



中华人民共和国气象行业标准

QX/T 661—2023

对流云火箭增雨效果 天气雷达物理检 验方法

Convective cloud seeding effect for precipitation enhancement with
rockets—Physical evaluation method based on weather radar

2023-04-23 发布

2023-07-01 实施

中 国 气 象 局 发 布

目 次

前言	II
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 技术方法	2
5 操作步骤	3
附录 A(规范性) 雷达探测物理量的计算方法	6
附录 B(资料性) 对流云火箭增雨效果 天气雷达物理检验方法应用示例	8
参考文献	11

前 言

本文件按照 GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由全国人工影响天气标准化技术委员会(SAC/TC 538)提出并归口。

本文件起草单位：中国气象科学研究院、南京云卫通软件技术有限公司、安徽省人工影响天气办公室、宁夏回族自治区人工影响天气中心。

本文件主要起草人：姚展予、贾烁、谭超、王铁、朱明佳、桑建人、常倬林、田磊、穆建华、孙艳桥。

对流云火箭增雨效果 天气雷达物理检验方法

1 范围

本文件描述了对流云火箭增雨作业效果天气雷达物理检验的技术方法及操作步骤。
本文件适用于对流云冷云催化的地面火箭增雨作业效果物理检验。

2 规范性引用文件

本文件没有规范性引用文件。

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

对流云 convective cloud

由于热力原因或动力原因在不稳定的大气层内产生对流所形成的积状云。

3.2

静力催化 static seeding

对因冰晶浓度不足、降水效率较低的自然云,在其过冷却部位播撒适当数量的成冰催化剂,改变云中的微物理过程,实现增加冰晶浓度,促进冰水转化,提高降水效率,促进和增加降水目的。

3.3

动力催化 dynamic seeding

在云的过冷却部位播撒大量人工冰核,使云中过冷水迅速冻结、水汽凝华释放大量潜热,云内温度升高,形成或增大上升气流,促使云体在水平和垂直方向迅速发展,相应延长云的生命期,从而增加降水量。

3.4

回波单元 identified reflectivity unit

雷达探测范围内大于给定反射率阈值和体积阈值的三维连续雷达回波区域。

3.5

回波单元顶高 top height of identified reflectivity unit

选定的雷达回波单元的最大高度。

3.6

回波单元体积 volume of identified reflectivity unit

选定的雷达回波单元的三维空间大小。

3.7

回波单元最大反射率 maximum reflectivity of identified reflectivity unit

选定的雷达回波单元中反射率的最大值。

3.8

回波单元垂直累积液态水含量 **vertically integrated liquid water content of identified reflectivity unit**
垂直方向上,从单元体底层到单元体顶层由每层最大反射率因子计算的液态水含量的累加值。

3.9

回波单元降水通量 **precipitation flux of identified reflectivity unit**
单位时间内,通过雷达回波单元水平投影面的每个格点垂直分层的最大降水量总和。

4 技术方法

4.1 概述

4.1.1 不同回波单元对比

选择合适的识别阈值,利用天气雷达探测数据对作业回波单元和非作业回波单元进行识别追踪,计算回波单元的各雷达探测物理量,选择符合 5.2.5 条件的对比回波单元,对比分析作业前、后作业回波单元和对比回波单元雷达探测物理量的变化,从而判断作业效果。

4.1.2 作业回波单元自比

首先考虑按 4.1.1 的方法进行作业效果的物理检验,若作业前、后雷达探测范围内未能找到符合 5.2.5 条件的非作业回波单元作为对比回波单元,可采用作业回波单元自比方法对比作业前、后雷达探测物理量的变化,判断作业效果。

4.2 数据要求

4.2.1 火箭作业信息

应包括作业点经纬度和海拔高度,作业方位角和仰角,作业起止时间,火箭弹型号和用弹量。

4.2.2 天气雷达探测数据

选择距离作业点 100 km 范围内的雷达站点,应包括雷达站点信息(包括经度、纬度、海拔高度,雷达型号)、雷达体扫基数据,其中数据时间范围应覆盖作业回波单元和对比回波单元完整生命史。

4.3 物理量的计算方法

由雷达体扫基数据按照下列方法计算各物理量:

- a) 回波单元顶高,按照常规业务雷达产品“回波顶”的计算方法,得出回波单元的最大高度;
- b) 回波单元体积,将回波单元各层满足给定阈值条件的格点累加,乘以单个格点对应的体积求得总体积;
- c) 回波单元最大反射率,按照常规业务雷达产品“组合反射率”的计算方法,得出回波单元中反射率的最大值;
- d) 回波单元垂直累积液态水含量,从单元体底层到单元体顶层由每层最大反射率因子计算液态水含量,并在垂直方向上进行积分得出(应符合附录 A 的 A.1 的规定);
- e) 回波单元降水通量,求取回波单元水平投影面格点的各层反射率最大值,利用经验关系式计算各格点降水率,并进行时间、面积积分,求得单位时间回波单元的总降水量(应符合 A.2 的规定)。

5 操作步骤

5.1 数据预处理

进行作业效果物理检验前,应根据作业信息和各类观测资料进行作业合理性初步分析,对作业合理的作业样本进行效果检验;用于作业效果物理检验的天气雷达探测数据应进行杂波去除和衰减订正;将作业信息数据和对应时间段的雷达回波反射率进行叠加显示。

5.2 确定回波单元

5.2.1 确定回波单元阈值

根据作业时段和区域,分析作业前 0.5 h 至作业后 1 h 作业区域雷达回波的发展演变,确定反射率阈值和体积阈值,宜选择回波反射率不小于 30 dBZ 且回波体积不小于 30 km³ 作为阈值,可根据不同地区不同季节的实际情况进行调整。

5.2.2 回波单元识别

基于给定的反射率阈值和体积阈值识别回波单元,主要步骤如下:

- a) 根据给定的反射率阈值进行水平识别,形成二维闭合单元;
- b) 沿垂直方向上进行识别,形成三维单元体;
- c) 根据给定的体积阈值,确定符合条件的连续三维回波单元,并进行标识。

5.2.3 回波单元追踪

计算回波单元每一体扫时刻的中心位置,根据下列原则和方法追踪回波单元(示例见附录 B 的 B.2 和 B.3):

- a) 特征相似,同一回波单元相邻时刻应具有相似形状、体积和强度;
- b) 距离优先,前后体扫时间内质心移动距离最近的回波单元优先配对;
- c) 用作业前 0.5 h 的回波单元移动信息确定其最大移动速度;
- d) 在此基础上估算每一体扫时段的移动方向和距离;
- e) 追踪时段应覆盖回波单元完整生命史;
- f) 追踪回波单元的同时计算其雷达探测物理量应符合 4.3 的规定。

5.2.4 确定作业回波单元

确定作业回波单元时应满足下列条件(示例见 B.1):

- a) 位于作业范围内;
- b) 符合反射率阈值和体积阈值;
- c) 雷达探测基数据完整覆盖作业区域及作业下游区域。

5.2.5 确定对比回波单元

确定对比回波单元时应满足下列条件(示例见 B.4):

- a) 与作业回波单元来自同一源地,或源地地形特点相同,受相同的大尺度天气系统影响;
- b) 不受任何催化作业影响,与作业回波单元边缘有明显距离;
- c) 作业前时段已存在且 5 个雷达探测物理量的变化特征与作业回波单元一致或呈相似的趋势。

5.3 对比分析

5.3.1 两个不同回波单元的对比

当作业前可找到合适的对比回波单元,作图对比作业回波单元和对比回波单元,并按下列要求进行:

- a) 绘制作业回波单元和对比回波单元 5 个雷达探测物理量随时间的变化曲线;
- b) 标识出作业信息;
- c) 对比作业前(宜取 0.5 h)、后(截至作业回波单元或对比回波单元消亡时间)两个回波单元各物理量的变化。

5.3.2 作业回波单元自比

当作业前、后均无法找到合适的对比回波单元时,作图对比作业前、后的作业回波单元,并按下列要求进行(示例见 B.5):

- a) 绘制作业回波单元 5 个雷达探测物理量随时间的变化曲线;
- b) 标识出作业信息;
- c) 对比作业前(宜取 0.5 h)、后(截至作业回波单元消亡时间)回波单元各物理量的变化。

5.4 结果判定

5.4.1 两个不同回波单元的对比

对比分析作业前、后两个回波单元的回波单元降水通量以及回波单元顶高、回波单元体积、回波单元最大反射率、回波单元垂直累积液态水含量 5 个物理量随时间的变化(示例见 B.6),并按下列要求进行:

- a) 根据回波单元降水通量可能出现的几种情况得出效果检验结果(应符合表 1 的规定);
- b) 增雨作业基于动力催化原理时,对比分析回波单元降水通量的变化得出作业有效,其余 4 个物理量应与回波单元降水通量呈现一致的变化趋势;
- c) 增雨作业基于静力催化原理时,以回波单元降水通量的变化对比作为判断作业是否有效的依据,其余 4 个物理量可能出现同回波单元降水通量不一致的变化趋势。

表 1 作业前、后两个回波单元降水通量变化对比判断效果检验结果

序号	作业前物理量值		作业后物理量值		效果检验结果
	作业回波单元	对比回波单元	作业回波单元	对比回波单元	
1	增大阶段	增大阶段	增幅与对比回波单元近似	以一定的增长速率继续增大	无效果
2	增大阶段	增大阶段	增幅小于对比回波单元	以一定的增长速率继续增大	无效果
3	增大阶段	增大阶段	增幅大于对比回波单元	以一定的增长速率继续增大	正效果
4	增大阶段	增大阶段	仍继续增大	变为逐渐减小	正效果
5	增大阶段	增大阶段	变为逐渐减小,减小幅度与对比回波单元近似	变为以一定速率逐渐减小	无效果
6	增大阶段	增大阶段	变为逐渐减小,减小幅度大于对比回波单元	变为以一定速率逐渐减小	无效果

表 1 作业前、后两个回波单元降水通量变化对比判断效果检验结果(续)

序号	作业前物理量值		作业后物理量值		效果检验结果
	作业回波单元	对比回波单元	作业回波单元	对比回波单元	
7	增大阶段	增大阶段	变为逐渐减小,减小幅度小于对比回波单元	变为以一定速率逐渐减小	正效果
8	减小阶段	减小阶段	减小幅度与对比回波单元近似	以一定速率继续减小	无效果
9	减小阶段	减小阶段	减小幅度大于对比回波单元	以一定速率继续减小	无效果
10	减小阶段	减小阶段	减小幅度小于对比回波单元	以一定速率继续减小	正效果
11	减小阶段	减小阶段	变为逐渐增大	以一定速率继续减小	正效果

5.4.2 作业回波单元自比

当无法找到合适的对比回波单元时,可分析作业回波单元作业前、后降水通量以及回波单元顶高、回波单元体积、回波单元最大反射率、回波单元垂直累积液态水含量 5 个物理量随时间的变化,并按下列要求进行:

- 根据回波单元降水通量可能出现的几种情况得出效果检验结果(应符合表 2 的规定);
- 增雨作业基于动力催化原理时,分析回波单元降水通量的变化得出作业有效,其余 4 个物理量应与回波单元降水通量呈现一致的变化趋势;
- 增雨作业基于静力催化原理时,以回波单元降水通量的变化对比作为判断作业是否有效的依据,其余 4 个物理量可能出现同回波单元降水通量不一致的变化趋势。

表 2 作业前、后作业回波单元降水通量变化对比判断效果检验结果

序号	作业回波单元		效果检验结果
	作业前物理量值	作业后物理量值	
1	增大阶段	变为逐渐减小	无效果
2	增大阶段	继续增大但增长速率较作业前变小	无效果
3	增大阶段	以作业前速率继续增大	无效果
4	增大阶段	继续增大且较作业前增长速率更大	正效果
5	减小阶段	以作业前速率继续减小	无效果
6	减小阶段	继续减小且减小速率较作业前变大	无效果
7	减小阶段	继续减小但减小速率较作业前变小	正效果
8	减小阶段	变为逐渐增大	正效果

附录 A

(规范性)

雷达探测物理量的计算方法

A.1 回波单元垂直累积液态水含量

A.1.1 找出回波单元中从单元体底到单元体顶每一层反射率最大值的格点。

A.1.2 将该反射率最大值转换成反射率因子,按照公式(A.1)进行计算:

$$Z = Z_0 \times 10^{\frac{Z_e}{10}} \dots\dots\dots(A.1)$$

式中:

Z ——反射率因子,单位为 mm⁶/m³, Z₀ = 1 mm⁶/m³;

Z_e ——反射率,单位为 dBZ。

A.1.3 根据反射率因子与水物质密度的经验关系式(A.2)计算水物质密度:

$$M = 3.44 \times 10^{-6} Z^{\frac{4}{7}} \dots\dots\dots(A.2)$$

式中:

M ——水物质密度,即单位格点的液态水含量,单位为千克/米³(kg/m³)。

A.1.4 按照式(A.3)对垂直方向上每一层的水物质密度进行积分:

$$L_{v1} = \int_{h_0}^{h_1} M dz \dots\dots\dots(A.3)$$

式中:

L_{v1} ——回波单元垂直累积液态水含量,单位为千克/米²(kg/m²);

h₁ ——回波单元体顶层所在高度,单位为米(m);

h₀ ——回波单元体底层所在高度,单位为米(m)。

注:由于厘米波雷达对大粒子敏感,对云滴反应很弱,所以 L_{v1}看作是降水物的累积。另一方面,冰雹的存在会产生强回波,导致水物质密度出现不可靠的高值,因此实际应用时将所有大于 55 dBZ 的反射率取为 55 dBZ。

A.2 回波单元降水通量

A.2.1 对回波单元进行水平投影,筛选出单个格点垂直方向各层反射率的最大值。

A.2.2 将该反射率最大值转换成反射率因子,应符合公式(A.1)的计算方法。

A.2.3 根据反射率因子与降水率的经验关系式(A.4)计算降水率:

$$R = \left(\frac{Z}{a}\right)^{b-1} \dots\dots\dots(A.4)$$

式中:

R ——降水率,单位为米/秒(m/s);

a, b ——分别为反射率因子与降水率的经验关系 Z = a × R^b 中的系数,取决于不同降水类型不同雨滴谱分布等因素。

A.2.4 水平投影单个格点的降水通量按照式(A.5)计算:

$$\Delta P_{flux} = \Delta A \times R \dots\dots\dots(A.5)$$

式中:

Δ P_{flux} ——单个格点的降水通量,单位为米³/秒(m³/s);

Δ A ——单个格点面积,单位为米²(m²)。

A.2.5 回波单元的降水通量按照式(A.6)对回波单元水平投影面所有格点的降水通量求和得到。

$$P_{\text{flux}} = \sum \Delta P_{\text{flux}} \dots\dots\dots (\text{A. 6})$$

式中：

P_{flux} ——回波单元降水通量，单位为米³/秒(m³/s)。

附录 B

(资料性)

对流云火箭增雨效果 天气雷达物理检验方法应用示例

B.1 确定作业回波单元

根据地面火箭增雨作业信息(见表 B.1),利用作业点经纬度在雷达回波组合反射率图上准确定位作业点位置(见图 B.1),结合作业方位角和仰角分析作业前 0.5 h 至作业后 1 h 作业区域雷达回波的发展演变,在此基础上选择 30 dBZ 和 30 km³ 作为阈值,根据 5.2.4 的条件确定作业回波单元(图 B.2 中的编号 3)。

表 B.1 地面火箭增雨作业信息

作业点	经度	纬度	作业日期	作业开始时间	作业结束时间	作业工具	方位角 / 仰角	用弹量
亳州市-涡阳县-城关镇	116.2192	33.5367	2013/7/19	19:30:00	19:35:00	WR-98/1D 型火箭	200°/60°	2

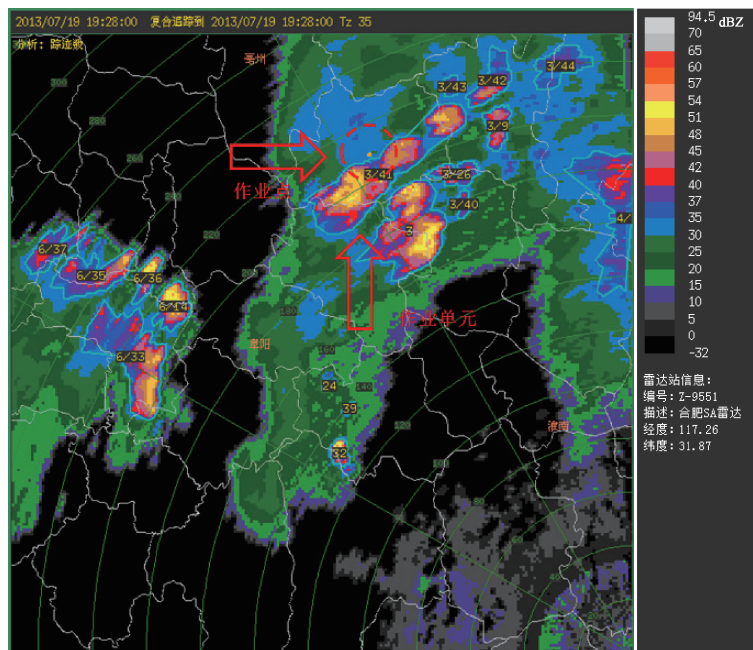


图 B.1 作业时雷达回波组合反射率叠加作业点、作业回波单元

B.2 追踪作业回波单元

按照 5.2.3 的原则和方法,在雷达探测范围内对作业回波单元的完整生命史进行识别追踪,同时计算作业回波单元各时次 5 个雷达探测物理量的值。

B.3 追踪非作业回波单元

按照 5.2.3 的原则和方法,在雷达探测范围内识别追踪非作业回波单元作为备选对比回波单元,对

其进行编号和覆盖完整生命史的识别追踪,同时计算非作业回波单元各时次 5 个雷达探测物理量的值。

B.4 确定对比回波单元

分析所有非作业回波单元,根据 5.2.5 的条件从中选出符合要求的作为对比回波单元(图 B.2 中的编号 6)。

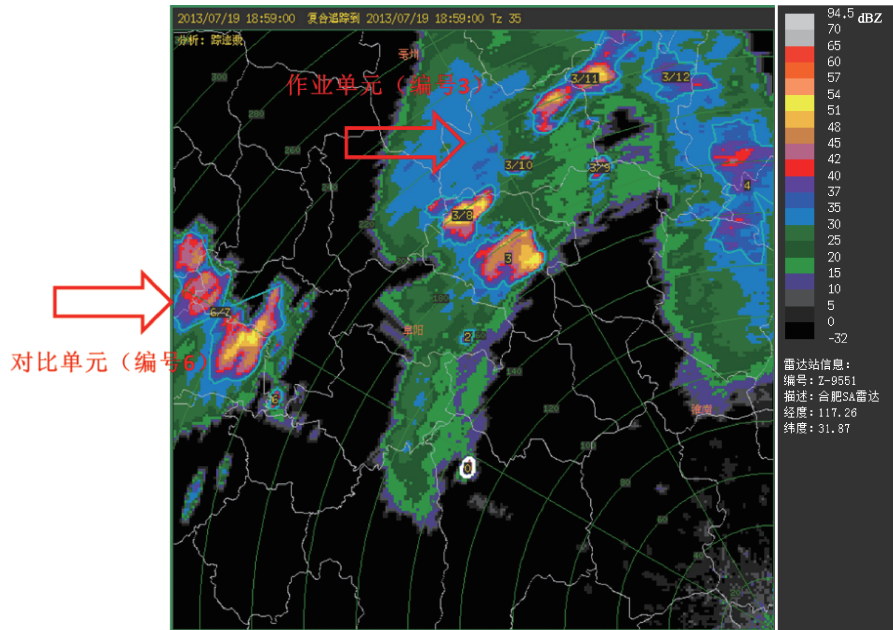


图 B.2 作业前雷达回波组合反射率叠加作业回波单元、对比回波单元

B.5 对比分析

绘制作业回波单元和对比回波单元 5 个雷达探测物理量(回波单元顶高、回波单元体积、回波单元最大反射率、回波单元垂直累积液态水含量、回波单元降水通量)随时间的变化曲线(见图 B.3 至图 B.5),对比分析作业前、后两个回波单元各物理量的变化。

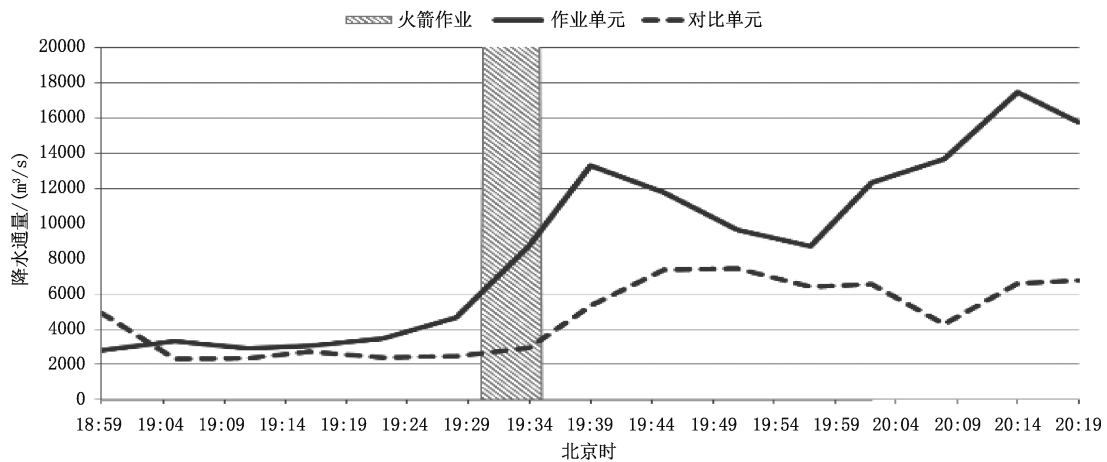


图 B.3 作业前、后两个回波单元降水通量随时间的变化对比

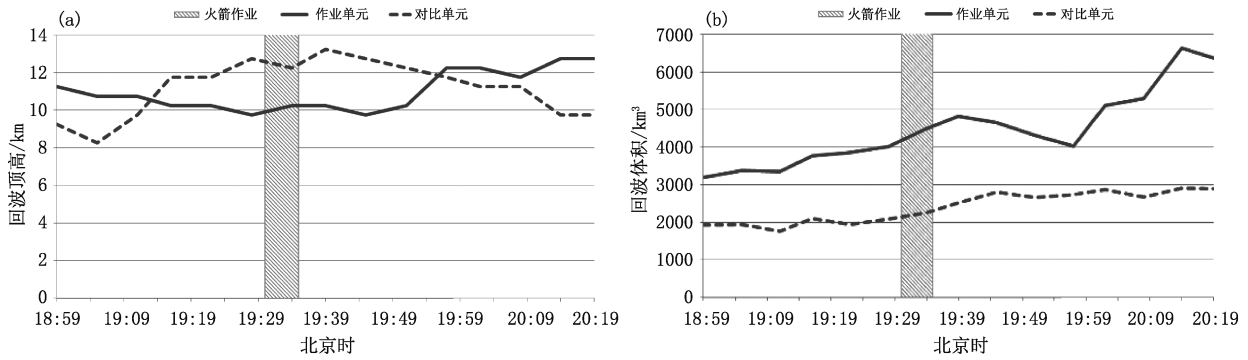


图 B.4 作业前、后两个回波单元回波顶高(a)、回波体积(b)随时间的变化对比

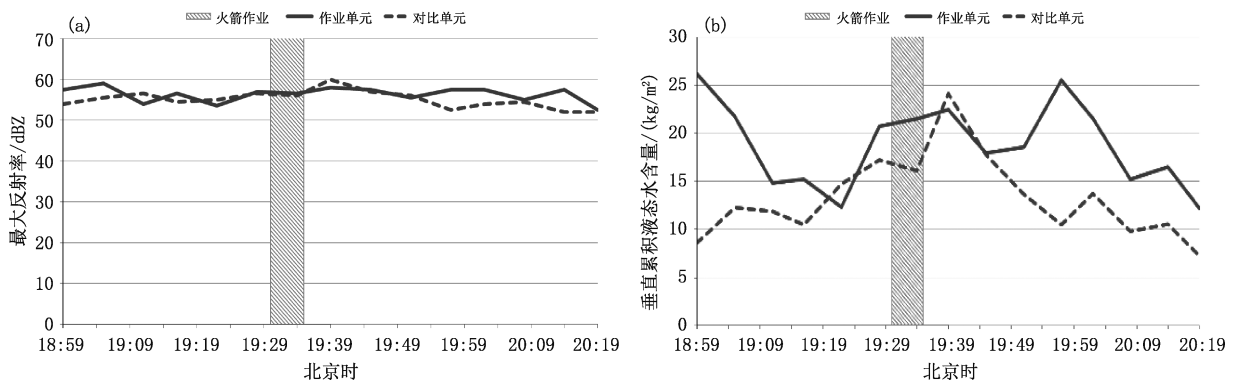


图 B.5 作业前、后两个回波单元最大反射率(a)、垂直累积液态水含量(b)随时间的变化对比

B.6 结果判定

首先对比分析作业回波单元和对比回波单元降水通量的变化得出作业有效(见表 B.2), 根据作业信息认为增雨作业基于静力催化原理, 所以以降水通量的变化作为判据认为该次作业有效。其余 4 个物理量中回波单元顶高和回波单元体积同回波单元降水通量呈一致的变化趋势。

表 B.2 作业前、后两个回波单元各物理量变化对比判断效果检验结果

物理量	作业前物理量值		作业后物理量值		效果检验结果
	作业回波单元	对比回波单元	作业回波单元	对比回波单元	
降水通量	稳定阶段	稳定阶段	增幅大于对比回波单元	以一定的增长速率继续增大	正效果
回波顶高	缓慢减小阶段	增大阶段	增幅大于对比回波单元	以一定的增长速率继续增大	/
回波体积	缓慢增大阶段	缓慢增大阶段	增幅大于对比回波单元	以一定的增长速率继续增大	/
最大反射率	起伏变化阶段	起伏变化阶段	增幅小于对比回波单元	以一定的增长速率继续增大	/
垂直累积液态水含量	增大阶段	增大阶段	增幅与对比回波单元近似	以一定的增长速率继续增大	/

参 考 文 献

- [1] 俞小鼎,姚秀萍,熊廷南,等. 多普勒天气雷达原理与业务应用[M]. 北京:气象出版社,2006
 - [2] Dixon M,Wiener G. TITAN:Thunderstorm identification,tracking analysis and nowcasting—a radar-based methodology [J]. J Atmos oceanic Technol,1993,10(6): 785-796
 - [3] 贾烁,姚展予. 江淮对流云人工增雨作业效果检验个例分析[J]. 气象,2016,42(2): 238-245
 - [4] 王铁,臧欣,杨晓峰. 强对流天气识别追踪算法与应用[C]. 北京:中国气象学会,2013
 - [5] 肖艳姣,汤达章,李中华,等. 风暴的自动识别、跟踪与预报[J]. 南京气象学院学报,1998,21(2): 223-229
-

中华人民共和国
气象行业标准
对流云火箭增雨效果 天气雷达物理检验方法
QX/T 661—2023

*

气象出版社出版发行
北京市海淀区中关村南大街46号
邮政编码:100081
网址:<http://www.qxcbs.com>
发行部:010-68408042
北京建宏印刷有限公司印刷

*

开本:880 mm×1230 mm 1/16 印张:1 字数:30千字
2023年5月第1版 2023年5月第1次印刷

*

书号:135029-6322 定价:25.00元

如有印装差错 由本社发行部调换
版权专有 侵权必究
举报电话:(010)68406301