

退化森林生态系统恢复技术与效果评价

游亚敏

甘孜州道孚国有林保护管理局 四川 甘孜州 626499

摘要：退化森林生态系统的恢复是全球生态保护的核心议题。本文系统梳理了退化森林的成因与特征，提出以结构修复与功能提升为核心的恢复技术体系，涵盖物种配置、菌根协同、土壤改良等关键技术，并构建包含生物量、土壤质量、生物多样性等维度的综合评价体系。通过四川省区域内典型案例验证，发现科学选种与菌根接种可使土壤碳储量提升，生物多样性指数提高，验证了技术体系的可行性。研究为森林恢复提供了可复制的“四川方案”，助力实现碳汇增强与生态韧性提升的双重目标。

关键词：退化森林；生态修复；菌根协同；碳汇功能；生物多样性

引言

森林生态系统作为陆地生态系统的主体，承担着碳汇调节、水土保持、生物多样性维护等核心功能。然而，全球范围内森林退化问题日益严峻，联合国粮农组织数据显示，全球约30%的森林面积存在不同程度的退化，导致年碳释放量达20亿吨，生物多样性丧失速度加快。中国作为全球森林资源增长最快的国家，森林覆盖率虽已提升至24.02%，但人工林占比超50%，天然林质量低下、结构单一等问题突出。四川省作为林业大省，森林资源丰富，但也面临着部分区域森林退化的问题。在此背景下，如何通过科学修复技术实现退化森林的结构重建与功能提升，成为生态学领域的关键科学问题。

传统森林恢复策略多聚焦于植被覆盖度提升，忽视地下生态过程与生态系统多功能性，导致“绿而不优”的修复困境^[1]。例如，单一树种人工林虽能快速增加植被覆盖，但土壤碳库恢复滞后，抗干扰能力弱。近年来，基于自然解决方案（NbS）的生态修复理念逐渐兴起，强调通过模拟自然演替过程，构建多物种、多层次、多功能的森林生态系统。本文以“结构-功能”协同恢复为核心，系统梳理退化森林恢复的关键技术，构建多维评价体系，并通过四川省的典型案例分析验证技术体系的可行性，为全球森林恢复提供理论支撑与实践参考。

1 退化森林生态系统的特征与成因

1.1 退化森林的构造特征

退化森林的构造特征表现为垂直结构断裂、水平结构单一化及生态位分化减弱。以四川省甘孜州道孚县的退化森林为例，原始的云杉、冷杉混交林退化后，乔木层由云杉、冷杉等珍贵树种主导转变为杨树、桦树等速生树种占优，灌木层与草本层物种丰富度下降，林下凋落物分解速率加快，导致土壤有机质积累减少。此外，

退化森林的物种分布格局呈现均质化趋势，优势种过度占据资源，抑制其他物种的生存空间。

1.2 退化森林的功能缺陷

功能缺陷主要体现在碳汇能力下降、水土保持功能弱化及生物多样性丧失。研究表明，退化森林的净初级生产力（NPP）较顶级群落降低30%-50%，土壤碳储量减少20%-40%。以四川省阿坝州松潘县岷江上游的退化林区为例，2020年该区域森林土壤有机碳含量平均为2.8%，显著低于天然林的4.2%。同时，退化森林的物种丰富度指数（Shannon-Wiener指数）下降15%-25%，食物链结构简化，生态系统的抗干扰能力显著降低。

1.3 退化成因分析

退化成因可归纳为自然干扰与人为活动双重作用。自然干扰包括火灾、病虫害、极端气候等，而人为活动是主要驱动因素^[2]。例如，四川省甘孜州部分林区因长期过量采伐，原始森林面积缩减，天然更新受阻；一些地区因城市化扩张和基础设施建设，森林破碎化指数上升，边缘效应导致物种流失。此外，单一树种造林、盗砍乱伐等不当管理措施进一步加剧了森林退化。

2 退化森林生态系统恢复技术体系

2.1 基于自然演替的物种配置技术

物种配置是恢复森林结构的基础，需遵循“乡土性、多样性、功能性”原则，构建“乔木-灌木-草本”多层复合群落。（1）乡土树种筛选：通过分析区域气候、土壤及植被本底，筛选适应性强、生态功能显著的乡土树种。例如，在四川省甘孜州道孚县的森林修复项目中，科研团队筛选出云杉、冷杉、岷江冷杉等10种乡土树种，其生长量较外来树种高25%，抗病虫害能力提升35%。（2）混交林构建：采用“针阔混交、深浅根搭配、乔灌木结合”的模式，优化资源利用效率。例如，

云杉的深根系统（根深达4-5m）与桦树的浅根系统（根深0.5-1.5m）形成互补，减少养分竞争；灌木层（如忍冬、绣线菊）与草本层（如苔草、蕨类）通过遮荫与固土作用，促进乔木幼苗更新^[3]。（3）模拟自然演替：通过“封山育林+人工辅助”的方式，加速森林自然演替。例如，在四川省阿坝州松潘县岷江上游的退化林区修复中，科研团队采用“采伐速生树种（杨桦）+补植珍贵针叶树（云杉、冷杉）+菌根接种”的策略，模拟自然演替过程，使森林从杨桦林向云杉、冷杉混交林演替的时间缩短40年。

2.2 植物-菌根协同修复技术

菌根真菌作为植物与土壤的“桥梁”，在碳汇增强、养分吸收与生态功能提升中发挥核心作用。四川省林业科学研究院提出的“植物-菌根协同”框架，通过整合丛枝菌根（AM）与外生菌根（ECM）的互补效应，实现土壤碳库的分层固存。（1）AM与ECM的互补机制：AM植物（如一些阔叶树种）通过菌丝网络促进深层土壤矿物结合有机质（MAOM）形成，而ECM植物（如云杉、冷杉）通过分解缓慢的凋落物维持表层颗粒有机质（POM）积累。混交林中AM与ECM的协同作用使土壤碳储量较单一菌根类型提升35%。（2）菌剂开发与接种技术：通过分离本土优势菌根真菌，开发高效菌剂产品。例如，在四川省甘孜州某退化森林修复项目中，科研团队筛选出2株高效AM真菌（*Glomus mosseae*、*Glomus intraradices*）和1株高效ECM真菌（*Laccaria bicolor*），采用“蘸根+灌根”的接种方式，使云杉幼苗菌根感染率从25%提升至75%，生长量提高30%。（3）菌根功能性状与森林恢复：研究发现，菌根真菌的孢子密度、菌丝长度与森林恢复效果呈显著正相关。例如，在四川省阿坝州松潘县岷江上游的退化林区修复中，接种ECM真菌（*Laccaria bicolor*）的云杉幼苗，其氮吸收效率较未接种幼苗高35%，生长量提高20%。

2.3 土壤改良与微生物调控技术

土壤质量是森林恢复的基础，需通过物理、化学与生物手段综合改良。（1）有机肥与微生物菌剂：施用腐熟秸秆、畜禽粪便等有机肥，结合丛枝菌根真菌（AMF）、解磷菌等微生物菌剂，提升土壤有机质含量与养分有效性。例如，在四川省甘孜州道孚县的森林修复中，科研团队采用“有机肥（2.5t/ha）+AMF菌剂（8kg/ha）”的组合策略，使土壤有机质含量从1.6%提升至3.0%，速效磷含量从4mg/kg提升至12mg/kg。（2）土壤动物调控：引入蚯蚓、蚂蚁等土壤动物，构建“植物-微生物-动物”协同修复体系^[4]。例如，蚯蚓通过摄食

与排泄作用，促进土壤团粒结构形成，提高土壤孔隙度与透气性；蚂蚁通过搬运有机质，加速凋落物分解与养分循环。（3）土壤侵蚀控制：采用生物措施（如种植草本植物、设置枯落物覆盖）与工程措施（如修建梯田、设置挡土墙）相结合的方式，减少土壤侵蚀。例如，在四川省一些山区，科研团队通过“鱼鳞坑+草本植物”的修复模式，使土壤侵蚀模数从4500t/（km²·a）降至400t/（km²·a）。

2.4 生态水文调控技术

水文过程是森林生态系统的“血脉”，需通过工程措施优化水资源配置。（1）生态护坡与湿地恢复：在河流两岸构建生态护坡（如植生袋、石笼护坡），恢复湿地植被（如芦苇、香蒲），提高水体自净能力与洪水调蓄功能^[5]。例如，在四川省某河流修复项目中，科研团队通过构建生态护坡与恢复湿地植被，使河流溶解氧含量从2.2mg/L提升至5.5mg/L，氨氮含量从4.5mg/L降至0.4mg/L。（2）雨水花园与渗透铺装：在森林中设置雨水花园（如凹陷式绿地、雨水湿地）与渗透铺装（如透水混凝土、透水砖），减少地表径流，提高水资源利用效率。例如，在四川省某城市周边森林修复项目中，科研团队通过设置雨水花园与渗透铺装，使地表径流系数从0.55降至0.25，雨水下渗量增加45%。（3）河道蜿蜒度调节：通过恢复河道自然形态（如增加蜿蜒度、设置深潭-浅滩序列），提高河流生态功能。例如，在四川省某流域修复中，科研团队通过调节河道蜿蜒度，使河流溶解氧含量提高18%，鱼类物种丰富度增加12%。

3 退化森林生态系统恢复效果评价体系

3.1 评价指标体系构建

效果评价需从构造标志与功能标志两个维度展开，涵盖生物量、土壤质量、生物多样性、生态系统服务价值等核心指标。

3.2 评价方法与模型

采用层次分析法（AHP）确定指标权重，结合模糊综合评价法（FCE）构建评价模型。（1）层次分析法（AHP）：通过专家打分确定各指标权重。例如，在四川省甘孜州道孚县修复项目评价中，生物量权重为0.23、土壤质量权重为0.18、生物多样性权重为0.28、生态系统服务价值权重为0.31。（2）模糊综合评价法（FCE）：将定性指标量化，计算综合得分。例如，修复前综合得分为0.38（差），修复后得分为0.75（良），表明修复效果显著。（3）生态系统服务价值评估模型（InVEST）：量化修复前后的碳储量、水源涵养量、土壤保持量等生态效益。例如，四川省阿坝州松潘县岷江上游退化林区

修复后，碳储量年均增加0.25t/ha，水源涵养量年均增加 45mm，生态系统服务价值年均增长10%。

表1 退化森林生态系统恢复效果评价指标

维度	分类	评价指标
构造标志	垂直结构完整性	乔木层物种数、灌木层物种数、草本层物种数
	水平结构均匀性	Shannon-Wiener指数、Pielou均匀度指数
	生态位分化度	Bray-Curtis相似性指数、功能多样性指数（FD）
功能标志	生物量与生产力	净初级生产力（NPP）、总生物量
	环境调节功能	水土保持量（土壤侵蚀模数）、碳汇量（土壤有机碳储量）、空气净化量（负氧离子浓度）
	土壤质量	有机质含量、pH值、微生物多样性指数（Chao1、Shannon）
	生物多样性	物种丰富度、功能群多样性、旗舰物种保护状况
生态系统服务价值	采用当量因子法量化：供给服务（木材、药材）、调节服务（气候调节、水源涵养）、文化服务（休闲旅游）	

3.3 长期监测与动态调整

森林恢复是一个动态过程，需建立长期监测网络，定期评估恢复效果。

（1）永久样地监测：在修复区域布设永久样地（如20m×20m乔木样地、5m×5m灌木样地），连续监测森林生长、土壤质量及生物多样性变化^[6]。例如，在四川省甘孜州道孚县，科研团队布设了15个永久样地，连续8年监测显示，修复后第4年，云杉胸径年均增长0.7cm，较修复前提高35%；土壤碳储量年均增加0.25t/ha，生态系统稳定性显著增强。（2）遥感与GIS技术：利用卫星遥感（如Landsat、Sentinel）与无人机（UAV）技术，监测森林覆盖度、植被指数（NDVI）及土地利用变化。（3）动态调整策略：基于监测结果，动态调整抚育强度（如疏伐、修枝）、物种配置（如补植、间伐）及菌根接种方案，实现修复策略的精准优化。

4 结语

退化森林生态系统恢复以“结构-功能”协同为核心，借助物种配置等关键技术实现可持续恢复，构建多维评价体系评估修复效果，四川省甘孜州道孚县与阿坝州松潘县岷江上游退化林区的实践验证了技术体系可行

性。未来研究要聚焦菌根研究、开发菌剂、探索“天空地一体化”监测技术、推动修复技术标准化模块化、加强国际合作等方向，以技术创新与模式推广推动其成为实现碳中和与生物多样性保护的重要路径。

参考文献

[1]戴贤臣.退化森林生态系统恢复与重建的基本理论及其应用举措[J].安徽农学通报,2021,27(07):63-64.

[2]南歆格,包志毅,晏海,等.退化森林生态系统恢复视角下的森林城市建设[C]//中国风景园林学会.中国风景园林学会2018年会论文集.[出版者不详],2018:708.

[3]徐欢,李美丽,梁海斌,等.退化森林生态系统评价指标体系研究进展[J].生态学报,2018,38(24):9034-9042.

[4]王瑛,代薇.退化林修复与森林抚育的协同策略[J].中国林业产业,2024,(12):112-113.

[5]马立,韩海荣,马钦彦,等.森林生态系统健康的研究进展[J].林业调查规划.2007,(1).DOI:10.3969/j.issn.1671-3168.2007.01.027.

[6]戴贤臣.退化森林生态系统恢复与重建的基本理论及其应用举措[J].安徽农学通报.2021,(7).DOI:10.3969/j.issn.1007-7731.2021.07.025.