

河南省森林碳汇价值时空特征及其影响因素

于鲁冀¹, 张亚慧^{1,2}, 王燕鹏³, 刘莹莹¹, 李昊⁴

(1. 郑州大学 生态与环境学院, 河南 郑州 450001; 2. 菏泽市环科水生态有限公司, 山东 菏泽 274000;
3. 郑州大学 综合设计研究院有限公司, 河南 郑州 450002; 4. 菏泽市应急管理局, 山东 菏泽 274000)

摘要: [目的] 分析河南省森林碳汇价值时空特征及影响因素, 为促进河南省“碳达峰、碳中和”目标实现提供参考。[方法] 采用蓄积量扩展法和造林成本法评估 2010—2020 年河南省森林碳汇价值, 分析其时间变化特征, 运用莫兰指数探究其空间聚集特征, 并构建扩展 STIRPAT 模型分析影响森林碳汇价值的因素。[结果] ① 河南省森林碳汇价值在时间上呈现持续上升趋势, 由 2010 年的 4.18×10^{10} 元增加至 2020 年的 6.71×10^{10} 元, 在空间分布上呈现为“豫西、豫南高, 豫东、豫北低”的态势, 且存在显著的正向空间聚集效应, 碳汇价值显著高值聚集区域分布在豫西和豫南地区, 显著低值聚集区域仅有两处且分布散落。② 除碳汇强度对河南省森林碳汇价值有负向作用外, 森林面积比例、城镇化率、林业产业比例、人均 GDP 均产生正向影响作用, 其中森林面积比例是推动研究区域森林碳汇价值增长的主要因素。[结论] 河南省森林碳汇价值潜力巨大, 未来应分区域推进森林碳汇价值实现。

关键词: 森林碳汇; 碳汇价值; 莫兰指数; STIRPAT 模型; 影响因素; 河南省

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2023)05-0288-09

中图分类号: F326.27

文献参数: 于鲁冀, 张亚慧, 王燕鹏, 等. 河南省森林碳汇价值时空特征及其影响因素[J]. 水土保持通报, 2023, 43(5): 288-296. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2023.05.034; Yu Luji, Zhang Yahui, Wang Yanpeng, et al. Spatiotemporal characteristics and factors influencing value of forest carbon sequestration in Henan Province [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(5): 288-296.

Spatiotemporal Characteristics and Factors Influencing Value of Forest Carbon Sequestration in Henan Province

Yu Luji¹, Zhang Yahui^{1,2}, Wang Yanpeng³, Liu Yingying¹, Li Hao⁴

(1. School of Ecology and Environment, Zhengzhou University, Zhengzhou, Henan 450001, China; 2. Heze Huanke Water Ecology Co., Ltd, Heze, Shandong 274000, China; 3. Zhengzhou University Comprehensive Design and Research Institute Co., Ltd, Zhengzhou, Henan 450002, China; 4. Heze Emergency Management Bureau, Heze, Shandong 274000, China)

Abstract: [Objective] The spatiotemporal characteristics and factors influencing the value of forest carbon sequestration in Henan Province were analyzed in order to provide a reference for promoting the realization of “carbon peak and carbon neutrality”. [Methods] The value of forest carbon sequestration in Henan Province from 2010 to 2020 was evaluated through the stock expansion method and the afforestation cost method, and the temporal variation characteristics of forest carbon sequestration value were analyzed. The Moran index was used to explore the spatial aggregation characteristics, and an extended STIRPAT model was constructed to analyze the factors affecting the value of forest carbon sequestration. [Results] ① The value of forest carbon sequestration in Henan Province showed a continuous rising trend which increased from 4.18 billion yuan in 2010 to 6.71 billion yuan in 2020. Carbon sequestration values exhibited a pattern of “higher in the west and south, lower in the east and north” in Henan Province, and there was a significant positive spatial aggregation effect. The areas with significant high carbon sequestration values were located in Western and Southern Henan Province, while there were only two areas with significant low carbon sequestration values. ② In

收稿日期: 2023-02-14

修回日期: 2023-03-27

资助项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项“清渭河流域水环境质量整体提升与功能恢复关键技术集成研究与综合示范课题”(2015ZX07204002); 河南省土地整理中心资助项目“河南省生态碳汇能力提升方法路径及措施研究”(20210717A); 河南科技智库调研课题“河南省辖黄河流域生态产品供给能力提升与价值实现路径调查”(HNKJZK-2023-13B)

第一作者: 于鲁冀(1962—), 男(汉族), 山东省威海市人, 硕士, 教授, 硕士生导师, 主要从事环境经济与管理等方面研究。Email: yuluji@126.com。

addition to the negative impact of carbon sink intensity on the value of forest carbon sequestration in Henan Province, the proportion of forest area, urbanization ratio, forestry industry ratio, and per capita GDP all showed positive impacts. The proportion of forest area was the most important factor promoting the growth of forest carbon sequestration values. [Conclusion] There is great potential for forest carbon sequestration in Henan Province, and the realization of forest carbon sequestration should be promoted regionally in the future.

Keywords: forest carbon sequestration; carbon sequestration value; Moran index; STIRPAT model; influencing factors; Henan Province

森林具有强大的碳汇功能,吸收二氧化碳的量约占陆地生态系统的 80%^[1]。森林碳汇是应对全球气候变化的关键策略,也是中国实现“碳达峰、碳中和”目标的重要路径,不仅生态价值和社会价值凸显,也蕴含巨大的经济价值。因此,定量评估森林碳汇经济价值的变化特征,探究森林碳汇价值的影响因素以提高区域森林碳汇价值对于助力中国“碳达峰、碳中和”目标实现具有重大意义。

近年来,国内外学者针对国家、省级、市县等不同空间尺度的森林类型进行了碳汇价值研究^[2-6],从学者关于森林碳汇价值的计算方法来看,森林碳汇经济价值等于森林碳汇量与单位森林碳汇价格的乘积,即森林碳汇经济价值取决于森林碳汇量和单位森林碳汇价格。关于森林碳汇量估算方法应用比较多的主要有平均生物量法、生物量转换因子连续函数法和蓄积量扩展法等,单位森林碳汇价格采用的主要有市场价格、造林成本和碳税等。在森林碳汇量驱动因素方面也取得了一些认知和实践,发现经济增长、城镇化率、能源消费结构、森林砍伐量、森林面积、温度变化等经济社会因素和自然环境因素都会在一定程度上影响森林碳汇量^[7-13]。在省级尺度关于森林碳汇经济价值研究已取得了一定成果,张春华等^[2]研究得到山东省森林碳汇价值从 2004—2008 年的 2.43×10^{10} 元增长至 2009—2013 年的 2.53×10^{10} 元,张峰等^[3]基于森林连续清查资料得到北京市森林碳汇价值由 2004—2008 年的 5.10×10^9 元增加至 2014—2018 年 7.70×10^9 元,李琛^[14]通过运用改进的灰色斜率关联度分析,发现林业固定资产投资完成额和林业产值对湖北省森林碳汇价值的影响效应最大。综合来看,省级尺度的森林碳汇经济价值研究主要聚焦在森林碳汇经济价值现状评估和时间变化特征方面,对其空间变化特征和集聚效应、价值影响因素和影响效应方面的研究较少,一定程度上制约了区域森林碳汇价值实现的相关管理决策和实践应用。

目前,针对河南省森林碳汇价值的研究多为国家和省级以下尺度的估算结果^[15-18],专门针对河南省森林碳汇价值的研究相对较少^[19-20]。已有研究结果反映的是 2003 年和 2008 年森林碳汇价值在时间上的

动态变化,未对其在空间上的变化特征进行研究,且研究对象未考虑林下植物和林地的碳汇价值,不能准确反映河南省森林碳汇价值现状。此外,随着森林碳汇产品价值实现的推进,分析影响森林碳汇价值的因素日益重要,但当前对于河南省森林碳汇价值影响因素的研究还是空白。基于此,本文对河南省森林碳汇价值时空演化特征进行研究,并构建扩展 STIRPAT 模型分析河南省森林碳汇价值的影响因素,以期为“双碳”目标背景下河南省森林碳汇经营管理和森林碳汇价值实现提供基础数据和政策建议。

1 研究区概况

河南省位于中国中部,黄河流域中下游地区^[21]。境内北、西、南三面分别被太行山、伏牛山、桐柏山和大别山环绕。全省总面积为 1.67×10^5 km²,其中平原盆地、山地丘陵分别占全省总面积的 55.70%, 44.30%。河南省区域内的伏牛山主脊与淮河干流连线以南为北亚热带湿润区,以北为暖温带半湿润区,具有丰富的生物资源。随着森林河南项目的持续建设,2020 年河南省森林覆盖率和森林蓄积量已分别达到 25.07% 和 2.07×10^8 m³。

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源及处理

河南省森林面积、蓄积量数据来源于河南省相关林业规划文件,河南省各市森林面积来源于第 3 次全国国土调查和河南省 2 类森林资源调查数据,城镇化率、人均 GDP、林业产值等数据来源于《河南省统计年鉴》《中国林业和草原年鉴》等相关资料,部分缺失数据采用插值法进行补充。

2.2 研究方法

2.2.1 森林碳汇价值核算方法 评估森林碳汇价值的目的是将森林的固碳量用货币形式表示出来,以促进森林碳汇价值的转化和实现。考虑森林碳汇评估方法的实用性和可操作性,本文采用蓄积量扩展法核算森林碳汇量,其原理是基于森林蓄积量测算林木生物量碳汇量,并通过林木生物与林下植物、林地之间

的碳转换系数测算林下植物和林地的碳汇量^[6]。在测得区域森林碳汇量基础上,合理的单位森林碳汇价格选择也是至关重要的,由于碳汇交易市场的不稳定性导致市场价格变动较大,且中国尚未开始征收碳税,各国政府征收的碳税差异较大,不适宜中国国情。造林成本法是从成本角度衡量碳汇价值,因其重视机会成本、交易成本及碳释放成本而得到学界广泛认可^[22]。为保证结果的公正合理性,通过查阅相关文献,选取森林碳汇价值核算中应用较多的 3 种造林成本 260.9,273.3,305 元/t 取其均值 279.73 元/t^[23] 作为本文的单位森林碳汇价格。森林碳汇价值核算的具体公式为:

$$\begin{cases} C_V = C_{\text{tol}} \times P \\ C_{\text{tol}} = C_{\text{bio}} + C_{\text{pla}} + C_{\text{woo}} = C_{\text{bio}} + \lambda C_{\text{bio}} + \mu C_{\text{bio}} \\ C_{\text{bio}} = V \times \alpha \times \beta \times \gamma \end{cases} \quad (1)$$

式中: C_V 为森林碳汇价值(元); C_{tol} 为森林总碳汇量(t); C_{bio} 为林木生物量碳汇量(t); C_{pla} 为林下植物碳汇量(含凋落物)(t); C_{woo} 为林地碳汇量(t); V 为森林蓄积量(m^3); λ 为林下植物碳转换系数,取 0.195; μ 为林地碳转换系数,取 1.244; α 为蓄积扩大系数,取 1.9; β 表示容积密度,取 0.5; γ 表示含碳率,取 0.5 (以上参数值取自国际通用的 IPCC 默认通用值)^[6]; P 为单位森林碳汇价格(元/t),本研究核算后,取造林成本 279.73 元/t。

2.2.2 空间相关性分析方法 为考察某项指标在空间上是否存在空间集聚特征,通常采用全局莫兰指数(Moran's I)来判断,其计算公式为^[24]:

$$I = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n S_{ij} (\omega_i - \bar{\omega})(\omega_j - \bar{\omega})}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n S_{ij} (\omega_i - \bar{\omega})^2} \quad (2)$$

式中: I 为全局莫兰指数; ω_i, ω_j 为第 i 个和第 j 个空间区域森林碳汇价值; $\bar{\omega}$ 为全区域森林碳汇价值平均值; S_{ij} 为区域之间空间权重矩阵。全局莫兰指数的取值范围在 $-1 \sim 1$ 。 I 大于 0 时,说明存在空间正相关,越接近 1 说明存在相同的属性在空间上聚集; I 接近 0 时,不存在空间相关,说明空间分布较为随机; I 小于 0 时,存在空间负相关,越接近于 -1 说明存在相异的属性在空间上聚集。

全局自相关仅对研究区域的某项指标在空间上是否聚集进行探究,而局部空间自相关可用于衡量研究区域内某项指标的空间聚集方式^[25]。局部莫兰指数的计算公式为:

$$I_l = \frac{(\omega_i - \bar{\omega})}{x^2} \sum_{j=1}^n S_{ij} (\omega_j - \bar{\omega}) \quad (3)$$

式中: I_l 为局部莫兰指数; x 为空间权重矩阵各元素之和。将局部莫兰指数进行空间聚类可得到空间关联局部指标聚类图(LISA 图),共包括高一高聚集、低一低聚集、低一高聚集、高一低聚集以及不显著这 5 种类型。

2.2.3 影响因素分析方法 STIRPAT 模型是常用的一种影响因素分析模型,源于 IPAT 等式,IPAT 等式是一种分析环境影响因素的重要量化模型,于 1971 年由美国生态学家 Ehrlich 等^[26] 提出并得到了广泛应用,IPAT 等式的表达式为:

$$I = P \times A \times T \quad (4)$$

式中: I 为环境负荷; P 为人口规模; A 为经济水平; T 为技术水平。

为克服 IPAT 等式各变量等比例影响的不足, York 等^[27] 将其扩展为以指数表示的随机模型,即 STIRPAT 模型,该模型具有良好的扩展性,可以灵活地定量分析环境问题,多用于对低碳经济发展评价,STIRPAT 模型的表达式为:

$$I = a \times P^b \times A^c \times T^d \times \delta \quad (5)$$

式中: I, P, A, T 同上式; a 为常数; b, c, d 为指数; δ 为随机误差。

本文结合森林碳汇价值研究特征,对 STIRPAT 模型进行扩展,在考虑人口、经济和技术因素的基础上,考虑到森林资源会直接影响森林碳汇量,故增加了自然资源因素。将城镇化率、人均 GDP 值、林业产业占 GDP 比重、碳汇强度、森林面积占土地面积比重共 5 个因素纳入 STIRPAT 模型,得到人口、经济发展、产业结构、碳汇产出、土地结构等影响河南省森林碳汇价值的扩展模型,经扩展后的 STIRPAT 模型表达式为:

$$C_V = a \times C_P^b \times A_G^c \times F_V^d \times G_C^e \times F_S^f \times \delta \quad (6)$$

式中: C_V 为森林碳汇价值; a 为常数; C_P 为城镇化率,表示人口因素,城市人口比例增加能一定程度上减少对森林的破坏,进而影响森林碳汇的形成^[28]; A_G 为人均 GDP,表示经济因素,人均 GDP 能反映区域的经济发展状况,经济增长会促进森林碳汇增加^[11]; F_V 为林业产业占 GDP 比例, G_C 为碳汇强度,表示技术因素, Dietz 等^[29] 提出技术因素应该被产业结构、能源强度等可观测的指标直观体现,林业产业占 GDP 比重反映技术进步推动林业发展的结果,借鉴已有研究提出的能源强度、碳强度等指标^[30],本文提出的碳汇强度(碳汇量占产值的比例)是指单位 GDP 所产出的森林碳汇量,能体现区域经济发展促进森林经营管理技术进步进而产出森林碳汇量的效果; F_S 为森林面积占土地面积比例,表示

自然资源因素,森林面积占土地面积的比例反映了区域土地利用情况,森林碳汇效应会随着土地利用结构的变化而变化^[10]; b, c, d, e 为各变量的指数参数; δ 为随机误差。

为了降低模型中异方差影响,将公式(6)进行对数化处理,处理后的扩展 STIRPAT 模型表达式为:

$$\ln C_V = \ln a + b \ln C_P + c \ln A_G + d \ln F_V + e \ln G_C + f \ln F_S + \ln \delta \quad (7)$$

式中: $\ln C_V$ 为因变量; $\ln a$ 为常数项; $\ln C_P, \ln A_G, \ln F_V, \ln G_C, \ln F_S$ 为自变量; $\ln \delta$ 为误差项进行多元线性拟合确定模型参数。其中 b, c, d, e, f 为弹性系数,表示 C_P, A_G, F_V, G_C, F_S 每变化 1% 分别引起 C_V 分别变化 $b\%, c\%, d\%, e\%, f\%$ 。 b, c, d, e, f 为正值表示该自变量对因变量有正向影响,负值表示有负向影响。

3 结果与分析

3.1 河南省森林碳汇价值时空演化特征

3.1.1 时间演化特征 森林碳汇价值主要由森林碳汇量和森林碳汇单位价格所决定,而森林碳汇单位价格固定不变,即森林碳汇价值的变化主要取决于森林碳汇量的变化,而森林碳汇量与森林面积息息相关,

故森林面积和森林碳汇量直接影响森林碳汇价值。2010—2020 年河南省森林面积、固碳量、森林碳汇价值与单位面积碳汇价值变化情况见图 1。由图 1 可知,2010—2020 年,河南省森林面积、固碳量、森林碳汇价值与单位面积碳汇价值均呈现持续增长趋势,森林面积与碳汇量分别由 2010 年的 $3.37 \times 10^6 \text{ hm}^2$, $1.49 \times 10^8 \text{ t}$ 增加至 2020 年的 $4.03 \times 10^6 \text{ hm}^2$, $2.40 \times 10^8 \text{ t}$,增幅分别为 19.78% 和 60.47%。森林碳汇总价值由 2010 年的 4.18×10^{10} 元增加至 2020 年的 6.71×10^{10} 元,增幅为 60.47%,年平均增速为 6.05%,单位面积碳汇价值由 2010 年的 1.24×10^4 元/ hm^2 增加至 2020 年的 1.66×10^4 元/ hm^2 。2010—2015 年增幅较大,森林碳汇价值和单位面积碳汇价值增幅分别为 32.56%, 24.26%,高于 2015—2020 年的 21.05%, 7.81%。2010—2020 年河南省森林碳汇价值变化主要与林业发展政策有关。

为了促进林业建设,河南省分别于 2008, 2013 年颁布了《河南林业生态省建设规划(2008—2012 年)》《河南林业生态省建设提升工程规划(2013—2017 年)》,2010—2015 年期间碳汇能力提升较快,后因林业用地不足等原因,2015—2020 年森林碳汇虽有增长,但增幅小于前一阶段。

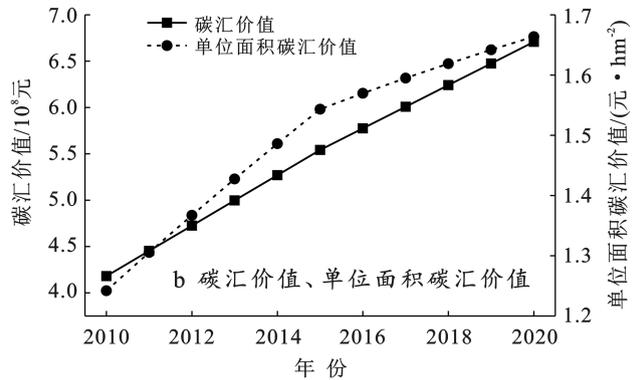
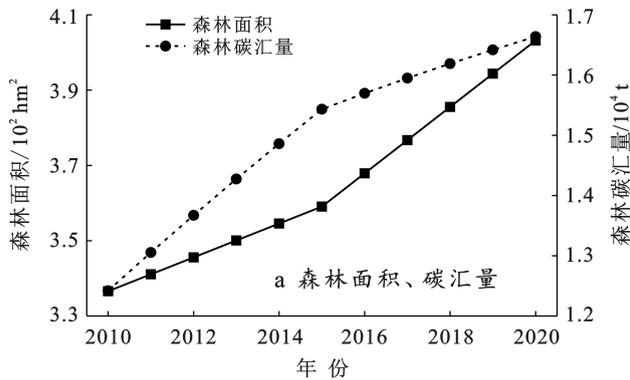


图 1 2010—2020 年河南省森林面积、碳汇量、碳汇价值及单位面积森林碳汇价值变化

Fig.1 Changes in forest area, carbon sink, carbon sink value, and unit area forest carbon sink value in Henan Province during 2010—2020

3.1.2 空间演化特征

(1) 空间分布特征。为更清晰了解河南省森林面积、碳汇量和碳汇价值空间变化情况,本文运用 ArcGIS 10.8 软件绘制了河南省森林面积、碳汇量和碳汇价值的空间分布图(图 2),并利用自然断点法对 2010, 2020 年河南省森林碳汇价值进行分类,分为碳汇价值较低区(1.96×10^8 元 $< C_V < 1.65 \times 10^9$ 元)、一般区(1.65×10^8 元 $< C_V < 3.73 \times 10^9$ 元)、良好区

(3.73×10^9 元 $< C_V < 9.92 \times 10^9$ 元)、较高区(9.29×10^9 元 $< C_V < 1.59 \times 10^{10}$ 元)4 种类型。

从图 2 可以看出,河南省各市碳汇价值量等级高低与森林面积和森林碳汇量大小有直接关系,森林面积与碳汇量越高的地市其碳汇价值等级越高,森林面积、碳汇量和碳汇价值在空间分布上均呈现“豫西、豫南高,豫东、豫北低”的态势,主要分布在豫西的南阳、洛阳、三门峡和豫南的信阳市。这 4 个城市森林碳汇

价值比例为 2010 年和 2020 年总价值的 62.71% 和 67.48%。对比 2010 年与 2020 年的河南省森林碳汇价值空间分布图可以发现 2010—2020 年碳汇价值较低区比例下降, 碳汇价值一般区比例增加, 部分区域由碳汇价值较低区转为了一般区(如安阳、新乡)。这说明该区域内森林碳汇量增加, 但由于森林的土地利用面积有限, 导致森林碳汇能力增长幅度受限, 从而使得森林碳汇价值低于其他区域; 而碳汇价值较高区明显增加, 主要是分布在伏牛山区内的南阳、洛阳市分别由碳汇价值良好区转为了较高区。伏牛山区是

中国重要的生态功能区, 生物多样性丰富, 自然环境条件优越^[31], 具有河南省最大的森林生态系统。因此良好的生态环境基础使得该区域森林碳汇能力较强, 其森林碳汇价值也相应较高。值得注意的是商丘市由碳汇价值一般区降为了碳汇价值较低区, 这是由于 2010—2020 年期间, 商丘市森林面积减少了 71.24%, 而耕地面积增加了 402.24%, 商丘市作为国家粮食生产核心区, 为全力保障粮食生产供给而导致森林面积减少, 从而致使森林碳汇量减少, 森林碳汇价值也大幅降低。

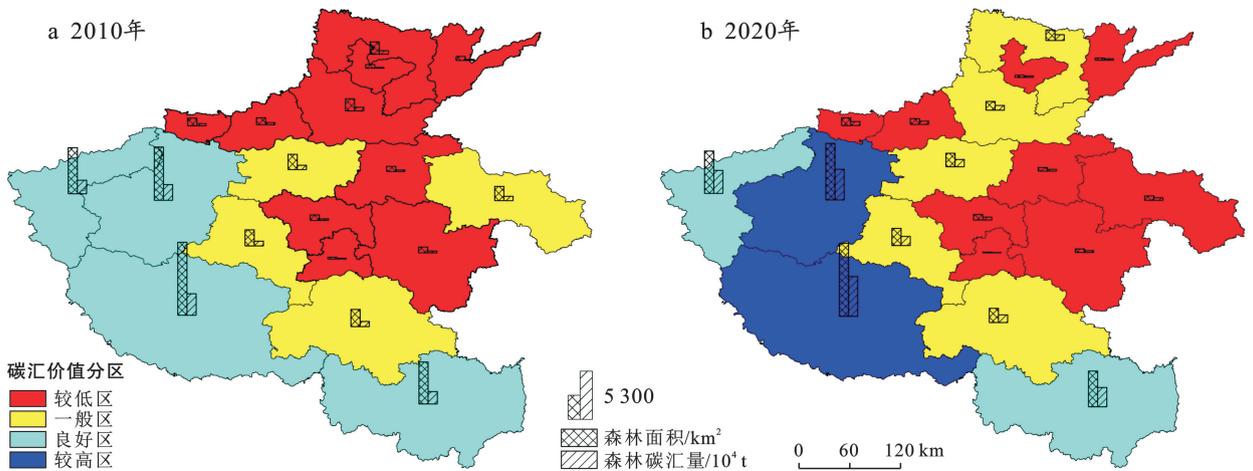


图 2 河南省森林面积、碳汇量、碳汇价值空间分布特征

Fig.2 Spatial distribution characteristics of forest area, forest carbon sequestration, and carbon sequestration value in Henan Province

(2) 空间聚集特征。河南省各市森林碳汇价值分布表现出明显的地区差异性, 森林碳汇价值实现若以调整森林碳汇价值空间分布、空间分区实现森林碳汇价值为技术手段, 打造区域协调发展新格局, 需对森林碳汇价值的空间相关性和聚集特征进行分析。本文通过计算莫兰指数探究森林碳汇价值的空间相关性。通过计算, 2010—2020 年河南省森林碳汇价值的全局莫兰指数均为正值, 且通过显著性检验 ($p < 0.01$), 表明在研究区域内森林碳汇价值存在显著的正向空间聚集效应^[32]。

为进一步分析区域内具体的空间聚集特征, 确定调整森林碳汇价值和不同路径实现森林碳汇价值的具体区域, 运用局部莫兰指数的方法, 绘制了河南省森林碳汇价值 LISA 聚类图(见图 3)。由图 3 可知, 2010—2020 年河南省森林碳汇价值的集聚特征基本稳定, 但存在空间异质性, 总体呈现“西南聚集”的分布特征。2010 年河南省森林碳汇价值高一高聚集区为三门峡、南阳和信阳市, 低—低聚集区仅有新乡市, 2020 年河南省高一高聚集区新增洛阳市, 低—低聚

集区新增周口市, 其余大部分地区空间相关性不显著。从森林碳汇价值聚类变化来看, 2010—2020 年森林碳汇价值高一高聚集区和低—低聚集区分别增加 1 个, 其空间聚集特征变化不大, 且聚集特征受地理区位、发展基础等条件影响, 碳汇价值高一高聚集区域分布在生态环境条件较好、建设用地少和林业资源潜力大的豫西和豫南地区, 碳汇价值低—低聚集区域散落分布在耕地面积比例较高、土地开发利用压力较大的豫北和豫东南地区。高一高聚集区为碳汇供给区, 需要以巩固森林碳汇能力和促进碳汇价值实现为目标, 低—低聚集区为碳汇需求区, 需要以科学提升森林固碳能力为目标。

3.2 河南省森林碳汇价值影响因素分析

为使模型参数结果较为精准、保持回归模型的稳定性, 需要对 5 个变量进行多重线性诊断, 主要是通过衡量变量的方差膨胀因子(VIF)来检验模型是否呈现共线性, VIF 大于 10 说明各变量之间存在多重共线性, 诊断结果见表 1。

由表 1 可知, 各变量 VIF 值均大于 10, 说明变量

间存在共线关系,此时若应用最小二乘法回归将导致结果精度不具备可信性,为解决各变量间的多重共线

性问题,提升模型拟合优度,本文采用岭回归^[33]进行拟合。

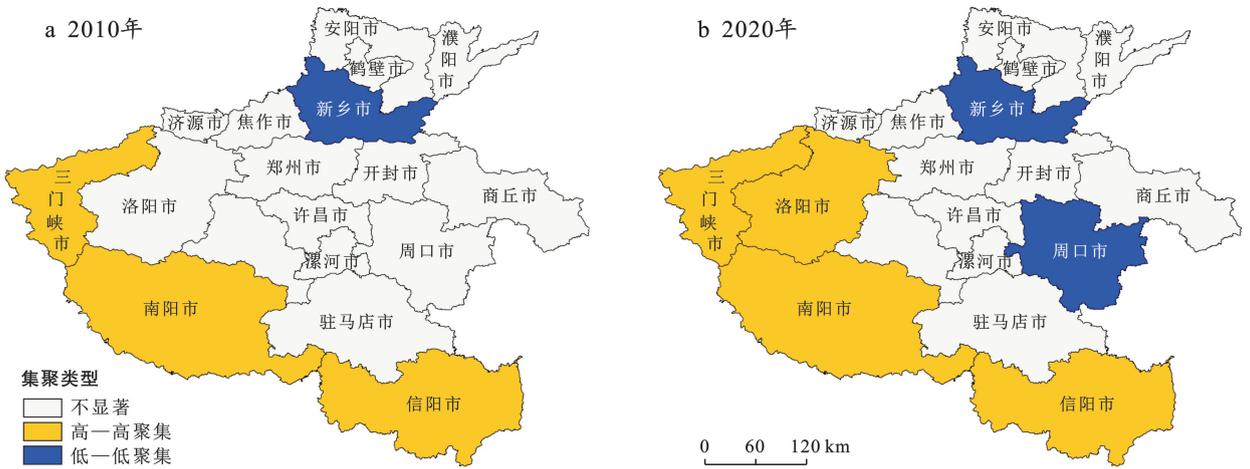


图 3 河南省森林碳汇价值 LISA 聚类特征

Fig.3 LISA clustering characteristics of forest carbon sink value in Henan Province

表 1 河南省森林碳汇价值各变量共线性诊断结果

Table 1 Results of collinearity diagnosis for each variable of forest carbon sink value in Henan Province

变量	非标准化系数	t 统计值	sig.	VIF
常量	5.676	6.063	0.002	—
$\ln C_P$	0.197	1.143	0.305	2 285.205
$\ln A_G$	0.826	12.409	0.000	1 829.997
$\ln F_V$	0.056	2.098	0.090	48.879
$\ln G_C$	0.839	11.503	0.000	564.706
$\ln F_S$	0.264	1.303	0.249	811.119

基于建立的扩展 STIRPAT 模型,将 $\ln C_V$ 作为因变量, $\ln C_P$, $\ln A_G$, $\ln F_V$, $\ln G_C$ 和 $\ln F_S$ 作为自变量进行岭回归。当 K 值为 0.06 时,此时自变量的标准化回归系数趋于稳定,岭回归拟合结果见表 2。

表 2 河南省森林碳汇价值 STIRPAT 模型岭回归拟合结果
Table 2 Ridge regression fitting results of STIRPAT model of forest carbon sink value in Henan Province

变量	系数	标准误差	标准系数	t 统计值	sig.
$\ln C_P$	0.313	0.019	0.240	16.487	0.000
$\ln A_G$	0.122	0.007	0.217	16.448	0.000
$\ln F_V$	0.236	0.036	0.170	6.583	0.001
$\ln G_C$	-0.191	0.029	-0.172	-6.558	0.001
$\ln F_S$	0.602	0.061	0.234	9.875	0.000
常数	3.605	0.405	—	8.907	0.000

注: F 值 = 434.300; sig. F = 0.000; R^2 = 0.998; 调整后 R^2 = 0.995。

从表 2 可以看出,该模型通过 F 检验 ($F = 434.300$, sig. $F = 0.000 < 0.05$),模型 R^2 值为 0.998,意味着模型自变量可以解释因变量森林碳汇价值的 99.80% 变化原因,模型具有意义。自变量均通过显著性检验,

说明自变量指标选择较有意义。岭回归得到的扩展 STIRPAT 模型回归方程为:

$$\ln C_V = 3.605 + 0.313 \ln C_P + 0.122 \ln A_G + 0.236 \ln F_V - 0.191 \ln G_C + 0.602 \ln F_S \quad (8)$$

由扩展 STIRPAT 模型回归结果可知,除碳汇强度对河南省森林碳汇价值有负向作用外,其余 4 个因素均产生正向影响作用,但作用效果有所差异,影响力大小依次为:森林面积比例 ($\ln F_S, 0.602$) > 城镇化率 ($\ln C_P, 0.313$) > 林业产业比例 ($\ln F_V, 0.236$) > 碳汇强度 ($\ln G_C, 0.191$) > 人均 GDP ($\ln A_G, 0.122$)。

(1) 森林面积比例是对森林碳汇价值产生正向促进作用的最关键因素。森林面积比例平均每增加 1%,河南省森林碳汇价值量增加 0.602%。森林面积是直接反映某区域森林资源情况的重要指标,增加森林碳汇的重要基础就是要增加森林面积近年来河南省通过实施各项造林、再造林工程,使得 2010—2020 年森林面积增幅达到 2.64%,直接提升了森林碳汇增量,故森林碳汇价值也逐步提升。

(2) 城镇化率是对森林碳汇价值产生正向促进作用的次要因素。河南省城镇化率由 2010 年的 38.82% 提升至 2020 年的 55.43%,随着农村人口向城镇迁移的数量增加,减少了农村人口日常生活中木材的使用量,减少了对森林的砍伐,由此会导致活立木蓄积量增加,从而使森林碳汇密度上升^[34]。此外农村人口迁移也为农村提供了更多土地空间,可在空闲且符合种植条件的土地上开展植树造林^[10],通过直接增加森林面积促进了森林固碳能力增强。

(3) 林业产业比例会对森林碳汇价值产生正向

影响关系。近年来河南省不断加大林业科技投入以促进林业产业发展,不仅通过积极发展特色经济林产业促使碳汇增加,也通过开发林业碳汇项目进行碳汇市场化交易实现碳汇经济价值,进而促进森林碳汇经济和林业经济的发展。

(4) 碳汇强度对森林碳汇价值存在负向影响关系,但相较于其他因素影响程度不大。2010—2020 年期间,河南省碳汇强度呈现逐年下降的趋势,由 2010 年的 0.66 t/万元下降至 2020 年 0.44 t/万元,下降幅度为 33.90%。虽然近年来河南省森林碳汇量随着经济发展水平的提高而增加,但单位 GDP 所产出的森林碳汇量却逐年降低,说明河南省森林碳汇增长速度小于经济增长速度,从而导致碳汇强度下降。理论上未来可通过降低经济发展速度来提高碳汇强度,以此反映技术水平的提高,但抑制经济增长速度是不现实的,未来可以通过进一步增强河南省土地开发利用技术、森林经营管理技术和提升科技投入效率来提升森林的碳汇能力。

(5) 人均 GDP 对森林碳汇价值的影响程度在几个因素中最小。人均 GDP 反映区域的经济水平,经济发展较好的地区一般碳排放量比较高,并且人均 GDP 反映了人们的生活水平。人们生活水平较高时对于生活环境质量的要求也较高。随着河南省经济发展和人民生活水平的提高,通过购买森林碳汇抵消碳排放的需求逐渐增强,并且通过“森林碳汇”实现“零碳生活”的方式成为人们的追求和向往,因此森林碳汇的价值愈加凸显。

4 结论与讨论

4.1 结论

(1) 河南省森林面积、碳汇量、碳汇价值和单位面积森林碳汇价值均呈现持续上升趋势,碳汇价值和单位面积森林碳汇价值分别由 2010 年的 4.18×10^{10} 元, 1.24×10^4 元/hm² 增加至 2020 年的 6.71×10^{10} 元, 1.66×10^4 元/hm², 2010—2015 年增幅大于 2015—2020 年。

(2) 河南省森林碳汇价值的空间分布格局整体表现为“豫西、豫南高,豫东、豫北低”的态势,省内森林碳汇价值较高的地市主要分布在伏牛山区。且河南省森林碳汇价值存在显著的正向空间聚集效应,总体呈现“西南聚集”的分布特征。2010—2020 年,河南省森林碳汇价值高一高聚集区和低—低聚集区分别增加 1 个,其空间聚集特征变化不大,大部分地区空间相关性不显著。

(3) 2010—2020 年,除碳汇强度外,城镇化率、人

均 GDP 值、林业产业比例、和森林面积均对河南省森林碳汇价值产生正向影响关系。5 种因素影响效果具有一定差异性,森林面积比例影响程度最大,城镇化率和林业产业比例次之,碳汇强度和人均 GDP 的影响程度相较来说不凸显。

4.2 讨论

本研究定量评估了河南省森林碳汇价值,与已有研究结果有相同和不同之处。① 森林碳汇价值核算方面,贾松伟^[20]基于不同森林类型生物量与蓄积量的回归方程和造林成本法核算 2008 年河南省森林碳汇价值为 2.21×10^{10} 元,计算的森林碳汇量仅考虑林木生物量碳汇量,未考虑林下植物和林地碳汇量,所核算得到的森林总碳汇量不全面。本文采用的是蓄积量扩展法,对林木生物量、林下植物和林地的碳汇量均进行核算以得到的森林碳汇价值相对全面。② 森林碳汇价值影响因素方面,因当前缺少对森林碳汇价值的研究,已有研究多是针对森林碳汇量,因本文估算的森林碳汇价值由森林碳汇量和森林碳汇单位价格所决定,而森林碳汇单位价格固定不变,故森林碳汇量的影响因素也是碳汇价值的影响因素。杜之利等^[10]研究发现森林面积和城镇化率对森林碳汇有正向影响,张颖等^[35]发现 GDP 值、林业生产总值对森林碳汇有正向影响效应,而陈帝伯等^[36]研究得到中国所有省域包括河南省其碳汇强度随着森林碳汇的提升呈现下降趋势,这与本文的研究结果均相同。产生这种现象的主要原因可能是森林面积增加会直接影响森林碳汇碳汇升高;人均 GDP 反映了经济社会发展水平,发展水平越高对于森林碳汇等反映生态环境质量的指标要求越高,也会促进森林碳汇相关科技进步,促进存量增加;林业产业比例增加反映社会对林业产品的需求,需求增加会倒逼林业产业升级,进一步提升森林利用效率,增加森林碳汇量;城镇化水平提高会导致人类活动产生聚集,一定程度上减少了对林地的干预^[37];碳汇强度是一个复合因素,由森林碳汇量和生产总值所决定,但由于森林碳汇增长速度小于经济增长速度导致碳汇强度下降。

基于有关研究,在未来发展过程中河南省可分区域开展森林碳汇价值实现工作。① 对于高一高聚集区,以该区域为试点,探索开展基于森林碳汇的生态补偿机制,通过试点先行找出存在的问题加以改进,进一步在全省推行;依托“三门峡苹果”“信阳茶叶油茶”等现有特色经济林产业进一步提升森林经营管理水平,促进产业经营目标由获得林产品收益的单一目标转变为既获得林产品收益又巩固森林碳汇量的复合目标;在经济发展较好的洛阳探索森林碳汇市场化

交易机制,通过推进林业碳汇市场化交易,探索将“空气净化、水质净化”等未来具有交易可行性的森林生态产品作为碳汇交易的附加产品纳入交易市场,以创新碳汇交易新模式,丰富森林碳汇价值实现路径。

②对于低—低聚集区,在保护现有森林资源的同时,加强集约经营、提高单位面积森林蓄积量,并积极出台相应政策引导推进林业碳汇项目开发;立足本地需求、结合本地实际打造适宜的造林模式,在保证粮食供给的条件下,遵循“适地适树”原则种植高固碳树种和有利于土壤固碳的树种,紧扣森林质量精准提升工程,提升森林质量,进而直接增加森林碳汇能力。

③对于其他聚集特征不显著的区域,要结合区域特色,提升森林碳汇能力,促进碳汇价值实现。如郑州市要充分发挥金融和人才支撑作用,加强对高一高聚集区和低—低聚集区的森林碳汇开发经营管理人才培养和输送,并积极探索“森林碳汇+绿色金融”新模式,创新开发多种森林碳汇金融产品,积极向高一高聚集区和低—低聚集区提供多种森林碳汇金融服务,推动碳汇价值实现。

本研究仍存在一些不足之处。在价值核算中,由于缺少部分年份数据故采用线性插值法补齐数据,所以得到的结果存在一定误差,今后应在每年实地监测数据的基础上,更精准研究碳汇动态变化;在影响因素分析时,由于森林碳汇价值受到自然和人文因素共同影响,仅采取模型模拟几种因素对因变量的贡献程度,无法全面探究森林碳汇价值的影响机制,未来应以增进人类福祉为出发点,结合质性研究等方法加强对森林碳汇价值影响机制的深入研究。

[参 考 文 献]

- [1] Fang Jingyun, Yu Guirui, Liu Lingli, et al. Climate change, human impacts, and carbon sequestration in China [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2018, 115(16): 4015-4020.
- [2] 张春华, 居为民, 王登杰, 等. 2004—2013年山东省森林碳储量及其碳汇经济价值[J]. *生态学报*, 2018, 38(5): 1739-1749.
- [3] 张峰, 彭祚登. 北京市森林碳储量和碳汇经济价值研究[J]. *林业资源管理*, 2021(6): 52-58.
- [4] Leley N C, Langat D K, Kisiwa A K, et al. Total carbon stock and potential carbon sequestration economic value of mukogodo forest-landscape ecosystem in drylands of northern Kenya [J]. *Open Journal of Forestry*, 2022, 12(1): 19-40.
- [5] Zhang Chunhua, Ju Weimin, Chen J M, et al. China's forest biomass carbon sink based on seven inventories from 1973 to 2008 [J]. *Climatic Change*, 2013, 118(3): 933-948.
- [6] 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.
- [7] 黄宰胜, 陈钦. 基于造林成本法的林业碳汇成本收益影响因素分析[J]. *资源科学*, 2016, 38(3): 485-492.
- [8] Sun Wanlong, Liu Xuehua. Review on carbon storage estimation of forest ecosystem and applications in China [J]. *Forest Ecosystems*, 2020, 7(1): 1-14.
- [9] 彭淑敏, 豆晓飞, 李鹏善, 等. 武汉市居民森林碳汇认知及支付意愿影响因素研究[J]. *中国林业经济*, 2022(2): 101-105.
- [10] 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.
- [11] 姚仁福, 胡珠珠, 贾君. 森林碳汇与经济增长的互动关系[J]. *林业经济问题*, 2022, 42(1): 73-79.
- [12] 陈思婷, 黄衍, 何霄. 中国森林碳汇发展潜力分析[J]. *中国林业经济*, 2022(4): 68-72.
- [13] 令狐大智, 罗溪, 朱帮助. 森林碳汇测算及固碳影响因素研究进展[J]. *广西大学学报(哲学社会科学版)*, 2022, 44(3): 142-155.
- [14] 李琛. 湖北省森林碳汇经济价值影响因素及潜力分析[D]. 湖北 武汉: 武汉轻工大学, 2022.
- [15] 张颖, 周雪, 覃庆锋, 等. 中国森林碳汇价值核算研究[J]. *北京林业大学学报*, 2013, 35(6): 124-131.
- [16] 张靖靖. 中国经济发展对森林经济价值的影响研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2018.
- [17] 贾松伟. 退耕还林前后森林碳储量变化及碳汇经济价值估算: 以洛宁县为例[J]. *河南农业科学*, 2013, 42(11): 68-71.
- [18] 滕永忠, 白保勋, 陈东海, 等. 河南省中北部不同土地利用类型净碳汇及其价值[J]. *河南农业科学*, 2019, 48(9): 60-66.
- [19] 贾松伟. 基于森林资源清查资料的河南省森林碳储量及其经济价值研究[J]. *湖北农业科学*, 2016, 55(6): 1612-1616.
- [20] 贾松伟. 河南省乔木林碳储量动态变化及其碳汇经济价值估算[J]. *河南农业科学*, 2014, 43(5): 149-153.
- [21] 汪伦焰, 蒋赞美, 李慧敏, 等. 河南省城市化与生态环境耦合协调状态的时空格局[J]. *水土保持通报*, 2021, 41(5): 311-318.
- [22] 刘梅娟, 钱怡霖, 郑根水. 基于造林成本法的森林碳汇成本影响因素研究[J]. *财会月刊*, 2020(9): 79-84.
- [23] 杨美丽, 褚宏洋, 庄皓明, 等. 森林碳汇经济价值评估研究: 以山东省为例[J]. *山东农业大学学报(社会科学版)*, 2017, 19(2): 77-84.
- [24] 位贺杰, 杨一鸣, 吴群. 多雾霾城市绿地空气净化服务与景观格局的关系: 以河南省安阳市区为例[J]. *水土保持通报*, 2021, 41(4): 292-299.

- [25] 如克亚·热合曼,阿里木江·卡斯木,哈力木拉提·阿布拉提,等.基于 InVEST 模型的天山北坡城市群生境质量时空演化研究[J].生态与农村环境学报,2022,38(9):1112-1121.
- [26] Ehrlich P R, Holdren J P. Impact of population growth [J]. Science, 1971,171(3977):1212-1217.
- [27] York R, Rosa E A, Dietz T. STIRPAT, IPAT and IMPACT: analytic tools for unpacking the driving forces of environmental impacts [J]. Ecological Economics, 2003,46(3):351-365.
- [28] Xu Qian, Yang Ren, Dong Yuxiang, et al. The influence of rapid urbanization and land use changes on terrestrial carbon sources/sinks in Guangzhou, China [J]. Ecological Indicators, 2016,70:304-316.
- [29] Dietz T, Rosa E A. Rethinking the environmental impacts of population, affluence and technology [J]. Human Ecology Review, 1994,1(2):277-300.
- [30] 许向阳,胡佳男.多情景下中国造纸行业碳排放峰值预测研究:基于可拓展的随机性环境评估模型[J].林业经济,2022,44(5):5-22.
- [31] 张静静,赵天旭,梁丹.伏牛山地区森林生态系统服务空间差异分析[J].生态环境学报,2020,29(7):1285-1291.
- [32] 戴巍,赵科理,高智群,等.典型亚热带森林生态系统碳密度及储量空间变异特征[J].生态学报,2017,37(22):7528-7538.
- [33] 张巍.基于 STIRPAT 模型的西安市碳足迹预测和情景分析[J].生态经济,2021,37(4):25-29.
- [34] 赵荟,沈佳焯,陈新云,等.基于国土空间规划落实造林绿化空间的路径思考[J].林业资源管理,2022(6):26-29.
- [35] 张颖,孟娜,姜逸菲.中国森林碳汇与林业经济发展耦合及长期变化特征分析[J].北京林业大学学报,2022,44(10):129-141.
- [36] 陈帝伯,魏伟,周俊菊,等.中国省域碳源/碳汇强度及碳盈亏的空间演变[J].经济地理,2023,43(1):159-168.
- [37] 侯孟阳,邓元杰,姚顺波,等.考虑空间溢出效应的森林质量与经济增长关系 EKC 检验[J].林业科学,2020,56(12):145-156.

(上接第 287 页)

- [24] 蒋惠琴.碳排放权初始配额分配研究[D].浙江 杭州:浙江工业大学,2019.
- [25] 邢佳琛.基于零和收益 DEA 模型的中国 2030 年碳排放目标省际分配研究[D].天津:天津大学,2019.
- [26] Charnes A, Cooper W W, Rhodes E. Measuring the efficiency of decision making units [J]. European Journal of Operational Research, 1978,2(6):429-444.
- [27] 郑立群.中国各省区碳减排责任分摊:基于零和收益 DEA 模型的研究[J].资源科学,2012,34(11):2087-2096.
- [28] Lins M P E, Gomes E G, Soares de Mello J C C B, et al. Olympic ranking based on a zero sum gains DEA model [J]. European Journal of Operational Research, 2003,148(2):312-322.
- [29] Gomes E G, Lins M E. Modelling undesirable outputs with zero sum gains data envelopment analysis models [J]. Journal of the Operational Research Society, 2008,59(5):616-623.
- [30] 崔晓燕.中国省际电力部门碳排放配额分配:基于熵法和零和 DEA 模型[D].天津:天津大学,2020.
- [31] Cecchini L, Venanzi S, Pierri A, et al. Environmental efficiency analysis and estimation of CO₂ abatement costs in dairy cattle farms in Umbria (Italy): a SBM-DEA model with undesirable output [J]. Journal of Cleaner Production, 2018,197:895-907.
- [32] 赵敏.中国碳排放效率及边际减排成本研究[D].甘肃 兰州:兰州财经大学,2022.
- [33] 王文举,陈真玲.中国省级区域初始碳配额分配方案研究:基于责任与目标、公平与效率的视角[J].管理世界,2019,35(3):81-98.
- [34] 张凯新.我国省域碳排放权配额分配研究[D].山东 东营:中国石油大学(华东),2017.
- [35] 王文举,孔晓旭.基于 2030 年碳达峰目标的中国省域碳配额分配研究[J].数量经济技术经济研究,2022,39(7):113-132.
- [36] 郭茹,吕爽,曹晓静,等.基于 ZSG-DEA 模型的中国六大行业碳减排分配效率研究[J].生态经济,2020,36(1):13-18.
- [37] 高杨,姚雪,白永秀,等.有“链长”赋能绿色低碳农业产业链:内在机理与实现路径[J].经济学家,2022(12):116-124.
- [38] 肖玉仙,尹海涛.我国碳排放权交易试点的运行和效果分析[J].生态经济,2017,33(5):57-62.