

长岛植被固碳量时空变化特征及造林增汇潜力分析

张雪莹^{1,2}, 侯西勇¹, 范国伦³, 王福涛⁴, 王晓利¹, 李东¹,
宋洁^{1,2}, 刘凯^{1,2}, 徐鹤⁵, 高映旭^{1,2}

1. 中国科学院烟台海岸带研究所, 烟台 264003;
2. 中国科学院大学, 北京 100049;
3. 长岛海洋生态文明综合试验区经济发展局, 烟台 265800;
4. 中国科学院空天信息创新研究院, 北京 100094;
5. 山东师范大学 地理与环境学院, 济南 250358

摘要: 海岛具有独特的地理特征和生态系统。剖析海岛固碳量的演变趋势, 对于指导“低碳海岛”和“生态海岛”建设意义重大。本文利用GF-1和Sentinel-2多光谱卫星影像提取长岛植被类型, 结合地形地貌分区, 采用固碳速率法计算2015年—2022年植被固碳量, 分析其变化特征, 并探究植被碳汇能力提升的影响因素, 评估造林增汇潜力。结果显示: (1) 2015年—2022年长岛植被面积整体呈现退缩趋势; 黑松纯林和针阔混交林面积减少, 而刺槐纯林和灌草丛面积增长; 北五岛南部植被面积退缩趋势显著, 大量灌草丛变为非林草区, 是植被退化的主要表现。(2) 长岛植被年际固碳量呈现波动上升趋势, 空间格局则呈现“多核式增长、条带式减弱”的特征; 不同岛屿植被固碳量时间变化拐点具有显著的南北差异; 植被“稳定区”固碳能力持续增强, 固碳量变化的拐点在2016年和2019年; 植被固碳量存在较显著的高程和坡度分异。(3) 松材线虫病扩散、极端气候事件发生、干旱胁迫及树龄老化等环境问题是影响长岛固碳变化的主要因素; 长岛造林适宜性分值区间为17.96—81.98, 优先造林区以北五岛为主。本研究可为长岛国际“零碳岛”愿景提供理论依据与数据支持。

关键词: 海岛城市, 植被类型, 固碳量, 增汇潜力, 长岛

中图分类号: P2

引用格式: 张雪莹, 侯西勇, 范国伦, 王福涛, 王晓利, 李东, 宋洁, 刘凯, 徐鹤, 高映旭. 2025. 长岛植被固碳量时空变化特征及造林增汇潜力分析. 遥感学报, 29(11): 3243–3261

Zhang X Y, Hou X Y, Fan G L, Wang F T, Wang X L, Li D, Song J, Liu K, Xu H and Gao Y X. 2025. Spatiotemporal dynamics of vegetation carbon sequestration and afforestation potential for carbon sink enhancement: A case study of Changdao Archipelago, China. National Remote Sensing Bulletin, 29(11): 3243–3261 [DOI: 10.11834/jrs.20254306]

1 引言

生态系统是关键的碳汇, 其固碳作用被公认为是经济高效且具有规模效应的碳中和途径 (于贵瑞等, 2022)。中国陆地生态系统固碳能力可抵消约7%—15%的人为二氧化碳排放, 且能持续发挥碳汇作用 (朴世龙等, 2022)。森林是陆地生态系统的重要组成部分, 仅占全球陆地非冰面面积的40%, 却贡献了90%的陆地生物量和73%的土壤碳

储量 (Lieth和Whittaker, 1975; Waring和Running, 1998; Sedjo, 1993)。森林在全球陆地生态系统碳循环和碳储量中占据核心地位 (Mo等, 2023; Yu等, 2024), 科学评估区域森林固碳现状与增汇潜力对于理解陆地生态系统碳循环及其源汇功能至关重要。森林生态系统固碳能力的研究方法主要有3种: 样地清查法、模型模拟法和遥感估算法。样地清查法基于典型样地测定生物量、枯落物或土壤等碳库的碳储量, 具有高精度和可靠性 (Fang

收稿日期: 2024-09-03; 预印本: 2025-04-24

基金项目: 国家自然科学基金 (编号: 42176221); 中国科学院烟台海岸带研究所前沿部署项目 (编号: YIC-E3518907); 长岛国际零碳岛规划研究项目 (编号: E391011601)

第一作者简介: 张雪莹, 研究方向为海岸带生态系统评估。E-mail: xueyingzhang@yic.ac.cn

通信作者简介: 侯西勇, 研究方向为海岸带资源环境遥感、生态系统评估、灾害风险评估。E-mail: xyhou@yic.ac.cn

等, 2001; Liu 等, 2012; 张颖和李晓格, 2022), 但适用空间范围较小。模型模拟法是通过 MAPSS (Zhou 等, 2019)、BIOME-BGC (Su 等, 2022; Srinet 等, 2023)、CASA (张猛 等, 2023; Wang 等, 2024; Ren 等, 2024) 等模型估算生态系统的碳储量, 但参数数据获取较为困难。遥感估算结合地面调查, 能够降低现场测量的频率及监测成本, 应用前景广阔 (高述超 等, 2023; 朱宁宁 等, 2024)。结合高分辨率卫星影像, 可为小型海岛城市提供详尽的植被信息, 实现对海岛植被时空变化的持续监测。

森林碳增汇是森林生态系统对大气二氧化碳的固定能力提升, 从而导致森林碳储存量的增长。在国际气候行动中, “基于自然的气候解决方案” NCS (Natural Climate Solutions) 是增强碳汇的重要策略 (Seddon, 2022)。其中造林 (新造林和再造林) 被视为具有最大碳增汇潜力的 NCS 途径 (徐晋涛和易媛媛, 2022)。当前研究在识别造林潜力区域时, 主要采用两种视角: 基于自然资源的角度, 造林适宜性受地形地貌、土壤、土地利用、树种、气候等多种因素的共同影响, 综合多种因子进行评价 (胡腾云 等, 2020)。从社会经济视角出发, 考虑造林成本与收益, 构建决策模型确定潜在的可造林面积 (汪宗顺 等, 2025)。海岛城市面积较小且土地资源有限, 通常面临诸多环境限制, 因此, 在综合考虑自然因子的基础上, 融入交通、人口等社会因素, 能够更加客观地评估适宜造林的区域。

长岛的地理位置和生态环境较为独特, 其植被碳增汇问题受到地方政府和众多学者的重视。2020 年以来政府部门先后发布《烟台市碳达峰工作方案》(烟台市人民政府, 2023)、《关于推进长岛综试区新一轮大保护大发展三年行动方案》以及《长岛海洋生态文明综合试验区建设行动计划》, 旨在推动长岛绿色、低碳和高质量发展。2024 年更是提出《长岛国际零碳岛发展规划 (2023—2035 年)》发展愿景。这些政策强调生态保护、低碳发展和国际零碳岛建设的重要性 (袁秀堂 等, 2023)。扩大森林覆盖面积是提升碳汇效能的经济高效策略 (Zellweger 等, 2020; 徐浩 等, 2023), 因此, 科学评估长岛植被固碳现状及造林增汇潜力, 对于实现相关规划或工作目标具有直接的指导意义, 可有助于优化植被配置、提高碳汇效率, 从而促进岛

屿生态保护和经济发展的平衡, 更好地适应和响应全球气候变化的挑战。

本文针对长岛地区采用多源、多时相遥感影像进行植被分类, 结合地形地貌分区, 采用固碳速率法计算植被固碳量并分析其时空变化特征, 进而探究植被生长和碳汇能力提升的主要影响因素, 对造林增汇潜力进行量化评估。研究可为长岛国际“零碳岛”目标实现提供数据支持, 以及为我国海岛生态文明建设提供科学的参考。

2 研究区概况与研究方法

2.1 研究区概况

长岛位于胶东半岛和辽东半岛之间, 是环渤海经济区的连接带、重要的生态屏障, 也是山东省重要的海岛城市 (图 1)。长岛包括 151 个岛屿及其所属海域, 岛陆面积 56.8 km², 海岸线长 187.8 km。面积较大且有人居住的主要是北五岛 (北隍城岛、南隍城岛、小钦岛、大钦岛、砣矶岛) 和南五岛 (北长山岛、南长山岛、大黑山岛、小黑山岛、庙岛)。长岛具有良好的资源禀赋和生态环境。天然植被发育受到限制, 现有林木以人工种植为主, 主要包括以黑松为优势种的针叶林、以刺槐为主的阔叶林以及针阔混交林 (赵鸣 等, 2017)。长岛以剥蚀山丘和海岸地貌为主要特征, 海拔最高处位于大钦岛南部 (约 194 m), 大黑山岛西部低山平原过渡带地形起伏度最高 (约 57 m); 北五岛呈链状分布, 海岛间距较大, 而南五岛分布较为集中且开发利用程度更高。

2.2 植被遥感监测

GF-1 与 Sentinel-2 卫星数据以其短重访周期和高分辨率特性, 对植被分类研究具有重要价值。采用 GF-1 (2015 年—2018 年) 和 Sentinel-2 (2019 年—2022 年) 多光谱影像, 数据分辨率为 8 m 和 10 m, 结合 2023 年 6 月多个岛屿野外调查和无人机航拍数据进行植被分类。影像数据预处理包括大气校正、正射校正、辐射定标和几何校正等, 其中, Sentinel-2 多光谱影像预处理是在 Google Earth Engine (GEE, <https://earthengine.google.com> [2024-11-22]) 云计算平台中完成 (宁晓刚 等, 2022; 梁锦涛 等, 2023)。参考《土地利用现状分类 (GB/T 21010-2017)》(中华人民共和国国家质

量监督检验检疫总局和中国国家标准化管理委员会，2007）和IGBP全球土地覆被分类系统标准（Loveland等，2000；Friedl等，2010），结合野外实地考察，将长岛植被类型划分黑松纯林、刺槐

纯林、针阔混交林和灌草丛（表1）。共选取350个样本，其中：250个样本用于确定阈值，每类地物50个；100个样本用于验证，每类地物20个。

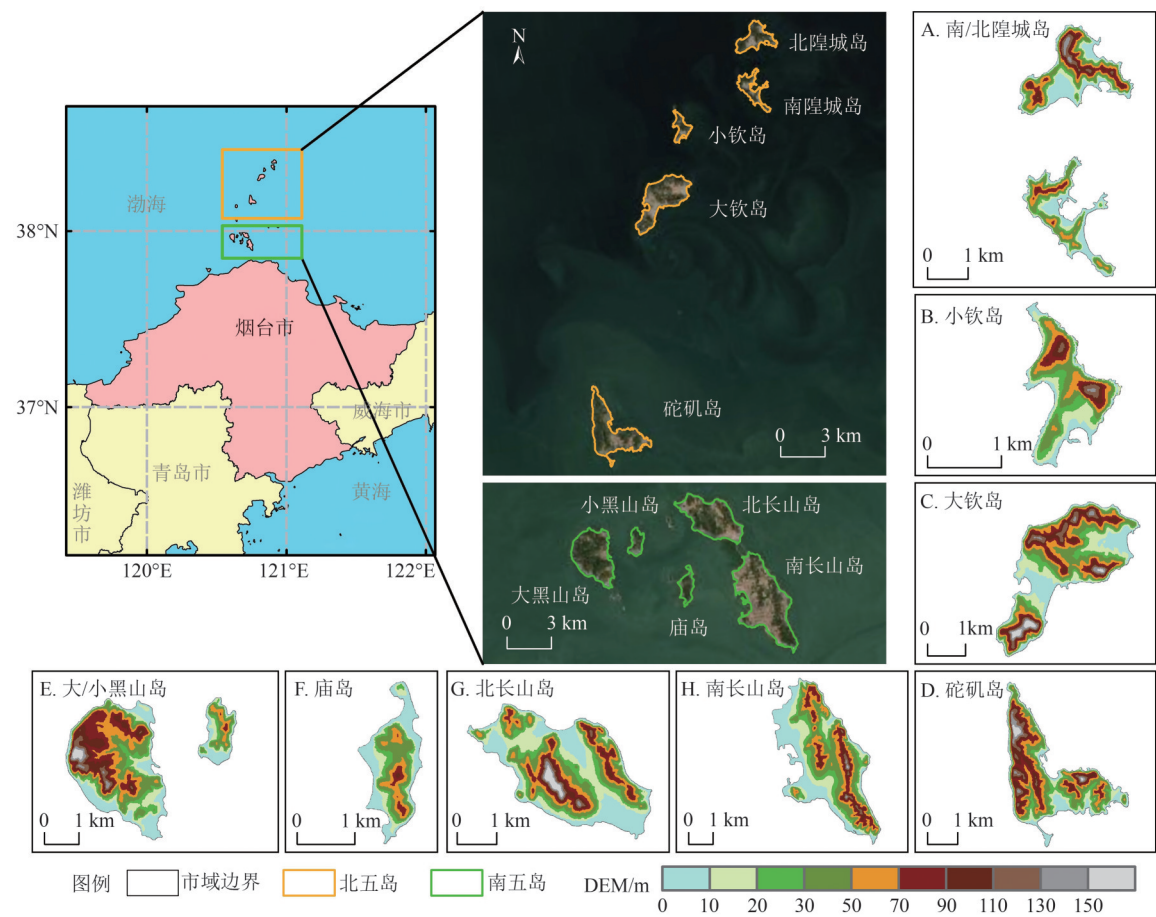


图1 长岛的地理位置和高程分布

Fig. 1 Geographic location and elevation distribution of Changdao

表1 长岛植被分类系统

Table 1 Vegetation classification system of Changdao

植被类型	实地照片	备注	植被类型	实地照片	备注
黑松纯林		林分存在多个树种时,其中黑松组成在65%以上时即为纯林	刺槐纯林		林分存在多个树种时,其中刺槐组成在65%以上时即为纯林
针阔混交林		覆盖度>60%,高度超过2 m,常绿或落叶的乔木林地	灌草丛		覆盖度>10%,高度低于2 m,常绿或落叶的乔木林地
非林草区		包括农作物覆盖、用于住宅、公共管理与服务、工矿仓储、军事设施等用地			

注：照片由宋洁于2023年6月实地拍摄。

以便于数据对比和统计分析，将GF-1多光谱影像重采样至10 m分辨率进行统一；进而，采用 Estimation Scale Parameter 2（ESP2）确定最优分割尺度，对影像进行面向对象的分割，并结合实地

调查数据、无人机航拍数据及 Google Earth 影像采集 5 种地物的样本数据，使用最邻近分类方法进行地物分类。评估分类结果的精度，如表 2 所示，总体精度和 Kappa 系数均较高，对 2022 年研究区典型岛屿植被分类结果进行展示，并与 CLCD 30 m 数据产品 (Yang 和 Huang, 2021) 进行对比，如图 2 所示，可见与 CLCD 数据结果 (林地: 1613.43 hm²; 灌草丛: 68.13 hm²) 相比，本研究分类结果 (林地: 2571.88 hm²; 灌草丛: 568.28 hm²) 更为精准

的识别了林草区域。

表 2 2015 年—2022 年长岛植被分类精度
Table 2 Classification accuracy of vegetation in Changdao from 2015 to 2022

参量	年份							
	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
总体精度	0.92	0.93	0.92	0.93	0.92	0.91	0.93	0.94
Kappa 系数	0.91	0.92	0.91	0.92	0.90	0.88	0.90	0.91

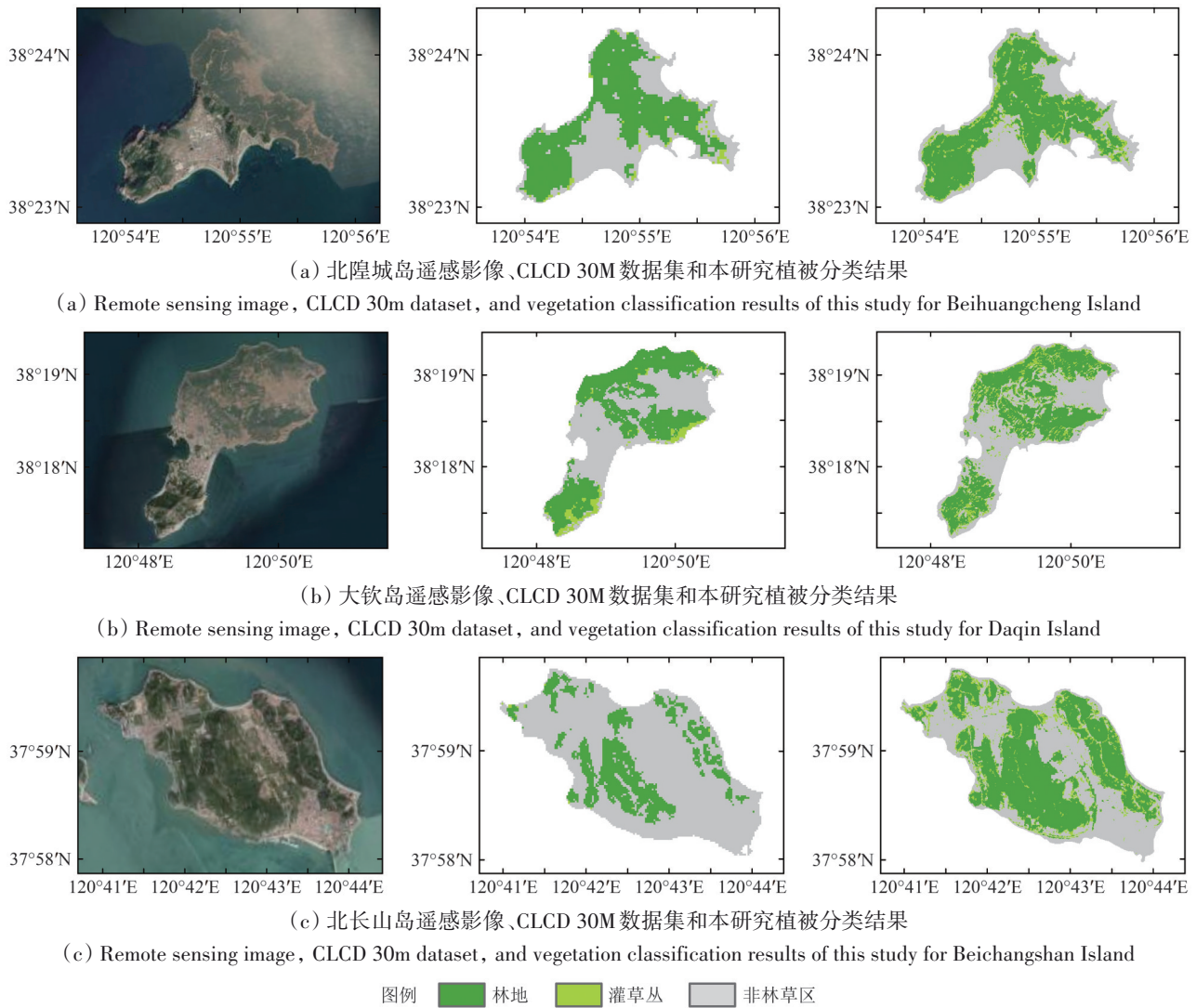


图 2 2022 年长岛植被类型数据对比图
Fig. 2 Comparison of vegetation type data in Changdao in 2022

2.3 地貌类型划分

使用数字高程模型 DEM (Digital Elevation Model), 结合野外调查信息划分地貌类型。具体使用 ALOS 对地观测卫星搭载合成孔径雷达 (PALSAR) 获取的高分辨率 (12.5 m) DEM 数据, 来源于美国阿拉斯加大学的地球观测数据平台

(<https://search.asf.alaska.edu/>[2024-11-22])。部分区域存在数据空白, 采用通过 91 卫图助手获取的 8 m 分辨率 DEM 数据进行填补。两种数据通过三次卷积插值法重采样至 10 m 分辨率并进行数据融合。进而, 依据式 (1) 计算地形起伏度 (RDLS), 利用高程与地形起伏度的组合阈值划分平原、丘陵和

低山3种地貌类型（表3）。

$$RDLS = H_{max} - H_{min} \tag{1}$$

式中，RDLS为地形起伏度； H_{max} 为高程最大值， H_{min} 为最小值；分析窗口为3×3。

表3 地貌类型划分的高程一起伏度组合阈值
Table 3 The elevation–relief combination threshold for landform classification

平原	丘陵	山地
DEM≤40 m; RDLS≤4 m	DEM≤40 m; 4 m<RDLS≤8 m	40 m<DEM≤80 m; RDLS>8 m
	DEM≤40 m; RDLS>8 m	DEM>80 m; RDLS≤4 m
	40 m<DEM≤80 m; RDLS≤4 m	DEM>80 m; 4 m<RDLS≤8 m
	40 m<DEM≤80 m; 4 m<RDLS≤8 m	DEM>80 m; RDLS>8 m

2.4 植被固碳量计算

参考生态环境部环境规划院和中国科学院生态环境研究中心发布的《陆地生态系统生产总值（GEP）核算技术指南》（生态环境部环境规划院，2020）以及国家发展改革委和国家统计局2022年印发的《生态产品总值核算规范（试行）》（国家统计局和国家发展和改革委员会，2022），采用固碳速率法计算植被碳汇。将样地清查法测算出的2017年烟台市不同树种在不同立地条件下的固碳速率作为基准参考值（孙中元等，2020）；统计研究时段内不同立地条件下植被类型未发生变化的区域；使用USGS提供的Landsat 8影像计算归一化植被指数（NDVI），采用中值合成法对时间序列数据进行平滑处理，并应用最大合成法MVC（Maximum Value Composites）计算生长季（5—10月）NDVI，以获取2015年—2022逐年NDVI数据；NDVI是评估植被固碳能力的关键指标，它能够合理反映冠层尺度植被吸收光合有效辐射（FPAR）的变化（田定方等，2020）。参考林分密度公式（张乃暄等，2022）及NDVI与固碳量之间的关系（王建步等，2019；Sultanova等，2023），确定在研究时段内植被未变化范围中，以不同年份“植被—地貌”组合区域的NDVI均值与2017年的比值作为系数，对固碳速率基准参考值进行修正，从而获得各植被类型逐年固碳速率（表4）。进而，利用下式计算植被固碳量：

表4 “植被—地貌”组合区域的固碳速率
Table 4 Carbon sequestration rates in vegetation–landform composite zones

		/(tC/(hm ² ·a))								
地貌类型	植被类型	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	
平原	黑松纯林	1.07	1.33	1.33	1.32	1.19	1.35	1.36	1.39	
	刺槐纯林	2.08	2.51	2.47	2.47	2.26	2.53	2.59	2.65	
	针阔混交	2.48	3.07	3.06	3.06	2.83	3.13	3.21	3.33	
丘陵	黑松纯林	1.41	1.73	1.72	1.69	1.54	1.74	1.76	1.79	
	刺槐纯林	2.06	2.47	2.43	2.45	2.19	2.48	2.56	2.60	
	针阔混交	2.46	2.94	2.90	2.93	2.67	2.97	3.08	3.15	
山地	黑松纯林	1.30	1.52	1.50	1.47	1.34	1.50	1.53	1.55	
	刺槐纯林	1.88	2.23	2.19	2.20	1.97	2.25	2.32	2.35	
	针阔混交	2.41	2.74	2.70	2.75	2.49	2.77	2.84	2.91	
灌草丛		0.80	1.00	1.02	1.00	0.88	1.07	1.08	1.13	

注：2017年固碳速率来源于文献（孙中元等，2020）。

$$Q_c = \sum_{i=1}^n LCSR_i \times a_j \times SL_i \tag{2}$$

$$a_j = \overline{NDVI}_{jk} / \overline{NDVI}_{j2017} \tag{3}$$

式中， Q_c 为植被固定碳总量（tC）； i 表示植被类型， $i=1, 2, \dots, n$ （ $n=4$ ）； $LCSR_i$ 是第*i*类植被类型的固碳速率（tC/（hm²·a））； j 表示“植被—地貌组合”类型， $j=1, 2, \dots, n$ （ $n=9$ ）； a_j 为第*j*类“植被—地貌组合”类型的修正系数； k 表示年份， $k=2015, 2016, \dots, n$ （ $n=2022$ ）； $\overline{NDVI}_{jk}$ 是第*k*年时第*j*类“植被—地貌组合”类型的NDVI均值； SL_i 是第*i*类植被类型的面积（hm²）。

2.5 造林增汇潜力评估

人口外迁等因素导致长岛常住人口逐渐减少、土地资源大量闲置、国家和地方生态文明相关政策等因素都为造林增汇带来很好的契机。

（1）造林适宜性影响因素。长岛植被生长受到多种因素的影响，主要包括地形地貌、土壤特征、植被覆盖以及人类活动等（池源等，2015；袁静芳等，2024），各因素数据来源如表5所示：土壤特征数据来源于土壤信息中心（ISRIC）；植被覆盖采用Landsat 8影像制作年内生长季的NDVI最大值合成数据；人口数据（人口密度）来源于WorldPop人口栅格数据集；道路数据来源于OpenStreetMap，在ArcGIS中进行密度分析，获得道路密度数据；交通可达性是基于分级路网测度成本，计算其到居住区累计耗费的时间（麻学锋和谭佳欣，2023）。

表5 数据来源
Table 5 Data sources

数据来源	时间分辨率	起止年份	空间分辨率/m	数据类型
World Soil Information(https://www.isric.org/)	年	1950—2017	250	土壤基岩深度、土壤含水量、土壤有机碳含量、土壤PH值
USGS(https://www.usgs.gov/)	月	2015—2022	30	Landsat 8 遥感影像
WorldPop(https://www.worldpop.org/)	年	2015—2020	100	人口数据
OpenStreetMap	年	2023	—	道路数据

(2) 造林适宜性评估。综合选取地形地貌、土壤特征、植被覆盖和人类活动的 11 个影响因子(表 6), 参照易海杰等(2022) 的研究, 通过加权求和获得造林适宜性综合指数。因子权重采用熵值法 EWM (Entropy Weight Method) 确定。熵值法是一种客观赋权法, 能够有效避免人为因素带来的偏差(韦新良 等, 2008)。造林适宜性综合指数

计算公式如下:

$$Z_i = \sum_{i=1}^n A_i S_i + \sum_{i=1}^n B_i S_i + \sum_{i=1}^n C_i S_i + \sum_{i=1}^n D_i S_i \quad (4)$$

式中, Z_i 是造林适宜性综合指数; A_i 、 B_i 、 C_i 、 D_i 代表地形地貌、土壤特征、植被覆盖和人类活动中第 i 个因子的权重; S_i 是第 i 个因子的评价分值。

表6 造林适宜性评价指标权重及等级划分
Table 6 Weights and grades of evaluation index of afforestation suitability

准则层	要素层	单位	指标性质	因子重要性等级划分				
				不适宜 (分值=20)	低适宜 (分值=40)	中适宜 (分值=60)	较高适宜 (分值=80)	高适宜 (分值=100)
地形地貌(0.1838)	高程(0.0278)	m	正	—	—	−4—30	30—50	50—194
	坡度(0.0138)	°	负	>25	20—25	15—20	8—15	0—8
	坡向(0.1422)	°	负	阴坡	半阴坡	半阳坡	平坡	阳坡
土壤特征(0.3457)	基岩深度(0.1139)	cm	正	<1500	1500—2000	2000—2200	2200—2500	>2500
	含水量(0.0408)	%	正	0—10	10—13	13—15	15—20	>20
	有机碳含量(0.1483)	g/kg	正	<5	5—10	10—15	15—20	>20
	PH 值(0.0427)	—	正	<6 或 >7.5	6—6.2	6.2—6.5	6.5—7	7—7.5
植被覆盖(0.0891)	NDVI(0.0891)	—	正	0.01—0.27	0.27—0.48	0.48—0.70	0.70—0.90	0.90—1
人类活动(0.3814)	人口密度(0.0069)	—	负	53.75—97.21	30.36—53.75	12.92—30.36	4.63—12.92	0.06—4.63
	道路密度(0.2033)	—	正	0—1.48	1.48—3.13	3.13—4.98	4.98—7.25	7.25—10.54
	交通可达性(0.1712)	—	正	5 h 外	5 h 内	3 h 内	2 h 内	1 h 内

注: 坡度、坡向分级参考(王娟, 2015)划分标准; 土壤 PH 值分级参考文献(艾鹏, 2012); 交通可达性分级参考文献(许浩 等, 2022); 其余指标采用自然间断点分级法(Jenks)为基准值, 部分指标进行整数化调整。

(3) 造林增汇量计算。基于造林适宜性综合指数, 针对植被现状分布区和建成区之外的岛陆区域, 区分近期、中期和远期目标规划造林分布区; 在此基础上, 假设未来时期不同植被类型之间存在良性演替, 固碳速率保持不变(2022 年), 仍基于式(2)和式(3)计算植被固碳量。

3 结果分析

3.1 植被类型时空变化

长岛植被主要植被类型为黑松纯林、刺槐纯林、针阔混交林及灌草丛, 2015 年—2022 年面积随时

间变化微弱减少(图 3)。其中 2015 年植被面积为 3184.74 hm² (占岛陆面积的 60.84%), 至 2022 年面积减少了 44.58 hm²。黑松纯林和针阔混交林面积退缩, 分别减少了 49.62 hm² (10.82%) 和 43.27 hm² (3.17%), 刺槐纯林面积增长了 8.42 hm² (1.01%), 灌草丛面积增长最显著 (39.89 hm², 7.55%)。各岛屿相比, 大、小黑山岛最佳, 植被覆盖率均大于 70%, 而南长山岛人口聚集、建成区面积较大, 植被覆盖率仅为 47.39%。2015 年—2022 年北隍城岛和小钦岛植被面积分别增长 3.50%、2.81%, 砣矶岛和大钦岛植被面积则分别减少 3.63%、3.42%。整体来看, 不同岛屿植被的分布及变化特征各异, 北五岛植被退缩趋势显著。

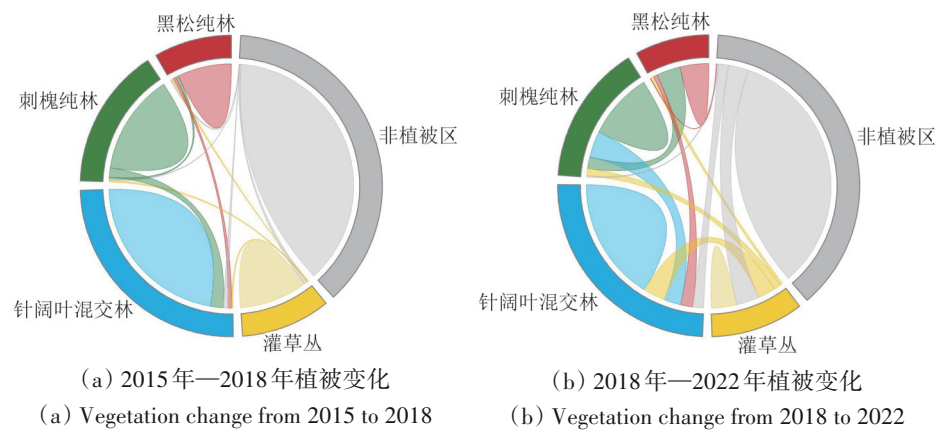


图3 长岛植被类型转移和弦图
Fig. 3 Chord diagram of vegetation type transitions on Changdao

长岛植被类型空间变化显著，针阔混交林和刺槐纯林相互转化最为剧烈（图4）。其中，针阔混交林变为刺槐纯林的面积高达352.32 hm²；非林草区造林也较为突出，面积达311.88 hm²，新增林地主要是针阔混交林，达236.48 hm²，而新增的刺槐纯林（50.09 hm²）和黑松纯林（25.31 hm²）面积较小。灌草丛变为非林草区面积达215.23 hm²，

是植被退化的重要表现。总的来说，空间变化体现了林分结构的优化与劣化趋势并存。混交林相较于纯林更加稳定，因此人工种植混交林能够有助于改善林分立地条件、提升植被生态功能（张佳鹏 等，2023）。总体上，长岛针阔混交林面积净减少，说明林分结构的稳定性有所降低。

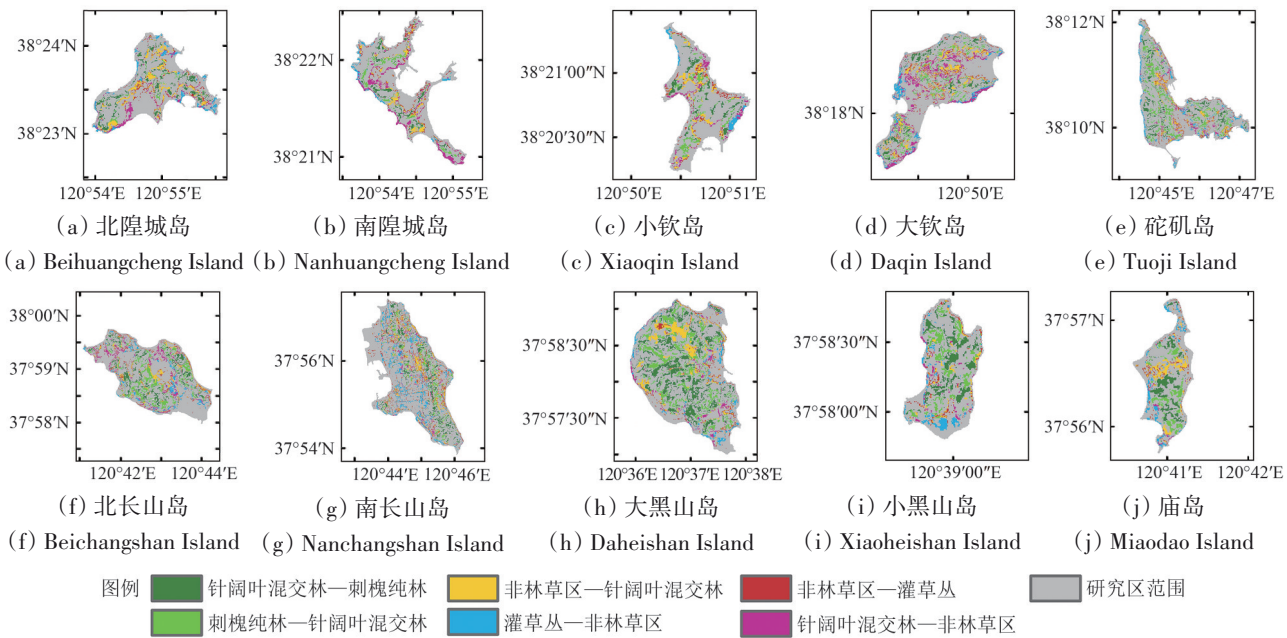


图4 2015年—2022年长岛植被类型主要变化空间分布图
Fig. 4 Distribution and change of vegetation in Changdao from 2015 to 2022

3.2 植被固碳量变化特征

3.2.1 植被固碳量时空变化

2015年—2022年植被固碳量呈波动上升趋势，

2015年为6009.11 tC，2022年增至7455.45 tC，增长率为3.01 %/a。历年单位面积固碳量呈现波动变化的特点（图5（a））；起始年份是最低值（188.68 gC/m²），2019年出现一个波谷（200.84 gC/m²），至2022年达

到峰值 (237.40 gC/m^2)。针阔混交林是植被碳汇的主要贡献者, 占比超过50% (图5 (b)), 其次是刺槐纯林 (贡献约27%的固碳量), 黑松纯林和灌草丛的固碳量占比较低。植被固碳量时间变化方面, 黑松纯林在2016年—2017年间达到峰值, 其余植被

类型则是2021年—2022年达到峰值; 所有植被类型固碳量低值均在2015和2019年。年际增长率排序为: 灌草丛 ($6.47\%/a$) > 刺槐纯林 ($3.20\%/a$) > 针阔混交林 ($2.79\%/a$) > 黑松纯林 ($1.26\%/a$)。

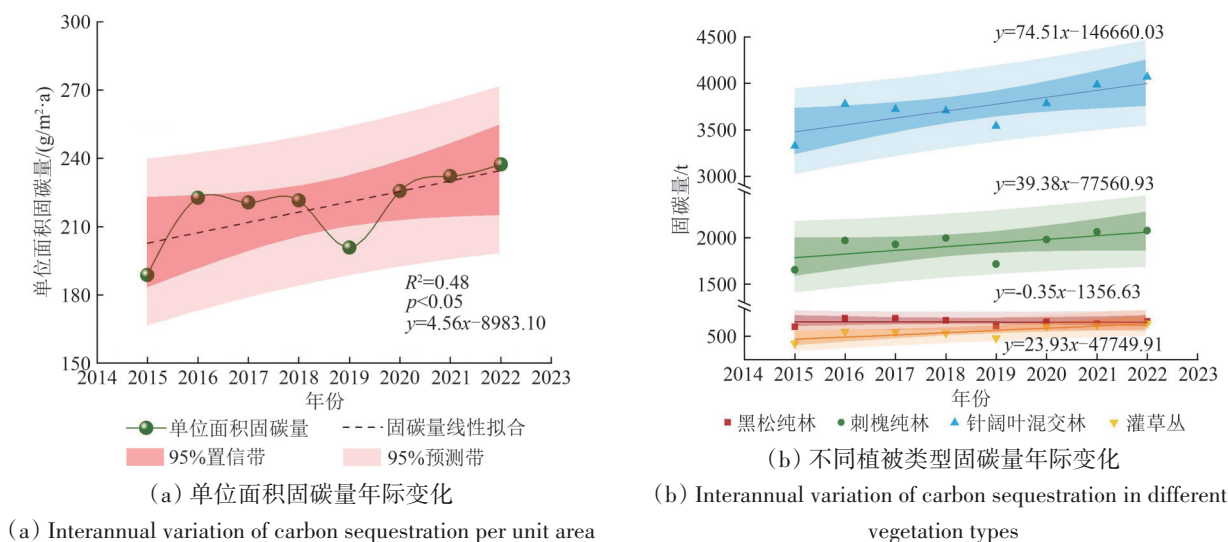


图5 长岛植被固碳时间变化特征

Fig. 5 Temporal variation of carbon sequestration by vegetation in Changdao

植被固碳量时空异质性显著 (图6)。2015年—2022年植被固碳量整体呈现“多核式增长, 条带式减弱”的特征。固碳量增长区域的总面积为 2355.63 hm^2 , 其中, 显著增长区域占 36.59% 。减少区域的总面积为 1603.72 hm^2 , 其中显著减少区域占 24.14% 。显著增长区域主要分布在丘陵地貌及平原—丘陵过渡区, 显著减少区域则呈现条带状分布在增长区域的外围。不同植被类型之间相比, 黑松纯林 ($-0.28 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$) 和灌草丛 ($-0.07 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$) 呈轻微减弱趋势, 而刺槐纯林 ($0.63 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$) 和针阔混交林 ($2.30 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$) 增长趋势明显。山地区域黑松纯林的减弱趋势尤为突出 ($-0.51 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$); 刺槐纯林和针阔混交林在不同地貌类型区均有增长, 增长趋势为: 平原>丘陵>山地。灌草丛在平原区域有所提升 ($0.55 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$), 但在山地区域下降显著 ($-0.77 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$)。总体而言, 2015年—2022年植被固碳量呈现明显上升趋势, 在丘陵地区具有良好生长态势的针阔混交林贡献最大。

3.2.2 植被固碳量岛屿分异

不同岛屿植被固碳量差异显著 (图7)。除南隍城和大钦岛2016年达到峰值外, 其余岛屿2022年出现峰值, 最低值多出现在2015年或2019年。南长

山岛植被总固碳量最大, 2022年达 1511.18 tC ; 其次为大黑山岛和砣矶岛, 总固碳量维持在 1000 tC 以上; 小钦岛和小黑山岛总固碳量较小, 2022年分别为 181.12 tC 和 236.15 tC 。岛屿植被单位面积固碳量代表了研究时段内植被整体的状况: 庙岛的植被单位面积固碳量最大, 达 256.94 gC/m^2 , 是长岛植被长势最好的岛屿, 其次为小黑山岛和大黑山岛, 分别为 254.22 gC/m^2 和 254.02 gC/m^2 ; 南隍城岛状况较差, 仅为 223.83 gC/m^2 。

2015年—2022年各个岛屿植被固碳量整体上均呈现不同程度的增长。庙岛增长率最大, 达 $6.60\%/a$; 大钦岛和南隍城岛增长率较小, 分别为 $1.24\%/a$ 和 $1.40\%/a$ 。各岛屿植被固碳量变化曲线均呈现“增—减—增”变化趋势, 显著增长和降低的年份分别是2016年和2019年, 而再次显著增长的年份则南北相异, 北五岛是在2021年, 其中大钦岛增长速率最快 ($18.07\%/a$), 而南五岛则是在2020年, 其中小黑山岛变化率最高 ($28.72\%/a$)。

3.2.3 植被固碳量分区特征

植被固碳能力及其变化受到多种因素的影响。将2015年—2022年植被类型保持不变的区域界定为“稳定区”, 统计年尺度植被覆盖频次, 将频次非零

且小于8 (部分年份无植被覆盖) 的区域定义为“变化区”, 统计长岛全域及各植被类型稳定区和变化区的固碳量, 如图8。长岛全域稳定区单位面积固碳量 (约 240 gC/m^2) 整体高于变化区 (约 160 gC/m^2), 曲线线性拟合斜率 (反映植被长势) 在稳定区和变化区分别为4.99和3.30, 说明稳定区植被长势及固

碳能力优于变化区。各植被类型来看, 刺槐纯林和针阔混交林稳定区固碳量高于变化区, 与长岛全域一致, 但黑松纯林则相反。各类植被稳定区的斜率均大于变化区, 说明稳定区植被固碳能力持续增强。

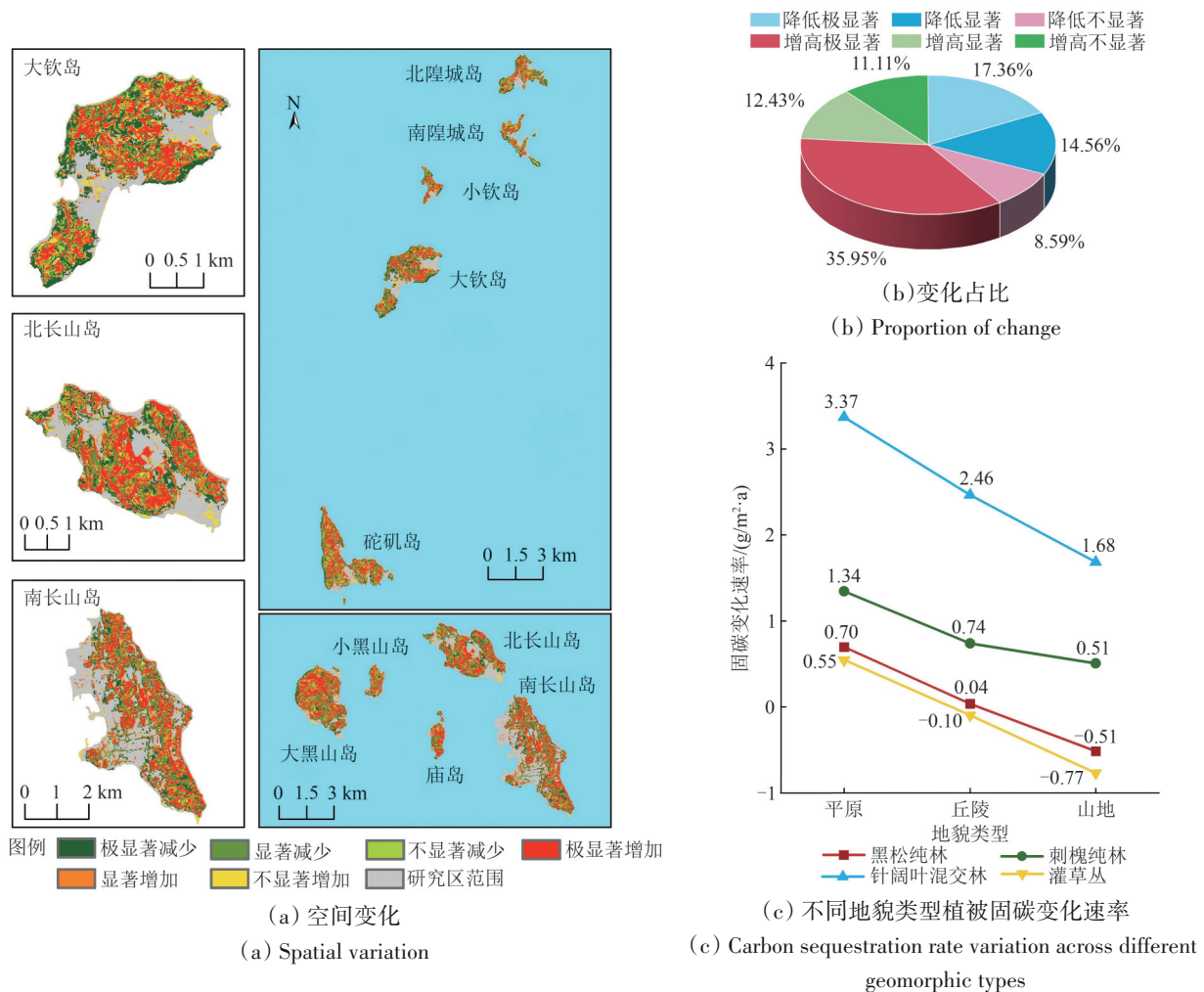
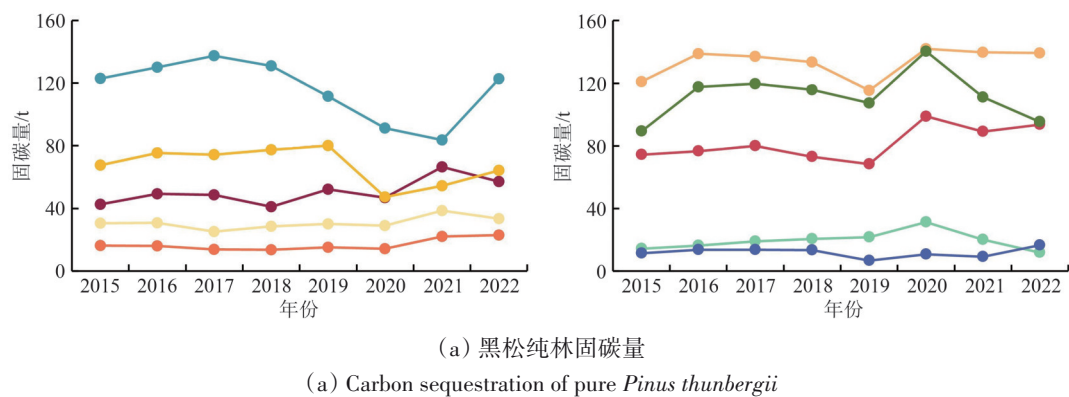


图6 长岛植被固碳空间变化特征

Fig. 6 Spatial variation characteristics of carbon sequestration by vegetation in Changdao



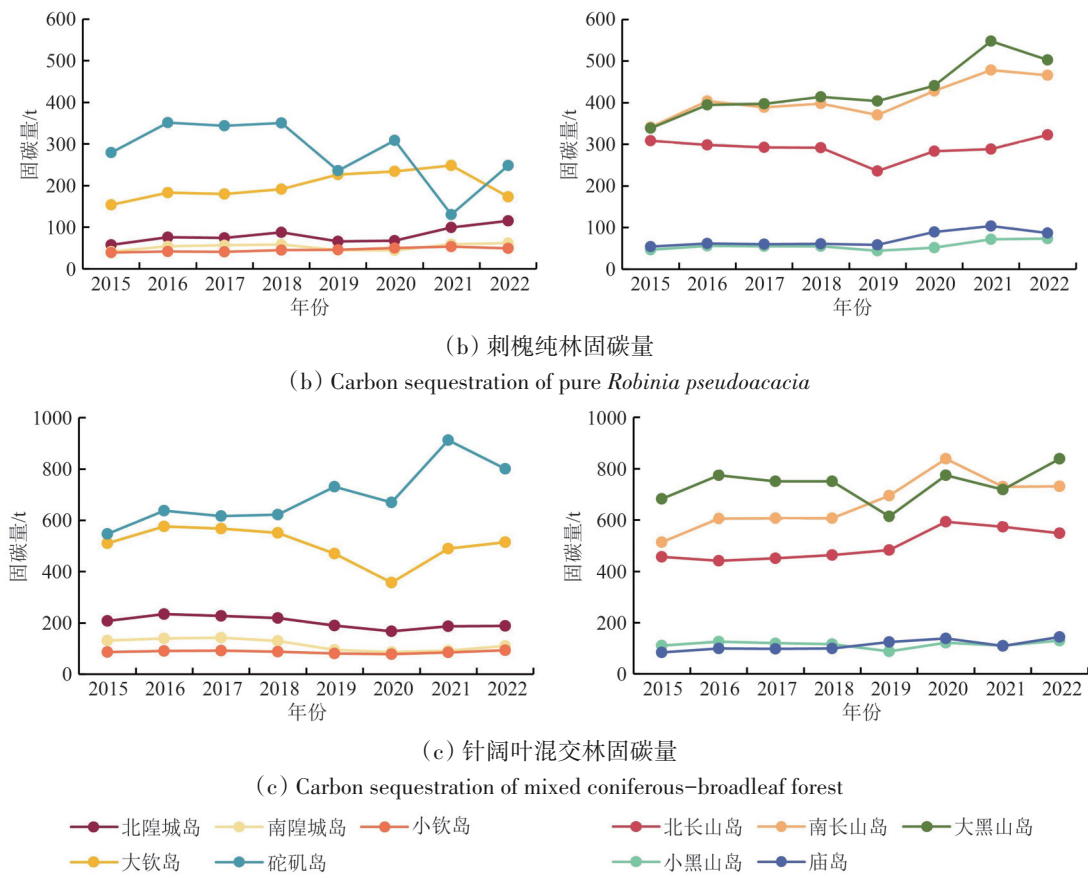


图7 长岛不同岛屿植被固碳变化特征

Fig. 7 Carbon sequestration by vegetation on various islands of Changdao

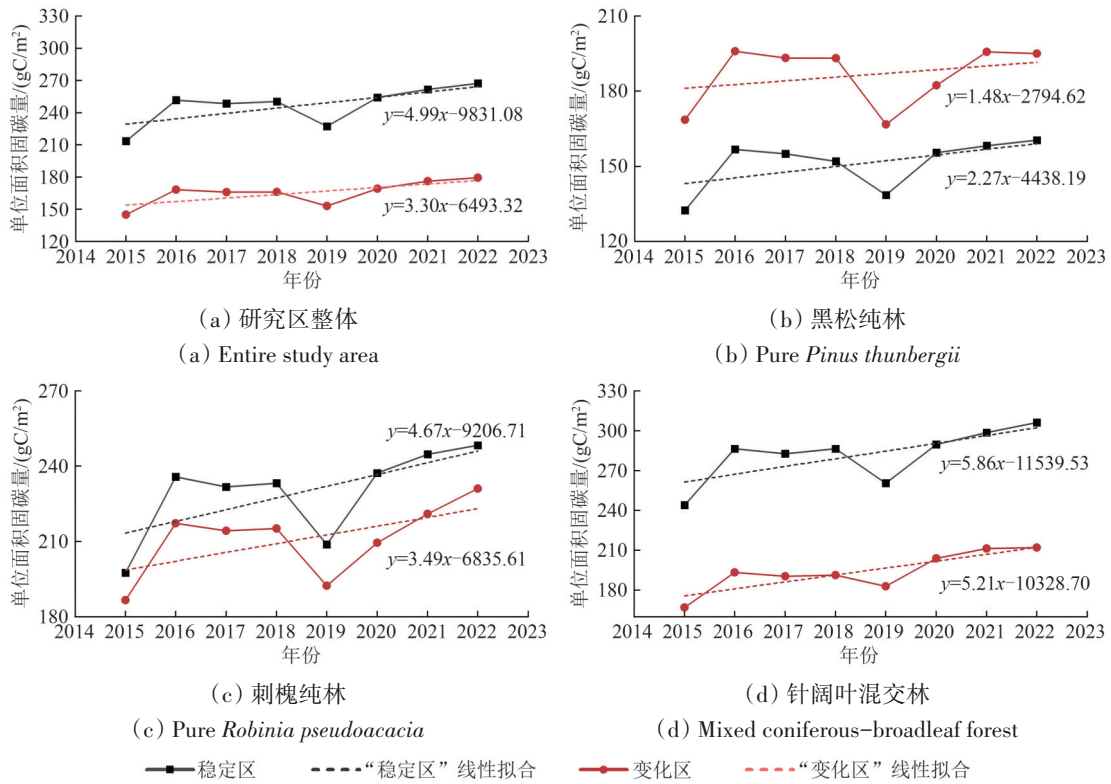


图8 各植被类型“稳定区”与“变化区”固碳能力对比

Fig. 8 Comparison of carbon sequestration capacities between “stable” and “dynamic” zones for various vegetation types

3.2.4 植被固碳量地貌分异

地形通过影响光照及水热条件影响植被分布和生长，并对固碳能力产生影响（窦佳慧等，2024）。植被固碳高程分异特征如图9所示。总体上，植被固碳存在显著的高程分异，随海拔升高而增加，到达一定高度阈值后趋于平稳（但波动显著）。长岛全域在海拔80 m和120 m位置有较为显著的变化，由持续快速上升转为平稳波动，继而变为剧烈波动。但是不同地貌类型之间，在值域和分异程度方面存在差异：平原区值域0—150 gC/m²，随海拔高

度增加而波动攀升，总体接近于线性增长；而且在海拔20 m以下区域两个年份的差异微弱，海拔超过20 m的区域2022年植被固碳显著高于2015年。丘陵区值域0—250 gC/m²，随海拔高度上升而波动上升，但在40—50 m区域有明显的“下跌”。山地区值域120—250 gC/m²，在40—120 m区域总体呈现水平波动特征，2015年和2022年曲线分别在175 gC/m²和215 gC/m²上下波动，海拔超过120 m的区域波动幅度显著增大。

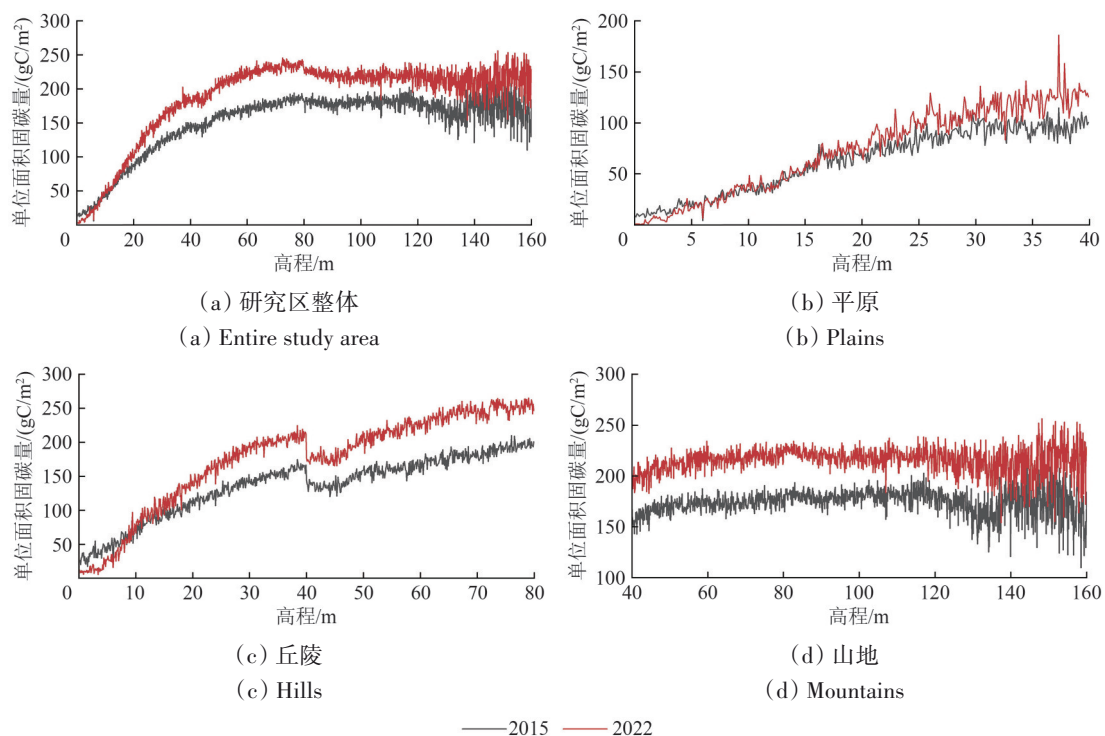


图9 长岛植被固碳的高程分异特征

Fig. 9 Elevation differentiation characters of vegetation carbon sequestration in Changdao

适宜的坡度能够减少水土流失，促进植物光合作用和生物量积累，提高碳固定能力（姚楠等，2023）。植被固碳坡度分异特征如图10所示。总体上，植被固碳存在显著的坡度分异，随坡度升高呈现“增—减—增”趋势，10°—30°区间植被固碳能力最显著，约在20°出现峰值；2022年坡度分异特征较2015年更剧烈。不同地貌类型之间，在值域和波动程度方面的差异也非常突出：平原区集中于10—150 gC/m²，随坡度增加而波动增加，但变化幅度不大。丘陵区在10°—30°区间数值比较稳定，集中于70—200 gC/m²，2015年和2022年峰值均在15.6°区域，分别为160.29 gC/m²和208.99 gC/m²。山

地区植被固碳随坡度上升而有轻微下降趋势，坡度40°以下区域总体较稳定，集中于180—220 gC/m²；时间变化显著，与2015年相比，2022年总体较高。

3.3 造林增汇潜力特征

造林适宜性综合指数的值域为17.96—81.98，将其划分为高度适宜、中度适宜、一般适宜、临界适宜和不适宜5个等级（图11），面积占比分别为15.02%、25.28%、29.06%、20.50%和10.14%。高度适宜区主要分布在砣矶岛、北隍城岛和南隍城岛，土壤含水量较高，坡向和坡度适宜，人口密度低，人类活动干扰较小，具备一定的道路基础

设施, 满足造林工程所需。中度适宜区主要分布在砣矶岛和北长山岛, 地形条件适宜且交通较为通达。一般适宜区面积最大, 主要呈条带状分布在大钦岛、大黑山岛及南北长山岛, 受地形条件制约, 坡度和坡向是主要限制性因素。临界适宜和不适宜

宜区主要分布在大钦岛沿岸、大黑山岛及南长山岛的西北区域。其中, 大钦岛和大黑山岛的低值区域主要受交通条件限制, 造林工程运输成本高, 南长山岛的低值区主要受土壤含水量等因素制约。

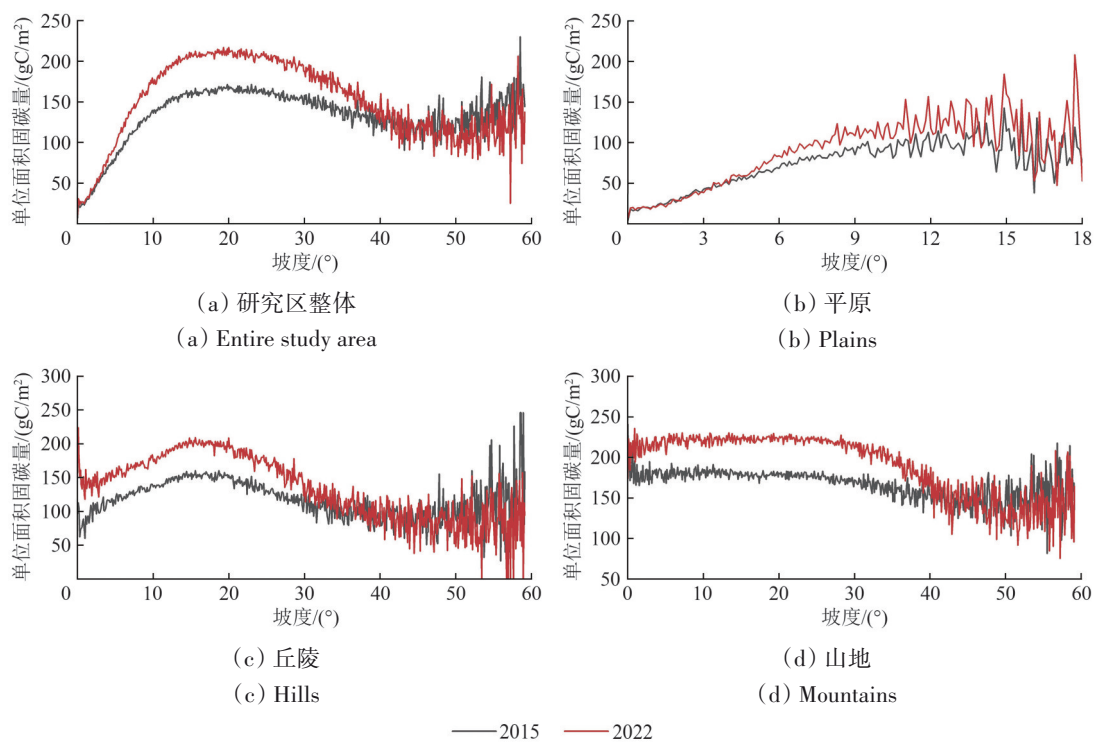


图 10 长岛植被固碳的坡度分异特征

Fig. 10 Slope differentiation characters of vegetation carbon sequestration in Changdao

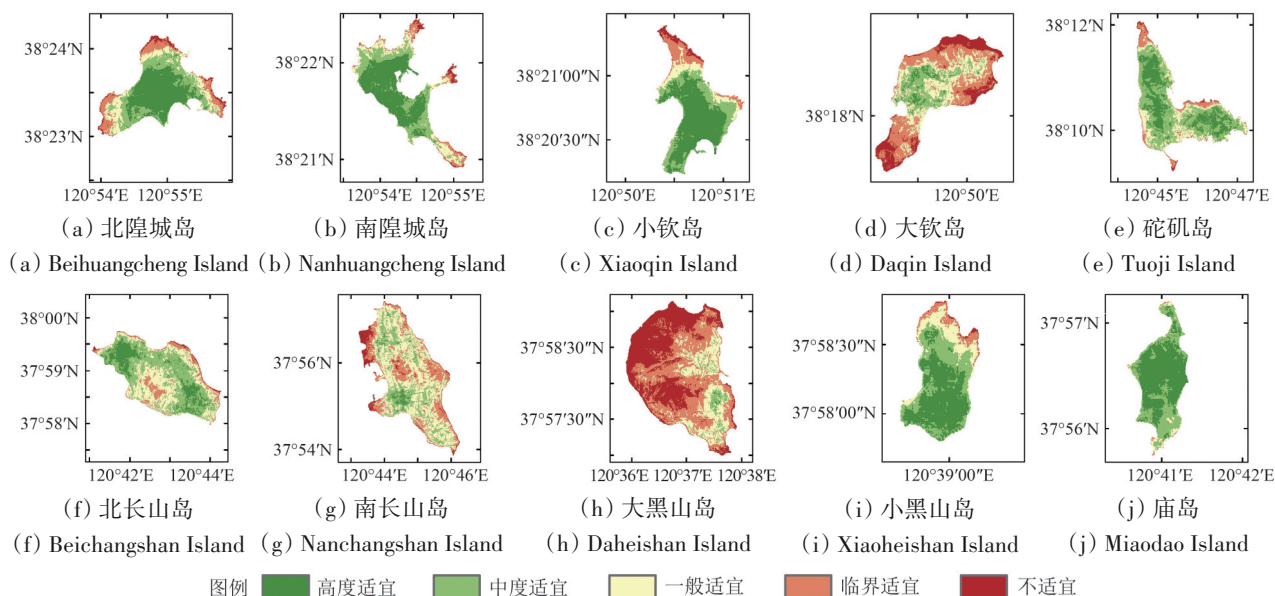


图 11 造林适宜性综合指数空间分布

Fig. 11 Spatial characters of afforestation suitability index

4 讨论

影响长岛植被固碳变化的因素值得进一步探究。从上述结果分析来看（图5（a）、图8），在研究时段内长岛植被固碳能力呈现“增—减—增”的趋势，以2016年和2019年为分界分为3个发展阶段。这种变化特征主要与近年来发布的生态政策紧密相关：长岛在“十二五”（2011年—2015年）实施了生态建设项目，拆除破旧建筑、建设岛屿护岸和防潮堤、实施岛屿和区域综合整治修复等，增加了岛屿林草覆盖率，提升了植被固碳能力。2015年起山东省松材线虫病进入快速扩散蔓延期，沿海地区爆发尤为严重（李好男等，2024）；2019年前疫区主要分布在南、北长山岛，面积达327 hm²，而2019年—2020年迅速扩张，超过了1300 hm²（李建东等，2022）。松材线虫病是导致研究期间黑松纯林面积剧烈退缩的主要原因（图12）。此外，气候因素会加速松材线虫病的发生及蔓延，尤其是遭遇极端气候（低温、干旱、风暴潮），例如，2019年严重干旱高温导致松材线虫病在烟台局部地区爆发，加剧了植被退化（山东省自然资

源厅，2020）。海岛淡水资源匮乏，有研究表明长岛秋季降水量呈现减少趋势（吴出尘，2024），干旱胁迫问题较为突出。长岛2019年NDVI均值（0.53）明显低于2020年（0.61），这也间接表明上述原因（气候变化、干旱、病虫害）等对植被固碳量的影响。黑松树龄老化也是影响植被固碳能力下降的重要原因，树木衰老导致对极端气候的抵抗力下降，树木死亡率大增（Wang等，2017）。人类干预被视为缓解植被病虫害、遏制生态退化的重要手段。2020年，长岛部署森林病虫害治理工作，特别强调松材线虫病的防控；2021年发布《烟台市“三线一单”生态环境分区管控方案》进一步明确生态空间最小面积的要求。这些政策措施短时期内促进了森林面积的恢复和固碳能力的提升。假设2015年—2022年间植被面积及类型均保持不变、植被长势良好、固碳能力增强，则2022年总固碳量理论上可达到7608.55 tC，然而实际计算结果仅为7455.45 tC，这表明气候变化和人为措施使植被的生长状况有所改善，但尚未完全抵消病虫害侵袭和树龄老化等因素的负面作用。

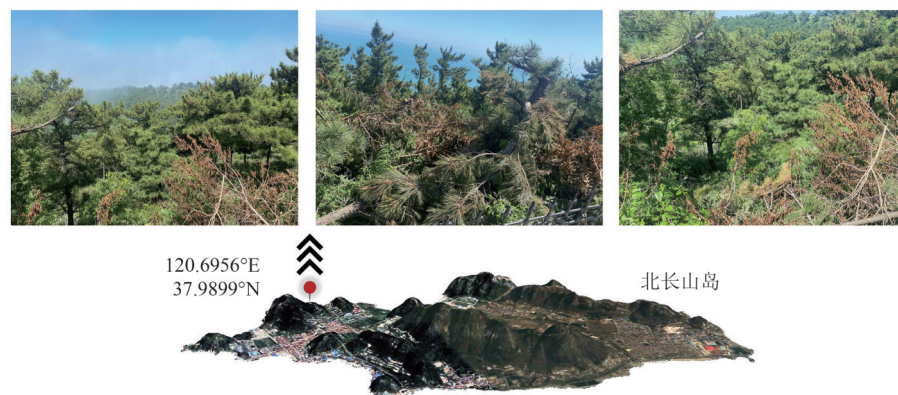


图12 北长山岛大头山区域病虫害导致黑松死亡

Fig. 12 The death of *Pinus thunbergii* caused by *Bursaphelenchus xylophilus* in Datou Mountain area of Bei Changshan Island

《长岛国际零碳岛发展规划（2023—2035年）》（山东省发展和改革委员会，2024）的发布标志着长岛在推进全球意义的海岛生态实践中迈出关键步伐，该规划旨在通过包括植树造林在内的多元化策略促进全岛温室气体净零排放目标的实现，其中，针对林业碳汇能力提升，计划近、中和远期分别造林57 hm²、81 hm²、122 hm²，林业碳汇能力分别达到2.73×10⁴ tCO₂（7445.46 tC）、2.77×10⁴ tCO₂（7554.55 tC）和2.81×10⁴ tCO₂（7663.64 tC）。在此

背景下，本文兼顾造林和固碳能力提升措施，对远期的造林增汇潜力做展望性分析。结果如表7所示：黑松纯林面积增加62.21 hm²，固碳增汇量为129.55 tC，其中平原和丘陵区域增长面积较大，分别为30.75 hm²和26.40 hm²；刺槐纯林面积增加15.90 hm²，固碳增汇量为36.22 tC，平原区域增加9.14 hm²；针阔混交林固碳增汇量最高，达151.23 tC，面积需增加58.77 hm²，以低山区域增长面积最大31.93 hm²。

表7 近—中—远期长岛植被面积增长及固碳增汇量目标

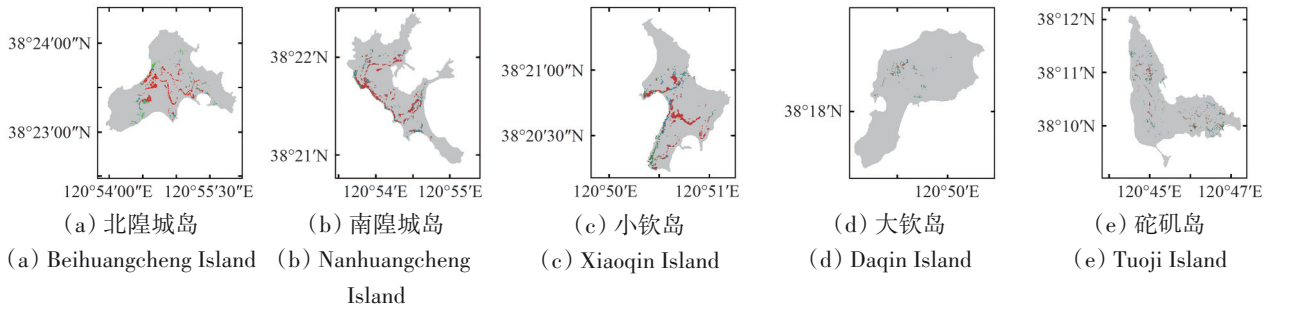
Table 7 Short/medium/long term targets for vegetation area growth and carbon sequestration in Changdao

植被	地貌	现状(2022年)		近期		中期		远期		总增汇量 tC
		面积/hm ²	固碳量/tC	面积/hm ²	固碳量/tC	面积/hm ²	固碳量/tC	面积/hm ²	固碳量/tC	
黑松	平原	14.85	20.62	31.10	43.19	36.60	50.83	45.60	63.33	42.71
	丘陵	33.47	88.73	52.37	138.84	54.87	145.47	59.87	158.73	69.99
	低山	186.29	620.26	187.85	625.45	189.35	630.44	191.35	637.10	16.85
刺槐	平原	137.38	245.48	140.52	251.09	141.52	252.88	146.52	261.82	16.33
	丘陵	339.90	884.93	340.96	887.69	341.46	888.99	342.46	891.59	6.66
	低山	636.93	2004.56	638.13	2008.34	639.13	2011.49	641.13	2017.78	13.22
针阔混交林	平原	256.81	397.40	259.55	401.64	261.05	403.96	263.05	407.06	9.66
	丘陵	469.25	1105.08	474.85	1118.27	479.85	1130.04	489.85	1153.59	48.51
	低山	496.63	1447.44	511.06	1489.49	518.56	1511.35	528.56	1540.50	93.06
灌草丛		568.25	640.94	560.62	632.34	558.12	629.52	553.12	623.88	-17.07
黑松		234.61	729.62	271.32	807.49	280.82	826.75	296.82	859.16	129.55
刺槐		1114.21	3134.97	1119.61	3147.12	1122.11	3153.35	1130.11	3171.19	36.22
针阔混交林		1222.69	2949.92	1245.46	3009.40	1259.46	3045.36	1281.46	3101.15	151.23
合计		3139.76	7455.45	3197.01	7596.34	3220.51	7654.98	3261.51	7755.37	299.93

利用造林适宜性综合指数评估结果，扣除现状（2022年）植被和建成区范围，则近、中、远期植被面积增加目标所对应的造林适宜性指数阈值分别为63.17、61.62和59.61。在不考虑海域航运成本的情况下，聚焦远期目标，则优先造林区（图13）主要分布在北隍城岛、南隍城岛、小钦岛、砣矶岛、北长山岛和小黑山岛，以砣矶岛和北长山岛为主，分别为26.53 hm²和23.46 hm²。实施阶段而言，近期优先造林区主要分布于北隍城岛和南隍城岛，分别为12.25 hm²和11.36 hm²；中、远期优先造林区逐步向南（向砣矶岛和北长山岛）转移，尤其是砣矶岛，面积分别为6.34 hm²和11.3 hm²。本文结果与《长岛国际零碳岛发展规划（2023—2035年）》提出的4大空间布局（北增、南优、内引、外联）总体一致。北五岛未利用地面积较广，潜在可造林区空间充分，同时该区域人口密度和人类活动干扰程度低，因此优先造林区主要集中于北五岛；选择地形和土壤条件适宜且交通可达的区域进行植树造林，能够兼顾成本效益和植被恢复的可持续性。南五岛人口密度较高，宜

在保障生产和生活空间的前提下，重点选择适应性强、生长快且生态功能突出的植被类型，对现有林分结构进行优化和提升。

本研究阐明了长岛植被固碳量的时空动态特征，为植被保护与管理工作提供了科学参考依据。此外，评估适宜造林区域，为长岛“零碳岛”项目规划中实施植被恢复与碳汇增强策略，即通过植树造林等生态工程措施以提升区域碳固定能力，提供了实证支持和决策指导。由于长岛缺乏连续年份的植被固碳速率实测数据，且相同区域的可比研究较少，制约了碳固存能力的精确评估。目前仅能参考采用InVEST模型（殷丽婷，2020）计算的2017年长岛单位面积固碳量（339 gC/m²），与本研究结果（220.63 gC/m²）数值相近。然而，二者在方法体系（InVEST模型计算/NDVI修正）、植被分类（土地利用类型/植被类型）及数据分辨率（30 m/10 m）等方面存在显著差异，结果可比性有限。未来需加强长岛植被固碳速率的长期监测，结合多方法进行验证，以优化碳汇管理策略，确保长岛“零碳岛”目标的科学实现。



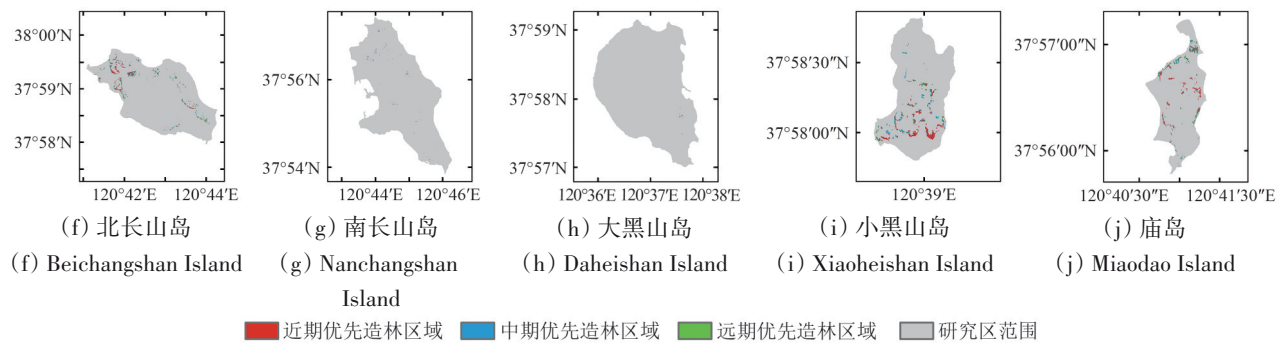


图 13 近/中/远期长岛适宜造林区空间分布

Fig. 13 Spatial distribution of suitable afforestation areas in Changdao in the near/medium/long term

5 结 论

(1) 2015年—2022年长岛植被面积整体呈现退缩趋势。黑松纯林和针阔混交林面积减小，而刺槐纯林和灌草丛面积增长；不同岛屿植被面积变化趋势各异，北五岛植被面积退缩趋势显著；植被类型之间，针阔混交林和刺槐纯林相互转化较为突出；大量灌草丛转化为非林草区，是植被退化的主要表现。混交林相较于纯林更加稳定，针阔混交林面积显著减少，林分结构的稳定性有所降低。

(2) 长岛植被年固碳量呈波动上升趋势，针阔混交林是主要贡献者，占比超过50%；年际增长率排序为：灌草丛>刺槐纯林>针阔混交林>黑松纯林；空间格局方面，植被固碳整体呈现“多核式增长，条带式减弱”的特征，4种林草类型在平原区域均呈现增长趋势；不同岛屿间，南长山岛植被总固碳量最大，庙岛的单位面积固碳量最大，是植被长势最好的岛屿；2015年—2022年间植被“稳定区”和“变化区”的固碳量均呈现“增—减—增”的变化趋势；各植被类型稳定区的固碳能力及其提升均明显优于变化区；2016年和2019年是植被固碳量变化的2个拐点，固碳量变化与生态保护政策和措施的实施密切相关；植被固碳量随海拔升高而增加，到达一定高度阈值后趋于平稳；随坡度升高呈现“增—减—增”的趋势。

(3) 结合实地调查和现有研究成果，影响长岛固碳变化的主要因素为：松材线虫病扩散、极端气候事件发生、干旱胁迫及树龄老化等环境问题；造林增汇潜力方面，高度适宜造林区域主要分布在砣矶岛、北隍城岛和南隍城岛，近期优先造林区主要分布在北五岛区域。

志 谢 野外调查过程得到了长岛海洋生态文明综合试验区经济发展局的大力支持，在此表示衷心的感谢！

参考文献 (References)

- Ai P. 2012. Study on the Soil Physical and Chemical Characteristics in Coastal Shelter Forest of the Northern Jiangsu Province. Nanjing: Nanjing Forestry University (艾鹏. 2012. 苏北沿海防护林造林地土壤理化特性研究. 南京: 南京林业大学)
- Chi Y, Shi H H, Wang X L, Li J and Feng A P. 2015. The spatial distribution and impact factors of net primary productivity in the island ecosystem of five southern islands of Miaodao Archipelago. *Acta Ecologica Sinica*, 35(24): 8094-8106 (池源, 石洪华, 王晓丽, 李捷, 丰爱平. 2015. 庙岛群岛南五岛生态系统净初级生产力空间分布及其影响因子. *生态学报*, 35(24): 8094-8106) [DOI: 10.5846/stxb201405040880]
- Chinese Academy of Environmental Planning. 2020. Ministry of ecology environment issued "the technical guideline on gross ecosystem product (GEP)" [EB/OL]. http://www.caep.org.cn/zclm/sthjyjjhszx/zxdt_21932/202010/t20201029_805419.shtml (生态环境部环境规划院. 2020. 生态环境部发布《陆地生态系统生产总值核算技术指南》[EB/OL]. http://www.caep.org.cn/zclm/sthjyjjhszx/zxdt_21932/202010/t20201029_805419.shtml)
- Department of Natural Resources of Shandong Province. 2020. Assessment of forest pest incidence in Shandong province for the first half of 2020 and projections for the second half [EB/OL]. http://www.shandong.gov.cn/art/2020/7/9/art_100221_9279828.html (山东省自然资源厅. 2020. 山东省2020年上半年林业有害生物发生情况及下半年发生趋势预测[EB/OL]. http://www.shandong.gov.cn/art/2020/7/9/art_100221_9279828.html)
- Dou J H, Liang Y, Huai B J, Wu M M, Liu B, Ma T X and Wang Y. 2024. Productivity and carbon budget dynamics of forests under different topographic conditions on Tibetan Plateau. *Chinese Journal of Ecology*, 43(6): 1521-1530 (窦佳慧, 梁宇, 怀保娟, 吴苗苗, 刘波, 马天啸, 王耀. 2024. 不同地形条件下青藏高原森林生产力和碳收支动态. *生态学杂志*, 43(6): 1521-1530) [DOI: 10.

- 13292/j.1000-4890.202406.048]
- Fang J Y, Chen A P, Peng C H, Zhao S Q and Ci L. 2001. Changes in forest biomass carbon storage in China between 1949 and 1998. *Science*, 292(5525): 2320-2322 [DOI: 10.1126/science.1058629]
- Friedl M A, Sulla-Menashé D, Tan B, Schneider A, Ramankutty N, Sibley A and Huang X M. 2010. MODIS Collection 5 global land cover: algorithm refinements and characterization of new datasets. *Remote Sensing of Environment*, 114(1): 168-182 [DOI: 10.1016/j.rse.2009.08.016]
- Gao S C, Chen Y Q, Chen Z Z, Lei J R and Wu T T. 2023. Carbon storage and its spatial distribution characteristics of forest ecosystems in Hainan Island, China. *Acta Ecologica Sinica*, 43(9): 3558-3570 (高述超, 陈毅青, 陈宗铸, 雷金睿, 吴庭天. 2023. 海南岛森林生态系统碳储量及其空间分布特征. *生态学报*, 43(9): 3558-3570) [DOI: 10.5846/stxb202207051909]
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China and Standardization Administration of the People's Republic of China. 2007. GB/T 21010-2017 Current and use classificatoin. Beijing: Standards Press of China (中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 2007. GB/T 21010-2007 土地利用现状分类. 北京: 中国标准出版社)
- Hu T Y, Li X C, Gong P, Yu W C and Huang X C. 2020. Evaluating the effect of plain afforestation project and future spatial suitability in Beijing. *Science China Earth Sciences*, 63(10): 1587-1598 (胡腾云, 李雪草, 宫鹏, 喻文承, 黄晓春. 2020. 北京市平原造林遥感监测与未来空间适宜性评价模拟. *中国科学: 地球科学*, 50(10): 1455-1467) [DOI: 10.1360/SSTe-2019-0286]
- Li H N, Yu L F, Zhan Z Y, Chi S K, Ren L L and Luo Y Q. 2024. Effects of stand and landscape level factors on the occurrence of pine wilt disease — a case study of pine forest in Weihai, Shandong Province. *Journal of Environmental Entomology*, 46(3): 616-624 (李好男, 俞琳锋, 詹钟易, 迟世宽, 任利利, 骆有庆. 2024. 林分和景观水平因子对松材线虫病发生的影响——以山东威海地区松林为例. *环境昆虫学报*, 46(3): 616-624) [DOI: 10.3969/j.issn.1674-0858.2024.03.8]
- Li J D, Liu C J, Zhou Y, Han X T and Teng Y H. 2022. Outbreak and control of pine wood nematode disease in Yantai Changdao comprehensive test area. *Shaanxi Forest Science and Technology*, 50(2): 137-140 (李建东, 刘成杰, 周瑶, 韩雪涛, 滕元辉. 2022. 长岛综合试验区松材线虫病发生及防治对策. *陕西林业科技*, 50(2): 137-140) [DOI: 10.12340/sxlykj202202028]
- Liang J T, Chen C, Sun W W, Yang G, Liu Z S and Zhang Z L. 2023. Spatio-temporal land use/cover change dynamics in Hangzhou Bay, China, using long-term Landsat time series and GEE platform. *National Remote Sensing Bulletin*, 27(6): 1480-1495 (梁锦涛, 陈超, 孙伟伟, 杨刚, 刘志松, 张自力. 2023. 长时序 Landsat 和 GEE 云平台的杭州湾土地利用/覆被变化时空格局演变. *遥感学报*, 27(6): 1480-1495) [DOI: 10.11834/jrs.20232614]
- Lieth H and Whittaker R H. 1975. *Primary Productivity of the Biosphere*. Heidelberg: Springer [DOI: 10.1007/978-3-642-80913-2]
- Liu S N, Zhou T, Wei L Y and Shu Y. 2012. The spatial distribution of forest carbon sinks and sources in China. *Chinese Science Bulletin*, 57(14): 1699-1707 [DOI: 10.1007/s11434-012-4998-1]
- Loveland T R, Reed B C, Brown J F, Ohlen D O, Zhu Z, Yang L and Merchant J W. 2000. Development of a global land cover characteristics database and IGBP DISCover from 1 km AVHRR data. *International Journal of Remote Sensing*, 21(6/7): 1303-1330 [DOI: 10.1080/014311600210191]
- Ma X F and Tan J X. 2023. Impact of traffic accessibility on the resilience of tourism environment system and spatial spillover effects in Xiangxi Area. *Scientia Geographica Sinica*, 43(2): 291-300 (麻学锋, 谭佳欣. 2023. 湘西地区交通可达性对旅游环境系统韧性的影响及空间溢出效应. *地理科学*, 43(2): 291-300) [DOI: 10.13249/j.cnki.sgs.2023.02.011]
- Mo L D, Zohner C M, Reich P B, Liang J J, De Miguel S, Nabuurs G J, Renner S S, Van Den hoogen J, Araza A, Herold M, Mirzagholi L, Ma H Z, Averill C, Phillips O L, Gamarra J G P, Hordijk I, Routh D, Abegg M, Adou Yao Y C, Alberti G, Almeyda Zambrano A M, Alvarado B V, Alvarez-Dávila E, Alvarez-Loayza P, Alves L F, Amaral I, Ammer C, Antón-Fernández C, Araujo-Murakami A, Arroyo L, Avitabile V, Aymard G A, Baker T R, Balazy R, Banki O, Barroso J G, Bastian M L, Bastin J F, Birgazzi L, Birnbaum P, Bitariho R, Boeckx P, Bongers F, Bouriaud O, Brancalion P H S, Brandl S, Brearley F Q, Brienen R, Broadbent E N, Bruelheide H, Bussotti F, Cazzolla Gatti R, César R G, Cesljar G, Chazdon R L, Chen H Y H, Chisholm C, Cho H, Cienciala E, Clark C, Clark D, Colletta G D, Coomes D A, Cornejo Valverde F, Corral-Rivas J J, Crim P M, Cumming J R, Dayanandan S, De Gasper A L, Decuyper M, Derroire G, Devries B, Djordjevic I, Dolezal J, Dourdain A, Engone Obiang N L, Enquist B J, Eyre T J, Fandohan A B, Fayle T M, Feldpausch T R, Ferreira L V, Finér L, Fischer M, Fletcher C, Frizzera L, Gianelle D, Glick H B, Harris D J, Hector A, Hemp A, Hengeveld G, Hérault B, Herbohn J L, Hillers A, Honorio Coronado E N, Hui C, Ibanez T, Imai N, Jagodziński A M, Jaroszewicz B, Johannsen V K, Joly C A, Jucker T, Jung I, Karminov V, Kartawinata K, Kearsley E, Kenfack D, Kennard D K, Kepfer-Rojas S, Keppel G, Khan M L, Killeen T J, Kim H S, Kitayama K, Köhl M, Korjus H, Kraxner F, Kucher D, Laarmann D, Lang M, Lu H, Lukina N V, Maitner B S, Malhi Y, Marcon E, Marimon B S, Marimon-Junior B H, Marshall A R, Martin E H, Meave J A, Melo-Cruz O, Mendoza C, Mendoza-Polo I, Miscicki S, Merow C, Mendoza A M, Moreno V S, Mukul S A, Mundhenk P, Nava-Miranda M G, Neill D, Neldner V J, Nevenic R V, Ngugi M R, Niklaus P A, Oleksyn J, Ontikov P, Ortiz-Malavasi E, Pan Y D, Paquette A, Parada-Gutierrez A, Parfenova E I, Park M, Parren M, Parthasarathy N, Peri P L, Pfautsch S, Picard N, Piedade M T F, Piotto D, Pitman N C A, Poulsen A D, Poulsen J R, Pretzsch H, Arevalo F R, Restrepo-Correa Z, Rodeghiero M, Rolim S G, Roopsind A, Rovero F, Rutishauser E, Saikia P, Salas-Eljatib C, Saner P, Schall P, Schelhaas M J, Schepaschenko D, Scherer-Lorenzen M, Schmid B, Schöngart J, Searle E B, Seben V, Serradiaz J M, Sheil D, Shvidenko A Z, Silva-Espejo J E, Silveira M, Singh J, Sist P, Slik F, Sonké B, Souza A F, Stereńczak K J, Sven-

- ning J C, Svoboda M, Swanepoel B, Targhetta N, Tchebakova N, ter Steege H, Thomas R, Tikhonova E, Umunay P M, Usoltsev V A, Valencia R, Valladares F, van der Plas F, Van Do T, van Nuland M E, Vasquez R M, Verbeeck H, Viana H, Vibrans A C, Vieira S, von Gadow K, Wang H F, Watson J V, Werner G D A, Wiser S K, Wittmann F, Woell H, Wortel V, Zagt R, Zawila-Niedzwiecki T, Zhang C Y, Zhao X H, Zhou M, Zhu Z X, Zo-Bi I C, Gann G D and Crowther T W. 2023. Integrated global assessment of the natural forest carbon potential. *Nature*, 624(7990): 92-101 [DOI: 10.1038/s41586-023-06723-z]
- National Bureau of Statistics and National Development and Reform Commission. 2022. Ecological Product Gross Value Accounting Standards. Beijing: People's Publishing House (国家统计局, 国家发展和改革委员会. 2022. 生态产品总值核算规范. 北京: 人民出版社)
- Ning X G, Chang W T, Wang H, Zhang H C and Zhu Q D. 2022. Extraction of marsh wetland in Heilongjiang Basin based on GEE and multi-source remote sensing data. *National Remote Sensing Bulletin*, 26(2): 386-396 (宁晓刚, 常文涛, 王浩, 张翰超, 朱乾德. 2022. 联合 GEE 与多源遥感数据的黑龙江流域沼泽湿地信息提取. *遥感学报*, 26(2): 386-396) [DOI: 10.11834/jrs.20200033]
- Piao S L, He Y, Wang X H and Chen F H. 2022. Estimation of China's terrestrial ecosystem carbon sink: methods, progress and prospects. *Science China Earth Sciences*, 65(4): 641-651 (朴世龙, 何悦, 王旭辉, 陈发虎. 2022. 中国陆地生态系统碳汇估算: 方法、进展、展望. *中国科学: 地球科学*, 52(6): 1010-1020) [DOI: 10.1360/SSTe-2021-0197]
- Ren S Y, Jing H C, Qian X X and Liu Y H. 2024. Spatial and temporal coordinated development research on ecosystem services and human well-being in the typical pastoral area of the Qinghai-Tibet Plateau. *Journal of Geographical Sciences*, 34(2): 252-288 [DOI: 10.1007/s11442-024-2204-4]
- Seddon N. 2022. Harnessing the potential of nature-based solutions for mitigating and adapting to climate change. *Science*, 376(6600): 1410-1416 [DOI: 10.1126/science.abn9668]
- Sedjo R A. 1993. The carbon cycle and global forest ecosystem. *Water, Air, and Soil Pollution*, 70(1/4): 295-307 [DOI: 10.1007/BF01105003]
- Srinet R, Nandy S, Patel N R, Padalia H, Watham T, Singh S K and Chauhan P. 2023. Simulation of forest carbon fluxes by integrating remote sensing data into biome-BGC model. *Ecological Modelling*, 475: 110185 [DOI: 10.1016/j.ecolmodel.2022.110185]
- Su Y, Zhang W F, Liu B J, Tian X, Chen S X, Wang H Y and Mao Y W. 2022. Forest carbon flux simulation using multi-source data and incorporation of remotely sensed model with process-based model. *Remote Sensing*, 14(19): 4766 [DOI: 10.3390/rs14194766]
- Sultanova R, Odintsov G, Martynova M and Mustafin R. 2023. Assessment of carbon reserves and biomass of forest ecosystems in the southern urals. *International Journal of Environmental Research*, 2023, 17(2): 26 [DOI: 10.1007/s41742-023-00516-y]
- Sun Z Y, Guan J, Su A F, Cao R F, Wang Z M, Qu H H, Cao G Y, Li H T, Yang L J and Yang C X. 2020. Function evaluation of carbon fixation and oxygen release of forest ecosystem based on GIS—a case study of Yantai city. *Forestry and Ecological Sciences*, 35(4): 405-413 (孙中元, 官静, 苏爱锋, 曹蓉芬, 王正茂, 曲宏辉, 曹国玉, 李洪涛, 杨丽君, 杨春欣. 2020. 基于 GIS 的森林生态系统固碳释氧功能评估——以烟台市为例. *林业与生态科学*, 35(4): 405-413) [DOI: 10.13320/j.cnki.hjfor.2020.0056]
- Tian D F, Fan W J and Ren H Z. 2020. Progress of fraction of absorbed photosynthetically active radiation retrieval from remote sensing data. *National Remote Sensing Bulletin*, 24(11): 1307-1324 (田定方, 范闻捷, 任华忠. 2020. 植被光合有效辐射吸收比率遥感研究进展. *遥感学报*, 24(11): 1307-1324) [DOI: 10.11834/jrs.20208498]
- Wang F, Zhu W C, Liu X H, Takayama N and Zhang J Q. 2017. Wilt of *Pinus thunbergii* induced by a succession of extreme meteorological events. *Ecological Informatics*, 42: 24-31 [DOI: 10.1016/j.ecoinf.2017.09.003]
- Wang J. 2015. Research on Forest Restoration Patterns of Yangtze River Basin Based on Land Ecological Suitability Evaluation. Wuhan: Huazhong Agricultural University (王娟. 2015. 基于土地生态适宜性评价的长江流域森林恢复格局研究. 武汉: 华中农业大学)
- Wang J B, Zhang J, Ma S and Ren G B. 2019. Estimation of vegetation carbon storage in the Yellow River estuary wetland based on GF-1 WVF satellite image. *Advances in Marine Science*, 37(1): 75-83 (王建步, 张杰, 马毅, 任广波. 2019. 基于 GF-1WVF 的黄河口湿地植被碳储量估算研究. *海洋科学进展*, 37(1): 75-83) [DOI: 10.3969/j.issn.1671-6647.2019.01.008]
- Wang R Y, Mo X Y, Ji H, Zhu Z, Wang Y S, Bao Z L and Li T H. 2024. Comparison of the CASA and InVEST models' effects for estimating spatiotemporal differences in carbon storage of green spaces in megacities. *Scientific Reports*, 14(1): 5456 [DOI: 10.1038/s41598-024-55858-0]
- Wang Z S, Yang H Q and Zhang H. 2025. Assessing the potential and cost-effectiveness of forestation for carbon sequestration in China: a reexamination from the perspectives of economic feasibility and social optimality. *Issues in Agricultural Economy*, (2): 111-125 (汪宗顺, 杨红强, 张寒. 2025. 中国造林增汇潜力及成本有效性——基于经济可行与社会最优视角的再审视. *农业经济问题*, (2): 111-125) [DOI: 10.13246/j.cnki.iae.20240702.001]
- Waring R H and Running S W. 1998. *Forest Ecosystems: Analysis at Multiple Scales*. San Diego: Academic Press
- Wei X L, Ma J, Liu E B and You J L. 2008. Suitability evaluation of tree species for ecological and landscape purpose. *Journal of Northwest Forestry University*, 23(6): 207-212 (韦新良, 马俊, 刘恩斌, 尤建林. 2008. 生态景观林树种选择适宜性评价技术研究. *西北林学院学报*, 23(6): 207-212)
- Wu C C. 2024. The Current Situation and Factors Analysis of Widespread Death of Black Pine Trees in Changdao, Shandong. Jinan: Shandong Normal University (吴出生. 2024. 山东长岛黑松大面积死亡的现状及影响因素分析. 济南: 山东师范大学) [DOI: 10.27280/d.cnki.gsdsu.2024.001879]
- Xu H, Huang T, Liu W and Wang H. 2022. Research on spatial distributions and accessibility of scenic areas in the Yangtze River Delta. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Science Edition)*,

- 46(6): 294-303 (许浩, 黄婷, 刘伟, 王浩. 2022. 长三角风景名胜空间分布与可达性研究. 南京林业大学学报(自然科学版), 46(6): 294-303) [DOI: 10.12302/j.issn.1000-2006.202107010]
- Xu H, Yue C and Piao S L. 2023. Future forestation in China should aim to align the temporal service window of the forest carbon sink with the “carbon neutrality” strategy. *Science China Earth Sciences*, 66(12): 2971-2976 (徐浩, 岳超, 朴世龙. 2023. 科学规划植树造林把握森林碳汇对“碳中和”战略的服务窗口期. 中国科学: 地球科学, 53(12): 3010-3014) [DOI: 10.1360/SSTe-2023-0203]
- Xu J T and Yi Y Y. 2022. Nature—based solutions in meeting China’s dual—carbon goal: the potential of forest and policy needs. *Issues in Agricultural Economy*, (9): 11-23 (徐晋涛, 易媛媛. 2022. “双碳”目标与基于自然的解决方案: 森林碳汇的潜力和政策需求. 农业经济问题, (9): 11-23) [DOI: 10.13246/j.cnki.iae.20220913.001]
- Yang J and Huang X. 2021. The 30 m annual land cover dataset and its dynamics in China from 1990 to 2019. *Earth System Science Data*, 13(8): 3907-3925 [DOI: 10.5194/essd-13-3907-2021]
- Yao N, Liu G Q, Yao S B, Jia L, Lin Y, Deng Y J and Hou M Y. 2023. Analysis of carbon sequestration effect of sloping land conversion program in Loess Plateau from the perspective of slope. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition)*, 47(1): 180-188 (姚楠, 刘广全, 姚顺波, 贾磊, 林颖, 邓元杰, 侯孟阳. 2023. 基于坡度视角的黄土高原退耕还林(草)工程碳汇效应分析. 南京林业大学学报(自然科学版), 47(1): 180-188) [DOI: 10.12302/j.issn.1000-2006.202111033]
- Yi H J, Zhang X P, He L, Zou Y D, Lyu D, Xu X M, He J, Wang Y C and Tian Q L. 2022. Vegetation restoration potential and land use change in different geomorphological areas of the Loess Plateau. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 38(18): 255-263 (易海杰, 张晓萍, 何亮, 邹亚东, 吕渡, 许小明, 贺洁, 王祎宸, 田起隆. 2022. 黄土高原不同地貌类型区植被恢复潜力及其土地利用变化. 农业工程学报, 38(18): 255-263) [DOI: 10.11975/j.issn.1002-6819.2022.18.028]
- Yin L T. 2020. Typical terrestrial ecosystem services of Miaodao Archipelago based on InVEST. Yantai: Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences (殷丽婷. 2020. 基于InVEST模型的庙岛群岛典型陆域生态系统服务研究. 烟台: 中国科学院大学(中国科学院烟台海岸带研究所)) [DOI: 10.27841/d.cnki.gytha.2020.000004]
- Yu G R, Hao T X and Zhu J X. 2022. Discussion on action strategies of China’s carbon peak and carbon neutrality. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 37(4): 423-434 (于贵瑞, 郝天象, 朱剑兴. 2022. 中国碳达峰、碳中和行动方略之探讨. 中国科学院院刊, 37(4): 423-434) [DOI: 10.16418/j.issn.1000-3045.20220121001]
- Yu Z, Liu S R, Li H K, Liang J J, Liu W G, Piao S L, Tian H Q, Zhou G Y, Lu C Q, You W B, Sun P S, Dong Y L, Sitch S and Agathokleous E. 2024. Maximizing carbon sequestration potential in Chinese forests through optimal management. *Nature Communications*, 15(1): 3154 [DOI: 10.1038/s41467-024-47143-5]
- Yuan J F, Zhou H L, Zhang X S and Liu X M. 2024. Estimation and attribution analysis of vegetation carbon sequestration capacity in the Beijing-Tianjin Sandstorm Source Control Area. *Acta Ecologica Sinica*, 44(15): 6731-6743 (袁静芳, 周海丽, 张星烁, 刘晓曼. 2024. 京津风沙源治理区植被固碳能力估算及归因分析. 生态学报, 44(15): 6731-6743) [DOI: 10.20103/j.stxb.202310302354]
- Yuan X T, Wang Q, Yu Z L, Zou T, Liu H, Pang H C, Wang D, Xiao Y, Song Z D, Tang J W, He Q and Yang H S. 2023. High-quality development strategies and approaches in China’s northern islands: case study in Changdao. *Marine Sciences*, 47(6): 52-59 (袁秀堂, 王清, 于正林, 邹涛, 刘辉, 逢浩辰, 王德, 肖扬, 宋祖德, 唐君玮, 贺强, 杨红生. 2023. 北方典型海岛高质量发展策略与途径——以长岛为例. 海洋科学, 47(6): 52-59) [DOI: 10.11759/hyxx20220421002]
- Zellweger F, De Frenne P, Lenoir J, Vangansbeke P, Verheyen K, Bernhard-Römermann M, Baeten L, Hédél R, Berki I, Brunet J, Van Calster H, Chudomelová M, Decocq G, Dirnböck T, Durak T, Heinken T, Jaroszewicz B, Kopecký M, Máliš F, Macek M, Malicki M, Naaf T, Nagel T A, Ortmann-Ajkai A, Petřík P, Piechler R, Reczyńska K, Schmidt W, Standovář T, Świerkosz K, Teleki B, Vild O, Wulf M and Coomes D. 2020. Forest microclimate dynamics drive plant responses to warming. *Science*, 368(6492): 772-775 [DOI: 10.1126/science.aba6880]
- Zhang J P, Jia Z Q, Li Q X, He L X Z, Gao Y, Wang L and Han D. 2023. Spatial structure and stability characteristics of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* mixed forest in Xiaotaojiagou watershed. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 37(3): 121-128 (张佳鹏, 贾志清, 李清雪, 何凌仙子, 高娅, 王陇, 韩东. 2023. 小桃家沟流域混交林空间结构及稳定性研究. 干旱区资源与环境, 37(3): 121-128) [DOI: 10.13448/j.cnki.jalre.2023.070]
- Zhang M, Chen S D, Lin H, Liu Y and Zhang H Q. 2023. Net primary productivity estimation of Dongting Lake wetland. *National Remote Sensing Bulletin*, 27(6): 1454-1466 (张猛, 陈淑丹, 林辉, 刘洋, 张怀清. 2023. 洞庭湖湿地净初级生产力估算研究. 遥感学报, 27(6): 1454-1466) [DOI: 10.11834/jrs.20221744]
- Zhang N X, Wang Y D, Xu Z Q, Fu L H and Zhang F. 2022. The effects of thinning on vegetation carbon storage and carbon fixation rate of spruce plantations in Saihanba area. *Journal of Hebei Agricultural University*, 45(6): 81-87 (张乃暄, 王韵頔, 许中旗, 付立华, 张菲, 程顺. 2022. 抚育间伐对塞罕坝地区云杉人工林碳储量及固碳速率的影响. 河北农业大学学报, 45(6): 81-87) [DOI: 10.13320/j.cnki.jauh.2022.0097]
- Zhang Y and Li X G. 2022. Carbon sink potential of Beijing’s forest under carbon peak and carbon neutrality. *Resources and Industries*, 24(1): 15-25 (张颖, 李晓格. 2022. 碳达峰碳中和目标下北京市森林碳汇潜力分析. 资源与产业, 24(1): 15-25) [DOI: 10.13776/j.cnki.resourcesindustries.20210907.001]
- Zhao M, Shi H H, Chi Y and Ding D W. 2017. The spatial distribution and impact factors of soil properties on the five southern islands of Miaodao Archipelago in China. *Marine Environmental Science*, 36(6): 884-891 (赵鸣, 石洪华, 池源, 丁德文. 2017. 庙岛群岛南五岛土壤性质空间分布及其影响因子. 海洋环境科学, 36(6): 884-891) [DOI: 10.13634/j.cnki.mes.2017.06.014]
- Zhou D C, Hao L, Kim J B, Liu P L, Pan C, Liu Y Q and Sun G. 2019. Potential impacts of climate change on vegetation dynamics and

ecosystem function in a mountain watershed on the Qinghai-Tibet Plateau. *Climatic Change*, 156(1/2): 31-50 [DOI: 10.1007/s10584-019-02524-4]
Zhu N N, Yang B S and Dong Z. 2024. The explicit model of forest

carbon storage based on remote sensing. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 53(1): 36-49 (朱宁宁, 杨必胜, 董震. 2024. 基于遥感的森林碳储量显式计算模型. *测绘学报*, 53(1): 36-49) [DOI: 10.11947/j.AGCS.2024.20230089]

Spatiotemporal dynamics of vegetation carbon sequestration and afforestation potential for carbon sink enhancement : A case study of Changdao Archipelago , China

ZHANG Xueying^{1,2}, HOU Xiyong¹, FAN Guolun³, WANG Futao⁴, WANG Xiaoli¹, LI Dong¹,
SONG Jie^{1,2}, LIU Kai^{1,2}, XU He⁵, GAO Yingxu^{1,2}

1. Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, Yantai 264003, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. The Marine Ecological Civilization Comprehensive Experimental Area of Changdao Economic Development Bureau, Yantai 265800, China;

4. Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China;

5. College of Geography and Environment, Shandong Normal University, Ji'nan 250358, China

Abstract: Islands feature unique geographical characteristics and distinct ecosystems. Analyzing the temporal dynamics of carbon sequestration in island ecosystems is critical for supporting the development of low-carbon and ecological islands. This study uses GF-1 and Sentinel-2 multispectral satellite imagery to classify vegetation types across the Changdao Archipelago. Combined with topographic and geomorphological subdivision data, these datasets were analyzed using a carbon sequestration rate approach to quantify vegetation carbon storage capacity during 2015—2022. The methodology further examines spatiotemporal change patterns, identifies the drivers behind vegetation carbon sink enhancement, and evaluates the potential for afforestation-induced carbon sequestration. Results show the following: (1) From 2015 to 2022, vegetation coverage in Changdao exhibited an overall declining trend. Areas dominated by pure *Pinus thunbergii* stands and mixed forests decreased, while pure *Robinia pseudoacacia* stands and shrublands increased. In the southern area of the North Five Islands, vegetation coverage declined substantially, demonstrating the transition of extensive shrublands to non-forest grasslands, which represents a primary form of vegetation degradation. (2) Interannual vegetation carbon sequestration in Changdao showed a fluctuating but increasing trend, revealing a “multicore growth and banded weakening” spatial pattern. Substantial north-south differences were observed in the inflection points of vegetation carbon sequestration across islands. “Stable zones” of vegetation carbon sequestration exhibited continuous enhancement, with key sequestration inflection points occurring in 2016 and 2019. Additionally, vegetation carbon sequestration demonstrated notable variations with elevation and slope gradients. (3) Key factors that influence carbon sequestration variation included the spread of pine wilt disease, extreme climate events, drought stress, and tree aging. The afforestation suitability index across Changdao ranged from 17.96 to 81.98, with the North Five Islands identified as the priority area for afforestation efforts. This study provides theoretical and empirical support for the development of Changdao as a “zero-carbon island.”

Key words: island city, vegetation types, carbon sequestration, carbon sink enhancement potential, Changdao

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 42176221); Seed Project of Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences (No. YIC-E3518907); Changdao International Carbon-Neutral Island Planning Research Project (No. E391011601)