

浆水苹果“6·8”冰雹灾害分析与人影防雹智能化方向研究

李俊国¹, 郝巨飞², 李永占²

¹邢台市信都区科技和工业信息化局, 河北 邢台

²邢台市气象局, 河北 邢台

收稿日期: 2026年2月11日; 录用日期: 2026年3月9日; 发布日期: 2026年3月19日

摘要

针对2025年6月8日浆水镇发生的冰雹灾害, 通过对触发条件、预警与实况服务、灾害影响等进行分析, 剖析面向特色林果产业的人影防雹作业存在的瓶颈问题, 提出从数据感知到效果反馈的自主优化智能环, 形成冰雹灾害的监测预警 - 智能决策 - 精准指挥 - 效果检验的智能闭环, 构建人影领域知识图谱、双引擎驱动参数自动调整的智能业务体系, 提升太行山地形下强对流天气的防御能力。

关键词

冰雹, 人影, 智能

Analysis of the “June 8” Hailstorm Disaster Affecting Jiangshui Apples and Research on the Intelligent Direction of Weather Modification for Hail Suppression

Junguo Li¹, Jufei Hao², Yongzhan Li²

¹Bureau of Science, Technology, Industry and Information, Xindu District, Xingtai City, Xingtai Hebei

²Xingtai Meteorological Bureau, Xingtai Hebei

Received: February 11, 2026; accepted: March 9, 2026; published: March 19, 2026

Abstract

In response to the hail disaster that occurred in Jiangshui Town on June 8, 2025, this paper analyzes

文章引用: 李俊国, 郝巨飞, 李永占. 浆水苹果“6·8”冰雹灾害分析与人影防雹智能化方向研究[J]. 气候变化研究快报, 2026, 15(2): 396-401. DOI: 10.12677/ccrl.2026.152044

the triggering conditions, early warning and real-time services, and disaster impacts. It examines the bottleneck problems in weather modification hail suppression operations targeting the specialty forest and fruit industry. A self-optimizing intelligent loop from data perception to effect feedback is proposed, forming an intelligent closed loop of hail disaster monitoring-early warning, intelligent decision-making, precise command, and effect verification. By constructing a knowledge graph in the field of weather modification and an intelligent operational system with dual-engine driven automatic parameter adjustment, this study aims to enhance the defense capability against severe convective weather in the Taihang Mountain terrain.

Keywords

Hail, Weather Modification, Intelligence

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

冰雹是典型的突发性强对流天气灾害，具有生消迅速、局地性强、致灾性显著的特征，对农业生产尤其是山地特色林果产业造成的损失往往具有不可逆性[1][2]。太行山区因特殊的地形动力抬升作用与夏季热力条件耦合，成为华北地区冰雹灾害的高频发区域，浆水镇作为太行山东麓优质苹果种植核心区，2025年6月8日的冰雹天气，造成1625.2亩果园受损，直接经济损失超6000万元，凸显了传统人影防雹作业的诸多短板。

传统人影防雹高度依赖人工经验，存在预警时效短、站点覆盖有盲区、作业决策缺乏量化优化等问题[3]，难以适配山区冰雹云快速演变的特征。随着人工智能与新型探测技术的发展，人影防雹迎来智能化升级机遇，阿联酋通过AI优化作业流程，国内贵州、云南等地构建的智能防雹体系，实现了预警与作业精准度的双重提升[4]，为山地防雹智能化提供了实践参考。双偏振雷达、相控阵雷达等装备为冰雹云精细监测提供支撑[5]，3D-CNN、DRL等算法推动了冰雹云识别与作业决策的自动化[6]。但太行山冰雹云具有显著局地性，现有技术体系难以直接适配。本文以浆水镇冰雹灾害为个案，剖析太行山地地形下林果产区人影防雹瓶颈，结合新型技术构建监测预警-智能决策-精准指挥-效果检验的智能闭环[7]，以期提升太行山区冰雹防御能力，为北方山地林果产区气象灾害防御提供技术参考。

2. 2025年6月8日浆水镇冰雹灾害的气象学分析及损失

2025年6月8日邢台市信都区浆水镇遭遇的冰雹天气，是典型的夏季午后地形触发型强对流天气过程，此次过程兼具发展速度快、致灾性强的特点，触发具备典型的热力与地形耦合特征，前期浆水镇区域呈现高温高湿的气象背景，大气不稳定能量持续积累，午后太阳辐射的加热作用进一步加剧了大气层结的不稳定性，在太行山地形的动力抬升作用下，局地强对流天气被快速触发，形成了晴空骤变、雷暴伴冰雹的突发天气过程。邢台市气象台雷达监测数据显示，15:19浆水镇区域雷达回波强度达57 dBz (图1)，且云层呈北偏东方向移动，成为冰雹天气发生的重要预警信号。

天气预警与实况监测发现：2025年6月8日15:33浆水镇率先出现冰雹天气，冰雹最大直径达1~3 cm，预警发布与冰雹发生几乎同步，未预留有效的灾害防御准备时间。天气实况数据显示，8日7时~17时邢台市出现分散性雷阵雨，平均降雨量2.8 mm，其中浆水镇降水量19.7 mm，宋家庄镇7 mm，两区域

均出现冰雹天气,冰雹最大直径 1 cm (图 2); 同时信都区出现 8 级瞬时大风,浆水镇最大风速达 17.5 m/s,风雹叠加进一步加剧了灾害影响。

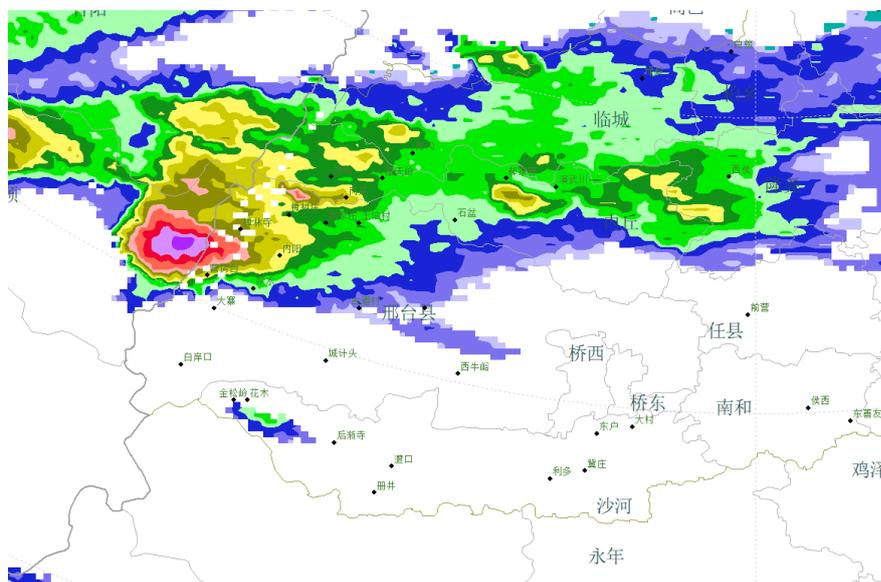


Figure 1. Radar reflectivity intensity at 15:19 on June 8, 2025 (Unit: dBz)
图 1. 2025 年 6 月 8 日 15:19 雷达回波强度(单位: dBz)



Figure 2. Hail disaster image
图 2. 冰雹灾害图片

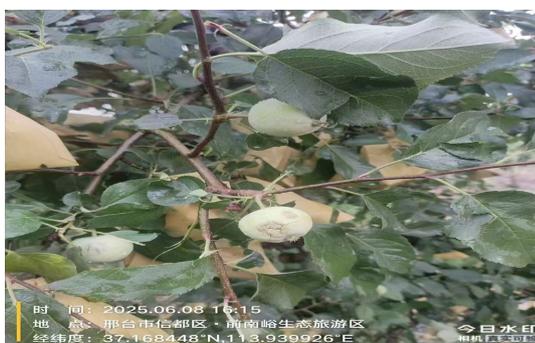


Figure 3. Impact of hail disaster on fruit trees
图 3. 冰雹灾害对果树造成的影响

此次冰雹天气，浆水苹果受灾严重，信都区农业农村局实地调查统计：冰雹天气持续 10 余分钟且冰雹密度较高，造成浆水镇前南峪、浆水等 25 个行政村，以及宋家庄镇槐树庄等 4 个行政村的苹果树不同程度受损，其中浆水村、下店村、前南峪村等 11 个村庄为重度受灾区域(图 3)。果实受损率介于 30%~80% 之间，且域内 80% 的果树已完成套袋作业，套袋防护未能有效抵御冰雹冲击，对苹果的外观与品质造成不可逆损伤。此次雹灾经核算：林果产业直接经济损失达 6000 多万元。

3. “6·8”冰雹灾害折射人影作业的短板

2025 年 6 月 8 日浆水镇苹果冰雹灾害，暴露了当前面向特色林果产业的人工影响天气防雹作业体系的诸多短板，在冰雹时空规律研究、监测预警、作业站点协同及指挥决策等核心环节，均存在与山地强对流天气防御需求不匹配的问题，传统作业模式已难以适配特色林果产业的灾害防护要求。

3.1. 冰雹预警时效与精准度亟待提升

传统预警发布的“未来 2 小时”窗口期，难以满足空域申请、弹药调运等防雹作业准备需求，本次灾害中预警与冰雹发生几乎同步，无有效作业准备时间。同时传统 S 波段天气雷达扫描周期长、空间分辨率有限，难以捕捉冰雹云初生与发展的微物理过程及精细结构，无法识别并利用防雹作业的黄金窗口。

3.2. 作业站点协同与覆盖能力存在硬伤

信都区现有 4 个高炮防雹作业点，作业半径仅 4~5 公里，且受太行山破碎山地地形影响，对西南、南部路径入侵的强对流天气防护存在大量盲区；各作业点间缺乏智能化协同拦截指挥机制，难以形成联防联控的作业体系，应对多路径强对流天气能力不足。

3.3. 作业指挥智能化水平偏低

当前防雹作业的发射时机、作业区域、用弹量等核心决策，高度依赖指挥员个人经验，缺乏基于多源实时数据融合与物理模型的量化、自动化决策支持。针对太行山区苹果、板栗等特色林果产业，尚未构建基于高分辨率地形、气候及作物分布数据的靶向式防雹作业方案，与现代化智能化作业流程要求差距显著。

4. 人影防雹作业精准智能化方案

近年，国外阿联酋的降雨增强研究计划中 AI 优化作业，国内防雹智能化以贵州人影防雹为代表，利用 AI 融合气象、农业等多行业数据，构建了从 12 小时潜势预报到 10 分钟点级预警的算法体系，并建立了全流程闭环管理[1]。

4.1. 系统总体架构

监测预警 - 智能决策 - 精准指挥 - 效果检验。采用层次化、模块化设计，构建了一个从数据感知到效果反馈的自主优化智能环：智能感知层(多源数据融合)——融合认知层(作业条件识别与预测)——智能决策层(生成优化作业方案)——精准执行层(自动化催化作业)——评估层(增雨防雹效果定量分析)。

4.2. 核心探测装备

邢台人影“十五五”规划有景梅山 X 波段双偏振雷达站建设，作为系统前端核心，通过电子扫描可在 20~30 秒内完成一次全空域三维体扫，相比传统雷达(5~6 分钟)，时间分辨率提升一个数量级。其双偏振功能可同步获取差分反射率(Zdr)、比差分相位(Kdp)等关键偏振参量[2]。

AI 驱动特征提取与反演：利用预训练的三维卷积神经网络(3D-CNN)模型，直接对融合后的高维雷达

数据立方体进行处理。模型能够自动识别并提取与云层宏观结构(如云顶高、云底高、回波顶高)、微物理特性(如过冷水含量、冰水含量)及动力特征(如垂直积分液态水含量 VIL、风场辐合)相关的深度特征。

秒级产品生成: 模型输出包括云体三维厚度场、关键温度层(如 -10°C 、 -20°C)高度场、过冷水含量分布场、冰雹概率场等在内的系列定量化产品, 更新频率与雷达扫描周期同步(可达分钟级甚至秒级), 为决策层提供实时、精确的“战场态势图”。

4.3. 融合认知层

人影领域知识图谱构建的“知识库”, 旨在将隐性、离散的专家经验转化为显性、结构化的计算机可理解知识。汇集数十年人影科研成果、业务规程、专家访谈记录及历史经典个例分析报告。采用图谱形式, 将概念实体(如“冰雹云”、“过冷水”、“催化温度窗”)及其关系(如“具有”、“位于”、“最佳作用”)进行结构化存储。

4.4. 智能决策层

双引擎驱动参数自动调整是系统的“大脑”, 基于实时“感知”和“认知”, 自动生成最优作业方案。作业条件识别引擎: 结合实时反演产品和知识图谱规则, 自动诊断并报警潜在作业目标(如可增雨的层状云过冷水区或发展的冰雹云单体), 给出其空间范围、强度等级和移动矢量。作业参数优化引擎(核心): 采用深度强化学习(DRL)框架实现发射参数的自适应计算。状态空间(S): 定义为 $S=[\text{云参数}, \text{环境参数}, \text{装备状态}]$ 。具体包括: 目标云的位置(经纬高)、移动速度、过冷水含量空间分布、环境温度层结、实时三维风场(U, V, W)、发射点坐标、火箭型号特性等。

动作空间(A): 定义为 $A=[\text{发射仰角}, \text{发射方位角}, \text{用弹量}]$ 。这是一个连续或高维离散的优化空间。

奖励函数(R): 精心设计的多目标复合函数, 是融合专家经验的集中体现: $R = \alpha * R_{\text{覆盖}} + \beta * R_{\text{效率}} + \gamma * R_{\text{经济}} + \delta * R_{\text{安全}}$ 。

针对高空风的影响, 系统集成了如董晓波等(2020)研制的人工增雨防雹火箭弹道跟踪系统所验证的实时风偏修正算法。

4.5. 核心技术实现: 快速捕捉与智能调整的算法与模型

4.5.1. 短临外推预测模型(ConvLSTM)

引入卷积长短期记忆网络(ConvLSTM), 将雷达回波序列视为时空序列进行建模。

模型输入: 过去 6~10 个时次(例如, 过去 60 分钟)的雷达反射率立体拼图(三维网格数据)。

模型输出: 未来 6 个时次(未来 60 分钟)的反射率预测。

核心算式: ConvLSTM 单元在标准 LSTM 基础上, 将全连接操作替换为卷积操作, 以保留空间结构信息。其关键门控机制如下(*表示卷积, \odot 表示逐元素乘):

$$f_t = \sigma(W_f * [h_{t-1}, x_t] + b_f) \quad (\text{遗忘门})$$

$$i_t = \sigma(W_i * [h_{t-1}, x_t] + b_i) \quad (\text{输入门})$$

$$\tilde{C}_t = \tanh(W_c * [h_{t-1}, x_t] + b_c) \quad (\text{候选记忆})$$

$$C_t = f_t \odot C_{t-1} + i_t \odot \tilde{C}_t \quad (\text{细胞状态更新})$$

$$o_t = \sigma(W_o * [h_{t-1}, x_t] + b_o) \quad (\text{输出门})$$

$$h_t = o_t \odot \tanh(C_t) \quad (\text{隐藏状态输出})$$

通过堆叠多层 ConvLSTM, 模型能学习复杂的大气运动规律, 比纯外推更准确地预测风暴的发展\减弱和移动。

4.5.2. 结合弹道跟踪的深度确定性策略梯度(DDPG)优化算法

针对作业参数连续调整的需求, 采用适用于连续动作空间的 DDPG 算法。弹道模型集成: 在 Critic 网络计算 $R_{覆盖}$ 和 $R_{安全}$ 时, 内部调用一个高精度火箭弹道模型。该模型以动作 A_t 和状态中的风场为输入, 通过数值积分求解弹道方程, 模拟出火箭从发射到开舱的完整三维轨迹 L_t , 进而计算与目标云的匹配度 [4]。训练与部署: 使用历史作业数据与数值模拟数据构建的离线经验池进行训练。在线部署时, Actor 网络根据实时 S_t 快速推理出 A_t 。系统同时运行弹道模型, 利用最新风场数据进行最终微调, 并将修正后的指令发送给发射终端。

5. 探讨

贵州智能化防雹的业务化实践, 为太行山区人影防雹精准智能化建设提供了关键参考。贵州依托 X 波段相控阵双偏振雷达网实现冰雹云秒级捕捉, 通过知识图谱触发预警规则, 经加密扫描追踪云体发展, 由 DDPG 算法快速计算含风偏修正的最优作业参数, 发射后通过雷达凝视观测验证催化剂送达效果, 并从云体反射率、粒子相态等维度开展作业效果评估, 实现冰雹云发展阶段的早期干预。其核心成效为将有效作业预警时间从传统不足 10 分钟提升至 10~30 分钟, 大幅提高作业精准度。这印证了多源探测组网、AI 与气象物理模型融合、全流程智能闭环管理的可行性, 邢台需结合太行山区地形与林果产业防护需求, 因地制宜借鉴该模式, 推进新型探测装备建设与智能算法本地化适配, 打造贴合区域特点的人影防雹精准智能化业务体系。

参考文献

- [1] 王令, 康玉霞, 卞素芬. 华北地区冰雹天气气候特征及成因分析[J]. 气象, 2007, 33(7): 76-82.
- [2] 段鹤君, 吴林林, 杨絮. 山地地形对强对流天气的影响研究进展[J]. 地理科学进展, 2022, 41(9): 1481-1492.
- [3] 周毓荃, 张蕾, 牛生杰. 人工影响天气技术与应用进展[J]. 气象学报, 2019, 77(5): 867-884.
- [4] 汪会, 赵志强, 陈宝君, 等. 阵列相控阵雷达冰雹云监测和防雹作业指挥系统[J]. 科技成果管理与研究, 2025, 20(2): 74-75.
- [5] Kumjian, M.R. (2013) Principles and Applications of Dual-Polarization Weather Radar. Part I: Description of the Polarimetric Variables. *Journal of Operational Meteorology*, 1, 1-20.
- [6] 李国翠, 付双喜, 李宝梓. 基于深度学习的冰雹云识别与预警模型研究[J]. 高原气象, 2024, 43(2): 412-421.
- [7] 董晓波, 王以琳, 李宝东. 人工增雨防雹火箭弹道跟踪系统设计与验证[J]. 气象科技, 2020, 48(3): 365-372.