

文章编号: 1674-7054(2023)03-0298-09



# 基于 InVEST 与 MaxEnt 模型的海南岛红树林生态系统碳储量增量预估

史 娴<sup>1,2</sup>, 聂堂哲<sup>2</sup>, 熊 千<sup>1</sup>, 刘兆鑫<sup>3</sup>, 张嘉怡<sup>3</sup>,  
刘文杰<sup>1,4</sup>, 乌 兰<sup>1</sup>, 崔 崑<sup>5</sup>, 孙仲益<sup>1,4</sup>

(1. 海南大学 生态与环境学院, 海口 570203; 2. 黑龙江大学 水利电力学院, 哈尔滨 150006;

3. 海南斯兰低碳投资有限公司, 海口 570000; 4. 海南省农林环境过程与生态调控重点实验室, 海口 570228;

5. 国家林业和草原局发展研究中心, 北京 100714)

**摘 要:** 为了解决在海南岛哪种红树、如何种红树能增汇的问题, 基于生物气候、水文、地质及土地利用等数据, 在最大熵(MaxEnt)模型评估所得的海南岛红树林生长适宜区基础上, 预测红树林潜在扩种区域范围; 结合潜在扩种范围和不同区域红树林生态系统碳密度调查数据, 利用 InVEST 模型对海南岛红树林生态系统碳储量增量进行预估。结果表明: 1) MaxEnt 模型与 InVEST 模型结合能够良好地预估红树林碳储量, 其中红树林潜在分布区的预测达到高信度(AUC>0.96); 2) 海南岛红树林生态系统现状碳储量约为 1.24 Tg, 其中土壤碳约 0.84 Tg, 总碳密度为 217.01 t·hm<sup>-2</sup>, 土壤碳密度为 147.43 t·hm<sup>-2</sup>。以历史上海南岛最大的红树林分布面积 12 506 hm<sup>2</sup> 作为潜在扩种范围控制线, 理论上海南岛红树林生态系统在扩种上限情景下能够为碳中和目标的实现贡献碳储量增量约 1.25 Tg, 而在扩种下限情景即仅保证完成《红树林保护修复专项行动计划(2020—2025)》扩种 2 000 hm<sup>2</sup> 红树林的基本任务情景下, 可实现约 0.38 Tg 碳储量增量。

**关键词:** MaxEnt 模型; InVEST 模型; 碳储量增量; 潜在分布; 红树林生态系统; 海南岛

**中图分类号:** S 718.55 **文献标志码:** A

**引用格式:** 史娴, 聂堂哲, 熊千, 等. 基于 InVEST 与 MaxEnt 模型的海南岛红树林生态系统碳储量增量预估[J]. 热带生物学报, 2023, 14(3): 298-306. DOI: 10.15886/j.cnki.rds wxb.2023.03.007

红树林是连接陆地和海洋系统的重要滨海生态系统, 其对碳的吸收速度是陆地森林的 4 倍<sup>[1]</sup>, 在碳循环过程中起着非常关键的作用, 有助于维护生态系统的多样性。近些年, 我国红树林保护和修复取得了实质性进展, 是全球罕见的红树林区域面积变大的国家; 但由于区域全体一致性不够, 监管能力有限, 依然存在着红树林生境退化、生物多样性降低等问题<sup>[2]</sup>。为把红树林保护好, 我国开展了如《红树林保护修复专项行动计划(2020—2025 年)》(以下简称《行动计划》)等红树

林保护、修复及扩种任务。但在哪种红树, 如何种红树, 怎样能增汇等一系列的科学问题尚未有明确答案, 这些仍是科学界关注的热点问题。现阶段, 针对于红树林碳储量的研究相对丰富, 但主要集中在利用样方调查法对特定林分或样方的某一组分(生物量碳或土壤碳)进行测量, 围绕较小区域尺度可以准确地揭示生态系统碳储量的分布<sup>[3]</sup>; 随着空间信息技术发展, 涌现出一系列<sup>[4-5]</sup>利用 UAV 或者卫星遥感技术获取红树林生态系统分布范围、冠层高度等参数进而求算碳储量的研究成果,

收稿日期: 2022-10-25

修回日期: 2023-03-05

基金项目: 海南省重点研发计划项目(ZDYF2022SHFZ111); 海南省自然科学基金高层次人才项目(322RC580)

第一作者: 史娴(1999-), 女, 海南大学生态与环境学院-黑龙江大学水利电力学院 2021 级硕士研究生. E-mail: 2211979@s.hjju.edu.cn

通信作者: 孙仲益(1989-), 男, 博士, 副教授. 研究方向: 碳循环与陆地生态系统建模. E-mail: gis.rs@hainanu.edu.cn

此类研究能够对大尺度甚至全球红树林生态系统碳储量进行估算;此外也有不少研究利用调查数据结合碳过程模型来估算红树林生态系统碳储量<sup>[6]</sup>,这类研究能够从机理过程上动态估算红树林生态系统碳过程与碳储量,但基于经验平均值和转换系数粗略估计存在较大的差异和不可靠性。物种多样性、树木密度、林龄和干扰水平都会极大地影响红树林碳储量成分的分布模式<sup>[7]</sup>,这些高度的空间异质性进一步阻碍了对红树林碳储量的估算,并混淆了空间尺度上碳储量组成之间的关系<sup>[8]</sup>。相对于红树林生态系统碳储量估算的丰富研究手段与科学发现,针对红树林碳储量增量预估的相关研究较少。

生态位模型(ENM)是利用现有生物分布数据和环境因子来预测待研究生物潜在分布的工具<sup>[9]</sup>,运用该模型对现有、过去、未来气候下物种分布进行预测,能够为深刻了解物种演化及未来迁徙提供依据<sup>[10]</sup>。近年来,研究者们研发了多种生态位模型<sup>[11]</sup>,如 DOMAIN、GARP、BIOCLIM、MaxEnt 等,每类模型都有自己的理论依据、分析方法和数据需求。其中,MaxEnt 模型当前运用最广的生态位模型<sup>[12]</sup>,MaxEnt 模型根据现有分布数据预测物种的适宜分布区域,模型准确性要优于其他模型<sup>[13]</sup>,本研究选择 MaxEnt 模型对红树林潜在分布进行预测,因其较好的理论和已有研究的数据支撑,有较高的准确性。

得益于空间信息技术的发展,卫星遥感手段提供了大尺度宏观反演红树林生态系统碳储量的机会<sup>[14]</sup>;通过遥感测量红树林冠层高度,利用异速生长方程推算生物量(AGB)<sup>[5]</sup>,进而获得区域红树林碳储量。但红树生长于低纬度地区,云覆盖率高,数据质量难以保证;此外,现地观测与遥感数据之间的空间观测尺度不匹配也增加了不确定性;特别地,由于遥感技术的特点,地下部分的生物量和土壤碳储量也难以获取<sup>[7]</sup>。成本较低、不间断的遥感生态系统服务评估模型<sup>[15]</sup>,可呈现生态系统服务功能的变化评估和预估结果的可视化<sup>[16]</sup>。大众接受较广的生态系统服务评估模型包括 ARIES、InVEST 模型等<sup>[17]</sup>,其中 InVEST 模型具有数据获取方便、量化估计性能高、预估流程和结果可视化清晰、模拟功能较强的特点<sup>[16]</sup>,已广泛应用

于生态系统碳储量估算及生态系统服务价值评估<sup>[18]</sup>,本研究选择 InVEST 模型对红树林碳储量进行估算,有较高的应用价值。

我国共有 27 种真红树,海南岛发现其中 26 种<sup>[19]</sup>,作为我国红树林植物多样性和碳储存能力最高的地区,近年来对海南岛红树林生态系统碳储量和碳密度的研究逐渐增多<sup>[7]</sup>,但罕有研究针对红树林碳储量增量进行预测。本研究以海南岛现有红树林分布数据和环境数据为基础,以海南岛历史最大红树林生存面积 12 506 hm<sup>2</sup> 为潜在最大分布范围,以《行动计划》要求的海南省扩种 2 000 hm<sup>2</sup> 红树林作为最低扩种面积,拟通过 MaxEnt 模型完成红树林潜在分布范围预测,解决在哪儿种红树及如何种红树的问题;在此基础上,利用 InVEST 模型对海南岛红树林碳储量现状及其不同扩种情景的碳储量增量进行分区预估,解决怎样能增汇的问题;最后以红树林增汇为前提,通过空间分析方法比较了理论与实践两种扩种方式,充实红树林碳储量研究丰度,旨在为决策者制定修复与扩种计划提供理论支持和实践指导。

## 1 材料与方法

**1.1 研究区概况** 海南岛(19°20' ~ 20°10' N, 108°21' ~ 111°03'E)面积 35 000 km<sup>2</sup>,海岸线 1 823 km,地势中部山区高,四周低,属热带海洋性气候,年平均温度 24 °C,年平均降雨量充沛,常受热带风暴与台风侵扰<sup>[20]</sup>。海南岛现有红树林面积为 5 699 hm<sup>2</sup>,主要分布在东寨港国家级自然保护区、清澜港省级自然保护区以及临高、澄迈和儋州等地,三亚、陵水和东方的红树林分布面积较小<sup>[21]</sup>。

### 1.2 数据来源

**1.2.1 MaxEnt 模型驱动数据** 利用 2021 年 10 月 11 日及 2022 年 06 月 22 日拍摄的“吉林一号”高分系列卫星影像(分辨率为 0.5 m),通过目测解析绘制海南岛红树林的分布区,结合实地调查和文献资料进行对比,最后得到海南岛现有红树林区域内 1 820 个分布点。

本研究从气候、地形、盐度、降水等因子选了 36 个环境因子,距岸线距离、坡度、坡向、凹凸指数、地形综合指数等因子是决定红树林分布的重

要因素<sup>[22]</sup>,通过 SRTM 30 m 数字高程模型与电子海图计算得到。气候变量数据来源于 WorldClim 网站(<http://www.worldclim.org/>),包括 19 个气候因子,且图层均采用 30"(约 1 km)的空间分辨率。生态建模的海洋数据来源于 bio-oracle 网站(<https://www.bio-oracle.org/>),本研究选取了包括盐度、年平均海表温度、年海表温度变化范围、年均的盐度、年均海流速度、年最大海流速度、溶解氧浓度、pH、海表光合有效辐射、叶绿素浓度、浮游植物浓度、初级生产力、硝酸盐/磷酸盐浓度数据,预测红树林适生区<sup>[23]</sup>,将上述环境因子都裁至海南岛海岸沿线 10 km 范围。

**1.2.2 InVEST 模型驱动数据** 2020 年土地利用数据来源于中国科学院资源环境数据中心(<https://www.resdc.cn/>),包括 6 种地类,分辨率为 30 m × 30 m。

碳密度数据库根据已公开发表数据构建,在 web of science 数据库及中国知网(CNKI)分别以“碳储量”和“碳密度”作为关键词检索,仅选择实地调查所获得数据。利用地上、地下碳储量间的定量统计关系<sup>[7]</sup>计算得到海南岛东南西北 4 区域的地上、地下和土壤碳密度,如表 1 所示。

表 1 海南岛碳密度表

Name	C_above	C_below	C_soil	C_dead	t·hm <sup>-2</sup>
mangorve-n	44.4	19.98	131.232	0	
mangorve-e	41.4	18.63	127.842	0	
mangorve-w	44.8	20.16	131.684	0	
mangorve-s	27.8	12.51	112.474	0	

注: mangrove-n, mangrove-e, mangrove-w, mangrove-s 分别为海南岛北、东、西、南部红树林分块。

### 1.3 研究方法

**1.3.1 MaxEnt 模型** MaxEnt 模型是最大熵原理驱动的生态位模型<sup>[24]</sup>,此模型结合现有分布数据,通过分析生物现有分布点在不同类型环境因子的约束下,得到该约束下最大熵的分布,进一步获取空间生长划分和适宜度<sup>[25]</sup>,可用来测评模型的模拟精确程度和不同环境因子的贡献率,广泛用于很多物种的生境测评、适宜度和潜在程度下的分布预测等研究<sup>[26]</sup>。本研究利用 MaxEnt 模型预测

海南岛红树林的分布区,较于理论模型和回归方程模型,该模型输入的数据更准确,可信程度较高<sup>[27]</sup>。

**1.3.2 InVEST 模型** InVEST 模型用于拟化多种土地利用情景下生态系统服务功能的变化,旨在为决策者提供数据支撑。InVEST 模型中的碳模块分为 4 个基本碳库,碳库类型丰富度越大,模型运算精度越大,死亡有机碳密度数据获取相对困难。同时,成熟的红树林生态系统中掉落物沉积与微生物分解消耗的碳处于动态平衡<sup>[28]</sup>,本研究中不特殊考虑死亡有机质碳。

**1.4 研究思路及技术路线** 本研究的研究思路如图 1 所示,主要有如下 3 个步骤。1)为获得相对准确的红树林潜在分布区,本研究利用 MaxEnt 模型结合现有红树林分布数据和环境数据完成 10 次重复预测,选取 AUC 值最大的一组作为最终预测结果;2)以适生系数作为判断依据,适生系数越接近 1 越适合红树生长,确定扩种 2 000 ~ 7 000 hm<sup>2</sup> 红树林最佳的位置与范围;3)运用 InVEST 模型所需的数据,每次运行模型分别输入现有红树林土地利用数据、碳库数据和未来扩种 2 000 ~ 7 000 hm<sup>2</sup> 红树林土地利用数据,得到现有红树林、扩种 2 000 ~ 7 000 hm<sup>2</sup> 红树林的总碳储量;将新碳库数据中地上、地下碳密度数据置零后得到土壤碳密度数据表再重复以上操作,分别得到不同扩种情景红树林的土壤碳储量,进而做差求出不同扩种情景的碳储量增量;4)通过空间分析方法对理论与实践 2 种扩种方式进行对比,对 2 种扩种方式的碳储量结果进行差异性分析,进而得出两者的优缺点对比。

## 2 结果与分析

### 2.1 海南岛红树林适生区评估

**2.1.1 预测模型精度** 利用 MaxEnt 模型预测红树林适生区分布效果良好,如图 2 所示,预测结果 AUC 均值为 0.964(标准差 ±0.005),测试数据 AUC 均值可达 0.949(标准差 ±0.005);同时,用于模型预测模拟的 1 820 处红树林分布点全部位于高适生区范围内,模拟结果与现有红树林分布数据具有较好的一致性,可信度较高,能够很好的用于红树林的适生区预测。

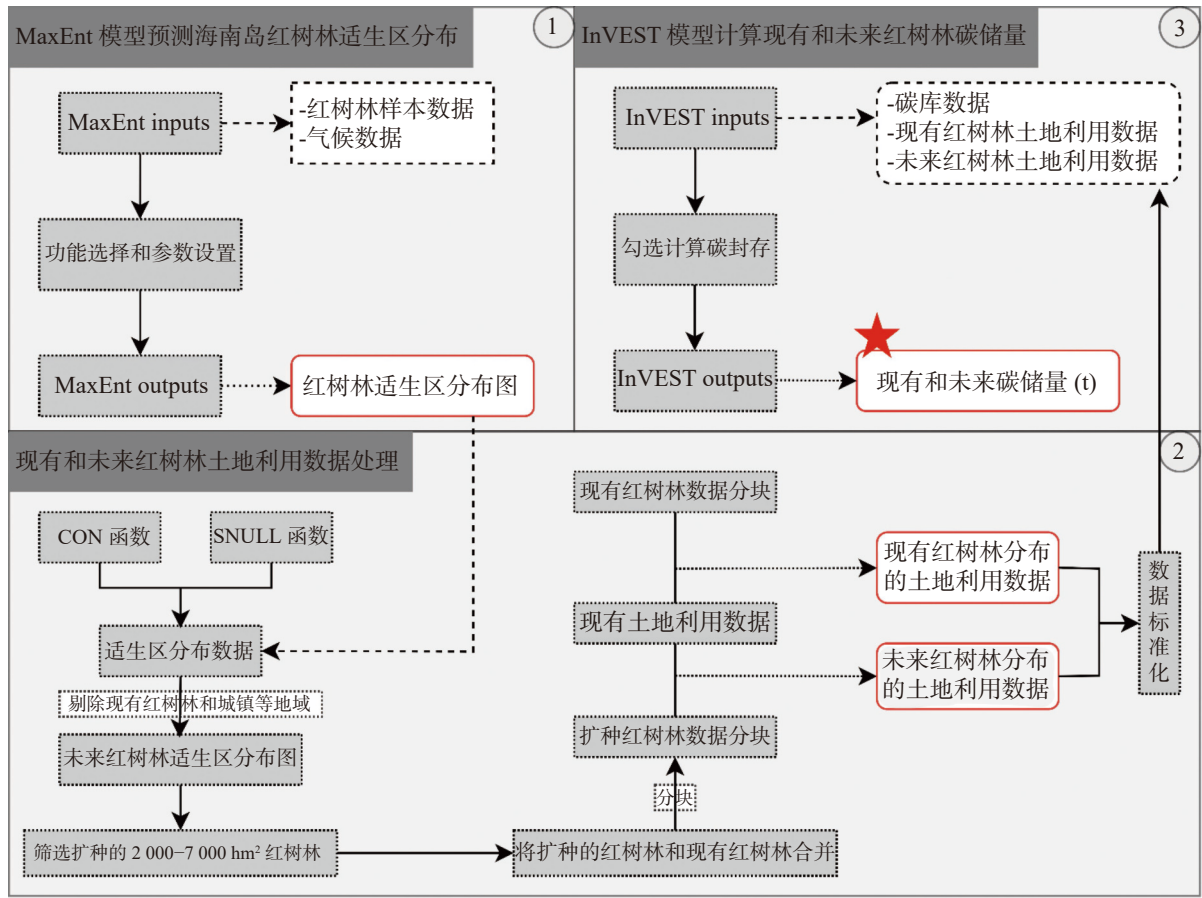


图 1 海南红树林适生分布模型图

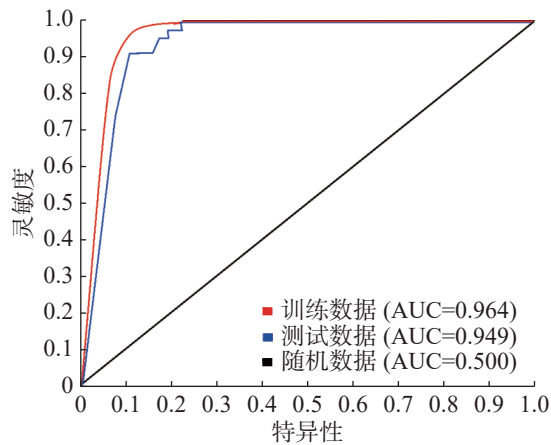


图 2 MaxEnt 模型预测精度曲线

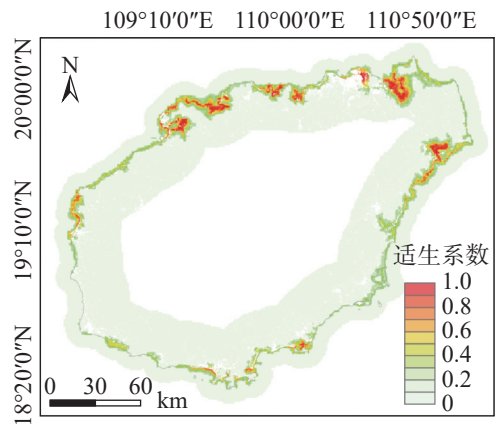


图 3 海南岛红树林适生区分布图

**2.1.2 海南岛红树林适生区划分** 利用 ArcGIS 空间分析模块对适生区进行适生系数的重分类, 去除建成区等无法种植红树林的区域得到如图 3 所示的适生区分布图。图 3 中适生系数越接近 1, 表明该区域越适合红树生长, 海南岛东北沿岸红树林生态系统适生区面积远高于西南沿岸, 主要集中在海口、文昌和儋州等地, 与红树林

生态系统分布现状一致。

**2.1.3 海南岛红树林扩种范围** 图 4 为海南岛红树林扩种 2 000 ~ 7 000 hm<sup>2</sup> 的具体位置与范围, 主要集中在海南岛的东部与北部(图 4-b ~ 图 4-f); 西部与南部虽有高适生系数分布区, 但其与现有红树分布区重叠, 因此, 几乎无红树适宜扩种区域(图 4-g ~ k)。

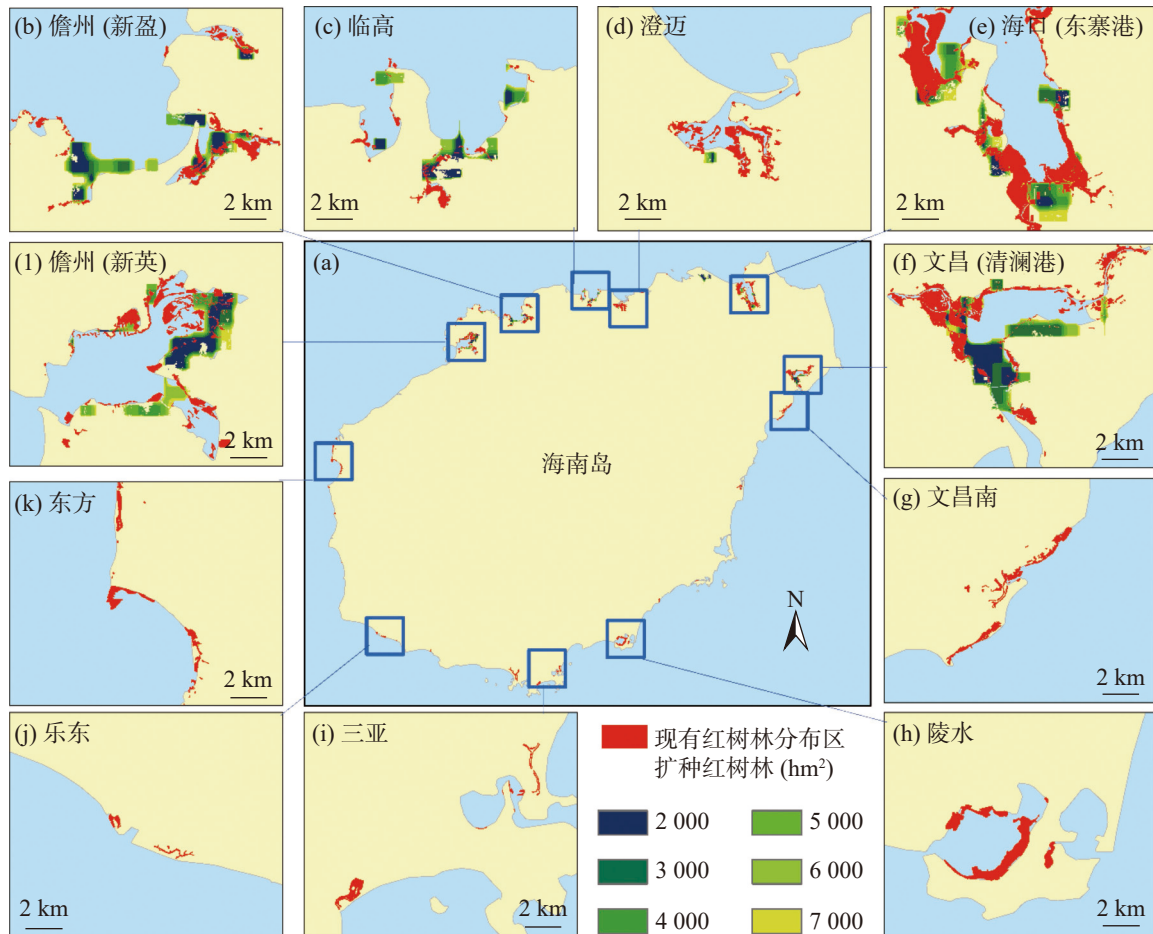


图4 海南岛红树林扩种范围图

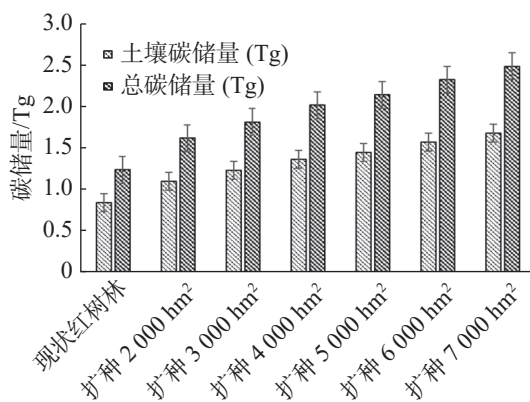


图5 海南岛现有和扩种红树林碳储量预估

**2.2 海南岛红树林碳储量增量预估** 利用 InVEST 模型结合图 4 中现有及扩种红树林分布数据, 结合碳密度数据完成碳储量预估, 如图 5 所示。海南岛红树林生态系统现有碳储量约为 1.24 Tg, 其中土壤碳约 0.84 Tg; 《行动计划》任务中扩种 2 000 hm<sup>2</sup> 红树林可实现约 0.38 Tg 碳储量增量, 主要分布在海口、文昌、儋州等地; 恢复至海南

岛历史最大的红树林分布面积, 碳储量可达 2.49 Tg, 增量约为 1.25 Tg, 主要分布在东北沿岸, 南部地区稍有增加。平均每扩种 1 000 hm<sup>2</sup> 红树将增加总碳储量 0.17 Tg, 其中, 土壤碳储量约增加 0.12 Tg; 由扩种 3 000 hm<sup>2</sup> 扩种至 4 000 hm<sup>2</sup> 时碳储量增量最大, 可达 0.14 Tg; 而从扩种 4 000 ~ 5 000 hm<sup>2</sup> 时的增量最小, 仅为 0.08 Tg; 土壤碳储量占总碳储量的比例随扩种面积增加而减少。

**2.3 理论与实践扩种对比** 本研究以 50 m × 50 m 格网进行红树扩种适宜区的分析, 并且扩种区以现有红树林为中心环状方式种植, 在实际生产实践过程将消耗更多的劳力和资源并不现实, 因此本研究针对生产实践采用 1 km 分辨率(即每个格网代表 100 hm<sup>2</sup>, 以块状方式扩种)进行碳储量增量预估。在同样的扩种面积下, 理论与实践间红树适宜扩种区有所差异(图 6), 且二者所产生的碳储量增量也有所不同(图 7), 扩种 3 000 hm<sup>2</sup> 情境下二者差异最高, 可达 0.13 Tg。

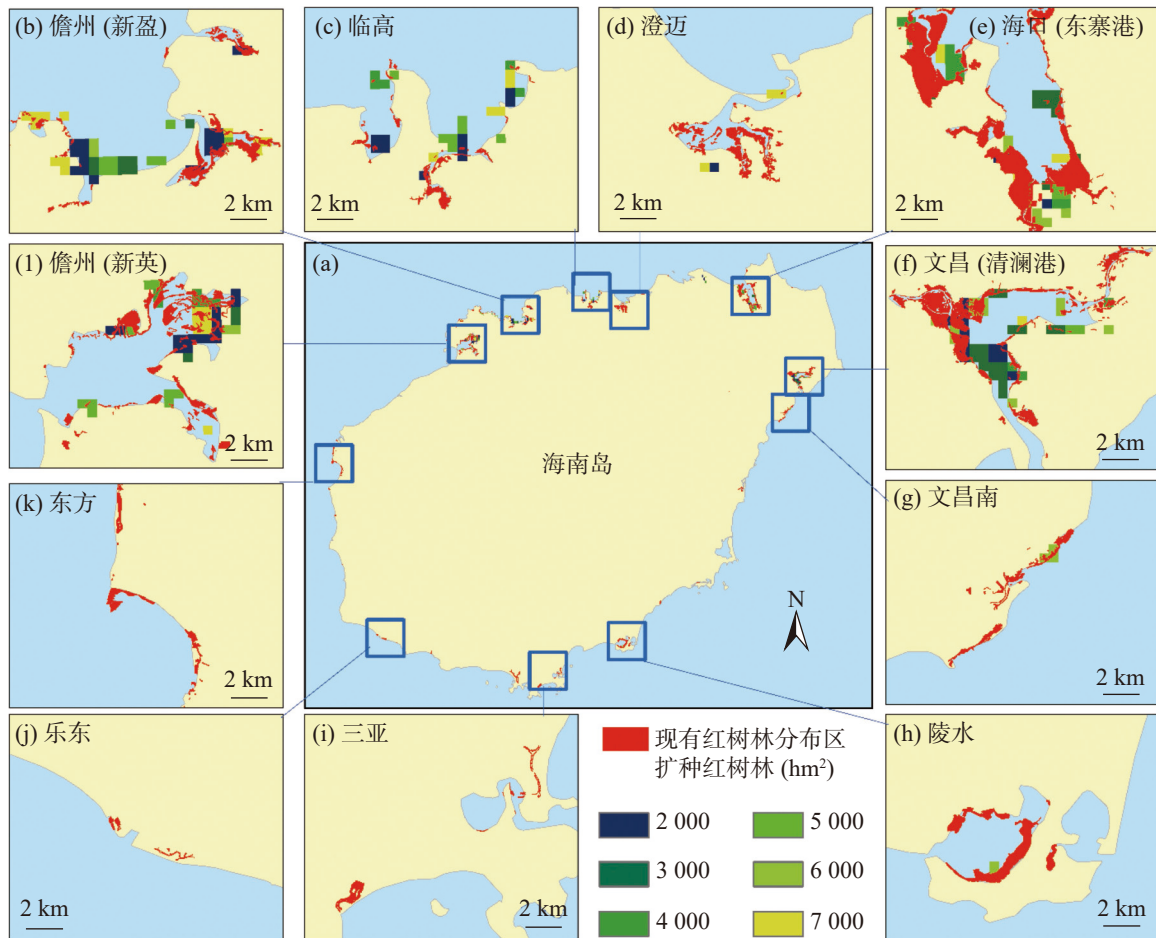


图 6 海南岛红树林扩种范围图-实践

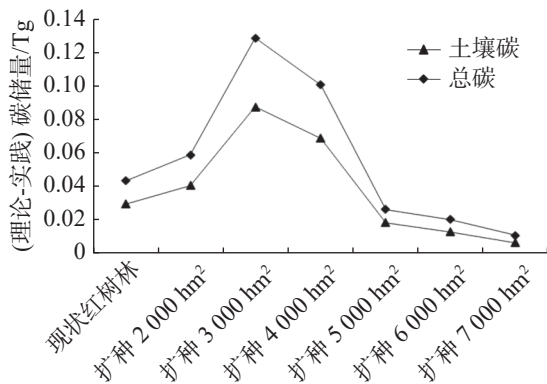


图 7 海南岛现状和扩种红树林(理论-实践)碳储量差值图

### 3 讨论

**3.1 海南岛红树林适生区** MaxEnt 模型通过生物现有的分布信息找到分布规律的最大熵, 从而对生物的适生概率进行预估, 确定生物的分布区域。模型通过刀切法得出环境因子的贡献率<sup>[29]</sup>, 地形因子的累计贡献率最高(67.0%), 其次为水质水文(20.1%)、生物气候(8.7%)、基质(4.3%)等因

素, 表明对海南岛红树林地理分布的主要制约因素为地形; 海南岛四周环海处于热带北缘, 虽存在雨旱两季, 但全年气温、海温、降水等均处于较高水平, 且温差不大, 因此生物气候、水文等因素对红树林分布的制约明显小于地处温带的广东等地<sup>[22]</sup>。本研究以历史上海南岛最大的红树林分布面积约 12 506 hm<sup>2</sup><sup>[30]</sup>(潜在扩种面积低于 7 000 hm<sup>2</sup>)为扩种上限, 以保证完成《行动计划》的基本任务在海南省扩种 2 000 hm<sup>2</sup>的作为扩种下限, 对海南岛 2 000 ~ 7 000 hm<sup>2</sup>扩种红树林进行增量预测。选择海南岛最大的红树林分布面积为上限主要考虑到在无人类活动干预前提下, 红树林能够分布的最大范围应当是其自然选择的结果, 是红树林生态系统能够保持自身的自然更新的上限。但人类科技进步、植种树工艺提高、树种科学搭配等干预行为在一定程度上能够扩大红树林可分布范围, 因此本研究中扩种上限有所低估。

**3.2 海南岛红树林碳储量评估的准确性** 研究的方法与尺度在一定程度上会造成碳密度估算产

生差异,本研究结果与 Meng 等<sup>[21]</sup>采用放大法结合实地调查分析的结果较为接近,但低于 Gao 等<sup>[31]</sup>的实地调查和异速生长方程结果,其主要原因在于 Gao 等<sup>[31]</sup>侧重于土壤碳及土壤深度的梯度变化研究,实地调查所取土壤为当地代表性植被和优势植物群落森林地区建立的采样点土壤,碳储能力较强;其次,植物多样性也会影响碳储量的大小, Bai 等<sup>[19]</sup>侧重于生物多样性与碳密度的关系研究,样本中红树植物的多样性丰富,而 Meng 等<sup>[21]</sup>与本研究则是侧重在红树林生态系统整体,主要以优势种林地进行调查; Guan 等<sup>[32]</sup>研究土壤无机碳的模式与意义,侧重于研究海南岛 7 个重点保护区土壤无机碳,保护区植被群落完整,碳储能力强于海南岛平均碳储能力。碳密度高于 Meng 等<sup>[7]</sup>

对海南岛地上、地下碳储量分布格局、关系和影响机制的研究,主要是因为 Guan 等<sup>[32]</sup>侧重选取海南岛重点区域估算全岛碳储量,而 Meng 等<sup>[21]</sup>侧重在南北部分区域,植物样本具有随机性;本研究对海南岛分区域进行碳储量估算,不同区域其碳密度不相同,分区既保证了代表性同时也提高了估算的精准性。若以海南岛平均碳密度进行估算,随着扩种面积的增加,每 1 000 hm<sup>2</sup> 将导致土壤碳储量低估 0.14 Tg,总碳储量低估 0.19 Tg。本研究利用 InVEST 模型所得结果(土壤碳密度及总碳密度)处于前人研究结果的置信区间内(表 2),但略低于平均值,位于中间水平,模拟结果具有一定的准确性与可信性。

表 2 本研究和其他研究中不同红树林碳储量的比较

研究序号	研究区域	土壤碳/(t·hm <sup>-2</sup> )	总碳/(t·hm <sup>-2</sup> )	来源
1	海南岛	147.42	217.00	本研究现状红树林
2	海南岛	128.53	192.00	(Meng et al.2022) <sup>[21]</sup>
3	海南岛	146.25	215.42	(Meng et al.2021) <sup>[7]</sup>
4	海南岛	197.00	310.75	(Bai et al.2021) <sup>[19]</sup>
5	海南岛	353.99	426.57	(Gao et al.2018) <sup>[31]</sup>
6	海南岛	213.64	/	(Guan et al.2018) <sup>[32]</sup>
除本研究外平均值(±标准差)		207.88±88.87	286.19±106.76	

**3.3 指导红树林扩种实践** 关于区域红树林的扩种研究,陈玉军等<sup>[33]</sup>针对引种无瓣海桑对红树资源的恢复、物种多样性和林分质量的提高等进行研究,侧重于从新物种的引进指导红树扩种;陈彧等<sup>[34]</sup>采用踏查法和样方调查法对海南陵水新村港内拉关木群落特征开展调查研究,侧重于通过优势种特征分析对该地区红树植物采取间种乡土红树植物以增加植物的多样性的种植方式指导红树扩种;李皓宇等<sup>[35]</sup>利用卫星影像解译辅助技术对粤东红树林物种组成和群落结构进行研究与调查,针对区位特征因地制宜的进行种群迁地保育、优势物种“从数量到质量”转变的种植方向来指导该地区的红树林恢复重建工作;王炳宇等<sup>[36]</sup>针对东寨港的无瓣海桑和拉关木的扩散路径和扩散趋势进行分析,侧重于通过对红树林湿地外来植物的管控来指导该地红树建设。本研究结合卫星影

像技术和实际样方调查分析,侧重于从理论和实践两个角度指导海南岛红树林扩种。理论上以 50 m × 50 m 格网进行红树扩种适宜区的分析,扩种区以现有红树林为中心环状方式种植,但在实际生产实践过程将消耗更多的劳力和资源,所以提出针对生产实践采用 1 km 分辨率(即每个格网代表 100 hm<sup>2</sup>,以块状方式扩种)进行碳储量增量预估;但在同一扩种情景下,理论方式的碳储量增量均大于实践方式的,其主要原因在于相同的扩种面积下,2 种方式划分到的区域不同,理论方式网格面积较小(2 500 m<sup>2</sup>),网格数量较多,大多位于高碳密度区域,而实践方式网格面积较大(100 hm<sup>2</sup>),网格数量较少,仅部分位于高碳密度区域(InVEST 模型原理是利用各个区域的面积乘以其碳密度并求和,得出研究区的总碳储量),两者各有利弊。

## 参考文献:

- [1] AHMED N, THOMPSON S, GLASER M. Integrated mangrove-shrimp cultivation: Potential for blue carbon sequestration [J]. *Ambio*, 2018, 47: 441 – 452.
- [2] 王成林. 红树林湿地的退化与修复方法研究——以广东南沙湿地公园红树林湿地以及湛江红树林湿地为例[J]. *艺术科技*, 2019, 32(12): 174 – 176.
- [3] OCHOA-GOMEZ J G, LLUCH-COTA S E, RIVERA-MONROY V H, et al. Mangrove wetland productivity and carbon stocks in an arid zone of the Gulf of California (La Paz Bay, Mexico) [J]. *Forest Ecology and Management*, 2019, 442: 135 – 147.
- [4] 廖静娟, 朱彬, 常云蕾, 等. 基于高分 2 号数据的海南岛红树林变化数据集 (2015–2019)[J]. *中国科学数据 (中英文网络版)*, 2022, 7(4): 7 – 17.
- [5] SIMARD M, FATOYINBO L, SMETANKA C, et al. Mangrove canopy height globally related to precipitation, temperature and cyclone frequency [J]. *Nature Geoscience*, 2019, 12(1): 40 – 45.
- [6] DONATO D C, KAUFFMAN J B, MURDIYARSO D, et al. Mangroves among the most carbon-rich forests in the tropics [J]. *Nature Geoscience*, 2011, 4(5): 293 – 297.
- [7] MENG Y, BAI J, GOU R, et al. Relationships between above- and below-ground carbon stocks in mangrove forests facilitate better estimation of total mangrove blue carbon [J]. *Carbon Balance Manag*, 2021, 16(1): 1 – 14.
- [8] ALONGI D M, MUKHOPADHYAY S K. Contribution of mangroves to coastal carbon cycling in low latitude seas [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2015, 213: 266 – 272.
- [9] 朱耿平, 刘国卿, 卜文俊, 等. 生态位模型的基本原理及其在生物多样性保护中的应用[J]. *生物多样性*, 2013, 21(1): 90 – 98.
- [10] 艾拉努尔·卡哈尔, 王鹏军, 逮永满, 等. 基于 Max-Ent 生态位模型预测木灵藓科三属植物在新疆的潜在分布区[J]. *华中师范大学学报 (自然科学版)*, 2022, 56(3): 487 – 496.
- [11] ELITH J, GRAHAM C H, ANDERSON R P, et al. Novel methods improve prediction of species' distributions from occurrence data [J]. *Ecography*, 2006, 29(2): 129 – 151.
- [12] AHMED S E, MCINERNEY G, O'HARA K, et al. Scientists and software – surveying the species distribution modelling community [J]. *Diversity and Distributions*, 2015, 21(3): 258–267.
- [13] 王运生, 谢丙炎, 万方浩, 等. ROC 曲线分析在评价入侵物种分布模型中的应用[J]. *生物多样性*, 2007, 15(4): 365 – 372.
- [14] XIN K, YAN K, GAO C, et al. Carbon storage and its influencing factors in Hainan Dongzhangang mangrove wetlands [J]. *Marine and Freshwater Research*, 2018, 69(5): 771 – 779.
- [15] 邹文涛, 陈绍志, 赵荣, 等. 森林生态系统碳储量及碳通量遥感监测研究进展[J]. *世界林业研究*, 2017, 30(5): 1 – 7.
- [16] POSNER S, VERUTES G, KOH I, et al. Global use of ecosystem service models [J]. *Ecosystem Services*, 2016, 17: 131 – 141.
- [17] VILLA F, BAGSTAD K J, VOIGT B, et al. A methodology for adaptable and robust ecosystem services assessment [J]. *Plos One*, 2014, 9(3): e91001.
- [18] 伍丹, 朱康文, 张晟, 等. 基于 PLUS 模型和 InVEST 模型的成渝经济区碳储量演化分析[J]. *三峡生态环境监测*, 2022, 7(2): 85 – 96.
- [19] BAI J, MENG Y, GOU R, et al. Mangrove diversity enhances plant biomass production and carbon storage in Hainan island, China [J]. *Functional Ecology*, 2021, 35(3): 774 – 86.
- [20] 吴胜安, 邢彩盈, 朱晶晶. 海南岛气候特征分析[J]. *热带生物学报*, 2022, 13(4): 315 – 323.
- [21] MENG Y, GOU R, BAI J, et al. Spatial patterns and driving factors of carbon stocks in mangrove forests on Hainan Island, China [J]. *Global Ecology and Biogeography*, 2022, 31(9): 1692 – 1706.
- [22] 晁碧霄, 胡文佳, 陈彬, 等. 基于 MaxEnt 模型的广东省红树林潜在适生区和保护空缺分析[J]. *生态学杂志*, 2020, 39(11): 3785 – 3794.
- [23] PHILLIPS S J, ANDERSON R P, SCHAPIRE R E. Maximum entropy modeling of species geographic distributions [J]. *Ecological Modelling*, 2006, 190(3): 231 – 259.
- [24] PHILLIPS S J, DUDÍK M. Modeling of species distributions with Maxent: new extensions and a comprehensive evaluation [J]. *Ecography*, 2008, 31(2): 161 – 175.
- [25] 徐卫华, 罗翀. MAXENT 模型在秦岭川金丝猴生境评价中的应用[J]. *森林工程*, 2010, 26(2): 1 – 3.
- [26] 王佩, 李英杰, 袁家根, 等. 基于优化 MaxEnt 模型的原麝生境适宜性评价[J]. *野生动物学报*, 2023, 44(1): 38 – 45.
- [27] 魏鹏, 张源, 何佳遥, 等. 基于 MaxEnt 模型分析气候变化下玉米褪绿斑驳病毒的潜在地理分布[J]. *植物保护学报*, 2022, 49(5): 1367 – 1376.
- [28] 王旭, 马伯文, 李丹, 等. 基于 FLUS 模型的湖北省生态空间多情景模拟预测[J]. *自然资源学报*, 2020, 35(1): 230 – 242.
- [29] 庄鸿飞, 张殷波, 王伟, 等. 基于最大熵模型的不同尺度物种分布概率优化热点分析: 以红色木莲为例[J]. *生物多样性*, 2018, 26(9): 931 – 940.
- [30] 张国钢, 梁伟, 钱法文, 等. 海南岛红树林的消长对水鸟的影响[J]. *林业科学*, 2008(6): 97 – 100.
- [31] GAO T, DING D, GUAN W, et al. Carbon stocks of coastal wetland ecosystems on Hainan Island, China [J]. *Polish Journal of Environmental Studies*, 2018, 27(3): 1061 – 1069.
- [32] GUAN W, XIONG Y, LIAO B. Soil inorganic carbon in



- mangroves of tropical China: patterns and implications [J]. *Biol Lett*, 2018, 14(11): 20180483.
- [33] 陈玉军, 郑松发, 廖宝文, 等. 珠海市淇澳岛红树林引种扩种问题的探讨 [J]. *广东林业科技*, 2002(2): 31 – 36.
- [34] 陈彧, 程成, 饶丹丹, 等. 外来红树植物拉关木在陵水新村港的群落特征 [J]. *热带林业*, 2022, 50(2): 25 – 29.
- [35] 李皓宇, 彭逸生, 刘嘉健, 等. 粤东沿海红树林物种组成与群落特征 [J]. *生态学报*, 2016, 36(1): 252 – 260.
- [36] 王炳宇, 杨珊, 刘强, 等. 外来红树植物无瓣海桑和拉关木在海南东寨港的人工种植与自然扩散 [J]. *生态学杂志*, 2020, 39(6): 1778 – 1786.

## Assessment of carbon stock and sequestration of the mangrove ecosystems on Hainan Island based on InVEST and MaxEnt models

SHI Xian<sup>1,2</sup>, NIE Tangzhe<sup>2</sup>, XIONG Qian<sup>1</sup>, LIU Zhaoxin<sup>3</sup>, ZHANG Jiayi<sup>3</sup>,  
LIU Wenjie<sup>1,4</sup>, WU Lan<sup>1</sup>, CUI Wei<sup>5</sup>, SUN Zhongyi<sup>1,4</sup>

(1. College of Ecology and Environment, Hainan University, Haikou, Hainan 570203, China; 2. College of Water Conservancy and Electric Power, Heilongjiang University, Harbin, Heilongjiang 150006, China; 3. Hainan Silan Low Carbon Investment Co., Ltd., Haikou, Hainan 570000, China; 4. Hainan Key Laboratory of Environmental Processes and Ecological Regulation in Agriculture and Forestry, Haikou, Hainan 570228, China; 5. Research Center for Development, State Forestry and Grassland Administration, Beijing 100714, China)

**Abstract:** In order to solve the problem of where to plant mangroves in Hainan Island and how to plant mangroves to increase sinks, based on bioclimate, hydrology, geology and land use data, based on the maximum entropy (MaxEnt) model evaluation of the suitable growth area of mangroves in Hainan Island, the potential expansion area of mangroves in Hainan Island was predicted. Combined with the potential expansion range and the carbon density survey data of mangrove ecosystems in different regions, the InVEST model was used to estimate the increase of carbon storage of mangrove ecosystems in Hainan Island. The results show that: 1) The combination of MaxEnt model and InVEST model can well predict mangrove carbon storage, and the prediction of potential distribution areas of mangroves reaches high reliability ( $AUC > 0.96$ ); 2) The current carbon storage of mangrove ecosystem in Hainan Island was about 1.24 Tg, of which soil carbon was about 0.84 Tg, the total carbon density was  $217.01 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ , and the soil carbon density was  $147.43 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ . Taking the largest mangrove distribution area of  $12\,506 \text{ hm}^2$  in Hainan Island as the control line of potential expansion range, it is theoretically that the mangrove ecosystem in Hainan Island can contribute about 1.25 Tg to the carbon neutrality goal under the upper limit scenario, while the increase in carbon storage of about 0.38 Tg can be achieved under the scenario of the lower limit of expansion, which only guarantees the completion of the basic task of expanding  $2\,000 \text{ hm}^2$  mangrove forest in the special action plan for mangrove protection and restoration (2020—2025)

**Keywords:** MaxEnt model; InVEST model; potential carbon stock; potential distribution; mangrove ecosystem; Hainan Island

(责任编辑:潘学峰)