

DOI: 10.5846/stxb202206221770

刘晓曼,王超,高吉喜,袁静芳,黄艳,王斌,彭阳.服务双碳目标的中国人工林生态系统碳增汇途径.生态学报,2023,43(14):5662-5673.

Liu X M, Wang C, Gao J X, Yuan J F, Huang Y, Wang B, Peng Y. Approaches to carbon sequestration enhancement in China's plantation ecosystem for carbon peaking and carbon neutrality goals. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(14):5662-5673.

## 服务双碳目标的中国人工林生态系统碳增汇途径

刘晓曼<sup>1</sup>,王超<sup>1</sup>,高吉喜<sup>1,\*</sup>,袁静芳<sup>1,2</sup>,黄艳<sup>1,2</sup>,王斌<sup>3</sup>,彭阳<sup>1</sup>

1 生态环境部卫星环境应用中心,北京 100094

2 中国环境科学研究院,北京 100012

3 中国林业科学研究院亚热带林业研究所,杭州 311400

**摘要:**中国在相对较低的经济发展水平条件下提出了“碳达峰、碳中和”目标,在全球气候治理中起着关键作用。中国是全球人工林面积最多的国家,中国森林生态系统碳储量增加的主要贡献者是人工林,是中国陆地碳汇的主要来源,具有较高的碳汇增长潜力,加强人工林碳增汇方案研究对中国实现“碳达峰、碳中和”目标具有非常重要的作用。研究梳理了中国人工林生态系统碳汇能力提升的主要因子和环节,分别从增加碳汇强度型增汇、保护修复型增汇、减少碳排放型增汇、技术提高型增汇和市场引领型增汇 5 个方面提出了 12 条人工林碳增汇途径,以期为中国实现“碳达峰、碳中和”目标作出更大贡献。

**关键词:**双碳目标;人工林;碳增汇

## Approaches to carbon sequestration enhancement in China's plantation ecosystem for carbon peaking and carbon neutrality goals

LIU Xiaoman<sup>1</sup>, WANG Chao<sup>1</sup>, GAO Jixi<sup>1,\*</sup>, YUAN Jingfang<sup>1,2</sup>, HUANG Yan<sup>1,2</sup>, WANG Bin<sup>3</sup>, PENG Yang<sup>1</sup>

1 Ministry of Ecology and Environment Center for Satellite Application on Ecology and Environment, Beijing 100094, China

2 Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China

3 Research Institute of Subtropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Hangzhou 311400, China

**Abstract:** Under the condition of relatively low economic development level, the goal of “carbon peaking and carbon neutrality” was put forward in China, which will play a key role in global climate governance. China is a country with the largest area of plantations in the world. The main contributor to the increase of carbon stocks in China's forest ecosystem is plantation, which is the main source of terrestrial carbon sequestration and has a high carbon sequestration enhancement potential. So, the research on carbon sequestration enhancement schemes of plantations is very important for China to achieve the goal of “carbon peaking and carbon neutrality”. We combed the main factors for carbon sequestration enhancement of plantation ecosystem in China, and proposed 12 approaches from 5 aspects, including increasing carbon sequestration intensity, protecting and repairing, reducing carbon emissions, improving technology, and market leading in this paper, which will make greater contributions to the goal of “carbon peaking and carbon neutrality”.

**Key Words:** carbon peaking and carbon neutrality goals; plantation ecosystem; carbon sequestration enhancement

气候变化是当今世界面临的最大的非传统安全问题,世界已经进入全球气候变化时代,给人类生存和社

基金项目:国家重点研发计划项目(2022YFF1303403)

收稿日期:2022-06-22; 网络出版日期:2023-03-23

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: gjx@nies.org

#本研究尚缺中国港澳台统计数据。

会经济可持续发展带来巨大的威胁<sup>[1]</sup>。气候变暖给植物种群、生态系统乃至整个生物圈都产生了巨大影响,已成为当今世界人类发展面临的最严峻的挑战之一<sup>[2]</sup>。气候变暖引发了人类社会的广泛关注,已成为当前生态环境领域以及全球关注的热点。中国作为世界人口最多的国家,也是世界最大的碳排放国,面临全球温室气体减排的巨大压力,在全球气候治理中起着关键作用<sup>[3]</sup>。应对气候变化是中国可持续发展的内在要求,也是负责任大国应尽的国际义务,针对气候变化开展了长期而持续的努力,提出了一系列的重大政策和行动(图1)。2020年习近平主席明确向世界表态:中国将脚踏实地落实2030年前CO<sub>2</sub>排放达到峰值,努力争取2060年前实现碳中和目标,为全球应对气候变化作出更大贡献<sup>[4]</sup>。“碳达峰、碳中和”目标,是中国应对全球气候变暖主动提出的“国家自主贡献”,也是基于推动构建人类命运共同体的责任担当,更是中国实现高质量发展和生态文明建设的重要途径,充分体现了中国为维护全球生态安全做贡献的坚定意志和决心<sup>[5]</sup>,其意义不亚于三次工业革命,其过程将会是中国经济社会的大转型,是一场涉及广泛领域的大变革<sup>[6]</sup>。

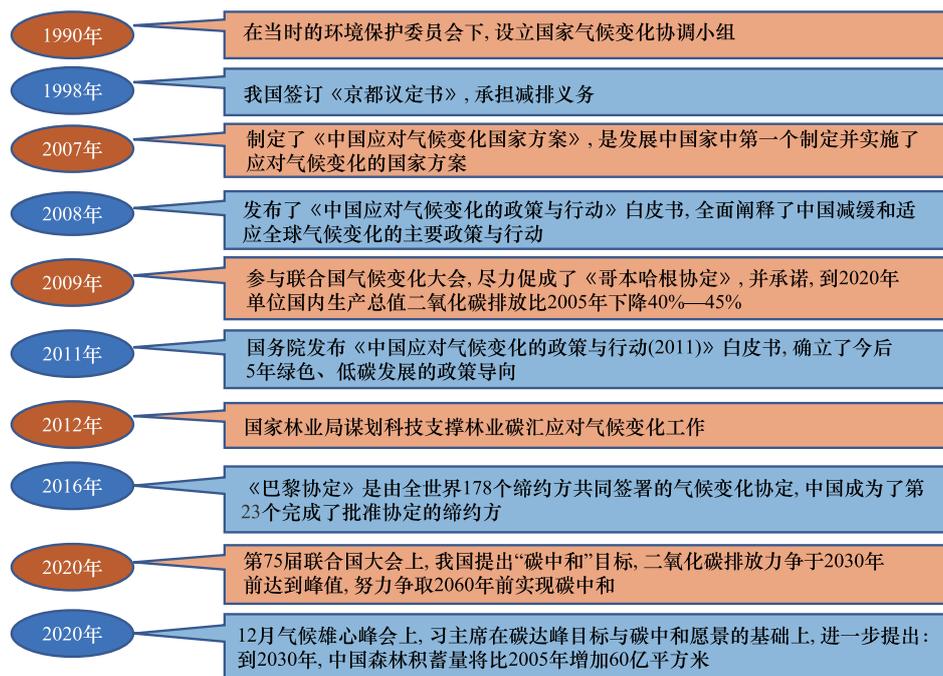


图1 中国应对气候变化重大政策与行动

Fig.1 China's major policies and actions to address climate change

但中国是在相对较低的经济发展水平条件下提出了“碳达峰、碳中和”目标,蕴含着机遇的同时,也面临着前所未有的巨大挑战。中国化石能源占能源总量近85%<sup>[3]</sup>,要把这么大比重的化石能源替换掉是非常困难的,仅仅依靠减排的方式成本巨大影响经济发展,不利于像我国这样新兴的发展中国家大面积施行<sup>[7]</sup>。相对于工业减排,森林碳汇更具成本有效性且存在多种效益,能抵减部分工业的温室气体的排放,减轻中国面对的减排压力,也是世界各国应对气候变化的重要策略和共识<sup>[8]</sup>,充分发挥森林的碳汇功能是降低CO<sub>2</sub>、缓解温室效应的有效措施<sup>[9]</sup>。

当前全球天然林面积急剧减少,人工林已被证实具有巨大的碳储量功能,是森林固碳的主要手段,是增加碳汇最具生态效应、成本最低、最可行、最有效的措施之一<sup>[10]</sup>。作为全球人工林面积增加最快、人工林最多的国家,发展人工林是中国应对气候变化的战略选择之一,对中国陆地生态系统碳汇增强的贡献率高达39%<sup>[11]</sup>,可为国家争取更大的经济发展排放空间,已成为中国实现“碳达峰、碳中和”目标的战略选择。因此研究如何提高人工林生态系统的碳增汇途径,已经成为当前科学研究的热点问题。本文在分析了中国人工林对双碳目标实现的意义及存在问题的基础上,提出服务双碳目标的中国人工林生态系统碳增汇途径和对策,

以期为中国森林经营管理和双碳目标的实现提供支撑。

## 1 人工林生态系统碳汇对服务“碳达峰、碳中和”目标的重要意义

### 1.1 生态系统碳汇的作用

CO<sub>2</sub>的吸收与固定是缓解全球变暖的有效途径之一,对减缓全球气候变暖具有重要意义,也成为全球的重要战略部署和政府行动<sup>[12]</sup>。控制大气 CO<sub>2</sub>浓度升高的核心思路有两种:一是减排,即减少人类活动所产生的温室气体排放;二是增汇,即增加生态系统吸收 CO<sub>2</sub>的能力来抵消工业中的碳排放<sup>[13]</sup>,这已成为缓解气候变暖的首要任务和广泛共识<sup>[14]</sup>。但减排的方式因为技术难度和成本高而阻力较大。研究表明,生态系统固碳的成本比工业减排成本低很多,前者只有后者的 1/30<sup>[15]</sup>,受到各个国家的青睐,是一种经济有效的碳增汇方式。同时生态系统的固碳能力强,平均每 7a 陆地植被就可消耗掉大气中全部的 CO<sub>2</sub>,全球陆地生态系统和海洋生态系统年均固碳 35 亿 t 和 26 亿 t,分别抵消了 30%和 23%的人为碳排放<sup>[13]</sup>。越来越多的国际组织和国家认识到生态系统碳汇在减缓全球变暖和发展低碳经济中的重要作用。

从不同生态系统固碳能力来说,海洋生态系统固碳容易导致海水酸化以及海洋生态系统不可逆的损害,岩石圈固碳由于很难预测地壳运动而存在不可预知的风险<sup>[16]</sup>。因此,森林、草原、湿地等陆地生态系统固碳是降低人工固碳的生态风险和减少 CO<sub>2</sub>排放到大气中的最佳选择。陆地生态系统是地球表层生态系统的重要组成部分,具有重要的碳汇功能,深度参与着全球碳循环过程。全球陆地生态系统在 2007—2017 年平均从大气中吸收碳高达 3.61PgC/a,相当于工业活动和土地利用变化的人为总碳排放的 33.7%<sup>[17]</sup>。全球的主要经济大国都十分重视增加陆地生态系统碳汇问题,也是当前国际社会减缓和适应全球气候变化的核心思路 and 重要途径。

### 1.2 森林生态系统碳汇作用

森林是陆地生态系统的主体,是陆地生态系统最大的碳库。森林植被通过光合作用吸收 CO<sub>2</sub>,放出 O<sub>2</sub>,把大气中的 CO<sub>2</sub>以生物量的形式固定在植被和土壤中,这个过程和机制实际上就是清除已排放到大气中的 CO<sub>2</sub>的碳汇功能<sup>[18]</sup>。其碳汇功能有如下优势:首先,森林固碳量巨大。森林是陆地上最大的碳储库和碳汇,被称为“地球之肺”。2020 年全球森林面积为 40.6 亿 hm<sup>2</sup>,约占全球陆地面积的 31%,森林碳储量高达 6620 亿 t<sup>[17]</sup>,森林固碳量相当于其他植被类型的 2 倍,森林植被碳储量约占全球植被碳储量的 86%以上<sup>[19—20]</sup>,可吸收固定全球每年大约 25%的化石燃料燃烧所排放的 CO<sub>2</sub><sup>[21]</sup>。联合国粮农组织发布的《全球森林资源评估》报告显示,全球平均每公顷森林的生物量碳储量为 71.5t,如果加上土壤、粗木质残体和枯落物中的碳,每公顷森林碳储量可达 161.1t<sup>[22]</sup>。另外,森林生态综合效益大。森林不仅具有碳汇功能,还具有许多其他生态、经济和社会效益,是地球上最大的资源库、基因库、物种库等等。它们在涵养水源、防风固沙、水土保持、保护生物多样性、调节温度、改善小气候、维护生态平衡等方面具有不可替代的作用。同时,它还能对人类提供众多的林产品和林副产品,可供旅游休憩,从而获得巨大的综合效益。

在全球气候变化成为国际社会广泛关注的热点和焦点的今天,森林碳汇越来越受到人们的重视,通过森林碳汇抵减碳排放已是发达国家通行做法<sup>[23]</sup>。

### 1.3 人工林生态系统碳汇作用

当前全球天然林面积急剧减少,联合国粮农组织发布的《全球森林资源评估》报告显示<sup>[23]</sup>,全球天然林面积从 1990 年的 403800 万 hm<sup>2</sup> 减少到 2020 年的 373700 万 hm<sup>2</sup>,30 年间天然林面积每年减少约 1000 万 hm<sup>2</sup>,因此人工林的发展成为了森林固碳的主要手段。人工林作为森林资源重要的组成部分,与天然林一样具有相同的吸收固持 CO<sub>2</sub>的功能,在维护全球碳平衡和缓解全球气候变化等方面的作用日益突显<sup>[24]</sup>,在许多地区人工造林不仅是森林面积增加的主要途径,同时也是抵消甚至逆转因森林采伐导致的碳排放,实现碳积累的有效途径<sup>[25—26]</sup>。大量研究结果表明,营造人工林成为固定 CO<sub>2</sub>、防止全球气候继续变暖的有效途径之一<sup>[27—28]</sup>。首先,植树造林增加了森林植被的覆盖面积,联合国粮农组织发布的《全球森林资源评估》显示<sup>[22]</sup>,

2020 年全球人工林面积为 29300 万  $\text{hm}^2$ , 1990—2020 年间人工林面积增加了 12300 万  $\text{hm}^2$ , 年增长率约为 2.4%。人工造林增加了地上部分植被的碳储量, 增强了生态系统的碳汇功能<sup>[10]</sup>。其次, 人工林生态系统与草地生态系统或农田生态系统相比, 林地表面可以积累更多的凋落物, 可以部分抵消地表碳的损失, 对土壤-大气系统的  $\text{CO}_2$  平衡发挥重要作用。此外, 人工林生态系统土壤碳库也因其具有较大的库容量, 且土壤碳周转速率慢, 受各种干扰影响小, 能维持较长时期的碳储藏, 从而对人工林生态系统的碳汇功能产生重要影响<sup>[10]</sup>。通过植树造林来减缓气候变化被公认为是吸收  $\text{CO}_2$ 、增加碳汇且最具生态效应的途径, 是一项既能降低  $\text{CO}_2$  含量减轻温室效益而改善生态环境, 又能保证社会经济发展的方式, 其成本要远低于工业减排, 被称为“减缓全球气候变化的一种可能机制和最有希望的选择”<sup>[18]</sup>, 已成为减缓全球气候变化研究的行动议题和核心内容。

#### 1.4 中国发展人工林生态系统碳汇的必要性

虽然近年来中国在降低能耗和减少温室气体排放方面成就显著, 但在今后相当长的时期内, 中国人口还会继续增长, 继续增加能源消费和温室气体排放量是不可避免的现实<sup>[29]</sup>。即使到 2060 年中国非化石能源占比从目前的 16% 左右提高到 80% 以上, 非化石电力占比由目前的 33% 左右提高到 90% 以上, 仍有大约 20 亿 t 温室气体排放难以消减<sup>[10]</sup>。如果不能有效解决有关碳减排与增汇的科技问题, 中国在未来的全球环境履约谈判中将可能陷入很被动的局面。因此, 在现有的节能减排技术基础上, 发掘新的固碳增汇途径显得十分迫切, 是中国政府应对气候变化的重要策略<sup>[30-31]</sup>。

中国陆地生态系统占全球陆地面积的 6.4%, 是全球和区域陆地生态系统碳汇的重点地区<sup>[32-33]</sup>。中国是世界上森林面积增加最快的国家, 森林覆盖率从 80 年代初的 12% 增加到现在的 22.96% (图 2), 森林面积达 2.2 亿  $\text{hm}^2$ , 森林蓄积量提高到 175.6 亿  $\text{m}^3$ , 森林植被总碳储量 91.86 亿 t<sup>[34]</sup>。森林对中国陆地生态系统碳贮量的贡献约为 80%, 将在我中国实现碳达峰目标和碳中和愿景的过程中扮演越来越重要的角色<sup>[35]</sup>。

中国森林生态系统碳储量增加的主要贡献者是人工林生态系统, 是中国陆地生态系统碳汇的主要来源<sup>[36]</sup>。联合国粮农组织发布的《全球森林资源评估》同样肯定了中国大规模的人工林对全球气候减缓的积极作用<sup>[22]</sup>。中国人工林面积 7954 万  $\text{hm}^2$ , 面积占中国森林面积的 36.15%; 蓄积量为 33 亿  $\text{m}^3$ , 占中国森林蓄积量的 19.27%<sup>[37]</sup> (图 3), 是全球人工林面积增加最快、人工林最多的国家。中国人工林的大部分仍处于幼龄林阶段, 占森林面积的 60.94%, 处于高生长阶段, 伴随着森林质量不断提升, 具有较高的固碳速率和较快的碳汇增长潜力<sup>[38]</sup>, 在 20 世纪末的后 20 年, 由人工林增加带来的碳汇增量约为 45000 万 t<sup>[27]</sup>, 这对中国“碳达峰、碳中和”具有重要作用<sup>[39]</sup>。发展人工林是中国应对气候变化的战略选择之一, 可为国家争取更大的经济发展排放空间, 在应对气候变化中的地位越来越重要, 已成为中国积极应对气候变化的战略选择。

## 2 制约中国人工林碳汇提升的几个问题

虽然中国人工林建设取得了很大的成就, 但由于长期粗放不合理的经营和管理, 依然存在人工林树种单一、林分结构不尽合理、质量和功能较差等问题, 导致碳汇作用发挥的远远不够, 固碳能力亟待提高。

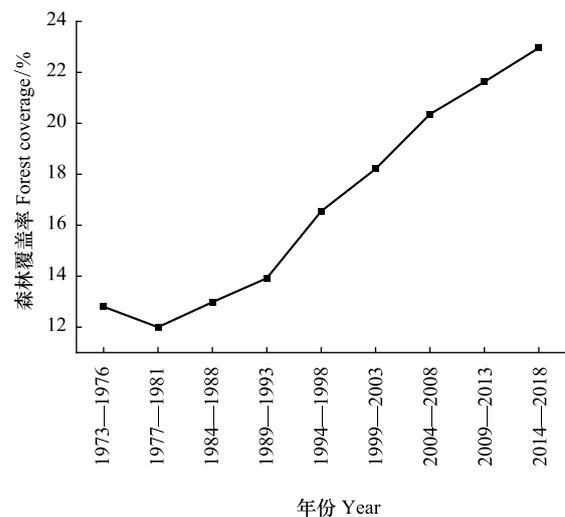


图 2 中国森林覆盖率变化状况

Fig.2 Change map of forest coverage in China

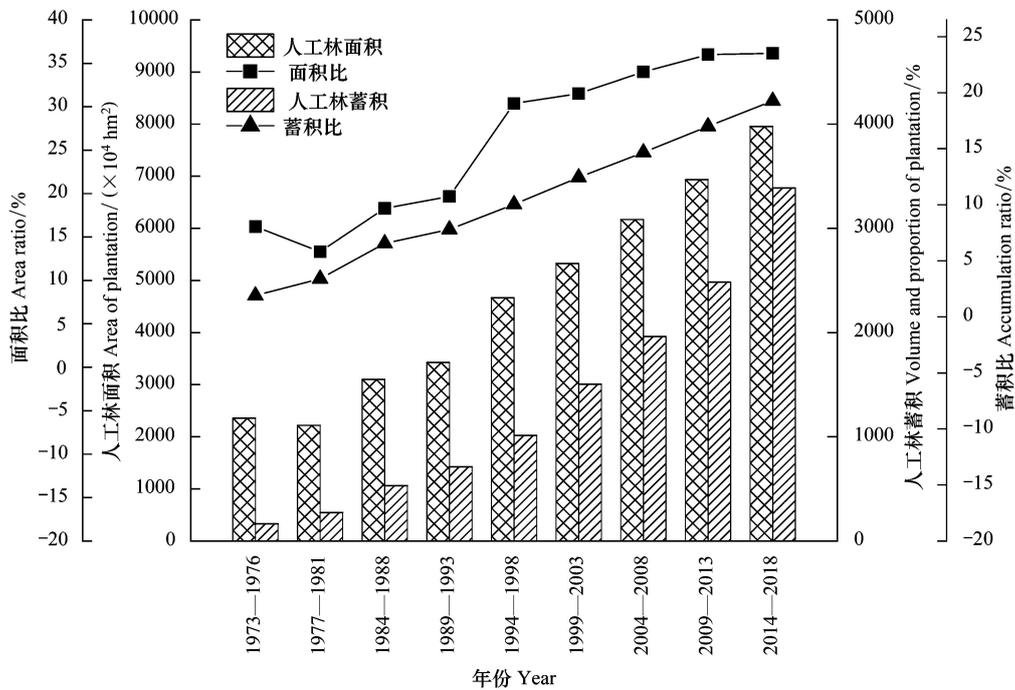


图3 中国人工林面积、蓄积量及其占比变化

Fig.3 Changes of area, volume and proportion of plantation in China

### 2.1 人工林树种单一,林分结构简单,碳汇作用发挥不够

长期以来,中国人工林偏重于同龄纯林培育模式,多为单一树种组成的同龄纯林,林分结构简单、功能单一、抗逆性差、易发生病虫害,成为人工林地力下降的因素<sup>[40]</sup>。中国90%的人工林为树种单一的纯林,其中针叶纯林占2/3,个别省份高达95%<sup>[41]</sup>。趋于单一物种、成片高密度人工林难以生长形成乔-灌-草垂直空间结构的森林群落,会出现凋落物不易分解或分解速度较慢,养分归还缓慢,土壤微生物受地被物抑制,造成某些土壤养分元素的亏缺,影响人工林生态系统碳汇能力<sup>[42-43]</sup>。延续单一树种粗放式的传统经营模式难以为继,已不能适应现阶段中国人工林的发展变化趋势。

### 2.2 人工林经营管理粗放,总体质量不高,固碳能力亟待提高

中国人工林经营管理粗放,缺乏科学的经营手段,如大面积皆伐作业、林木过量采伐、抚育管理滞后,忽视了森林的自然演替规律、天然更新、森林健康和多目标近自然经营,导致中国林地生产力和产出率低,单位蓄积量和生产力较低,严重影响了人工林生态系统的物质循环和能量流动<sup>[44]</sup>。第九次全国森林资源清查数据表明,中国人工林单位蓄积量仅为 $59.3\text{m}^3/\text{hm}^2$ ,远低于天然林的 $111.36\text{m}^3/\text{hm}^2$ ,仅为德国等林业发达国家的1/5左右<sup>[37]</sup>。

### 2.3 未来人工造林空间受限,造林难度越来越大

受可利用土地资源的限制、立地条件制约和气候变化的胁迫影响,中国人工林面积继续扩展的空间越来越少,造林难度越来越大。根据第九次全国森林资源清查数据,中国人工造林成林面积为 $1659.65\text{万}\text{hm}^2$ ,比第八次清查的成林面积 $1808.26\text{万}\text{hm}^2$ 减少 $148.61\text{万}\text{hm}^2$ ,下降8.22%<sup>[37]</sup>。根据评估,目前可用于造林的土地还有约 $3000\text{万}\text{hm}^2$ ,再加上退耕还林、退耕还草的土地,总共约有 $4000\text{多万}\text{hm}^2$ 土地可以用来扩大森林面积<sup>[45]</sup>,然而,这些可造林土地的50%是在降雨量 $400\text{mm}$ 以下的干旱和半干旱地区,造林难度较大,约有36%的林地受地形、土壤、海拔等立地条件限制,导致造林成功相当困难,用来扩大森林面积的土地资源极其有限。同时更多一部分乔木林地采伐后,特别是质量高的乔木林地采伐后,转为茶果园等,高质量乔木林地流失严重,“趋经济林化”的趋势明显<sup>[46]</sup>,这在一定程度上使“碳达峰、碳中和”目标的实现存在较大的风险。

这迫切要求中国未来造林将更加注重森林质量和森林生产力的提高,从规模速度型向质量效益型转变、从强调覆盖率向强调蓄积量转变,从而实现碳汇能力的有效增长。

### 3 中国人工林生态系统碳增汇的途径

在全球气候变化的背景下,如何提高人工林生态系统的碳储量和碳汇潜力已经纳入人工林的经营管理范畴。加强人工林生态系统碳增汇途径的研究对预测并维护其系统长期生产力、减缓大气 CO<sub>2</sub> 浓度上升,将具有极其重要的指导作用,对中国实现“碳达峰、碳中和”目标具有非常重要的作用。

人工林生态系统的碳汇能力主要取决于:①植物光合作用生产力;②植物自养呼吸;③生态系统中人为干扰和自然灾害造成的碳排放。因此,人工林生态系统碳增汇措施可以通过调控上述各个主要因子来实现,可以归纳为以下 5 种途径共 12 条措施(见图 4):

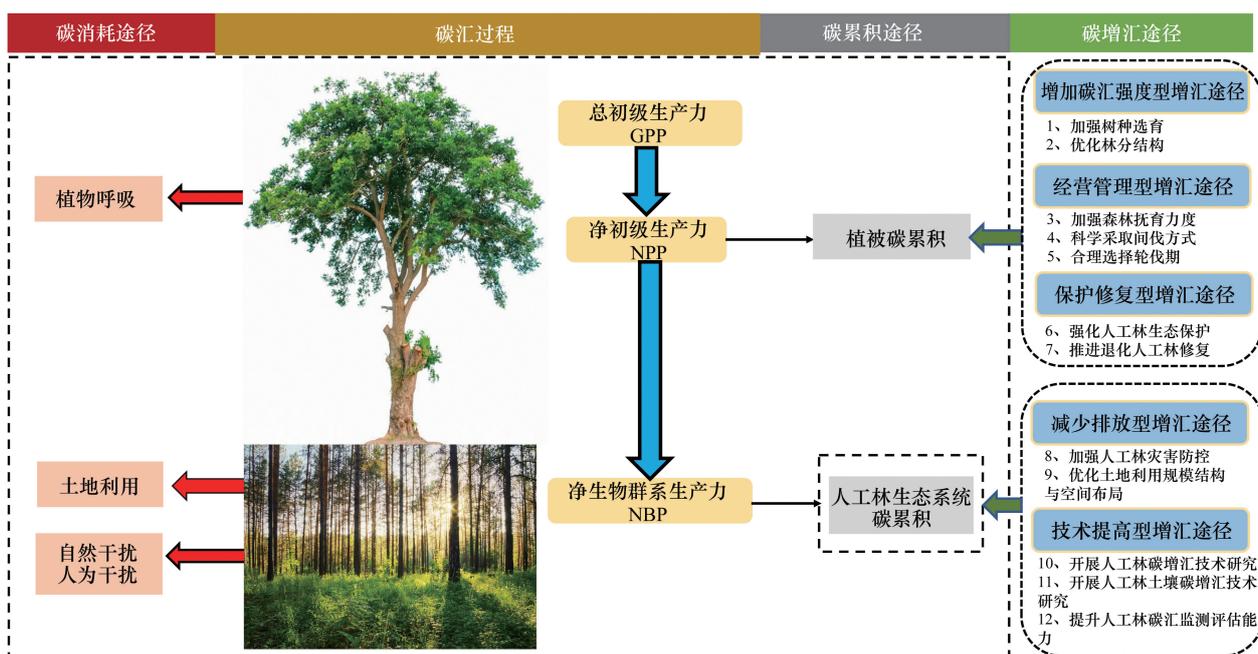


图 4 中国人工林生态系统碳增汇的主要因子和途径

Fig.4 Main factors and approaches of carbon sequestration enhancement of plantations ecosystem in China

#### 3.1 增加碳汇强度型增汇途径

中国人工林普遍存在树种单一、结构和功能较差等特点,加强人工林树种选育、优化人工林结构是增强碳汇功能的有效途径。

##### (1) 加强人工林树种选育

人工林的树种组成不同,冠层的光合固定能力不同,引起凋落物的种类、产量和质量也不同,具有不同的碳密度和生长速率<sup>[47]</sup>。王效科等研究发现中国 38 种优势种森林类型的植物碳密度差异较大,介于 6.47—118.14 Mg/hm<sup>2</sup> 之间<sup>[48]</sup>。人工林树种的种类是决定人工林生态系统碳储量水平最为重要的因素之一<sup>[49]</sup>。

在实现人工林碳汇的过程中,要充分考虑人工林所在区域的地理环境特点、气候状况、土壤水分承载力、树木的生长特性等,遵循“宜乔则乔、宜灌则灌、适地适树”的原则,在掌握区域林木生长历史和人工引种经验的基础上,因地制宜选择生产力高、抗逆性良好、耐干瘠、抗病虫害与气候条件相适应的树种,提高人工林存活率和生产力。在保证高生长量而获得高蓄积量增长的同时,有意识地使用生长量和含碳率较高的树种,有效增加人工林碳汇量,确保人工林碳汇造林效果,增强人工林的碳汇功能。

##### (2) 优化人工林结构

人工林的结构决定了人工林群落的冠层结构、叶面积指数以及生产力等。人工林结构的不同会引起群落物种组成的不同,并通过植物本身的呼吸、土壤微生物的活动、凋落物的质量及分解速率等许多功能过程变化,最终引致人工林生态系统碳汇功能的改变<sup>[50]</sup>。因此结构合理的人工林可最大限度提升生产力、极大地增强固碳能力。

遵循自然更新为主、人工措施为辅的原则,依照尊重和保护自然的理念,通过对人工林进行近自然化改造,调整人工林的水平分布格局、树种混交比例和林龄结构等,推进同龄林向异龄林,单层林向复层林,纯叶林向生产力高、固碳能力强的混交林的转化,将现存的大面积单层同龄人工针叶纯林转化成以乡土阔叶树种为主的复层异龄多树种混交林<sup>[51]</sup>。通过优化人工林结构,提高林分质量和生产力,保证每年最大的蓄积量、生长量和固碳量,实现人工林的高碳汇<sup>[52-53]</sup>。

### 3.2 经营管理型增汇途径

中国宜林土地面积的有限性,决定了增加造林面积的受限性,通过植树造林等增加人工林面积的措施来提高人工林固碳量是有限的,因此中国人工林未来发展不可能再延续一味追求以扩大人工林面积来实现人工林资源的生长,必将从以扩大造林面积为主转变为以提高现有人工林生产力和质量为重点。通过森林抚育、森林间伐和轮伐期选择等人工林经营和管理措施,能提高人工林的长期生产力和固碳量。

#### (1) 人工林抚育

人工林抚育是为提高幼林的存活率和成林的生产率,对幼龄林、中龄林林分进行抚育,促进林木生长,明显提高人工林质量,从而增加人工林的生物量、蓄积量和碳汇能力<sup>[54]</sup>。

人工林抚育措施主要包括施肥、灌溉、修枝、除草等<sup>[55]</sup>。一是施肥。施肥是人工林抚育广泛应用的一项措施,也是提高人工林生态系统的植被和土壤固碳量的有效途径,对森林碳储量的积累产生了积极影响<sup>[56]</sup>。人工林施肥需要根据树木的实际特点,通过分析苗木生长状况与养分供应之间的内在关系,掌握苗木在不同阶段的生长规律,确定合适的施肥方式、施肥种类以及施肥数量等,从而增加人工林营养提供,促进林木生长。二是灌溉。灌溉需要侧重于灌溉水质量的控制,通过定期测定灌溉水的 pH、金属离子含量和杂草种子等情况,精准化监测灌溉水的水质。三是修枝。在自然整枝不良、通风透光不畅的林分中进行,在林分郁闭、树干下部出现枯枝时开始,一般采取平切法,重点针对枝条、死枝过多的林木。四是割灌除草。在下层草灌藤生长旺盛、与林木生长争水争肥严重的幼龄林中进行,采取机割、人割等不同方式,清除妨碍树木生长的藤条和杂草。

#### (2) 人工林间伐

间伐是人工林培育经营的重要环节和主要措施。科学合理地采取人工林间伐措施,能够有效调整林分组成、降低林分密度、促进林木生长、提高林分质量和碳汇能力<sup>[57]</sup>。罗韧对 20 年生马尾松人工林生物量研究表明,人工林间伐后,林下植被得到充分发育,林木的生产力得到提高<sup>[58]</sup>;杨玉林对落叶松进行强度为 30% 的抚育间伐,10 年后林分总生物量增长率比对照林分高 74.8%<sup>[59]</sup>。同时间伐明显地改良了土壤的理化性质、土壤微生物性质、土壤酶活性,提高了土壤肥力,也是影响林分凋落物分解和土壤碳积累的重要因素<sup>[60-61]</sup>。

根据以“伐”促“育”的发展理念,对人工林进行疏伐、透光伐、生长伐和卫生伐等。一是疏伐。对于超过资源承载力的人工林,选用合理的疏伐强度和方式来调整林分结构,调整林分结构和林分内生态系统的演替,改变林分内营养分布,减少林木个体间的竞争。二是透光伐。当主要树种受到次要树种的抑制威胁时,进行透光伐,间密留疏,去劣留优,保留珍贵树种和优质树木,以保证林分中的主要树种,能够获得比较充足的阳光和空间,以利生长。三是生长伐。针对下层目的树种幼龄树较多或遭受自然灾害危害、林内杂乱无章的中龄林可选择在林木分化加剧、胸径生长量连年显著下降时进行生长伐,伐除掉生长不良、病腐木、生长过密及影响保留木的林木以及抑制树种生长的灌木、藤木和高大草本等。四是卫生伐。针对病虫害林木及遭受风折倒、冰冻、雪压、火灾等危害的林分进行卫生伐,将这类生态功能已显著下降的林木清除<sup>[62]</sup>,改善林分树种结构和空间结构,增加人工林碳汇量。

### (3) 合理选择轮伐期

人工林固碳能力与年龄有关,树木在初期生长阶段,单位叶面积固碳能力不断增强,在生长最旺盛时期,其固碳能力达到高峰,进入近熟阶段则固碳能力开始下降;树木完全成熟时,固碳能力降至最低<sup>[63]</sup>。然而为获取木材,大部分地区在人工林经营中选择的轮伐期均未到达这个“生长顶点”。因此,在林分到达生物量开始下降的阶段之前,延长轮伐期可增加人工林碳储量,但到达生长量顶点后,人工林碳储量将会减少<sup>[64]</sup>,应延长轮伐期以增加林分的固碳量。

因此,根据各地树种确定合理的轮伐期和轮伐量,确定出较为理想的人工林轮伐期,确保维持人工林生态系统碳固存的持久性,充分利用人工林的固碳潜力。

### 3.3 保护修复型增汇途径

合理地保护人工林或对人工林进行生态恢复,可以提高人工林植被的生产力。通过生态保护和修复,能提升人工林质量和稳定性,增强人工林固碳释氧、减排增汇的能力。

#### (1) 强化人工林生态保护

人工林如果长期受到外界因素的破坏,特别是自然灾害带来的连带破坏,会对人工林造成毁灭性打击。对人工林进行生态保护可以减少森林资源遭遇破坏,促进林木正常健康生长,能使人工林碳汇作用持续实现<sup>[65]</sup>。

遵循预防为主、科学防控、依法治理的原则,不断强化人工林生态保护的力度。通过划定林地红线或建立保护性区域,加强保护力度,严禁非法占用人工林等违法行为,减少人类活动对人工林的占用,以及林地流失、林木减少、森林退化导致的碳排放。科学确定采伐限额,改进人工林采伐方式,减少采伐数量。积极采取措施防止森林火灾等灾害的发生,避免或减少人工林的破坏和损失,确保人工林资源安全和维持碳储量。

#### (2) 推进退化人工林修复

在植树造林工作不断推进的过程中,中国还面临人工林退化问题,很多地区都存在大面积低质、低效林,这在中国森林总面积中占据了相当大的比例,针对人工退化林开展修复工作已经迫在眉睫。通过修复,能提升人工林生产力和固碳能力。

将人工林生态修复作为实现“碳达峰、碳中和”目标的重要组成部分,对于受损的人工林,在分析其受损原因的基础上,以自然修复为主、人工修复为辅,优先基于自然的解决方案(NbS),采取封山育林、围封禁牧等措施进行生态修复,提升人工林碳汇和适应气候变化的潜力。在需要人工促进恢复的地方,全方位、全地域、全过程部署人工林的水源涵养、水土保持、防风固沙、洪水调蓄等生态修复工程和任务,立体开展退化人工林的修复工作,有效提升植被覆盖率,减少人工林生态退化,提升固碳能力。

### 3.4 减少碳排放型增汇途径

人工林生态系统既可以作为温室气体的储藏库和吸收源,又可能因火灾、病害等外在的干扰,以及不合理的土地利用,成为温室气体的排放源,加剧人工林碳汇功能的降低<sup>[66]</sup>。通过加强人工林灾害防控、优化土地利用格局来减少碳排放,维持高水平的生态系统碳贮量,也是提高人工林生态系统碳汇功能的重要途径之一。

#### (1) 加强人工林灾害防控

灾害作为一种外部干扰因子,不仅破坏了原有人工林的结构和功能,而且导致人工林 CO<sub>2</sub> 的排放,改变了整个生态系统的碳固定、分配和循环,使植被的生物量碳储量降低<sup>[67-68]</sup>。

一是加强人工林防火工作。加强人工林防火、扑火和保障体系建设,提升人工林火灾监测、火源管控和应急处置能力,遏制重大人工林火灾发生,有效减少人工林火灾导致的碳排放。二是加强人工林病虫害防治。大力推进以生物防治为主的人工林有害生物无公害防控措施的实施,综合开展有害生物监测调查、巡护防控和灾害除治,强化重大林业有害生物灾害的治理,提高人工林总体生产水平和碳吸收能力,减少人工林碳排放<sup>[69]</sup>。

#### (2) 优化土地利用规模结构与空间布局

人类活动引起的土地利用变化是影响人工林生态系统碳汇的重要因素之一,合理的土地利用方式使得人

工林生态系统成为巨大的汇,不合理则成为重要的源<sup>[70]</sup>。土地利用主要通过改变人工林结构、水热动态和土壤有机物质含量影响人工林固碳能力<sup>[71-72]</sup>。Guo 等<sup>[73]</sup>对全球 74 篇关于土地利用变化对森林碳储量影响的文献进行分析后发现,从农田到人工林的土地利用转变,土壤碳储量增加 18%。Laclau 等<sup>[74]</sup>对南美 14 年生人工松林与当地牧草地进行比较,发现牧草地转化为松树人工林能极大地增加生物量碳库,是草地的 20 倍。因此,土地利用方式是影响人工林生态系统碳汇功能的一个重要因素。

以低碳发展为目标导向,以国土空间规划和用途管制为手段,进行土地利用结构和规模调整,减少人类活动引起的人工林向低碳汇能力的土地利用类型的转化,采取合理、可持续的管理措施促进低碳密度的土地利用地类转化为高碳密度的人工林类型,优化人工林和其他土地利用类型的空间配置,提高碳汇水平和固碳效率,实现人工林生态系统碳汇效应的最大化和持久化<sup>[70]</sup>。

### 3.5 技术提高型增汇途径

“碳达峰、碳中和”过程既是挑战又是机遇,碳增汇技术的重要性在此进程中得到充分体现。需要构建集技术攻关、试验示范、推广应用为一体的人工林生态系统碳增汇技术体系,来提高人工林生态系统的碳汇能力。

#### (1) 开展人工林碳增汇技术研究

充分发挥人工林固碳增汇的作用,积极开展人工林碳增汇技术攻关,这对提升中国人工林生态系统碳汇能力,以及中国人工林营建与管理在人类应对全球气候变化中的作用具有重要意义。

整合地面调查、气象气候水文观测、模型模拟以及卫星遥感反演等数据,基于多源、多尺度、多过程、多途径的综合集成分析等手段,开展不同类型人工林固碳速率和能力提升技术攻关,建立适合不同地区人工林的生态化改造模式,有效提高人工林的固碳增汇能力。

中国可造林土地的 50%是在降雨量 400 mm 以下的干旱和半干旱地区,造林难度较大。因此进一步加大干旱地区人工造林技术的科技攻关迫在眉睫。基于农业有机质废弃物,研发锁水保肥营养生长基及其成套设备,将牲畜粪便、秸秆、腐殖酸、保水剂等材料按一定比例混合旋压制备锁水保肥生长基,用于贫瘠、气候干旱导致人工林苗木无法存活的困境,从根本上解决漏肥漏水问题,提升干旱、半干旱地区的造林技术水平及提高人工林质量和增汇潜力的森林可持续经营技术<sup>[75]</sup>。针对中国广大丘陵地区人工林土壤养分流失等问题,开展植物篱选种和种植技术研究,对筛选出的灌木植物篱和草本植物篱进行空间布局,并通过水土肥拦截,研发具有最强水土保持、维持土壤肥力、减少面源污染、增加碳汇能力等生态服务效益的植物篱品种,提升丘陵地区人工林的生产力和碳汇能力。

#### (2) 开展人工林土壤碳增汇技术研究

人工林土壤中有有机碳的含量占据了全球土壤有机碳含量的 2/3 以上,成为陆地生态系统中最大的有机碳库,约为植物碳库的 3 倍、大气碳库的 2 倍<sup>[76]</sup>。因此,增加土壤碳汇,对于缓解全球变暖具有重要意义<sup>[77]</sup>。近年来,随着全球气候变暖研究的深入,土壤碳汇与全球气候变暖的关系研究,已成为全球气候变化研究的三大热点之一<sup>[78]</sup>。

首先应该加强土壤碳汇机制研究。由于人工林土壤有机碳的固定、储存和排放受到包括气候、土地利用历史、树种组成和群落结构、土壤理化性质、人类活动干扰等许多生物和非生物因素的控制,因而揭示人工林土壤的碳汇形成机制,将有助于探讨人工林土壤碳汇、库、源的调控技术,增强人工林生态系统的碳汇功能<sup>[11]</sup>。

另外也要开展土壤增汇技术研究。林木从土壤中吸收养分以满足其生长需要,同时又通过枯落物的形式向人工林生态系统输送有机质和养分,构成了吸收-归还-再吸收的养分循环机制,从而使得人工林枯落物成为林地土壤养分的主要来源,因而研究人工林枯落物的数量、分解速率对林地生产力和碳汇功能具有重要影响。针对枯落物的不同形态,利用物理、化学和生物技术,促进枯落物快速分解,培育加厚土壤腐殖质层,增加土壤养分,提升土壤保水保肥能力,增强土壤固碳速率。另外土壤菌剂添加显著增加了土壤呼吸速率,同时增

加了土壤有机含量,并且对土壤微生物群落及功能多样性有明显的促进作用<sup>[79]</sup>。因此,研究土壤菌剂添加技术可以促进凋落物分解,提高人工林的土壤地力,维持人工林的可持续经营。

### (3) 提升人工林生态系统碳汇监测评估能力

受研究技术和数据资料限制,人工林生态系统碳储量估算还没有一个公认的方法。人工林生态系统碳储量估算结果由于所选研究方法和偏重点的不同存在较大的差异,缺乏可靠性。因此,如何选取适当的研究方法,利用现存资料来提高估算精度成为人工林生态系统碳储量估算的关键。融合多源数据(地面观测、卫星遥感、无人机等)、多尺度数据(样地尺度、站点尺度、区域尺度)以及多手段数据(联网观测、森林清查、模型模拟),建设人工林生态系统天空地协同一体化数据监测体系,准确评估人工林生态系统的固碳现状、速率和潜力,客观评估中国人工林生态系统潜在固碳潜力、现实固碳潜力及其在全球碳收支中的贡献。

## 4 讨论和结论

中国在相对较低的经济发展水平条件下提出了“碳达峰、碳中和”目标,蕴含着大量的机遇,也面临着前所未有的巨大挑战。中国人工林面积居世界首位,是增加碳汇最具生态效应、成本最低、可能性最大的途径,其成本要远低于工业减排,已成为实现“碳达峰、碳中和”目标的战略选择。但是,人工林存在质量较差、结构不尽合理、生产力不高、生态功能较弱和生态稳定性下降等问题。但面向生态系统服务的多目标经营是人工林发展的趋势,为了更好地发挥中国人工林生态系统的碳汇功能,需要在如下几个方面进行进一步探索。

### (1) 人工林生态系统碳汇功能和其他生态服务功能之间的权衡和协同

由于主导目标和影响因素的复杂性,人工林生态系统碳汇功能与其他生态服务功能之间存在权衡和协同的关系。如在增加人工林植被碳储量的同时,能否同时提高生物多样性?是否存在某种既可以增加人工林生态系统碳储量,又能提高生物多样性的经营管理方式?在干旱半干旱地区,人工林植被碳汇功能的提升某种程度上会导致地下水水位下降和流域产流量减少,如何协调不同功能之间的矛盾?这些问题均需进行深入的研究与探讨,因此迫切需要针对人工林生态系统碳汇功能和其他生态服务功能之间协同权衡的科学问题,以演替理论指导森林管理,深入研究和协调人工林生态系统固碳和生物多样性保护、水土保持等生态服务功能的关系,发挥人工林生态系统最佳的固碳效益和多目标的生态服务功能是未来人工林生态系统碳汇研究的方向<sup>[80]</sup>。

### (2) 妥善处理好人 工林生态系统碳汇和社会经济发展的关系

不同社会利益群体的需求不同,因此要妥善处理好人 工林生态系统碳汇功能提升与生产经营多目标之间的相互关系。在提升人工林生态系统碳汇功能的同时,需要结合生态和社会的双重需求,通过科学的规划和经营调控等手段,处理好生态系统服务与经济社会发展之间的关系,实现经济、社会和碳汇功能的多重效益,实现人与自然的和谐共处,满足人类所期望的多目标、多价值、多用途、多产品和多服务的需要。

### (3) 人工林生态系统碳汇研究尺度需从林分转向景观

景观是开展人工林生态系统碳汇研究的最佳尺度,人工林生态系统碳汇研究需要从以往林分尺度上土壤和植被的样点样方研究,转向景观尺度上植被格局与碳汇过程的调控。利用景观生态学原理和方法,科学辨析区域尺度上的人工林生态系统碳汇能力变化和驱动力因素,构建人工林景观的多样性和连通性,形成不同造林树种斑块空间镶嵌与合理配置,逐步提升区域人工林生态系统的碳汇能力。

本文以新发展理念为引领,通过梳理人工林生态系统碳汇环节和因子,从增加碳汇强度型增汇、经营管理型增汇、保护修复型增汇、减少碳排放型增汇、技术提高型增汇 5 个途径提出了 12 条人工林碳增汇措施,以期为中国实现“碳达峰、碳中和”目标提供技术支撑、为应对全球气候变暖作出更大贡献。

## 参考文献(References):

- [1] 胡鞍钢. 中国实现 2030 年前碳达峰目标及主要途径. 北京工业大学学报: 社会科学版, 2021, 21(3): 1-15.
- [2] 刘长松. 碳中和的科学内涵、建设路径与政策措施. 阅江学刊, 2021, 13(2): 48-60, 121.

- [ 3 ] 张永生, 巢清尘, 陈迎, 张建宇, 王谋, 张莹, 禹湘. 中国碳中和: 引领全球气候治理和绿色转型. 国际经济评论, 2021(3): 9-26, 4.
- [ 4 ] 习近平. 继往开来, 开启全球应对气候变化新征程——在气候雄心峰会上的讲话(2020年12月12日, 北京)人民日报, 2020-12-13(2).
- [ 5 ] 封加平. 碳中和应发挥林业的关键作用. 中国林业产业, 2021(3): 2.
- [ 6 ] 丁仲礼. 中国碳中和框架路线图研究. 中国工业和信息化, 2021(8): 54-61.
- [ 7 ] 王松伟, 郭忠升. 全球变化背景下碳汇林研究进展. 林业科技通讯, 2020(9): 8-11.
- [ 8 ] Richards K R, Stokes C. A review of forest carbon sequestration cost studies: a dozen years of research. *Climatic Change*, 2004, 63(1/2): 1-48.
- [ 9 ] 杨礼旦. 适应气候变化的人工林多目标经营与管理对策. 温带林业研究, 2022, 5(1): 12-17.
- [ 10 ] 张连凯, 金鑫. 实现碳达峰、碳中和的自然碳汇解决方案. 中国矿业报, 2021-07-30. [https://www.cgs.gov.cn/ddzt/jqthd/ddy/jyxc/202107/t20210730\\_677425.html](https://www.cgs.gov.cn/ddzt/jqthd/ddy/jyxc/202107/t20210730_677425.html)
- [ 11 ] 冯瑞芳, 杨万勤, 张健. 人工林经营与全球变化减缓. 生态学报, 2006, 26(11): 3870-3877.
- [ 12 ] 徐英明, 虞依娜, 李鑫, 李昊, 何明威, 林森. 南亚热带不同造林模式碳汇林土壤碳积累与碳汇功能. 生态学报, 2019, 39(1): 355-362.
- [ 13 ] 高扬, 何念鹏, 汪亚峰. 生态系统固碳特征及其研究进展. 自然资源学报, 2013, 28(7): 1264-1274.
- [ 14 ] 郑聚锋, 程琨, 潘根兴, SMITH Pete, 李恋卿, 张旭辉, 郑金伟, 韩晓君, 杜彦玲. 关于中国土壤碳库及固碳潜力研究的若干问题. 科学通报, 2011, 56(26): 2162-2173.
- [ 15 ] UNFCCC. Review of the Implementation of Commitments and of Other Provisions of the Convention UNFCCC guidelines on reporting and review. *Ecological Economics*, 1999(29): 269-291.
- [ 16 ] 徐冰, 郭兆迪, 朴世龙, 方精云. 2000—2050年中国森林生物量碳库: 基于生物量密度与林龄关系的预测. 中国科学: 生命科学, 2010, 40(7): 587-594.
- [ 17 ] Wang J, Feng L, Palmer P I, Liu Y, Fang S X, Bösch H, O'Dell C W, Tang X P, Yang D X, Liu L X, Xia C Z. Large Chinese land carbon sink estimated from atmospheric carbon dioxide data. *Nature*, 2020, 586(7831): 720-723.
- [ 18 ] 魏晓华, 郑吉, 刘国华, 刘世荣, 王伟峰, 刘苑秋, Blanco A. Juan. 人工林碳汇潜力新概念及应用. 生态学报, 2015, 35(12): 3881-3885.
- [ 19 ] Kramer P J. Carbon dioxide concentration, photosynthesis, and dry matter production. *BioScience*, 1981, 31(1): 29-33.
- [ 20 ] Waring R H, Schlesinger W H. *Forest ecosystems: concepts and management*. Orlando: Academic Press, 1985
- [ 21 ] 何念鹏, 王秋风, 刘颖慧, 任伟, 于贵瑞. 区域尺度陆地生态系统碳增汇途径及其可行性分析. 地理科学进展, 2011, 30(7): 788-794.
- [ 22 ] Food and Agriculture Organization of the United Nations F D. *Global forest resources assessment 2020: Main report*. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2020.
- [ 23 ] 李怒云. 发展碳汇林业 应对气候变化. 林业与生态, 2014(3): 15-17.
- [ 24 ] Duveneck M J, Scheller R M. Climate-suitable planting as a strategy for maintaining forest productivity and functional diversity. *Ecological Applications*, 2015, 25(6): 1653-1668.
- [ 25 ] 柯水发, 李周, 张莹. 中国应对气候变化的造林行动及绿色就业潜力测算. 林业经济, 2012, 34(7): 34-40.
- [ 26 ] Bhattacharya P, Pradhan L, Yadav G. Joint forest management in India: experiences of two decades. *Resources, Conservation and Recycling*, 2010, 54(8): 469-480.
- [ 27 ] 方精云, 陈安平. 中国森林植被碳库的动态变化及其意义. 植物学报, 2001, 43(9): 967-973.
- [ 28 ] 吴思思, 邢玮, 葛之葳. 人工林碳储量及影响因子研究进展. 江苏林业科技, 2017, 44(6): 47-51.
- [ 29 ] 王秋风, 刘颖慧, 何念鹏, 方华军, 伏玉玲, 于贵瑞. 中国区域陆地生态系统碳收支综合研究的科技需求与重要科学问题. 地理科学进展, 2012, 31(1): 78-87.
- [ 30 ] 沈建辉. 为实现碳达峰碳中和目标贡献林业力量. 群众, 2021(13): 58-59.
- [ 31 ] 赵宁, 周蕾, 庄杰, 王永琳, 周稳, 陈集景, 宋珺, 丁键滢, 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.
- [ 32 ] He H L, Wang S Q, Zhang L, Wang J B, Ren X L, Zhou L, Piao S L, Yan H, Ju W M, Gu F X, Yu S Y, Yang Y H, Wang M M, Niu Z E, Ge R, Yan H M, Huang M, Zhou G Y, Bai Y F, Xie Z Q, Tang Z Y, Wu B F, Zhang L M, He N P, Wang Q F, Yu G R. Altered trends in carbon uptake in China's terrestrial ecosystems under the enhanced summer monsoon and warming hiatus. *National Science Review*, 2019, 6(3): 505-514.
- [ 33 ] Fang J Y, Guo Z D, Piao S L, Chen A P. Terrestrial vegetation carbon sinks in China, 1981-2000. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2007, 50(9): 1341-1350.
- [ 34 ] 马爱平. 全球增绿四分之一来自中国. 科技日报, 2021-03-19. [https://tech.gmw.cn/2021-03/19/content\\_34699167.htm](https://tech.gmw.cn/2021-03/19/content_34699167.htm)
- [ 35 ] Fang J Y, Wang G G, Liu G H, Xu S L. Forest biomass of China: an estimate based on the biomass-volume relationship. *Ecological Applications*, 1998, 8(4): 1084-1091.
- [ 36 ] 方精云, 于贵瑞, 任小波, 刘国华, 赵新全. 中国陆地生态系统固碳效应——中国科学院战略性先导科技专项“应对气候变化的碳收支认证及相关问题”之生态系统固碳任务群研究进展. 中国科学院院刊, 2015, 30(6): 848-857, 875.
- [ 37 ] 国家林业和草原局. 中国林业和草原年鉴-2019, 2019. 北京: 中国林业出版社, 2019.
- [ 38 ] 徐冰, 郭兆迪, 朴世龙, 方精云. 2000—2050年中国森林生物量碳库: 基于生物量密度与林龄关系的预测. 中国科学: 生命科学, 2010, 40(7): 587-594.
- [ 39 ] 王兵, 牛香, 宋庆丰. 基于全口径碳汇监测的中国森林碳中和能力分析. 环境保护, 2021, 49(16): 30-34.

- [40] 盛炜彤. 人工林地力衰退研究. 北京: 中国科学技术出版社, 1992.
- [41] 朱教君, 张金鑫. 关于人工林可持续经营的思考. 科学, 2016, 68(4): 37-40, 63.
- [42] Koutika L S, Epron D, Bouillet J P, Mareschal L. Changes in N and C concentrations, soil acidity and P availability in tropical mixed acacia and eucalypt plantations on a nutrient-poor sandy soil. *Plant and Soil*, 2014, 379(1): 205-216.
- [43] 郭婧, 喻林华, 方晰, 项文化, 邓湘雯, 路翔. 中亚热带 4 种森林凋落物量、组成、动态及其周转期. *生态学报*, 2015, 35(14): 4668-4677.
- [44] 张梦雅, 王新杰, 刘乐, 张鹏, 付尧. 迹地炼山对杉木林植物多样性与土壤特性的影响. *东北林业大学学报*, 2017, 45(3): 63-67, 76.
- [45] 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. *北京林业大学学报*, 2022, 44(1): 38-47.
- [46] 程钰, 刘璨, 杨红强, 张寒. 商品林种植结构的“趋经济林化”——基于劳动力成本效应及相对收益效应的成因分析. *林业科学*, 2021, 57(7): 184-193.
- [47] Wang H, Liu S R, Mo J M. Correlation between leaf litter and fine root decomposition among subtropical tree species. *Plant and Soil*, 2010, 335(1): 289-298.
- [48] 王效科, 冯宗炜, 欧阳志云. 中国森林生态系统的植物碳储量和碳密度研究. *应用生态学报*, 2001, 12(1): 13-16.
- [49] 于贵瑞. 全球变化与陆地生态系统碳循环和碳蓄积. 北京: 气象出版社, 2003.
- [50] Guo J F, Yang Y S, Chen G S, Xie J S, Lin P. Soil C and N pools in Chinese fir and evergreen broadleaf forests and their changes with slash burning in mid-subtropical China. *Pedosphere*, 2006, 16(1): 56-63.
- [51] 刘世荣, 杨予静, 王晖. 中国人工林经营发展战略与对策: 从追求木材产量的单一目标经营转向提升生态系统服务质量和效益的多目标经营. *生态学报*, 2018, 38(1): 1-10.
- [52] 李建民, 谭芳林. “双碳”目标背景下福建省高碳汇林业的实现路径. *发展研究*, 2021, 38(10): 9-16.
- [53] 高伟生. 森林碳汇生态工程造林技术与效益分析. *南方农业*, 2019, 13(15): 55-56.
- [54] 庾锦宁. 森林抚育加强对低碳经济的促进作用分析. *花卉*, 2017(2): 98-99.
- [55] 康孟龙. 森林抚育对森林生态系统的影响. *新农业*, 2022(14): 42-43.
- [56] Schroeder P. Can intensive management increase carbon storage in forests? *Environmental Management*, 1991, 15(4): 475-481.
- [57] 贾忠奎. 我国人工林长期生产力维持技术研究进展. *世界林业研究*, 2012, 25(1): 49-54.
- [58] 罗韧. 抚育间伐对马尾松生物生产力的影响. *四川林业科技*, 1992, 13(2): 29-34.
- [59] 杨玉林, 高俊波, 曹飞, 卢德宝, 赵庆喜, 吴耀先, 卢正茂. 抚育间伐对落叶松生长量的影响. *吉林林业科技*, 2003, 32(5): 21-24.
- [60] 梁晶, 王庆成, 许丽娟, 吴文娟. 抚育对长白山两种林分凋落物分解及土壤的影响. *植物研究*, 2015, 35(2): 297-303.
- [61] 孙志虎. 长白落叶松人工用材林长期生产力维持的研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2005.
- [62] 汪远方, 刘泽武, 张树来. 新时期森林抚育经营技术与措施. *现代农业研究*, 2020, 26(5): 115-116.
- [63] 向椰. 森林经营管理中提高森林碳汇能力的措施. *现代农业科技*, 2021(20): 125-126.
- [64] Tang J W, Bolstad P V, Martin J G. Soil carbon fluxes and stocks in a Great Lakes forest chronosequence. *Global Change Biology*, 9, 15(1): 145-155.
- [65] 张红. 森林经营管理对森林碳汇的作用及提升策略研究. *林业建设*, 2020(3): 20-23.
- [66] Pan Y D, Birdsey R A, Fang J Y, 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 L, Rautiainen A, Sitch S, Hayes D. A large and persistent carbon sink in the world's forests. *Science*, 2011, 333(6045): 988-993.
- [67] Trumbore S, Brando P, Hartmann H. Forest health and global change. *Science*, 2015, 349(6250): 814-818.
- [68] 胡海清, 罗斯生, 罗碧珍, 魏书精, 吴泽鹏, 王振师, 李小川, 周宇飞. 林火干扰对森林生态系统土壤有机碳的影响研究进展. *生态学报*, 2020, 40(6): 1839-1850.
- [69] 马爱民. 气候变化的影响与我国的对策措施. *中国科技投资*, 2009(7): 20-23.
- [70] 侯华丽, 谭文兵, 周璞, 柳晓娟, 张惠. 发掘土壤碳库 助力实现碳中和中国自然资源报, 2021-04-14(3).
- [71] 周剑芬, 管东生. 森林土地利用变化及其对碳循环的影响. *生态环境*, 2004, 13(4): 674-676.
- [72] Sharma P, Rai S C, Sharma R, Sharma E. Effects of land-use change on soil microbial C, N and P in a Himalayan watershed. *Pedobiologia*, 2004, 48(1): 83-92.
- [73] Guo L B, Gifford R M. Soil carbon stocks and land use change: a meta analysis. *Global Change Biology*, 2002, 8(4): 345-360.
- [74] Laclau P. Biomass and carbon sequestration of ponderosa pine plantations and native cypress forests in northwest Patagonia. *Forest Ecology and Management*, 2003, 180(1/2/3): 317-333.
- [75] 铁铮, 武曙红. 碳达峰和碳中和: 林业发展迎来新机遇. *国土绿化*, 2021, 000(005): P.33-5.
- [76] 陈家新, 杨红强. 全球森林及林产品碳科学研究进展与前瞻. *南京林业大学学报: 自然科学版*, 2018, 42(4): 1-8.
- [77] 胡小燕, 段爱国. 森林生态系统碳储量研究进展. *林业科技通讯*, 2020(2): 3-6.
- [78] 胡海清, 罗斯生, 罗碧珍, 魏书精, 吴泽鹏, 王振师, 李小川, 周宇飞. 林火干扰对森林生态系统土壤有机碳的影响研究进展. *生态学报*, 2020, 40(6): 1839-1850.
- [79] 钱壮壮, 朱孔鑫, 王会利, 覃其云, 邓小军, 曹继钊, 庄舜尧. 菌剂添加对人工林土壤呼吸和有机质含量及细菌群落影响. *南方林业科学*, 2021, 49(2): 37-41, 78.
- [80] 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.