

不同林龄杉木林生态功能评价及障碍因子分析

霍鑫豪¹, 林根根², 岳辉², 靖艺³, 杨学安¹, 沈子雅¹, 赵辰辰¹, 程金花¹

(1.北京林业大学 水土保持学院, 北京 100083;

2.长汀县水土保持中心, 福建 龙岩 366300; 3.北京市水务局政务服务中心, 北京 100071)

摘 要: [目的] 科学评价福建省长汀县楼子坝国有林场不同林龄杉木林的生态功能综合状况, 明确其主要影响因素与提升方向, 为该区域杉木林生态经营与功能优化提供数据支撑和科学依据。[方法] 选取该林场 5 个不同林龄的杉木林设置代表性样地, 从水源涵养、保育土壤和林下植被多样性 3 个维度, 选取 14 个指标构建综合评价体系; 采用层次分析法确定指标权重, 结合加权综合指数法量化生态功能综合评价价值, 运用系统障碍度模型识别制约生态功能提升的关键障碍因子。[结果] ①杉木林生态功能综合评价价值排序为 11 a 林分(0.72) > 7~8 a 林分(0.31) > 3~4 a 林分(0.28), 评价等级分别为Ⅱ级、Ⅳ级、Ⅳ级。生态功能总体随林龄增长呈提升趋势。②随着林龄增加, 水源涵养和保育土壤功能呈提升趋势, 林下植被多样性功能呈下降趋势。③不同林龄段杉木林的核心障碍因子存在显著阶段性差异。3~4 a 林分以枯落物有效拦蓄量、土壤有效蓄水量、土壤侵蚀强度为主, 7~8 a 林分以枯落物有效拦蓄量、土壤有机质含量为主, 11 a 林分以土壤有效蓄水量、Shannon-Wiener 指数、Simpson 指数为主。[结论] 针对该区域杉木林生态经营与功能优化, 应实施差异化改善策略, 针对 3~4 a 林分可人工增施混合枯落物, 沿等高线设置鱼鳞坑与截水沟; 针对 7~8 a 林分采用沟施方式施用腐熟落叶肥或有机肥, 引入乡土阔叶树构建混交林。针对 11 a 林分采取林下植被调控措施, 适度保留乡土灌木和草本植物, 并进行混交改造。

关键词: 楼子坝国有林场; 杉木林; 生态功能; 层次分析法; 障碍度模型

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2026)04-0448-09

中图分类号: S718.55⁺

文献参数: 霍鑫豪, 林根根, 岳辉, 等. 不同林龄杉木林生态功能评价及障碍因子分析[J]. 水土保持通报, 2026, 46(4): 448-456. Huo Xinhao, Lin Gengen, Yue Hui, et al. Evaluation of ecological functions and analysis of obstacle factors in *Cunninghamia lanceolata* forests of different stand ages [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2026, 46(4): 448-456.

DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2026.04.024

CSTR: 32312.14.stbctb.2026.04.024

Evaluation of ecological functions and analysis of obstacle factors in *Cunninghamia lanceolata* forests of different stand ages

Huo Xinhao¹, Lin Gengen², Yue Hui², Jing Yi³, Yang Xuean¹, Shen Ziya¹, Zhao Chenchen¹, Cheng Jinhua¹

(1.School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083,

China; 2.Changting County Soil and Water Conservation Center, Longyan, Fujian 366300,

China; 3.Beijing Municipal Water Authority Administrative Service Center, Beijing 100071, China)

Abstract: [Objective] The comprehensive ecological functions of *Cunninghamia lanceolata* forests of different stand ages in Louziba state-owned forest farm, Changting County, Fujian Province, were evaluated in order to identify the main influencing factors and improvement directions, and to provide data support and a scientific basis for ecological management and function optimization of *C. lanceolata* forests in this region. [Methods] Representative plots were established in five *C. lanceolata* stands of different stand ages. A comprehensive evaluation system consisting of 14 indicators was constructed from three dimensions, namely water conservation, soil conservation, and understory vegetation diversity. The analytic hierarchy process was used to determine indicator weights, the weighted comprehensive index method was used to quantify the comprehensive ecological

收稿日期: 2025-11-24

修回日期: 2026-02-03

采用日期: 2026-02-05

资助项目: 国家重点研发计划项目“南方低质低效人工林质量改善与生态服务提升技术”(2023YFF1304403)

第一作者: 霍鑫豪(2002—), 男(汉族), 河北省邢台市人, 硕士研究生, 研究方向为林业生态工程。Email: m15233927612@163.com。

通信作者: 程金花(1979—), 女(汉族), 山东省聊城市人, 博士, 教授, 主要从事土壤侵蚀、森林水文研究。Email: Jinhua_cheng@126.com。

function value, and the system obstacle degree model was applied to identify the key obstacle factors restricting ecological function improvement. [Results] ① The comprehensive ecological function values of the *C. lanceolata* stands were ranked as 11 a (0.72) > 7—8 a (0.31) > 3—4 a (0.28), corresponding to Grade II, Grade IV, and Grade IV, respectively, indicating that ecological functions generally improved with increasing stand age. ② With increasing stand age, water conservation and soil conservation functions showed an increasing trend, whereas understory vegetation diversity showed a decreasing trend. ③ The core obstacle factors differed significantly among stand ages. For 3—4 a stands, the main obstacle factors were effective litter interception, effective soil water storage, and soil erosion intensity. For 7—8 a stands, the main factors were effective litter interception and soil organic matter content. For 11 a stands, the main factors were effective soil water storage, the Shannon-Wiener index, and the Simpson index. [Conclusion] Differentiated improvement strategies should be adopted for ecological management and function optimization of *C. lanceolata* forests in this region. For 3—4 a stands, mixed litter can be added manually, and fish-scale pits and interception ditches can be arranged along contour lines. For 7—8 a stands, decomposed leaf manure or organic fertilizer can be applied in furrows, and native broad-leaved trees can be introduced to establish mixed forests. For 11 a stands, understory vegetation regulation measures should be adopted, with appropriate retention of native shrubs and herbs, together with mixed-stand transformation.

Keywords: Louziba state-owned forest farm; *Cunninghamia lanceolata* forest; ecological function; analytic hierarchy process; obstacle degree model

森林是自然界中储量丰厚且弥足珍贵的“绿色财富”^[1],既能够为人类社会供给各类有形物质产品,又能输出优质的生态服务^[2]。生态服务是生态系统及其过程为人类创造和维持的环境条件和利益^[3]。而森林具备水土保持、水源涵养、固碳释氧、大气净化、生物多样性保育、营养物质累积等多重生态功能^[4-8]。当前,人口、资源与环境协调发展的理念愈发深入人心,森林生态功能相关研究始终是学界关注的焦点议题^[9-10]。相关研究覆盖从全球森林生态系统的宏观尺度探索^[11],到具体林场、小流域以及森林群落的微观尺度分析^[12],但由于生态功能评价体系缺乏统一标准,不同研究得出的评价结果往往存在显著差异。

层次分析-模糊综合评价法作为评价中的重要技术手段,本质是一种定性分析与定量计算相结合的综合评价模式,目前已广泛应用于林地生态系统^[13]、水域生态环境等^[14]各类场景的生态功能评价实践。该方法核心在于融合层次分析法与模糊综合评价法的技术优势:首先通过层次分析法完成评价体系的结构拆解与层级划分,明确各指标的逻辑关系;随后借助模糊综合评价法对评价对象的各项表现进行多维度评判,构建模糊评判矩阵;最终通过整合后的评价模型计算得出综合评价值^[15-16]。例如,台辉等^[17]利用层次分析法和模糊评价法构建残源沟垦区苹果园生态功能评价指标模型,对其生态功能进行综合评价并进行分级,探究了影响其生态功能提升的主要影响因子。王举位等^[13]对达拉特旗沙棘生态功能

进行综合评价分级,验证该方法的可行性。梅光义等^[18]以北京十三陵林场不同年份数据,计算生态功能指数,进行林分质量和生态功能的评价。

杉木(*Cunninghamia lanceolata*)作为中国南方速生优质用材林的核心造林树种,其人工林分对南方集体林区的生态环境稳态维持与森林生态系统功能发挥具有不可替代的作用^[19]。但值得关注的是,随着杉木人工林连栽代数的递增,单位面积木材产出量呈现持续下滑态势,而其生态功能的逐步衰退,已在相当程度上成为限制该区域林业可持续发展的关键瓶颈^[20-21]。杉木人工林生态功能退化问题已成为生态学领域学者与林业生产实践部门共同聚焦的核心议题。例如,余朝晖^[19]通过对杉木人工林综合服务价值评价,发现成熟林综合服务价值逐年降低。杨玉盛等^[22]通过对福建省南平市王台镇溪后村3代杉木林水源涵养功能对比,发现随着杉木连栽代数的增加,林分水源涵养功能下降。傅瑞青^[23]通过细柄阿丁枫杉木与杉木萌芽林混交,发现混交林的水源涵养能力有较大程度提高。潘红林等^[24]在湖南省浏阳市与湖北省虎爪山,对区域杉木人工林林下植被多样性研究发现,草本多样性及生物量随林龄增长持续下降。当前针对杉木林生态功能的研究多集中于成熟林或连栽林分^[19],而中幼龄林作为林分生长的关键过渡阶段,其生态功能动态演变规律及限制因子尚未明确,导致针对性经营技术缺乏。因此有必要引入系统障碍度模型,对林地生态功能发展的影响因子进行探究,进一步识别林地生态功能

发展中的障碍因子,提高评价的准确性和针对性。

本研究以福建省长汀县楼子坝国有林场为研究区,选取不同林龄(3~11 a)杉木人工林的代表性样地。所选 5 个林龄杉木人工林样地均为林场规模化经营的核心中幼龄代表性样地,无特殊干扰,能够反映南方中幼龄杉木人工林的普遍特征。研究结果对同类区域的杉木林生态经营具有较强的参考价值。从水源涵养、保育土壤和林下植被多样性功能出发,构建符合该区域的生态功能综合评价体系,引入障碍度模型,探究不同林龄(3~11 a)杉木人工林生态功能的演变特征和制约各林龄杉木林生态功能提升的关键障碍因子,并提出适配不同林龄杉木人工林的生态功能优化路径,为南方中幼龄杉木林精细化经营及生态功能提升提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于福建省龙岩市长汀县楼子坝国有林场,该区域地处武夷山脉南麓低山丘陵地带,属中亚热带季风湿润气候,是南方杉木人工林的核心分布区,其立地条件(红壤、低山丘陵)、经营模式(纯林营造)与南方集体林区的杉木林经营现状高度一致。地理坐标介于北纬 25°18′—26°02′,东经 116°00′—116°40′之间。年均气温约 18.3℃,多年平均降水量达 1 700 mm,降水主要集中于 4—6 月的雨季时段,年无霜期 282 d 以上,土壤以酸性红壤为主,土层肥沃,pH 值多在 4.5~5.5 之间,其地带性植被以亚热带常绿阔叶林(壳斗科、樟科、蔷薇科、山茶科)为主。本研究选择该地区杉木人工林为研究对象。

1.2 数据来源

在林场内以 5 个不同林龄(3 a,4 a,7 a,8 a,11 a)的中幼龄杉木林分别设置 20 m×20 m 样地,样地在坡度、海拔高度、造林密度等立地条件上具有相似性(表 1),样地设置 3 组重复。

土壤和枯落物样品以及相关测定指标在 2025 年

5 月中旬开始采集,在样地中心及四角各设置 30 cm×30 cm 小样方,测量枯落物厚度,按未分解层和半分解层采集枯落物样品并称量其鲜重,以供实验室对枯落物各项指标进行测定。土壤样品按照《森林土壤分析方法》进行采集,土壤样品在每个样地沿对角线选取 3 个采样点,按 0—10,10—20 cm 和 20—40 cm 分层采集,用环刀(容积 100 cm³)采集原状土样,采样时每层样品均在该层垂直厚度的中部位置获取(如 0—10 cm 层取 2.5~7.5 cm 深度),以避免层间过渡带干扰,最大限度反映土层实际情况,每层设 3 个重复,确保数据代表性和统计可靠性,先对单个样地各层次枯落物样品、土样分别取平均值,再对同一生长年限的 3 个样地同层采样点的值求平均作为最终值。枯落物有效拦蓄量通过室内浸泡法进行测定,土壤有效蓄水量通过容积法进行测定,土壤非毛管孔隙度的测定按照《森林土壤水分-物理性质的测定》进行测定。

地表径流量和土壤侵蚀强度数据通过设置径流小区监测获取,每个样地设置 3 个 2 m×5 m 径流小区(坡度 15°),小区四周用铁皮围挡,底部设置集流槽与集流桶,收集一次降雨产流和泥沙量,每个样地数据取 3 个径流小区产流和泥沙量的平均值进行计算。

土壤有机质含量测定采用重铬酸钾容量法,土壤速效氮含量测定采用碱解扩散法,土壤速效磷含量测定采用 0.5 mol/L 的碳酸氢钠浸提、钼蓝比色法,土壤速效钾含量测定用 1.0 mol/L 的醋酸铵浸提、火焰光度计法。

林下植被多样性测定参考《森林生态系统林下植被多样性监测与评估规范》(LY/T 2241—2014):在每个 20 m×20 m 标准样地内,布设 3 个 5 m×5 m 灌木样方(调查灌木层物种名称、株数、盖度、平均高度)和 3 个 1 m×1 m 草本样方(调查草本层物种名称、株数、盖度、平均高度),记录所有样方内出现的植被物种,计算 Shannon-Wiener 指数、Simpson 指数、Margalef 指数、Pielou 指数及 Patrick 指数。

表 1 不同林龄杉木林样地基本特征

Table 1 Basic characteristics of sample plots in *Cunninghamia lanceolata* forests of different stand ages

林龄/a	地理坐标	坡度/ (°)	海拔高度/ m	造林密度/ (株·hm ⁻²)	郁闭度	平均 树高/m	平均胸径/ cm
3	25.662 59 096°N, 116.125 29 140°E	52.7	607.99	3 000	0.40	5.03	10.23
4	25.662 90 544°N, 116.126 59 489°E	51.3	593.73	3 000	0.50	5.31	10.92
7	25.670 22 429°N, 116.119 03 770°E	52.7	583.05	2 505	0.70	11.19	12.23
8	25.669 88 307°N, 116.119 83 065°E	52.9	577.01	2 505	0.65	11.64	13.07
11	25.662 51 737°N, 116.123 67 650°E	53.1	636.68	2 250	0.70	14.22	17.49

1.3 评价指标体系的构建

在构建楼子坝国有林场生态功能评价体系时,遵循科学合理性、相对独立性、复合层次性等原则^[25-26],将生态功能综合评价指标体系分为 3 个层次,包括目标层(A)、准则层(B)和指标层(C)。并在前人研究的基础上^[27],结合楼子坝国有林场的实际情况,将楼子坝国有林场生态功能分为水源涵养、保育土壤和林

下植被多样性 3 个方面,在指标选择上,结合楼子坝国有林场的自然情况和区域特性,采用频数统计法统计以往相关论文中使用频率较高的指标,尽可能全面地对指标进行初选;其次,根据独立性分析、对比分析法以及专家打分等方法,由上至下对初选指标进行筛选;最后,征求专家意见确定 14 项作为楼子坝国有林场生态功能评价体系的指标(表 2)。

表 2 长汀县楼子坝国有林场生态功能综合评价指标权重
Table 2 Weights of indicators for comprehensive evaluation of ecological functions in Louziba state-owned forest farm in Changting County

目标层	权重 W ₁	准则层	权重 W ₂	指标层	权重 W ₃	W _{AHP}
楼 子 坝 林 场 生 态 功 能 状 况 (A)	1.000	水源涵养(B ₁)	0.454	枯落物有效拦蓄量(C ₁)	0.484	0.220
				土壤有效蓄水量(C ₂)	0.268	0.121
				地表径流量(C ₃)	0.085	0.038
				土壤非毛管孔隙度(C ₄)	0.163	0.074
		保育土壤(B ₂)	0.364	土壤侵蚀强度(C ₅)	0.416	0.151
				土壤有机质含量(C ₆)	0.262	0.095
				土壤速效氮含量(C ₇)	0.161	0.059
				土壤速效磷含量(C ₈)	0.099	0.036
				土壤速效钾含量(C ₉)	0.062	0.023
				Shannon-Wiener 指数(C ₁₀)	0.423	0.077
				Simpson 指数(C ₁₁)	0.266	0.048
		林下植被多样性(B ₃)	0.182	Margalef 指数(C ₁₂)	0.155	0.028
				Pielou 指数(C ₁₃)	0.096	0.017
				Patrick 指数(C ₁₄)	0.060	0.011

1.4 评价方法

1.4.1 指标权重计算

为确保层次分析法的应用科学性,本研究在专家咨询赋值法的基础上,进一步开展数学分析,对最大特征值进行一致性检验。若一致性检验系数 C_{CR}<0.1,则表明层次总排序结果具备满意的一致性,此时可采纳该分析结论,进而明确各评价指标的权重分配。

1.4.2 评价指标量化

为破解评价指标量纲不一致的难题,本研究依托模糊数学相关理论,引入隶属函数法对各指标原始数据实施无量纲化处理。梯形隶属函数作为隶属函数体系中的重要类型之一,其核心构成包含半升梯形函数与半降梯形函数两大基本形式(表 3)。

半升函数用于评价一定范围内数值越大越好的指标,公式为

$$E_i = \begin{cases} 0 & (x_{ij} \leq x_{ia}) \\ \frac{x_{ij} - x_{ia}}{x_{ib} - x_{ia}} & (x_{ia} \leq x_{ij} \leq x_{ib}) \\ 1 & (x_{ij} \geq x_{ib}) \end{cases} \quad (1)$$

半降函数用于评价一定范围内数值越小越好的指标,公式为

$$E_i = \begin{cases} 1 & (x_{ij} \leq x_{ia}) \\ \frac{x_{ib} - x_{ij}}{x_{ib} - x_{ia}} & (x_{ia} \leq x_{ij} \leq x_{ib}) \\ 0 & (x_{ij} \geq x_{ib}) \end{cases} \quad (2)$$

式中: x_{ij} 为第 i 个指标,第 j 个样地的原始数据值; x_{ia} 为指标 x_{ij} 的下限阈值; x_{ib} 为指标 x_{ij} 的上限阈值。

1.4.3 各级系统效益评价值的确定

本研究采用加权综合指数法由下至上计算每个指标对各级子系统的影响,最后对整个系统进行全面的评价。

$$I = \sum_{i=1}^m w_i \sum_{j=1}^n w_{ij} E_{ij} \quad (3)$$

式中: I 为林场生态功能全系统评价值; E_{ij} 为第 i 个子系统中第 j 个指标的评价值; w_{ij} 为第 i 个子系统中第 j 个指标在该层级所占的权重系数; w_i 为第 i 子系统在该层级所占的权重系数。

1.4.4 生态功能综合评价等级

为直观明晰林场生态功能的综合状态,本研究结合台辉等^[17]的分级思路与专家咨询意见,以模糊数学理论为支撑,将生态功能综合评价等级划分为 5 个连续区间等级,总指数相近的林分在隶属关系上

归为同一生态功能发展等级。楼子坝国有林场生态功能综合等级评价标准为:0.8~1.0 为Ⅰ级,0.6~0.8 为Ⅱ级,0.4~0.6 为Ⅲ级,0.2~0.4 为Ⅳ级,0~0.2 为Ⅴ级。

表 3 研究林场生态功能评价指标释义及无量纲化函数类型
Table 3 Definitions and dimensionless function types of ecological function evaluation indicators in study forest farm

评价指标	指标含义	无量纲化函数类型
枯落物有效拦蓄量(C_1)/mm	枯落物能够有效拦截和蓄积的水量	极大最优
土壤有效蓄水量(C_2)/mm	土壤中含有的大于凋萎湿度的水分贮存量	极大最优
地表径流量(C_3)/m ³	降水后除入渗、蒸发等损失外,沿地表流动的水量	极小最优
土壤非毛管孔隙度(C_4)/%	土壤中大孔隙的数量,是土壤孔隙度的一种	极大最优
土壤侵蚀强度(C_5)/(t·hm ⁻² ·a ⁻¹)	土壤及土壤母质单位面积、单位时间内受侵蚀量的大小,反映了侵蚀强度	极小最优
土壤有机质含量(C_6)/%		极大最优
土壤速效氮含量(C_7)/(g·kg ⁻¹)	土壤肥力的重要组成部分,土壤肥力养分储量指标	极大最优
土壤速效磷含量(C_8)/(g·kg ⁻¹)		极大最优
土壤速效钾含量(C_9)/(g·kg ⁻¹)		极大最优
Shannon-Wiener 指数(C_{10})	用于量化群落生物多样性的数学公式,它既考虑了物种丰富度,也考虑了物种均匀度	极大最优
Simpson 指数(C_{11})	反映生态系统物种种数及各物种间个体分配均匀性的指标	极大最优
Margalef 指数(C_{12})	反映一个生态系统中生物量或生物多样性丰富程度的指标	极大最优
Pielou 指数(C_{13})	衡量群落中物种个体分布均匀程度的指标	极大最优
Patrick 指数(C_{14})	通常指物种丰富度指数,即群落中物种的总数	极大最优

1.4.5 系统障碍度模型

障碍度是指不利于生态功能发挥的障碍因素^[28],本文在楼子坝国有林场生态功能评价的基础上,引入障碍度模型,采用因子贡献度、指标偏离度和障碍度对林场生态功能发展进行分析诊断,便于识别林场生态建设中的薄弱点,为优化林场生态服务工作提供决策参考。计算公式为:

$$I_j = 1 - Y_j \tag{4}$$

$$O_j = \frac{I_j F_j}{\sum_{j=1}^n I_j F_j} \tag{5}$$

式中: I_j 为第 j 个指标林场发展目标的差距,即 100% 与指标标准化值之差; Y_j 为第 j 个指标的标准化值; O_j 为第 j 个指标对林场发展的影响程度; F_j 为第 j 个指标的因子贡献度,即指标对总目标的权重。

2 结果与分析

2.1 指标权重的确定

根据楼子坝国有林场生态功能综合评价体系,运用层次分析法分别计算准则层权重 W_2 和指标层权重 W_3 以及组合权重 W_{AHP} ,其中,准则层矩阵 C_{CR} 为 0,水源涵养、保育土壤和林下植被多样性矩阵的 C_{CR} 值分别为 0.089 8,0.015,0.017 4,均小于 0.1,矩阵的权重值具有可信性,计算结果见表 2。体系的准则层中,水源涵养所占比重大,达到 0.454,是影响林场生态功能水平的关键因素,其次是保育土壤和林下

植被多样性,分别为 0.364,0.182。指标层中,枯落物有效拦蓄量、土壤侵蚀强度、土壤有效蓄水量和土壤有机质含量的 W_{AHP} 分别为 0.220, 0.151, 0.121, 0.095,是林场生态功能状况的主要影响因子,其中 Shannon-Wiener 指数的 W_{AHP} 较高,是林场生态功能状况的重要影响因子。

2.2 楼子坝国有林场生态功能综合评价

2.2.1 指标评价

将楼子坝国有林场生态功能各指标进行无量纲化处理,得到各指标的归一化评价(图 1)。随着林龄的增加,林场水源涵养和保育土壤子系统的各项指标基本呈现上升的趋势,而林下植被多样性的各项指标基本呈现不同程度下降的趋势。

水源涵养子系统中,枯落物有效拦蓄量和地表径流量评价 11 a 时达到最大;土壤有效蓄水量和非毛管孔隙在 7~8 a 时达到最大。水源涵养各项指标评价在 3~4 a 时,基本都为最小,主要与林龄较小,郁闭度小,对水分的固持能力弱有关。随着林龄增大,郁闭度增大,各项指标的评价值逐渐上升。

保育土壤子系统中,土壤侵蚀强度、土壤有机质含量、土壤速效氮含量和土壤速效磷含量评价值呈现先下降后上升的趋势,在 11 a 时达到最大。土壤速效钾含量评价在 3~8 a 时呈现上升的趋势,在 8 a 时达到最大,在 11 a 时出现下降。这些指标评价值的下降主要与林下植被多样性下降有关,林下植被的减少导致土壤肥力一定程度受到影响。

林下植被多样性子系统中,各项指标评价值均在3~4 a时较大,之后呈现下降的趋势,这与林分郁闭度有关,年龄较小时,郁闭度小,林下植被生长条件好,随着郁闭度的增大,林下植被生长条件受限,出现下降的趋势。

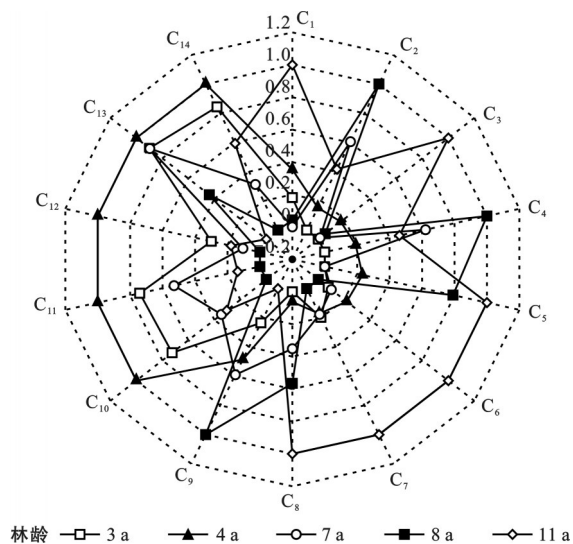


图1 不同林龄归一化综合效益指标评价值
Fig.1 Normalized evaluation values of comprehensive functional indicators for different stand ages

2.2.2 子系统评价价值及系统综合评价等级

生态功能作为一个复合系统,受到水源涵养、保育土壤和生物多样性的共同影响,从整体来看(图2)。水源涵养评价值和保育土壤评价值在11 a达到最大,分别为0.75,0.93,林下植被多样性评价值在3~4 a时最大,为0.84;水源涵养评价值在3~4 a时最小,为0.17,保育土壤评价值在3~4 a时最小,为0.14;林下植被多样性评价值在11 a最小,为0.22;水源涵养评价值和保育土壤评价值总体呈现递增的趋势,而林下植被多样性评价值呈现递减的趋势。

对比5个林龄的生态功能综合评价价值表现为:11 a林分(0.72)>7~8 a林分(0.31)>3~4 a林分(0.28),综合评价价值增幅的不同具体表现在子系统提升水平的差异。3~4 a时生态功能综合评价等级为Ⅳ级,7~8 a时也为Ⅳ级,11 a时达到Ⅱ级,这主要得益于水源涵养和保育土壤功能的上升。

2.3 楼子坝国有林场生态功能发展影响因素分析

通过系统障碍度模型计算研究区域各影响因子的障碍度(图3)。图3中颜色越深代表该因素对生态功能发展的影响程度越大。5个不同林龄的生态功能各影响因子的障碍度变化存在差异。3~4 a时主要障碍因子都为枯落物有效拦蓄量、土壤有效蓄水量和土壤侵蚀强度,分别占0.22,0.15和0.19,0.23和0.17,0.19;7~8 a时主要障碍因子为枯落物有效拦蓄量和

土壤有机质含量分别为0.29,0.11和0.34,0.15;11 a时主要障碍因子为土壤有效蓄水量、Shannon-Wiener指数和Simpson指数,分别占0.26,0.20,0.15。

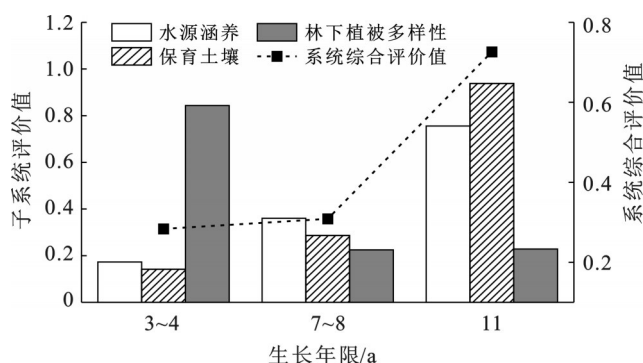


图2 不同林龄子系统及系统综合评价结果
Fig.2 Evaluation results of subsystems and overall system for different stand ages

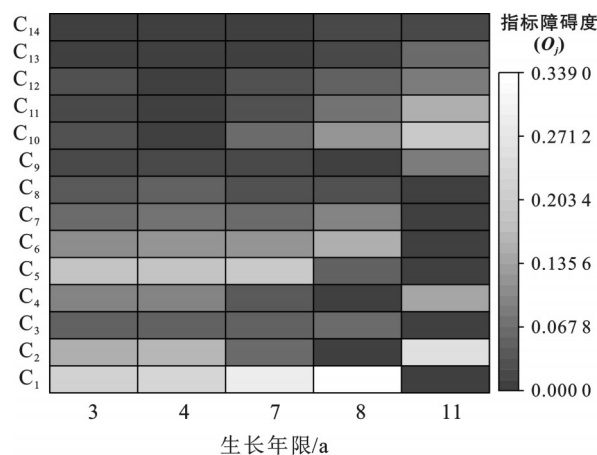


图3 不同林龄障碍因子障碍度结果
Fig.3 Obstacle degrees of obstacle factors for different stand ages

3 结论

(1) 不同林龄杉木人工林生态功能综合评价排序为:11 a林分(0.72)>7~8 a林分(0.31)>3~4 a林分(0.28),其评价等级分别为Ⅱ级、Ⅳ级、Ⅳ级,生态功能随林龄增长整体呈提升趋势。

(2) 水源涵养、保育土壤功能随林龄增长稳定提升,而林下植被多样性功能呈下降趋势,三者的协同与权衡效应决定了林分整体生态功能。

(3) 不同林龄杉木林的核心障碍因子存在差异:3~4 a林分以枯落物有效拦蓄量、土壤有效蓄水量、土壤侵蚀强度为主;7~8 a林分以枯落物有效拦蓄量、土壤有机质含量为主;11 a林分以土壤有效蓄水量、Shannon-Wiener指数、Simpson指数为主。

(4) 根据不同林龄的核心障碍因子实施改善措施,如针对3~4 a林分可人工增施混合枯落物,沿等

高线设置鱼鳞坑与截水沟;针对 7~8 a 林分采用沟施方式施用腐熟落叶肥或有机肥,引入乡土阔叶树构建混交林;针对 11 a 林分采取林下植被调控措施,适度保留乡土灌木和草本植物,并进行混交改造。

4 讨论

本研究以长汀县楼子坝国有林场不同林龄杉木林为对象,从水源涵养、保育土壤和林下植被多样性三大核心功能切入,通过构建综合评价体系并结合障碍度模型,揭示了杉木林生态功能的动态变化规律及限制因素,其结果既与现有研究形成呼应,也呈现出区域特有的生态特征,为南方杉木人工林的精细化经营提供了针对性参考。

4.1 杉木林生态功能演变特征

研究发现,随着林龄增加,杉木林生态功能综合评价整体呈提升趋势,11 a 生杉木林综合评价值(0.72)显著高于其他林龄,且达到Ⅱ级评价水平,这与余朝晖关于不同林龄杉木人工林生态功能的研究结论一致,印证了中龄杉木林在生态功能上的优势^[19]。从子系统来看,水源涵养和保育土壤功能随林龄增长呈现稳定提升态势,这一现象的核心驱动机制可从林分结构与土壤理化性质的协同变化中得到解释:随着杉木林生长,林分郁闭度逐步提高,枯落物累积量增加,其有效拦蓄量显著提升(11 a 林分该项指标评价值最高),同时植被根系深度和密度增加,改善了土壤非毛管孔隙结构,增强了土壤对水分的入渗与蓄存能力,进而降低了地表径流量和土壤侵蚀强度。此外,枯落物分解过程中向土壤输入大量有机质及氮、磷、钾等营养元素,显著提升了土壤肥力,推动保育土壤功能持续优化,这与孙清琳等在云和县森林生态系统水源涵养功能评估中发现的林龄与“土壤蓄水、肥力呈正相关”的规律相符^[6]。

值得注意的是,林下植被多样性功能并未随林龄增长同步提升,反而呈下降趋势,3~4 a 生林分林下植被多样性评价值较高,之后逐步下降,11 a 林分降至较低水平。这一特征与杉木林的群落结构特性密切相关:3~4 a 林分郁闭度适中,林下光照、水分条件良好,为各类草本、灌木植被的生长提供了适宜环境,使得物种丰富度和均匀度维持在较高水平;随着林龄增加,杉木林冠层郁闭度持续增大,林下光照资源匮乏,加之杉木自身对土壤养分的竞争性较强,导致林下伴生植被生长受限,物种数量减少,Shannon-Wiener 指数和 Simpson 指数显著下降,最终表现为林下植被多样性功能衰退。这一结果揭示了杉木人工林在生态功能上的“权衡效应”——水源涵养和保育土壤功能的强化可能以牺牲林下植被多样性为代

价,这与王娜等^[7]在三峡库区森林生态系统服务权衡分析中发现的“单一树种人工林易出现生态功能失衡”的结论具有一致性。

4.2 生态功能障碍因子识别与启示

障碍度模型分析表明,不同林龄杉木林生态功能的主要障碍因子存在显著差异,其演变规律与林分生长阶段的生态过程特征高度耦合,这为分阶段精准调控提供了科学依据。

对于 3~4 a 生杉木林,障碍因子主要集中于枯落物有效拦蓄量、土壤有效蓄水量和土壤侵蚀强度,这是因为郁闭度低、枯落物积累少,土壤结构尚未得到有效改善,水土保持能力较弱。傅瑞青^[23]在福建省尤溪县通过研究发现杉木萌芽林及幼龄林通过营造细柄阿丁枫,改造成针阔混交林,可有效提升杉木林水源涵养能力。因此,针对这一阶段,可通过人工增施枯落物、设置临时水土保持工程(如鱼鳞坑、截水沟)、种植固氮植物等措施,增加地表覆盖,减少土壤侵蚀,快速提升土壤蓄水和抗侵蚀能力,也可以通过改造针阔混交林为杉木林生长创造稳定环境。

对于 7~8 a 生杉木林,障碍因子转变为枯落物有效拦蓄量、土壤有机质含量指数。余朝晖^[19]在福建省闽侯县地区研究发现,在杉木林林龄达到 5 a 以后,林分进入速生阶段和干材阶段,生长速度快,从土壤中吸收的营养物质多于林分养分归还量,反映出该阶段林分进入快速生长期,对养分需求增加,而枯落物分解速率与养分供给速率不匹配,同时林下光照减少导致林下植被多样性下降,开始制约生态系统稳定性。此时应采取林下植被调控措施,适度保留乡土灌木和草本植物,配合施用有机肥,促进枯落物分解和养分循环,同时通过混交改造(如搭配阔叶树种)提升群落多样性,缓解单一杉木林的连栽障碍。

对于 11 a 生杉木林,土壤有效蓄水量、Shannon-Wiener 指数和 Simpson 指数成为主要障碍因子,这与潘红林等^[24]所研究不同林龄杉木人工林林下植被多样性结果一致,杉木人工林中龄林的林下植被多样性下降,成为主要影响因素,表明林分结构趋于稳定,整体生态功能较强,水源涵养与土壤保育功能显著提升,但林冠郁闭度增大会影响林下植被,导致存在水分调控潜力不足和林下植被多样性匮乏的问题。针对这一阶段,可通过优化林分密度、开展择伐更新等措施,降低林冠郁闭度,改善林下微环境,同时引入共生树种构建混交林体系,提升林下植被多样性,同时通过松土改良土壤孔隙结构,增加有效蓄水量,实现生态功能的持续优化。

此外,从各子系统核心障碍因子来看,水源涵养

的主要限制因素为枯落物有效拦蓄量,保育土壤的关键障碍是土壤侵蚀强度,而林下植被多样性的核心制约因子为 Shannon-Wiener 指数,这一结果明确了各功能提升的关键因子。结合张洪达等^[8]在大别山北麓植被水土保持功能评价中提出的分层逐级聚焦的思路,水源涵养功能强化可聚焦枯落物管理,保育土壤功能提升可重点开展水土保持工程与土壤改良,林下植被多样性恢复可通过林分结构优化与乡土物种引入实现,靶向破解这些障碍因子,最终达成杉木人工林生态功能的协同提升,为南方红壤区中幼龄杉木林的精细化经营提供针对性的指导。

4.3 研究局限性

本研究构建的评价体系涵盖了水源涵养、保育土壤和林下植被多样性三大核心功能,但未纳入固碳释氧、净化大气等重要生态功能指标,可能导致评价结果不够全面,未来可扩充指标体系与观测周期,新增固碳量、大气污染物吸附量等指标,开展连续 3~5 a 的定位观测,结合长期数据深入分析林龄、气候、经营措施对生态功能的综合影响,提升研究的学术深度与实践指导性。同时,本研究林龄梯度集中于 3~11 a 中幼龄林,未纳入成熟林,可能导致生态功能演变规律的完整性不足,难以揭示生态功能的长期演变规律,未来需扩大林龄跨度(如增加 15 a, 20 a 生林分)进一步验证结论,并且后续可开展长期定位观测,明确不同林龄的生态功能拐点及调控阈值。

参考文献(References)

- [1] 杨角. 中国绿色城镇化发展水平评价及实现路径研究[D]. 陕西 西安: 西北大学, 2020.
Yang Jiao. The research on the development level evaluation and realization path of green urbanization in China [D]. Xi'an, Shaanxi: Northwest University, 2020.
- [2] 王前进, 王希群, 陆诗雷, 等. 生态补偿的经济学理论基础及中国的实践[J]. 林业经济, 2019, 41(1): 3-23.
Wang Qianjin, Wang Xiqun, Lu Shilei, et al. The basis of economic theory on the ecological compensation and its practice in China [J]. Forestry Economics, 2019, 41(1): 3-23.
- [3] 封志明, 杨艳昭, 李鹏. 从自然资源核算到自然资源资产负债表编制[J]. 中国科学院院刊, 2014, 29(4): 449-456.
Feng Zhiming, Yang Yanzhao, Li Peng. From natural resources accounting to balance-sheet of natural resources asset compilation [J]. Bulletin of the Chinese Academy of Sciences, 2014, 29(4): 449-456.
- [4] 冯源, 田宇, 朱建华, 等. 森林固碳释氧服务价值与异养呼吸损失量评估[J]. 生态学报, 2020, 40(14): 5044-5054.
Feng Yuan, Tian Yu, Zhu Jianhua, et al. Evaluation of forest carbon fixation and oxygen release service value and heterotrophic respiration loss [J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(14): 5044-5054.
- [5] 靳利军. 基于绿色发展的森林资源资产负债表设计机理与实现路径研究[D]. 黑龙江 哈尔滨: 东北林业大学, 2022.
Jin Lijun. Research on design mechanism and realization path of forest resource balance sheet based on green development [D]. Harbin, Heilongjiang: Northeast Forestry University, 2022.
- [6] 孙清琳, 李延森, 郭继凯, 等. 云和县森林生态系统水源涵养功能评估[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2015, 51(5): 888-896.
Sun Qinglin, Li Yansen, Guo Jikai, et al. Assessment of water conservation function of forest ecosystem in Yunhe County, Zhejiang Province [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2015, 51(5): 888-896.
- [7] 王娜, 楚鑫磊, 勾蒙蒙, 等. 三峡库区森林生态系统服务权衡与协同分析[J]. 生态环境学报, 2021, 30(3): 475-484.
Wang Na, Chu Xinlei, Gou Mengmeng, et al. Tradeoffs and synergies analysis on forest ecosystem services in the Three Gorges reservoir area [J]. Ecology and Environment Sciences, 2021, 30(3): 475-484.
- [8] 张洪达, 赵传普, 戴玉婷, 等. 群落尺度植被水土保持功能评价模型的构建: 以大别山北麓安徽省金寨县为例[J]. 水土保持通报, 2022, 42(1): 122-129.
Zhang Hongda, Zhao Chuanpu, Dai Yuting, et al. Construction of evaluation model for soil and water conservation function of vegetation at community scale: Taking Jinzhai County, Anhui Province at northern foot of Dabie Mountains as an example [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(1): 122-129.
- [9] Jin Xingxing, Wei Luyao, Wang Yi, et al. Construction of ecological security pattern based on the importance of ecosystem service functions and ecological sensitivity assessment: A case study in Fengxian County of Jiangsu Province, China [J]. Environment, Development and Sustainability, 2021, 23(1): 563-590.
- [10] 蔡德峰, 张扬建, 丛楠, 等. 藏中联网工程生态系统服务功能重要性评价[J]. 生态学杂志, 2021, 40(2): 593-603.
Cai Defeng, Zhang Yangjian, Cong Nan, et al. Assessment on the importance of ecosystem services along the transmission line of Tibet networking project [J]. Chinese Journal of Ecology, 2021, 40(2): 593-603.
- [11] Acharya R P, Maraseni T, Cockfield G. Global trend of forest ecosystem services valuation: An analysis of publications [J]. Ecosystem Services, 2019, 39: 100979.
- [12] 赵玉堂. 普达措国家公园森林生态系统服务价值评估与分析[J]. 林业调查规划, 2023, 48(3): 208-213.
Zhao Yutang. Evaluation and analysis of forest ecosystem services value in Pudacuo National Park [J]. Forest Inventory and Planning, 2023, 48(3): 208-213.

- [13] 王举位,张征,闫国振,等.基于AHP-模糊综合评价的沙棘生态服务功能研究[J].生态科学,2011,30(4):393-398.
Wang Juwei, Zhang Zheng, Yan Guozhen, et al. Eco-system services of seabuckthorn based on AHP-fuzzy comprehensive evaluation [J]. Ecological Science, 2011,30(4):393-398.
- [14] 陈秀铜,李璐.基于AHP-fuzzy方法的锦屏一级水库生态系统服务功能综合评价[J].长江流域资源与环境,2011,20(1):107-110.
Chen Xiutong, Li Lu. Comprehensive evaluation of eco-system service function of Jinping- I reservoir based on AHP-fuzzy method [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2011,20(1):107-110.
- [15] 刘秋艳,吴新年.多要素评价中指标权重的确定方法评述[J].知识管理论坛,2017,2(6):500-510.
Liu Qiuyan, Wu Xinnian. Review on the weighting methods of indexes in the multi-factor evaluation [J]. Knowledge Management Forum, 2017,2(6):500-510.
- [16] 张涛,任光明,徐树锋,等.基于层次分析法和模糊数学理论的库岸稳定性评价[J].水电能源科学,2013,31(1):115-118.
Zhang Tao, Ren Guangming, Xu Shufeng, et al. Reservoir bank stability evaluation based on AHP and fuzzy mathematics theory [J]. Water Resources and Power, 2013,31(1):115-118.
- [17] 台辉,秦富仓,张茂林,等.残源沟壑区苹果园生态服务功能综合评价研究[J].生态科学,2024,43(3):36-42.
Tai Hui, Qin Fucang, Zhang Maolin, et al. Study on the comprehensive evaluation of the ecological service function of apple orchard in the residual gully regions of Loess Plateau [J]. Ecological Science, 2024, 43(3):36-42.
- [18] 梅光义,孙玉军,于盛梅,等.侧柏林分质量与生态功能综合评价研究[J].林业资源管理,2017(增刊1):1-9.
Mei Guangyi, Sun Yujun, Yu Shengmei, et al. Research on ecological function in evaluation of *Platycladus orientalis* and stand quality assessment [J]. Forest Resources Management, 2017(S1):1-9.
- [19] 余朝晖.不同林龄杉木人工林生态功能比较研究[J].林业勘察设计,2018,38(3):6-10.
Yu Chaohui. Comparison ecological function of *Cunninghamia lanceolata* plantations of different age [J]. Forestry Prospect and Design, 2018,38(3):6-10.
- [20] 李婷婷,陆元昌,庞丽峰,等.杉木人工林近自然经营的初步效果[J].林业科学,2014,50(5):90-100.
Li Tingting, Lu Yuanchang, Pang Lifeng, et al. Initial effect of close-to-nature management of Chinese fir plantation [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2014,50(5):90-100.
- [21] 舒韦维,卢立华,李华,等.林分密度对杉木人工林林下植被和土壤性质的影响[J].生态学报,2021,41(11):4521-4530.
Shu Weiwei, Lu Lihua, Li Hua, et al. Effects of stand density on understory vegetation and soil properties of *Cunninghamia lanceolata* plantation [J]. Acta Ecologica Sinica, 2021,41(11):4521-4530.
- [22] 杨玉盛,陈光水,彭加才,等.不同栽杉代数林分水源涵养功能的分析[J].土壤侵蚀与水土保持学报,1998,12(S1):120-124.
Yang Yusheng, Chen Guangshui, Peng Jiakai, et al. Analysis on preservation of water source function of Chinese fir plantation under different rotations [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1998,12(S1):120-124.
- [23] 傅瑞青.细柄阿丁枫杉木混交林的水源涵养功能研究[J].福建林业科技,2000,27(4):49-51.
Fu Ruiqing. Study on the water conservation function of *Altingia gracilipes* and *Cunninghamia lanceolata* mixed forest [J]. Journal of Fujian Forestry Science and Technology, 2000,27(4):49-51.
- [24] 潘红林,江怡航,刘娜,等.不同林龄及区域杉木人工林林下植被多样性差异[J].林业科学研究,2025,38(6):89-99.
Pan Honglin, Jiang Yihang, Liu Na, et al. Understory vegetation diversity in Chinese fir plantations across stand ages and regions [J]. Forest Research, 2025, 38(6):89-99.
- [25] 徐尚荣.基于熵值法的青海省科技创新能力评价研究[J].青海大学学报(自然科学版),2011,29(1):96-102.
Xu Shangrong. Entropy-based innovation capability evaluation of science and technology in Qinghai [J]. Journal of Qinghai University (Nature Science), 2011, 29(1):96-102.
- [26] 周振民.基于模糊综合评判法水环境评价及其可靠性分析[J].中国农村水利水电,2009(5):15-17.
Zhou Zhenmin. Water environment evaluation based on the fuzzy comprehensive method [J]. China Rural Water and Hydropower, 2009(5):15-17.
- [27] 张柳.南方典型红壤区长汀县水土保持生态系统服务功能及其价值时空演变研究[D].福建 福州:福建师范大学,2024.
Zhang Liu. Study on the temporal and spatial evolution of soil and water conservation ecosystem service functions and values in Changting, a typical red soil area in the south of China [D]. Fuzhou, Fujian: Fujian Normal University, 2024.
- [28] 杨秀敏,耿静,徐游,等.基于TOPSIS模型的海南岛土地综合承载力时空变化及障碍度诊断[J].生态学报,2022,42(22):9324-9334.
Yang Xiumin, Geng Jing, Xu You, et al. Spatio-temporal change and obstacle degree diagnosis of comprehensive land carrying capacity in Hainan Island based on TOPSIS model [J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(22):9324-9334.