

多普勒雷达数值产品在火箭增雨效果分析中的应用

李红斌¹ 何玉科¹ 周德平² 濮文耀¹

(1 辽宁省大连市人工影响天气办公室, 大连 116001; 2 中国气象局沈阳大气环境研究所, 沈阳 110016)

摘要 采用新一代多普勒雷达基本数据和二次产品对 2004~2005 年大连地区实施火箭增雨作业的 31 个作业个例进行了统计分析, 总结出利用雷达实时指挥作业其雷达回波几个主要参数随时间的变化规律。分析结果表明, 对不同类型云作业后云体回波强度、垂直积分液态水含量均随时间增大, 且最大值均出现在作业后 20~30 min 左右; 回波顶高却产生了不同的变化特征, 即积层混合云作业后顶高随时间增高, 层状云顶高则出现先下降再增高的变化。该分析结果对采用雷达进行效果分析, 科学选择再作业时机, 充分开发空中云水资源具有实际的指导意义。

关键词 人工增雨 效果分析 雷达数据产品

引言

科学、客观地评价人工增雨作业效果是现代人工影响天气学科研究的重要组成部分。由于它的多学科和复杂性, 长期以来这个问题始终未得到更好的解决, 因此增雨效果的评估仍是本学科当前非常重要的研究课题。目前, 我国在人工增雨效果评估中通常采用的是统计方法, 包括随机试验和非随机试验 2 种方案^[1]。主要是以地面降水量为统计变量, 但自然降水量在时空分布上却存在着较大差异。非随机试验在方案设计时对降水的时空分布上做了某种假定^[1], 因此导致统计结果缺乏客观性; 随机试验方案最大的问题是放弃了 50% 的适合作业的机会, 大大延长了试验周期。以农业抗旱增雨和水库蓄水为目的的人工增雨作业, 是属于服务范畴的纯业务性质生产活动, 作业后人们最关心的是地面降水是否发生了改变。回答这个问题似乎不难, 只要将播撒后的降雨观测资料 and 自然发展情况下预报的结果作一比较即可。但大多数实际情况中, 根据气象学理论和云物理学理论要做出比较精确的预报还不可能, 特别是降水在时空分布上的巨大起伏, 使得客观定量地评估作业效果变得更为困难。

由于天气雷达能灵活准确地监测较大范围内云状和降水的分布及变化, 已成为云和降水物理研究、

天气预报和人工影响天气工作的有力工具。人工增雨效果指的是作业后催化云体是否产生预期变化, 降水是否加强。前者是直接效果, 诸如作业云体的云顶高度、冰晶数密度、大云滴数密度、持续时间等的改变是否得到反映; 后者是云的一系列物理变化的最终结果, 称为人工影响的间接效果。无论是分析人工增雨的直接效果, 还是间接效果, 天气雷达都是非常有效的工具。近几年, 采用雷达进行物理检验在我国许多省市已进行过一些探索^[2~6], 但大多仅限于对某个个例的总结分析, 还未有应用雷达进行效果分析的可借鉴的主要参数变化规律方面的研究。本文立足于采用多普勒雷达进行物理检验, 针对火箭增雨作业效果分析方法进行了初步探讨。根据大连市增雨工作需要, 对 2004~2005 年 4~10 月大连地区实施火箭人工增雨作业的多普勒雷达体扫数据资料和 PUP 软件二次开发产品进行了统计分析, 得到了对作业效果分析有意义的几个雷达主要参数的变化规律, 并提出了采用多普勒雷达回波强度、云顶高度、垂直积分液态水含量各要素随时间的变化趋势对作业效果进行实时分析的一种评价方法。通过掌握雷达主要参数随时间变化规律, 在实际作业中既可对作业效果进行雷达实时分析判断, 同时也能对范围宽广的稳定性降雨云系确定再次作业的最佳时机, 达到充分开发空中云水资源的目的。

中国气象局 2006 年“火箭增雨流动作业决策指挥系统新技术推广应用项目”资助

作者简介: 李红斌, 女, 1963 年生, 高级工程师, 从事人工影响天气研究工作, Email: lhb2237389@163.com

收稿日期: 2005 年 10 月 20 日; 定稿日期: 2006 年 12 月 10 日

1 资料来源与分析方法

1.1 资料来源

选取了大连 2004~2005 年的 9 次增雨天气过程中的 35 个作业个例的多普勒雷达 PPI 和 RHI 基本数据资料和 PUP 软件生成的二次产品资料。根据作业云体回波特征将 35 个个例分为 3 种不同类型的作业云,即层状云、积层混合云和积状云。其中,积层混合云有 13 个个例,层状云有 18 个个例,积状云仅有 4 个个例,表明大连地区的主要降雨云系是积层混合云和层状云。由于积云作业样本少,且资料不全,这里仅对前两类稳定性降水增雨作业情况进行了统计和分析。

1.2 分析方法

把火箭一次作业过程(接到一次作业指令到作业实施完毕)作为一个个例。由此得到大连地区 2004~2005 年的 31 个个例(其中层状云 18 个,积层混合云 13 个,略去 4 个积状云)。首先,对每个个例的作业云体的回波强度、云顶高度和垂直积分液态水含量雷达参数分别计算所选取的各时间点上的数值。其中一次个例分析的时间选取方法为作业前 30 min 及作业后 60 min;选取的时间点依次为作业前每隔 10 min 一个,作业后 30 min 内每隔 10 min 一个,30 min 后每隔 15 min 一个。其次,对 31 个个例分不同类型云(层状云 18 个例,积层混合云 13 个例)的各雷达参数的不同时间点上的参数值分别进行统计和分析,从而定性地得到了各雷达参数随时间的变化规律。

2 多普勒雷达参数随时间的变化特征

2.1 雷达回波强度随时间的变化

按上述分析方法,对 18 个层状云个例和 13 个积层混合云个例的雷达回波强度(采用体扫 0.5° 仰角数据)作业前后各时间点上的数值(用雷达每 6 min 一次体扫数据,如果恰好是所取的时间上的,数据可直接获得;如果在两个体扫之间则选靠近的或内插得到该数据)分别进行统计和分析,得到了相似的变化趋势(图 1)。由图 1 可见,作业前,强度平均值是缓慢增大的,30 min 内仅增加了 0.5 dBz;作业后,催化云体回波强度平均值随时间先是快速增大,在 30 min 左右达最大,增加了 1.4 dBz,之后又缓慢减小。

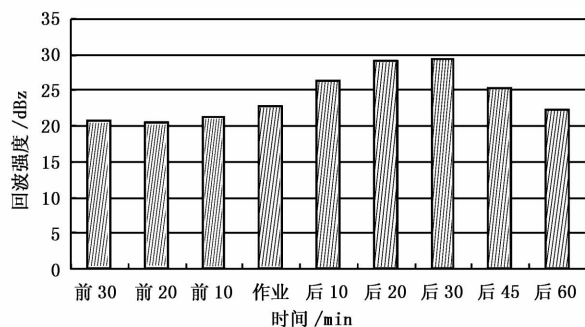


图 1 作业前后层状云和积层混合云平均回波强度随时间的变化

从图 1 还可以看出,催化剂核化效率在作业后 20~30 min 左右达最大,即作业 20~30 min 后,若火箭射程内目标云仍满足雷达作业判别指标^[7],可进行再次作业,以达到充分开发空中云水资源的目的。上述变化采用相关性检验得到结果为:层状云为 80%(表 1);积层混合云为 78.5%(表 2)。

2.2 雷达回波云顶高度随时间的变化

2.2.1 层状云作业云体回波顶高变化

通过对 18 个层状云个例的多普勒雷达体扫资料进行剖面分析,得到了作业云体部位的各个取值点上的 RHI 数值以及层状云催化云体平均云顶高度(取雷达回波 RHI 上 0 dBz 所在高度为云顶高)随时间的变化趋势(图 2),即作业前云顶略有升高,在 30 min 内上升了 0.1 km;作业后云顶先是继续升高(这也许是选择的催化云体作业前正处于发展阶段以及云中催化剂最初核化反应的综合结果),10 min 后云顶高度开始逐渐下降,作业后 30 min 左右达最低值,平均下降了 0.2 km,之后又出现了逐渐回升,到 60 min 时平均顶高值仍大于作业时。

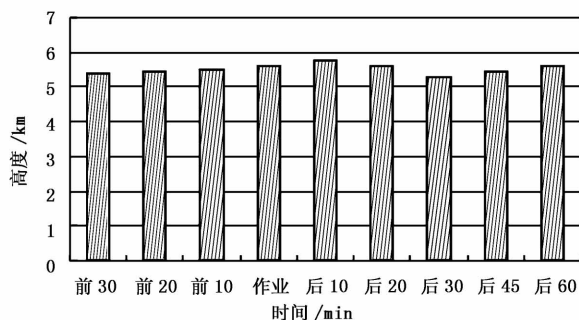


图 2 催化云体平均云顶高度随时间的变化

通过分析发现:对层状云作业后,云顶出现了下塌现象(图略),可能是层状云在静力催化作用下,降

水逐渐增大和下沉气流加强引起的结果,这也和对应时间内回波强度增强,降水加大是吻合的。

表 1 层状云雷达反射率因子随时间的变化 dBZ

日期	地点	前 30 min	前 20 min	前 10 min	作业时	后 10 min	后 20 min	后 30 min	后 45 min	后 60 min
2004-04-26	儋汤	18	18	18	18	18	18	23	23	18
2004-05-16	旅顺	24	25	25	28	28	28	26	24	18
2004-05-16	黄泥川	23	25	26	28	33	33	28	23	18
2004-05-16	金州	18	20	22	28	28	33	28	23	18
2004-07-01	永宁	18	20	22	23	28	28	28	18	18
2004-07-01	塔岭	20	23	23	25	28	33	33	28	23
2005-04-06	长海	15	15	16	18	23	23	18	18	18
2005-04-06	黄泥川	16	18	18	18	23	25	23	18	18
2005-04-09	黄泥川	12	13	13	13	15	18	18	13	13
2005-04-09	二坨子	13	15	15	15	18	18	18	18	13
2005-04-09	双岛	11	15	15	16	18	18	23	23	18
2005-04-09	西海	13	13	15	16	23	23	33	28	28
2005-05-05	长海	15	18	18	22	28	28	28	28	28
2005-09-16	黄泥川	18	23	23	25	28	43	28	18	18
2005-09-16	双岛	13	13	14	16	18	18	23	18	18
2005-09-16	西海	23	23	24	24	28	28	28	28	18
2005-09-16	唐家	25	25	26	26	28	28	25	13	13
2005-09-16	长海	18	18	15	18	18	18	23	23	18

表 2 积层混合云雷达反射率因子随时间的变化 dBZ

日期	地点	前 30 min	前 20 min	前 10 min	作业时	后 10 min	后 20 min	后 30 min	后 45 min	后 60 min
2004-04-13	黄泥川	23	24	26	28	33	38	43	43	38
2004-04-13	黄泥川	28	30	32	33	38	38	38	36	34
2004-07-18	同益	14	16	18	20	23	28	33	43	33
2004-07-18	儋汤	15	16	18	20	25	25	24	24	22
2004-07-18	四平	25	26	26	28	30	30	33	35	28
2004-07-18	桂云花	25	25	25	25	28	28	28	25	23
2004-07-18	儋汤	20	21	22	23	28	33	28	25	23
2004-07-18	大营	23	25	26	26	30	33	34	28	28
2004-07-18	同益	24	26	27	28	28	33	35	29	25
2004-07-18	桂云花	21	23	23	25	28	28	28	18	13
2005-04-19	三堂	25	27	28	30	33	28	28	23	23
2005-04-19	桑店	15	17	18	20	25	38	48	23	18
2005-04-19	黄泥川	12	14	15	18	28	43	35	30	28

2.2.2 积层混合云回波顶高的变化

分析 13 个积层混合云个例的雷达体扫资料,计算其相应时间点回波的 RHI 数值,并进行统计和分析,得到了积层混合云云顶高度随时间的变化趋势(图 3):作业前云顶高度缓慢升高,升高幅度大于层状云,30 min 内升高了 0.2 km;作业后催化云体顶高明显增加,在 30 min 左右升到最高,大约升高了 0.4 km,增加幅度明显大于作业前,之后开始缓慢下降,在 60 min 时接近于作业时的平均高度值。分析变化原因,可能是作业针对发展着的积云泡进行催化,因此动力催化效果突显的结果。

同样对其相关性(与该变化趋势相吻合的)进行

分析得到:层状云为 76.4 %(表 3);积层混合云为 75%(表略)。

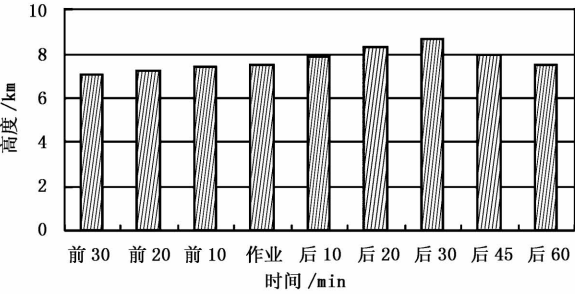


图 3 积层混合云顶平均高度随时间的变化

表 3 层状云云顶 0 dBz 高度值随时间的变化

km

日期	地点	前 30 min	前 20 min	前 10 min	作业时	后 10 min	后 20 min	后 30 min	后 45 min	后 60 min
2004-04-26	佷汤	5.3	5.3	5.3	5.5	5.6	6.0	5.6	5.7	5.8
2004-05-16	旅顺	5.2	5.2	5.4	5.2	5.0	4.8	4.8	4.8	4.0
2004-05-16	黄泥川	4.8	4.8	5.0	4.8	5.0	5.2	4.8	4.5	4.0
2004-05-16	金州	5.1	5.2	5.5	5.6	5.8	6.2	6.0	6.4	5.5
2004-07-01	永宁	5.1	5.2	5.2	5.3	5.6	5.6	5.3	5.6	5.8
2004-07-01	塔岭	4.7	4.8	4.8	5.1	5.3	4.8	3.8	4.0	4.3
2005-04-06	长海	5.8	5.8	6.0	6.2	6.2	5.8	5.4	5.7	6.4
2005-04-06	黄泥川	6.1	6.2	6.2	6.2	6.3	6.1	5.9	6.2	6.2
2005-04-09	黄泥川	6.2	6.2	6.2	6.4	6.6	6.5	5.8	6.1	6.4
2005-04-09	二坨子	6.2	6.2	6.2	6.3	6.5	6.2	5.8	6.0	6.2
2005-04-09	双岛	6.0	6.1	6.2	6.2	6.4	6.2	6.0	6.2	6.6
2005-04-09	西海	5.3	5.4	5.4	5.5	5.7	5.5	5.3	5.4	5.4
2005-05-05	长海	5.5	5.6	5.6	5.7	5.8	5.6	5.3	5.4	5.5
2005-09-16	黄泥川	4.0	4.0	4.0	4.2	4.3	4.1	4.0	4.4	4.6
2005-09-16	双岛	6.1	6.2	6.4	6.4	6.4	6.0	5.6	5.8	5.8
2005-09-16	西海	5.0	5.0	5.2	5.2	5.3	5.0	4.8	4.9	6.5
2005-09-16	唐家	5.2	5.2	5.4	5.5	6.0	5.8	5.4	5.8	6.8
2005-09-16	长海	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.1	5.2	5.2	5.0

2.3 垂直积分液态水含量随时间变化特征

2.3.1 层状云垂直积分液态水含量的变化

对层状云 17 个个例的多普勒雷达垂直积分液态水含量进行统计和分析,得到了其平均值随时间的变化规律(图 4):作业前其要素值基本不变;作业后要素值随时间明显增大,在 20~30 min 达最大,平均增加幅度 $1.2\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$, 30 min 后开始迅速下降,作业后 60 min 已降为低于作业时的平均值。该结果再次表明:对层状云重复作业的最佳时机应选择在作业后 30 min 左右。对该要素随时间变化规律通过相关性检验为 64%(表略)。

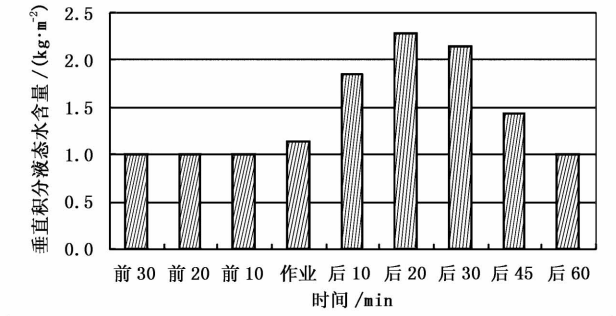


图 4 层状云垂直积分液态水含量随时间的变化

2.3.2 积层混合云垂直积分液态水含量的变化

对积层混合云 10 个个例的垂直积分液态水含量进行统计分析,得到平均值随时间的变化(图 5):作业前,其平均值随时间有所增大,30 min 内增加

了 $0.5\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$;作业后,其平均值明显增大,20~30 min 内达最大,增加了 $1.7\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$,之后迅速减小,作业后 60 min 的平均值低于作业时的平均值。由此表明,对积层混合云再次作业的最佳时机可选择在作业后 20~30 min 左右。该雷达参数随时间变化规律经过相关性检验为 70%(表略)。

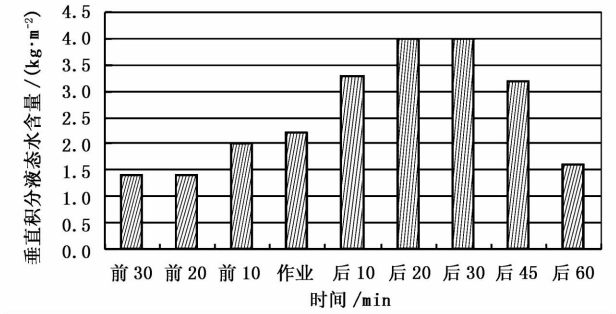


图 5 积层混合云垂直积分液态水含量随时间的变化

3 结论

(1)火箭对层状云和积层混合云作业后,作业云体的回波反射率因子先迅速增大,20~30 min 达最大,之后缓慢减小,45 min 后变化趋于平稳,平均强度值仍高于作业时的平均值。

(2)火箭对层状云催化后,作业云体顶高先是下降,出现下塌现象,30 min 降到最低,之后缓慢升高;对积层混合云作业后,顶高会迅速增加,30 min

左右升到最高,之后缓慢下降。

(3)层状云垂直积分液态水含量作业前基本不变,作业后随时间迅速增大,30 min 达最大,之后迅速减小;积层混合云则于作业前逐渐增大,作业后迅速增大,20~30 min 达最大,之后迅速减小。

(4)不同雷达参数随时间变化均表明,对层状云和积层混合云重复作业的最佳时机均可选择在作业后 30 min 左右。

(5)在实际作业中,根据各参数以上变化特征,通过实时监测的多普勒雷达回波强度、顶高和垂直积分液态水含量等各要素随时间的变化,可以直观、迅速、客观地判断作业的效果,同时也为科学选择再作业的最佳时机找到了依据。

(6)该方法局限于定性分析和判断,雷达定量评估方法是今后要进一步探讨的课题。

参考文献

- [1] 曾光平. 人工增雨影响区自然降水量的一种估计方法[J]. 气象, 2000, 25(2): 10-14.
- [2] 王永亮, 田广之, 房彬. 多普勒雷达资料检验增雨催化效果的个例分析[J]. 辽宁气象, 2004(4): 54-59.
- [3] 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(4): 186-190.
- [4] 迟竹萍, 张苏平, 冯桂力, 等. 数值化天气雷达回波资料在人工影响天气中的处理应用[J]. 成都信息工程学院学报, 2001, (6): 45-49.
- [5] 袁健, 宫福久, 郭恩铭. 应用雷达回波检验人工增雨效果的个例分析[J]. 辽宁气象, 2003, 22(4): 69-70.
- [6] 石玲, 赵生平, 胡之东. 711 雷达强降水天气的资料分析[J]. 宁夏工程技术, 2004, 3(3): 137-141.
- [7] 李红斌, 濮文耀, 张殿刚, 等. 火箭增雨作业中雷达和 3S 技术的应用[J]. 气象科技, 2004, 32(4): 247-250.

Application of Doppler Radar Numerical Products to Effectiveness Analysis of Precipitation Enhancement

Li Hongbin¹ He Yuke¹ Zhou Deping² Pu Wenya¹

(1 Dalian Weather Modification Office, Liaoning Province, Dalian 116001;

2 Institute of Atmospheric Environment, CMA, Shenyang 110016)

Abstract: A statistical analysis of 38 rain enhancement cases in Dalian of Liaoning Province is made based on the basic data and products of Doppler radar echo in last two years. The variation characteristics of primary echo parameters are summarized. It is shown that some radar echo parameters varied regularly with time. The radar echo intensity and VIL (Vertical Integrated Liquid water) after seeding became greater, and the maximum values appeared in 20 to 30 minutes after seeding. The evolutionary characteristics of cloud-top heights were different: the heights of stratus-cumulus mixing clouds increased, while the heights of stratiform clouds decreased at first and then increased. The results provide useful reference for the seeding effectiveness analysis with Doppler data and the scientific selection of seeding opportunity aiming at large-range and stable precipitation processes, as well as the sufficiency exploitation of air cloud-water resource.

Key words: precipitation enhancement, effectiveness analysis, radar data product