

中国森林碳汇的区域差异及动态演进分析

薛龙飞¹ 罗小锋^{2*} 李容容² 余威震²

(1. 河北经贸大学 商学院, 石家庄 050061;

2. 华中农业大学 经济管理学院, 武汉 430070)

摘要 基于1988—2013年全国森林资源清查数据,采用改进的森林蓄积量法估算了中国大陆31个省(市、区)的森林碳汇量,并以单位面积森林碳汇量为指标,借助Dagum基尼系数和Markov链方法系统分析了中国森林碳汇的区域差异及其动态演进趋势。结果表明:1)中国森林碳汇在省域间存在较大差距,由南方林区向西南、东北林区递增变化;2)Dagum基尼系数及其分解结果显示,中国森林碳汇的地区差异呈波动下降趋势。从四大林区来看,南方、北方和东北地区内差距与全国一致,基本呈下降趋势。而西南地区内差距呈现先上升后下降趋势。地区间差距是造成中国森林碳汇区域差异的首要原因,并且地区间净差距和超变密度差距对全国总体差异的贡献率呈此消彼长的“∞”型变化。3)Markov链分析发现,不同水平的森林碳汇地区间跨区流动的可能性较低。但从动态演进来看,中国森林碳汇呈上升态势,预期较低水平的省份将逐步减少,整体向着高水平趋势发展。

关键词 森林碳汇; 区域差异; Dagum基尼系数; Markov链

中图分类号 X196;S718.5

文章编号 1007-4333(2018)01-0197-10

文献标志码 A

Regional differences and dynamic evolution of forest carbon sink in China

XUE Longfei, LUO Xiaofeng*, LI Rongrong, YU Weizhen

(1. College of Business, Hebei University of Economics and Business, Shijiazhuang 050061, China;

2. College of Economics & Management, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China)

Abstract Based on the data of forest resources inventory during 1988 – 2013 in China, the forest carbon sink of 31 provinces is estimated by using an improved forest inventory method. The regional difference and dynamic evolution of forest carbon sink in China are systematically analyzed by means of Dagum Gini coefficient and Markov chain method. The results indicated that: 1) There is a large gap in the forest carbon sink in each province. It presents the increasing trend of the south region to the southwest and the northeast region; 2) Dagum Gini coefficient and its decomposition results show that the regional difference in forest carbon sink in China show a downward trend. Among four major forest regions, the gaps in the south, the north and the northeast are in line with the whole country, and the trend is basically declining. However the gap in the southwest region is first increased and then decreased. The regional gap is the leading cause of differences in China's forest carbon sink. Moreover, the differences between the net and the over-variable density in the region are an x-shaped contribution to the overall difference in the country; 3) According to Markov chain analysis, different levels of forest carbon transfer are less likely to flow across regions. But from the prospective of dynamic evolution, China's forest carbon sink are on the rise, and lower-level provinces are expected to decline gradually. In addition, the overall trend will move towards higher levels.

Keywords forest carbon sink; regional difference; Dagum Gini coefficient; Markov chain

收稿日期: 2017-03-24

基金项目: 国家社科基金重点项目(15AZD071)

第一作者: 薛龙飞, 博士, E-mail: xueshan001@126.com

通讯作者: 罗小锋, 教授, 主要从事农业经济理论与政策、资源环境与灾害经济研究, E-mail: luoxiaofeng@mail.hzau.edu.cn

IPCC(政府间气候变化专门委员会)第五次评估报告指出,由于人类活动导致的温室气体浓度增加,导致全球气温显著上升,1983—2012年成为过去1400年以来最暖的30年^[1]。实施碳减排、增加碳汇以应对气候变化的影响,成为国际社会的共识^[2]。森林系统作为陆地生态系统中最大的碳库,能有效降低二氧化碳排放量,缓解温室效应^[3]。自2004年中国取代美国成为世界第一大碳排放国以来^[4],中国加大了对森林碳汇功能的重视程度。从中国内部来看,森林资源丰富,但区域间资源禀赋差异明显^[5],不同地区的森林功能有着较大区别,因此森林碳汇和碳储量在时空上也呈现出差异化趋势。合理安排我国减排增汇的空间配置和优化方案,制定行之有效的策略,首先要从森林碳汇的宏观格局和空间特征入手,充分掌握我国森林碳汇的区域差异及其演化趋势。

国内外学者们普遍认为维持丰富的森林生态资源,不仅能够提升生物多样性、涵养水源、保持水土^[6],减少空气中二氧化碳含量、稳定碳循环^[7-8],而且对国家经济增长的稳定性有着正向的生态作用^[9]。随着森林生态功能的凸显,一批学者展开了对森林碳汇量测算的研究。Pan等^[10]根据森林资源清查资料,测算了全球的森林碳吸收量,结果显示1997—2007年的碳储量为 $2.4 \pm 0.4 \text{ PgC}$ 。薛龙飞等^[5]测算出我国森林清查期间的森林固碳量均值为132.82亿t。张旭芳等^[4]把森林碳库纳入到林业碳库核算体系,计算出2013年我国森林碳库的碳储总量达到了175.37亿t,比1993年增长了57.93亿t。或者采用生物量法^[11],或者蓄积量法^[5,12-13],学者们的研究结果都显示森林系统蕴含有丰富的碳储量。但是,也一些学者指出我国单位面积碳汇能力较低,且区域发展差异性较大。徐新良等^[14]研究发现我国单位面积森林碳汇量从20世纪70年代初的 $35\,564 \text{ kg/hm}^2$ 增长到了2003年的 $38\,564 \text{ kg/hm}^2$ 。30年来净增长量仅为 $3\,000 \text{ kg/hm}^2$,甚至在80年代、90年代时期2次出现了负增长。而且从区域分布来看,东北、西南碳储总量大,单位面积碳汇量也比其他地区强。对于森林碳汇的地区差异性变化的原因,Houghton^[15]认为可能来自于气候变化,Risto等^[16]测算发现采伐量会显著降低森林碳储量。除此之外,Canadell等^[8]认为森林固碳能力同样受到了经济社会的影响。虽然造成地区间碳汇差异的原因不同,但我国森林植被碳汇分布存在

明显的空间分布规律。从省域角度来看,西藏、黑龙江的森林碳汇优势明显,并且具有较强的森林固碳能力^[17];从区域角度来看,横断山脉、长白山脉以及大兴安岭南端等是森林碳汇的高集聚区^[18]。也有学者对我国森林碳汇的空间格局进行了模拟分析,得出西南和东北地区是我国最主要的碳库基地^[19]。总之,虽然地区间森林碳汇有了较大的提升,但空间分布差异现象并没有缩小。

从已有研究看,学者们对森林碳汇的测算、空间特征及区域差异的研究取得了一定的进展。但多数文献仍停留在对区域森林碳汇的一般性比较中,而对碳汇的地区差异来源及动态变化未有进一步研究。在绿色减排增汇措施的推动下,森林碳汇和碳储量已成为各方关注的重点,对森林碳汇的地区差异化进行定量测度、比较以及动态变化规律的总结,为实施森林碳汇差别化管理政策显得尤为必要。基于此,本研究根据56类树种的转换系数,采用改进的森林蓄积量法对中国31个省份的碳汇进行了测算。并以单位面积碳汇量为指标,利用Dagum基尼系数和Markov链法,系统分析了中国森林碳汇的区域差异及其动态演进趋势。

1 数据来源与研究方法

1.1 数据来源

森林碳汇的丰富与否很大程度上决定于一个地区拥有的森林面积,并不能客观反映出各地区的森林碳汇水平和固碳能力的差异。为此,本研究采用单位面积碳汇量作为分析森林碳汇水平空间特征及动态演进的指标。其定义为森林碳储存总量与森林总面积之比,其中森林固碳总量包括了林木、林下和土壤三部分碳汇之和。一个地区的单位面积碳汇越多,则表明其固碳能力越强。自1973年开始,我国共进行了8次森林资源清查。并从第3次开始,形成了5年1次的调查模式(1984—1988、1989—1993、1994—1998、1999—2003、2004—2008、2009—2013)。为了研究的延续性和规律性,本研究选取了第3~8次的相关资料。研究样本包括除香港、澳门、台湾之外的中国大陆31个省域数据,所采用的数据来自于1988—2013年连续6次森林资源清查数据。由于在第3~5次森林资源清查中并没有统计重庆的数据,本研究采用了均值插值法进行补充。

1.2 森林碳汇的测算

当前主流研究多采用生物量法和蓄积量法核算

森林碳汇^[11,17,20]。蓄积量法能够从林木、林下和土壤三部分解释森林碳汇和碳流动情况,对于分析地区的森林碳汇更为全面和客观^[4]。但是,以往学者在运用蓄积量法时,对蓄积量和碳汇的转换系数一般选择 IPCC 统计的均值,忽视了不同树种的转换参数有较大差异的事实。为此,本研究运用改进后的蓄积量法,根据《森林经营项目碳汇计量监测指南》^[21]所统计的 56 类主要树种转换系数,对全国森林碳汇进行测算。

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

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

式中: C_F 表示森林碳汇,由表示森林生物量碳汇(C_B)、林下植被碳汇(C_V)、森林土壤碳汇(C_S)三部分组成。 α 、 β 分别表示森林生物碳汇与林下植被碳汇、森林土壤碳汇之间的转换系数,该数值取自 IPCC 报告中公布的 0.195、1.244^[22]; S_{ij} 表示 i 省份的 j 类树种的面积; C_{ij} 表示 i 省份的 j 类树种的碳密度。

$$C_{ij} = V_{ij} \times \delta_j \times \rho_j \times \gamma_j \quad (3)$$

式中: V_{ij} 表示 i 省份的 j 类树种的单位面积蓄积量;生物扩展系数(δ)、容积密度(ρ)和含碳率(γ)为生物量模块转换参数。

1.3 森林碳汇区域差异的 Dagum 基尼系数法

Gini^[23] 提出的基尼系数是分析收入差异的常用工具。随着学科的交叉研究,基尼系数的应用范围扩大到教育、工业、产业以及资源分布等领域。从计算公式看,基尼系数本质上是对某项数据的内在差距进行评价的一种指标。为此,对其他领域的指标内在之间的差距分析同样适用。在资源环境方面,已有学者对地区的碳汇、碳源进行了细致分析^[24]。但是,基尼系数只能从整体上把握资源环境分布的差异特征,并不能揭示其内在差异的来源。在此基础上,Dagum^[25]对基尼系数做了进一步的完善。Dagum 基尼系数法不仅满足了对森林碳汇的一般性分析,还能进一步挖掘出区域内(间)及超变因素对总体差距的影响。式(4)中,森林碳汇基尼系数用 G 表示, n 、 k 分别代指省份个数及区域划分个数。 n_j (n_h) 表示为 j (h) 区域内省份的个数, y_{ij} (y_{hr}) 代表第 j (h) 地区内某一省份的森林碳汇, \bar{y} 则表示全国所有省份的平均值。

$$G = \frac{1}{2n^2 \bar{y}} \sum_{j=1}^k \sum_{h=1}^k \sum_{i=1}^{n_j} \sum_{r=1}^{n_h} |y_{ji} - y_{hr}| \quad (4)$$

Dagum 基尼系数包括:地区内差异(G_w)、地区间差异(G_{nb})、超变密度(G_t),三者满足 $G = G_w + G_{nb} + G_t$ 。超变密度(G_t)是对研究对象进行分类划分时,由于交叉项(残差项)的存在,而对地区总基尼系数产生的影响。 G_{jj} 表示 j 地区的基尼系数, G_{jh} 表示地区 j 与 h 间的基尼系数, D_{jh} 表示地区 j 与 h 间碳汇量的相对影响。

$$G_w = \sum_{j=1}^k p_j s_j G_{jj} \quad (5)$$

$$G_{nb} = \sum_{j=2}^k \sum_{h=1}^{j-1} (p_j s_h + p_h s_j) G_{jh} D_{jh} \quad (6)$$

$$G_t = \sum_{j=2}^k \sum_{h=1}^{j-1} (p_j s_h + p_h s_j) G_{jh} (1 - D_{jh}) \quad (7)$$

$$G_{jj} = \frac{1}{2n_j^2 \bar{Y}_j} \sum_{h=1}^{n_j} \sum_{r=1}^{n_j} |y_{ji} - y_{jr}| \quad (8)$$

$$G_{jh} = \frac{1}{n_j n_h (\bar{Y}_j + \bar{Y}_h)} \sum_{i=1}^{n_j} \sum_{r=1}^{n_h} |y_{ji} - y_{hr}| \quad (9)$$

$$D_{jh} = \frac{d_{jh} - q_{jh}}{d_{jh} + q_{jh}} \quad (10)$$

式中: \bar{Y}_j 、 \bar{Y}_h 表示第 j 、 h 地区的森林碳汇均值, $q_j = \frac{n_j}{n}$, $s_j = \frac{n_j \bar{Y}_j}{n \bar{Y}}$ 。公式(10) D_{jh} 中, $d_{jh} - q_{jh}$ 表示地区间碳汇的净差距, $d_{jh} + q_{jh}$ 表示地区间碳汇的平均差距。 d_{jh} 表示当 j 、 h 地区间样本 $y_{ji} > y_{hr}$ 时,所有 $y_{ji} - y_{hr}$ 的数学期望; q_{jh} 表示的是超变一阶距,当 j 、 h 地区间样本 $y_{ji} < y_{hr}$ 时,所有 $y_{hr} - y_{ji}$ 的数学期望。

1.4 森林碳汇动态演进过程的 Markov 链法

基尼系数从整体上描述了森林碳储量水平的区域差异变化及其原因,但对其动态转移情况难以全面呈现。为此,通过构建 Markov 链进行补充分析。Markov 链是时间与状态均离散的随机过程($\{x(t), t \in T\}$)。假设森林碳汇的转移概率只与森林碳汇的状态 i 与 j 有关,与 m 无关,则 Markov 链为:

$$P\{x_{m+1} = j \mid x_0 = i_0, x_1 = i_1, \dots, x_{m-1} = i_{m-1}, x_m = i\} = \{x_{m+1} = j \mid x_m = i\} \quad (11)$$

式(11)是对 Markov 链性质的说明,代表了变量由一种状态转移到另一种状态的概率分布。将全国的森林碳汇划分为 M 种类型,得到 $M \times M$ 维的转移概率矩阵 P 。

$$P = p_{ij} = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & \cdots & p_{1m} \\ p_{21} & p_{22} & \cdots & p_{2m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ p_{m1} & p_{m2} & \cdots & p_{mm} \end{bmatrix} \quad (12)$$

式中： $p_{ij} \geq 0, ij \in M, \sum_{j \in M} p_{ij} = 1, ij \in M$ 。 p_{ij} 为转移概率，即从第*i*种类型转移到第*j*种类型的概率，采用极大似然估计法测算。 P_{ij} 的具体测算方式如下：

$$p_{ij} = \frac{n_{ij}}{n_i} \quad (13)$$

式中： n_{ij} 为样本研究期内第*i*种类型转移到第*j*种类型次数， n_i 为第*i*种类型的总次数，由此转移概率矩阵 $P = \{p_{ij}\}$ 。若地区森林碳汇水平在初始时间为*i*类型，经变换后等级不变，则认为整体状态平稳；若等级提高，则认为地区等级向上提升；反之则表示地区等级向下降低。

2 中国森林碳汇的区域差异

2.1 描述性统计分析

采用 Arc GIS 软件对各省(市、区)的碳汇水平分布图进行绘制。结合我国碳汇发展的实际情况，同时借鉴肖刚等^[26]学者的分类方法，将中国森林碳汇水平划分为 4 种类型：低于全国平均值 50% 的省份作为低水平类型，区间表达为(0, 23.83]；在全国平均值为 50%~100% 的省份作为中低类型，区间表达为(23.83, 47.65]；在全国平均值为 100%~150% 的省份作为中高类型，区间表达为(47.65, 71.48]；高于全国平均值 150% 的省份作为高水平类型，区间表达为(71.48, +∞]。

第一，从碳汇总量来看。由图 1、2 可知，我国森林的碳汇水平在省域间存在较大差距，基本上呈由东部沿海向内陆省份递增的态势。1988—2013 年森林碳汇均值排名前三的省份为西藏、新疆和吉林，单位面积碳汇水平分别为 161.13、112.46 和 103.95 t/hm²，这些地区都属于高水平类型；而上海、山东和北京 3 个地区的单位面积碳汇水平最低，分别为 10.70、13.09 和 17.66 t/hm²。整体而言，我国东北和西南是森林碳汇水平较高的集中地区，一方面由于自然因素，这些地区森林资源丰富，生态环境良好，适宜森林碳汇功能的发展；另一方面，林业产业是当地的重要产业，一大部分资金投入到了森林资源的管理和保护当中，为发挥森林的经济和生态效益提供了重要支撑。

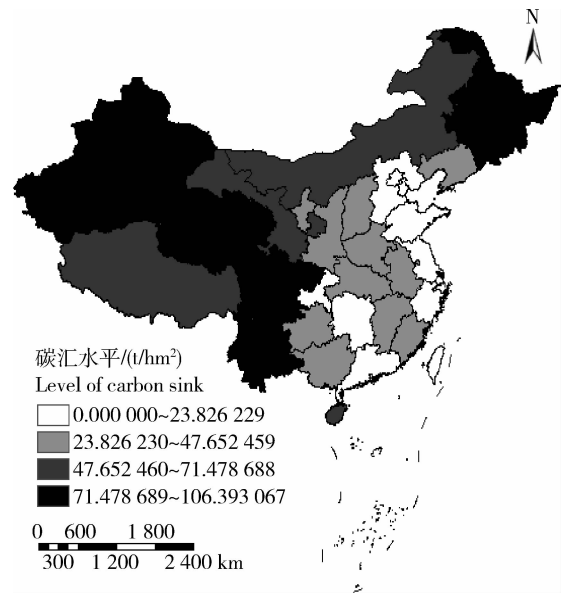


图 1 1988 年中国森林碳汇的地区分布

Fig. 1 Regional distribution of forest carbon sinks in China in 1988

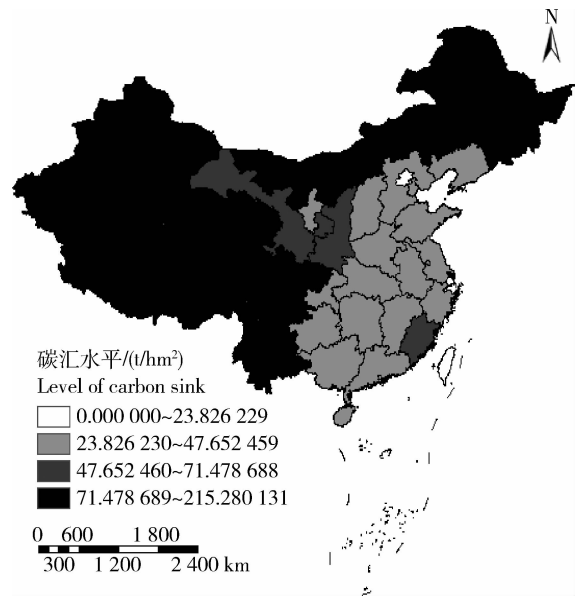


图 2 2013 年中国森林碳汇的地区分布

Fig. 2 Regional distribution of forest carbon sinks in China in 2013

第二，从碳汇增量来看。由图 3 可知，在 1988—2013 年期间，绝大多数地区的碳汇水平都呈正向增长，并且增量保持在 0~23.83 t/hm²。从增长幅度看，山东、西藏、重庆等 11 个省份的碳汇水平增幅超过 50%，青海、宁夏、云南、海南 4 个省(区)碳汇水平略有降低。但全国 31 个省份的单位面积

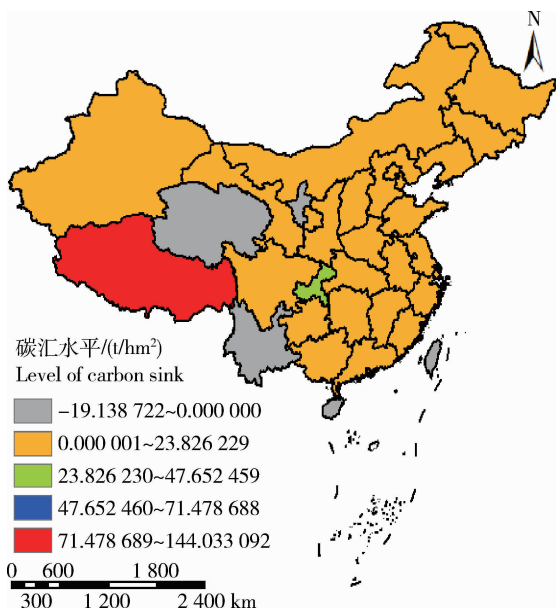


图 3 1988—2013 年中国森林碳汇增量的地区分布

Fig. 3 Regional distribution of forest carbon sinks increment in China from 1988 to 2013

森林碳汇均值从 1988 年的 42.34 t/hm^2 提升到 2013 年的 55.27 t/hm^2 , 增幅为 30.54%, 提高程度明显。这与中国对森林生态效益的重视程度密切相关。在 20 世纪 90 年代初, 中国森林资源面临着自然灾害和超额采伐的双重压力, 生态环境受到严重破坏。为此, 政府相继出台了一些列法律法规, 旨在从制度层面改善生态环境。随着政策效果的凸显, 中国的森林碳汇水平也有了一定程度的提升, 为中国生态环境改善起到了重要作用。

2.2 森林碳汇的区域差异分析

根据森林资源特点和管理方式, 结合《中国林业发展报告》^[27] 和以往学者的研究^[5], 将中国大陆 31 个省(市、区)划分为东北国有林区、南方集体林区、西南混合管理林区和北方少林区 4 个区域^①。运用 Dagum 基尼系数分解法对全国及东北、西南、南方和北方林区的碳汇水平进行测算。

2.2.1 森林碳汇空间分布的总体差距及其变化特征

中国森林碳汇水平基尼系数图(图 4)从总体上描述了地区差距及其演变过程。随着时间的推移, 中国森林碳储量水平的总体差异在波动中呈缩小态势。具体来看, 从 1988 年的 0.382 6 上升到 1993

年的 0.404 8, 1998 年则略有下降至 0.402 0; 到 2003 年达到研究期内的最高值 0.411 0, 相比 1988 年增长了 7.42%。这是由于碳汇水平较高的省份如: 西藏、新疆等在这段时期内有了更大的提升, 而上海、天津等地仍然保持在原有水平上, 地区间差距越来越大。之后的 2008、2013 年连续 2 次大幅下降, 到 2013 年基尼系数为 0.336 4, 对比研究期初下降了 12.08%。可能的原因是 1998 年中国签署《京都议定书》, 主动承担起降低碳排, 增加碳汇的责任, 推动了各地区对森林管理的重视程度。同时, 从 2003 年开始, 由南方林区带动实施的集体林权制度改革提升了林农参与林业发展的积极性。中国的森林管理呈现出正规化、规模化发展方式。但是, 由于植物生产和环境改善的周期性特征, 在 2008 年之后这些效果才开始逐渐凸显。

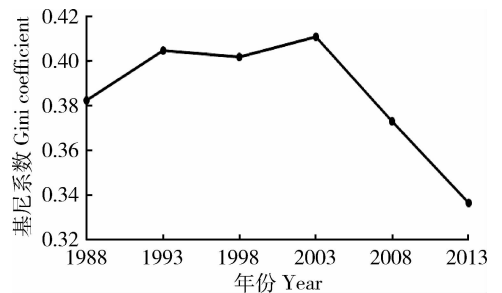


图 4 中国森林碳汇水平总体差异及其演变

Fig. 4 The overall disparity evolution of forest carbon sink in China

2.2.2 森林碳汇空间分布的区域差异及分解

1) 区域内森林碳汇水平的差异分析。基尼系数演变图(图 5)显示, 南方、北方和东北林区与全国的变化基本一致, 整体上呈现下降趋势, 森林碳汇水平空间分布的地区差距在逐渐缩小。并且南方林区基尼系数下降幅度最大, 1988—2013 年降幅为 48.98%。这是因为南方林区如上海、江苏等地在 1988 年远低于平均水平, 经过多年的发展逐步与南方林区其他省份持平。上海、江苏属于少林省(区), 林业产业属于其薄弱产业。改革开放初期, 他们通过植物造林、丘陵山区林业建设、改造荒山等一系列措施, 规划了长期性的林业生态发展计划。同时, 这些地区的经济实力强, 对于林业的支持力度较大, 在

① 东北国有林区, 包括内蒙古、辽宁、吉林和黑龙江; 西南混合管理林区, 包括重庆、四川、云南、西藏; 南方集体林区, 包括上海、江苏、浙江、安徽、福建、江西、湖北、湖南、广东、广西、海南和贵州; 北方少林区, 包括北京、天津、河北、山西、山东、河南、陕西、甘肃、青海、宁夏和新疆。

面对重大森林灾害,如火灾、病虫害时能够及时调整,降低损失,实现森林资源的稳定增长。北方林区碳汇水平基尼系数长期高于其他林区,在2003年之前缓慢上升,之后迅速下降,经历了抛物线式的变动情况。东北林区的下降程度较为平缓,从研究期初的0.2198下降至研究期末的0.1616,降幅为26.50%。东北地区是国有林场的集中地,是中国最大的天然林区和木材生产基地。在1978年之前,长期的“重采轻育”导致东北林区森林资源锐减。为了实现东北国有林区生态和经济功能长期共存的局面,针对当地以落叶松为主的特点,中国政府相继实施了资源保护、环境管理、转型发展等措施,稳定了东北林区的森林碳汇功能。西南林区不同于其他3个林区,在1988—2003年基尼系数波动上升,在2003年达到最高值0.3286。2003年两极分化现象显著,西藏等地高碳汇水平水平的地区出现峰值,而重庆则碳汇水平处于最低水平。2003年之后西南林区区域内差异开始下降,至2013年基尼系数为0.2890,较1988年而言增幅为21.99%。对比4个地区的碳汇水平的变动趋势来看,在1998年之前东北、西南、南方林区区域内差异程度较小,但北方林区差异化较大,远高于其他3个林区。但从2003年开始,北方林区碳汇水平的基尼系数下降并与西南地区基本逐渐接近。由于降水、气温、土壤、海拔等诸多自然条件的约束,长久以来河北、山西、宁夏等地的森林覆盖率低、碳汇林资源少等问题突出。并且北方各省(区)间林业发展和森林管理方式的不同,森林碳汇水平也存在着较大的差异。

2) 区域间森林碳汇水平的差异分析。根据 Dagum

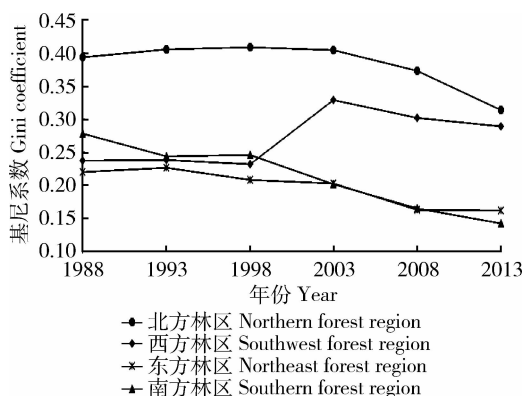


图5 北方、东北、西南、南方林区内基尼系数及其演变

Fig. 5 Gini coefficient of forest carbon sinks in four major forest regions and its evolution

分解的基尼系数,不仅区域内存在差异,区域间的差异同样明显。同一区域内的自然条件、森林资源具有相似性。如南方集体林区,树种以杉木和马尾松为主,是中国重要的森林碳汇库。而区域内的森林碳汇差异很难通过自然环境产生较大的变动,更主要通过人为活动进行改善,如荒山整理、森林抚育、采伐限额等。而对区域间,自然条件、社会环境以及经济发展都有着较大差异,导致区域间森林碳汇水平的扩大或缩小。由图6可知北方、东北、西南和南方四个林区间存在一定的差距,但随着时间的推移地区间的差距变化表现出不同的趋势。北方-东北区域的差异变化较为平缓;北方-西南区域、东北-西南区域间差距都呈先上升后下降趋势;北方-南方林区之间的森林碳汇水平的差距稳定下降;东北-南方呈稳定下降的态势;西南-南方区域之间常年存在较高的差距。

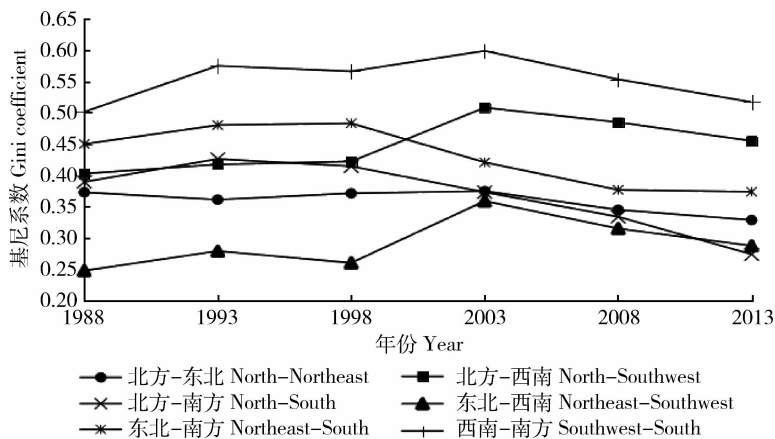


图6 北方、东北、西南、南方林区间基尼系数及其演变

Fig. 6 Gini coefficient of forest carbon sink between four major regions and its evolution

3) 区域森林碳汇水平的差异贡献率分析。由表 1 和图 7 可知, 地区内的差距贡献值呈稳定下降趋势, 对全国的总体差异贡献率也在下降。全国总体差异主要来源于地区间总差距, 其贡献率维持在 77% 以上。地区间总体差距可划分为地区间净差距和地区间超变密度差距, 两者对全国总体差异的贡

献率呈“∞”型此消彼长变化, 交叉上升或下降。地区间超变密度在 1998 年之前贡献率最大, 但近年来其贡献值和贡献率都有所缩小。而地区间的净差距贡献率在研究期初对全国总体差异贡献较小, 之后呈现上升态势, 并在 2013 年成为全国总体差异的主要原因。

表 1 森林碳汇区域差距贡献率的分解结果

Tab. 1 The gap contribution decomposition result of forest carbon sink

| 年份 Year | 全国 Country | 地区内差距 Regional disparity | | 地区间净差距 Net gap between regions | | 地区间超变密度 Over-variable density between regions | | 地区间总差距 Regional total gap | |
|------------|---------------|-----------------------------|----------------------------|-----------------------------------|----------------------------|---|----------------------------|------------------------------|----------------------------|
| | | 贡献值 Contribution value | 贡献率 % Contribution rate | 贡献值 Contribution value | 贡献率 % Contribution rate | 贡献值 Contribution value | 贡献率 % Contribution rate | 贡献值 Contribution value | 贡献率 % Contribution rate |
| 1988 | 0.382 6 | 0.085 7 | 22.39 | 0.140 7 | 36.78 | 0.156 2 | 40.83 | 0.296 9 | 77.61 |
| 1993 | 0.404 8 | 0.084 2 | 20.80 | 0.155 2 | 38.33 | 0.165 5 | 40.88 | 0.320 6 | 79.20 |
| 1998 | 0.402 0 | 0.082 7 | 20.58 | 0.148 5 | 36.95 | 0.170 7 | 42.47 | 0.319 2 | 79.42 |
| 2003 | 0.411 0 | 0.079 3 | 19.28 | 0.181 6 | 44.18 | 0.150 2 | 36.53 | 0.331 8 | 80.72 |
| 2008 | 0.373 0 | 0.070 8 | 18.98 | 0.165 0 | 44.23 | 0.137 2 | 36.78 | 0.302 2 | 81.02 |
| 2013 | 0.336 4 | 0.061 3 | 18.22 | 0.147 8 | 43.94 | 0.127 3 | 37.84 | 0.275 1 | 81.78 |

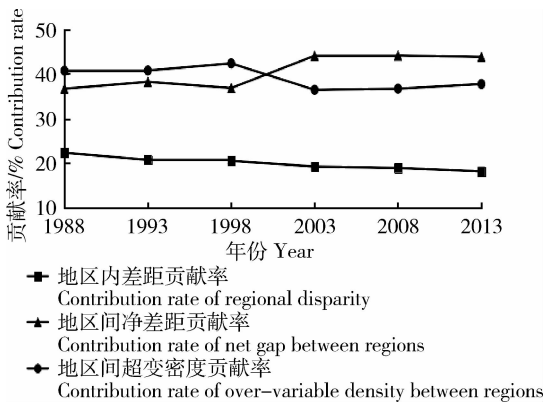


图 7 森林碳汇的区域差距贡献率及其变动趋势

Fig. 7 Trend of contribution rate on forest carbon sink of regional difference in China

3 中国森林碳汇动态演进分析

Dagum 分解的基尼系数可用来刻画森林碳汇地区差异的整体形态和差异的主要来源, 但没有反映各省份森林碳汇的相对位置在时间上的动态变化情况, 也没有说明森林碳汇经过长期演变后处于稳

定状态的情形。为此, 本研究通过估计 Markov 的转移概率矩阵, 考察森林碳汇的动态研究与稳态分布状况。为了方便分析森林碳汇的演进变化, 结合前文划分的森林碳汇水平的四种类型, 把森林碳汇水平在 (0, 23.83] 区间的低水平类型, 用 I 表示; 把森林碳汇水平在 (23.83, 47.65] 区间的中低类型, 用 II 表示; 把森林碳汇水平在 (47.65, 71.48] 区间的中高类型, 用 III 表示; 把森林碳汇水平在 (71.48, +∞) 区间的高水平类型, 用 IV 表示。

表 2 是中国森林碳汇水平的 Markov 转移矩阵概率计算结果。由表 2 可知, 非对角线上的转移概率较低, 而对角线上的转移概率则明显较高。说明不同类型水平的省份之间的流动性较低, 其所处的位置相对固定, 即高水平省份仍有很大概率维持在高水平状态, 而低水平省份则依旧处于低水平状态。具体来看: ①在研究期初处于类型 I (低水平) 的省份, 在研究期末仍有 76% 的省份类型 I 的不变状态, 而有 24% 的省份上升到类型 II (中低水平); ②而对于在研究期初处于类型 II 的省份, 却有 7.55% 的省份森林碳汇水平降低到类型 I。但仍

有 88.68% 的省份维持在类型 II 状态, 3.77% 省份向中高水平的类型 III 流动; ③在研究期初属于类型 III 的省份, 有 78.95% 的维持在原状态, 另有 5.26%、15.79% 的省份转变成了类型 II、类型 IV; ④在研究期初处于高水平类型 IV 的省份更具稳定性, 研究期末仍有 96.97% 的省份保持着高水平, 只有 3.03% 的省份降低为中高水平的类型 III。这也表明, 不同类别的省份往往只会在相邻区间中转移, 而跨区间变动的概率较小, 尤其是从低水平直接过渡到高水平的现象很难出现。通过植物造林和森林

培育, 尤其是近年来开展的碳汇林项目, 改善了中国的生态环境, 提升了各地区的森林覆盖率和碳汇储量, 绝大多数省(区)从低水平转变到了较高的水平上。但是, 森林的碳汇是依托于植被发挥作用的, 即使是合理、科学、精确的森林抚育方式也难以脱离生长周期的限制。树木生长周期长, 短时间内很难发挥出最大的碳汇功能。同时, 幼林的碳汇功能较弱, 而成熟林仅在生长旺盛期的碳储能力最高, 之后呈缓慢衰减的变化。这些客观因素决定了森林碳汇水平很难出现跨区发展。

表 2 1988—2013 年中国森林碳汇的 Markov 转移矩阵概率分布

Table 2 Probability of Markov transfer matrix of Chinese forest carbon sink from 1988 to 2013 %

| 分类 Classifications | 类型 I Type I | 类型 II Type II | 类型 III Type III | 类型 IV Type IV |
|-----------------------|----------------|------------------|--------------------|------------------|
| 类型 I Type I | 76.00 | 24.00 | 0.00 | 0.00 |
| 类型 II Type II | 7.55 | 88.68 | 3.77 | 0.00 |
| 类型 III Type III | 0.00 | 5.26 | 78.95 | 15.79 |
| 类型 IV Type IV | 0.00 | 0.00 | 3.03 | 96.97 |

注: 高, 中高, 中低, 低四种类型分别对应 (0, 23.83], (23.83, 47.65], (47.65, 71.48], (71.48, +∞]

Note: High, upper-middle, lower-middle, low four types correspond (0, 23.83], (23.83, 47.65], (47.65, 71.48], (71.48 +∞]

虽然不同类别省份跨区变动的可能性较低, 那么他们最终的稳定形态是怎样的? 表 3 为 1988—2013 年的初始分布及 Markov 链的稳态分布状况, 显示出长期均衡状态时, 多数地区将处于高水平状

态。相较于初始分布状态下, 类型 I (32.26%)、类型 II (35.48%) 的省份占绝大多数的情况, 发展到稳态分布后类型 I、类型 II 的省份所占的比例分别降为 5.45% 和 17.34%。而处于类型 III 的省份所占的

表 3 中国森林碳汇的初始分布和稳态分布

Table 3 Initial distribution and steady distribution of forest carbon in China %

| 分布状态 Distribution classifications | 类型 I Type I | 类型 II Type II | 类型 III Type III | 类型 IV Type IV |
|--------------------------------------|----------------|------------------|--------------------|------------------|
| 初始分布 Initial Distribution | 32.26 | 35.48 | 12.90 | 19.35 |
| 稳态分布 Steady-State Distribution | 5.45 | 17.34 | 12.43 | 64.78 |

比例基本维持不变,仍然保持在12%以上。处于类型Ⅳ的省份比例变化最大,从初始分布的19.35%上升到64.78%。由此可初步推断,类型Ⅰ和类型Ⅱ省份的森林碳汇水平不具有稳定性,而类型Ⅲ和类型Ⅳ省份的森林碳汇水平则相对稳定。随着各地区对森林生态功能的重视,人力、物力、财力的投资也开始向此倾斜,这些人为因素都促进了森林碳汇水平的提升。研究初期的低、中低水平的森林碳汇水平类型将逐步减少,全国多数地区也将逐步发展到中高水平及以上。

4 结论与讨论

本研究根据中国大陆31个省(市、区)1988—2013年连续六次森林资源清查数据,对中国森林碳汇的区域差异及其动态演进趋势进行了实证分析。结果显示:1)中国森林碳汇省域间存在较大差距,整体上呈由南方向东北和西南地区能力递增的态势。西藏、新疆和吉林等省份碳汇较高,而上海、山东和北京等地碳汇水平较低。2)中国森林碳汇基尼系数在1988—2013年间基本呈波动下降趋势。四个林区间的森林碳汇仍有较大差距,而西南和南方林区较其他区域间的差距更大。Dagum分解基尼系数结果显示,全国总体上的差异主要来源于地区间的总体差距,其中地区间净差距和地区间超变密度差距的贡献率呈“∞”型交叉上升或下降。3)通过Markov链分析区域森林碳汇水平的状态转移,发现不同水平的森林碳汇能力的组间流动性较低,稳定性较强。但整体来看,向较高水平发展是未来的主要趋势。

上述结果表明,随着中国森林碳汇的不断发展,各地区的碳汇水平在整体提升的同时,地区间的差异将逐步缩小。但“西高东低”的整体格局并没有发生根本改变。这不仅受地区间森林资源禀赋差异的影响,同样与各地的管理方式和发展策略相关。在增汇减碳的趋势下,东部地区森林碳汇水平低于中部地区,中部地区低于西部地区的渗透趋势也应逐渐进行转变。为此,中国在发展绿色经济,分解碳减排责任,提高森林生态系统碳汇能力的同时,需要充分考虑森林碳汇系统在地区间的动态流动性以及未来的演变趋势,依据地区功能差异协调东、中、西部的碳汇发展方向,切实完善发展区域森林碳汇和固碳能力提升和优化措施,保障低碳社会的有序构建。

参考文献 References

- [1] Intergovernmental Panel on Climate Change. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis* [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2013
- [2] 吴贤荣,张俊飏,田云,薛龙飞. 中国省域农业碳排放: 测算、效率变动及影响因素研究[J]. 资源科学, 2014, 36(1): 129-138
Wu X R, Zhang J B, Tian Y, Xue L F. Research on China's provincial agricultural carbon emissions performance index and its influencing factors[J]. *Resources Science*, 2014, 36(1): 129-138 (in Chinese)
- [3] 许广月. 中国低碳农业发展研究[J]. 经济学家, 2010, 10: 72-78
Xu G Y. Study on the development of China's low-carbon agriculture[J]. *Economist*, 2010, 10: 72-78 (in Chinese)
- [4] 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 (in Chinese)
- [5] 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[J]. 自然资源学报, 2016(8): 1251-1369
Xue L F, Luo X F, Wu X R. Temporal-spatial dynamics of carbon storage of forest vegetation in China[J]. *Journal of Natural Resources*, 2016, (8): 1251-1369 (in Chinese)
- [6] De Groot R S, Wilson M A, Boumans R M J. A typology for the classification, description and valuation of ecosystem functions, goods and services[J]. *Ecological economics*, 2002, 41(3): 393-408
- [7] Nepal P, Ince P J, Skog K E, Chang S J. Forest carbon benefits, costs and leakage effects of carbon reserve scenarios in the United States[J]. *Journal of Forest Economics*, 2013, 19(3): 286-306
- [8] Canadell J G, Le Quéré C, Raupach M R, Field C B, Buitenhuis E T, Ciais P, Conway T H, Gillett N P, Houghton R A, Marland G. Contributions to accelerating atmospheric CO₂ growth from economic activity, carbon intensity, and efficiency of natural sinks[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2007, 104(47): 18866
- [9] 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[J]. 自然资源学报, 2013, 28(11): 1835-1845
Li P, Zhang J B. Research on the long-term and short-term dynamic relationship between carbon forestry development and economic growth: Based on the provincial panel data of China in 1998-2010[J]. *Journal of Natural Resources*, 2013(11): 1835-1845 (in Chinese)
- [10] Pan Y, Birdsey R A, Fang J, Houghton R, Kauppi P E, Kurz W A, Phillips O L, Shvidenko A, Lewis S L, Canadell J G, Ciais P, Jackson R B, Pacala S W, McGuire A D, Piao S, Rautiainen A,

- Sitch S, Hayes D. A large and persistent carbon sink in the world's forests[J]. *Science*, 2011, 333(6045): 988
- [11] Wojciech G, Kuppers M. Polish forest ecosystems: The influence of changes in the economic system on the carbon balance[J]. *Climatic Change*, 1994, 199: 141-146
- [12] Han F, Plodinec M J. Terrestrial carbon pools in southeast and south-central United States[J]. *Climatic Change*, 2007, 84(2): 191-202
- [13] 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[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(18): 251-261
- Long F, Shen Y Q, Wu W G, Qi H B, Zhu Z, Zhang Z. Measurement and optimum design of carbon sequestration efficiency of regional forestland use process[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 29(18): 251-261 (in Chinese)
- [14] 徐新良, 曹明奎, 李克让. 中国森林生态系统植被碳储量时空动态变化研究[J]. *地理科学进展*, 2007, 26(6): 1-10
- Xu X L, Cao M K, Li K R. Temporal-spatial dynamics of carbon storage of forest vegetation in China[J]. *Progress in Geography*, 2007, 26(6): 1-10 (in Chinese)
- [15] Houghton R A. Magnitude, distribution and causes of terrestrial carbon sinks and some implications for policy[J]. *Climate Policy*, 2002, 2(1): 71-88
- [16] Sievänen R, Salminen O, Lehtonen A, Ojanen P, Liski J, Ruosteenoja K, Tuomi M. Carbon stock changes of forest land in Finland under different levels of wood use and climate change[J]. *Annals of Forest Science*, 2014, 71(2): 255-265
- [17] 罗小锋, 薛龙飞, 李兆亮. 林业碳汇经济效益评价及区域协调性分析[J]. *统计与决策*, 2017(2): 121-125
- Luo X F, Xue L F, Li Z L. Economic benefit evaluation and regional coordination analysis of forestry carbon sequestration in China[J]. *Statistics & Decision*, 2017, (2): 121-125 (in Chinese)
- [18] 刘双娜, 周涛, 魏林艳, 舒阳. 中国森林植被的碳汇/源空间分布格局[J]. *科学通报*, 2012, 57(11): 943-950
- Liu S N, Zhou T, Wei L Y, Shu Y. China's forest vegetation carbon sink/source space distribution pattern [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2012, 57(11): 943-950 (in Chinese)
- [19] 赵明伟, 岳天祥, 赵娜, 孙晓芳. 基于 HASM 的中国森林植被碳储量空间分布模拟[J]. *地理学报*, 2013, 68(9): 1212-1224
- Zhao M W, Yue T X, Zhao N, Sun X F. Spatial distribution of forest vegetation carbon stock in China based on HASM[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2013, 68(9): 1212-1224 (in Chinese)
- [20] 李长青, 苏美玲, 杨新, 吉勒图. 内蒙古碳汇资源估算与碳汇产业发展潜力分析[J]. *干旱区资源与环境*, 2012, 26(5): 162-168
- Li C Q, Su M L, Yang X, Ji L T. Carbon sink industry development potential in Inner Mongolia[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2012, 26(5): 162-168 (in Chinese)
- [21] 国家林业局造林绿化管理司. 森林经营项目碳汇计量监测指南[M]. 北京: 中国林业出版社, 2014
- The afforestation of the state forestry administration. *The Guide Carbon Sink Forest Management Project Measurement Monitoring* [M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 2014 (in Chinese)
- [22] United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC). Methodological issues, land-use, land-use change and forestry, submissions from parties[R]. Lyon: Thirteenth Session of the Subsidiary Body for Scientific and Technological Advice (SBSTA), 2000
- [23] Gini C. Variabilità e mutabilità (Variability and mutability) [J]. *C. Cuppini, Bologna*, 1912: 156. Reprinted in *Memorie di metodologica statistica*, Editor, Pizetti E, Salvemini T, Rome: Libreria Eredi Virgilio Veschi, 1955 (in Italian).
- [24] 田云, 张俊彪, 吴贤荣, 程琳琳. 中国种植业碳汇盈余动态变化及地区差异分析[J]. *自然资源学报*, 2015, 30(11)
- Tian Y, Zhang J B, Wu X R, Cheng L L. Research on dynamic change and regional differences of China's planting industry carbon sink surplus[J]. *Journal of Natural Resources*, 2015, 30(11)(in Chinese)
- [25] Dagum C. A new approach to the decomposition of the gini income inequality ratio[J]. *Empirical Economics*, 1997, 22(4): 515-531
- [26] 肖刚, 杜德斌, 李恒, 戴其文. 长江中游城市群城市创新差异的时空格局演变[J]. *长江流域资源与环境*, 2016, 25(2): 199-207
- Xiao G, Du D B, Li H, Dai Q W. The temporal and spatial evolution of city innovation differences in urban agglomeration in the middle reaches of the Yangtze River[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2016, 25(2): 199-207 (in Chinese)
- [27] 国家林业局. 2015 中国林业发展报告: 中文版 [R]. 北京: 中国林业出版社, 2015
- State Forestry Administration. 2015 China forestry development report; Chinese version[R]. Beijing, China Forestry Press, 2015 (in Chinese)