



主持人: 任明迅

海南岛橡胶林生态系统服务功能及其价值评估分析

曾慧芬^{1,2#}, 樊孝凤¹, 杨川², 吴志祥^{1,2*}

(1. 海南大学 国际商学院, 海南海口 570228 中国; 2. 中国热带农业科学院 橡胶研究所/海南儋州热带农业生态系统国家野外科学观测研究站, 海南 儋州 571737 中国)

摘要: 天然橡胶(Natural Rubber)作为战略资源的安全供应对于国民经济的安全乃至国家的安全都具有十分重要的意义。近年来, 橡胶林种植面积的迅速扩张及潜在的生态问题引起广泛关注。开展海南岛橡胶林生态系统服务功能评估, 有助于确定橡胶林的生态价值, 从生态经济学视角审视天然橡胶产业的重要地位, 促进天然橡胶产业可持续发展。本研究采用海南岛橡胶林不同林龄识别算法, 获取海南岛不同林龄橡胶林的种植面积, 使用替代成本法、影子工程法对海南岛不同区域和不同林龄的橡胶林进行生态服务功能价值评估。研究表明, 2022年海南岛橡胶林生态系统服务功能总价值为353.04亿元, 其单位面积生态系统服务功能价值为67478.91元·hm⁻²; 固碳和释氧功能价值为235.71亿元、净化水质和调节水量功能价值为33.90亿元、固土和保肥功能价值为5.73亿元、空气净化功能价值为34.58亿元、森林防护功能价值为4.00亿元、林木营养物质积累功能价值为15.43亿元、保育生物多样性功能价值为3.14亿元; 其中, 海南岛橡胶树的A16-A20林龄段橡胶林生态系统服务功能价值最大; 海南岛橡胶林生态系统服务功能价值空间分布格局由大到小基本呈现为西北部、中部、西南部、东南部、东北部。研究表明, 橡胶林具有较强的生态系统服务功能, 在给人类带来经济效益和社会效益的同时, 也能产生较大的生态效益。

关键词: 橡胶林; 海南岛; 生态功能; 生态系统服务功能; 生态效益

中图分类号: S719 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-7054(2025)04-0598-08

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. doi: 10.15886/j.cnki.rds wxb.20240121

橡胶树(*Hevea brasiliensis* Müll. Arg.)是热带地区关键的经济林木, 其作为一种自然生态资产, 同时也是一种自然生态产品, 能为人类社会提供较强的自然生态服务, 如涵养水源、土壤保持、固碳释氧等^[1]。橡胶树产业化在中国已有近70年的历史, 在海南、云南和广东等热区产生了较大的生态效益, 发挥着重要的生态功能^[2]。天然橡胶产业是海南的重要支柱产业之一, 橡胶林是海南岛当地最大的人工林生态系统, 种植面积占海南岛森林总覆盖面积的1/4以上^[3]。天然橡胶种植区域的生态条件与环境质量对海南岛的生态环境有着重要的意义^[3]。

生态系统服务研究得到快速的发展, 生态系统服务功能及其价值也随之成为研究的热点。1970年, 关键环境问题研究小组在《人类对全球环境的影响报告》提出生态系统可以为人类提供服务的观点, 1977年, Westman^[4]在此基础上, 考虑了生态系统服务具有的社会价值, 提出自然的服务概念; 1981年, Ehrlich等^[5]综合并统一了相关的概念, 提出了生态系统服务的概念; 1997年, 生态学家Robin等^[6]出版生态系统服务的书籍, 阐述了生态系统服务的主要类型, 并对生态系统服务功能进行了全面的论述^[6]; 同年, Costanza等^[7]运用当量因子法估算了全球生态系统服务总价值大约为每

收稿日期: 2024-07-26

修回日期: 2024-09-27

基金项目: 国家天然橡胶产业技术体系橡胶园生态岗位科学家经费项目(CARS-33-ZP3); 海南省重点研发专项(ZDYF2021SHFZ257); 海南省研究生创新科研课题(Qhys2023-26)

*第一作者: 曾慧芬(1996—), 女, 海南大学国际商学院2022级硕士研究生。E-mail: zenghui fen1996@163.com

*通信作者: 吴志祥(1970—), 男, 博士, 研究员。研究方向: 森林生态学和农林气象。E-mail: zhixiang wu@catas.cn

年30亿美元;20世纪90年代后,生态系统服务的定义、内涵和功能价值评估方法引入国内,学者对“Ecosystem services”有两种解释,分别为生态系统服务和生态系统服务功能。欧阳志云等^[8]将其定义为生态系统服务功能并进行了评估,并认为生态系统服务功能包括二氧化碳的固定、氧气的释放、水土保持、有机物质的生产及污染物质的降解;而傅伯杰等^[9]认为生态系统服务功能和生态系统服务概念不同,生态系统服务功能是生态系统本身具有的属性,不能将两者混为一谈。

欧阳志云等^[8]在Robin等^[6]和Costanza等^[7]研究结果的基础上对中国森林生态系统进行了价值评估,大部分研究针对天然林和生态公益林^[9-12],对橡胶林等经济林的生态系统服务功能研究较少^[13-14]。本次评估基于不同林龄橡胶林识别算法获得海南岛不同林龄橡胶林种植面积,分析海南岛橡胶林生态系统服务功能及其价值。做好海南岛橡胶林生态系统服务功能价值,反映海南岛橡胶林对社会、经济和生态的贡献程度,以期促进天然橡胶等经济林产业提质增效,实现可持续发展,并为其他经济林的生态系统服务功能评估提供模板和依据。本研究意义在于,重点探究海南岛橡胶林蕴含的生态系统服务功能并对其进行评估,使公众客观认识海南岛橡胶林蕴含的生态系统服务功能价值及其所产生的生态效益,促进天然橡胶产业的可持续发展。

1 材料与方法

1.1 自然地理概况 海南陆地主体海南岛地处北回归线以南,位于18°10′~20°10′N,108°37′~111°03′E,光照时间较长,干湿两季分明,属热带季风海洋性气候,拥有独立热带海岛水系,岛内水系有南渡江、昌化江和万泉河,三大流域的积水面积都超过3 000 km²^[15]。海南岛地势概况为中间高、四周低,岛内中部向四周依次为山地、丘陵、台地和平原等。海南岛大部分地区的年平均气温处于22.5~25.6℃,而年极端最高气温,北部地区可达39℃,中部地区则为37~39℃,西部地区及沿海温度较低,通常低于36℃^[16]。与世界上的同纬度地区相比,海南岛是降雨量最多的地区之一,年均降水量约达1 640 mm,降水量较为丰富,水汽来源较为充足,但也具有时空分配不均的特点,呈现东部地区降水量多于西部地区,山区的降水量多于平原地区,降水量随着海拔的增加而增加。本研究只统计海南岛内18个市(县)的橡胶林种植面积,其他区域由于数据局限性不计入。

1.2 评估指标 海南岛橡胶林生态系统服务功能评估依照《森林生态系统服务功能评估规范》(LY/T 1721-2008)^[17],并参考了《海南生态公益林生态服务功能价值评估研究》^[18]一书中的部分生态参数,构建评估指标体系(表1)。

1.3 数据来源 本研究的基础数据和公共参数依

表1 海南岛橡胶林生态系统服务功能评估体系

Tab. 1 Evaluation of ecosystem service function of rubber plantations in Hainan Island

类别 Category	指标 Indicator	参考文献 References
固碳释氧 Carbon sequestration and Oxygen release	固碳 Carbon sequestration	[19-23]
	释氧 Oxygen release	
水源涵养 Water conservation	调节水量 Regulate the amount of water	[24-25]
土壤保持 Soil conservation	固土 Soil fixation	[26]
	保肥 Fertilizer conservation	
	提供负离子 Negative-ion supply	
空气净化 Air purification	污染物 Contaminant	[18][27]
	阻滞降尘 Blocking dust reduction	
营养物质积累 Nutrient accumulation	营养物质 Nutrient	[18]
森林防护 Action of forest against natural calamities	农作物增产 Increased crop yields	[2][28-31]
保育生物多样性 Species conservation	物种多样性 Species diversity	

照中华人民共和国林业行业标准(LY/T 1721—2008)^[17]和《森林生态系统服务功能评估规范》(GB/T 38582—2020)^[32]以及中国权威部门发布的社会公共数据^[33-34]。海南岛不同林龄橡胶林种植面积数据引用 Chen 等^[35]在海南岛橡胶林林龄识别算法基础之上计算而得,该算法通过估计橡胶园种植年份,并使用高频时间序列 Landsat 数据识别。

2 海南岛橡胶林生态服务功能

2.1 固碳和释氧 在森林生态系统中,固碳释氧被视为一项重要的服务功能,大约占总服务价值的 18.5%~32.59%。将生态系统净生产力视为森林最终固碳量,橡胶树生物量推算固碳量的转换系数仍采用 50%。计算公式如下:

$$G_C = a \times NPP \times 0.5, \quad (1)$$

$$G_{CO_2} = M_{CO_2} \cdot M_C^{-1} \times G_C, \quad (2)$$

$$G_{O_2} = M_{O_2} \cdot M_{CO_2}^{-1} \times G_{CO_2}. \quad (3)$$

其中,式(1)、式(2)计算橡胶林固定碳和二氧化碳的物质质量,单位为 $t \cdot hm^{-2}$,式(3)计算橡胶林制造氧气的物质质量,单位为 $t \cdot hm^{-2}$; A 为不同林龄橡胶林面积,单位为 hm^2 , NPP 为不同林龄橡胶净初级生产力,单位为 $t \cdot hm^{-2}$; G_C 为固定碳的物质质量,单位为 t ; G_{CO_2} 为橡胶林固定二氧化碳量,单位为 t ; $M_{CO_2} \cdot M_C^{-1}$ 为碳转化为二氧化碳的系数,即固碳量除以 44 乘以 12。

$$U_C = G_C \times C_C, \quad (4)$$

$$U_{O_2} = G_{O_2} \times C_{O_2}. \quad (5)$$

其中,式(4)和式(5)分别采用碳税法工业制氧成本法^[30]计算出海南岛橡胶林生态系统固定碳和释放氧气价值。本研究选用瑞典碳税价格和工业制氧价格^[36],固碳价格为 150 美元 $\cdot t^{-1}$,按照 2025 年年均美元汇率折算成 1 008.92 元 $\cdot t^{-1}$,制造氧气的价格为 1 000 元 $\cdot t^{-1}$ 。

2.2 涵养水源 生态系统涵养水源功能通常使用水量平衡法计算,而水量平衡方程的计算原理是在一定时空内,生态系统中的水分是质量守恒的。计算公式如下:

$$TQ = A \times (P - R - ET), \quad (6)$$

$$U_{调} = G_{调} \times C_{库}, \quad (7)$$

$$U_{净} = G_{净} \times K_{水}. \quad (8)$$

其中,式(6)为橡胶林涵养水源物质量,式(7)、式(8)为涵养水源价值量,单位为元 $\cdot a^{-1}$,参考全国平均水库库容造价^[37]和 CPI 系数修正^[38]计算而定,将水库建设单位库容投资设置为 6.5 元 $\cdot m^{-3}$ 。参考海南省水资源交易价格^[39]和 CPI 系数修正^[38]计算而定,并根据贴现率得到用水价格为 2.09 元 $\cdot t^{-1}$ 。通过收集公开文献数据进行分析,得出海南岛橡胶林地表径流占年降雨量的 6.87%^[39-41]。据海南省水务厅公布数据^[37]显示,2022 年海南省年均降水量为 2 068.6 mm。

2.3 土壤保持 森林生态系统的土壤保持功能是通过林冠层、枯落层和根系等减缓降雨对土壤的侵蚀程度,保护土壤、增加土壤的抗蚀性,从而减少土壤流失,为土壤的良好发育提供有利条件。而土壤保持主要包括固土和保肥两方面。计算公式如下:

$$U_{固土} = A \times (X_2 - X_1) / \rho, \quad (9)$$

$$U_{保肥} = A \times (X_2 - X_1) (NC_1/R_1 + R_1 + PC_1/R_2 + KC_2/R_3 + MC_3) / 100. \quad (10)$$

其中,式(9)和式(10)计算橡胶林固土和保肥价值量,单位元 $\cdot a^{-1}$; N 、 P 、 K 、 M 为土壤氮、磷、钾和有机质平均含量,单位为 %; R_1 、 R_2 、 R_3 分别为磷酸二铵和氯化钾化肥的 N 、 P 、 K 含量,单位为 %; C_1 (磷酸二铵)、 C_2 (氯化钾)、 C_3 (有机质)代表各自价格,单位为元 $\cdot t^{-1}$ 。

2.4 净化空气 橡胶林空气净化功能指橡胶林生态系统吸收、过滤、阻隔并分解大气中的污染物,其中包括二氧化硫、氟化物、氮氧化物和颗粒物等,具有净化空气污染物,改善橡胶种植地的大气环境的功能。计算公式如下:

$$U_{负离子} = 52.56 \times 10^{14} \times AHK_{负离子} \times (Q_{负离子} - 600) / L, \quad (11)$$

$$U_{污染物} = A \times (K_{氟化物} Q_{氟化物} + K_{氮氧化物} Q_{氮氧化物} + K_{滞尘} Q_{滞尘}). \quad (12)$$

其中,式(11)和式(12)计算橡胶林产生负离子和吸收污染物的价值量,单位为元 $\cdot a^{-1}$;二氧化硫、氮氧化物、氟化物、滞尘的收费价格按照国家发展改革委排污费征收标准^[42]及计算方法,并根据 CPI 系数修正^[38]计算而定;二氧化硫治理费用为 1.20

元·kg⁻¹; 氮氧化物治理费用为 0.63 元·kg⁻¹; 氟化物治理费用为 0.69 元·kg⁻¹; 滞尘的治理费用为 0.15 元·kg⁻¹; 负离子的生产费用按照林业行业标准^[17]推荐价格。

2.5 营养物质积累 营养物质积累功能定义为橡胶林在生长过程中所积累的营养元素, 大多为氮、磷和钾等三个大量元素的积累。不同林龄的橡胶林初级净生产力存在显著差异, 通过对不同林龄的橡胶树评估其营养物质积累物质量。计算公式如下:

$$U_{\text{营养}} = A \times NPP \times (N_{\text{营养}} C_1 / R_1 + P_{\text{营养}} C_1 / R_2 + K_{\text{营养}} C_2 / R_3) \quad (13)$$

其中, 式(13)计算橡胶林林木营养积累价值量, 单位为元·a⁻¹; $N_{\text{营养}}$ 、 $P_{\text{营养}}$ 、 $K_{\text{营养}}$ 为橡胶林氮、磷和钾的年净积累量, 单位为 %, 数值分别为 0.872 7%、0.083 6% 和 0.694 1%^[15]。

2.6 森林防护 橡胶林防护价值则通过假定由于橡胶林的存在, 海南农作物增产的价值, 计算公式如下式所示。

$$U_{\text{农田防护}} = K_a \times V_a \times m_a \times A \quad (14)$$

其中, 式(14)计算橡胶林农田防护价值量, 单位为元·a⁻¹; $U_{\text{农田防护}}$ 为橡胶林分农田防护功能的价值, 单位为元·a⁻¹; K_a 为平均 1 hm² 橡胶林能实现农田防护面积 19 hm²; V_a 为农作物的价格, 单位为元·kg⁻¹, 这里取水稻国家保护价 2.7 元·kg⁻¹^[18]; m_a 为农作物平均增产量, 单位为 kg·hm⁻²·a⁻¹。

2.7 生物多样性保育 根据生物多样性指数评估法, 衡量橡胶林物种保育价值, 计算公式如下:

$$U_{\text{生物}} = S_{\text{生物}} \times A \quad (15)$$

公式根据 Shannon-Wiener 指数评估法^[28]计算。参考《海南生态公益林生态服务功能价值评估研究》^[18]一书中参数, 橡胶林 Shannon-Wiener 指数<1, 推荐指数对应的单价为 600 元·hm⁻²·a⁻¹。

3 结果和分析

3.1 海南岛橡胶林生态系统服务功能物质量评估

根据评估公式计算出海南岛橡胶林生态系统服务功能物质量主要集中在 7 个方面。在固碳和释氧方面, 年固碳量为 1357.65 万 t, 释氧量为 987.38 万 t; 在水源涵养方面, 年涵养水源量 39460.34 万 m³·a⁻¹; 在土壤保持方面, 其中固土量为 383.65

万 t·a⁻¹, 保肥量为 13.75 万 t·a⁻¹, 其中年固定 N、K 和 P 分别为 0.34 万 t、0.14 万 t、6.98 万 t; 在营养物质积累方面, 林木积累氮、磷和钾的量分别为 6.46 万 t、0.62 万 t、5.14 万 t; 在净化空气方面, 年提供负离子 14 005.58×10²² 个负离子, 吸收污染物总量 4.56 万 t, 吸纳滞尘总量为 1 523 万 t。

3.2 不同林龄橡胶林生态系统服务功能物质量分布特征

由于不同林龄的橡胶树的净初级生产力(NPP)存在差异, 根据生态系统服务功能计算公式, 不同的净初级生产力计算得到的固碳和释氧、林木营养积累功能的物质量也存在较大差异。因此, 本次评估引用橡胶林龄识别算法计算得到以 5 年为步长对橡胶树林龄的划分, 以期更精确评估这两个功能的物质量。得到计算结果如下表 2 和表 3 的结果。其中, A1 ~ A5 和 A6 ~ A10 为橡胶树幼龄林, A11 ~ A15 和 A16 ~ A20 为橡胶树成熟

表 2 不同林龄橡胶林固碳和二氧化碳量

Tab. 2 Carbon stock and carbon sequestration of rubber plantations at different ages

龄段 Age	种植面积/hm ² Acreage area/hm ²	固碳量 /万t Carbon stock	固二氧化碳量/万t Carbon dioxide
A1 ~ A5	12 409.3	11 664.74	42 770.71
A6 ~ A10	56 993.14	132 224.09	484 821.66
A11 ~ A15	77 303.67	189 780.51	695 861.87
A16 ~ A20	166 988.88	597 820.21	2 192 007.42
A21 ~ A25	33 562.63	145 158.39	532 247.43
A26 ~ A30	28 619.35	91 009.52	333 701.59
A>30	147 308.73	468 441.77	1 717 619.81

表 3 不同林龄橡胶林林木营养积累量

Tab. 3 Nutrient accumulation of rubber plantations at different ages /万 t

林龄 Age	氮年净积累量 Nitrogen accumulation	磷年净积累量 Phosphorus accumulation	钾年净积累量 Potassium accumulation
A1 ~ A5	0.035 6	0.003 4	0.028 3
A6 ~ A10	0.609 8	0.058 4	0.485 0
A11 ~ A15	1.082 1	0.103 7	0.860 6
A16 ~ A20	2.363 8	0.226 4	1.880 0
A21 ~ A25	0.427 6	0.041 0	0.340 1
A26 ~ A30	0.316 2	0.030 3	0.251 5
A>30	1.627 5	0.155 9	1.294 4
Total	6.462 6	0.619 1	5.140 0

林, A21 ~ A25 和 A26 ~ A30 为橡胶树近熟林, A>30 为橡胶树老龄林。由表 2 和表 3 结果可知, 橡胶树的固碳量和二氧化碳量随着林龄的增大而增大, 海南岛橡胶树的 A16 ~ A20 林龄段分布面积较多, 此时, 固碳量、二氧化碳物质质量和营养物质积累物质量达到顶峰。根据表 3 结果可以看出, 橡胶树对大量元素的吸收, 尤其是氮元素的量较多, 氮元素对橡胶树的生长发育和胶乳的产量和质量起着关键性的作用。

3.3 海南岛橡胶林生态系统服务功能价值量评估

海南岛橡胶林生态系统服务功能中, 固碳释氧、空气净化、涵养水源、营养物质积累、土壤保持、森林防护和保育生物多样性分别占比为 70.90%、10.40%、10.20%、4.64%、1.72%、1.20% 和 0.94%, 其中固碳和释氧的比重较大。比重从大到小顺序为: 固碳释氧、空气净化、水源涵养、林木营养物质积累、土壤保持、森林防护、保育生物多样性。

3.4 不同林龄橡胶树生态系统服务功能价值量分布特征 根据橡胶林龄识别算法计算得知, 海南岛橡胶林在 A16 ~ A20 林龄段种植面积较为广泛。基于学者的研究结果得出, A16 ~ A20 林龄段的橡胶林净初级生产力是最大的^[20], 同时海南岛橡胶林在 A16 ~ A20 林龄段的种植面积也是最大的, 因而, 计算得出 A16 ~ A20 林龄段蕴含的生态系统服务功能价值占比较重。不同林龄橡胶树生态系统服务功能价值之间的差异主要为固碳和释氧、营养物质积累两个功能的物质量不同, 而导致计算得到的价值量也随之存在较大的差异。其中, A16 ~ A20 林龄段的橡胶林年营养物质积累功能价值量为 4.11 亿元, 其次为 A>30 林龄段为 2.83 亿元, 价值量最小的林龄段为处于幼龄的 A1 ~ A5, 主要原因在于近几年海南岛幼龄橡胶树更新数量较少和橡胶林幼龄段的净初级生产力较低。海南岛不同林龄橡胶林生态系统服务价值分布格局由高到低排序为 A16 ~ A20、A>30、A11 ~ A15、A6 ~ A10、A21 ~ A25、A26 ~ A30、A1 ~ A5。

3.5 海南岛橡胶林生态系统服务功能价值空间分布格局 在海南岛 18 个市(县)的橡胶林生态系统服务功能价值中, 儋州市价值量最大, 为 105.93 亿元·a⁻¹, 占全岛的 21.11%, 其次为琼中县、白沙县和澄迈县, 分别为 66.35 亿元·a⁻¹, 62.85 亿元·a⁻¹,

55.58 亿元·a⁻¹。在近 30 年这 4 个市(县)一直是海南岛内橡胶林种植面积较大的区域, 并且这 4 个市(县)的橡胶林处于 A16 ~ A20 林龄段的面积最多, 因此, 也是海南岛橡胶林生态系统服务功能价值的主要区域。较小的为海口市、东方市、陵水县和文昌市, 其中文昌市的价值量最小, 仅占总价值量的 0.21%。海南岛橡胶林生态系统服务功能价值量的空间分布格局有由大到小顺序为西北部、中部、西南部、东南部、东北部。

4 讨论

本研究以海南岛橡胶林生态系统服务功能为研究对象, 构建了评估海南岛橡胶林生态系统服务功能的指标体系, 对其进行物质量和价值量的评估。海南岛橡胶林生态系统服务功能包括固碳释氧、涵养水源、土壤保持、净化空气、营养物质积累、森林防护和生物多样性保育 7 个方面, 其中, 固碳释氧、涵养水源和空气净化占较大的比重。从生态系统服务功能物质量和价值量来看, 海南岛橡胶林生态系统服务功能有着较大的价值, 这与陈伟等^[43]的研究结果有较大的差异。陈伟等^[43]将物质量法和价值量法相结合对海南农垦橡胶林部分生态系统评估价值为 59.52×10⁸ 元, 本研究的评估结果远大于陈伟等^[43]的评估结果, 原因是本研究选取了 7 个指标, 相比较于陈伟等^[43]的评估指标多了固碳和释氧功能, 并且陈伟等^[43]只考虑了海南农垦橡胶林, 没有覆盖到海南全岛的橡胶林。本次评估考虑了不同林龄的橡胶生物量而导致生态系统服务功能价值存在差异, 根据不同林龄橡胶林的净初级生产力计算的固碳释氧价值和营养物质积累价值。另一原因是, 陈伟等^[43]的研究对象为 2005 年的海南农垦橡胶林, 目前, 海南岛橡胶林的面积、林龄的变化和参考的社会公共数据有差异, 导致了与本次评估海南岛橡胶林生态系统服务功能价值的差异较大。其中, 本研究水源涵养功能的价值是陈伟等^[43]评估结果水源涵养价值的 4 ~ 5 倍, 原因是陈伟等^[43]只考虑橡胶林调节水量, 未考虑净化水质的价值。而土壤保持是陈伟等^[43]评估结果的 8 倍, 主要在于陈伟等^[43]引用的数据只考虑了固土而未考虑保肥价值。而空气净化功能价值是陈伟等^[41]评估结果的 3 ~ 4 倍, 原因在于陈伟等^[43]未计算橡胶林产生负

离子的价值。而陈伟等^[43]的保育生物多样性功能价值评估结果大于本研究中生物多样性价值,原因在于两者选用的评估方法和参数存在差异,陈伟等^[43]选取的参数大于本研究所用参数。由于不同林龄橡胶林生物量存在显著差异,本研究团队引用橡胶林林龄识别算法获得海南岛不同林龄的橡胶林种植面积,以得到更精准的海南岛橡胶林生态系统服务功能的评估结果。

从生态系统服务功能物质质量分布来看,A16~A20林龄段的物质质量和价值量最大,因此导致形成了橡胶林A16~A20林龄段种植面积较多的区域,价值量越高的时空分布格局特征,林龄段和林分面积是影响生态系统服务功能的主要因素,这与朱美玲等^[23]和宋清海等^[22]计算A16~A20林龄段橡胶林净初级生产力最大的研究结果一致。结果表明,林分面积和A16~A20林龄段不同的区域,生态系统服务价值也不尽相同。本次评估仍存在不足需进一步对参数进行优化,由于数据可获得性存在限制,部分参数选择采用平均值,林龄大于30年的橡胶林由于树龄范围较大,采用近似值进行评估,在一定程度上影响评估结果的精准度。评估橡胶林生态系统服务功能所用数据引用公开发表文献中的结果,相比较于实地调研采样存在误差。虽然存在以上不足,但本研究对于海南岛橡胶林生态系统服务功能进行了初步探索,对其生态系统服务功能进行物质质量和价值量的评估,为海南岛橡胶林探索生态补偿机制和生态修复提供参考依据。

本研究构建了海南岛橡胶林生态系统服务功能评估指标体系,为进一步衡量天然橡胶产业在海南的重要地位,并为回应橡胶种植存在悖论及质疑提供理论依据及数据支撑,橡胶林带来的生态问题主要取决于橡胶种植和管理过程是否违反栽培规程。通过评估结果得出,海南岛橡胶林具有较强的生态系统服务功能,因此,不能否定橡胶林产生的积极作用以及橡胶林带来的生态、经济和社会效益。本次评估从生态经济学视角,重新审视天然橡胶产业的重要性,对保证国家用胶安全,保障战略物资供给,有着重要的意义。同时,也为其他人工林生态系统服务功能提供评估模板,各地区应结合研究区域森林资源状况进行调整评估体系指标,提高核算技术,形成研究区域的

地方规范和参数本地化。橡胶林碳汇具有较大的潜力,未来应对橡胶林具有的碳汇价值进行更具探讨。海南岛各市(县)的每项橡胶林生态系统服务功能以及橡胶林生态系统服务功能总价值量的空间分布格局,与海南岛各市(县)的橡胶林种植面积和不同林龄段的橡胶林净初级生产力有关。细化不同林龄段的橡胶林生态系统服务功能价值量,更精确评估橡胶林生态系统服务功能价值,缩小因不同林龄的净初级生产力存在差异而产生的计算误差,为橡胶树的种植规划、胶林抚育、胶林更新和改善低效胶林的生长环境等措施提供理论依据。在橡胶林经营管理过程中,加强幼龄和成熟胶林的保护管理,同时也要对近熟和老龄胶林的开发和更新。

5 结 论

经过测算,海南岛橡胶林生态系统服务功能总价值为353.04亿元,其单位面积生态系统服务功能价值为67478.91元·hm⁻²,具有较大的生态系统服务功能价值。其中固碳释氧功能价值占比较大,约占天然橡胶产业生态总价值的70.90%。此次评估结果显示,海南岛橡胶林对海南的减排、维持大气中碳氧平衡起着重要的作用,为未来开展橡胶林碳交易提供理论依据和数据支撑,对促进天然橡胶产业可持续发展和对推动橡胶种植地的农业农村发展以及提高胶农收入有着重要的意义。

参考文献:

- [1] 蒋菊生,彭宗波.海南农垦橡胶产业的生态服务功能价值转移研究[C]//中国生态学会2006学术年会论文荟萃.沈阳:中国生态学会,2006:2.
- [2] 祁栋灵,兰国玉,陈帮乾,等.橡胶林生态系统生态功能述评[J].*生物学杂志*,2021,38(1):102-105.
- [3] 李广洋,寇卫利,陈帮乾,等.近30年海南岛橡胶林时空变化分析[J].*南京林业大学学报(自然科学版)*,2023,47(1):189-198.
- [4] WESTMAN W E. How much are nature's services worth?[J].*Science*,1977,197(4307):960-964.
- [5] RICHTER M N J R. Review: extinction: the causes and consequences of the disappearance of species[J].*Humboldt Journal of Social Relations*,1982,9(2):231-233.
- [6] ROBIN L, SÖRLIN S, WARDE P. The future of nature: documents of global change[M]. New Haven: Yale University Press,2013:454-464.

- [7] 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.
- [8] 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(5): 607 – 613.
- [9] 傅伯杰, 张立伟. 土地利用变化与生态系统服务: 概念、方法与进展[J]. *地理科学进展*, 2014, 33(4): 441 – 446.
- [10] 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.
- [11] 于格, 鲁春霞, 谢高地. 青藏高原草地生态系统服务功能的季节动态变化[J]. *应用生态学报*, 2007, 18(1): 47 – 51.
- [12] 冯继广, 丁陆彬, 王景升, 等. 基于案例的中国森林生态系统服务功能评价[J]. *应用生态学报*, 2016, 27(5): 1375 – 1382.
- [13] 肖骁, 穆治霖, 赵雪雁, 等. 基于 RS/GIS 的东北地区森林生态系统服务功能价值评估[J]. *生态学杂志*, 2017, 36(11): 3298 – 3304.
- [14] 李少宁, 陶雪莹, 鲁绍伟, 等. 北京市经济林生态系统服务功能评估[J]. *西北林学院学报*, 2022, 37(1): 267 – 272.
- [15] 郑婷婷, 李苑菱, 陈宗铸, 等. 2000—2020 年海南岛流域景观格局时空演变及其推动因素分析[J]. *热带林业*, 2023, 51(4): 67 – 73.
- [16] 宾昕, 蒋贤玲, 任晓玥. 近 51 年海南岛极端气温事件分析[J]. *热带气象学报*, 2023, 39(3): 424 – 432.
- [17] 国家林业局. LY/T 1721—2008 森林生态系统服务功能评估规范[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008: 3-6.
- [18] 李意德. 海南生态公益林生态服务功能价值评估研究[M]. 北京: 中国林业出版社, 2016: 31-38.
- [19] 蒋菊生, 王如松. 橡胶林固定 CO₂ 和释放 O₂ 的服务功能及其价值估计[J]. *生态学报*, 2002, 22(9): 1545 – 1551.
- [20] 吴志祥, 谢贵水, 陶忠良, 等. 海南儋州不同林龄橡胶林土壤碳和全氮特征[J]. *生态环境学报*, 2009, 18(4): 1484 – 1491.
- [21] 唐建维, 庞家平, 陈明勇, 等. 西双版纳橡胶林的生物量及其模型[J]. *生态学杂志*, 2009, 28(10): 1942 – 1948.
- [22] 宋清海, 张一平. 西双版纳地区人工橡胶林生物量、固碳现状及潜力[J]. *生态学杂志*, 2010, 29(10): 1887 – 1891.
- [23] 朱美玲, 王旭, 王帅, 等. 海南儋州橡胶树、桉树人工林碳储量及其动态变化[J]. *生态科学*, 2016, 35(3): 43 – 51.
- [24] 左其亭, 王娇阳, 杨峰, 等. 水源涵养相关概念辨析及水源涵养能力计算方法[J]. *水利水电科技进展*, 2022, 42(2): 13 – 19.
- [25] 欧阳志云, 赵同谦, 赵景柱, 等. 海南岛生态系统生态调节功能及其生态经济价值研究[J]. *应用生态学报*, 2004, 15(8): 1395 – 1402.
- [26] 刘月, 赵文武, 贾立志. 土壤保持服务: 概念、评估与展望[J]. *生态学报*, 2019, 39(2): 432 – 440.
- [27] 张欣, 尤春赫, 李诗菁, 等. 生态系统净化空气服务研究进展[J]. *环境工程技术学报*, 2022, 12(1): 232 – 239.
- [28] 王兵, 郑秋红, 郭浩. 基于 Shannon-Wiener 指数的中国森林物种多样性保育价值评估方法[J]. *林业科学研究*, 2008, 21(2): 268 – 274.
- [29] 黄先寒, 兰国玉, 杨川, 等. 海南不同栽培模式下橡胶林灌草物种多样性研究[J]. *西北林学院学报*, 2016, 31(5): 115 – 120.
- [30] 兰国玉, 吴志祥, 谢贵水. 海南橡胶林植物多样性特征[J]. *生物多样性*, 2014, 22(5): 658 – 666.
- [31] 王群, 李东海, 杨小波, 等. 海南霸王岭橡胶林下植物多样性特征研究[J]. *林业资源管理*, 2022(5): 76 – 83.
- [32] 国家林业和草原局. 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.
- [33] 中肥网农资通. 2023 年中肥网钾肥市场年报[EB/OL]. (2024-01-22)[2024-07-24]. <http://vip.fert.cn/view.asp?id=2711914>.
- [34] 中肥网农资通. 2023 年中肥网磷酸铵市场年报[EB/OL]. (2024-01-22)[2024-07-24]. <http://vip.fert.cn/view.asp?id=2711880>.
- [35] CHEN B Q, XIAO X M, WU Z X, et al. Identifying establishment year and pre-conversion land cover of rubber plantations on Hainan Island, China using Landsat data during 1987–2015[J]. *Remote Sensing*, 2018, 10(8): 1240.
- [36] 罗佳, 黎蕾, 姜芸, 等. 湖南省森林生态系统服务功能价值评估[J]. *生态科学*, 2022, 41(4): 70 – 77.
- [37] 中华人民共和国水利部. 2021 年全国水利发展统计公报[DB/OL]. <http://www.mwr.gov.cn/sj/tjgb/slfztjgb/>
- [38] 国家统计局. 2021 年 12 月份居民消费价格同比上涨 1.5% 环比下降 0.3%[EB/OL]. (2022-01-12)[2024-07-24]. https://www.stats.gov.cn/xxgk/sjfb/zxfb2020/202201/t20220112_1826190.html.
- [39] 海南省水务厅. 2022 年海南省水资源公报[EB/OL]. (2023-08-28)[2024-07-24]. <https://swt.hainan.gov.cn/sswt/1801/202308/e96dcba83c8c4fdb96be9e87bb5e1ade.shtml>.
- [40] 张晓娟, 吴志祥, 杨川, 等. 海南岛橡胶林生态系统水汽通量及其影响因子研究[J]. *热带作物学报*, 2015, 36(8): 1432 – 1439.
- [41] 耿思文. 海南儋州橡胶林生态系统水量平衡研究[D]. 海口: 海南大学, 2020. doi: 10.27073/d.cnki.ghadu.2020.000390
- [42] 中华人民共和国生态环境部. 国家发改委、财政部、环保部调整排污费征收标准[EB/OL]. (2014-09-05)[2024-07-24]. https://www.mee.gov.cn/ywdt/hjnews/201409/t20140905_288712.shtml.
- [43] 陈伟, 兰国玉, 蒋菊生, 等. 海南农垦橡胶林生态系统服务价值的分析[J]. *西北林学院学报*, 2008, 23(1): 215 – 218.

Ecosystem service functions of rubber plantations in Hainan Island and their value analysis

ZENG Huifen^{1,2#}, FAN Xiaofeng¹, YANG Chuan², WU Zhixiang^{1,2*}

(1. International Business School, Hainan University, Haikou, Hainan 570228, China; 2. Rubber Research Institute, Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences/Hainan Danzhou National Observation and Research Station for Tropical Agro-ecosystems, Danzhou, Hainan 571737, China)

Abstract: Natural rubber has a vital position, and its safe supply is of great significance to the security of the national economy and even the security of the country. In recent years, the rapid expansion of rubber plantation area and potential ecological problems have attracted more attention. The assessment of the ecosystem service of rubber plantations in Hainan Island is conducive to determine the ecological value of rubber plantations, examine the important position of natural rubber industry from the perspective of ecological economics, and promote the sustainable development of natural rubber industry. In this context, the recognition algorithm of rubber plantations of different ages in Hainan Island was used to calculate the planting area of rubber plantations of different ages in Hainan Island, and the ecological service function value of the rubber plantations in different areas at different ages in Hainan Island was evaluated by substitute cost method and shadow engineering method. The results showed that the total value of ecosystem services in the rubber plantations in Hainan Island was 35.304 billion yuan, and the value of ecosystem services per unit area was 67 478.91 yuan/ha. The value of carbon sequestration and oxygen release was 23.571 billion yuan, the value of water purification and regulation was 3.390 billion yuan, the value of soil fixation and fertilizer conservation was 0.573 billion yuan, the value of air purification was 3.458 billion yuan, the value of farmland protection was 0.400 billion yuan, the value of forest tree nutrient accumulation was 1.543 billion yuan, and the value of biodiversity conservation was 0.314 billion yuan. Among them, the ecosystem service value of rubber plantations at the ages of 16–20 years in Hainan Island was the highest. The spatial distribution pattern of ecosystem service value of the rubber plantations in Hainan Island is basically in the order of northwest > middle > southwest > southeast > northeast. The results show that rubber plantations have a strong ecosystem service function, which can not only bring economic and social benefits to human beings, but also produce greater ecological benefits.

Keywords: rubber plantation; Hainan Island; ecological function; ecosystem service function; eco-efficiency

(责任编辑: 钟云芳)