

多政策情景下海南省红树林生态系统服务价值模拟预测

甘小林[#], 刘名归, 葛成军^{*}

(海南大学 环境科学与工程学院/海南省农林环境过程与生态调控重点实验室/
海口市环境毒理学重点实验室, 海南 海口 570228 中国)

摘要: 红树林对海岸带生态安全及蓝碳生态系统意义重大, 其生态系统服务价值(ESV)量化与预测可为生态保护和空间规划提供科学支撑。本研究以海南省红树林为对象, 基于 2000—2020 年土地利用与红树林分布数据, 采用 PLUS 模型模拟 2030—2050 年自然发展、红树林保护、耕地—红树林双保护三种情景的空间格局变化, 并构建含 4 大类 11 项服务的 ESV 评估体系, 分析其价值构成与空间分异。结果显示, 2000—2020 年海南红树林面积从 44.11 km² 增至 75.84 km², ESV 总量从 11.37 亿元升至 19.07 亿元; 支持服务(以保肥价值为核心)占比 43.5%~45.9%。根据多情景模拟分析结果, 2050 年耕地—红树林双保护情景下, 红树林面积与 ESV 均达最优, ESV 达 26.80 亿元, 凸显协同保护潜力。研究揭示了政策调控的关键作用, 同时提出“耕地—红树林”协同保护等建议, 为海南红树林保护修复及蓝碳战略实施提供参考。

关键词: 红树林生态系统服务价值; PLUS 模型; 多情景模拟; 土地利用变化; 时空演变

中图分类号: **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-7054(2026)X-0001-14

甘小林, 刘名归, 葛成军. 多政策情景下海南省红树林生态系统服务价值模拟预测[J]. 热带生物学报 (中英文), 2026, 17(0): 1–14. DOI: [10.15886/j.cnki.rdswwb.20250187](https://doi.org/10.15886/j.cnki.rdswwb.20250187) CSTR: [32425.14/j.cnki.rdswwb.20250187](https://cstr.cn/32425.14/j.cnki.rdswwb.20250187)



红树林作为典型的滨海湿地生态系统, 在全球热带与亚热带海岸线分布广泛, 因其具有碳汇固碳、防风消浪、水质净化、生态栖息等多重生态系统服务功能, 被誉为“海岸卫士”和“蓝碳库”^[1-3]。近年来, 红树林生态系统服务价值(ecosystem services values, ESV)评估已成为生态价值转化与可持续发展研究的重要方向^[4-5]。海南省作为我国红树林分布最集中、生态价值最高的区域, 其红树林面积约占全国的 33%。近年来, 随着生态政策的持续推进, 海南省红树林面积呈现增长态势。自 2010 年以来, 依托“退塘还林”、“滩涂造林”等生态修复工程, 海南红树林的面积与空间分布格局发生了显著变化。

随着红树林生态功能研究的不断增多, 其所带来的生态服务价值也日益受到广泛关注。何海军等基于海南红树林的温室气体排放与净化功能, 估算其单位面积 ESV 高达 33.32 万元·ha⁻¹, 显著高于全球平均水平^[6]; Wang 等基于 Sentinel-2 影像

分析 2016—2020 年广西红树林面积动态演变趋势, 量化 ESV 变化, 揭示其与面积、空间格局的关联性, 提出空间格局优化对提升生态价值的重要性, 为保护政策提供依据^[7]。然而, 对于红树林生态系统服务价值, 现有研究主要为静态评估及历史变化分析, 缺乏对红树林 ESV 动态演变的预测研究^[8-9]。

在土地利用模拟领域, 主要有 FLUS 模型(future land use simulation model)、CLUE-S 模型(conversion of land use and its effects at small region extent)、CA-Markov 模型(cellular automata-markov model)、PLUS 模型(patch-generating land use simulation model)等^[10]。PLUS 模型是在 FLUS 模型基础上发展而来, 集成了土地扩张规则挖掘和多类型随机种子机制, 能够实现斑块尺度的精细模拟, 模拟精度高, 适应性强^[11]。本研究以 2000—2020 年海南红树林遥感数据为基础, 结合 PLUS 模型模拟 2030—2050 年多情景下的空间分布, 测算海南省红树林的动态价值以揭示红树林生态系

© CC BY 4.0 收稿日期: 2025-12-02

修回日期: 2026-01-12

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(42277315); 海南省科技人才创新项目(KJRC2023C21)

[#]第一作者: 甘小林(2000—), 男, 海南大学环境科学与工程学院 2023 级硕士研究生。E-mail: xlg02276097@163.com

^{*}通信作者: 葛成军(1977—), 男, 教授。研究方向: 环境污染修复技术及环境经济。E-mail: cjge3007@163.com

统服务功能的空间格局与演变趋势。

1 研究区概况和数据来源

1.1 研究区概况 海南省研究区概况如图 1 所示, 海南省位于 $18^{\circ}10' \sim 20^{\circ}10' \text{N}$, $108^{\circ}37' \sim 111^{\circ}03' \text{E}$ 之间, 属于热带季风气候区。该区域气候高温多

雨, 光照资源丰富, 为红树林的生长提供了优越的自然条件。海南省呈东北至西南走向的长轴形态, 长度约 290 km, 西北至东南方向的宽度约为 180 km, 总面积为 3.39 万 km^2 。据统计, 海南省现有红树植物共 21 科 28 属 44 种, 且鸟类物种丰富, 生物多样性特征显著。

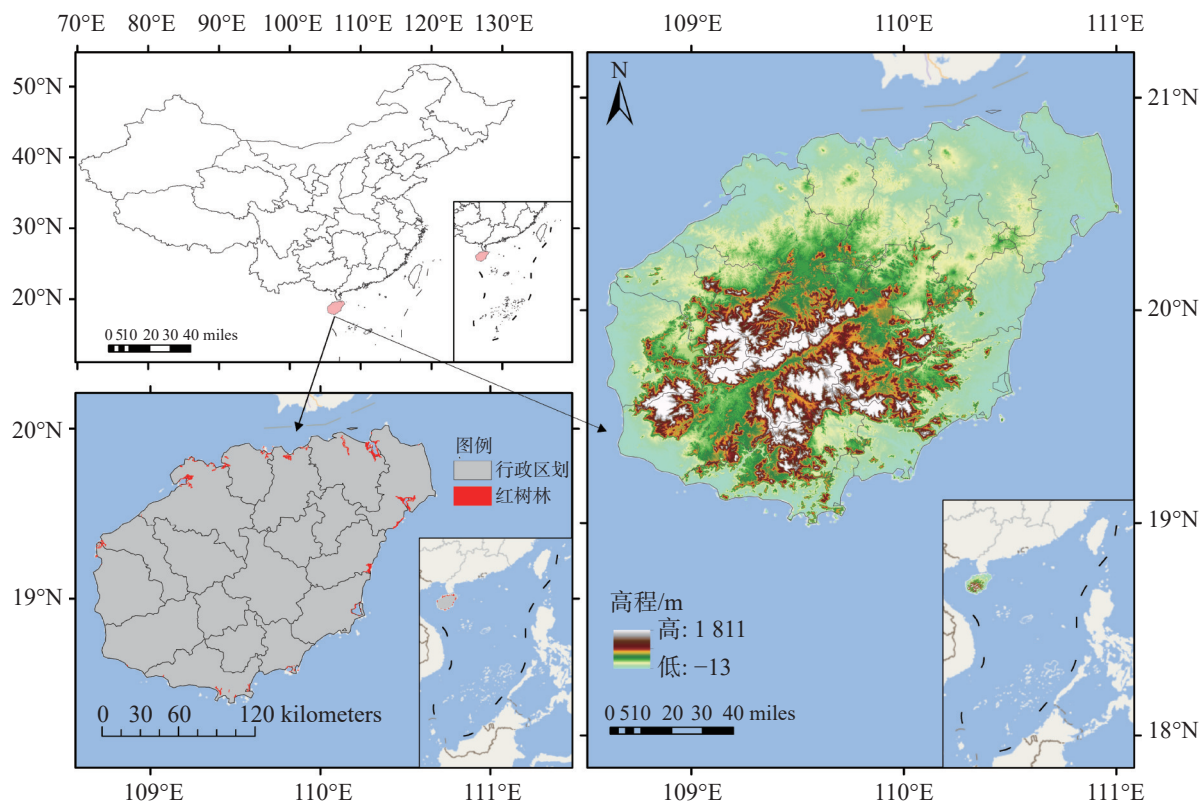


图 1 研究区地理位置

Fig. 1 Geographical location of the study area

注: 中国版图审图号 GS(2024)0650 号(基于地类完整性确定, 研究区包含突出行政边界的生态区域)

Note: China map review number GS (2024)0650 (determined through comprehensive land use integrity analysis, the study area encompasses ecological regions distinguished by prominent administrative boundaries).

1.2 数据来源与处理

1.2.1 数据来源 研究所用遥感数据涵盖土地利用类型(林地、耕地、草地、水域、建设用地、未利用地)、红树林、养殖鱼塘、海岸线矢量、滩涂及驱动因子(自然因素、社会经济因子、可达性因子)等, 具体来源见表 1。ESV(生态系统服务价值)统计数据通过整理学术文献与政府公开文件获取, 以保障数据的准确性与可靠性。

1.2.2 数据预处理 本研究用 ArcGIS v10.8 重分类合并地类数据, 因地类数据来源多样存在冲突, 故依研究核心关注对象排序地类重要性(红树林>养殖鱼塘>滩涂地>林地、耕地等其他六项地类), 冲突区域取重要性最高地类; 经擦除工具去除相

交区、合并数据后, 形成海南土地利用数据集如图 2, 且 PLUS 模型的栅格数据与地类数据行列号均保持一致, 采用 WGS 1984 Albers 坐标。

通过 ArcGIS Pro 沿线生成样带工具, 设 100 米间隔、垂直海岸线且向内陆及海域各延伸 200 米的样带, 用相交工具提取与红树林相交样带, 结合标识工具叠加行政区矢量图, 提取各市红树林重合岸段长度, 计算公式如下:

$$L_{ij} = U_{ij} \times 100 \quad (1)$$

式中, L_{ij} 为第 i 年 j 市县的的红树林重合岸线长度; U_{ij} 为第 i 年 j 市县的样带数量。

受数据可用性限制, 文献选取的不同服务功能评估价格参数来源年份不同, 缺乏时间可比

表 1 PLUS 模型相关数据及来源

Tab. 1 Datasets and sources for the PLUS model

数据类型 Data type	数据名称 Data name	文件格式 File format	来源 Source
土地利用数据 Land use data	2000—2020年土地利用类型	栅格文件	中国科学院资源环境科学与数据中心 (http://www.resdc.cn/)
	红树林分布数据	矢量文件	地球资源数据云平台(www.gis5g.com)
	滩涂数据	矢量文件	[12]
	养殖鱼塘数据	矢量文件	[13]
其他数据 Other data	海岸线数据	矢量文件	[14]
	年平均气温	栅格文件	地球资源数据云平台(www.gis5g.com)
自然因素 Natural factors	年平均降水	栅格文件	
	高程	栅格文件	地理空间数据云(https://www.gscloud.cn/)
	坡度	栅格文件	基于DEM数据获得
社会经济因子 Socio-economic factors	人口密度	栅格文件	中国科学院资源环境科学与数据中心 (http://www.resdc.cn/)
	人均GDP	栅格文件	
	夜间灯光数据	栅格文件	[15]
	商务住宅	矢量文件	高德开放平台(https://lbs.amap.com)
可达性因子 Accessibility factors	政府机构及社会团体	矢量文件	
	公路	矢量文件	OpenStreetMap(https://openstreetmap.org)
	水路	矢量文件	
	普通铁路	矢量文件	[16]
	高速铁路	矢量文件	

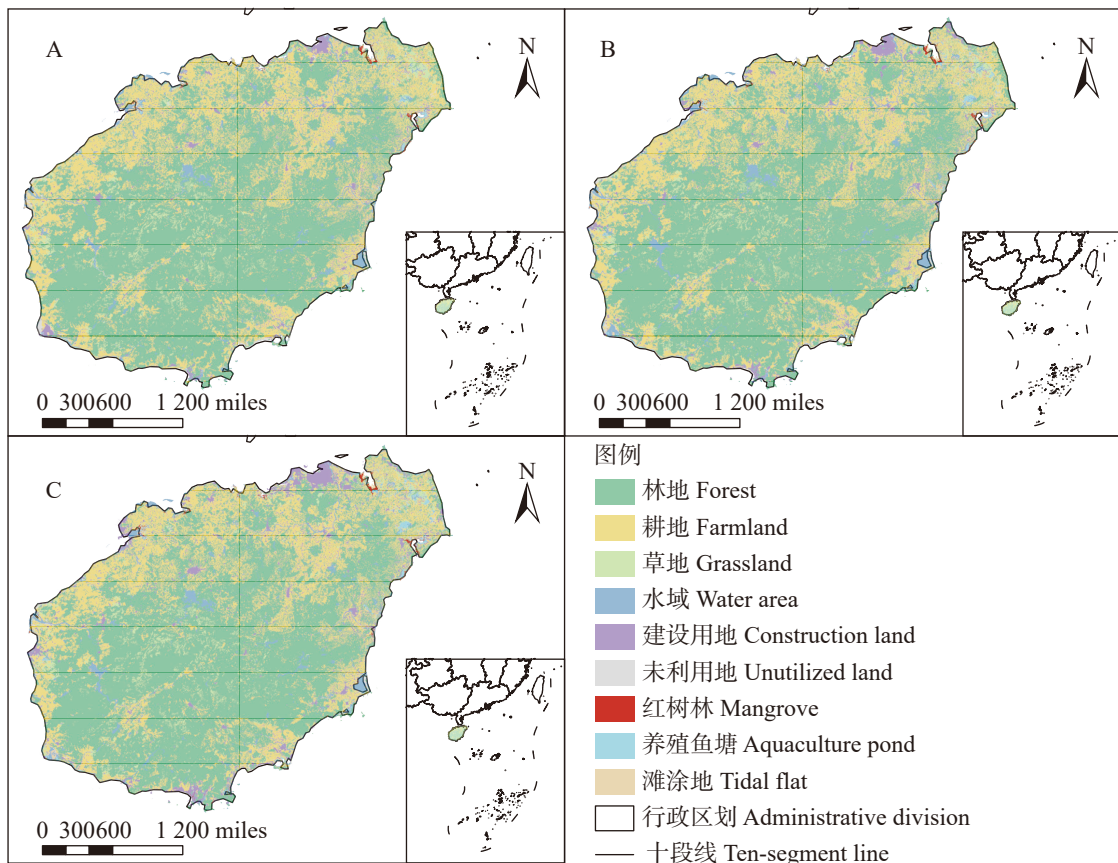


图 2 2000 年(A)、2010 年(B)和 2020 年(C)海南省土地利用变化

Fig. 2 Land use changes in Hainan Province in 2000 (A), 2010 (B), and 2020 (C)

性。本研究拟用工业生产者价格指数(PPI)将参数统一转换至指定年份,由于数据可得性,2000 年价格拟用海南省 2002 年的 PPI 进行换算,并将 2002 年作为基准年,具体转换方法如下:

$$I_t=I_{t-1}\times\frac{r_t}{100}$$
(2)

$$P_t=P_o\times\frac{I_t}{I_o}$$
(3)

式中: I_t 为第 t 年的定基指数; r_t 为第 t 年的 PPI 环比指数(即相对上一年的百分比值); P_t 为目标年份价格; P_o 为原始年份价格; I_o 为目标年份定期指数。

2 研究方法

2.1 PLUS 模型 运用模型中的 LEAS 模块,提取 2010—2020 年各地类扩张样本,利用随机森林算法量化各驱动因子的贡献度,并生成各地类的发展概率图,其中随机森林采样方式为随机采样,决策树数目设置 30,采样率为 0.1。再利用 Markov Chain 得到 2020 年的地类变化趋势,通过 CARS

模块结合 2010—2020 年的发展概率、预设的邻域权重及土地转换规则等参数模拟 2020 年各地类扩张情况,领域权重通过多次试验对比确定最优系数(表 2)。通过与实际数据对比进行验证模型精度,OA(overall accuracy)为 0.924 和 Kappa 系数为 0.858,表明模型构建良好,可以用于土地利用变化的模拟预测研究^[17]。

2.2 多情景模拟设置 为分析不同政策导向下红树林面积变化情况,综合考虑《海南省红树林资源保护专项规划(2024—2035 年)》《海南省“绿美自贸港”三年行动方案(2025—2027 年)》《海南省红树林保护修复专项行动计划实施方案(2022—2025 年)》以及《海南省国土空间总体规划(2021—2035 年)》《关于加强耕地保护提升耕地质量完善占补平衡的意见》等政策文件,设置三种模拟情景,土地利用成本转换矩阵设置如表 3 所示。

(1)自然发展情景:以历史时期(2000—2020 年)的土地利用变化为基础,通过 Markov Chain 预测未来变化趋势,不施加政策干预,反映红树林及

表 2 多次实验确定的领域权重因子最优取值

Tab. 2 Optimized domain weighting factors derived from repeated experiments

林地	耕地	草地	水域	建筑用地	未利用地	红树林	养殖鱼塘	滩涂地
Forest	Farmland	Grassland	Water area	Construction land	Unutilized land	Mangrove	Aquaculture pond	Tidal flat
0.58	0.45	0.43	0.2	0.95	0.25	0.68	0.32	0.6

表 3 土地利用成本转换矩阵

Tab. 3 Land use conversion cost matrices

自然发展情景									红树林保护情景									耕地-红树林双保护情景								
Natural development scenario									Mangrove conservation scenario									Farmland-mangrove dual protection Scenario								
A	B	C	D	E	F	G	H	I	A	B	C	D	E	F	G	H	I	A	B	C	D	E	F	G	H	I
A	1	1	1	0	1	1	1	0	0	1	1	1	0	1	1	1	0	0	1	1	1	0	1	1	0	0
B	1	1	0	1	1	1	1	1	0	1	1	0	1	1	1	1	0	1	1	0	0	1	0	1	0	0
C	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0	1	1	1	1	1	1	0
D	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1
E	1	1	1	0	1	0	1	0	1	1	1	1	0	1	0	1	0	1	1	1	0	1	0	1	0	1
F	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
G	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
H	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
I	0	1	1	1	0	0	1	1	1	0	1	1	1	0	0	1	1	1	0	1	1	1	0	0	1	1

注: A~I 分别为林地、耕地、草地、水域、建设用地、未利用地、红树林、养殖鱼塘、滩涂地。
Note: A~I represent forest, farmland, grassland, water area, construction land, unutilized land, mangrove, aquaculture pond, and tidal flat, respectively.

其他类型土地的自然演变规律。

(2)红树林保护情景: 体现生态优先导向, 严格禁止红树林向其他用地转化, 并借鉴前人学者, 将森林和耕地向红树林的转移概率提高 80%, 养殖鱼塘、滩涂地、水域和未利用地提高 30%, 以模拟“退塘还林”“促淤造陆”等修复措施, 同时将草地和建设用地向红树林的转移概率降低 80%, 限制建设扩张^[17]。

(3)耕地—红树林双保护情景: 强调粮食安全与生态修复并重, 依据耕地保护政策, 通过栅格计算器提取三期(2000、2010、2020 年)均保持为耕地的稳定区域, 并筛选 2020 年坡度小于 6°的耕地区域, 设定为限制转换区^[19]。将耕地向红树林、建设用地、养殖鱼塘转移概率降低 30%, 其余地类转换规则与红树林保护情景一致, 以体现耕地保护与红树林修复的协调推进。

表 4 红树林生态系统服务价值核算体系及相关数据

Tab. 4 Mangrove ecosystem service value accounting framework and related data

一级指标 Primary indicator	二级指标 Secondary indicator	评价方法 Evaluation method	统计数据及来源 Statistical data and sources
供给服务 Provisioning services	食物供给 Food provision	市场价值法 MVM	2012年红树林的海产品价格为4 170 000元·km ⁻² ^[23]
	原材料供给 Raw material provision	市场价值法 MVM	红树林的年材积平均生长量为439 t·km ⁻² ·a ⁻¹ ^[24] , 2008年红树植物活立木市场价格为993元·t ⁻¹ ^[25] 。
调节服务 Regulating services	固碳释氧 Carbon sequestration and oxygen release	市场价值法、 造林成本法、 工业制氧法 MVM, ACM, IOPM	2010年的造林成本为250元·t ⁻¹ ^[26] , 根据《海南省生态产品总值(GEP)核算技术规范(试行)》, 海南省红树林地固碳速率为444.27 tC·km ⁻² ·a ⁻¹ , 碳氧转化系数为32/44。2020年工业制氧成本为800元·t ⁻¹ , 碳交易价格为28元·t ⁻¹ 。
	空气净化 Air purification	替代成本法 RCM	红树林SO ₂ 、NO _x 、粉尘吸收能力分别为8 865、600、1 011 000 kg·km ⁻² ·a ⁻¹ ^[6] 。根据海南省生态产品总值(GEP)核算技术规范(试行)》, 2020年SO ₂ 、NO _x 治理成本为2.526 3元·kg ⁻¹ , 粉尘治理成本为0.6元·kg ⁻¹ 。
	水质净化 Water purification	替代成本法 RCM	根据《海南省生态产品总值(GEP)核算技术规范(试行)》, 海南省湿地的COD净化能力为110.43 t·km ⁻² ·a ⁻¹ , COD的净化费用为2 800元·t ⁻¹ ; 氮磷的净化价值分别为3.5元·kg ⁻¹ 和11.2元·kg ⁻¹ 。根据前人研究, 单位面积重金属吸附价值为2 660 000元·km ⁻² ^[27] , 氮磷的平均年吸收量分别为17 747、1951.67kg·km ⁻² ^[28,30] 。
	消浪护岸 Wave attenuation and shoreline protection	能值分析法 EAM	根据前人研究, 南海海域的海水密度为1 025 kg·m ⁻³ ^[31] , 海浪流速在0.1 ~ 0.77m·s ⁻¹ 范围, 取中间值0.435m·s ⁻¹ ^[32-35] ; 平均浪高为0.904 m ^[36-40] , 能值转换率为2.590 sej·J ⁻¹ ^[41] , 能值货币比率为3.13×1 011 sej·元 ⁻¹ ^[42] 。
支持服务 Supporting services	保肥价值 Soil fertility maintenance	替代成本法 RCM	经测定, 0.3 m的红树林表层土壤N、P、K的总含量为1.39%, 土壤密度为770 kg·m ⁻³ ^[24] 。根据《海南省生态产品总值(GEP)核算技术规范(试行)》, 2020年磷酸二氢铵、氯化钾价格分别为3.895、3.3元·kg ⁻¹ , 取平均值作为化肥平均价格, 即3.597 5元·kg ⁻¹ 。
	病虫害价值 Pest and disease control	成果参照法 BTM	据统计, 平均每单位林地的病虫害防治价值约为500元·km ⁻² ·a ⁻¹ , 且林地病虫害价值占一体化病虫害防治价值的10% ^[24] 。
	栖息地价值 Habitat provision	成果参照法 BTM	根据前人研究, 湿地单位面积价格为221 220元·km ⁻² ^[43]
文化服务 Cultural services	休闲旅游 Recreation and tourism	成果参照法 BTM	参考Costanza等研究, 全球湿地生态系统平均娱乐功能价值为57 400 USD·km ⁻² ^[44] , 汇率取6.8, 转换后为390 320元·km ⁻² 。
	科教宣传 Education and cientific research	成果参照法 BTM	参考Costanza等研究, 单位面积湿地科教价值取86 100 USD·km ⁻² ^[44] , 转换后为585 480元·km ⁻² 。参考前人研究, 我国现有单位面积湿地生态系统平均科研价值为38 200元·km ⁻² ^[45]

2.3 ESV 估算 本研究基于联合国千年生态系统评估 (millennium ecosystem assessment) 和海南省红树林生态系统特征, 将红树林生态系统服务分为供给服务、调节服务、支持服务、文化服务 4 类, 共包含 11 种特定服务。采用市场价值法 (market value method, MVM)、替代成本法 (replacement cost method, RCM)、工业制氧法 (industrial oxygen production method, IOPM)、造林成本法 (afforestation cost method, AME)、能值分析法 (Emergy analysis method, EAM)、成果参照法 (benefit transfer method, BTM) 等对海南红树林 ESV 进行评价分析^[20-22], 具体核算体系及相关数据见表 4, 核算方法见支撑材料附表 S1。

3 结果与分析

3.1 土地利用和海岸线变化分析 2000 年、2010 年、2020 年海南省各市县红树林分布面积及海岸线变化见表 5。整体上, 红树林总面积从 2000 年的 44.11 km² 增长至 2020 年的 75.84 km², 增长了 31.73 km², 增幅高达 71.9%。同期, 红树林重合岸段长度由 263.8 km 增加至 313.3 km, 增幅为 18.8%。文昌市和海口市作为传统上的红树林分布大市, 在保持面积稳定增长的同时, 其重合岸

段长度变化不大。儋州市、琼海市和三亚市是红树林面积增长的核心区域, 其 2020 年面积相较于 2000 年分别增长了 101%、460% 和 263%, 其岸段长度显著延长。昌江黎族自治县的红树林面积变化显著, 从 0.02 km² 恢复至 1.01 km², 增长近 50 倍, 同时岸线从 300 m 延伸至 6600 m。澄迈县的红树林面积也实现了快速增长, 但受防护的岸线长度却有所减少。

土地利用类型转移情况如图 3, 在 2000—2010 年间, 耕地、林地、水域以及养殖鱼塘为向红树林转化的主要土地类型。而在 2010—2020 年阶段, 这些土地类型向红树林转化的规模进一步扩大, 转化面积显著增多, 且建设用地向红树林转化的面积在这一时期出现了明显增长。

红树林生态系统并非单向扩张, 其向其他土地利用类型的转化面积亦有所增加, 主要向耕地、林地、水域以及养殖鱼塘这四类土地类型发生转化。红树林生态系统与周边土地利用类型之间存在着复杂的动态平衡关系。

3.2 ESV 时空变化分析 2000—2020 年红树林 ESV 及贡献率见表 6、7 所示。研究期间内, 红树林生态系统服务价值 (ESV) 总量实现显著增长, 从 2000 年的 113 698 万元上升至 2020 年的 190 698

表 5 2000—2020 年海南省红树林面积及岸段长度变化

Tab. 5 Changes in mangrove area and shoreline length in Hainan province from 2000 to 2020

地区 Region	2000年 Year 2000		2010年 Year 2010		2020年 Year 2020	
	面积/km ²	岸段长度/km	面积/km ²	岸段长度/km	面积/km ²	岸段长度/km
	Area	Shoreline length	Area	Shoreline length	Area	Shoreline length
昌江黎族自治县 Changjiang Li Autonomous County	0.02	0.3	0.30	6.1	1.01	6.6
澄迈县 Chengmai County	2.34	26.4	2.91	22	4.87	21.8
儋州市 Danzhou City	6.39	49.5	7.98	55.8	12.87	61.4
东方市 Dongfang City	0.32	6.5	0.71	9.8	1.14	10.5
海口市 Haikou City	17.10	51.7	19.66	43.2	22.42	54.2
乐东黎族自治县 Ledong Li Autonomous County	0.00	0	0.00	0	0.19	1.4
临高县 Lingao County	1.60	20.8	2.73	21.3	4.10	23.3
陵水黎族自治县 Lingshui Li Autonomous County	0.27	3.4	0.38	4.4	0.96	8.3
琼海市 Qionghai City	0.72	10.5	1.93	20.2	4.02	24.6
三亚市 Sanya City	0.94	1.8	1.16	2.8	3.42	3.6
万宁市 Wanning City	0.58	8.7	0.91	15.8	1.21	12.9
文昌市 Wenchang City	13.81	84.2	15.64	83.9	19.63	84.7
海南省 Hainan Province	44.11	263.8	54.30	285.3	75.84	313.3

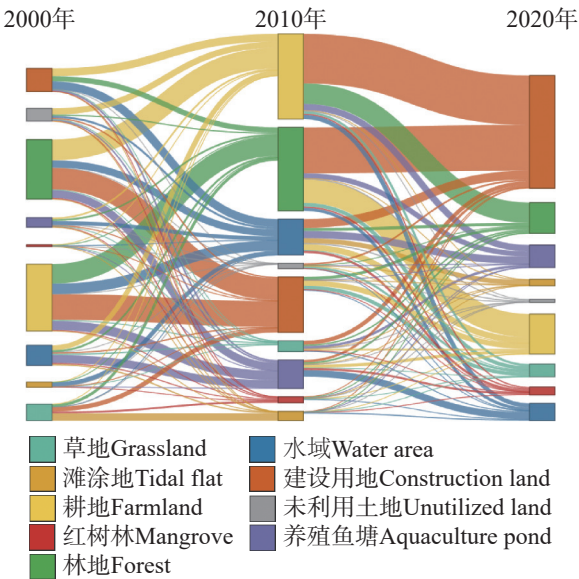


图 3 2000—2020 年土地利用转移桑基图
Fig. 3 Sankey diagram of land use transition (2000–2020)

万元,增幅达 67.7%。从服务构成来看,支持服务始终占据主导地位,其中保肥价值占总价值的 43.5%~45.9%,凸显了红树林在维持土壤肥力与养分循环中的关键作用。调节服务中,水质净化价值的占比从 11.9% 稳步提升至 12.6%,反映出红树林在水环境改善方面的持续贡献;而消浪护岸

价值占比有所下降,可能与红树林面积扩张速度高于其前沿岸线延伸速度有关。此外,供给服务与文化服务的价值总量均保持稳定增长,而固碳释氧和空气净化等与气候变化密切相关的服务价值占比略有上升,反映了红树林在“双碳”战略背景下的巨大潜力。

从空间格局看,传统核心区域如海口市和文昌市的 ESV 贡献率有所下降,分别降至 27.86% 和 26.04%。与此同时,儋州、琼海与三亚作为新兴增长区域,其 ESV 贡献率均实现显著提升。更为突出的是,昌江黎族自治县与乐东黎族自治县等原有低值地区实现突破性增长,昌江贡献率由 0.07% 跃升至 1.44%,乐东由 0.01% 增至 0.28%,体现了近几年红树林增长带来的显著成效。

3.3 多情景下土地利用和 ESV 变化分析

3.3.1 多情景下红树林及其岸段长度变化分析

依据多情景模拟预测结果(图 4),2030 年与 2050 年的红树林面积及岸段长度变化情况如下:拟将 2020 年作为基准年份,红树林面积为 75 km²,岸段长度为 313 km。在自然发展情景下,2020—2030 年红树林呈现快速扩张态势,面积增长近 15 km²,

表 6 2000—2020 年海南省红树林 ESV 及贡献率

Tab. 6 ESV and contribution rate of mangroves in Hainan province from 2000 to 2020

地区 Region	2000年 Year 2000		2010年 Year 2010		2020年 Year 2020	
	ESV/万元	贡献率 Contribution rate	ESV/万元	贡献率 Contribution rate	ESV/万元	贡献率 Contribution rate
昌江黎族自治县 Changjiang Li Autonomous County	74.58	0.07%	1 181.46	0.83%	2 750.98	1.44%
澄迈县 Chengmai County	7 040.81	6.19%	8 234.53	5.76%	12 377.49	6.49%
儋州市 Danzhou City	17 403.47	15.31%	22 212.74	15.52%	33 055.97	17.33%
东方市 Dongfang City	1 210.68	1.06%	2 400.06	1.68%	3 357.89	1.76%
海口市 Haikou City	39 928.16	35.12%	46 629.16	32.59%	53 121.81	27.86%
乐东黎族自治县 Ledong Li Autonomous County	9.26	0.01%	7.95	0.01%	536.65	0.28%
临高县 Lingao County	5 054.19	4.45%	7 797.74	5.45%	10 855.87	5.69%
陵水黎族自治县 Lingshui Li Autonomous County	849.83	0.75%	1 199.58	0.84%	2 779.78	1.46%
琼海市 Qionghai City	2 357.98	2.07%	5 943.77	4.15%	10 784.34	5.66%
三亚市 Sanya City	2 118.44	1.86%	2 777.88	1.94%	7 706.51	4.04%
万宁市 Wanning City	1 922.71	1.69%	3 334.62	2.33%	3 718.07	1.95%
文昌市 Wenchang City	35 733.87	31.43%	41 365.34	28.91%	49 658.94	26.04%
海南省 Hainan Province	113 698.69		143 079.08		190 698.31	

表 7 各服务指标 ESV 及占比

Tab. 7 ESV and proportion of each service indicator

一级指标 Primary indicator	二级指标 Secondary indicator	2000年 Year 2000		2010年 Year 2010		2020年 Year 2020	
		ESV/万元	占比/% Proportion	ESV/万元	占比/% Proportion	ESV/万元	占比/% Proportion
供给服务 Provisioning services	食物供给 Food provision	16 059.452	14.1246%	20 648.627	14.4316%	28 467.693	14.9281%
	原材料供给 Raw material provision	1 796.395	1.5800%	2 309.736	1.6143%	3 184.369	1.6698%
	固碳释氧价值 Carbon equestration and oxygen release	4 452.580	3.9161%	5 939.102	4.1509%	8 893.087	4.6634%
调节服务 Regulating services	空气净化 Air purification	2 697.470	2.3725%	3 468.303	2.4240%	4 781.654	2.5074%
	水质净化 Water purification	13 541.643	11.9101%	17 410.769	12.1686%	24 004.132	12.5875%
	消浪护岸 Wave attenuation and shoreline protection	21 651.189	19.0426%	24 514.473	17.1335%	26 531.358	13.9127%
支持服务 Supporting services	保肥价值 Soil fertility maintenance	49 418.685	43.4646%	63 540.648	44.4095%	87 601.741	45.9373%
	病虫害防治价值 pest and disease control	2.706	0.0024%	3.358	0.0023%	4.425	0.0023%
	栖息地价值 Habitat provision	981.157	0.8629%	1 261.534	0.8817%	1 739.243	0.9120%
文化服务 Cultural services	休闲旅游 Recreation and tourism	1 721.803	1.5144%	2 213.828	1.5473%	3 052.144	1.6005%
	科教宣传 Education and scientific research	1 375.607	1.2099%	1 768.703	1.2362%	2 438.462	1.2787%

岸段长度增加近 5 km; 进入 2030—2050 年阶段, 红树林增长近乎停滞, 面积仅增加 0.18 km², 岸段长度则回落至与 2020 年基准水平。在红树林保护情景下, 2020—2030 年红树林面积增加近 16 km², 增幅高于自然发展情景, 同期岸段长度大幅增加近 7 km; 2030—2050 年期间, 红树林面积与岸段长度继续保持稳定增长趋势。在耕地—红树林双保护情景下, 2020—2030 年红树林面积与岸段长度的变化趋势均与红树林保护情景相近; 而 2030—2050 年为该情景的优势增长期, 该时期红树林面积增长表现为所有情景中最优, 增长量达 19 km² 左右, 海岸线长度亦进一步延伸至 339 km。

3.3.2 多情景下红树林变化对比分析 根据图 5、6 所示, 不同情景下红树林的空间增减格局、地类转移来源与增长态势存在显著差异。总体上, 2030—2050 年红树林变化以增加为主, 但扩张强度与空间集聚程度随情景而显著分化: 自然发展情景下红树林新增斑块较为零散、减少斑块仍然存在; 红树林保护情景下新增范围与连续性较自然发展有所提升、减少过程进一步收敛; 而耕地—红树林双保护情景下红树林扩张最为显著, 新增区域更密集、更成片, 沿海形成更清晰的聚集扩张带, 表现出最强的净增效应。

从地类转移机制看, 自然发展情景中红树林

扩张以林地转移为主, 耕地与养殖鱼塘为次要来源; 但至 2050 年, 各地类向红树林的转入面积与红树林向其他地类的转出面积基本持平, 导致红树林增长动力不足, 空间上对应为“增减并存且以碎斑为主”的变化格局。在红树林保护情景下, 林地依旧是红树林的主要转入地类, 相较于自然发展情景, 水域、耕地及养殖鱼塘向红树林的转移规模有所提升; 同时红树林向其他地类的转出过程得到有效限制, 使得红树林仍保持净增长, 且新增斑块的连片性与稳定性增强。耕地—红树林双保护情景则呈现出不同的转移结构: 红树林转入以建设用地、水域及养殖鱼塘为主, 且红树林向其他地类的转出面积较红树林保护情景进一步减少, 转入增强与转出抑制的双重作用共同驱动该情景红树林净增长量达到最高水平。

情景差异空间对比结果来看, 双保护情景相对自然发展情景产生的红树林“额外增加区”范围最大且集聚性最强, 红树林保护相对自然发展亦产生额外增量但规模较小, 而红树林保护与双保护之间的差异主要表现为少量局部区域的增量变化, 说明综合约束条件下红树林扩张优势在多数区域具有稳定性。

3.3.3 多情景下 ESV 变化分析 以 2020 年各项生态服务单元面值为基准, 预测多情景下 2030 年

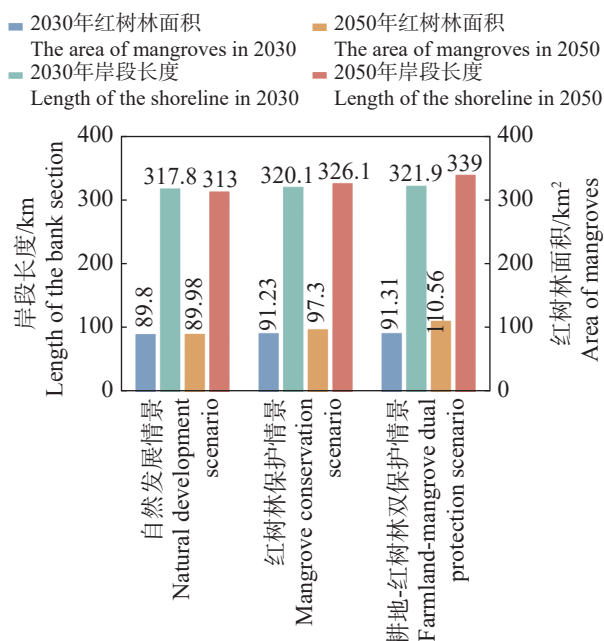


图 4 多情景下 2030—2050 年红树林面积及海岸线长度变化

Fig. 4 Changes in mangrove area and coastline length under multiple scenarios from 2030 to 2050

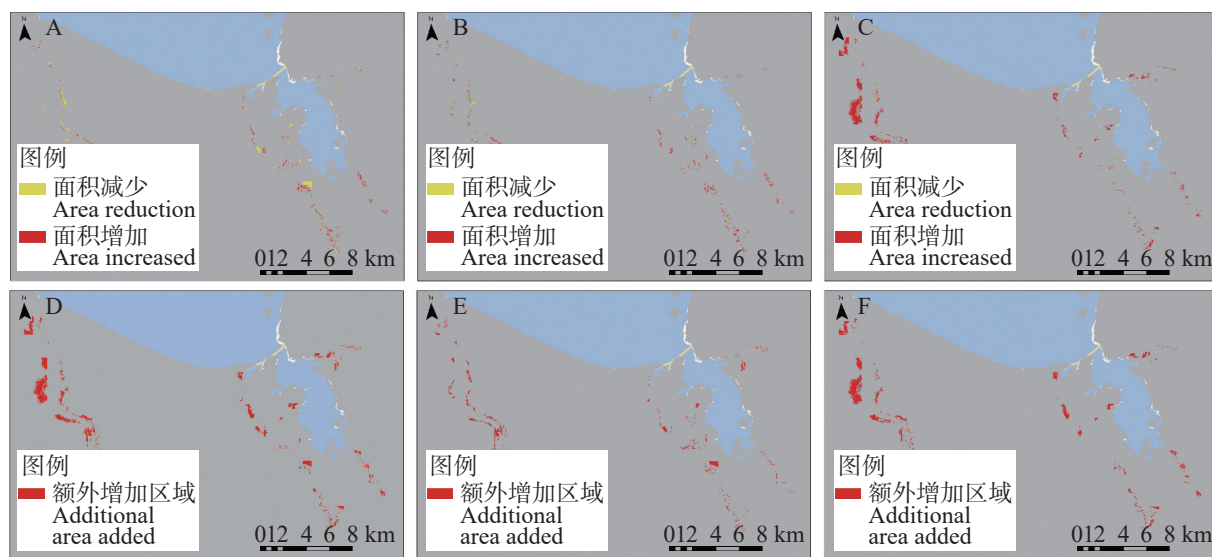
与 2050 年的红树林生态系统服务价值, 并评估其时空演变特征。多情景下红树林 ESV 计算结果如表 8 所示, 从总体趋势来看, 三种情景下红树林的 ESV 从 2030 年到 2050 年均保持增长, 但增幅存在显著差异。其中, 耕地—红树林双保护情景表

现最为突出, 到 2050 年 ESV 总值达到 268 036.85 万元, 显著高于红树林保护情景的 238 240.46 万元和自然发展情景的 221 285.45 万元。

三种情景中, 自然发展情景的 ESV 增长相对缓慢, 表明若无强力政策干预, 红树林生态服务功能的提升将受到限制。红树林保护情景相较于自然发展情景已有明显改善, 而耕地—红树林双保护情景则展现出最佳效果, 其 2050 年的各项服务价值均显著高于其他情景。

4 讨论

4.1 保护政策对红树林变化的影响 本研究模拟结果表明, 不同政策导向对红树林生态恢复的影响存在显著差异。在自然发展情景下, 2030 年后红树林面积与 ESV 增长明显乏力。晁碧霄等对广东红树林的预测亦指出, 在现状趋势情景下, 自然地类面积呈持续减少态势^[46]; 结合图 5 可见, 无政策干预时, 红树林后期向其他地类的转出规模上升, 进一步印证了缺乏系统性保护的恢复模式难以持续。相较之下, 红树林保护情景通过实施“退塘还林”、限制转出等措施, 有效促进了红树林面积和 ESV 的持续增长。国内学者对近四十年来红树林保护实践的总结亦表明, 主动修复政策



A~C 分别为 2030—2050 年自然发展情景、红树林保护情景、耕地-红树林双保护情景下的面积变化情况; D~F 分别为 2050 年耕地-红树林双保护情景与自然发展情景、红树林保护情景与自然发展情景、耕地-红树林双保护情景与红树林保护情景之间的面积对比情况。

A~C illustrate the increases and decreases in area under the natural development, mangrove conservation, and farmland-mangrove dual protection scenarios from 2030 to 2050, respectively; D~F show the area comparisons in 2050 between the farmland-mangrove dual protection scenario and the natural development scenario, between the mangrove conservation scenario and the natural development scenario, and between the farmland-mangrove dual protection scenario and the mangrove conservation scenario, respectively.

图 5 不同情景下红树林变化对比

Fig. 5 Comparative analysis of mangrove changes under different scenarios

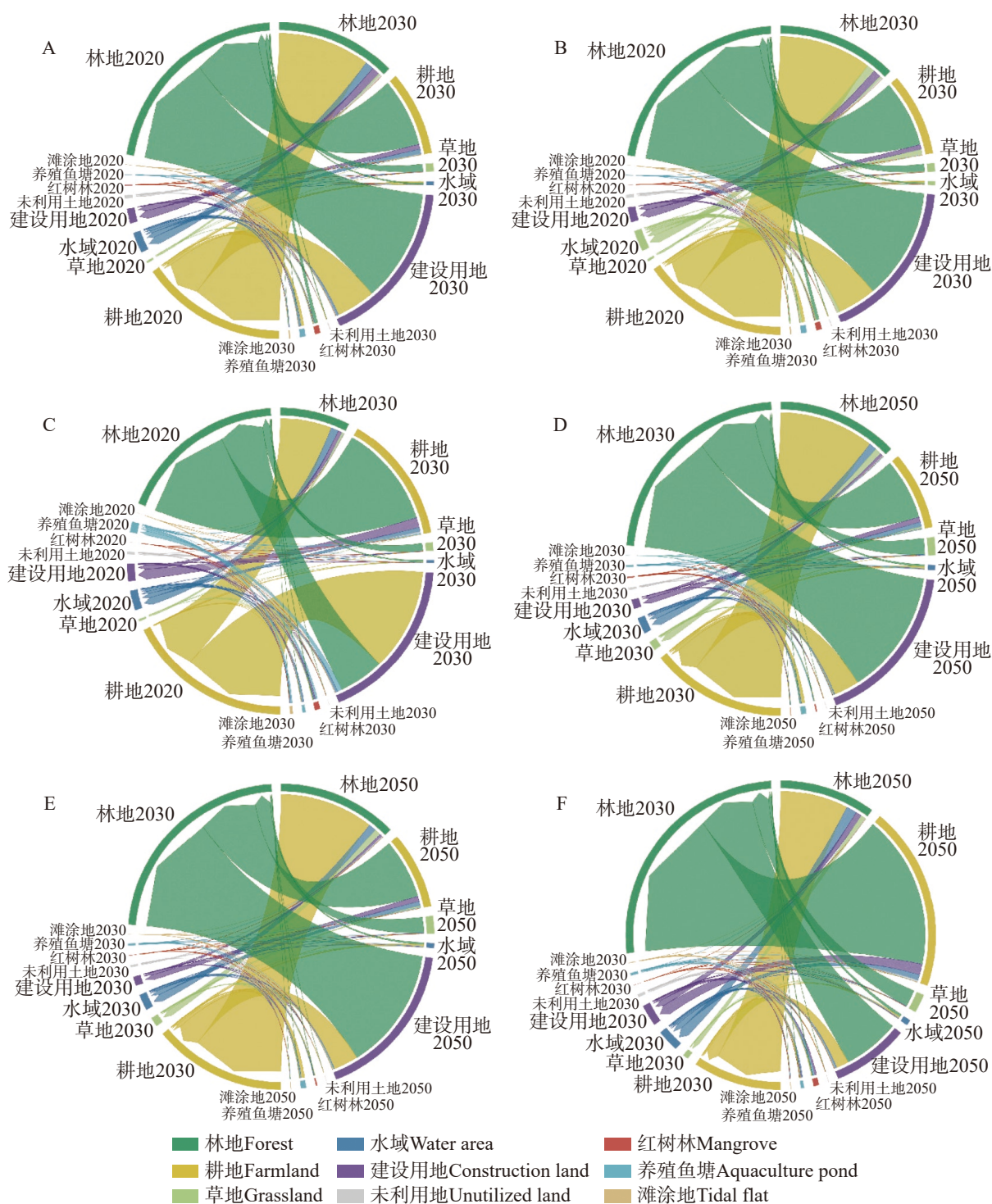


Fig. 6 Chord diagram of land use under multiple scenarios

A~F 分别为自然发展情景 2020—2030 年、红树林保护情景 2020—2030 年、耕地-红树林双保护情景 2020—2030 年、自然发展情景 2030—2050 年、红树林保护情景 2030—2050 年、耕地-红树林双保护情景 2030—2050 年。

A~C represent the natural development, mangrove conservation, and farmland-mangrove dual protection scenarios from 2020 to 2030, respectively; D~F represent the same three scenarios from 2030 to 2050, respectively

可显著提高红树林存量,并增强其固碳、水质净化等生态功能^[47]。其中,耕地红树林双保护情景的综合表现最为优越。在 2050 年实现了红树林面积与 ESV 的最大化增长,同时避免了耕地被过度占

用,实现了生态修复与粮食安全的协同。这一结果与国家关于“坚守耕地红线、统筹农业与生态空间”的政策导向高度契合。通过在模型中将稳定耕地划为限制转换区,不仅守住了粮食生产空间

底线,也释放了低生产力或高生态潜力地块用于生态修复,从而实现红树林净增与海岸线延展的双赢。

从地类转化结构看,自然发展与红树林保护情景下红树林的转入来源均以林地为主,其次为耕地和养殖鱼塘,整体趋势与 Shi 等研究结论一致^[17]。相比之下,耕地—红树林双保护情景中红树林的主要转入来源转向建设用地与养殖鱼塘,同时耕地与红树林面积均呈增加,表明在“控耕保耕”与“保红扩红”的叠加约束下,土地转换路径发生了

明显重构。图 5、6 进一步表明,双保护情景带来的红树林净增最高,关键在于对沿海高开发压力区的竞争性用地扩张施加更强限制,尤其显著抑制建设用地与养殖鱼塘的外延增长,从而释放更多可转入空间并降低红树林转出风险,表现为相对自然发展情景更大范围、更高集聚度的额外增加区。单一红树林保护虽同样促进红树林扩张,但对建设用地和养殖鱼塘等强竞争用地的约束相对有限,因此增量整体弱于双保护情景。

4.2 ESV 与空间分布格局变化 本研究评估期

表 8 多情景下红树林 ESV 变化

Tab. 8 Changes in ESV of mangroves under multiple scenarios

服务指标 Service indicator	2020年 Year 2020	2030年 Year 2030			2050年 Year 2050		
	单元价值 unit value/ (万元·km ⁻²)	自然发 展情景/ (万元) Natural development scenario	红树林 保护情景/ (万元) Mangrove conservation scenario	耕地红树林 双保护情景/ (万元) Farmland- mangrove dual protection scenario	自然发 展情景/ (万元) Natural development scenario	红树林 保护情景/ (万元) Mangrove conservation scenario	耕地红树林 双保护情景/ (万元) Farmland- mangrove dual protection scenario
食物供给 Food provision	375.38	33 709.12	34 245.92	34 275.95	33 776.69	36 524.47	41 502.01
原材料供给 Raw material provision	41.99	3 770.70	3 830.75	3 834.11	3 778.26	4 085.63	4 642.41
固碳释氧价值 Carbon sequestration and oxygen Release	117.26	10 529.95	10 697.63	10 707.01	10 551.05	11 409.40	12 964.27
空气净化 Air purification	63.05	5 661.89	5 752.05	5 757.10	5 673.24	6 134.77	6 970.81
水质净化 Water purification	316.52	28 423.50	28 876.12	28 901.44	28 480.47	30 797.40	34 994.45
消浪护岸 Wave attenuation and shoreline protection	84.68	26 911.30	27 106.07	27 258.49	26 504.84	27 614.15	28 706.52
保肥价值 Soil fertility maintenance	1 155.12	103 729.78	105 381.60	105 474.01	103 937.70	112 393.18	127 710.07
病虫害价值 Pest and disease control	0.06	5.39	5.47	5.48	5.40	5.84	6.63
栖息地价值 Habitat provision	22.93	2 059.11	2 091.90	2 093.74	2 063.24	2 231.09	2 535.14
休闲旅游 Habitat provision	40.25	3 614.45	3 672.01	3 675.23	3 621.70	3 916.33	4 450.04
科教宣传 Education and scientific research	32.15	2 887.07	2 933.04	2 935.62	2 892.86	3 128.20	3 554.50
总价值 Total value		221 302.26	224 592.56	224 918.18	221 285.45	238 240.46	268 036.85

内 ESV 总量增长 54.4%, 主要驱动力源于红树林面积的显著扩张^[7]。支持服务, 尤其是保肥价值, 始终占据 ESV 的主导地位, 这与韩维栋和何海军等的早期评估结论一致, 凸显了红树林在土壤养分维持方面的基础性生态功能^[6,24]。本研究期间, 水质净化价值在调节服务中的占比稳步提升。红树林本身具有过滤污染物、降解有机物等强大的水体净化功能^[48], 在具体的价值评估实践中, 水质净化、海产品供给及气候调节也是一项贡献突出的核心服务^[49]。

从空间格局看, 红树林 ESV 的增长核心区逐渐从海口、文昌等传统核心分布区, 向儋州、琼海、三亚及昌江、乐东等原先的薄弱区域转移, 这一空间演变特征与《海南省红树林资源保护专项规划(2024—2035 年)》中所提出的“两线三区多点”布局, 以及其中明确的儋州湾“两山”理论转化实验区、三亚古红树保护示范区等重点区域高度吻合。雷金睿等对海南岛 ESV 时空变化的研究亦指出, 生态系统的服务价值在空间上具有显著异质性, 且其高值区与保护修复工程的分布密切相关^[49]。因此, 生态修复工程可在一定程度上优化红树林 ESV 的空间分布格局, 促使 ESV 在更广泛的地理范围内实现均衡增长, 对于提升区域生态公平性、促进沿海地区生态系统的整体协调与可持续发展具有积极意义。

4.3 生态管理启示与政策建议 研究结果为海南省红树林保护与生态空间治理提供了多项启示。第一, 推广耕地—红树林协同机制, 在严格保护优质耕地的同时, 积极引导建设用地、养殖鱼塘等低生态效益用地向红树林转化, 通过构建生态补偿与土地置换机制, 在保障耕地红线不突破的同时, 释放低效养殖区和滩涂地的修复潜力, 实现生态效益与经济效益的最大化。第二, 生态修复工程的布局应更具战略性和针对性, 在巩固海口、文昌等传统核心区的同时, 重点支持儋州、琼海、三亚等新兴增长区, 并挖掘昌江、乐东等地的恢复潜力, 以优化全省红树林生态服务的整体空间格局。第三, 建议在未来的 GEP 核算中, 进一步细化并本地化红树林 ESV 的评估参数, 建立动态更新机制, 以更精准地量化红树林的生态贡献, 为生态补偿等政策提供科学支撑。第四, 加强社会参与生态产品价值实现。通过建立碳汇交易、生态补

偿与生态旅游联动机制, 推动红树林生态价值向经济价值转化, 助力海南蓝碳经济与生态文明建设。

5 结 论

本研究通过 PLUS 模型与生态系统服务价值评估方法, 系统分析了海南省红树林 2000—2020 年的时空演变特征, 并对 2030—2050 年多情景下的发展趋势进行了模拟预测。主要结论如下:

(1) 红树林面积与 ESV 显著增长: 2000—2020 年间, 海南省红树林面积增长 71.9%, ESV 增长 67.7%, 支持服务(尤其是保肥价值)是 ESV 的主要组成部分, 反映了红树林在土壤养分维持方面的核心功能。

(2) 空间格局呈现扩散趋势: 传统核心区(如海口、文昌)的 ESV 贡献率有所下降, 而儋州、琼海、三亚及昌江、乐东等地区增长显著, 表明红树林生态修复成效在空间上趋于均衡。

(3) 多情景模拟揭示政策效应: 自然发展情景下红树林增长后劲不足; 红树林保护情景可促进持续增长; 而耕地—红树林双保护情景在保障粮食安全的同时, 实现了红树林面积与 ESV 的最大化增长, 体现了生态与农业协同发展的可行性。

支撑材料: 附表 S1. <https://rdswxb.hainanu.edu.cn/article/doi/10.15886/j.cnki.rdsxb.20250187>

参考文献:

- [1] Zhu J J, Yan B. Blue carbon sink function and carbon neutrality potential of mangroves[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 822: 153438. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153438>
- [2] Zhang Y L, Pan L H, Liu Y, et al. Determining the payment for ecosystem services of mangrove forests: the approach combining ecosystem services and social-economic level and application in Shankou National Nature Reserve, Guangxi, China[J]. *Global Ecology and Conservation*, 2024, 54: e03146. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2024.e03146>
- [3] 李庆芳, 章家恩, 刘金苓, 等. 红树林生态系统服务功能研究综述[J]. *生态科学*, 2006, 25(5): 472–475. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1008-8873.2006.05.021>
- [4] Lee S L, Then A Y H, Goh H C, et al. Strengthened multi-stakeholder linkages in valuation studies is critical for improved decision making outcomes for valuable mangroves – the Malaysian case study[J]. *Frontiers in Marine Science*, 2022, 9: 1033200. <https://doi.org/10.3389/fmars.2022.1033200>
- [5] 唐道斌, 辛存林, 陈宁, 等. 2000—2018 年湛江通明海红树林破碎化及生态服务价值[J]. *应用生态学报*, 2023, 34(2): 415–422. <https://doi.org/10.13287/j.1001-9332.2023>

02.022

- [6] 何海军, 温家声, 张锦炜, 等. 海南红树林湿地生态系统服务价值评估[J]. 生态经济, 2015, 31(4): 145–149.
- [7] Wang K D, Jia M M, Zhang X H, et al. Evaluating ecosystem service value changes in mangrove forests in Guangxi, China, from 2016 to 2020[J]. *Remote Sensing*, 2024, 16(3): 494. <https://doi.org/10.3390/rs16030494>
- [8] Estoque R C, Myint S W, Wang C Y, et al. Assessing environmental impacts and change in Myanmar's mangrove ecosystem service value due to deforestation (2000–2014)[J]. *Global Change Biology*, 2018, 24(11): 5391–5410. <https://doi.org/10.1111/gcb.14409>
- [9] Ashournejad Q, Amiraslani F, Kiavarz Moghadam M, et al. Assessing the changes of mangrove ecosystem services value in the Pars Special Economic Energy Zone[J]. *Ocean & Coastal Management*, 2019, 179: 104838. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2019.104838>
- [10] Rong T Q, Qin M Z, Zhang P Y, et al. Spatiotemporal evolution of land use carbon emissions and multi scenario simulation in the future—based on carbon emission fair model and PLUS model[J]. *Environmental Technology & Innovation*, 2025, 38: 104087. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2025.104087>
- [11] 梁毅东, 张述清, 朱大明, 等. 主体功能视角下耦合马尔可夫链和 PLUS 模型的城镇开发边界划定研究[J]. 地球信息科学学报, 2024, 26(7): 1702–1716. <https://doi.org/10.12082/dqxxkx.2024.240064>
- [12] 胡忠文, 徐月, 尹玉蒙, 等. 18°N 以北中国滨海滩涂湿地分布数据集 (1989—2020)[J]. 全球变化数据学报, 2022, 6(1): 125–132. <https://doi.org/10.3974/geodp.2022.01.17>
- [13] 张丽, 唐永强, 林婧, 等. 基于 Landsat 数据的海南岛养殖塘变化数据集 (1987–2020)[J]. 中国科学数据, 2022, 7(4): 1–10. <https://doi.org/10.11922/sciencedb.j00001.00400>
- [14] Yang G, Sun W W, Huang K, et al. China's mainland shorelines over 30 years using Landsat time series data (1990–2019)[DS/OL]. Science Data Bank, 2024. (2024-04-12)[2025-11-13]. <https://www.scidb.cn/en/detail?dataSetId=c333b768c39a41628fc4bd6e7d869752#p2>
- [15] 仲晓雅, 闫庆武, 李桂娥. 中国长时间序列夜间灯光数据集的研发 (2000–2020)[J]. 全球变化数据学报, 2022, 6(3): 416–424. <https://doi.org/10.3974/geodp.2022.03.12>
- [16] Davis S J, Qian M J, Zeng W. A comprehensive GIS database for China's surface transport network with implications for transport and socioeconomics research [EB/OL]. (2025-02-15)[2025-11-13]. <https://www.nber.org/papers/w33515>
- [17] 王益明, 张增信, 陈喜. 基于 PLUS-InVEST-GeoDetector 模型的鄱阳湖生态经济区碳储量时空变化及驱动因素分析[J]. 环境科学, 2026, 47(7): 4623–4634. <https://doi.org/10.13227/j.hjkk.202503107>
- [18] Shi X, Wu L, Zheng Y Q, et al. Dynamic estimation of mangrove carbon storage in Hainan Island based on the InVEST-PLUS model[J]. *Forests*, 2024, 15(5): 750. <https://doi.org/10.3390/f15050750>
- [19] 张阔, 郭荣中, 吴洁. 基于 PLUS-InVEST 模型的长株潭城市群碳储量时空演变及情景模拟[J]. 中国水土保持科学, 2026, 24(1): 252–269. <https://doi.org/10.1684/3/j.sswc.2025096>
- [20] 猛克. 中国温带草原生态系统服务价值评估综述[J]. 中国草地学报, 2025, 47(11): 126–137. <https://doi.org/10.16742/j.zgcdxb.20250237>
- [21] 臧国荣. 海洋工程生态损害评估方法及应用研究[D]. 大连: 大连海洋大学, 2024. <https://doi.org/10.27821/d.cnki.gdlhy.2024.000013>
- [22] 沙宇聪, 田付玮, 戴江玉, 等. 河湖水生态产品价值核算与实现机制研究进展[J]. 南水北调与水利科技 (中英文), 2025, 23(4): 858–872. <https://doi.org/10.13476/j.cnki.nsbdk.2025.0087>
- [23] 吴秋城, 方柏州, 林伟山, 等. 漳江口红树林国家级自然保护区海产品产量产值研究[J]. 湿地科学与管理, 2012, 8(1): 34–38. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-3290.2012.01.10>
- [24] 韩维栋, 高秀梅, 卢昌义, 等. 中国红树林生态系统生态价值评估[J]. 生态科学, 2000, 19(1): 40–46. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1008-8873.2000.01.007>
- [25] 隋磊, 赵智杰, 金羽, 等. 海南岛自然生态系统服务价值动态评估[J]. 资源科学, 2012, 34(3): 572–580.
- [26] 李国伟, 赵伟, 魏亚伟, 等. 天然林资源保护工程对长白山林区森林生态系统服务功能的影响[J]. 生态学报, 2015, 35(4): 984–992. <https://doi.org/10.5846/stxb.201304240799>
- [27] 辛琨, 赵广儒, 孙娟, 等. 红树林土壤吸附重金属生态功能价值估算: 以海南省东寨港红树林为例[J]. 生态学杂志, 2005, 24(2): 206–208. <https://doi.org/10.13292/j.1000-4890.2005.0237>
- [28] 林鹏. 福建九龙江口秋茄红树林的生物量和六元素的累积与循环 (英文)[J]. 武汉植物学研究, 1989, 7(3): 251–257.
- [29] 林鹏, 吴新华. 海莲红树林氮磷的累积和循环[J]. 厦门大学学报 (自然科学版), 1990, 29(4): 463–467.
- [30] 尹毅, 林鹏. 红海榄红树林的氮、磷积累和生物循环[J]. 生态学报, 1993, 13(3): 221–227.
- [31] Tong Y F, Li J M, Chen W Y, et al. Long-term (1979–2024) variation trend in wave power in the south China sea[J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2025, 13(3): 524. <https://doi.org/10.3390/jmse13030524>
- [32] 周旋, 李自强, 安玉柱, 等. 基于高频地波雷达资料的海南中东部近海表层海流特征[J]. 热带海洋学报, 2021, 40(2): 103–111. <https://doi.org/10.11978/2020044>
- [33] 高抒, 周亮, 李高聪, 等. 海南岛全新世海岸演化过程与沉积记录[J]. 第四纪研究, 2016, 36(1): 1–17. <https://doi.org/10.11928/j.issn.1001-7410.2016.01.01>
- [34] 李近元, 方念乔, 张吉, 等. 海南岛西南海域的潮流和潮汐观测特征[J]. 海洋预报, 2016, 33(2): 45–52. <https://doi.org/10.11737/j.issn.1003-0239.2016.02.007>
- [35] 任叙合, 尤启明, 郭静, 等. 海南岛东北海域海流和余流特征分析[J]. 广西科学, 2018, 25(4): 418–422. <https://doi.org/10.13656/j.cnki.gxkx.20180919.002>
- [36] 李淑江, 李泽文, 范斌, 等. 海南岛东南近岸海浪观测及统计特征[J]. 海洋科学进展, 2016, 34(1): 1–9. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1671-6647.2016.01.001>
- [37] 陈宜展, 曹永港, 刘长建, 等. 海南岛三亚红塘湾海域波浪特征[J]. 广东海洋大学学报, 2024, 44(5): 50–56. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-9159.2024.05.006>
- [38] 冯兴如, 李近元, 尹宝树, 等. 海南岛东南近岸海域海浪观测特征研究[J]. 热带海洋学报, 2018, 37(3): 1–8. <https://doi.org/10.11978/2017102>

- [39] 全长亮, 朱钰, 吴祥柏, 等. 基于数值模拟的琼州海峡东口推移质输运量估算[J]. *地学前缘*, 2023, 30(5): 553–566. <https://doi.org/10.13745/j.esf.sf.2023.2.73>
- [40] 毛龙江, 张永战, 许叶华, 等. 海南岛东部铜鼓岭岸段港湾岸滩沉积特征[J]. *地理科学*, 2008, 28(5): 677–682. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-0690.2008.05.015>
- [41] 易小青, 高常军, 魏龙, 等. 湛江红树林国家级自然保护区湿地生态系统服务价值评估[J]. *生态科学*, 2018, 37(2): 61–67. <https://doi.org/10.14108/j.cnki.1008-8873.2018.02.008>
- [42] 韩增林, 胡伟, 钟敬秋, 等. 基于能值分析的中国海洋生态经济可持续发展评价[J]. *生态学报*, 2017, 37(8): 2563–2574. <https://doi.org/10.5846/stxb201512172517>
- [43] 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/10.3321/j.issn:1000-3037.2003.02.010>
- [44] 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. <https://doi.org/10.1038/387253a0>
- [45] 辛琨, 肖笃宁. 盘锦地区湿地生态系统服务功能价值估算[J]. *生态学报*, 2002, 22(8): 1345–1349. <https://doi.org/10.3321/j.issn:1000-0933.2002.08.025>
- [46] 晁碧霄, 王玉玉, 俞炜炜, 等. 广东省土地利用驱动下红树林潜在生境预测[J]. *中国环境科学*, 2021, 41(11): 5282–5291. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-6923.2021.11.037>
- [47] 黄凡非, 唐丽丽, 李瑞利. 近四十年来中国大陆红树林保护与恢复措施的生态效益分析[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2023, 59(5): 813–822. <https://doi.org/10.13209/j.0479-8023.2023.046>
- [48] 朱颖, 吴纯德. 红树林对水体净化作用研究进展[J]. *生态科学*, 2008, 27(1): 55–60. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1008-8873.2008.01.011>
- [49] 雷金睿, 陈宗铸, 陈小花, 等. 1980—2018 年海南岛土地利用与生态系统服务价值时空变化[J]. *生态学报*, 2020, 40(14): 4760–4773. <https://doi.org/10.5846/stxb201907261580>

Simulation and projection of the ecosystem service value of mangrove forests in Hainan Province under multi-policy scenarios

Gan Xiaolin[#], Liu Minggui, Ge Chengjun^{*}

(School of Environmental Science and Engineering, Hainan University/Key Laboratory of Agro-Forestry Environmental Processes and Ecological Regulation of Hainan Province/ Haikou Key Laboratory of Environmental Toxicology, Haikou, Hainan 570228, China)

Abstract: Mangroves play a vital role in coastal ecological security and blue carbon ecosystems. Quantifying and predicting their ecosystem service value (ESV) provides a scientific basis for ecological conservation and spatial planning. Based on land use and mangrove distribution data from 2000 to 2020, the PLUS model was employed to simulate spatial pattern changes under three scenarios (natural development, mangrove conservation, and dual protection of farmland and mangroves) for the period from 2030 to 2050. An ESV evaluation system encompassing 11 services across four major categories was constructed to analyze value composition and spatial variability. The results indicate that from 2000 to 2020 the mangrove area in Hainan expanded from 44.11 to 75.84 square kilometers, and the total ecosystem service value increased from 1.137 billion to 1.907 billion yuan. Support services (centered on fertility maintenance) accounted for 43.5%–45.9% of the total value. Multi-scenario simulations suggest that under the dual protection scenario, the mangrove area and its associated ESV could reach a total value of 2.68 billion yuan by 2050, highlighting its synergistic conservation potential. This study highlights the critical role of policy intervention and proposes strategies such as the “farmland-mangrove cooperative protection” model, offering a valuable reference for mangrove conservation, restoration, and the implementation of the blue carbon strategy in Hainan.

Keywords: Ecosystem service value of mangroves; PLUS model; multi-scenario simulation; land use change; spatiotemporal evolution

(责任编辑: 张 瑁)