

基于森林资源清查数据的林地利用效率变化研究

许恩银¹, 聂影^{1,2*}, 芮晓东²

(1.南京林业大学经济管理学院,江苏 南京 210037;2.金陵科技学院商学院,江苏 南京 211169)

摘要:【目的】定量分析我国重要林区林地利用效率变化差异及其对生态经济的影响,为制定森林资源管理措施提供参考。【方法】从森林资源变动角度,结合森林面积、蓄积量、生物量和碳储量等4个属性,利用1989—2018年森林资源清查数据,从林区和省级两个尺度上量化分析我国南方林区和西南林区的林地利用效率变化。【结果】研究期间,南方林区碳储量增加1.17 Pg,森林面积、蓄积密度、生物量转换比和碳储量的年变化率分别为1.91%、2.07%、0.40%和4.38%;西南林区碳储量增加0.95 Pg,森林面积、蓄积密度、生物量转换比和碳储量的年变化率分别为1.79%、0.07%、-0.05%和1.81%。各省(市、区)森林蓄积量均增加,其中上海、江苏、贵州和西藏林区面积相对贡献最高,而福建和海南林区面积及蓄积密度(即单位面积蓄积)增长速度不均衡将影响后期发展,云南和西藏蓄积密度下降导致蓄积量增长缓慢。各省森林均发挥碳汇作用,南方林区固碳能力优势突出,上海和江苏最为显著,西南林区三省(自治区)林区碳汇均处于缓慢发展水平。【结论】为提高林地利用效率,西南林区应继续提升退耕还林力度,提高补偿标准和年限;对于林龄结构不合理的天然林,应进行可持续经营管理,人为促进更新过熟林以提高其更新能力。南方林区应积极发展造林再造林项目和重点地区速生林工程,发挥人工林生长迅速、在较长时间内维持碳汇能力稳定上升的优势。

关键词:林地利用效率;森林资源;价值属性;林区;碳汇

中图分类号:S718;S757

文献标志码:A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

文章编号:1000-2006(2022)05-0213-08



Analysis on the forest land use efficiency changes based on forest resource inventory data

XU Enyin¹, NIE Ying^{1,2*}, RUI Xiaodong²

(1.College of Economic and Management, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China;

2.College of Business, Jinling Institute of Technology, Nanjing 211169, China)

Abstract: 【Objective】Quantitative analysis of the difference in forest land use efficiency and its eco-economic impact in important forest regions of China can provide a reference for formulating forest resource management measures. 【Method】From the perspective of changes in forest resources, combined with the four attributes of forest area, volume, biomass, and carbon storage, and using forest inventory data for China from 1989 to 2018, the changes in forest land use efficiency in the southern and southwest forest regions are quantitatively analyzed at the forest area and provincial scales. 【Result】During the study period, carbon storage in the southern forest region increases by 1.17 Pg, and the annual change rates for the forest area, volume density, biomass ratio, carbon storage are 1.91%, 2.07%, 0.40%, and 4.38%, respectively. The carbon storage in the southwest forest region increased by 0.95 Pg, and the annual change rates of these attributes are 1.79%, 0.07%, -0.05%, and 1.81%, respectively. The volume has increased for all the provinces, among which Shanghai, Jiangsu, Guizhou, and Tibet have the highest relative contribution. However, the unbalanced growth rate of forest area and volume density (volume per unit area) in Fujian and Hainan will influence the later development, while the decline in the volume density in Yunnan and Tibet will lead to slow growth in volume. Forests in all provinces play a key role in carbon sequestration, with the advantages of carbon sequestration being more prominent in the southern forest region, and especially in Shanghai and Jiangsu. The carbon sequestration capacity for the three

收稿日期 Received: 2021-03-08

修回日期 Accepted: 2021-04-29

基金项目:江苏高校哲学社会科学基金项目(2019SJA0475)。

第一作者:许恩银(xuenyin@njfu.edu.cn), 博士生。*通信作者:聂影(ynieh@njfu.edu.cn), 教授。

引文格式:许恩银,聂影,芮晓东. 基于森林资源清查数据的林地利用效率变化研究[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2022, 46(5): 213-220. XU E Y, NIE Y, RUI X D. Analysis on the forest land use efficiency changes based on forest resource inventory data[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2022, 46(5): 213-220. DOI: 10.12302/j.issn.1000-2006.202103017.

provinces in the southwest forest region is at a relatively slow development level.【Conclusion】To improve forest land use efficiency, the government should increase investment and continue to implement the Grain-to-Green Program, while improving the compensation standard and the time limit. Afforestation and reforestation projects and fast-growing forest projects should continue to be actively developed in key areas, to give full play to the advantages of rapid growth of plantations and a stable increase in the carbon sink capacity over longer time scales. For natural forests with an unsuitable age structure, sustainable management should be undertaken to artificially promote the regeneration ability of over-mature forests to improve the decline in volume density and encourage forestry to maximize its carbon sequestration potential.

Keywords: forest land use efficiency; forest resource; valuable attributes; forest region; carbon sink

近年来温室效应日渐加剧,气候变化已对当今经济社会发展造成严重威胁。改革开放40多年来,我国经济保持快速增长并已成为世界第二大经济体,同时也是世界上最大的能源消费国和温室气体排放国之一^[1]。如今我国正处于工业化和城市化的快速发展阶段,环境污染和能源使用效率制约了经济可持续发展^[2]。国内外研究已证明土地利用变化已成为仅次于化石能源燃烧的第二大温室气体排放源,是人类活动影响陆地生态系统碳循环的主要途径^[3-4]。森林储碳功能会促进林地成为全球转变为净碳汇的关键组成部分,对降低大气温室气体浓度以及缓解气候变化起积极作用^[5]。林业研究在全球碳平衡和应对气候变化中具有重要地位^[6]。林地利用效率研究对区域乃至全球都具有重要意义,不仅利于全面评估林地发展情况,确定各类资源对森林碳储量的贡献价值,而且可为政府制定林业政策和宏观决策提供科学依据。

森林作为陆地生态系统主体为人类提供基本服务,是人类和其他生物生存和发展的基础。20世纪80年代初的商业木材市场开放,全国范围经济飞速发展,以及如今的城市化发展,都大大提高了林地采伐速度,加剧了林地转换^[7-8]。虽然20世纪90年代以后政府开始注重生态退化问题并积极实施一系列生态保护政策,但历史原因造成的森林破碎和损失长期影响林地利用效率,降低森林资源的数量和质量,增加森林管理难度和成本,林业可持续发展受到威胁^[9-11]。提高林地利用效率即在合理利用林地资源的前提下,使林地产出的数量和质量得到明显提升^[8,12-13]。因此,有必要了解我国林地利用效率的现状及其变化趋势,从而对不同林分有针对性地改进管理方式,以最大限度地提高林地利用效率。

森林面积、蓄积量、生物量和碳储量是体现森林资源的价值属性^[14]。森林面积是一个国家或地区评估林地发展状况的第一个指标,对森林面积随时间和空间变化的估计可以描述毁林和重新造林、

植树造林对森林资源数量最直接的影响。不断变化的蓄积量可为现有木材资源提供参考信息,其估计值是估算森林碳吸收量的基础。森林碳储功能促使林业成为缓解气候变化不可替代的部分,因此,及时了解森林碳储量和碳汇能力及其变化趋势,对于减缓气候变化至关重要^[15-16]。评价森林价值属性对于一个国家或地区的宏观政策制定和环境监测具有重要意义,然而大部分只分析个别森林属性,不能提供对林地多层面的综合解析^[17-20]。任何一个森林属性变化都会导致碳储量变化,分析不同资源角度变化对碳储量的影响,更利于估计不同属性对森林总碳储量的相对贡献,综合评估国家或地区森林资源^[21-24]。

根据第9次森林资源清查结果,森林作为我国占主导地位的土地资源之一,面积约2.20亿 hm^2 ,占我国土地面积的22.96%^[25-26]。南方林区作为我国最大的人工林区,碳贡献上升趋势突出,碳贡献增量一直高于其他林区。东北林区和西南林区作为我国重要天然林区,碳贡献增长速度缓慢,而西南林区蓄积量占比下降速度快等问题尤其应该引起重视^[15]。因此,本研究以我国南方林区和西南林区分别作为人工林和天然林的代表区域,利用6个森林资源清查时期数据,从林区和省级两个尺度上评估过去30年林地利用效率变化。最后通过比较两种林区的林地利用效率变化差异及其生态经济影响,进一步识别天然林和人工林缓解气候变化潜力的关键影响因素,从而为森林可持续发展提供理论支持。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

西南林区和南方林区均是我国的重要林区,森林面积占全国森林总面积的61.64%。西南林区是我国第二大天然林区,主要包括四川、云南和西藏三省区交界处的横断山区,以及西藏东南部的喜马拉雅山南坡等地区^[15]。该地区林业用地的利用率

低于全国平均水平,天然林和成、过熟林比重大,发展森林资源的潜力很大。森林类型和树种非常复杂,主要树种有冷杉(*Abies fabri*)、云杉(*Picea asperata*)、高山松(*Pinus densata*)、桦木(*Betula* spp.)和 高山栎(*Quercus semecarpifolia*)等。南方林区为秦岭淮河以南、云贵高原以东的广大地区,是我国最大的人工林区,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 12 个省(市)。该区是我国自然条件最好的地区,森林资源集约经营水平高,林木生长迅速,林业生产潜力大。该区也是我国最大的经济林和竹林基地,主要树种有马尾松(*Pinus massoniana*)、黄山松(*Pinus taiwanensis*)、杉木(*Cunninghamia lanceolata*)和柳杉(*Cryptomeria japonica* var. *sinensis*)等,主要经济林木有油茶(*Camellia oleifera*)、油桐(*Vernicia fordii*)、乌桕(*Sapium sebiferum*)和漆树(*Toxicodendron vernicifluum*)等。

1.2 林地利用效率计算方法

林地利用效率是指在合理利用林地资源的情况下,林地产出的森林资源数量和质量^[8,12-13]。本研究从森林资源变动的角度分析林地利用效率,利用“森林属性”(Forest Identify)的概念来评估森林在近 30 年森林资源清查期间的变化状况^[17-18,21-23,27]。“Forest Identity”方法由 Kauppi 等^[21]开发,首先用可测量的变量定义森林的价值属性,再将它们与逻辑权重结合起来,为全面评估某一区域内的森林资源提供一种有效的分析方法^[21-22]。

森林价值属性分别为面积(A)、蓄积量(V)、生物量(M)和碳储量(Q)。森林面积最直观地体现出森林资源的数量;森林密度(D)即单位面积内活立木的材积总量,可用作衡量森林资源质量的指标。提高森林生物量与蓄积量的转换比(B)能够激励生态系统保护,促进燃料经济发展。碳浓度(C)指生物量中碳的转换率,即碳含量与生物量的比值,采用国际上使用率最高值(0.5)^[28]。各属性及变量之间的逻辑关系如下:

$$V=A \times D; \quad (1)$$

$$M=A \times D \times B=V \times B; \quad (2)$$

$$Q=A \times D \times B \times C=M \times C。 \quad (3)$$

则可得:

$$\frac{d \ln(V)}{d t}=\frac{d \ln(A)}{d t}+\frac{d \ln(D)}{d t}; \quad (4)$$

$$\frac{d \ln(M)}{d t}=\frac{d \ln(A)}{d t}+\frac{d \ln(D)}{d t}+\frac{d \ln(B)}{d t}; \quad (5)$$

$$\frac{d \ln(Q)}{d t}=\frac{d \ln(A)}{d t}+\frac{d \ln(D)}{d t}+\frac{d \ln(B)}{d t}+\frac{d \ln(C)}{d t}。 \quad (6)$$

$$\text{令 } v=\frac{d \ln(V)}{d t}, m=\frac{d \ln(M)}{d t}, q=\frac{d \ln(Q)}{d t}, a=$$

$$\frac{d \ln(A)}{d t}, d=\frac{d \ln(D)}{d t}, b=\frac{d \ln(B)}{d t}, c=\frac{d \ln(C)}{d t}。 \quad (7)$$

则:

$$v=a+d; m=a+d+b; q=a+d+b+c。 \quad (8)$$

式中: a 、 d 、 b 和 c 分别表示森林面积、蓄积密度、生物量转换比和碳浓度的年度变化率。 v 将森林面积变量和木材蓄积密度结合起来,可表示森林总蓄积量的变化属性。从生态角度出发,提高森林面积和蓄积对保护生态系统有积极意义,但从经济角度出发,森林生物质中的燃料能源更值得重视。因此增加单位体积生物量,可使生物量变化率(m)带有经济属性。 q 是4个属性的最终整合,由于碳浓度统一使用0.5,则 $c=0$,生物量变化率(m)和碳储量变化率(q)数值相等^[26]。综合由 a 、 d 、 b 和 c 不同组合联系起来的 v 、 m 和 q ,可发现森林从面积到碳储量的变化情况,分析森林资源的变化情况及林地利用效率。

1.3 数据来源与处理

森林面积和蓄积数据来源于国家林业和草原局科学数据中心公布的第4次至第9次全国森林资源清查报告。森林清查报告未提供森林生物量的详细信息,且研究表明生物量换算因子不是恒定的,随着森林年龄、立地类型和林分密度等因素变化而变化^[29-30]。研究中借鉴 Fang 等^[31]对各优势树种生物量与蓄积量转换比研究的结果,此项数值属于树种特征值,仅与树种有关。因此,各个时期的平均生物量转化率由该区域各省生物量转化率决定,各省具体值则由不同树种特征值按对应时期面积占比加权所得。

2 结果与分析

2.1 林区林地利用效率变化

利用 1989—2018 年第 4 次至第 9 次森林资源清查数据和 Fang 等^[31]研究的林分平均生物量,计算得出了南方林区和西南林区的森林面积(A)、蓄积密度(D)和生物量转换比(B)。采用恒定的碳浓度值 0.5,利用公式(3)估算了各时期林区森林碳储量(Q)。根据公式(4)—(7)估算了研究期间森林各属性的年变化率。在研究期间,南方林区森林碳储量增加了 1.17 Pg,森林面积年变化率(a)、蓄积密度年变化率(d)和生物量转换比年变化率

(b)分别为1.91%、2.07%和0.40%,碳储量年变化率为4.38%,相当于每年碳汇量为38.71 Tg。西南林区森林碳储量增加了0.95 Pg,森林面积、蓄积密度和生物量转换比年变化率分别为1.79%、0.07%和-0.05%,碳储量年变化率为1.81%,相当于每年碳汇量为31.95 Tg(表1)。

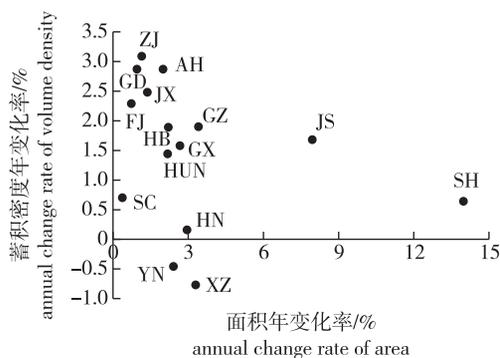
表1 林区各阶段森林面积、蓄积密度、生物量转换比和碳储量

Table 1 Forest area, density of growing stock, biomass ratio, carbon storage in different stages of forest regions

林区 forest region	年份 years	森林面积/ $\times 10^6 \text{ hm}^2$ forest area	蓄积密度/ $(\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2})$ volume density	生物量 转换比/ $(\text{Mg} \cdot \text{m}^{-3})$ biomass ratio	碳储量/ Pg carbon storage
南方 southern	1989—1993	38.04	41.90	0.78	0.62
	1994—1998	44.90	40.14	0.76	0.68
	1999—2003	48.10	48.41	0.74	0.86
	2004—2008	52.77	54.30	0.80	1.14
	2009—2013	57.21	58.60	0.82	1.38
	2014—2018	62.94	67.27	0.84	1.79
西南 southwest	1989—1993	24.91	158.97	0.91	1.80
	1994—1998	27.87	142.92	0.91	1.82
	1999—2003	33.01	156.26	0.91	2.34
	2004—2008	34.79	155.07	0.90	2.43
	2009—2013	35.58	158.40	0.90	2.54
	2014—2018	39.88	153.37	0.90	2.75

2.2 省级林地利用效率变化

森林面积年变化率(a)和蓄积密度年变化率(d)关系见图1。由图1可看出,在实施各项林业



SH.上海 Shanghai; JS.江苏 Jiangsu; ZJ.浙江 Zhejiang; AH.安徽 Anhui; FJ.福建 Fujian; JX.江西 Jiangxi; HB.湖北 Hubei; HUN.湖南 Hunan; GD.广东 Guangdong; GX.广西 Guangxi; HN.海南 Hainan; GZ.贵州 Guizhou; SC.四川 Sichuan; YN.云南 Yunnan; XZ.西藏 Tibet。下同。The same below.

图1 1989—2018年南方和西南林区森林蓄积变化情况

Fig.1 Changes of stock volume in southern and southwest forest regions from 1989 to 2018

管理项目后,两个林区各省份森林面积都有所增加。其中,4个省份的森林面积年增长率>3%,6个省份年增长率为1.5%~3%,5个省份年增长率<1.5%。表明在过去的30年,我国重要林区都积极进行了造林及再造林,尤其上海、江苏、贵州和西藏森林迅速扩张。除云南和西藏外,大多数省份的森林蓄积密度都有所增加(图1)。在蓄积密度增加的省份中,5个省份的年增长率>2%,5个省份为1%~2%,3个省份在1%以下。

森林蓄积量的年变化率(v)是森林面积和蓄积密度的年变化率总和,通过森林面积和蓄积密度的变化情况可看出研究期间各省市、区森林蓄积量的变化情况(图1)。总体来看,林区各省份森林蓄积量均有所增加,其中上海和江苏增长率最高,主要是由于这两个省份森林面积的迅速扩张。贵州、安徽、广西、浙江、湖北、江西、广东和湖南蓄积增长速度较快,且森林面积和蓄积密度贡献较为平均。福建和海南分别呈现“低面积+高密度”增长率和“高面积+低密度”增长率,发展不均匀不利于后期森林管理。云南和西藏的森林面积增加但密度下降,较大的面积增长率弥补了密度的负变化率,使两省(区)的蓄积量依然能维持净增长。四川的森林面积和蓄积密度增长率均在较低水平,导致其蓄积量增长最缓慢。

生物量的变化由森林面积、蓄积密度和生物量转换比共同影响,由于碳浓度值统一使用0.5,则碳浓度变化率为0,因此生物量变化率(m)和碳储量变化率(q)在数值上相同^[28]。各省(市、区)森林面积、蓄积密度和生物量转换比对生物量和碳储量变化的影响见图2。结果表明,15个省(市、区)的森林在研究期间均表现为碳汇,充分发挥固碳功能为减少温室气体做出了贡献。南方林区12个省

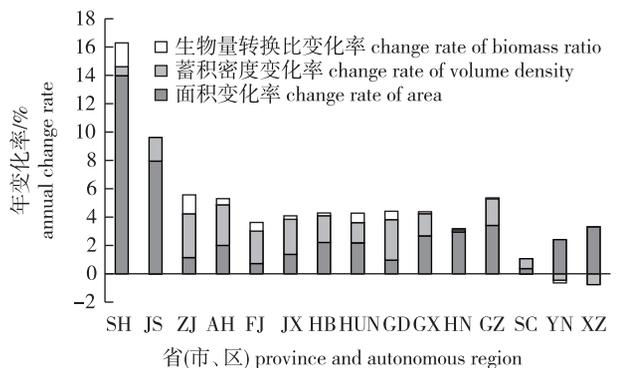


图2 1989—2018年南方和西南林区林地利用效率变化情况

Fig.2 Changes of forest land use efficiency in southern and southwest forest regions from 1989 to 2018

(市、区)的固碳能力表现出明显的优势,其中以上海和江苏最为显著。蓄积密度和生物量转换比增长速度都较低的海南省依靠大量增加森林面积以维持稳定水平的碳储增长率。西南林区的3个省(区)碳储增长率均在较低水平。四川低碳储增长率主要是由于在森林面积和蓄积密度方面增长均较为缓慢,而西藏是由于蓄积密度的下降幅度大,云南则是由于蓄积密度和生物量转换比均出现负增长的现象。

2.3 人工林和天然林资源对碳汇相对贡献的差异

不同森林管理政策和项目将在不同程度上改变各地区森林扩张强度和生长速度,从而对各林分碳储量和蓄积量产生强烈影响。在研究区域所有省(市、区)中,森林面积、蓄积密度和生物量转换比平均年变化率分别为3.18%、1.49%和0.38%,森林面积增加对碳汇的贡献大于后两者。森林面积、蓄积密度和生物量转换比对碳汇能力的相对贡献大小见图3。南方林区作为我国最大的人工林区,可作为人工林代表性研究区域;西南林区作为我国第二大天然林区,林龄偏大和蓄积量下降问题已经逐渐影响森林发展,可作为天然林代表性研究区域。因此,结合图2和图3对南方林区和西南林区进行分析,以探究人工林和天然林不同属性方面对提高碳汇能力相对贡献的差异。

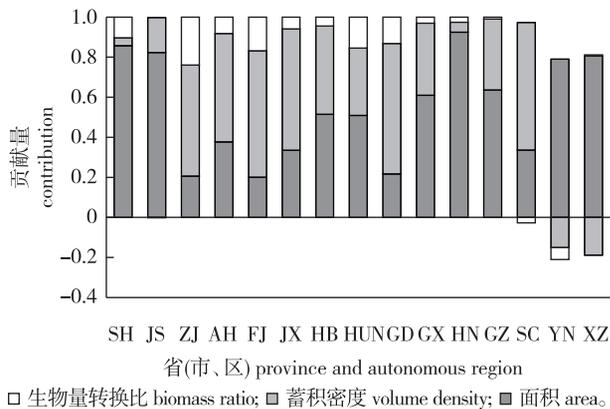


图3 1989—2018年南方和西南林区不同资源对碳汇的相对贡献

Fig.3 Relative contribution of different resources to carbon sinks in southern and southwest forest regions from 1989 to 2018

在研究期,我国人工林和天然林都一直发挥着碳汇作用,森林面积和蓄积密度的增加是人工林碳汇的主要贡献因素,生物量转换比影响不明显,天然林蓄积密度下降成为提高天然林林地利用效率的制约因素。人工林面积扩张迅速,碳汇增强趋势

明显与我国森林生态恢复项目密切相关,包括退耕还林和重点地区速生林工程等,且这些项目覆盖全国97%以上的县市,更广泛地实现生态系统服务多重目标^[32]。快速集中的造林项目利于在短期内扩大森林面积并增强对碳汇的相对贡献,当造林项目实施完成,有利的生长条件和有效的管理促进森林生长,将在较长时间内维持蓄积密度对碳汇的贡献能力,使得人工林碳汇能力保持稳定上升趋势。天然林碳汇主要贡献因素为森林面积增加,这归因于天然林保护工程及后期实行的天然林禁伐政策,大大降低砍伐率并保证森林面积的贡献能力^[26]。而在省级研究结果中显示,蓄积密度对天然林碳汇贡献趋势不固定,在西藏和云南产生负向贡献,在四川却主要是正向贡献因素。这是由于1999年四川成为退耕还林试点省份之一,森林面积在短期内迅速增加,幼林生长对碳汇做出重要贡献,且长期以碳汇能力较强的中龄林和近熟林为主。其他两省与四川相比,林龄偏大且以碳汇能力较弱的过熟林为主^[33]。因此,对于过熟林面积比例较高的天然林地区,应人为促进更新过熟林,进行可持续经营管理以提高过熟林更新能力,增加碳密度较高的树种面积,从而提高生物量转换比,并改善蓄积密度下降现象以增加森林碳汇能力。

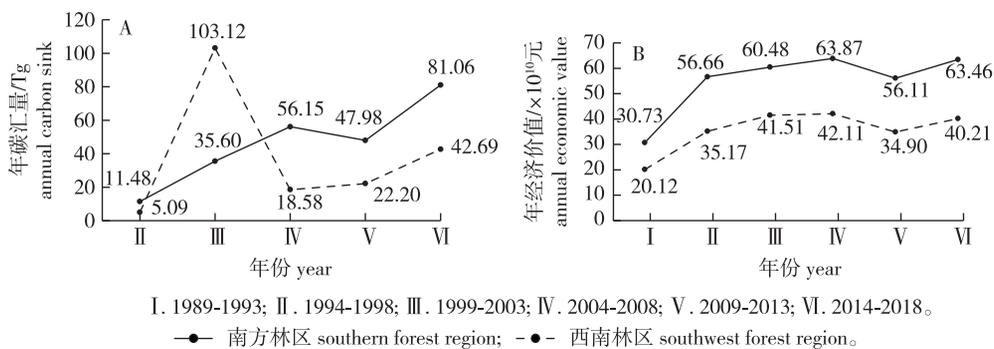
2.4 林地利用效率提高对生态经济的影响

提高林地利用效率指通过森林管理政策和项目实施使森林面积和蓄积密度有所提升,从而增加碳储量并且保障木材生产安全,最终表现在提高碳汇能力和林地价值两方面。本研究基于林分蓄积生物量转化率估算森林植被碳储量,然而森林生态系统碳库包括土壤、植被、凋落物、枯木和木质林产品,仅依据植被碳汇能力评估林地变化的影响,易低估森林对缓解气候变化的作用^[34]。因此,参考美国森林中不同碳库的通量比率来估算我国森林整个生态系统的固碳量情况^[17]。美国森林经历过长期的森林砍伐和农业扩张,随后又在国家鼓励的生态保护项目中逐渐恢复森林系统,与我国森林经历过程相似^[34]。美国森林生态系统不同碳库净变化率之间的比率,即植被、枯木、凋落物、土壤、木质林产品质量比分别为0.49:0.11:0.01:0.02:0.37^[35]。通过这组数据估算1989—2018年我国南方林区平均年碳汇量为79.00 Tg,西南林区平均年碳汇量为65.20 Tg,研究期碳汇变化趋势见图4A。南方林区总体呈现稳定高效上升趋势,继续实施现有森林管理政策利于充分激发该林区碳汇潜力。西南林区在第6次森林资源清查期间

(1999—2003)碳汇量跳跃性提升,之后下降并保持缓慢增长速度。1998年我国开始实施天然林保护工程,1999年开始实施退耕还林政策,这两项措施高效保护了天然林并在短时间内迅速增加了森林面积,是导致1999—2003年碳汇能力剧增的重要原因。其次在对第4次森林资源清查(1989—1993)数据进行处理时,采取统一乘以面积修正系数的方法,西藏此期间的森林面积调整后被高估,使得西南林区1994—1998年的碳汇量被低估,这也是第5次(1994—1998)和第6次(1999—2003)森林资源清查期间碳汇能力差距明显的原因。

森林具有供给、调节、支持和文化服务功能,包括原材料生产、气体调节、气候调节、保持土壤和维持生物多样性等,采用Costanza等^[36]开发的生态系统服务价值系数法估算森林面积变化导致的经济价值变化,即生态系统服务价值当量乘以该土地利用类型面积。谢高地等^[37-38]和方精云等^[39]在我国700位生态学研究者的问卷调查的基础

上,修正得出中国6种土地利用类型的生态系统服务价值的单位面积当量值,该系数表中林地的生态系统服务价值当量值为28.12。研究中1个生态服务价值当量因子的年经济价值量为54美元/hm²,将汇率分别与林地生态系统服务价值当量值相乘,可获得6次森林资源清查期间林地单位面积年经济价值分别为0.81、1.26、1.26、1.21、0.98和1.01万元/hm²。结合林地单位面积经济价值及林地面积变化数据,得出研究区域林地生态系统价值生产情况。第9次森林资源清查期间(2014—2018)与第4次相比,南方林区经济价值增长了1.6365×10¹²元,平均每年增加经济值5.46×10¹⁰元,西南林区增长了1.0042×10¹²元,平均每年增加经济值3.35×10¹⁰元。研究区域林地经济价值的变化状况,受汇率起伏影响,在研究期间两个林区虽然森林面积稳定增长,但经济价值变化趋势类似,总体呈现波动上升趋势,且速度较为缓慢(图4B)。



I. 1989-1993; II. 1994-1998; III. 1999-2003; IV. 2004-2008; V. 2009-2013; VI. 2014-2018.
—●— 南方林区 southern forest region; -●- 西南林区 southwest forest region.

图4 1989—2018年林地利用效率变化对生态经济的影响

Fig.4 Influence of forest land use efficiency change on ecological economy from 1989 to 2018

3 讨论

研究中的不确定性主要来自森林面积和蓄积量数据的精确度以及使用林分蓄积生物量转化率估计各省(区)碳储量的误差。所需的森林面积和蓄积量数据均从全国森林资源清查报告中获取,森林资源清查是目前对林地和林区内资源分布、种类、数量和质量等最全面最准确的森林资源调查工作。统一使用森林清查报告数据,估计各省(区)及不同时期的结果并进行比较分析更具有公平性和可比性。对于森林定义有所不同的第4次森林资源清查,也根据国家林业和草原局的建议对数据进行了修正。使用的林分蓄积生物量转化率来自Fang等^[29,31]关于中国森林植被碳库的研究结果,该项研究基于生物量转换因子连续函数法,并且利

用了大量的生物量实测数据和50年来中国森林资源数据及相关的统计资料。实地测量和统计数据的结合、理论基础和逻辑方法的结合,使得半个世纪以来我国森林植被碳库的动态变化及生态系统功能得到客观展示和评价^[39]。因此,虽然以森林资源清查数据为基础的研究易过度依赖基础数据的更新,存在不可避免的误差,但其反映出来的变化趋势依然具有可比性,可为提高林地利用效率制定针对性措施提供参考。

国家先后颁布了《森林资源规划设计调查主要技术规定》和《国家森林资源连续清查技术规定》,在清查内容和技术标准等多方面做出了改进,这导致前期和后期森林资源清查数据存在不一致。如森林的定义,森林冠层密度标准由>0.3改为≥0.2;原技术规定对灌木经济林没有具体规定,

而连续清查技术规定将灌木林地分为国家特别规定的灌木林和其他灌木林两部分,国家特别规定的灌木林计入森林面积;原技术规定将宜林地划入荒地,而连续清查技术规定将宜林地划为一级地类,可以反映林地资源情况。因此,根据不同区域的林分类型属性建立合适的数据库和生物量模型,利于保证数据的准确性和系统性,进一步提高估算精确度,能更有效地分析不同区域林地利用效率的差异和问题。其次应增加小区域尺度比较研究和实地调查等方法的综合运用,建立样地基础数据的共享平台,降低研究对森林资源清查数据的依赖程度。可提高遥感技术在数据库建立过程中的使用,将不同区域的森林面积、蓄积量、生物量和碳储量估算结合在一起,对于制定森林管理措施、科学提高林地利用效率均有重要意义。

为充分发挥森林在缓解气候变化中的潜力,需因地制宜改进不同类型林分管理方式,提高林地利用效率。根据分析比较两个林区林地利用效率变化差异及其生态经济影响,可知在蓄积密度下降的西南林区,应人为促进更新过熟林,改善林龄偏大的现象并提高森林固碳潜力,尤其林地利用效率最低的四川应积极发展混交林,增加碳密度较高的冷杉和云杉面积;南方林区面积相对贡献低的福建应积极发展造林再造林项目,蓄积密度贡献低的海南应提高速生树种的面积比例。政府应加大投入,继续实施退耕还林工程,提高补偿标准和年限,增加技术支持,从而维持森林面积对林地利用效率的较高贡献。积极实施重点地区速生林工程等,利用有利的生长条件和有效的管理发挥人工林生长迅速、可在较长时间内维持碳汇能力稳定上升的优势。对于林龄结构不合理的天然林区域,应进行可持续经营管理,提高过熟林更新能力,增加碳密度较高的树种面积,从而提高生物量转换比并改善蓄积密度下降现象,激励林业最大限度发挥固碳潜力。

4 结 论

1) 在1989—2018年,我国南方林区森林碳储量增加1.17 Pg,森林面积、蓄积密度、生物量转换比和碳储量年变化率分别为1.91%、2.07%、0.40%和4.38%;西南林区森林碳储量增加0.95 Pg,森林面积、蓄积密度、生物量转换比和碳储量年变化率分别为1.79%、0.07%、-0.05%和1.81%。

2) 各省(市、区)均积极进行造林和再造林,尤其上海、江苏、贵州和西藏森林面积迅速扩张;除云南和西藏外,其他各省蓄积密度都得到提高。各省

(市、区)蓄积量增长幅度不同,其中福建和海南森林面积和蓄积密度增长不均匀将影响后期发展,云南和西藏森林面积增长率需弥补蓄积密度的负向作用,改善蓄积量增长缓慢问题。

3) 研究期间各省(市、区)森林一直发挥碳汇作用,南方林区固碳能力表现出明显优势,以上海和江苏最为显著;西南林区碳汇能力处于较低水平,四川主要是由于森林面积和蓄积密度增长幅度小,而西藏和云南则是由于蓄积密度呈现下降趋势。

4) 参考美国森林生态系统不同碳库净变化率之间的比率,研究期间南方林区生态系统平均年碳汇量为79.00 Tg,西南林区为65.20 Tg;结合林地单位面积经济价值及林地变化数据,研究期间南方林区经济价值增长 1.6365×10^{12} 元,西南林区增长 1.0042×10^{12} 元。

参考文献(reference):

- [1] YU B B. Industrial structure, technological innovation, and total-factor energy efficiency in China[J]. *Environ Sci Pollut Res*, 2020, 27(8): 8371-8385. DOI:10.1007/s11356-019-07363-5.
- [2] DONG Y, JIN G, DENG X Z. Dynamic interactive effects of urban land-use efficiency, industrial transformation, and carbon emissions[J]. *J Clean Prod*, 2020, 270: 122547. DOI:10.1016/j.jclepro.2020.122547.
- [3] YANG H R, ZHENG H, LIU H G, et al. NonLinear effects of environmental regulation on eco-efficiency under the constraint of land use carbon emissions: evidence based on a bootstrapping approach and panel threshold model[J]. *Int J Environ Res Public Health*, 2019, 16(10): 1679. DOI:10.3390/ijerph16101679.
- [4] 张大伟, 胡长群, 何怀江, 等. 吉林省辽河流域土地利用类型演变过程研究[J]. *森林工程*, 2020, 36(5): 45-53, 61. ZHANG D W, HU C Q, HE H J, et al. Study on the evolution process of land use types in Liaohe River basin of Jilin Province[J]. *Forest Engineering*, 2020, 36(5): 45-53, 61. DOI:10.16270/j.cnki.slgc.2020.05.007.
- [5] GRASSI G, HOUSE J, DENTENER F, et al. The key role of forests in meeting climate targets requires science for credible mitigation[J]. *Nat Clim Change*, 2017, 7(3): 220-226. DOI: 10.1038/nclimate3227.
- [6] IPCC. *Climate change 2013: the physical science basis* [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2013. DOI: 10.1007/BF00524943.
- [7] VAN DEN HOEK J, OZDOGAN M, BURNICKI, A, et al. Evaluating forest policy implementation effectiveness with a cross-scale remote sensing analysis in a priority conservation area of Southwest China[J]. *Appl Geogr*, 2014, 47: 177-189. DOI:10.1016/j.apgeog.2013.12.010.
- [8] HE Y F, XIE H L, FAN Y H, et al. Forested land use efficiency in China: spatiotemporal patterns and influencing factors from 1999 to 2010[J]. *Sustainability*, 2016, 8(8): 772. DOI:10.3390/su8080772.
- [9] LI L C, LIU J L, CHENG B D, et al. Effects of economic globalization and trade on forest transitions: evidence from 76 developing countries[J]. *For Chron*, 2017, 93(2): 171-179. DOI:10.5558/ufc2017-023.
- [10] LI L C, CHHATRE A, LIU J L. Multiple drivers and pathways to China's forest transition [J]. *For Policy Econ*, 2019, 106:

101962. DOI:10.1016/j.forpol.2019.101962.
- [11] KASTNER T, ERB K H, NONHEBEL S. International wood trade and forest change: a global analysis[J]. *Glob Environ Change*, 2011, 21(3): 947-956. DOI:10.1016/j.gloenvcha.2011.05.003.
- [12] LI L C, LIU J L, LONG H X, et al. Economic globalization, trade and forest transition; the case of nine Asian countries[J]. *For Policy Econ*, 2017, 76: 7-13. DOI:10.1016/j.forpol.2015.12.006.
- [13] 刘珉. 森林资源变动及其影响因素研究[J]. *林业经济*, 2014, 37(1): 80-86. LIU M. Study on fluctuation and influencing factors of forest resources[J]. *For Econ*, 2014, 37(1): 80-86. DOI:10.13843/j.cnki.lyjj.2014.01.011.
- [14] FENG J G, WANG J S, YAO S C, et al. Dynamic assessment of forest resources quality at the provincial level using AHP and cluster analysis[J]. *Comput Electron Agric*, 2016, 124: 184-193. DOI:10.1016/j.compag.2016.04.007.
- [15] 许恩银, 王维枫, 聂影, 等. 中国林业碳贡献区域分布及潜力预测[J]. *中国人口·资源与环境*, 2020, 30(5): 36-45. XU E Y, WANG W F, NIE Y, et al. Regional distribution and potential forecast of China's forestry carbon contributions[J]. *China Popul Resour Environ*, 2020, 30(5): 36-45. DOI:10.12062/cpre.20200105.
- [16] 朱坤, 彭建松, 张文莉, 等. 曲靖市森林生态系统固碳释氧的生态效益[J]. *森林工程*, 2022, 38(2): 34-43. ZHU K, PENG J S, ZHANG W L, et al. Ecological benefits and value evaluation of carbon fixation and oxygen release in Qujing City[J]. *Forest Engineering*, 2022, 38(2): 34-43. DOI:10.16270/j.cnki.slge.2022.02.002.
- [17] FANG J Y, GUO Z D, HU H F, et al. Forest biomass carbon sinks in East Asia, with special reference to the relative contributions of forest expansion and forest growth[J]. *Glob Change Biol*, 2014, 20(6): 2019-2030. DOI:10.1111/gcb.12512.
- [18] LI P, ZHU J, HU H F, et al. The relative contributions of forest growth and areal expansion to forest biomass carbon[J]. *Biogeosciences*, 2016, 13(2): 375-388. DOI:10.5194/bg-13-375-2016.
- [19] KÖHL M, LASCO R, CIFUENTES M, et al. Changes in forest production, biomass and carbon: results from the 2015 UN FAO global forest resource assessment[J]. *For Ecol Manag*, 2015, 352: 21-34. DOI:10.1016/j.foreco.2015.05.036.
- [20] 张春华, 王莉媛, 宋茜薇, 等. 1973—2013年黑龙江省森林碳储量及其动态变化[J]. *中国环境科学*, 2018, 38(12): 4678-4686. ZHANG C H, WANG L Y, SONG Q W, et al. Biomass carbon stocks and dynamics of forests in Heilongjiang Province from 1973 to 2013[J]. *China Environ Sci*, 2018, 38(12): 4678-4686. DOI:10.19674/j.cnki.issn1000-6923.2018.0528.
- [21] KAUPPI P E, AUSUBEL J H, FANG J Y, et al. Returning forests analyzed with the forest identity[J]. *PNAS*, 2006, 103(46): 17574-17579. DOI:www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.0608343103
- [22] WAGGONER P E. Using the Forest Identity to grasp and comprehend the swelling mass of forest statistics[J]. *Int For Rev*, 2008, 10(4): 689-694. DOI:10.1505/for.10.4.689.
- [23] MARCOS-MARTINEZ R M, BRYAN B A, SCHWABE K A, et al. Forest transition in developed agricultural regions needs efficient regulatory policy[J]. *For Policy Econ*, 2018, 86: 67-75. DOI:10.1016/j.forpol.2017.10.021.
- [24] CRESPO CUARESMA J C, DANYLO O, FRITZ S, et al. Economic development and forest cover: evidence from satellite data[J]. *Sci Rep*, 2017, 7: 40678. DOI:10.1038/srep40678.
- [25] 董玮, 田淑英, 刘浩. 林业生态经济发展多维度公共政策选择与测度[J]. *中国人口·资源与环境*, 2017, 27(11): 149-158. DONG W, TIAN S Y, LIU H. Choices of public policies for forestry ecological economy development and the multi-dimensional measurements[J]. *China Popul Resour Environ*, 2017, 27(11): 149-158. DOI:10.12062/cpre.20170355.
- [26] 刘臻, 帅忠义, 李琪, 等. 江西省铜鼓县全面禁止天然林商业性采伐经验问题及对策[J]. *林业经济*, 2019, 41(5): 55-59. LIU C, SHUAI Z Y, LI Q, et al. The issues and new policy measures on commercial logging ban on natural forests in Tonggu County of Jiangxi Province[J]. *For Econ*, 2019, 41(5): 55-59. DOI:10.13843/j.cnki.lyjj.2019.05.011.
- [27] SHI L, ZHAO S Q, TANG Z Y, et al. The changes in China's forests: an analysis using the forest identity[J]. *PLoS One*, 2011, 6(6): e20778. DOI:10.1371/journal.pone.0020778.
- [28] PAN Y D, LUO T X, BIRDSEY R, et al. New estimates of carbon storage and sequestration in China's forests: effects of age-class and method on inventory-based carbon estimation[J]. *Clim Change*, 2004, 67(2/3): 211-236. DOI:10.1007/s10584-004-2799-5.
- [29] FANG J Y, CHEN A P, PENG C H, et al. Changes in forest biomass carbon storage in China between 1949 and 1998[J]. *Science*, 2001, 292(5525): 2320-2322. DOI:10.1126/science.1058629.
- [30] FANG J Y, GUO Z D, PIAO S L, et al. Terrestrial vegetation carbon sinks in China, 1981-2000[J]. *Sci China Ser D*, 2007, 50(9): 1341-1350. DOI:10.1007/s11430-007-0049-1.
- [31] FANG J Y, WANG G G, LIU G H, et al. Forest biomass of China: an estimate based on the biomass-volume relationship[J]. *Ecol Appl*, 1998, 8(4): 1084-1091. DOI:10.1890/1051-0761(1998)008[1084:FBOCAE]2.0.CO;2.
- [32] 严如贺, 柯水发. 经济林种植对人工林木材供给能力的影响: 抑制还是促进? ——基于南方12省份森林资源清查面板数据[J]. *中国农村经济*, 2019(5): 38-53. YAN R H, KE S F. The impact of cultivation of tree crops on timber supply capacity of planted forests: inhibition or promotion? an analysis based on forest inventory panel data in 12 provinces of south China[J]. *Chin Rural Econ*, 2019(5): 38-53.
- [33] 李奇, 朱建华, 范立红, 等. 西南地区乔木林碳储量及木材生产潜力预测[J]. *生态环境学报*, 2018, 27(3): 416-423. LI Q, ZHU J H, FAN L H, et al. Prediction of forest carbon storage and timber yield potential in southwestern China[J]. *Ecol Environ Sci*, 2018, 27(3): 416-423. DOI:10.16258/j.cnki.1674-5906.2018.03.003.
- [34] PAN Y D, BIRDSEY R A, FANG J Y, et al. A large and persistent carbon sink in the world's forests[J]. *Science*, 2011, 333(6045): 988-993. DOI:10.1126/science.1201609.
- [35] WOODBURY P B, SMITH J E, HEATH L S. Carbon sequestration in the US. forest sector from 1990 to 2010[J]. *For Ecol Manag*, 2007, 241(1/2/3): 14-27. DOI:10.1016/j.foreco.2006.12.008.
- [36] COSTANZA R, D'ARGE R, DE GROOT R, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital[J]. *Ecol Econ*, 1998, 25(1): 3-15. DOI:10.1016/S0921-8009(98)00020-2.
- [37] 谢高地, 甄霖, 鲁春霞, 等. 一个基于专家知识的生态系统服务价值化方法[J]. *自然资源学报*, 2008, 23(5): 911-919. XIE G D, ZHEN L, LU C X, et al. Expert knowledge based valuation method of ecosystem services in China[J]. *J Nat Resour*, 2008, 23(5): 911-919. DOI:10.11849/zrzyxb.2008.05.019.
- [38] XIE G D, ZHANG C X, ZHEN L, et al. Dynamic changes in the value of China's ecosystem services[J]. *Ecosyst Serv*, 2017, 26: 146-154. DOI:10.1016/j.ecoser.2017.06.010.
- [39] 方精云, 陈安平, 赵淑清, 等. 中国森林生物量的估算: 对 Fang 等 Science 一文(Science, 2001, 291: 2320~2322)的若干说明[J]. *植物生态学报*, 2002, 26(2): 243-249. FANG J Y, CHEN A P, ZHAO S Q, et al. Estimating biomass carbon of China's forests: supplementary notes on report published in Science (291: 2320-2322) by Fang et al. (2001)[J]. *Acta Phytocool Sin*, 2002, 26(2): 243-249.