大湾区城市森林生态系统碳汇价值评估及碳账户建立与实现

童 欣，张 颖*

北京林业大学经济管理学院 北京

【摘要】本论文围绕粤港澳大湾区城市森林碳汇价值评估与碳账户体系建设开展研究，力求寻找一套方法论与实践应用相结合的解决方案。在研究过程中，采用蓄积量转换法构建碳汇测算模型，并引入生物量扩大系数、含碳率等核心参数，对区域内森林碳储量进行全面系统的核算。此外，运用岭回归分析法，结合生产要素与影子价格理论，建立碳汇定价模型，进而完成大湾区森林固碳经济价值量化评估工作。在碳账户构建方面，基于大湾区城市森林管理的独特特点，本研究设计了一个包含数据采集、动态监测及交易核证三大核心功能的碳账户体系基本框架。该框架的核心目标是助力粤港澳大湾区实现碳达峰与碳中和目标，通过构建科学的数据支撑体系与决策建议框架，为区域绿色发展提供切实可行的路径。研究结果显示：在 2004 年至 2023 年期间，大湾区森林年均碳储量达 59109 万吨左右，表明大湾区的碳汇价值有较大的挖掘空间。为满足碳资产管理的实际需求，本研究创新设计了具有大湾区特色的森林碳账户体系，该体系包含三个核心模块：①动态监测模块。通过整合遥感数据与地面监测站数据，实现碳储量季度动态更新，确保数据的时效性与准确性。②交易管理模块。与区域碳交易平台展开对接工作，建立完善的碳汇项目登记与核证流程。③效益评估模块。开发可视化平台，实时展示森林碳汇增量与生态效益，助力科学决策。

【关键词】粤港澳大湾区；城市森林；碳汇价值评估；碳账户体系；生态系统

【基金项目】华南植物资源研发中心技术推广平台科技创新专项-城市森林生物多样性提升技术研究与示范应用项目

【收稿日期】2026 年 8 月 20 日 【出刊日期】2026 年 11 月 20 日 【DOI】10.12208/j.aee.20260011

Assessment of carbon sink value and establishment and realization of carbon account of urban forest ecosystem in great bay area

*Xin Tong, Ying Zhang**

School of Economics and Management, Beijing Forestry University, Beijing

【**Abstract**】This paper focuses on the evaluation of urban forest carbon sink value and construction of carbon account system in the Guangdong Hong Kong Macao Greater Bay Area, aiming to find a solution combining methodology and practical application. In the research process, a carbon sink calculation model was constructed using the accumulation conversion method, and core parameters such as biomass expansion coefficient and carbon content were introduced to comprehensively and systematically account for forest carbon storage in the region. In addition, using ridge regression analysis and combining production factors with shadow price theory, a carbon sequestration pricing model is established to quantitatively evaluate the economic value of forest carbon sequestration in the Greater Bay Area. In terms of carbon account construction, based on the unique characteristics of urban forest management in the Greater Bay Area, this study designs a basic framework for a carbon account system that includes three core functions: data collection, dynamic monitoring, and transaction verification. The core goal of this

作者简介：童欣，女，本科生，主要研究方向：资源环境统计；

*通讯作者：张颖，博士，教授，主要研究方向：资源、生态环境价值评价与核算，区域经济学

framework is to assist the Guangdong Hong Kong Macao Greater Bay Area in achieving carbon peak and carbon neutrality goals. By building a scientific data support system and decision-making suggestion framework, it provides a practical and feasible path for regional green development. The research results show that from 2004 to 2023, the annual average carbon storage of forests reached about 591.09 million tons, indicating that there is still significant room for tapping into the carbon sink value of the Greater Bay Area. To meet the practical needs of carbon asset management, this study innovatively designs a forest carbon account system with characteristics of the Greater Bay Area, which includes three core modules: ① dynamic monitoring module. By integrating remote sensing data with ground monitoring station data, quarterly dynamic updates of carbon storage are achieved to ensure the timeliness and accuracy of the data. ② Transaction management module. Collaborate with regional carbon trading platforms to establish a comprehensive process for registering and verifying carbon sequestration projects. ③ Benefit evaluation module. Develop a visualization platform to display real-time forest carbon sequestration increment and ecological benefits, and assist in scientific decision-making.

【Keywords】Guangdong Hong Kong Macao Greater Bay Area; Urban forests; Carbon sequestration value assessment; Carbon account system; Ecosystem

1 引言

气候变化正导致环境问题日益加剧，国际社会普遍认同需通过切实措施降低碳排放。多数国家积极推动以“低排放、高能效”为特征的低碳革命，对技术、产业等诸多方面进行升级调整以适应新形势下的环保政策。《巴黎协定》明确提出国际社会应将全球气温升幅限制在 2℃以下。同时，各国需共同争取实现 1.5℃的更严格控温目标，这对缓解气候变暖具有关键作用。中国始终将绿色低碳发展置于战略核心位置，以实际行动践行“绿水青山就是金山银山”理念。新时代以来，中国逐步将生态文明建设深度融入发展全局，持续贯彻新发展理念，明确提出 2030 年前实现碳达峰、2060 年达成碳中和的战略目标。

当前，实现碳中和的核心路径在于“减排”与“增汇”的双轨并行。地球上的碳循环主要依赖陆地和海洋两大生态系统来吸收大气中的二氧化碳。在各类碳汇措施中，森林碳汇项目尤为关键，已成为全球清洁发展机制的重要环节。森林作为陆地生态系统最主要的碳汇，其地上生物量储存了全球约 80%的陆地植被碳，根系和土壤在内的地下部分则储存着约 40%的陆地总碳量，对维持全球碳平衡起着不可替代的作用。值得注意的是，森林碳汇的价值在城市化进程中呈现双重特性。一方面，城市作为占全球 3/4 温室气体排放的“碳源”主体[1]，我国城市碳排放占比高达 70%[2]，亟需通过生态修复构建碳抵消机制。另一方面，森林生态系统能同步发挥固碳释氧、降温减霾等协同效益，这对超高密度城市群尤为重要。粤港澳大湾区建设是我国经济增长的关键动力之一。城市化进程中面临碳排放增加与生态空间受压的双重挑战。大湾区的气候条件（亚热带季风气候）和地理环境使其具备较高的森林碳汇潜力。但是目前大湾区城市的碳汇功能尚未得到充分挖掘，森林碳汇的价值评估与碳账户体系建设仍处于起步阶段。Keren Chen 等人指出借助碳市场，让森林碳汇与碳账户双管齐下，实现增加碳汇的“双碳”背景下森林碳汇与碳账户的潜能和市场需求目标，则显得更为经济、合理和高效[3]；Fang 等基于生物量换算因子连续函数法，采用中国森林资源清查资料研究森林碳储量的问题[4]。Han 等基于碳资产价值理论提出了风能技术的碳资产价值评估方法[5]；Xu 等基于碳资产价值理论提出分布式光伏电站的碳资产价值评估方法及其影响因素的敏感性分析方法[6]。

综上，本文聚焦粤港澳大湾区城市森林生态系统的碳汇价值评估与碳账户体系建设，针对当前碳汇计量方法碎片化、数据基础薄弱及市场化机制缺失等核心问题，构建“价值核算-账户构建-实现路径”三位一体的研究框架，借鉴欧盟市场联动经验与日本基层治理模式，探索政府主导下碳汇权益分配机制，加快市场化交易场景的深度融合，从而为生态产品价值实现提供可操作的制度载体。

2 数据来源与理论基础

2.1 数据来源与处理

2.1.1 数据来源

由于森林资源清查五年一次，且港澳森林覆盖

率相对较低，主要以公园与城市绿化为主，考虑到数据的可获得性，本研究覆盖 2004-2023 年间的森林资源动态变化，重点采集森林总储量、年度新增量、采伐消耗量及灾害损失量等核心指标。

数据采集依托广东省统计局与林业部门发布的年度统计公报、林业年鉴以及国家林草局编制的五年规划专项统计资料。同时，为较全面地反映森林生态系统碳价值的变动情况，选取 2004-2023 年间的林业总产值（Q）、林业固定资产投入量（K）、林业系统年末从业人数（L）数据。其中，Q 作为产出变量，碳资产投入量（C）、K、L 作为投入变量。

2.1.2 数据处理

基于官方发布的数据，结合森林资源增长规律、政策影响和历史趋势，进行数据处理。林业总产值按当年平减指数处理，林业固定资产投资按当年的固定资产投资指数处理，而碳资产投入量由碳汇核算结果和平均每年的碳储量增加量算出[7]。

数据处理原则如表 1 所示。

表 1 数据处理原则

指标	处理原则	考量判断依据
蓄积量	遵循“上年存量 + 生长量 − 采伐量 − 枯损量”基本公式	受禁伐政策影响，增速略有上升，而受台风等灾害影响，增速放缓
生长量	非灾害年份：当年值 = 上年值 + 0.005灾害年份：下调 10%	与林龄结构、造林面积相关，人工林占比高则增速稳定。
采伐量	根据限伐启动、禁伐试点、灾害等因素微调	—
枯损量	参考灾害记录，极端年份（如台风、寒潮）适当上调	—

2.2 理论基础

2.2.1 森林生态系统

森林生态系统作为陆地生态体系的核心构成单元，其核心要素包括林木群落、动物种群及微生物群落，这些生命体与土壤基质、光照条件、大气环境等非生命环境要素共同形成生态体系。森林不仅能够产出经济价值高的产品，还在水源保护等方面发挥着不可替代的作用。树木通过根系固定土壤，树冠调节局部气候，形成生态服务功能。这些看得见的经济收益和看不见的环境效益，构成森林对人类的价值。

2.2.2 森林碳汇价值

碳价值理论的核心是将碳排放的外部成本内部化，通过碳定价（如碳税或碳交易）反映其真实社会成本。碳价的形成基于边际减排成本和气候变化损害评估，不同地区因政策、技术等因素差异而呈现价格梯度。森林碳汇价值的测算主要取决于两个关键指标：碳储存总量和单位碳价。在定价机制方面，国际社会尚未形成公认的定价标准，当前普遍参考的是碳税政策和碳排放权交易市场的价格水平。

2.2.3 碳账户体系

碳账户体系是量化和管理碳排放与碳汇的工具，遵循环境经济核算原则，包含物理量（排放/吸收）和价值量（经济影响）的双重计量。其核心功能包括监测、报告与核查，确保数据透明可信。未来，碳账户体系将向数字化、智能化发展，结合区块链、物联网等技术提升核算精度，并探索跨境协同机制，以支持全球碳中和目标的实现。

2.3 模型设定

2.3.1 森林碳汇核算

借助蓄积量转换法，按照对应的换算系数核算森林碳储量、碳汇量，具体包括含碳率、林下植物固碳量换算系数、林地固碳量换算系数等。

按照蓄积量转换法，森林碳储量、碳汇量核算公式为：

$$\begin{aligned}\text{森林碳储量} &= \text{林木碳汇量} + \text{林下植被碳汇量} \\ &\quad + \text{林地碳汇量} \\ &= \text{森林蓄积量} \times \text{扩大系数} \times \text{容积系数} \times \text{含碳率} + \\ &\quad \text{林下植物固碳量换算系数} \times \text{森林蓄积量} \\ &\quad + \text{林地固碳量换算系数} \\ &\quad \times \text{森林蓄积量}\end{aligned}$$

用字母表示为：

$$C_F = V_F \times \delta \times \rho \times y + a \times V_F \times \delta \times \rho \times y + \beta \times V_F \times \delta \times \rho \times y \quad (1)$$

其中C_F为森林碳储量，V_F为森林蓄积量，δ为生物量扩大系数，用于将蓄积量转换为生物总量。ρ表示容积密度参数，反映单位生物量的实际干物质重量。y指植物干物质含碳比例参数，即含碳率。a为林下植物固碳量调整系数，根据林木生物量计算林下植物（含凋落物）固碳量。β为林地固碳量换算系数，用于计算林地自身的碳储存量。参照以往森林

碳汇相关研究，系数取值如表 2 所示。

表 2　换算系数取值

系数	一般取值
$\boldsymbol{\delta}$生物量扩大系数	1.9
$\boldsymbol{\rho}$容积密度	0.45~0.5
$\boldsymbol{y}$含碳率	0.5
$\boldsymbol{a}$林下植物固碳量换算系数	0.195
$\boldsymbol{\beta}$林地固碳量换算系数	1.244

在上述公式中，森林碳汇量即为碳储量的变化值，具体为森林碳储量在不同年份的差值或变化值。一般研究中，往往笼统的把森林碳储量、碳汇量统称为森林碳汇[8]，本文也主要采用这种笼统的叫法。

2.3.2 森林碳汇价格评估

（1）影子价格模型

基于生产要素价值理论，将森林碳汇视为生产要素，通过构建林业生产函数模型测算其影子价格。建立包含碳资产投入量（C）、林业固定资产投入量（K）、林业系统年末从业人数（L）三要素的生产函数，采用计量方法量化各要素对产出的贡献比例。森林碳汇的边际产出价值可通过模型参数计算得出，即每增加一单位碳汇量对应的产值增量，最终结合碳汇总量推导其理论影子价格。该方法通过生产系统的实际投入产出关系，客观反映森林碳汇在林业经济中的价值贡献，既能为碳汇交易定价提供科学依据，也可评估碳汇政策对林业收益的影响效应。

$$\ln Q = a + y_L \times \ln L + y_K \times \ln K + y_C \times \ln C + y_{LK} \times \ln L \times \ln K + y_{LC} \times \ln L \times \ln C + y_{KC} \times \ln K \times \ln C + y_{LL} \times (\ln L)^2 + y_{KK} \times (\ln K)^2 + y_{CC} \times (\ln C)^2 \quad (2)$$

其中，a为随机误差项。y_K、y_{LK}、y_{LL}等分别为要素的产出弹性与各个要素间交叉项或平方项之间的弹性。

对等式左右求导得：

$$\frac{dQ/Q}{dC/C} = \frac{d\ln Q}{d\ln C} = y_C + y_{LC} \times \ln L_t + y_{KC} \times \ln K_t + 2y_{CC} \times \ln C_t \quad (3)$$

$$\frac{dQ}{dC} = \frac{Q}{C} \times (y_C + y_{LC} \times \ln L_t + y_{KC} \times \ln K_t + 2y_{CC} \times \ln C_t) \quad (4)$$

由于边际生产力等于生产投入要素的价格，因此碳价格为：

$$P = \frac{dQ}{dC} = \frac{Q}{C} \times (y_C + y_{LC} \times \ln L_t + y_{KC} \times \ln K_t + 2y_{CC} \times \ln C_t) \quad (5)$$

（2）岭回归分析

岭回归主要应用于共线性数据分析，属于有偏估计回归方法。由岭回归得出的回归方程的可决系数低于普通回归，但其回归系数的显著性高于普通回归。岭回归通过放弃无偏性，损失部分信息来获取更符合实际的回归系数。采用岭回归分析估计模型参数，主要包括两个部分，一为确定岭参数 k，二为确定回归系数。

2.3.3 森林碳汇价值评估

由 2.3.1 森林碳汇核算和 2.3.2 森林碳汇价格评估可知，碳汇量由蓄积量转换法计算而来，碳价格由生产函数下的影子价格计算而来。森林碳汇价值为碳汇量与碳价格的乘积。故森林碳汇资源价值评估采取以下公式：

$$W = C \times P \quad (6)$$

其中，W 表示碳汇价值量，C 为碳量，P 为碳价格。

4 森林碳汇价值评估与碳账户构建

4.1 描述统计分析

4.1.1 GDP 发展特征

2004-2023 年间 GDP 从 18864.62 亿元增长至 137243.81 亿元，呈现持续增长态势，整体增速较快，但期间出现若干阶段性波动。其中由于全球金融危机与疫情等突发情况，2009 年与 2020 年 GDP 出现明显增速放缓，2012 年后，随着经济结构调整和产业转型升级，增速逐步趋稳，反映经济转型成效。特别值得注意的是 2021 年 GDP 突破 12 万亿元，这与粤港澳大湾区建设全面启动密切相关，数字经济、高端制造业等新动能持续发力。

4.1.2 森林蓄积量变化

2004-2023 年间森林蓄积量保持稳定增长，从 3.5 亿立方米稳步提升至 6.8 亿立方米，年均增长 3.6%，显示出森林资源总量持续扩大的良好态势。在核算期中期，蓄积量增长出现明显加速，这与广东省实施的重要生态工程时间节点相吻合。后期增长速度进一步加快，反映出森林保护政策力度不断加强的效果。

4.1.3 森林年生长-消耗动态

森林年生长量总体呈上升趋势，但存在若干波动。某些年份生长量偏低，可能与当年发生的重大

自然灾害有关。而后期生长量达到历史新高，表明森林质量提升措施取得成效。

采伐量整体呈下降趋势。核算期初期，采伐量处于相对较高的水平，但随着时间的推移，其数值逐渐降低。特别是在重要林业法规实施后，下降速度加快。2016 年后采伐量有所上升，可能是由于统计口径变化、灾害应急处理（灾害木采伐、疫木除治采伐）等原因。枯损量保持相对稳定，但近年略有上升，可能与气候变化、病虫害爆发等因素有关。总消耗量显著下降，与天然林保护政策的实施密切相关。

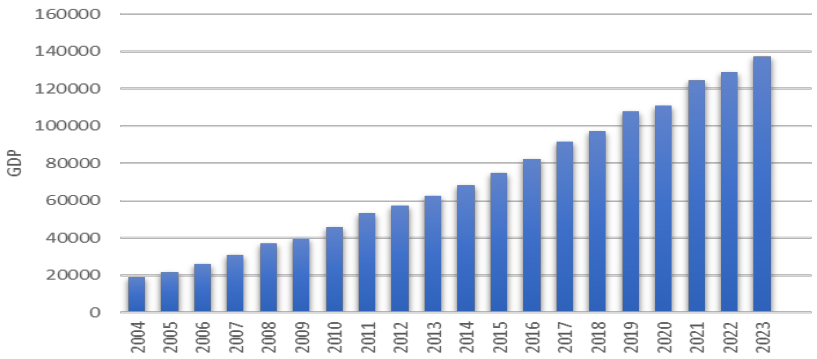


图 1　2004-2023 年 GDP 柱形图

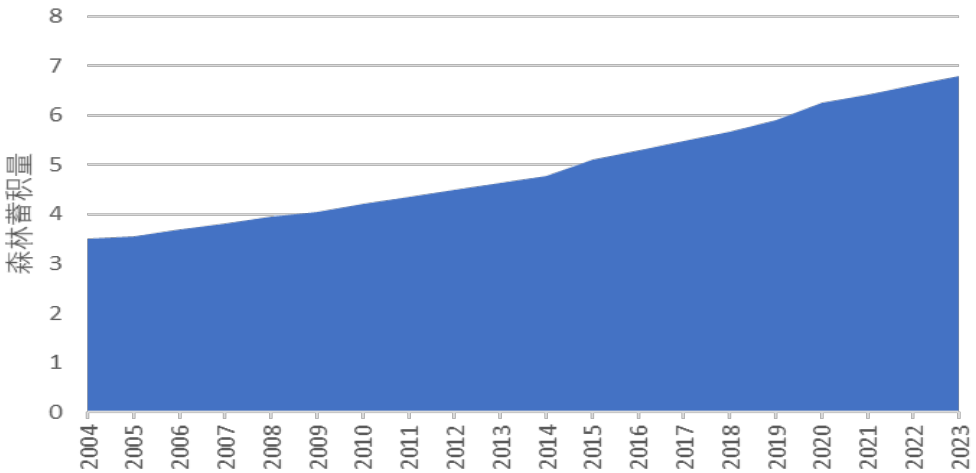


图 2　2004-2023 年森林蓄积量堆积面积图

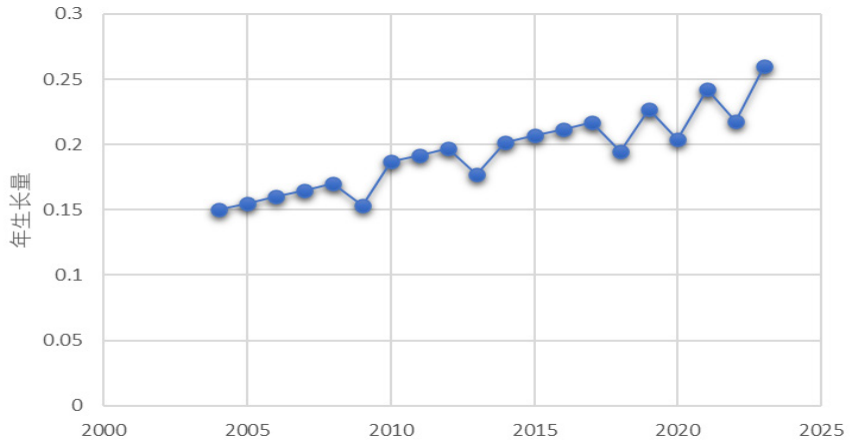


图 3　2004-2023 年森林年生长量散点图

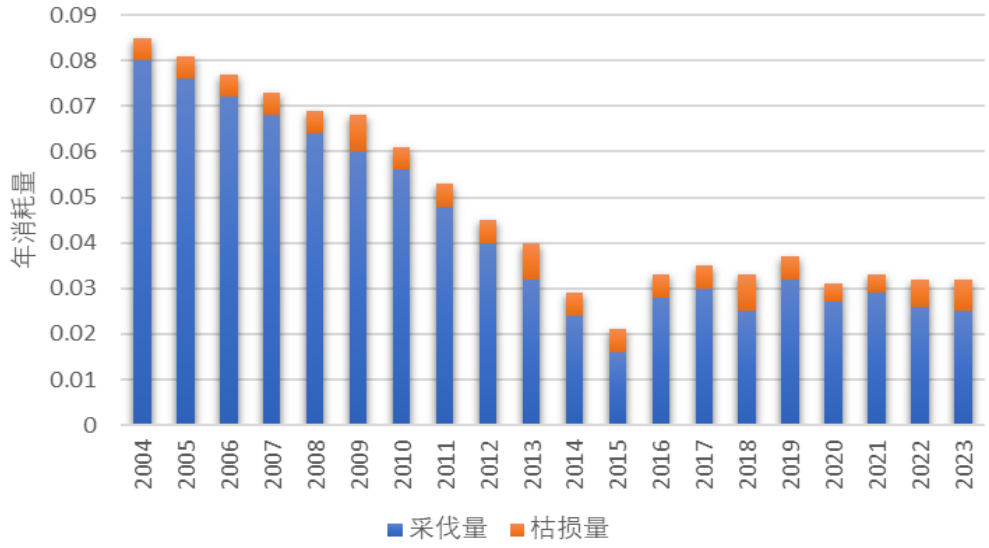


图 4　2004-2023 年森林年消耗量堆积柱形图

核算期中期出现重要转折，森林年生长量开始显著超过消耗量，这一变化与相关环境政策试点在时间上高度吻合。后期生长量持续高于消耗量，为区域碳中和目标提供了重要支撑。

4.2 森林碳汇量计量

由蓄积量转换法，对基本数据进行森林碳汇量核算，如表 3 所示。

表 3　森林碳储量、碳汇量计量

年份	GDP/亿元	森林碳储量/亿t	森林年生长碳汇量/亿$t \cdot a^{-1}$	森林年消耗碳汇量/亿$t \cdot a^{-1}$		
				采伐量	枯损量	合计
2004	18864.62	4.055	0.174	0.093	0.006	0.098
2005	21701.28	4.124	0.180	0.088	0.006	0.094
2006	25968.55	4.275	0.185	0.083	0.006	0.089
2007	30673.71	4.426	0.191	0.079	0.006	0.085
2008	36796.71	4.588	0.197	0.074	0.006	0.080
2009	39464.7	4.692	0.177	0.070	0.009	0.079
2010	45944.6	4.866	0.217	0.065	0.006	0.071
2011	53072.8	5.040	0.222	0.056	0.006	0.061
2012	57007.7	5.213	0.228	0.046	0.006	0.052
2013	62503.4	5.364	0.205	0.037	0.009	0.046
2014	68173	5.538	0.234	0.028	0.006	0.034
2015	74732.4	5.908	0.240	0.019	0.006	0.024
2016	82163.2	6.140	0.246	0.032	0.006	0.038
2017	91648.7	6.360	0.251	0.035	0.006	0.041
2018	97277.77	6.569	0.226	0.029	0.009	0.038
2019	107671.1	6.835	0.263	0.037	0.006	0.043
2020	110760.9	7.241	0.236	0.031	0.005	0.036
2021	124369.7	7.438	0.280	0.034	0.005	0.038
2022	129118.6	7.646	0.253	0.030	0.007	0.037
2023	137243.8	7.878	0.301	0.029	0.008	0.037

4.3 森林碳汇价值评估

4.3.1 基于生产函数测算森林碳汇影子价格

为更好反映森林碳汇的贡献价值，对基本数据对数化处理。

考虑到回归结果的可靠性，在回归前对各变量进行相关性分析，发现研究变量间存在较强的相关性，具体结果见表 5。

为检验变量间是否存在多重共线性，借助辅助回归法，将$\ln L$作为因变量，其余解释变量作为自变量，对变量进行多重共线性检验，根据估计参数的方差扩大因子 VIF 判断，一般认为 VIF 超过 10，则存在严重的多重共线性。结果显示部分估计参数的 VIF 远超过 10，变量间存在严重的多重共线性问题，具体数据见表 6。

表 4　碳价格模型基本数据

年份	林业总产值/亿元	碳资产投入量/万 t	林业系统年末从业人数/人	林业固定资产投资/万元
2004	381.85	42560.38	38388	29471
2005	440.70	43255.49	38718	63855
2006	1315.22	44761.57	37966	41486
2007	1375.53	46267.66	37641	39116
2008	1404.18	47889.59	36279	51401
2009	2200.12	48932.26	34002	41336
2010	2802.16	50670.05	36162	77995
2011	3328.10	52407.84	32472	52000
2012	4690.92	54145.63	33286	38000
2013	5595.39	55651.71	31271	25000
2014	6500.34	57389.50	29685	37323
2015	7150.28	61096.78	30424	25918
2016	7695.78	63413.83	29601	41066
2017	8022.39	65615.02	28563	74130
2018	8167.58	67700.37	26512	25475
2019	8415.95	70364.98	26923	59772
2020	8212.20	74419.81	24546	15426
2021	8607.43	76389.31	21649	36814
2022	8713.79	78474.65	20255	15799
2023	8950.06	80791.70	19004	21000

表 5　相关性分析

变量	$\ln L$	$\ln K$	$\ln C$	$\ln L \times \ln K$	$\ln L \times \ln C$	$\ln K \times \ln C$
$\ln L$	1	—	—	—	—	—
$\ln K$	0.566	1	—	—	—	—
$\ln C$	-0.962	-0.481	1	—	—	—
$\ln L \times \ln K$	0.781	0.957	-0.705	1	—	—
$\ln L \times \ln C$	0.447	0.459	-0.186	0.500	1	—
$\ln K \times \ln C$	0.180	0.905	-0.064	0.748	0.438	1

表 6　多重共线性检验

变量	VIF	容差
$\ln K$（剔除）	—	—
$\ln C$（剔除）	—	—
$\ln L \times \ln K$（剔除）	—	—
$\ln L \times \ln C$	235.270	0.004
$\ln K \times \ln C$	801.183	0.001

在保留研究变量的同时，为降低多重共线性的影响，本文通过岭回归分析进行参数估计。

（1）确定岭参数k

初始设定：距离区间为 0.5；从$k=0$至$k=1$估计回归系数。运算结果如图 5、图 6 所示。由岭迹图可知，当$k=0.1$时，大多数值基本趋于稳定。由拟合优度图可知，可决系数先下降幅度明显，但k超过 0.1 后，模型拟合优度指标保持稳定。通过系统比较分析，确定当参数$k=0.1$时，所建立的回归模型具有更优的预测性能。

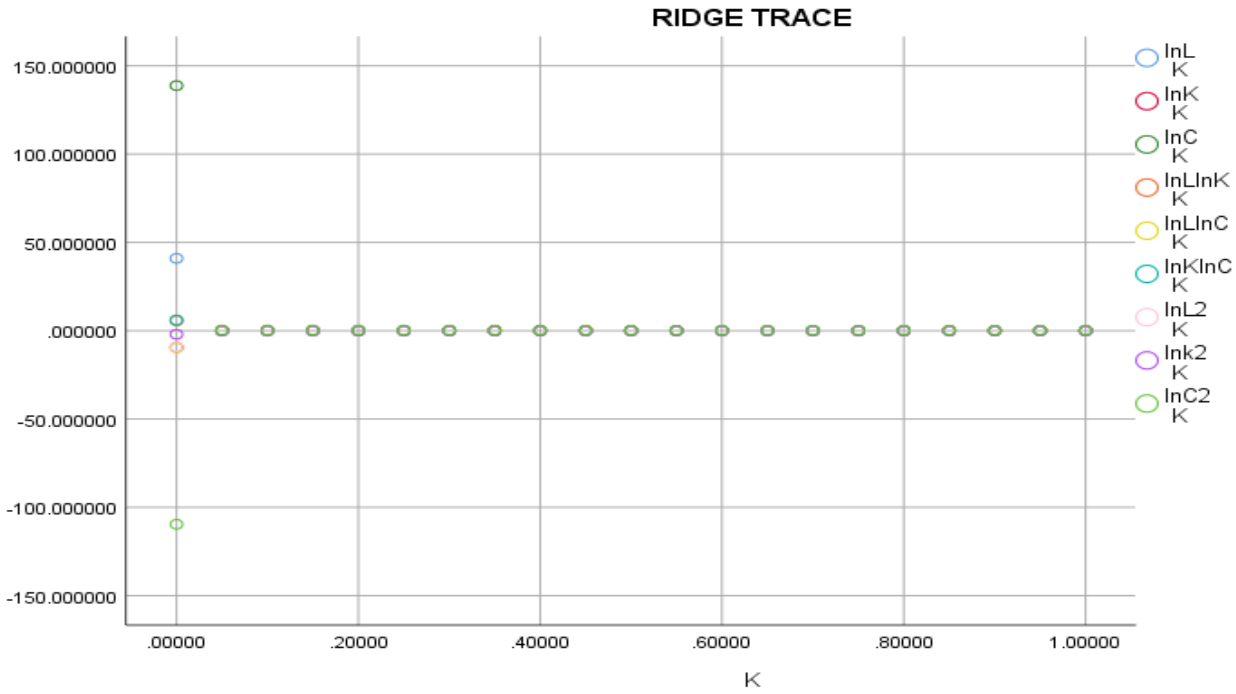


图 5　不同 k 值下各变量岭迹图

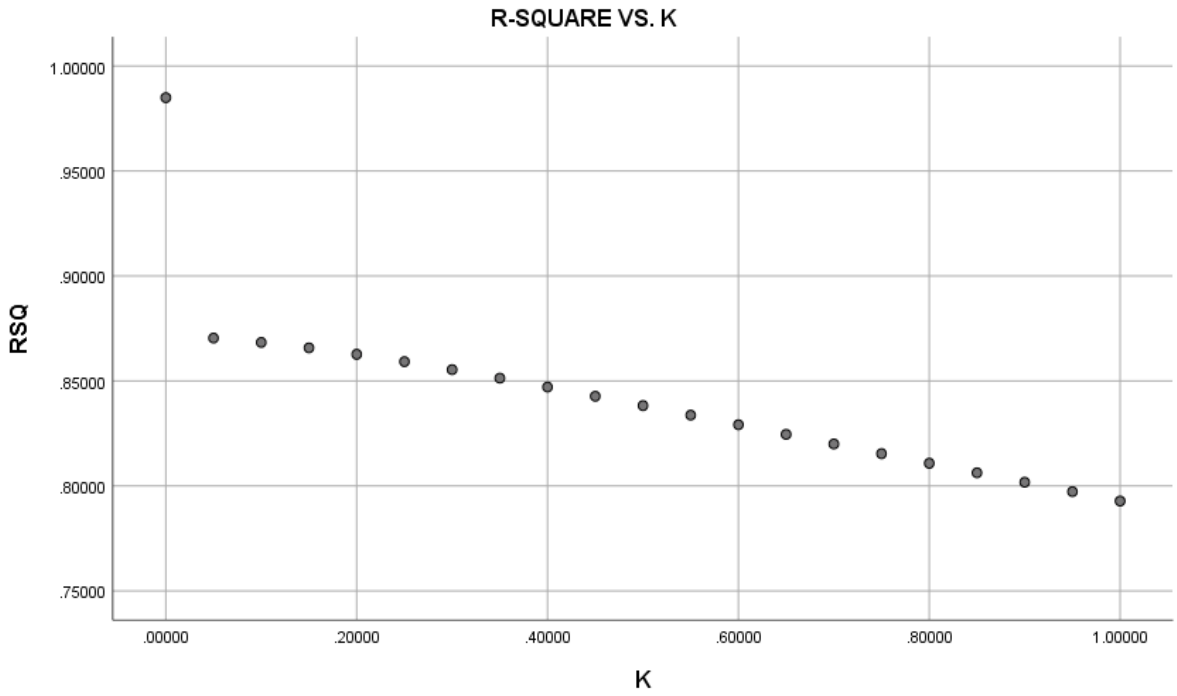


图 6　不同 k 值对应的拟合优度图

当$k=0.1$，对数据进行岭回归分析，由表 7 可知，碳价格模型的可决系数R^2为 0.985，调整后的R^2为 0.942，显著性统计量 F 为 22.467，Sig F<0.05，说明模型通过统计检验，且回归拟合效果较好。

（2）确定回归系数

根据回归系数检验结果，筛选出不符合经济学意义与统计上不显著的变量。由表 8 可知，剔除劳动力与固定资产投入的交叉项、劳动力与碳资产的交叉项、固定资产与碳资产的交叉项、劳动力投入的平方项、固定资产投入的平方项和碳资产投入的平方项变量。

剔除相关变量后，在岭回归分析中对余下的劳动力投入、固定资产投入、碳资产投入三个变量进行$k=0.1$的有偏估计。由输出结果表 9 可知，剔除 6 个变量后模型的R^2为 0.9985，调整后的R^2为 0.9980，F 值为 1951.4799，Sig F<0.05，统计上显著，充分说明剔除变量后的模型拟合效果更好。

表 7　回归方程显著性检验

Ridge Regression with k=0.1			
Mult R		0.993	
R^2		0.985	
AdjR^2		0.942	
SE		1.412	
方差分析			
回归	df	SS	MS
Regress	9.000	402.857	44.762
Residual	3.000	5.977	1.992

表 8　回归系数显著性检验

Variables in the Equation-				
变量	B	SE（B）	Beta	B/SE（B）
$\ln L$	0.2485	0.0545	0.2559	4.5568
$\ln K$	0.2801	0.0441	0.2840	6.3551
$\ln C$	0.4445	0.0739	0.4689	6.0132
$\ln L \times \ln K$	-0.0036	0.0036	-0.0184	-1.0223
$\ln L \times \ln C$	-0.0057	0.0065	-0.0305	-.8711
$\ln K \times \ln C$	-0.0036	0.0027	-0.0191	-1.3096
$(\ln L)^2$	-0.0058	0.0036	-0.02938	-1.6196
$(\ln K)^2$	0.0005	0.0085	0.0028	0.0649
$(\ln C)^2$	0.0006	0.0039	0.0034	0.1510
Constant	0.0152	0.4297	0.0000	0.0353

表 9　剔除变量后的显著性检验

Ridge Regression with k=0.1			
R 值		0.9992	
R^2		0.9985	
调整后R^2		0.9980	
SE		0.1619	
方差分析			
回归	df	SS	MS
Regress	3.000	153.473	51.158
Residual	9.000	0.236	0.026

在系数估计中，由表 10 可知，三个变量回归系数均符合经济学意义，且显著性水平均小于 0.05，估计的参数显著，对林业总产值具有正向作用。调整后的模型是合理、有意义的，能够有效的估计森林碳汇价格。

表 10　剔除变量后的回归系数及显著性检验

变量	B	SE（B）	Beta	B/SE（B）
$\ln L$	0.3232	0.0042	0.3230	76.4088
$\ln K$	0.3220	0.0048	0.3213	67.5491
$\ln C$	0.3229	0.0047	0.3233	68.6300
Constant	-0.0036	0.0529	0.0000	-0.0678

由上述分析可知，生产函数模型为：

$$ln\,Q = 0.3232\ln L + 0.323\ln K + 0.3229\ln C - 0.0036 \quad (7)$$

碳价格模型为：

$$P = \frac{dQ}{dC} = \frac{Q}{C} \times (0.3229) \quad (8)$$

基于碳价格模型，测算每年的碳价格，发现碳价格变化趋势基本一致，个别年份出现波动，可能是受台风自然灾害、政策等影响，具体数据如表 11 所示。

4.3.2 碳汇价值量评估

确定碳汇量与碳价格后，对大湾区森林生态系统碳汇价值量进行评估，发现大湾区森林碳汇价值潜力巨大，有待充分挖掘，具体数据如表 12 所示。

表 11　大湾区 2004-2023 年森林碳价格

年份	价格（元/吨）	年份	价格（元/吨）
2004	38.87	2014	522.49
2005	20.70	2015	827.64
2006	95.11	2016	562.20
2007	105.50	2017	324.66
2008	81.95	2018	961.83
2009	159.68	2019	422.40
2010	107.78	2020	1597.08
2011	192.01	2021	701.43
2012	370.34	2022	1654.62
2013	671.45	2023	1278.58

表 12　碳汇价值量评估

年份	价值量	年份	价值量
2004	1654355	2014	29985622
2005	895595	2015	50566256
2006	4257199	2016	35651327
2007	4881067	2017	21302678
2008	3924752	2018	65116540
2009	7813285	2019	29722352
2010	5461330	2020	118854615
2011	10062600	2021	53581409
2012	20052070	2022	129845896
2013	37367160	2023	103298652

4.4 构建碳账户体系

大湾区作为我国开放程度最高、经济活力最强的区域之一，其城市森林生态系统具有典型的“三高三强”特征：森林类型多样性高、人为干预强度高、生态服务需求高；碳汇功能空间异质性强、政策协同性强、市场流动性强。这一特征决定了传统碳汇计量方法难以满足精细化管理需求，亟需建立适配区域特点的碳账户体系。

4.4.1 大湾区森林碳账户基本形式

采用“1+N”分级账户体系，即一个主账户（区域总账）+N 个子账户（细分账户），确保碳汇数据的系统性、可追溯性和市场化应用。三级管理架构以主账户为顶层中枢，核算湾区森林碳汇总量。通过分配账户按行政区划分解管控目标，最终由项目级子账户对接具体林地单元。四维数据体系实现全周期管理。基础碳库整合森林资源二类调查数据，流量账户追踪年度碳汇变化，交易台账记录碳信用流转，价值转换模块通过碳税法与造林成本法加权生成经济价值。

4.4.2 碳账户基本框架

（1）框架设计依据

本文碳账户框架的构建遵循国际通行的《国民经济核算体系》（SNA）资产账户编制原则，将碳汇资源纳入生产要素进行系统核算。编制方法主要参考联合国《环境经济核算体系》（SEEA）的碳账户编制标准，采用实物量与价值量并重的核算方式。

在实践层面，充分吸收大湾区碳市场试点经验，确保账户设计的可操作性。同时，严格执行《广东省森林碳汇交易管理办法》的相关规定，在碳汇计量、产权登记、交易规则等方面与地方性法规保持高度一致，确保账户体系的规范性和合法性。

（2）碳汇存量登记系统设计

①资产分类账户体系

本研究基于《环境经济核算体系》（SEEA）资产分类标准，构建了包含四大类碳汇资产的分类账户，见表 14。账户设计采用“期初存量+本期变动=期末存量”的平衡关系，确保符合国民经济核算原则。其中：

A.森林碳汇：主要核算乔木林、竹林等陆地生态系统碳储量。

B.红树林碳汇：重点监测珠江口、大鹏湾等滨海湿地碳汇功能。

C.城市绿地碳汇：涵盖公园绿地、防护绿地等城市生态系统。

D.湿地碳汇：包括淡水沼泽、滩涂等自然湿地。

表 13　大湾区森林碳账户基本形式

账户类型	功能定位	核算内容	数据来源	更新频率
主账户	大湾区碳汇总量核算	森林碳储量；年度碳汇增量	遥感监测；地面样地调查	年度更新
分配账户	各行政区碳汇分配与管理	行政区划内森林碳汇量	无人机；样地数据	季度更新
项目级子账户	具体林地碳汇核算	单块林地的碳汇变化	物联网传感器；人工核查	实时/月度更新
交易账户	碳汇交易记录	碳汇交易量、价格、买方/卖方	区块链智能合约	实时记录
补偿账户	生态补偿资金分配	碳汇贡献度；补偿标准	政府财政；市场交易数据	年度结算

表 14　资产分类账户体系

资产类别	计量单位	期初存量	本期增加	本期减少	期末存量	备注
森林碳汇	万吨CO_2e	—	—	—	—	—
红树林碳汇	万吨CO_2e	—	—	—	—	—
城市绿地碳汇	万吨CO_2e	—	—	—	—	—
湿地碳汇	万吨CO_2e	—	—	—	—	—

②核算方法体系

碳账户核算采用“自上而下”与“自下而上”相结合的混合核算方法，严格实行联合国政府间气候变化专门委员会（IPCC）发布的《国家温室气体清单指南》（2019 修订版）中规定的第二层级（Tier 2）方法学，结合大湾区特有的植被参数，采取以下基础计量方法：

$$C = \Sigma\ (S_i \times C_i \times G_i) \quad (9)$$

其中，C为森林碳汇量，S_i为第i树种面积(hm^2)，C_i为单位面积碳储量(t/hm^2)，G_i为生长系数调节系数，一般取值在0.8-1.2之间。

$$C_h = \mathrm{S} \times （\mathrm{Cabove} + \mathrm{Cbelow} + \mathrm{Csoil}） \quad （10）$$

其中，C_h为红树林碳汇量，S为面积(hm^2)，Cabove代表地上生物量碳，Cbelow代表地下生物量碳，Csoil代表土壤碳。

建立“自然-人为”双因素变动记录机制。参考《广东省森林资源连续清查技术规定》，核算包括按年度生长率计算的自然增长量、因造林/再造林项目核证的人为新增量、由于采伐或灾害损失的减少量，具体公式如表15所示。

（3）碳交易记录系统设计

①交易账户架构

构建多维度交易流水账系统，设置7个核心字段确保交易可追溯，见表16。

A.交易凭证编号采用“GDEA-年份-6 位序列号”编码规则。

B.交易价格记录实际成交价与当日市场均价双轨数据。

表15　核算指标及计算

核算指标	核算公式
自然增长量	基期存量×年度生长率
人为增长量	新造林面积×碳汇方法学核定系数
减少量	采伐量×排放因子＋灾害损失量

表16　碳交易记录账户框架

交易日期	交易主体	交易类型	交易量（吨CO_2e）	交易价格（元/吨）	交易凭证编号	备注
—	—	—	—	—	—	—
—	出让方/受让方	配额交易/CCER	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—

②交易类型标准化分类

参考《碳排放权交易管理暂行条例》将交易分为以下4类。

A.政府间转移。采用“协商定价+生态补偿”双机制，如深莞惠碳汇指标调剂。

B.企业购买。记录控排企业履约购买行为，关联其排放监测计划。

C.生态补偿。建立横向补偿价格指数，参考广东省生态保护补偿办法。

D.自愿交易。设置个人碳中和账户，对接“粤省事”政务平台。

4.4.3 碳账户具体运行机制

本研究通过“技术监测-动态管理-特色应用-制度保障”四步实现大湾区碳账户闭环运行机制。实行三对应登记制度，即地理边界、法律所有权与碳汇生态价值三维绑定，确保碳资产可测量、可报告、可核查。

（1）“空天地人”协同监测

四种手段相互校验，确保数据真实可靠。

（2）智能平台动态管理

开发区块链管理平台，每季度自动更新森林碳储量。设立可视化看板，实时展示大湾区各行政区碳汇存量、交易量、补偿资金流向。

（3）因地制宜灵活处理

针对红树林受潮汐周期性淹没的特殊环境，专门开发潮间带碳汇计算模型，精准测算涨落潮状态下湿地固碳能力的动态变化。同时，建立粤港澳三地碳账户协同机制，统一采用国际湿地核算标准，开发兼容港澳计量规则的工具包，实现跨境碳汇数据的无缝对接。

表17　数据搜集方法

手段	具体方式
遥感解译覆盖范围	用卫星看森林变化
激光雷达扫描物体	无人机测树木三维结构
传感器实时传数据	物联网盯土壤呼吸
实地查漏补缺	网格员补人工核查

表 18 智能平台动态管理优势

优势	具体表现	示例
智能结算	碳汇交易达成后，系统自动打款分账	A 市卖碳给 B 企业，钱货两清无需人工盯
双轨变现	算“生态成绩单”；做碳汇指数产品	考核各区县碳中和进度；像股票一样在碳交易所挂牌交易

（4）三层支撑体系

①通过制定《大湾区森林碳汇监测技术规程》明确无人机航测高度、土壤传感器布设密度等技术细节，从源头规范数据采集。

②将碳账户数据与生态补偿资金分配直接挂钩，对碳汇增量显著的区县给予最高 10%的资金奖励，激发基层管护积极性。

③同步探索碳金融创新，允许企业以碳账户登记的碳储量为抵押物申请绿色贷款，从而有效激活生态资产流动性。

4.4.4 机制可行性验证

（1）林业碳汇开发与交易实践案例

2023 年福田红树林保护区 126 公顷红树林碳汇以 485 元/吨成交，创国内单价纪录[9]。2024 年江门恩平市镇海湾 142 公顷红树林保护碳汇以 336 元/吨成交价拍卖，总金额超 198 万元，创全国碳汇交易最高总价[10]。该交易由深圳交易集团完成，资金用于红树林修复，并探索跨区域蓝碳交易联盟。恩平市通过“一库一贷一中心 N 转化”机制整合生态资源，形成可复制的“恩平样板”。

（2）企业碳账户与绿色金融创新

肇庆高新区建立广东省首个企业碳账户，覆盖 233 家企业，通过能源消耗数据核算碳排放强度，划分“深绿-浅绿-黄色-红色”四色等级，推出“云碳贷”等金融产品，为 163 家企业提供 59.26 亿元融资，平均利率降低 34BP，年节省利息 1976 万元，该模式获国家发改委认可[11]。

（3）区域碳市场与政策探索

人大代表白鹤祥建议大湾区建设具有“内引外联”功能的国际碳市场，前期以自愿减排机制推动碳普惠项目入市，后期探索将港澳纳入强制减排体系，并依托广州期货交易所开发碳期货等衍生品[12]。广东省 2021 年完成首个蓝碳项目（湛江红树林造林），交易 5880 吨碳汇用于生态修复[13]，2024 年深圳、惠州等地通过方法学创新与开发权交易推动红树林碳汇期货试点，探索蓝碳资源提前变现路径。

（4）公众参与

中信银行推出“中信碳账户”，覆盖北京、上海、深圳的公交、地铁出行碳减排核算，用户可通过信用卡消费积累碳积分兑换绿色权益。该平台联合 25 家企业构建“绿·信·汇”生态，获评 2024 年广东绿色金融创新案例。

4.4.5 与传统台账管理的对比

表 19 传统台账管理与碳账户模式对比

对比维度	传统台账管理	碳账户模式
数据精度	依赖人工统计，误差大	遥感+物联网+区块链
更新效率	年度更新，滞后性强	实时/月度更新，动态响应
交易成本	纸质流程，耗时耗力	智能合约自动结算
防篡改性	易被修改，可信度低	区块链存证，全程可追溯

5 研究结论及政策建议

5.1 研究结论

（1）大湾区森林碳汇价值巨大

研究显示，2004-2023 年间粤港澳大湾区森林蓄积量实现跨越式增长，总量从 3.5 亿立方米增至 6.8 亿立方米，年均增长率达 3.6%，碳储量同步实现倍增。既彰显了天然林保护工程、退耕还林等生态修复政策的实施成效，也突出了森林生态系统碳汇能力的强化，为大湾区实现“双碳”目标提供了重要的自然解决方案基础。

通过生产函数模型测算发现，森林碳汇价格呈现指数级增长。这一价值增长轨迹与粤港澳大湾区国家战略实施形成时空耦合，数字经济、高端制造等新动能产业的勃兴，以及碳排放权交易市场的完善，共同推动了碳汇价值实现机制的成熟。

（2）构建分级碳账户体系切实可行

本研究设计了一套大湾区碳账户框架，提出的“1+N”分级账户体系（主账户+子账户）整合了区块链溯源、物联网监测等技术手段，实现碳汇存量核算、交易流转的数字化管理。实践案例表明，福田红树林碳汇交易平台通过主账户实现区域碳汇统筹，肇庆企业碳账户则依托子账户体系完成年度减排量核证，验证了该体系在生态补偿、绿色信贷等多元场景的应用可行性。

技术赋能下的动态监测与智能结算机制，可以有效缓解传统碳汇管理中的信息不对称难题。研究证实，碳汇价值的高效转化需要构建政府主导与市场驱动相结合的协同机制。

5.2 政策建议

为实现碳汇价值的有效转化，需从技术、市场、制度三方面协同推进。技术层面应制定统一的碳汇监测标准，推广无人机航测与物联网技术，提升数据时效性。市场层面可扩大交易场景，试点红树林蓝碳期货，并推动粤港澳三地碳市场衔接，探索跨境碳汇交易。制度层面需优化生态补偿机制，对碳汇增量显著的地区给予资金奖励，同时明确政府、企业与林农的收益分配比例。此外，建议将碳账户数据纳入地方政府考核体系，并开发“碳汇贷”等金融工具，降低市场主体参与门槛。

参考文献

[1] GOULDSON A, COLENBRANDER S, SUDMANT A, et al. Cities and climate change mitigation: Economic opportunities and governance challenges in Asia[J]. Cities, 2016, 54:11-19.

[2] 杨秀,付琳,丁丁.区域碳排放峰值测算若干问题思考：以北京市为例[J].中国人口·资源与环境, 2015,25(10):39-44.

[3] Chen K., Cai Q., Zheng N., et al. Forest Carbon Sink Evaluation—An Important Contribution for Carbon Neutrality [C]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. IOP Publishing, 2021, 811(1): 012009.

[4] Kallio M, Solberg B, Kaar L, et al. Economic Impacts of Setting Reference Levels for the Forest Carbon Sinks in the EU on the European Forest Sector [J]. Forest Policy and Economics, 2018.(92).

[5] Fang J, Chen A, Peng C, et al. Changes in Forest Biomass Carbon Storage in China Between 1949 and 1998 [J].Science, 2001, 292(5525).

[6] Han L, Liu Y, Lin Q, et al. Valuing Carbon Assets for High-tech With Application to the Wind Energy Industry [J]. Energy Policy, 2015(87).

[7] 石冉.江西省森林生态系统碳价值评估及固碳潜力预测研究[D].江西财经大学,2023.

[8] Xu X, Guan C, Jin J. Valuing the Carbon Assets of Distributed Photo-voltaic Generation in China [J].Energy Policy, 2018(121).

[9] 深圳市人民政府国有资产监督管理委员会.全国首单红树林保护碳汇成功拍卖[EB/OL].(2023-09-28)[2025-04-08]. http://gzw.sz.gov.cn/gkmlpt/content/10/10860/mpost_10860669.html#1904.

[10] 江门市自然资源局.江门市恩平市镇海湾红树林保护碳汇成功拍卖[EB/OL].(2024-11-26)[2025-04-08]. http://lyj.gd.gov.cn/lmgd/gdxd/content/post_4587099.html

[11] 广东省发展和改革委员会（2024）.肇庆高新区推进“企业碳账户+绿色金融”，双轮驱动实体经济高质量发展：广东省优化县域营商环境典型案例之二十二[EB/OL].(2024-08-22)[2025-04-08]. http://drc.gd.gov.cn/gzyw5618/content/post_4481681.html

[12] 夏子轩. 全国人大代表白鹤祥建议：依托广州期货交易所推动碳排放权期、现货联动[N/OL]. 时代周报, 2022-03-08[2025-04-08]. https://finance.sina.com.cn/money/future/indu/2022-03-08/doc-imcwiwss4832569.shtml.

[13] 陈彦. 广东湛江红树林造林项目入选《国土空间生态修复典型案例集》红树林变“金树林”助推实现碳中和[N/OL]. 湛江日报, 2024-01-07[2025-04-08]. https://www.gdzjdaily.com.cn/p/2872004.html.

版权声明：©2026 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
OPEN ACCESS