北京林业大学学报
JOURNAL OF BEIJING FORESTRY UNIVERSITY

低效林及其改造研究进展

毕华兴 魏曦 梁文俊 赵丹阳

Research progress on degraded forest and its restoration

Bi Huaxing, Wei Xi, Liang Wenjun, Zhao Danyang

引用本文:
毕华兴, 魏曦, 梁文俊, 赵丹阳. 低效林及其改造研究进展[J]. 北京林业大学学报, 2026, 48(7):1–11. doi: 10.12171/j.1000–1522.20260086
Bi Huaxing, Wei Xi, Liang Wenjun, Zhao Danyang. Research progress on degraded forest and its restoration[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2026, 48(7):1–11. doi: 10.12171/j.1000–1522.20260086

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20260086

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

全球森林碳汇功能评估研究进展
Review on the evaluation of global forest carbon sink function
北京林业大学学报, 2022, 44(10): 1–10. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20220242

塞罕坝北曼甸林场森林生态功能等级评价
Grade evaluation of forest ecological function for Beimandian Forest Farm of Saihanba, Hebei Province of northern China
北京林业大学学报, 2023, 45(1): 89–98. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20210373

树种多样性对森林死木微生物分解及碳循环的影响研究进展
Research progress of impacts of tree species diversity on microbial decomposition of forest deadwood and carbon cycling
北京林业大学学报, 2024, 46(11): 1–9. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20240233

石门国家森林公园夏季不同林分保健功能综合评价
Comprehensive evaluation of healthcare functions among different stands in Shimen National Forest Park of southern China in summer
北京林业大学学报, 2021, 43(6): 60–74. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20200343

林火干扰对林分结构及植被更新影响研究进展
Research progress on effects of fire disturbance on stand structure and vegetation regeneration
北京林业大学学报, 2025, 47(1): 156–162. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20240029

古建筑木结构无损检测内容与研究进展
Content and research progress in nondestructive testing of wooden structures in ancient architecture
北京林业大学学报, 2024, 46(4): 1–13. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20240015

DOI:10.12171/j.1000−1522.20260086

低效林及其改造研究进展

毕华兴[1,2,3,4] 魏 曦[5,6] 梁文俊[5,6] 赵丹阳[1,7]

（1. 北京林业大学水土保持学院，北京 100083；2. 林木资源高效生产全国重点实验室，北京 100083；3. 山西吉县森林生态系统国家野外科学观测研究站，北京 100083；4. 水土保持国家林业和草原局重点实验室，北京市水土保持工程技术研究中心，林业生态工程教育部工程研究中心，北京林业大学，北京 100083；5. 山西农业大学林学院，山西 太谷 030801；6. 森林资源高效培育山西省重点实验室，山西 太谷 030801；7. 国家林业和草原局产业发展规划院，北京 100013）

摘要:我国低效林普遍存在结构单一、生态功能退化、蓄积量与碳汇能力下降、病虫害频发及综合效益低等问题，严重制约国家生态安全屏障构建及“双碳”战略目标的实现。因此，低效林改造已成为推动森林生态系统高质量发展与多功能协同提升的关键举措。本文系统综述了我国低效林及其改造的研究进展，基于对低效林类型划分、成因机制及空间分布差异的深入分析，构建了以“更新复壮、结构优化、功能提升”为核心的技术路径。评述了遥感监测、人工智能、大数据、虚拟仿真及数字孪生等新兴技术在低效林改造全链条中的应用现状，从生态效益、碳汇增量及社会经济价值等多维度建立了改造成效评价体系。研究成果旨在为提升我国森林生态系统多功能性、维持系统韧性与稳定性提供理论支撑，为服务国家生态安全与绿色低碳发展战略提供重要参考。

关键词：低效林；改造技术；森林质量提升；功能评价；生态恢复

中图分类号：S75 **文献标志码**：A **文章编号**：1000−1522(2026)07−0001−11

引文格式：毕华兴，魏曦，梁文俊，等. 低效林及其改造研究进展［J］. 北京林业大学学报，2026，48(7)：1−11. Bi Huaxing, Wei Xi, Liang Wenjun, et al. Research progress on degraded forest and its restoration［J］. Journal of Beijing Forestry University, 2026, 48(7): 1−11.

Research progress on degraded forest and its restoration

Bi Huaxing[1,2,3,4] Wei Xi[5,6] Liang Wenjun[5,6] Zhao Danyang[1,7]

(1. School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;
2. State Key Laboratory of Efficient Production of Forest Resources, Beijing 100083, China;
3. Ji County Station, Chinese National Ecosystem Research Network (CNERN), Beijing 100083, China;
4. Key Laboratory of Soil and Water Conservation of National Forestry and Grassland Administration, Beijing Engineering Research Center of Soil and Water Conservation, Engineering Research Center of Forestry Ecological Engineering of Ministry of Education, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;
5. College of Forestry, Shanxi Agricultural University, Taigu 030801, Shanxi, China;
6. Shanxi Key Laboratory of Efficient Cultivation of Forest Resources, Taigu 030801, Shanxi, China;
7. Industry Development and Planning Institute, National Forestry and Grassland Administration, Beijing 100013, China)

Abstract: Existing degraded forest in China generally face multiple challenges, including monotonous structure, degraded ecological functions, declining biomass and carbon sequestration capacity, frequent pest infestations, and reduced comprehensive benefits, which severely constrain the construction of national ecological security barriers and the achievement of “dual carbon” strategic goals. Therefore, degraded forest

收稿日期: 2026−02−23 **修回日期:** 2026−05−15

基金项目: 国家重点研发计划（2022YFF1300401、2024YFD2200504）。

第一作者: 毕华兴，教授，博士生导师。主要研究方向：水土保持和林业生态。Email: bhx@bjfu.edu.cn 地址：100083 北京市海淀区清华东路 35 号北京林业大学水土保持学院。

责任作者: 魏曦，教授，博士生导师。主要研究方向：水土保持和林业生态。Email: weixi860826@163.com 地址：030801 山西省晋中市太谷区铭贤南路 1 号山西农业大学林学院。

本刊网址: https://j.bjfu.edu.cn; https://journal.bjfu.edu.cn

restoration has become a key measure to promote high-quality development and multifunctional synergistic improvement of forest ecosystems. This paper systematically reviews the research progress in degraded forest restoration in China. Based on an in-depth analysis of classification, causal mechanisms, and spatial distribution differences of degraded forest, it constructs a technical pathway centered on “regeneration and rejuvenation, structural optimization, and functional enhancement”. Additionally, it provides a critical review of current applications of emerging technologies such as remote sensing monitoring, artificial intelligence, big data, virtual simulation, and digital twins across the entire restoration chain. Furthermore, a comprehensive evaluation system for restoration effectiveness was established from multiple dimensions, including ecological benefits, carbon sequestration increments and socio-economic value. The research findings aim to provide theoretical support for enhancing the multifunctionality of China's forest ecosystems, maintaining system resilience and stability, and offer important references for serving national ecological security and green, low-carbon development strategies.

Key words: degraded forest; restoration technology; forest quality improvement; functional evaluation; ecological restoration

低效林(degraded forest)是指受人为或自然因素影响，林分结构和稳定性失调，林木生长发育迟滞，系统功能退化或丧失，导致森林生态功能、林产品产量或生物量显著低于同类立地条件下相同林分平均水平，不符合培育目标的林分总称[1]。国家“十五五”规划纲要《草案》提出以“双碳战略”为牵引，筑牢生态安全屏障，增强绿色发展动能。然而，当前我国低效林普遍存在生态功能衰退、蓄积量和碳储量降低、病虫害频发及生态与经济效益显著减弱等问题[2]，不仅影响森林质量提升和生态系统功能的发挥，也制约着“双碳”目标的实现，威胁着生态安全屏障的构建[3]。因此，全面深入了解我国低效林现状、系统科学推进低效林改造、有效提高森林质量与生态功能成为当前林业高质量发展的核心任务。

我国大规模造林始于 20 世纪 50—70 年代，80 年代后，“三北防护林工程”和“长江流域防护林体系建设工程”等重大生态工程相继实施，在有效控制水土流失、提高生物多样性、改善区域生态环境质量等方面成效显著。21 世纪以来，特别是“退耕还林工程”和“天然林保护工程”等一系列生态工程的实施使得我国森林覆盖率从新中国成立初期的不足 9.00% 提高到 25.09%，林草覆盖率超 56.00%[4]。但由于造林初期未充分考虑立地条件限制，且多采用单一速生树种和密植高产模式，造成部分地区人工林质量偏低、生态稳定性较差[5]。因此，虽然我国森林面积不断增加，但抚育和优化不足，导致部分人工林正面临逐渐退化的困境[6]；部分天然次生林也由于人为破坏而出现退化趋势。低效林地生态脆弱、土地退化严重、森林碳汇能力降低、生态系统恢复难度大等问题日益凸显[7]。因此，应着力推进低效林的有效改造，在实现林分质量提升和生态功能优化的基础上，进一步促进我国生态安全格局的完善及森林碳汇能力的跃升。

低效林按起源分为低效次生林和低效人工林 2 大类，其形成和改造既受自然条件制约，也受长期人为经营模式的深刻影响。低效林改造的措施主要包括间伐抚育、补植补播、调整结构、更换树种、嫁接复壮、封山育林等措施[8]。国外研究[3,7]重点关注气候干旱、土壤贫瘠、病虫害侵袭、外来物种入侵、极端气候事件(火灾、风倒)、长期单一树种纯林经营、过度采伐等自然和人为因素对低效林的影响，国际主流的低效林改造策略从单一的林木生产力提升逐渐转向系统性的多目标生态修复和多元化技术创新。而前人[9]研究实践发现，我国低效林改造更是存在诸多挑战。首先，低效林生态恢复与水资源利用矛盾显著，尤其是干旱、半干旱地区改造措施不当易加剧地下水位下降和生态系统用水竞争，因而威胁长期生态稳定性。其次，林分结构单一问题突出，部分地区长期营造杨树(*Populus* spp.)、桉树(*Eucalyptus* spp.)、油松(*Pinus tabuliformis*)等速生纯林，致使林分抗逆性降低、病虫害频发、生物多样性衰减等问题[10]，融合新兴智能技术优化低效林改造模式成为当前研究的热点和难点。第三，低效林改造前后的生态功能和社会经济效益量化评估体系缺失，投入产出收益与激励机制尚不健全[11]。第四，低效林及其改造的监测评价体系不完善，缺乏统一监测数据库和标准化评价指标，改造成效难以横向对比与纵向核验[12]。第五，气候变化适应性研究滞后，树种选择与未来生境适配性不足[13]。在“双碳”目标、乡村振兴和生态文明建设的背景下，低效林提质增效不仅是生态修复的迫切需求，更是保障国家生态安全和推进绿色低碳发展的核心战略任务[14]。

综上所述，系统梳理我国低效林及其改造研究现状、总结经验不足，并提出未来研究方向对于构建科学的森林质量提升体系具有重要的理论与实践价值。因此，本文综合分析我国相关研究成果，重点探讨低效林的类型、成因、空间格局演变、改造策略和技术发展等，旨在为我国森林高质量发展、生态功能和碳汇能力提升提供系统化的理论支持。

1　低效林现状

我国低效林具有分布广泛、类型多样、成因复杂的特点。因此低效林改造需要针对不同类型、成因和空间分布的低效林实施精准的改造措施，以符合自然生态过程中的林分演变规律、最大程度地发挥林分改造效益。

1.1　低效林类型

低效林类型划分主要依据林分的生态结构、形成途径、功能属性与经营目的等特征。基于低效林结构和功能多样性、成因复杂性、立地适应性等显著特征[8,15]，我国低效林主要分为 4 类[1]（表 1）。

次生林长期受到采伐、放牧、过度垦殖等干扰，部分存在不同程度的群落结构简化或紊乱、更新困难、生物多样性下降、生态功能低下问题[16]，表现为轻度和重度等不同程度的退化次生林。在东北、秦岭、淮河地区、云贵高原等山地丘陵带分布较多，其生态修复的需求迫切[17]。以物质产品为主的经营不当人工林中，用材林类低效林由于长期过度追求短周期采伐和速生高产，忽视了土壤养分循环与林分更新，存在结构单一、养分退化、生产力低下、木材品质下降等问题[6,18]，如华南地区的桉树纯林[19]、兴安落叶松（*Larix gmelinii*）人工林[20]，以及华北的杨树速生林[21]等；经济林类低效林存在老化、经济产出下降影响农民收入、制约生态效益提升的问题；竹（*Phyllostachys* spp.）林等特殊低效林分布在江南、西南等适生地区[22]，往往由于树种组成单一和长期粗放经营而导致功能较弱[23]。而以生态防护功能为主的经营不当人工林主要分布在“三北”地区、黄土高原、长江上中游、东北西部干旱区、南方低山丘陵和沿海地区[24]。由于造林时过度强调速生和高密度，且多采用单一树种（如樟子松 *Pinus sylvestris* var. *mongolica*、杨树、沙棘 *Hippophae rhamnoides* 等）的配置[25]，部分生态林因密度过高或物种不适应导致生长停滞、生态功能达不到预期[26]。此类低效林分结构趋于简单、根系发育浅、抗逆性差，难以发挥应有的防风固沙、水源涵养等功能[27]，部分防护林甚至出现了“小老头树”现象[28−29]。严重受害人工林在全国各地均有分布，存在严重病虫害或受到各类灾害

表 1　低效林类型划分及评判标准

Tab. 1　Classification and evaluation criteria for degraded forest types

类别	评判标准
轻度退化次生林	具备以下所有条件的次生林： 1.主要由实生乔木组成，林分生长量或生物量较同类立地条件平均水平低30%～50% 2.目的树种占林分树种组成比例的40%以下，生长发育受到抑制 3.天然更新的优良林木个体数量少（< 40 株/hm^2） 4.土壤肥力和生态服务功能基本正常
重度退化次生林	具备以下所有条件的次生林： 1.林木90%多代萌生，林相残败，结构失调 2.缺乏有效的进展演替树种，天然更新不良，具有自然繁育能力的优良林木个体数量 < 30 株/hm^2 3.林木生长缓慢或停滞，树高、蓄积生长量较同类立地条件林分的平均水平低50%以上 4.土壤肥力和水土保持功能明显下降
经营不当人工林	以物质产品为主要经营目的的人工林，具备以下条件之一的： 1.生长缺乏活力，树高、蓄积生长量较同类立地条件林分的平均水平低30%以上 2.林木生长停滞，林分郁闭度低于0.4以下，无培育前途 3.林相残败，目的树种组成比重占40%以下，预期商品材出材率低于50%
	4.薪炭林经过2次以上樵采、萌芽生长能力衰退 5.经济林产品连续3年产量较同类立地条件林分的平均水平低30%以上 6.经济林林木或品种退化，产品类型和质量已不适应市场需求
	以生态防护功能为主要经营目的的人工林，符合下列条件之一的： 1.林分郁闭度低于0.4以下的中龄林以上的林分 2.林下植被盖度低于30%的林分 3.断带长度达到林带平均树高的2倍以上，且缺带总长度占整条林带长度比例达20%以上，林相残败、防护功能差的防护林带 4.受中度风蚀，沙质裸露，林相残败的防风固沙林
严重受害人工林	具备以下条件之一的人工林： 1.发生检疫性林业有害生物的林分 2.受害死亡木（含濒死木）株数占单位面积株数40%以上的林分 3.林木生长发育迟滞，出现负生长的林分

注：此表引自文献[1]。

影响较大，已基本丧失生态功能和经济价值，还会因自然灾害情况、林分健康状况等发生动态变化[30]。

1.2 低效林成因

低效林的成因可归纳为自然因子制约与人为经营失衡 2 大类(表 2)，包括物种组成、立地条件、经营管理和社会经济政策等多个维度[8, 31]。

低效林的形成是自然因素脆弱性与人为影响因素在特定时空尺度上相互交织、级联放大的耦合作用结果。低效林成因多样、机制复杂，在改造过程中需要精准把握每类低效林的关键制约因素和改造目标导向，基于不同低效林的具体情况量化各因子影响权重，科学构建具有针对性的改造措施体系，最大程度发挥低效林改造效果。

1.3 低效林空间分布

1990—2020 年的历次全国森林资源清查结果表明，我国低效林呈现“面积略减、质量提升、空间迁移明显”的趋势[32]，且东北、华北、西北等不同区域的低效林特征差异显著(表 3)。东北地区天然林质量逐步恢复；黄土高原地区通过实施封山育林和人工更新等恢复措施，林分结构明显改善；但南方部分速生商品林区由于高强度经营，低效问题加剧。随着国家生态工程的持续实施，低效林空间分布也在发生结构性迁移——部分边际土地实现生态恢复，但在城市扩张、基础设施建设等过程中，空间分布分散的新低效林地正在形成，表明低效林改造是森林可持续经营的长期过程。低效问题加剧的林区和城市基建新形成的低效林是当前研究的局部热点区域。

2 低效林改造

低效林改造是提升森林质量、增强生态功能、支撑“双碳”目标和生态文明建设的重要手段[33−36]。当前我国低效林改造工作逐步形成了以政策引领、施策科学、技术集成与智能化支撑为核心的低效林改造体系。

2.1 低效林改造策略

政策层面，国家和地方出台了一系列森林质量提升的政策规划和行业标准，包括《土地管理法实施条例》、《全国生态环境建设规划(2000—2050 年)》

表 2 低效林成因

Tab. 2 Causes of degraded forest formation

成因		影响机制
自然要素	土壤贫瘠与地力衰退	土壤酸化、质地粗糙、有机质含量低、养分失衡的生态脆弱带，难以满足林木生长的养分需求。林木根系生长受限、抗逆性下降，逐渐形成“地力贫—林木弱—更新难”的恶性循环
	水分胁迫	干旱半干旱区降雨稀少，蒸散大，水资源承载不足，造林密度过高极易引发水分竞争，导致枯梢、早衰等现象；气候变暖趋势下，部分南方树种北移后适应性不足，也造成低效化
	地形地貌制约	坡度大、立地不均的区域水土流失严重，导致林木根系难以固定，林分结构易遭破坏
	立地条件差	部分高寒或石漠化地区的气候、土壤、水分等立地条件极差，造林成活率低、更新困难
	极端气候和自然灾害	干旱、风灾、冻害、洪涝、热害、火灾等，加剧了低效林的形成与扩散
	病虫害	长期单一树种造林使林分抗逆性减弱，病虫害暴发频发，如东北落叶松毛虫(*Dendrolimus superans*)、南方松材线虫病(*Bursaphelenchus xylophilus*)、竹林病害等造成大面积林分退化
人为影响	造林地与树种选择不当	单一树种速生林模式广泛采用，种苗质量参差、选址不合理，“造林易、经营难”是突出瓶颈。多以速生高产为导向，忽视了立地条件与树种适应性的匹配。在干旱地区大面积种植杨树、桉树等高耗水树种，短期成活快但长期衰退明显
	林分结构与密度不合理	过度密植、缺乏择伐与抚育。高密度造林导致林木间竞争加剧，养分、水分供给不足；单层结构林分难以形成稳定的生态系统，抗风险能力差。部分人工林未及时间伐或更新，演变为低效林
	经营管理与抚育不足	部分造林后期管护投入不足，缺乏科学的抚育、补植、更新制度，致使林分长期处于封闭状态，生长潜力无法释放
	放牧、采伐扰动频繁	农牧交错区域内农耕、放牧等扰动频率高导致林分退化
	经济激励与政策约束不足	林业投资回报周期长、经济效益低，地方政府与经营者缺乏持续改造的积极性；部分低效林权属分散、经营主体缺乏合作机制，制约了集约化经营与改造投入

表 3 不同区域的低效林特征

Tab. 3 Characteristics of degraded forest in different regions

区域	低效林特征
东北天然林区	为天然针叶退化次生林，受采伐历史与病虫害影响显著的严重受害人工林等
华北与黄土高原区	典型为防护林低效化，造林密度过大、树种单一，水分胁迫显著
南方丘陵与喀斯特地区	以桉树、杉木(*Cunninghamia lanceolata*)、马尾松(*Pinus massoniana*)人工林为主，存在过度经营、土壤退化和生态功能下降等问题
西北干旱与农牧交错带	为防护林或经济林退化型等经营不当人工林，受降水稀缺与风蚀影响，林木早衰、成活率下降

（1998）、《全国重要生态系统保护和修复重大工程总体规划（2021—2035 年）》、《森林质量精准提升工程实施方案（2021—2030 年）》、《“十四五”林业草原保护发展规划纲要》、低效林改造技术规程（LY/T 1690—2017）等，构成了多层级、多维度的低效林改造政策保障和行业导向。

资金支持层面，中央和地方财政设立了专项资金，建立起多元化投入渠道，如三北、长江流域、退化天然林区等重点工程区中央投资，通过生态补偿、碳汇交易和生态公益林补贴等机制引导社会资本参与，探索“林下经济 + 低效林改造”融合模式，实现生态与经济效益双赢，也构建起低效林改造的保障体系。

技术层面，低效林改造思路从单一造林转向系统经营，从数量增长转向质量提升。根据林分结构特点、功能定位与区域差异，我国低效林改造形成了以“目标导向、分类施策、因地制宜、持续经营”为核心的总体策略。其中，目标导向引领低效林改造的施策方向和经营导向，要按照不同区域的低效林特点确定不同类型的改造核心目标，以便形成因地制宜的改造模式，主要包括木材产出为主的经营导向、生态服务功能导向、碳汇功能导向和多目标导向 4 种（表 4）。

结合我国地理跨度大、气候差异显著的特点，低效林改造要根据上述不同目标导向、立地条件、林分类型与区域功能分类分区逐步开展，形成差异化改造方案。东北地区以天然次生林恢复为重点，侧重木材产出和生态服务功能；华北—黄土高原地区以防护林改造为主，侧重水源涵养、土壤保持、生物多样性保护等生态功能；南方地区注重速生人工林结构优化和混交改造，侧重木材产出、林下经济发展和碳汇等功能；西北干旱区强化水分平衡与生态适应性，注重水源涵养和土壤保持功能，防止水耗型低效林扩大。

2.2　低效林改造技术

目前，低效林改造技术形成了“更新、优化、提升”3 大路径（表 5），涵盖生物学、生态学、经营学多学科以及与信息化智能化等新技术融合，逐步进入“数字化、智能化、精准化”新阶段。例如，遥感（RS）、无人机（UAV）与地理信息技术（GIS）实现低效林分布、林分结构和改造成效的动态监测。人工智能与（AI）大数据分析（bigdata）在林分分类、碳储量估算、病虫害识别及经营优化等领域应用，可对低效林进行自动识别与动态评估，实现精准经营决策支持。虚拟仿真（virtual simulation）模拟不同改造方案对生态系统结构与功能的影响，指导经营决策。数字孪生技术（digital twin technology）用于优化间伐强度与混交比例[37]。碳汇监测与生态评估模型（carbon sink monitoring and ecological assessment model）结合遥感数据与实地监测，实现低效林改造前后碳汇变化的动态评估。

我国低效林改造技术体系日趋完善，涵盖采用新兴技术深度融合的低效林识别与监测，3 大改造路径融合的林分内外乔灌草各层经营管理和枯落物管理，以及精准的生境营造、森林水文土壤提升等内容。核心特征体现为目标导向、技术多元与智能协同，逐步实现从“被动修复”向“主动经营”的根本转变。

2.3　低效林改造成效评价

低效林改造成效评价内容主要包括生态效益、碳汇与气候调节效益、经济与社会效益、风险等。其中，生态效益体现在森林结构优化、生物多样性恢复、

表 4　基于目标导向的低效林改造模式

Tab. 4　Restoration models for degraded forest based on target orientations

目标导向	改造模式	适用区域
木材产出为主	通过改变树种、调整调密度、施肥抚育等措施提升生产力： （1）结构优化、择伐补植 （2）混交林营造 （3）长周期经营与近自然林业	速生丰产林区和商品林基地，如兴安落叶松人工林、华南桉树人工林等
生态服务功能	适当引入乡土树种，将现有纯林更新为异龄复层混交林，改善林分结构和生态稳定性，强化土壤保持与水源调节功能，提升生物多样性保护效能： （1）封育保护、促进天然更新 （2）水源保护林修复 （3）生物多样性提升	水源涵养林、防护林、生态公益林等区域
碳汇功能	延长轮伐期、优化树种结构、促进混交与天然更新，提高碳储量和碳固定速率： （1）提高蓄积与碳密度 （2）引入碳信用与生态产品价值评估	适用于双碳背景下各类林分的碳汇提升工程
混合目标	“生态 + 经济 + 社会”多目标模式：各类目标融合，兼顾生态保护、产业发展与社会就业： （1）南方地区：“混交林 + 林下经济”模式 （2）北方地区：“防护林 + 碳汇”模式	不同区域多目标导向的林分改造

表 5 低效林改造技术路径、方法与应用

Tab. 5 Restoration technology path, method and application of degraded forest

改造路径		改造方法与应用
林分更新技术	更新改造	在东北、南方地区，采用择伐结合人工补植方式促进更新，伐除劣质林木、促进天然或人工更新，恢复林分生产力；在西北防护林区和南方退化人工林地，对退化严重、空株率高的林地进行更替、补植、复壮，恢复群落结构与群落密度
	天然林恢复	在东北、南方山区的天然林地，采取封山育林、择伐、天然更新促进恢复
林分结构优化技术	间伐与抚育	在东北、华北、黄土高原地区，对病虫害木进行卫生伐，对干扰木进行合理间伐，调整林分密度，改善光照与养分分配，促进优势树种生长，提高林木生长量[36]
	混交林改造	在南方马尾松人工纯林中引入阔叶树，采用异龄、异种混交方式，提高群落抗逆性，增加生态系统稳定性，增加碳储量
	立体结构优化	各地区引入乔灌草复合模式，构建“多层、多功能”生态系统，提升林下生物多样性与土壤肥力
林分质量提升技术	土壤改良与地力恢复	条件具备的地区，通过施用有机肥、生物炭、菌根接种等措施改善土壤理化性质，恢复地力
	病虫害综合防治	采用“生态防治 + 生物控制”策略，如利用天敌昆虫控制松毛虫群体，减少化学农药依赖
	水分调控与生态用水管理	在干旱区推广“低密度 + 高覆盖”造林模式，实现林分与水资源的协调利用
	经果林提质增效	果业主产区的经济林和果园，进行嫁接改良、修剪、水肥一体化。在西南、南方条件适宜的天然和人工林地，进行林下种植、林下经济等立体经营

注：此表引自文献[1, 34−35]。

生态系统服务功能提升等方面，评价低效林改造后林分结构、物种组成与空间配置的改善、林地土壤优化程度、水土流失防治效果、对微气候和区域水文循环的调节、生态栖息地的供给和环境改善、洪涝干旱等缓解以及生态系统功能的恢复效果等。碳汇与气候调节效益评价体现为低效林改造后生物量提升、林分碳汇持续期延长、林分碳释放风险降低和气候调节能力提高等效果。经济社会效益评价木材产出和非木质林产品供给、林下经济和生态产业、生态资本转化、生态旅游、碳汇交易和生态补偿等新型生态经济模式和经济发展状况，以及促进就业、增加收入、提升区域防护体系的稳定性与抗灾能力等社会效益。风险评价涉及上述生态、社会经济和技术政策等层面的风险识别、评价、权重和等级划分以及风险防控策略等内容。要基于不同区域的具体低效林改造项目有针对性地进行风险耦合机制、定量化、区域性以及长期风险跟踪等，还可与智能决策融合应用来完善低效林改造成效评价体系。

根据不同区域的低效林特征，结合我国生态系统保护和修复重大工程“三区四带”布局和要求[38]，近年来各区域持续开展卓有成效的低效林改造，进展如下。

（1）东北地区。针对东北森林带内天然林退化、采伐和病虫害影响显著的低效林，在天然林保护工程等综合治理和应用多功能导向的改造下，东北地区森林的林分结构和生产力、水源涵养、土壤肥力、生物多样性和碳汇等功能得到系统提升[39]。林分生长和结构方面，东北大小兴安岭低效林改造后生长量提高 15%[40]，如红松（*Pinus koraiensis*）+ 白桦（*Betula platyphylla*）、日本落叶松（*Larix kaempferi*）+ 色赤杨（*Alnus sibirica*）等针阔混交改造后林分生产力明显提升，林分郁闭度提高 10% ~ 25%，林下植被多样性指数增长 25% 以上[41]。生态效益方面，枯落物蓄积量和持水量等水文功能、土壤肥力指标均优于未改造林地，全氮储量增加 2.91 Mg/hm^2[42]。碳汇效益方面，改造后表层土壤有机碳储量与林分碳增量均有较大增幅和增速[43]。经济社会效益包括改造后森林蓄积量增加带来的直接经济收益、碳汇和林下经济收益等，如大小兴安岭和五大连池市的改造，产值实现亿元级突破；改造活动创造的就业机会也有可观的社会效益[44]。值得关注的是，改造过程中可能发生地力衰退、病虫害加剧、物种入侵等问题，增加了生物入侵及生态安全风险的不确定性，需对潜在风险保持警惕。

（2）华北−黄土高原地区。华北−黄土高原地区包括“三区四带”中的黄河重点生态区（含黄土高原生态屏障）和北方防沙带[38]，针对其防护林低效化、水分胁迫显著、“小老头树”现象突出的问题，实施了退耕还林（草）、三北防护林及低效林改造等工程。生态效益方面，“头木作业”、间伐和针叶树种混交等改造方式能有效缓解“小老头树”问题[45]，森林覆盖率提升（如山西省三北工程区提升为 18.56%，2023）、土壤侵蚀模数显著减少、水土流失综合治理度大幅提升[46]。碳汇效益方面，近 20 年黄土高原退耕面积达 39 065 km^2，其中近 1/4 转为森林，退耕地总固碳量达 21.77 Tg[47]。经济社会效益方面，文冠果等木本油料林进入盛果期后亩均效益良好、山区合作社造林机制带动了逾 11 万贫困人口增收脱贫[48]。但也存在不可忽视改造风险，如高达 90% 的人工林区土壤水分亏缺严重甚至形成土壤干层、碳汇提升

与水资源消耗之间存在显著的权衡关系[49]。因此，该区域的低效林改造需审慎平衡植被恢复中的水资源约束，探索可持续性恢复路径。

（3）南方丘陵与喀斯特地区。南方丘陵与喀斯特地区大多属于“三区四带”中的南方丘陵山地带，存在桉树、杉木、马尾松等人工林过度经营、土壤退化和生态功能下降等突出问题。针对这些问题和该区气候特点，区域内各地采用了综合改造措施取得了多维效益。生态效益方面，林窗干扰对物种多样性提升有正向驱动，改造后地上生物量和林下灌草覆盖度分别提高 15% 和 30% 以上，土壤有机质和氮磷钾含量分别提升 10% ~ 140%，侵蚀量减少，地表径流水溶解氧饱和度增大[50]。碳汇与气候调节效益方面，低效杉木林、马尾松林等实施补植或套种阔叶经济树种改造措施后，土壤有机密度、碳储量和林分总碳汇量比纯林提高约 3 倍[51]；南方地区县域内松林改造项目测算到 2060 年累计可实现碳汇增量约 260 万 t [52]，可见碳汇效益增量显著。经济社会效益方面，典型改造区如江西、四川等地的木材和林下经济产值逐年提升[53]，低效林改造在促进林业产权流转、社会资本投入及公共生态治理协同方面也积累了宝贵经验[54]。风险方面，西南喀斯特地区的岩土组构差异所导致的土壤养分制约，以及碳汇效益与经济发展之间的区域权衡矛盾，是该区域深化低效林改造质量的症结[55]。

（4）西北干旱与农牧交错带。西北干旱与农牧交错带属北方防沙带，针对该区防护林或经济林退化型等经营不当人工林存在的林木早衰、成活率下降问题，开展了大规模防风固沙和植被恢复等低效林改造。生态效益方面，陕西、山西、甘肃、宁夏、青海、内蒙古等地大力实施防风固沙与植被恢复措施，达到新增土壤保持量、节约水资源等目的，其中生物菌剂、微生物肥料等新材料使植被存活率提高，有效遏制了荒漠化进程[56]。碳汇与气候调节效益方面，改造措施可直接新增碳汇量、固碳潜力提升达 9.37 Mt /a[57]。经济社会效益方面，低效林改造项目在内蒙古、甘肃、青海等地带动上万名农牧民阶段性就业、创造数亿元以上劳务收入。同时，该区低效林改造有增汇成本高企、生态安全脆弱性、人工生态林地的自我更新存在缺陷、植树加剧土壤干化等风险。

（5）其他地区。其他地区的低效林改造也有一定成效。如西藏拉萨通过智能灌溉、乡土树种筛选等科技创新手段使营造林成活率超过 85%，引导农牧民群众参与造林绿化及销售苗木增收超 16 亿元，撬动约 20 亿元社会资本参与国土绿化[58]，还可通过碳汇交易实现碳减排并增加收益。长江干热河谷区的低效林改造项目可吸纳超 1 万户本地农户参与造林管护实现就地增收[59]。风险方面，改造后还可能存在林分结构简单、树种组成单一、株间竞争激烈、植被分布不均、水源涵养功能不强等问题，需要重点考虑生态效益与区域可持续发展的长效协同问题。

由此可见，低效林改造成效评价是衡量改造效果的关键环节，不仅能体现森林生态系统结构与功能的恢复程度，也反映了区域生态安全与绿色经济发展的综合效益。然而目前，我国不同地区、不同改造类型现有的低效林改造成效评价体系不统一，指标权重不平衡，且缺乏统一的评价标准与量化指标体系，这无疑会降低低效林改造成效评价结果的准确性，影响林业部门相关政策的制定，制约我国低效林改造与森林质量提升的可持续发展。未来，需要在建成低效林改造长期样地与监测网络、实现多源信息融合的数据共享基础上，建立基于生态大数据和人工智能算法的跨尺度、跨区域成效评价平台，实现从林分生长、生态结构、功能服务到碳汇效益的多维度智能分析与可视化展示；制定统一的低效林质量评价标准与分级分区管理规范，为全国范围内的低效林改造成效评价提供量化参考与制度基础。

3　低效林改造的发展方向与思考

3.1　调和林分改造与水资源承载力的矛盾，坚持生态优先与多目标协同

人工造林在“植被恢复—水资源”矛盾突出的干旱和半干旱地区，易造成林分生长不良、水分亏缺、地下水位下降等问题[60]。例如，黄土高原、华北山地及西南喀斯特地区部分低效林改造时未充分考虑水资源承载力，出现“以水换绿”不可持续问题；林分改造时高密度造林导致水分胁迫，从而抑制树木生长，引发次生退化等现象。因此，低效林改造应坚持生态优先与多目标协同的理念，从传统单一导向模式转变为以生态安全、碳汇功能、生物多样性保护、气候变化适应性和社会经济协调发展的多目标综合管理体系。科学权衡生态区位、立地条件与水热资源特征，分区分类建立适宜的低效林改造策略。例如，北方干旱区重点实施“以水定林、以地定树”的生态限量造林[61]，南方丘陵与亚热带地区推广多树种混交与近自然经营模式，形成区域差异化、功能多样化的改造体系，实现多目标、多效益的动态平衡。同时，考虑到全球气候变化以及我国不同气候带区域在温度、降水及极端气候事件频率方面的差异，低效林改造须强化适应性经营理念，评估气候变化和南水北调等水资源调配工程的影响，筛选高耐旱、抗寒、抗病虫能力强的树种组合，建立区域协同的生态

修复网络和生态廊道，避免一些原本适宜的树种出现生长不适、病虫害频发甚至局部退化的风险，以及发生“树种—气候适应性错配”等问题。

3.2 加强传统改造技术与新兴技术融合，解决改造隐忧

传统低效林改造存在树种单一与高密度速生林的隐忧。部分地区采用桉树、杨树、杉木等单一树种速生改造模式，容易形成生态“脆皮层”，在极端气候事件（干旱、冰冻、病虫害）下的抵抗与恢复能力差[62]。部分低效林改造时存在高密度更新与单一替换的倾向，忽视混交配置与群落演替规律，改造后林分仍是长期高密度经营，导致林分竞争加剧、个体生长受限、生产力下降、生态功能衰退。未来，需加强传统改造技术与新兴技术的融合应用，重视“混交林 + 近自然”等经营理念，优化低效林树种组合与空间配置，构建稳定可持续的森林生态系统结构。强化人工智能、遥感、无人机和大数据等现代信息技术在林分结构优化、改造成效监测与生态风险预警中的综合应用，尤其是对生态功能、碳汇效益、生物多样性和社会影响等进行跟踪评估。还应在国家与省级层面建设低效林改造长期样地与监测网络，整合森林清查、遥感监测、无人机影像和生态站点数据，形成多源信息融合的国家级数据库和共享库，以解决不同地区采用的调查方法和时间尺度差异较大，导致监测结果缺乏可比性等问题。

3.3 健全制度机制和多元参与体系，激励改造持续发展

低效林改造的产权界定不清、利益分配机制不完善和社会资本参与不足等制约了其长期改造动力，出现短期收益导向明显、改造后的抚育管护不到位、重造轻管等问题[63]，且财政投入与补偿偏向工程建设环节，缺乏后期持续贡献的激励机制。同时，碳汇交易、生态补偿、森林保险等总体规模仍小，运行机制需进一步完善。未来，需要进一步完善森林经营权制度和收益分配机制，强化集体林权确权与流转，提升林农、企业及社会资本参与的积极性。建立以生态效益为导向的差异化补偿机制，将低效林改造成效与生态补偿、碳汇交易及绿色金融政策相衔接，探索形成“生态价值量化—市场转化—收益反哺”的生态产品价值实现良性循环路径。鼓励社会组织、科研院校和企业等共同参与低效林改造，构建“政府引导、市场主导、社会共治”的多元治理格局。

4 结　　论

本文系统分析了我国低效林的类型、成因、分布及其改造技术的现状，针对性地提出当前低效林改造科学研究与实践工作中急需解决的问题，并对未来发展方向提出建议。

中国森林覆盖率持续提高，生态系统服务功能显著增强，取得了举世瞩目的成就。然而，低效林问题已成为制约我国森林质量提升和生态系统稳定性的关键瓶颈，目前我国林业建设已从数量扩张向质量提升、量质并重转变，应坚持“生态优先、科学导向、智能支撑、制度保障”的总体思路，从顶层设计、技术手段和管理体系等多维度创新低效林改造的策略和模式，提升森林质量和生态功能，为促进和保障国家生态安全、“双碳”目标以及乡村振兴等多目标的实现提供支撑。展望未来，应以科学创新为核心驱动力，以制度改革为保障，以完善高效的技术体系为支撑，充分融合人工智能、大数据、数字孪生等新兴技术，构建智能化监测与评价体系，实现森林生态系统的结构优化、功能重建以及改造过程的科学化、精细化和动态化管理，推动我国现有低效林改造向系统、智能、可持续方向发展。

需要说明的是，本文研究区域未涵盖我国港澳台地区，且缺少对高寒高海拔等特殊立地条件下的低效林改造案例分析。本文相关结论基于对前人研究结果的理论性总结，未依托长期定位监测数据开展深入的量化分析和结论验证。因此，未来应继续从不同角度切入，多维度整合研究结果，进一步深入对我国低效林及其改造的认识与研究。

参 考 文 献

[1] 全国营造林标准化技术委员会 (SAC/TC 385). 低效林改造技术规程: LY/T 1690—2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
Afforestation and Forest Management (SAC/TC 385). Technical regulation of restoration of low function forest: LY/T 1690−2017[S]. Beijing: Standards Press of China, 2017.

[2] 郭小平, 朱金兆, 余新晓, 等. 论黄土高原地区低效刺槐林改造问题 [J]. 水土保持研究, 1998, 5(4): 77−82.
Guo X P, Zhu J Z, Yu X X, et al. The preliminary discussion on reforming the low-yield locust in the Loess Plateau [J]. Research of Soil and Water Conservation, 1998, 5(4): 77−82.

[3] Cheng K, Zhang Y X, Yang H T, et al. China’s naturally regenerated forests currently have greater aboveground carbon accumulation rates than newly planted forests [J]. Communications Earth & Environment, 2024, 6: 345.

[4] 全国绿化委员会办公室. 2025 年中国国土绿化状况公报 [N]. 2026−03−12. https://www.mnr.gov.cn/yw66/202603/t20260312-2916291.html.
Greening Commission Office. 2025 China land greening status bulletin[N]. 2026−03−12.https://www.mnr.gov.cn/yw66/202603/t20260312-2916291.html.

[5] 玉宝, 彭华福. 基于自然修复理念的森林经营措施研究 [J]. 西南林业大学学报 (自然科学), 2023, 43(1): 8−17.

Yu B, Peng H F. Research on forest management measures based on natural restoration concept [J]. Journal of Southwest Forestry University (Natural Sciences), 2023, 43(1): 8−17.

[6] 郝天象, 王兵, 牛香, 等. 全面提升我国森林生态系统质量和稳定性的实践与思考 [J]. 陆地生态系统与保护学报, 2022, 2(5): 13−31.
Hao T X, Wang B, Niu X, et al. Practice and thinking of comprehensively improving the quality and stability of forest ecosystem in China [J]. Terrestrial Ecosystem and Conservation, 2022, 2(5): 13−31.

[7] Hou G R, Bi H X, Wei X, et al. Optimal configuration of stand structures in a low-efficiency *Robinia pseudoacacia* forest based on a comprehensive index of soil and water conservation ecological benefits [J]. Ecological Indicators, 2020, 114: 106308.

[8] 邓东周, 张小平, 鄢武先, 等. 低效林改造研究综述 [J]. 世界林业研究, 2010, 23(4): 65−69.
Deng D Z, Zhang X P, Yan W X, et al. A review of low-function forest improvement [J]. World Forestry Research, 2010, 23(4): 65−69.

[9] Sun S L, Xiang W H, Ouyang S, et al. Balancing water yield and water use efficiency between planted and natural forests: a global analysis [J]. Global Change Biology, 2024, 30(11): e17561.

[10] Pan M Y, Xiao R, Ni H M. Changes in soil microbial diversity across different forest successional stages: a meta-analysis of Chinese forest ecosystems [J]. Forests, 2025, 16(8): 1319.

[11] 国家林业局. 森林抚育规程: GB/T 15781—2015[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.
National Forestry and Grassland Administration. Regulations for forest tending: GB/T 15781−2015[S]. Beijing: Standard Press of China, 2015.

[12] 傅伯杰, 吕一河, 高光耀. 中国主要陆地生态系统服务与生态安全研究的重要进展 [J]. 自然杂志, 2012, 34(5): 261−272.
Fu B J, Lü Y H, Gao G Y. Significant advances in research on key terrestrial ecosystem services and ecological security in China [J]. Chinese Journal of Nature, 2012, 34(5): 261−272.

[13] 徐雨晴, 肖风劲, 於琍. 中国森林生态系统净初级生产力时空分布及其对气候变化的响应研究综述 [J]. 生态学报, 2020, 40(14): 4710−4723.
Xu Y Q, Xiao F J, Yu L. Review of spatio-temporal distribution of net primary productity in forest ecosystem and its responses to climate change in China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(14): 4710−4723.

[14] Sun Y H, Gong Q W. Digital economy empowering low-carbon collaborative governance and ecological restoration in forestry [J]. Journal of Forestry Research, 2026, 37(1): 40.

[15] 韩新生, 董立国, 许浩, 等. 宁夏典型黄土丘陵区低效生态林改造技术初探 [J]. 宁夏农林科技, 2025, 66(6): 39−45.
Han X S, Dong L G, Xu H, et al. A preliminary study on transformation technology of low-efficiency ecological forests in typical loess hilly areas of Ningxia [J]. Journal of Ningxia Agriculture and Forestry Science and Technology, 2025, 66(6): 39−45.

[16] 邹星晨, 黄海山, 严芝银, 等. 基于结构方程模型的天然白桦次生林林下生态功能评价 [J]. 生态学报, 2026, 46(7): 3521−3531.
Zou X C, Huang H S, Yan Z Y, et al. Evaluation of understory ecological functions in natural secondary *Betula platyphylla* forests based on structural equation model [J]. Acta Ecologica Sinica, 2026, 46(7): 3521−3531.

[17] 张晏维, 王家源, 史明昌, 等. 1982—2022 年中国不同气候区植被覆盖度时空演变特征及驱动力分析 [J/OL]. 环境科学, 1−21[2025−12−28]. https://doi.org/10.13227/j.hjkx.202506274.
Zhang Y W, Wang J Y, Shi M C, et al. Characteristics of spatial and temporal evolution of vegetation cover in different climate zones and analysis of driving factors, China from 1982 to 2022[J/OL]. Environmental Science, 1−21[2025−12−28]. https://doi.org/10.13227/j.hjkx.202506274.

[18] 张会儒, 雷相东, 符利勇, 等. 中国森林资源质量现状与提升对策 [J]. 陆地生态系统与保护学报, 2024, 4(5): 46−54.
Zhang H R, Lei X D, Fu L Y, et al. The current situation and improvement strategies of forest resource quality in China [J]. Terrestrial Ecosystem and Conservation, 2024, 4(5): 46−54.

[19] 邓海燕, 申琳琳, 胡中洋, 等. 桉树用材林林分质量评价与界定标准划分 [J]. 中南林业科技大学学报, 2023, 43(7): 65−73.
Deng H Y, Shen L L, Hu Z Y, et al. Stand quality evaluation and demarcation standard division of *Eucalyptus* plantation [J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2023, 43(7): 65−73.

[20] Xie Y L, Lei X D, Shi J N. Impacts of climate change on biological rotation of *Larix olgensis* plantations for timber production and carbon storage in northeast China using the 3-PGmix model [J]. Ecological Modelling, 2020, 435: 109267.

[21] He M J, Huo X M, Ma R H, et al. Enhance soil organic carbon accumulation in degraded poplar forests via microbial activation: stump grafting transformed pure forests surpassing mixed forests [J]. Industrial Crops and Products, 2025, 234: 121541.

[22] 宋传生, 龙启德, 蔡磊, 等. 国内低效林研究概述 [J]. 安徽农业科学, 2015, 43(25): 151−152,155.
Song C S, Long Q D, Cai L, et al. Overview of research on low-productivity forests in China [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2015, 43(25): 151−152,155.

[23] 郑世慧, 刘广路, 岳祥华, 等. 中国竹资源培育现状与增产潜力 [J]. 世界竹藤通讯, 2022, 20(5): 75−80.
Zheng S H, Liu G L, Yue X H, et al. Current situation of bamboo resource cultivation and growth potentials in its production in China [J]. World Bamboo and Rattan, 2022, 20(5): 75−80.

[24] 闫敏, 柴茵超, 刘亚琪, 等. “三北”工程防风固沙林研究进展 [J]. 内蒙古农业大学学报 (自然科学版), 2026, 47(2): 94−100.
Yan M, Chai Y C, Liu Y Q, et al. Research progress on windbreak and sand-fixing forests in the “Three-North” Shelterbelt Program [J]. Journal of Inner Mongolia Agricultural University (Natural Science Edition), 2026, 47(2): 94−100.

[25] Guo S, Zhang Q T, Ling Y S, et al. Identifying ecological priority protection and restoration areas based on the changing characteristics of ‘past-future’ ecological security patterns: a case

study of Nanning [J]. Ecological Indicators, 2026, 182: 114617.

[26] 傅伯杰, 刘彦随, 曹智, 等. 黄土高原生态保护和高质量发展现状、问题与建议 [J]. 中国科学院院刊, 2023, 38(8): 1110−1117.
Fu B J, Liu Y S, Cao Z, et al. Current conditions, issues, and suggestions for ecological protection and high-quality development in the Loess Plateau [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2023, 38(8): 1110−1117.

[27] Wei X, Liang W J. Regulation of stand density alters forest structure and soil moisture during afforestation with *Robinia pseudoacacia* L. and *Pinus tabuliformis* Carr. on the Loess Plateau [J]. Forest Ecology and Management, 2021, 491: 119196.

[28] 王正秋. 谈谈“小老头树”的改造 [J]. 中国水土保持, 1982(3): 53.
Wang Z Q. On the renovation of aged dwarf trees [J]. Soil and Water Conservation in China, 1982(3): 53.

[29] 张敬业. 小老树形成原因及其改造的途径 [J]. 中国沙漠, 1987(2): 59−61.
Zhang J Y. Formation causes and renovation approaches of aged dwarf trees [J]. Journal of Desert Research, 1987(2): 59−61.

[30] Hua F Y, Bruijnzee L A, Meli P, et al. The biodiversity and ecosystem service contributions and trade-offs of forest restoration approaches [J]. Science, 2022, 376: 839.

[31] 郭艳杰, 毕华兴, 赵丹阳, 等. 不同密度油松林地土壤水碳分布特征及其耦合关系 [J]. 应用生态学报, 2025, 36(1): 50−58.
Guo Y J, Bi H X, Zhao D Y, et al. Soil water and carbon distribution characteristics and their coupling relationship in *Pinus tabuliformis* plantations with different densities [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2025, 36(1): 50−58.

[32] Cheng K, Yang H, Guan H, et al. Unveiling China’s natural and planted forest spatial-temporal dynamics from 1990 to 2020 [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2014, 209: 37−50.

[33] Xu P Z, Zhang Y D, Li Q W, et al. Evaluation of forest eco-efficiency: a transformation of ecological value quantity perspective [J]. Science of The Total Environment, 2025, 965: 178612.

[34] 菅宁红, 赵海兰, 刘珉. 我国森林资源增长驱动因素及潜力分析：基于第九次全国森林资源清查结果 [J]. 林草政策研究, 2022, 2(3): 64−71.
Jian N H, Zhao H L, Liu M. Driving force and potential of forest resource change: based on the results of the Ninth National Forest Resources Inventory [J]. Journal of Forestry and Grassland Policy, 2022, 2(3): 64−71.

[35] 张会儒, 雷相东, 张春雨, 等. 森林质量评价及精准提升理论与技术研究 [J]. 北京林业大学学报, 2019, 41(5): 1−18.
Zhang H R, Lei X D, Zhang C Y, et al. Research on theory and technology of forest quality evaluation and precision improvement [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2019, 41(5): 1−18.

[36] 张会儒, 李凤日, 赵秀海,等. 东北过伐林可持续经营技术 [M]. 北京: 中国林业出版社, 2016.
Zhang H R, Li F R, Zhao X H, et al. Sustainable management techniques of over-cutting forests in northeastern China[M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 2016.

[37] 张怀清, 邱汉清, 雷可欣, 等. 数字孪生驱动森林精准经营决策: 理论模型、关键技术与应用示范 [J]. 北京林业大学学报, 2025, 47(11): 1−16.
Zhang H Q, Qiu H Q, Lei K X, et al. Digital-twin-driven precise forest management and decision-making: theoretical models, key technologies and application demonstrations [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2025, 47(11): 1−16.

[38] 柳金昊, 冯晓明, 吕一河, 等. 中国国土空间生态安全格局发展历程和特点 [J]. 科技导报, 2025, 43(14): 24−33.
Liu J H, Feng X M, Lü Y H, et al. Development process and characteristics of territories spatial ecological security pattern in China [J]. Science & Technology Review, 2025, 43(14): 24−33.

[39] Wang X R, Qiao X T, Lin S X, et al. Scale-dependent variations in photosynthetic processes mediate net primary productivity in temperate forests [J]. Forest Ecosystems, 2024, 11: 100236.

[40] 宋启亮. 大兴安岭阔叶混交低质林不同改造模式效果的研究 [D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2015.
Song Q L. Study on the effect of different transformation models of low-quality broad-leaved mixed forest in Daxing’an Mountains[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2015.

[41] 岳庆敏, 何怀江, 张春雨, 等. 阔叶红松林林木与林分生长对采伐干扰的响应 [J]. 生态学报, 2024, 44(5): 2019−2028.
Yue Q M, He H J, Zhang C Y, et al. Responses of tree growth and stand productivity to harvesting disturbance in Korean pine-broadleaved forests [J]. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(5): 2019−2028.

[42] Gao F, Cui X Y, Sang Y, et al. Changes in soil organic carbon and total nitrogen as affected by primary forest conversion [J]. Forest Ecology and Management, 2020, 463: 118013.

[43] 耿燕, 赵秀海, 安黎哲. 阔叶红松林乔木地上碳储量和碳增量对采伐强度的响应 [J]. 北京林业大学学报, 2022, 44(10): 23−32.
Geng Y, Zhao X H, An L Z. Responses of tree aboveground carbon storage and carbon increment to logging intensity in a broadleaved Korean pine forest [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2022, 44(10): 23−32.

[44] 黑河五大连池市以守护绿水青山激活生态经济, 人民网. http://hlj.people.com.cn/n2/2025/1219/c220024-41448514.html.
Protecting Lucid Waters and Lush Mountains to Activate Ecological Economy in Wudalianchi City, Heihe. People’s Network. http://hlj.people.com.cn/n2/2025/1219/c220024-41448514.html.

[45] 侯庆春, 黄旭, 韩仕峰, 等. 关于黄土高原地区小老树成因及其改造途径的研究 (Ⅲ): 小老树的成因及其改造途径 [J]. 水土保持学报, 1991, 5(4): 80−86.
Hou Q C, Huang X, Han S F, et al. Study on the causes and remedial approaches of low-yield stunted trees in the Loess Plateau region (Ⅲ): causes and remedial approaches of low-yield stunted trees [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1991, 5(4): 80−86.

[46] Bai R H, Zhao X N, Wang X Z, et al. SOC erosion reduction of the “Grain for Green” program on the Loess Plateau, China [J].

Soil and Tillage Research, 2026, 256: 106863.

[47] 陕西秦岭森林生态系统国家野外科学观测研究站, 国家生态系统观测研究网络. https://www.cnern.ac.cn/getContent_class.action?class_id=qlf15&article_class_id=2&id=56489&pid=qlfroot.
National Field Scientific Observation and Research Station of Forest Ecosystem in Qinling Mountains, Shaanxi. Chinese National Ecosystem Research Network. https://www.cnern.ac.cn/getContent_class.action?class_id=qlf15&article_class_id=2&id=56489&pid=qlfroot.

[48] 何永国, 焦强, 王正科, 等. 干旱山区木本油料树种文冠果的生物学特性及栽培技术 [J]. 现代农业科技, 2015(19): 187,189.
He Y G, Jiao Q, Wang Z K, et al. Biological characteristics and cultivation techniques of *Xanthoceras sorbifolium*, a woody oil tree species in arid mountainous areas [J]. Xiandai Nongye Keji, 2015(19): 187,189.

[49] Tong Y, Wang Y, Zhou J, et al. Deciphering the stratified distribution and evolution of deep soil drought and its environmental controls: new evidence from continuous fiber optic monitoring in 0–30 m profile [J]. Geoderma, 2025, 454: 117168.

[50] 王轶浩, 陈展, 周建岗, 等. 重庆酸雨区马尾松纯林改造对土壤酸化特征及团聚体稳定性的影响 [J]. 生态学报, 2021, 41(13): 5184−5194.
Wang Y H, Chen Z, Zhou J G, et al. Effects of transformation of Masson pine forest on characteristics of soil acidification and aggregate stability within polluted areas of Chongqing [J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(13): 5184−5194.

[51] 程分生, 尤龙辉, 叶功富, 等. 亚热带红壤侵蚀区马尾松不同套种模式生态系统碳平衡 [J]. 应用生态学报, 2021, 32(4): 1163−1174.
Cheng F S, You L H, Ye G F, et al. Carbon balance in an interplanting *Pinus massoniana* stand in subtropical eroded red soil region, China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2021, 32(4): 1163−1174.

[52] 朱洪如. 碳中和愿景下长汀县松林改造试点项目碳汇潜力测算 [J]. 林业勘察设计, 2022, 42(3): 80−83.
Zhu H R. Calculation of carbon sink potential for the pilot project of pine forest renovation in Changting County under the vision of carbon neutrality [J]. Forestry Survey and Design, 2022, 42(3): 80−83.

[53] He Y, Wu Y S, Yang X. Effective reduction of agricultural carbon emissions via land-use- structure adjustment: a case study of Sichuan Province, Southwest China [J]. Chinese Journal of Population, Resources and Environment, 2025, 23(3): 386−396.

[54] 阮池茵. 森林的金融化及其社会生态影响——基于林权流转的再考察 [J]. 中国农业大学学报 (社会科学版), 2024, 41(6): 121−142.
Ruan C Y. Financialization of forests and its socio-environmental impacts: an examination of forest land transactions [J]. Journal of China Agricultural University (Social Sciences), 2024, 41(6): 121−142.

[55] Yue Y M, Wang L, Brandt M, et al. A social-ecological framework to enhance sustainable reforestation under geological constraints [J]. Earth's Future, 2024, 12(5): e2023EF004335.

[56] 李玉霖, 赵学勇, 刘新平, 等. 沙漠化土地及其治理研究推动北方农牧交错区生态恢复和农牧业可持续发展 [J]. 中国科学院院刊, 2019, 34(7): 832−840.
Li Y L, Zhao X Y, Liu X P, et al. Research in desertification mechanism and reversion techniques promotes sustainable restoration of degraded ecosystem and gro-pastoral development [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2019, 34(7): 832−840.

[57] 汪宗顺, 张海鹏, 岳超, 等. 造林增汇是实现碳中和的成本有效途径吗?——以西北地区为例 [J]. 自然资源学报, 2024, 39(3): 731−748.
Wang Z S, Zhang H P, Yue C, et al. Is afforestation for carbon sequestration a cost-effective pathway to carbon neutrality? Taking the northwest region as an example [J]. Journal of Natural Resources, 2024, 39(3): 731−748.

[58] 西藏拉萨: 只此青绿画“两山”-新华网. http://www.news.cn/20240605/2284e762ce4047fca940952552d14b3c/c.html.
Lhasa, Xizang: Painting the "Two Mountains" with unique greenery, Xinhuanet. http://www.news.cn/20240605/2284e762ce4047fca940952552d14b3c/c.html.

[59] 四川省林业和草原局. 攀枝花市 5 亿元生态治理项目落地! 以“治理画笔”绘就“生态美市”新图景 [N]. https://lcj.sc.gov.cn/scslyt/sxdt/2025/9/12/ce28f2a7d0704153aca7dde289602612.shtml.
Sichuan Provincial Forestry and Grassland Administration. A 500-million-yuan ecological governance project launched in Panzhihua: painting a new blueprint of an ecologically beautiful city with the “Governance Brush”[N]. https://lcj.sc.gov.cn/scslyt/sxdt/2025/9/12/ce28f2a7d0704153aca7dde289602612.shtml.

[60] 朱教君, 宋立宁, 王国晨. 沙地樟子松引种 70 年的历史、进展与展望 [J]. 林业科学, 2025, 61(7): 23−34.
Zhu J J, Song L N, Wang G C. 70 years of introducing of Mongolian pine to sandy lands: history, progress, and perspectives [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2025, 61(7): 23−34.

[61] Wu Q, Yang J, Song J X, et al. Do forests store more water? A comparative analysis of water storage between multiple land cover types [J]. Journal of Hydrology, 2025, 661C: 133752.

[62] 张峰. 基于 SD 和 DPSIRM 模型的饮马河流域生态脆弱性评价 [D]. 长春: 东北师范大学, 2019.
Zhang F. Ecological vulnerability assessment of Yinma River Basin based on SD and DPSIRM model[D]. Changchun: Northeast Normal University, 2019.

[63] 牛昕, 张鋆萍, 王烨, 等. 基于软系统方法论的集体林权制度改革政策效果评估 [J]. 林草政策研究, 2025, 11(19): 1−13.
Niu X, Zhang Y P, Wang Y, et al. Evaluation of policy effects of collective forest tenure reform based on soft systems methodology [J]. Journal of Forestry and Grassland Policy, 2025, 11(19): 1−13.

（责任编辑　李　契
责任编委　赵秀海）