向移速可以寻

找作业时机,在回波移动缓慢或稳定维持且回波处于发展或成熟阶段,实施飞机人工增雨作业效果较佳。而在降水回波出现前及降水回波减弱消散阶段,均不宜实施飞机人工增雨作业。

3.2 用雷达回波来判断不稳定天气

飞机人工增雨作业具有作业范围大、作业时间长和作业高度高的优势。由于飞机的本身局限性和作业的安全性,飞机不适合在不稳定的天气条件下实施人工增雨作业。因此,必须准确判断不稳定天气出现的时间,才能把握住作业时机,实施飞机人工增雨作业。

3.2.1 不稳定天气的时间变化

利用1980~2004年沈阳雷达回波资料,对不稳定(强度大于等于 35 dBz ,高度大于等于 7 km)天气出现的时间和变化规律进行统计分析。根据统计得出,不稳定天气一年四季都可能出现,但各月分布不均。由图1可知,最大值出现在6月,占全年总数的

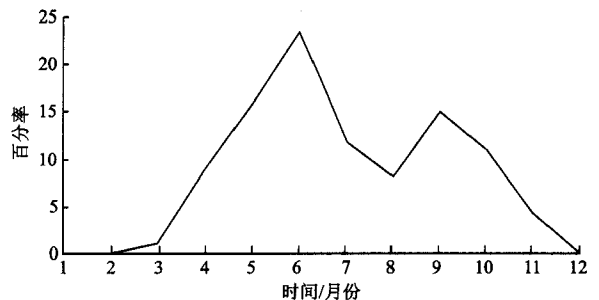


图1 1980~2004年1~12月不稳定天气的百分率分布23.4%;其次为5月和9月,分别占全年总数的15.2%和15.0%。

每日中随时都有不稳定天气发生的可能,但主要集中在中午至傍晚,即11~20时,占74.5%;其中以13~18时最为集中,占50.9%,说明午后热对流旺盛,有利于雷雨大风天气的发生。

对流系统是中小尺度天气系统。而这些中小尺度天气系统都产生在大尺度的环境场中,冷涡、冷涡后部横槽、高空槽、槽后西北气流都是产生对流天气的主要高空系统。而冷涡、冷涡后部、横槽基本为不稳定天气。故应尽可能选在不稳定天气不易出现的时间实施飞机人工增雨作业。

3.2.2 不稳定天气的雷达判别方法

为了判断不稳定天气,对2004年6~9月沈阳雷达产品(强度产品、速度产品、垂直液态水产品)和自动站1 h降水资料进行了统计分析,以寻求用雷达回波产品判断不稳定天气的方法和指标。

首先统计了2004年6~9月不同降水强度出现的时间、地点及其雷达回波(强度、速度、液态水含量)特征,如表3和表4。然后将回波强度、液态水含

量与降水强度的关系进行了拟合。

从表3和表4、图2和图3可以看出,降水强度与回波强度具有很好的相关性,平均回波强度超过30 dBz时可以产生超过5 mm/h的降水。考虑强降水回波持续时间一般比较短,从总降水量角度考虑,

达到3 h短时暴雨15 mm以上的降水平均回波强度应为35~40 dBz。从强度产品上看,强度超过35 dBz的回波为不稳定的对流性强降水回波,这时不适合实施飞机人工增雨作业。

在雷达速度产品中,超过10mm/h的不稳定对

表3 2004年6~8月辽宁强降水过程统计

降水强度/ (mm·h ⁻¹)	降水量/ mm	时间	地点	强度/ dBz	速度特征	垂直液态水含量/ (kg·m ⁻²)
大于60	68.5	6月25日08~09时	黑山	53	中气旋	26
	62.6	6月25日07~08时	盘锦	51	中气旋	25
	63.0	7月27日00~01时	大洼	49	中气旋	12
50~59	59.7	7月24日01~02时	丹东	50	中气旋	26
	56.8	7月28日16~17时	草河口	47	中气旋	13
40~49	45.1	6月25日12~13时	鞍山	44	中气旋	17
	45.1	7月18日08~09时	凤城	44	中气旋	9
	46.6	7月27日01~02时	大洼	45	中气旋	9
	47.0	7月2日05~06时	昌图	46	中气旋	13
	45.7	7月5日13~14时	彰武	46	中气旋	15
	43.3	7月9日15~16时	辽中	50	中气旋	19
30~39	39.6	6月25日04~05时	锦州	46	中气旋	16
	36.6	7月20日00~01时	宽甸	40	中气旋	12
	34.3	7月24日00~01时	岫岩	42	中气旋	13
	33.7	7月29日18~19时	沈阳	39	辐合线	25
	33.5	7月23日20~21时	清原	44	辐合线	15
	32.5	7月18日20~21时	西丰	42	逆风区	19
	36.3	7月18日20~21时	昌图	43	中气旋	22
	34.6	7月23日17~18时	彰武	45	辐合线	20
	36.9	7月29日11~12时	彰武	41	中气旋	16
	39.2	8月3日13~14时	凤城	47	中气旋	12
	31.1	8月8日18~19时	丹东	39	中气旋	13
	32.6	6月28日22~23时	新城子	40	辐合线	26
	32.3	6月26日16~17时	鞍山	43	辐合线	22
	31.0	7月29日23~00时	熊岳	41	中气旋	8
	31.3	7月9日14~15时	锦州	42	中气旋	7
	32.0	8月3日12~13时	丹东	44	中气旋	18
34.8	8月22日16~17时	沈阳	45	辐合线	13	

表4 不同降水强度的雷达回波统计特征

降水强度/ (mm·h ⁻¹)	出现次数	平均回波/ dBz	回波变化/ dBz	变化幅度/ dBz	速度特征	垂直液态水含量/ (kg·m ⁻²)
≥60	3	51	43~58	15	中气旋	21
50~59	2	48	38~58	20	中气旋	19
40~49	6	46	33~53	20	中气旋	14
30~39	17	43	23~53	30	中气旋、辐合线	15
20~29	50	40	13~48	35	辐合线、逆风区	16
10~19	122	35	8~48	40	部分有辐合线	7
5~9	307	32	0~43	43	部分有逆风区	3
<5	557	<30	0~38	38	部分有急流	3

流性降水均有明显可识别特征,并有中气旋、辐合线、逆风区、急流等相配合。从产生降水的强度分

析,中气旋产生的降水强度最大;然后是辐合线、逆风区和急流。而从出现频率上看,急流出现的频率

最大;然后是中气旋、辐合线及逆风区。中气旋、辐

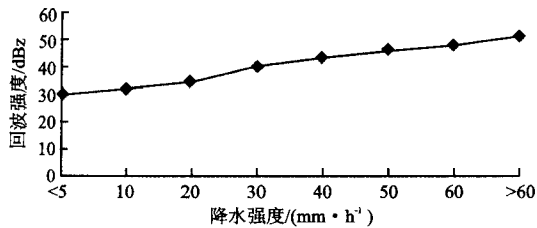


图2 回波强度与降水强度关系

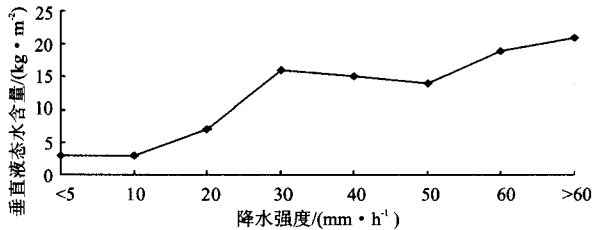


图3 垂直液态水含量与降水强度关系

合线及逆风区基本上对应的是不稳定的对流性强降水,不适合实施飞机人工增雨作业。应避免在以上3种速度特征所影响的区域内进行飞机人工增雨作业,因为急流范围比较大,在急流所影响的区域内也常会有不稳定的对流单体生成。因此,在急流所影响的区域内应有选择地实施飞机人工增雨作业。

垂直液态水含量(VIL)与降水强度的相关性较差。降水强度较弱时,降水强度随平均VIL增加而增强;降水强度超过30 mm/h后,VIL随降水强度加强反而下降;到50 mm/h的强度时,又开始随降水强度加强而增加。而对于单独的降水过程而言,VIL的变化基本无规律可循;高VIL对应比较强的降水,而很低的VIL常常会产生强降水,通过垂直液态水含量预测降水强度的结果不如通过回波强度预测。但是VIL产品可以作为区分稳定性降水和不稳定性降水的重要依据。统计表明,稳定性降水的VIL值为15 kg/m²以下;超过15 kg/m²基本上为不稳定的对流性降水,不利于实施飞机人工增雨作业。

4 利用雷达回波选择最佳作业区域

通过对降水过程的雷达回波特征分析,得到了飞机人工增雨作业最佳作业区。

4.1 0℃层亮带

0℃层亮带是云中雪花、冰晶下降到0℃层以下时融化、降水粒子碰并、数密度变化等原因造成的。它是稳定性层状云降水的一个重要特征,反映了层状云降水中存在着明显的冰水转化层,即亮带上面的降水粒子以冰晶为主,通过亮带后全部转化为水滴。亮带的出现也表明了层状云中气流稳定,无明显的对流活动,为冰水转化提供了一个稳定层。

积层混合云中也有亮带结构。但与层状云均匀的亮带不同,它常是不均匀的。这种不均匀表现在亮带各处强度、厚度不等,甚至有时是由不连续的亮点所构成。亮带的存在,不仅可以提供云和降水结构及形成过程的重要信息,而且对实施飞机人工增雨作业也是十分有用的。亮带的上限高度与实际0℃层高度非常接近,一般相差近百米。飞机人工增雨作业必须选在0℃层高度以上,即亮带以上作业。

4.2 作业区域的雷达回波特征

实施飞机人工增雨作业是向一些正在发展中的可产生降水的云中播撒催化剂来影响云的微物理结构,以增加降水。根据对2004~2005年降水过程的雷达回波分析及一些国内外的试验获知:飞机人工增雨的最佳作业区域应选在处于发展阶段的降水回波,回波区中间没有空隙和条纹结构,强度大于等于15 dBz,高度大于等于4 km,移速缓慢或稳定的均匀片状或絮状降水回波区域,增雨效果比较明显。

5 结论

5.1 4~8月,辽宁飞机人工增雨作业期间,影响降水的主要天气系统有高空西风槽型、东北冷涡型、副热带高压后部型、切变线型和其他类型5种。在这5种天气类型中,适合实施飞机人工增雨作业的天气系统以高空槽为最多,其次为冷涡,再次为高压后部;在这3种天气系统下,选择好作业时机,可实施飞机人工增雨作业。

5.2 夏季降水云层有3种类型,即积雨云、层状云和层积混合云。其中层积混合云降水是主要降水类型,也是实施飞机人工增雨作业的首选云层。

5.3 在回波移动缓慢或稳定维持且回波处于发展或成熟阶段实施飞机人工增雨作业效果较佳。而在降水回波出现前或降水回波减弱消散阶段,均不宜实施飞机人工增雨作业。

5.4 用雷达回波产品判别稳定度。一般强度超过35 dBz的回波为不稳定的对流性强降水回波;中气旋、辐合线及逆风区基本上对应的是不稳定的对流性强降水;稳定性降水的VIL值为15 kg/m²以下,超过15 kg/m²基本上为不稳定的对流性降水。

参考文献

- [1] 曲晓波,张廷治.辽宁省夏季降水天气环流特征分析[J].辽宁气象,1996(4):10-13.
- [2] 路爽,廖国进,李喜有,等.沈阳市降水概率预报服务系统[J].气象与环境学报,2006,22(1):68-71.
- [3] 王永亮,李英伟.飞机人工增雨天气系统及云系研究[J].辽宁气象,2000(4):33-35.

- [4] 李子华, 宫福久. 雷达在天气导变中的应用[M]. 北京: 气象出版社, 1994: 80-95.
- [5] 中国人民解放军总参谋部. 多普勒雷达资料分析与应用[M]. 北京: 解放军出版社, 2000: 178-188.
- [6] 樊鹏, 余兴. 陕西省人工增雨技术开发研究[M]. 北京: 气象出版社, 2003: 270-275.
- [7] 张培昌, 杜秉玉. 雷达气象学[M]. 北京: 气象出版社, 2001: 356-387.
- [8] 陈进强, 杨连英. 多普勒天气雷达在人工影响天气中的应用[J]. 气象科技, 2002, 30(2): 127-128.
- [9] 巴特尔, 单久涛, 刘兴汉, 等. 数字化、双极化雷达及其在人工影响天气作业与研究中的应用[J]. 内蒙古气象, 1998(2): 32-36.
- [10] 朱龙彪, 何彩芬, 黄思源. 宁波新一代天气雷达在人工增雨中的应用[J]. 气象, 2004, 30(7): 59-62.
- [11] 吴林林. 新一代天气雷达冰雹探测算法及在业务中的应用[J]. 气象, 2005, 31(1): 51-55.
- [12] 白先达, 陈博杰, 张瑞波, 等. 新一代天气雷达在人工增雨作业中的应用[J]. 广西气象, 2005, 26(3): 45-48.

Analysis of radar echo characteristics on the weather system of fitting aircraft artificial precipitation enhancement

WANG Jihong¹ HAN Jiangwen² HU Wei¹ SHENG Yong² DU Jianwei³

(1. Liaoning Weather Modification Office, Shenyang 110016;

2. Liaoning Meteorological Observatory, Shenyang 110016;

3. Chaoyang Agricultural. Bureau, chaoyang 122000)

Abstract: Weather system favorable to precipitation enhancement operating, precipitation enhancement operation cloud and their radar echo characteristics were analyzed by the Doppler radar data and routine weather data in Huishan mountain of Shenyang from 2004 to 2005. The operating conditions, occasions, regions and so on for aircraft precipitation enhancement operations were discussed, in order to provide the scientific basis for aircraft artificial precipitation enhancement operations.

Key words: Artificial precipitation enhancement operations; Weather system; Radar echo; Doppler radar; Weather modification