

中国林业碳汇效率评价分析

简克蓉, 陈紫薇*, 廖志高

广西科技大学经济与管理学院, 广西 柳州

收稿日期: 2024年9月24日; 录用日期: 2024年10月24日; 发布日期: 2024年11月27日

摘要

研究林业碳汇的投入产出效率有利于实现林业碳汇资源优化配置, 提高碳汇产出水平。首先采用蓄积量扩展法测算了中国29个省(市、区)2004~2022年的林业碳汇量, 其次基于DEA-BCC模型Malmquist模型, 对林业碳汇效率进行了静态效率测量和动态演进过程分析。结果表明: 中国林业碳汇效率总体较低, 规模效率是制约综合效率提升的主要因素; 生产要素指数波动上升, 技术效率变化指数和技术进步指数共同促进了生产要素指数的提高。四大林区的林业碳汇效率由高到低依次为南方林区 > 北方林区 > 西南林区 > 东北林区。为此建议: 转换林业碳汇粗放型增长方式; 推广规模化经营模式; 统筹发展战略, 因地制宜提升碳汇效率。

关键词

林业碳汇效率, 蓄积量扩展法, DEA-BCC模型, Malmquist模型

Evaluation and Analysis of the Efficiency of Forestry Carbon Sinks in China

Kerong Jian, Ziwei Chen*, Zhigao Liao

School of Economics and Management, Guangxi University of Science and Technology, Liuzhou Guangxi

Received: Sep. 24th, 2024; accepted: Oct. 24th, 2024; published: Nov. 27th, 2024

Abstract

Studying the input-output efficiency of forestry carbon sinks is conducive to realizing the optimal allocation of forestry carbon sink resources and improving the output level of carbon sinks. Firstly, the forestry carbon sinks of 29 provinces (cities and districts) in China from 2004 to 2023 were measured by the accumulation expansion method, and secondly, based on the DEA-BCC model and

*通讯作者。

Malmquist model, the forestry carbon sink efficiency was analyzed in terms of the static efficiency measurement and the dynamic evolution process. The results show that: China's forestry carbon sink efficiency is generally low, and scale efficiency is the main factor restricting the improvement of comprehensive efficiency; the index of production factors fluctuates and rises, and the index of technical efficiency change and the index of technological progress jointly promote the improvement of the index of production factors. The efficiency of forestry carbon sinks in the four major forest regions is, in descending order, Southern Forestry Region > Northern Forestry Region > Southwestern Forestry Region > Northeastern Forestry Region. It is recommended to transform the crude growth mode of forestry carbon sinks; promote the large-scale operation mode; and integrate the development strategy to improve the efficiency of carbon sinks according to local conditions.

Keywords

Forestry Carbon Sink Efficiency, Accumulation Expansion Method, DEA-BCC Model, Malmquist Model

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

全球经济的迅速发展带来了自然环境的破坏，二氧化碳浓度不断提高，给人类生存环境带来切实危害。由碳排放量增加引起的全球气候变暖严重威胁人类生存及社会、经济和环境可持续发展[1]。在严峻的环境局势下，实施碳减排、增加碳汇已成为国际社会的普遍共识。其中，森林是陆地生态系统中最大的碳库[2]，在陆地碳汇中起着关键作用[3]。林业碳汇，特指通过森林生态系统的碳吸收和储存功能，减少二氧化碳浓度的过程，其作为一种有效的碳汇手段之一，在国际上受到广泛认可。为了在2030年实现碳达峰，中国提出“碳达峰十大行动”，其中就包括“碳汇能力整合提升活动”，这一行动需要提高生态系统的碳汇能力。中国是世界上最大的新增碳汇国，到2030年，预计我国的森林覆盖率将实现显著提升，达到大约25%的水平，同时，森林的总蓄积量也将稳步增长，有望达到190亿立方米的规模[4]。林业碳汇具有巨大的潜力和价值，但在实际操作中，其效率问题却面临着诸多挑战，如由于受资源禀赋和经营管理水平的影响，林业碳汇效率存在地区差异。当前，我国已出台一系列支持林业碳汇的政策措施，如开发林业碳汇项目、开展林业碳汇交易试点等，以提升林业碳汇经济效益。

当前对林业碳汇的研究主要集中在林业碳汇的内涵、林业碳汇量的测算[5]和林业碳汇效率[6]上。部分学者认为林业碳汇是从空气中吸收温室气体的过程[7]，或者是单位时间内森林碳储量的变化[8]。对于林业碳汇量测算，学者们从全国[9]、天保工程区[10]等各层面展开。运用的方法主要有样地勘测法、遥感估测法和模型模拟法。样地勘测法中最常用的是生物量法[11]和蓄积量法[12]。徐思若(2024)采用生物量转换因子连续函数法对黑龙江省1999~2018年的森林碳储量进行测算[5]；张颖(2024)采用森林蓄积量法核算我国1973~2018年间森林资源总碳储量，发现中国森林碳汇潜力巨大[13]。现有文献普遍采用基于非参数的数据包络分析方法(DEA) [14] [15]和基于参数的随机前沿生产函数[16]对林业经济效率[17]、林业全要素生产效率[18]、林业生态效率[19]、林业固碳效率[20]等进行探讨。涉及林业碳汇效率的研究较少，并且大多采用静态DEA模型[21]或动态DEA-Malmquist [22]等方法，角度单一。整体来看中国林业碳汇效率偏低[23]，尽管在森林资源丰富的地区也不例外[10]。黄衍等(2023)在研究中创新性地引入了效率补

偿机制对中国 8 个省份的森林碳汇效率进行评价,发现林业投入和人才技术是森林碳汇高质量发展的关键[24]。林业碳汇效率存在时空格局差距。张启航采用三阶段超效率数据包络分析模型对林业碳汇效率进行了深入探讨,其研究发现,林业碳汇效率具有空间非均衡性[9]。

综上所述,在效率研究领域,学者们的聚焦点往往关注于林业的经济效率和生态效率上,尽管对蓄积量有所考量,却忽略了林业所产生的碳汇效率。考虑到林业碳汇的社会经济属性,作为一种生产活动,林业碳汇的投入和产出是否合理尚需深入研究。为此,本文采用以林业碳汇量为产出指标,以劳动力、林业固定投资总额、造林面积和林业病虫害防治率为投入指标的 DEA 模型对全国林业碳汇效率进行测度,探索实现更高效率的途径,期望能够为林业碳汇的科学管理、政策制定及市场机制的完善提供新的思路与依据。

2. 数据与方法

2.1. 数据来源与数据处理

由于重庆市、西藏自治区统计数据缺失,参考相关文献,本文以中国大陆 29 个省(市、区)为研究对象。产出指标林业碳汇量由蓄积量扩展法算出,其余涉及到的数据来源于《中国统计年鉴》《中国林业统计年鉴》。

为了研究的一致性和数据的可获得性,选取了 2004、2008、2013、2018 年 4 次清查数据进行分析。由于中国尚未公布最新的(2022 年)森林资源清查数据,为使研究更具全面性与合理性,从 2019 年起使用灰色预测方法将森林蓄积量数据延续到 2022 年,其余投入指标缺失数据用线性插值法进行补充。

其次为确保投入指标与产出指标在时间维度上具有一致性,分别取林业系统从业人员和林业投资完成额在 4 次森林资源清查时段的平均值,并将 4 个时段分别记为 I、II、III 和 IV。为考察林业碳汇效率 2004~2022 年的空间分布规律,参照 Zhang et al. (2013) 等学者的做法,将 29 个省(市、区) 2004~2022 年林业碳汇效率值进行分区定等: [1.00, 0.90] 为碳汇效率高效区, [0.90, 0.80] 为碳汇效率亚高效区, [0.80, 0.50] 为碳汇效率中效区, [0.50, 0.00] 为碳汇效率低效区[25]。最后为了在更大范围内考察区域间的效率差异,借鉴 Wei and Shen (2022) 的做法,将各省份分为东北林区、南方林区、西南林区及北方林区[26]。

2.2. 投入产出指标说明

根据道格拉斯生产函数,投入要素包括劳动力、土地和资本。具体指标说明如下:

劳动投入: 劳动投入是林业生产和管理中的关键组成部分,包括植树、森林管理和采伐等多个环节。从《林业统计年鉴》中选取各地区林业系统当年年末从业人数来衡量劳动投入。

资本投入: 本文选取各地区每年度林业固定投资完成额作为资本投入量的具体衡量指标。林业固定投资完成额涵盖了林业生产和经营活动中的固定资产投资、基础设施建设、植物养护等多方面的资本支出,这些投资对于提升林业的生产效率具有重要意义。林业投资完成额的增加往往伴随着林业管理和碳汇技术的改进,有助于提升林业碳汇效率。

土地投入: 土地投入指标主要根据 IPCC 关于“土地利用、土地利用变化和林业”方面的优良做法,造林与再造林是林地利用的一种方式[27]。根据现有可以获得的数据,难以将造林或再造林区分开,故选取造林面积作为“造林与再造林”指标。

技术投入: 在以往林业碳汇效率的研究中,大部分研究将劳动力投入、资金投入、土地投入作为投入变量[28][29],然而随着科技的发展,科技也逐渐成为独立的生产要素,而病虫害会危害森林直接影响森林质量,对林业碳汇产生持续性的危害作用,故将林业病虫害防治率作为技术投入指标。

在构建本文的产出指标体系时，基于研究目标，选取“中国各省域的林业碳汇量”作为核心产出指标。林业碳汇效率评价指标体系如表 1 所示。

Table 1. Forestry carbon sink efficiency evaluation index system
表 1. 林业碳汇效率评价指标体系

指标	指标分类	可测度指标	单位
投入指标	劳动投入	各地区林业系统年末从业人数	人
	资本投入	林业固定资产投资	万元
	土地投入	造林面积	公顷
	技术投入	病虫害防治率	%
产出指标	林业碳汇量		百万吨
	林业总产值		万元

2.3. 模型构建

2.3.1. 森林蓄积量扩展法

蓄积量扩展法根据蓄积量求出生物量，再根据生物量与固碳量的转化系数求出碳汇量，并且能够对林下植物、地下腐殖质和森林土壤的固碳量进行研究。实用性强，同时准确性较高。因此，本文采用蓄积量扩展法对中国 29 个省(市、区)的林业碳汇量进行计算。参照张娟等[30]的做法，具体计算方式如公式(1)所示：

$$C = C_1 + C_2 + C_3 = V * a * \rho * \gamma + \alpha(V * a * \rho * \gamma) + \beta(V * a * \rho * \gamma) \quad (1)$$

式中： C 表示森林总的蓄积量； C_1 表示林木碳汇量； C_2 表示林下植物碳汇量； C_3 表示林地碳汇量； V 表示森林蓄积量； a 表示蓄积扩大系数； ρ 表示容积密度； γ 表示含碳率； α 表示林下植物碳转换系数； β 表示林地碳转换系数。各系数采用 IPCC 默认值即 a 、 ρ 、 γ 、 α 、 β 分别取 1.9、0.5、0.5、0.195、1.244。

2.3.2. 林业碳汇效率评价方法

采用 DEA-BCC 模型和 DEA-Malmquist 模型对林业碳汇效率进行静态效率测量和动态演进过程分析。具体公式如下：

DEA-BCC 模型

相较于 CCR 模型，DEA-BCC 模型能够测算多阶段测度效率。鉴于我国森林资源的规模报酬始终处于动态变化之中，采用规模报酬可变(VRS)的 BCC 模型来进行分析与评估，更能贴切地反映现实情况的需求。因此，本研究参照杨仙艳等人[31]的做法，选择 BCC 模型。选择 BCC 模型。BCC 模型假设规模收益处于变化的状态，具体模型如下：

$$\begin{cases} \max(u^T y_i - \mu_0) \\ \omega^T x_j - u^T y_j \geq 0 \\ \omega^T x_i = 1 \\ \omega \geq 0, \mu \geq 0 \\ j = 1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (2)$$

加入松弛变量后，其对偶模型为：

$$(D_{BCC}) = \begin{cases} \min \theta \\ \sum_{j=1}^n x_j \lambda_j + s^- = \theta x_i \\ \sum_{j=1}^n y_j \lambda_j - s^+ = y_i \\ \sum_{j=1}^n y_j = 1 \\ \lambda_j \geq 0, j = 1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (3)$$

若 $\theta = 1$ ，则 DMU_{j_0} 为弱 BCC 有效，若同时满足 $s^+ = 0, s^- = 0$ ，则 DMU_{j_0} 为 BCC 有效；若 $\theta < 1$ 则 DMU_{j_0} 为 BCC 无效。

DEA-Malmquist 模型

Malmquist 指数用于考察跨期 DMU 的生产率变动情况并对其进行分解，评价全要素生产率变动情况。通过生产可能集和距离函数最终确定的全要素生产率，是学术界运用最多的 Malmquist 指数模型。相较于传统的 BCC 和 CCR 模型，DEA-Malmquist 方法引入了 Malmquist 指数。这一指数的引入使得该方法能够对不同时间点的效率水平进行比较，从而更好地捕捉效率的变化趋势以及演变过程。参照张亚连等人[32]的做法，构建 DEA-Malmquist 模型。如果以 t 期为参考，Malmquist 生产率指数表示如下：

$$M_0 = (X^{t+1}, Y^{t+1}, X^t, Y^t) = \left[\frac{D_0^t(X^{t+1}, Y^{t+1})}{D_0^t(X^t, Y^t)} \right] \quad (4)$$

$D_0^t(X^{t+1}, Y^{t+1})$ 表示参照该时期技术的第 t+1 期的全要素生产率； $D_0^t(X^t, Y^t)$ 表示参照该时期技术的当期全要素生产率；而如果基于 t+1 期参照技术，Malmquist 生产率指数则表示如下：

$$M_0 = (X^{t+1}, Y^{t+1}, X^t, Y^t) = \left[\frac{D_0^{t+1}(X^{t+1}, Y^{t+1})}{D_0^{t+1}(X^t, Y^t)} \right] \quad (5)$$

$D_0^{t+1}(X^{t+1}, Y^{t+1})$ 表示参照 t+1 时期技术的当期全要素生产率； $D_0^{t+1}(X^t, Y^t)$ 表示参照 t+1 时期技术的第 t 期全要素生产率。

由于两期指数在经济上是信息对称的，因此定义 t 期到 t+1 期的 Malmquist 指数公式如下：

$$M_0 = (X^{t+1}, Y^{t+1}, X^t, Y^t) = \left\{ \left[\frac{D_0^t(X^{t+1}, Y^{t+1})}{D_0^t(X^t, Y^t)} \right] \left[\frac{D_0^{t+1}(X^{t+1}, Y^{t+1})}{D_0^{t+1}(X^t, Y^t)} \right]^{\frac{1}{2}} \right\} \quad (6)$$

即综合生产率指数为两期指数的几何平均值。表示 t 期到 t+1 期生产率的改变。Malmquist 指数大于 1，表示全要素生产率上升；若小于 1，则表明全要素生产率降低。

将 Malmquist 指数进一步分解，公式如下：

$$EFFCH = \frac{D_0^{t+1}(X^{t+1}, Y^{t+1})}{D_0^t(X^t, Y^t)} \quad (7)$$

$$TECHCH = \left\{ \left[\frac{D_0^t(X^{t+1}, Y^{t+1})}{D_0^t(X^t, Y^t)} \right] \left[\frac{D_0^{t+1}(X^t, Y^t)}{D_0^{t+1}(X^t, Y^t)} \right]^{\frac{1}{2}} \right\} \quad (8)$$

综合技术效率 EFFCH 可以分解为纯技术效率(PECH)和规模效率(SECH)，三者关系为 $EFFCH = SECH * PECH$ ，因此全要素生产率可表示为：

$$TEPCH = TECHCH * SECH * PECH \tag{9}$$

3. 结果与分析

3.1. 静态效率评价分析

Table 2. Static value of forestry carbon sink efficiency by region in 2004~2022

表 2. 2004~2022 年各地区林业碳汇效率静态值

区域	省份	纯技术效率				规模效率				综合效率			
		I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV
北方林区	北京	1	0.645	0.7	0.569	0.03	0.091	0.152	0.094	0.03	0.059	0.106	0.053
	天津	1	1	1	1	0.059	0.094	0.127	0.175	0.059	0.094	0.127	0.175
	河北	1	0.487	0.581	0.537	0.1	0.222	0.205	0.329	0.1	0.108	0.119	0.177
	山西	1	0.673	0.705	0.591	0.096	0.15	0.169	0.234	0.096	0.101	0.119	0.138
	山东	1	0.463	0.542	0.579	0.031	0.203	0.21	0.151	0.031	0.094	0.114	0.087
	河南	1	0.507	0.619	0.593	0.108	0.307	0.346	0.327	0.108	0.156	0.214	0.194
	陕西	1	0.712	0.708	0.735	0.528	0.513	0.463	0.524	0.528	0.365	0.328	0.385
	甘肃	1	0.651	0.804	0.691	0.177	0.397	0.258	0.242	0.177	0.258	0.208	0.167
	青海	1	0.873	0.92	0.888	0.142	0.137	0.088	0.127	0.142	0.119	0.081	0.112
	宁夏	1	1	1	1	0.018	0.021	0.022	0.03	0.018	0.021	0.022	0.03
新疆	1	0.686	0.763	0.806	0.497	0.619	0.537	0.576	0.497	0.425	0.41	0.464	
东北林区	内蒙古	1	1	1	1	0.879	1	1	1	0.879	1	1	1
	辽宁	1	0.576	0.657	1	0.271	0.572	0.517	0.54	0.271	0.33	0.34	0.54
	吉林	1	1	0.943	0.915	1	1	0.962	0.893	1	1	0.908	0.818
	黑龙江	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
南方林区	上海	1	1	1	1	0.01	0.068	0.175	0.115	0.01	0.068	0.175	0.115
	江苏	1	0.599	0.648	0.708	0.038	0.205	0.345	0.224	0.038	0.123	0.224	0.159
	浙江	1	0.955	1	1	0.837	0.917	0.998	0.881	0.837	0.875	0.998	0.881
	安徽	1	0.637	0.65	0.596	0.208	0.694	0.437	0.538	0.208	0.442	0.284	0.321
	福建	1	1	0.925	0.894	1	1	0.988	0.9	1	1	0.914	0.805
	江西	1	0.759	0.783	0.68	0.562	0.649	0.594	0.486	0.562	0.492	0.465	0.331
	贵州	1	0.679	0.695	0.576	0.177	0.583	0.5	0.573	0.177	0.396	0.348	0.33
	湖北	1	0.657	0.71	0.662	0.174	0.579	0.413	0.531	0.174	0.38	0.293	0.352
	湖南	1	0.726	0.686	1	0.237	0.46	0.352	0.464	0.237	0.334	0.242	0.464
	广东	1	1	1	0.906	1	0.778	0.444	0.506	1	0.778	0.444	0.458
广西	1	1	1	1	1	1	1	0.776	1	1	1	0.776	
海南	1	1	1	1	0.409	0.895	1	0.543	0.409	0.895	1	0.543	
西南林区	四川	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
	云南	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	

基于上述指标, 选用 2004~2022 年间中国各省林业碳汇产出数据, 使用 Deap 2.1 软件测算 DEA-BCC 模型, 测算结果如表 2 所示。29 个省(市、区)林业碳汇效率呈现明显的不平衡性。其中, 东北林区和西南林区的林业碳汇效率显著领先于国内其他省份。西南林区省份中的四川、云南的林业碳汇效率值都为 1, 处于碳汇效率高效区, 这与舒明远[10]的研究结论一致。林业政策和碳汇项目的开发使得碳汇效率在一定时间内处于稳定状态。四川和云南两省均出台了相关政策和行动方案以推动林业碳汇的发展。例如, 四川省林业和草原局印发了《四川林草碳汇行动方案》, 云南省也发布了《关于推进森林可持续经营的指导意见》。四川和云南都在积极开发和实施林业碳汇项目。四川省在雅安市等地通过低效林改造补植补种, 大力提高森林质量, 预计可吸收大量二氧化碳。云南省则通过森林资源清查和监测, 为林业碳汇项目的开发提供了数据支持; 从东北林区看, 青海、宁夏等地处碳汇效率低效区, 因地形、气候等致造林难、规模小、产量低。北京、天津、河北等经济发达地区天然林少, 多人工造林, 虽成效显著但周期长致碳汇产出不高, 也为低效区。南方林区中, 2004~2008 年福建、广东、广西等省综合效率值为 1, 达到有效。黑龙江在东北林区四个阶段效率值均为 1。说明上述地区在前期调整森林投入冗余与产出不足问题获得显著成效, 碳汇产出达高水平。

为了对林业碳汇效率水平有一个直观的认识, 对四个时段的碳汇效率数值做算术平均处理, 如表 3 所示。第 I、II、III、IV 阶段, 29 个省(市、区)的综合效率平均值分别为 0.434、0.480、0.465、0.444, 说明碳汇效率水平处于低效状态, 有待提高。在四个不同的时段内, 纯技术效率与综合效率的平均值均未能达到 1, 整体而言呈现出低效状态。进一步分析发现, 这四个时段内的规模效率水平相较于纯技术效率明显偏低, 这表明规模效率的低下成为了制约综合效率提升的关键因素, 限制了整体效率的进一步优化。

Table 3. Average forestry carbon sink efficiency in 2004~2022

表 3. 2004~2022 年林业碳汇效率平均值

时段	平均值			省份数量		
	纯技术效率	规模效率	综合效率	规模收益递减	规模收益递增	规模收益不变
I	1.000	0.434	0.434	0	22	7
II	0.803	0.557	0.480	0	22	7
III	0.829	0.528	0.465	1	22	6
IV	0.825	0.510	0.444	0	25	4

从纯技术效率来看, 4 个时段中 29 个省(市、区)林业碳汇效率的纯技术效率维持在 0.8 左右, 处于效率亚高效区, 还需要推动林业科技变革、提升林业技术水平。从规模效率分析, 整个时段内林业碳汇规模效率平均值 0.507, 整体偏低。全时段 DEA 有效的有四川、云南和黑龙江, 其在现有产业结构下规模已达最优。第一阶段, 黑龙江、四川、云南、内蒙古规模效率为 1; 第二和第三阶段, 四川、云南规模效率为 1; 第四阶段, 仍只有四川、云南、黑龙江规模效率为 1, 这些区域处于固定规模报酬阶段, 规模效率有效。这些地区凭借森林资源优势, 森林面积广阔且林业用地面积领先, 加上土地资源有效利用和丰富劳动力, 提升了林业碳汇经济效率。而在第四阶段, 宁夏、北京、上海面临林业碳汇规模效率滞后挑战。这些省市因林业用地有限、森林覆盖率低, 需科学规划生产要素分配投入, 优化经济产出效益, 为实现碳达峰与碳中和目标贡献力量。

3.2. 动态效率评价分析

为了分析林业碳汇效率的动态变化趋势, 利用 Malmquist 指数对各阶段各区域的碳汇效率进行测算,

结果如表 4 所示。从时间序列来看,中国林业碳汇的全要素生产率呈“U”型,技术进步指数和技术效率变化指数是全要素生产率上升的共同推动力。在第一至第二阶段,尽管全要素生产率大于 1,但技术进步指数(TI)却低于 1,与此同时,技术效率(TE)及其纯技术效率(PTE)的变化指数均超过 1。这一现象表明,在此阶段,技术进步指数的滞后是制约全要素生产率进一步提升的主要因素。在第三至第四阶段,技术效率进步指数与技术进步指数均大于 1,两者共同作用,促使全要素生产率显著提升。就技术进步指数而言,文章查阅 2004~2013 年《中国林业统计年鉴》的数据,发现在第一和第二阶段,林业专业技术人员从 2004 年的 27,044 人上升到 2013 年的 46,478 人,林业技术研发投入也逐年上升,然而可能存在林业科技成果转化率低等问题,加之林业政策还在规划完善的阶段,导致技术进步指数限制了全要素生产率的增长。自 2013 年开始,随着《中华人民共和国农业技术推广法》《中央财政林业补助资金管理办法》和《国有林区改革指导意见》等与林业发展相关的政策文件的出台和完善,林业技术推广体系得到健全,使得技术进步指数同样促进了全要素生产率的增长。

Table 4. Changes in Malmquist production index for forestry carbon sinks in 2004~2022

表 4. 2004~2022 年林业碳汇 Malmquist 生产指数变化

时段	Effch 技术效率 (EC)	Techch 技术进步 (TC)	Pech 纯技术效率 (PEC)	Sech 规模效率 (SEC)	Tfpch 全要素生产率 (TFP)
I-II	1.592	0.900	0.940	1.733	1.393
II-III	1.084	1.072	1.047	1.038	1.162
III-IV	1.032	1.404	0.999	1.032	1.359

通过对各地区生产效率指数及其分解因素的分析,结果显示,在大多数地区,全要素生产率指数均实现了大于 1 的增长。具体而言,除了福建、青海、宁夏等少数省份外,其余省份的技术进步指数均大于 1。此外,在技术效率变化指数方面,有 22 个省份的该指数也大于 1,表明这些地区在技术效率的提升上取得了积极成效。技术效率无效的省份需加强林业碳汇的协调发展提升林业碳汇效率林业碳汇效率呈现正向演进,顺应国家在发展林业的过程中更注重生态功能作用的发挥。

从全要素生产率来看(表 5),四大林区的林业碳汇效率由高到低依次为南方林区 > 北方林区 > 西南林区 > 东北林区。南方林区凭借温暖湿润的气候条件、丰富的劳动力资源、充足的资本投入及先进的病虫害防治技术,为林木的快速生长和高效碳汇创造了优越环境,从而林业碳汇效率水平。北方林区虽面临寒冷气候挑战,但凭借针叶树种的耐寒特性及不断提升的管理水平,其碳汇效率紧随其后。西南林区则因地形复杂、资本投入相对不足及病虫害防治难度大等因素,碳汇效率低于北方林区。而东北林区,受寒冷漫长的气候条件、土壤冻结期长及可能的人才流失问题影响,其碳汇效率在四大林区中相对最低。因此,提升各林区碳汇效率需因地制宜,强化劳动投入、加大资本支持、优化病虫害防治措施并充分利用自然条件优势。

Table 5. Changes in the efficiency of forestry carbon sinks in 2004~2022

表 5. 2004~2022 年林业碳汇效率变动情况

区域	技术效率	技术进步	纯技术效率	规模效率	全要素生产率
北方林区	1.201	1.123	0.978	1.254	1.291
东北林区	1.065	1.094	1.037	1.035	1.172
南方林区	1.366	1.117	0.997	1.402	1.370
西南林区	1.000	1.251	1.000	1.000	1.251

4. 结论和建议

4.1. 结论

本文采用 DEA-BCC 模型和 Malmquist 模型对中国 29 个省份(除重庆、西藏外)2004~2022 年的林业碳汇效率进行了测度与区域分析, 研究结论如下:

1) 从静态方面看, 中国 29 个省份的林业碳汇平均综合效率较低, 碳汇水平提升空间大。林业碳汇综合效率平均值分别为 0.434、0.480、0.465 和 0.444。与规模效率相比, 全国林业碳汇纯技术效率水平总体较高。此外在一定的林业碳汇投入下, 现有技术效率下的森林规模碳汇与最优规模碳汇的比例逐渐增加, 这意味着为增加林业碳汇而采取的一系列造林、再造林和生态恢复等措施是有效的。综合技术效率低主要是由规模效率低造成的, 表明当前林业碳汇的规模效率是制约林业碳汇效率提高的主要因素。

2) 从动态方面看, Malmquist 生产指数呈波动上升的趋势, 技术进步指数和技术效率进步指数共同促进了生产效率指数的增长。四大林区的林业碳汇效率由高到低依次为南方林区 > 北方林区 > 西南林区 > 东北林区, 空间差异显著。

4.2. 建议

1) 完善体制机制, 转换林业碳汇粗放型增长方式, 优化资源配置。增强财政支持力度, 大力引导社会资本参与, 通过多方投入推动林业碳汇实现高效发展。以科技创新为导向, 加大林业技术的投入和推广, 开展国际合作, 引进国外先进的林业技术和管理经验, 提高林业碳汇的科技水平。重视林业系统中就业劳动力的素质, 全力培养和引进人才, 促使人才资源向低效型城市倾斜流动。相关部门可通过录用专业技术人员、管理人才、培养高科技及尖端管理等适用人才, 同时, 建立激励机制, 实现引才、留才、用才的良性循环。提高创新型人才在林业骨干中的比重, 提高林业整体发展水平。

2) 推广规模化经营模式, 加强森林经营管理。鼓励和支持林业企业、合作社及农户通过土地流转、联合经营等方式, 实现林业碳汇项目的规模化、集约化经营。通过统一规划、统一标准、统一管理, 降低单位面积经营成本, 提高资源利用效率, 促进规模效益的发挥。引入现代林业管理技术, 如精准林业、智能监测等, 提高森林经营管理水平。加强对幼龄林、中龄林的抚育管理, 促进林木健康生长, 提高单位面积碳汇量。

3) 统筹发展战略, 因地制宜提升碳汇效率。无论是碳汇综合效率还是全要素生产率指数, 我国各省差异明显, 四川、云南等自然资源丰富的地区遥遥领先, 天津等地区相对薄弱。分地区执行来看, 南方林区依托其技术与市场优势, 应强化林业科技创新, 聚焦高固碳树种培育、森林管理及碳汇监测。鉴于西南林区生态脆弱性, 应加大生态保护力度, 实施天然林保护、退耕还林等工程, 维护生态系统稳定性, 同时发展特色林业经济。北方林区需加强森林健康管理, 提升碳汇能力, 并探索碳汇交易机制, 吸引投资。东北林区推动传统林业产业向绿色、低碳、高效方向转型升级, 发展木材深加工、生物质能源等新兴产业, 提高林业综合效益。

基金项目

2022 年度广西人文社会科学发展研究中心“科学研究工程”专项项目“‘双碳’目标下广西城市群碳达峰预测及差异化减排路径研究”(WKZX2022001); 四川省社会科学重点研究基地系统科学与企业发展研究中心重点项目“‘双碳’目标下我国城市群碳达峰预测及差异化减排路径研究”(XQ22B09)。

参考文献

- [1] Galeotti, M., Lanza, A. and Pauli, F. (2006) Reassessing the Environmental Kuznets Curve for CO₂ Emissions: A Robustness Exercise. *Ecological Economics*, 57, 152-163. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2005.03.031>

- [2] Shevliakova, E., Stouffer, R.J., Malyshev, S., Krasting, J.P., Hurtt, G.C. and Pacala, S.W. (2013) Historical Warming Reduced Due to Enhanced Land Carbon Uptake. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **110**, 16730-16735. <https://doi.org/10.1073/pnas.1314047110>
- [3] Chen, J., Xu, C., Wang, Y., Li, D. and Song, M. (2021) Carbon Neutrality Based on Vegetation Carbon Sequestration for China's Cities and Counties: Trend, Inequality and Driver. *Resources Policy*, **74**, Article 102403. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2021.102403>
- [4] Zhao, N., Wang, K. and Yuan, Y. (2023) Toward the Carbon Neutrality: Forest Carbon Sinks and Its Spatial Spillover Effect in China. *Ecological Economics*, **209**, Article 107837. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2023.107837>
- [5] 徐思若, 成志影, 那雪迎, 等. 黑龙江省森林碳汇及其经济价值的变化分析与潜力预测[J]. 生态学杂志, 2024, 43(1): 197-205.
- [6] Wang, J., Shi, K. and Hu, M. (2022) Measurement of Forest Carbon Sink Efficiency and Its Influencing Factors Empirical Evidence from China. *Forests*, **13**, Article 1909. <https://doi.org/10.3390/fl3111909>
- [7] 宋平, 赵荣, 胡利娟, 等. 推动“双碳”目标实现的林业碳汇科学传播策略[J]. 世界林业研究, 2023, 36(2): 89-94.
- [8] 杜之利, 苏彤, 葛佳敏, 等. 碳中和背景下的森林碳汇及其空间溢出效应[J]. 经济研究, 2021, 56(12): 187-202.
- [9] 张启航, 张亚连, 谭桂菲, 等. 中国林业碳汇效率时空演化特征——基于三阶段超效率 SBM-DEA 模型[J]. 生态学报, 2024(15): 1-14.
- [10] 舒明远, 吴家治, 李晨阳, 等. 天保工程区森林碳汇效率演进分析[J]. 林业经济问题, 2022, 42(5): 490-497.
- [11] Fang, J., Wang, G.G., Liu, G. and Xu, S. (1998) Forest Biomass of China: An Estimate Based on the Biomass-Volume Relationship. *Ecological Applications*, **8**, 1084-1091. [https://doi.org/10.1890/1051-0761\(1998\)008\[1084:fbocae\]2.0.co;2](https://doi.org/10.1890/1051-0761(1998)008[1084:fbocae]2.0.co;2)
- [12] 郝婷婷, 李顺龙. 黑龙江省森林碳汇潜力分析[J]. 林业经济问题, 2006(6): 519-522+526.
- [13] 张颖, 李晓格, 温亚利. 碳达峰碳中和背景下中国森林碳汇潜力分析研究[J]. 北京林业大学学报, 2022, 44(1): 38-47.
- [14] 金哲丽, 曹冰玉. 基于 DEA 模型的湖南省林业投资效率分析[J]. 中南林业科技大学学报(社会科学版), 2020, 14(2): 89-95.
- [15] 张译, 熊曦. 绿色发展背景下中国林业生态效率评价及影响因素实证分析——基于 DEA 分析视角[J]. 中南林业科技大学学报, 2020, 40(4): 149-158.
- [16] 徐玮, 白静, 包庆丰. 内蒙古林业生产技术效率及其影响因素的实证研究——基于随机前沿生产函数[J]. 林业经济, 2017, 39(12): 89-94+112.
- [17] 吕洁华, 付思琦, 张滨. 黑龙江省国有重点林区林业经济投入产出效率研究[J]. 林业经济问题, 2019, 39(3): 300-306.
- [18] 吕洁华, 孙嘉宇, 蔡秀亭. 中国林业绿色全要素生产率的时空演变分析[J]. 农林经济管理学报, 2022, 21(3): 320-330.
- [19] 余红红, 杨加猛. 我国森林生态效率测算及时空演变分析[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2023, 47(2): 167-177.
- [20] 薛龙飞, 罗小锋, 吴贤荣. 中国四大林区固碳效率: 测算、驱动因素及收敛性[J]. 自然资源学报, 2016, 31(8): 1351-1363.
- [21] He, X., Chen, L. and Huang, Y. (2022) A Study of Forest Carbon Sink Increment from the Perspective of Efficiency Evaluation Based on an Inverse DEA Model. *Forests*, **13**, Article 1563. <https://doi.org/10.3390/fl3101563>
- [22] Vilkov, A. and Tian, G. (2024) Efficiency Evaluation of Forest Carbon Sinks: A Case Study of Russia. *Forests*, **15**, Article 649. <https://doi.org/10.3390/fl5040649>
- [23] 姚仁福, 边文燕, 范宏琳, 等. 中国省域森林碳汇效率演进分析[J]. 林业经济问题, 2021, 41(1): 51-59.
- [24] 黄衍, 陈丽焯, 吴楠, 等. 基于效率补偿机制的区间标杆面研究——以森林碳汇效率为例[J]. 中国管理科学, 2023, 31(12): 317-328.
- [25] Zhang, Z., Liu, Y.Y., Ding, W.M., et al. (2013) Measurement and Optimum Design of the Carbon Sequestration Efficiency of Regional Forestland Use Process. *Editorial Office of Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, **18**, 251-261.
- [26] Wei, J. and Shen, M. (2022) Analysis of the Efficiency of Forest Carbon Sinks and Its Influencing Factors—Evidence from China. *Sustainability*, **14**, Article 11155. <https://doi.org/10.3390/su141811155>

-
- [27] UNFCCC (2000) Methodological Issues, Land-Use, Land-Use Change and Forestry, Submissions from Parties. *SBSTA 13th Session*, Lyon, 11-15 September 2000.
- [28] 杨吉. “双碳”背景下我国林业碳汇经济效率评价及影响因素[J]. 中南林业科技大学学报, 2024, 44(8): 201-208.
- [29] 李文博, 刘滨, 余松, 等. 江西省林业产业投入产出效率评价[J]. 江西农业学报, 2021, 33(5): 131-137.
- [30] 张娟, 陈钦. 森林碳汇经济价值评估研究——以福建省为例[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2021, 43(5): 121-128.
- [31] 杨仙艳, 邓思宇, 刘伟平. 基于 DEA 方法的福建林业投入产出效率分析——以福建省 10 县 210 户农户调研数据为例[J]. 中国林业经济, 2017(2): 1-5.
- [32] 张亚连, 张启航, 梁旭文. 碳中和愿景下林业碳汇经济价值评估及效率测算[J]. 中南林业科技大学学报(社会科学版), 2024, 18(1): 71-81.