DOI: 10.5846/stxb202205201425

朱建华,田宇,李奇,刘华妍,郭学媛,田惠玲,刘常富,肖文发.中国森林生态系统碳汇现状与潜力.生态学报,2023,43(9):3442-3457.

Zhu J H, Tian Y, Li Q, Liu H Y, Guo X Y, Tian H L, Liu C F, Xiao W F.The current and potential carbon sink in forest ecosystem in China. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(9):3442-3457.

中国森林生态系统碳汇现状与潜力

朱建华^{1,2,3,*},田 宇^{1,4},李 奇^{1,5},刘华妍^{1,2},郭学媛^{1,2},田惠玲^{1,2},刘常富^{1,2,3}, 肖文发^{1,2,3}

- 1 中国林业科学研究院森林生态环境与自然保护研究所 国家林业和草原局森林生态环境重点实验室, 北京 100091
- 2 国家林业和草原局林业碳汇计量与研究中心, 北京 100091
- 3 南京林业大学南方现代林业协同创新中心,南京 210037
- 4 中节能生态产品发展研究中心有限公司, 北京 100084
- 5 中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司,西安 710065

摘要: 巩固和提升森林碳汇, 是实现中国"碳中和"目标的重要路径之一。研究总结梳理了近 10 年来有关中国森林碳储量及其变化的研究文献, 一方面在于探明中国森林碳汇现状和潜力以及对实现"碳中和"的贡献, 同时分析当前森林碳汇计量与模拟预测研究的差距与不足, 更好地支撑国家碳中和实施路径与行动方案。通过整合分析, 1999—2018 年间中国森林生态系统碳储量年均增长量约(208.0±44.5) TgC/a 或(762.0±163.2) TgCO₂-eq/a, 其中生物质、死有机质和土壤有机碳库的年均增长量分别约为(168.8±42.4) TgC/a、(12.5±8.1) TgC/a 和(26.7±10.9) TgC/a。此外, 木质林产品和森林之外的其它林木碳储量分别增长(49.0±15.1) TgC/a 和(12.0±11.1) TgC/a。预计中国乔木林生物质碳储量年变化量将从1999—2018 年间的(145.9±38.3) TgC/a增长至2030—2039 年间的(171.9±60.5) TgC/a,到2050—2059 年间逐渐下降至(146.9±57.7) TgC/a。2050—2059 年间中国森林生态系统碳储量年变化量有可能达到(247.0±71.2) TgC/a或(905.2±260.8) TgCO₂-eq/a。但由于不同研究对森林的定义有较大的差别, 再加上数据来源、方法和参数、假设条件等存在差异,中国森林碳储量及其变化的评估预测结果存在较大的不确定性。未来需要在统一土地利用分类的基础上,明确森林面积及其边界的空间变化,综合考虑土地利用变化、气候变化以及人为活动管理等的影响, 全面评估森林生态系统各碳库和预测碳汇动态,有效支撑实现中国"碳中和"宏伟目标。

关键词:森林生态系统;森林面积;碳储量变化;碳汇潜力

The current and potential carbon sink in forest ecosystem in China

ZHU Jianhua^{1,2,3,*}, TIAN Yu^{1,4}, LI Qi^{1,5}, LIU Huayan^{1,2}, GUO Xueyuan^{1,2}, TIAN Huiling^{1,2}, LIU Changfu^{1,2,3}, XIAO Wenfa^{1,2,3}

- 1 Ecology and Nature Conservation Institute, Chinese Academy of Forestry, Key Laboratory of Forest Ecology and Environment, National Forestry and Grassland Administration, Beijing 100091, China
- 2 Forestry Carbon Accounting and Research Center, National Forestry and Grassland Administration, Beijing 100091, China
- 3 Co-innovation Center for Sustainable Forestry in Southern China, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China
- 4 Eco-Product Development Research Center, China Energy Conservation and Environmental Protection, Beijing 100084, China
- 5 Northwest Engineering Corporation Limited, Power Construction Corporation of China, Xi'an 710065, China

Abstract: Conserving and enhancing forest carbon sinks is one of the important paths to achieve China's carbon neutrality goal. This paper summarized the research literatures on China's forest carbon stock and carbon stock change (CSC) in the

基金项目:国家自然科学基金重大项目(32192434);"十三五"国家重点研发计划项目(2016YFD0600200)

收稿日期:2022-05-20; 网络出版日期:2022-10-06

*通讯作者 Corresponding author.E-mail: zhucool@caf.ac.cn

#本研究不含中国港澳台统计数据。

past 10 years, with one aim to prove the current and potential forest carbon sink and its contribution to carbon neutrality, and the other aim to reveal the gaps and shortages in forest carbon sink simulation and prediction research, and to better support the national implementation pathways and actions to carbon neutrality. The results show that the mean annual CSC in China's forest ecosystems during 1999—2018 was about (208.0±44.5) TgC/a or (762.0±163.2) TgCO₂-eq/a, among which the mean annual CSC in forest biomass, dead organic matter and soil organic carbon were (168.8±42.4) TgC/a, (12.5±8.1) TgC/a and (26.7±10.9) TgC/a, respectively. In addition, the carbon stocks in harvested wood products and trees outside forest in China increased by (49.0±15.1) TgC/a and (12.0±11.1) TgC/a during 1999—2018, respectively. The mean annual CSC of biomass in arbor forests in China will increase from (145.9±38.3) TgC/a during 1999—2018 to (171.9 ± 60.5) TgC/a in 2030s, and then gradually decrease to (146.9 ± 57.7) TgC/a in 2050s. By 2050s, the mean annual CSC in China's forest ecosystems will reach (247.0±71.2) TgC/a or (905.2±260.8) TgCO₂-eq/a. The differences in the definitions of forests, data sources, estimation methods and parameters, and unreasonable assumptions in different studies resulted in a large uncertainty in the assessment and prediction results of China's forest carbon stock and its changes. It is necessary to unify the land use classification and clarify the changes in forest area and its spatial distribution, comprehensively consider the impacts of land use change, climate change and human activity management, and to assess the dynamics of all carbon pools in forest ecosystem in the future, which will effectively support achieving China's ambitious goal of carbon neutrality.

Key Words: forest ecosystem; forest area; carbon stock change; potential carbon sinks

作为减缓气候变化的重要举措之一,保护和增强森林碳汇、减少毁林和森林退化造成的碳排放等相关内容被纳入多项应对气候变化国际公约。1992年《联合国气候变化框架公约(UNFCCC)》^[1]第四条第 1 款明确提出要促进维护和增强森林碳汇。1997年《京都议定书》^[2]第二条第 1 款将促进可持续森林管理、造林和再造林作为保护和增强温室气体汇和库的重要措施,同时在第三条第 3 款提出要对造林、再造林和毁林产生的温室气体汇和源进行核查和报告。2016年《巴黎协定》^[3]第五条第 1 款要求各缔约方采取行动保护和增强森林碳汇,第五条第 2 款鼓励缔约方通过制定政策和采取积极激励措施,以减少毁林和森林退化造成的排放,以及通过森林保护和可持续管理来提升森林碳储量。2021年 UNFCCC 第 26 次缔约方大会上,包括中国在内的141个国家共同签署了《关于森林和土地利用的格拉斯哥领导人宣言》^[4],承诺到 2030年停止毁林、扭转土地退化状况,在保护森林问题上迈出了具有里程碑意义的一步。

实现"净零排放"并达成《巴黎协定》的控温目标,已成为全球应对气候变化新的焦点问题。在科学层面上,"净零排放"指人为排放到大气的温室气体与人为从大气中清除的温室气体达到平衡^[5]。对森林而言,区分并量化人为和自然过程的温室气体汇或源,明确人为活动的影响和贡献,是"净零排放"目标和《巴黎协定》全球盘点机制下所面临的重大挑战^[6-7]。"政府间气候变化专门委员会(IPCC)"将土地划分为"有管理的土地"和"无管理的土地",其中"有管理的土地"是指采取直接的人为措施(如森林管理、造林、毁林等)或通过间接的人为干预(如设立国家公园、建立保护区等)以实现土地的生产、生态或社会功能,并规定人为活动产生的温室气体汇或源只发生在有管理的土地上,以此区别于无管理的土地上因自然过程产生的温室气体汇或源^[8]。

中国政府一直重视森林碳汇在应对气候变化方面独特且不可替代的作用。2020年中国政府作出了"力争于2030年前实现碳达峰、2060年前实现碳中和"的重大国家战略决策,将巩固现有森林的固碳作用、持续增加森林面积和蓄积量、提升生态系统碳汇增量能力作为实现碳中和的重要发展路径之一。同时提出要提升统计监测能力,开展森林等生态系统碳汇本底调查和碳储量评估,建立生态系统碳汇监测核算体系。因此,明确中国森林碳汇现状与潜力,尤其是凸显人为活动的影响和贡献,对于采取有效的增汇减排行动措施和实现"碳中和"宏伟目标具有十分重要的意义。本文通过总结和梳理近10年来有关中国森林碳储量和碳汇量的

研究文献,一方面在于探明中国森林碳汇现状和潜力以及对实现"碳中和"的贡献,更重要的在于分析认识当前碳汇现状和潜力评估的差距与不足,加强未来碳汇计量与模拟预测研究,更好地支撑国家碳中和实施路径与行动方案的制定。

1 森林碳汇的内涵

UNFCCC 将"汇"定义为从大气中清除温室气体、气溶胶或温室气体前体的任何过程、活动或机制,反之则为源 $^{[1]}$ 。由于温室气体以二氧化碳为主,且常以二氧化碳当量 $(CO_2\text{-eq})$ 来衡量,所以也称为"碳汇"或"碳源"。碳汇和碳源都是相对于大气而言的,碳汇量的大小代表了一段时间内从大气中清除 CO_2 的能力。在IPCC 的报告中,常用正值表示碳源或碳排放,用负值表示碳汇或碳清除 $^{[8]}$ 。

森林碳汇是森林植物通过光合作用从大气中吸收 CO_2 合成有机物,并将其储存在生物体内或土壤中,从而起到降低大气 CO_2 浓度和缓解气候变化的作用。森林生态系统碳库通常分为生物量、凋落物、死木和土壤有机碳。采伐的木产品(Harvested Wood Products, HWP)中的碳可以储存数年到数百年从而延缓碳排放,因此 HWP 是森林生态系统之外的一个重要碳库。森林碳汇量常用一段时间内森林各碳库的碳储量变化之和表示^[8]:

$$\Delta C_{FL} = \sum_{i} \Delta C_{FL,i} = \sum_{i} (\Delta C_{AB,i} + \Delta C_{BB,i} + \Delta C_{DW,i} + \Delta C_{LI,i} + \Delta C_{SO,i} + \Delta C_{HWP,i})$$
 (1)

式中: ΔC_{FL} 为森林碳储量变化,i 为按照气候区、森林类型等划分的层或亚类型, ΔC_{AB} 、 ΔC_{DW} 、 ΔC_{LU} 、 ΔC_{SO} 和 ΔC_{HWP} 分别代表地上生物量、地下生物量、死木、凋落物、土壤有机碳和收获的木产品碳库的碳储量变化。

某一碳库碳储量变化的可以采用"储量变化法"(公式2)或损益法(公式3)来估计[8]:

$$\Delta C = (C_{t_2} - C_{t_1}) / (t_2 - t_1) \tag{2}$$

$$\Delta C = C_{\text{gain}} - C_{\text{loss}} \tag{3}$$

式中:C 为某碳库的碳储量(MgC,1MgC=1t 碳), ΔC 为某碳库的碳储量变化(MgC/a), t_1 和 t_2 分别代表不同的时间(a); C_{esin} 为该碳库的碳储量增加(MgC/a),而 C_{loss} 为该碳库的碳储量减少(MgC/a)。

当森林面积及其边界均未发生变化时,可以直接采用"储量变化法"运用公式(2)计算森林碳储量的变化量。但如果有新增森林或存在毁林时,则必须同时考虑土地利用变化类型的面积和土地利用变化前后碳密度的变化(公式4):

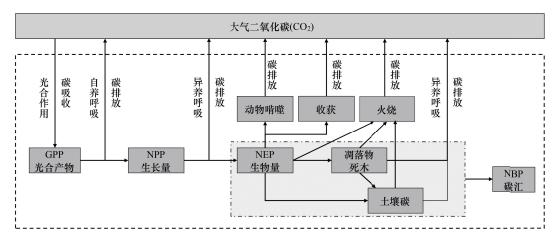
$$\Delta C = \sum_{i} \frac{(D_{i,t_2} - D_{i,t_1}) \times A_i}{(t_2 - t_1)} \tag{4}$$

式中: ΔC 为某碳库的碳储量变化(MgC/a); t_1 和 t_2 分别代表不同的年份(a);i 为土地利用变化的类型,包括 t_1 年至 t_2 年间一直保持为森林、其它土地利用类型转化为森林(如造林、森林自然恢复)和森林转化为其它土地利用类型(如毁林)等;D 为土地利用变化前(后)的碳密度(MgC/hm²);A 为土地利用变化类型的面积(hm²)。

"损益法"多见于一些基于过程的模型模拟研究中,用以描述森林与大气之间的碳交换,以及森林生态系统内各碳库之间的碳转移。公式(3)中 $C_{\rm gain}$ 可以是来自于吸收大气 CO_2 (如光合作用使生物量增长),也可以是来自其它碳库的转移(如凋落物碳库的增加是来自于生物量碳库的转移)。同样 $C_{\rm loss}$ 可以是向大气释放 CO_2 (如生物量燃烧),也可以是转移到其它碳库(如采伐使生物量碳转移到木产品碳库)。在长时间尺度上,森林碳汇相当于森林生态系统总初级生产力(GPP)扣除自养呼吸(Ra)和异养呼吸(Rh)碳排放,再扣除人为活动(如采伐收获)和自然干扰(如火灾、动物啃噬)造成的碳排放之后形成的净生物群系生产力(Net Biome Productivity,NBP)[8](图 1)。

2 全球森林碳汇现状

2020 年全球森林面积 4060 $Mhm^2(1Mhm^2=1$ 百万公顷) 总碳储量达到 662GtC(1GtC= 10^9 t 碳),其中生物量、死有机质和土壤有机质碳库的碳储量分别约占 44%、10% 和 $45\%^{[9]}$ 。多数研究认为目前全球森林总体上



GPP 总初级生产力; NPP 净初级生产力; NEP 净生态系统生产力; NBP 净生物群系生产力

图 1 森林生态系统碳收支示意图

Fig.1 Schematic diagram of carbon budget in forest ecosystem

是一个碳汇,但在有人为管理和干扰发生、年际变化大、土地利用变化剧烈的区域或时段,森林既可能是碳汇也有可能成为碳源 $^{[10]}$ 。Pan 等 $^{[11]}$ 基于清查数据和长期地面观测数据,综合运用统计和过程模型"自下而上"地评估了 1990—2007 年间全球森林总碳汇量约 (-4.05 ± 0.67) PgC/a $(1\ PgC=10^9\ t\ deptage)$ ($-4.05\pm0.67)$ PgC/a $(1\ PgC=10^9\ t\ deptage)$ ($-1.11\pm0.82)$ PgC/a。Harris 等 $^{[13]}$ 基于 IPCC 指南的方法学框架,集成地面监测、激光雷达和卫星观测数据绘制了2001—2019 年间全球森林碳汇 30m 分辨率空间分布图,结果显示 2001—2019 年间毁林等干扰造成了全球森林温室气体排放 (8.1 ± 2.5) GtCO2-eq/a(其中 CO2约占 98.9%),同期全球森林碳汇量约 (-15.6 ± 49.0) GtCO2-eq/a,二者相抵后全球森林净碳汇量约 (-7.6 ± 49.0) GtCO2-eq/a。Wang 等 $^{[14]}$ 利用中国第一颗碳卫星 TanSat的 XCO2产品估计了 2017—2018 年间全球陆地生态系统碳汇为-3.46 PgC/a,但无法具体区分森林的碳汇。

然而,也有研究认为全球森林可能是碳排放源。世界粮农组织(FAO)结果显示,2020 年全球森林面积相比 1990 年减少了 178 Mhm^2 ,森林总碳储量减少了约 6 $GtC^{[9]}$ 。基于 FAO《全球森林资源评估 2020》国别报告数据的研究还表明,尽管全球因毁林产生的碳排放从 1991—2000 年间的 4.3 $GtCO_2$ -eq/a 下降至 2016—2020 年间的 2.9 $GtCO_2$ -eq/a,但同期全球森林总碳汇量也从-3.5 $GtCO_2$ -eq/a 降至-2.6 $GtCO_2$ -eq/a,综合二者之后 1991—2020 年期间全球森林总体是二氧化碳的净排放源,平均年净排放量为 0.4 $GtCO_2$ -eq/a $^{[15]}$ 。2020 年"全球碳收支"评估结果也显示 $^{[12]}$,2011—2020 年间"有管理的土地"碳汇量为 (-2.7 ± 0.4) GtC/a,但以毁林为主的土地利用变化导致的碳排放量为 (3.8 ± 0.6) GtC/a,二者相抵后"有管理的土地"净排放 (1.1 ± 0.7) GtC/a,不过该研究也未区分出森林的具体贡献。

3 中国森林碳汇现状

3.1 中国森林碳汇的评估范围

《森林法》^[16]规定中国森林包括乔木林、竹林和国家特别规定的灌木林(简称"特灌林")。第九次全国森林资源清查报告显示^[17],2014—2018 年间我国乔木林、竹林和特灌林面积分别为 179.89 Mhm^2 ,6.41 Mhm^2 34.15 Mhm^2 。第三次全国国土调查成果显示^[18],截至 2019 年底全国乔木林面积 197.35 Mhm^2 、竹林面积 7.02 Mhm^2 ,但没有单独统计特灌林面积^[19]。一些基于遥感解译的森林面积往往按照土地利用或植被覆盖类型来划分。例如,国家规定的乔木林和竹林郁闭度>0.2,疏林地的郁闭度>0.1 且<0.2^[20],而中国科学院"中国土地利用遥感监测数据"采用的森林郁闭度>0.3,疏林地郁闭度 0.1 至 0.3 之间^[21],清华大学"全球陆地覆盖数

据"则采用了森林郁闭度 > 0.1、树高 > 5 m 的分类标准 [22]。由于对森林的定义和分类方式各不相同,不同土地利用或覆盖分类产品中的中国森林面积存在比较大的差异(表 1),这会直接影响到对森林碳储量及其变化量的评估结果。而且,目前全国尺度森林碳储量及其变化量的研究大多仅针对乔木林,而对竹林和特灌林的研究相对较少。再加上不同研究所采用的评估方法、评估的时间区间和空间范围等方面的差异,目前中国森林碳储量和碳汇量相关研究结果具有非常高的不确定性。

表 1 不同数据来源的中国森林面积/Mhm²

Table 1 China's forest area from different data sources

		£++	竹林 Bamboo forest	灌木	林地 Shrub lands	#24.0.A	粉拍车源	
年份 Year	森林 Forest	乔木林 Arbor forest		特灌林 National specific shrubs	一般灌木林 Other shrubs	小计 Subtotal	其它林地 ^① Other woodland	数据来源 Data source
2015	135.40 ^②	NA	NA	NA	NA	48.69	39.92	[21]
2015	$258.14^{ ext{@}}$	NA	NA	NA	NA	NA	NA	[22]
2015	NA	187.11	NA	NA	NA	43.29	22.59	[23]
2014—2018	$220.45^{\scriptsize{\textcircled{3}}}$	179.89	6.41	34.15	18.70	52.84	13.56	[17]
2019	NA	197.35	7.02	NA	NA	58.63	21.13	[18]
2020	137.14^{2}	NA	NA	NA	NA	46.90	41.73	[21]

①指疏林地、未成林地、苗圃地和迹地等;②包括乔木林、竹林和乔木类经济林;③包括我国港澳台地区的乔木林、竹林和特灌林;NA表示无数据

3.2 森林生物量碳

3.2.1 森林生物质碳储量和碳密度

国家林业和草原局统计结果显示,2014—2018 年间全国森林生物质碳储量为 8.13 PgC(地上和地下生物量碳库分别为 6.39 PgC 和 1.73 PgC)^[17],其中乔木林、竹林和特灌林生物质碳储量分别为 7.58 PgC、0.21 PgC 和 0.34 PgC,平均生物质碳密度分别为 42.14 MgC/hm²、32.76 MgC/hm²和 6.17 MgC/hm²。该项评估是基于全国约 41.5 万个固定样地(其中森林样地约 10 万个)监测数据,按省和优势树种构建生物量经验(回归)模型评估乔木林生物量,同时采用竹子单株生物量模型结合株数密度评价竹林生物量,采用平均生物量密度评价特灌林生物量^[24]。张煜星等^[25]同样基于森林资源清查数据,采用相似的方法构建了 25 个树种的生物量-蓄积量回归模型估计了全国乔木林生物质碳储量和碳密度,结果显示 2014—2018 年间全国乔木林生物质碳储量约为 7.67 PgC,平均生物质碳密度 42.63 MgC/hm²。研究还显示,近 70 年来全国乔木林生物质碳储量变化总体上呈现先降低再逐步增加的态势,尤其 1980 年以后森林采伐得以控制,森林面积逐渐增加,乔木林生物质碳储量得以提升^[25]。 Tang 等^[26]的研究采用的全国森林面积数据为 188.2 Mhm²(其中竹林面积约 4.0 Mhm²)。该研究在全国范围内调查了 7800 个森林样地的生物质、死有机质和土壤有机碳密度,按省、气候区和森林植被类型的面积权重计算得到全国森林生态系统碳储量。研究结果显示^[26],2011—2015 年间全国森林(不含竹林)的生物质碳储量为 10.35 PgC,平均生物质碳密度 55.91 MgC/hm²,明显高于上述基于森林资源清查的评估结果。

3.2.2 森林生物质碳储量变化

近 20 年来中国森林生物质碳储量年变化量的评估结果范围在 116.7—232.0 TgC/a 之间^[17,26—34],不同研究结果之间的差异较大(表 2)。由于多数研究没有考虑森林面积变化产生的温室气体汇和源,只是简单采用"储量变化法"计算了不同时期森林碳储量的年均变化量,因此严格来说不能称为"碳汇"。中国"土地利用、土地利用变化与林业(LULUCF)"国家温室气体清单^[34]评估了 1994—2014 年间"一直保持为林地"的生物质碳储量年均增长 91.0 TgC/a,"其它土地转化为林地(林地面积增加)"的生物质碳储量年均增长 61.2 TgC/a,二者合计 152.2 TgC/a。林地面积增加对于中国森林生物质碳储量增长起到了非常重要的作用,占比约40.2%。Li 等^[35]也认为 1977—2008 年间中国森林生物质碳储量的增长有 50.4%是缘于森林面积的增加,尤

其是人工林面积的增长;而天然林碳储量增加则有 60.4%归因于林分生物质的增长。张煜星等^[25]也认为近 20 年来天然林是中国森林生物质碳储量增加的主要贡献者。

	Table 2 Lite	erature results of fore	st biomass carbon s	stock and carbon stock	change in China	
时段 Period	面积 Area/ Mhm²	碳储量/PgC C stock	碳密度 C density/ (MgC/hm²)	碳储量变化 C stock change/ (TgC/a)	评估方法 Methods	数据来源 Data source
2001—2010	188.2 ^①	10.48	55.7	116.7	I	[26—27]
2000—2009	NA	10.75	NA	NA	II	[28]
2009—2013	164.6	6.81	41.4	142.0	III	[29]
2009—2013	164.6	7.07	43.2	127.4	IV	[30]
2009—2013	164.6	7.27	44.5	141.7	IV	[31]
2009—2013	164.6	6.13	37.3	NA	IV	[32]
2009—2013	164.6	7.38	44.8	149.1	IV	[33]
1994—2014	261.4 ^②	NA	NA	152.2	III	[34]
2014—2018	179.9	7.58	42.1	NA	III	[17]
2014—2018	179.9	7.97	44.3	232.0	III	[31]
2014—2018	179.9	7.91	43.9	106.2	IV	[33]

表 2 中国森林生物质碳储量和碳储量变化文献研究结果

①评估范围包括乔木林和竹林;②评估范围包括:乔木林、竹林、灌木林、疏林和未成林地;③评估范围包括:乔木林、竹林、灌木林、疏林、未成林地、苗圃地、散生木和四旁树。其它未标注的评估范围均只包括乔木林;NA表示无数据;评估方法中I:样地调查集合生物量转换因子;II:地球系统模型(ESM);III:森林资源清查结合生物量模型;IV:森林资源清查结合生物量转换因子

NA

151.8

Zhang 等^[36]基于森林资源清查数据评估了 1999—2003 年间和 2004—2008 年间中国竹林的生物质碳储量分别为 0.43 PgC 和 0.52 PgC, 年均增长 1.8 TgC/a。而 Guo 等^[37]采用同样数据评估了同期中国竹林的生物质碳储量分别为 0.18 PgC 和 0.30 PgC, 年均增长 24.4 TgC/a, 两项研究的差异较大。Zhang 等^[36]还评估了1999—2003 年和 2004—2008 年间中国灌木林的生物质碳储量分别为 0.45 PgC 和 0.53 PgC, 年均增长 16.0 TgC/a。而 Fang 等^[27]的结果显示 2001—2010 年间中国灌丛生态系统(面积 74.3 Mhm^2)生物质碳储量约 0.71 PgC, 年均增长 3.5 TgC/a。由于评估的对象和面积不同, 这两项研究结果之间的可比性不高。

此外,森林之外的林木(Trees Outside Forest, TOF)如疏林、散生木和四旁树等,也储存了一定数量的生物质碳。Pan等^[38]的结果显示 1977—1993 年间中国 TOF 生物质碳储量约为 0.241—0.243 PgC,但年变化量仅约 0.01 TgC/a。Zhang 等^[36]估计 2004—2008 年间中国 TOF 生物质碳储量约为 1.1 PgC,年均增长量达14.0 TgC/a。LULUCF 国家温室气体清单结果显示 1994—2014 年间中国 TOF 生物质碳储量年均增长22.0 TgC/a^[34]。这几项研究的评估时段不同,结果可比性不高,但一定程度上反映了近年来国土绿化对增加生物质碳储量的贡献。

3.3 森林死有机质碳

2014-2018

271.3^③

8.98

森林死有机质(Dead Organic Matter, DOM)包括凋落物和死木,是森林生态系统重要的组成部分。凋落物和死木的碳储量分别约占森林生态系统总碳储量的 6%和 4%^[8],对森林生态系统结构和碳动态具有重要的影响。中国森林 DOM 碳储量及其变化量的研究不多,不确定性也较高。Peng 等^[39]基于中国植被图和来自文献的 3869 个样地数据评估了中国森林 DOM 碳储量约为 0.697 PgC,平均碳密度 4.6 MgC/hm²。Tang 等^[26]评估了 2001—2010 年间中国森林 DOM 碳储量约为 0.37 PgC,平均碳密度 1.90 MgC/hm²,碳储量年均变化量 9.0 TgC/a。LULUCF 国家温室气体清单^[34]结果显示 1994—2014 年间中国森林 DOM 碳储量年均变化量为 21.76 TgC/a。Lun 等^[40]评估了 1999—2008 年间中国森林 DOM 碳储量年均变化量为 22.44 TgC/a。Zhu 等^[41]评估了 2004—2008 年间中国森林 DOM 碳储量约 0.925 PgC,平均碳密度 5.95 MgC/hm²,相比 1984—1998 年中国森林 DOM 碳储量年均增长 6.7 TgC/a。总体而言,中国森林 DOM 碳储量近年来呈增长趋势,这

与中国森林面积以及森林生物质碳储量的变化趋势一致。

3.4 森林土壤有机碳

一般认为,森林表层土壤有机碳含量比较容易受环境变化影响,而深层土壤中的有机碳则相对比较稳定^[42-43]。由于不同研究所评估的森林面积和土层厚度存在差异,中国森林土壤有机碳储量的不同研究结果之间缺乏可比性(表 3)。总体而言,中国森林 0—100cm 土层深度的平均土壤有机碳密度范围约在 106.16—144.89 MgC/hm²之间^[26-27,34,39,42-45]。Xie 等^[42]基于全国土壤普查历史数据和文献资料评估了中国森林表层土壤(平均深度 17.3 cm)的平均有机碳密度约 54.82 MgC/hm²,2000—2009 年间中国森林表层土壤碳储量相比 1980—1989 年间年均增加了 11.72 TgC/a。Li 等^[44]利用机器学习方法研究了 2000—2010 年中国森林土壤(0—20 cm)有机碳储量从 10.96 PgC 增加至 11.15 PgC,年均增长约 19.0 TgC/a。Yang 等^[43]基于 20 世纪80 年代的全国土壤普查数据和 2000 年后文献数据整理,采用数据挖掘的方法评估了 20 年间中国森林表层土壤(0—10 cm)有机碳储量年均增加 31.87 TgC/a,远高于上述两项研究结果。Fang 等^[27]基于森林土壤有机碳年均增长率评估 2001—2010 年间中国森林表层土壤(0—20 cm)有机碳储量增长了 37.6 TgC/a。LULUCF国家温室气体清单^[34]结果显示 1994—2014 年间中国林地土壤(0—30 cm)有机碳储量年均增长 33.41 TgC/a,且主要是新增林地的贡献。

表 3 中国森林土壤有机碳储量及其变化量的文献研究结果

时段 Period	面积 Area/Mhm²	土层厚度 Soil depth/cm	碳储量 C stock/PgC	碳密度 C density/ (MgC/hm ²)	碳储量变化 C stock change/ (TgC/a)	评估方法 Methods	数据来源 Data source
1980—1989	249.32	0—17.3	13.67	54.82	NA	I	[42]
1980—2000	249.32	0—17.3	NA	NA	11.72	I	[42]
1980—2000	159.4 ^①	0—10	NA	NA	$31.87^{@}$	II	[43]
1994—2004	261.4 ^③	0—30	NA	NA	33.41	I	[34]
2001—2010	188.2	0—20	NA	NA	37.6	II	[27]
2000—2009	208.85	0—20	10.96	52.5	NA	III	[44]
2004—2014	195.89	0—20	10.32	52.7	NA	IV	[45]
2010—2019	208.85	0—20	11.15	53.5	19.0 ^④	III	[44]
1980—1989	249.32	0—100	34.23	137.3	NA	I	[42]
2000—2009	208.85	0—100	25.31	121.2	NA	III	[44]
2004—2014	151.55	0—100	21.96	144.89	NA	IV	[39]
2004—2014	195.89	0—100	22.59	115.3	NA	IV	[45]
2010—2019	208.85	0—100	26.06	124.8	75.0 ^④	III	[44]
2011—2015	188.2	0—100	19.98	106.16	NA	II	[26]

Table 3 Literature results of forest soil organic carbon stock and its change in China

①根据该文中使用的森林覆盖率(16.6%)换算成面积;②根据该文中森林土壤有机碳密度的年均变化量乘以森林面积得到;③评估范围包括乔木林、竹林、特殊灌木林、普通灌木林、疏林、未成林地等;④根据该文中2000—2009年间和2010—2019年间的森林土壤有机碳储量之差计算得到10年平均年变化量;评估方法1:全国土壤普查数据结合文献数据,估计平均土壤有机碳密度及其变化;II:全国土壤普查数据结合文献数据,况器学习:IV:文献数据估计平均土壤有机碳密度及其变化

3.5 木产品碳

采伐后木产品(HWP)中储存的碳可以保存较长的时间,这取决于 HWP 的最终用途和使用寿命。通过可持续的森林经营增加采伐量 $^{[46-47]}$,提高长寿命 HWP 比例,或者延长 HWP 使用寿命并加强回收利用 $^{[48]}$,可以有效增加 HWP 碳储量。有研究表明 2015 年全球 HWP 净碳汇量约 91.43 TgC/a,其中中国约为 40.98 TgC/a $^{[47]}$ 。2000 年以来中国 HWP 碳储量呈高速增长趋势,这主要是中国加入 WTO 后实施了多项进口减税和免税政策, HWP 进口量大幅增长 $^{[47,49-50]}$ 。1990s 年代中国 HWP 碳储量年均变化量约 6.16—11.73 TgC/a $^{[50-51]}$;2000s 年代年均增长约 16.71—25.10 TgC/a $^{[49-50]}$;2010—2016 年间增长约 40.98—

70.98 TgC/ $a^{[34,47,50,52]}$ 。研究还表明, 2016 年中国进口 HWP 的碳储量增长占到了国产 HWP 碳储量增长的 $46\%^{[50]}$ 。

3.6 中国森林生态系统碳储量变化

通过整合近年来中国森林碳储量及其变化量的研究结果,近 20 年来中国森林生物质碳储量增长迅速,发挥着显著的碳汇功能(图 2)。1999—2018 年间,中国乔木林、竹林和特灌林生物质碳储量年均增长量分别达到(145.9±38.3) TgC/a、(13.1±16.0) TgC/a 和(9.8±8.8) TgC/a (图 3);森林生态系统中,生物质、DOM 和 SOC 碳储量年均增长量分别为(168.8±42.4) TgC/a、(12.5±8.1) TgC/a 和(26.7±10.9) TgC/a (图 4),分别占比81.1%、6.0%和12.8%。1999—2018 年间,中国森林生态系统总碳储量年均增长(208.0±44.5) TgC/a (图 5),相当于清除大气二氧化碳(762.0±163.2) $TgCO_2$ -eq/a;森林生态系统之外的木质林产品(HWP)和其它林木(TOF) 碳储量年均增加量分别为(49.0±15.1) TgC/a 和(12.0±11.1) TgC/a (图 5),分别相当于清除大气二氧化碳(179.7±55.5) $TgCO_2$ -eq/a 和(44.0±40.8) $TgCO_2$ -eq/a。

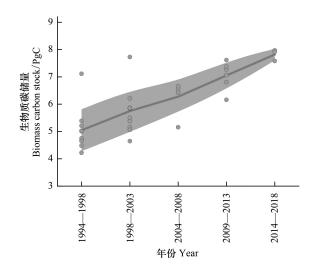


图 2 1999—2018 年中国乔木林生物质碳储量文献结果 Fig.2 Literatures estimated forest biomass carbon stock in China during 1999—2018

图中阴影是置信区间

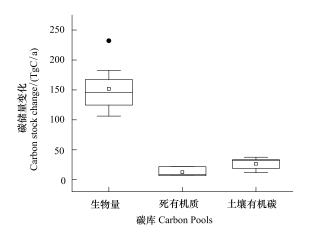


图 4 1999—2018 年中国森林生态系统各碳库的碳储量变化文献 结果

Fig.4 Literatures estimated carbon stock changes in different carbon pools in China's forest ecosystem during 1999—2018 DOM: 死有机质 Dead organic matter; SOC: 土壤有机碳 Soil organic carbon

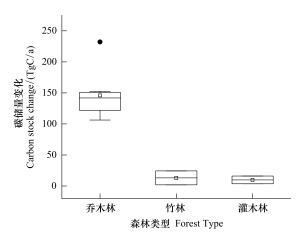


图 3 1999—2018 年中国不同类型森林的生物质碳储量变化文献 结果

Fig.3 Literatures estimated biomass carbon stock in different forest types in China during 1999—2018

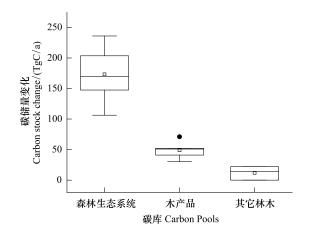


图 5 1999—2018 年中国森林、木产品及其他林木碳储量变化的 文献研究结果

Fig.5 Literatures estimated carbon stock changes in forest ecosystem, harvested wood products and trees outside forest in China during 1999—2018

HWP: 木产品 Harvested wood products; TOF: 其它林木 Trees outside forest

4 中国森林碳汇潜力

森林的固碳潜力主要取决于两个方面:一是森林面积的增长,二是森林生长引起的碳密度变化^[35,53]。 Kauppi 等^[54]提出了一种简单而透明的表达式来评价森林面积、碳密度等变量驱动下的区域森林属性,Fang 等^[53]将这一概念运用到森林碳储量及其变化的归因研究中:

$$M = A \times D \tag{5}$$

$$\frac{\mathrm{dln}(M)}{\mathrm{d}t} = \frac{\mathrm{dln}(A)}{\mathrm{d}t} + \frac{\mathrm{dln}(D)}{\mathrm{d}t} \tag{6}$$

式中,M 代表森林碳储量(PgC)或蓄积量(m^3),A 代表森林面积(hm^2),D 代表森林碳密度(MgC/hm^2)或单位面积蓄积量(m^3/hm^2), $\frac{d\ln(M)}{dt}$ 、 $\frac{d\ln(A)}{dt}$ 和 $\frac{d\ln(D)}{dt}$ 则分别代表森林碳储量或蓄积量、森林面积、碳密度或单位面积蓄积量随时间 t 的变化速率。

IPCC 国家温室气体清单指南[8]将温室气体排放/清除量(ΔC)表述为活动水平数据与排放因子的乘积:

$$\Delta C = AD \times EF \tag{7}$$

式中:AD 为活动水平,对森林碳汇/碳排放而言可以为按森林类型、林龄、气候区等划分的森林面积;EF 为排放因子,对森林碳汇/碳排放而言可以为单位面积的固碳速率或碳排放速率。

因此,对森林碳汇的评估或预测,重点在于对森林面积变化以及单位面积固碳速率的评估和预测。其中 固碳速率可以用单位面积碳密度的年变化量来表示。

4.1 中国未来森林面积预测

中国已经制定了到 2035 年森林覆盖率达到 26%的目标^[55],这相当于要新增森林面积约 29.2 Mhm^{2[56]}。拒统计,全国尚存宜林地加上各类迹地的面积总计约 52.4 Mhm²,其中约 34%分布在内蒙古,29%分布在西北五省区^[17]。干旱半干旱区的造林成活率以及森林生长速率均较低^[57],因此未来新增森林面积难度也较大。Zhang 等^[56]基于中国天然顶级群落的分布特征,采用机器集成学习方法预测了气候变化背景下到 2070s 全国潜在适宜造林区面积将达到 33.1 Mhm²。Cai 等^[58]利用全球森林适宜分布区数据^[59]、土地覆被数据^[60]和高分辨率全球林木覆盖数据^[61—62],识别出未来全国比较适宜森林分布且造林难度较低的土地面积仅有约5.9 Mhm²,未来森林潜在分布适宜性和造林难度均中等的土地面积约 29.9 Mhm²,而森林潜在分布适宜性低且造林难度高的土地面积约有 52.4 Mhm²。

现有研究预测到 2050 年中国乔木林面积范围在 195.79—249.76 $Mhm^{2[32,58,63-67]}$, 平均约(218.55±19.51) Mhm^2 。除乔木林外, Qiu 等[65] 还预测了 2050 年中国经济林、竹林和灌木林的面积将分别达到 24.66 Mhm^2 、7.44 Mhm^2 和 64.08 Mhm^2 ,森林总面积将达到 293.56 Mhm^2 。Hu 等[67] 预计到 2050 年中国森林总面积将到 272.27 Mhm^2 ,森林覆盖率达到 28.4%。Huang 等[68]则预计 2060 年中国森林总面积将在 2020 年 220.57 Mhm^2 的基础上再增加 47 Mhm^2 ,达到 267.57 Mhm^2 。目前对于中国森林面积最大潜力的估计具有较大的不确定性,范围在 242.25—293.56 Mhm^2 之间,这意味着相比于 2020 年需要新增 21.80—73.11 Mhm^2 。

4.2 中国未来森林碳密度和碳储量变化预测

4.2.1 森林生物量碳预测

现有关于未来森林碳储量变化的预测研究主要侧重于乔木林生物质碳库,而较少涉及土壤和死有机质碳库,对竹林和特灌林也鲜有研究。乔木林生物质碳密度可以基于单位面积蓄积量利用生物量扩展因子 (Biomass Expansion Factor,BEF)的方法转换获得^[8,11,37],而乔木林蓄积量的生长速率则受到树种、林龄、气候、地形、土壤等诸多要素的综合影响,尤其是林龄的影响占主导地位^[69—70]。相对而言,林龄和气候条件更容易随时间发生变化,因此一些研究通过构建林龄和气候变化情景来预测未来森林蓄积生长量,从而估计未来森林生物质碳密度和碳储量变化。例如,Xu等^[63]利用 Logistic 生长曲线构建了全国 36 个主要树种和森林类型

的生物量生长模型。Qiu 等^[65]通过建立林木胸径随年龄、气候、地形以及土壤等因素的生长预测模型来模拟 林分蓄积生长量的变化。He 等^[71]基于成熟林最大生物量密度(B_{max})、最大生长速率(v_0)和林龄等因子构建了中国主要森林植被类型的生物量生长模型。Tian 等^[69]通过机器学习算法建立了主要人工林和天然林蓄积生长量与林分、地形、土壤、气候等多因子的偏依赖关系,并根据林龄和气候变化情景来预测未来森林蓄积生长量和生物质碳储量变化^[70]。Yao 等^[28]将温度、降水等气候因子融入林龄驱动的生物量预测模型,来评价林龄和气候变化对森林生物质碳储量变化的影响。

一些研究基于基准年乔木林面积在未来保持不变的假设,通过预测乔木林蓄积(生物量或生物质碳密度)随林龄的变化,来预测未来时段的乔木林生物质碳密度、生物质碳储量及其变化量(图 6)。也有一些研究构建了未来乔木林面积扩增情景来进行预测(图 7),两种情景下预测结果的不确定性都较高,不同研究结果之间差异也较大。尽管不同预测研究的基准年和基准面积不同,但预测结果均显示中国未来乔木林生物质碳密度和碳储量呈随时间增长的趋势,并将持续发挥碳汇的功能。综合分析图 6 和图 7 中的文献预测结果,未来 2040—2049 年全国乔木林平均生物量碳密度将达到(58.72±10.50) MgC/hm²,乔木林生物质碳储量将达到(12.58±1.99) PgC。在面积扩增假设情景下乔木林生物质碳储量到 2020—2029 年约为(171.9±60.5) TgC/a, 2030—2039 年约为(155.7±58.8) TgC/a, 2040—2049 年约为(146.9±57.7) TgC/a。未来乔木林生物质碳储量年变化量有随时间而下降的趋势,这主要可能是由于多数研究基于林龄变化来进行预测,而未来随着林龄增长,成熟林和过熟林面积占比将增加,乔木林平均生长速率会逐渐下降^[64]。李奇等^[32]和 Xu等^[63]的结果显示,中国乔木林生物质碳储量年变化量从 2020 年后逐年下降。而 Zhang等^[66]和 Cai 等^[58]则预测中国乔木林生物质碳储量年变化量大约在 2030—2035 年前后达到峰值,之后逐渐呈下降趋势。

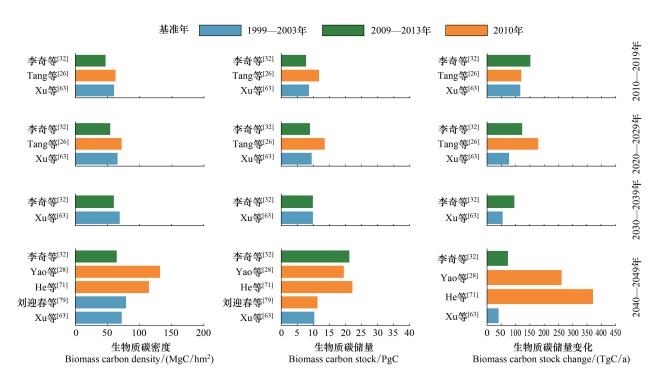


图 6 基于面积不变假设情景的 2020—2050 年中国乔木林生物质碳密度、碳储量和碳储量变化预测研究结果

Fig.6 Literatures predicted biomass carbon density, biomass carbon stock and biomass carbon stock change of the arbor forests in China during 2020—2050 under the arbor area remaining unchanged scenarios

BCD: 生物质碳密度 Biomass carbon density; BCS: 生物质碳储量 Biomass carbon stock; BCSC: 生物质碳储量变化 Biomass carbon stock change

还有一些研究预测了环境因子以及人为管理活动对未来森林生物质碳储量的影响。Yao 等^[28] 预测 2040—2049 年间中国森林生物质碳储量将比 2000—2009 年间增加 8.89—10.37 PgC,其中林龄增长的贡献约

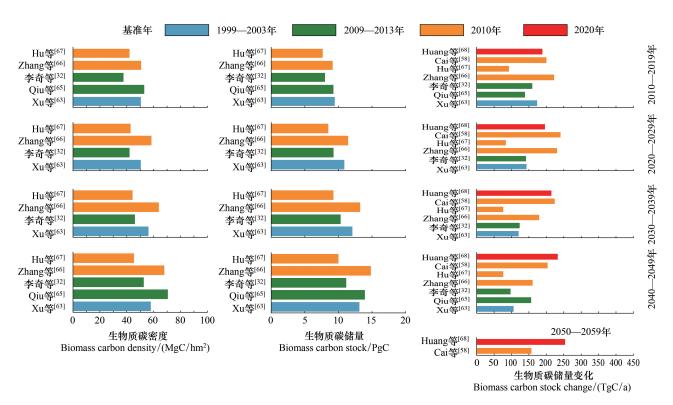


图 7 基于面积扩增假设情景的 2020—2060 年中国乔木林生物质碳密度、碳储量和碳储量变化预测研究结果

Fig.7 Literatures predicted biomass carbon density, biomass carbon stock and biomass carbon stock change of the arbor forests in China during 2020—2060 under the arbor area expansion scenarios

6.69 PgC,气候变化的贡献相对较弱(0.52—0.60 PgC),而 CO_2 浓度增加能贡献 1.68—3.12 PgC。Cai 等 $^{[58]}$ 和 Huang 等 $^{[68]}$ 的研究结果也显示,不同气候情景下未来中国森林生物质碳储量的差异不大。Huang 等 $^{[68]}$ 还认为,通过采取目标导向管理可以显著提升未来中国森林生物质年固碳量,在 RCP4.5 情景下目标导向管理将使 2050s 中国森林生物质年固碳量从基准情景的 189.3 TgC/a 提升到 253.1 TgC/a,贡献占比达到 25.2%。

4.2.2 森林土壤碳预测

Zhang 等^[64]的预测研究考虑了未来森林土壤碳储量的变化,不同情景下中国森林土壤碳储量年变化量将从 1990 年的 18.41TgC/a 缓慢增长到 2050 年的 21.07—29.07 TgC/a 左右。Cai 等^[58]预计在不同的森林面积扩增情景下,2055—2060 年间中国森林土壤碳储量平均年变化量将达到 30—167 TgC/a,而且新造林前期土壤碳储量呈下降状态,后期才逐渐恢复并有所提升。Huang 等^[68]研究认为,不同情景下中国森林土壤碳储量年变化量将从 2010—2019 年间的 68.5 TgC/a 增加到 2050—2059 年间的 67.4—96.5 TgC/a。与前文综述的1999—2018 年间中国森林土壤碳储量年变化量约(26.7±10.9)TgC/a(图 2)相比,这两项研究对于中国森林土壤碳储量变化的预测结果明显较高。

5 结论与展望

5.1 中国森林碳汇现状

通过回顾和梳理近 10 年来有关中国森林碳储量和碳储量变化的研究文献,1999—2018 年间中国森林生态系统总碳储量年均增长量达到(208.0±44.5) TgC/a,相当于清除大气二氧化碳(762.0±163.2) $TgCO_2$ -eq/a。其中森林生物质碳储量年均增长(168.8±42.4) TgC/a(占森林生态系统碳储量年均变化量的 81.1%),森林死有机质(DOM)和土壤有机碳(SOC)储量分别年均增长(12.5±8.1) TgC/a 和(26.7±10.9) TgC/a。此外,森林生态系统之外的木质林产品(HWP)和其它林木(TOF)碳储量年均增加量分别为(49.0±15.1) TgC/a 和(12.0±

11.1) TgC/a,分别相当于清除大气二氧化碳(179.7±55.5) TgCO₂-eq/a 和(44.0±40.8) TgCO₂-eq/a。

5.2 中国森林碳汇潜力

中国森林碳汇潜力预测研究主要侧重于乔木林生物质碳储量的变化。在未来乔木林面积扩增情景下,中国乔木林生物质碳储量年变化量将在2030年前后达到峰值(171.9±60.5)TgC/a,之后逐渐呈下降趋势,2050年约为(146.9±57.7)TgC/a。未来气候变化对中国森林生物质碳储量的影响不大,但通过采取目标导向管理可以显著提升未来中国森林生物质年固碳量。未来不同气候情景和森林面积扩增情景下,中国森林土壤碳储量年均变化量在2050—2059年间将达到21.1—167.0TgC/a,平均约(64.8±36.6)TgC/a。假定没有预测数据的竹林、特灌林、死有机质碳储量变化未来保持在1999—2018年的水平,到2050—2059年间中国森林生态系统碳储量年变化量将达到(247.0±71.2)TgC/a,相当于清除大气二氧化碳(905.2±260.8)TgCO₂-eq/a,但不确定性较高。

5.3 问题与展望

森林面积和范围是森林碳汇评估和预测的核心之一。目前中国森林面积、类型和分布的数据,主要来源于"自下而上"的全国性基础调查(如国土调查、森林资源清查等)以及"自上而下"的土地利用遥感分类解译。不同来源的数据在定义、阈值、分类等方面存在明显的不同,从而造成不同研究文献中所采用的森林面积数据差异较大(表1)。尤其是在采用"储量变化法"评估年均碳储量变化量时,如果森林定义和分类在时间序列上不一致,会直接影响评估结果的准确性和可比性。因此,有必要全面细化和完善全国土地利用基础数据,对包括森林在内的不同陆地生态系统的分类方式、面积及空间分布等数据进行规范并及时更新,详实掌握准确的全国国土利用现状和自然资源变化情况。同时,有必要做好国土空间规划体系建设,明确未来中国森林新增面积的空间规划和时间布局。Hong等[72]认为,通常只有在土壤碳密度较低的情况下造林才有可能增加土壤碳储量,而在土壤碳密度较高的地方造林则有可能造成土壤碳损失。Lai等[73]研究表明 1990—2010年间土地利用变化使中国土壤有机碳储量减少了 11.5 TgC/a。而现有预测研究大多基于未来中国森林面积保持不变的假设,没有考虑土地利用的变化,缺乏合理性和可信度。未来中国森林扩增面积还有多大潜力?在空间上和时间上将如何布局?对森林生物质和土壤碳储量将产生怎样的影响?这将是未来森林碳储量及其变化量预测研究需要重点考虑的问题。

森林碳汇评估和预测的另一个核心问题是森林生态系统固碳速率,反映为单位面积碳储量(或碳密度)的年变化量。从方法来说,许多研究都简单采用"储量变化法"来评价不同时期森林碳储量的变化,往往容易忽视土地利用变化(如林地征占、造林和再造林等)的影响,特别是对土壤碳库的影响^[74]。碳密度的评估方法、模型和参数的差异,也会导致结果不确定性增加。Guo 等^[74]基于 1999—2003 年森林资源清查数据,采用连续的生物量扩展因子、平均生物量密度和平均比例系数 3 种不同的生物量转换方法来评估中国乔木林生物质碳密度和碳储量,结果显示中国乔木林生物质碳储量分别为 5.862 PgC、7.726 PgC 和 6.211 PgC,不同方法的评估结果差异明显。Peng 等^[39]分别采用了 3 种森林类型分类方法和 3 种空间插值方法来评估 2004—2014 年间中国森林生态系统碳储量,结果显示 6 种方法评估结果的变动系数在 5.0% 左右,且主要是土壤有机碳的差异。

目前对于未来森林碳密度的预测,大多基于林龄与蓄积量(生物量或碳密度)的相关关系来进行模拟。普遍认为林龄是森林结构和功能最重要的驱动因子^[75],会影响到森林碳循环的许多环节,如生物量生长^[38,63,69]、凋落物分解^[76]和净初级生产力^[77]、净生态系统生产力^[78]等等。因此,能否准确预测林龄随时间的变化是未来森林碳密度预测的关键。但林龄变化具有非常高的不确定性,并不一定会随时间同步增长,还会受到森林自然死亡与更新、火灾病虫害、人为采伐和更新造林等因素的综合影响^[78]。现有研究大多假定森林的林龄变化总是与时间变化同步,且未来整体向成熟林和过熟林转化^[63,65-67,71,79]。这一假设缺乏合理性,也不符合林业生产实际,因此预测结果的可信度不高。

气候、土壤、立地等环境要素也会影响森林生长量和碳密度变化[69-70]。有研究认为在全国尺度上未来气

候变化对森林碳汇潜力的影响不大^[28,58],但是否存在区域、树种或森林类型之间的差异?目前尚不十分清楚,有待进一步深入研究。有效的人为管理对森林碳汇潜力也有显著的提升效果。例如,将纯林改造为混交林往往具有更好的固碳效益^[80-81];选择固碳能力强的造林树种可以增强森林的固碳能力^[82-83];改变种植密度、调整采伐周期、改变采伐方式等也会影响人工林固碳能力^[80]。但目前这些技术措施主要还停留在林分尺度的实验研究,尚未在区域或更大尺度进行推广和应用,增汇潜力难以有效评估。中国现有森林 60%以上还处于幼龄和中龄阶段,天然次生林面积占比较高,平均每公顷蓄积 94.84 m³/hm² 只有全球平均水平的72%^[17],森林固碳潜力尚未得到完全发挥。未来亟需通过科学改造与经营,从森林面积扩增、生产力提高、木产品高效循环利用等多角度促进森林生态系统固碳增汇,为实现中国 2060 年前"碳中和"宏大目标作出积极有效的贡献。

参考文献 (References):

- [1] United Nations. United nations framework convention on climate change. 1992. [2022-01-08]. https://unfccc.int/files/essential_background/background_publications_htmlpdf/application/pdf/conveng.pdf.
- [2] United Nations. Kyoto protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change. 1998. [2022-01-08]. https://unfccc.int/sites/default/files/resource/docs/cop3/107a01.pdf.
- [3] United Nations. Paris Agreement. 2015.
- [4] Glasgow Leaders' Declaration on Forests and Land Use. 2021. [2022-01-08]. https://unfccc.int/sites/default/files/english_paris_agreement.pdf.
- [5] Fankhauser S, Smith S M, Allen M, Axelsson K, Hale T, Hepburn C, Kendall J M, Khosla R, Lezaun J, Mitchell-Larson E, Obersteiner M, Rajamani L, Rickaby R, Seddon N, Wetzer T. The meaning of net zero and how to get it right. Nature Climate Change, 2022, 12(1): 15-21.
- [6] Ogle S M, Kurz W A. Land-based emissions. Nature Climate Change, 2021, 11(5): 382-383.
- [7] Grassi G, Stehfest E, Rogelj J, van Vuuren D, Cescatti A, House J, Nabuurs G J, Rossi S, Alkama R, Viñas R A, Calvin K, Ceccherini G, Federici S, Fujimori S, Gusti M, Hasegawa T, Havlik P, Humpenöder F, Korosuo A, Perugini L, Tubiello F N, Popp A. Critical adjustment of land mitigation pathways for assessing countries' climate progress. Nature Climate Change, 2021, 11(5): 425-434.
- [8] IPCC. Guidelines for national greenhouse gas inventories, prepared by the national greenhouse gas inventories programme. IGES, 2006.
- [9] FAO. Global forest resources assessment 2020-Key findings. 2021.
- [10] Klein Goldewijk K, Beusen A, Doelman J, Stehfest E. Anthropogenic land use estimates for the Holocene-HYDE 3.2. Earth System Science Data, 2017, 9(2): 927-953.
- [11] 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.
- [12] Friedlingstein P, O'Sullivan M, Jones M W, Andrew R M, Hauck J, Olsen A, Peters G P, Peters W, Pongratz J, Sitch S, Le Quéré C, Canadell J G, Ciais P, Jackson R B, Alin S, Aragão L E O C, Arneth A, Arora V, Bates N R, Becker M, Benoit-Cattin A, Bittig H C, Bopp L, Bultan S, Chandra N, Chevallier F, Chini L P, Evans W, Florentie L, Forster P M, Gasser T, Gehlen M, Gilfillan D, Gkritzalis T, Gregor L, Gruber N, Harris I, Hartung K, Haverd V, Houghton R A, Ilyina T, Jain A K, Joetzjer E, Kadono K, Kato E, Kitidis V, Korsbakken J I, Landschützer P, Lefèvre N, Lenton A, Lienert S, Liu Z, Lombardozzi D, Marland G, Metzl N, Munro D R, Nabel J E M S, Nakaoka S I, Niwa Y, O'Brien K, Ono T, Palmer P I, Pierrot D, Poulter B, Resplandy L, Robertson E, Rödenbeck C, Schwinger J, Séférian R, Skjelvan I, Smith A J P, Sutton A J, Tanhua T, Tans P P, Tian H Q, Tilbrook B, van der Werf G, Vuichard N, Walker A P, Wanninkhof R, Watson A J, Willis D, Wiltshire A J, Yuan W P, Yue X, and Zaehle S. Global carbon budget 2020. Earth System Science Data, 2021, 12, 3269 3340.
- [13] Harris N L, Gibbs D A, Baccini A, Birdsey R A, de Bruin S, Farina M, Fatoyinbo L, Hansen M C, Herold M, Houghton R A, Potapov P V, Suarez D R, Roman-Cuesta R M, Saatchi S S, Slay C M, Turubanova S A, Tyukavina A. Global maps of twenty-first century forest carbon fluxes. Nature Climate Change, 2021, 11(3): 234-240.
- [14] Wang H M, Jiang F, Liu Y, Yang D X, Wu M S, He W, Wang J, Wang J, Ju W M, Chen J M. Global terrestrial ecosystem carbon flux inferred from TanSat XCO2 retrievals. Journal of Remote Sensing, 2022, 2022; 1-12.
- [15] Tubiello F N, Conchedda G, Wanner N, Federici S, Rossi S, Grassi G. Carbon emissions and removals from forests: new estimates, 1990 2020. Earth System Science Data, 2021, 13(4): 1681-1691.
- [16] 全国人民代表大会常务委员会. 中华人民共和国森林法. 2020.
- [17] 国家林业和草原局. 中国森林资源报告(2014—2018). 北京: 中国林业出版社, 2019.

- [18] 自然资源部. 第三次全国国土调查主要数据成果发布.(2021-08-26) [2022-01-08]. http://www.mnr.gov.cn/dt/ywbb/202108/t20210826_2678337.html
- [19] 全国国土资源标准化技术委员会. TD/T 1044-2014 生产项目土地复垦验收规程. 北京: 中国标准出版社, 2014.
- [20] 全国自然资源与国土空间规划标准化技术委员会. GB/T 21010-2017 土地利用现状分类. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- [21] 中国科学院资源环境科学与数据中心. 中国土地利用遥感监测数据. [2022-04-08]. https://www.resdc.cn/Datalist1.aspx
- [22] Liu H, Gong P, Wang J, Clinton N, Bai Y Q, Liang S L. Annual dynamics of global land cover and its long-term changes from 1982 to 2015. Earth System Science Data, 2020, 12(2): 1217-1243.
- [23] 自然资源部. 全国和省级年度土地利用现状数据. [2022-04-10]. https://tddc.mnr.gov.cn/
- [24] 李海奎,雷渊才,曾伟生,基于森林清查资料的中国森林植被碳储量,林业科学,2011,47(7):7-12.
- [25] 张煜星,王雪军,全国森林蓄积生物量模型建立和碳变化研究,中国科学;生命科学,2021,51(2);199-214.
- [26] Tang X L, Zhao X, Bai Y F, Tang Z Y, Wang W T, Zhao Y C, Wan H W, Xie Z Q, Shi X Z, Wu B F, Wang G X, Yan J H, Ma K P, Du S, Li S G, Han S J, Ma Y X, Hu H F, He N P, Yang Y H, Han W X, He H L, Yu G R, Fang J Y, Zhou G Y. Carbon pools in China's terrestrial ecosystems: new estimates based on an intensive field survey. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2018, 115(16): 4021-4026.
- [27] Fang J Y, Yu G R, Liu L L, Hu S J, Chapin F S III. Climate change, human impacts, and carbon sequestration in China. PNAS, 2018, 115 (16): 4015-4020.
- [28] Yao Y T, Piao S L, Wang T. Future biomass carbon sequestration capacity of Chinese forests. Science Bulletin, 2018, 63(17): 1108-1117.
- [29] 张煜星,王雪军,蒲莹,张建波. 1949—2018 年中国森林资源碳储量变化研究. 北京林业大学学报, 2021, 43(5): 1-14.
- [30] Liu W W, Lu F, Luo Y J, Bo W J, Kong L Q, Zhang L, Liu B J, Ouyang Z Y, Wang X K. Human influence on the temporal dynamics and spatial distribution of forest biomass carbon in China. Ecology and Evolution, 2017, 7(16): 6220-6230.
- [31] Zhao M M, Yang J L, Zhao N, Liu Y, Wang Y F, Wilson J P, Yue T X. Estimation of China's forest stand biomass carbon sequestration based on the continuous biomass expansion factor model and seven forest inventories from 1977 to 2013. Forest Ecology and Management, 2019, 448: 528-534.
- [32] 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.
- [33] Zhao M M, Yang J L, Zhao N, Liu L, Du L, Xiao X M, Yue T X, Wilson J P. Spatially explicit changes in forest biomass carbon of China over the past 4 decades; coupling long-term inventory and remote sensing data. Journal of Cleaner Production, 2021, 316; 128274.
- 94] 中华人民共和国气候变化第二次两年更新报. 2019. https://unfccc.int/documents/197666.
- [35] Li P, Zhu J, Hu H, Guo Z, Pan Y, Birdsey R, Fang J. The relative contributions of forest growth and areal expansion to forest biomass carbon. Biogeosciences, 2016, 13(2): 375-388.
- [36] Zhang C H, Ju W M, Chen J M, Zan M, Li D Q, Zhou Y L, Wang X Q. China's forest biomass carbon sink based on seven inventories from 1973 to 2008. Climatic Change, 2013, 118(3/4): 933-948.
- [37] Guo Z D, Hu H F, Li P, Li N Y, Fang J Y. Spatio-temporal changes in biomass carbon sinks in China's forests from 1977 to 2008. Science China Life Sciences, 2013, 56(7): 661-671.
- [38] Pan Y D, Luo T X, Birdsey R, Hom J, Melillo J. 'new estimates of carbon storage and sequestration in China'S forests: effects of age-class and method on inventory-based carbon estimation'. Climatic Change, 2004, 67(2/3): 211-236.
- [39] Peng S L, Wen D, He N P, Yu G R, Ma A N, Wang Q F. Carbon storage in China's forest ecosystems: estimation by different integrative methods. Ecology and Evolution, 2016, 6(10): 3129-3145.
- [40] Lun F, Li W H, Liu Y. Complete forest carbon cycle and budget in China, 1999-2008. Forest Ecology and Management, 2012, 264: 81-89.
- [41] Zhu J, Hu H, Tao S, Chi X, Li P, Jiang L, Ji C, Zhu J, Tang Z, Pan Y, Birdsey R A, He X, Fang J. Carbon stocks and changes of dead organic matter in China's forests. Nature Communications, 2017, 8: 151.
- [42] Xie Z B, Zhu J G, Liu G, Cadisch G, Hasegawa T, Chen C M, Sun H F, Tang H Y, Zeng Q. Soil organic carbon stocks in China and changes from 1980s to 2000s. Global Change Biology, 2007, 13(9): 1989-2007.
- [43] Yang Y H, Li P, Ding J Z, Zhao X, Ma W H, Ji C J, Fang J Y. Increased topsoil carbon stock across China's forests. Global Change Biology, 2014, 20(8): 2687-2696.
- [44] Li H W, Wu Y P, Liu S G, Xiao J F, Zhao W Z, Chen J, Alexandrov G, Cao Y. Decipher soil organic carbon dynamics and driving forces across China using machine learning. Global Change Biology, 2022, 28(10): 3394-3410.
- [45] Xu L, Yu G R, He N P, Wang Q F, Gao Y, Wen D, Li S G, Niu S L, Ge J P. Carbon storage in China's terrestrial ecosystems: a synthesis. Scientific Reports, 2018, 8(1): 1-13.
- [46] Pilli R, Fiorese G, Grassi G. EU mitigation potential of harvested wood products. Carbon Balance and Management, 2015, 10(1): 6.

- [47] Johnston C M T, Radeloff V C. Global mitigation potential of carbon stored in harvested wood products. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2019, 116(29); 14526-14531.
- [48] Brunet-Navarro P, Jochheim H, Muys B. The effect of increasing lifespan and recycling rate on carbon storage in wood products from theoretical model to application for the European wood sector. Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change, 2017, 22(8): 1193-1205.
- [49] Yang H Q, Zhang X F, Hong Y X. Classification, production, and carbon stock of harvested wood products in China from 1961 to 2012. BioResources, 2014, 9(3): 4311-4322.
- [50] Zhang L Y, Sun Y K, Song T Y, Xu J Q. Harvested wood products as a carbon sink in China, 1900—2016. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2019, 16(3); 445.
- [51] 白彦锋,姜春前,张守攻,中国木质林产品碳储量及其减排潜力,生态学报,2009,29(1):399-405.
- [52] Zhang X B, Yang H Q, Chen J X. Life-cycle carbon budget of China's harvested wood products in 1900-2015. Forest Policy and Economics, 2018, 92: 181-192.
- [53] Fang J Y, Guo Z D, Hu H F, Kato T, Muraoka H, Son Y. Forest biomass carbon sinks in East Asia, with special reference to the relative contributions of forest expansion and forest growth. Global Change Biology, 2014, 20(6): 2019-2030.
- [54] Kauppi P E, Ausubel J H, Fang J Y, Mather A S, Sedjo R A, Waggoner P E. Returning forests analyzed with the forest identity. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2006, 103(46): 17574-17579.
- [55] 国家发展改革委,自然资源部.《全国重要生态系统保护和修复重大工程总体规划(2021—2035年)》. 2020.
- [56] Zhang L, Sun P S, Huettmann F, Liu S R. Where should China practice forestry in a warming world? Global Change Biology, 2022, 28(7): 2461-2475.
- [57] McVicar T R, Li L T, van Niel T G, Zhang L, Li R, Yang Q K, Zhang X P, Mu X M, Wen Z M, Liu W Z, Zhao Y A, Liu Z H, Gao P. Developing a decision support tool for China's re-vegetation program: Simulating regional impacts of afforestation on average annual streamflow in the Loess Plateau. Forest Ecology and Management, 2007, 251(1/2): 65-81.
- [58] Cai W X, He N P, Li M X, Xu L, Wang L Z, Zhu J H, Zeng N, Yan P, Si G X, Zhang X Q, Cen X Y, Yu G R, Sun O J. Carbon sequestration of Chinese forests from 2010 to 2060; spatiotemporal dynamics and its regulatory strategies. Science Bulletin, 2022, 67(8): 836-843.
- [59] Ahrends A, Hollingsworth P M, Beckschäfer P, Chen H F, Zomer R J, Zhang L B, Wang M C, Xu J C. China's fight to halt tree cover loss. Proceedings Biological Sciences, 2017, 284(1854): 20162559.
- [60] Gong P, Liu H, Zhang M N, Li C C, Wang J, Huang H B, Clinton N, Ji L Y, Li W Y, Bai Y Q, Chen B, Xu B, Zhu Z L, Yuan C, Ping Suen H, Guo J, Xu N, Li W J, Song L C. Stable classification with limited sample: transferring a 30-m resolution sample set collected in 2015 to mapping 10-m resolution global land cover in 2017. Science Bulletin, 2019, 64(6): 370-373.
- [61] Sexton J O, Song X P, Feng M, Noojipady P, Anand A, Huang C Q, Kim D H, Collins K M, Channan S, DiMiceli C, Townshend J R. Global, 30-m resolution continuous fields of tree cover: Landsat-based rescaling of MODIS vegetation continuous fields with lidar-based estimates of error. International Journal of Digital Earth, 2013, 6(5): 427-448.
- [62] Hansen M C, Potapov P V, Moore R, Hancher M, Turubanova S A, Tyukavina A, Thau D, Stehman S V, Goetz S J, Loveland T R, Kommareddy A, Egorov A, Chini L, Justice C O, Townshend J R G. High-resolution global maps of 21st-century forest cover change. Science, 2013, 342(6160): 850-853.
- [63] Xu B, Guo Z D, Piao S L, Fang J Y. Biomass carbon stocks in China's forests between 2000 and 2050; a prediction based on forest biomass-age relationships. Science China Life Sciences, 2010, 53(7); 776-783.
- [64] Zhang X Q, Xu D Y. Potential carbon sequestration in China's forests. Environmental Science & Policy, 2003, 6(5): 421-432.
- [65] Qiu Z X, Feng Z K, Song Y N, Li M L, Zhang P P. Carbon sequestration potential of forest vegetation in China from 2003 to 2050: predicting forest vegetation growth based on climate and the environment. Journal of Cleaner Production, 2020, 252; 119715.
- [66] Zhang C H, Ju W M, Chen J M, Fang M H, Wu M Q, Chang X L, Wang T, Wang X Q. Sustained biomass carbon sequestration by China's forests from 2010 to 2050. Forests, 2018, 9(11): 689.
- [67] Hu H F, Wang S P, Guo Z D, Xu B, Fang J Y. The stage-classified matrix models project a significant increase in biomass carbon stocks in China's forests between 2005 and 2050. Scientific Reports, 2015, 5: 11203.
- [68] Huang Y, Sun W J, Qin Z C, Zhang W, Yu Y Q, Li T T, Zhang Q, Wang G C, Yu L F, Wang Y J, Ding F, Zhang P. The role of China's terrestrial carbon sequestration 2010 2060 in offsetting energy-related CO2 emissions. National Science Review, 2022; nwac057.
- [69] Tian H L, Zhu J H, He X, Chen X Y, Jian Z J, Li C Y, Ou Q X, Li Q, Huang G S, Liu C F, Xiao W F. Using machine learning algorithms to estimate stand volume growth of Larix and Quercus forests based on national-scale Forest Inventory data in China. Forest Ecosystems, 2022, 9: 100037.
- [70] Tian H L, Zhu J H, Jian Z J, Ou Q X, He X, Chen X Y, Li C Y, Li Q, Liu H Y, Huang G S, Xiao W F. The carbon neutral potential of forests

- in the Yangtze River economic belt of China. Forests, 2022, 13(5): 721.
- [71] He N P, Wen D, Zhu J X, Tang X L, Xu L, Zhang L, Hu H F, Huang M, Yu G R. Vegetation carbon sequestration in Chinese forests from 2010 to 2050. Global Change Biology, 2017, 23(4): 1575-1584.
- [72] Hong S, Yin G, Piao S, Dybzinski R, Cong N, Li X, Wang K, Peñuelas J, Zeng H, Chen A. Divergent responses of soil organic carbon to afforestation. Nature Sustainability, 2020, 3(9): 694-700.
- [73] Lai L, Huang X J, Yang H, Chuai X W, Zhang M, Zhong T Y, Chen Z G, Chen Y, Wang X, Thompson J R. Carbon emissions from land-use change and management in China between 1990 and 2010. Science Advances, 2016, 2(11); e1601063.
- [74] Guo Z D, Fang J Y, Pan Y D, Birdsey R. Inventory-based estimates of forest biomass carbon stocks in China: a comparison of three methods. Forest Ecology and Management, 2010, 259(7): 1225-1231.
- [75] Zhang C H, Ju W M, Chen J M, Li D Q, Wang X Q, Fan W Y, Li M S, Zan M. Mapping forest stand age in China using remotely sensed forest height and observation data. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 2014, 119(6): 1163-1179.
- [76] Xu C Y, Turnbull M H, Tissue D T, Lewis J D, Carson R, Schuster W S F, Whitehead D, Walcroft A S, Li J B, Griffin K L. Age-related decline of stand biomass accumulation is primarily due to mortality and not to reduction in NPP associated with individual tree physiology, tree growth or stand structure in a Quercus-dominated forest. Journal of Ecology, 2012, 100(2): 428-440.
- [77] He L M, Chen J M, Pan Y D, Birdsey R, Kattge J. Relationships between net primary productivity and forest stand age in US forests. Global Biogeochemical Cycles, 2012, 26(3): GB3009.
- [78] Pan Y, Chen J M, Birdsey R, McCullough K, He L, Deng F. Age structure and disturbance legacy of North American forests. Biogeosciences, 2011, 8(3): 715-732.
- [79] 刘迎春, 高显连, 付超, 于贵瑞, 刘兆英. 基于森林资源清查数据估算中国森林生物量固碳潜力. 生态学报, 2019, 39(11): 4002-4010.
- [80] Zhang H, Zhou G M, Wang Y X, Bai S B, Sun Z B, Berninger F, Bai Y F, Penttinen P. Thinning and species mixing in Chinese fir monocultures improve carbon sequestration in subtropical China. European Journal of Forest Research, 2019, 138(3): 433-443.
- [81] He Y J, Qin L, Li Z Y, Liang X Y, Shao M X, Tan L. Carbon storage capacity of monoculture and mixed-species plantations in subtropical China. Forest Ecology and Management, 2013, 295: 193-198.
- [82] Wang W J, Lu J L, Du H J, Wei C H, Wang H M, Fu Y J, He X Y. Ranking thirteen tree species based on their impact on soil physiochemical properties, soil fertility, and carbon sequestration in Northeastern China. Forest Ecology and Management, 2017, 404: 214-229.
- [83] Cui X W, Liang J, Lu W Z, Chen H, Liu F, Lin G X, Xu F H, Luo Y Q, Lin G H. Stronger ecosystem carbon sequestration potential of mangrove wetlands with respect to terrestrial forests in subtropical China. Agricultural and Forest Meteorology, 2018, 249: 71-80.