北京林业大学学报
JOURNAL OF BEIJING FORESTRY UNIVERSITY

中国森林碳汇溢出效应、生态聚集效应及价值管理

张颖 张子璇 李艺欣

Spillover effect, ecological aggregation effect and value management of forest carbon sink in China

Zhang Ying, Zhang Zixuan, Li Yixin

引用本文:
张颖, 张子璇, 李艺欣. 中国森林碳汇溢出效应、生态聚集效应及价值管理[J]. 北京林业大学学报, 2025, 47(12):56–66. doi: 10.12171/j.1000–1522.20240334
Zhang Ying, Zhang Zixuan, Li Yixin. Spillover effect, ecological aggregation effect and value management of forest carbon sink in China[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2025, 47(12):56–66. doi: 10.12171/j.1000–1522.20240334

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20240334

您可能感兴趣的其他文章
Articles you may be interested in

中国森林碳汇与林业经济发展耦合及长期变化特征分析
Coupling and long–term change characteristics analysis of forest carbon sequestration and forestry economic development in China
北京林业大学学报, 2022, 44(10): 129–141. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20220257

全球森林碳汇功能评估研究进展
Review on the evaluation of global forest carbon sink function
北京林业大学学报, 2022, 44(10): 1–10. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20220242

阔叶红松林功能多样性与森林碳汇功能关系
Relationship between functional diversity of broadleaved Korean pine forest and forest carbon sink function
北京林业大学学报, 2022, 44(10): 68–76. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20220237

碳达峰碳中和背景下中国森林碳汇潜力分析研究
Forest carbon sequestration potential in China under the background of carbon emission peak and carbon neutralization
北京林业大学学报, 2022, 44(1): 38–47. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20210143

大兴安岭盘古林场森林碳汇木材复合经营规划
Forest carbon sink–timber compound management planning of Pangu Forest Farm in Great Xing’an Mountains of northeastern China
北京林业大学学报, 2020, 42(8): 1–11. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20190331

基于不同立地等级的天山云杉天然林碳汇潜力
Carbon sink potential of natural forests of *Picea schrenkiana* var. *tianschanica* based on different site grades
北京林业大学学报, 2025, 47(4): 74–81. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20240337

DOI:10.12171/j.1000−1522.20240334

中国森林碳汇溢出效应、生态聚集效应及价值管理

张 颖 张子璇 李艺欣
（北京林业大学经济管理学院，北京 100083）

摘要:【目的】深入了解我国森林碳汇状况，明确各省份森林碳汇价值生产之间的联系与溢出规律，旨在为提升森林碳汇管理水平、优化碳汇价值管理策略以及推动我国森林资源的高质量发展提供科学依据。**【方法】**基于第八、九次森林资源清查数据，采用森林蓄积量扩展法核算 2013—2018 年我国森林碳汇价值，并通过社会网络分析法分析森林碳汇溢出效应和生态聚集效应，探讨森林碳汇价值管理策略。**【结果】**(1)2013—2018 年，我国森林碳储量和碳汇量显著增长，总碳汇价值达 1 545.64 亿元，年均碳汇实物增加量为 2.17 亿 t，年均森林碳汇价值增加量为 272.17 亿元。(2)森林碳汇价值关联网络整体密度为 0.273 1，虽网络密度较低，但网络关联度为 1，表明网络整体通达情况较好且网络关联程度较高；森林碳汇价值关联网络等级度为 0.426 6，反映不同省份之间的森林碳汇价值生产较为集中，网络间存在互相溢出的可能性；碳汇价值关联网络效率为 0.632 2，表明信息传递效率较高，同时也表明网络通达性较好，并具有一定的稳定性。(3)森林碳汇价值关联网络中存在“强势省份”，如内蒙古、湖北、安徽等省份森林碳汇价值网络中介中心度较高，分别为 160.83、106.79 和 54.09，远高于全国平均值 19.91，说明这些省份在网络中处于核心与桥梁地位，具有生态聚集效应，但整体溢出能力仍需提升。**【结论】**我国森林碳汇价值生产呈现显著的空间关联性，具体表现为生态联动效应，并形成碳汇“增长极”辐射效应。建议通过“分类管理 + 区域协作”的综合模式，推动森林资源的高质量发展，强化对森林碳汇价值关联网络的建设，以“增长极”带动整体网络协同发展，充分发挥生态聚集效应，实现碳汇价值最大化。

关键词：森林碳汇；价值核算；溢出效应；社会网络分析；生态聚集效应；碳汇管理
中图分类号：S750 **文献标志码：**A **文章编号：**1000−1522(2025)12−0056−11
引文格式：张颖，张子璇，李艺欣. 中国森林碳汇溢出效应、生态聚集效应及价值管理［J］. 北京林业大学学报，2025，47(12)：56−66. Zhang Ying, Zhang Zixuan, Li Yixin. Spillover effect, ecological aggregation effect and value management of forest carbon sink in China［J］. Journal of Beijing Forestry University, 2025, 47(12): 56−66.

Spillover effect, ecological aggregation effect and value management of forest carbon sink in China

Zhang Ying Zhang Zixuan Li Yixin
(School of Economics and Management, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract:［**Objective**］This study aims to gain an in-depth understanding of the status of forest carbon sinks in China, clarify the spatial connections and spillover mechanisms among forest carbon sink value production across provinces, improve the level of forest carbon sink management, optimize the management mode of carbon sink value, and promote the high-quality development of forests in China.［**Method**］Based on the data of the 8th and 9th National Forest Resources Inventories, the forest carbon sink value in China from 2013 to 2018 was estimated using the forest stock expansion method. Social network analysis was employed to analyze the spillover effects and ecological aggregation effects of forest carbon sinks, and corresponding value management strategies were discussed.［**Result**］(1) From 2013 to 2018, both China’s forest carbon stock and carbon sink increased significantly. The total value of forest carbon sink in China

收稿日期: 2024−08−18 **修回日期:** 2025−11−30
基金项目: 国家自然科学基金项目(72173011)。
作者简介: 张颖，教授。主要研究方向：资源、环境评价与核算，区域经济学。Email: zhangyin@bjfu.edu.cn 地址：100083 北京市海淀区清华东路 35 号北京林业大学经济管理学院。
本刊网址: http://j.bjfu.edu.cn; http://journal.bjfu.edu.cn

was 154.564 billion CNY, with an average annual physical increase of 217 million t and the average annual monertary value increase of 27.217 billion CNY. (2) The overall density of the forest carbon sink value association network was 0.273 1, which was not high, but the network correlation degree was 1, reflecting that the overall network access was good and the network correlation degree is high. The level of forest carbon sink value correlation network was 0.426 6, which reflects a relatively high degree of concentration in the production of forest carbon sink value in different provinces, and there was the possibility of mutual spillover between the networks. The efficiency of carbon sink value correlation network was 0.632 2, which reflects the high efficiency of network information transmission, and also indicates that the network had good accessibility and certain stability. (3) There were "strong provinces" in the forest carbon sink value association network, such as Inner Mongolia, Hubei, Anhui and other provinces, with network betweenness values of 160.83, 106.79 and 54.09, respectively, far exceeding the national average of 19.91. These provinced are in the core and bridge position in the association network, and there was an ecological aggregation effect, but the overall spillover capacity needed improvement. [**Conclusion**] The study found that the production of forest carbon sink value in China shows a significant spatial correlation, which is specifically manifested as an ecological linkage effect and has formed a carbon sink "growth pole" with radiation-driven effect. For management, a comprehensive management of "classified management + regional cooperation" should be adopted to promote high-quality forest development. Additionally, it is necessary to strengthen the understanding of the value association network of forest carbon sinks, and use the "growth pole" to drive the overall network to "general growth", enhance the ecological aggregation effect, and thereby maximize the value of forest carbon sink in China.

Key words: forest carbon sink; value accounting; spillover effect; social network analysis; ecological aggregation effect; carbon sink management

森林作为生态系统中最大的碳库，在吸收并固定大气二氧化碳（CO_2）方面发挥着不可替代的作用[1]。当前，尽管我国 CO_2 排放量的增速有所放缓，但排放总量仍处于上升阶段。为积极应对全球气候变化，实现“碳达峰”与“碳中和”的战略目标迫在眉睫。在此背景下，森林碳汇因其较高的成本效益和多重协同效益，已成为不可或缺的低成本碳减排途径[2]。森林碳汇不仅提供气候调节、水源涵养等生态服务，还能促进区域经济发展[3]，兼具显著的生态正外部性与经济价值。值得注意的是，这种效益并非孤立存在。受森林地理环境相似性、政策扩散效应和生产创新的互补性等因素影响，森林碳汇价值往往在区域间产生复杂的空间溢出与生态聚集效应[4−6]。因此，科学评估森林碳汇价值及其溢出效应并深入揭示其空间关联规律，对合理开发利用森林资源、制定相关林业管理政策、促进碳汇生态产品价值实现等具有重要意义。

为准确评估森林碳汇，学术界发展了多种核算方法。主流的碳汇实物量核算方法包括基于样地勘测的生物量法、蓄积量法、生物量清查法，以及基于微气象学的涡旋相关法、涡旋协方差法和箱式法等[7]。其中，生物量法因操作简便、结果直观被广泛应用。例如，国内有关学者在核算沈阳中心城区森林碳储量及碳汇量时采用了平均生物量法[8]。此外，岳阳[9]、余杭[10]、南京[11]、杭州[12]等地的森林碳汇研究也主要使用生物量转换因子法等。对于国家或区域等大尺度森林碳汇核算，蓄积量法因其兼顾准确性与可操作性而成为首选。在厘清碳汇本底值的基础上，学者们开始关注其空间分布规律与关联特征。例如，在“双碳”目标背景下，刘迎春等[13]采用蓄积量年增长量法估算了我国 2001—2050 年森林生物量碳储量与固碳潜力的动态变化；薛龙飞等[6]利用森林蓄积量扩展法测算了 1988—2013 年全国森林碳汇量，并结合空间计量模型系统分析其空间关联特征与溢出效应。相比之下，基于微气象学的碳汇检测方法因仪器设备及操作要求较高，多用于小尺度研究，难以满足大尺度核算研究需求[14]。

然而，总体来看，现有研究仍存在两方面局限。一是多数研究集中于单一区域的森林碳汇实物量及价值评估，对其碳汇价值的空间溢出效应和生态聚集效应的关注仍显不足；二是在方法上，相关分析多依赖于传统空间计量模型，尚未充分考虑地理因素及省际的交互影响[15]，难以完全刻画由经济联系、政策互动、资源流动等多元复杂渠道构成的省际间实质关联网络，因而在揭示网络结构特征、识别关键节点与传导路径方面存在不足。社会网络分析方法

(social network analysis, SNA)[5]为解决上述问题提供了有力工具。SNA 专注于分析行动者(本研究中的各省市)之间的关联结构与互动模式,能够有效识别网络中的核心节点、板块结构以及价值流动的关键路径,尤其擅长处理非对称、多通道的复杂关系数据。

因此,为更系统揭示中国森林碳汇价值的空间关联机制,本文基于森林资源清查数据,采用森林蓄积量扩展法测算各省森林碳汇价值,并引入社会网络分析方法。通过构建省际碳汇价值关联网络,分析森林碳汇价值生产过程中不同节点之间的互动关系和结构特征,以揭示碳汇价值的地理空间关联性、溢出效应与生态聚集效应[6],旨在为提升森林碳汇能力、优化森林碳汇经营管理水平以及制定区域协作发展的差异化政策等提供参考。

1 研究方法及数据来源

1.1 森林碳汇价值核算

1.1.1 碳汇实物量核算

本研究采用森林蓄积量扩展法[15]计算森林碳储量,并进行不同地区森林碳汇对比分析,重点核算森林资源与林木资源碳储量及碳汇量,范围涵盖森林、疏林、散生木和四旁树等,与我国森林资源二类调查划分标准一致。森林碳汇量是指一定时期内碳储量的变化量,按照森林资源界定,其计算范围应包括森林、疏林、散生木和四旁树等碳汇量[6],与森林资源碳储量计算范围一致。另外,森林资源包括森林、林木、林地以及林内的野生动植物等[7],在计算森林资源的碳储量和碳汇量时,通常笼统地认为主要计算森林、林木资源碳储量和碳汇量[6–7],并按照 IPCC 的有关界定及相关研究,碳储量、碳汇量计算主要包含林木、林下植物和林地固碳量 3 部分[15–16]。

森林资源碳储量、碳汇量计算采用的蓄积量扩展法公式如下所示。

$$C_{TF} = S_i C_i + \alpha S_i C_i + \beta S_i C_i \tag{1}$$

$$C_i = V_i \delta \rho \gamma \tag{2}$$

式中:C_{TF}为森林资源碳储量,包括林木固碳量、林下植物固碳量和林地固碳量;S_i为第i类森林的面积;C_i为第i类森林类型的碳密度;V_i为第i类森林单位面积蓄积量;α为林下植物碳转换系数;β为林地固碳量转换系数;δ为生物量扩大系数;ρ为生物量体积转换成生物干质量系数,即容积密度;γ为生物干质量转换成固碳量的系数,即含碳率。而$V_f = S_i V_i$,为第i类森林总的蓄积量。因此,公式可简化为

$$C_{TF} = (1+\alpha+\beta) V_f \delta \rho \gamma \tag{3}$$

一般地,林木固碳量用蓄积量来计算,其计算公式如下所示。

$$C_{TW} = V_f \delta \rho \gamma \tag{4}$$

在全国森林资源碳储量的核算过程中,换算系数通常按 IPCC(政府间气候变化专门委员会)的默认参数值取值[16],即δ为林木蓄积量转换成以林木为主体的生物蓄积量,一般取值为 1.90;容积密度ρ一般取 0.45 ~ 0.50 t/m^3,本文取 0.50 t/m^3;含碳率γ一般取 0.5;林下植物固碳量转换系数α取 0.195,β为林地固碳量转换系数,取 1.244。研究所采用的数据主要来自《中国森林资源清查》《中国林业统计年鉴》《中国统计年鉴》以及发表的相关文献的公开数据[13–14]。时间范围为第八次(2009—2013)至第九次(2014—2018)森林资源清查期间,具体时间为 2013—2018 年。

1.1.2 碳汇价值量核算

在获得森林碳汇实物量的基础上,采用市场价值法将其转化为经济价值。其基本计算公式如下所示。

$$U_c = \Delta C_{TF} P_c \tag{5}$$

式中:U_c为森林碳汇价值量;ΔC_{TF}为森林碳汇量,即森林资源碳储量变化量;P_c为单位碳汇价格。

1.2 空间关联矩阵构建

构建网络空间关联矩阵(spatial weights matrix)[5]是探究区域生态系统服务价值量溢出效应和生态聚集效应的关键。为了刻画区域间的碳汇价值流动,本研究采用修正的引力模型[6]构建空间关联矩阵,将经济、地理等因素综合考虑。修正后的引力模型如下所示。

$$y_{ij} = k_{ij} \frac{\sqrt[4]{P_i G_i E_i U_{ci}} \sqrt[4]{P_j G_j E_j U_{cj}}}{D_{ij}^2} \tag{6}$$

式中:y_{ij}表示省份 i 和省份 j 的引力值;U_{ci}和U_{cj}分别代表省份 i 和省份 j 的森林碳汇价值;P_i 和 P_j 分别代表省份 i 和省份 j 的第一产业从业人员数量,用以反映当地人力资本存量;G_i 和 G_j 分别代表省份 i 和省份 j 的林业生产总值,用以衡量林业发展水平;E_i 和 E_j 为省份 i 和省份 j 年末耕地面积,反映自然资源禀赋水平;D_{ij} 代表省份 i 和省份 j 间的地理距离;k_{ij}为省份 i 和省份 j 引力系数,当引力系数为 1 时,表示两省份间是理想的对等关系;现实情境中,网络空间溢出效应普遍存在,因此本文采用森林碳汇价值量的比重关系对空间关联矩阵的引力值进行修正。

$$k_{ij} = \frac{U_{ci}}{U_{ci} + U_{cj}} \tag{7}$$

通过公式(5)和(6)构建各省份引力关联矩阵,

为确保矩阵的可操作性，将各行的平均引力值作为临界值。当引力值高于该临界值，赋值为 1，表示存在较强的空间关联；否则赋值为 0，表示关联较弱。

需注意的是，空间关联矩阵是一种用于量化地理空间中不同单元相互关系的分析工具，通过计算森林单元之间的距离、生态连通性等指标建立空间权重矩阵，进而探索其在碳汇功能上的相互影响，帮助理解全国范围内森林资源的空间配置及其对碳汇能力的影响[17]。空间关联矩阵并非真实反映不同单元间森林碳汇服务的联系，而是提供了一种空间关联分析框架与现实世界的镜像映射[18]。

1.3　社会网络分析框架与指标设定

基于 1.2 构建的省际网络空间关联矩阵，本文将 31 个省（市、自治区）设定为网络节点，将两节点间的关联抽象为有向连接，从而构建中国森林碳汇价值关联网络。该模型综合考虑了各省的森林碳汇本底值、林业经济、人力资本及地理距离等因素。这种“关联”并非直接的物理连接，而是对各省份之间在自然资源禀赋、经济活动和政策环境相互作用下，所潜藏的碳汇价值溢出可能性与影响强度的量化表征。网络分析的对象虽然是省域节点及其间的关联，但所有分析均根植于各省的森林资源实体。节点属性（碳汇价值）直接来源于森林资源的核算结果，节点间关联的强度也主要由森林资源本底数据及其他相关要素驱动决定。因此，通过分析该网络的结构特征，可以系统揭示碳汇价值的空间互动模式。这种方法避免了单纯从自然或社会单一视角研究的局限性，能够同时捕捉系统内的物理聚集（如生态廊道形成的板块）与社会经济协作（如核心省份的桥梁作用），确保了研究方法与研究对象（森林碳汇价值生产系统）在主体性上的一致性。

为了全面分析森林碳汇和生态系统服务价值的关联网络特征，本文从整体网络特征、个体网络特征和块模型[19]3 个角度进行分析。

1.3.1　整体网络特征

整体网络特征通常采用网络密度、网络关联度、网络等级度及网络效率[19]这 4 个指标进行衡量，具体参数如表 1 所示。

1.3.2　个体网络特征

点度中心度和中介中心度[19]是衡量个体网络特征的重要指标。点度中心度用于评估某个节点在网络中的重要程度，包括出度和入度。出度表示该节点向其他节点发出的关系数，出度数量越大表明该节点在网络中地位越重要。入度则是该节点接收其他节点的关系数，入度数量越大，表明该节点接收其他节点的关系数越多。中介中心度反映了一个节点作为媒介连接其他节点的能力。中介中心度数值越高，表明该节点在区域信息交流、资源传递及区域合作中扮演的角色越重要。

1.3.3　块模型

为了更好地反映森林碳汇的溢出效应与生态聚集效应，本文采用社会网络分析方法中的块模型[6]来分析网络结构及节点在网络中的角色。块模型将网络中的节点划分为 4 种角色类型。（1）主受益板块，该板块同时接收来自内部成员及其他板块的关系，接收的其他板块的关系数明显大于其接收的内部成员关系数（即溢出关系）；（2）净溢出板块，该板块成员对其他板块的溢出关系较为明显，表现为接收的内部成员的关系数明显大于接收的其他板块的关系数；（3）双向溢出板块，该板块对其他板块的关系接收较少，但对内部成员及其他板块成员发出的关系较多；（4）经纪人板块，该板块在网络中发挥“桥梁”作用，可以接收来自其他板块成员的溢出关系并向外部板块发出关系，但接收内部成员间的关系数占比较小。这 4 个板块主要通过板块成员数量、接收板块外关系数量、溢出板块外关系数等指标，反映我国森林碳汇和生态系统服务价值关联网络的成员关系[5]。

在本文的关联网络特征分析中，以我国 31 个省（市、自治区）的森林碳汇为研究对象，基于其分布位置与碳汇空间关联影响，采用蓄积量扩展法测算其空间分布，并通过网络密度、网络关联度、网络等级度及网络效率分析森林碳汇价值关联网络特征。

表 1　整体网络特征指标

Tab. 1　Overall network characteristics indicators

特征	计算公式	参数	含义
网络密度	$D=\frac{L}{N(N-1)}$	L为网络中的连线数量，N为节点数量	反映网络各节点间关系紧密程度，其值越大，表示网络越紧密
网络关联度	$C=1-\frac{V}{N(N-1)/2}$	V为网络中不可达节点的对数	表示网络通达性，其值越大，表示网络的关联程度越高
网络等级度	$H=1-\frac{K}{\max(K)}$	K为网络中对称可达的节点的对数	衡量各节点的非对称可达程度，其值越大，网络的可达程度越高，节点数也越多
网络效率	$E=1-\frac{A}{\max(A)}$	A为多余关联数	反映网络节点的连接效率，其值越大，网络节点连接效率越高

2 结果与分析

2.1 碳汇价值量核算

根据第八、九次全国森林资源清查数据，结合核算方法，计算了我国 31 个省（市、自治区）森林碳汇量（表 2）。

表 2 的核算结果显示，2013—2018 年，我国森林碳储量和碳汇量均显著增加，年均森林碳汇实物增加量为 2.17 亿 t。具体来看，2013 年林木碳储量为 70.20 亿 t，2018 年增至 81.03 亿 t，增幅达 15.4%。森林资源碳储量从 171.22 亿 t 增加至 197.62 亿 t。分省（市、自治区）来看，各省林木碳储量及森林资源碳储量均有所上升，其中西南地区及东北地区的省份，碳储量位居全国前列。云南、黑龙江及内蒙古的碳汇量位列前三，占全国总森林碳汇量的 29% 左右，这与当地丰富的森林资源、良好的植被类型、土壤类型及气候条件密切相关[20]。

根据张颖等[21]的研究，我国森林碳汇的最优价

表 2 基于森林资源清查数据的中国森林碳汇量

Tab. 2 Carbon sequestration of forest resources in China based on forest inventory data

省（市、自治区）	2009—2013年		2014—2018年		森林碳汇量/（10^4 t·a^{-1}）
	林木碳储量/10^4 t	森林资源碳储量/10^4 t	林木碳储量/10^4 t	森林资源碳储量/10^4 t	
北京	677.03	1 651.28	1 157.75	2 823.74	96.14
天津	177.66	433.32	218.63	533.23	8.19
河北	5 118.10	12 483.05	6 525.54	15 915.79	281.49
山西	4 626.08	11 283.01	6 138.60	14 972.05	302.50
内蒙古	63 901.98	155 856.92	72 534.46	176 911.54	1 726.50
辽宁	11 896.99	29 016.75	14 130.86	34 465.17	446.77
吉林	43 822.25	106 882.47	48 115.49	117 353.68	858.65
黑龙江	78 131.33	190 562.31	87 734.44	213 984.31	1 920.62
上海	88.52	215.89	213.56	520.86	25.01
江苏	3 073.25	7 495.66	3 346.13	8 161.21	54.58
浙江	10 297.88	25 116.53	13 354.47	32 571.55	611.32
安徽	8 585.55	20 940.17	10 538.61	25 703.67	390.61
福建	28 878.17	70 433.86	34 645.37	84 500.07	1 153.44
江西	19 399.29	47 314.88	24 066.27	58 697.63	933.40
山东	4 236.90	10 333.80	4 351.71	10 613.82	22.96
河南	8 119.92	19 804.48	9 841.58	24 003.62	344.33
湖北	13 610.16	33 195.18	17 341.26	42 295.33	746.22
湖南	15 722.15	38 346.33	19 339.97	47 170.18	723.56
广东	16 949.29	41 339.31	22 208.67	54 166.94	1 051.88
广西	24 194.98	59 011.56	32 182.41	78 492.91	1 597.49
海南	4 229.32	10 315.31	7 286.57	17 771.95	611.45
重庆	6 959.59	16 974.43	9 822.14	23 956.19	572.51
四川	79 800.02	194 632.25	88 397.03	215 600.34	1 719.40
贵州	14 286.30	34 844.30	18 611.88	45 394.37	865.11
云南	80 421.87	196 148.93	93 701.27	228 537.41	2 655.88
西藏	107 448.35	262 066.52	108 420.85	264 438.45	194.50
陕西	18 806.45	45 868.92	22 736.68	55 454.77	786.05
甘肃	10 190.64	24 854.96	11 964.72	29 181.96	354.82
青海	2 057.32	5 017.82	2 310.47	5 635.24	50.63
宁夏	313.66	765.01	396.71	967.58	16.61
新疆	15 985.69	38 989.10	18 630.21	45 439.09	528.90
总计	702 006.69	1 712 194.32	810 264.30	1 976 234.63	21 651.52

格为 10.11 ~ 15.17 美元/t。按此价格的上限计算，并结合中国外汇交易中心公布的 2013 年与 2018 年美元兑人民币平均汇率(分别为 6.19 和 6.62)，2013 年与 2018 年森林碳汇的价格分别为 93.90、100.43 元/t。

表 3 展示了 2013—2018 年各省森林碳汇的价值核算结果。结果表明，2013 年我国森林碳储量价值为 6 591.84 亿元，到 2018 年增至 8 137.48 亿元，增幅高达 23%。结合碳储量实物量核算表分析，森林碳储量价值的增长不仅受到碳汇价格上涨的影响，还与森林碳储量的增加密切相关。2013－2018 年期间，森林碳汇总价值量为 1 545.64 亿元，按照 2018 年森林碳汇价格的上限计算，年均森林碳汇价值增加量为 272.17 亿元。尤其云南、黑龙江、四川及内蒙古 4 省区，由于森林资源丰富和碳储量高，4 省份森林碳汇总价值增加值为 600.21 亿元，增加值位列全国前 4 位，占全国碳汇总价值量的 38.83%。

表 3　2013—2018 年森林碳汇价值量　　亿元

Tab. 3　Accounting for the value of forest carbon sinks in China from 2013 to 2018　10^8 CNY

省(市、自治区)	森林碳汇价值量	省(市、自治区)	森林碳汇价值量
北京	5.27	湖北	46.36
天津	0.53	湖南	46.60
河北	17.48	广东	63.89
山西	18.21	广西	96.02
内蒙古	128.42	海南	33.47
辽宁	30.20	重庆	33.29
吉林	71.73	四川	138.45
黑龙江	147.46	贵州	52.77
上海	1.31	云南	185.88
江苏	4.75	西藏	79.93
浙江	37.42	陕西	51.75
安徽	25.22	甘肃	24.47
福建	76.78	青海	3.89
江西	59.54	宁夏	1.04
山东	3.92	新疆	37.00
河南	22.59	总计	1 545.64

2.2　碳汇价值溢出效应、聚集效应分析

2.2.1　整体网络分析

在森林碳汇价值核算的基础上，结合我国森林碳汇的实际监测数据(值)与本研究计算的碳汇理论值，得到修正系数(即实际值/理论值的比例系数)[22]，优化森林碳汇引力值，本研究构建了 31 个省(市、自治区)的森林碳汇价值空间关联矩阵，并通过 UCINET 软件构建森林碳汇价值关联网络，分析其溢出效应和聚集效应。通过可视化工具绘制中国森林碳汇价值社会网络关联图(图 1)表明，31 个省(市、自治区)的森林碳汇价值均通过一个或多个“管道”在空间上相互关联，网络中没有孤立的节点。这表明，31 个省(市、自治区)的森林碳汇价值生产在森林资源、碳市场、社会经济、政策等方面存在联系，为森林碳汇价值溢出效应和聚集效应的发生提供了路径。

网络分析进一步揭示，我国森林碳汇价值关联网络的整体网络密度为 0.273 1，低于理论最大网络密度(0.5)[23]，表明各省(市、自治区)之间的碳汇价值关联网络的关联程度较低，碳汇价值溢出能力尚未充分发挥。研究进一步对该网络中的网络关联度、

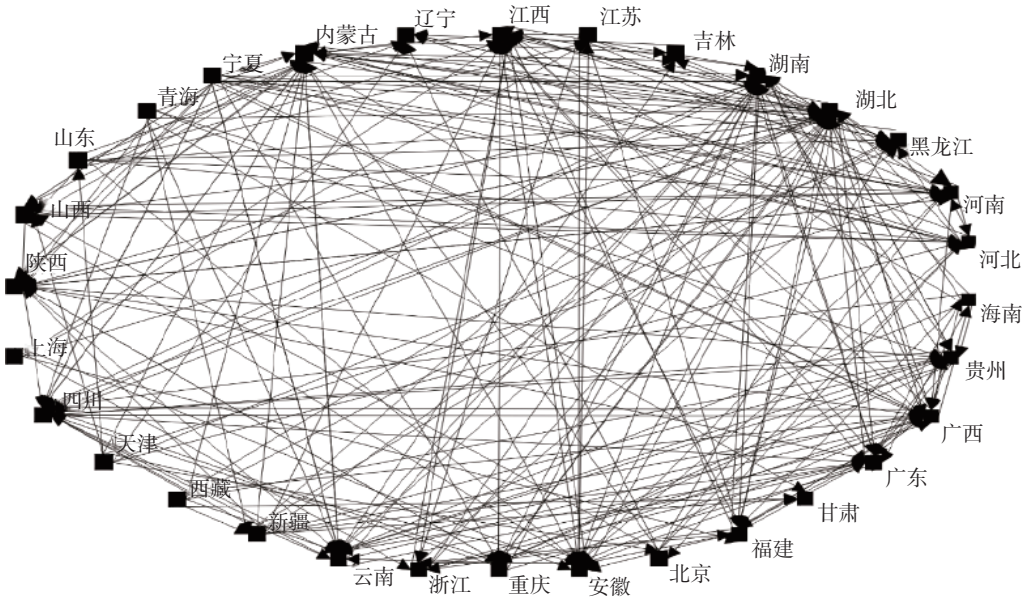


图 1　中国森林碳汇价值关联网络

Fig. 1　Network of forest carbon sink value relationships in China

网络等级度及网络效率进行计算，结果显示，网络关联度最大值为 1，表明碳汇价值关联网络关联程度较高，网络整体通达性良好，但一些关联度尚未达到最大值，网络关联和网络密度有待加强，各省（市、自治区）的森林碳汇价值生产可通过森林资源、碳市场、社会经济、政策等各种渠道相互影响，促进网络密度的提升和关联度的提高，为区域协同、森林固碳功能的提高及碳汇市场的发展等奠定基础。网络等级度为 0.426 6，表明不同省份之间森林碳汇价值生产关联在空间的相对集中程度较高，也印证了各省市区的碳汇价值存在互相溢出的可能性[19, 24]，但网络中仍存在部分边缘省份，其较低的网络等级度影响了溢出效应的发挥。网络效率为 0.632 2，表明网络信息传递效率较高，但该值距其最大值 1 仍有一定差距，说明网络中存在一定冗余连线，使得网络中的溢出关系的传递效率的潜力没有完全发挥，再加上信息传递具有衰减效应等，削弱了森林碳汇价值关联网络碳汇价值生产的整体溢出效应。

2.2.2 中心性分析

为进一步探讨我国森林碳汇价值关联网络中各省份的重要性角色，本文利用中心性分析的重要指标点度中心度和中介中心度对该网络进行分析[25]。中心性分析结果表明（表 4），31 个省市区的点度中心度（出度、入度）的均值为 8.194，出度标准差为 2.545，最大值和最小值分别为 13.00 和 2.00；入度标准差为 6.808，最大值和最小值分别为 25.00 和 0.00。这表明关联网络中各节点的出度、入度的最大值均超过其均值[19]，存在部分中心作用或重要作用突出的省份[25]，并对其他省份形成辐射带动作用，其溢出效应显著。出度和入度的最大值和最小值差异较大，尤其是入度，最大值和最小值差异为 25，说明某些省份（如湖北、广西、内蒙古等）的带动作用较大，其带动作用超过其辐射作用。

根据中介中心度的结果，计算的森林碳汇价值关联网络的中介中心度均值为 19.91，最大值和最小值分别为 160.83 和 0.00（表 4），极差较大。其中内蒙古、湖北、安徽等中介中心度显著高于均值，表明这些省份在网络中起到了较为核心的桥梁作用，提升了整个网络的通达性。同时，这些省份也表现出较强的森林碳汇生态聚集效应，其中介中心度均在 50.00 以上，远高于其平均值。

2.2.3 块模型分析

为进一步分析森林碳汇价值生产关联网络的溢出效应与生态聚集效应，本文采用 UCINET 软件的 CONCOR 方法[25]对我国 31 个省市区碳汇价值关联网络进行块模型分析。选择最大分割深度为 2，收敛标准为 0.2，将该网络划分成 4 个板块（表 5、6）。

溢出板块外关系数和接受关系矩阵表明（表 5），板块内部关系数量为 131 个（接受关系矩阵中 4 个板块对角线关系之和），板块外部关系数量为 123 个（溢出板块外关系数纵向关系之和）。两者差异较小，在统计合理误差范围内，表明网络中存在明显的聚

表 4 中心性分析

Tab. 4 Centrality analysis

省（市、自治区）	出度	入度	中介中心度	省（市、自治区）	出度	入度	中介中心度
北京	6.00	2.00	0.00	湖北	13.00	25.00	106.79
天津	9.00	0.00	0.00	湖南	9.00	18.00	16.64
河北	8.00	7.00	41.76	广东	8.00	14.00	12.75
山西	6.00	7.00	5.56	广西	9.00	20.00	33.64
内蒙古	12.00	18.00	160.83	海南	9.00	2.00	0.17
辽宁	3.00	6.00	11.33	重庆	9.00	6.00	1.69
吉林	2.00	3.00	3.44	四川	9.00	14.00	16.54
黑龙江	3.00	11.00	28.34	贵州	7.00	13.00	2.90
上海	6.00	0.00	0.00	云南	7.00	15.00	14.18
江苏	6.00	3.00	1.52	西藏	9.00	0.00	0.00
浙江	8.00	5.00	13.65	陕西	11.00	10.00	13.48
安徽	10.00	11.00	54.09	甘肃	10.00	3.00	0.97
福建	7.00	10.00	9.91	青海	9.00	0.00	0.00
江西	7.00	16.00	28.41	宁夏	11.00	0.00	0.00
山东	10.00	1.00	1.05	新疆	12.00	3.00	2.39
河南	9.00	11.00	34.95				

表 5　板块间溢出效应分析

Tab. 5　Analysis of spillover effects between segments

板块	接受关系矩阵				板块成员数量	接受板块外关系数	溢出板块外关系数	期望内部关系比例/%	实际内部关系比例/%	板块类型
	板块1	板块2	板块3	板块4						
板块1	10	9	21	1	5	16	31	13.33	24.39	净溢出
板块2	9	30	8	2	8	24	19	23.33	61.22	双向溢出
板块3	5	4	78	6	11	74	15	33.33	83.87	主受益
板块4	2	11	45	13	7	9	58	20.00	18.31	经纪人

注：期望内部关系比例 =（板块内省市区个数 − 1）/（网络中所有省市区个数 − 1）；实际内部关系比例 = 板块内部关系数/板块溢出关系总数。

表 6　关联网络聚类分析

Tab. 6　Block model clustering results

板块	所含省（市、自治区）
板块1	安徽、上海、河南、江苏、山东
板块2	黑龙江、山西、天津、北京、内蒙古、吉林、河北、辽宁
板块3	湖南、广东、江西、福建、海南、湖北、浙江、四川、贵州、云南、广西
板块4	甘肃、青海、西藏、新疆、宁夏、陕西、重庆

集效应。尤其板块间的联系较为活跃，外部板块对其他板块的影响力较大，碳汇价值生产的关联聚集效应的凝聚作用较明显。

由表 7 可知，该网络像矩阵的对角线上值均为 1，进一步证明各板块内部不同省份间存在碳汇价值生产关联的“空间俱乐部趋同”效应和聚集效应[25−27]。不同板块通过信息、资源等物质或非物质的联系，形成板块内各成员碳汇价值“普涨”或“普跌”的联动之势，且不同板块存在核心区与次核心区等层级现象[25]。因此，在加强各省份之间碳汇或林业产业联系[28]、促进各区域生态保护政策协同与落实的同时，需通过分类管理和区域协作的综合管理方式，注重发挥碳汇价值关联网络中核心区的带动作用，优化网络溢出关系，从而实现全国范围内的碳汇价值生产增值，促进森林经营管理水平的提升和高质量发展。

3　讨　　论

本研究基于第八、九次森林资源清查数据，探讨了森林碳汇价值生产的溢出效应与生态聚集效应，并分析了不同省份之间碳汇价值生产的关联性。在此对以下相关价值管理等问题进行拓展性讨论。

3.1　森林碳汇溢出效应、生态聚集效应的价值管理

中国森林碳汇价值生产是否存在溢出效应和聚集效应，主要取决于具体的情境和研究范围。森林碳汇价值的溢出效应主要表现在地理空间上的相互影响[29−30]。例如，某一地区的森林碳汇项目实施后，若导致该地区以外的地方减少了森林砍伐或增加了植树造林活动，或者因政策引导和资金支持等因素促进了植树造林，则表明存在溢出效应。此外，森林碳汇项目还能带来生态环境改善和生物多样性保护等多重效益，这些效益可能扩散到项目区域之外，产生积极的社会经济影响。聚集效应则可理解为在一定区域内，多个相似或互补的森林碳汇项目共同作用下形成的协同增效现象。张倩等[22]的研究表明，我国森林碳汇价值生产存在明显的“俱乐部”效应，如何进行经济开发利用值得大家思考。本文通过计算森林碳汇价值关联网络的各板块密度矩阵和像矩阵（表 7），进一步验证了我国森林碳汇价值的溢出效应和聚集效应，也证明了我国森林碳汇价值生产“俱乐部”效应的存在。在进行碳汇价值管理时，应借鉴区域经济学的相关原理和方法，研究并识别中国森林碳汇生产溢出效应及其生态聚集效应的关键节点和重要连接路径，揭示不同利益相关者之间的合作模式及其对森林碳汇效益的影响，并通过综合考虑物理连接和社会连接，优化森林碳汇价值管理策略，

表 7　各板块密度矩阵和像矩阵

Tab. 7　Each segment density matrix and mirror matrix

板块	密度矩阵				像矩阵			
	板块1	板块2	板块3	板块4	板块1	板块2	板块3	板块4
板块1	0.500	0.225	0.382	0.029	1	0	1	0
板块2	0.225	0.536	0.091	0.036	0	1	0	0
板块3	0.091	0.045	0.709	0.078	0	0	1	0
板块4	0.057	0.196	0.584	0.310	0	0	1	1

促进我国森林碳汇市场的发展。

3.2 森林碳汇生产的价值“增长极”与价值管理

价值“增长极”通常指在特定区域内，由于多种有利条件的叠加，使得某一资源或产业呈现出较高的增值潜力和发展速度[31]。对于森林碳汇而言，一些地区因其优越的自然条件（如适宜的气候和土壤条件等），适合大规模植树造林和森林保护，从而成为森林碳汇的重要增长点。此外，通过政策支持（如财政补贴、税收优惠等），政府可促进森林碳汇项目的落地和发展，形成森林碳汇价值生产的增长点。本文基于森林碳汇价值网络的中心性分析表明，价值网络中存在明显的“抱团”现象，即说明我国森林碳汇价值生产存在一定的“增长极”现象[32]，可以通过“增长极”的聚集效应、扩散效应等促进我国森林碳汇的价值实现。另外，通过系统化的价值工程管理方法[22]，实现价值管理，并结合功能分析来优化设计、降低森林碳汇价值生产的成本，开展森林资源的多效益功能分析和成本效益分析等，进行碳汇效益的多目标优化，实现碳汇价值最大化，提高森林管理效率，推动森林碳汇价值生产的可持续发展[29]。

3.3 森林碳汇价值应走综合管理路径

森林碳汇价值综合管理是一个涉及政策、技术、社会参与等多方面内容的重要议题。这一管理方式旨在通过系统化、科学化的方法提升森林的碳汇能力，同时兼顾生态保护和社会经济发展。从森林碳汇的重要性来看，森林能够吸收大量 CO_2 并将其转化为有机物质，从而发挥“碳汇”的作用。因此，加强森林资源的保护和管理对实现中国的“双碳”目标和区域经济高质量发展至关重要[33]。从政策支持来看，中国政府已出台了一系列政策措施以促进森林资源的可持续发展，包括实施天然林保护工程和退耕还林工程等。这些政策旨在增加森林覆盖率、提高森林质量并增强森林生态系统服务功能。从技术创新来看，利用遥感技术、大数据分析等现代信息技术手段，可以更准确地监测森林生长状况及碳汇能力变化，为制定科学合理的森林经营策略提供依据[34]。从公众参与来看，鼓励社会各界参与森林保护活动（如植树造林、认养树木等），不仅有助于改善环境质量，还能增强人们的环保意识。此外，从国际合作来看，在全球气候变化背景下，各国需携手应对气候挑战。中国可以与其他国家分享在森林碳汇管理和碳市场建设方面的经验和技术，推动建立更加公平有效的全球气候治理体系[35]。因此，通过综合运用法律法规、科技创新和社会力量等多种管理手段，探索“分类管理 + 区域协作”的综合管理方式，可以为我国森林碳汇价值综合管理开辟一条适合国情的有效路径。

3.4 研究局限与展望

本研究存在一定的局限性。首先，基于省级行政单元的分析尺度可能掩盖了省内部更细微的异质性，未来可结合更高分辨率数据开展多尺度研究。其次，本研究构建的是基于特定时期的静态关联网络，未能揭示网络结构的动态演化过程，未来可利用长时期序列数据刻画网络时序演变，是富有价值的拓展方向。再次，以往对森林碳汇溢出及生态聚集效应的研究，通常偏向自然生态系统分析，既忽视了政府、企业、社区等相关主体的互动关系，也缺乏对网络结构特征的关注。本研究采用的社会网络分析法，虽然在一定程度上弥补了上述不足，但相关研究内容仍有待进一步完善，尤其是在识别个体、组织之间的关键节点、组织协作，以及它们之间的信息流动、资源配置和社会资本的联接机制和协作方式等方面，这些也是碳汇价值管理必须重视的问题。

4 结　　论

本研究采用蓄积量扩展法测算我国 31 省（市、自治区）的森林碳汇量及其价值，并采用社会网络分析法对森林碳汇价值的溢出效应、生态聚集效应和碳汇价值管理展开分析讨论，得出以下结论。

（1）我国森林的固碳能力有所提升，东北地区和西南地区的森林碳汇量和碳储量均位居全国前列。截至 2018 年，中国林木碳储量达到 81.03 亿 t，森林资源碳储量达到 197.62 亿 t，2013—2018 年我国碳汇价值为 1 545.64 亿元，年均森林碳汇价值增加量为 272.17 亿元。分地区来看，东北及西南地区省份碳汇价值较高，其中云南、黑龙江、四川及内蒙古 4 省森林碳汇价值 600.21 亿元，占全国同期碳汇价值量的 38.83%。

（2）我国各省份的森林碳汇价值生产可通过关联网络实现价值溢出。构建碳汇价值社会关联网络并对溢出效应进行分析发现，整体网络密度为 0.273 1，网络联系虽不够紧密，但各省份之间存在碳汇价值溢出的渠道，且网络关联度最大值为 1，通达性较好。网络等级度为 0.426 6，表明网络中存在非对称性溢出，网络效率为 0.632 2，说明网络效率较高，但依然存在较多冗余连线，使得网络传递效率的潜力没有完全发挥。尽管这些冗余连线保障了网络的稳定性，但也显示出提升网络信息传递效率等有较大潜力。

（3）碳汇价值溢出效应具有一定的地域规律，并存在碳汇价值溢出“增长极”和聚集效应。该网络节点的出度、入度均值为 8.194，节点出度较大的省（市、自治区）（如湖北、内蒙古、安徽等）地理位置大多靠

近中部地区，便于溢出效应的接收与传递，呈现明显的聚集效应趋势。从中介中心度来看，内蒙古、湖北、安徽等省份在网络中处于核心支配地位，发挥了桥梁作用，整体提升了网络通达性，可作为碳汇价值增值的“增长极”，带动其他省份森林碳汇价值生产增值和林业发展。

(4)我国森林碳汇价值溢出客观上存在核心区、次核心区等层级，可通过分类管理和区域协作的综合管理方式进一步挖掘森林碳汇价值潜力。块模型分析将我国 31 个省(市、自治区)划分成了 4 个板块。在当前网络密度较低、网络联系较弱且各省份存在“空间俱乐部效应”和聚集效应的情况下，应重点关注双向溢出板块和经纪人板块，加强网络内各省之间的物质与非物质联系。对于经纪人板块，应通过政策和经济手段强化内部交流，增强网络稳定性并带动其他区域碳汇价值生产的发展。

参　考　文　献

[1] 蔡伟祥, 徐丽, 李明旭, 等. 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 [J]. 地理学报, 2022, 77(7): 1808−1820.
Cai W X, Xu L, Li M X, et al. Imbalance of inter-provincial forest carbon sequestration rate(2010-2060) in China and its regulation strategy [J]. Acta Geographica Sinica, 2022, 77(7): 1808−1820.

[2] 姜霞, 黄祖辉. 经济新常态下中国林业碳汇潜力分析 [J]. 中国农村经济, 2016(11): 57−67.
Jiang X, Huang Z H. Analysis on carbon sequestration potential of forestry in China under the new economic normal [J]. Chinese Rural Economy, 2016(11): 57−67.

[3] 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.
Zhang Y, Zhou X, Qin Q F, et al. Value accounting of forest carbon sinks in China[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2013, 35(6): 124−131.

[4] Merlo M , Briales E R. Public goods and externalities linked to Mediterranean forests: economic nature and policy [J]. Land Use Policy, 2000, 17(3): 197−208.

[5] Atakan Ö, Mustafa F T, Pak M. Economic valuation of externalities linked to Turkish forests [J]. African Journal of Agricultural Research, 2009, 4(11): 1251−1259.

[6] 薛龙飞, 罗小锋, 李兆亮, 等. 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 [J]. 自然资源学报, 2017, 32(10): 1744−1754.
Xue L F, Luo X F, Li Z L, et al. Spatial spillover effects and influencing factors of forest carbon sink in China: spatial econometric analysis based on forest resources inventory in 31 provinces of the mainland of China [J]. Journal of Natural Resources, 2017, 32(10): 1744−1754.

[7] 石小亮, 张颖, 韩争伟. 森林碳汇计量方法研究综述: 基于北京市的选择 [J]. 林业经济, 2014, 36(11): 44−49.
Shi X L, Zhang Y, Han Z W. Review of forest carbon sink measurement methods: based on choice of Beijing [J]. Forestry Economics, 2014, 36(11): 44−49.

[8] Liu C , Li X. Carbon storage and sequestration by urban forests in Shenyang, China[J]. Urban Forestry & Urban Greening, 2012, 11(2): 121−128.

[9] 李洪甫, 李洪泽, 谢庆国. 森林植被碳贮量估算及分析 [J]. 中国城市林业, 2010, 8(5): 46−47.
Li H F, Li H Z, Xie Q G. Estimation and analysis of carbon storage of forest vegetation [J]. Journal of Chinese Urban Forestry, 2010, 8(5): 46−47.

[10] 李惠敏, 陆帆, 唐仕敏, 等. 城市化过程中余杭市森林碳汇动态 [J]. 复旦学报 (自然科学版), 2004, 43(6): 1044−1050.
Li H M, Lu F, Tang S M, et al. Dynamic carbon sink of forests in Yuhang City with the development of urbanization [J]. Journal of Fudan University, 2004, 43(6): 1044−1050.

[11] 王祖华, 刘红梅, 关庆伟, 等. 南京城市森林生态系统的碳储量和碳密度 [J]. 南京林业大学学报 (自然科学版), 2011, 35(4): 18−22.
Wang Z H, Liu H M, Guan Q W, et al. Carbon storage and density of urban forest ecosystems in Nanjing [J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2011, 35(4): 18−22.

[12] Zhao M , Kong Z H , Escobedo F J , et al. Impacts of urban forests on offsetting carbon emissions from industrial energy use in Hangzhou, China [J]. Journal of Environmental Management, 2010(4): 91.

[13] 刘迎春, 高显连, 付超, 等. 基于森林资源清查数据估算中国森林生物量固碳潜力 [J]. 生态学报, 2019, 39(11): 4002−4010.
Liu Y C, Gao X L, Fu C, et al. Estimation of carbon sequestration potential of forest biomass in China based on National Forest Resources Inventory [J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(11): 4002−4010.

[14] 张旭芳, 杨红强, 张小标. 1993—2033 年中国林业碳库水平及发展态势 [J]. 资源科学, 2016, 38(2): 290−299.
Zhang X F, Yang H Q, Zhang X B. Development level and trend in Chinese forestry carbon pools from 1989 to 2033 [J]. Resources Science, 2016, 38(2): 290−299.

[15] 郗婷婷, 李顺龙. 黑龙江省森林碳汇潜力分析 [J]. 林业经济问题, 2006, 26(6): 519−522, 526.
Xi T T, Li S L. Analysis of forestry carbon mitigation potential in Heilongjiang Province [J]. Problems of Forestry Economics, 2006, 26(6): 519−522, 526.

[16] 张颖, 潘静. 森林碳汇经济核算及资产负债表编制研究 [J]. 统计研究, 2016, 33(11): 71−76.
Zhang Y, Pan J. The research on economic accounting of forest carbon sinks and its balance sheet establishment [J]. Statistical Research, 2016, 33(11): 71−76.

[17] Cai W X, He N P, Li M X, et al. Carbon sequestration of Chinese forests from 2010 to 2060: spatiotemporal dynamics and its regulatory strategies [J]. Science Bulletin, 2022, 67(8): 836−843.

[18] 刘世荣, 王晖, 李海奎, 等. 碳中和目标下中国森林碳储量、碳汇

变化预估与潜力提升途径 [J]. 林业科学, 2024, 60(4): 157−172.
Liu S R, Wang H, Li H K, et al. Projections of China's forest carbon storage and sequestration and ways of their potential capacity enhancement [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2024, 60(4): 157−172.

[19] 王小华, 杨玉琪, 罗新雨, 等. 中国经济高质量发展的空间关联网络及其作用机制 [J]. 地理学报, 2022, 77(8): 1920−1936.
Wang X H, Yang Y Q, Luo X Y, et al. The spatial correlation network and formation mechanism of China's high-quality economic development [J]. Acta Geographica Sinica, 2022, 77(8): 1920−1936.

[20] Li S, Liu J, Zhang Q, et al. Spatial distribution and influencing factors of forest carbon storage in China [J]. Journal of Forest Research, 2016, 27(4): 631−639.

[21] 张颖, 吴丽莉, 苏帆, 等. 我国森林碳汇核算的计量模型研究 [J]. 北京林业大学学报, 2010, 32(2): 194−200.
Zhang Y, Wu L L, Su F, et al. An accounting model for forest carbon sinks in China[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2010, 32(2): 194−200.

[22] 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 [J]. 世界林业研究, 2023, 36(6): 125−131.
Zhang Q, Diao G, Zhao R. Pathways to realizing the value of forest carbon in China from the perspective of "forests-carbon market-socioeconomics" system[J]. World Forestry Research, 2023, 36(6): 125−131.

[23] 刘双娜, 周涛, 舒阳, 等. 基于遥感降尺度估算中国森林生物量的空间分布 [J]. 生态学报, 2012, 32(8): 2320−2330.
Liu S N, Zhou T, Shu Y, et al. The estimating of the spatial distribution of forest biomass in China based on remote sensing and downscaling techniques[J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(8): 2320−2330.

[24] 张洪宇, 程振博. 中国森林碳汇效度动态演进及时空演变格局 [J]. 天津农林科技, 2024(3): 37−42.
Zhang H Y, Cheng Z B. Dynamic evolution of forest carbon sink effectiveness and spatial and temporal evolution pattern in China[J]. Science and Technology of Tianjin Agriculture and Forestry, 2024(3): 37−42.

[25] 李敬, 陈澍, 万广华, 等. 中国区域经济增长的空间关联及其解释: 基于网络分析方法 [J]. 经济研究, 2014, 49(11): 4−16.
Li J, Chen S, Wan G H, et al. Study on the spatial correlation and explanation of regional economic growth in China: based on analytic network process[J]. Economic Research Journal, 2014, 49(11): 4−16.

[26] 赵忠宝, 耿世刚, 李克国, 等. "双碳"背景下基于碳汇交易的河北省森林生态效益补偿机制研究 [J]. 林业资源管理, 2023(2): 10−16.
Zhao Z B, Geng S G, Li K G, et al. Study on forest ecological benefit compensation mechanism in Hebei Province based on carbon sink trading under carbon peak and carbon neutrality targets[J]. Forest Resources Management, 2023(2): 10−16.

[27] 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.
Zhang Y, Meng N, Jiang Y F. Coupling and long-term change characteristics analysis of forest carbon sequestration and forestry economic development in China[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2022, 44(10): 129−141.

[28] 李继峰, 郭焦锋, 高世楫, 等. 我国实现 2060 年前碳中和目标的路径分析 [J]. 发展研究, 2021, 38(4): 37−47.
Li J F, Guo J F, Gao S J, et al. Path analysis of China's goal of carbon neutrality by 2060[J]. Development Research, 2021, 38(4): 37−47.

[29] 朱教君, 高添, 于立忠, 等. 森林生态系统碳汇: 概念、时间效应与提升途径 [J]. 应用生态学报, 2024, 35(9): 2313−2321.

[30] Zhu J J, Gao T, Yu L Z, et al. Carbon sink of forest ecosystems: concept, time effect and improvement approaches[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2024, 35(9): 2312−2321.

[31] 付伟, 李龙, 罗明灿, 等. 省域视角下中国森林碳汇空间外溢效应与影响因素 [J]. 生态学报, 2023, 43(10): 4074−4085.
Fu W, Li L, Luo M C, et al. Spatial spillover effects and influencing factors of forest carbon sink in China from provincial perspective[J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(10): 4074−4085.

[32] 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 [J]. 统计与决策, 2024, 40(8): 84−88.
Zhang Z Q, Zhou W, Yang C Y. Spatial effects of forest cutting quota on forest carbon sequestration in China under the background of carbon neutralization[J]. Statistics & Decision, 2024, 40(8): 84−88.

[33] 金碚. 区域经济高质量发展的经济学范式构架 [J]. 区域经济评论, 2024(5): 5−12.
Jin B. The economic paradigm framework for high quality development of regional economy[J]. Regional Economic Review, 2024(5): 5−12.

[34] 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.
Zhang Y, Li X G, Wen Y L. Forest carbon sequestration potential in China under the background of carbon emission peak and carbon neutralization[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2022, 44(1): 38−47.

[35] 朱建华, 田宇, 李奇, 等. 中国森林生态系统碳汇现状与潜力 [J]. 生态学报, 2023, 43(9): 3442−3457.
Zhu J H, Tian Y, Li Q, et al. The current and potential carbon sink in forest ecosystem in China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(9): 3442−3457.

（责任编辑 范 娟
责任编委 赵秀海）