

DOI: 10.20103/j.stxb.202311172510

张启航, 张亚连, 谭桂菲, 黄崇超, 袁宝龙. 中国林业碳汇效率时空演化特征——基于三阶段超效率数据包络分析模型. 生态学报, 2024, 44(15): 6769-6782.

Zhang Q H, Zhang Y L, Tan G F, Huang C C, Yuan B L. Spatio-temporal evolutionary characteristics of forestry carbon sink efficiency in China based on a three-stage super-efficiency SBM-DEA model. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(15): 6769-6782.

中国林业碳汇效率时空演化特征 ——基于三阶段超效率数据包络分析模型

张启航¹, 张亚连^{1,*}, 谭桂菲², 黄崇超^{1,2}, 袁宝龙¹

¹ 中南林业科技大学 商学院, 长沙 410004

² 广西壮族自治区林业科学研究院, 南宁 530001

摘要: 提高林业碳汇效率是缓解气候变化、实现碳中和的重要路径。客观评价我国林业碳汇效率及其时空演化特征, 有助于加快国土空间绿化进程。采用三阶段超效率 SBM-DEA 模型对中国 30 个省(市、区) 2008—2021 年林业碳汇效率进行测度, 并运用 GML 指数、Moran's I 指数和空间马尔科夫链等方法对林业碳汇效率的变化规律及时空演化特征进行分析。研究发现: (1) 中国林业碳汇效率总体水平不高, 不同地区间差异明显; 四大林区林业碳汇效率呈现“西南林区>东北林区>南方林区>北方林区”的空间分异格局; 剔除外部环境和随机误差的影响后, 低效率地区呈现出“追赶”高效率地区的趋势。(2) 林业碳汇效率变化呈上升趋势, 其中 GML 指数最高的地区为东北林区、最低的为北方林区; 技术进步对林业碳汇效率提升的贡献较大, 不同地区对综合效率的依赖程度不同。(3) 林业碳汇效率具有空间非均衡性, 高效率地区与低效率地区间呈现“包围状”分布, 且该特征在时间上保持稳定; 2015 年后林业碳汇效率存在显著空间正相关性, 空间分布存在聚集效应; 考虑空间滞后项的空间马尔科夫链结果表明, 邻域类型对林业碳汇效率状态转移影响显著, 空间分布上具有较强的近邻效应, 呈现“高高趋同, 低低趋同, 高带动低, 低抑制高”的空间演化特征。研究对提升生态系统碳汇能力与建设人与自然和谐共生的现代化具有重要现实意义。

关键词: 林业碳汇效率; 碳中和; 时空演化特征; 三阶段超效率数据包络分析模型

Spatio-temporal evolutionary characteristics of forestry carbon sink efficiency in China based on a three-stage super-efficiency SBM-DEA model

ZHANG Qihang¹, ZHANG Yalian^{1,*}, TAN Guifei², HUANG Chongchao^{1,2}, YUAN Baolong¹

¹ Business College, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, China

² Guangxi Forestry Research Institute, Nanning 530001, China

Abstract: There exists a significant pathway in mitigating climate change and achieving carbon neutrality, which is to enhance the efficiency of forestry carbon sink. An objective evaluation of China's forestry carbon sink efficiency and its spatio-temporal evolutionary characteristics plays a crucial role in speeding up the process of national land greening. The three-stage super-efficiency SBM-DEA model was used to estimate forestry carbon sink efficiency in 30 provinces (municipalities and districts) in China from 2008 to 2021. At the same time, in order to find out the change rules and spatio-temporal evolutionary characteristics of forestry carbon sink efficiency, we used the methods of GML index, global Moran index and spatial Markov chain to carry out detailed analysis. The results revealed that: (1) In general, the level of

基金项目: 国家社会科学基金一般项目(22BJY197); 湖南省研究生科研创新项目(CX20230784); 湖南省会计科研课题(2024HNKJB32); 广西林业科技项目(桂林科字(2024)1号)

收稿日期: 2023-11-17; **网络出版日期:** 2024-05-24

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: t20061325@csuft.edu.cn

限于数据的可获取性, 本研究尚未含中国港澳台统计数据。

forestry carbon sink efficiency in China was not high, which had great room for improvement. The difference of forestry carbon sink efficiency among different regions was also very obvious. The spatial pattern of forestry carbon sink efficiency in four forest regions was Southwest Forest region>Northeast forest region>Southern forest region>Northern forest region. After eliminating the influence of external environment and random error, the low efficiency regions showed a trend of catching up with the high efficiency regions. (2) The change of forestry carbon sink efficiency showed an upward trend, and the region with the highest GML index was the northeast forest region and the lowest was the northern forest region. Technological progress had a great contribution to the improvement of forestry carbon sink efficiency, and different regions had different dependence on comprehensive efficiency. (3) The efficiency of forestry carbon sink was spatially non-equilibrium, with a “bounding” distribution between high-efficiency regions and low-efficiency regions, and this feature remains stable in time. After 2015, there was a significant spatial positive correlation between forestry carbon sink efficiency, and the spatial distribution had a clustering effect. The results of the spatial Markov chain considering the spatial lag term indicated that the neighborhood type had a significant impact on the state transition of forestry carbon sink efficiency, and there was a strong neighbor effect in the spatial distribution, showing the spatial evolution characteristics of “high and high convergence, low and low convergence, high drive low, low inhibition high”. The research is of great practical significance for enhancing the carbon sink capacity of forest ecosystem and constructing the modernization of harmonious coexistence between man and nature.

Key Words: forestry carbon sink efficiency; carbon neutrality; space and temporal evolutionary characteristics; three stage super-efficiency SBM-DEA

中国式现代化是人与自然和谐共生的现代化,要求经济发展与生态保护协同共进。在碳减排压力与日俱增与经济增速下行的现状下,林业成为稳步实现碳中和与促进经济绿色发展的重要基石,并在生态扶贫、碳汇交易及生态产品价值实现中拥有得天独厚的优势^[1]。随着《京都议定书》中清洁发展机制的生效,林业碳汇不仅成为抵减工业减排加速碳中和实现的创新路径,也成为当下双碳经济、林业经济发展的重要推手。然而,计量标准不统一、规范市场难建立等问题抑制着林业碳汇的产业化进程,制约着其生态与经济效益的发挥^[2]。甚至在某些林木资源禀赋良好的地区,贫困率反而更高,出现了“自然资源诅咒”的现象^[3]。党的二十大报告再次强调要提升生态系统碳汇能力。为此,如何提高林业碳汇效率作为缓解气候变化的重要议题引发了学者们的广泛关注。

林业碳汇效率是多种投入要素共同作用的结果,不仅强调森林的固碳价值也强调其经济价值^[4]。测算林业碳汇效率并分析其时空演化特征,是实现区域林业资源差异化管理的重要需求。目前,学者们围绕林业碳汇的研究已有一些进展,主要集中于林业碳汇的现状与潜力^[5]、成本节约^[6]、价值核算^[7]及政策演变^[8]。在林业相关效率研究上,学者们从全国^[9]、天保工程区^[10]、“两山”发源地^[11]等各层面展开,利用了 BCC 模型^[12]、超效率 SBM^[13]、Malmquist 指数^[14]等模型,探讨了林业的生态效率及全要素生产率^[15–16]。涉及林业碳汇效率的研究较少,整体来看中国林业碳汇效率偏低^[17],尽管在天保工程区等森林资源丰富的地区也不例外^[18]。黄衍等^[19]引入了效率补偿机制与区间标杆面,发现 8 个省份在经济、资源或管理上具有优势,成为了林业碳汇效率评价中的标杆。在时空格局方面,林业碳汇量的区域间差距较大^[20],森林资源禀赋越好的地区,其效率值也更高^[21]。Zhao 等^[22]研究表明各省份林业碳汇效率随时间趋于高(低)水平,呈现低效率和高效率的“双峰分布”。林业碳汇的跨区域空间关联特征也体现在其空间溢出效应上^[23],杜之利等^[24]和付伟等^[20]分别从全球和全国的视角探索了林业碳汇的空间外溢效益,发现区域间林业碳汇的发展往往无法独善其身。在影响因素上,数字经济的发展^[25]、国家财政的支持^[26]和林业产业聚集水平^[27]都在不同程度上影响着林业相关效率的提升。

综上所述,现有研究对于林业碳汇和相关效率已有较为深入的讨论,但仍有进一步拓展的空间。在研究

方法上,学者们从 BBC、Malmquist 指数法逐渐演进为更优的超效率 SBM 和 ML 指数,但较少剔除环境因素与随机噪音的影响。在效率研究中,学者们更多关注了森林的生态效率,虽然对森林蓄积量有所考虑,但忽略了森林既是碳汇也是碳源^[28]。在时空演化特征方面,相关研究多集中于林业碳汇的分布,涉及林业碳汇效率的较少,且局限在一般性分析。基于此,本文利用三阶段超效率 SBM-DEA 模型和 GML 指数,从静态与动态两个方面测算 2008 年—2021 年 30 个省级行政区的林业碳汇效率。其中,将林业生产过程中的二氧化碳排放量作为非期望产出,使得林业碳汇效率的测算更接近现实情况,进而采用 Moran's I 指数和空间马尔科夫链等方法分析林业碳汇效率的时空演化特征。

1 模型构建、变量选取与数据来源

1.1 模型构建

数据包络分析(DEA)是运筹学与经济学领域常用的定量分析技术。它可对多个单位和决策单元的相对效率进行评估,并基于输入与输出数据计算效率得分。传统的 DEA 模型仅能基于截面数据而非面板数据评估决策单元效率,并且在权重假设、环境变量、尺度效率等方面有较大的局限性,对效率评估结果的解释能力不佳。因此,本文首先运用三阶段超效率 SBM-DEA 模型,在剔除了环境变量和随机误差项对决策单元效率的不利影响后,从静态视角对中国林业碳汇效率进行测算。然后,利用 Global Malmquist-Luenberger 指数模型从动态视角探索林业碳汇效率的变化规律。最后,利用自然断点法、Moran's I 指数和空间马尔科夫链进一步分析林业碳汇效率的时空演化特征。

1.1.1 三阶段超效率 SBM-DEA 模型

第一阶段基于的是非期望产出的超效率 SBM 模型,该模型是将每个省级行政区作为一个决策单元(DMU),其中包括 M 个生产要素 x_m (投入), L 个期望产出 y_l 与 K 个非期望产出 u_k ,包含非期望产出的 SBM 超效率模型的线性规划公式如下:

$$\rho = \min \left[\left(\frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \frac{s_m^x}{x_{m0}} \right) / \left(\frac{1}{L+K} \left(\sum_{l=1}^L \frac{s_l^y}{y_{l0}} + \sum_{k=1}^K \frac{s_k^u}{u_{k0}} \right) \right) \right]$$

$$s.t. \begin{cases} x_{m0} \geq \sum_{j=1, \neq 0}^n \lambda_j x_{mj} - s_m^x, \forall m \\ y_{l0} \leq \sum_{j=1, \neq 0}^n \lambda_j y_{lj} - s_l^y, \forall l \\ u_{k0} \geq \sum_{j=1, \neq 0}^n \lambda_j u_{kj} - s_k^u, \forall k \end{cases} \quad (1)$$

$$s_m^x \geq 0, s_l^y \geq 0, s_k^u \geq 0; x_i \geq 0, y_i \geq 0, u_i \geq 0, \lambda_i \geq 0; \forall m, l, k, i$$

式中, ρ 为所要测算的效率值; s_m^x 、 s_l^y 和 s_k^u 分别为投入变量、期望产出和非期望产出的松弛量; λ 为权重向量。其中, ρ 值的大小与该 DMU 的效率值呈现正相关关系,为了使测算出的效率值更接近实际效率值,本文参考闫佳惠和张越杰^[29]的做法将 DMU 值的设定条件为规模效率可变与全局参比。

第二阶段需用到随机前沿模型(SFA),由于管理无效率、环境因素及统计噪声会对第一阶段投入变量的松弛值产生影响,这会导致测算出的投入产出水平无法达到最大。因此,第二阶段采用 SFA 模型,剥离环境变量与随机误差的影响,得到仅由管理无效率造成的决策单元投入冗余。具体公式如下:

$$S_{mi}^t = f(E_{mi}^t, \eta_m) + v_{mi}^t + \zeta_{mi}^t, i = 1, 2, \dots, N; m = 1, 2, \dots, N; t = 1, 2, \dots, T \quad (2)$$

式中, S_{mi}^t 为第 m 项投入的松弛变量; E_{mi}^t 为环境变量, η_m 为其系数; $v_{mi}^t + \zeta_{mi}^t$ 为混合误差项,两项相互独立,分别代表随机误差与管理无效率。此外,利用 Fried 等^[30]提出的方法,利用随机误差项估计量来剥离管理无效率项和随机误差项,最终逼近随机误差因素的具体估计值,并运用如下公式调整初始投入:

$$x_{mi}^{t'} = x_{mi}^t + [\max(v_{mi}^t) - v_{mi}^t] + [\max(f(E_{mi}^t, \hat{\eta}_m)) - f(E_{mi}^t, \hat{\eta}_m)] \quad (3)$$

第三阶段是利用第二阶段调整后的数据,利用超效率 SBM-DEA 模型再次进行测算,此时所得到的效率值已剔除了外部环境和随机误差的影响,能更为准确的反映真实水平。

1.1.2 Global Malmquist-Luenberger 指数模型

GML 指数模型可用于林业碳汇效率的动态测算。Chung 等^[31]为解决传统 Malmquist 指数未考虑非期望产出的问题,将方向距离函数(DDF)引入 ML 指数当中。但 ML 指数模型仍存在不具备循环传递性及线性规划误解等缺点,Oh^[32]在此基础上构建了 GML 指数模型,通过定义全局生产技术集 $P^G(x) = P^1 \cup P^2 \cup \dots \cup P^T$,构造了单一生产前沿,以衡量不同时期、各决策单元技术效率与前沿的差距。设方向性向量为 $g = (g_y, g_b)$,则相应的第 t 期 DDF 形式为:

$$D^t(x^t, y^t, b^t; g) = \sup\{\beta \mid (y^t + \beta g_y, b^t - \beta g_b) \in P^t(x^t)\} \quad (4)$$

式中, t 表示时期, x, y, b 分别表示投入向量、期望产出向量和非期望产出向量。 β 为期望产出增加、非期望产出减少的最大可能值。在 DMU 投入要素既定的情况下,DDF 可最大限度增加期望产出、减少非期望产出。依据上述 DDF,定义第 t 期至 $t+1$ 期 GML 指数及其分解形式如下:

$$\begin{aligned} \text{GML}_{t+1}^t(x^t, y^t, b^t, x^{t+1}, y^{t+1}, b^{t+1}) &= \frac{1 + D^G(x^t, y^t, b^t)}{1 + D^G(x^{t+1}, y^{t+1}, b^{t+1})} \\ &= \frac{1 + D_v^t(x^t, y^t, b^t)}{1 + D_v^{t+1}(x^{t+1}, y^{t+1}, b^{t+1})} \times \left[\frac{1 + D_c^G(x^t, y^t, b^t)}{1 + D_c^t(x^t, y^t, b^t)} \cdot \frac{1 + D_v^{t+1}(x^{t+1}, y^{t+1}, b^{t+1})}{1 + D_c^G(x^{t+1}, y^{t+1}, b^{t+1})} \right] \times \\ &\quad \frac{1 + D_v^G(x^t, y^t, b^t)}{1 + D_v^t(x^t, y^t, b^t)} \cdot \frac{1 + D_v^{t+1}(x^{t+1}, y^{t+1}, b^{t+1})}{1 + D_v^G(x^{t+1}, y^{t+1}, b^{t+1})} \\ &= \text{GPEC}_{t+1}^t \times \text{GSE}_{t+1}^t \times \text{GTC}_{t+1}^t \end{aligned} \quad (5)$$

式中, GML_{t+1}^t 、 GPEC_{t+1}^t 、 GSE_{t+1}^t 、 GTC_{t+1}^t 分别表示 DMU 第 t 至 $t+1$ 期投入产出效率变化纯技术效率变化、规模效率变化及技术进步变化; GML_{t+1}^t 大于 1 代表投入产出效率提高,小于 1 则代表投入产出效率降低。

1.1.3 空间相关性分析模型

如果仅考虑本地区的森林资源禀赋而忽视其对周围地区的溢出效应,则会使得研究结论存有一定误差。为解决不同区域间相关空间依赖性问题,本文采用探索性数据分析方法,利用 Moran's I 指数从全局角度对林业碳汇效率进行空间相关性分析,以揭示林业碳汇效率的空间分布格局,具体公式如下所示:

$$\text{Moran's } I = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (\text{PTE}_i - \overline{\text{PTE}}) (\text{PTE}_j - \overline{\text{PTE}})}{S^2 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij}} \quad (6)$$

1.1.4 空间马尔科夫链

传统的马尔科夫链是一种基于时间序列的模型,它描述了一个系统在不同时间点之间状态的转移概率,其中状态的转移只取决于前一个时刻的状态。传统马尔科夫链假设系统的状态之间的转移概率与时间和空间位置无关,因此在空间分布不规则或具有空间相关性的系统中可能存在一定局限性。空间马尔科夫链的发展是对传统马尔科夫链的一种扩展,以考虑状态之间的空间相关性,能更为准确地反映林业碳汇效率向上或向下转移的演化规律。空间马尔科夫链在传统的基础上引入了空间滞后项,将状态转移概率矩阵划分为 k 个 $k \times k$ 矩阵。空间滞后项中纳入了对相邻省级行政区之间地理位置的考量,通过该省级行政区林业碳汇效率与空间权重的加权平均计算得出,具体公式如下:

$$\text{Lag}_j = \sum_{i=1}^n Y_i W_{ij} \quad (7)$$

式中, Lag_j 为 j 省级行政区的空间滞后项; Y_i 为 i 地区林业碳汇效率; n 为省级行政区数量;空间权重 W_{ij} 为 i

和 j 两个省级行政区间的空间关联度,本文采用地理邻接进行定义,若两个省级行政区相邻,则 w_{ij} 为 1,否则为 0。通过传统马尔科夫转移矩阵与空间马尔科夫转移矩阵结果的对比,可知邻域背景下林业碳汇效率转移的大小,进而分析邻域类型对某地区林业碳汇效率转移方向的影响。若邻域类型对林业碳汇效率的状态转移不存在影响,则:

$$P_{ab|1} = P_{ab|2} = \dots = P_{ab|n} = P_{ab}$$

1.2 变量选取

1.2.1 投入变量

资本、劳动力与土地是经济学中的三大生产要素。本文以林业系统从业人数(人)作为劳动力指标的投入量,林业土地的投入量则使用各省级行政区的森林面积(万公顷)来衡量。林业资本并未直接可用数据,选取林业固定资产投资完成额并利用永续盘存法计算得出,计算公式如下:

$$K_{it} = (1 - r) K_{it-1} + I_{it} \quad (8)$$

式中, K_{it} 为第 t 年 i 地区林业资本存量; I_{it} 为第 t 年 i 地区林业固定资产投资总额; r 为折旧率。本文参考张军等^[33]的做法,以 2008 年为基期,用固定资产投资价格指数对名义固定资产投资进行平减。

1.2.2 产出变量

本文的产出变量包括林业产业总产值和林业碳汇量两个期望产出,林业生产过程中的二氧化碳排放量为非期望产出变量。林业生产过程中的二氧化碳排放量本文综合了 Lin 等^[34]和吴建新等^[35]的方法计算得出。已有的碳汇量的核算方法较多,例如生物量法、碳周转模型法、遥感技术法和微气象法等,但这些方法或要求过高、或数据不易寻找,或需要借助其他领域的相关研究,实现难度较大。蓄积量法相对简单,且考虑了林分生长与凋落等生态因素,有较为成熟的计算体系,所以本文选取蓄积量法计算各地区碳汇量。蓄积量法具体包含了两部分内容:首先,以林木蓄积量为基础,通过蓄积扩大系数、容积密度和含碳率,计算出以林木为主体的生物量碳汇量;其次在此基础上,利用比例关系与转换系数,计算林下植物碳汇量与林地碳汇量,具体模型如下:

$$\begin{aligned} C_f &= C_b + C_v + C_s \\ &= V \times \delta \times \rho \times \gamma + \alpha(V \times \delta \times \rho \times \gamma) + \beta(V \times \delta \times \rho \times \gamma) \end{aligned} \quad (9)$$

式中, C_f 为林业碳汇总量; C_b 为林木碳汇量, C_v 为林下植物碳汇量, C_s 为林地碳汇量; V 为森林蓄积量, δ 为生物量扩大系数, ρ 为容积密度, γ 为含碳率; α 和 β 分别为林下植物碳汇转换系数与林地碳汇转换系数。其中,参考薛龙飞等^[36]的定义 $\alpha = 0.195$, $\beta = 1.244$, $\gamma = 0.500$, $\delta = 1.900$, $\rho = 0.500$ 。

1.2.3 环境变量

在三阶段超效率 SBM-DEA 模型的第二阶段中,需要考虑环境变量的影响。环境变量的选取既要不在主观可控范围之内,又要对林业碳汇效率产生影响。参考已有文献,本文选取了 7 个环境变量:林业病害发生防治率、林业虫害发生防治率、森林覆盖率、森林火灾受灾面积、林业从业人员受教育程度、输出型结构和年降水量。其中,林业病虫害会影响林木生长,其发生率也在一定程度上代表着区域林业生产环境质量,对林产品产量有严重不利影响。保护和增加森林覆盖率对于维持生态平衡,应对气候变化及促进可持续林业发展至关重要。森林火灾能够对森林生态系统、碳循环和经济产值造成严重影响,能直接导致碳汇减少甚至转变为碳源。劳动力素质根据张红丽和康茜^[37]的研究以平均受教育年限计算得出。输出型结构则用林业第一产业总产值占林业产业总产值的比重来衡量。年降水量等气候因素对林业生产的重要性不容忽视,以各省级行政区的全年降水量(mm)表示。综上,本文所涉及的所有变量及指标表示具体见表 1。

1.3 数据来源及说明

本文选取 2008—2021 年 30 个省、直辖市和自治区的有关数据为样本数据。研究数据来自于《中国林业统计年鉴》、《中国统计年鉴》、《2021 中国林草资源及生态状况》和《中国水利统计年鉴》。由于西藏部分数据不可得,所以研究区域未包含西藏。参考薛龙飞等^[36]的做法,在后续分析中将 30 个省级行政区划分为四大

林区:东北林区(吉林、内蒙古、辽宁和黑龙江)、西南林区(四川、云南、西藏和重庆)、南方林区(上海、贵州、江苏、海南、浙江、广西、安徽、广东、福建、湖南、湖北和江西)、北方林区(北京、宁夏、天津、新疆、河北、山东、山西、陕西、河南、甘肃和青海)。

表 1 林业碳汇效率评价指标体系
Table 1 Evaluation index system of forestry carbon sink efficiency

指标类型 Index type	指标名称 Index name	指标表示 Indicator representation
投入变量 Input variable	土地投入	森林面积
	劳动力投入	年末林业系统从业人数
	资本投入	林业资本存量
期望产出变量 Expected output variable	经济产出	林业产业总产值
	生态产出	林业碳汇量
非期望产出变量 Undesired output variable	碳源产出	林业生产过程中 CO ₂ 排放量
环境变量 Environment variable	病害防治	林业病害发生防治率
	虫害防治	林业虫害发生防治率
	森林覆盖率	森林面积/土地总面积
	火灾情况	森林火灾受灾面积
	劳动力素质	林业从业人员受教育程度
	输出型结构	林业第一产业总产值/林业总产值
	年降水量	年平均降水量

2 结果与分析

2.1 林业碳汇效率总体分析

第一阶段基于非期望产出的超效率 SBM 模型的林业碳汇效率值如图 1 所示。此阶段会受到环境因素及随机误差的影响,所需的结果由 MATLAB R2022b 软件计算得到。2008—2021 年,调整前中国林业碳汇效率均值为 0.62,存在 38%的进步空间。从整体来看,调整前各地区林业碳汇效率值的测算结果在 0.4—1 的范围之内,区域差距较大,波动较为平缓。其中,东北林区、南方林区和西南林区的林业碳汇效率高于全国的平均水平,仅北方林区在全国平均水平之下,与杨旭等^[38]的研究结论一致。北方林区中既有农业大省(河南、河北、山东),又有着经济高度发达的北京、天津,而甘肃、宁夏、青海和新疆等地的林业受限于严苛的气候条件与地理状况,森林类型多为林业工程造林,以防护为主,所以林业碳汇效率在所有林区中最低。从地区层面来

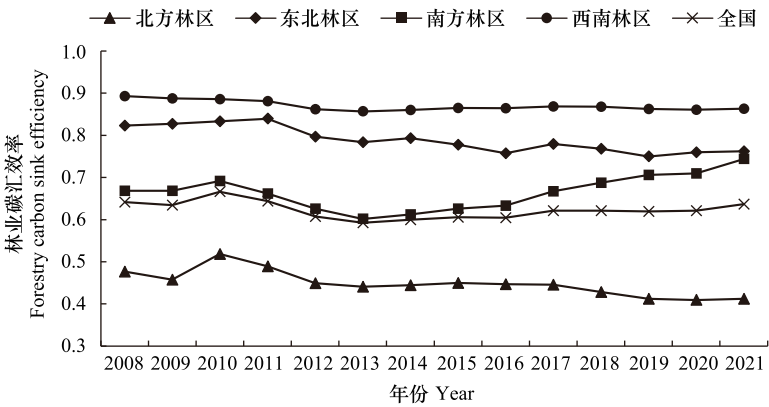


图 1 2008—2021 调整前各地区林业碳汇效率

Fig.1 Forestry carbon sink efficiency of each region from 2008 to 2021

看,四大林区的碳汇效率区域差异显著,效率均值分别为 0.87、0.79、0.66 和 0.45,整体呈现为西南林区>东北林区>南方林区>北方林区的空间分异格局。西南林区气候条件优越,拥有丰富的森林资源,碳汇能力较强。东北林区是我国“天保工程”的主要建设区,土地与人力资本投入较大,但林下经济产业的发展受限于全面停伐政策,经济效益难以实现转化^[39]。南方林区是我国重要的人工林与经济林产区,是建筑、家具制造等行业的主要木材供应地,但近年来区域性的林业碳汇交易市场发展态势迅猛,为此其林业碳汇效率在 2013 年开始一直呈现上升态势。

第二阶段中,将第一阶段中求得的土地、劳动力和资本 3 个投入变量的松弛变量作为被解释变量,7 个环境变量作为解释变量,构建 SFA 随机前沿回归模型。数据分析通过 Frontier4.1 软件进行,结果如表 2 所示。各变量的 LR 单边误差项均在 1%的水平上显著,说明模型拟合良好。

表 2 林业碳汇效率随机前沿分析回归结果

Table 2 Regression results of stochastic frontier analysis on forestry carbon sink efficiency

随机前沿分析 Stochastic frontier analysis	林地面积 Forest area	林业从业人员 Forestry practitioners	林业资本存量 Forestry capital stock
常数项 Constant value	6543.31 *** (161.06)	3712.38 *** (17.96)	-24383.77 *** (-267.81)
林业病害发生防治率 Prevention and control rate of forestry diseases	-11189.69 *** (-17.54)	-448.90 ** (-2.83)	1476.17 *** (4.22)
林业虫害发生防治率 Prevention and control rate of forestry pests	-8173.30 *** (-21.40)	-854.37 *** (-3.49)	-3181.54 *** (-12.41)
森林覆盖率 Forest coverage rate	19396.11 *** (1045.92)	8165.55 *** (25.43)	5204.59 *** (82.62)
森林火灾受灾面积 Forest fire disaster area	479.12 *** (11.96)	418.79 ** (2.33)	-91.45 (-1.13)
平均受教育年限 Average years of schooling	-1005.94 *** (-3.87)	-406.83 *** (-7.72)	1517.06 *** (34.67)
输出型结构 Output structure	16395.94 *** (91.31)	-1465.09 *** (-11.19)	3679.43 *** (34.46)
年降水量 Annual precipitation	-0.15 (-0.10)	-0.90 *** (-4.17)	0.01 (0.02)
sigma-squared	5.54×10 ⁸ *** (5.54×10 ⁸)	3.14×10 ⁷ *** (3.14×10 ⁷)	6.39×10 ⁷ *** (6.39×10 ⁷)
gamma	0.93 *** (192.72)	0.98 *** (848.38)	0.94 *** (276.21)
LR 单边误差	628.66 ***	1138.61 ***	816.26 ***

表中小括号内为 t 值;***、**、* 分别代表在 1%、5%、10%水平下显著

总体上,各环境变量对投入变量的松弛值通过显著性检验。具体而言,林业病害和虫害发生防治率对林地面积和林业从业人员松弛变量的影响为负,在 1%或 5%的水平上显著,说明其对林地面积和林业从业人员存在一定的“挤出效应”,能通过合理配置生产要素减少 2 个投入的松弛变量,但病害和虫害防治率对林业资本存量的影响有所不同。森林覆盖率对 3 个投入松弛变量的影响为正,且在 1%的水平上显著。森林火灾受灾面积对林地面积和林业从业人员的松弛变量呈显著正相关,可能的原因是森林火灾导致了更多森林的恢复和再生工作,植树、生态修复和灾后的森林管理需要更多的林业劳动力,而这些工作会增加森林的种植面积。从另外一方面也可以看出中国在应对森林火灾的政策及措施是有用且高效的。平均受教育年限与林地面积、林业从业人员的松弛变量呈现负相关关系,说明在具有更高受教育年限的从业人员中,更多关注于森林管理与保护,而非扩大森林面积,且其生产效率更高,更善于规划和管理资源,减少资源浪费。输出型结构与林地面积与林业资本存量的松弛变量呈正相关,与林业从业人员的松弛变量呈负相关,说明目前林业第一产业占比越高,越能增加林业土地及资金,而且能减少林业劳动力。年降水量与林业从业人员的松弛变量为负值,说明其能通过减少林业从业人数,从而提高林业碳汇效率。

根据上述 SFA 模型的实证结果,本文分离了管理无效率和随机误差项,在考虑了所有环境变量的影响后,调整了原始的投入数据,结合产出数据再次代入非期望产出的超效率 SBM 模型对各效率值进行了测算,结果如图 2 所示。中国林业碳汇效率均值上升为 0.64,各区域间差距变小。即单纯从内部管理效率视角来看,林业碳汇效率较低地区与较高地区之间的差距逐渐缩小,表明二者之间存在“追赶效应”^[40]。北方林区碳汇效率由 0.44 上升至 0.46,东北林区碳汇效率由 0.78 上升至 0.82,南方林区碳汇效率由 0.66 上升至 0.68,

西南林区碳汇效率由 0.87 上升至 0.88,说明环境因素与随机噪音对林业碳汇效率存有相对不利的影响,对这些因素的调整也是林业产业间接减冗增产的有效途径之一。四大林区中除了 2011 年与 2019 年,东北林区的碳汇效率赶超了西南林区,总体的空间分异特征与第一阶段相吻合。通过对两个阶段数值大小的对比,可以看出各效率值提升程度不高,第三阶段的结果与第一阶段相差不大,从侧面反映了将碳源作为非期望产出的 SBM 模型的稳健性。从省级行政区的层面来看,林业碳汇效率最高的地区为福建达到 1.1165,最小的是上海,仅有 0.2670。第三阶段与第一阶段相比,林业碳汇效率上升的地区有 21 个,表明除了内部管理水平外,外部环境对当地林业发展的影响是相对不利的。环境因素对森林的损伤会直接影响其碳汇能力,相应的自我愈合和修复也会推迟其经济效益的变现时间。

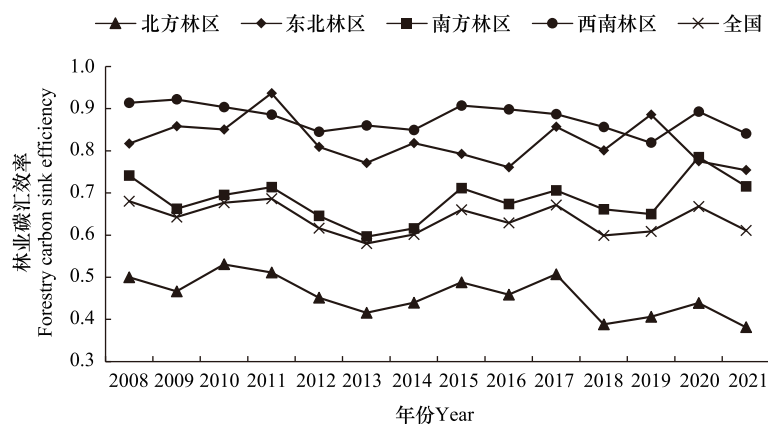


图 2 2008—2021 调整后各地区林业碳汇效率

Fig.2 Adjusted forestry carbon sink efficiency of each region from 2008 to 2021

2.2 林业碳汇效率变化指数分析

根据前文构建 GML 指数模型,计算出 2008—2021 年各地区林业碳汇效率变化指数,具体如图 3 所示。研究期间内中国及四大林区的林业碳汇效率处于波动当中,变化指数大于 1 的年份较多,总体呈现增长趋势。各个林区的碳汇效率变化情况不同,东北林区相对稳定,仅有两个时段小于 1,另外三大林区碳汇效率波动幅度较大。整体上,林业碳汇效率变化指数呈现东北林区>南方林区>西南林区>北方林区的空间格局。“十一五”期间,我国对生态建设的投入不断增大,在 2011 年“十一五”规划结束,四大林区的碳汇效率变化值有明显提高,2019—2020 年四大林区碳汇效率变化值同时提高,该时期我国明确了对于气候变化问题的立场,

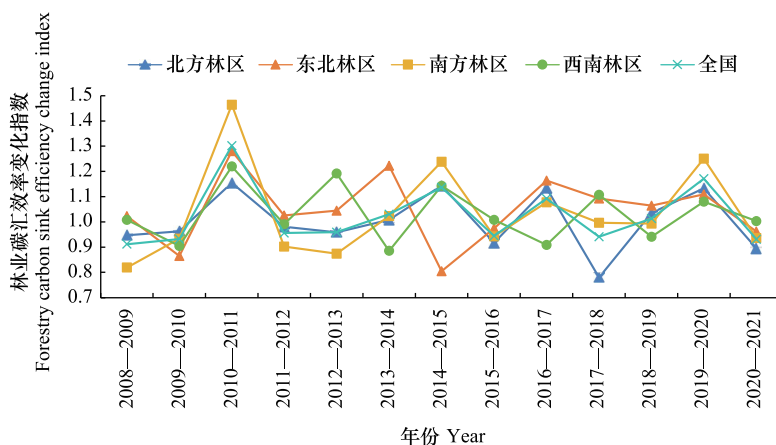


图 3 2008—2021 四大林区林业碳汇效率变化指数

Fig.3 Change index of forestry carbon sink efficiency of four forest regions from 2008 to 2021

尤其在 2020 年提出双碳目标,林业碳汇作为走向碳中和的创新路径,受到广泛关注。但在 2020—2021 年北方、东北和南方林区三大林区效率变化指数同时跌破 1,疫情的影响首当其中,林业经济发展停滞,森林管理效率走低。

为进一步分析,将林业碳汇效率变化指数分解为综合效率指数(GEC)和技术进步效率指数(GTC),具体如表 3 所示。25 个省级行政区的林业碳汇效率指数大于 1,带动了全国林业碳汇效率的增长。只有北方林区中的北京、河北、山西、河南和新疆 5 个地区林业碳汇效率变化指数小于 1,表明在北方林区内林业碳汇效率的变化并不均衡,区域间差异性较高。中国林业碳汇效率变化指数的均值为 1.0248,虽呈现上升趋势但数值不高,增长率仍偏低。可能的原因在于:一是我国经济发展初期,“粗放型”的经济发展方式使得人们对林业的关注更偏向于生态恢复及温室气体的吸收,但弥补生态破坏造成的生态问题并非短期可见其成效,碳汇能力的提升与林木生长周期息息相关;二是多数省份林业碳汇效率变化指数虽大于 1,但超过 1.1 的仅有内蒙古,说明林业碳汇效率的增长态势有待进一步提高。根据林业碳汇效率变化指数的分解情况可知,综合效率变化指数的均值为 1.0064,技术进步效率变化指数的均值为 1.0278,说明总体上投入产出达到有效前沿面,组织管理水平及要素配置也处于合理范围之内,有一定的技术进步或创新。具体而言,所有地区的技术进步变化指数均大于 1,弥补了部分地区综合效率变化指数偏低所带来的负面效应,技术进步推动了林业碳汇效率变化指数的提升,但部分地区管理能力有限,规模经济暂未形成。

表 3 各地区林业碳汇效率变化指数及其分解

Table 3 Change index and decomposition of forestry carbon sink efficiency in each region

地区 Region	林业碳汇效率变化指数 Change index of forestry carbon sink efficiency			地区 Region	林业碳汇效率变化指数 Change index of forestry carbon sink efficiency		
	GML	GEC	GTC		GML	GEC	GTC
北京	0.9988	0.9925	1.0095	江苏	1.0273	1.0097	1.0107
天津	1.0181	1.0174	1.0135	浙江	1.0141	1.0034	1.0234
河北	0.9809	0.9601	1.0337	安徽	1.0414	1.0388	1.0138
山西	0.9988	0.9891	1.0135	福建	1.0220	1.0044	1.0153
山东	1.0225	1.0142	1.0207	江西	1.0425	1.0060	1.0590
河南	0.9973	0.9769	1.0295	贵州	1.0368	1.0221	1.0217
陕西	1.0240	1.0096	1.0199	湖北	1.0377	1.0215	1.0273
甘肃	1.0183	1.0092	1.0176	湖南	1.0604	1.0441	1.0231
青海	1.0065	0.9955	1.0236	广东	1.0723	1.0391	1.0478
宁夏	1.0073	0.9925	1.0237	广西	1.0402	1.0367	1.0091
新疆	0.9714	0.9595	1.0270	海南	1.0169	1.0135	1.0197
北方林区	1.0040	0.9924	1.0211	南方林区	1.0347	1.0198	1.0236
内蒙古	1.1204	0.9941	1.1263	重庆	1.0172	1.0090	1.0119
辽宁	1.0014	0.9922	1.0202	四川	1.0235	0.9930	1.0302
吉林	1.0320	1.0007	1.0307	云南	1.0498	0.9968	1.0508
黑龙江	1.0405	1.0524	1.0499	西南林区	1.0301	0.9996	1.0310
东北林区	1.0486	1.0098	1.0568	平均值 Mean	1.0248	1.0064	1.0278
上海	1.0049	0.9982	1.0126				

GML: 全局马尔奎斯特-伦伯格 Global malmquist-luenberger; GEC: 全局技术效率变动 Global efficiency change; GTC: 全局技术进步 Global technology change

2.3 林业碳汇效率空间非均衡特征

根据森林资源清查的周期,选取研究区间内 2008、2013、2018 和 2021 年 4 个年份进行林业碳汇空间差异性分析。运用 ArcGIS10.8 软件,将林业碳汇效率(第三阶段)划分为低效率(0.00—0.28)、较低效率(0.28—0.39)、中效率(0.39—0.59)、较高效率(0.59—0.72)和高效率(0.72—1.21),考虑数据的可比性,在运用自然断点法的基础上对各年份的效率区间进行了手动调整,林业碳汇效率空间分布如图 4 所示。整体来看,我国

林业碳汇效率的空间分布情况较为稳定,处于高效率的地区基本保持不变,各年份维持在 8—10 个左右,主要集中于内蒙古、吉林、四川、云南及西南沿海地区。内蒙古和吉林依托大兴安岭林区的优势,在国土绿化建设上成效显著,率先开展了碳汇交易项目储备工作。云南不断落实林权制度改革,并在 2018 年取得了中国林业大数据中心和林权交易中心的成功落户。四川连续经历了两轮的退耕还林还草工程,推动了生态与民生的共赢。西南沿海地区则拥有气候、经济与人才的多重优势,其中福建省开展了区域林业碳汇交易(FFCER),林业碳汇成交额居于全国前列。

林业碳汇高效率地区与其他效率地区呈现出“包围状”的空间分布特征。除高效率地区外,其他各省级行政区主要集中在中效率和较低效率范围内。值得注意的是,尽管通过自然断点法将 0.72—1.21 确定为高效率区,但处于该区间内的各地区林业碳汇效率实际上全都大于 1,换句话说,林业碳汇高效率地区与其他效率地区之间差距明显。这一研究结论与余红红和杨家猛^[12]相一致,在对森林生态效率值进行划分时,高效率的范围最大,几乎在 0.6—1 之间。中国各区域间森林资源分布不均,林业产业投入力度不同,林业发展主要目标不一,加之气候与地理条件的差异,才最终导致了此种现象的形成。此外,研究区间内林业碳汇效率较为平稳,但有所降低,与杨旭等^[38]研究林业生产技术效率的结果相一致。一方面,本文在投入产出中考虑了碳源的影响,能更真实地反映林业碳汇的效率;另一方面,受限于林木资源的生长周期,投入大见效慢的问题是困扰林业产业及碳汇交易的原因之一。

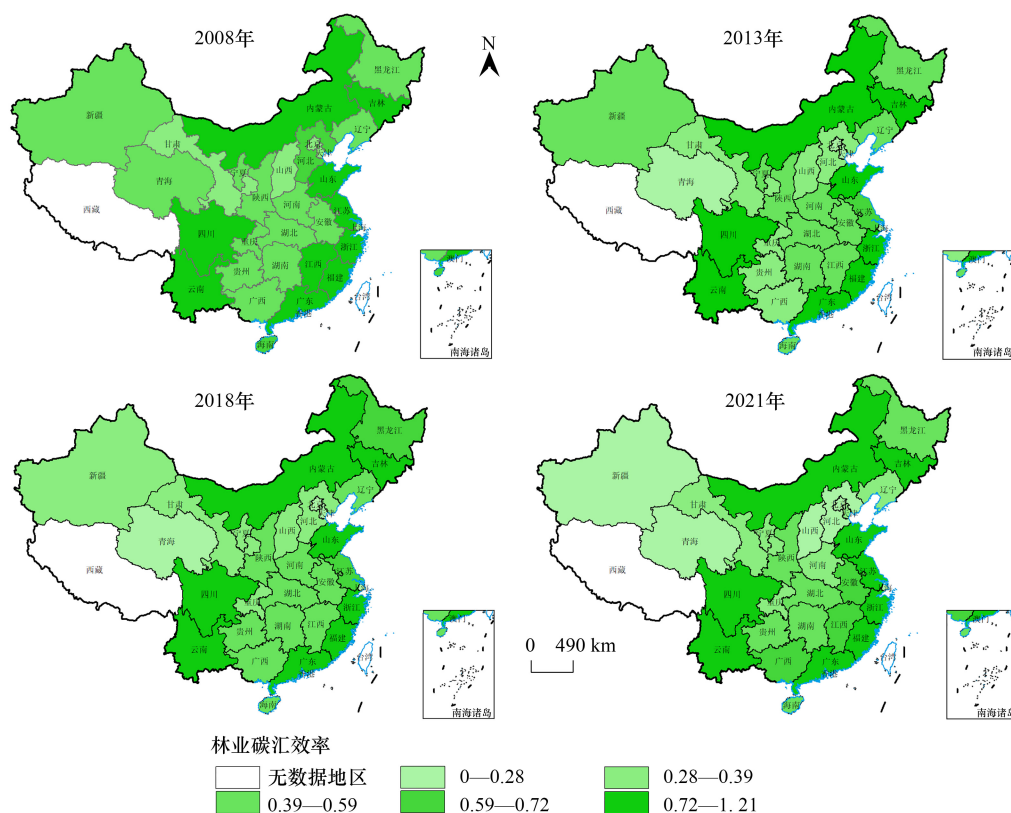


图 4 2008 年、2013 年、2018 年和 2021 年中国林业碳汇效率空间分布

Fig.4 Spatial distribution of forestry carbon sink efficiency in China in 2008, 2013, 2018 and 2021

该图基于国家测绘地理信息局标准地图服务网站下载的审图号为 GS(2023)2767 的标准地图绘制,底图无修改

2.4 林业碳汇效率空间相关性检验

本文利用 GeoDa 软件计算了 2008—2021 年中国林业碳汇效率的全局 Moran's I 指数。基于 Queen 空间矩阵,选择蒙特卡洛模拟 999 次检验 Moran's I 指数。根据表 4 可知,2008—2021 年林业碳汇效率的 Moran's I

基本为正(除 2009 和 2010 年外),这种正相关关系验证了林业碳汇效益能够外溢至其他地区,在空间分布上,林业碳汇效率的聚集效益明显。其中,显著性检验以 2015 年为分水岭,2015 年之后均通过显著性检验且 Moran's I 指数均大于零,说明林业碳汇效率在该时期存在显著的正向空间依赖效益,这与碳汇与碳源所具有的流通特性高度一致,高效率地区的空间辐射能够传达至低效率地区,存在显著的空间溢出效益。2015 年之前 Moran's I 指数均未通过显著性检验,表明该期间空间溢出效益并不显著。从时序变动来看,林业碳汇效率在研究期间内变动趋势较大,但在 2015 年之后整体上呈现稳中有升的态势。

表 4 2008—2021 年中国林业碳汇效率 Moran's I 指数

Table 4 Moran index of forestry carbon sink efficiency in China from 2008 to 2021

年份 Year	Moran's I 指数 Moran's I index	P	Z	年份 Year	Moran's I 指数 Moran's I index	P	Z
2008	0.082	0.153	0.994	2015	0.185	0.039	1.879
2009	-0.048	0.474	-0.072	2016	0.209	0.028	2.067
2010	-0.042	0.495	-0.033	2017	0.161	0.055	1.668
2011	0.127	0.098	1.321	2018	0.207	0.030	2.030
2012	0.087	0.156	1.02	2019	0.164	0.047	1.670
2013	0.037	0.264	0.606	2020	0.203	0.032	1.988
2014	0.124	0.098	1.313	2021	0.224	0.022	2.151

P 值表示伴随概率; Z 值表示标准化统计量

2.5 林业碳汇效率趋同演化特征

为深入探讨中国林业碳汇效率的趋同演化特征,构建基于传统和基于空间的马尔科夫转移效率矩阵。林业碳汇效率被离散为 4 种状态:低、较低、较高和高,由低到高的转移为向上转移,由高到低的转移为向下转移。2008—2021 年中国林业碳汇效率马尔科夫转移如表 5 所示,对角线上的数值为林业碳汇效率保存原状态的概率,非对角线上的数值为不同林业碳汇效率类型间发生转移的概率^[41]。根据结果可知:①林业碳汇效率受原有林业碳汇发展水平影响较大。除较高水平外,对角线上的概率值大于非对角线上的概率值,表明林业碳汇效率类型转移较为稳定,维持原有状态的概率较大。②林业碳汇效率存在“俱乐部收敛”现象。低水平类型与高水平类型在下一阶段维持原有状态的概率均达到 80% 以上,表明林业碳汇效率存在低低集聚与高高集聚现象,即“俱乐部收敛”。③林业碳汇效率的跨越式升迁难以在短期内实现。大多数地区林业碳汇效率都在邻近类型之间转变,前三种类型向上转移的概率分别为 14.5%、27.3%、22.2%,呈现循序渐进性。

表 5 2008—2021 年中国林业碳汇效率马尔科夫转移效率矩阵

Table 5 Markov transfer efficiency matrix of forestry carbon sink efficiency in China from 2008 to 2021

$t/t+1$	n	低水平 Low level	较低水平 Lower level	较高水平 Higher level	高水平 High level
低水平 Low level	166	0.855	0.127	0.018	0
较低水平 Lower level	73	0.288	0.438	0.205	0.068
较高水平 Higher level	36	0.056	0.444	0.278	0.222
高水平 High level	115	0	0.043	0.078	0.878

t :时间 Time; n :数量 Number

林业碳汇效率的提升不仅依靠要素的投入与内部管理的创新,区域间生产要素的流动、政策措施的借鉴、林业碳汇项目试点地区的示范效应等同样至关重要。区域间森林资源不平衡的情况下,会驱使森林生态系统服务要素流入或溢出。空间马尔科夫链转移矩阵具有更强的空间解释力,能更为清晰的表明不同领域类型对林业碳汇效率趋同演化规律的影响,具体如表 6 所示。根据结果可以发现:①林业碳汇效率的空间演化具有近邻效应。对比传统马尔科夫链转移矩阵可知,研究期间内林业碳汇效率转移的概率变动明显,说明近邻区域类型对林业碳汇效率的转移有明显促进或抑制影响。②受不同领域背景的影响,林业碳汇效率向上或向下

转移的概率不尽相同。具体表现为邻高促进,邻低抑制,如 $P_{12|1}=0.026<P_{12}=0.127<P_{12|4}=0.267$,说明良好的环境有利于周边地区林业碳汇效率的提升。部分地区的结果相反,可能是受制于地区产业比例失调及技术管理水平不高,导致林下经济发展停滞,最终造成林业投入要素支出过多但产出效率不高。③在空间维度,表 6 的结果再次为“俱乐部收敛”现象提供了解释依据。受邻域类型溢出效应影响,中国林业碳汇效率的转移容易在一定的地理空间范围内形成“俱乐部集聚”。在林业碳汇效率低的区域,其向上转移的概率上升,向下转移的概率下降,所以在该地理范围内林业碳汇效率低的区域数据有减少趋势,反之亦然。总体上,邻域类型对中国林业碳汇效率演化规律的影响较大。从空间维度来看,林业碳汇效率呈现“高高趋同、低低趋同、高带动低、低抑制高”的空间聚集演化特征。邻近地区拥有相似的地理环境与气候条件,在林业生产模式与碳汇政策措施的相互借鉴上也具有天然的优势,所以林业碳汇效率才能呈现出空间集聚态势。

表 6 2008—2021 年中国林业碳汇效率空间马尔科夫转移效率矩阵

Table 6 Spatial Markov transfer efficiency matrix of forestry carbon sink efficiency in China from 2008 to 2021

空间滞后类型 Spatial lag type	$t/t+1$	n	低水平 Low level	较低水平 Lower level	较高水平 Higher level	高水平 High level
低水平 Low level	低水平	38	0.947	0.026	0.026	0.000
	较低水平	4	0.500	0.250	0.250	0.000
	较高水平	2	0.000	0.500	0.500	0.000
	高水平	8	0.000	0.000	0.000	1.000
较低水平 Lower level	低水平	30	0.833	0.167	0.000	0.000
	较低水平	14	0.214	0.429	0.286	0.071
	较高水平	4	0.250	0.500	0.000	0.250
	高水平	28	0.000	0.000	0.036	0.964
较高水平 Higher level	低水平	68	0.882	0.103	0.015	0.000
	较低水平	21	0.381	0.333	0.238	0.048
	较高水平	16	0.000	0.438	0.250	0.313
	高水平	44	0.000	0.023	0.114	0.864
高水平 High level	低水平	30	0.700	0.267	0.033	0.000
	较低水平	34	0.235	0.529	0.147	0.088
	较高水平	14	0.071	0.429	0.357	0.143
	高水平	35	0.000	0.114	0.086	0.800

在考虑空间滞后效应后,中国林业碳汇效率的转移情况发生改变,证实林业碳汇效率的演变具有空间溢出效应。为进一步验证其统计学意义上的显著性,借鉴陶晓红等^[42]的做法进行假设检验,假设林业碳汇效率类型的转移是相互独立的,其演化过程与空间滞后项无关,具体检验公式如下:

$$q = -2 \log \left\{ \prod_{l=1}^k \prod_{i=1}^k \prod_{j=1}^k \left[\frac{P_{ij}}{P_{ij}(l)} \right]^{n_{ij}(l)} \right\} \tag{10}$$

式中, k 为林业碳汇效率状态数量,本文 k 为 4; P_{ij} 、 $P_{ij}(l)$ 、 $n_{ij}(l)$ 分别代表传统马尔科夫转移概率、领域类型为 l 的空间转移概率及对应的地区数量。 q 服从自由度为 $k(k-1)^2$ 的卡方分布。求得自由度为 36,对应 0.05 显著水平下, $q = 71.77 > \chi^2(40) = 66.77$,所以拒绝接受原假设^[43],表明林业碳汇效率间的转移与邻域地区类型具有显著空间相关性。

3 结论与讨论

3.1 结论

本文利用三阶段超效率 SBM-DEA 模型对中国 30 个省(区、市)2008—2021 年林业碳汇效率进行测算,分析了环境因素的影响,然后运用 GML 指数从动态视角探讨了林业碳汇效率变化指数,最后采用 Moran's I 指

数和空间马尔科夫链等方法从空间维度研究了林业碳汇效率的演化规律,探明了林业碳汇效率的区域差异及可能的原因。主要研究结论如下:

(1)总体上,中国林业碳汇效率水平不高,与生产前沿面的距离亟需缩小,区域差距较大。四大林区林业碳汇效率由高到低依次为西南林区>东北林区>南方林区>北方林区。在剔除外部环境与随机误差之后,林业碳汇效率均值提升为 0.64,区域差距变小,低效率地区与高效率地区间存在“追赶效应”。

(2)中国林业碳汇效率变化呈现上升趋势,但区域间发展不均衡、不充分,效率变化值呈现出东北林区>南方林区>西南林区>北方林区的格局。从增长动力源来看,技术进步效率的贡献大于综合效率,所以未来应在优化森林管理的基础上,加大林木培育的规模化水平。

(3)中国林业碳汇效率具有显著的空间非均衡性,效率高值地区与其他地区之间差距较大,呈现出“包围状”的空间分布特征。Moran's *I* 指数结果显示,在 2015 年之后林业碳汇效率存在显著的正向空间依赖效益,尤其在 2019—2021 年三年更为明显,说明林业在缓解气候变化中与实现碳中和的作用愈发得到重视。

(4)邻域类型对中国林业碳汇效率的演化规律影响较大,表现出较为明显的近邻效应。高效率地区能够带动邻近地区林业碳汇效率的提高,而低效率地区则起到了反作用,从空间维度来看,林业碳汇效率存在雅各布斯效应,即“高高趋同、低低趋同、高带动低、低抑制高”的空间聚集演化特征。

3.2 讨论

林业碳汇是林业助力碳中和战略的核心资源。作为本文的关键性数据,林业碳汇的测算方法较多,蓄积量扩展法受制于不同林木类型的碳转换系数的差异,测算结果与现实情况有一定的偏差。森林面积、森林蓄积量等数据来源不一,主要有森林资源清查与土地利用遥感分类解译。本文的研究数据显示,我国林业碳汇总量从 2013 年的 171.21 亿 t 增长到 2018 年的 197.62 亿 t,与付伟等^[20]的研究一致,而张颖等^[44]测算出的结果略高,2013 年为 186.22 亿 t,2018 年为 214.39 亿 t。于鲁冀等^[45]利用生物量转换因子连续函数法的测算出河南省 2018 年林业碳汇量为 2.78 亿 t,高于本文的 2.40 亿 t。不同数据来源,不同测算方法下的林业碳汇的结果不尽相同,甚至差距可达两倍之多^[5]。此外,本文仅选取了 7 个环境变量进行探讨,干旱、林龄、土壤、立地等要素也会影响林业碳汇量和碳密度变化^[46—48]。综上,林业碳汇量的估算、环境变量的选取与效率测算方法的不同都会对林业碳汇效率的准确性与真实性产生影响。未来,仍需更精确的数据、更权威的方法来呈现更准确的林业碳汇效率。而何种因素会影响林业碳汇效率,不同地区应如何因地制宜加强林业碳汇管理等,都是有待深入研究的课题。

参考文献 (References):

- [1] 胡振通,王亚华. 中国生态扶贫的理论创新和实现机制. 清华大学学报: 哲学社会科学版, 2021, 36(1): 168-180, 206.
- [2] 彭红军,徐笑,俞小平. 林业碳汇产品价值实现路径综述. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2022, 46(6): 177-186.
- [3] 杨博文. “资源诅咒”抑或“制度失灵”? ——基于中国林业碳汇交易制度的分析. 中国农村观察, 2021(5): 51-70.
- [4] 罗小锋,薛龙飞,李兆亮. 林业碳汇经济效益评价及区域协调性分析. 统计与决策, 2017(2): 121-125.
- [5] 朱建华,田宇,李奇,刘华妍,郭学媛,田惠玲,刘常富,肖文发. 中国森林生态系统碳汇现状与潜力. 生态学报, 2023, 43(9): 3442-3457.
- [6] Ge J M, Zhang Z P, Lin B Q. Towards carbon neutrality: how much do forest carbon sinks cost in China? Environmental Impact Assessment Review, 2023, 98: 106949.
- [7] 张楠,储安婷,杨红强. 碳交易机制下林业碳汇产品类别比较与价值核算模型甄别. 中国人口·资源与环境, 2022, 32(11): 146-155.
- [8] 刘宇,羊凌玉,张静,张金珠,李欣蓓,朱能高,周梅芳. 近 20 年我国森林碳汇政策演变和评价. 生态学报, 2023, 43(9): 3430-3441.
- [9] 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. 农林经济管理学报, 2022, 21(3): 320-330.
- [10] 吴丹,曹巍,黄麟,呼和涛力. 天然林资源保护工程区生态效应评估. 长江科学院院报, 2023, 40(1): 73-80.
- [11] 孔凡斌,王宁,徐彩瑶. “两山”理念发源地森林生态产品价值实现效率. 林业科学, 2022, 58(7): 12-22.
- [12] 余红红,杨加猛. 我国森林生态效率测算及时空演变分析. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2023, 47(2): 167-177.
- [13] 吴远征,张智光. 林业生态安全效率及其影响因素的 DEA-Tobit 模型分析——基于生态与产业共生关系. 长江流域资源与环境, 2021, 30(1): 76-86.
- [14] Chen Y F, Ma L H, Miao J F, Hui X X. Correction: does Chinese forestry eco-efficiency converge? A three-stage DEA-Malmquist approach.

- European Journal of Forest Research, 2023, 142(6): 1279-1280.
- [15] Tan J L, Su X, Wang R. Exploring the measurement of regional forestry eco-efficiency and influencing factors in China based on the super-efficient DEA-tobit two stage model. *Forests*, 2023, 14(2): 300.
- [16] Jin M M, Chen N, Wang S K, Cao F P. Does forestry industry integration promote total factor productivity of forestry industry? Evidence from China. *Journal of Cleaner Production*, 2023, 415: 137767.
- [17] 姚仁福, 边文燕, 范宏琳, 贯君. 中国省域森林碳汇效率演进分析. *林业经济问题*, 2021, 41(1): 51-59.
- [18] 舒明远, 吴家治, 李晨阳, 丁胜. 天保工程区森林碳汇效率演进分析. *林业经济问题*, 2022, 42(5): 490-497.
- [19] 黄衍, 陈丽桦, 吴楠, 王应明, 戴永务. 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. *中国管理科学*, 2023, 31(12): 317-328.
- [20] 付伟, 李龙, 罗明灿, 陈建成, 王福利. 省域视角下中国森林碳汇空间外溢效应与影响因素. *生态学报*, 2023, 43(10): 4074-4085.
- [21] Yin S W, Gong Z W, Gu L, Deng Y J, Niu Y J. Driving forces of the efficiency of forest carbon sequestration production: Spatial panel data from the national forest inventory in China. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 330: 129776.
- [22] Zhao S X, Shi W, Qiao F W, Wang C Y, An Y, Zhang L Y. Temporal and Spatial Changes and Trend Predictions of Forest Carbon Sequestration Efficiency in China Based on the Carbon Neutrality Goal. *Forests*, 2023, 14(12): 2387.
- [23] Zhao N, Wang K Q, Yuan Y N. Toward the carbon neutrality: Forest carbon sinks and its spatial spillover effect in China. *Ecological Economics*, 2023, 209: 107837.
- [24] 杜之利, 苏彤, 葛佳敏, 王霞. 碳中和背景下的森林碳汇及其空间溢出效应. *经济研究*, 2021, 56(12): 187-202.
- [25] 孔凡斌, 程文杰, 徐彩瑶. 数字经济发展能否提高森林生态产品价值转化效率——基于浙江省丽水市的实证分析. *中国农村经济*, 2023(5): 163-184.
- [26] 曹玉昆, 翟相如. 国家财政支持对林业产业全要素生产率影响的实证. *统计与决策*, 2020, 36(7): 118-122.
- [27] 郑宇梅, 高纯一, 雷光春. 林业产业集聚水平与生态效率实证分析——基于中国 15 个省域面板数据的检验. *经济地理*, 2017, 37(10): 136-142.
- [28] 张亚连, 曾嘉彬, 樊行健, 陈文俊. 有关企业碳排放与碳固会计的计量和实务处理探讨. *会计研究*, 2017(5): 11-18, 96.
- [29] 闫佳惠, 张越杰. 中国肉牛主产区碳排放效率时空演化特征及空间分布格局研究. *地理科学*, 2023, 43(5): 879-888.
- [30] Fried H O, Lovell C A K, Schmidt S S, Yaisawarng S. Accounting for environmental effects and statistical noise in data envelopment analysis. *Journal of Productivity Analysis*, 2002, 17(1): 157-174.
- [31] Chung Y H, Färe R, Grosskopf S. Productivity and undesirable outputs: a directional distance function approach. *Journal of Environmental Management*, 1997, 51(3): 229-240.
- [32] Oh D H. A global Malmquist-Luenberger productivity index. *Journal of Productivity Analysis*, 2010, 34(3): 183-197.
- [33] 张军, 吴桂英, 张吉鹏. 中国省际物质资本存量估算: 1952—2000. *经济研究*, 2004, 39(10): 35-44.
- [34] Lin B Q, Ge J M. Carbon sinks and output of China's forestry sector: an ecological economic development perspective. *The Science of the Total Environment*, 2019, 655: 1169-1180.
- [35] 吴建新, 郭智勇. 基于连续性动态分布方法的中国碳排放收敛分析. *统计研究*, 2016, 33(1): 54-60.
- [36] 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. *自然资源学报*, 2016, 31(8): 1351-1363.
- [37] 张红丽, 康茜. 中国林业生产效率时空分异及影响因素研究. *西北林学院学报*, 2017, 32(3): 301-305.
- [38] 杨旭, 屈志光, 邓建远. 中国省域林业生产技术效率的空间收敛性及分异特征. *资源科学*, 2021, 43(10): 1947-1960.
- [39] 朱洪革, 曹博, 张晓蕾. 从森林依赖到森林生态产品价值实现——东北国有林区发展路径探析. *世界林业研究*, 2024, 37(1): 16-22.
- [40] 彭文斌, 曹笑天, 苏昌贵, 邝嫦娥. 长江中游城市群碳效率时空演化特征——基于三阶段 SBM-DEA 模型. *生态学报*, 2023, 43(9): 3532-3545.
- [41] 李天籽, 韩沅刚. 武汉城市圈科技金融效率时空特征与趋同演化分析. *经济地理*, 2022, 42(1): 61-69.
- [42] 陶晓红, 齐亚伟. 中国区域经济时空演变的加权空间马尔可夫链分析. *中国工业经济*, 2013(5): 31-43.
- [43] 王少剑, 高爽, 黄永源, 史晨怡. 基于超效率 SBM 模型的中国城市碳排放绩效时空演变格局及预测. *地理学报*, 2020, 75(6): 1316-1330.
- [44] 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. *北京林业大学学报*, 2022, 44(1): 38-47.
- [45] 于鲁冀, 张亚慧, 樊雷, 王莉, 刘莹莹. 河南省森林固碳量与碳汇价值评估. *郑州大学学报(工学版)*: 1-7 [2024-03-16]. <https://doi.org/10.13705/j.issn.1671-6833.2023.06.002>.
- [46] 赵林, 徐春雪, 刘雪莹, 李汉青, 江浩鸿, 林爱文. 干旱对湖北省森林植被净初级生产力的影响. *长江流域资源与环境*, 2014, 23(11): 1595-1602.
- [47] 王大卫, 沈文星. 中国主要树种人工乔木林碳储量测算及固碳潜力分析. *南京林业大学学报: 自然科学版*, 2022, 46(5): 11-19.
- [48] Tian H L, Zhu J H, He X, Chen X Y, Jian Z J, Li C Y, Ou Q X, Li Q, Huang G S, Liu C F, Xiao W F. Using machine learning algorithms to estimate stand volume growth of *Larix* and *Quercus* forests based on national-scale Forest Inventory data in China. *Forest Ecosystems*, 2022, 9: 100037.