主持人：宋希强，任明迅　Open Access

海南省森林资源与生态系统服务功能演变特征分析

宋庆丰[1,2#]，王　兵[1,2]，牛　香[1,2*]

（1. 海南国家公园研究院/海南国家公园保护与发展重点实验室，海南 海口 570203 中国；2. 中国林业科学研究院 森林生态环境与自然保护研究所/国家林业和草原局森林生态环境重点实验室，北京 100091 中国）

摘　要：基于全国第 3 次～第 9 次森林资源清查中的海南省森林资源数据与同时期内相关生态站数据，系统分析了 30 余年（1984—2018 年）森林资源“数量−质量−结构”的动态特征，并依据国家标准量化了关键生态系统服务功能的演变规律，旨在揭示其内在的耦合关系。研究结果表明：1）海南省森林资源实现了显著增长，森林面积、蓄积量和森林覆盖率分别增长 124.48%、163.84% 和 31.96%，林龄结构持续优化，森林质量稳步提升，政策与制度因素是驱动森林资源变化的关键力量；2）所有评估的生态系统服务功能均大幅增强，其中调节水量和提供负离子量增长最为突出，增幅均超过 240%；3）相关性分析进一步揭示，成过熟林面积在水源涵养和固土服务发挥方面的作用最大，而单位面积蓄积量则是固碳服务发挥的主要因素，凸显了森林数量因子（面积、蓄积）与成熟度因子在提升生态系统服务中的核心地位。本研究阐明了森林资源增长与生态系统服务功能动态变化之间的耦合关系，可为区域森林可持续经营提供科学依据。

关键词：森林资源；功能提升；政策与制度因素；林业生态工程

中图分类号：S718.5　**文献标志码：**A　**文章编号：**1674 − 7054(2026)05 − 0775 − 09

宋庆丰, 王兵, 牛香. 海南省森林资源与生态系统服务功能演变特征分析[J]. 热带生物学报 (中英文), 2026, 17(5): 775−783.　DOI: 10.15886/j.cnki.rdswxb.20250176　CSTR: 32425.14.j.cnki.rdswxb.20250176

森林作为生态系统的主体，人类不仅依靠其生产木材、林产品等直接的物质资源，还在时刻享受着其在水土保持、水质净化、固碳释氧、调节大气环境、保护生物多样性和提供休闲游憩场所等方面所带来的生态福祉[1]。全球变化背景下，森林资源的动态变化及其生态效应的评估，已成为生态学、地理学及可持续发展研究的前沿与热点。

海南省作为中国唯一的热带岛屿省份，拥有中国最完整、最多样化的热带雨林生态系统，其森林资源是国家重要的生态安全屏障和生物种质资源库[2]。自 20 世纪 80 年代以来，伴随着社会经济的飞速发展，区域自然生态环境发生了显著改变，尤以受自然与人为因素共同作用的土地利用变化最为突出[3]，其森林资源既面临着因橡胶（*Hevea brasiliensis*）、槟榔（*Areca catechu*）等经济林扩张、旅游设施建设带来的占用与破碎化压力，也受益于“退耕还林”“天然林资源保护”等系列林业重大生态工程的实施而得到恢复与保护[4]。这种高强度的人类活动与积极的生态保护政策交织影响，使得海南省森林资源的时空格局、质量状况及其所支撑的生态系统服务功能呈现出复杂的动态特征。

目前，已有研究从不同角度对海南省或海南热带雨林国家公园的森林资源与生态系统服务功能进行了探讨，主要集中在森林面积的遥感监测、某一特定生态系统服务（如碳储量、水源涵养）或质量的评估，或针对个别自然保护区的研究等方面[3−13]。然而，现有研究多集中于静态或单一时点评估，缺乏对森林资源“数量−质量”长期协同演变的系统分析；同时，其与多重关键生态系统服务功能动态的关联研究仍较薄弱。这一不足制约了对人类活动及政策干预下热带岛屿森林演变规律的深入认识，也影响了区域生态保护与修复策略的

CC BY 4.0
收稿日期：2025−11−22　**修回日期：**2026−01−26

基金项目：国家林业和草原局重点课题（2021ZDKT003-2）

#**第一作者：**宋庆丰（1983—），男，博士，助理研究员。研究方向：森林生态系统关键过程长期监测与评估。E-mail: songqingfeng@caf.ac.cn

*通信作者：牛香（1982—），女，博士，研究员。研究方向：森林生态系统监测与评估。E-mail: niuxiang@caf.ac.cn

精准制定与成效评估。因此，本研究旨在利用第 3 次～第 9 次森林资源清查数据、森林生态站监测数据，系统分析海南省 30 余年（1984—2018 年）森林资源在数量、质量和结构等方面的动态变化特征；在此基础上，基于国家标准《森林生态系统服务功能评估规范》（GB/T 38582—2020）[14]，量化了森林生态系统服务功能动态演变规律，揭示森林资源增长与生态系统服务功能动态变化之间的耦合关系及其驱动机制。本研究期望能够为海南省森林资源的可持续管理、国家公园的建设成效评估以及海南自由贸易港建设过程中的生态安全保障提供科学依据和决策支持。

1 研究区概况

海南岛（18°10′～20°10′ N，108°37′～111°03′ E）是位于中国最南端的最大岛屿，属于热带季风海洋性气候，全年暖热，雨量充沛，干湿季分明。年均气温为 22～27 ℃，年均降雨量可达 1 500～2 000 mm，为热带森林的生长发育提供了优越的水热条件。海南岛是中国热带生物多样性的关键地区，拥有中国最完整、连片面积最大的热带雨林生态系统。森林类型丰富多样，主要包括热带低地雨林、热带山地雨林、热带季雨林、热带针叶林（如南亚松林）以及沿海的红树林等[2]。海南岛的热带雨林在类型、外貌及群落结构等方面差异性较大，森林生物多样性极其丰富，造就了其在全球热带雨林保护中的特殊地位。其中，岛内有尖峰岭、吊罗山、霸王岭、黎母山、五指山、鹦哥岭 6 大主要林区，8 个国家级森林公园及 9 个国家级自然保护区，这些地区是海南岛热带森林和生物多样性富集的区域[15]。

2 研究方法

2.1 评估方法 依据国家标准《森林生态系统服务功能评估规范》（GB/T 38582—2020）[14]，开展海南省森林生态系统涵养水源、保育土壤、固碳释氧、林木养分固持和净化大气环境等 5 项功能 19 个指标类别的实物量评估（图 1）。相关评估公式，如表 1 所示。

2.2 数据来源 森林资源数据来源于第 3～9 次全国森林资源清查报告[16–22]；造林数据来源于 1988—2018 年中国林业统计年鉴；森林生态数据

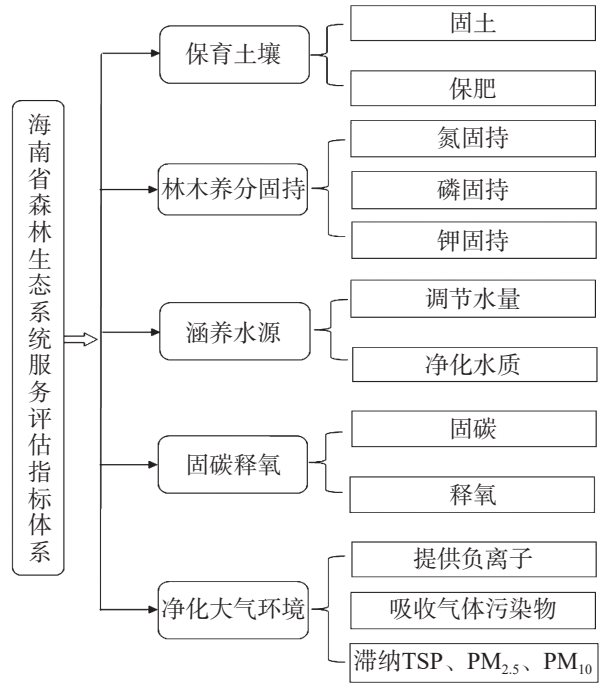

图 1 海南省森林生态系统服务功能评估指标体系
Fig. 1 Assessment indicator system for forest ecosystem service functions in Hainan Province

来源于海南省内的森林生态站（尖峰岭生态站、文昌生态站、霸王岭生态站和五指山生态站）长期监测数据，利用在本区域开展研究公开发表文献中的数据作为重要补充，并依据生态服务修正系数，对站点数据向全省尺度进行了转换[23–24]。

2.3 分析方法 利用 Pearson 相关分析方法，对森林资源变化与生态系统服务功能提升的关系进行分析，并进行显著性检验。

3 结果与分析

3.1 森林资源变化特征

3.1.1 数量变化特征 自 1984 年以来，海南省森林面积和蓄积量持续增加（图 2-A），森林面积自第 3 次清查期的 86.64×10^4 hm^2，增长至第 9 次清查期的 194.49×10^4 hm^2，增长幅度达到了 124.48%；森林蓄积量自第 3 次清查期的 58.14×10^7 m^3，增长至第 9 次清查期的 $153.40\times10^7 m^3$，增长幅度达到了 163.84%。由此可见，森林蓄积量增长幅度高于森林面积，说明海南省森林质量在不断提升。

3.1.2 质量变化特征 森林质量是综合评价森林结构与功能状态的指标，用森林覆盖率与单位面积蓄积量 2 个指标来表征，能够反映森林的数量规模与结构健康程度。自第 3 次清查期以来，海南省森林覆盖率分别为 25.40%、31.27%、39.56%、

表 1　海南省森林生态系统服务功能评估模型公式包

Tab. 1　Formula package for the assessment model of forest ecosystem services in Hainan Province

功能 Function	指标 Indicator	模型公式 Model Formula
涵养水源 Water conservation	调节水量 Regulating flow	$G_{调} = 10A\cdot(P-E-C)\cdot F$ $G_{调}$为评估林分年调节水量($m^3\cdot a^{-1}$); P为实测林外降水量($mm\cdot a^{-1}$); E为实测林分蒸散量($mm\cdot a^{-1}$); C为实测地表快速径流量($mm\cdot a^{-1}$); A为林分面积(hm^2); F为森林生态功能修正系数。
保育土壤 Soil conservation	固土 Soil-fixation	$G_{固土} = A\cdot(X_2-X_1)\cdot F$ $G_{固土}$为评估林分年固土量($t\cdot a^{-1}$); X_1为有林地土壤侵蚀模数〔$t\cdot(hm^2\cdot a)^{-1}$〕; X_2为无林地土壤侵蚀模数〔$t\cdot(hm^2\cdot a)^{-1}$〕; A为林分面积(hm^2); F为森林生态功能修正系数。
	保肥 Fertilizer preservation	$G_N = A\cdot N\cdot(X_2-X_1)\cdot F\ G_F = A\cdot P\cdot(X_2-X_1)\cdot F\ G_K = A\cdot K\cdot(X_2-X_1)\cdot F$ $G_{有机质} = A\cdot M\cdot(X_2-X_1)\cdot F$ G_N为评估林分提升氮元素量($t\cdot a^{-1}$); G_P为评估林分提升磷元素量($t\cdot a^{-1}$); G_K为评估林分提升钾元素量($t\cdot a^{-1}$); $G_{有机质}$为评估林分提升有机质量($t\cdot a^{-1}$); X_1为有林地土壤风力侵蚀模数〔$t\cdot(hm^2\cdot a)^{-1}$〕; X_2为无林地土壤风力侵蚀模数〔$t\cdot(hm^2\cdot a)^{-1}$〕; N为实测林分土壤平均含氮量(%); P为实测林分土壤平均含磷量(%); K为实测林分土壤平均含钾量(%); M为实测林分土壤平均有机质含量(%); A为林分面积(hm^2); F为森林生态功能修正系数。
固碳释氧 Carbon fixation and oxygen	固碳 Carbon sequestration	$G_{碳} = A\cdot(1.63R_{碳}\cdot B_{年} + F_{土壤碳})\cdot F$ $G_{碳}$为评估林分年固碳量($t\cdot a^{-1}$); $B_{年}$为实测林分年净生产力〔$t\cdot(hm^2\cdot a)^{-1}$〕; $F_{土壤碳}$为实测林分单位面积土壤年固碳量〔$t\cdot(hm^2\cdot a)^{-1}$〕; $R_{碳}$为CO_2中碳的含量, 为27.27%; A为林分面积(hm^2); F为森林生态功能修正系数。
林木养分固持 Forest nutrient retention	氮、磷、钾固持 Nitrogen, phosphorus and potassium retention	$G_{氮} = A - N_{营养} - B_{年} - F\ G_{磷} = A\cdot P_{营养} - B_{年} - F\ G_{钾} = A\cdot K_{营养} - B_{年} - F$ $G_{氮}$为评估林分植被固氮量($t\cdot a^{-1}$); $G_{磷}$为评估林分植被固磷量($t\cdot a^{-1}$); $G_{钾}$为评估林分植被固钾量($t\cdot a^{-1}$); $N_{营养}$为实测林分林木氮元素含量(%); $P_{营养}$为实测林分林木磷元素含量(%); $K_{营养}$为实测林分林木钾元素含量(%); $B_{年}$为实测林分年净生产力〔$t\cdot(hm^2\cdot a)^{-1}$〕; A为林分面积(hm^2); F为森林生态功能修正系数。
净化大气环境 Atmospheric Environment Purification	提供负离子 Provide negative ions	$G_{负离子} = 5.256\times10^{15}\cdot Q_{负离子}\cdot A\cdot H\cdot F/L$ $G_{负离子}$为评估林分年提供负离子个数($个\cdot a^{-1}$); $Q_{负离子}$为实测林分负离子浓度($个\cdot cm^{-3}$); H为实测林分高度(m); L为负离子寿命(min); A为林分面积(hm^2); F为森林生态功能修正系数。
	吸收污染气体 Absorbing polluting gases	$G_{二氧化硫} = Q_{二氧化硫}\cdot A\cdot F/1000\ G_{氟化物} = Q_{氟化物}\cdot A\cdot F/1000$ $G_{氮氧化物} = Q_{氮氧化物}\cdot A\cdot F/1000$ $G_{二氧化硫}$为评估林分年吸收二氧化硫量($t\cdot a^{-1}$); $G_{氟化物}$为评估林分年吸收氟化物量($t\cdot a^{-1}$); $G_{氮氧化物}$为评估林分年吸收氮氧化物量($t\cdot a^{-1}$); $Q_{二氧化硫}$为实测林分单位面积吸收二氧化硫量〔$kg\cdot(hm^2\cdot a)^{-1}$〕; $Q_{氟化物}$为实测林分单位面积吸收氟化物量〔$kg\cdot(hm^2\cdot a)^{-1}$〕; $Q_{氮氧化物}$为实测林分单位面积吸收氮氧化物量〔$kg\cdot(hm^2\cdot a)^{-1}$〕; A为林分面积(hm^2); F为森林生态功能修正系数。
	滞尘 Dust catching	$G_{滞尘} = Q_{滞尘}\cdot A\cdot F/1000$ $G_{滞尘}$为评估林分年滞尘量($t\cdot a^{-1}$); $Q_{滞尘}$为实测林分单位面积滞尘量〔$kg\cdot(hm^2\cdot a)^{-1}$〕; A为林分面积(hm^2); F为森林生态功能修正系数。

48.87%、51.98%、55.38% 和57.36%(图2-B),30 余年来增加了 31.96%, 略高于第 4 次的森林覆盖率。森林单位面积蓄积量作为森林多方面状况的“晴雨表”, 是衡量森林质量的重要指标之一[25], 海南省森林单位面积蓄积量 30 余年来呈现出先降低再升高的趋势(图 2-C), 与全国森林单位面积蓄积量变化趋势基本相同[26]。

3.1.3　结构变化特征　30 余年来, 海南省天然林面积占比逐年降低, 而人工林则出现不断上升的趋势(图 2-D)。就实际面积而言, 天然林面积从第 3 次清查期间的 26.02×10^4 hm^2, 上升到第 9 次清查期间的 54.09×10^4 hm^2, 增长了 1 倍。其占比逐渐降低的原因, 主要是海南省人工林面积急速增长(图 3), 第 4 次 ~ 第 9 次清查期间, 累计造林

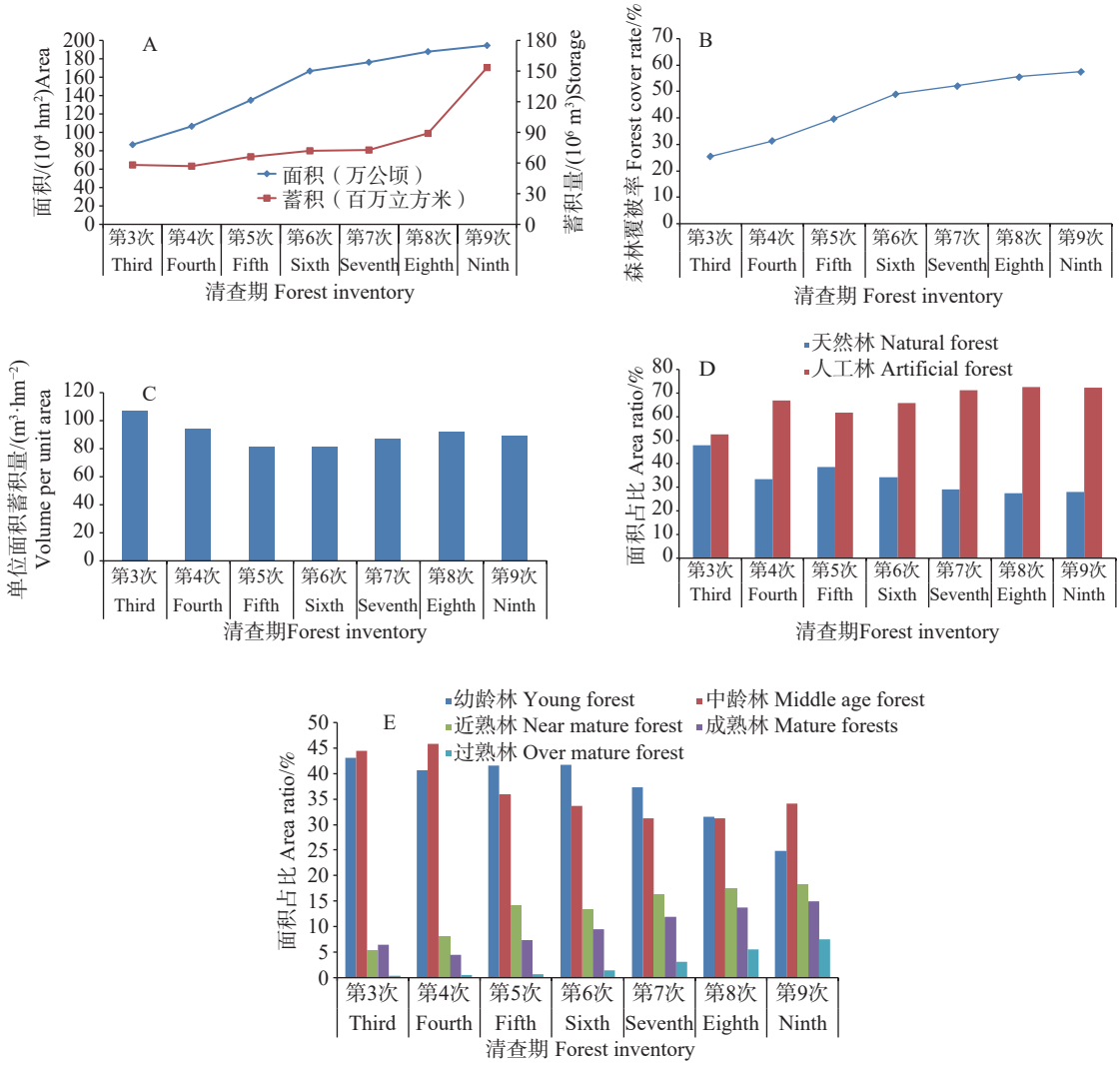

图 2　海南省森林资源变化情况

Fig. 2　Changes in forest resources in Hainan Province

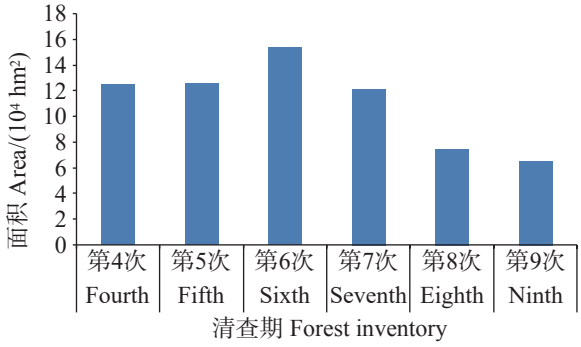

图 3　历次清查期间海南省造林面积

Fig. 3　Afforestation area in Hainan Province during Forest Resource Inventory

面积为 66.75×10⁴ hm²。海南省由于其特殊的地理区位和气候条件，省内营造了大面积的人工林，主要以经济林为主。据第 9 次森林资源清查报告显示，海南省人工乔木林各优势树种(组)中，以橡胶林、桉树林和其他经济林面积最大，三者合计为 105.39×10⁴ hm²，占人工乔木林面积的比例为 88.08%。

就林龄结构变化而言，中幼龄林面积呈现出持续降低的趋势，近熟林、成熟林和过熟林面积则恰恰相反，三者总面积占比逐渐增加，从第 3 次清查期的 12.33%，增加到了第 9 次清查期的 40.85%(图 2-E)。这说明在林业政策的实施下，毁林现象逐渐得到遏制，森林资源得到了有效的保护，林龄结构逐渐合理。

3.2　森林生态系统服务功能变化特征　30 余年来，海南省森林生态系统调节水量、固土量、保肥量、固碳量、林木养分固持量、提供负离子量、吸收污染气体量和滞尘各项实物量均出现了明显的上升趋势(表 2)，其增长幅度分别为 263.50%、177.29%、208.63%、168.40%、162.09%、296.15%、216.43% 和 243.95%。其中，调节水量、提供负离子量和滞

尘增长幅度最大, 表明海南省森林生态系统在水源供给、调蓄洪水和人居生活环境改善方面的作用较为显著, 为自贸区的建设提供了优良的生态环境和物质保障, 有助于海南要实现到 2035 年成为生态环境质量和资源利用效率居于世界前沿的国家生态文明试验区的目标[27]。

表 2　海南省森林生态系统服务功能实物量变化

Tab. 2　Changes in physical quantities of forest ecosystem services in Hainan Province

清查期 Forest inventory	调节水量/(亿$m^3 \cdot a^{-1}$) Warter regulation	固土/(万$t \cdot a^{-1}$) Soil-fixation	保肥/(万$t \cdot a^{-1}$) Fertilizer retention	固碳/(万$t \cdot a^{-1}$) Carbon sequestration	林木养分固持/(万$t \cdot a^{-1}$) Forest nutrient retention	提供负离子/($\times 10^{25}$个$\cdot a^{-1}$) Provide negative ions	吸收污染气体/(万$t \cdot a^{-1}$) Absorbing pollution gases	滞尘/(亿$t \cdot a^{-1}$) Dust catching
第3次 Third	34.82	2 852.02	87.91	114.55	8.23	0.52	9.33	0.09
第4次 Fourth	43.27	3 546.18	108.49	137.29	9.88	0.60	11.56	0.11
第5次 Fifth	61.99	4 989.86	156.54	198.65	14.20	0.90	16.32	0.16
第6次 Sixth	65.52	5 493.75	162.72	230.29	15.93	1.00	18.01	0.18
第7次 Seventh	66.32	5 765.00	169.07	211.62	16.02	0.99	18.92	0.19
第8次 Eighth	82.56	6 963.89	207.62	263.52	19.76	1.24	22.97	0.24
第9次 Ninth	126.57	7 908.38	271.32	307.45	21.57	2.06	29.54	0.32

4　讨　论

4.1　森林资源增长因素分析　30 余年来, 海南省森林资源发生了显著的变化, 森林面积和蓄积量持续增长、森林覆盖率和单位面积蓄积量不断提升、森林结构明显改善。其原因主要有以下几个方面: 政策与制度驱动、经济发展与产业结构转型驱动、社会与民生驱动和自然与地理条件驱动。其中, 人类活动对森林具有双重影响: 一方面可能导致森林退化, 另一方面通过可持续管理措施可维护生态系统完整性[28]。

政策与制度因素是驱动森林资源变化的关键力量, 其作用主要体现在国家实施的系列林业生态工程所推动的大规模造林活动方面, 为森林资源数量的持续增长奠定了基础[29]。其中, 在第 6 次全国森林资源清查期间, 海南省森林面积与森林覆盖率增幅最为显著, 主要归因于该时期中国相继启动的退耕还林与天然林资源保护两大生态工程。从造林面积来看, 第 4 次至第 6 次清查期间的累计造林面积占近 34 年总造林面积的 62.75%。值得注意的是, 由于新造林分多处于幼龄阶段, 第 6 次清查期间单位面积蓄积量出现一定程度下降, 同时幼龄林与人工林面积在林分结构中的占比相应上升。

除造林活动外, 森林资源清查技术的调整也是引起资源统计结果变化的重要因素。在第 5 次清查期间, 单位面积蓄积量同样呈现下降趋势, 其主要原因在于森林郁闭度的认定标准由 0.3 调整为 0.2[26], 该标准放宽显著推动了森林统计面积的快速增长。与第 4 次清查相比, 第 5 次清查期间海南省森林面积增幅达 26.54%, 为各期之最。然而, 因郁闭度标准降低而新增纳入森林范畴的有林地, 其林分密度与单位面积蓄积量普遍偏低。根据人工造林一般 3 ~ 8 年可郁闭成林的规律估算, 经查阅 1989—1998 年的中国林业统计年鉴中关于海南省的造林数据, 在第 5 次清查期间能够实现郁闭的造林面积为 5.43 ~ 16.23 万 hm^2, 而该期森林面积较第 4 次清查增加 28.30 万 hm^2。据此推断, 郁闭度标准调整对森林面积增加的贡献率为 8.94% ~ 16.23%。该部分新增森林资源中, 人工造林面积占比为 42.16% ~ 44.28%, 也就意味着其中天然林资源较多, 这也是第 5 次清查期间天然林面积占比出现明显上升的主要原因之一。

森林面积与蓄积量的最快增长时间段上存在差异, 二者变化曲线的交点为第 7 次清查期。主要是因为前期造林面积较大, 这部分森林资源经

过一段时间的生长之后，由幼龄林阶段进入到中龄林，甚至成熟林阶段，蓄积量进入了快速累积期。此外，森林经营方式的改变，是森林单位面积蓄积量变化的主要原因。森林经营方式已经由凭借造林面积增加来提升森林蓄积量的单一方式，转变为造林和可持续经营兼顾。因为依靠提升森林覆盖率来改善森林质量十分困难[30]，要构建适应中国森林资源发展特征的可持续森林经营技术体系，用以增强森林生态系统质量和生产力[31]。就森林固碳和提供其他生态系统服务而言，森林蓄积水平的提高才是根本。毕竟，扩大森林面积，即使是很显著的扩大，并不意味着森林单位面积蓄积水平就会提高。同时，人工林面积占比增加，会带来海南热带雨林国家公园内森林景观、野生动植物栖息地破碎化的问题。同时，某些速生树种需水量大，可能导致地下水位下降；长期单一经营还会造成土壤养分失衡，依赖化肥维持生长[32]。

4.2 森林生态系统服务功能变化分析 通过 Pearson 相关分析方法对海南省森林资源与生态系统服务功能进行了相关分析，并建立了相关系数矩阵（表 3），并进行了显著性检验。从中可以清晰地识别出不同森林资源要素对各生态系统服务功能的驱动作用存在显著差异。在调节服务方面，涵养水源功能与成过熟林面积表现出极显著正相关（r=0.636, P<0.01），同时与森林总面积也呈现极显著正相关（r=0.569, P<0.01），表明成熟林分的结构和规模对水源涵养功能发挥的作用最强；固土服务也与成过熟林面积呈极显著正相关（r=0.688, P<0.01），进一步印证了高郁闭度、深层根系的老龄林在土壤保持功能的显著作用。在供给予支持服务方面，固碳功能与单位面积蓄积量（r=0.549, P<0.01）和总蓄积量（r=0.543, P<0.01）均呈现显著正相关，说明林木生物量积累速率是影响碳储存能力的重要因素；提供负离子服务则与成过熟林面积相关性最高（r=0.573, P<0.01），反映出森林康养功能与林分成熟度的高度相关。值得注意的是，吸收污染气体功能与各结构指标的相关性普遍较弱，其中与森林面积、单位面积蓄积量和覆盖率的关系表现为（r=0.385, P<0.05）显著相关，说明该功能可能更易受森林资源的数量、生产力和树种组成等要素影响。

所以，森林资源面积与蓄积量和成熟度共同调控着生态系统服务功能的供给格局，其中成过熟林在多项服务中均发挥重要作用，凸显其在森林可持续经营中的特殊生态价值。

森林数量（面积和蓄积量）的增长是主要驱动因素，而森林质量提升和结构改善的作用也不容忽视，最终均作用于生态系统服务的发挥。Wang 等[33] 认为，植被恢复对土壤环境及碳库具有积极影响，主要是因为林分结构趋于复杂化发展，群落结构较为稳定[34]。徐珂[35] 认为，以生物量计算森林生态系统服务价值具有方法的科学性和结果的可靠性，生物量的高生长与森林生态系统服务功能的增强密切关联[36–37]，且随着蓄积量不断累积，生态功能逐步提升[38–40]。森林蓄积量增长意味着碳储量同步增加，李奇[41] 量化了森林植被碳储量的增加对涵养水源能力提升的驱动作用，认为碳储量增加了 42.56%，涵养水源能力提升了 20.85%。

有研究表明，林分蓄积与林龄之间存在正相关的关系[37,42]，但其增长速率呈现为由快变慢的趋

表 3 森林资源与生态系统服务功能 Pearson 相关系数矩阵

Tab. 3 Pearson correlation matrix of forest resources and ecosystem services

功能 Services	面积 Area	蓄积量 Storage	单位面积蓄积 Volume per unit area	覆盖率 Forest cover rate	公益林面积 Non-comercial forest Area	成过熟林面积 Mature, over-mature forest Area
涵养水源 Water conservation	0.569**	0.256	0.222	0.523*	0.417*	0.636**
固土 Soil-fixation	0.349*	0.161	0.197	0.510*	0.335	0.688**
固碳 Carbon sequestration	0.526*	0.543**	0.549**	0.320	0.285	0.223
提供负离子 Provide negative ions	0.331	0.178	0.192	0.396*	0.154	0.573**
吸收污染气体 Absorbing polluting gases	0.438*	0.154	0.385*	0.354*	0.178	0.161

注（Notes）：*, P<0.05; **, P<0.01。

势, 年轻森林以“效率取胜”, 老龄森林以“稳态持久”[43]。有林地面积与蓄积量的增加, 林龄组成比例向中龄林、近熟林的倾斜, 都表明森林生态系统的质量得到了提高[44], 森林生态系统服务功能才能更好发挥。林龄对植被和土壤固碳量的影响作用最大, 其中, 土壤碳储量与林龄之间关系显著[45]。王贤会[46] 的研究结果表明, 林龄与土壤蓄水能力也呈现出正相关性, 当林分完全郁闭后, 土壤蓄水能力得以充分发挥, 其土壤抗蚀能力也会随之提升。

5　结　论

过去 30 多年(1984—2018 年), 在林业生态工程的驱动下, 海南省森林资源在面积、蓄积量和覆盖率上均呈现持续增长的趋势, 同时林分结构不断优化, 中幼龄林占比下降而近熟林、成熟林和过熟林占比上升, 这标志着海南省森林生态系统从单纯的规模扩张进入了质量与结构同步提升的发展新阶段。

本研究评估的各项生态系统服务功能实物量均呈现出逐步增长的趋势, 尤其在调节水量、净化大气环境等方面增幅最为显著, 与森林数量的增加和结构的优化紧密相关。相关分析表明, 成过熟林面积和单位面积蓄积量是驱动服务功能提升的关键因素。

参考文献:

[1] Daily G C. Nature's services: societal dependence on natural ecosystems[M]. Washington: Island Press, 1997: 11−12.

[2] 蒋有绪, 王伯荪, 臧润国, 等. 海南岛热带林生物多样性及其形成机制[M]. 北京: 科学出版社, 2002: 1−5.

[3] 戴声佩, 罗红霞, 胡盈盈, 等. 基于 GLC30 数据的近 20 年海南岛土地利用动态变化研究[J]. 农业工程, 2021, 11(9): 61−69. https://doi.org/10.3969/j.issn.2095-1795.2021.09.012

[4] 邓须军, 岳上植. 海南天然林资源变动及管理路径实现[J]. 经济师, 2014(11): 192−193. https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-4914.2014.11.095

[5] 周亚东, 薛杨, 李广翘, 等. 海南生态公益林生态系统服务功能价值评估报告[J]. 热带林业, 2011, 39(2): 31−37. https://doi.org/10.3969/j.issn.1672-0938.2011.02.009

[6] 林声洪. 海南省白沙县森林资源碳汇变化及价值研究[D]. 海口: 海南大学, 2013.

[7] 周婷. 鹦哥岭自然保护区森林资源现状及可持续经营分析[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2015. https://doi.org/10.7666/d.Y3134230

[8] 王一荃, 周璋, 李意德, 等. 不同热带森林空气负离子浓度评价研究[J]. 生态环境学报, 2021, 30(5): 898−906. https://doi.org/10.16258/j.cnki.1674-5906.2021.05.002

[9] 王一荃. 海南热带森林生态系统生态质量综合评价研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2021. https://doi.org/10.27625/d.cnki.gzlky.2021.000214

[10] 李昂, 叶长青, 朱丽蓉, 等. 土地利用/覆被变化对产水服务功能的影响: 以海南热带雨林国家公园为例[J]. 水利水电技术 (中英文), 2022, 53(5): 36−45. https://doi.org/10.13928/j.cnki.wrahe.2022.05.004

[11] 杜乐山. 海南热带雨林国家公园生态系统服务价值评估、溢出效应及提升对策研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2023. https://doi.org/10.26949/d.cnki.gblyu.2023.001480

[12] 高述超, 陈毅青, 陈宗铸, 等. 海南岛森林生态系统碳储量及其空间分布特征[J]. 生态学报, 2023, 43(9): 3558−3570. https://doi.org/10.5846/stxb202207051909

[13] 曾慧芬, 樊孝凤, 杨川, 等. 海南岛橡胶林生态系统服务功能及其价值评估分析[J]. 热带生物学报, 2025, 16(4): 598−605. https://doi.org/10.15886/j.cnki.rdswxb.20240121

[14] GB/T 38582—2020 森林生态系统服务功能评估规范[S].

[15] 侯伟, 杨福孙, 周兆德, 等. 海南岛森林旅游发展与森林生物多样性保护[J]. 热带生物学报, 2015, 6(1): 91−97. https://doi.org/10.15886/j.cnki.rdswxb.2015.01.014

[16] 国家林业局. 国家森林资源统计 (1984—1988)[M]. 北京: 中华人民共和国林业部, 1988: 110−203.

[17] 国家林业局. 国家森林资源统计 (1989—1993)[M]. 北京: 中华人民共和国林业部, 1994: 81−101.

[18] 国家林业局. 国家森林资源统计 (1994—1998)[M]. 北京: 国家林业局森林资源管理司, 2000: 114−141.

[19] 国家林业局. 国家森林资源统计 (1999—2003)[M]. 北京: 国家林业局森林资源管理司, 2005: 331−334.

[20] 国家林业局. 中国森林资源报告 (2004—2008)[M]. 北京: 中国林业出版社, 2009: 153−208.

[21] 国家林业局. 中国森林资源报告 (2009—2013)[M]. 北京: 中国林业出版社, 2014: 78−80.

[22] 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: 209−301.

[23] 宋庆丰, 王雪松, 王晓燕, 等. 基于生物量的森林生态功能修正系数的应用: 以辽宁省退耕还林工程为例[J]. 中国水土保持科学, 2015, 13(3): 111−116. https://doi.org/10.3969/j.issn.1672-3007.2015.03.017

[24] 张宏祯, 何建平, 宋庆丰, 等. 甘肃省白龙江生态空间绿色核算与碳中和评估[M]. 北京: 中国林业出版社, 2025: 11−13.

[25] 赵其国, 黄国勤, 王礼献. 中国南方森林生态系统的功能、问题及对策[J]. 森林与环境学报, 2015, 35(4): 289−296. https://doi.org/10.13324/j.cnki.jfcf.2015.04.001

[26] 国家林业局中国森林生态系统服务功能评估项目组. 中国森林资源及其生态功能四十年监测与评估[M]. 北京: 中国林业出版社, 2018: 137−139.

[27] 文穗, 文博, 李斯才. 海南自贸区 (港) 背景下森林资源保护的法律问题研究[J]. 南海法学, 2019, 3(6): 59−68.

[28] Wang C Y, Liu Y, Liu H P, et al. Intervention effects of different forest management measures on forest degradation and improvement in Northeast Asia[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2026, 225: 108641. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2025.108641

[29] 国家林业和草原局科学技术司. 中国陆地生态系统质量定位观测研究报告 2000: 森林[M]. 北京: 中国林业出版社, 2021: 36−38.

[30] 李延海, 蔡晓楼. 森林资源保护措施探析[J]. 科技创新与应用, 2013, 3(13): 247. https://doi.org/10.19981/j.cn23-1581/g3.2013.13.239

[31] 张光元. 科学经营森林增加森林碳汇[J]. 林业建设, 2013(3): 1−4.

[32] 陈海辉. 海南中部丘陵区典型人工林自然恢复下植被特征及恢复评价[D]. 海口: 海南大学, 2024. https://doi.org/10.27073/d.cnki.ghadu.2024.000974

[33] Wang S Z, Chen W X, Heal K V, et al. Vegetation restoration shapes soil organic matter chemistry and microbial processes[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2025, 211: 109970. https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2025.109970

[34] 杜春雁, 李东海, 祁栋灵, 等. 海南热带雨林国家公园内退营性橡胶林林下自然恢复植被的群落特征变化[J]. 热带生物学报, 2025, 16(1): 31−42. https://doi.org/10.15886/j.cnki.rdswxb.20240133

[35] 徐珂. 千烟洲亚热带针叶林 GPP 模型优化及生态服务价值研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2021. https://doi.org/10.27009/d.cnki.gdblu.2021.000146

[36] 谢高地, 鲁春霞, 冷允法, 等. 青藏高原生态资产的价值评估[J]. 自然资源学报, 2003, 18(2): 189−196. https://doi.org/10.11849/zrzyxb.2003.02.010

[37] 宋庆丰. 中国近 40 年森林资源变迁动态对生态功能的影响研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2015. doi:10.7666/d.Y2903794

[38] 刘若莎. 青海黄土高寒区人工林主要生态功能研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2021. https://doi.org/10.26949/d.cnki.gblyu.2021.000753

[39] 武亚楠. 喀斯特高原区植被不同恢复阶段土壤有机碳特征与碳汇功能评价[D]. 贵阳: 贵州大学, 2021. https://doi.org/10.27047/d.cnki.ggudu.2021.001339

[40] 张雷. 毛乌素沙地人工灌木林群落特征及其生态系统服务研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2021. https://doi.org/10.27224/d.cnki.gnmdu.2021.000004

[41] 李奇. 三峡库区生态系统服务时空变化与权衡研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2020. https://doi.org/10.27625/d.cnki.gzlky.2020.000078

[42] 洪滔, 张艳艳, 李宝银, 等. 福建省阔叶林林分年龄与平均胸径、蓄积量的关系[J]. 北华大学学报 (自然科学版), 2008, 9(1): 69−74. https://doi.org/10.3969/j.issn.1009-4822.2008.01.021

[43] Wang F Y, Xue M M, Zhou L M, et al. Contrasting age-dependent leaf acclimation strategies drive vegetation greening across deciduous broadleaf forests in mid- to high latitudes[J]. Nature Plants, 2025, 11(9): 1748−1758. https://doi.org/10.1038/s41477-025-02096-5

[44] 蒙宽宏. 黑龙江森工国有林区森林资源与生态功能总量研究[J]. 林业科技, 2016, 41(4): 6−11. https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-9499.2016.04.002

[45] 巩晨. 黄土高原不同造林模式生态功能特征及权衡/协同效应[D]. 咸阳: 中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心, 2022.

[46] 王贤会. 密云县森林资源现状分析及生态效益动态模拟[D]. 北京: 北京林业大学, 2011.

Analysis of the evolution characteristics of forest resources and ecosystem services functions in Hainan Province

Song Qingfeng[1,2#], Wang Bing[1,2], Niu Xiang[1,2*]

（1. Hainan Institute of National Park/Key Laboratory for National Park Protection and Development of Hainan Province, Haikou, Hainan 570203, China; 2. Ecology and Nature Conservation Institute, Chinese Academy of Forestry/Key Laboratory of Forest Ecology and Environment of National Forestry and Grassland Administration, Beijing 100091, China）

Abstract: Based on forest resource data of Hainan Province from the third to the ninth national forest resource inventories and relevant ecological station data from the same period, the dynamic characteristics of forest resources over more than 30 years (1984–2018) were systematically analyzed in terms of "quantity-quality-structure", and the evolutionary patterns of key ecosystem service functions were quantified in accordance with national standards, aiming to reveal their intrinsic coupling relationships. The results showed that forest resources in Hainan Province had achieved remarkable growth, with forest area, stock volume, and forest coverage increasing by 124.48%, 163.84%, and 31.96 percentage points, respectively. The forest age structure had been continuously optimized, and forest quality had steadily improved, with policy and institutional factors identified as key drivers of these changes. All assessed ecosystem service functions had significantly enhanced, particularly water regulation and negative ion provision, which had increased by over 240%. Correlation analysis further revealed that the area of mature and overmature forests had the greatest dominant effect on water conservation and soil fixation services, while stock volume per unit area was the key determining factor for carbon sequestration service. This highlighted the central role of forest quality and maturity in enhancing ecosystem services, underscoring the central importance of indicators of forest quantity (area, stock volume) and indicators of maturity. All these findings elucidate the coupling relationship between the growth of forest resources and the dynamic changes in ecosystem service functions, providing a scientific basis for the sustainable management of regional forests.

Keywords: forest resources; ecosystem service enhancement; policy and institutional factors; forestry ecological projects

(责任编辑:潘学峰)