

王飞, 王思瀚, 乌日罕, 等, 2025. 人工影响天气作业效益评价研究综述[J]. 气象, 51(11): 1547-1558. Wang F, Wang S H, Wu R H, et al, 2025. Advances in studies on benefit evaluation of weather modification[J]. Meteor Mon, 51(11): 1547-1558(in Chinese).

人工影响天气作业效益评价研究综述^{*}

王 飞^{1,2} 王思瀚^{1,2} 乌日罕^{1,2} 耿 仪^{1,2} 葛旭东^{1,2} 孙 勇^{1,3}
刘 莉^{1,3} 林大伟^{1,2} 孙丰宾^{1,2} 赵志强^{1,2} 陈宝君^{1,2}

1 中国气象局云降水物理与人工影响天气重点开放实验室, 北京 100081

2 中国气象局人工影响天气中心, 北京 100081

3 中国气象科学研究院, 北京 100081

提 要: 人工影响天气的核心在于理解和应用大气物理及云降水原理, 借助人工干预手段, 引导局地天气过程向人类期望的方向发展。科学评价人工影响天气作业效益并构建客观的评价体系, 对优化人工干预决策具有重要意义。文章系统综述了近年来人工影响天气在水文、农业、生态、环境、经济等五大维度的效益评价研究进展, 从多个尺度上论述当前研究的瓶颈问题和挑战, 提出人工影响天气从“物理效果导向”转向“综合价值优化”的研究范式转型方向, 旨在为后续效益评价的科研创新与业务应用提供理论依据与实践指导。

关键词: 人工影响天气, 效果评估, 效益评价

中图分类号: P48

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2025.101701

Advances in Studies on Benefit Evaluation of Weather Modification

WANG Fei^{1,2} WANG Sihan^{1,2} WU Rihan^{1,2} GENG Yi^{1,2} GE Xudong^{1,2} SUN Qing^{1,3}
LIU Li^{1,3} LIN Dawei^{1,2} SUN Fengbin^{1,2} ZHAO Zhiqiang^{1,2} CHEN Baojun^{1,2}

1 CMA Key Laboratory of Cloud-Precipitation Physics and Weather Modification (CPML), Beijing 100081

2 CMA Weather Modification Centre, Beijing 100081

3 Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

Abstract: The essence of weather modification (WM) lies in understanding and applying the principles of atmospheric physics and cloud microphysics to steer local weather processes toward desired outcomes through targeted intervention. Scientifically evaluating the effectiveness of WM operations and establishing objective assessment frameworks are crucial for optimizing intervention strategies. To provide both a theoretical foundation and practical guidance to support future research innovation in the field of WM benefit evaluation, this paper reviews the recent progresses in evaluating the benefits of WM in five key dimensions: hydrology, agriculture, ecology, environment and economy. Besides, current research challenges and limitations across multiple scales are analyzed and a paradigm shift from a “physical-effect-oriented” approach to one that is centered on “comprehensive value optimization” is proposed.

Key words: weather modification, effectiveness evaluation, benefit evaluation

* 国家重点研发计划(2024YFF1308200、2023YFD2302700)、宁夏回族自治区重点研发计划项目(2022CMG02010)和中国气象局创新发展专项(CXFZ2023J035)共同资助

2025 年 8 月 11 日收稿; 2025 年 10 月 17 日收修定稿

第一作者:王飞,主要从事气溶胶和云降水物理研究. E-mail:feiwang@cma.gov.cn

通讯作者:陈宝君,主要从事云降水物理与人工影响天气研究. E-mail:chenbj@cma.gov.cn

引言

21世纪以来,全球气候变化引发的极端天气事件频发,加剧了水资源短缺、生态退化和气象灾害风险。据世界气象组织(WMO)报告,过去50年气象灾害造成的经济损失增长超5倍(WMO, 2021)。在此背景下,人工影响天气作为人类主动干预天气系统的科学技术手段,正由应急减灾逐步向战略性资源管理方式转变。目前,人工播云仍是最主要的人工影响天气作业方式:即利用飞机、火箭、高炮等工具将催化剂播撒入云进行催化,人为改变云的发展和降水的相态、量级或分布。此外,防雹、消雾、减雨等人工影响天气作业手段,近年来在防灾减灾气象服务中的应用也日益广泛(毛节泰和郑国光, 2006; 姚展予, 2006; 雷恒池等, 2008; 郑国光和郭学良, 2012)。目前,全球已有50多个国家开展人工影响天气实践。

自20世纪40年代干冰和AgI作为人工播云催化剂被发现以来,世界各地实施了大量的人工影响天气科学试验,其目标之一是探究人工播云后,目标云的宏观物理过程和降水过程所产生的变化,即人工影响天气的作业效果(王飞等, 2022)。常见的效果评估方法包括:(1)基于大量随机化作业样本的统计分析(曾光平等, 1993; Breed et al, 2014; 黄彦彬等, 2019);(2)利用原位观测或遥感反演寻找作业后云降水的物理响应证据(Rosenfeld et al, 2005; Wang et al, 2019; 2021; Dong et al, 2021);(3)通过数值模式对催化效果开展仿真模拟计算等(刘卫国等, 2021; Hua et al, 2024)。通过上述方法得到的评估结果一般包含两方面:一是云的宏观特征变化,包括云微物理参数、动力或热力结构等;另一种是催化导致地面降水特征发生变化,包括降水的相态、量级和分布等。一般来说,效果评估的首要目标是回答“人工播云有没有成功改变天气?以及改变了多少?”这一基础性问题。对此,科学家侧重于从物理机理上论证变化的因果性,业务人员则致力于评估具体作业方案的实际效能。而决策者则更关注最终作业效果转化为可衡量的经济价值,即评估其带来的实际效益。

效果评估重点关注量化人工干预对特定气象要素或天气现象的实际改变程度(Woodley and Rosenfeld, 2004),而效益评价则是量化天气改变后

产生的可感知价值以及其与投入成本的平衡关系。效益评价涉及气象学、水文学、农学、经济学、社会学、环境科学等多个学科,是通过对定量效果评估结果的深入挖掘,结合各领域的数据源,从多维度、多指标、跨学科的角度,来实现面向经济价值、社会效益和生态影响的综合评价,既包括评价短期、直接的影响(例如一次人工防雹作业减少的经济损失),也要考虑长期、潜在的效益(例如持续增雨作业对区域水资源调控的影响)。通过效益评价,可以明确人工影响天气工作在哪些方面取得了显著成效,哪些方面还需要改进,还可以为人工影响天气作业提供科学依据,帮助优化资源配置,提高作业效率和效果。随着人工影响天气事业的发展,效益评价在其中扮演着越来越重要的角色,通过效益评价可以增强公众对人工影响天气的了解和信任,促进社会支持;还能为政府向气象部门投入和有针对性地改良工程建设提供理论根据,进一步推动人工影响天气事业的持续发展。

早期的人工影响天气研究主要聚焦于作业效果的验证,效益分析仅粗略估算灾害损失减少值(Simpson et al, 1965),方法局限在“将效果等同于效益”,忽视成本核算与社会维度等方面的影响。随着人工影响天气活动不断增加,人们越来越发现,复杂的云降水过程使得作业有效的物理证据偏少,而随机化统计结果往往显著性不足(Benjamini et al, 2023),导致人们开始关注人工影响天气的成本-效益分析,如美国北达科他州人工防雹项目建立“作物损失-作业成本”对比模型(Changnon and Hewings, 2001),以色列建立人工增雨项目水资源开发经济价值核算体系。随着交叉学科研究的不断融合深入,效益评价维度逐渐多元化,聚焦经济、社会、生态等方面。此外,在人工智能快速发展的浪潮下,利用多元遥感监测等大数据分析和机器学习归因分析等方法,评价人工影响天气的综合效益也是未来的重要研究方向。

随着人工影响天气作业规模扩大与经费投入增加,其效益评价已然成为政府决策、公众关心和科学研究的核心议题。然而,由于天气系统的混沌性、干预效果的复杂性以及价值维度的多元性,如何科学量化人工影响天气活动的投入产出比,建立兼顾经济、社会、生态效益的评价体系,仍是亟待突破的学术与实践难题。近年来,国内外众多学者围绕人工影响天气效益评估开展了大量研究,运用不同方法,

从不同角度对人工影响天气在农业、水资源、生态环境等领域的效益进行了分析和探讨,取得了一系列有价值的研究成果(Acharya et al, 2011; Benjamini et al, 2023; Lee et al, 2024)。对人工影响天气效益评估进行系统的研究综述,梳理现有研究成果,分析存在的问题和挑战,对于推动人工影响天气效益评估技术的发展,提升人工影响天气工作的整体水平具有重要的现实意义。本文将全面回顾和总结国内外在人工影响天气效益评估方面的研究进展,深入分析各种评估方法的优缺点及应用案例,以期为后续相关研究和实际业务工作提供有益的参考。

1 效益评价的概念和分类

人工影响天气的作业效益,是指在作业效果客观、定量评估的基础上,评价其在经济、社会、生态等方面产生的直接或间接价值增量。而效益评价,则是对增雨、防雹等人工影响天气活动所产生或预期产生的各方面效果、价值与影响进行系统分析和客观判断的过程。作为衡量作业成效的重要环节,效益评价不仅在于优化作业方案、提升作业效果,从而有效地支撑人工影响天气事业高质量发展;更在于精准量化作业在防灾减灾、生态修复、社会服务等多领域的实际收益,为国家战略和决策提供科学依据。

从不同应用领域和影响维度出发,本文将人工影响天气作业效益划分为:水文效益、农业效益、环境效益、生态效益和经济效益等五个方面(图 1),其中经济效益可被视为由前四类效益所衍生出的以货币形式的直接或间接价值。此外,人工影响天气在

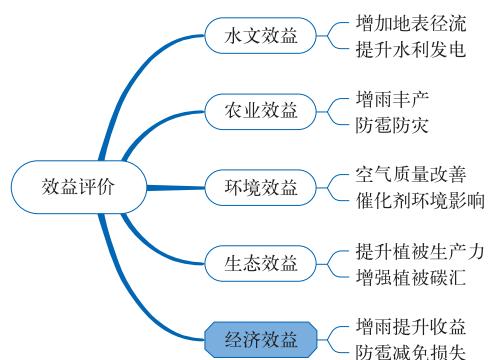


图 1 人工影响天气作业效益
评价领域及维度示意图

Fig. 1 Evaluation dimensions for weather modification benefit evaluation

气候调节与社会效益这两个宏观维度上同样具有深远潜力。气候调节着眼于通过天气干预影响区域气候系统,以应对气候变化等长远挑战;社会效益则聚焦于其对公共福祉、社会稳定等非市场价值的贡献。然而,由于前者尚存在科学认知与风险评估的诸多不确定性,后者也缺乏成熟的量化研究范式,因此本文对这两个维度暂不作深入探讨。

(1) 水文效益。调节与影响水资源系统是人工影响天气作业效益的重要组成部分。在全球气候变化加剧的背景下,水资源时空分布不均问题日益凸显。通过对具有潜力的目标云系实施精准的人工增雨(雪)作业,可有效增加区域降水量,优化局地降水的时空分布格局,提升地表径流,增强水库调蓄能力,从而缓解旱涝风险并减轻水资源短缺带来的不利影响。作为维护水安全、增加水资源供给、保障水电运行的重要技术手段,人工增雨(雪)已在全球多个国家,如美国、以色列、中国、韩国等得到广泛应用和深入研究,在区域水文与水利系统中发挥重要的支撑作用(Acharya et al, 2011; Benjamini et al, 2023; 张俊才等, 2019; Lee et al, 2024)。

(2) 农业效益。在干旱季节,及时开展人工增雨作业,可为农作物补充水分、提高土壤湿度、促进作物生长,从而增加粮食产量,保障粮食安全。而在年降水量偏少的地区,实施冬季人工增雪作业则具有双重效益:一方面可减少冬小麦等越冬作物的冻害损失,补充土壤水分、增强土壤活力;另一方面,积雪作为“固体水库”,能增加春季融雪量,满足春播春耕用水需求。此外,人工增雨(雪)带来的降水增加,有助于改善土壤结构、减少侵蚀、增强肥力,为农作物提供更优的生长环境。同时,人工增雨(雪)还能降低农业灌溉成本,减轻农民负担,提升农业综合效益。而人工防雹作业则能有效减少冰雹灾害对林果、烟叶、棉花等经济作物造成的机械损伤,降低农业经济损失,这些人工影响天气措施共同保障了粮食安全和农业可持续发展,对稳定农村社会经济具有重要意义(Knowles and Skidmore, 2021)。

(3) 环境效益。人工增雨(雪)作业通过增加降水强度与范围,或延长云体的持续时间,可有效改善大气环境甚至水体环境。例如,利用人工播云技术增加降水,能够加强污染物的湿清除(云下清除)过程;同时,通过促进云内清除过程(如核化等),可显著降低大气中 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 等气溶胶颗粒物以及 SO_2 、 NO_x 等气态污染物浓度。这些机制共同作用,

有助于改善空气质量,减少沙尘天气发生,缓解雾霾等大气污染现象。此外,人工增雨(雪)通过补充河流、湖库等水量,促进水体循环更新,增强自净能力,以减少富营养化等问题发生(Givati and Rosenfeld, 2005; Ku et al, 2023)。针对大雾天气,人工消雾作业(通过加热、扰动空气或播撒催化剂等方式减少雾滴浓度或粒径)可有效提升能见度,降低雾害影响,进而改善机场、港口等关键交通节点的通行条件,保障交通安全并提升运输效率。

(4)生态效益。作为应对气候变化和推进生态修复的重要协同技术,人工影响天气正逐步突破传统“增雨抗旱”的单一目标,向调节生态系统水碳循环、增强植被恢复能力等方向拓展,成为具有综合生态调控潜力的创新手段(Wehbe et al, 2023)。通过精准实施人工增雨(雪)作业,可有效降低森林草原火险等级,显著遏制火灾对生态系统的破坏;抑制土地沙化与荒漠化进程,维护土壤生态功能;提升土壤墒情,减少风蚀水蚀,促进有机质积累与微生物活动,改善退化土壤结构;补充河流、湖泊等地表水体水量,维持水体生态平衡,保障水生生物生存繁衍,进一步增强了区域水源涵养与固碳能力。此外,增雨(雪)带来的局地温湿度调节,有助于缓冲极端高温、干旱对敏感生态系统的冲击等协同效应。例如,在青藏高原地区开展补冰、固冻土人工增水作业,通过增加积雪厚度和冰面覆盖,有效补给高原水塔,为河湖与地下水的补给提供保障,对高原生态系统起到关键的修复与稳定作用。人工影响天气在修复脆弱生态系统,提升生态质量、生物多样性和生态功能等方面发挥着越来越重要的作用。

(5)经济效益。人工影响天气的经济效益主要体现在通过精准干预天气过程,降低灾害损失并创造生产价值,涵盖直接经济收益与间接拉动效应。在农业增效与减灾方面,人工增雨(雪)作业提升粮食产量、稳定农产品供应、保障农民收入;人工防雹、防霜等措施有效保护高附加值经济作物,显著减少绝收风险,年均可挽回数十亿元经济损失。在水资源与能源价值提升方面,人工增雨(雪)为缺水地区补充水库蓄水,直接增加水电发电量并降低火电用水成本。在灾害损失削减方面,人工增雨(雪)降低森林草原火险等级,减少火灾经济损失;人工消雾作业有效减少航班延误与港口停运损失,提升物流效率。综合而言,这些措施通过减少灾害损失、创造新增价值,有力支撑区域经济韧性发展,为社会创造显

著经济效益(Wehbe et al, 2023)。

2 效益评价研究进展

2.1 水文效益

2.1.1 增加地表径流

人工增雨在适宜的地理与气象条件下能够显著增加地表径流。研究表明,在迎风坡、山区汇水区等特定区域,通过催化作用增强的降水更容易转化为地表径流。在实证研究方面,针对美国内华达山脉流域开展的 11 次催化作业,研究人员采用蒙特卡罗置换分析方法(Re-randomization)进行了目标-对照统计评估(Silverman, 2010)。结果显示,所有迎风侧流域的地表径流均显著增加,而背风坡地区响应较弱。在印度尼西亚拉罗纳流域的研究中,研究人员结合流域水文数据,通过建立约束变量函数等方法,评估了地面催化发生器的实际效果及成本效益(Prasetyo et al, 2019)。结果表明,地面催化作业可显著提升地表径流,从而有效降低水电站运行成本。在模型模拟研究方面,针对美国北普拉特河流域,应用可变下渗容量模型(variable infiltration capacity, VIC)模拟评估人工增雨的水文影响(Acharya et al, 2011)。模拟显示,降雨量增加 1%~5% 可导致年径流量增长 0.3%~1.5%,且区域降雨的空间差异亦会影响年径流量变化。韩国基于天气预报模式 WRF-ARW 和降水径流模拟系统(PRMS)对南江、保宁、永潭三大水库流域进行模拟(Ma et al, 2023)。结果表明,三大流域的径流增加率均显著高于降雨增长率(约为后者的两倍或者更高),同时指出不同水库流域的适宜催化条件存在显著差异,增雨作业需充分考虑当地气候特征和流域条件。利用降雨分区对比、水文分区对比、SWAT 水文模型及 HEC-HMS 模型等方法对中国黄河上游地区的人工增雨效果评估显示,2016 年、2017 年的人工增雨作业分别产生新增径流 $6.70 \times 10^8 \text{ m}^3$ 和 $6.38 \times 10^8 \text{ m}^3$,在缓解干旱、改善区域环境等方面发挥了积极作用(张俊才等,2019)。此外,土壤水分状态在“人工增雨-产流路径”中也具有关键作用。研究表明,前期降雨积累形成的湿润土壤能够显著降低后续降雨的产流阈值,促进中等强度降水快速形成径流;而在土壤相对干燥状态下,同等降水的转化效率较低(Ma et al, 2023; Ye et al, 2023)。这种“记忆效应”说明在制定

增雨作业方案时,应充分考虑土壤含水量动态及连续降雨条件,以提升人工影响天气作业的水文效益转化率。

2.1.2 提升水利发电

人工增雨为流域水电系统的稳定运行提供了有效的水源补充与保障。自 2018 年韩国开展飞机增雨作业以来,研究人员对境内 21 座具有较大蓄水能力的多用途大坝进行了水电效益评估(Kim et al, 2020)。结果显示,增雨作业使所有大坝平均每月新增供水量达 $7.7 \times 10^5 \text{ m}^3$,其中旱季的月供水量更是达到 $9.3 \times 10^5 \text{ m}^3$ 。以蟾津江大坝为例,年均 96 次人工增雨作业约增加发电量 $4.79 \times 10^6 \text{ kW} \cdot \text{h}$,年度经济效益约增长 1.01 万美元。研究同时指出,流域面积、可播云概率、净水头高度等因素均会影响增雨效率以及综合水利效益。国内方面,采用对比分析、历史回归分析及垂向混合产流模型等方法评估了人工增雨作业对龙羊峡水库增蓄量的贡献(张阳, 2006),1997 年龙羊峡水库增蓄约新增发电量 $1.7 \times 10^9 \text{ kW} \cdot \text{h}$,经济效益增加超 4 亿元。在黄河上游班多—青铜峡段梯级电站区域,2016 年、2017 年人工增雨作业分别增加发电量 $1.81 \times 10^9 \text{ kW} \cdot \text{h}$ 和 $1.72 \times 10^9 \text{ kW} \cdot \text{h}$,显著提升了当地水电经济效益(张俊才等,2019)。

2.2 农业效益

2.2.1 增雨丰产

多项研究评估了人工增雨对农业生产的效益。Bangsund and Hodur(2019)基于人工增雨-产量历史关系模型,结合美国北达科他州 2013—2017 年实际单产数据更新参数,发现 9 种主要作物单产均有提升,油菜籽总产量提升 10.6%(该州占全国产量 85%),亚麻总产量提升 11.0%,小麦、大豆、玉米总产量分别提升 7.1%、6.7%、4.1%。Knowles and Skidmore(2021)对北达科他州云催化项目(North Dakota Cloud Modification Project, NDCMP)的评估显示,该项目对小麦和大麦的产量具有显著的积极影响,同时降低了作物保险赔付率。该研究基于 1989—2018 年间的面板数据^[1],采用双向固定效应回归模型(时间效应和县固定效应),其作用是控制

县级层面未被观测到且不随时间变化的因素(如政治多数派倾向、宗教多数派倾向等),分析 NDCMP 产生的农业净效益。结果表明,参与项目的县,其小麦产量比未参与县平均每英亩(1 acre = 4046.856 m²)高出 3.87 蒲式耳^[2]。鉴于 30 年间平均小麦产量约 28.98 蒲式耳/英亩,这意味着项目参与县的小麦产量提升了约 13%。Lu and Skidmore(2024)基于 2002—2020 年县级面板数据,通过双向固定效应模型并结合倾向得分匹配法,实证分析了人工增雨对西堪萨斯州作物产量的影响。结果显示,作业区域玉米单产增加 17.82 蒲式耳/英亩,增幅约 15.01%。该研究同步探讨了人工增雨的负面影响与溢出效应:发现作业区由洪水引发的作物损失率增加了 32%,对水分敏感作物(如高粱)可能会造成减产。研究强调,增雨对降水分布的扰动是核心作用机制,其农业效益高度依赖于作物需水性(如玉米受益、高粱受损等)及局地气候条件。

近年来我国人工增雨技术和规模发展迅速,在缓解极端干旱对大田及经济作物的损失、助力农业丰产增收方面发挥了积极作用。孙宝利等(2022)通过统计作物生长期降水量、干旱强度指数和粮食产量的变化,评估分析了辽宁阜新市人工增雨的农业效益。1991—1999 年作物生长期内,阜新市作物生长期降水量以年均 8.8 mm 的速率递减,然而在 2000—2021 年作物生长期,降水量以年均 8.1 mm 的速率逐渐提升,尤其近十年间增幅明显,达到 $12.3 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ 。这使得年降水量比多年平均值增加了 32.8 mm,相当于每年在作物生长期多给农田浇灌水量达 $3.28 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。这一结果得益于阜新市自 2000 年来不断提升的人工增雨作业指挥能力与作业规模,以及人工影响“三适当”业务模式的本地化应用,增加了人工增雨技术含量,进一步提高了增雨作业能力和效益。邹纯丽(2023)对内蒙古乌兰察布市人工增雨连续作业前后土壤墒情分析表明,增雨后土壤墒情明显改善,土壤中所含水分能充分满足农作物后期出苗或生长需求,使得土壤在应对干旱胁迫时具备更强的缓冲能力。Liu et al(2025)指出,水分胁迫对青藏高原上生长期的青稞会产生不利影响,而人工增雨有望缓解这一问题。通过作物

^[1]面板数据:一种数据结构,包含多个个体(本研究中的县)在多个时间点(本研究中为 2002—2020 年)的观测值。该数据形式有助于控制不随时间变化的个体异质性,从而更精确地识别因果效应。

^[2]蒲式耳:英制农产品计量单位,1 蒲式耳约等于 35.24 L。

模型模拟发现,增雨对青稞产量的提升效应是非线性的,增雨率小于 5% 的影响甚微,而当增雨率超过 10% 则能显著增加青稞产量。

2.2.2 防雹减灾

人工防雹作业通过有效降低冰雹强度,为农业生产带来显著效益。一方面,在作物生长关键期(如小麦灌浆、玉米抽穗),防雹作业可避免冰雹直接击打麦穗、玉米棒,防止籽粒脱落,保证产量稳定;另一方面,减少冰雹对作物叶片的物理损伤,确保光合作用正常进行,促进作物健康生长,提升最终收获的农产品质量,从而增加农民收益。美国北达科他州云催化项目(NDCMP)的研究结果表明,该项目使作业县的 9 种主要作物年均冰雹损失平均减少约 41.4%,其中小麦等主粮作物损失减少 45%,大豆/干豆减少 30%,苜蓿减少 22.5%。此外,年均冰雹损失覆盖面积占种植总面积的比例减少 4.54%,冰雹平均直径减小约 8%(Bangsund and Hodur, 2019; Knowles and Skidmore, 2021)。法国的防雹实践可以追溯到 20 世纪 50 年代,Dessens et al (2016)引用农业保险公司对 1986 年以前防雹作业效果的统计分析指出,在受催化影响的西北地区,雹灾影响的损失减少约 41%。然而,防雹效果并非在所有地区都一致显著。Gavrilov et al(2010)通过线性趋势方程和 Mann-Kendall 检验,分析了 1967—2002 年间塞尔维亚利用 AgI 播撒进行防雹作业对冰雹日数趋势的影响。研究发现,对比同期实施了防雹作业的塞尔维亚其他地区(其冰雹日数趋势呈停滞状态)与未实施作业的伏伊伏丁那地区(冰雹日数呈下降趋势),防雹作业在塞尔维亚并未导致冰雹日数的显著减少,而是可能起到了稳定(停滞)原有趋势的作用。我国河北满城县实施的防雹作业也取得了积极成效,试验期间年均雹灾面积比试验前减少约 0.22 万 ha,全县粮食、棉花及果品年产量因此增加约 357 万 kg。与未开展防雹作业的邻近易县相比,满城县平均每年雹灾面积减少 0.29 万 ha(王雨曾等,1995)。王秋香等(2010)统计新疆 1951—2007 年 1870 条雹灾资料,用气候趋势系数、二阶主值函数分析其长期变化趋势,对防雹前后(以 1978 年和 1990 年为界)趋势系数进行比较,分析防雹效果。研究发现,20 世纪 90 年代阿克苏地区形成大规模综合防雹体系以来,平均每年雹灾受灾面积实际减少趋势为 2.6%,经济损失实际减少趋势为 4.4%,雹灾次数实际减少趋势为 6.2%。孙擎等

(2025)对比研究我国西南地区四种以冰雹最大直径、持续时间和密度为指标的烤烟冰雹灾损模型,结合烤烟种植成本测算人工防雹作业对烤烟减损的经济价值。综合多个防雹作业点的烤烟冰雹减损情况,结果表示,人工防雹作业每投入 1 元,带来的烤烟减损额为 9.59 元,证明人工防雹对烤烟等经济作物防灾减损具有重要作用。

2.3 环境效益

2.3.1 空气质量改善

人工增雨不仅能有效补充水资源,更能产生显著的环境效益。Ku et al(2023)通过对 2020 年 11 月 1 日在韩国西部沿海地区开展的两次飞机增雨试验研究发现,催化后飞机观测的降水粒子浓度与尺度均有增加;利用 WRF 模型模拟催化与未催化场景的小时累积降水差异,计算出作业区域降水增强,这一结果同时得到雷达和地面观测的证实;地面环境监测站显示,催化后 PM_{10} 浓度峰值从 $140 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 降至 $80 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,降幅达 43%,表明人工增雨可有效降低大气中的细颗粒物浓度。黄东杰等(2024)分析了 2022 年 1 月 4 日湖北宜昌市一次人工增雨作业前后空气污染物浓度小时值变化,发现增雨前 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度接近严重污染级别(峰值约 $245 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$),增雨后缓慢下降至 $122 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,说明降雨对空气质量改善效果明显。沐贤俊(2024)分析 2019 年安徽淮南地区的一次人工增雨作业的环境效益,发现作业结束后(与作业前相比,时间间隔 6 h),AQI、 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 均呈明显下降趋势,直观反映了人工增雨通过湿沉降过程去除大气污染物的实际效能。此外,对 2021—2022 年的 12 架次飞机作业的分析显示,作业后 AQI、 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 改善(差值为正)的比例分别为 75%(9 架次)、66.7%(8 架次)和 75%(9 架次),表明增雨作业对改善淮南地区空气质量具有积极作用。除此之外,Givati 和 Rosenfeld(2005)研究发现,在以色列北部山区,人工增雨可有效抵消空气污染造成的降水锐减、维持区域水资源稳定。这主要体现在污染气溶胶会抑制暖雨和冰相过程从而减少降水,而人工增雨播撒的 AgI 能促进冰核形成,加速冰晶增长从而增加降水。通过线性回归和长期趋势分离模型分析内地丘陵地区($500 \sim 1000 \text{ m}$)与上风海岸/平原地区的降水量的比值发现,人工增雨使北部山区降水在污染背景下多保留了 12%~14%,相当于每年避免 100 mm

的水资源损失。这一效益对缓解半干旱区水资源短缺、维持区域水安全具有重要价值。

2.3.2 催化剂环境影响

在人工影响天气催化剂对环境的影响评估方面,学者主要关注 AgI 等作为催化剂是否会对环境产生不利影响。Ren and Jin(2024)对北京人工增雨影响区域的水体和土壤进行了长期观测(2004—2019 年),发现水体对人工增雨释放 Ag^+ 的调节起主导作用,16 年观测周期内, Ag^+ 含量累计增加约 3.3%。Korneev et al(2017)详细研究了不同国家人工增雨项目 AgI 消耗量的差异,例如叙利亚 $0.545 \text{ g} \cdot \text{km}^{-2}$, 伊朗 $0.107 \text{ g} \cdot \text{km}^{-2}$, 俄罗斯雅库特 $0.005 \text{ g} \cdot \text{km}^{-2}$ 。研究通过计算单位面积的试剂消耗量,指出 AgI 对大气颗粒物浓度的短期影响微乎其微,同时肯定了其在增加降水和防雹减灾方面的积极作用。段婧等(2020)针对国内外使用 AgI 开展人工增雨(雪)和人工防雹外场试验作业后降水、土壤和湖泊等的 Ag^+ 含量研究,尽管催化后 Ag^+ 含量会有不同程度的增加,尤其是地面燃烧炉催化和人工防雹作业,但降水和水库中的 Ag^+ 含量远低于饮用水标准。张晓苑等(2024)针对 AgI 催化剂的环境影响进行了探索性研究,通过采集山东、北京、天津等地人工增雨事件后的降水样品,精密测量并深入分析这些样品中的 Ag^+ 含量,计算得出单位降水中的 Ag^+ 浓度远低于我国《地下水质量控制标准》和《生活饮用水卫生标准》的限值,并将其归因于作业后水库水量增加对 Ag^+ 的稀释作用,表明人工增雨作业在合理使用下对环境造成的风险极低。

2.4 生态效益

2.4.1 提升植被生产力

国内学者通过多区域实证研究发现,人工增雨对植被及牧草具有显著正向生态效应。黄河上游玛曲地区 1997—1999 年开展的人工增雨作业使牧草产量提升 20%(年均增产 $525 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$), 草场植被覆盖度明显改善,春季覆盖度提升超过 20%,并带动育羊年产值增加 1606 万元(德力格尔等,2005)。研究人员通过分析多年来西南地区气候变化与植被净初级生产力(NPP)之间的潜在关系,结合贵州 2007 年的人工增雨作业数据,对该年度人工增雨所产生的生态效益进行了量化评估。研究结果显示,2007 年实施的人工增雨作业提升了贵州森林有机物累计约 $1.40 \times 10^4 \text{ t}$, 生态增益显著(李玮,2024)。

河西走廊地区的长期试验结果显示,人工增雨(雪)作业有效补充了石羊河流域的生态需水量,对流域生态治理和恢复起到了积极作用(张文煜等,2021;程鹏等,2021)。研究表明,自 2010 年以来,该流域的植被指数与植被覆盖度均呈现显著上升趋势,平均植被覆盖度稳定在 46% 以上,改善范围约占流域总面积的 20%。同时,区域内水域面积也逐年扩大。这些生态指标的持续向好,表明人工增雨已成为推动流域生态恢复的一项重要措施。上述成果不仅印证了人工增雨在半干旱区生态修复中的实际效力,也为我国在类似气候区系统推进生态建设、构筑区域生态安全屏障提供了重要的科学依据与实践参考。此外,人工增雨作业期需综合考虑物候期、水分利用效率及降水再分配过程。基于黄河上游地区降水等因素对牧草产量的影响贡献研究表明,甘肃同德地区 6 月上旬至 7 月上旬期间均为人工增雨的最佳时期,各旬每 10 mm 降水对牧草生长高度的促进作用分别为 0.2、0.3、0.3 及 0.2 cm; 玛曲地区最佳增雨期为 5 月上旬至 6 月上旬,各旬每 10 mm 降水相应促进效果分别为 1.1、0.8、0.5 及 0.3 cm(汪青春等,2001)。

2.4.2 增强植被碳汇

韩国学者通过耦合 WRF-ARW 模型和 RHESSys 生态水文模型,对保宁大坝流域开展播云效果模拟研究(Yoo et al,2024)。结果表明,播云不仅显著提升年降水量(18%)和径流量(22%),还能在春季增强土壤湿度,进而刺激生态系统的总初级生产力(GPP),并提升全球陆地生态系统碳汇能力。研究同时揭示播云效应与土壤湿度、GPP、NPP 和呼吸作用等存在 1~2 个月的时间滞后,证实植被活动对前期催化效果具有持续依赖性。基于 CASA (carnegie ames Stanford approach) 模型与多源遥感数据, Lee et al(2024) 对保宁大坝流域 2018—2020 年人工增雨带来的 NPP 变化进行了定量评估,进一步研究发现,在干旱背景下,若人工增雨助力前 16 天累计降水量达到 50~100 mm,可使当前时间段内的 NPP 显著改善,平均可带动全年 NPP 提升 3%~4%, 对应单位面积的碳汇的提升为每年 20~26 $\text{gC} \cdot \text{m}^{-2}$ 。若将该效应在韩国森林生态系统中进行外推,年碳积累量的提升可占韩国 2030 年碳减排目标的 1.2%~1.5%。该研究明确揭示了在气候变化与生态系统退化并存的背景下,人工增雨不仅在水资源调控方面具有显著效益,在增强陆地生

态系统碳汇功能与维护生态系统稳定性方面同样展现出重要的生态价值。此外,生态效益的优化还需考量作业时机。对浙江亚热带森林的研究发现,冬季和春季适度增水更有利于土壤有机碳积累,而夏季低温可能会抑制该过程;表征人工增雨作业应遵循“生态需水关键期”原则,需针对不同生态系统物候特征优化增水时机,以提升其生态效益(Cheng et al,2023)。

2.5 经济效益

2.5.1 增雨提升收益

Lachhab(2023)详细评估了美国加利福尼亚州圣巴巴拉郡云催化项目的经济效益,通过成本分析、增水量以及降水-径流转换系数计算得出,人工增雨额外产生的径流平均成本为每英亩增加 1 英尺($1 \text{ ft} = 0.3048 \text{ m}$)深度水量(英亩-英尺)的价格达 5.6 美元。在干旱年份(较干燥的冬季),该成本上升至每英亩-英尺 11.1 美元。对比加利福尼亚州不同用途的水价(每英亩-英尺 45~600 美元),人工增雨的成本明显更低。研究还指出,该成本远低于其他供水技术,如地下水存储(每英亩-英尺 150~250 美元)和海水淡化(每英亩-英尺 700~980 美元),凸显其经济性优势。李玮(2024)利用 2002—2007 年《贵州省统计年鉴》中的农业总产值、人工增雨投入及用水量等数据,基于柯布-道格拉斯生产函数框架,通过多元回归分析测算了人工增水对水资源供给和农业经济增长的贡献率。结果显示,2007 年人工增雨对水资源供给的贡献率为 2.47%,对农业经济增长的贡献率为 4.10%。

2.5.2 防雹减免损失

Knowles and Skidmore(2021)基于固定效应回归模型,采用 1989—2018 年 NDCMP 的数据研究发现,参与 NDCMP 的县,小麦产量平均比未参与的县高 13%,小麦保险损失比率^[3]平均低 0.548%。根据经济学家估算,2008—2017 年,该项目通过减少冰雹损失,降低保险赔付成本,每年为农业部门节省约 690 万美元。研究进一步指出,NDCMP 的净现值(net present value, NPV)介于 2.68~3.43 亿美元之间,其收益成本比高达 36:1~37:1,凸显其卓越的经济性。Bangsund and Hodur(2019)同样评估了 NDCMP 在 2008—2017 年的经济效益,

根据保险数据、作物产量与生长季降雨量关系模型以及作物供应增加对价格的影响等计算得出,该项目使 9 种作物的年均冰雹损失减少约 1.17 亿美元,年均直接经济效益达 2.9922 亿美元,总经济效益达 5.8993 亿美元,年增税收约 610 万美元。对比项目年均成本约 90.9 万美元,其年均直接收益远超成本,对当地经济产生了显著的积极影响。Dessens et al(2016)基于欧洲地区的防雹项目研究发现,法国采用地面 AgI 发生器开展的防雹作业,其成本效益比估计约为 1:24;而在西班牙加泰罗尼亚地区,防雹作业显著降低了冰雹动能(约 47.0%~50%),有效减少了对农业基础设施的破坏,从而节省了修复成本。Gavrilov et al(2013)对塞尔维亚的防雹效益评估表明,1971—2003 年期间,塞尔维亚防雹系统每投入 1 迪纳尔(塞尔维亚货币)可获得 14 倍的回报,塞尔维亚农业、林业和水资源管理部的文件称,仅在 2006 年,防雹作业带来的效益就达 4800 万欧元。

3 问题、挑战与展望

近年来,随着大气探测能力快速提升、云降水数值模式不断发展以及催化技术愈发成熟,对云降水和人工播云机理的认识也在不断加深,人工影响天气的科学基础与作业规范水平显著提升。特别是播云有效物理证据的持续累积与量化效果评估方法的创新发展,为人工影响天气效益评价研究奠定了基础。然而,当前效益评价研究仍处于探索起步阶段。结合上述研究现状,提出以下关键问题、挑战和展望,旨在为效益评价研究的下一步发展方向提供参考和借鉴。

3.1 存在问题

3.1.1 多学科交叉融合的研究范式尚未建立

效益评价是通过对人工影响天气作业产生的综合价值进行系统化、量化评估的过程,需融合大气、水文、农业、生态、环境、经济、社会等多学科方法。然而,当前效益评价研究仍存在学科壁垒严格、跨领域协作不足等突出问题。以人工增雨(雪)的水文经济效益评价为例,气象学领域需要精准评估人工催化作业的影响范围与缓解农业干旱或满足生态需水的有效增水量;水量水文学层面须通过水文模型

^[3] 保险损失比率:指在一定时期内,保险公司的赔款支出总额与同期保费收入总额的比率(%)。

和观测数据来量化增水对地表径流、湖库水位的贡献;经济学视角则要求将水文增益转化为工农业生产与居民生活等效的经济价值增量。该过程涉及多学科深度耦合及复杂应用场景解析,多元化、跨领域的人工影响天气效益综合评价研究范式亟待构建。

3.1.2 规范化的效益评价指标体系有待完善

由于缺乏统一、国际或国内广泛认可的效益评价技术标准、操作规范和方法指南,规范化的人工影响天气作业效益评价指标体系尚未形成。不同领域、不同地区采用的评估方法差异大,导致结果难以横向比较和汇总统计,也影响评估结果的可信度和公信力。由于人工影响天气的最终效益往往是间接的,且受到众多其他自然、经济和社会等多重因素耦合影响,因此精确解耦人工影响天气的贡献份额极其困难,例如专项效益评价需排除其他混杂因素干扰(剔除农业效益中人为灌溉的贡献)。此外效益评价涉及的研究方向多、专业领域广,多学科交叉属性造成指标体系架构复杂,例如综合效益则需整合多场景异质化指标,而难点在于不同指标的权重分配。采用不同的指标设置和分析方法可能导致评估结果存在差异,使得难以获得具有稳健性、一致性、可信度高的评价结论。

3.1.3 系统化的社会效益评价手段仍显薄弱

当前人工影响天气效益评价存在一定的局限性,研究视角较为单一。现有研究多聚焦于农业增产、生态向好等单一领域,较少对灾害防控、碳汇增益、减污增效等多维应用场景开展系统性评估,对民生改善、健康效益、公众满意度等社会影响指标的量化研究则严重不足,导致难以全面衡量人工影响天气作业在不同地区和社会经济条件下的综合效益。此外,缺乏系统性的社会调研机制,特别是对受影响地区有针对性的调查不足,难以真实掌握公众对人工影响天气作业的接受度和满意度。以生态修复型人工增雨(雪)作业为例,人们大多关注增加降水对提升植被覆盖度和生物多样性等方面的影响,但对改善牧民生活质量、促进边境地区繁荣稳定等社会效益却鲜有评估。这种评价的缺失不仅影响了决策的科学性,也阻碍了人工影响天气技术的推广应用。

3.1.4 定量化的效果评估是制约效益评价的关键

得益于气象观测能力的提升(张鹏等,2025),基于卫星、雷达等遥感反演和机载原位探测手段的播云物理响应越来越多被发现,特别是多种观测信号对同一播云现象的交叉印证,可作为人工影响天气作业效果的直接物理证据,极大深化了人们对播云

机理的认识。此外,随着数值模式精度的提高和计算能力的增强(沈学顺等,2025),人工播云效果的数值模拟评估技术取得显著进展。越来越多的催化有效案例已可通过数值模拟实现重现。然而,现有评估方法(如统计分析、物理检验、模式评估等)仍然存在诸多问题。例如部分作业的合理性不足;统计检验结果的显著性和功效不高;播云物理响应的分析多局限于定性层面;数值模式对关键微物理过程的参数化存在经验性假设和简化;单一数据源难以全面反映作业的长期效应和区域性效益。因此,如何科学、准确地判别作业后云降水的定量效果,并将其合理、有效地转化为作业效益,仍然是当前人工影响天气效益评估研究面临的重要难题。

3.2 面临挑战

3.2.1 定量归因复杂

如何将作业贡献进行解耦是人工影响天气效益评价研究面临的重要挑战之一。一方面天气系统的混沌性使得作业效果难以从云降水自然波动中有效分离;另一方面将作业效果转化为具体的生态、经济和社会效益需依赖复杂的模型构建和假设条件。此外,由于生态、气候效益等存在迟滞效应,长期的归因分析一定程度上会稀释人工催化的贡献。

3.2.2 指标多元异构

效益评价涉及领域广泛、指标庞杂,其指标设置会因场景和维度的不同而直接影响评估结果的客观性与可信度。以人工增雨改善草原生态为例,其虽提升草原的水土涵养,但也可能造成伴生鼠类种群增长,引发草场退化风险。单一指标易导致评价结果片面,而多指标体系的权重分配则需结合具体场景进行综合考虑。

3.2.3 结论主观不确定

人工影响天气的作业效益是在定量评估作业效果的基础上计算得到的,本质上是将“物理链”效应转化为“价值链”效益的过程,该计算过程的每个环节均存在不同程度的误差和不确定性,且这些误差和不确定性会在转化过程中传导并放大。此外,作业效益通常受到多种因素的叠加影响,涉及复杂的成本效益分析和价值评估方法,使得评价结果亦存在较大的主观性和不确定性。

3.3 研究展望

3.3.1 构建多元化的综合评价研究体系

数据基础方面,需整合大气、水文、农业、生态、

环境、经济、社会等多源异构数据,运用人工智能技术解决数据碎片化难题,发展智能数据融合方法,构建适配不同场景的“效益评价专用数据集”。评价尺度方面,需拓展空间尺度(单点、区域、全国)并延伸时间尺度(短期、中期、长期),实现效益评价“点-线-面-时间”四维覆盖。评价方法方面,应重点构建融合水文、大气环境、作物生长等多学科领域的人工影响天气耦合模型,通过提升模型的准确性和适配性,从而增强效益评价结果的精准度与可信度,例如将增水量输入水文模型,模拟其对径流过程和水库蓄水的影响,进而耦合经济模型核算综合收益;通过构建“雹灾强度-作物减产-损失调查-保险赔付”的灾害链损失评估模型,量化防雹作业减免的经济损失。评价维度方面,过往研究多聚焦直接经济效益(如农业增产、水电增益等),却忽视了相关利益主体的效益分析(如减少保险赔付、降低救灾支出)以及对成本费用的精细化评估。未来应构建面向不同场景的人工影响天气成本效益综合分析框架,该框架需涵盖生态效益、经济效益、社会效益及风险成本等方面,并统筹考虑直接与间接影响。评价主体方面,推动气象学、统计学、经济学、生态学等学科协同建立统一的人工影响天气效益评价语义体系,规范方法表述、结果解读及不确定性分析标准,同时整合政府决策需求和社会公众意见,构建“科学-政策-公众”三位一体共识机制。确保评价结果兼具科学公信力与社会可接受性。

3.3.2 优化多维协同的效益指标模型

作为人工影响天气效益评价的核心研究方向,构建完善的评价模型与指标体系是提升评价科学性与准确性的关键。在实际评价研究中,各维度可下设多项具体评价指标:例如,经济维度可包括农业增收、发电量增加、灾害损失降低、投入产出比等直接经济效益指标;生态维度可涵盖净初级生产力提升、碳汇增量、土壤湿度变化与植被覆盖度变化等指标;社会维度则可引入公众满意度调查、健康效益评估等社会民生指标。在指标设计时,需重点考量区域特征差异:例如干旱区应侧重水资源增益评估,城市需强化空气质量改善评价,森林带则应突出碳汇功能提升。在计算跨区域和多场景综合效益时,应建立全国统一的效益评价框架,并基于地方实际动态调整指标权重。基于该框架,需着力构建定量化综合评价模型(如耦合水文模型与经济学算法的集成模型),推动单一效益评估向多维度协同评估转变,从而为人工影响天气的科学决策与资源配置提供全

面支撑。

3.3.3 完善社会参与和反馈机制

建立多层次社会参与和反馈机制,是优化人工影响天气社会效益评价、增强技术公信力的关键突破点。通过引入独立的第三方,采用前文提到的多元化方法和指标模型,可以提高评价结果的客观性。此外,建立全周期跟踪的社会调研机制,通过定制化问卷调查常态化收集作业影响区域内群众、行业代表等利益相关方的反馈意见。最后,定期发布涵盖经济、农业、生态、环境和社会效益的综合性效益评价报告。通过完善社会参与机制,既可以增强公众对人工影响天气作业的理解和信任,又能为技术优化提供宝贵的实践参考。

人工影响天气效益评价的未来发展,应着眼于构建更加科学、系统和开放的评估体系,并建立以评价目的为导向的多学科交叉、多领域融合的评价理论框架。长远来看,通过持续优化这一效益评估价值体系,不仅可以提升人工影响天气作业的科学性与精准性,还能为应对全球气候变化、推进生态文明建设等重大战略提供新的技术路径和反馈模式,推进人工影响天气创造更大的社会价值。

致谢:感谢中国气象局“人工影响天气作业效果检验技术”重点创新团队(CMA2022ZD10)和中国气象局人工影响天气中心“人工影响天气效果评估方法研发与应用团队”(WMC2023IT03)对本研究的支持。

参考文献

- 程鹏,陈祺,蒋友严,等,2021.河西走廊石羊河流域近 10 年人工增雨效果检验评估[J].高原气象,40(4):866-874. Cheng P, Chen Q, Jiang Y Y, et al, 2021. Effect evaluation of artificial rainfall enhancement in the Shiyang River Basin of Hexi Corridor in the latest 10 years[J]. Plateau Meteor, 40(4):866-874(in Chinese).
- 德力格尔,汪青春,周陆生,等,2005.1997—1999 年黄河上游玛曲地区人工增雨生态效应的检验[J].高原气象,24(3):442-449. Deli G E, Wang Q C, Zhou L S, et al, 2005. Test of ecological effect of artificial precipitation stimulation of Maqu Region in upper reach of Yellow River from 1997 to 1999[J]. Plateau Meteor, 24(3):442-449(in Chinese).
- 段婧,楼小凤,汪会,等,2020.人工影响天气用碘化银催化剂对区域环境影响的研究进展[J].气象,46(2):257-268. Duan J, Lou X F, Wang H, et al, 2020. Research progress on impact of AgI in weather modification operations on environment in related areas [J]. Meteor Mon, 46(2):257-268(in Chinese).
- 黄东杰,唐巧珍,何满,等,2024.人工增雨对宜昌空气质量影响分析[J].水利水电快报,45(S1):61-64. Huang D J, Tang Q Z, He M, et al, 2024. Analysis on the impact of artificial rain enhancement on air quality in Yichang [J]. Express Water Resour Hydropower Info, 45(S1):61-64(in Chinese).
- 黄彦彬,毛志远,邢峰华,等,2019.海南岛西部山区人工催化暖底积

- 云随机化效果检验[J]. 气象科技, 47(3): 486-494. Huang Y B, Mao Z Y, Xing F H, et al, 2019. Randomized effectiveness evaluation of artificially catalyzing heating-bottom cumulus in mountainous western Hainan Island[J]. Meteor Sci Technol, 47(3): 486-494(in Chinese).
- 雷恒池, 洪延超, 赵震, 等, 2008. 近年来云降水物理和人工影响天气研究进展[J]. 大气科学, 32(4): 967-974. Lei H C, Hong Y C, Zhao Z, et al, 2008. Advances in cloud and precipitation physics and weather modification in recent years[J]. Chin J Atmos Sci, 32(4): 967-974(in Chinese).
- 李玮, 2024. 人工增雨对水资源、农业经济及植被增长的贡献[J]. 农业灾害研究, 14(12): 226-228. Li W, 2024. Contribution of artificial rain enhancement to water resources, agricultural economy and vegetation growth[J]. J Agric Catastrophol, 14(12): 226-228(in Chinese).
- 刘卫国, 陶玥, 周毓荃, 2021. 层状云催化宏微观物理响应的数值模拟研究[J]. 大气科学, 45(1): 37-57. Liu W G, Tao Y, Zhou Y Q, 2021. Numerical simulation of the macro and micro physical responses of stratiform cloud seeding[J]. Chin J Atmos Sci, 45(1): 37-57(in Chinese).
- 毛节泰, 郑国光, 2006. 对人工影响天气若干问题的探讨[J]. 应用气象学报, 17(5): 643-646. Mao J T, Zheng G G, 2006. Discussions on some weather modification issues[J]. J Appl Meteor Sci, 17(5): 643-646(in Chinese).
- 沐贤俊, 2024. 淮南人工增雨改善空气质量对比实验研究[J]. 生态与资源, (7): 25-27. Mu X J, 2024. Comparative experimental study on improving air quality through artificial precipitation enhancement in Huainan[J]. Ecol Resour, (7): 25-27(in Chinese).
- 沈学顺, 苏勇, 李兴良, 等, 2025. 中国业务数值天气预报自主发展中的理论和方法创新[J]. 气象, 51(11): 1293-1320. Shen X S, Su Y, Li X L, et al, 2025. Innovation of theory and methodology in the independent development of operational numerical weather prediction in China[J]. Meteor Mon, 51(11): 1293-1320(in Chinese).
- 孙宝利, 孙可, 张旭, 等, 2022. 人工增雨对缓解阜新市农业干旱的作用[J]. 农业工程, 12(8): 44-50. Sun B L, Sun K, Zhang X, et al, 2022. Effect of artificial precipitation on alleviating agricultural drought in Fuxin City[J]. Agric Eng, 12(8): 44-50(in Chinese).
- 孙擎, 赵艳霞, 张祎, 等, 2025. 基于雷达外推的烤烟人工防雹效益评估方法研究[J]. 气象学报, doi: 10.11676/qxb2025.20250071. Sun Q, Zhao Y X, Zhang Y, et al, 2025. Study on hail suppression benefit assessment on tobacco based on radar extrapolation [J]. Acta Meteor Sin(in Chinese)(in press).
- 王飞, 李集明, 姚展予, 等, 2022. 我国人工增雨作业效果定量评估研究综述[J]. 气象, 48(8): 945-962. Wang F, Li J M, Yao Z Y, et al, 2022. Advances of quantitative evaluation studies of artificial precipitation enhancement in China[J]. Meteor Mon, 48(8): 945-962(in Chinese).
- 汪青春, 周陆生, 周宁芳, 等, 2001. 黄河上游气候因子对天然牧草产量的影响及最佳人工增雨期的选择[J]. 青海气象, (2): 28-31. Wang Q C, Zhou L S, Zhou N F, et al, 2001. Influence of climatic factors on natural forage yield in upper Yellow River Basin and selection of optimal artificial rain enhancement period [J]. J Qinghai Meteor, (2): 28-31(in Chinese).
- 王秋香, 王晓梅, 张春良, 等, 2010. 阿克苏地区雹灾特征及其防雹效益分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 4(6): 6-11. Wang Q X, Wang X M, Zhang C L, et al, 2010. Characteristics of hail damage and benefits of hail suppression in Akesu Area[J]. Desert Oasis Meteor, 4(6): 6-11(in Chinese).
- 王雨曾, 王文乐, 冉永海, 等, 1995. 满城防雹效果的评估[J]. 气象, 21(9): 25-29. Wang Y Z, Wang W L, Ran Y H, et al, 1995. Evaluation of the results of five-year hail suppression in Mancheng, Hebei Province[J]. Meteor Mon, 21(9): 25-29(in Chinese).
- 姚展予, 2006. 中国气象科学研究院人工影响天气研究进展回顾[J]. 应用气象学报, 17(6): 786-795. Yao Z Y, 2006. Review of weather modification research in Chinese Academy of Meteorological Sciences[J]. J Appl Meteor Sci, 17(6): 786-795(in Chinese).
- 曾光平, 吴明林, 林长城, 等, 1993. 古田水库人工降雨效果的综合评价[J]. 应用气象学报, 4(2): 154-161. Zeng G P, Wu M L, Lin C C, et al, 1993. A comprehensive evaluation of the effect of artificial precipitation in Gutian Reservoir Area[J]. Quart J Appl Meteor, 4(2): 154-161(in Chinese).
- 张俊才, 沈延青, 曹光明, 等, 2019. 黄河上游人工增雨效益评估研究及应用[J]. 人民黄河, 41(S2): 1-2, 11. Zhang J C, Shen Y Q, Cao G M, et al, 2019. Evaluation and application of artificial rain enhancement benefits in the upper Yellow River[J]. Yellow Riv, 41(S2): 1-2, 11(in Chinese).
- 张鹏, 陈玉宝, 商建, 等, 2025. 我国天气雷达网和风云三号降水卫星的发展与数据融合应用初探[J]. 气象, 51(11): 1367-1382. Zhang P, Chen Y B, Shang J, et al, 2025. Preliminary study on the development and data fusion application of China's weather radar network and FY-3G precipitation satellite[J]. Meteor Mon, 51(11): 1367-1382(in Chinese).
- 张文煜, 黄颖, 尹宪志, 等, 2021. 邯连山地形云人工增雨(雪)试验观测与研究进展[J]. 气象科技进展, 11(5): 102-116. Zhang W Y, Huang Y, Yin X Z, et al, 2021. Observations and research progress of cloud-seeding (snow) project in Qilian Mountains[J]. Adv Meteor Sci Technol, 11(5): 102-116(in Chinese).
- 张晓苑, 裴子永, 张孟琪, 等, 2024. 天津地区人工增雨(雪)用 AgI 催化剂对环境影响的探讨[J]. 天津科技, 51(7): 105-107. Zhang X Y, Pei Z Y, Zhang M Q, et al, 2024. Discussion on environmental impact of AgI catalyst for artificial rainfall (snow) enhancement in Tianjin Area[J]. Tianjin Sci Technol, 51(7): 105-107(in Chinese).
- 张阳, 2006. 龙羊峡水库库区人工增雨、增水效果评估[D]. 南京: 河海大学. Zhang Y, 2006. Evaluating effects of artificial precipitation and runoff by man of Longyangxia Reservoir[D]. Nanjing: Hohai University(in Chinese).
- 郑国光, 郭学良, 2012. 人工影响天气科学技术现状及发展趋势[J]. 中国工程科学, 14(9): 20-27. Zheng G G, Guo X L, 2012. Status and development of sciences and technology for weather modification[J]. Strateg Stud CAE, 14(9): 20-27(in Chinese).
- 邹纯丽, 2023. 乌兰察布春季干旱对农牧林果的影响及抗旱人工增雨作业个例分析[J]. 智慧农业导刊, 3(15): 61-64. Zou C L, 2023. Effects of spring drought on agriculture, animal husbandry and fruit in Ulanqab and case study of artificial rain enhancement for

- drought resistance[J]. J Smart Agric, 3(15): 61-64(in Chinese).
- Acharya A, Piechota T C, Stephen H, et al, 2011. Modeled streamflow response under cloud seeding in the North Platte River watershed[J]. J Hydrol, 409(1-2): 305-314.
- Bangsund D, Hodur N, 2019. Economic impacts of cloud seeding on agricultural crops in North Dakota[R]. North Dakota State Department of Agribusiness and Applied Economics, North Dakota State University.
- Benjamini Y, Givati A, Khain P, et al, 2023. The Israel 4 cloud seeding experiment: primary results[J]. J Appl Meteor Climatol, 62(3): 317-327.
- Breed D, Rasmussen R, Weeks C, et al, 2014. Evaluating winter orographic cloud seeding: design of the Wyoming Weather Modification Pilot Project (WWMPP)[J]. J Appl Meteor Climatol, 53(2): 282-299.
- Changnon S A, Hewings G J D, 2001. Losses from weather extremes in the United States[J]. Nat Hazards Rev, 2(3): 113-123.
- Cheng X K, Zhou T, Liu S H, et al, 2023. Effects of climate on variation of soil organic carbon and alkali-hydrolyzed nitrogen in subtropical forests: a case study of Zhejiang Province, China[J]. Forests, 14(5): 914.
- Dessens J, Sánchez J L, Berthet C, et al, 2016. Hail prevention by ground-based silver iodide generators: results of historical and modern field projects[J]. Atmos Res, 170: 98-111.
- Dong X B, Zhao C F, Huang Z C, et al, 2021. Increase of precipitation by cloud seeding observed from a case study in November 2020 over Shijiazhuang, China[J]. Atmos Res, 262: 105766.
- Gavrilov M B, Lazić L, Pešić A, et al, 2010. Influence of hail suppression on the hail trend in Serbia[J]. Phys Geogr, 31(5): 441-454.
- Gavrilov M B, Markovic S B, Zorn M, et al, 2013. Is hail suppression useful in Serbia? General review and new results [J]. Acta Geogr Slov, 53(1): 166-179.
- Givati A, Rosenfeld D, 2005. Separation between cloud-seeding and air-pollution effects[J]. J Appl Meteor Climatol, 44(9): 1298-1314.
- Hua S F, Chen B J, He H, et al, 2024. Numerical simulation of the cloud seeding operation of a convective rainfall event occurred in Beijing[J]. Atmos Res, 304: 107386.
- Kim B Y, Cha J W, Jung W, et al, 2020. Precipitation enhancement experiments in catchment areas of dams: evaluation of water resource augmentation and economic benefits[J]. Remote Sens, 12(22): 3730.
- Knowles S, Skidmore M, 2021. Cloud seeding and crops yields: evaluation of the North Dakota Cloud Modification Project [J]. Weather Clim Soc, 13(4): 885-898.
- Korneev V P, Potapov E I, Shchukin G G, 2017. Environmental aspects of cloud seeding[J]. Russ Meteor Hydrol, 42(7): 477-483.
- Ku J M, Chang K H, Chae S, et al, 2023. Preliminary results of cloud seeding experiments for air pollution reduction in 2020[J]. Asia-Pac J Atmos Sci, 59(3): 347-358.
- Lachhab R, 2023. Economic impacts of weather modification on water resources and drought: evidence from California[R]. Minneapolis: AgEcon Search.
- Lee M, Yoo C, Chang K H, 2024. Unexpected contribution of cloud seeding to NPP increase during drought[J]. Hydrol Res, 55(1): 17-32.
- Liu J D, Wang F, Liu D L, et al, 2025. Beneficial analysis of the effect of precipitation enhancement on highland barley production on the Tibetan Plateau under different climate conditions[J]. Climate, 13(5): 83.
- Lu P J, Skidmore M, 2024. Efficacy analysis of cloud seeding program in Kansas agriculture[R]. Minneapolis: AgEcon Search.
- Ma J H, Yoo C, Song S U, et al, 2023. Different effect of cloud seeding on Three Dam Basins, Korea[J]. Water, 15(14): 2555.
- Prasetyo A, Widjiantoro B L, Nasution A M, 2019. Overview of ground-based generator towers as cloud seeding facilities to optimize water resources in the Larona Basin[J]. MATEC Web Conf, 276: 06025.
- Ren X Y, Jin Y L, 2024. Transport pathway of the Ag^+ following artificial precipitation enhancement activities[J]. Heliyon, 10(3): e25299.
- Rosenfeld D, Yu X, Dai J, 2005. Satellite-retrieved microstructure of AgI seeding tracks in supercooled layer clouds[J]. J Appl Meteor, 44(6): 760-767.
- Silverman B A, 2010. An evaluation of eleven operational cloud seeding programs in the watersheds of the Sierra Nevada Mountains[J]. Atmos Res, 97(4): 526-539.
- Simpson J, Simpson R H, Andrews D A, et al, 1965. Experimental cumulus dynamics[J]. Rev Geophys, 3(3): 387-431.
- Wang F, Li Z Q, Jiang Q, et al, 2019. Evaluation of hygroscopic cloud seeding in liquid-water clouds: a feasibility study[J]. Atmos Chem Phys, 19(23): 14967-14977.
- Wang J, Yue Z G, Rosenfeld D, et al, 2021. The evolution of an AgI cloud-seeding track in Central China as seen by a combination of radar, satellite, and disdrometer observations[J]. J Geophys Res Atmos, 126(11): e2020JD033914.
- Wehbe Y, Griffiths S, Al Mazrouei A, et al, 2023. Rethinking water security in a warming climate: rainfall enhancement as an innovative augmentation technique[J]. npj Clim Atmos Sci, 6(1): 171.
- WMO, 2021. WMO atlas of mortality and economic losses from weather, climate and water extremes (1970–2019)[R]. Geneva: WMO.
- Woodley W L, Rosenfeld D, 2004. The development and testing of a new method to evaluate the operational cloud-seeding programs in Texas[J]. J Appl Meteor, 43(2): 249-263.
- Ye S, Liu L, Li J Y, et al, 2023. From rainfall to runoff: the role of soil moisture in a mountainous catchment[J]. J Hydrol, 625: 130060.
- Yoo C, Na W, Chang K H, et al, 2024. Ecohydrological investigation of cloud seeding effect on vegetation activity in the Boryeong Dam Basin, South Korea[J]. Sci Total Environ, 940: 173598.

(本文责编:侯翠梅)