

低效林改培碳汇响应的阶段性转折点判别机制

李雅妮¹, 张丰玺², 王唯³, 杨秀¹, 王斌¹

¹商洛市商州区二龙山国有林场, 陕西 商洛

²商洛市镇安县高峰镇人民政府, 陕西 镇安

³商洛市商州区夜村国有林场, 陕西 商洛

收稿日期: 2026年1月20日; 录用日期: 2026年3月2日; 发布日期: 2026年3月13日

摘要

目的: 明确低效林改培过程中森林碳汇的阶段性演化特征, 构建转折点识别机制, 为碳储动态监测与碳管理提供技术支持。方法: 以陕西商洛市中幼龄低效林为对象, 整合2000~2023年多源数据(Landsat遥感指数、实地碳含量与生物量), 采用滑动窗口法与分段回归模型, 量化碳储年增长斜率变化, 进而识别碳储积累的关键转折点。结果: 地上碳储在改培后第22年与第31年出现加速与趋稳转折, 年增速由0.9 Mg·ha⁻¹·年⁻¹升至3.8 Mg·ha⁻¹·年⁻¹, 后回落至1.0 Mg·ha⁻¹·年⁻¹; 土壤碳储响应滞后约1.5年, 相应转折点出现在第23.5年与32.6年。结论: 构建的“滑动窗口 + 分段回归 + 多指标融合”机制, 能有效捕捉低效林碳汇跃迁的阶段性信号。本研究的创新点在于提出了融合多源时序数据与统计模型的转折点判别框架, 增强了动态监测的量化能力; 明确了地上与土壤碳汇响应存在约1.5年的系统性滞后, 为差异化碳管理提供了时序依据。该机制可为森林碳汇精准评估与生态服务管理提供科学支持。

关键词

低效林改培, 碳汇响应, 转折点判别, 多源数据融合, 早期预警

Mechanism for Identifying Stage-Specific Turning Points in Carbon Sink Response during Low-Efficiency Forest Transformation

Yani Li¹, Fengxi Zhang², Wei Wang³, Xiu Yang¹, Bin Wang¹

¹Erlongshan State-Owned Forest Farm, Shangzhou District, Shangluo City, Shangluo Shaanxi

²People's Government of Gaofeng Town, Zhen'an County, Shangluo City, Zhen'an Shaanxi

³Yecun State-Owned Forest Farm, Shangzhou District, Shangluo City, Shangluo Shaanxi

Received: January 20, 2026; accepted: March 2, 2026; published: March 13, 2026

文章引用: 李雅妮, 张丰玺, 王唯, 杨秀, 王斌. 低效林改培碳汇响应的阶段性转折点判别机制[J]. 林业世界, 2026, 15(2): 300-308. DOI: 10.12677/wjf.2026.152036

Abstract

[Objective] This study aims to clarify the staged evolutionary characteristics of forest carbon sinks during the reconstruction and cultivation of low-efficiency forests, and establish a turning point identification mechanism to provide technical support for the dynamic monitoring and management of carbon storage. **[Method]** Taking young and middle-aged low-efficiency forests in Shangluo City, Shaanxi Province as the research object, multi-source data from 2000 to 2023 (including Landsat remote sensing indices, field-measured carbon content and biomass) were integrated. The sliding window method and piecewise regression model were adopted to quantify the annual change slope of carbon storage, and further identify the key turning points of carbon storage accumulation. **[Result]** The aboveground carbon storage showed accelerated and stabilized turning points in the 22nd and 31st years after reconstruction and cultivation, with the annual growth rate increasing from $0.9 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{yr}^{-1}$ to $3.8 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{yr}^{-1}$, and then decreasing to $1.0 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{yr}^{-1}$. The response of soil carbon storage lagged by approximately 1.5 years, with the corresponding turning points appearing in the 23.5th and 32.6th years. **[Conclusion]** The established mechanism of “sliding window + piecewise regression + multi-index fusion” can effectively capture the staged signals of carbon sink transition in low-efficiency forests. The innovation of this study lies in proposing a turning point discrimination framework integrating multi-source time-series data and statistical models, which enhances the quantitative capability of dynamic monitoring. It is clarified that there is a systematic lag of about 1.5 years between the responses of aboveground and soil carbon sinks, providing a temporal basis for differentiated carbon management. This mechanism can provide scientific support for the accurate assessment of forest carbon sinks and the management of ecological services.

Keywords

Low-Quality Forest Rehabilitation, Carbon Sink Response, Transition Point Identification, Multi-Source Data Integration, Early Warning

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

低效林指因自然或人为干扰导致生长不良、功能衰退的林分，不仅未能充分发挥其生态与经济价值，还可能加剧生态退化。森林碳汇指森林通过光合作用将二氧化碳转化为有机碳并储存于植被与土壤的过程，是应对气候变化、实现“双碳”目标的关键途径。提升低效林碳汇功能已成为森林生态修复的核心议题，相关政策也为低效林改培与碳汇管理协同提供了制度支持。现有研究在低效林改培技术方面已取得进展[1]-[3]，但多侧重于林分质量与经济效益，对碳汇积累的时序性、阶段性特征，尤其是碳储转折点的科学识别仍显不足。本研究拟构建低效林改培碳汇响应的转折点判别机制，融合多源时序数据揭示碳储演变趋势与关键跃迁节点，以为林业经营与碳汇管理提供量化依据。

2. 研究材料与方法

2.1. 研究区与样地设置

本研究选择陕西省商洛市典型暖温带人工林区作为研究区域，重点分析油松与侧柏等低效纯林。商

洛位于秦岭南坡,是西北地区的重要生态屏障,人工林广布,改培潜力大。研究区内选取 792 个样点,碳密度平均为 138.45 吨/公顷,土壤碳储占比近 70%。样地分布在商洛市中北部丘陵低山地带,涵盖林龄 20~40 年的中幼龄人工林,尤其关注油松与侧柏纯林。

本研究以“改培起始年”为时间原点,采用“空间换时间”的方法,即通过在同一时期调查不同林龄(改培后年限)的样地,构建碳储量随时间变化的序列。为保障样地间的可比性,所有样地在立地条件(如坡度、坡向、土壤类型)、树种组成和林分起源上均保持一致,仅林龄(即改培后年限)存在差异。

为确保数据代表性,按林龄(改培后年限)、立地类型和郁闭度设置多个监测小区,每种组合设置 3~5 个重复样地,面积 1~5 公顷,并采集胸径、高度、生物量和土壤样本,建立长期动态监测体系,追踪碳储变化并分析树种碳汇响应差异。同时,在研究区内设立了未进行人工改培的天然恢复对照样地,用于分离和评估改培措施对碳储量的额外增益效果。

2.2. 数据来源与预处理

研究数据整合了遥感影像、地面样地实测与历史清查资料,以全面捕捉碳储的时空动态。遥感数据源自 Landsat TM/OLI 系列卫星(2000~2023 年),经大气校正与云掩膜处理后,提取归一化植被指数(NDVI)、叶面积指数(LAI)与植被覆盖度(FVC)等参数,用以反演林分结构变化并与地面数据协同验证生物量动态趋势[4]。地面数据于商洛市典型低效林及改培区采集,测定了胸径、树高、生物量及土壤理化性质;乔木含碳率参考油松与侧柏树种标准,并依据政府间气候变化专门委员会(IPCC)推荐转换因子计算碳储量[5][6]。同时,参考陕西省多期森林资源连续清查成果,构建历史基线以验证长期趋势。预处理包括异常值剔除、缺失值插补与时间序列标准化;采用克里金(Kriging)插值法生成碳储空间分布图,并计算变异系数(Coefficient of Variation, CV)以量化序列波动,为后续转折点识别提供数据基础[7]。

2.3. 阶段转折点判别机制构建

低效林改培后,森林碳汇功能随时间呈现“缓慢积累-快速跃升-逐渐趋稳”的非线性演化过程。为精准捕捉碳储量动态轨迹中的关键跃迁节点,本研究构建了一套集成趋势识别、统计断点检验与多指标交叉验证的判别机制,旨在提升转折点识别的稳健性、统计显著性及生态学解释力[8]。该机制同步纳入未改培对照样地的碳储序列作为本底参照,以分离和凸显改培措施对碳汇动态的净影响。

2.3.1. 基于滑动窗口的多尺度斜率变化识别

以改培起始年为时间原点,针对林龄 20~40 年间的碳储量年度序列,采用滑动窗口分析法进行局部趋势探测。设置窗口宽度为 3、4、5 年,逐年滑动并计算窗口内碳储量的年均增长率(斜率)。通过追踪斜率的连续变化,识别增长率发生显著突变的潜在区间。例如,分析显示部分样地地上碳储量年增长率由约 $1.1 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$ 陡增至 $3.8 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$,标志着该系统可能进入了快速碳积累阶段。此步骤初步框定了转折点可能发生的林龄范围。为验证识别结果对不同窗口设置的稳健性,本研究系统比较了不同窗口宽度下滑动斜率序列的突变点分布。结果显示,关键突变区间在不同窗口设定下高度一致,表明所识别的转折信号具有较好的稳定性,不受窗口宽度的偶然选择影响。

2.3.2. 基于分段回归的断点拟合与统计显著性检验

为定量确定转折点的具体位置并检验其统计显著性,进一步采用分段线性回归模型拟合“林龄-碳储量”之间的整体关系。该模型通过迭代寻优,确定使模型残差平方和最小的断点位置,即转折点。利用拟合优度(R^2)评估模型解释力,并通过置信区间及 p 值(设定显著性水平 $\alpha=0.05$)判断断点的统计显著性。应用该模型,本研究识别出地上碳储量增长轨迹中存在两个显著断点($p<0.01$),分别位于改培后约第 22 年

与第 31 年,从而将积累过程划分为三个具有不同斜率的线性阶段,验证了增长模式的结构化变化。

2.3.3. 多指标融合与判别稳定性增强

为降低单一指标的不确定性并增强判别机制的普适性,引入了地上生物量碳、土壤有机碳(0~40 cm)及凋落物层碳等多维度碳库指标。分别计算各指标年增长率的变异系数,并分析其随时间的变化一致性。当多个独立指标在同一时间区间内均表现出增长率的协同跃变时,该区间被认定为高可信度的转折阶段。本机制特别强调了地下土壤碳库响应可能存在滞后效应,因此在集成分析中赋予不同碳库时序差异以生态权重,确保了识别结果不仅关注地上植被的动态,也能反映地下生态过程的延迟反馈,从而使构建的评价体系更具全局视角和区域适应性。

3. 研究结果与分析

3.1. 碳储变化的整体趋势

综合实地监测、资源清查与遥感反演结果,低效林改培后碳储量积累呈现典型的“S 型”三阶段特征,即初期缓慢增长、中期快速跃升、后期趋于稳定[9][10](图 1)。为明确改培措施的碳汇增益,本研究同步对比了未改培对照林分的碳储动态。如图所示,改培林分总碳密度在改培后呈现显著的非线性增长,而未改培对照林分增长平缓,两者差异随林龄增加而逐渐扩大,直观反映了改培对碳汇功能的激发与促进作用。

具体而言,改培前样地平均总碳密度为 $106.35 \text{ Mg C}\cdot\text{ha}^{-1}$,其中地上与土壤碳储量分别为 $22.16 \text{ Mg C}\cdot\text{ha}^{-1}$ 和 $84.19 \text{ Mg C}\cdot\text{ha}^{-1}$ 。至林龄近 40 年时,总碳密度增至 $138.45 \text{ Mg C}\cdot\text{ha}^{-1}$,地上与土壤碳储量分别达到 $29.16 \text{ Mg C}\cdot\text{ha}^{-1}$ 和 $109.29 \text{ Mg C}\cdot\text{ha}^{-1}$ 。土壤碳储量占比始终高于 78%,表明地下系统是碳汇的主导库。

碳储年增速分析进一步量化了各阶段特征(表 1)。林龄 20 年以内,地上与土壤碳储年增量分别为 $1.1 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$ 和 $0.4 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$; 20~30 年间进入快速增长期,年增速分别跃升至 $3.3 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$ 和 $1.4 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$; 30 年后增长显著趋缓,年增量回落至 $1.0 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$ 与 $0.7 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$ 。

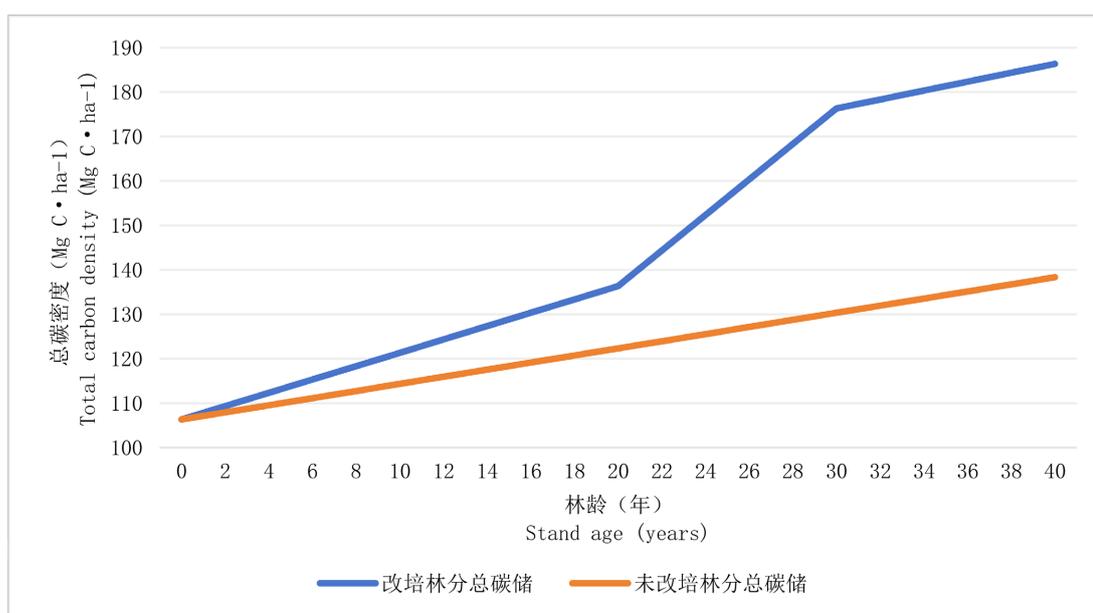


Figure 1. Carbon storage change curve of rehabilitated forest stands
图 1. 改培林分碳储变化曲线

Table 1. Annual increment of carbon storage in sample plots**表 1.** 样地碳储累积年均增量示意

林龄阶段	地上碳储年增量(Mg·ha ⁻¹ ·年 ⁻¹)	土壤碳储年增量(Mg·ha ⁻¹ ·年 ⁻¹)
<20 年	1.1	0.4
20~30 年	3.3	1.4
>30 年	1	0.7

3.2. 阶段转折点识别结果

为精确识别改培后碳储动态的阶段性转折点,本研究采用滑动窗口分析法(窗口宽度 3~5 年),系统计算了各林龄区间碳储年增量的变化趋势,初步揭示了碳汇积累的非线性阶段特征。分析发现,地上碳储年增长率约在第 22 年出现明显跃升,标志着进入快速增长期;至第 32 年左右,增速开始下降,增长曲线趋于平缓。相比之下,土壤碳储的响应存在滞后,其快速增长约始于第 24 年,至第 33 年后方趋稳定,表明地下系统的生态反馈较地上系统延迟约 1~2 年。

为统计验证上述阶段性变化的显著性,进一步采用分段回归模型拟合林龄与碳储量的关系。模型识别出两个显著的转折点(表 2)。对于地上碳储,转折点分别出现在第 21.8 年与第 31.7 年($p < 0.01$);土壤碳储的转折点则位于第 23.9 年与第 33.1 年($p < 0.05$)。这一结果显著证实了碳储积累存在“缓慢增长-快速增长-趋于稳定”的三阶段演化过程,并定量揭示了地下碳库响应改造措施存在结构性时滞。

这些关键转折点的精准识别,为优化改培林地碳汇动态监测的时序节奏,以及制定分阶段的科学经营干预策略,提供了重要的数据与理论依据。

Table 2. Identification of turning points for aboveground and soil carbon storage based on piecewise regression model**表 2.** 地上与土壤碳储分段回归模型断点

指标	第一阶段(递增)	转折点一(年)	第二阶段(陡增)	转折点二(年)	第三阶段(趋缓)
地上碳储量	0.9	21.8	3.8	31.7	1
土壤碳储量	0.4	23.9	2.3	33.1	0.7

3.3. 转折点前后碳汇响应特征

碳汇积累的阶段性跃迁不仅体现在关键时间节点的识别上,更深层次地反映了低效林改培后,生态系统从结构到功能发生的系统性重构。依据本研究识别的两个关键转折点,碳汇动态响应可明确划分为三个特征鲜明、生态意义迥异的阶段,各阶段系统结构与功能状态存在显著差异(表 3)。

3.3.1. 初期阶段(林龄 < 转折点一)

缓慢积累与系统启动期。此阶段林分处于结构构建与恢复初期,以油松、侧柏等为主体的林分冠层尚未充分闭合,对光能等资源的截获与利用效率较低。地上碳汇的积累主要源于枝叶生物量的初步扩张,林木胸径与树干材积增长缓慢,碳同化产物向结构性生物质转化的效率不高,碳输入-输出系统尚未形成高效闭环。与之相应,土壤系统处于扰动后恢复的早期,微生物群落结构正在进行重建与演替,来自地上的凋落物、细根周转等有机质输入通量较小,导致土壤有机碳库处于缓慢的自然积累状态,碳汇功能尚未被充分激活。

3.3.2. 转折阶段(转折点一 ≤ 林龄 ≤ 转折点二)

快速积累与结构重组期。此阶段是碳汇功能发生非线性跃升的关键时期[11]。随着林冠迅速郁闭,林

内光环境改变, 林木对光、水、养分等资源的竞争加剧, 驱动个体生长与种群结构发生显著重组, 群落生物量进入指数式快速增长期, 地上碳汇效应在此阶段达到峰值。伴随林木生长速率的提升, 林分凋落物(包括叶、枝、皮等)产量大幅增加, 同时根系生物量增长与代谢活动(特别是根际沉积与呼吸)显著增强, 共同导致向土壤系统输入的有机质数量与质量同步提升, 从而驱动土壤碳库进入一个快速积累的“时间窗口”, 地下碳汇响应显著增强。

3.3.3. 稳定阶段(林龄 > 转折点二)

增速趋缓与系统稳态期。当林分结构发育趋于成熟与稳定, 林木个体生长从速生期进入成熟期, 年碳积累速率逐步放缓并维持在一个相对稳定的水平。地上碳汇功能从快速积累转变为维持性积累。与此同时, 土壤碳系统内部的各种生物与非生物调节机制趋于完善和平衡。微生物群落结构趋于稳定, 有机质的输入速率与矿化分解速率在新的水平上达到动态平衡, 土壤碳库的净积累速率随之下降并趋于稳定[12][13]。这标志着整个森林生态系统的碳汇功能从一个快速增长的阶段, 过渡到一个动态平衡的稳态阶段。

Table 3. Summary of carbon sink response characteristics across key stages before and after turning points

表 3. 转折点前后关键阶段变化特征总结

时间阶段	地上碳储变化特征	土壤碳储变化特征
初期(<转折点一)	缓慢积累, 冠层尚未完全闭合	微生物群落重建初期, 有机碳输入有限
转折阶段	快速增长, 林分结构重组与生物量积累加强	根际活动增强, 凋落物输入达到高峰, 形成快速积累窗口
后期(>转折点二)	积累增速放缓, 林分结构趋于稳定	碳积累趋稳, 系统形成动态平衡的碳汇稳态

4. 结论与讨论

4.1. 主要结论

低效林改培是提升林分质量、增强森林碳汇功能、助力实现“双碳”目标的重要路径[14]-[16]。本研究结果表明, 改培后森林碳储量的积累并非简单的线性过程, 而是受到林分结构演变、生理特性变化以及地上与地下系统相互作用等多重生态因子的综合影响, 呈现出明显的阶段性跃迁特征, 且不同碳库的响应存在时序差异。

4.1.1. 地上与土壤碳储量变化呈“S型”累积趋势

在商洛市中幼龄低效林改培过程中, 碳储积累整体表现为“起步缓慢-快速增长-逐渐趋稳”的三阶段“S型”曲线。具体而言, 地上碳储年增速在改培后第22年左右出现显著跃升, 至约第31年时增速下降并进入相对稳定的平台期。土壤碳储的响应则相对滞后, 其年增速的跃升点和趋稳点分别出现在第24年和第33年前后, 普遍滞后于地上系统1~2年, 这揭示了地下碳库具有更长的生态反馈周期[17][18]。

4.1.2. 转折点可通过斜率动态与分段回归模型实现精准识别

本研究构建的“滑动窗口分析结合分段回归”的判别机制, 能够有效捕捉碳储年增速发生的显著性跳变时点。实证结果显示, 地上碳储在转折点前的年增速约为 $0.9 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{年}^{-1}$, 转折后迅速提升至 $3.8 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{年}^{-1}$, 最终在平台期稳定在 $1.0 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{年}^{-1}$ 左右。土壤碳储的年增速则由 $0.4 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{年}^{-1}$ 跃升至 $2.3 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{年}^{-1}$, 随后趋稳于 $0.7 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{年}^{-1}$ 。该机制兼具良好的统计显著性与生态学解释力, 为低效林碳汇动态过程的识别与量化评估提供了方法支持。

4.1.3. 改培后碳汇积累节奏存在明显的阶段异质性

碳汇积累的节奏在不同林龄阶段差异显著。改培初期,林分结构处于重组初期,林木生长缓慢,碳汇贡献有限;进入中期后,随着林冠郁闭和竞争加剧,生物量快速增长,碳储年增量显著提高;到后期,生态系统养分与空间利用趋于平衡,碳储增长随之放缓。这一过程由林分结构优化、资源重新配置与能量利用效率协同驱动,是系统整体的阶段性生态响应。

4.1.4. 碳储转折标志着生态系统结构与功能的协同演变

碳储的阶段性跃升不仅反映了积累速率的变化,更深层次地标志着生态系统结构与功能的整体性重构。地上碳储的急剧增加阶段,往往与林冠结构成型、空间利用效率提升以及优势木竞争能力增强同步;而土壤碳储的跳跃则多出现在凋落物大量输入、根际活动增强及微生物群落重组的时期。这种自上而下的能量与物质传输,促进了碳向稳定有机质的转化。碳储的阶段式跃迁既是森林生产力释放的体现,也集中反映了生态系统自我调节与结构优化的内在能力。

4.2. 理论与实践创新

本文在理论建设、实践运用上都有了进步。在理论层面,传统森林碳汇研究多聚焦于静态碳储总量估算或线性趋势分析,未能有效揭示低效林改造后碳汇功能动态演替中的非线性时序跃迁特征。本文首次将滑动窗口局部趋势分析和分段回归统计断点检测结合起来,从碳储量年际变化率的角度入手,成功地量化并识别出改培后碳汇“低速积累、快速跃升、逐渐趋稳”的三个阶段转变模式。该方法不但可以找到碳储增长的拐点,更重要的是把碳储的突变性同林分结构重组、竞争格局变化等重要的生态过程联系起来,给认识碳汇动态的驱动机制赋予了新的分析框架,加强了碳汇动态监测的理论根基[19]-[21]。

就实践和方法而言,本研究对遥感反演植被指数时序、高精度地面样地监测数据、区域森林资源连续清查历史资料等多源异构数据加以系统整合之后,创建起时空连续的碳储量分析数据集。经过严格的规范化预处理以及空间插值技术,对碳汇跃迁的关键节点进行准确的识别,并且可以实现空间可视化表达。该方法论具有较强的可操作性以及区域推广潜力,可以为其他生态区碳汇监测提供技术范式。本研究第一次在改培林地中量化了地上、地下碳库响应时间差,确定了土壤碳汇响应比地上部分滞后1~1.5年。这一发现有直接的碳管理实践意义,说明碳汇评价和管理要考虑到不同碳库响应的的时间。因此,本文提出“转折点即经营窗口”的管理理念,把生态监测识别的转折阶段同林业经营措施(抚育间伐、补植改造等)的实施窗口期精准对接,给低效林定向改培、碳汇增益效果的中期评价、长周期管护决策提供科学的量化依据,促进研究成果向森林经营实践的有效转化[22]。

4.3. 研究局限与后续方向

尽管本研究取得了上述进展,但仍存在若干局限,未来研究可在以下方向深入:

4.3.1. 空间尺度的局限性与外推验证

本研究样地数据集集中于陕西商洛市中亚热带典型低效人工林区,结论对该区域有较好的代表性。但是我国森林类型多样,不同气候带(寒温带、干旱半干旱区)和不同林分(天然林、混交林)的生长发育节律、生物量分配策略、碳循环过程存在较大差异[23]。因此,目前建立的转折点判别机制在更广范围内是否适用、稳定还需检验。后续的研究要拓展观测网络,创建起多气候带、多植被类型的对比观测体系,从而检验或者修正这个判别机制,提高它的普适性[24]-[26]。

4.3.2. 监测维度与分辨率的提升

本研究依靠年度尺度的碳储量估算以及0~40 cm土层的土壤碳采样,虽然可以显示年际趋势,但是

无法体现季节动态、极端气候事件等短周期干扰给碳汇带来的脉冲式影响,也无法体现深层土壤碳库的响应。未来可以将高频遥感(哨兵系列)、近地面遥感、自动化连续监测设备等结合在一起,开展更深层次(1 m 以内)的分层土壤剖面采样,结合微地形、水热因子监测,从而提高对碳汇过程时空异质性的解析精度[27]。

4.3.3. 从现象识别到机理解析的深化

目前主要依靠统计关系来识别转折现象,对驱动碳储变化的生态因子(温度、降水、土壤湿度、氮沉降等)及其交互作用的机理建模还比较欠缺。后续研究要加入 CENTURY、Biome-BGC 这些生态过程模型,结合多源观测数据,创建起“气候-土壤-植被”多因子推动的碳汇动态模拟及预测模型,达成从统计描述到机理解析的转变[28]-[30]。

4.3.4. 生态系统服务协同权衡的综合评估

森林有碳汇、水源涵养、生物多样性保护等多种功能。本研究集中于碳汇单一服务,没有探讨它转折变化与其它服务功能临界点的相关性。未来要创建多功能协同权衡分析体系,探究碳汇关键转折期是否同步或者异步于其它生态系统服务的突变点,给林地多目标协同经营和生态效益最大化赋予更为全面的决策支撑。

参考文献

- [1] 唐麟. 盐源县国家储备林建设云南松低效林改造技术[J]. 现代园艺, 2023, 46(16): 67-69.
- [2] 张洁, 王元顶, 舒德远, 等. 国家储备林改培采伐强度对马尾松人工林生长的影响[J]. 贵州林业科技, 2024, 52(4): 28-34.
- [3] 胡德活, 郑会全, 韦如萍, 等. 密度控制和追肥对杉木近熟林改培大径材林的效应分析[J]. 山地农业生物学报, 2024, 43(3): 9-14, 32.
- [4] 李俊明. 小陇山林区低质低效林改培经营技术[J]. 乡村科技, 2020(14): 76-77.
- [5] 袁媛, 姚甲宝, 徐克芹, 等. 林窗面积、年龄对赣中南杉木低效林灌草物种多样性和碳储量的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2025, 31(8): 1272-1283.
- [6] 冯焱. 大同市云冈林场油松低效林改造对土壤养分状况的影响[J]. 防护林科技, 2023(6): 19-21.
- [7] 符式培. 浅谈低效林改造中不同采伐方式对造林成效的影响[J]. 今日农业, 2022(5): 71.
- [8] 姚伟, 王有位. “双碳”目标下巍山县桉树低效林改造[J]. 绿色科技, 2024, 26(1): 98-103.
- [9] 卢春光, 李漫, 谭上权, 等. 国家储备林改培技术的优化与实践——以博白林场为例[J]. 现代园艺, 2025, 48(4): 182-183, 186.
- [10] 马军. 浅谈如何发挥林业在低碳经济中的作用[J]. 山西农经, 2023(8): 129-131.
- [11] 秦世立, 曲杭峰. 大兴安岭白桦低质林改培效果的综合评价[J]. 东北林业大学学报, 2022, 50(3): 19-24.
- [12] 张仁瑞, 廖兴国. 低质低效林补植改造主要评价因子调查研究[J]. 安徽农学通报, 2024, 30(21): 57-60.
- [13] 李婷, 徐婷. 加强森林抚育和低效林改造与提高森林质量的有效途径[J]. 吉林蔬菜, 2024(2): 259.
- [14] 韩泉武. 浅析加强森林抚育和低效林改造[J]. 中文科技期刊数据库(全文版)自然科学, 2021(1): 165-167.
- [15] 王志刚, 刘克, 聂怀鑫, 等. 低质低效林改造技术[J]. 现代农村科技, 2024(6): 61-62.
- [16] 陈宇. 基于生态适应性分析的低质低效林树种选择与多样化配置模式研究——以肇庆市国有清桂林场为例[J]. 生态与资源, 2025(9): 67-69.
- [17] 邹雅榕, 胡铮方, 鄢雪杨, 等. 玉屏油茶低产低效林成因分析及改造技术探讨[J]. 现代园艺, 2026, 49(1): 89-91.
- [18] 孟伟, 代小燕, 姚华忆, 等. 龙里林场马尾松现有林改培模式研究[J]. 内蒙古林业调查设计, 2021, 44(5): 21-23.
- [19] 刘小兵. 森林抚育与低效林改造是驱动森林品质升级的引擎[J]. 今日农业, 2025(4): B81.
- [20] 刘鹏. 南岭国家森林公园低质低效林改造模式与生物多样性提升路径[J]. 中国林业产业, 2025(5): 21-22.
- [21] 徐海莉. 左云县古长城五路山防风固沙生态治理及低效林改造技术探讨[J]. 山西林业, 2022(3): 24-25.

- [22] 陈永强, 张永刚. 陕西省低效林改造中植物种质资源保护策略探讨[J]. 南方农业, 2024, 18(24): 169-171.
- [23] 李桃根. 森林抚育、低效林改造提高森林质量的分析[J]. 乡村科技, 2024, 15(17): 113-116.
- [24] 张伟. 森林抚育技术创新在低效林生态修复与经营方向转型中的应用[J]. 农业灾害研究, 2025, 15(5): 67-69.
- [25] 吴悦宏, 林文欢, 朱晓武, 等. 低效林改造树种早期生长分析[J]. 林业调查规划, 2022, 47(4): 110-114, 143.
- [26] 沙吉旦·尕衣提. 林场低产低效林改造后的森林碳汇功能变化及提升策略[J]. 绿色中国, 2025(3): 85-87.
- [27] 刘春红, 梁悦军. 承德低效林改造中经济树种的选择和抚育管理策略[J]. 特种经济动植物, 2025, 28(6): 179-181.
- [28] 孟雪梅, 黄远章, 赵冬, 等. 鲁西南砂石山低效林改造与恢复关键技术[J]. 农业灾害研究, 2025, 15(8): 155-157.
- [29] 杨海军. 低效林改造的现实意义及有效举措研究[J]. 花木盆景: 上半月, 2022(11): 60-61.
- [30] 熊文. 水土流失区低效林改造成效分析[J]. 林业勘察设计, 2022(1): 82-84.