

森林火灾后生态修复技术集成与恢复效果评价

王海宁

陕西省太白林业局 陕西 宝鸡 721600

摘要:近年来,全球气候变化加剧、极端天气频发以及人类活动干扰等因素导致森林火灾发生频率和强度显著上升,对生态系统结构与功能造成严重破坏。如何科学、高效地开展灾后生态修复,已成为全球生态学、林学及环境科学领域的重要课题。本文系统梳理了森林火灾后生态系统的受损特征,归纳了当前主流的生态修复技术体系,并在此基础上提出多尺度、多目标、多技术融合的“技术集成”模式。同时,构建了涵盖植被恢复、土壤健康、生物多样性、水文调节及碳汇功能等维度的综合评价指标体系,用于科学评估修复成效。本文强调因地制宜、动态调整与长期监测在生态修复中的核心地位,并对未来研究方向提出展望,以期为我国乃至全球森林火灾后生态修复实践提供理论支撑与技术参考。

关键词:森林火灾;生态修复;技术集成;恢复效果;评价体系;生态系统服务

引言

森林是陆地生态系统重要部分,在维持全球碳平衡、调节气候等方面作用不可替代。但全球变暖叠加人为火源管理不善,森林火灾成为威胁其安全的重大自然灾害。据FAO统计,全球每年因火灾损失森林面积超3500万公顷,直接经济损失数十亿美元,间接生态损失难估量。我国是森林火灾高发国,西南、华南及东北林区火灾频发且破坏性强。2020年四川西昌、2022年重庆北碚等地特大森林火灾,造成人员伤亡、财产损失,还导致林地退化、水土流失加剧、生物栖息地破碎化,生态系统服务功能受损。灾后科学高效开展生态修复,是生态重建的迫切需求,也是实现“双碳”目标与生态文明建设的关键。传统生态修复多采用单一手段,难应对火灾后复杂生态退化格局。近年来,“技术集成”理念渐成共识,即根据多种因素组合修复技术。同时,科学评价修复效果、避免“重建设、轻评估”也是提升修复质量的核心问题。本文旨在梳理森林火灾后生态系统受损机制,整合修复技术,构建技术集成框架,建立效果评价体系,为提升我国生态修复科学性与实效性提供依据与指导。

1 森林火灾对生态系统的破坏特征

1.1 植被系统的损毁

火灾直接烧毁地表植被,包括乔木、灌木、草本及枯落物层。高强度火灾可导致树冠层完全焚毁,形成“火烧迹地”。不同树种对火的耐受性差异显著:针叶林(如马尾松、云南松)因富含油脂更易燃烧,常遭受毁灭性打击;而部分阔叶树(如栎类)具有较厚树皮,具备一定抗火能力。火灾后,先锋物种(如禾本科、菊

科植物)迅速入侵,但若缺乏有效干预,可能演替为低价值灌草丛,阻碍森林原生群落恢复。

1.2 土壤理化性质恶化

高温燃烧导致土壤有机质大量分解,氮素挥发损失可达50%以上。同时,土壤团聚体结构破坏,孔隙度下降,容重增加,渗透性减弱。更为严重的是,火灾后土壤表面易形成疏水层(water-repellent layer),极大降低入渗率,加剧地表径流与侵蚀风险^[1]。此外,灰烬短期内可提高土壤pH值和钾、钙等元素含量,但长期来看,养分循环中断将导致土壤贫瘠化。

1.3 生物多样性丧失

火灾直接导致动物死亡或迁移,昆虫、两栖类及小型哺乳动物尤为脆弱。土壤微生物群落结构发生剧变,有益菌(如固氮菌、菌根真菌)数量锐减,影响养分转化与植物共生。植物种子库亦遭破坏,尤其是依赖土壤种子库更新的物种恢复困难。栖息地破碎化进一步限制物种扩散与基因交流,降低生态系统韧性。

1.4 水文与碳循环功能削弱

植被覆盖减少导致蒸腾作用下降,区域小气候趋于干燥。地表裸露加剧雨水冲刷,泥沙入河量增加,水质恶化。森林碳汇功能短期内转为碳源——燃烧释放大量CO₂,加之植被死亡与土壤呼吸增强,形成正反馈效应,加剧气候变化。

2 森林火灾后生态修复技术体系

2.1 工程措施:稳定立地条件

在火灾后的初期阶段,首要任务是控制次生灾害风险并稳定受损立地。针对坡度较大的区域,可修建鱼鳞坑、水平阶或谷坊等小型水土保持工程,有效拦截地表

径流,减缓土壤侵蚀速率。对于存在滑坡或崩塌隐患的边坡,采用格构梁、生态袋或植生毯等柔性加固技术,既能提供物理支撑,又有利于植被附着生长。此外,针对火灾后普遍存在的土壤疏水层问题,可通过浅层翻耕(深度控制在10厘米以内)予以破除,恢复土壤入渗能力,但需谨慎操作,避免深层扰动引发新的水土流失。

2.2 植被恢复技术

植被恢复是生态修复的核心环节,需根据火烧强度与立地条件灵活选择策略。在轻度火烧迹地或邻近天然林区域,封山育林是一种经济高效的自然恢复方式,依靠周边林分的种子传播与萌蘖更新能力,逐步实现群落重建。而在中重度火烧区,自然更新能力有限,需辅以人工措施。直播造林适用于土壤条件尚可的区域,可选用耐旱、速生且具萌蘖能力的乡土树种如栓皮栎、桤木等进行点播或条播;植苗造林则更适合立地条件较差的地段,采用带土球的容器苗能显著提高成活率,并注重乔、灌、草的合理配置以构建复层结构^[2]。对于交通不便的大面积迹地,飞播造林结合无人机精准作业可大幅提升效率。此外,引入豆科等先锋植物不仅可快速覆盖地表,还能通过生物固氮作用改良土壤,为后续演替创造有利条件。

2.3 土壤修复技术

土壤功能的恢复是植被重建的基础。可通过施用腐熟有机肥、秸秆覆盖或添加生物炭等方式补充有机质,改善土壤结构与持水能力。其中,生物炭因其高比表面积、强吸附性及化学稳定性,在固定养分、缓解酸化、促进微生物活性方面表现出独特优势。同时,接种丛枝菌根真菌(AMF)或固氮菌剂可重建植物-微生物共生关系,增强植物对磷、氮等关键养分的吸收效率。此外,应基于土壤检测结果,科学调控pH值与养分平衡,例如在碱性过强区域适量施用硫磺,在氮磷匮乏区精准施肥,避免盲目投入造成二次污染。

2.4 生物多样性促进措施

生态修复不应仅关注植被覆盖,更应着眼于生物多样性的整体恢复。实践中应尽可能保留未燃或轻度燃烧的“生态岛”,这些残存斑块可作为物种避难所和扩散源,加速区域生物多样性的重建。通过营造异质性生境——如局部保留枯立木供鸟类栖息、设置灌丛岛吸引传粉昆虫——可显著提升景观复杂性与生态功能。此外,在大面积修复区之间规划建设野生动物廊道,有助于连接破碎化的栖息地,促进种群间的基因流动与生态过程恢复,从而增强整个生态系统的稳定性与适应力。

2.5 社区参与与智慧管理

生态修复的可持续性离不开社会支持与现代技术赋能。引导当地社区参与苗木培育、抚育管护等环节,不仅能降低人力成本,还可增强居民的生态保护意识与归属感,形成长效共管机制。在技术层面,应充分利用卫星影像(如Sentinel-2、Landsat)、遥感、地理信息系统(GIS)与无人机等手段,定期获取植被覆盖度、土壤湿度、火险等级等关键参数,实现修复过程的动态监测与智能决策^[3]。更重要的是,应将修复区域纳入区域森林防火预警体系,通过火险预测、可燃物管理等措施,防范二次火灾风险,确保修复成果得以长期维持。

3 技术集成模式构建

3.1 空间尺度集成

技术集成需充分考虑空间异质性,实现从宏观到微观的协同布局。在流域或景观尺度上,应以水土保持和生物廊道构建为核心,统筹上下游、左右岸的修复需求,保障生态过程的连续性。在小流域或林班尺度,需结合坡向、坡度、土壤类型等立地因子进行分区施策,例如阳坡侧重配置耐旱树种,阴坡则注重保水与遮荫。在样地或斑块尺度,则强调精细化操作,如在侵蚀沟布设生态袋并配合植草,在火烧核心区采用容器苗结合覆盖物保墒,实现措施与微环境的高度匹配。

3.2 时间序列集成

生态修复是一个长期演替过程,技术应用需遵循时间逻辑。火灾后1-2年内,重点在于应急抢险、控制侵蚀和快速植被覆盖,以遏制生态退化趋势;3-5年进入中期恢复阶段,应着力推进植被建群、土壤改良和群落结构优化,提升系统稳定性;5年以后则转向长期引导,通过间伐、补植珍稀树种等措施,推动群落向近自然状态演替,并强化其碳汇、水源涵养等生态系统服务功能。这种分阶段、递进式的集成策略,有助于实现修复目标的有序达成。

3.3 功能目标集成

现代生态修复已超越单纯的植被恢复,转向多功能协同。修复方案应统筹生态安全(如防灾减灾)、生产功能(如非木质林产品供给)、生态服务(如碳汇、水质净化)与文化价值(如景观美学、自然教育)等多重目标。例如,在生态脆弱区优先保障水土保持功能,在生态旅游区兼顾景观美化与生物多样性,在碳汇重点区则强化高固碳树种的配置。通过功能目标的有机融合,使修复成果更好地服务于国家生态文明建设与“双碳”战略。

4 恢复效果评价体系构建

4.1 评价目标维度

表1 评价目标维度

维度	核心目标
植被恢复	群落结构重建、物种多样性提升、覆盖度恢复
土壤健康	有机质含量、团聚体稳定性、酶活性、微生物多样性
水文调节	径流削减率、泥沙拦截量、地下水补给能力
生物多样性	物种丰富度、关键种回归、食物网完整性
碳汇功能	净生态系统生产力（NEP）、土壤碳储量变化
社会经济	社区参与度、就业带动、生态产品价值实现

4.2 关键指标与监测方法

为实现客观评价，需建立可量化、可监测的指标体系。植被状况可通过Shannon-Wiener多样性指数、遥感反演的NDVI植被覆盖度及乔木胸径/树高生长量进行评估；土壤健康则依赖实验室测定的总有机碳、水稳性团聚体比例、脲酶与磷酸酶活性，并结合PLFA技术分析微生物群落结构；水文效应可通过径流小区观测、泥沙收集器计量及同位素示踪技术评估；生物多样性监测可采用样线法调查鸟类与兽类，陷阱法采集昆虫，并探索eDNA技术检测土壤隐存生物；碳汇功能则借助BIOME-BGC模型模拟或涡度相关法实测净生态系统生产力。

4.3 评价方法

评价应采用多元方法相互验证。对比分析法通过设置修复区、未火烧对照区及自然恢复区，揭示修复措施的相对有效性；时间序列分析则追踪同一区域修复前后的动态变化，识别恢复趋势与拐点；综合指数法可将多维指标加权整合为生态恢复指数（ERI），便于横向比较^[4]。此外，还可采用当量因子法或市场价值法对生态系统服务功能进行货币化评估，为生态补偿与绿色金融提供依据。

5 讨论与展望

5.1 关键挑战

当前森林火灾后生态修复仍面临多重挑战。气候变化带来的干旱与高温事件频发，可能抵消修复成效，要求修复系统具备更强的气候适应性。同时，修复周期长、投入大，而资金保障与长效机制尚不健全，易导致

“重建轻管”。此外，缺乏统一的技术标准与验收规范，使得修复目标模糊、效果评估主观，制约了行业整体水平的提升。

5.2 未来方向

未来应深化“近自然修复”理念，尊重生态演替规律，减少高强度人为干预。推动“数字孪生”技术在修复规划中的应用，通过虚拟仿真预判不同方案的长期效果。探索“生态银行”等市场化机制，将修复成果转化为可交易的生态资产，激发社会资本参与。更重要的是，加强生态学、土壤学、水文学、社会学等多学科交叉融合，构建系统性、全链条的修复知识体系，为全球森林生态安全贡献中国智慧。

6 结语

森林火灾后的生态修复绝非简单的植树种草，而是一项涉及多要素、多环节的复杂系统工程。若秉持“一刀切”思维，难以应对火灾后复杂多变的生态状况。本文提出的“多尺度—多阶段—多功能”集成模式，搭配涵盖生态、水文、碳汇及社会维度的综合评价体系，能精准考量不同尺度、阶段和功能需求，为科学制定修复方案、动态优化管理策略筑牢根基。未来，需强化长期监测、完善政策保障、推动技术创新，达成“山水林田湖草沙”一体化保护修复，切实筑牢国家生态安全屏障。

参考文献

- [1]周会娥,方志平.森林火灾后生态修复策略研究[J].森林防火,2025,43(01):166-169.
- [2]王翠华,起跃昌.基于生态系统服务能力提升的森林火灾灾后生态修复模式[J].生态与资源,2024,(12):60-62.
- [3]贺志龙,官渊奇,周亚旭,等.基于生态系统服务能力提升的森林火灾灾后生态修复模式研究——以凌云山生态修复工程为例[J].安徽农业科学,2024,52(15):110-114.
- [4]张颖.森林火灾的影响与生态恢复措施[J].中国林业产业,2024,(07):102-103.