山东农业大学学报(自然科学版),2026,57(4):664-674 VOL.57 NO.4 2026
Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science Edition) doi:10.3969/j.issn.1000-2324.2026.04.008

福建南平百年树龄杉木人工林生态系统服务功能评估

吴雅桃[1,2],吴向荣[1,2],涂传进[3],陈明久[4],马祥庆[1,2],孙帅超[1,2*]

1. 福建农林大学林学院,福建 福州 350002
2. 国家林业和草原局杉木工程技术研究中心,福建 福州 350002
3. 福建省南平市延平区林业局,福建 南平 353000
4. 福建省南平市延平区溪后国有林场,福建 南平 353003

摘 要: 长期经营的人工林在演替为近自然林后,其生态系统服务功能会发生深刻变化。位于福建南平安槽下的杉木(*Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook.)林是我国人工林经营史上的珍贵遗产,对其生态价值进行量化评估,对探索高价值人工林培育路径具有重要理论与实践意义。本研究以该百年树龄杉木人工林(4.05 hm^2)为对象,基于全林分实测结果以及社会公共监测数据,对其供给、调节、支持和文化四类服务功能中的八项具体指标进行了系统评估。结果表明:该林分生态系统服务的总价值量为109.48 万元·a^{-1},单位面积价值高达27.03 万元·hm^{-2}·a^{-1},约为全国杉木林平均水平(12.34 万元·hm^{-2}·a^{-1})的2.19倍,生态价值巨大。从价值构成看,供给服务(49.66 万元·a^{-1},占45.36%)和调节服务(41.25 万元·a^{-1},占37.68%)是其主导功能。价值最高的三项功能依次为生物多样性保护(28.35 万元·a^{-1})、涵养水源(24.25 万元·a^{-1})和林木产品供给(21.31 万元·a^{-1}),三者合计占总价值的67.50%,表明该林分已从单一的木材生产功能转变为兼具强大生态保育功能的复合生态系统。研究结果量化了百年树龄杉木人工林的巨大生态潜力和多重价值,可为我国珍稀古老人文森林的保护、经营以及生态价值导向的林业政策制定提供科学依据。

关键词: 百年杉木林;生态价值评估;供给服务;调节服务;安槽下

中图法分类号: S791.27 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-2324(2026)04-0664-11

Assessment of Ecosystem Service in a Century-Old Chinese Fir Plantation in Nanping, Fujian

WU Ya-tao[1,2], WU Xiang-rong[1,2], TU Chuan-jin[3], CHEN Ming-jiu[4], MA Xiang-qing[1,2], SUN Shuai-chao[1,2*]

1. *College of Forestry/Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002,China*
2. *National Forestry and Grassland Bureau Fir Engineering Technology Research Centre, Fuzhou 350002,China*
3. *Forestry Bureau/Yanping District,Nanping 353000,China*
4. *Xihou State-owned Forestry Farm/Yanping District, Nanping 353003,China*

Abstract: Long-term managed plantations undergo profound changes in their ecosystem service functions as they succeed towards near-natural forests. The *Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook. forest,located in Ancaoxia, Nanping, Fujian, is a precious heritage in the history of China's plantation management. Quantifying its ecological value holds significant theoretical and practical importance for exploring pathways to cultivate high-value plantations. This study focuses on this 4.05 hm^2 century-old Chinese fir plantation, systematically assessing eight specific indicators across four categories of service functions—provisioning, regulating, supporting, and cultural—based on field measurements of the entire stand and publicly available monitoring data. The results indicate that the total annual value of the stand's ecosystem services is 1.094 8 million CNY·a^{-1}, with a per-unit-area value reaching 0.270 3 million CNY·hm^{-2}·a^{-1}. This is approximately 2.19 times the national average for Chinese fir forests (0.123 4 million CNY·hm^{-2}·a^{-1}), demonstrating its immense ecological value. In terms of value composition, provisioning services (0.496 6 million CNY·a^{-1}, 45.36%) and regulating services (0.412 5 million CNY·a^{-1}, 37.68%) are the dominant functions. The three highest-value functions are biodiversity conservation (0.283 5 million CNY·a^{-1}), water conservation (0.242 5 million CNY·a^{-1}), and timber product supply (0.213 1 million CNY·a^{-1}), which collectively account for 67.50% of the total value. This signifies that the stand has transitioned from a single-purpose timber production forest to a complex ecosystem with powerful ecological conservation functions. These findings quantify the huge ecological potential and multiple values of century-old Chinese fir plantations,

收稿日期: 2025-12-18 **修回日期:** 2026-06-18
基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFF1304405)
第1作者简介: 吴雅桃(2001-),女,硕士研究生,研究方向:森林可持续经营与管理。1102185902@qq.com
***通讯作者:** Author for correspondence. E-mail:sun_sc@yeah.net

providing a scientific basis for the conservation and management of rare and ancient cultural forests, as well as for the formulation of eco-value-oriented forestry policies in China.

Keywords: Century-old Chinese fir forest; ecological value assessment; provisioning services; regulating services; Ancaoxia

生态系统服务是指生态系统为维持人类生存和发展所提供的产品与惠益，是连接自然生态系统与人类福祉的关键桥梁[1,2]。自 Costanza 等[3]对全球生态系统服务价值进行量化以来，生态系统服务（Ecosystem Services，ES）的评估已成为全球环境科学、生态学和经济学交叉研究的核心议题，并被纳入千年生态系统评估（Millennium Ecosystem Assessment，MEA）和生物多样性与生态系统服务政府间科学政策平台（Intergovernmental science-policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services，IPBES）等全球性议程，为生态保护和可持续发展决策提供了重要的科学支撑[4]。

森林作为陆地上面积最广、结构最复杂、生物多样性最丰富的生态系统，是全球生态系统服务最重要的供给者[5]。然而，在全球森林资源中，人工林的地位和功能一直受到争议。传统观点认为，人工林多为结构单一、集约经营的同龄纯林，其主要目标是木材供给，而在生物多样性保护、水源涵养等调节和支持服务方面，其功能远逊于天然林[6,7]。但随着研究的深入，学者们发现，人工林经过长期演替和科学经营，特别是当人工林进入成熟或过熟阶段，其林分结构会趋于复杂化，物种多样性逐渐恢复，生态功能也随之发生深刻演变，逐步向近自然林过渡，其生态系统服务功能可能得到极大的提升和重塑[8,9]。因此，对长周期、近自然化的人工林进行生态系统服务评估，对于重新认识人工林的生态潜力具有重要的科学价值。

我国是世界上人工林面积最大的国家，人工林经营在满足木材需求、实现“双碳”目标和建设生态文明等国家战略中扮演着举足轻重的角色[10]。早期，以侯元兆等[11]为代表的学者对森林的多种生态效益进行了系统性论述和估算，为后续研究奠定了基础。此后，欧阳志云等[12]和王兵等[13]构建了符合中国国情的森林生态系统服务功能评估技术体系，被广泛应用于全国和区域尺度的评估，极大地推动了我国森林生态系统服务的研究进程。近年来，区域宏观尺度[14-17]或特定森林类型[18,19]常规林龄林分的生态系统服务评估研究不断深入。然而，现有研究多集中于中幼龄林，而针对历经百年自然演替、具有独特历史人文价值的古老人工林，其生态系统服务功能的构成、价值及其演变规律，相关的系统性评估仍显不足。

位于福建南平溪后村安槽下的人工杉木林，于 1919 年人工扦插营造，是我国现存经营历史最悠久、有明确起源和经营历史记载的杉木人工林之一[20]。从单一用材林到近自然复层异龄林，林内不仅保留了百年树龄的高大通直杉木，还自然繁衍了大量阔叶树种，形成了独特的乔-灌-草复合结构[21-24]。这片古老的杉木林曾因其卓越的丰产性被国务院授予“绿色金库”的称号，不仅见证了我国人工林长期自然演替的生态进程，更承载着地方林业发展的历史与文化。因此，对其进行全面评估，不仅能揭示其现实的生态价值，更能为理解人工林生态系统功能的长期动态提供独特的实证案例。

为此，本研究以安槽下百年树龄杉木人工林为对象，基于全林分实测数据，结合社会经济参数，采用规范化的评估方法，旨在科学量化其供给、调节、支持和文化四大类生态系统服务功能的构成与价值。通过与全国同类森林的对比，揭示其作为长期演替人工林的独特生态功能特征与巨大价值潜力，为我国古老人文森林的保护、经营以及生态价值导向的林业政策制定提供科学依据与数据支持。

1　研究区域概况

研究地位于福建省南平市延平区溪后村安槽下（117° 55′15″~117° 55′30″E，26° 40′05″~26° 40′15″N），属中亚热带季风性湿润气候，年平均气温 19.3 ℃，年均降水量 1 664 mm，年均日照时数 1 715 h，无霜期约 300 d，地貌为低山丘陵，土壤类型主要是由花岗岩风化物发育而成的山地黄壤，土层厚度大于 80 cm。

研究对象为南平市安槽下现存的百年树龄杉木人工林，总面积 4.05 hm^2。该林分于 1919 年采用本地优良种源进行扦插造林，初植密度约为 3 600 株·hm^{-2}。林分建立后，除早期的抚育和少量间伐外，近几十年来基本处于封禁保护状态，

逐步演替为近自然林。根据2024年对该林分进行的全面调查，林分蓄积量为2 473.93 m³，共有乔木5 156株，树种75种，灌木和草本植物95种。林分内主要优势树种为杉木，伴生树种丰富，主要有木荷（*Schima superba* Gardner & Champ.）、栲树（*Castanopsis fargesii* Franch.）、青冈（*Quercus glauca* Thunb.）等70余种阔叶树种，形成了明显的乔-灌-草复层结构。该林分独特的起源历史、长期的演替过程和优良的林分结构，使其成为评估人工林生态价值演变潜力的理想样板。

2 材料和方法

2.1 数据来源

安槽下百年树龄杉木林生态系统服务功能的评估由基于实物产出的物质量测算和生态效益货币化的价值量测算组成。评估数据主要基于2024年全林分每木实测结果（表1），对林分内所有胸径≥5 cm的林木，采用Vertex IV超声波测高仪测定树高、围径尺测定胸径、皮尺测定冠幅，同步进行唯一性编号，并记录树种、存活状态（活立木/枯立木）及特殊特征（如断梢、分叉）。同时，使用DJI M300 RTK无人机、GoSLAM三维激光扫描仪进行每株树木坐标标定以及林分面积边界定位。

本研究使用的化肥价格及污染物治理费用等信息来源于社会公共数据（表2），包括中华人民共和国卫生部（www.nhfpc.gov.cn）、南平市人民政府官网（www.np.gov.cn）、中国化肥网（www.fert.cn）、农资网（www.ampcn. com）等相关统计报告。对于部分难以实地测量的生态过程参数，如净初级生产力、土壤侵蚀模数等，采用与本研究区的植被类型、气候条件等相近的文献研究中的成果。

表 1 百年树龄杉木林全林分实测结果

Table 1 Whole forest measurements of the century-old Chinese fir plantation

树种 Species	杉木 Chinese fir	阔叶树 Broadleaved tree
株数/株 Number of trees	2 327	2 829
平均胸径/cm Average diameter at breast height	32.91	12.91
最大胸径/cm Maximum diameter at breast height	66.33	120.00
平均树高/m Average tree height	27.07	10.70
最大树高/m Maximum tree height	44.40	33.30
蓄积量/m³ Stand volume	2 206.42	267.51

2.2 森林生态系统服务功能的评估方法及指标

评估体系主要参照《森林生态系统服务功能评估规范》（GB/T 38582-2020）[27]，并结合研究区的具体情况，选取了供给服务、调节服务、支持服务和文化服务4大类共8项指标，具体包括涵养水源、保育土壤、木材产品供给、固碳释氧、净化大气环境、林木养分固持、生物多样性保护和森林康养功能，系统地进行量化评估工作。

将定量的生态物质量转化为经济价值量时，除依据规范中的计算方法外，还采用了应税污染物当量、等效替代价格等方法。此外，由于部分价格参数可能不是评估年份的实际价格，引入价格参数动态调整因子（D），将非评估年份的价格参数调整到评估年份（2024年）的水平，可以更准确地实现对森林生态系统功能在某一特定时间点的精准量化评估。其公式如下：

$$D = (1 + dn + 1) \times (1 + dn + 2) \cdots (1 + dm) \quad (1)$$

$$d = (Dr + Lr)/2 \quad (2)$$

式中：d、n、m分别表示价值指数、价格参数的对应年份（年）、评估年份（年）；D_r、L_r分别表示银行平均存、贷款利率（%）。

表 2 森林生态系统服务评估社会公共资源数据

Table 2 Social public resource data for forest ecosystem services assessment

编号 Number	名称 Name	单位 Unit	出处值 Provenance	价格 Price	来源及依据 Source and basis
1	水库建设单位库容投资 Investment in reservoir capacity by construction units	元·t^{-1}	10.28	11.99	相关研究[25]
2	水的净化费用 Water purification costs	元·t^{-1}	2.06	2.81	2012年南平市人民政府官网。
3	挖取单位面积土方费用 Excavation cost per unit area	元·m^{-3}	73.08	85.73	相关研究[26]
4	磷酸二铵含氮量 Nitrogen content in diammonium phosphate	%	14	14	
5	磷酸二铵含磷量 Phosphorus content in diammonium phosphate	%	15.01	15.01	化肥产品说明
6	氯化钾含钾量 Potassium content in potassium chloride	%	50	50	
7	磷酸二铵化肥价格 Price of diammonium phosphate fertilizer	元·t^{-1}	2 400	2 799.60	
8	氯化钾化肥价格 Price of potassium chloride fertilizer	元·t^{-1}	2 200	2 566.30	2018年中国化肥网、农资网
9	有机质价格 Price of organic matter	元·t^{-1}	800	933.20	
10	固碳价格 Price of carbon sequestration	元·t^{-1}	1 200	1 632.86	《中国统计年鉴》
11	制造氧气价格 Cost of oxygen production	元·t^{-1}	1 000	1 547.05	2007年中华人民共和国卫生部氧气均价
12	负离子产生费用 Cost of negative ion generation	元·10^{-18}个	9.46	11.92	根据企业生产负离子寿命、电费得负离子费用
13	二氧化硫治理费用 Cost of sulfur dioxide abatement	元·kg^{-1}	2.15	2.44	中华人民共和国国家发展和改革委员会第四部委2003年第31号令《排污费征收标准及计算方法》。
14	氟化物治理费用 Cost of fluoride abatement	元·kg^{-1}	1.23	1.74	
15	氮氧化物治理费用 Cost of nitrogen oxides abatement	元·kg^{-1}	1.13	1.40	
16	降尘清理费用 Cost of dust control	元·kg^{-1}	0.27	0.31	
17	生物多样性保护价值 Value of biodiversity conservation	元·hm^{-2}·a^{-1}	/		相关规范[27]

2.2.1 支持服务

2.2.1.1 保育土壤功能　森林保育土壤功能主要包含固土和保肥功能,其主要计算公式如下:

$$U_{固土} = A \times (X_2 - X_1) \times C_{固土}/\rho \quad (3)$$

式中:$U_{固土}$为每年固土效益的价值计量(万元·a^{-1}),A为面积(4.05 hm^2);X_1为林地土壤侵蚀模数,针、阔叶林分别取值1.294、0.295 t·hm^{-2}·a^{-1};X_2表示无林地的平均侵蚀模数[28],取值35 t·hm^{-2}·a^{-1};$C_{固土}$为土方挖运的单位成本(元·m^{-3})(表2);ρ为土壤密度,根据杨玉盛等[29]对该林分的研究结果,取值1.172 g·cm^{-3}。

$$U_{肥} = A \times (X_2 - X_1) \times (N \times \frac{C_1}{R_1} + P \times \frac{C_1}{R_2} + K \times \frac{C_2}{R_3} + M \times C_3) \quad (4)$$

式中：$U_{肥}$表示每年保肥功能的价值（万元·a^{-1}），M、K、N、P分别表示实测林分中土壤含有机质、钾、氮、磷量，其含量分别取值为4.382%、1.830%、0.166%、0.095%[29]；R_1、R_2、R_3分别表示化肥磷酸二铵含氮、磷量、氯化钾含钾量（%）（表2）；C_1、C_2、C_3分别表示化肥磷酸二铵、氯化钾、有机质价格（元·t^{-1}）（表2）。

2.2.1.2 林木养分固持功能　林木养分固持的通用计算公式如下：

$$U_{营养} = A \times B_{年} \times (N \times \frac{C_1}{R_1} + P \times \frac{C_1}{R_2} + K \times \frac{C_2}{R_3}) \quad (5)$$

式中：$U_{营养}$表示林分固持氮、磷、钾的价值（万元·a^{-1}）；$B_{年}$为林分净生产力，杉木过熟林[30]、阔叶林[31]净生产力分别取值为9.992、11.260 t·hm^{-2}·a^{-1}；N、P、K分别表示林分含氮量、含磷量以及含钾量，杉木的平均N、P、K含量分别为0.129%、0.021%和0.164%，阔叶树的平均N、P、K含量分别为0.826%、0.035%和0.633%[32]。

2.2.2 调节服务

2.2.2.1 涵养水源功能　涵养水源的主要计算公式如下：

$$U_{调} = 10 \times A \times (P - E - C) \times C_{库} \quad (6)$$

$$U_{净} = 10 \times A \times (P - E - C) \times K_{水} \quad (7)$$

式中：$U_{调}$、$U_{净}$表示林分调节水量、净化水质的年评估值（万元·a^{-1}）；$C_{库}$、$K_{水}$表示水的市场交易单价（元·m^{-3}）、净化水的成本（元·a^{-1}）（表1）；P、E、C分别表示降水量、蒸散量及径流量（mm·a^{-1}）。

2.2.2.2 固碳释氧功能　固碳释氧的主要计算公式如下：

$$U_{碳} = A \times (1.63 \times R_{碳} \times B_{年} + S_{碳}) \times C_{碳} \quad (8)$$

$$U_{氧} = 1.19 \times A \times B_{年} \times C_{氧} \quad (9)$$

式中：$U_{碳}$、$U_{氧}$分别表示评估林分年固碳、年释放氧气价值（万元·a^{-1}）；$R_{碳}$表示二氧化碳中的碳含量（27.27%）；$S_{碳}$为单位面积的土壤固碳量[33]，杉木、阔叶树取值分别为0.655 9、1.646 6 t·hm^{-2}·a^{-1}；$C_{碳}$、$C_{氧}$表示固碳、氧气价格（元·t^{-1}）（表2）。

2.2.2.3 净化大气环境功能　净化大气环境的主要计算公式如下：

$$U_{负离子} = 5.256 \times 10^{15} \times A \times H \times K_{负离子} \times (Q_{负离子} - 600)/L \quad (10)$$

$$U_{污染物} = A \times Q_{污染物} \times K_{污染物} \quad (11)$$

式中：$U_{负离子}$表示评估林分年提供负离子价值（万元·a^{-1}）；$U_{污染物}$表示评估林分年吸收氮氧化物、氟化物、二氧化硫价值（元·a^{-1}）；$K_{负离子}$为投入负离子的成本（元·个$^{-1}$）；$K_{污染物}$表示处置二氧化硫、氟化物、氮氧化物、降尘的成本（元·kg^{-1}）（表2）；$Q_{负离子}$表示负离子浓度，杉木、阔叶树平均负离子浓度分别为1 234、1 387 个·cm^{-3}[34]；$Q_{污染物}$表示二氧化硫、氟化物、氮氧化物以及降尘单位面积年滞尘量，杉木平均吸收$Q_{污染物}$分别取值215.60、0.50、6.00、34 452.90 kg·hm^{-2}·a^{-1}，阔叶林平均吸收$Q_{污染物}$分别取值88.65、4.65、6.00、45 229.90 kg·hm^{-2}·a^{-1}[35]，H为实测林分高度（m）。

2.2.3 供给服务

2.2.3.1 物种资源保育　物种资源保育的主要计算公式如下：

$$U_{生} = (1 + \sum_{m=1}^{x} E_m \times 0.1 + \sum_{n=1}^{y} B_n \times 0.1 + \sum_{r=1}^{z} O_r \times 0.1) \times S_{生} \times A \quad (12)$$

式中：$U_{生}$表示物种资源保育的年评估价值（万元·a^{-1}）；x、y、z分别是林分内的珍稀种、特有种及古树物种数量；E_m、B_n、O_r分别评估物种m、n、r的珍稀、特有种、古树年龄指数；$S_{生}$是每年单位面积内生物多样性的经济效益（元·hm^{-2}·a^{-1}），基于《中国生物多样性红色名录》[36]的分类标准，结合全林分调查结果和Shannon-Wiener多样性指数计算，乔木层、林下灌草层（经剔除潜在乔木化物种后）取值均在2~3之间，根据生物多样性指数等级划分得到$S_{生}$取值为10 000元·hm^{-2}·a^{-1}[27]。

2.2.3.2 林木产品供给　林木产品供给的主要计算公式如下：

$$U_{木材产品} = \sum_{i}^{n} (A_i \times S_i \times U_i)(i = 1,2,\cdots,n) \quad (13)$$

式中：$U_{木材产品}$表示木材产品的年评估价值（万元·a^{-1}），A_i、U_i、S_i分别为第i种产品的林地面积（hm^2）、单价（元·m^{-3}）、单位面积年蓄积生长量（m^3·hm^{-2}·a^{-1}）。计算数据来源于实测林分蓄积量，结合二元材积生长率参数（杉木4.41%，阔叶树10.30%）[37,38]和2024年平均市场价格（胸径

32 cm杉木平均1 400 元·m^{-3}，胸径5~20 cm阔叶树平均670元·m^{-3}），最终实现经济价值贴现。

2.2.4 文化服务

安槽下百年树龄杉木林作为一处免费对公众开放的场所，其文化服务功能不容忽视。文化服务功能价值主要计算公式如下：

$$U_{文化} = \lambda(Q_{旅游} + M_{其他}) \quad (14)$$

式中：$U_{文化}$表示文化功能价值（万元·a^{-1}），$Q_{旅游}$和$M_{其他}$分别表示旅游收入和直接带动的其他产业的产值（万元·a^{-1}）。其中，旅游价值参考南平市延平区公布的王台镇“绿色金库＋红色文化”研学情况，结合何霜[39]研究成果综合估算。由于目前地区配套设施缺失，开发不全，其他产业价值暂未纳入本次评估。λ代表不同地区的调节系数，参考相关规范南平市取值为0.8[27]。

3　结果

3.1　百年树龄杉木林生态系统服务功能物质量评估

表3结果表明，目前安槽下百年树龄杉木林保育土壤的总物质量为148.62 t·a^{-1}，保育土壤指标涵盖了固土量、固氮、固磷、固钾以及固有机质，其中固土量138.53 t·a^{-1}＞固有机质6.60 t·a^{-1}＞固钾3.12 t·a^{-1}＞固氮0.24 t·a^{-1}＞固磷0.13 t·a^{-1}，固土量占比最高（约93%）；林木对养分固持的总物质量为0.40 t·a^{-1}，其中氮固持（0.21 t·a^{-1}）和钾固持量（0.18 t·a^{-1}）远高于磷固持量（0.01 t·a^{-1}）；涵养水源总物质量为16 384.85 m^3·a^{-1}；固碳、释氧总物质量分别为23.78 t·a^{-1}、51.21 t·a^{-1}，说明该森林生态系统中的植物生长旺盛，通过光合作用，较高效率地实现氧气释放与二氧化碳吸收；在大气环境净化功能方面，吸收二氧化硫、氟化物和氮氧化物的总物质量为0.65 t·a^{-1}，提供负离子个数为6.20×10^{19}个·a^{-1}。

3.2　百年树龄杉木林生态系统服务功能价值量评估

根据表4，安槽下森林生态系统服务功能分为供给、调节、支持和文化服务四类。各类服务功能以价值高低为序，依次为供给服务（49.66万元·a^{-1}）＞调节服务（41.25万元·a^{-1}）＞文化服务（14.4万元·a^{-1}）＞支持服务（4.17万元·a^{-1}）。安槽下百年树龄杉木林木材产品和物种资源较为丰富和优质，供给服务在生态系统服务中占据主导地位，贡献率达45.36%；其次为调节服务和文化服务，贡献率达37.68%、13.15%；支持服务占比相对较低。

根据图1，按照各项服务功能价值的贡献大小排序，依次为：保护生物多样性（28.35万元·a^{-1}，25.89%）＞涵养水源（24.25万元·a^{-1}，22.15%）＞林木产品供给（21.31万元·a^{-1}，19.46%）＞森林康养（14.4万元·a^{-1}，13.15%）＞固碳释氧（11.80万元·a^{-1}，10.78%）＞净化大气环境（5.20万元·a^{-1}，4.75%）＞保育土壤（3.95万元·a^{-1}，3.61%）＞林木养分固持（0.22万元·a^{-1}，0.20%）。从林木产品经济价值与生态价值角度来看，林木产品经济价值为21.31万元·a^{-1}，生态价值为88.17万元·a^{-1}，生态服务价值显著高于经济价值，大约是经济价值的4.13倍，这表明百年树龄杉木林生态系统已从过去的用材林慢慢转变为公益林，更加注重森林的长期健康和生态功能的维护，而非短期的经济利益。

3.3　百年树龄杉木林内不同植被层的生态服务功能对比

图2为百年树龄杉木林内乔木层和林下层的生物多样性功能对比。林分物种资源保育价值量为28.35万元·a^{-1}，其中乔木层生物多样性价值量（18.22万元·a^{-1}）显著高于林下层（10.13万元·a^{-1}）。在乔木层中，本次调查识别并记录了15种珍稀濒危物种、17种特有种、3种古树；林下层珍稀濒危物种有6种，特有种有9种。乔木层在珍稀濒危、特有和古树物种数量上均高于林下层。

图3和图4分别为杉木和阔叶树的林木产品供给和林木养分固持价值对比。在林木产品供给方面，杉木的价值量为13.62万元·a^{-1}，显著高于阔叶树的7.68万元·a^{-1}。但在林木养分固持方面，杉木的价值量仅为0.03万元·a^{-1}，远小于阔叶树的价值量0.19万元·a^{-1}。杉木作为典型用材树种且年龄更大，林产品供给能力较强，然而其林木养分固持功能却显著弱于阔叶树种。

4　讨论

4.1　百年树龄杉木林生态系统服务的价值特征与主导功能演变

安槽下百年树龄杉木林单位面积生态服务

表 3 百年树龄杉木林生态系统服务功能的物质量评估

Table 3 Physical quantity assessment of forest ecosystem services of the century-old Chinese fir plantation

类别 Category	指标 Index	林分平均物质量 Average amount of material	每公顷单位面积物质量 Mass per unit area per hectare
保育土壤 Soil conservation	固土量/(t·a^{-1}) Soil Stabilization	138.53	34.20
	固氮/(t·a^{-1}) Nitrogen fixation	0.24	0.06
	固磷/(t·a^{-1}) Phosphorus fixation	0.13	0.03
	固钾/(t·a^{-1}) Potassium fixation	3.12	0.77
林木养分固持 Nutrient retention	固有机质/(t·a^{-1}) Organic matter sequestration	6.60	1.63
	氮固持/(t·a^{-1}) Nitrogen retention	0.21	0.05
	磷固持/(t·a^{-1}) Phosphorus retention	0.01	0.002
	钾固持/(t·a^{-1}) Potassium retention	0.18	0.04
涵养水源 Water regulation	调节水量/(m^3·a^{-1}) Regulation of water quantity	8 192.42	2 022.82
	净化水质/(m^3·a^{-1}) Water quality purification	8 192.42	2 022.82
固碳释氧 Carbon sequestration and oxygen release	固碳/(t·a^{-1}) Carbon sequestration	23.78	5.87
	释氧/(t·a^{-1}) Oxygen release	51.21	12.64
净化大气环境 Air purification	提供负离子数/(个·a^{-1}) Generation of negative ions	6.20×10^{19}	1.53×10^{19}
	吸收二氧化硫/(t·a^{-1}) Absorption of sulfur dioxide	0.62	0.15
	吸收氟化物/(t·a^{-1}) Absorption of fluorides	0.01	0.002
	吸收氮氧化物/(t·a^{-1}) Absorption of nitrogen oxides	0.02	0.004

价值高达 27.03 万元·hm^{-2}·a^{-1}，这不仅是王兵等[18]评估的全国杉木林平均水平（12.34 万元·hm^{-2}·a^{-1}）的 2.19 倍，更是全国森林生态系统平均水平（4.26 万元·hm^{-2}·a^{-1}）的 6.35 倍[35]。这一显著差异揭示了历经长期、低干预自然演替的人工林在生态系统服务能力上具有巨大潜力。在价值构成上，该林分以生物多样性保护、涵养水源、林木产品供给为核心生态服务功能，其价值排序与康开权[40]对福建省其他国有林场的评估结果具有高度一致性，也印证了杨海江等[41]关于中国森林生态系统服务评估研究的普遍结论，即这些调节与支持服务是衡量森林生态系统健康状况的关键指标。

本研究中生物多样性保护功能的价值（28.35 万元·a^{-1}）尤为突出，成为价值最高的单项服务。这主要得益于研究区独特的保护历史与演替阶段，地方政府长期对该林分实施的严格封禁保护，为物种的自然定居、繁衍和群落的复杂化创造了稳定环境，使其从人工纯林演替为物种丰富的复层异龄林。这种包含高大针叶乔木、繁

表 4 百年树龄杉木林生态系统服务功能的价值量评估

Table 4 Value quantity assessment of ecosystem services of the century-old Chinese fir plantation

服务功能类别 Service function category	林分平均价值量/(万元·a^{-1}) Average value of whole stand	单位面积价值量/(万元·hm^{-2}·a^{-1}) Value per unit area	总价值量/(万元·a^{-1}) Total value	价值比例/% Ratio
供给服务 Provisioning services	物种资源保育:28.35	7.00	49.66	45.36%
	林木产品供给:21.31	5.26		
调节服务 Regulating services	涵养水源:24.25	5.99	41.25	37.68%
	固碳释氧:11.80	2.91		
	净化大气环境:5.20	1.28		
支持服务 Supporting services	保育土壤:3.95	0.98	4.17	4.03%
	林分养分固持:0.22	0.05		
文化服务 Cultural services	森林康养:14.4	3.56	14.4	13.15%
合计		27.03	109.48	100%

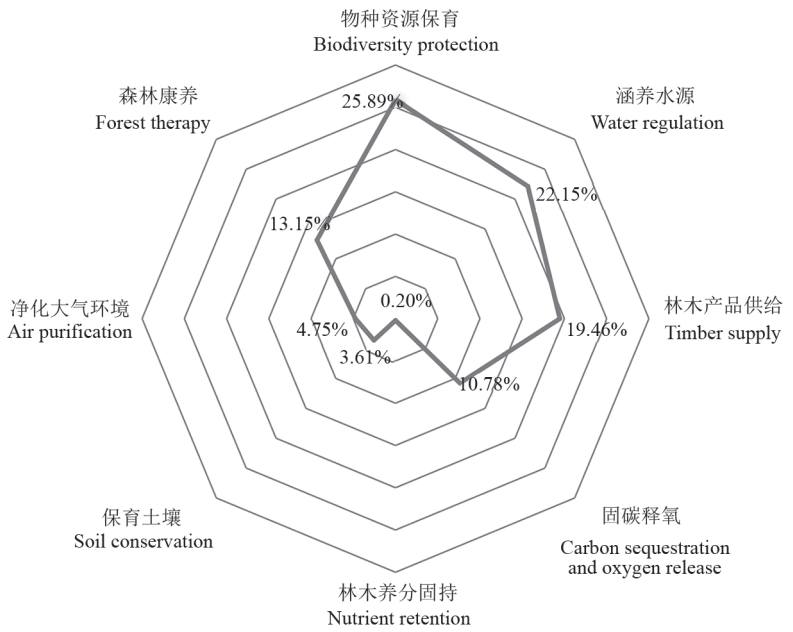


图 1 百年树龄杉木林的生态系统服务价值构成

Fig. 1 Composition of ecosystem service values of the century-old Chinese fir plantation

茂阔叶伴生树及丰富灌草层的复层结构,结合长期累积的深厚枯枝落叶层,极大地增强了林冠截留与土壤持水能力,强化了水源涵养功能。同时,尽管林分已转为以保育为主,但其保留了巨大的杉木大径材蓄积量,且伴生阔叶树种持续积累生物量,使得该生态系统在发挥高水平调节服务的同时,仍保持着卓越的供给服务潜力。因此,该林分的主导功能已从建立初期的木材供给,演变为当前以生态保育为主、兼具优质大径材供给能力的复合功能体系。这为我国未来进入成熟龄期的大量人工林验证了通过近自然化经营提升生态价值的可行路径[42]。

4.2　阔叶树混交对生态系统服务功能优化的贡献

阔叶树种的自然定居与生长,是安槽下林分生态功能优化的内在驱动力。研究发现,尽管杉木作为目标树种在林木产品供给上具有显著优势,但阔叶树种在维持物种丰富度及珍稀特有物种保育方面的贡献率远高于单一杉木,乔木层及林下层的珍稀濒危与特有物种主要由阔叶树种构成。在物质循环与能量流动方面,阔叶树种表现出更强的养分固持与固碳释氧优势,这主要归

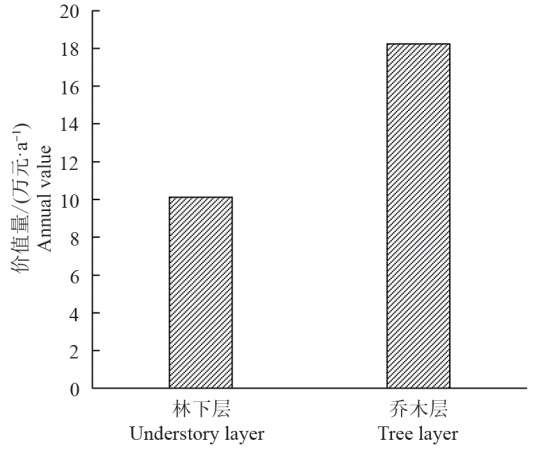


图 2 百年树龄杉木林乔木层与林下层的生物多样性价值量对比

Fig. 2 Comparison of biodiversity values between tree layer and understory of the century-old Chinese fir plantation

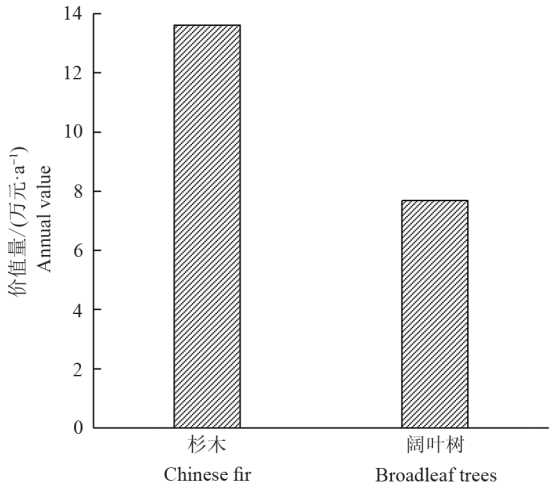


图 3 百年树龄杉木林不同树种的林木产品供给价值量对比

Fig. 3 Comparison of timber product supply values of different tree species in the century-old Chinese fir plantation

因于生物量作为功能核心载体的累积效应[43]。阔叶树不仅年净生产力高于杉木，其氮、磷、钾养分含量也显著更高，分别为杉木的6.4、3.7和3.9倍[32]。这种高生产力与高养分浓度的双重特性，显著提升了单位面积内林木对养分的吸收与储存效率，使其林木养分固持价值达到杉木的6倍以上。这一结果符合阔叶树种通常具有高叶片养分含量、能加速林地生物地球化学循环的生态学理论[33]。

此外，阔叶树种通过植被-土壤交互效应进一步强化了碳汇功能。其高效的光合作用在固

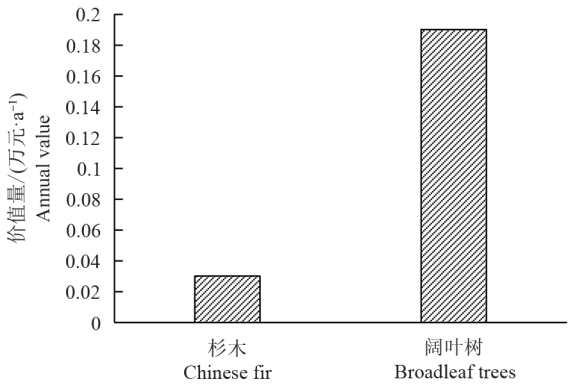


图 4 百年树龄杉木林不同树种的林木养分固持价值量对比

Fig. 4 Comparison of nutrient sequestration value among different tree species of the century-old Chinese fir plantation

定更多大气二氧化碳的同时，产生的优质凋落物经微生物分解持续转化为土壤有机碳，促进了土壤有机碳的积累与稳定，使得单位面积土壤固碳量达到杉木的2.5倍。因此，阔叶树种的引入不仅通过极高的物种占比直接提升了生物多样性，更通过改善土壤理化性质和提高养分有效性，间接增强了生态系统的整体生产力与稳定性，充分体现了针阔混交体系中的物种互补效应[44,45]。在针叶人工林经营中积极引导乡土阔叶树种混交，是构建健康、稳定且多功能森林生态系统的重要技术策略[46]。

4.3 研究的局限性与未来展望

本研究虽采用规范化方法，但仍存在一些不确定性与待完善之处。首先，在参数本地化方面，部分生态过程参数（如土壤侵蚀模数、净初级生产力）引用了区域研究成果，与研究地点的精确值可能存在差异。例如，在计算滞尘功能时，未区分$PM_{2.5}$与PM_{10}的粒径特异性滞留效率，使得滞尘量的结果难以反映林分对不同颗粒物的净化贡献，若能采用基于叶面积指数的精准模型，将比当前等效替代法更为可靠。其次，在评估范围方面，本次评估侧重于植被，尚未完全涵盖生态系统的所有组分。例如，生物多样性价值未能包括大型真菌以及实地观察到的飞鼠、珍稀鸟类等动物资源；文化服务价值因地理位置相对偏远、旅游设施缺乏而未采用旅行成本法等进行深入核算，导致其价值会被低估。最后，本次评估是特定时间断面的静态评估，未能展现其价值

的百年动态演变。

因此,未来研究可从以下方面深化:第一,建立长期定位监测体系,获取林分生物量、土壤、水文等动态实测数据,修正模型参数;第二,拓展评估边界,将动物、微生物多样性以及非木质林产品价值纳入核算体系,并运用环境经济学方法对森林康养、自然教育等文化服务价值进行专项评估;第三,结合历史文献与树木年轮学方法,重建林分百年演替过程中的结构与功能动态,模拟其服务价值的长期演变轨迹,为揭示人工林生态系统演替规律提供更完整的科学证据。

5　结论

本研究评估福建南平安槽下百年树龄杉木人工林生态系统服务功能的单位面积价值高达 27.03 万元 $\cdot hm^{-2}\cdot a^{-1}$,远超全国平均水平,证明了近自然演替能显著提升人工林生态价值。生物多样性保护、涵养水源和林木产品供给是其最重要功能,阔叶树种的自然混交是功能转型的关键驱动力。基于上述评估结果,对该地区及我国杉木人工林的科学经营提出如下建议:一、实施差异化的近自然经营策略。对于现存的古老杉木林,应坚持保护优先原则,最大程度减少人为干扰,仅在必要时进行极低强度的林窗疏伐以维持异龄结构;而对于广大的中幼龄杉木纯林,则应主动引入适合的乡土阔叶树种,诱导形成针阔混交复层结构,以加速其向高价值生态系统演替。二、重视古树名木种质资源的保护与利用,依托安槽下杉木古树群落开展大径级杉木良种的遗传资源收集与繁育。三、探索生态产品价值实现机制。鉴于该林分显著的文化康养、水文调节与生物多样性保护价值,建议在严格保护前提下适度发展森林康养产业,并探索开展林业碳汇交易与生态补偿试点,推动生态效益的货币化流转,为南方集体林区绿水青山向金山银山的转化提供科学示范。

参考文献

[1] Daily G C. Nature's Services: Societal dependence on natural ecosystems[M]. Washington D.C.: Island Press, 1997.

[2] MEA (Millennium Ecosystem Assessment). Ecosystems and human well-being: synthesis[M]. Washington D.C.: Island Press, 2005.

[3] Costanza R, D'Arge R, De Groot R, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital [J]. Nature, 1997, 387(6630): 253-260.

[4] Díaz S, Settele J, Brondízio E S, et al. The global assessment report on biodiversity and ecosystem services: summary for policymakers[R]. Bonn, Germany: Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services (IPBES), 2019:3-5.

[5] Bonan G B. Forests and climate change: forcings, feedbacks, and the climate benefits of forests[J]. Science, 2008, 320(5882): 1444-1449.

[6] Kormann U G, Stokely T D, Verschuyl J, et al. Reconciling biodiversity with timber production and revenue via an intensive forest management experiment [J]. Ecological Applications, 2021, 31(8): e02441.

[7] 靳 芳,鲁绍伟,余新晓,等.中国森林生态系统服务功能及其价值评价[J].应用生态学报,2005,16(08):1531-1536.

[8] Paquette A, Messier C. The role of plantations in managing the world's forests in the Anthropocene[J]. Frontiers in Ecology and the Environment, 2010, 8 (1): 27-34.

[9] 陆元昌,张守攻,雷相东,等.人工林近自然化改造的理论基础和实施技术[J].世界林业研究,2009,22(01):20-27.

[10] 国家林业和草原局.中国森林资源报告(2014-2018)[M].北京:中国林业出版社,2019.

[11] 侯元兆,王 琦.中国森林资源核算研究[J].世界林业研究,1995(03):51-56.

[12] 欧阳志云,王效科,苗 鸿.中国陆地生态系统服务功能及其生态经济价值的初步研究[J].生态学报,1999,19(05):607-613.

[13] 王 兵,任晓旭,胡 文.中国森林生态系统服务功能及其价值评估[J].林业科学,2011,47(02):145-153.

[14] 王 兵,鲁绍伟,尤文忠,等.辽宁省森林生态系统服务价值评估[J].应用生态学报,2010,21(07):1792-1798.

[15] 潘勇军,陈步峰,王 兵,等.广州市森林生态系统服务功能评估[J].中南林业科技大学学报,2013,33(05):73-78.

[16] 牛 香,王 兵.基于分布式测算方法的福建省森林生态系统服务功能评估[J].中国水土保持科学,2012,10(02):36-43.

[17] 梁美霞.福建戴云山自然保护区生态系统服务价值评估[J].西北林学院学报,2014,29(01):263-268.

[18] 王 兵,马向前,郭 浩,等.中国杉木林的生态系统服务价值评估[J].林业科学,2009,45(04):124-130.
[19] 王 兵,鲁绍伟.中国经济林生态系统服务价值评估[J].应用生态学报,2009,20(02):417-425.
[20] 林 杰,陈平留,黄健儿.福建南平溪后安曹下杉木丰产林生长调查研究[J].福建林学院学报,1984(01):9-19.
[21] 何宗明,杨玉盛,陈光水,等.安曹下76年生杉木群落主要种群分布格局[J].福建林学院学报,2001(03):212-215.
[22] 邹双全,何宗明,陈光水,等.老杉木人工林与松阔混交林群落多样性比较[J].福建林学院学报,2002(02):124-128.
[23] 洪 滔,吴承祯,胡喜生.安曹下杉木丰产林不同阶段生长比较研究[J].福建林学院学报,2008(01):19-22.
[24] 蔡小英,范海兰,洪 滔,等.福建安曹下丰产杉木人工林林窗边缘效应的研究[J].热带亚热带植物学报,2007(03):229-236.
[25] 彭明俊,杨 旭,陈建洪,等.云南省昆明市海口林场森林生态系统服务功能研究[M].北京:中国林业出版社,2022.
[26] 水利部水利建设经济定额站.中华人民共和国水利部水利建筑工程预算定额.下册[M].郑州:黄河水利出版社,2002.
[27] 国家市场监督管理总局.GB/T 38582-2020 森林生态系统服务功能评估规范[S].北京:中国标准出版社,2020: 8-12.
[28] 姚鸿文,陶吉兴,杜 群,等.浙江省森林生态服务功能评估与分析[J].南京林业大学学报(自然科学版),2012,36(04):13-17.
[29] 杨玉盛,李振问,俞新妥,等.南平溪后杉木林取代杂木林后土壤肥力变化的研究[J].植物生态学报,1994(03):236-242.
[30] 林 卓.不同尺度下福建省杉木碳计量模型、预估及应用研究[D].福州:福建农林大学,2016.
[31] 吴文跃,姚顺彬,徐志扬.基于森林资源清查数据的江西省主要森林类型净生产力研究[J].南京林业大学学报(自然科学版),2019,43(05):193-198.
[32] 何宗明,张任好,邹双全,等.福建柏和杉木人工林营养元素积累与分配[J].热带亚热带植物学报,2003(03):205-210.
[33] 李晓曼,康文星.广州市城市森林生态系统碳汇功能研究[J].中南林业科技大学学报,2008(01):8-13.
[34] 陶宝先,张金池.南京地区主要森林类型空气负离子变化特征[J].南京林业大学学报(自然科学版),2012,36(02):147-150.
[35] 邱世平,刘建敏,苏 全.崇左市森林生态系统服务功能价值评估[J].广西师范学院学报(自然科学版),2016,33(04):93-103.
[36] 生态环境部,中国科学院.中国生物多样性红色名录——高等植物卷(2020)[R].北京:生态环境部,中国科学院,2020.
[37] 曾小波.闽东杉木人工林材积生长率表的编制[J].林业勘察设计,2000(02): 4.
[38] 叶伟光.明溪县马尾松人工林单木材积生长率模型的研究[J].林业勘察设计,2019, 39(03):44-47.
[39] 何玉霜.福建南平溪后杉木丰产林物种多样性及其价值评估[D].福州:福建农林大学, 2013:47.
[40] 康开权.连江长龙国有林场森林资源价值评估研究[D].福州:福建农林大学,2015:35-36.
[41] 杨海江,勾晓华,马维兢,等.近10年中国森林生态系统服务功能价值评估研究进展[J/OL].生态学杂志,1-13[2025-03-29].https://link.cnki.net/urlid/21.1148.Q.20230714.1044.002.
[42] 漆良华,田慧敏,王辉民,等.南方低质低效人工林质量改善与生态服务提升技术研究前瞻[J].中国水土保持科学,2024, 22(05): 1-8.
[43] 蒋静俭,李子睿,牛明月,等.浙江省国有林场森林植被固碳释氧服务功能价值评估[J].林业资源管理,2022(S1):66-71.
[44] Hector A, Bagchi R. Biodiversity and ecosystem multifunctionality[J]. Nature, 2007, 448(7150): 188-190.
[45] 严明明,高洪娣,刘美华,等.混交改造杉木纯林对林下土壤肥力影响的研究进展[J].生态科学,2024,43(02):253-259.
[46] 熊 潇,苏仕权,童 慧,等.马尾松人工林引入阔叶树种异龄混交改造对土壤生物有效性磷影响[J/OL].广西植物,1-14[2026-01-08].https://link.cnki.net/urlid/45.1134.Q.20250908.1613.004.