

DOI: 10.20103/j.stxb.202408292058

李雪敏, 潘越明, 李艺格, 张耘恺, 王菲菲. 内蒙古森林碳汇价值的时空演变格局、影响因素与空间外溢效应研究. 生态学报, 2025, 45(15):

Li X M, Pan Y M, Li Y G, Zhang Y K, Wang F F. Spatiotemporal evolution pattern, influencing factors and spatial spillover effect of forest carbon sequestration value in Inner Mongolia. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(15): - .

内蒙古森林碳汇价值的时空演变格局、影响因素与空间外溢效应研究

李雪敏^{1,*}, 潘越明¹, 李艺格^{2,3}, 张耘恺¹, 王菲菲¹

1 内蒙古财经大学财政税务学院, 呼和浩特 010070

2 中国科学院大学, 北京 100049

3 中国科学院科技战略咨询研究院, 北京 100190

摘要: 森林碳汇对于减缓全球气候变暖、推动我国碳中和目标实现具有重要意义。基于最优价格法、碳税法 and 造林成本法评估 2009—2023 年内蒙古 12 盟市的森林碳汇价值并分析其时空演变格局, 从经济、社会、自然、规模四个维度构建指标体系并应用空间计量模型揭示森林碳汇价值的影响因素、相关性特征和空间外溢效应。结果表明: ①时间上, 内蒙古森林碳汇价值总体呈增长趋势且以蒙东和蒙中的盟市增速较快, 空间上整体呈现“东高西低”的演变格局。②内蒙古森林碳汇价值具有显著的全局空间关联性且空间集聚程度不恒定, 低低相关盟市为阿拉善盟、巴彦淖尔市和乌海市, 高低相关盟市为呼伦贝尔市, 兴安盟则表现为交替高低相关和高高相关。③各盟市间存在显著的正向空间溢出效应, 相邻盟市森林碳汇价值每变化 1%, 本盟市将同向变化 0.205%; 城镇化水平对森林碳汇价值具有正向影响作用且主要影响相邻盟市森林碳汇价值, 劳动力要素投入程度、地方财政支出和林业管理水平仅对相邻盟市呈现负向影响。研究结果为深入理解森林碳汇价值变化的内在机理, 推动森林碳汇价值实现和可持续经营管理提供有益参考和借鉴。

关键词: 森林碳汇价值; 时空演变格局; 影响因素; 空间相关性; 空间外溢效应

Spatiotemporal evolution pattern, influencing factors and spatial spillover effect of forest carbon sequestration value in Inner Mongolia

LI Xuemin^{1,*}, PAN Yueming¹, LI Yige^{2,3}, ZHANG Yunkai¹, WANG Feifei¹

1 School of Finance and Taxation, Inner Mongolia University of Finance and Economics, Hohhot 010070, China

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

3 Institutes of Science and Development, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

Abstract: Forest carbon sequestration is crucial for mitigating global warming and promoting the realization of China's carbon neutrality goal. Using the optimal price method, carbon tax method and afforestation cost method, the forest carbon sink value of 12 league cities in Inner Mongolia from 2009 to 2023 was evaluated and its spatiotemporal evolution pattern was analyzed. The index system was constructed from the four dimensions of economy, society, nature, and scale, and the spatial econometric model was used to reveal the influencing factors, correlation characteristics and spatial spillover effects of forest carbon sink value. The results showed that: ①Over time, the forest carbon sink value of Inner Mongolia showed an increasing trend, with faster growth rates in eastern and central Mongolia. Spatially, the overall spatial pattern was “high in

基金项目: 国家自然科学基金项目(42461045); 内蒙古自然科学基金资助项目(2022QN07004); “党的二十大精神研究”哲学社会科学重大专项(ESDZX202324); 内蒙古财经大学自治区“五大任务”研究专项重点项目(NCXWD2404)

收稿日期: 2024-08-29; 网络出版日期: 2025-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: lxm2005.6.19@163.com

the east and low in the west". ②The forest carbon sink value of Inner Mongolia had a significant global spatial correlation and the degree of spatial agglomeration was not constant. The low-low correlation league cities were Alashan League, Bayannaoer City and Wuhai City; while the high-low correlation league city was Hulunbuir City; and the Xing'an League showed alternating low-high correlation and high-high correlation. ③There is a significant positive spatial spillover effect among the leagues and cities. Specifically, for every 1% change in the forest carbon sequestration value of neighboring leagues or cities, the corresponding value in the local area changes in the same direction by 0.205%. The level of urbanization positively impacts forest carbon sequestration value, primarily influencing forest carbon sink value in adjacent league cities. In contrast, factors such as labor input, local government fiscal expenditure, and forestry management levels only exhibit a negative impact on the forest carbon sequestration value of neighboring leagues or cities. The results of this study provide an important reference for in-depth understanding of the internal mechanism of forest carbon sink value change, and promoting the realization of forest carbon sink value and sustainable management.

Key Words: forest carbon sequestration value; spatiotemporal evolution pattern; influencing factors; spatial correlation; spatial spillover effects

伴随着人类经济社会的迅速发展,温室气体浓度增加导致气候变暖的问题日益凸显,已成为现阶段全球共同面临的挑战。我国是世界第一大碳排放国,低碳减排是未来发展的重要战略方向,习近平总书记在第 75 届联合国大会一般性辩论上提出的“2030 年前实现碳达峰、2060 年前实现碳中和”目标(简称“双碳”目标)也正是我国低碳减排决心的彰显^[1]。低碳减排的实施途径主要有减少“碳源”和增加“碳汇”两大方向,两者在缓解气候变化中是相互补充的关系,因此充分推动碳汇发展也将是应对全球气候变化的主要战略^[2]。森林作为陆地上最大的碳储库和最经济有效的吸碳器^[3],其碳汇功能在维持碳平衡、调节碳循环方面具有巨大作用^[4-5],大力推动森林碳汇发展是实现我国“双碳”目标的重要方式之一。同时,森林碳汇还具有涵养水源、保持水土、创造就业和拓展产业等多种生态、经济和社会功能,能够间接促进经济发展和社会稳定。因此,深入挖掘森林碳汇价值且把握其时空变化内在机理是落实我国“双碳”目标的关键步骤,也是推动经济社会与生态保护协同发展的重要前提。

目前,我国逐步形成基于项目层面的林业碳汇交易,2024 年国家核证自愿减排量(China Certified Emission Reduction, CCER)市场的正式重启使得相关碳市场活跃度与成交额进一步提升,推动更多的优质林业碳汇项目开发与落地实施,而科学评估森林碳汇价值是实现森林碳汇交易的必要路径。系统梳理国内外文献发现现阶段研究对象大多以森林碳汇为主^[6-7],有关森林碳汇价值的研究主要聚焦于国家、省域和流域尺度^[8-11]的价值评估^[12-13]、价值实现路径^[14-15]与管理策略制定^[16]等方面,评估方法以碳税法^[17]、造林成本法^[18]和市场价格法^[19]应用较为普遍。随着研究渐次深入,部分学者对森林碳汇量的时空特征与影响因素进行探究^[20],发现其主要受森林砍伐量、森林自然破坏程度、自然条件、生物多样性、能源消费结构、城镇化水平等因素影响^[21-22],森林碳汇价值影响因素研究相比碳汇量而言略显匮乏,少数学者从国家和省域尺度出发揭示森林碳汇价值与经济增长的关系以及森林碳汇价值的影响因素^[23-24];基于市域或县域微观尺度的研究主要将森林碳汇价值作为相关管理策略研究的基础,如核算森林碳收支以模拟森林碳补偿机制^[25],以森林碳汇价值评估为基础探索价值实现对策^[26]、优化林业碳汇质押贷款融资模式^[27]等,未对其价值量化方法和影响因素进行深入探讨。同时,由于森林资源的分布并不是孤立存在的,地理环境的相似性、政策引导的溢出性、生产创新的互补性等会使森林碳汇呈现明显的区域关联效应,部分学者认为森林碳汇的空间溢出效应并不显著或存在负向溢出效应^[28],一些学者则认为森林碳汇存在较强的正向空间溢出效应^[29],可见有关森林碳汇空间效应的研究仍需要深层次探讨。综上,围绕森林碳汇的科学研究与实践探索有必要从更微观尺度出发,通过揭示森林碳汇价值时空格局、影响因素及区域间溢出关系,为政府因地制宜地制定区域森林碳汇发展政策提供科学依据。

本研究从市域关联性的角度出发,在对森林碳汇价值评估与时空变化分析的基础上,深入剖析森林碳汇价值的影响因素与空间外溢效应,是对当前关于森林碳汇价值影响因素与空间效应研究的有益补充。以内蒙古 12 盟市为研究区域,首先通过固碳速率法与时空调节因子测算森林碳汇量;其次,利用最优价格法、碳税法、造林成本方法以及 REER 指数对森林碳汇价值进行评估,并揭示 2009—2023 年内蒙古森林碳汇价值的时空演变特征;最后,通过构建多维度指标体系和空间计量模型进行森林碳汇价值的影响因素和空间外溢效应研究。研究结果以期为深入理解内蒙古森林碳汇价值的空间互动机制及其驱动因素提供重要依据,也为推进内蒙古森林碳汇交易和针对性制定森林碳汇发展政策提供数据支撑和科学指导。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

内蒙古自治区位于我国北部边疆,地域狭长,由西北向东南斜伸,东西直线距离超过 2400km,地处 $97^{\circ}12'—126^{\circ}04'E$, $37^{\circ}24'—53^{\circ}23'N$ 。全区总面积 118.3 万 km^2 ,下辖 12 个地级行政区,包括 9 个地级市和 3 个盟(图 1)。内蒙古是祖国北方重要生态安全屏障,土地覆盖类型多样且森林资源丰富,森林总面积 $0.26 \times 10^8 hm^2$,活立木蓄积量 $16.63 \times 10^8 m^3$ ^[30],全区已建立以森林生态系统为主要保护对象的保护区 64 个,蕴藏着巨大的森林碳汇开发潜力。受区位因素影响,内蒙古各盟市间的自然资源禀赋、经济发展水平、社会发展程度和气候条件等差异较大,区域内部发展极不均衡,不同地级单位间森林碳汇价值存在较大的时空差异性与关联性。因此,以盟市为研究单元可以更好地明晰研究区森林碳汇价值时空分布格局,进一步揭示森林碳汇价值影响因素及区域间空间外溢效应,为提升区域森林生态系统保护和林业碳汇政策的地区适配性、促进森林碳汇可持续发展提供科学依据。

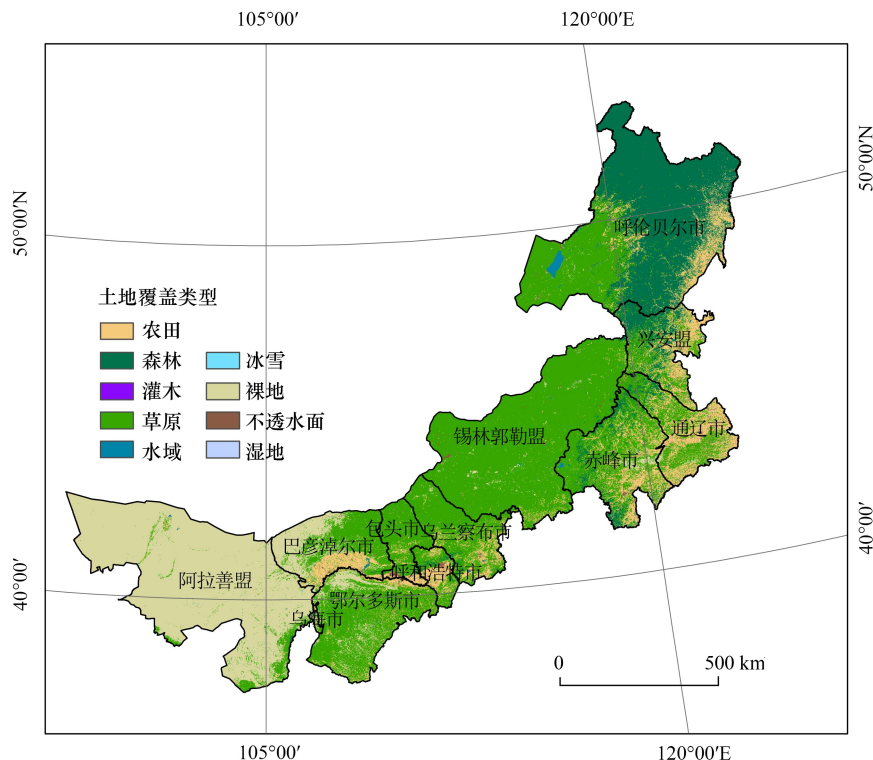


图 1 内蒙古自治区区域概况图

Fig.1 Regional overview map of Inner Mongolia Autonomous Region

1.2 数据来源及预处理

2009—2013 年为第八次全国森林资源清查周期,2014—2018 年为第九次全国森林资源清查周期,第十次全国森林资源清查结果目前尚未公布。为兼顾数据可得性和研究时效性,本文以 2009—2023 年为研究区间。2009—2018 年森林植被固碳速率和森林土壤固碳速率数据来自 2020 年 9 月由生态环境部环境规划院、中国科学院生态环境研究中心共同编写的《陆地生态系统生产总值(GEP)核算技术指南》(以下简称《GEP 核算技术指南》),2019—2023 年森林植被固碳速率和森林土壤固碳速率数据参考何念鹏等^[31]文献的预测结果进行补充。因《GEP 核算技术指南》仅公布了 2000、2010、2015 年数据,考虑森林植被、土壤固碳速率数据可得性以及植被生长速度和固碳能力增长变化缓慢的现实情况,故本文假设 2009—2013、2014—2018 和 2019—2023 年各盟市森林植被固碳速率和森林土壤固碳速率均不变。

本研究的森林面积来自中国 30m 年度土地覆盖数据集及其动态变化(1985—2022 年)数据集(<https://www.ncdc.ac.cn/portal/metadata/9de270f3-b5ad-4e19-afc0-2531f3977f2f>);NPP 和土壤保持模拟量相关数据来自中国科学院资源与环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn>),数据精度为 1km×1km;行政区边界数据来自国家基础地理信息中心(<https://www.ngcc.cn/>);年平均气温和年降水量数据来自美国国家海洋和大气管理局(NOAA)下设的国家环境信息中心(NCEI)(<https://www.ncei.noaa.gov/data/global-summary-of-the-day/archive/>),基于中国所有站点的逐日数据,利用反距离权重法插值得到全国逐日栅格数据,空间尺度为 1km,通过地级市的行政边界 shp 数据对地级市逐日栅格进行平均数处理,进而汇总加和得到逐年数据;文中涉及到的其他影响因素数据均来自 2009—2023 年《内蒙古统计年鉴》《内蒙古经济社会调查年鉴》《中国城市统计年鉴》;名义汇率和价格平减指数数据来自 2009—2023 年《中国统计年鉴》《中国财政年鉴》和中国外汇交易中心;最优价格模型、碳税法和造林成本法价格以及林下植物碳转换系数涉及数据均来自文献资料^[32—36]。文中部分缺失数据通过线性插值法进行补值。

2 研究方法与研究框架

2.1 森林碳汇量的计量方法

森林碳汇量计量是碳汇价值评估的必要前提。以《GEP 核算技术指南》为依据,考虑传统固碳速率法对林下植物固碳能力的忽略以及不同盟市间地理条件与环境质量对固碳速率的差异化影响,本文引入时空调节因子并参考森林蓄积量拓展法^[32],以期更加准确和合理地计量森林碳汇量。具体思路为首先利用植被净初级生产力(NPP)、土壤保持时空调节因子分别修正森林植被固碳速率和森林土壤固碳速率,再通过森林面积和林下植被碳转换系数测算森林植被固碳量、森林土壤固碳量以及林下植物固碳量,随后运用 C 转化为 CO₂ 系数计算森林生态系统碳汇量。计算公式为:

$$FC_{ij} = [FCSR \times E_{ij1} \times (1 + \alpha) \times SF_{ij} + FCSS \times E_{ij2} \times SF_{ij}] \times M_{CO_2} / M_C \quad (1)$$

式中, FC_{ij} 为第 i 个盟市第 j 年的森林生态系统碳汇量(tCO_2/a);FCSR 为森林植被固碳速率($tC \text{ hm}^{-2} a^{-1}$);FCSS 为森林土壤固碳速率($tC \text{ hm}^{-2} a^{-1}$); E_{ij1} 、 E_{ij2} 分别为第 i 个盟市第 j 年的 NPP 和土壤保持时空调节因子; SF_{ij} 为第 i 个盟市第 j 年的森林面积(hm^2); α 为林下植物碳转换系数,取 IPCC 默认值 0.195; M_{CO_2}/M_C 为 C 转化为 CO₂ 的转换系数 44/12。

NPP 时空调节因子的计算方法为:

$$E_{ij1} = e_{ij} / \bar{e}_j \quad (2)$$

式中, e_{ij} 指森林生态系统第 i 个盟市第 j 年的 NPP (t/hm^2); $\bar{e}_j$ 指森林生态系统第 j 年的内蒙古地区平均 NPP (t/hm^2)。

借鉴应用较广的 RULSE 模型计算土壤保持量,土壤保持时空调节因子的计算方法为:

$$E_{ij2} = p_{ij} / \bar{p}_j \quad (3)$$

式中, p_{ij} 指森林生态系统第*i*个盟市第*j*年的土壤保持模拟量(t/hm^2); $\overline{p_j}$ 指森林生态系统第*j*年的内蒙古地区平均土壤保持模拟量(t/hm^2)。

2.2 森林碳汇价格的确定方法

森林碳汇价格是价值量评估的基本参数。基于碳汇生产者收益最大化、外部经济因素对碳汇价格的影响、碳汇带来的收益或失去碳汇造成的损失三个视角对森林碳汇价格进行测算。以结合实际有效汇率的最优价格法、碳税法和造林成本法的平均价格作为森林碳汇价格,具体公式为:

$$P_i = [(P_{OPM} + P_{CT}) \times REER_i + P_{AC}] / 3 \quad (4)$$

式中, P_i 为第*i*年的碳汇价格; P_{OPM} 为最优价格模型确定的碳汇价格,将森林碳汇生产的追加支出和碳汇生产的追加收入相比较,当资源的边际收入(MR)等于边际支出(MC)时实现碳汇生产利润最大化,借鉴张颖等的研究^[33],我国森林碳汇最优价格区间为 10.11—15.17 \$/t,一般选用上限; P_{CT} 为碳税价格,借鉴刘梅娟等^[34]基于《森林生态系统服务功能评估规范》所推荐的碳汇资产单价标准,即采用瑞典碳税率 150 \$/t 碳; P_{AC} 为运用固定 CO₂的造林成本法得到的碳汇价格,参考李文华等^[35]研究,碳固定价值取 365 元/tCO₂,碳蓄积价值取 20.5 元/tCO₂,根据谢高地等^[36]研究,碳汇价值可分为碳固定价值和碳蓄积价值,因此固定 CO₂的造林成本为 385.5 元/t;REER_{*i*}为第*i*年的实际有效汇率指数,即名义有效汇率除以价格平减指数或成本指数,目的是消除通货膨胀、汇率变动等因素的影响。

2.3 森林碳汇价值的影响因素指标体系

考虑森林碳汇价值涉及多系统间的复杂联系,本文综合借鉴杜之利、李鹏、于贵瑞等的研究,从经济、社会、自然、规模四个维度构建森林碳汇价值影响因素指标体系(表 1),以探究森林碳汇价值变化的内在机理。各个维度的具体指标选取及其依据如下:

表 1 森林碳汇价值影响因素指标体系

Table 1 The index system of the influencing factors of forest carbon sequestration value

影响维度 Impact dimension	影响因素指标 Impact factor indicators	指标缩写 Abbreviation of index	指标描述 Indicator description
经济维度 Economic dimension	经济发展水平	EL	人均 GDP 指数
	产业结构	IS	第一产业 GDP/GDP
	林业发展水平	FDL	年单位面积林业产值
社会维度 Social dimension	城镇化水平	UL	城镇常住人口/地区常住人口
	劳动力要素投入程度	DL	农业劳动力人数/地区常住人口
	技术发展水平	TL	年专利授权数
自然维度 Natural dimension	降水	P	年单位面积降水量
	气温	T	年平均气温
规模维度 Scale dimension	地方财政支出	LE	在节能减排上的一般公共预算支出
	林业管理水平	FML	造林总面积

EL:经济发展水平 Economic development level;IS:产业结构 Industrial structure;FDL:林业发展水平 Forestry development level;UL:城镇化水平 Urbanization level;DL:劳动力要素投入程度 Degree of labor factor input;TL:技术发展水平 Technological development level;P:降水 Precipitation;T:气温 Temperature;LE:地方财政支出 Local fiscal expenditure;FML:林业管理水平 Forestry management level

(1)经济因素。森林碳汇与经济增长之间存在长期均衡与短期动态关系,两者之间具有正的双向互动关系,但经济增长对森林碳汇发展稳健性的影响不具有持续效应^[37]。经济发展过程中的产业结构变化意味着土地利用和管理方式转变,由此带来的林业生产规模变化、生产技术改善、产业集聚等均会影响森林碳汇^[38]。通常认为,林业产业发展与森林碳汇量之间存在正相关的关系^[1],但是短期内林业产业发展也可能带来森林资源的过度消耗^[39],进而导致森林碳汇及其价值量减少。

(2)社会因素。城镇化水平是衡量区域社会经济发展的重要指标,不同类型的城镇化率对森林碳汇的形成有不同的影响^[40],进而影响森林碳汇价值。同时,我国参与森林建设的主体多为农业劳动力,在劳动力素

质保持恒定的基础上,劳动力人数会很大程度影响林业产量与森林碳汇^[1]。此外,森林碳汇发展的质量与技术水平密切相关,一方面技术水平直接关系着生态系统建设能力、培育能力和监测能力等^[41],另一方面通过改变其他行业生产效率以控制环境污染,改善森林生长的外部环境,进而间接影响森林碳汇发展。

(3) 自然因素。水热条件是影响森林生长和固碳能力的重要因素,通过影响植被的生长覆盖以及光合作用的强弱^[42],进而影响森林碳汇能力和碳汇价值。其中,降水是中国陆地生态系统碳汇最显著的影响因子之一,气温对碳汇的影响方式仍存在争议和探索^[43]。

(4) 规模因素。森林碳汇增长离不开政府对环境保护工程与林业生态工程建设的投资^[44],目前财政支持是政府推动森林碳汇发展的主要方式,可为技术研发、科学管理等提供资金保障。造林规模是林业管理水平的体现,对于提高森林碳汇能力具有重要意义^[45],但受林木生长期的影响,造林行为对森林碳汇的作用存在滞后期^[46],短期内无法产生正向影响。

2.4 空间计量模型的建立

2.4.1 多元线性回归模型(OLS)

在森林碳汇价值影响因素指标体系建立的基础上,当不考虑空间外溢效应时,通过多元线性回归对各因素影响效应进行初步探究,具体模型如下:

$$\ln y = c + \sum_{k=1}^3 \sum_{i=1}^3 \alpha_k \ln x_i + \sum_{j=1}^3 \sum_{i=4}^6 \beta_j \ln x_i + \sum_{m=1}^2 \sum_{i=7}^8 \gamma_m \ln x_i + \sum_{n=1}^2 \sum_{i=9}^{10} \lambda_n \ln x_i + \varepsilon \quad (5)$$

式中, y 为森林碳汇价值; x_i 依次代表经济、社会、自然、规模方面的各个影响因素指标; α_k 、 β_j 、 γ_m 、 λ_n 分别表示各指标回归影响系数; c 为截距; ε 为随机扰动项。

2.4.2 空间计量模型

在多元线性回归模型的基础上检验相邻空间单元森林碳汇价值之间的相关性,若显著相关,则利用拉格朗日乘子检验(Lagrange Multiplier, LM)选择适合的空间计量模型^[1],以进一步研究森林碳汇价值的影响因素以及跨域溢出效应。空间相关性通过全局 Moran's I 指数和局部 Moran's I 指数进行分析,全局 Moran's I 指数可以发现空间的集聚或异常值和空间分布的差异与关联性,反映研究区域内空间差异的平均程度;局部 Moran's I 指数用以确定具体集聚情况,描述临近空间属性值的相关程度。公式如下:

$$I_G = \frac{n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (y_i - \bar{y}) (y_j - \bar{y})}{\left(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} \right) \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (6)$$

$$I_L = \frac{(y_i - \bar{y}) \sum_{j=1}^n w_{ij} (y_j - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 / n} \quad (7)$$

式中, I_G 、 I_L 分别表示全局和局部 Moran's I 指数; n 表示地区总数; y_i 、 y_j 分别表示第 i 、 j 地区相应属性的观测值; w_{ij} 为空间权重矩阵元素。

空间计量模型分为空间滞后模型(SLM)、空间误差模型(SEM)和空间杜宾模型(SDM)三种。具体形式如下:

$$y_{it} = \rho \sum_{j=1}^n w_{ij} y_{jt} + \varphi + x_{it} \alpha' + \sum_{j=1}^n w_{ij} x_{ijt} \beta' + \mu_i + \eta_t + \varphi_{it} \quad (8)$$

$$\varphi_{it} = \lambda \sum_{j=1}^n w_{ij} \varphi_{jt} + \varepsilon_{it} \quad (9)$$

式中, y_{it} 为第 i 个地区 t 时刻的因变量; x_{it} 为 k 维解释变量; ρ 为因变量的空间自回归系数; α' 为 $k \times 1$ 维参数估计系数向量; β' 为 $k \times 1$ 维空间自相关系数矩阵; μ_i 、 η_t 、 φ_{it} 分别表示空间效应项、时间效应项和误差项; λ 为误差项的空间自相关系数; ε_{it} 为服从 $(0, \sigma^2)$ 分布的独立同分布误差项。当 $\lambda = \beta' = 0$ 时,则为空间滞后模型;当 $\rho =$

$\beta'=0$ 时,则为空间误差模型;当 $\lambda=0$ 时,则为空间杜宾模型。

3 结果与分析

3.1 内蒙古森林碳汇价值的时空演变格局

内蒙古森林碳汇价值量大且各盟市间存在较大时空差异,2009—2023 年内蒙古森林碳汇价值量总体上呈现增长趋势,全区碳汇价值总量从 2009 年的 7.59×10^6 万元增加至 2023 年的 1.64×10^7 万元,各盟市森林碳汇量增长幅度具有一定差异性,且森林碳汇类型结构在不同盟市也存在差异和变化(图 2),尤以鄂尔多斯增速最为显著,总增幅达 30 余倍。2014 年和 2019 年为森林碳汇价值普遍增长且增幅较大的年份,2014 年除通辽以外的其他盟市均发生最大幅度的波动,2019 年波动幅度相对较小,其中包头和呼和浩特出现一定程度下降。

森林碳汇价值普遍增长是由于 2014 年和 2019 年均处于森林资源清查周期分界年份,森林植被固碳速率均发生增长,使得森林碳汇量及其价值量得以提升。森林碳汇价值增长幅度差异则是由森林植被固碳速率增加量差异和森林土壤固碳速率变化差异导致,2014 年森林植被固碳速率从 $0.46 \text{ tC hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 增加至 $1.04 \text{ tC hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$,2019 年从 $1.04 \text{ tC hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 仅增加至 $1.36 \text{ tC hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$;森林土壤固碳速率在 2014 年由 $0.3 \text{ tC hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 增至 $0.67 \text{ tC hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$,2019 年却减少至 $0.59 \text{ tC hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 。各盟市森林碳汇价值不同的变化幅度主要与其碳汇类型结构有关,碳汇类型结构决定了不同固碳速率变化对森林碳汇量的影响程度,其中:蒙中和蒙西的盟市以森林植被碳汇量为主,林下植被碳汇量和森林土壤碳汇量仅占碳汇总量的 30% 左右;蒙东的呼伦贝尔市和兴安盟以森林土壤碳汇量和森林植被碳汇量为主,共占碳汇总量的 90% 以上,林下植被碳汇量普遍占比不足 10%,通辽市和赤峰市的碳汇主要构成类型在研究期逐渐由森林植被碳汇转变为森林土壤碳汇。

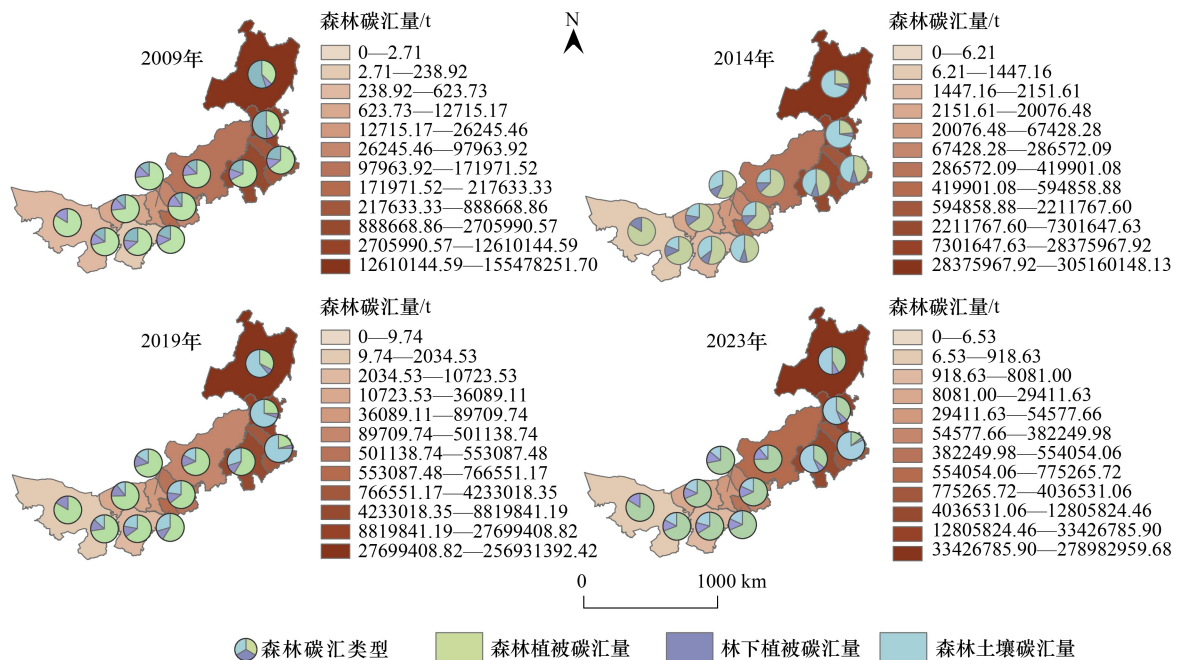


图 2 内蒙古各盟市森林碳汇量及碳汇类型结构图

Fig.2 Forest carbon sequestration quantity and carbon sequestration type structure map of various league cities in Inner Mongolia

结合时空动态特征具体分析,内蒙古森林碳汇价值总体呈由东向西逐渐减少的演变格局,南北方向上演变格局相对复杂,蒙东呈“整体北高南低、由南北两端逐渐向中部递减”的格局,蒙中表现为“偏东地区由北向南减少、偏西地区由南向北减少”的空间分布,蒙西整体展现出“北部高于南部”的特征(图 3)。这主要由降

水量、水资源分布、产业结构等差异所致,如蒙东全年降水日(100d以上)高于蒙中和蒙西(25—100d);水资源总量 $43.27 \times 10^9 \text{ m}^3$, 占全区的 85%;蒙东产业以生态旅游、畜牧业等为主,相较蒙中和蒙西更需要具备良好的生态环境与协调的经济-生态发展模式。从增幅角度看,蒙东和蒙中地区森林碳汇价值相较于蒙西增幅更大,蒙东、蒙中增幅以 3—4 倍左右为主,蒙西基本处于 1—2 倍的增幅范围内。这与蒙东良好的降水量等自然条件和独特的生态-经济互动模式密切相关,各盟市以生态旅游、清洁能源、绿色智慧农业等作为重点发展产业,生态环境与经济发展之间形成互促的协同关系,蒙中则主要与黄河流域建设规划有关,内蒙古通过实施黄河重点生态区生态保护与修复工程,如开展林草植被建设、退化林分修复和森林抚育等项目,使得黄河经流及附近区域森林碳汇能力持续提升。

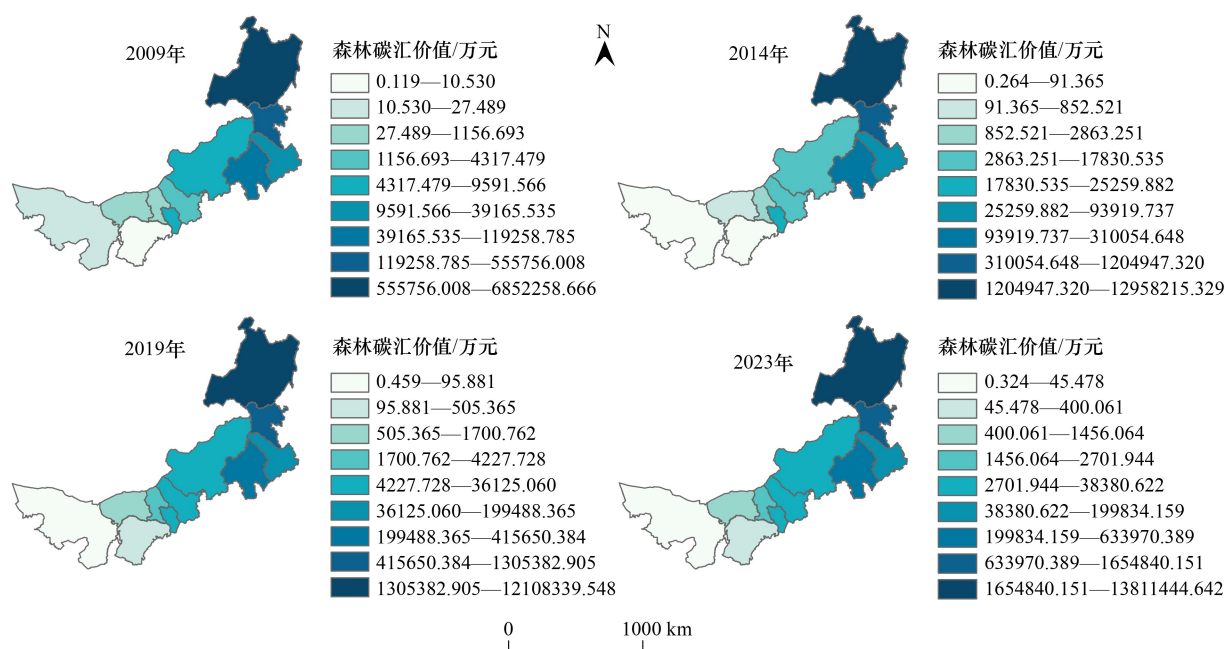


图3 内蒙古各盟市森林碳汇价值时空变化图

Fig.3 Spatial and temporal variation map of forest carbon sink value in various leagues and cities in Inner Mongolia

3.2 森林碳汇价值的影响因素分析

经济、社会、自然和规模因素共同驱动森林碳汇价值变化,但由于各盟市地理位置、重点产业、产业空间、政策导向、林龄结构等的差异,各影响因素的作用方式和方向呈现明显的空间异质性(表2)。

从经济维度来看,产业结构是影响经济发展水平、林业发展水平与森林碳汇价值之间关系的重要桥梁。经济发展水平对森林碳汇价值的影响主要与各盟市的重点产业和优势产业直接相关,其中,兴安盟和巴彦淖尔市的经济发展水平与森林碳汇价值呈较为显著的正相关,主要是由于兴安盟是国家生态文明建设示范盟和全国“绿水青山就是金山银山”实践创新基地,以生态文化旅游业、现代绿色农牧业为重点产业,巴彦淖尔市则以绿色种植业、生态畜牧业和特色养殖业为优势产业,两盟市的产业发展均对生态资源具有较强的依赖性;乌海和呼和浩特等盟市的经济发展水平与森林碳汇价值呈负相关,原因在于这些盟市以工业、制造业等为主要产业,如乌海是国家重要工业基地,经济发展以建材、冶金等产业为主,林业并非其特色产业,呼和浩特“六大产业集群”中的现代化工产业、新材料和现代装备制造业产业等均会对森林碳汇发展空间造成挤压,甚至破坏森林碳汇发展所需的生态环境,进而抑制碳汇价值的提升。林业发展水平的提高通常会通过扩大森林面积、提升森林培育水平等对碳汇价值产生正向促进作用,这也是锡林郭勒盟和兴安盟的林业发展水平与森林碳汇价值呈正相关的原因;巴彦淖尔、鄂尔多斯和乌兰察布市的林业发展水平与森林碳汇价值出现负相关,一方面可能是由于我国产业结构逐步向“三二一”格局调整,第三产业发展造成森林碳汇减少抵消了第一产业

对森林碳汇的促进作用,另一方面则与发展林业产业短期内会导致森林资源过度消耗有关,进而造成碳汇价值下降。

表 2 2009—2023 内蒙古各盟市森林碳汇价值影响因素回归结果

Table 2 Regression results of influencing factors of forest carbon sink value in Inner Mongolia league cities from 2009 to 2023

盟市 City	回归系数 Coefficient	经济维度 Economic dimension			社会维度 Social dimension			自然维度 Natural dimension		规模维度 Scale dimension	
		EL	FDL	IS	UL	DL	TL	P	T	FML	LE
阿拉善盟	74.635 *	-7.439 ^(*)	-0.504	1.540 *	12.661	1.197 ^(*)	-0.427 ^(*)	1.488 *	1.313	-0.529 ^(*)	-0.324 ^(*)
锡林郭勒盟	7.573	2.952	3.306 *	0.813 ^(*)	6.825 ^(*)	2.160 ^(*)	-0.217 *	0.054	-0.854 ^(*)	-0.359 ^(*)	-0.202
兴安盟	-41.497 *	15.986 **	0.888 ^(*)	0.544	8.525 **	2.425 ^(*)	-0.124 ^(*)	-0.449 ^(*)	1.862 **	-0.008	-0.524 ^(*)
乌海市	54.308 **	-6.254 ^(*)	-2.051 *	-2.185 ^(*)	-9.889 *	1.856 ^(*)	0.151 ^(*)	0.232	0.459	0.028	0.113
巴彦淖尔市	-0.148	6.997 *	-1.992 ***	-1.475 ^(*)	7.902 **	5.198 **	-0.185 ^(*)	0.457 **	1.207 ^(*)	-0.075	0.541 ***
鄂尔多斯市	30.511	-1.181	-1.708 ^(*)	0.128	-0.817	-1.050	-0.335	0.285	-0.248	0.136	0.570
包头市	7.271	-1.259	0.739	-0.105	-14.102	-0.774	0.983	0.206	-0.185	0.208	0.142
呼和浩特市	37.012 ^(*)	-6.028 ^(*)	-0.102	-2.375 **	-3.120 ^(*)	-2.368 *	-0.189	0.632 **	0.531	0.309 ^(*)	-0.060
乌兰察布市	-7.358	8.570	-1.289 ^(*)	0.376	1.840	1.819	0.221	0.871 ^(*)	0.813	-0.376	-0.127
赤峰市	12.739	4.563	-0.477	-0.046	11.480 ^(*)	-2.014 ^(*)	-0.759 ^(*)	0.098	1.363 ^(*)	-0.177	-0.164
通辽市	65.906 **	-7.828 ^(*)	-1.458	-0.206	2.848	1.442 ^(*)	0.081 ^(*)	0.667 ^(*)	1.982 ^(*)	-0.052	-0.051
呼伦贝尔市	56.070 ^(*)	-7.937 ^(*)	-1.248 ^(*)	-3.375 *	7.492 ^(*)	-6.204 *	0.056	-0.307	-0.172 *	0.053	-0.628

表中 *、**、*** 分别表示通过 10%、5%、1% 的显著性检验, () 表示 P 值在 0.4 以内

基于社会维度,锡林郭勒盟、兴安盟、巴彦淖尔市、赤峰市和呼伦贝尔市的城镇化水平与森林碳汇价值呈较为显著的正相关,主要与农村人口减少使得森林砍伐率降低、森林碳储量密度增加有关;乌海和呼和浩特的城镇化水平对森林碳汇价值具有负向影响,可能是由于过度城镇化导致林业用地被挤占,进而降低森林碳汇能力。阿拉善盟、锡林郭勒盟、兴安盟、乌海市、巴彦淖尔市和通辽市的劳动力要素投入程度与森林碳汇价值呈显著正相关,说明劳动力人数比例增加会加大森林的种植与培育,进而促进森林碳汇价值的增加;呼和浩特、赤峰和呼伦贝尔呈负相关关系,可能是由于农牧业劳动力更多投身于林业以外的种植业、畜牧业等产业,导致林业相关劳动力缺乏。此外,技术发展水平对森林碳汇价值的作用方式与当地重点产业及其政策导向密切相关,如通辽等盟市的政策倾向生态产业,林业产业技术不断提高,进而促使森林碳汇价值提升;对于阿拉善、锡林郭勒等盟市,由于其政策支持更倾向于化工、材料、能源等产业,技术创新更多集中于相关产品生产过程中,造成短期内技术发展水平对森林碳汇价值的抑制作用。

基于自然维度,巴彦淖尔和通辽的降水、气温因素均与森林碳汇价值呈正相关,可能是因为良好的水热条件会使植物孔径放大加快光合作用以促进植被的固碳作用。然而,在降水量较为丰富的兴安盟、气温偏低的锡林郭勒盟和呼伦贝尔市则分别出现降水、气温对森林碳汇价值产生负向影响的现象,可能是由于降水量超过合适界限后出现反硝化作用导致氮损失增多^[47],以及气温升高影响有机碳分解^[48]造成的,森林生态系统固碳能力由此下降,进而使得森林碳汇价值降低。

从规模维度来看,地方财政支持对森林碳汇价值提升具有积极作用。巴彦淖尔市地方财政支出与森林碳汇价值呈显著正相关,由于该地区地方财政加大对林业科研资金、设备资金等支持力度,使得森林培育规模不断扩大,林业管理水平和技术水平也进一步提升;而阿拉善盟和兴安盟的地方财政支出与森林碳汇价值出现负相关,近年来两个盟市的节能环保财政支出大量流入林业以外的风能、氢能、储能等建设项目中,短期内制约森林碳汇发展。与此同时,呼和浩特近年来大力推进国土绿化专项行动和还林还草工程建设,森林面积覆盖范围不断扩大,林业管理水平持续提升,推动森林碳汇的发展;阿拉善和锡林郭勒的林业管理水平与森林碳汇价值呈负相关则主要与林木生长期有关,说明造林行为对森林碳汇的影响具有滞后性。

3.3 内蒙古森林碳汇价值的空间关联性分析

3.3.1 森林碳汇价值的全局空间关联性分析

利用 Stata 17.0 对被解释变量森林碳汇价值进行全局 Moran 检验。由于内蒙古相邻盟市间均存在公共边且空间关系多发生于相互邻接的市域,因此为了更好地解释市域间的邻近关系^[49],选取 Rook 空间权重矩阵。2009—2023 年 Moran's *I* 指数均为正值且通过 1% 的显著性检验,表明内蒙古森林碳汇价值具有显著的全局空间关联性(表 3)。

表 3 内蒙古森林碳汇价值全局 Moran's *I* 指数检验

Table 3 Global Moran's <i>I</i> index test of forest carbon sequestration value in Inner Mongolia								
	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
全局 Moran's <i>I</i> 指数	0.669 *** (3.661)	0.670 *** (3.658)	0.676 *** (3.688)	0.675 *** (3.697)	0.664 *** (3.665)	0.656 *** (3.637)	0.657 *** (3.653)	0.640 *** (3.590)
	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	—
Global Moran's <i>I</i> index	0.645 *** (3.622)	0.626 *** (3.557)	0.627 *** (3.554)	0.626 *** (3.554)	0.636 *** (3.577)	0.643 *** (3.602)	0.659 *** (3.658)	—

表中 *、**、*** 分别表示通过 10%、5%、1% 的显著性检验,括号内数值为 *Z* 统计量

2009—2011 年森林碳汇价值 Moran's *I* 指数稳步增长,2012—2023 年期间森林碳汇价值 Moran's *I* 指数整体呈“V”字形的先下降后上升的趋势(图 4)。这可能是因为 2012 年之前内蒙古超额完成国家“三北”防护林体系建设任务和京津风沙源治理工程林业建设任务,在森林覆盖率提升、水土流失治理等方面取得显著成就,对各盟市 Moran's *I* 指数的提升均起到促进作用。2012 年党的十八大迎来生态文明建设时代,内蒙古实施了天然林保护、“三北”防护林建设、退耕还林还草等一系列国家重点生态工程,但由于各盟市保护工程实施的规模与进程存在差异,导致森林碳汇价值空间集聚效应降低。2018 年之后,随着《内蒙古自治区“十四五”林业和草原保护发展规划》的实施、自治区六大林业生态重点工程的持续推进,各盟市森林资源得到有效保护, Moran's *I* 指数也逐步恢复稳定上升趋势。

3.3.2 森林碳汇价值的局部空间关联性分析

为进一步反映局部空间可能出现的非典型特征,本文利用 ArcGIS 和 GeoDa 软件测算内蒙古森林碳汇价值局部 Moran's *I* 指数并绘制 Lisa 聚类图(图 5)。低低集聚的盟市主要集中于蒙西的阿拉善、巴彦淖尔和乌海,受自然因素影响这些盟市生态承载力低且生态治理压力大;同时产业发展模式也极大地挤压了森林生态效益的发挥,如阿拉善主要以化工和沙漠旅游为重点产业,巴彦淖尔以农牧业为主,乌海则以化工、冶金等为支柱产业,林业产业较为薄弱。蒙东的呼伦贝尔在整个研究期呈现高低集聚特征,大兴安岭以东北—西南走向纵贯呼伦贝尔中部,良好的森林资源禀赋、较成熟的林业经营模式为发展森林碳汇提供了前提条件,使其森林碳汇价值远高于其他盟市。特别地,兴安盟在研究期间交替呈现低高集聚和高高集聚,其集聚特征与邻近的呼伦贝尔碳汇价值变动存在同期性,兴安盟森林碳汇价值增幅显著高于或减幅显著小于呼伦贝尔时存在高高集聚效应,反之则出现低高集聚效应。

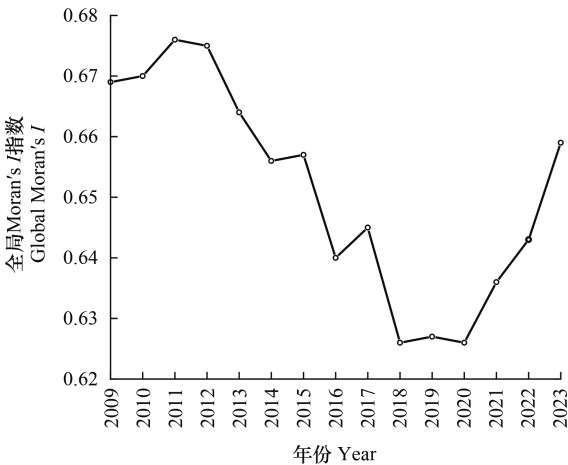


图 4 2009—2023 年全球 Moran's *I* 指数趋势图
Fig.4 Global Moran's *I* index trend chart from 2009 to 2023

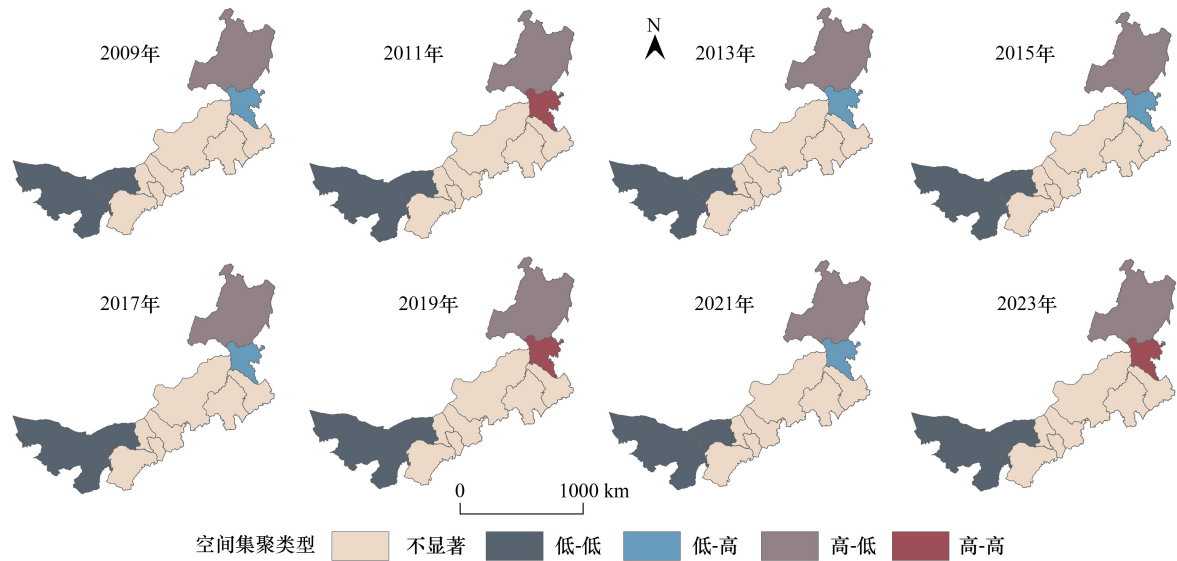


图 5 内蒙古各盟市森林碳汇价值 Lisa 聚类图

Fig.5 Lisa cluster map of forest carbon sequestration value in Inner Mongolia league cities

3.4 内蒙古森林碳汇价值的空间外溢效应

3.4.1 空间外溢效应分析

全局和局部空间相关性分析表明内蒙古森林碳汇价值的空间外溢效应显著,因此加入空间因素的影响分析外溢效应,具体检验结果如表 4 所示。在拉格朗日乘子检验和稳健性检验中,4 个检验均通过了 10% 及以上的显著性检验,均拒绝原假设,说明本文所选变量兼具空间滞后和空间误差自相关效应。在三种空间计量模型中仅 SDM 模型兼具两种效应,初步判断选择 SDM 模型进行空间外溢效应分析。利用似然比检验判断 SDM 模型是否会退化为 SLM 和 SEM 模型,检验值分别为 80.76 和 50.16 且均通过了 1% 的显著性检验,即 SDM 模型不会发生退化。在三种固定效应(时间、地区、双固定)检验中,双固定效应和地区、时间两种固定效应比较的检验结果分别为 68.99、500.62,均通过 1% 的显著性检验。因此,进一步选择双固定效应的空间杜宾模型分析内蒙古森林碳汇价值的空间外溢效应及其影响因素。

表 4 LM、LR、固定效应检验结果

Table 4 LM、LR、Fixed effects test results

检验类型 Inspection type	检验统计量 Test statistics	统计量 Statistic	P
LM 检验和稳健性 LM 检验 LM test and Robust LM test	空间误差		
	Moran's I 指数	1.884	0.060
	拉格朗日乘子检验	2.697	0.101
	稳健性检验	6.098	0.014
	空间滞后		
LR 检验 LR test	拉格朗日乘子检验	61.185	0.000
	稳健性检验	64.587	0.000
	SDM 模型 & SLM 模型	80.76	0.000
固定效应检验 Fixed effects test	SDM 模型 & SEM 模型	50.16	0.000
	双固定效应 & 地区固定效应	68.99	0.000
	双固定效应 & 时间固定效应	500.62	0.000

LM 检验:拉格朗日乘子检验 Lagrange Multiplier test; 稳健性 LM 检验:稳健性拉格朗日乘子检验 Robust Lagrange Multiplier test; LR 检验:似然比检验 Likelihood Ratio test; SDM 模型:空间杜宾模型 Spatial Dubin Model; SLM 模型:空间滞后模型 Spatial Lag Model; SEM 模型:空间误差模型 Spatial Error Model

根据双固定效应的SDM模型结果(表5),主要系数 ρ 为0.205并通过了5%的显著性检验,表明内蒙古各盟市森林碳汇价值之间具有正向的空间溢出效应,且相邻盟市的森林碳汇价值水平每变化1%,本盟市的森林碳汇价值同向变化0.205%。影响因素中,城镇化水平(2.594)、劳动力要素投入程度(-0.672)、地方财政支出(-0.168)和林业管理水平(-0.086)的参数估计通过5%以上的显著性检验,可见城镇化水平对相邻盟市的森林碳汇价值为正向影响,劳动力要素投入程度、地方财政支出和林业管理水平对相邻盟市为负向影响。其余因素的空间效应均不显著,其中:经济因素和技术水平主要对本区域的森林碳汇发展影响显著,但对相邻地区影响则较小;降水、气温等自然条件主要对本地森林资源生长产生影响,进而影响森林碳汇的能力,与其他盟市关联程度不高。

3.4.2 空间外溢效应的拓展讨论

空间杜宾模型可以较好地解释内蒙古各盟市间森林碳汇价值的空间相关性,但其无法直观表现各因素的直接作用与间接作用效果,因此本文进一步将所选变量对森林碳汇价值的影响效应分解为直接、间接和总效应,以便更加清晰地展现空间影响效果。其中直接效应为该变量对本盟市森林碳汇价值的影响,间接效应度量该变量对相邻盟市的影响。

表5 空间杜宾模型及空间效应分解结果

Table 5 Spatial durbin model and spatial effect decomposition results				
	变量名称 Variable	统计量 Statistic	Z 统计量 Z-statistic	
空间杜宾模型	UL	2.594 ***	3.61	
Spatial durbin model	DL	-0.672 **	-2.48	
	LE	-0.167 **	-2.20	
	FML	-0.086 ***	-3.22	
	ρ	0.205 **	2.42	
	λ	0.019 ***	9.19	
	R^2	0.847		
	变量名称 Variable	直接效应 Direct effect	间接效应 Indirect effect	总效应 Total effect
空间效应分解	UL	1.473 *** (3.82)	3.388 *** (3.60)	4.861 *** (4.08)
Spatial effect	DL	0.018(0.13)	-0.763 ** (-2.20)	-0.745 * (-1.68)
decomposition	LE	-0.060(-1.56)	-0.212 ** (-2.23)	-0.272 ** (-2.45)
	FML	-0.005(-0.32)	-0.107 *** (-3.18)	-0.106 *** (-2.67)

表中*、**、***分别表示通过10%、5%、1%的显著性检验,括号内数值为Z统计量

各影响因素效应分解的结果如表5所示。就直接效应估计结果而言,城镇化水平(1.473)对本盟市的森林碳汇价值具有显著的正向作用,这可能由于城镇化人口增加会减少对森林的砍伐,且城镇人口日常使用木材数量低于农村人口,进而使得活立木蓄积量增加^[50],森林碳汇能力不断提升。同时,城镇人口对森林作为生态资源的感知价值相对于其作为木材等经济资源的价值更高,公众生态意识的提高使得本地区森林资源得到更加有效的保护,森林碳储量密度、碳汇量和碳汇价值也随之提升。

对于间接效应估计结果,城镇化水平、劳动力要素投入水平、地方财政支出和林业管理水平均通过了5%及以上的显著性检验。其中,城镇化水平对相邻盟市的森林碳汇价值也具有正向作用,间接效应系数(3.388)大于直接效应(1.473)表明其对相邻盟市森林碳汇价值的促进作用更加显著,可能由于本区域城镇化水平的提高会对相邻区域产生经济辐射效应,为相邻盟市的城镇化建设起到示范和引领作用;同时,农村人口向城镇迁移可以为开展植树造林工程提供更多土地空间^[16],森林面积的扩大促进森林碳汇价值的提升。劳动力要素投入水平(-0.763)、地方财政支出(-0.212)和林业管理水平(-0.107)对相邻盟市的森林碳汇价值均具有负向影响。劳动力投入属于森林碳汇项目的“嵌入因素”,是农户参与森林碳汇最主要的方式,能够为其带来

直接经济福利^[47];节能环保财政支出主要通过投资环境保护与林业生态工程、改善能源使用结构、推广固碳技术等实现森林碳汇的提升;林业管理水平可以促进森林结构的丰富度、森林树种的抚育度和森林的生态保护水平,对于林业产业发展具有重要推动作用,因此当本盟市的劳动力投入水平、地方财政对林业支持力度和林业管理水平提高时,相邻盟市的林业等相关从业人员倾向迁移至本盟市寻求发展,导致相邻盟市出现人才流失、林业碳汇发展受阻等现象,进而对其森林碳汇价值产生抑制作用。

4 讨论与结论

4.1 讨论

(1)内蒙古各盟市森林碳汇实物量和价值量具有明显的时空异质性,因此相关决策部门应基于各盟市森林碳汇发展现状推行差异化政策,同时要重视分区规划。蒙东地区森林资源丰富,蕴藏着巨大的森林碳汇开发潜力,是森林碳汇发展的核心区域,属强碳汇区;蒙中地区由于政府对黄河流域重点生态区实施的生态保护工程,森林固碳能力显著提升,属碳汇发展重点区,未来应积极探索以“生态优先、绿色发展”为导向的高质量发展路径;蒙西地区受限于气候、产业结构等因素影响,属弱碳汇区,未来应充分考虑地区资源环境禀赋,因地制宜地制定发展策略,重点加强生态保护和荒漠化治理。

(2)以 2009—2013 年、2014—2018 年、2019—2023 年为三个研究周期,森林碳汇价值在每个周期均较上一周期出现较大幅度增长,其中作为全国森林清查周期分界年份的 2014 年和 2019 年增长尤为显著,究其原因发现,固碳速率因子在不同清查周期阶梯式的变化导致森林碳汇量大幅增加。固碳速率的变化可能存在管理政策、自然规律和研究技术三方面原因:一是国家出台《林业应对气候变化“十二五”行动要点》《国家储备林建设规划(2018—2035 年)》等政策促使全国实施大量造林和再造林工程,推进森林生态系统固碳能力有效提升^[51];二是森林固碳很大程度上取决于其年龄级的变化,表现为幼龄林固碳速率较低,中龄林固碳速率最大,成熟林和过熟林碳素吸收与释放基本平衡,内蒙古在落实造林政策后,随着林龄不断增长森林固碳速率也随之提升;三是遥感等技术的不断发展,森林固碳速率测量技术和口径的变化导致固碳速率发生变化。此外,森林固碳还会受到火灾、氮沉降等因素影响^[52],未来可进一步探究森林固碳速率的影响因素及其在不同时空上的修正方式。

(3)内蒙古森林碳汇价值在空间上存在显著的相关性与外溢效应,这一发现揭示了单纯依照本地情景推进森林碳汇发展的局限性。因此,各盟市在制定与执行森林碳汇政策时,应充分考虑区位因素,并结合相邻盟市的社会发展程度和林业规模水平,在此基础上制定森林碳汇发展的空间规划,明确森林碳汇发展的具体方向。此外,需综合多维度分析碳汇价值的影响因素,秉承人类命运共同体原则,通过与相邻盟市的协商合作,共同制定合理有效的森林碳汇协同管理策略,旨在促进内蒙古各区域森林碳汇事业和谐与可持续发展。

4.2 结论

根据内蒙古各盟市森林碳汇价值、影响因素与空间外溢效应的测算和分析结果,本文得出如下结论:

1)内蒙古整体上具有丰富的森林碳汇价值。2009—2023 年各盟市森林碳汇价值总体呈增长趋势,由于森林植被固碳速率的增长、森林土壤固碳速率的变化和碳汇类型结构的差异,2014 年和 2019 年各盟市森林碳汇价值普遍增幅较大但波动幅度存在一定差异。蒙东和蒙中盟市的森林碳汇价值增幅达到 3—4 倍左右,蒙西盟市中除鄂尔多斯外增幅均以 1—2 倍为主。空间上,东西方向呈由东向西逐渐减少的演变趋势,南北方向呈现出蒙东“整体北高南低、由南北两端逐渐向中部递减”、蒙中“偏东地区由北向南减少、偏西地区由南向北减少”、蒙西“北部高于南部”的格局,说明森林碳汇价值分布具有显著空间集聚和空间非均衡特征。

2)内蒙古森林碳汇价值具有显著的全局空间关联性。2009—2011 年森林碳汇价值 Moran's *I* 指数稳步增长,2012—2023 年期间整体呈“V”字形的先降低后增加的趋势。全局 Moran's *I* 指数变动说明,各盟市森林碳汇价值在空间上的集聚程度并不恒定。局部 Moran's *I* 指数反映出局部空间关联性:低低集集聚集中于蒙西的阿拉善盟、巴彦淖尔市和乌海市,高低集聚位于蒙东的呼伦贝尔市,兴安盟在研究期间交替出现低高集聚和

高高集聚现象。

3) 内蒙古森林碳汇价值具有显著的空间外溢效应。相邻盟市的森林碳汇价值每变化 1%, 本盟市的森林碳汇价值将同向变化 0.205%。其中, 城镇化水平对相邻盟市的森林碳汇价值具有正向影响, 而劳动力要素投入程度、地方财政支出和林业管理水平则为负向影响。进一步分解空间溢出效应发现, 城镇化水平不仅对本地森林碳汇价值具有正面效应, 而且对相邻盟市的促进作用更为显著; 相比之下, 劳动力要素投入水平、地方财政支出以及林业管理水平仅对相邻盟市的森林碳汇价值产生负面抑制效应, 而对本盟市的直接影响则相对微弱。

参考文献 (References):

- [1] 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.
- [2] 陈建成, 关海玲. 碳汇市场对林业经济发展的影响研究. 中国人口·资源与环境, 2014, 24(S1): 445-448.
- [3] 贾治邦. 积极发挥森林在应对气候变化中的重大作用. 求是, 2008(4): 50-51.
- [4] 张自强, 周伟, 杨重玉. 碳中和背景下森林采伐限额对中国森林碳汇影响的空间效应. 统计与决策, 2024, 40(8): 84-88.
- [5] 赵宁, 周蕾, 庄杰, 王永琳, 周稳, 陈集景, 宋珺, 丁键浠, 迟永刚. 中国陆地生态系统碳源/汇整合分析. 生态学报, 2021, 41(19): 7648-7658.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 曹恒, 王弟, 赵鹏. 山西省森林碳汇经济价值评估及交易评价体系构建研究. 经济问题, 2023(7): 120-128.
- [9] 徐思若, 成志影, 那雪迎, 张栩嘉, 马大龙, 张鹏. 黑龙江省森林碳汇及其经济价值的变化分析与潜力预测. 生态学杂志, 2024, 43(1): 197-205.
- [10] Shi X L, Wang T L, Lu S Y, Chen K, He D, Xu Z. Evaluation of China's forest carbon sink service value. Environmental Science and Pollution Research International, 2022, 29(29): 44668-44677.
- [11] Zhang Y, Chen J C, Hu M X, Offer A. Valuation of forest carbon sinks in China within the framework of the system of national accounts. Journal of Forestry Research, 2016, 27(6): 1321-1328.
- [12] 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, 2024, 45(3): 7-13.
- [13] Zhao J, Hu H, Wang J L. Forest carbon reserve calculation and comprehensive economic value evaluation: a forest management model based on both biomass expansion factor method and total forest value. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2022, 19(23): 15925.
- [14] 张倩, 刁钢, 赵荣. “森林资源—碳市场—社会经济”系统视角的中国林业碳汇价值实现路径探析. 世界林业研究, 2023, 36(6): 125-131.
- [15] Zhong J, Chi S P, Chen Y F, Kang X Y, Kang H J. Research and development trend of economic value assessment of forest carbon sink—take Fujian province as an example. Population, Resources & Environmental Economics, 2024, 5(1): 6-15.
- [16] Sun Z L, Zhou Y. Trade-offs between forest carbon sinks and multidimensional forest values: from assessment to management strategies. Journal of Physics: Conference Series, 2023, 2665(1): 1-8.
- [17] 刘芳明, 刘大海, 郭贞利. 海洋碳汇经济价值核算研究. 海洋通报, 2019, 38(1): 8-13, 19.
- [18] 孙康, 崔茜茜, 苏子晓, 王雁楠. 中国海水养殖碳汇经济价值时空演化及影响因素分析. 地理研究, 2020, 39(11): 2508-2520.
- [19] Chen Y Y, Qiu J, Jia C. Measurement of the fair value of forest carbon sinks—Taking Yixing National Forest Park as an example. BioResources, 2023, 18(4): 8187-8211.
- [20] Wen D, He N P. Forest carbon storage along the north-south transect of Eastern China: Spatial patterns, allocation, and influencing factors. Ecological Indicators, 2016, 61: 960-967.
- [21] Buczek U, Cruz-García R, Harmuth J, Kalbe J, Scharnweber T, Stoll A, Wilmking M, Jurasinski G. Soil and vegetation factors affecting carbon storage in a coastal forest in NE Germany. Geoderma Regional, 2023, 33: e00629.
- [22] Chen K X, Li T, Yang M X, Zhou X L, Peng C H. The effects of environmental factors and plant diversity on forest carbon sequestration vary between eastern and western regions of China. Journal of Cleaner Production, 2024, 437: 140371.
- [23] 于鲁冀, 张亚慧, 王燕鹏, 刘莹莹, 李昊. 河南省森林碳汇价值时空特征及其影响因素. 水土保持通报, 2023, 43(5): 288-296.
- [24] Song Y K. An empirical study on the relationship between economic growth and forest carbon sink value based on PVAR model. Frontiers in Energy

Research, 2023, 11: 1249144.

- [25] 孔凡斌, 曹露丹, 徐彩瑶. 基于碳收支核算的钱塘江流域森林碳补偿机制. 林业科学, 2022, 58(9): 1-15.
- [26] 李洋, 李莹, 庄莉, 贾利. 牡丹江市森林碳汇价值维度及其实现对策. 林业经济, 2014, 36(8): 114-117.
- [27] 秦涛, 杜亚婷, 陈奕多, 王姗. 林业碳汇质押贷款融资模式比较、现实困境与突破方向. 农业经济问题, 2023, 44(1): 120-130.
- [28] 薛龙飞, 罗小锋, 李兆亮, 吴贤荣. 中国森林碳汇的空间溢出效应与影响因素——基于大陆 31 个省(市、区)森林资源清查数据的空间计量分析. 自然资源学报, 2017, 32(10): 1744-1754.
- [29] 孙建卫, 赵荣钦, 黄贤金, 陈志刚. 1995—2005 年中国碳排放核算及其因素分解研究. 自然资源学报, 2010, 25(8): 1284-1295.
- [30] 秦富仓, 赵鹏武, 李龙, 郝龙飞. “双碳”背景下提升内蒙古森林碳汇功能的思考. 北方经济, 2023(2): 27-30.
- [31] 蔡伟祥, 徐丽, 李明旭, 孙建新, 何念鹏. 2010—2060 年中国森林生态系统固碳速率省际不平衡性及调控策略. 地理学报, 2022, 77(7): 1808-1820.
- [32] 郝婷婷, 李顺龙. 黑龙江省森林碳汇潜力分析. 林业经济问题, 2006, 26(6): 519-522, 526.
- [33] 张颖, 吴丽莉, 苏帆, 杨志耕. 我国森林碳汇核算的计量模型研究. 北京林业大学学报, 2010, 32(2): 194-200.
- [34] 刘梅娟, 朱嘉雯, 裴应萍, 何炯英. 森林碳汇资产价值计量研究. 中国农业会计, 2022(1): 50-54.
- [35] 李文华, 谢高地, 肖玉. 北京市森林资源资产评估方法体系. 北京: 中国科学院地理科学与资源研究所, 2007.
- [36] 谢高地, 李士美, 肖玉, 祁悦. 碳汇价值的形成和评价. 自然资源学报, 2011, 26(1): 1-10.
- [37] 李鹏, 张俊飏. 森林碳汇与经济增长的长期均衡及短期动态关系研究——基于中国 1998—2010 年省级面板数据. 自然资源学报, 2013, 28(11): 1835-1845.
- [38] 贯君, 张少鹏, 任月, 盛春光. 中国农业净碳汇时空分异与影响因素演进分析. 中国环境科学, 2024, 44(2): 1158-1170.
- [39] 王兰会. 森林蓄积变动影响因素的数量经济分析. 北京林业大学学报: 社会科学版, 2003, 2(S1): 7-10.
- [40] Xu Q, Yang R, Dong Y X, Liu Y X, Qiu L R. The influence of rapid urbanization and land use changes on terrestrial carbon sources/sinks in Guangzhou, China. Ecological Indicators, 2016, 70: 304-316.
- [41] 于贵瑞, 朱剑兴, 徐丽, 何念鹏. 中国生态系统碳汇功能提升的技术途径: 基于自然解决方案. 中国科学院院刊, 2022, 37(4): 490-501.
- [42] 王锴, 朴世龙, 何悦, 刘永稳, 何洪林. 中国陆地生态系统碳汇稳定性的空间分布特征及驱动机制. 中国科学: 地球科学, 2023, 53(2): 216-226.
- [43] Savage K E, Parton W J, Davidson E A, Trumbore S E, Frey S D. Long-term changes in forest carbon under temperature and nitrogen amendments in a temperate northern hardwood forest. Global Change Biology, 2013, 19(8): 2389-2400.
- [44] 刘珉, 胡鞍钢. 中国创造森林绿色奇迹(1949—2060 年). 新疆师范大学学报: 哲学社会科学版, 2022, 43(3): 69-80.
- [45] 龙飞, 沈月琴, 吴伟光, 祁慧博, 朱臻, 张哲. 区域林地利用过程的碳汇效率测度与优化设计. 农业工程学报, 2013, 29(18): 251-261.
- [46] 吴胜男, 李岩泉, 于大炮, 周莉, 周旺明, 郭焱, 王晓雨, 代力民. 基于 VAR 模型的森林植被碳储量影响因素分析——以陕西省为例. 生态学报, 2015, 35(1): 196-203.
- [47] Ren H Y, Xu Z W, Isbell F, Huang J H, Han X G, Wan S Q, Chen S P, Wang R Z, Zeng D H, Jiang Y, Fang Y T. Exacerbated nitrogen limitation ends transient stimulation of grassland productivity by increased precipitation. Ecological Monographs, 2017, 87(3): 457-469.
- [48] Liu S W, Zheng Y J, Ma R Y, Yu K, Han Z Q, Xiao S Q, Li Z F, Wu S, Li S Q, Wang J Y, Luo Y Q, Zou J W. Increased soil release of greenhouse gases shrinks terrestrial carbon uptake enhancement under warming. Global Change Biology, 2020, 26(8): 4601-4613.
- [49] 吕健. 中国城市化水平的空间效应与地区收敛分析: 1978—2009 年. 经济管理, 2011, 33(9): 32-44.
- [50] 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.
- [51] 刘魏魏, 王效科, 逯非, 欧阳志云. 造林再造林、森林采伐、气候变化、CO₂ 浓度升高、火灾和虫害对森林固碳能力的影响. 生态学报, 2016, 36(8): 2113-2122.
- [52] 王效科, 刘魏魏. 影响森林固碳的因素. 林业与生态, 2021(3): 40-41.