

文章编号: 2096-1618(2019)02-0198-06

# 一种与作业效率相关的人工防雹物理检验方法的探究

郑博华, 李 斌

(新疆维吾尔自治区人工影响天气办公室, 新疆 乌鲁木齐 830002)

**摘要:**运用新一代天气雷达基数据、NECP 逐6 h再分析资料,基于数学算法分析了2011年5月24日新疆阿克苏地区一次防雹作业过程的物理参数动态变化。使用编程软件解析新一代天气雷达基数据,用递推、排序、深度优先搜索等算法计算冰雹云“体积”,模拟冰雹云“形态”,发现体积为极大值时,冰雹云呈上宽下窄型。建立数学方程与数学拟合多项式,一次方程斜率可近似反映冰雹云生长速率、衰减速率和单位时间内地面作业速率,拐点可作为区分冰雹云生长过程与衰减过程的临界点,结果表明:衰减与生长速率、衰减与作业速率比值越大,防雹作业效果越显著。根据不同高度层的斜率值可推断:仰角越大,斜率值越大,即随着碘化银增量的不断增加,冰雹云最先从顶部塌陷,且塌陷的速率最快。上述数理模型对识别早期雹云、何时开展人影作业、选取作业方位角以及合理使用作业剂量提供重要的参考依据。

**关键词:**冰雹云;人工防雹;效果检验;物理参数检验法

**中图分类号:**P482

**文献标志码:**A

**doi:**10.16836/j.cnki.jcuit.2019.02.015

## 0 引言

新疆是典型的温带大陆性干旱气候,光热资源丰富,但干旱、冰雹等气象灾害频发,是中国西北地区冰雹灾害多发地区之一<sup>[1]</sup>。阿克苏地区的渭干河流域和阿克苏河流域是新疆主要冰雹发生区域<sup>[2]</sup>。南疆的阿克苏地区地处天山山脉中段南麓、塔里木盆地西北边缘,地貌类型复杂<sup>[2]</sup>,夏季炎热干燥,其北部为山地,南部为沙漠,中间是平原、绿洲、河流、水库等,起伏不平的下垫面极易造成冰雹天气。阿克苏每年因冰雹、洪水等自然灾害造成的经济损失达数亿元之多,严重制约经济发展,适时开展有效的人工影响天气作业有举足轻重的作用。随着全球气候变暖,近几年阿克苏地区的强冰雹天气呈增多趋势<sup>[2-3]</sup>,人工影响天气科技技术水平也随之发展提高。1994年,阿克苏地区有了新疆第一部中频相参的C波段多普勒天气雷达,1996年正式投入使用。2011年新型人工影响天气作业火箭发射系统148套以及X波段双偏振天气雷达投入使用,阿克苏地区建立了较为完善的人工防雹作业体系。

2000年以来,国内学者对各地冰雹天气的气候特征、时空分布、冰雹形成机制和催化防雹作业理论等展开了诸多研究。肖辉等<sup>[4-5]</sup>在识别早期冰雹云时提出了45 dBZ雷达强回波高度作为指标。郭学良等<sup>[6-8]</sup>研究

表明:高炮防雹抑制雹云有效减少冻滴的平均直径和质量并有利于地面降水的产生。王雨曾等<sup>[9-15]</sup>表明:防雹作业后雷达回波顶高、雷达回波强度以及30 dBZ强回波顶高明显比作业前小,通过了0.5显著性水平检验。新疆作为冰雹灾害的多发区,为冰雹研究提供了充足的个例,陈洪武等<sup>[16-18]</sup>等研究了新疆降雹出现的时间,并统计分析了系统性冰雹天气的环流形势;王秋香等<sup>[19]</sup>系统地阐明了新疆雹灾的分布特征,指出新疆阿克苏地区为雹灾最严重区域,必须提前联防、着力防御、重点保护。李丽华等<sup>[20]</sup>借助 ArcGIS 完成了阿克苏地区冰雹灾害5个风险区的区划。这些研究成果基本揭示了新疆冰雹天气的发生规律和变化特征。

自20世纪70年代新疆昭苏开始实施人工防雹作业以来,每年全疆各地州不断加大投入,作业装备和作业水平有着显著提升,但如何评估作业效果仍是人工防雹工作中亟待解决的一项课题。近几年,有一些针对统计效果评估检验的方法探究,如李斌等<sup>[21]</sup>运用序列检验、不成对秩和检验以及Welch检验等统计学方法,对阿克苏地区科学开展人工防雹作业(自1996年)前后各18 a的年雹灾面积差异进行分析,得出非参数性不成对秩和检验显著性水平为0.05,参数性Welch检验显著性水平高达0.01,雹灾面积相对减少率为43.14%;李斌等<sup>[22]</sup>以喀什地区作为对比区,采用统计学的区域回归分析法,得出阿克苏地区雹灾面积相对减少率为54.5%,统计显著性水平高达0.01。毋庸置疑,统计效果检验方法在一定前提条件下可以说明其效果,但存在两点不足:要求资料年代较长;只考

收稿日期:2018-11-30

基金项目:新疆人工影响天气科学技术研究开放基金资助项目(RYJ201708)

考虑最后结果,不管冰雹云的变化过程,未能深入认识冰雹云的变化规律。为了提高对冰雹云的认识,采用能反映雹云特征的某些物理量进行对比分析的物理参数统计检验法,利用作业前后雷达回波参数,结合地面作业量以及单位时间内地面作业效率,建立雷达回波参数与作业量、作业速率特征变化之间的数模关系。选取 2011 年 5 月 24 日新疆阿克苏地区一次冰雹天气过程,利用新一代天气雷达(CINRAD/CC)基数据,分析作业前后冰雹云“体积”“形态”变化,拟合冰雹云生长、衰减、作业增量的数学拟合多项式,定量分析地面人工防雹作业效果,进而为人工防雹物理检验方法提供重要参考依据。

# 1 冰雹天气概况

2011 年 5 月 24 日,受中纬度弱波动影响,阿克苏地区共 4 站产生降雨(图 1),24 日 00 时至次日 00 时,新和累积降水量 5.7 mm、阿克苏 1.2 mm、温宿 0.5 mm、库车 0.4 mm。14 时前后,阿克苏地区多站出现强对流天气,拜城、库车、新和、沙雅出现雷暴。19:10~20:15,在温宿县恰格拉克乡三大队出现强对流天气,伴有雷暴和软冰雹,19:24 左右开始降雹,冰雹持续时间约 5 min,最大直径约 2 mm,造成 110 亩棉花受灾,经济损失 0.5 万元;19:30 左右,阿克苏市拜什吐格曼乡出现冰雹,24 大队 1 小队 1000 亩棉花受灾,20% 棉花叶子被打掉,直接经济损失 20 万元。

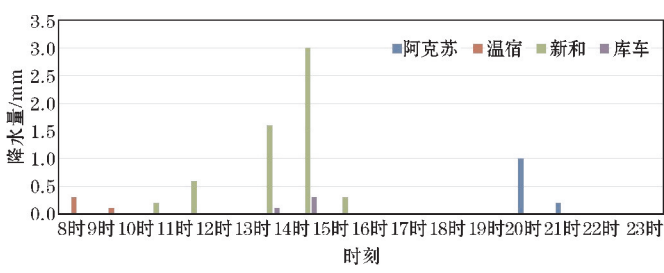
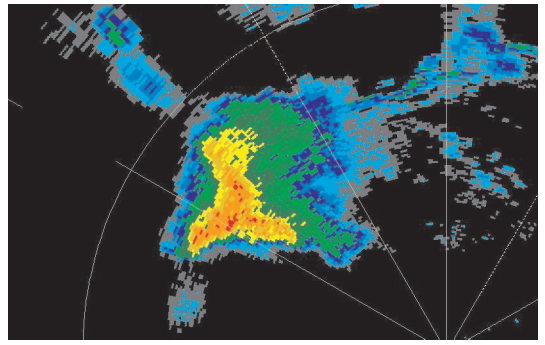


图 1 2011 年 5 月 24 日阿克苏地区降水实况

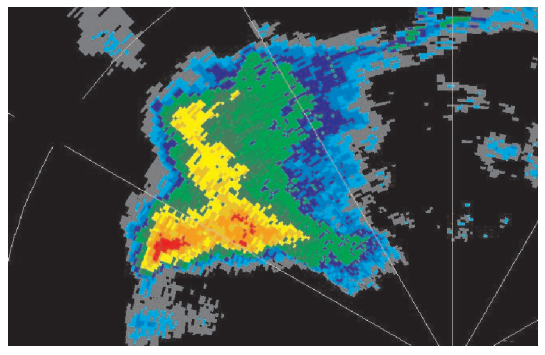
回顾当日阿克苏地区雷达回波,19:10 起,雷达回波逐渐形成“V”形,至 20:15,温宿县位于“V”形回波顶端(图 2),而正是在这个时段,温宿县恰格拉克乡三大队出现强对流天气,且伴有大雨和软冰雹。这与冰雹云雷达回波形态识别已有认知(冰雹云回波类似“人”字形排列、“V”形缺口顶端常会出现降雹)相符<sup>[23]</sup>。

早期研究认为<sup>[24]</sup>,阿克苏地区冰雹云组合反射率因子达 50 dBZ 以上,45 dBZ 强回波核高度  $\geq 9$  km 可作为冰雹云识别指标,也有研究指出<sup>[4-5]</sup>冰雹云初期,回波和强回波都会出现在 0℃~-5℃,在云体的中上部,强冰雹云 45 dBZ 回波顶高 > 8 km,弱冰雹云 45 dBZ

回波顶高为 7~8 km。按此标准来看,此次雹云开始发展时 47.3 dBZ 强回波顶高已经超过 8 km(18:09),51.6 dBZ 强回波核高度达 8.8 km(18:20),前期雷达回波已有所反映,有较大降雹概率。



(a) 19:09



(b) 19:15

图 2 2011 年 5 月 24 日 19:09 及 19:15 新疆阿克苏雷达组合反射率

5 月 24 日 20 时 500 hPa 高空天气图,如图 3 所示。欧亚范围为纬向环流,西西伯利亚为一稳定的低值区,阿克苏地区处于低压底部的锋区上,低压外围不断分裂短波东移南下。同时在 40°N~45°N 有较弱的南支锋区,锋区东移过程中与西伯利亚低槽底部分裂波动相结合,造成此次阿克苏地区的降水及局地冰雹天气。分析低层热力条件也能看到明显的冷暖气流交汇:23 日 20 时,低层 850 hPa 阿克苏受弱温度脊控制,24 日 08-09 时,北支冷空气南下,温宿县产生降水,24 日白天,天空晴好,受太阳辐射作用,温宿县气温逐步回升,最高温达 26℃,底层有较好的热力条件。24 日 20 时,850 hPa 温度槽南压,温宿处于低槽底部,冷空气入侵,地面气温高,低层气温低,形成不稳定层结。从 850 hPa 风场上看,阿克苏有 14 m/s 的偏东风,加之其西部山脉地形阻挡作用,利于上升运动的产生,为强对流天气提供了良好的动力条件和触发机制。当日 08 时的探空 K 指数为 27,沙氏指数为 1.11,零度层高度为 3767 m,不稳定指数都是利于对流发生的,0~6 km 垂直风切变约 24 m/s,大气层结不稳定,具有一定强对流潜势。



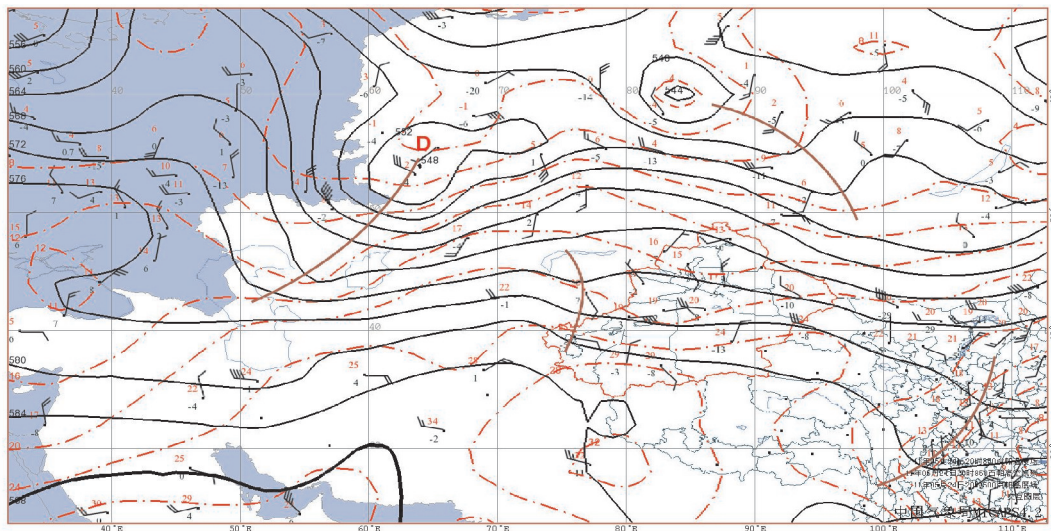


图3 2011年5月24日20时天气实况(实线为500 hPa位势高度,虚线为850 hPa温度,矢量风为850 hPa风)

2 防雷作业效果分析

2.1 防雷作业效果检验方法

科学的检验防雷效果对提高作业效率、改进防雷技术至关重要。效果分析的方法众多,统计检验法与物理参数检验法较为常用<sup>[25]</sup>,后者可选择两种方式进行作业前后对比检验:对比同一块雹云作业前、后某些物理参数的变化;选择大致相同的两块雹云,一块作业,另一块不作业,对这两次过程进行相关比较。但由于降雹是小概率事件,且降雹时空变速很大,受不同地域不同时间影响,选择两块大致相同的雹云并不是一件易事。此次人工防雷效果检验采用对比同一块雹云物理参数检验方法,运用基于雷达基数据的数理模型对同一块雹云进行定量分析,暂且认为雹云的自然生长速率等于自然衰减速率(无人工防雷作业情况)。

2.2 核心算法的设计

新一代天气雷达(CINRAD/CC)原始数据由文件头和基于极坐标系的原始数据(512个径向)组成。经解析得到文件头中雷达基数据基本信息,如国家、省份、站点名、雷达型号、经度和纬度等。在细化每层数据结构时,挑选出45~48 dBZ的雷达回波强度,并找到其对应的极坐标,在程序代码中通过输入角度区间坐标范围来遴选对应冰雹云(例如同一张雷达图中有2~3块不同雹云区域)以确保对同一块雹云实施作业与分析,由此统计出满足条件的点数,并挑选出此层中回波强度最大的值,利用数学公式计算出这一层中最强回波对应的高度。至此,可以根据每层满足条件值的点数量近似模拟出这块冰雹云的“体积”发展过程(图4)。在体积点数

最大时(19:21)根据不同仰角层点数可以近似地描绘这块冰雹云垂直高度上的形态分布(图5),19:21(上宽下窄)自第8层(仰角:7.5°)到第12层(仰角:14.0°)有比较明显点数聚合,且高度均在7 km以上,再次说明有降雹趋势<sup>[4-5]</sup>,10 min后,19:31(上窄下宽)在8~12层聚合点数急剧下降,几乎消失。

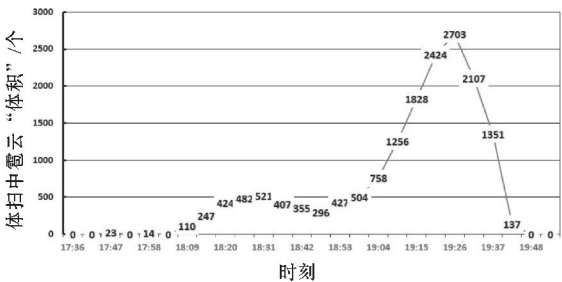


图4 雹云生成、衰减过程中满足算法的点数随着时间的变化

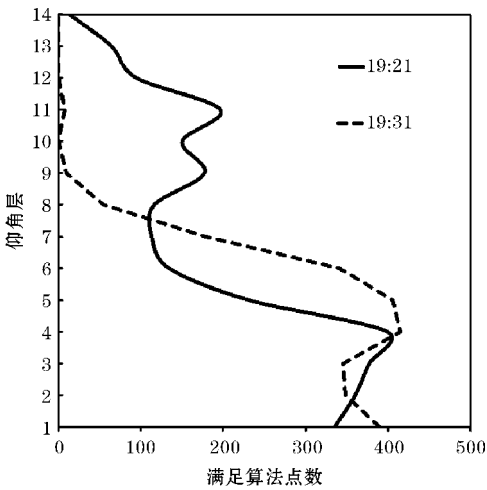


图5 19:21与19:31冰雹云“体积”每层点数的分布

2.3 数学关系的推算

在得到冰雹云“体积”随时间变化特征后,根据冰

雹云生长和衰减的特征,可以把整个冰雹过程划分为 2 个阶段,即 18:09–19:26 的生长过程(图 6a)和 19:26–19:48 衰减过程(图 6b),将生长过程与衰减过程曲线进行多项式拟合,(对于非线性模型,其多项式方幂值越大,误差越小),文中使用三次拟合多项式,利用三次多项式的二阶求导可作为曲线的拐点,用拐点区分冰雹云的增长过程或衰减过程。

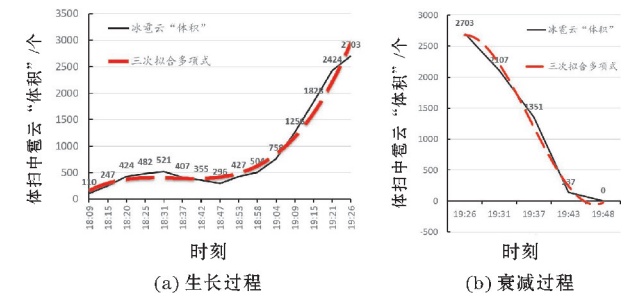


图 6 冰雹云生长过程、衰减过程“体积”的三次拟合多项式

推导出生长与衰减过程的拟合多项式为

$$y_1 = 3.123x^3 - 51.635x^2 + 273.34x - 66.775$$

$$y_2 = 103.08x^3 - 894.89x^2 + 1498x + 1970.6$$

$y_1$  函数中拐点值在  $x$  为 18:42 时,  $y_2$  函数中拐点值在  $x=19:31$  时,以此两点为临界点在多项式中计算出近似斜率来表征增长或衰减速率,得到增长和衰减过程的一次方程表达式。冰雹云生长过程  $y_1 = 372.67x - 402.5$ ,生长过程的斜率为 372.67。冰雹云衰减过程  $y_2 = -601.43x + 3154.7$ ,衰减过程的斜率为 601.43。

斜率比约为  $(601.43)/(372.67) = 1.6138$ ,即作业中衰减的速度与生长速度之比为 1.6138。

为探究防雹作业量的变化,用上述方法计算碘化银累积量随时间的变化。这次冰雹天气过程中防雹作业点共 27 个,均使用 37 mm 高炮或火箭弹,集中作业时间自 18:41–20:00,累计发射炮弹 650 发,火箭弹 112 枚。图 7 为将炮弹和火箭弹的碘化银含量均匀插值到时间后得到已作业碘化银累积量随时间的变化图。

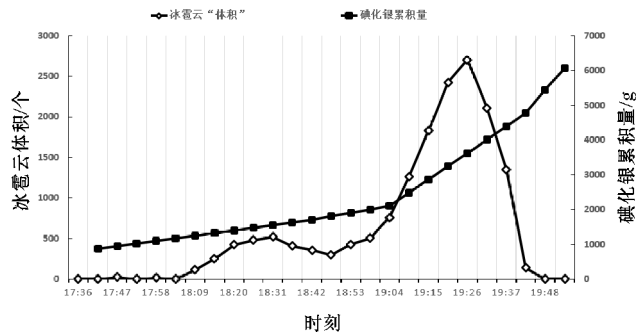


图 7 冰雹云“体积”与碘化银累积量的变化

计算开始作业后碘化银累积量的数学方程拟合及斜率,得到一次方程  $y = 358.13x + 932.41$ ,斜率为 358.13,反映了单位时间内作业增量的速率。由此得到冰雹云生长、衰减、碘化银增量三者之间的比例为 372.67 : 601.43 : 358.13,即 1.04 : 1.68 : 1。衰减速率大于碘化银增量,可推断出人工防雹作业对冰雹衰减有一定积极作用。

在这次防雹整个过程中,根据核心算法中每一层最强回波对应的高度选取了 4 层(L6、L7、L10、L11)作为计算对象,得到 4 层方程分别为

$$L6: y = -0.3135x + 9.5864;$$

$$L7: y = -0.3883x + 11542;$$

$$L10: y = -0.6642x + 17.897;$$

$$L11: y = -0.7069x + 19.349;$$

4 个不同仰角(5.3°,6.7°,10°,11°)(图 8)强中心高度的变化可以拟合上述方程,得到了 4 个不同斜率值 0.3135、0.3883、0.6642、0.7069。从这 4 个斜率值可以看出仰角越大其方程斜率值越大,即随着碘化银增量的不断增加,冰雹云最先从顶部塌陷,且塌陷的速率最快。从另一方面也可以看出,持续对冰雹云的作业即随着碘化银含量的持续增加可以较为明显地降低冰雹云(顶部)强中心高度。

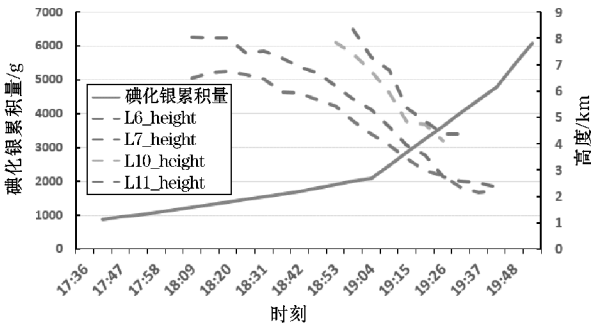


图 8 L6、L7、L10、L11 层强中心高度随着碘化银累积量之间关系图

3 结论

通过分析 2011 年 5 月 24 日新疆阿克苏地区一次冰雹过程的演变,得出以下结论:

- (1) 雷达回波图与炮点实时指挥作业为这次防雹作业提供了有力技术保障;实况作业信息与灾情快报信息为作业后效果评估提供了有效的参考分析依据。
- (2) 通过解析新一代天气雷达基数据,运用数理模型对冰雹云的整个发展过程进行了定量分析,推算出冰雹云“体积”、计算出不同仰角强中心回波顶高等参数和冰雹云生成、衰减、作业增量三者之间的斜率比,衰减与生长速率、衰减与作业速率比值越大,防雹

作业效果越显著。但文中只有一个个例,用斜率比来反映防雷效果的指标还有待更多的个例来量化。在冰雹云“体积”与碘化银累积量的变化中可以看出冰雹云在19:15后体积有较为突显的下坠,设想如果将作业时间提前6 min(一个雷达体扫时间),是否会对冰雹云的快速生长起到更为有效抑制作用还有待进一步论证。在对雷达基数据不同仰角数据进行分析时,发现在碘化银含量持续增加的情况下,仰角 L11 回波层强中心高度从19:04急剧衰减,衰减斜率为所选4层中之最,即从雹云顶部开始迅速塌陷,达到防雷作业效果。

(3)从雷达基数据进行分析的物理参数检验方法不仅可以定量分析冰雹云生成、衰减、作业增量三者之间的斜率比,还可以作为防雷作业的有效阈值,如雹云“体积”阈值、不同仰角层中强中心顶高阈值等。受不同地区、地形影响,基于雷达基数据的物理参数检验方法受限于很难找到完全相似的两块冰雹云进行数据分析,相关参数检验等,但可以通过较早的历史数据找寻完全没有进行防雷作业的雹云进行物理参数检验方法验证,这也是今后需努力的方向。

## 参考文献:

[1] 刘德祥,白虎志,董安祥. 中国西北地区冰雹的气候特征及异常研究[J]. 高原气象,2004,23(6):795-803

[2] 热苏力·阿不拉,牛生杰,王红岩. 新疆冰雹时空分布特征分析[J]. 自然灾害学报,2013,22(2):158-163.

[3] 张俊兰,张莉. 新疆阿克苏地区50 a 来强冰雹天气的气候特征[J]. 中国沙漠,2011,31(1):236-241.

[4] 肖辉,吴玉霞,胡朝霞,等. 旬邑地区冰雹云的早期识别及数值模拟[J]. 高原气象,2002,21(2):159-166.

[5] 樊鹏,肖辉. 雷达识别渭北地区冰雹云技术研究[J]. 气象,2005,31(7):16-19.

[6] 崔雅琴,肖辉,王振会,等. 三维对流云催化数值模式人工冰晶参数化方案的改进与个例模拟试验[J]. 高原气象,2007,26(4):798-810.

[7] 郭学良. 三维强对流云的冰雹形成机制及降雹过程的冰雹分档数值模拟研究[D]. 北京:中国科学院大气物理研究所,1997:44-49.

[8] 周非非,肖辉,黄美元,等. 人工抑制上升气流对冰雹云降水影响的数值试验研究[J]. 南京气象

学院学报,2005,28(2):10-19.

- [9] 刘治国,陶健红,王学良,等. 一次高炮防雷效果的 CINRAD/CC 产品分析[J]. 干旱气象,2006,24(3):23-30.
- [10] 王雨曾,刘新元,赵宗然,等. 人工防雷效果差异分析[J]. 气象,1996,22(12):31-34.
- [11] 王婉,姚展予. 2006 年北京市人工增雨作业效果统计分析[J]. 高原气象,2009,28(1):195-202.
- [12] 王雨曾,郁青. 多物理参量检验防雷效果的研究[J]. 气象,1995,21(10):3-9.
- [13] 高子毅,张建新,廖飞佳,等. 新疆天山山区人工增雨试验效果评价[J]. 高原气象,2005,24(5):734-740.
- [14] 李桂华,金少华. 雹云识别的物元可拓模型在低纬高原的构造及其效果检验[J]. 高原气象,2005,24(2):280-284.
- [15] 李祚泳,邓新民,张辉军. 基于神经网络 B-P 算法的雹云识别模型及其效果检验[J]. 高原气象,1994,13(1):44-49.
- [16] 陈洪武,马禹,王旭,等. 新疆冰雹天气的气候特征分析[J]. 气象,2002,29(11):25-28.
- [17] 王旭,马禹. 新疆冰雹天气过程的基本特征[J]. 气象,2002,25(1):10-14.
- [18] 马禹,王旭,赵兵科,等. 新疆冰雹的时空统计特征[J]. 新疆气象,2002,25(1):4-5.
- [19] 王秋香,任宜勇. 51a 新疆雹灾损失的时空分布特征[J]. 干旱区地理,2006,29(1):65-69.
- [20] 李丽华,陈洪武,毛炜峰,等. 基于 GIS 的阿克苏地区冰雹灾害风险区划及评价[J]. 干旱区研究,2010,27(2):221-229.
- [21] 李斌,郑博华,史莲梅,等. 新疆阿克苏地区人工防雷作业效率研究[J]. 新疆农业科学,2016,53(5):942-948.
- [22] 李斌,郑博华,史莲梅,等. 利用区域回归分析法对阿克苏地区人工防雷作业效果再分析[J]. 新疆农业科学,2017,54(9):1756-1764.
- [23] 郭恩铭,宋达人,刘万军,等. 冰雹云图集[M]. 北京:气象出版社,1996:134-136.
- [24] 张磊,张继东,热苏力·阿不拉. 南疆阿克苏冰雹天气的判别指标研究[J]. 干旱气象,2014,32(4):629-635.
- [25] 徐秀玲. 通过多种途径探讨西藏人工防雷效果检验方法[J]. 西藏科技,2007(1):54-57.



## A Study on the Method of Artificial Anti-hail Physical Testing Related to Operating Efficiency

ZHENG Bohua, LI Bin

(Weather Modification Office of Xinjiang Uygur Autonomous Region, Urumqi 830002, China)

**Abstract:** According to a new generation of weather radar data and NECP-by-six hour reanalysis data, the dynamic analysis of the physical parameters of an anti-hail operation process in Akesu area of Xinjiang on May 24, 2011 was analyzed based on the mathematical algorithm. We use the programming software to analyze the new generation of weather radar data, and use the recursive, sorting, depth-first search algorithm to calculate the "volume" of hail cloud, to simulate the "shape" of hail cloud. We found that when the volume was at its maximum, the hail cloud was on wide below narrow type. Establishing mathematical equations and mathematical fitting polynomial, the slope of the primary equation can approximately reflect the hail cloud growth rate, the attenuation rate and the ground operating rate per unit time, inflection points can be used as the critical point to distinguish the hail cloud growth process and the attenuation process. The results show that the greater the ratio of attenuation and growth rate, the greater the ratio of attenuation and operating rate, the more obvious the effect of hail suppression is. According to the slope value of different height, it can be inferred that the larger the elevation angle, the greater the slope value, that is, with the increasing number of silver iodide increment, the hail cloud first collapse from the top, with the fastest collapse rate. The above mathematical model provides an important reference for identifying early hail clouds, when to carry out weather modification operation, selecting the azimuth angle of the operation and using the operation dose reasonably.

**Keywords:** hail cloud; artificial hail; effect test; physical parameter test method