

何阳,李红斌,夏葳,等.雷达特征参数在人工增雨(雪)决策中的应用[J].沙漠与绿洲气象,2022,16(4):125-130.

doi: 10.12057/j.issn.1002-0799.2022.04.017

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



雷达特征参数在人工增雨(雪)决策中的应用

何 阳,李红斌*,夏 葳,温家梁,濮文耀,张殿刚

(大连市人工影响天气办公室,辽宁 大连 116001)

摘 要:对 2016—2018 年大连市 86 次降水过程(≥ 5 mm)高空资料进行统计分析,得到主要的降水天气形势场,即冬季为高空槽、东北冷涡和平直西风气流形势场,春、夏、秋季为高空槽、东北冷涡、副热带高压西南气流、西北气流及江淮气旋形势场。对新建 SA 多普勒雷达资料进行 PUP 分析,得到降水回波特征和特征参数值,以及主要降水云系(层状云、积层混合云和对流云)。根据雷达回波强度、垂直积分液态水含量等特征参数及变化,结合冷云催化原理等综合分析,建立了基于 SA 多普勒雷达的人工增雨(雪)作业预警、决策判别指标(回波强度 ≥ 16 dBZ、垂直积分液态水含量 ≥ 1 kg/m²)。通过对 2019 年 41 次降水个例雷达资料进行指标验证和分析,得到 87%及以上的准确率,对 4 月 13 日一次实例通过火箭增雨决策系统业务运行和雷达指标决策等分析,取得了预期效果。

关键词:雷达特征参数;人工增雨(雪);决策和应用

中图分类号:P481

文献标识码:A

文章编号:1002-0799(2022)04-0125-06

随着新一代天气雷达高时空分辨率探测及全国布网建设,使天气监测和预报准确性得到了极大提高,而新一代天气雷达在人工影响天气中的应用^[1-3],特别是在人工增雨、防雹决策指挥等方面发挥着越来越突出的作用^[4-7],已成为人工影响天气科学决策指挥作业不可缺少的重要工具。通过几十年人影作业实践和分析,人工增雨作业预警、决策等方面研究取得了重要成果^[8-10]。许多省、市结合当地实际,综合不同雷达特征参数作为增雨潜力分析^[11-12]和作业决策^[13-14]判别指标。并通过实践证明,催化云体过冷层越厚,催化潜力越大,作业效果越好^[15-17]。且通过数值模拟得到,增雨最佳时机选择在对流云降水初期,或层状云、积层混合云降水云系发展旺盛阶段^[18]。

辽东半岛最南端的大连市受三面环海等特殊气候影响,淡水资源严重匮乏。随着 2003 年 SC 型多普勒天气雷达建成并投入业务使用,大连市人影办在多年作业实践和历史资料分析基础上,研究和建立了以雷达特征参数为主的火箭增雨作业预警、决策判别指标体系^[17],研发了基于 SC 多普勒天气雷达的火箭人工增雨流动作业决策指挥系统^[18-20],并实现业务运行,在大连市农业抗旱、水库蓄水和生态环境保护等方面发挥了重要作用。2015 年 SA 新一代多普勒雷达在大连投入应用。通过大连市增雨防雹决策系统业务运行发现,雷达作业决策时常出现过去未曾有过的误判,甚至将强雹云判别成单体雹云,可能是不同型号雷达特征参数和决策指标存在差异所致。为了订正雷达判别指标及补充建立大连市冬季增雨(雪)雷达决策指标,通过对 2016—2018 年大连市 86 次降水过程 SA 多普勒雷达资料进行 PUP 处理和分析,根据冷云催化原理和数值模拟结果^[18]等,建立了基于 SA 多普勒天气雷达人工增雨(雪)作业预警、决策判别指标提升了人影科学作业决策指挥能力。

收稿日期:2021-11-15;修回日期:2022-02-07

基金项目:国家自然科学基金(41375038)

作者简介:何阳(1981—),男,工程师,主要从事人工影响天气业务与科研。E-mail:25108827@qq.com

通信作者:李红斌(1963—),女,正高级工程师,主要从事人工影响天气业务与科研。E-mail:lhb7159@163.com

1 资料与方法

采用2016—2018年大连市7个基本站(大连、旅顺、金州、瓦房店、普兰店、庄河、长海)的86次降水天气过程(3个基本站过程雨量 ≥ 5 mm)相关气象资料,以及SA多普勒雷达探测基数据资料。通过对高空天气图资料、探空资料进行统计^[21]和分析,得到了大连市适宜人工增雨(雪)的降水天气形势场特征及层结稳定度;对雷达基数据资料进行PUP分析,得到了雷达特征参数、降水回波特征及主要降水云系特征;结合冷云催化及数值模拟结果^[18],建立了SA多普勒雷达的人工增雨作业决策判别指标;利用2019年41次降水过程及4月13日一次作业实例对大连市增雨雪决策指挥系统进行了业务运行及雷达资料反演指标分析和验证。

2 人工增雨(雪)天气特征

2.1 降水形势场特征

2016—2018年大连市共出现86次降水(≥ 5 mm)天气过程,其中,冬季(11—2月)降水34次,春、夏、秋季降水52次。对高空500 hPa天气图分析得到,冬季出现降水的高空形势场主要为高空槽(68%)、东北冷涡(19%)和平直西风气流(13%);春、夏、秋季高空形势场主要为高空槽(56%)、东北冷涡(22%)、副热带高压西南气流(13%)、西北气流和江淮气旋(9%)。其中,高空槽和东北冷涡占比较大,为75%(表1),是大连适宜人工增雨(雪)主要降水天气形势。

表1 大连市适宜人工增雨(雪)的500 hPa降水天气形势场所占比例 %

500 hPa	高空槽	东北冷涡	平直西风气流	副高西南气流	西北气流和江淮气旋
冬	68	19	13	0	0
春、夏、秋	56	22	0	13	9

2.2 大气层结稳定度

对86次降水天气过程的不稳定参数沙氏指数(S_i)分析发现,产生降水时大气层结多为稳定层结($S_i > 0$),只在夏季副热带高压、东北冷涡和江淮气旋形势下的降水过程才出现不稳定层结($S_i < 0$)。由此可知,大连市秋、冬季实施地面燃烟炉增雨(雪)作业时,大气中、低层(700、850 hPa)高空槽前上升运动^[20]与地面低压辐合上升^[20]运动配合较好,是地面燃烟炉增雨(雪)有效作业的基本前提。

3 人工增雨(雪)雷达决策指标分析

大连市人工增雨(雪)主要采用火箭和地面燃烟炉催化系统,其中,火箭(固定和移动)主要实施春、夏、秋季的人工增雨作业;地面燃烟炉主要在冬季实施增雨(雪)作业。

3.1 增雨作业预警指标

在火箭车增雨移动作业中,需进行作业预警分析(即车辆适时调度)。临近(3~0 h)作业时,通过雷达实时监测及作业预警指标分析^[19]确定火箭车出发时间和作业预设点。

2015年SA多普勒雷达在大连投入业务使用。对2016—2018年春、夏、秋季52次降雨天气过程雷达资料进行PUP分析及雷达回波特征等分析,得到了主要降雨云系为层状云、积层混合云和对流云共169个个例,其中积层混合云106个、对流云41个、层状云22个。根据冷云催化原理和数值模拟结果^[18-19](层云、积层混合云作业时机应选择降雨发展旺盛阶段和对流云降雨初期)等综合分析,获得了不同类型云的作业预警指标(表2)。

表2 不同类型云的作业预警指标

云型	预警指标	
层状云	回波强度	≥ 20 dBZ
	$H_{\text{云顶}}$	≥ 3.0 km
	$-\Delta H$ (负温层厚度)	≥ 1 km
	垂直积分液态水含量	≥ 1 kg/m ²
积层混合云	回波强度(积云泡)	≥ 25 dBZ
	$H_{\text{云顶}}$	≥ 3.5 km
	$-\Delta H$ (负温层厚度)	≥ 1.8 km
	垂直积分液态水含量	≥ 2 kg/m ²
对流云	孤立积云的回波面积	$\geq 10 \times 10$ km ²
	回波强度	≥ 25 dBZ
	$H_{\text{云顶}}$	≥ 4.0 km
	$-\Delta H$ (负温层厚度)	≥ 2.5 km
	垂直积分液态水含量	≥ 3 kg/m ²

作业预警指标写入了大连市火箭增雨决策指挥系统^[20]并业务应用。通过雷达监测及作业预警指标,可适时输出作业预警方案^[20],进行车辆适时调度。利用2019年春、夏、秋季28次降雨天气过程的76个不同类型云雷达回波个例进行系统业务运行及雷达作业预警指标分析和验证,经数据统计,准确率达87%。

3.2 人工增雨(雪)作业决策指标

作业决策(即作业时机选择)是科学有效作业关键要素之一。主要通过雷达实时监测及指标判别确定。由于冬、夏季降水回波特征参数差异,为了科学精准作业,针对不同季节,采用原火箭增雨决策指标研究方法^[17]进行了 SA 多普勒雷达的增雨(雪)作业决策指标分析及完善建立。

3.2.1 春、夏、秋季人工增雨作业决策指标

在预警指标基础上,结合雷达特征参数值及其变化,建立了 SA 多普勒雷达的人工增雨作业决策判别指标(表 3)。

表 3 基于 SA 多普勒天气雷达的人工增雨作业决策判别指标

云型	回波强度/dBZ	$H_{\text{云顶}}/\text{km}$	0℃层高/km	$-\Delta H(\text{负温层})/\text{km}$	液态水含量/(kg/m ³)
层状云	20	2.8~5.8	1.8~4.5	>1.0	1~3
积层混合云	25	3.7~7.0	2.1~5.0	>1.8	2~7
对流云	25	4.3~8.0	1.8~5.4	>2.5	3~9

该判别指标写入了大连市火箭人工增雨决策指挥系统^[19]并业务应用。经 2019 年 76 个个例的验证,准确率达 93%。

3.2.2 冬季人工增雨(雪)作业决策指标

对 2016—2018 年冬季 34 次降水过程的雷达基数据资料进行 PUP 分析,根据获得的雷达回波特征和特征参数值及其变化,得到了大连市冬季主要降水云系为层状云(31 个)、积层混合云(41 个)和对流云(19 个)91 个个例,结合冷云催化原理及数值模拟结果^[18]等综合分析,建立了 SA 多普勒雷达的人工增雪(雨)作业决策判别指标(表 4)。

表 4 基于 SA 多普勒天气雷达的人工增雪(雨)作业决策判别指标

云型	回波强度/dBZ	$H_{\text{云顶}}/\text{km}$	0℃层高/km	$-\Delta H(\text{负温层})/\text{km}$	液态水含量/(kg/m ³)
层状云	16	2.0~4.5	0.0~1.0	>1.0	1.0
积层混合云	20	2.5~6.5	0.8~2.0	>1.7	1~7
对流云	25	3.0~7.0	0.8~2.5	>2.2	2~9

该作业决策指标写入了大连市人工增雨雪决策指挥系统^[20]并投入业务应用。利用 2019 年冬季 13 次降水过程的 34 个不同类型云雷达回波个例进行了系统业务运行及雷达决策指标分析和验证,准确率达 91%。

采用相同雷达特征参数和方法研究建立的 SA 多普勒雷达决策判别指标与原 SC 多普勒雷达决策

指标进行对比发现,雷达特征参数指标存在一定差异,即 SA 型回波强度(反射率因子)平均增大 5 dBZ、回波顶高减小 1~2 km、垂直积分液态水含量增大 1~3 kg/m³。由此可见,不同型号雷达的人影作业预警、决策指标可能存在差异,在业务应用中,需及时进行订正分析。通过完善建立的大连市人工增雨(雪)决策指标体系及业务应用,提升了系统的科学决策和作业实时指挥。

4 人工增雨实例分析

2019 年 4 月 13 日大连市出现一次降雨天气过程,大连市人影办组织实施了火箭人工增雨。对本次过程进行火箭增雨指挥系统业务运行和雷达资料反演决策指标判别及综合分析,取得了预期效果。

4.1 天气形势场分析

受高空槽影响,4 月 13 日大连市出现小雨天气过程。通过形势场分析可知,在 13 日 08 时高空 500 hPa 上有一宽广浅槽横跨我国东北,大连市上空为平直偏西气流场(高层上升运动偏弱^[22]),对应 850 hPa 槽前西南气流场(即低层上升运动较强^[21]);地面图上,大连位于闭合低压前部均压场中,水平风速较小,为 2 m/s(图 1),并扩展到 850 hPa 高度。由大连探空资料分析可知,本次降雨过程大气层结为稳定层结(图 2)。

4.2 雷达决策及人工增雨

正值春季农业抗旱,大连出现小雨天气过程,大连市人影办提前做好火箭增雨各项准备,时刻关注天气,根据系统业务运行,组织实施了火箭增雨作

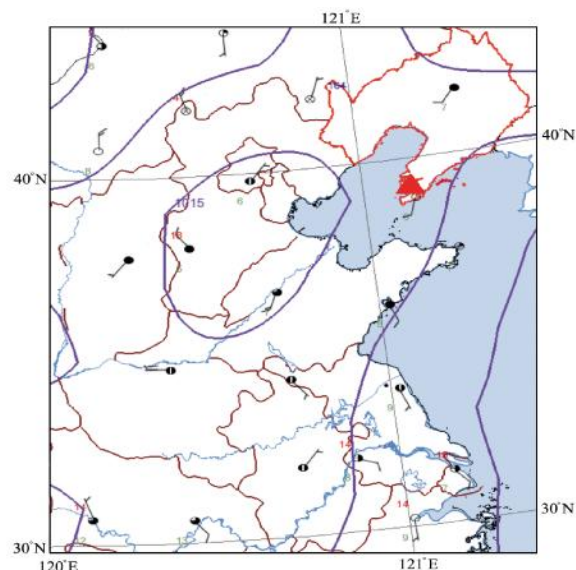
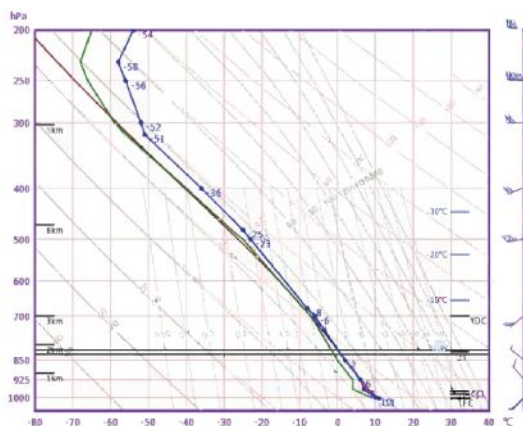


图 1 2019 年 4 月 13 日 08 时地面天气图 (▲为大连本站)

图2 2019年4月13日20时 T - $\ln P$ 图

业。利用6 min一次雷达基数据资料进行PUP处理和系统业务运行,以及雷达资料反演,再现了SA多普勒天气雷达作业预警、决策指标判别和火箭增雨实时指挥作业过程。

通过系统业务运行,13日17:51雷达决策平台发出了黄泥川(图3a中橘色小三角)等作业点的作业预警,并输出了作业预警方案^[20]。指挥员经过人工订正(分析大连市火箭车到达黄泥川作业点需1 h等)后,下达了火箭车出发到达黄泥川等作业点的作业指令。

同时,对 $PM_{2.5}$ 实时观测资料分析得到,降雨前大连市出现了较长时间的大气污染(即 $PM_{2.5}>100$ 维持了24 h),大连市人影办在重点实施农业抗旱增雨同时,也兼顾开展对大连市区空气净化、减轻大气污染影响的增雨作业。

当增雨火箭车到达作业预设点后,20:27雷达决策指挥平台输出黄泥川等作业点作业决策报警(图4a)及作业实施方案^[17](图5)。指挥员经订正分析发现,黄泥川等作业点上空的降雨云中液态水含量较充沛(图4b),且垂直积分液态水含量较大,为4~9 kg/m²,表明此时作业云中增雨潜力较大。

大连市人影办抓住有利时机,实时指挥黄泥川等3个作业点在20:28和20:58实施了两次火箭增雨作业,共发射增雨火箭弹18枚^[17]。

对黄泥川作业点做了实施方案调整,达到大连市区空气净化的增雨目的,间隔30 min两次作业,共发射增雨火箭弹6枚(3枚/次),45°发射仰角(-13℃层高度),方位角为西南(下游大连市区)。经测算,黄泥川作业点距大连站约20 km,其作业高度4 km(火箭弹道参数45°发射仰角)处的水平风向为西南偏西风、风速为10 m/s(图2)。对作业云体移动计算分析,作业后40~80 min(即21—22时),作

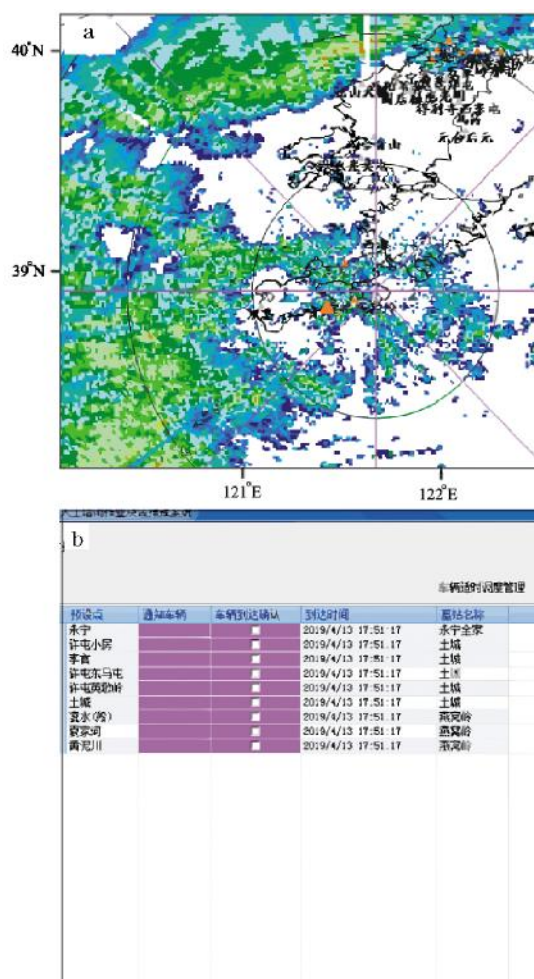


图3 2019年4月13日17:51雷达决策指挥平台适时输出显示

(a为作业点分布,b为火箭车出发时间及作业预设点)

业云将移到大连市区。根据大连站地面小时观测雨量,20时(作业阶段)为2.5 mm,21、22时(即作业云体影响阶段)分别为3.1和3.7 mm。作业后,大连市区地面雨量的增加与黄泥川作业点作业云体对大连市区的影响时段相吻合,达到了预期效果。

此外,在大连市雨量增大的同时,近地面大气细颗粒物浓度 $PM_{2.5}$ 逐渐减小,在23时减小到68(<75)。由此表明,一定程度的湿沉降过程对本地源大气污染起到减轻和缓解作用。

通过人工增雨决策指挥系统业务运行和雷达反演决策指标分析,雷达决策指挥平台能适时、准确输出火箭增雨作业预警、决策指标判别结果,进行实时指挥。

5 结论

(1)对2016—2018年大连市产生的86次降水过程高空500 hPa形势场分析,以及不同季节降水

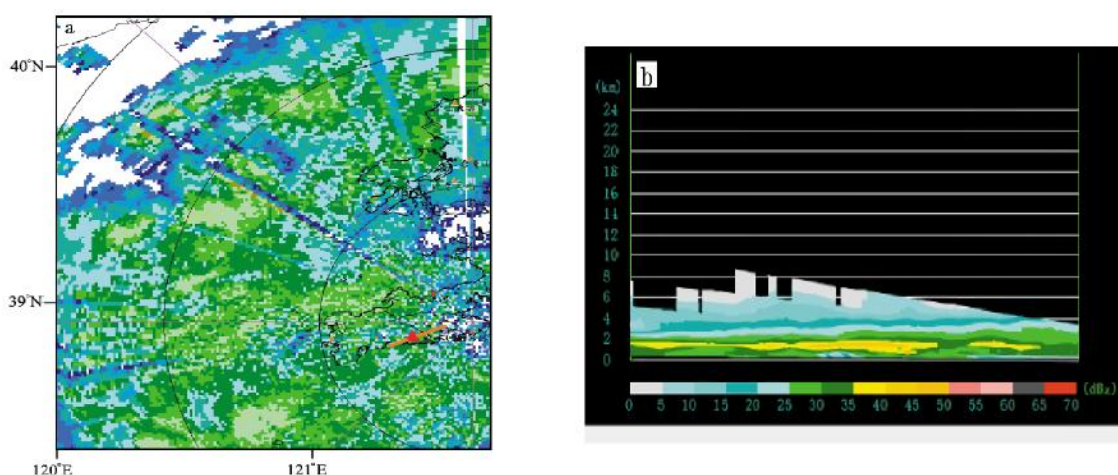


图4 2019年4月13日20:27雷达决策指挥平台适时输出显示
(a为雷达回波与作业点叠加显示,b为黄泥川作业点雷达垂直剖面;▲为作业点)

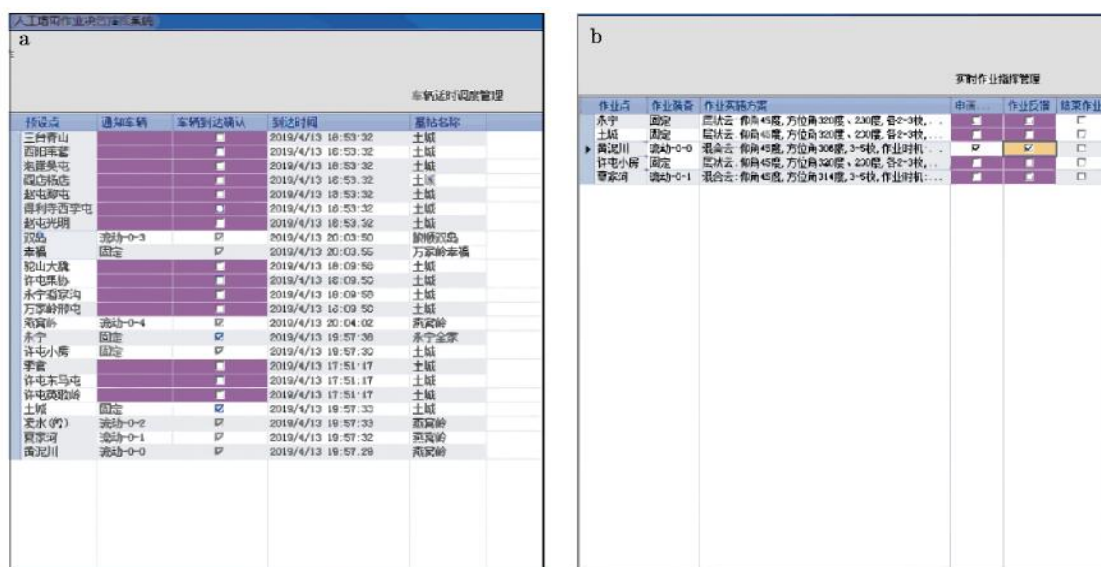


图5 2019年4月13日20:27雷达决策指挥平台适时作业预警和决策显示
(a为作业预警方案,b为作业实施方案)

过程SA多普勒雷达基数据资料进行PUP分析,得到了几种适宜人工增雨雪作业的高空形势场和雷达决策判据指标。冬季形势场主要为高空槽、东北冷涡和平直西风气流,春夏秋冬为高空槽、东北冷涡、副高西南气流、西北气流和江淮气旋,高空槽和东北冷涡占75%,是大连市主要降水天气系统。通过雷达资料分析,得到大连市主要降水云系(即层状云、积层混合云和对流云),根据冷云催化原理及数值模拟结果等综合分析,建立SA多普勒雷达的人工增雨(雪)作业预警、决策判据指标(回波强度 ≥ 16 dBZ、垂直积分液态水含量 ≥ 1 kg/m²)。

(2)利用2019年41次降水过程(春、夏、秋季28次,冬季13次)统计得到的110个不同类型云雷达回波个例进行了雷达作业预警、决策指标分析和

验证,得到了87%及以上准确率。对4月13日一次实例进行了火箭增雨指挥系统业务运行和雷达反演决策指标判别,将新建SA多普勒雷达决策指标写入人工增雨(雪)决策指挥系统,提升了系统科学决策和作业指挥能力,取得预期效果。

参考文献:

- [1] 陈光学,段英,吴兑.火箭人工影响天气技术[M].北京:气象出版社,2008:314—319.
- [2] 俞小鼎.多普勒天气雷达原理与业务应用[M].北京:气象出版社,2006:139—144.
- [3] 郭学良.大气物理与人工影响天气(上)[M].北京:气象出版社,2010:226—228.
- [4] 李斌.人工防雹作业效果物理统计评估方法初探[J].沙漠与绿洲气象,2020,14(4):113—118.
- [5] 王以琳,姚展予,林长城.一次火箭人工增雨作业雷达回

- 波响应探讨[J].气象科技,2016,44(6):1053-1059.
- [6] 李斌,郑博华.新疆重点雹区防雹作业效果统计检验评估[J].沙漠与绿洲气象,2020,14(2):116-122.
- [7] 张微.冷涡前部飞机人工增雨作业条件数值模拟研究[J].沙漠与绿洲气象,2020,14(6):54-60.
- [8] 李宏宇,嵇磊,周崑,等.北京地区人工增雨效果和防雹经济效益评估[J].高原气象,2014,21(4):1314-1351.
- [9] 李铁林,雷恒池,刘艳华,等.河南春季一次层状冷云的微物理结构特征分析[J].气象,2010,36(9):74-80.
- [10] 王以琳,黄磊.地市级人工影响天气业务技术系统[J].气象科技,2007,23(4):69-77.
- [11] 徐祥德,等.农业气象防灾调控工程与技术系统[M].北京:气象出版社,2002:322-328.
- [12] 洪延超,李宏宇.一次锋面层状云云系结构、降水机制及人工增雨条件研究[J].高原气象,2011,30(5):1308-1323.
- [13] 石爱丽,郑国光,孙晶,等.河南省一次秋季层状云降水增雨潜力的观测和数值模拟分析[J].气象,2013,39(1):67-73.
- [14] 高子毅,傅家模.开展人工影响天气技术服务促进农业抗灾夺丰收[J].沙漠与绿洲气象,1993,11(2):114-119.
- [15] 中国气象局科技发展司.人工影响天气岗位培训教材[M].北京:气象出版社,2003:268-276.
- [16] 白婷,黄毅梅,樊奇.河南一次降水天气过程人工增雨作业条件综合分析[J].气象,2020,46(12):1633-1640.
- [17] 李红斌,周德平,濮文耀.火箭增雨作业部位和催化剂量的确定[J].气象,2005,31(10):42-46.
- [18] 李大山.人工影响天气现状与展望[M].北京:气象出版社,2002:262-267.
- [19] 杨敏,黄毅梅.我国中部区域人工增雨天气系统分型及典型天气系统特点[J].气象与环境科学,2017,40(4):63-69.
- [20] 李红斌,方德贤,侯国成,等.基于模块化设计的数字雷达人工增雨作业指挥系统[J].高原气象,2008,27(6):1375-1382.
- [21] 胡玲,刘锦,东高红,等.天津城区暴雪的环流形势与雷达特征分析[J].气象与环境科学,2020,43(1):34-42.
- [22] 朱乾根,林锦瑞,寿绍文.天气学原理和方法[M].北京:气象出版社,1979:268-276.

Decision-making Application of Radar Feature Parameters in Artificial Precipitation (Snow) Enhancement

HE Yang, LI Hongbin, XIA Wei, WEN Jialiang, PU Wenyao, ZHANG Diangang
(Dalian Weather Modification Office, Dalian 116001, China)

Abstract The upper-air data of 86 precipitation events (≥ 5 mm) in Dalian from 2016 to 2018 are counted and analyzed, main synoptic patterns are obtained, patterns include high-level trough, Northeast China Cold Vortex, zonal westerlies in winter, while patterns involve high-level trough, Northeast China Cold Vortex, southwest flows of subtropical high, northwest flows and Changjiang-Huaihe cyclone in other seasons. After data processing via PUP, radar echo evolution patterns and feature parameters are derived, corresponding to clouds manifest stratiform, stratiform-convective mixed and convective patterns. According to feature parameters such as reflectivity, vertically integrated liquid water content (VIL) and so forth, combined with cold cloud catalytic principle, the system containing SA radar-based artificial precipitation operation, early warning and decision-making index (reflectivity greater than or equal to 16 dBZ, VIL greater than or equal to 1 kg/m² and so forth) is developed. By examining radar data of 41 cases in 2019, the accuracy rate shows over 87%. Additionally, a case on 13 April 2019 was operationally tested by this system, desired effects are achieved.

Key words radar feature parameters; artificial precipitation (snow) enhancement; decision-making and application