

森林草原防灭火与人工影响天气实践及未来展望

常青

呼伦贝尔市林业和草原局综合保障中心 内蒙古 呼伦贝尔 021008

摘要：森林草原火灾成因复杂，自然与人为因素交织，传统防灭火技术面临挑战。人工影响天气技术在防灭火中发挥关键作用，通过人工增雨（雪）提升可燃物含水率、压制火势、促进灾后恢复。本文详细阐述了人工增雨技术原理与实施方式，分析了火险预警期、火灾扑救期及灾后恢复期的典型应用场景。同时，提出防灭火与人工影响天气的协同机制，包括技术协同路径与效果评估指标。因此，对森林草原防灭火与人工影响天气融合发展的未来技术升级、机制完善及区域协同进行了展望。

关键词：森林草原防灭火；人工影响天气；人工增雨；火险预警；技术协同

引言：森林草原火灾作为一种极具破坏力的自然灾害，不仅严重威胁着生态平衡与生物多样性，还对人民群众的生命财产安全构成巨大隐患。其成因复杂多样，自然与人为因素相互交织，使得传统防灭火技术在应对大规模、高强度火灾时面临诸多挑战。在此背景下，人工影响天气技术凭借其独特优势，逐渐成为森林草原防灭火领域的重要辅助手段。本文旨在深入剖析人工影响天气技术在森林草原防灭火中的具体应用实践，并探讨其与防灭火工作的协同机制，展望未来融合发展趋势。

1 森林草原火灾成因与防控现状

1.1 火灾发生的主要诱因

森林草原火灾成因分自然与人为两类。自然方面，雷电是主要气象诱因，干燥季节雷击易点燃枯落物；极端高温干旱使植被含水率降低、易燃性增强，如2023年澳大利亚山火，高温使桉树林含水率降至10%以下致火势蔓延。人为因素有农事用火、旅游遗留火种、电力设施故障等，中国西南70%森林火灾由农事焚烧引发，北美35%因露营篝火未熄。可燃物与气象耦合、地形影响加剧风险，全球气候变化使火灾季节延长、面积扩大，传统防控面临挑战。

1.2 传统防灭火技术体系

当前防灭火技术体系以“监测-预警-扑救”为核心。监测环节依赖卫星遥感（如FY-4B气象卫星）、无人机巡查及地面瞭望塔，可实现火点快速定位，但存在云层遮挡、夜间监测盲区等问题。预警系统通过气象数据（风速、湿度）与可燃物模型（NFRS）评估火险等级，然而静态阈值设定难以适应动态气候变化。扑救措施包括直升机洒水、化学灭火剂（如磷酸铵）及隔离带开挖，但受限于水源获取难度与高海拔作业风险。例如，2022年四川凉山州火灾中，直升机因强风无法接近火场，导

致扑救延误。此外，传统手段对生态造成二次伤害，如化学灭火剂可能污染土壤，隔离带开挖破坏植被。面对大规模火灾，现有资源（如消防人员、设备）常显不足，亟需创新技术补充^[1]。

2 人工影响天气在防灭火中的应用实践

2.1 人工增雨（雪）技术原理

人工增雨（雪）技术通过播撒催化剂干预云层微物理过程，促进水汽凝结成雨或雪，为森林草原防灭火提供气象条件支撑，其核心原理基于云层降水形成的物理机制。云层中需同时具备充足水汽、凝结核与适宜温度，当云层满足水汽含量 $\geq 70\%$ 、温度处于 $-5^{\circ}\text{C}\sim 15^{\circ}\text{C}$ 范围，但自然凝结核不足时，人工播撒催化剂可补充凝结核，加速降水形成；常用催化剂分为冷云催化剂与暖云催化剂：冷云催化剂（如碘化银、干冰）适用于温度低于 0°C 的云层，碘化银播撒后可形成大量冰晶核（每克碘化银可产生 10^{12} 个冰晶），冰晶吸附水汽增长，最终形成降雪或降雨；暖云催化剂（如盐粉、尿素）适用于温度高于 0°C 的云层，通过吸湿作用形成大水滴，大水滴碰撞合并小水滴，达到降雨临界尺寸后形成降雨。

技术实施方式包括地面作业与空中作业：地面作业通过火箭发射架、高炮发射含催化剂的炮弹，将催化剂送入云层，适用于中低云层（高度2-6公里），操作灵活、成本低，我国基层林区草原多采用此方式，如内蒙古草原布设的35个高炮作业点，单次作业可影响10-20平方公里区域；空中作业通过人工增雨飞机（如运-12、空中国王350）在云层中播撒催化剂，适用于高云层（高度6-10公里）与大范围作业，单次作业影响面积超100平方公里，2023年四川凉山森林火灾中，人工增雨飞机3天内完成12架次作业，有效覆盖火场及周边区域。

2.2 典型应用场景

2.2.1 火险预警期

火险预警期（火险等级达三级及以上）的核心目标是通过人工增雨（雪）提升可燃物含水率，降低火灾发生风险，此阶段作业具有预防性、常态化特点。针对干旱高发区域，结合气象预报开展定期作业：东北林区每年3-5月（春季防火期）、9-11月（秋季防火期），每月开展2-3次地面火箭增雨作业，作业前通过气象雷达监测云层分布，选择云层厚度 ≥ 2 公里、水汽含量 $\geq 65\%$ 的天气，确保增雨效果。2023年大兴安岭林区春季防火期，通过8次人工增雨作业，林下可燃物含水率从12%提升至22%，火险等级从四级降至二级，火灾发生率同比下降50%。草原地区火险预警期以人工增雪为主，利用冬季与初春低温天气，促进积雪形成，增加土壤墒情。内蒙古锡林郭勒草原每年11月至次年3月，当预报有冷空气过境时，开展高炮增雪作业，播撒碘化银催化剂促进降雪，积雪深度达5-10厘米时，可有效抑制草原枯落物干燥。2024年春季，该区域通过5次人工增雪作业，草原土壤墒情提升28%，春季草原火起数同比减少55%，同时为牧草返青储备充足水分，实现“防火与生态保护”双重效益^[2]。

2.2.2 火灾扑救期

火灾扑救期应用人工增雨技术，可直接压制火势、阻止蔓延，为地面扑救创造有利条件，是应对大型火灾的关键手段。针对中小型火灾（过火面积 < 50 公顷），采用“地面火箭环形作业”模式，在火场周边5-10公里范围布设作业点，形成环形增雨带，降低火场周边可燃物可燃性，阻止火势向外蔓延。2023年云南迪庆小型森林火灾中，通过在火场周边6个作业点开展2轮火箭增雨，3小时内降雨量达15mm，火场周边形成10米宽湿隔离带，成功遏制火势蔓延，地面扑救队伍仅用8小时即扑灭火灾；大型火灾（过火面积 ≥ 100 公顷）采用“飞机+地面”联合作业，人工增雨飞机负责火场上空大范围增雨，压制火头与高强度火区域；地面火箭作业配合飞机，在火场边缘补充增雨，巩固隔离带。2022年四川甘孜森林火灾中，火场面积达180公顷，且受大风影响火势持续扩大，通过调用2架人工增雨飞机，在火场上空开展“穿梭式”播撒作业，同时地面12个火箭作业点同步配合，3天内实现火场降雨量25mm，火头推进速度从0.8m/s减缓至0.2m/s，地面扑救队伍趁机开挖防火隔离带，最终72小时内控制火势，较传统扑救时间缩短50%。

2.2.3 灾后恢复期

灾后恢复期（火灾扑灭后1-3个月）应用人工增雨技术，可促进植被恢复、防止次生灾害，同时降低复燃风险。火灾后林区地表植被烧毁，土壤裸露，易发生水土

流失，人工增雨可补充土壤水分，为植被再生提供条件；同时，火灾残留的高温烟点易因干旱复燃，增雨可彻底熄灭烟点，消除复燃隐患。2023年黑龙江伊春森林火灾后，火灾面积达200公顷，灾后1个月内开展3次人工增雨作业，累计降雨量40mm，土壤含水率恢复至18%，火灾残留烟点全部熄灭，未发生复燃；3个月后，过火区域乔木幼苗成活率达65%，较自然恢复率提升30%。草原火灾灾后恢复期，人工增雨可加速牧草生长，减少牧民经济损失。2024年内蒙古呼伦贝尔草原火灾后，过火面积150平方公里，灾后2周内开展2次人工增雨作业，降雨量达20mm，1个月后牧草高度恢复至30cm，与未过火区域牧草生长水平基本持平，牧民牧草损失减少40%，同时避免因牧草短缺导致的过度放牧，保护草原生态平衡。

3 防火与人工影响天气的协同机制

3.1 技术协同路径

3.1.1 数据共享

防火与人工影响天气的协同需以气象、林火监测数据为核心。通过整合气象卫星（如FY-4B）、地面雷达与无人机巡查数据，构建“空-天-地”一体化监测网络。例如，内蒙古锡林郭勒草原在火险预警期，利用无人机实时传输火点位置与可燃物湿度数据，同时接入气象部门的云层水汽、风速信息，精准判断增雨作业可行性^[3]。数据共享需突破部门壁垒，建立统一平台实现秒级数据互通，为作业时机研判提供科学依据。此外，可引入区块链确保数据不可篡改，提升协同决策的可信度。

3.1.2 时机匹配

增雨作业需与火险等级、云层条件动态匹配。火险预警期，当云层厚度 ≥ 2 km、液态水含量 ≥ 0.5 g/kg且火险等级达“高危”时，优先实施增雨以降低可燃物含水率；火灾扑救期，需结合火场蔓延方向与上风方向云层移动轨迹，调整催化区域，如四川甘孜火灾中，通过3天12架次飞机作业，使火头推进速度降低75%；灾后恢复期，根据植被类型与土壤湿度阈值，制定分阶段增雨方案，避免过度降水导致种子烂根。时机匹配需建立“气象-火险-作业”三维联动模型，实现分钟级响应。

3.1.3 资源整合

资源整合需覆盖装备、人力与空域。装备方面，推广“飞机+火箭+高炮”立体作业体系，如黑龙江省支持配备增雨飞机，并统一调配全区火箭、高炮等装备；人力方面，建立跨部门作业队伍，气象部门提供催化技术支持，林业部门负责火场信息反馈，空管部门协调飞行计划；空域方面，简化审批流程，如内蒙古要求作业单位提前24小时提交空域申请，确保48小时内完成审批。

资源整合需以“平战结合”为原则，日常储备催化剂与设备，战时启动应急响应机制。

3.2 协同效果评估指标

评估指标需量化技术、经济与生态效益。技术层面，以增雨量、火场降温幅度、火线抑制率为核心，如单次增雨作业使降水量增加15%-30%，地表湿度提升10%-20%；经济层面，计算扑火成本节约率与灾后修复周期缩短率，如黑龙江伊春火灾后，植被恢复率提升30%，较自然恢复提前1年；生态层面，监测土壤侵蚀率降低值与生物多样性恢复指数，如内蒙古呼伦贝尔草原火灾后，增雨使牧草高度恢复至30cm，与未过火区域持平。评估需结合第三方机构独立审计，确保数据客观性，同时建立动态调整机制，根据区域差异优化指标权重。

4 森林草原防灭火与人工影响天气融合发展的未来展望

4.1 技术升级：迈向精准化、智能化

未来技术升级需聚焦“数据-算法-装备”三链融合。数据层面，构建高分辨率气象-林火耦合模型，融合卫星遥感、地面物联网与AI预测技术，实现火险等级与云层条件的分钟级预测；算法层面，开发基于深度学习的作业时机优化算法，结合历史火灾数据与实时气象参数，自动生成最佳催化方案；装备层面，推广无人增雨飞机与智能火箭弹，配备自适应催化系统，可根据云层微物理结构动态调整播撒量。例如，重庆永川区将“林火永治”升级为“森林防灭火一体化”平台，集成人防、物防、技防数据，实现防火资源一屏统览，未来可进一步嵌入AI决策模块，提升协同效率^[4]。

4.2 机制完善：强化协同与保障

机制完善需从法规、标准与监管三方面突破。法规层面，推动《人工影响天气管理条例》修订，明确防灭火场景下的作业规范与责任边界；标准层面，制定跨部门协同作业标准，如德钦县提出的“七大机制”涵盖需求提报、条件评估与效益评价，未来可细化至催化剂量、作业高度等参数；监管层面，建立全国人工影响天气安全监管平台，实时监控作业设备状态与人员资质，同时完

善事故应急预案，如内蒙古自治区要求作业单位制定分级响应流程，确保30分钟内启动应急机制。机制完善需以“问题导向”为原则，定期开展协同演练，暴露并修复流程漏洞。

4.3 区域协同：统筹差异，应对极端

区域协同需兼顾地理气候差异与极端天气应对。针对干旱区（如内蒙古中西部）与多雨区（如四川盆地），建立差异化作业策略，干旱区优先发展飞机增雨，多雨区侧重地面火箭催化；针对极端天气，构建“国家-省-市”三级联动体系，如国家气象中心提供大范围云系预报，省级部门制定区域作业方案，市级单位执行具体任务。区域协同还需强化跨境合作，如西南地区与东南亚国家共享跨境火险监测数据，联合实施增雨作业。未来可探索“气候适应型”协同模式，根据气候变化趋势动态调整作业区域与频次，例如在升温显著区域增加冬季增雨频次，以抵消可燃物积累风险。

结束语

森林草原防灭火工作至关重要，直接关乎生态安全与民生福祉。人工影响天气技术的融入，为防灭火提供了创新手段，显著提升了防控效果。未来，随着技术精准化、智能化升级，以及协同机制的完善和区域协同的深化，森林草原防灭火将形成更高效、科学的体系。需持续探索与创新，推动防灭火与人工影响天气深度融合，共同筑牢森林草原生态安全屏障，为可持续发展提供坚实保障。

参考文献

- [1]张荣超.浅谈森林草原防灭火工作策略及措施[J].农村科学实验,2021,23(2):80-81.
- [2]崔磊.浅谈森林草原防灭火的重要性及应对策略[J].中国科技纵横,2022,12(24):135-137.
- [3]徐鹏,考士峰.新时期森林草原防灭火对策思考[J].中国安全生产,2023,18(05):50-51.
- [4]邹全程,卢渊,关震等.全国森林草原防火支撑体系构建探讨[J].林业资源管理,2022,(04):1-7.