

DOI: 10.5846/stxb202206071614

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.

Fu W, Li L, Luo M C, Chen J C, Wang F L. Spatial spillover effects and influencing factors of forest carbon sink in China from provincial perspective. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(10): 4074-4085.

# 省域视角下中国森林碳汇空间外溢效应与影响因素

付 伟<sup>1</sup>, 李 龙<sup>1</sup>, 罗明灿<sup>1</sup>, 陈建成<sup>2,\*</sup>, 王福利<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 西南林业大学经济管理学院, 昆明 650233

<sup>2</sup> 北京林业大学经济管理学院, 北京 100083

**摘要:** 森林碳汇空间相关性与溢出效应对林业产业的区域统筹发展具有重要作用, 科学核算各地区的森林碳汇量并分析其空间关联特征是制定差异化碳汇发展政策的重要基础。以森林蓄积量扩展法核算我国 31 个省(市、自治区)1993—2018 年 6 次森林资源清查期间的森林碳汇量, 探究省域间森林碳汇量的相关性特征, 并利用空间计量模型分析森林碳汇的外溢效应和影响因素。结果表明: (1) 我国整体森林碳汇量不断增加, 不同地区的森林碳汇量差别较大。西南省份和东北林区森林碳汇量处于第一梯队, 上海和北京碳汇增速较快。(2) 研究期间内的 Moran's  $I$  指数先呈现倒“V”形的变化特征, 之后又以较为稳定的趋势上升, 我国各地区的森林碳汇分布存在显著的空间关联性。(3) 森林碳汇的空间外溢效应显著, 根据空间杜宾模型将外溢效应分解为直接效应、间接效应和总效应。林业管理水平和森林蓄积水平对本地和相邻地区森林碳汇量有正向影响, 林业产业发展水平对本地区的森林碳汇量有负向影响。综上, 我国各地方政府对差异化林业碳汇政策的制定和执行应兼顾区域因素, 以我国林业政策的总体空间规划来综合统筹各区域森林政策, 在“山水林田湖草沙”的命运共同体理念引领下, 实现林业的绿色高质量发展。

**关键词:** 森林碳汇; 绿色发展; 空间外溢效应; 空间相关性

## Spatial spillover effects and influencing factors of forest carbon sink in China from provincial perspective

FU Wei<sup>1</sup>, LI Long<sup>1</sup>, LUO Mingcan<sup>1</sup>, CHEN Jiancheng<sup>2,\*</sup>, WANG Fuli<sup>1</sup>

<sup>1</sup> School of economics and management, Southwest Forestry University, Kunming 650233, China

<sup>2</sup> School of economics and management, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

**Abstract:** The regionally integrated development of the forestry industry is significantly influenced by the spatial correlation and spillover effects of forest carbon sinks. The scientific accounting of forest carbon sinks in each region and analysis of their spatial correlation characteristics provide a crucial foundation for developing differentiated carbon sink development policies. The forest stock expansion method was used to account for the forest carbon sinks of 31 Chinese provinces (municipalities and autonomous regions) over six forest inventory periods from 1993 to 2018. The spatial econometric model was then used to analyze the spillover effects and influencing factors of forest carbon sinks. The findings revealed that: (1) China's overall forest carbon sinks were increasing, while forest carbon sinks in different regions varied greatly. The forest carbon sinks in southwestern provinces and northeastern forest areas were in the first echelon, and Shanghai and Beijing had a faster growth rate of carbon sinks. (2) There was a considerable spatial association between the distribution of forest carbon sinks in different parts of China during the study period, and the Moran index initially displayed an inverted “V”

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(72264035); 国家社会科学基金项目(18BGL052)

**收稿日期:** 2022-06-07; **采用日期:** 2023-02-06

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: chenjc1963@163.com

# 本研究尚缺中国港澳台统计数据。

shaped change before increasing in a more stable pattern. (3) The forest carbon sink had an obviously regional spillover effect, which was divided into direct effects, indirect effects, and total effects by the spatial Durbin model. Forest carbon sinks in the immediate area and its neighbors were positively impacted by forestry management and stock levels, while negatively impacted by forestry industry development levels. In conclusion, local governments in China should consider regional factors when developing and implementing differentiated forestry carbon sink policies, and should use the overall spatial planning of national forestry policies to thoroughly coordinate regional forestry policies in order to achieve green and high-quality development of forestry under the leadership of the "community of destiny of mountains, water, forests, fields, lakes, grasses, and forests".

**Key Words:** forest carbon sink; green development; spatial spillover effect; spatial correlation

全球经济的迅速发展带来了自然生态环境的破坏,CO<sub>2</sub>在大气中的浓度不断增高,给人类的生存环境带来了切身的危害,低碳减排成为全球共识。我国 CO<sub>2</sub>排放量不断增长,已成为世界第一大碳排放国,低碳减排将成为我国未来发展的重要战略方向。在第七十五届联合国大会上习近平总书记第一次明确提出了“双碳”目标,中央财经委员会第九次会议提出“要把碳达峰、碳中和纳入生态文明建设整体布局”<sup>[1]</sup>。中国共产党第二十次全国代表大会上进一步提出要推动绿色发展,加快实施重要生态系统保护和修复重大工程。“双碳”目标的提出昭示着我国低碳减排的决心,要在减少“碳源”和增加“碳汇”两方面持续推进温室气体减排<sup>[2]</sup>,与碳减排政策一致,大力推动森林碳汇的发展将是缓解全球气候变化的重要方式<sup>[3-4]</sup>。森林吸收大气中的 CO<sub>2</sub>并储存就是森林的碳汇功能<sup>[5-6]</sup>。森林是陆地生态系统中最大的碳库,在“双碳”目标的实现过程中存在着巨大的生态效益<sup>[7]</sup>。森林的碳汇功能对全球的碳循环有着深刻的影响<sup>[8-9]</sup>。2020 年联合国粮农组织公布的全球森林资源评估报告显示,全球森林碳储量约占全球植被碳储量的 77%,森林碳储能力的提高在“双碳”目标的实现中具有重要作用<sup>[10]</sup>。森林碳汇的发展将成为应对气候变化及“双碳”目标实现的重要途径之一<sup>[11-12]</sup>。

国际上最早于 1960 年左右开始进行森林碳汇的研究<sup>[13]</sup>。马学威等<sup>[14]</sup>将森林碳汇的研究分为萌芽期和快速发展期两个阶段,2006 年之前为萌芽期,2007 年至今为快速发展期<sup>[15]</sup>。早期的研究代表 Paul<sup>[16]</sup>使用森林生长模型将森林集约经营对碳储量的影响进行了探析,学者们在之后的研究中,将自然科学和经济学的融合纳入了动态分析框架和模型,森林碳汇的研究不断走向完善<sup>[17-18]</sup>。国内对森林碳汇空间溢出效应的研究存在着不同的观点,在森林碳汇的空间溢出效应是否显著及存在正向还是负向的空间溢出效应之间产生分歧<sup>[19]</sup>。薛龙飞等<sup>[20]</sup>通过研究我国 31 个省市的森林碳汇情况,证明了我国森林碳汇之间有着显著的负向空间溢出效应,但大量国内学者还是在省域层面上对森林碳汇进行研究<sup>[21-22]</sup>。森林资源禀赋类似的地区在森林碳汇量上存在较大差异<sup>[23]</sup>,学者们从经济发展水平<sup>[24]</sup>、森林管理水平<sup>[25-27]</sup>以及森林灾害<sup>[28]</sup>等方面对其影响因素进行研究,这些因素对森林碳汇量都有着重要的影响。在碳汇的空间溢出效应研究中,孙建卫等<sup>[29]</sup>、孙丽文等<sup>[30]</sup>和徐敬俊等<sup>[31]</sup>分别对林业碳汇的经济和区域效应、省域碳锁定的空间外溢效应以及渔业碳汇的空间外溢效应方面进行了研究。

综上所述,国内外对森林碳汇的研究较为广泛,为学者对森林碳汇的研究提供了丰富的材料,但大量学者的研究视角仍关注于单一省份,对空间分布状况的研究较少且局限于一般性分析,对国家层面森林碳汇的空间溢出效应和影响因素未能进一步探究。由于森林资源的分布不是独立的,地理环境的相似性、政策引导的溢出性和生产创新的互补性等会产生较强的区域关联效应,地区间的协调发展问题值得深入探究。本文通过森林蓄积量扩展法测算我国 31 个省(市、自治区)在 1993—2018 年六次森林资源清查期间的森林碳汇量,对省域空间森林碳汇总量相关性特征进行对比,利用空间计量模型进行森林碳汇的外溢效应和影响因素分析。为我国各地区差异化森林碳汇政策的制定与实施提供支撑,利用我国林业政策的总体空间规划来综合统筹各区域森林政策,促进林业绿色高质量发展。

## 1 数据介绍与研究设计

### 1.1 数据介绍

#### 1.1.1 数据来源

选择 1993、1998、2003、2008、2013 和 2018 年我国六次森林资源清查的统计资料,数据源自于《全国森林资源清查报告》和《中国林业统计年鉴》,对相关数据取对数来消除异方差的影响。

#### 1.1.2 变量选取

本文在相关文献的基础上,进行了以下变量的选取:(1)林业产业发展水平,森林碳汇量与林业产业发展水平之间有着正相关的关系,选取林业产业总产值与森林面积的比值,即森林单位面积产值代表林业产业发展水平,记为 F-level。(2)劳动力要素投入,在劳动力素质保持恒定的基础上,劳动者人数在很大程度上影响林业产量,从而对森林碳汇量有着重要影响。文中以林业系统年末从业人员人数代表劳动力要素投入水平,记为 F-labor。(3)林业管理水平,造林行为是土地利用变化的方式,可以大幅提高植被碳汇<sup>[32]</sup>。由于造林行为对森林碳汇的影响存在 10 年作用的生长期<sup>[33]</sup>。以被解释变量早 10 年的造林面积代表林业管理水平,记为 F-area。(4)森林采伐面积,因为采伐量对森林碳汇有着重要的关系,选取原木的采伐量作为影响森林碳汇的重要指标,记为 F-logs。(5)森林灾害程度,不同地区的森林生态情况不同,森林火灾、病害、虫害对森林碳汇产生一定的影响,以森林火灾、病虫害面积与森林面积的比值代表森林灾害程度,记为 F-disaster。(6)森林蓄积水平,森林蓄积量对森林碳汇有着主导影响,以单位面积森林蓄积量代表各地区森林蓄积水平,记为 F-stock。

### 1.2 研究设计

根据空间计量经济学的观点,不同区域的事物和现象之间在空间上相互影响,存在一定的空间相关性。地理空间中各经济事物之间存在着不同相关程度和交互效应,是事物本身所固有的空间经济属性,空间计量经济学用空间外溢效应来定义和分析这种相关性。

本文在对我国 31 个省(市、自治区)的森林碳汇量进行测算的基础上,运用空间自相关中的全局和局部 Moran's  $I$  指数来考虑森林碳汇的时空格局,以空间计量模型分析森林碳汇空间关联性。对三种空间计量模型进行比较,选择最优模型对森林碳汇的空间外溢效应以及影响因素进行研究。

## 2 研究方法

### 2.1 森林碳汇量测算

本文以森林蓄积量扩展法核算森林碳汇量,公式中  $C_S$ 、 $C_V$ 、 $C_B$  和  $C_F$  依次为不同森林结构的碳汇量,分别为森林土壤碳汇量、林下植被碳汇量、森林生物量碳汇量和森林总体碳汇量<sup>[23]</sup>。 $S_{ij}$ 、 $C_{ij}$ 、 $V_{ij}$  分别代表第  $i$  类地区第  $j$  类森林类型的森林面积、森林碳密度和森林单位面积蓄积量,具体公式如下:

$$C_F = C_S + C_B + C_V \quad (1)$$

$$C_F = \sum (S_{ij} \times C_{ij}) + \alpha \sum (S_{ij} \times C_{ij}) + \beta \sum (S_{ij} \times C_{ij}) \quad (2)$$

$$C_{ij} = V_{ij} \times \sigma \times \rho \times \gamma \quad (3)$$

式中, $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\sigma$ 、 $\rho$  和  $\gamma$  分别为林下植物碳转换系数、森林碳转换系数、微生物含量扩大系数、容积系数和含碳量。各项折算系数均根据联合国政府间气候变化专门委员会的默认参数值取值。其中, $\alpha$  取值 0.195, $\beta$  取值 1.244。 $\sigma$  取值 1.90, $\rho$  取值 0.50 t/m<sup>3</sup>, $\gamma$  为取值 0.50<sup>[34]</sup>。

### 2.2 空间关联性分析

探索性空间数据分析 (Exploratory Spatial Data Analysis, ESDA) 主要使用地理可视化技术来揭示空间数据的特征。文献中经常使用它来确定空间数据分布模式、聚集热点和空间异质性<sup>[35]</sup>。ESDA 的优势在于能够提取其他方法无法识别的复杂空间现象,并为发现新的研究问题奠定基础<sup>[36]</sup>。它反映了特定空间中观测数据

的相互依赖性。空间自相关方法分为全局空间自相关(Global Moran's  $I$ )和局部空间自相关(Local Moran's  $I$ )。全局 Moran's  $I$  指数可以发现空间的集聚或异常值并发现空间分布的差异和关联性。取值为 $(-1, +1)$ , 全局 Moran's  $I$  指数 $>0$ 时,数值越大则空间正关联性越明显;全局 Moran's  $I$  指数 $=0$ 时,则空间分布关联性较弱;全局 Moran's  $I$  指数 $<0$ 时,数值越小则空间差异性越显著。全局空间自相关分析仅用一个值来反映研究区域间的空间差异的平均程度,却不能详细地说明区域间各个对象间具体的空间关联模式,没有考虑到空间异质性,因此无法反映地理单元内的局部空间相关性。所以,有必要使用局部自相关来确定具体集聚情况<sup>[37]</sup>,通过进行局部自相关分析来描述邻近空间的属性值的相关程度。相应公式如下:

$$I_G = \frac{n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (y_i - \bar{y}) (y_j - \bar{y})}{\left( \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} \right) \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (4)$$

$$I_L = \frac{(y_i - \bar{y}) \sum_{j=1}^n w_{ij} (y_j - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 / n} \quad (5)$$

式中, $I_G$ 、 $I_L$ 和 $n$ 分别为全局、局部 Moran's  $I$  指数和地区总数, $\bar{y}$ 为地区相应指标的平均值, $y_i$ 和 $y_j$ 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,描述了空间对象在第 $i$ 和第 $j$ 二点间的关联。此外,利用 Moran's  $I$  指数散点图进一步研究我国森林碳储量的局部空间集聚模式。在 Moran's  $I$  指数散点图中,第一(第三)象限代表碳储量的高(低)水平,表示高-高(低-低)集聚。第二(四)象限表明碳储量水平低(高)的省份被水平高(低)的省份包围,代表低-高(高-低)集聚<sup>[38]</sup>。

### 2.3 空间计量模型

在进行空间计量模型的研究中,先忽略各空间单元之间的相关作用,进行普通最小二乘回归(Ordinary Least Squares regression, OLS),预设回归模型如下:

$$y_{it} = \beta_i x_{it} + \mu_{it} \quad (6)$$

式中, $t$ 、 $i$ 、 $y_{it}$ 和 $x_{it}$ 分别为时间、观测样本、 $n \times 1$ 维的被解释变量以及 $n \times k$ 维的解释变量, $\beta_i$ 为 $k \times 1$ 维的 $x_{it}$ 的影响系数, $\mu_{it}$ 为 $n \times 1$ 维的相互独立的随机误差项向量,且 $\mu_{it} \sim (0, \sigma^2)$ 分布。

在最小二乘模型的基础上,检验相邻空间单元要素之间的相关性。若显著相关,则利用拉格朗日乘子检验(Lagrange Multiplier, LM)对三种空间计量模型做抉择:空间滞后模型(Spatial Lagged Model, SLM)、空间误差模型(Spatial Error Model, SEM)以及空间杜宾模型(Spatial Durbin Model, SDM)。

所有的空间计量模型给出以下的形式:

$$y_{it} = \rho \sum_{j=1}^n w_{ij} y_{jt} + \varphi + x_{it} \beta + \sum_{j=1}^n w_{ij} x_{ijt} \gamma + \mu_i + \eta_i + \varphi_{it} \quad (7)$$

$$\varphi_{it} = \lambda \sum_{j=1}^n w_{ij} \varphi_{jt} + \varepsilon_{it} \quad (8)$$

式中, $y_{it}$ 、 $w_{ij}$ 、 $\rho$ 分别为第 $i$ 个地区 $t$ 时刻的因变量、 $n \times n$ 阶的空间权重矩阵以及因变量的空间自回归系数, $\sum_{j=1}^n w_{ij} y_{jt}$ 代表临近地区因变量对本地区的影响, $x_{ijt}$ 为 $K$ 维解释变量, $\beta$ 是 $k \times 1$ 维回归部分的参数估计系数向量, $\sum_{j=1}^n w_{ij} x_{ijt} \gamma$ 是临近区域自变量对本区域自变量的影响, $\gamma$ 是 $k \times 1$ 维空间自相关系数矩阵, $\mu_i$ 、 $\eta_i$ 和 $\varphi_{it}$ 分别为空间效应项、时间效应项和误差项, $\lambda$ 是误差项的空间自相关系数, $\varepsilon_{it}$ 为独立同分布误差项且服从 $(0, \sigma^2)$ 分布。

空间滞后模型(SLM)、空间误差模型(SEM)和空间杜宾模型(SDM)分别由以上公式的调整而来。

空间滞后模型(SLM) ( $\lambda = \gamma = 0$ ):



$$y_{it} = \rho \sum_{j=1}^n w_{ij} y_{jt} + \varphi + x_{it}\beta + \mu_i + \eta_i + \varphi_{it} \tag{9}$$

空间误差模型 (SEM) ( $\rho = \gamma = 0$ ):

$$y_{it} = \varphi + x_{it}\beta + \mu_i + \eta_i + \varphi_{it} \tag{10}$$

$$\varphi_{it} = \lambda \sum_{j=1}^n w_{ij} \varphi_{jt} + \varepsilon_{it} \tag{11}$$

空间杜宾模型 (SDM) ( $\lambda \neq 0$ ):

$$y_{it} = \rho \sum_{j=1}^n w_{ij} y_{jt} + \varphi + x_{it}\beta + \sum_{j=1}^n w_{ij} x_{jt}\gamma + \mu_i + \eta_i + \varphi_{it} \tag{12}$$

3 结果分析

3.1 我国各省(市、自治区)森林碳汇量分析

我国森林碳汇总量丰富,年均碳汇量为 1509780.85 万 t(表 1)。根据 1993—2018 年各省市的碳汇量分布及变化情况,整体上看,我国森林碳汇分为三个梯队:第一梯队为西南省份和东北林区,由于地理因素,这些地区拥有大量的森林面积,为我国森林碳汇总量的主力军。第二梯队为南方林区,在我国森林碳汇中居于中等水平。第三梯队为东部沿海地区,碳汇量相较于前两个梯队较少。2018 年,我国森林碳汇总量为 1976234.52 万 t。西藏碳汇量为 264438.45 万 t,居我国首位,占我国碳汇总量的 13.38%。云南、四川、黑龙江三省的碳汇总量紧随其后,之间的碳汇量差距不大,四省的森林碳汇总量占我国碳汇总量的 46.68%。天津、上海和宁夏由于其森林面积和地理因素的影响,碳汇量较低。2018 年,上海碳汇量最低,但是从碳汇量的变化情况来看,上海碳汇增速较快,我国多个省份的碳汇增长幅度都较大,整体处于上升趋势。

表 1 我国各省(市、自治区)森林碳汇量汇总/10<sup>4</sup>t

Table 1 Summary of forest carbon sequestration in all provinces (cities and autonomous regions) of China

| 地区<br>Region | 1993      | 1998      | 2003      | 2008      | 2013      | 2018      | 平均值<br>Average | 变化率<br>Rate of change |
|--------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|----------------|-----------------------|
| 北京           | 517.00    | 794.54    | 973.97    | 1203.22   | 1651.28   | 2823.74   | 1327.29        | 446.17                |
| 天津           | 183.81    | 185.65    | 162.60    | 230.42    | 433.32    | 533.23    | 288.17         | 190.10                |
| 河北           | 6075.57   | 6891.13   | 7541.91   | 9701.58   | 12483.05  | 15915.79  | 9768.17        | 161.96                |
| 山西           | 5192.37   | 6538.68   | 7182.77   | 8855.38   | 11283.01  | 14972.05  | 9004.04        | 188.35                |
| 内蒙古          | 103891.81 | 113724.85 | 127615.18 | 136382.15 | 155856.92 | 176911.54 | 135730.41      | 70.28                 |
| 辽宁           | 15660.99  | 18695.00  | 20247.04  | 23433.31  | 29016.75  | 34465.17  | 23586.38       | 120.07                |
| 吉林           | 87855.79  | 91125.88  | 94588.36  | 97793.75  | 106882.47 | 117353.68 | 99266.66       | 33.58                 |
| 黑龙江          | 156121.52 | 163432.31 | 159299.86 | 176217.40 | 190562.31 | 213984.31 | 176602.95      | 37.06                 |
| 上海           | 12.30     | 27.72     | 38.51     | 116.95    | 215.89    | 520.75    | 155.35         | 4132.49               |
| 江苏           | 941.29    | 1003.02   | 2647.54   | 4056.86   | 7495.66   | 8161.21   | 4050.93        | 767.02                |
| 浙江           | 10961.26  | 12885.12  | 13364.57  | 19953.44  | 25116.53  | 32571.55  | 19142.08       | 197.15                |
| 安徽           | 7241.92   | 9610.86   | 12016.11  | 15935.99  | 20940.17  | 25703.67  | 15241.45       | 254.93                |
| 福建           | 37268.46  | 42275.72  | 51389.11  | 56114.64  | 70433.86  | 84500.07  | 56996.98       | 126.73                |
| 江西           | 20956.94  | 25844.82  | 37658.09  | 45796.08  | 47314.88  | 58697.63  | 39378.07       | 180.09                |
| 山东           | 1738.11   | 1715.76   | 3709.19   | 7343.35   | 10333.80  | 10613.82  | 5909.00        | 510.65                |
| 河南           | 5582.83   | 6092.10   | 9736.99   | 14986.82  | 19804.48  | 24003.62  | 13367.80       | 329.95                |
| 湖北           | 13852.44  | 15320.13  | 17848.98  | 24262.40  | 33195.18  | 42295.33  | 24462.41       | 205.33                |
| 湖南           | 17549.14  | 23043.60  | 30740.84  | 40440.25  | 38346.33  | 47170.19  | 32881.72       | 168.79                |
| 广东           | 18823.91  | 22853.88  | 32862.29  | 34968.19  | 41339.31  | 54166.94  | 34169.09       | 187.76                |
| 广西           | 24745.20  | 32091.05  | 42259.82  | 54306.07  | 59011.56  | 78492.91  | 48484.43       | 217.20                |
| 海南           | 6598.45   | 7661.36   | 8335.77   | 8427.38   | 10315.31  | 17771.95  | 9851.70        | 169.34                |

续表

| 地区<br>Region       | 1993       | 1998       | 2003       | 2008       | 2013       | 2018       | 平均值<br>Average | 变化率<br>Rate of change |
|--------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|----------------|-----------------------|
| 重庆                 | 2583.97    | 6181.59    | 9779.20    | 13128.23   | 16974.43   | 23956.19   | 12100.60       | 827.11                |
| 四川                 | 151223.53  | 167547.80  | 173249.72  | 184868.58  | 194632.25  | 215600.34  | 181187.04      | 42.57                 |
| 贵州                 | 10879.92   | 16277.48   | 20616.79   | 27813.82   | 34844.30   | 45394.37   | 25971.11       | 317.23                |
| 云南                 | 128049.66  | 148713.99  | 162111.43  | 180011.72  | 196148.93  | 228537.41  | 173928.86      | 78.48                 |
| 西藏                 | 237937.69  | 240523.02  | 262529.19  | 260147.84  | 262066.52  | 264438.45  | 254607.12      | 11.14                 |
| 陕西                 | 32343.99   | 35063.62   | 35654.50   | 39181.94   | 45868.92   | 55454.77   | 40594.62       | 71.45                 |
| 甘肃                 | 19116.01   | 19928.67   | 20279.20   | 22433.48   | 24854.96   | 29181.96   | 22632.38       | 52.66                 |
| 青海                 | 3429.20    | 3788.79    | 4162.14    | 4536.37    | 5017.82    | 5635.24    | 4428.26        | 64.33                 |
| 宁夏                 | 672.69     | 678.04     | 455.13     | 570.16     | 765.01     | 967.58     | 684.77         | 43.84                 |
| 新疆                 | 22663.73   | 29437.14   | 32484.67   | 34872.23   | 38989.10   | 45439.09   | 33980.99       | 100.49                |
| 总量<br>Total amount | 1150671.50 | 1269953.30 | 1401541.47 | 1548089.99 | 1712194.32 | 1976234.52 | 1509780.85     | 71.75                 |

### 3.2 我国各省(市、自治区)森林碳汇量空间关联性分析

#### 3.2.1 我国森林碳汇的全局空间关联性分析

本文利用 Geoda 18.0 和 Stata 15.1 对被解释变量-森林碳汇量进行全局 Moran 检验,选取 Rook 邻接矩阵将海南处理为与广东、广西邻接,作为空间权重矩阵<sup>[39]</sup>。结果如表 2,1993—2018 年,Moran's  $I$  指数均为正值且通过 1% 的显著性水平检验。显示出我国森林碳汇具有显著的全局空间关联性。

表 2 我国森林碳汇量全局 Moran's  $I$  指数检验

Table 2 Global Moran's  $I$  index test of forest carbon sequestration in China

| 指标 Index                                | 1993   | 1998   | 2003   | 2008   | 2013   | 2018   |
|-----------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 全局 Moran's $I$ 指数<br>Global Moran's $I$ | 0.324  | 0.339  | 0.322  | 0.327  | 0.329  | 0.331  |
| $Z$                                     | 3.0901 | 3.3117 | 3.1935 | 3.1974 | 3.1723 | 3.1758 |
| $P$                                     | 0.006  | 0.006  | 0.007  | 0.007  | 0.008  | 0.007  |

如图,Moran's  $I$  指数的变化呈现出不同趋势。

1993—2003 年期间,森林碳汇 Moran's  $I$  指数为倒“V”形的先增加后降低的趋势,在 2003 年之后,又以较为稳定的趋势上升。Moran's  $I$  指数的变动说明我国各省(市、自治区)之间的森林碳汇在空间上的集聚程度并不恒定。1988 年之前,由于我国各地区加大对森林的基础保护并投入大量的资金支持,对各地区 Moran's  $I$  指数的提升起到了促进作用。1998—2003 年之间,为了保护生态环境,维护生态安全,一系列林业重点工程在各地实施。其中包括:天然林保护工程、“三北”防护林以及京津风沙源治理工程等,但是由于各地区保护工程实施的规模和进程存在差异,导致了各地区之间空间集聚效应的降低。2003 年之后,各地区林权改革和退耕还林工程的实施,有效的保护了森林资源,带动了各地区的森林碳汇发展,Moran's  $I$  指数开始稳步提升。

#### 3.2.2 我国森林碳汇的局部空间关联性分析

对森林碳汇的全局关联性分析并没有说明森林碳汇量在各地区之间的局部空间自相关情况。因此,应用局部 Moran's  $I$  指数散点图来进行局部的关联性分析。局部 Moran's  $I$  指数散点图四个象限表示四种空间集

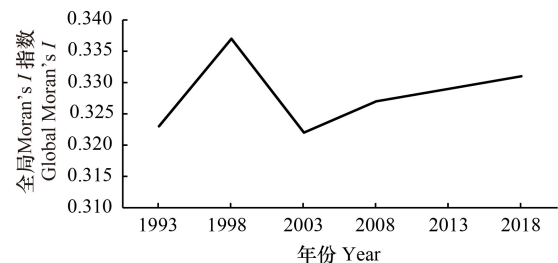


图 1 全局 Moran's  $I$  指数趋势图

Fig.1 Global Moran's  $I$  index trend chart

聚模式,其中,第一象限(H-H)表示高森林碳汇量省(市、自治区)被高森林碳汇量的其他省(市、自治区)所包围;第二象限(L-H),表示低森林碳汇量省(市、自治区)被高森林碳汇量的其他省(市、自治区)所包围;第三象限(L-L),表示低森林碳汇量省(市、自治区)被低森林碳汇量的其他省(市、自治区)所包围;第四象限(H-L)表示高森林碳汇量省(市、自治区)被低森林碳汇量的其他省(市、自治区)所包围。第一、三象限表示森林碳汇之间存在着空间正相关作用,第二四象限表示森林碳汇存在着空间负相关作用。

图2为我国森林碳汇局部 Moran's  $I$  指数散点图。图中各地区基本落入第一、二、三象限,对比 1993 和 2018 年的变化情况。1993 年高高相关省份为:西藏和云南。低高相关省份为青海。2018 年高高相关省份为西藏和云南。低高相关省份为青海和贵州。高高相关的地区主要集中在我国西南地区,优良的森林资源禀赋,森林管理和林业重点保护工程的实施,推动西南地区林业碳汇集聚发展。

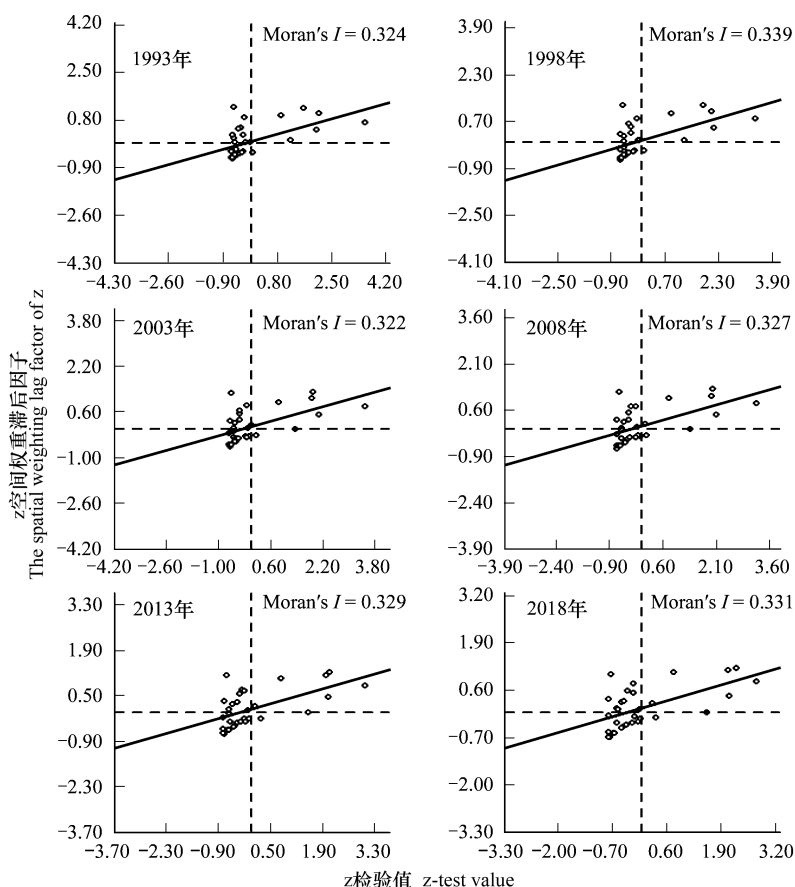


图2 我国森林碳汇 Moran's  $I$  指数散点图

Fig.2 Moran's  $I$  index scatter diagram of forest carbon sink in China

### 3.3 我国各省(市、自治区)森林碳汇空间外溢效应与影响因素分析

#### 3.3.1 空间计量模型的选择

全局和局部空间相关性分析表明我国森林碳汇的空间外溢效应显著,为此,加入空间因素的影响分析外溢效应。

第一步:LM 检验。首先利用 Stata 15.1 软件对所选取变量的面板数据进行 OLS 检验,并根据 LM 检验以及稳健性 LM 检验结果选取空间计量模型。如表 3,林业产业发展水平、森林受灾程度对森林碳汇量存在着显著的负向作用,劳动力要素投入、林业管理水平、森林采伐面积和森林蓄积量水平对森林碳汇量存在显著的正向作用。

表 3 OLS 回归检验结果  
Table 3 OLS regression test results

| 变量 Variable                                  | 回归系数<br>Coefficient | T 统计量<br>T-statistic | 显著性<br>Probability |
|----------------------------------------------|---------------------|----------------------|--------------------|
| 林业产业发展水平 Forestry industry development level | -0.2003             | -4.88                | 0.0000             |
| 劳动力要素投入 Labor factor inputs                  | 0.2991              | 5.62                 | 0.0000             |
| 林业管理水平 Forestry management level             | 0.1205              | 3.26                 | 0.0010             |
| 森林采伐面积 Forest harvesting area                | 0.1449              | 5.13                 | 0.0000             |
| 森林灾害程度 Forest disaster level                 | -0.2436             | -4.24                | 0.0000             |
| 森林蓄积水平 Forest stock level                    | 1.4365              | 12.16                | 0.0000             |
| $R^2$                                        |                     | 0.8855               |                    |

如表 4, LM 检验和稳健性检验都通过了 1% 的显著性检验, 4 个检验均拒绝了原假设, 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, SDM 模型兼具两种效应, 初步判断选择 SDM 模型来进行空间外溢效应的分析。

表 4 LM 和 Robust LM 检验结果  
Table 4 LM and Robust LM inspection results

| 检验统计量 Test statistics                                       | 回归系数 Coefficient | 显著性 Probability |
|-------------------------------------------------------------|------------------|-----------------|
| Moran's I 指数 Moran's I index                                | 5.027            | 0.0000          |
| 拉格朗日乘子检验(无空间滞后) Lagrange Multiplier test (no spatial lag)   | 20.471           | 0.0000          |
| 稳健性检验(无空间滞后) Robust test (no spatial lag)                   | 7.702            | 0.0060          |
| 拉格朗日乘子检验(无空间误差) Lagrange Multiplier test (no spatial error) | 17.083           | 0.0000          |
| 稳健性检验(无空间误差) Robust test (no spatial error)                 | 4.314            | 0.0380          |

第二步: 三种空间计量模型的比较。通过豪斯曼检验对固定效应和随机效应进行选择, 检验结果中, SDM 的豪斯曼检验值为 14.73,  $\text{Prob} > \chi^2 = 0.0225$ , 通过了 5% 的显著性检验。故选用固定效应的空间杜宾模型来进行外溢效应的分析。在空间杜宾模型中引用了解释变量的空间滞后项, 并使用极大似然估计法可以有效地消除内生性问题。由表 5, 在三种空间计量模式的比较中, SDM 模型的  $\sigma^2 = 0.009$ , 优于 SEM 和 SAR 模型, 拟合优度  $R^2 = 0.753$  也优于 SEM 模型。综合考虑, SDM 模型是最理想的, 最终选择固定效应的 SDM 模型进行分析。

第三步: 似然比检验(Likelihood Ratio, LR)。对 SDM 模型进行 LR 检验, 检验空间杜宾模型是否会退化成 SLM 和 SEM 模型。如表 5, LR 检验分别为 15.50 和 25.77, 均通过了 1% 的显著性检验。

综上, 本文最终以固定效应的空间杜宾模型分析森林碳汇的空间外溢效应与影响因素。

### 3.3.2 空间外溢效应分析

SDM 模型的主要参数  $\rho$  的系数为 0.238, 存在着明显的正向效应并经过了 10% 的显著性试验, 数据表明各省(市、自治区)的森林碳汇量之间具有空间溢出效应, 并且相邻区域的森林碳汇水平每变化 1%, 本区域的森林碳会正向变化 0.238%。对邻近地区森林碳汇的溢出效应, 充分体现了地域上的空间关联性。林业产业发展水平、劳动力要素投入水平、林业管理水平、森林采伐面积、森林灾害程度和森林蓄积水平的空间效应分别为: -0.0410、-0.0274、0.0576、-0.0380、0.0528、0.522。其中林业产业发展水平、劳动力要素投入和森林采伐面积对临近省份为负向影响。林业管理水平、森林灾害程度和森林蓄积水平对临近省份为正向影响。

### 3.3.3 空间外溢效应影响因素分析

空间杜宾模型很好地解释了各地区之间的空间经济相关性, 然而参数估计结果并不能将直接作用效果和空间外溢效应直观表现出来, 本文将所选变量对森林碳汇的影响效应分解为直接、间接和总效应来更加清晰地展示影响效果。具体结果如表 6 所示。



表 5 模型回归结果

Table 5 Model regression results

| 变量名称 Variable name                                       | 空间滞后模型 SLM            | 空间误差模型 SEM             | 空间杜宾模型 SDM              |
|----------------------------------------------------------|-----------------------|------------------------|-------------------------|
| 林业产业发展水平<br>Forestry industry development level          | -0.0843 *** (-0.0237) | -0.0949 *** (-0.0258)  | -0.0876 *** (-0.0239)   |
| 劳动力要素投入 Labor factor inputs                              | 0.0253 (-0.0343)      | 0.0293 (-0.0359)       | 0.0365 (-0.0331)        |
| 林业管理水平 Forestry management level                         | 0.0137 * (-0.00789)   | 0.00867 (-0.00828)     | 0.0162 ** (-0.00765)    |
| 森林采伐面积 Forest harvesting area                            | 0.00883 (-0.0104)     | 0.0142 (-0.0111)       | 0.0125 (-0.0102)        |
| 森林灾害程度 Forest disaster level                             | -0.0482 *** (-0.0148) | -0.0556 *** (-0.0152)  | -0.0460 *** (-0.0144)   |
| 森林蓄积水平 Forest stock level                                | 0.790 *** (-0.0832)   | 0.863 *** (-0.0926)    | 0.811 *** (-0.0824)     |
| 空间权重×林业产业发展水平<br>W × Forestry industry development level |                       |                        | -0.0410 (0.0369)        |
| 空间权重×劳动力要素投入<br>W × Labor factor inputs                  |                       |                        | -0.0274 (0.0628)        |
| 空间权重×林业管理水平<br>W × Forestry management level             |                       |                        | 0.0576 *** (0.0217)     |
| 空间权重×森林采伐面积<br>W × Forest harvesting area                |                       |                        | -0.0380 * (0.0215)      |
| 空间权重×森林灾害程度<br>W × Forest disaster level                 |                       |                        | 0.0528 (0.0322)         |
| 空间权重×森林蓄积水平<br>W × Forest stock level                    |                       |                        | 0.522 ** (0.208)        |
| λ                                                        |                       | 0.320 **<br>-0.142     |                         |
| ρ                                                        | 0.382 ***<br>-0.0906  |                        | 0.238 *<br>-0.137       |
| R <sup>2</sup>                                           | 0.768                 | 0.75                   | 0.753                   |
| σ <sup>2</sup>                                           | 0.0101 ***<br>-0.0013 | 0.0110 ***<br>-0.00142 | 0.00909 ***<br>-0.00117 |
| 最大似然估计 Maximum Likelihood Estimate                       | 107.1987              | 102.0643               | 114.9495                |
| 似然比检验 Likelihood Ratio test                              | 15.50 ***             | 25.77 ***              |                         |

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

表 6 空间效应分解

Table 6 Spatial effect decomposition

| 变量<br>Variable                               | 直接效应<br>Direct effect | 间接效应<br>Indirect effect | 总效应<br>Total effect |
|----------------------------------------------|-----------------------|-------------------------|---------------------|
| 林业产业发展水平 Forestry industry development level | -0.0905 *** (0.0245)  | -0.0784 (0.0509)        | -0.169 *** (0.0568) |
| 劳动力要素投入 Labor factor inputs                  | 0.0339 (0.0325)       | -0.0259 (0.0800)        | 0.00802 (0.0914)    |
| 林业管理水平 Forestry management level             | 0.0207 *** (0.00754)  | 0.0802 *** (0.0293)     | 0.101 *** (0.0324)  |
| 森林采伐面积 Forest harvesting area                | 0.00996 (0.00985)     | -0.0443 (0.0280)        | -0.0344 (0.0300)    |
| 森林灾害程度 Forest disaster level                 | -0.0435 *** (0.0143)  | 0.0520 (0.0411)         | 0.00846 (0.0483)    |
| 森林蓄积水平 Forest stock level                    | 0.855 *** (0.0798)    | 0.903 *** (0.207)       | 1.758 *** (0.222)   |

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

一是各变量的直接效应。林业产业发展水平、劳动力要素投入、林业管理水平、森林采伐面积、森林灾害程度和森林蓄积水平的直接效应分别为-0.0905、0.0339、0.0207、0.00996、-0.0435 和 0.855。其中,除了劳动力要素投入和森林采伐面积没有通过 10% 的显著性检验,其余变量均通过 1% 的显著性检验。本地区的林业管理水平和森林蓄积水平的提高会对本地森林碳汇量的提高有着推动作用。林业管理水平的提升会提高森林生态环境保护,使森林的生长更加有序,发展更加充分,森林结构更加立体,促进森林碳汇量的增加。森林蓄积水平反应了地区的优势碳汇树种的数量,单位蓄积水平的提高会提升森林碳汇总量。林业产业发展水平和森林灾害程度为负向效应,表明当今林业产业的发展模式在一定程度和森林碳汇量之间存在着不匹配的因

素,可能的解释是林业产业政策的侧重点和产业类型的偏好与森林碳汇不能很好的融合发展。而森林灾害与病虫害则直接导致树木生物结构的恶化,遏制林木的正常生长。

二是各变量的间接效应,林业产业发展水平、劳动力要素投入、林业管理水平、森林采伐面积、森林灾害程度和森林蓄积水平的间接效应分别为 $-0.0784$ 、 $-0.0259$ 、 $0.0802$ 、 $-0.0443$ 、 $0.0520$ 和 $0.903$ 。其中,只有林业管理水平和森林蓄积水平通过了1%的显著性检验,剩余变量均未通过10%的显著性检验,即本地区的林业产业发展水平、劳动力要素投入、森林采伐面积和森林灾害程度对相邻地区森林碳汇量的间接影响并不明显。林业管理水平的间接效应系数为正,表明一个地区的林业管理水平的提升会产生示范效应,使得空间相邻地区也会在林业管理水平上向该地区学习,造成相邻省份的林业管理水平也有一定程度的提升,从而提高森林碳汇水平。森林蓄积水平的间接效应系数为正,由于相邻省份的树种在地理位置上的相似性,树种蓄积能力类似,森林碳汇水平有着带动作用。

三是各变量的总效应,林业产业发展水平、劳动力要素投入、林业管理水平、森林采伐面积、森林灾害程度和森林蓄积水平的总效应分别为: $-0.169$ 、 $0.00802$ 、 $0.101$ 、 $-0.0344$ 、 $0.00846$ 、 $1.758$ 。其中,林业产业发展水平、林业管理水平和森林蓄积水平均通过了1%的显著性检验,剩余变量没有通过10%的显著性检验。说明劳动力要素投入、森林采伐面积和森林灾害程度对森林碳汇量的空间溢出影响并不显著。林业产业发展水平的总效应、直接效应和间接效应系数均为负,但间接效应未通过10%的显著性检验。说明林业产业发展水平对本地区的森林碳汇量有负向影响,但是对相邻省份的影响并不明显。林业管理水平的总效应、直接效应和间接效应系数均为正,且均通过了1%的显著性检验。林业管理水平在直观上对森林结构的丰富度,森林树种的抚育度以及森林的生态保护水平等方面存在正向影响。表明林业管理水平不仅对本地区的森林碳汇量有推动作用,而且对相邻地区产生示范和拉动效应,带动相邻地区森林碳汇水平提升。森林蓄积水平的总效应、直接效应和间接效应系数同样均为正。森林蓄积水平反映了当地树种的综合碳汇能力,且临近地区之间由于地理空间的相似性,树种碳汇能力差异不大,因此,森林蓄积水平对本地区和相邻地区的森林碳汇水平都存在着促进作用。

## 4 结论与启示

### 4.1 主要结论

根据我国森林碳汇量的核算及空间外溢效应和影响因素分析结果,本文从森林碳汇量的整体和变化情况、空间外溢效应以及各因素的影响三个方面得到以下结论:

一是我国整体上具有丰富的森林碳汇量。年均碳汇量为1509780.85万t。六次森林资源清查期间,森林碳汇量整体呈上升趋势。由于森林资源禀赋的差异,各地区的森林碳汇量存在较大差异。西藏、云南、四川、黑龙江四个省份的森林碳汇总量较大,占我国碳汇总量的40%以上。天津、上海和宁夏的森林碳汇量处于较低的位置,但是在增长幅度上面,上海市森林碳汇量增速最快。

二是我国各省(市、自治区)森林碳汇量空间关联性分析。我国森林碳汇具有显著的全局空间关联性。1993—2003年期间,森林碳汇Moran's  $I$ 指数为倒“V”形的先增加后降低的趋势,在2003年之后,又以较为稳定的趋势上升。Moran's  $I$ 指数的变动说明我国各省(市、自治区)的森林碳汇在空间上的集聚程度并不恒定。局部Moran's  $I$ 指数反映出高高相关省份为:西藏和云南。低高相关省份为青海和贵州,各个时期变动不大,表明我国森林碳汇已形成高高相关格局,且高高相关的地区主要集中在我国西南地区,由于丰富的森林资源,森林管理和林业重点保护工程的实施,推进了西南地区林业碳汇集聚发展。

三是我国森林碳汇的空间外溢效应及影响因素分析。各省(市、自治区)的森林碳汇量之间存在显著的空间外溢效应。且相邻区域的森林碳汇水平每变化1%,本区域的森林碳汇量正向变化0.238%。其中林业产业发展水平、劳动力要素投入和森林采伐面积对临近省份为负向影响。林业管理水平、森林灾害程度和森林蓄积水平对临近省份为正向影响。对空间外溢效应进行分解:直接效应中,林业管理水平和森林蓄积水平对

本地森林碳汇量有正向影响,林业产业发展水平和森林灾害程度为负向效应。间接效应中,本地区的林业产业发展水平、劳动力要素投入、森林采伐面积和森林灾害程度对相邻地区森林碳汇量的间接影响并不明显。林业管理水平和森林蓄积水平对相邻地区森林碳汇量有正向影响。总效应中,林业管理水平和森林蓄积水平对本地和相邻地区森林碳汇量有正向影响,林业产业发展水平对本地区的森林碳汇量有负向影响,但是对相邻省份的影响并不明显。

## 4.2 政策启示

根据上述研究结论,我国在制定和实施差异化林业碳汇政策时有以下启示:

一是我国森林碳汇量在空间上存在着显著的空间相关性与空间外溢效应,对差异化林业碳汇政策的制定与实施应考虑区位因素,结合相邻地区的森林资源禀赋和林业产业发展水平进行林业发展的空间规划,并综合协调各地区林业政策,在“山水林田湖草沙”的命运共同体理念引领下,合理实现森林碳汇林业绿色发展。

二是利用好森林碳汇的空间外溢效应,林业产业发展水平和森林采伐面积对森林碳汇量的总效应影响为负,说明林业产业绿色发展进程中应进行结构上的调整,要调整林业第一产业占比,优化林业第二、第三产业融合发展,促进森林碳汇水平的提升。森林采伐量应合理制定采伐配额,优化采伐侧重于人工林。发挥西南地区与东北林区的辐射作用,带动相邻地区森林资源的合理利用与规划,充分吸收碳汇林项目实施经验。

三是根据各因素对我国森林碳汇影响程度的不同进行相应变革,林业产业的发展模式和森林碳汇之间存在着不匹配的因素,未能很好的与森林碳汇融合发展,要加快林产品加工业发展规模的扩大和发展方式的转变。在林业管理水平和森林蓄积水平方面,森林环境稳定、树种结构多样化、优势碳汇树种扩大化是林业绿色发展的基础,要保持生态、社会、环境三方的协调,差异化实施林业政策制度,确保森林使用权在流转、抵押和担保上的合规性,提供森林碳汇项目实施的政策保证。严格实施采伐限额制度,提高森林管护能力,科学建立应对森林火灾、病虫害的方案。

## 参考文献 (References):

- [1] 庄贵阳, 窦晓铭. 新发展格局下碳排放达峰的政策内涵与实现路径. 新疆师范大学学报(哲学社会科学版), 2021, 42(06): 124-133.
- [2] 李阳, 陈敏鹏. 中国省域农业源非 CO<sub>2</sub> 温室气体排放的影响因素分析与峰值预测. 环境科学学报, 2021, 41(12): 5174-5189.
- [3] 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.
- [4] 王怡然, 王雅晖, 杨金霖, 赵田野, 寇林, 张大红. 黄河流域森林生态安全等级评价与时空演变分析. 生态学报, 2022, 42(6): 2112-2121.
- [5] 毛海凌. 云南省森林碳储量动态变化趋势及对策. 中南林业调查规划, 2021, 40(1): 56-59.
- [6] 巢清尘. “碳达峰和碳中和”的科学内涵及我国的政策措施. 环境与可持续发展, 2021, 46(2): 14-19.
- [7] 续珊珊. 森林碳储量估算方法综述. 林业调查规划, 2014, 39(6): 28-33.
- [8] 孔蕊, 张增信, 张凤英, 田佳西, 朱斌, 朱敏, 王益明. 长江流域森林碳储量的时空变化及其驱动因素分析. 水土保持研究, 2020, 27(4): 60-66.
- [9] 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.
- [10] 王国胜, 孙涛, 咎国盛, 王棒, 孔祥吉. 陆地生态系统碳汇在实现“双碳”目标中的作用和建议. 中国地质调查, 2021, 8(4): 13-19.
- [11] 付伟, 罗明灿, 陈建成. 碳足迹及其影响因素研究进展与展望. 林业经济, 2021, 43(8): 39-49.
- [12] 姜晓艳, 吴相利. 林业资源型城市生态-经济-社会协调发展的定量测度——以黑龙江省伊春市为例. 生态学报, 2021, 41(21): 8396-8407.
- [13] 李顺龙. 森林碳汇经济问题研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2005.
- [14] 马学威, 熊康宁, 张俞, 赖佳丽, 张仕豪, 季传泽. 森林生态系统碳储量研究进展与展望. 西北林学院学报, 2019, 34(5): 62-72.
- [15] 张颖, 李晓格. 碳达峰碳中和目标下北京市森林碳汇潜力分析. 资源与产业, 2022, 24(1): 15-25.
- [16] Schroeder P. Can intensive management increase carbon storage in forests? Environmental Management, 1991, 15(4): 475-481.
- [17] Golub A, Hertel T, Lee H L, Rose S, Sohngen B. The opportunity cost of land use and the global potential for greenhouse gas mitigation in agriculture and forestry. Resource and Energy Economics, 2009, 31(4): 299-319.
- [18] Nepal P, Ince P J, Skog K E, Chang S J. Projection of US forest sector carbon sequestration under US and global timber market and wood energy

- consumption scenarios, 2010—2060. *Biomass and Bioenergy*, 2012, 45: 251-264.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] 黄晶晶, 李玲玲, 徐琳瑜. 基于外溢生态系统服务价值的区域生态补偿机制研究. *生态学报*, 2021, 41(17): 6994-7001.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] Fang J, Chen A, Peng C, Zhao S, Ci L. Changes in forest biomass carbon storage in China between 1949 and 1998. *Science*, 2001, 292(5525): 2320-2322.
- [26] Keeling R F, Piper S C, Heimann M. Global and hemispheric CO<sub>2</sub> sinks deduced from changes in atmospheric O<sub>2</sub> concentration. *Nature*, 1996, 381(6579): 218-221.
- [27] Goulden M L, Munger J W, Fan S M, Daube B C, Wofsy S C. Exchange of carbon dioxide by a deciduous forest: response to interannual climate variability. *Science*, 1996, 271(5255): 1576-1578.
- [28] 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. *资源科学*, 2016, 38(2): 290-299.
- [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] 孙丽文, 赵鹏, 李少帅, 杜娟. 中国省域碳锁定空间溢出效应及影响因素分析——基于空间面板模型的实证检验. *科技管理研究*, 2020, 40(3): 225-232.
- [31] 徐敬俊, 张洁, 余翠花. 海洋碳汇渔业绿色发展经济外溢效应评价研究. *中国人口·资源与环境*, 2020, 30(6): 136-145.
- [32] 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.
- [33] Garten Jr C T. Soil carbon storage beneath recently established tree plantations in Tennessee and South Carolina, USA. *Biomass and Bioenergy*, 2002, 23(2): 93-102.
- [34] 李奇, 朱建华, 冯源, 肖文发. 中国森林乔木林碳储量及其固碳潜力预测. *气候变化研究进展*, 2018, 14(3): 287-294.
- [35] Li C, Wu K, Gao X. Manufacturing industry agglomeration and spatial clustering: evidence from Hebei Province, China. *Environment, Development and Sustainability*, 2020, 22: 2941-2965.
- [36] 刘华军, 王耀辉, 雷名雨. 中国战略性新兴产业的空间集聚及其演变. *数量经济技术经济研究*, 2019, 36(7): 99-116.
- [37] Cheng Z. The spatial correlation and interaction between manufacturing agglomeration and environmental pollution. *Ecological Indicators*, 2016, 61, 1024-1032.
- [38] Chen Z, Zhu H, Zhao W, Zhao M, Zhang Y. Spatial agglomeration of China's forest products manufacturing industry: measurement, characteristics and determinants. *Forests*, 2021, 12(8), 1006.
- [39] 孟斌, 王劲峰, 张文忠, 刘旭华. 基于空间分析方法的中国区域差异研究. *地理科学*, 2005, 25(4): 11-18.