

DOI: 10.20103/j.stxb.202411072731

王晖,刘世荣,周正虎,陈亮,王健.森林土壤储碳与增汇的不确定性分析.生态学报,2025,45(8):3626-3644.

Wang H, Liu S R, Zhou Z H, Chen L, Wang J. Uncertainty analysis of soil carbon storage and sink in forests. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(8): 3626-3644.

森林土壤储碳与增汇的不确定性分析

王 晖¹, 刘世荣^{1,*}, 周正虎², 陈 亮³, 王 健¹

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 东北林业大学生态学院, 哈尔滨 150040

3 中南林业科技大学生命与环境科学学院, 长沙 410004

摘要: 森林具有类型多样、结构复杂以及随环境变化等特征, 1 m 深森林土壤储存的碳约占全球森林生态系统总碳储量的 45%, 约占全球土壤碳库的 52%。目前对森林土壤固碳潜力和关键过程机制的认识还十分有限。因此, 森林土壤储碳与增汇的估算仍存在很大不确定性。研究梳理了森林土壤有机碳(SOC)储量、密度、含量、增量、固定和碳汇等术语定义; 综述了 SOC 稳定性的机制, 包括化学结构稳定性、团聚体物理保护、金属氧化物和粘土矿物吸附, 生物与环境主导有机碳稳定固持, 以及最新研究相继提出的森林 SOC 组分多样性及功能复杂性维持碳稳定的学术观点。研究还分析了森林 SOC 储量和增量不同测定方法的主要原理、优点和不足。根据已有文献数据分析, 全球森林 1 m 深 SOC 储量变化范围为 383—787 Pg C ($Pg = 10^{15} g$), 年变化范围为每年降低 349 Tg C ($Tg = 10^{12} g$) 到每年增加 498 Tg C。中国森林 1 m 深 SOC 储量评估范围为 16.0—34.2 Pg C, 年变化范围为每年降低 64.5 Tg C 到增加 217.3 Tg C。说明目前对森林 SOC 储量和增量的估算还存在很大不确定性。最新研究表明全球森林碳容量和固碳潜力巨大, 但不同研究对 SOC 是否存在上限仍具不同观点, 气候变化对森林 SOC 储量及其持续固碳潜力的影响也存在较大的不确定性。未来建议通过学科交叉深入探索森林群落结构与土壤固碳过程之间的联系, 从碳组分多样性和功能复杂性的新视角理解森林 SOC 的形成与稳定机制; 将 SOC 监测纳入国家森林资源清查体系、建立国家尺度的 SOC 长期监测网络, 设立我国森林 SOC 增汇大科学计划; 提出保持 SOC 稳定固持的天然林保护修复及经营提升途径; 建立培育高固碳树种, 优化林分结构, 合理采伐以及轮伐期延长等人工林土壤固碳增汇经营技术体系。

关键词: 森林土壤; 储碳; 增汇; 固碳潜力; 不确定性

Uncertainty analysis of soil carbon storage and sink in forests

WANG Hui¹, LIU Shirong^{1,*}, ZHOU Zhenghu², CHEN Liang³, WANG Jian¹

1 Key Laboratory of Forest Ecology and Environment of National Forestry and Grassland Administration, Ecology and Nature Conservation Institute, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China

2 College of Ecology, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China

3 College of Life and Environmental Science, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, China

Abstract: Forests, characterized by diverse types, complex structures, and high sensitivity to environmental changes, account for approximately 45% of the carbon stock in global forest ecosystems and 52% of the global soil carbon pool in the 0—100 cm layer. However, the carbon sequestration potential and key mechanistic processes of forest soils remain limited. Consequently, substantial uncertainties persist in estimating forest soil carbon storage and net carbon sink. In this study, we compiled definitions of terms related to forest soil organic carbon (SOC), including stock, density, concentration, accrual, sequestration, and carbon sink; reviewed the mechanisms of SOC stability, including chemical structure stability, physical protection by aggregates, adsorption by metal oxides and clay minerals, and the dominant role of biological and environmental factors in shaping SOC stabilization. Recent studies suggested that the diversity of SOC components and the complexity of

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(31930078); 国家重点研发计划项目(2021YFD2200400)

收稿日期: 2024-11-07; **网络出版日期:** 2025-01-20

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

their functions in forests played a critical role in maintaining carbon stability. We conducted a comparative analysis of the main principles, advantages, and limitations of various methods for measuring forest SOC stocks and accrual; and literature review to estimate that the global pattern of SOC stocks in the 0—100 cm layer in forest soils, ranging from 383 to 787 Pg C ($\text{Pg} = 10^{15} \text{ g}$). Current studies showed significant discrepancies in the annual variation of global forest SOC stocks, ranging from a decrease of 349 Tg C ($\text{Tg} = 10^{12} \text{ g}$) to an increase of 498 Tg C per year in the 0—100 cm layer. In China, the estimated range of SOC stocks in the 0—100 cm layer in forests ranged from 16.0 to 34.2 Pg C, and the estimated annual variation in SOC stocks in forests ranged from a decrease of 61.5 Tg C to an increase of 217.3 Tg C in the 0—100 cm layer. The above-estimated results remain a great uncertainty in forest SOC stocks and accrual. Recent studies suggested that global forest carbon capacity and sequestration potential were substantial. However, varying perspectives exist regarding whether there was an upper limit to SOC. The impacts of climate change on forest SOC stocks and long-term sequestration potential also remain uncertain. Future studies need to focus on the connections between forest community structure and soil carbon sequestration processes by using interdisciplinary approaches, aiming to understand the mechanisms underlying forest soil carbon stability from a new perspective of the diversity of carbon components and the complexity of their functions. A national-scale long-term SOC monitoring network by incorporating soil C monitoring into the national forest resource inventory system and a major scientific program for enhancing C sequestration in forest soils should be initiated. Also, it is necessary to develop a technical system of forest management to enhance soil sequestration and maintain soil C stability, including natural forest protection, restoration, and management strategies and plantations silviculture regime, including cultivating high-carbon tree species, optimizing stand structure, implementing reasonable harvesting practices, and extending rotation periods.

Key Words: forest soils; carbon storage; carbon sink; carbon sequestration potential; uncertainty

1 森林土壤储碳与增汇的相关概念

1.1 土壤碳及其组成分类

土壤中的碳包括无机碳与有机碳。土壤有机碳 (Soil organic carbon, SOC) 是动植物残体和微生物体, 以及通过微生物作用所形成的腐殖质的合称, 是土壤极其重要的组成部分, 不仅与土壤肥力和健康密切相关, 而且对地球碳循环有巨大的影响。土壤无机碳主要是指土壤中各种负价态的含碳无机化合物, 包括土壤溶液中的碳酸根离子 (CO_3^{2-} 、 HCO_3^-)、土壤中的钙镁碳酸盐沉积物以及土壤空气中的 CO_2 。除了干旱和半干旱地区的土壤无机碳含量相对比较高, 大多数土壤特别是表层土壤无机碳含量非常低, 而且周转期比较长。本文探讨的对象是 SOC。

1.1.1 土壤有机碳化学组分

SOC 化学组分目前常用的测定方法包括: ^{13}C 固体核磁共振技术和傅里叶红外光谱技术等。采用 ^{13}C 固体核磁共振技术可区分的主要 SOC 化学组分如下^[1-2]:

烷基碳 (Alkyl C): 主要来源于脂质、角质和木质素等, 优先保存在土壤中, 并能够长期稳定的储存在土壤中, 是 SOC 的主要贡献者。氧烷基碳 (O-alkyl C): 主要来源于碳水化合物、纤维素、半纤维素和甲氧基碳, 更容易被土壤微生物群落分解。芳香碳 (Aromatic C): 主要来源于木质素、软木质、多肽类或黑碳等带有苯环类的物质, 也来源于微生物代谢产物或植物体经过高热产生的物质。羰基碳 (Carbonyl C): 主要来源于羧酸、酰胺和酮类等物质。

1.1.2 土壤有机碳物理组分

SOC 物理组分通常分为颗粒态和矿物结合态两种形式^[3-4]:

颗粒态有机碳 (Particulate organic carbon, POC), 是指土壤中直径在 53—2000 μm 的有机质颗粒。主要由植物残体、动物遗骸和微生物细胞等组成, 它们在土壤中相对容易受到微生物的分解作用, 因此具有较快的周转率。

矿物结合态有机碳(Mineral-associated organic carbon, MAOC),是指土壤中的有机碳与土壤矿物颗粒通过物理或化学结合的有机碳组分。这种结合可以是暂时的,也可以是长期的,对 SOC 的稳定性和持久性有重要影响。矿物结合态有机碳相对不易被微生物分解,周转时间较长。

1.2 森林土壤储碳和增汇的术语定义

(1) 森林土壤有机碳储量(Forest SOC storage, stock):森林 SOC 库的大小^[5]。

(2) 森林土壤有机碳密度(Forest SOC density):是指单位面积林地一定深度的土层中 SOC 储量。

(3) 森林土壤有机碳含量(Forest SOC concentration):每单位重量森林土壤中有多少有机碳,单位如: g/kg等。

(4) 森林土壤有机碳增量(Forest SOC accrual):在给定时间单位林地 SOC 储量的增加量^[5]。

(5) 森林土壤有机碳固定(SOC sequestration in forest soils):大气中的碳通过森林植物或者其他有机物转移进入土壤并以 SOC 形态留存导致 SOC 储量净增加的过程^[5-6]。

(6) 森林碳汇(Forest C sink):包括植被碳汇和土壤碳汇两部分。可以从两个角度理解森林碳汇定义,①森林植被和土壤的碳吸收过程,如树木等植被的光合作用,土壤光合细菌固定 CO₂和甲烷氧化菌吸收 CH₄等;②森林植被或土壤碳吸收减去碳排放的净固碳量,对于森林植被碳汇就是森林植被光合 CO₂的生物量碳积累减去植被呼吸作用碳排放后的净固碳量,而森林土壤碳汇即是森林 SOC 固定(SOC sequestration in forest soils)。

2 森林土壤有机碳的形成机制与影响因素

2.1 森林土壤有机碳的形成机制

2.1.1 森林土壤有机碳的输入、周转和输出

森林凋落物和根系残体输入作为 SOC 的重要来源^[7-8]。凋落物和根系残体进入土壤后,经过土壤生物的分解作用,逐渐转化为腐殖质,从而形成 SOC。微生物在 SOC 周转过程中发挥重要作用^[9]。土壤微生物通过合成代谢将外源碳转化成有机质储存于土壤中^[10]。微生物通过同化作用优先将易分解有机碳转化为微生物代谢的副产物和细胞残体,并通过与土壤矿物的相互吸附,形成相对稳定的土壤碳组分^[9]。微生物残体贡献了森林表层土壤有机碳的 35%,土壤微生物残体对 SOC 的贡献随着土层深度增加而增加^[11]。土壤微生物可以通过分解代谢向大气释放 CO₂^[10]。土壤呼吸是森林土壤碳输出的主要形式。降雨、洪水等过程导致的地表径流和水分渗透活动会导致 SOC 流失。森林火灾、土壤侵蚀、毁林采伐等会导致森林 SOC 的快速输出。

2.1.2 森林土壤有机碳的稳定机制

决定土壤碳稳定性的机制包括: SOC 的化学结构稳定性、土壤团聚体的物理保护、金属氧化物和粘土矿物与 SOC 的相互作用和生物与环境主导 SOC 稳定固持。

(1) SOC 的化学结构稳定性: SOC 由多种多样、不同化学性质的有机分子组分混合而成,有机碳化学组分表征了有机碳的化学稳定性^[1-2]。

(2) 土壤团聚体的物理保护: SOC 促进了团聚体的形成,而团聚体又能保护 SOC,减少微生物的分解矿化, SOC 的减少伴随着土壤结构的退化^[12]。

(3) 金属氧化物和粘土矿物与 SOC 的相互作用: 高价铁铝氧化物和粘土矿物通过配位体置换、高价离子键桥、范德华力和络合作用等会导致 SOC 的生物有效性下降,即 SOC 稳定性提高^[13]。

(4) 生物与环境主导 SOC 稳定固持: 植物种类、微生物群落与环境条件及其相互作用不仅决定了 SOC 的积累,还影响了土壤的物理和化学性质,从而影响碳的持久性^[14]。

2.2 森林土壤有机碳的影响因素

2.2.1 气候因素

温度和水分对 SOC 均具有双面作用。气温升高可以加快植物生长速率,增加植被光合固碳能力和生产

力,进而增加 SOC^[15];气温升高还可以通过改变土壤微生物群落及提高活性加速 SOC 的分解^[16]。在干旱地区,降水减少可能导致植被覆盖率下降,减少有机质输入,导致 SOC 减少;在湿润地区,降水增加,利于微生物活动和加剧有机质矿化,导致 SOC 流失^[17]。

2.2.2 植物因素

森林植物群落结构改变,如植物多样性变化,乔-灌-草结构转变和森林演替等通过改变植物源和微生物源的碳输入数量和质量影响 SOC 变化^[18]。现有研究表明树种多样性增加可促进 SOC 增加^[19]。

2.2.3 人类活动因素

森林土地利用变化通常指人类将森林生态系统转变为农业用地、城市或其他用途的过程,这种转变大大弱化了森林生态系统包括土壤的固碳能力^[20]。大面积的采伐毁林会显著破坏稳定的土壤结构,短期加快分解并释放 SOC^[21]。

3 森林土壤有机碳储量和增量的测定方法与分布格局

3.1 森林土壤有机碳储量和增量的测定方法

森林 SOC 储量和增量的测定方法可以分为直接测量法和间接测量法(表 1)。

表 1 土壤有机碳储量评估方法
Table 1 Methods for assessing soil organic carbon stocks

方法 Method		主要原理 Principle	优点 Advantages	缺点 Disadvantages
直接测量法 Direct measurement	土壤普查	实测数据+尺度扩展	较准确	资金和劳力耗费高
	整合分析	实测数据汇编+尺度扩展	资金和劳力耗费低、较准确	数据集噪音大
间接测量法 Indirect measurement	生物量比值	遥感生物量+生物量与土壤碳间的经验比例	高效	准确性低
	过程模型	碳循环过程+数学公式	可以预测、机理过程	目前准确性低
	遥感评估	有机碳与土壤光谱反射率间定量关系	高效	无法评估森林土壤和深层土壤

(1)直接测量法。直接测量法是土壤碳储量评估最准确的方法,包括土壤普查和整合分析方法^[22—23]。森林土壤普查估算碳储量包括土壤调查和尺度外推两个关键过程。直接测量法最大不确定性来源于区域碳储量估算,即,单点数据的外推。单点土壤碳储量数据外推方法包括土壤类型法、森林类型法、GIS 插值法和经验模型法^[24—27]。土壤类型法和森林类型法根据每种土壤或森林类型的分布面积进行外推估算。这两种方法忽略了同一土壤类型和森林类型内部土壤碳储量在空间和气候梯度上的巨大变异性。GIS 插值法完全依赖于空间插值,忽略了生态因子的驱动作用。经验模型法是建立多环境因子和土壤碳储量之间的传统多元模型或最新机器学习模型,根据环境因子的栅格数据进行外推。此外,基于文献计量的整合分析也是重要的直接测量法。但缺点是由于实验方法、采样方法等的不一致,整合分析的噪音非常大^[28—29]。

(2)间接法测量法。常用的间接测量法包括生物量比值法、过程模型模拟和遥感评估^[30—32]。生物量比值法是基于不同森林类型植被生物量和 SOC 的比例关系预测土壤碳储量。由于地上植被生物量可以通过遥感方法进行大尺度、长时间监测,因此根据生物量比值法可以研究 SOC 在大尺度以及长时间尺度上的变化。然而,植被生物量和土壤碳储量之间的比例关系具有很大变异性。例如,最新研究发现中国北方大规模的植树造林后生物量碳库和 SOC 库呈现出不对称变化^[33]。因此,生物量比值法量化土壤碳储量存在很大不确定性。

土壤碳循环模型用数学表达式模拟了植物碳输入、不同土壤碳库之间的周转以及 SOC 的释放等动态变化过程,土壤碳储量是碳输入和输出的平衡结果,过程模型模拟也是土壤碳储量评估的重要手段。尤其在预测未来气候变化情景下 SOC 的变化方面发挥关键作用。第六次国际耦合模式比较计划(CMIP6)中采用了 13

个地球系统模式评估了全球土壤碳储量,但是这 13 个地球系统模式对全球土壤碳储量的预测范围差异巨大,变化范围为 516—2430 Pg C^[31]。

土壤有机质在可见光和近红外波段有独特的光谱特性,土壤光谱反射率与土壤有机质含量呈显著负相关关系^[32]。因此,土壤有机质含量可以从土壤反射光谱中得到一定程度的反映,利用土壤高光谱反射率可以进行有机质含量的速测。土壤有机质的光谱特性不仅因有机质含量而变化,而且在很大程度上依赖于成土母质,要求土壤类型的一致性问题。地形、水分等特征也会影响土壤有机质遥感反演的精度^[34]。此外,土壤上方的覆盖物,如秸秆、植被、凋落物等的存在均会限制该方法的实施^[35]。

3.2 全球森林土壤有机碳储量和增量的分布格局

SOC 库是陆地生态系统最大碳库,充分发挥其固碳潜力保守估算可以贡献基于自然的解决方案的四分之一^[36]。然而,目前国内外学者对全球 SOC 库的评估还存在很大的不确定性。以往研究评估的全球 0—100 cm 深 SOC 库大小变化范围为 504—3400 Pg C,平均为 1618 Pg C^[37—38](图 1)。目前国际上被广泛使用的全球 SOC 分布数据产品包括联合国粮食及农业组织和国际土壤参考与信息中心(ISRIC)共同开发的 HWSDv1.2、ISRIC 制作的 WISE30sec 和 SoilGrids250 m。尽管来自同一研究机构,HWSDv1.2、WISE30sec 和 SoilGrids250 m 评估的全球土壤 SOC 储量分别为 2500、1408 和 3400 Pg C^[37]。因此,全球 SOC 储量的评估精度还需要进一步提升。

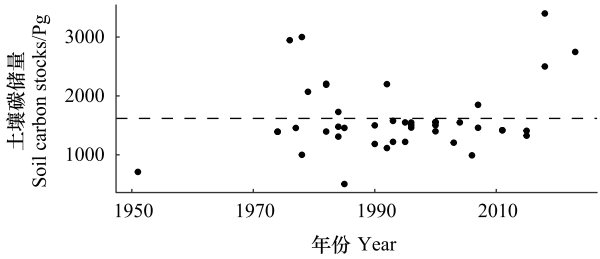


图 1 全球土壤有机碳储量评估^[37—38]

Fig.1 Global assessment of SOC stocks

图中虚线表示全球 0—100 cm 深有机碳储量平均值

依据 HWSD2 数据评估的全球 0—100 cm 森林土壤碳储量为 447.2 Pg,表层土壤(0—20 cm)储存了总量的 43%^[39]。虽然北方森林和温带森林土壤碳密度分别为 21.1 kg C m⁻²和 14.1 kg C m⁻²,高于热带/亚热带森林(11.2 kg C m⁻²)。但是由于热带/亚热带森林面积最大,因此,全球热带/亚热带森林土壤碳储量(183.8 Pg C)略高于北方森林(157.8 Pg C)和温带森林(100.7 Pg C)(图 2)。

此外,基于不同研究方法和不同数据库评估的全球森林土壤碳储量和年变化量大小差异巨大。全球森林 0—100 cm SOC 储量评估变异范围为 383—787 Pg C^[30,40—46]。不同研究评估的全球森林 SOC 储量变化范围为每年降低 349 Tg C 到每年增加 498 Tg(表 2)。

表 2 全球森林 0—100 cm 土壤碳储量和碳汇量

Table 2 Global forest soil carbon stocks and sink at 0 to 100 cm soil layers

评估时间 Assessment period	森林面积 Forest area/ ($\times 10^4$ hm ²)	土壤碳储量 Soil carbon stocks/ (Pg C)	土壤碳储量变化 Changes in soil carbon stocks/(Tg C/a)	参考文献 References
1990—1999	390	383	498	[30]
2000—2007	390	383	456	[30]
1990—1999	400	406	389	[43]
2000—2009	400	401	404	[43]
2010—2019	400	393	463	[43]
1990—2000	400	—	-274	[47]
2000—2005	400	—	50	[47]
2005—2010	400	—	-349	[47]
2010—2015	400	—	-83	[47]
—	387	—	400	[46]
1990	420	787	—	[40]
1982	386	470.7	—	[44]
—	365	630	—	[41]
1980	—	704	—	[45]

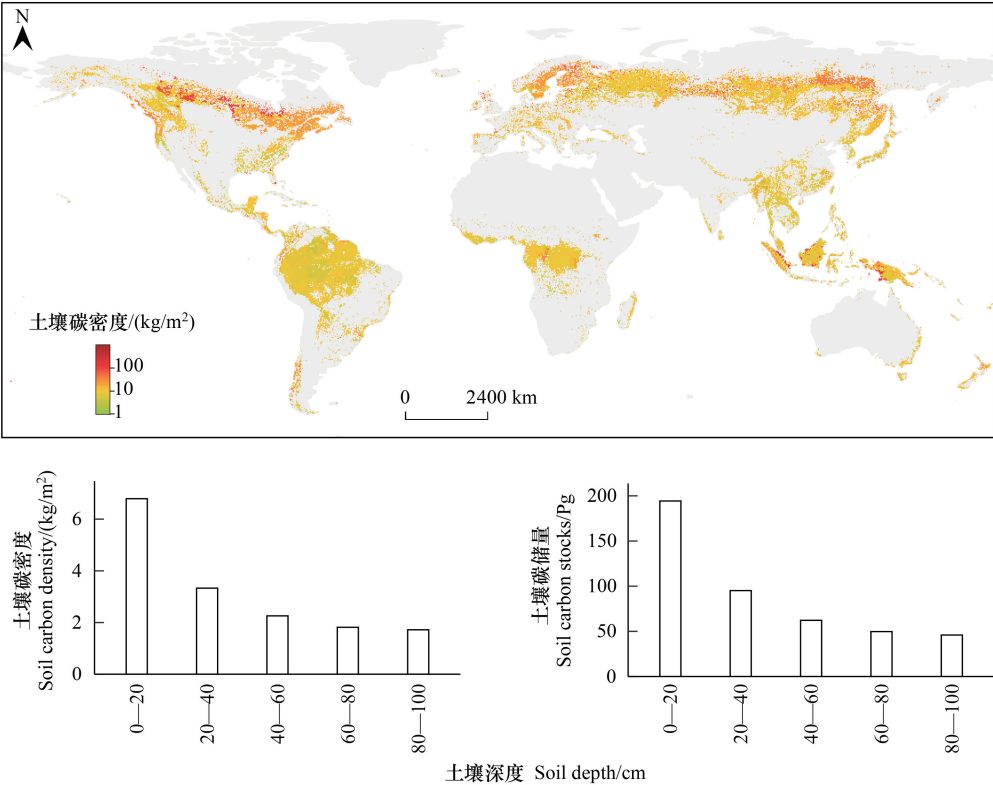


图 2 全球森林土壤有机碳密度的水平和垂直分布

Fig.2 Horizontal and vertical distribution of SOC density in global forests

3.3 中国森林土壤有机碳储量和增量的分布格局

中国森林 0—100 cm SOC 储量评估范围为 16.0—34.2 Pg C,平均值为 23.3 Pg C^[48—53]。尽管很多研究均基于第二次土壤普查的数据进行估算,由于估算方法和森林面积的差异,利用第二次土壤普查数据估算的中国森林 SOC 储量的差异也近 2 倍(表 3)。

表 3 我国森林土壤碳储量和密度

Table 3 Soil carbon stocks and density in forests of China

评估时间 Assessment period	土壤深度 Soil depth/cm	森林面积 Forest area/ ($\times 10^4$ hm ²)	土壤碳储量 Soil carbon stocks/ (Tg C)	土壤碳密度 Soil carbon density/ (kg C/m ²)	参考文献 References
1979—1985	0—100	179.48	19.08	10.63	[48]
1979—1985	0—100	150	17.39	11.59	[54]
1979—1985	0—100	271.54	28.81	10.61	[49]
1979—2004	0—100	197.13	20.7	10.5	[50]
1989—1993	0—100	108.62	21.02	19.36	[24]
2004—2014	0—100	195.89	22.59	11.53	[49]
2010—2015	0—100	188.2	19.98	10.62	[51]
1980—2000	0—100	150	21.5	14.33	[52]
1981—1998	0—100	121.63	23.21	19.08	[53]
1987—1990	0—100	—	16	13.6	[40]
1980—2000	0—100	142.8	22.31	15.62	[55]
2004—2014	0—100	151.55	20.63	13.61	[56]
2004—2014	0—100	151.55	21.09	13.9	[56]
2004—2014	0—100	151.55	22.54	14.88	[56]

续表

评估时间 Assessment period	土壤深度 Soil depth/cm	森林面积 Forest area/ ($\times 10^4 \text{ hm}^2$)	土壤碳储量 Soil carbon stocks/ (Tg C)	土壤碳密度 Soil carbon density/ (kg C/m^2)	参考文献 References
1980	0—100	208.85	23.83	11.41	[57]
2000	0—100	208.85	25.31	12.12	[57]
2010	0—100	208.85	26.06	12.48	[57]
2010—2018	0—100	255	26.02	10.3	[58]
2004—2014	0—100	273.58	31.34	11.45	[49]
1980—2000	0—100	249.32	34.23	13.73	[59]
2000—2014	0—100	208.85	25.56	12.24	[57]
1980	0—20	248.74	11.96	4.81	[23]
2010	0—20	165.8	8.49	5.12	[23]

基于中国科学院南京土壤研究所 2010—2018 年采集的 4844 个土壤剖面生成的数据库^[60],结合森林分布数据库,评估的中国森林 SOC 储量为 26.0 Pg C,表层土壤(0—30 cm)存储了总量的 53%。东北林区土壤碳密度最大(12.1 kg C/m^2),西南林区次之(10.5 kg C/m^2),而华北和西北林区(9.6 kg C/m^2)和东南林区(9.1 kg C/m^2)最低(图 3)。

中国森林土壤碳储量的变化趋势尚不明确。由于缺乏严格的重采样和长期监测数据,不同研究间评估的中国森林 0—1 m 深土壤碳储量变化范围为每年降低 61.5 Tg C 到每年增加 217 Tg C^[50,57,59,61—66](表 4)。

表 4 我国森林土壤碳增量
Table 4 Soil carbon increment in forests of China

评估时间 Assessment period	土壤深度 Soil depth/cm	森林面积 Forest area/ ($\times 10^4 \text{ hm}^2$)	土壤碳储量变化 Changes in soil carbon stocks/(Tg C/a)	参考文献 References
1980—2000	0—100	249.32	11.7	[59]
2000—2014	0—100	208.85	0.9	[57]
2010—2020	0—100	249.32	75.5	[61]
1982—1999	0—100	130	4	[62]
1980—2019	0—100	249.32	217.3	[63]
1981—2000	0—100	131.5	16	[64]
1982—2009	0—100	273.58	90.4	[65]
1988—2001	0—100	229.01	-61.5	[66]
1980—2010	0—20	165.8	-115	[23]

3.4 森林土壤有机碳及组分的空间变异性分析

基于全球森林生态系统的数据整合分析,Zhang 等发现气候、土壤性质和森林类型对 MAOC 含量的解释率(47%)远高于其对 POC 含量的解释率(17%)^[67]。MAOC 和 POC 含量均随年平均温度的升高而降低,原因是温度升高导致的碳分解超过了碳输入的补充。干旱指数显著调控 MAOC 含量,却对 POC 含量没有显著影响。Zhang 等还发现寒温带针叶林和温带森林 POC 含量显著高于亚热带森林,但 MAOC 含量在寒温带针叶林、温带森林和亚热带森林中相近^[67]。另一项全球整合分析却发现温带森林 MAOC 含量最大,热带森林次之,寒温带针叶林最低^[68]。因此,由于整合分析中数据源、采样深度、采样方法、数据分析方法等的影响,两项全球整合分析展示出完全不同的结果。基于标准一致的采样方法,Lugato 等在欧洲的大尺度研究发现,尽管针叶林土壤黏土含量低于阔叶林和针阔混交林,但针叶林单位矿物的 MAOC 密度最大^[69]。

不同研究关于 MAOC 和 POC 对气候变化的敏感性也存在巨大争议。Lugato 等发现气候变化对欧洲森林 POC 的负效应要显著高于其对 MAOC 的负效应,表明 POC 对气候变化的响应比 MAOC 更加敏感^[69]。然而,

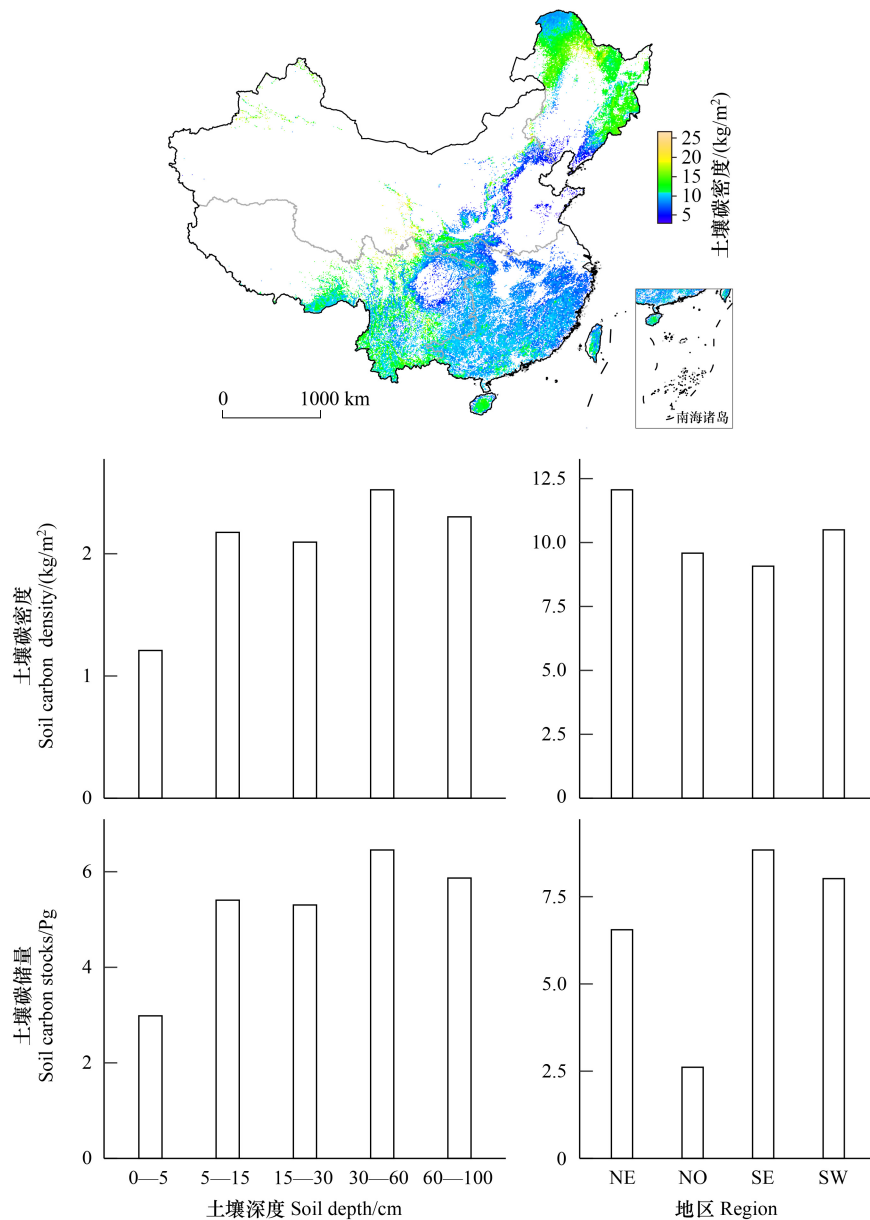


图3 中国森林土壤有机碳储量的水平和垂直分布

Fig.3 Horizontal and vertical distribution of SOC stocks in forests of China

SE:东南;SW:西南;NO:华北和西北;NE:东北

Díaz-Martínez 等最新发现认为全球旱地生态系统 MAOC 和 POC 对气候变化的敏感性相同^[70]。总之,作为关键的 SOC 功能组分,深入分析 MAOC 和 POC 的气候敏感性将有助于揭示 SOC 对气候变化的反馈。例如,基于数据-模型融合手段,最新研究发现全球深层土壤 MAOC 和 POC 对气候变暖的敏感性要显著高于表层土壤^[27]。

4 森林土壤固碳研究关注焦点

4.1 森林土壤碳容量、可持续固持及增长速率和碳汇潜力

最新研究评估表明全球森林碳容量和固碳潜力巨大^[43]。森林拥有陆地生态系统最大的 SOC 库,1 m 深森林土壤储存的碳约占全球森林生态系统总碳储量的 45%,约占全球土壤碳库的 52%^[43,71]。森林具有类型多样性和结构复杂性以及随环境变化等特征,目前对森林土壤的固碳潜力、关键过程及其机制的认识还十分

有限。因此,对森林土壤碳储量及增汇空间的估算仍然存在很大不确定性。

研究表明,伴随着林龄的增加或森林演替,森林 SOC 含量和储量呈现增加趋势。通过在不同自然地理区的森林生态站开展长期定位监测,可以定量分析森林 SOC 积累与转化的动态变化规律,确定反映土壤固碳功能的关键参数和土壤最大碳固持量。例如,在我国华南地区的鼎湖山森林生态站,通过分析 25 年(1979—2003 年)的长期土壤观测数据,发现我国亚热带成熟的天然老林龄仍然具有固碳能力,SOC 含量平均每年增加 0.035%,SOC 储量增加 $0.61 \text{ t hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ ^[72]。Cai 等采用森林碳固存模型并基于 3365 个森林站点的野外调查数据,评估了 3 种造林和 3 种气候情景下 2010—2060 年中国现有和新造林的碳固存速率^[61]。在不考虑极端事件和人为干扰影响的情况下,中国森林平均碳固存速率为 $(0.358 \pm 0.016) \text{ Pg C/a}$,其中生物量和土壤分别为 $(0.211 \pm 0.016) \text{ Pg C/a}$ 和 $(0.147 \pm 0.005) \text{ Pg C/a}$ 。

土壤碳饱和的概念早在 20 年前伴随土壤稳定性机制的深入理解而提出,指的是土壤稳态物理化学稳定的碳含量(MAOC)会随着外源碳输入增加而不再增加^[74]。碳饱和度的概念是基于这样的假设,即粉土和粘土矿物数量决定了土壤储存碳的总体能力。该概念主要将 MAOC 作为主要的土壤碳库,并将矿物的比表面积作为 MAOC 稳定的主要驱动力。Castellano 等提出双库碳饱和模型(图 4),包括一个稳定的慢周转 SOC 库(即 MAOC),该库表现出饱和行为,以及一个不具有饱和行为的相对不稳定的快速周转 SOC 库(即 POC)^[74]。该模型可以在操作上定义,使得植物被分解到 <2 mm 的程度,从而进入不稳定的非保护 SOC 库,该库由未物理化学稳定的植物残留物(即非受保护的 SOC)主导。然后,来自不稳定的非保护 SOC 库的分解产物被转移到物理化学稳定的 SOC 或矿化。随着碳输入的增加,物理化学稳定池中的 SOC 逐渐增加到最大值(即饱和)。但也有些研究认为 MAOC 没有饱和上限,这挑战了土壤碳饱和这一概念^[14,75]。基于此,Six 等又发文重申了土壤碳饱和概念并提出了检测土壤碳饱和状态的六项基本原则^[76]。

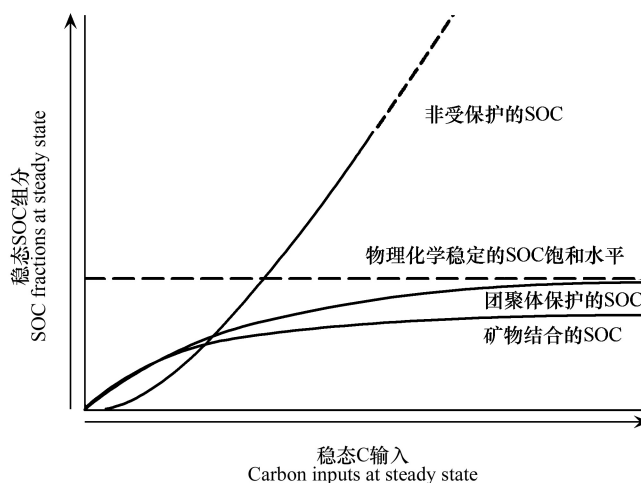


图 4 双库的碳饱和模型^[74]

Fig.4 Carbon saturation model of the dual pool

Georgiou 等通过分析 1144 个全球土壤剖面,对 MAOC 储量和碳储存能力进行了全球估计^[77]。该研究发现:1 m 深非永久冻土矿物土壤碳储量为 899 Pg C。虽然这分别占表层和深层土壤碳的 66%和 70%,但仅占矿物学容量的 42%和 21%。农业管理下的地区和更深的土壤层显示出最大的 MAOC 饱和亏缺^[77]。至关重要的是,饱和和亏缺表明几年到几十年的碳封存潜能。尽管土壤中具有较大的碳固存潜力,但在任何特定地点和特定生态系统内实现这一潜力往往存在重大限制^[78]。Angst 等认为以 SOC 为中心的管理策略应该针对 POC 还是 MAOC(或两者兼而有之),主要取决于土壤的碳饱和度^[79]。对于这些碳“饱和亏缺”较大的土壤,改善管理可以增加 MAOC。但以 MAOC 为目标的管理是否有效主要取决于(1)环境条件,如 pH 值、有机物输入的化学性质或氧气的可用性,以及(2)活性矿物表面的总体比例。这些参数分别决定了土壤动物和微生物

解聚并将有机质转化为更简单形式和微生物残体的速率,这对土壤以 MAOC 形式储存 SOC 的能力至关重要。因此,在有利于有机质转化的条件下(如有机质输入具有低碳氮比和木质素氮比或充足的氧气)和具有丰富活性矿物质的土壤(如富含淤泥和粘土的土壤),通过实施适当的管理,可以促进 MAOC 的形成。虽然 MAOC 确实随着碳含量的增加而趋于“饱和”,但土壤储存额外碳的能力并没有达到饱和点。在接近和高于土壤碳饱和阈值时,MAOC 的形成效率较低,但不是零。同样,有充分的证据表明,额外的(植物)输入可以继续积累为不稳定(自由)或稳定(封闭)的 POC。因此,对于处于或接近其理论碳饱和极限的土壤,以 MAOC 为中心旨在增加碳储存的策略将是无效的,甚至可能适得其反^[7]。对于含碳饱和和矿物相的土壤,重点应该放在 POC 的增加上,例如,通过更多的结构复杂的植物残体输入。如果这些输入持续存在,即使 MAOC 形成很低,从长远来看,这些土壤中的碳储存可以通过 POC 池增加。例如,在以木材生产为目标的森林中,即使 MAOC 库接近饱和,保留较大比例生物量残留物(如树叶和树枝)的做法也可以增加 SOC 储量^[80]。

4.2 全球变化(包括极端气候)如何影响土壤有机碳储存

全球变化包括升温、干旱和氮沉降等已成为不争的事实,影响着陆地生态系统碳循环等关键过程。其中全球气候变化如何影响森林地下碳过程,是当前碳循环模型中最不确定的部分,也成为土壤生态学研究的前沿与热点。气候变化改变森林向土壤的有机物输入数量、质量和分布,从而影响土壤原有有机质分解和新有机质形成之间的平衡而改变土壤固碳功能。

全球变暖可能会加快 SOC 的分解,从而与气候变化形成强烈的正反馈。尽管有证据表明,气候变暖会增加进出土壤的碳通量,但这些响应之间的全球净碳平衡仍不确定。Crowther 等通过收集北美、欧洲和亚洲 49 个野外试验的数据,对气候变暖引发的土壤碳储量变化进行了综合量化评估,发现气候变暖的影响取决于初始土壤碳储量大小,在高纬度地区发生大量的碳损失,通过敏感性估算表明在升温 1℃ 的情景下,全球表层土壤的碳储量将下降 $(30 \pm 30) \text{ Pg C}^{[81]}$ 。研究人员通过在热带森林 3000 m 海拔梯度上进行土壤置换试验(相当于温度变化 $\pm 15^\circ\text{C}$),结果发现土壤置换 5 年时间里温度每升高 1℃ 则土壤碳含量下降 4%,土壤碳的总损失与初始碳含量及其易分解程度有关,并因微生物生理指标(包括碳利用效率的提高、微生物群落组成向适应升温的微生物类群转变,以及水解酶活性的增强)的变化而加剧^[82]。底层 SOC 占全球土壤碳储量近 50%,并且底层土和表层土在植物碳输入形式、微生物群落组成、有机质稳定过程以及微气候方面有所差异^[41]。准确量化土壤剖面有机碳对全球变暖的响应及其二者之间的互馈作用,一直以来是土壤和全球变化研究领域的热点和难点。Wang 等发现 SOC 对变暖的响应强烈地依赖于有机碳所处的土壤深度,在较深的土层,有机碳损失较少^[83]。具体而言,1℃ 变暖将分别会导致 0—0.3 m、0.3—1 m 和 1—2 m SOC $(6.0 \pm 1.6)\%$ (均值 $\pm 95\%$ 置信区间), $(4.8 \pm 2.3)\%$ 和 $(1.3 \pm 4.0)\%$ 的损失。随着变暖加剧,0—0.3 m、0.3—1 m 和 1—2 m 的 SOC 损失分别以 $4.2\%/^\circ\text{C}$ 、 $2.2\%/^\circ\text{C}$ 和 $1.4\%/^\circ\text{C}$ 的速率增加。

由于气候变暖,干旱强度和发生频率在全球范围内不断增加,深刻影响森林生态系统碳循环过程。Liu 等通过野外连续 3 年的模拟林内穿透雨减少实验发现,减雨 30% 增加了杨树人工林表层土壤总微生物残体碳含量 $(+9.1\%)$,减雨 50% 对土壤微生物特别是真菌残体碳积累具有负效应且在下层 (-43.6%) 比上层土壤更强烈^[84]。Wang 等利用 7 年的隔离降雨实验研究发现随着土壤深度的增加,持续降雨减少增加了亚热带森林土壤微生物残体碳对有机碳的贡献,在底土中细菌残体碳比真菌残体碳对有机碳积累更重要,而在表土中则相反^[85]。

近年来由于我国农业活动和化石燃料燃烧导致的氮沉降急剧增加,进入森林生态系统氮量达到 $30\text{--}70 \text{ kg hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ ^[86]。越来越多的研究开始关注氮沉降对森林 SOC 积累的影响。全球或区域尺度的整合分析结果大多表明,氮沉降总体上有显著增加 SOC 积累的趋势^[87]。Lu 等基于热带森林实验和数据整合分析提出了氮沉降下的土壤碳吸存假说,认为在“氮限制”的生态系统(如北方森林)中,氮沉降促进植被净初级生产力,地上凋落物输入增加和土壤微生物分解减少导致土壤碳增加;而在氮相对“富裕”的热带森林,长期氮沉降没有影响净初级生产力,土壤碳吸存增加的主要驱动因素是降低二氧化碳和可溶性有机碳输出通量^[88]。Wang 等

发现 9 年氮沉降加剧亚热带天然常绿阔叶林土壤微生物磷限制,进一步抑制土壤碳分解的激发效应^[89]。此外,氮添加也会影响 SOC 组分积累。研究表明氮添加会促进 POC 含量,主要原因是氮添加促进了植物碳输入或抑制了微生物对 POC 的分解^[88,90]。然而,氮添加可能通过减少微生物氮挖掘提高 MAOC,也可能因土壤酸化降低微生物残体碳产生而减少 MAOC 积累^[91]。在热带森林长期(14 年)氮沉降的试验中发现,氮沉降提高了 SOC 库总量,主要提升了易分解碳库组分,表明热带森林高氮低磷的土壤环境有利于有机碳的固持,从而有助于减缓气候变化,但增加的碳主要是易分解的碳库组分,稳定性下降^[42,91]。

随着气候不断变暖,全球范围内干旱、热浪和强降水等极端气候事件频发,强烈影响陆地生态系统过程。Wang 等以世界土壤信息服务网(WoSIS)收录的全球土壤信息数据库为数据源,融合空间替代时间、meta 分析和基于机器学习的数字土壤制图技术,量化了全球变暖背景下不同类型极端气候变化对表层(0—0.3 m)SOC 的影响^[92]。发现全球尺度上大多数极端气候强度或频率的增加会加剧变暖导致 SOC 损失,其中热带热的夜晚长度增加对 SOC 的影响最为显著,其增加 5 天会额外增加 8% 的 SOC 损失,但有些极端气候的变化也会减缓 SOC 的损失,如全球寒潮天数平均减少 5 天,则会抵消 22% 的变暖导致的 SOC 损失。此外,与单一极端气候事件相比,复合极端气候事件(如干热极端事件)对 SOC 的影响更为显著,如与单一的极端高温和干旱相比,热干复合极端事件会导致更多的 SOC 损失。如果气候变化导致未来复合极端事件加剧,将会增加全球 SOC 损失的风险,对土壤固碳措施的制定提出新的挑战。

气候变化对森林土壤碳储量及其持续固碳潜力的影响还存在较大的不确定性。揭示全球气候变化如何调控 SOC 积累的作用机制,有助于深入认识森林生态系统 SOC 库在气候背景下的响应和反馈机制。气候变化如何影响地上-地下耦合作用(凋落物及根系分泌物输入变化对土壤生物群落的调节以及土壤生物适应性),以及气候变化如何调控 SOC 不同稳定机制(选择性保存、土壤团聚体周转及对有机碳的保护作用、微生物碳泵等)仍是未来研究的热点和核心科学问题。同时,全球变化涉及了大气 CO₂ 浓度升高、气候变暖、降水格局变化、氮沉降增加等诸多方面,这些变化大多是同时发生的,并且不同全球变化因子之间可能存在交互作用。因此,如何真实地模拟多个全球变化因子对陆地生态系统的影响以及研究陆地生态系统对多种全球变化的综合响应是当前全球变化生态学的难点与重点之一。未来的研究将更多通过全球变化多因子控制实验来了解生态系统对多种环境要素变化的综合响应及其机制。

4.3 森林植被变化(演替和经营)对土壤固碳的作用

大多数关于演替的研究采用了不同年龄的森林年序列或空间代时间的方法,以推断发生在几十年至百年时间尺度上的过程^[93]。尽管已有数百项实地研究和许多文献综述,关于演替过程中 SOC 储量变化的方向和幅度仍存在显著分歧^[94—96]。这种分歧可能源于这些研究中使用的时空代时间方法背后的潜在不足。具体而言,较少有研究严格检验组成成年序列的不同样地或地点的生态和生物物理条件是否一致,通常假设森林年龄或扰动以来的时间是样地之间唯一的差异^[93,96]。一般而言,保存良好的原始林/老林龄都分布在坡度陡、土层薄的区域,其 SOC 储量很可能低于土层厚的沟谷地区的次生林。

国内外学者已经达成共识,除非明确考虑生物物理驱动因素,否则无法准确估计不同演替阶段的 SOC 储量变化^[95,97]。例如,研究表明刀耕火种后在热带森林 SOC 恢复较快^[98],这可能是由于刀耕火种后森林的遗留效应对土壤影响更大^[99]。其次,刀耕火种后燃烧产生的灰烬为土壤微生物群落提供了养分输入,加速了 SOC 的恢复^[100]。此外,植物残渣中难分解的成分以及燃烧产生的芳香碳化合物,也有助于 SOC 的恢复^[101—103]。

森林采伐增加了植物再生、凋落物分解、根系周转以及林下植被的多样性,这些因素可以促进 SOC 积累^[104—108]。然而,采伐后 SOC 储量下降,主要的原因可能是 CO₂ 排放增加和凋落物输入减少所致^[108—110]。大部分研究关注森林恢复过程中 SOC 的动态变化,但有机碳官能团的变化能够更深入地反映森林恢复过程中土壤碳库的动态^[111—112]。未来需要关注土壤碳组分的变化,以准确量化演替过程中 SOC 的动态。

尽管最近来自森林清查和实验研究的证据表明,树种丰富度的增加能够提升生产力并提高 SOC 储量,但

关于调控树种多样性与 SOC 储量之间关系的机制仍不清楚^[113-114]。多乡土树种混交林被认为是一种潜在的森林管理策略,有望替代单一树种人工林,因其能够提供更多种类的高价值木材和生态功能^[115]。由于人工林的树种丰富度通常不如天然森林复杂,研究人工林营建过程中最优的树种多样性以提高 SOC 储量,仍是需要进一步探讨的方向。在南亚热带人工林研究发现树种丰富度与 SOC 储量之间存在抛物线关系,树种丰富度的最优阈值出现在 4—5 种之间,表明混交数量适中树种能够实现更高的 SOC 储量^[116]。通量测量和卫星观测结合研究提供了中国植树潜力的高置信度地图,若以最大化碳汇潜力为目标进行树种选择,森林碳汇潜力相比仅考虑环境适应性的造林方案增加了近一倍^[117]。最新的研究表明拥有较高叶片碳含量、干物质含量、较高木材密度和较低最大树高的树种积累更多的 SOC^[19,118]。然而,关于植物功能性状与 SOC 储量及组分关系的研究仍较为匮乏。这表明未来需要进一步收集树种的叶片和木材性状信息,以更好地探究特定功能树种与 SOC 储量之间的关系。

5 建议

5.1 基础研究上探索森林土壤固碳和稳定性提升新机制

(1) 建立森林群落结构与土壤固碳过程之间的联系。由于 SOC 储存形态且固碳机制复杂,当前森林生态系统储碳和增汇机制的最大不确定性在于土壤。如达到森林土壤固碳能力增加的目标,需通过造林树种配置和森林经营措施等技术创新来实现。因此,建立森林生态系统固碳增汇的地上-地下调控机制关联是指导林业生产实践的重要依据。

(2) 从 SOC 组分多样性和功能复杂性的新视角认识森林土壤碳的稳定性。国内外最新的研究相继提出了森林 SOC 组分多样性、均匀度及功能复杂性维持碳稳定的学术观点,并在区域和样地尺度的研究得以分析验证^[119-124]。由此从有机碳稳定性取决于单一碳组分的认知向受控于有机碳结构多样性和空间异质性的新视角延伸。因此,建议从多视角认识 SOC 的组成结构,为分析 SOC 稳定性的内在驱动力提供科学依据。

(3) 加强学科交叉探索森林土壤固碳增汇新机制。生态学和计算机科学领域学科交叉,土壤学与分子生物学、物理学、化学、材料科学领域学科交叉,利用人工智能和数据同化技术,基于深度学习方法挖掘全球森林 SOC 储存机制。包括¹³C 稳定性同位素标记示踪、¹⁴C 放射性同位素年代分析和高分辨率 CT 扫描 SOC 空间分布等技术可为探索森林土壤固碳新机制提供新思路。

5.2 加强森林土壤碳储和碳汇的多尺度精准测定

(1) 将土壤碳监测纳入国家森林资源清查体系。我国森林土壤碳储量是植被碳储量的 2 倍以上,其碳库大小直接决定森林水土保持能力、土壤肥力和植被生产力,进而决定着森林水库、粮库和钱库的大小。尽管第九次全国森林资源清查考虑了土壤因子,但仅仅调查了土壤类型、土壤厚度、腐殖质厚度。因此,将土壤碳监测纳入国家森林资源清查体系可以有效解决我国森林土壤碳库“家底不清”、变化不明的问题。

(2) 建立国家尺度的土壤碳长期观测网络。森林土壤碳无法通过遥感技术进行大尺度精准观测、现有碳循环模型也不可能精确模拟森林 SOC 的动态变化、整合分析包含巨大的噪音以及缺乏配套的环境因子。建立包括气候、植被、土壤、根系、微生物、经营管理与 SOC 同步的长期观测网络,准确揭示 SOC 的形成和周转过程。构建高精度的经验和过程模型,精准评估森林土壤碳库的储量和动态变化,为森林经营提供科学支撑。

(3) 设立我国森林土壤碳增汇大科学计划。《联合国气候变化框架公约》(UNFCCC)宣布了法国农业部提出了“千分之四全球土壤增碳计划”。这一方案与农业可持续发展挂钩,同时服务于保障粮食安全和减缓气候变化。我国森林土壤碳储量大约是农田土壤碳储量的 3 倍。我国森林林龄普遍为中低龄,未来植被碳汇能力可能降低,我国森林生态系统的长期高碳汇效应将从依赖植被转变为依赖土壤。此外,我国人工林面积世界第一,人工林土壤碳储量普遍低于天然林,提高人工林土壤碳储量也是关键的增汇途径。因此,设立我国森林土壤碳增汇科学计划,助力国家“双碳战略”。

5.3 建立保持土壤碳稳定固持的天然林保护修复及经营提升途径

(1) 研判天然林 SOC 对气候变化和森林经营响应的抗性、韧性与恢复力。系统研究天然林生态系统受气

候变化和人为干扰影响,剖析天然林 SOC 储量与组成对气候变化响应的潜在阈值,分析采伐、抚育、火烧等干扰对天然林 SOC 储量及稳定性的影响,确定干扰程度与碳损失之间的关系,为未来管理方案提供科学依据。

(2) 准确评估天然林保护修复中土壤碳固定效应。构建受干扰后的次生林演替过程中不同阶段植物群落组成与土壤碳库的重建过程,评估天然林保护修复中 SOC 储量增益效应,筛选加速森林演替过程固碳功能提升的森林群落结构优化和经营抚育技术途径。

(3) 提出天然林土壤碳稳定性维持的分区经营技术途径。对 SOC 储存量大、但稳定性弱并且受干扰后恢复速率慢的天然林(如高海拔林区)应加强保护。根据 SOC 稳定性及恢复潜力进行差别化的森林抚育管理,划定保育区、修复区和经营区,以最大限度地保持土壤碳库稳定。

5.4 提出人工林土壤固碳增汇的经营途径

(1) 培育和种植具有深根系特征的高固碳人工林树种。选育深根树种、增加根系碳向土壤输入是当前最具前景的土壤碳增汇策略之一^[125-126]。与地上凋落物相比,根系输入的有机质(包括根系分泌物)通常具有更高的土壤碳转化效率,对 SOC 的长期封存贡献更大。因此,可尝试利用基因编辑等先进技术培育具有深根系、高周转特征的高储碳植物,将大气 CO₂ 通过光合作用和成土过程长期封存在土壤中,实现人工林土壤碳增汇。

(2) 调整优化人工林树种结构。人工林树种结构单一,树种混交能够显著增加土壤碳储量,且在越贫瘠的土壤通过混交增加固碳的潜力越大^[127]。特别是将以针叶树为主的人工林,通过冠下补植乡土阔叶树种、固氮树种等方式调整为针阔树种混交人工林,不仅可以大幅增加碳汇,还对增加和保护生物多样性、发挥森林的非碳效益,从而获得高质量的生态碳汇,确保人工林多种效益的发挥。

(3) 合理的采伐方式以及轮伐期延长管理。森林采伐通常会降低土壤有机物质输入,特别是高强度采伐或皆伐,而通过适当强度(树木移除 35%—55%)的择伐或间伐有利于土壤碳增汇^[128]。在人工林采伐管理中,土壤碳储量还可以通过减少有机物出口的管理策略相结合来最大化,如在桉树人工林中保留收获残留物 3 年,可增加 POC 和 MOAC 含量(2.1 倍和 1.2 倍)。延长轮伐期也是人工林碳增汇的重要途径之一。如基于长期定位研究明确了延长杉木轮伐期至 30—35 年,可最大限度地发挥杉木人工林生态系统地上-地下碳储存和木材生产的协同效益^[129]。

总之,应大力加强森林土壤固碳增汇机制与实现途径的研究。森林增汇有多种方式,只有深入阐明森林 SOC 形成、固持稳定及其对森林经营的响应机制,才能针对性地优化管理、实施多目标适应性经营。扩大以 MAOC 为重点的管理策略,在提升 MAOC 的同时扩容 POC,分库管理,因地制宜研发不同类型森林土壤碳增汇的经营技术体系,从而最大限度地实现碳增汇。

参考文献(References):

- [1] Kögel-Knabner I. The macromolecular organic composition of plant and microbial residues as inputs to soil organic matter. *Soil Biology and Biochemistry*, 2002, 34(2): 139-162.
- [2] Baldock J A, Oades J M, Waters A G, Peng X, Vassallo A M, Wilson M A. Aspects of the chemical structure of soil organic materials as revealed by solid-state ¹³C NMR spectroscopy. *Biogeochemistry*, 1992, 16(1): 1-42.
- [3] von Lützow M, Kögel-Knabner I, Ekschmitt K, Flessa H, Guggenberger G, Matzner E, Marschner B. SOM fractionation methods: Relevance to functional pools and to stabilization mechanisms. *Soil Biology and Biochemistry*, 2007, 39(9): 2183-2207.
- [4] Lavalley J M, Soong J L, Cotrufo M F. Conceptualizing soil organic matter into particulate and mineral-associated forms to address global change in the 21st century. *Global Change Biology*, 2020, 26(1): 261-273.
- [5] Don A, Seidel F, Leifeld J, Kätterer T, Martin M, Pellerin S, Emde D, Seitz D, Chenu C. Carbon sequestration in soils and climate change mitigation-Definitions and pitfalls. *Global Change Biology*, 2024, 30(1): e16983.
- [6] MacKay A. Climate change 2007: impacts, adaptation and vulnerability. contribution of working group II to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. *Journal of Environmental Quality*, 2008, 37: 2407.
- [7] Chari N R, Taylor B N. Soil organic matter formation and loss are mediated by root exudates in a temperate forest. *Nature Geoscience*, 2022, 15

(12): 1011-1016.

- [8] Cotrufo M F, Soong J L, Horton A J, Campbell E E, Haddix M, Wall D H, Parton W J. Formation of soil organic matter via biochemical and physical pathways of litter mass loss. *Nature Geoscience*, 2015, 8: 776-779.
- [9] Liang C, Schimel J P, Jastrow J D. The importance of anabolism in microbial control over soil carbon storage. *Nature Microbiology*, 2017, 2: 17105.
- [10] Schimel J P, Weintraub M N. The implications of exoenzyme activity on microbial carbon and nitrogen limitation in soil: a theoretical model. *Soil Biology and Biochemistry*, 2003, 35(4): 549-563.
- [11] Wang B R, An S S, Liang C, Liu Y, Kuzyakov Y. Microbial necromass as the source of soil organic carbon in global ecosystems. *Soil Biology and Biochemistry*, 2021, 162: 108422.
- [12] Six J, Elliott E T, Paustian K. Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation: a mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, 32(14): 2099-2103.
- [13] Lützow M V, Kögel-Knabner I, Ekschmitt K, Matzner E, Guggenberger G, Marschner B, Flessa H. Stabilization of organic matter in temperate soils: mechanisms and their relevance under different soil conditions-a review. *European Journal of Soil Science*, 2006, 57(4): 426-445.
- [14] Schmidt M W I, Torn M S, Abiven S, Dittmar T, Guggenberger G, Janssens I A, Kleber M, Kögel-Knabner I, Lehmann J, Manning D A C, Nannipieri P, Rasse D P, Weiner S, Trumbore S E. Persistence of soil organic matter as an ecosystem property. *Nature*, 2011, 478(7367): 49-56.
- [15] Yuan X, Chen Y, Qin W K, Xu T L, Mao Y H, Wang Q, Chen K L, Zhu B. Plant and microbial regulations of soil carbon dynamics under warming in two alpine swamp meadow ecosystems on the Tibetan Plateau. *Science of the Total Environment*, 2021, 790: 148072.
- [16] Melillo J M, Frey S D, DeAngelis K M, Werner W J, Bernard M J, Bowles F P, Pold G, Knorr M A, Grandy A S. Long-term pattern and magnitude of soil carbon feedback to the climate system in a warming world. *Science*, 2017, 358(6359): 101-105.
- [17] Fang X, Zhou G Y, Qu C, Huang W J, Zhang D Q, Li Y L, Yi Z G, Liu J X. Translocating subtropical forest soils to a warmer region alters microbial communities and increases the decomposition of mineral-associated organic carbon. *Soil Biology and Biochemistry*, 2020, 142: 107707.
- [18] Shi Z, Sherry R, Xu X, Hararuk O, Souza L, Jiang L F, Xia J Y, Liang J Y, Luo Y Q. Evidence for long-term shift in plant community composition under decadal experimental warming. *Journal of Ecology*, 2015, 103(5): 1131-1140.
- [19] Chen X L, Taylor A R, Reich P B, Hisano M, Chen H Y H, Chang S X. Tree diversity increases decadal forest soil carbon and nitrogen accrual. *Nature*, 2023, 618(7963): 94-101.
- [20] Huang Y Y, Chen Y X, Castro-Izaguirre N, Baruffol M, Brezzi M, Lang A, Li Y, Härdtle W, von Oheimb G, Yang X F, Liu X J, Pei K Q, Both S, Yang B, Eichenberg D, Assmann T, Bauhus J, Behrens T, Buscot F, Chen X Y, Chesters D, Ding B Y, Durka W, Erfmeier A, Fang J Y, Fischer M, Guo L D, Guo D L, Gutknecht J L M, He J S, He C L, Hector A, Hönig L, Hu R Y, Klein A M, Kühn P, Liang Y, Li S, Michalski S, Scherer-Lorenzen M, Schmidt K, Scholten T, Schuldt A, Shi X Z, Tan M Z, Tang Z Y, Trogisch S, Wang Z W, Welk E, Wirth C, Wubet T, Xiang W H, Yu M J, Yu X D, Zhang J Y, Zhang S R, Zhang N L, Zhou H Z, Zhu C D, Zhu L, Bruehlheide H, Ma K P, Niklaus P A, Schmid B. Impacts of species richness on productivity in a large-scale subtropical forest experiment. *Science*, 2018, 362(6410): 80-83.
- [21] Nave L E, DeLyser K, Domke G M, Holub S M, Janowiak M K, Keller A B, Peters M P, Solarik K A, Walters B F, Swanston C W. Land use change and forest management effects on soil carbon stocks in the Northeast U.S. *Carbon Balance and Management*, 2024, 19(1): 5.
- [22] Hong S B, Yin G D, Piao S L, Dybzinski R, Cong N, Li X Y, Wang K, Peñuelas J, Zeng H, Chen A P. Divergent responses of soil organic carbon to afforestation. *Nature Sustainability*, 2020, 3: 694-700.
- [23] Wang S, Xu L, Zhuang Q L, He N P. Investigating the spatio-temporal variability of soil organic carbon stocks in different ecosystems of China. *Science of the Total Environment*, 2021, 758: 143644.
- [24] 周玉荣, 于振良, 赵士洞. 我国主要森林生态系统碳贮量和碳平衡. *植物生态学报*, 2000, 24(5): 518.
- [25] Eswaran H, Van Den Berg E, Reich P. Organic carbon in soils of the world. *Soil Science Society of America Journal*, 1993, 57(1): 192-194.
- [26] Wu H B, Guo Z T, Peng C H. Land use induced changes of organic carbon storage in soils of China. *Global Change Biology*, 2003, 9(3): 305-315.
- [27] Zhou Z H, Ren C J, Wang C K, Delgado-Baquerizo M, Luo Y Q, Luo Z K, Du Z G, Zhu B, Yang Y H, Jiao S, Zhao F Z, Cai A D, Yang G H, Wei G H. Global turnover of soil mineral-associated and particulate organic carbon. *Nature Communications*, 2024, 15: 5329.
- [28] 刘苗, 刘国华. 土壤有机碳储量估算的影响因素和不确定性. *生态环境学报*, 2014, 23(7): 1222-1232.
- [29] Sun W L, Liu X H. Review on carbon storage estimation of forest ecosystem and applications in China. *Forest Ecosystems*, 2020, 7: 4.
- [30] 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.
- [31] Varney R M, Chadburn S E, Burke E J, Cox P M. Evaluation of soil carbon simulation in CMIP6 Earth system models. *Biogeosciences*, 2022, 19(19): 4671-4704.
- [32] Angelopoulou T, Tziolas N, Balafoutis A, Zalidis G, Bochtis D. Remote sensing techniques for soil organic carbon estimation: a review. *Remote*

- Sensing, 2019, 11(6): 676.
- [33] Hong S B, Ding J Z, Kan F, Xu H, Chen S Y, Yao Y T, Piao S L. Asymmetry of carbon sequestrations by plant and soil after forestation regulated by soil nitrogen. *Nature Communications*, 2023, 14(1): 3196.
- [34] Guo L, Sun X R, Fu P, Shi T Z, Dang L N, Chen Y Y, Linderman M, Zhang G L, Zhang Y, Jiang Q H, Zhang H T, Zeng C. Mapping soil organic carbon stock by hyperspectral and time-series multispectral remote sensing images in low-relief agricultural areas. *Geoderma*, 2021, 398: 115118.
- [35] Dvorakova K, Shi P, Limbourg Q, van Wesemael B. Soil organic carbon mapping from remote sensing: the effect of crop residues. *Remote Sensing*, 2020, 12(12): 1913.
- [36] Bossio D A, Cook-Patton S C, Ellis P W, Fargione J, Sanderman J, Smith P, Wood S, Zomer R J, von Unger M, Emmer I M, Griscom B W. The role of soil carbon in natural climate solutions. *Nature Sustainability*, 2020, 3: 391-398.
- [37] Lin Z Y, Dai Y J, Mishra U, Wang G C, Shangguan W, Zhang W, Zhangcai, Qin. On the magnitude and uncertainties of global and regional soil organic carbon: a comparative analysis using multiple estimates. *Earth System Science Data Discussions*, 2022, 1-24.
- [38] Scharlemann J P, Tanner E V, Hiederer R, Kapos V. Global soil carbon: understanding and managing the largest terrestrial carbon pool. *Carbon Management*, 2014, 5(1): 81-91.
- [39] Nachtergaele F, Velthuisen H, Verelst L, Wiberg D, Batjes N, Dijkshoorn J, Engelen V, Fischer G, Jones A, Montanarella L, Petri M, Prieler S, Teixeira E, Shi X. Harmonized world soil database (version 1.2). FAO. 2023.
- [40] Dixon R K, Solomon A M, Brown S, Houghton R A, Trexler M C, Wisniewski J. Carbon pools and flux of global forest ecosystems. *Science*, 1994, 263(5144): 185-190.
- [41] Jobbágy E G, Jackson R B. The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation. *Ecological Applications*, 2000, 10(2): 423.
- [42] Li H, Chen Y, Lu Z, Wang F M, Lambers H, Zhang J F, Qin G M, Zhou J G, Wu J T, Zhang L L, Thapa P, Lu X K, Mo J M. Nitrogen deposition in low-phosphorus tropical forests benefits soil C sequestration but not stabilization. *Ecological Indicators*, 2023, 146: 109761.
- [43] Pan Y D, Birdsey R A, Phillips O L, Houghton R A, Fang J Y, Kauppi P E, Keith H, Kurz W A, Ito A, Lewis S L, Nabuurs G J, Shvidenko A, Hashimoto S, Lerink B, Schepaschenko D, Castanho A, Murdiyarslo D. The enduring world forest carbon sink. *Nature*, 2024, 631(8021): 563-569.
- [44] Post W M, Emanuel W R, Zinke P J, Stangenberger A G. Soil carbon pools and world life zones. *Nature*, 1982, 298: 156-159.
- [45] Prentice, I C, Farquhar, G, Fasham, M, Goulden, M L, Heimann, M, Jaramillo, V, Khesghi, H, Le Quéré, C, Scholes, R J, Wallace, D W. The carbon cycle and atmospheric carbon dioxide. *Climate change 2001: the scientific basis*, Intergovernmental panel on climate change. 2001.
- [46] Schlesinger W H. Evidence from chronosequence studies for a low carbon-storage potential of soils. *Nature*, 1990, 348: 232-234.
- [47] Köhl M, Lasco R, Cifuentes M, Jonsson Ö, Korhonen K T, Mundhenk P, de Jesus Navar J, Stinson G. Changes in forest production, biomass and carbon: results from the 2015 UN FAO global forest resource assessment. *Forest Ecology and Management*, 2015, 352: 21-34.
- [48] Xu L, He N P, Yu G R, Wen D, Gao Y, He H L. Differences in pedotransfer functions of bulk density lead to high uncertainty in soil organic carbon estimation at regional scales: evidence from Chinese terrestrial ecosystems. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2015, 120(8): 1567-1575.
- [49] 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): 2806.
- [50] Yang Y H, Mohammad A, Feng J M, Zhou R, Fang J Y. Storage, patterns and environmental controls of soil organic carbon in China. *Biogeochemistry*, 2007, 84(2): 131-141.
- [51] 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.
- [52] Yu D S, Shi X Z, Wang H J, Sun W X, Chen J M, Liu Q H, Zhao Y C. Regional patterns of soil organic carbon stocks in China. *Journal of Environmental Management*, 2007, 85(3): 680-689.
- [53] 解宪丽, 孙波, 周慧珍, 李忠佩. 不同植被下中国土壤有机碳的储量与影响因子. *土壤学报*, 2004, 41(5): 687-699.
- [54] Li K R. Vegetation and soil carbon storage in China. *Science in China Series D*, 2003, 47(1): 49.
- [55] Yu G R, Li X R, Wang Q F, Li S G. Carbon storage and its spatial pattern of terrestrial ecosystem in China. *Journal of Resources and Ecology*, 2010, 1: 97-109.
- [56] 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.
- [57] 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.
- [58] Liu F, Wu H, Zhao Y, Li D, Yang J L, Song X, Shi Z, Zhu A X, Zhang G L. Mapping high resolution national soil information grids of China. *Science Bulletin*, 2022, 67(3): 328-340.
- [59] 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.
- [60] Liu F, Wu H Y, Zhao Y G, Li D C, Yang J L, Song X D, Shi Z, Zhu A X, Zhang G L. Mapping high resolution national soil information grids of China. *Science Bulletin*, 2022, 67(3): 328-340.
- [61] 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.
- [62] Piao S L, Fang J Y, Ciais P, Peylin P, Huang Y, Sitch S, Wang T. The carbon balance of terrestrial ecosystems in China. *Nature*, 2009, 458(7241): 1009-1013.
- [63] Yu Z, Ciais P, Piao S L, Houghton R A, Lu C Q, Tian H Q, Agathokleous E, Kattal G R, Sitch S, Goll D, Yue X, Walker A, Friedlingstein P, Jain A K, Liu S R, Zhou G Y. Forest expansion dominates China's land carbon sink since 1980. *Nature Communications*, 2022, 13(1): 5374.
- [64] Tian H Q, Melillo J, Lu C Q, Kicklighter D, Liu M L, Ren W, Xu X F, Chen G S, Zhang C, Pan S F, Liu J Y, Running S. China's terrestrial carbon balance: contributions from multiple global change factors. *Global Biogeochemical Cycles*, 2011, 25(1): GB1007.
- [65] Xu L, Yu G R, He N P. Increased soil organic carbon storage in Chinese terrestrial ecosystems from the 1980s to the 2010s. *Journal of Geographical Sciences*, 2019, 29(1): 49-66.
- [66] Wang S, Chen J M, Ju W M, Feng X, Chen M, Chen P, Yu G. Carbon sinks and sources in China's forests during 1901—2001. *Journal of Environmental Management*, 2007, 85(3): 524-537.
- [67] Zhang Y, Guo X, Chen L, Kuzyakov Y, Wang R, Zhang H, Han X, Jiang Y, Sun O J. Global pattern of organic carbon pools in forest soils. *Global Change Biology*, 2024, 30(6): e17386.
- [68] Sokol N W, Whalen E D, Jilling A, Kallenbach C, Pett-Ridge J, Georgiou K. Global distribution, formation and fate of mineral-associated soil organic matter under a changing climate: A trait-based perspective. *Functional Ecology*, 2022, 36(6): 1411-1429.
- [69] Lugato E, Lavallee J M, Haddix M L, Panagos P, Cotrufo M F. Different climate sensitivity of particulate and mineral-associated soil organic matter. *Nature Geoscience*, 2021, 14(5): 295-300.
- [70] Díaz-Martínez P, Maestre F T, Moreno-Jiménez E, Delgado-Baquerizo M, Eldridge D J, Saiz H, Gross N, Le Bagousse-Pinguet Y, Gozalo B, Ochoa V, Guirado E. Vulnerability of mineral-associated soil organic carbon to climate across global drylands. *Nature Climate Change*, 2024, 14(9): 976-982.
- [71] Jackson R B, Lajtha K, Crow S E, Hugelius G, Kramer M G, Piñeiro G. The ecology of soil carbon: pools, vulnerabilities, and biotic and abiotic controls. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 2017, 48: 419-445.
- [72] Zhou G Y, Liu S G, Li Z A, Zhang D Q, Tang X L, Zhou C Y, Yan J H, Mo J M. Old-growth forests can accumulate carbon in soils. *Science*, 2006, 314(5804): 1417.
- [73] Six J, Conant R T, Paul E A, Paustian K. Stabilization mechanisms of soil organic matter: implications for C-saturation of soils. *Plant and Soil*, 2002, 241(2): 155-176.
- [74] Castellano M J, Mueller K E, Olk D C, Sawyer J E, Six J. Integrating plant litter quality, soil organic matter stabilization, and the carbon saturation concept. *Global Change Biology*, 2015, 21(9): 3200-3209.
- [75] Begill N, Don A, Poeplau C. No detectable upper limit of mineral-associated organic carbon in temperate agricultural soils. *Global Change Biology*, 2023, 29(16): 4662-4669.
- [76] Six J, Doetterl S, Laub M, Müller C R, Van de Broek M. The six rights of how and when to test for soil C saturation. *Soil*, 2024, 10(1): 275-279.
- [77] Georgiou K, Jackson R B, Vindušková O, Abramoff R Z, Ahlström A, Feng W T, Harden J W, Pellegrini A F A, Polley H W, Soong J L, Riley W J, Torn M S. Global stocks and capacity of mineral-associated soil organic carbon. *Nature Communications*, 2022, 13(1): 3797.
- [78] Poeplau C, Dechow R, Begill N, Don A. Towards an ecosystem capacity to stabilise organic carbon in soils. *Global Change Biology*, 2024, 30(8): e17453.
- [79] Angst G, Mueller K E, Castellano M J, Vogel C, Wiesmeier M, Mueller C W. Unlocking complex soil systems as carbon sinks: multi-pool management as the key. *Nature Communications*, 2023, 14(1): 2967.
- [80] Ortiz C A, Lundblad M, Lundström A, Stendahl J. The effect of increased extraction of forest harvest residues on soil organic carbon accumulation in Sweden. *Biomass and Bioenergy*, 2014, 70: 230-238.
- [81] Crowther T W, Todd-Brown K E O, Rowe C W, Wieder W R, Carey J C, Machmuller M B, Snoek B L, Fang S, Zhou G, Allison S D, Blair J M, Bridgman S D, Burton A J, Carrillo Y, Reich P B, Clark J S, Classen A T, Dijkstra F A, Elberling B, Emmett B A, Estiarte M, Frey S D, Guo J, Harte J, Jiang L, Johnson B R, Kröel-Dulay G, Larsen K S, Laudon H, Lavallee J M, Luo Y, Lupascu M, Ma L N, Marhan S, Michelsen A, Mohan J, Niu S,

- Pendall E, Peñuelas J, Pfeifer-Meister L, Poll C, Reinsch S, Reynolds L L, Schmidt I K, Sistla S, Sokol N W, Templer P H, Treseder K K, Welker J M, Bradford M A. Quantifying global soil carbon losses in response to warming. *Nature*, 2016, 540(7631): 104-108.
- [82] Nottingham A T, Whitaker J, Ostle N J, Bardgett R D, McNamara N P, Fierer N, Salinas N, Ccahuana A J Q, Turner B L, Meir P. Microbial responses to warming enhance soil carbon loss following translocation across a tropical forest elevation gradient. *Ecology Letters*, 2019, 22(11): 1889-1899.
- [83] Wang M M, Guo X W, Zhang S, Xiao L J, Mishra U, Yang Y H, Zhu B, Wang G C, Mao X L, Qian T, Jiang T, Shi Z, Luo Z K. Global soil profiles indicate depth-dependent soil carbon losses under a warmer climate. *Nature Communications*, 2022, 13: 5514.
- [84] Liu Y W, Zou X M, Chen H Y H, Delgado-Baquerizo M, Wang C T, Zhang C, Ruan H H. Fungal necromass is reduced by intensive drought in subsoil but not in topsoil. *Global Change Biology*, 2023, 29(24): 7159-7172.
- [85] Wang X X, Zhou L Y, Fu Y L, Jiang Z, Jia S X, Song B Q, Liu D Q, Zhou X H. Drought-induced changes in rare microbial community promoted contribution of microbial necromass C to SOC in a subtropical forest. *Soil Biology and Biochemistry*, 2024, 189: 109252.
- [86] Ma X M, Zhu B, Nie Y X, Liu Y, Kuzyakov Y. Root and mycorrhizal strategies for nutrient acquisition in forests under nitrogen deposition: a meta-analysis. *Soil Biology and Biochemistry*, 2021, 163: 108418.
- [87] Xu C H, Xu X, Ju C H, Chen H Y H, Wilsey B J, Luo Y Q, Fan W. Long-term, amplified responses of soil organic carbon to nitrogen addition worldwide. *Global Change Biology*, 2021, 27(6): 1170-1180.
- [88] Lu X K, Vitousek P M, Mao Q G, Gilliam F S, Luo Y Q, Turner B L, Zhou G Y, Mo J M. Nitrogen deposition accelerates soil carbon sequestration in tropical forests. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2021, 118(16): e2020790118.
- [89] Wang X H, Li S, Zhu B, Homyak P M, Chen G S, Yao X D, Wu D M, Yang Z J, Lyu M K, Yang Y S. Long-term nitrogen deposition inhibits soil priming effects by enhancing phosphorus limitation in a subtropical forest. *Global Change Biology*, 2023, 29(14): 4081-4093.
- [90] Chen J G, Xiao W, Zheng C Y, Zhu B. Nitrogen addition has contrasting effects on particulate and mineral-associated soil organic carbon in a subtropical forest. *Soil Biology and Biochemistry*, 2020, 142: 107708.
- [91] Zhang J F, Zhou J G, Sayer E J, Lambers H, Liu Z F, Lu X K, Li Y W, Li Y X, Li H, Wang F M. Nitrogen deposition enhances soil organic carbon and microbial residual carbon in a tropical forest. *Plant and Soil*, 2023, 484(1): 217-235.
- [92] Wang M M, Zhang S, Guo X W, Xiao L J, Yang Y H, Luo Y Q, Mishra U, Luo Z K. Responses of soil organic carbon to climate extremes under warming across global biomes. *Nature Climate Change*, 2024, 14: 98-105.
- [93] Powers J S, Marín-Spiotta E. Ecosystem processes and biogeochemical cycles in secondary tropical forest succession. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 2017, 48: 497-519.
- [94] Johnson D W, Curtis P S. Effects of forest management on soil C and N storage: meta analysis. *Forest Ecology and Management*, 2001, 140(2/3): 227-238.
- [95] Powers J S, Corre M D, Twine T E, Veldkamp E. Geographic bias of field observations of soil carbon stocks with tropical land-use changes precludes spatial extrapolation. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2011, 108(15): 6318-6322.
- [96] Satdichanh M, Dossa G G O, Yan K, Tomlinson K W, Barton K E, Crow S E, Winowiecki L, Vågen T G, Xu J C, Harrison R D. Drivers of soil organic carbon stock during tropical forest succession. *Journal of Ecology*, 2023, 111(8): 1722-1734.
- [97] López-Ulloa M, Veldkamp E, de Koning G H J. Soil carbon stabilization in converted tropical pastures and forests depends on soil type. *Soil Science Society of America Journal*, 2005, 69(4): 1110-1117.
- [98] Wang J, Wang H, Ding Y, Zhang Y G, Cong W, Zang R G, Liu S R. Shifting cultivation and logging change soil organic carbon functional groups in tropical lowland rainforests on Hainan Island in China. *Forest Ecology and Management*, 2023, 549: 121447.
- [99] Poorter L, Craven D, Jakovac C C, van der Sande M T, Amissah L, Bongers F, Chazdon R L, Farrior C E, Kambach S, Meave J A, Muñoz R, Norden N, Rüger N, van Breugel M, Zambrano A M A, Amani B, Andrade J L, Brancalion P H S, Broadbent E N, de Foresta H, Dent D H, Derroire G, DeWalt S J, Dupuy J M, Durán S M, Fantini A C, Finegan B, Hernández-Jaramillo A, Hernández-Stefanoni J L, Hietz P, Junqueira A B, N'Dja J K, Letcher S G, Lohbeck M, López-Camacho R, Martínez-Ramos M, Melo F P L, Mora F, Müller S C, N'Guessan A E, Oberleitner F, Ortiz-Malavassi E, Pérez-García E A, Pinho B X, Piotto D, Powers J S, Rodríguez-Buriticá S, Rozendaal D M A, Ruíz J, Tabarelli M, Teixeira H M, de Sá Barretto Sampaio E V, van der Wal H, Villa P M, Fernandes G W, Santos B A, Aguilar-Cano J, de Almeida-Cortez J S, Alvarez-Davila E, Arreola-Villa F, Balvanera P, Becknell J M, Cabral G A L, Castellanos-Castro C, de Jong B H J, Nieto J E, Espírito-Santo M M, Fandino M C, García H, García-Villalobos D, Hall J S, Idárraga A, Jiménez-Montoya J, Kennard D, Marín-Spiotta E, Mesquita R, Nunes Y R F, Ochoa-Gaona S, Peña-Claros M, Pérez-Cárdenas N, Rodríguez-Velázquez J, Villanueva L S, Schwartz N B, Steininger M K, Veloso M D M, Vester H F M, Vieira I C G, Williamson G B, Zanini K, Hérault B. Multidimensional tropical forest recovery. *Science*, 2021, 374(6573): 1370-1376.
- [100] Veldkamp E, Schmidt M, Powers J S, Corre M D. Deforestation and reforestation impacts on soils in the tropics. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2020, 1: 590-605.
- [101] Almendros G, Knicker H, González-Vila F J. Rearrangement of carbon and nitrogen forms in peat after progressive thermal oxidation as determined

- by solid-state ^{13}C - and ^{15}N -NMR spectroscopy. *Organic Geochemistry*, 2003, 34(11): 1559-1568.
- [102] Bonhage A, Raab T, Schneider A, Fischer T, Ramezany S, Ouimet W, Raab A, Hirsch F. Vertical SOC distribution and aromatic carbon in centuries old charcoal-rich Technosols. *European Journal of Soil Science*, 2022, 73(4): e13293.
- [103] López-Martín M, González-Vila F J, Knicker H. Distribution of black carbon and black nitrogen in physical soil fractions from soils seven years after an intense forest fire and their role as C sink. *Science of the Total Environment*, 2018, 637: 1187-1196.
- [104] Adamczyk B, Adamczyk S, Kukkola M, Tamminen P, Smolander A. Logging residue harvest may decrease enzymatic activity of boreal forest soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 2015, 82: 74-80.
- [105] Gong C, Tan Q Y, Liu G B, Xu M X. Forest thinning increases soil carbon stocks in China. *Forest Ecology and Management*, 2021, 482: 118812.
- [106] Liang C, Amelung W, Lehmann J, Kästner M. Quantitative assessment of microbial necromass contribution to soil organic matter. *Global Change Biology*, 2019, 25(11): 3578-3590.
- [107] Saunders M, Tobin B, Black K, Gioria M, Nieuwenhuis M, Osborne B A. Thinning effects on the net ecosystem carbon exchange of a Sitka spruce forest are temperature-dependent. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2012, 157: 1-10.
- [108] Blanc L, Echard M, Herault B, Bonal D, Marcon E, Chave J, Baraloto C. Dynamics of aboveground carbon stocks in a selectively logged tropical forest. *Ecological Applications*, 2009, 19(6): 1397-1404.
- [109] Campbell J, Alberti G, Martin J, Law B E. Carbon dynamics of a ponderosa pine plantation following a thinning treatment in the northern Sierra Nevada. *Forest Ecology and Management*, 2009, 257(2): 453-463.
- [110] Chiti T, Perugini L, Vespertino D, Valentini R. Effect of selective logging on soil organic carbon dynamics in tropical forests in central and western Africa. *Plant and Soil*, 2016, 399(1): 283-294.
- [111] van der Sande M T, Powers J S, Kuyper T W, Norden N, Salgado-Negret B, de Almeida J S, Bongers F, Delgado D, Dent D H, Derroire G, do Espírito Santo M M, Dupuy J M, Fernandes G W, Finegan B, Gavito M E, Hernández-Stefanoni J L, Jakovac C C, Jones I L, das Dores Magalhães Veloso M, Meave J A, Mora F, Muñoz R, Pérez-Cárdenas N, Piotto D, Álvarez-Dávila E, Cáceres-Siani Y, Dalban-Pilon C, Dourdain A, Du D V, Villalobos D G, Nunes Y R F, Sanchez-Azofeifa A, Poorter L. Soil resistance and recovery during neotropical forest succession. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series B, Biological Sciences*, 2023, 378(1867): 20210074.
- [112] van der Plas F. Biodiversity and ecosystem functioning in naturally assembled communities. *Biological Reviews*, 2019, 94(4): 1220-1245.
- [113] Chen S P, Wang W T, Xu W T, Wang Y, Wan H W, Chen D M, Tang Z Y, Tang X L, Zhou G Y, Xie Z Q, Zhou D W, Shangguan Z P, Huang J H, He J S, Wang Y F, Sheng J D, Tang L S, Li X R, Dong M, Wu Y, Wang Q F, Wang Z H, Wu J G, Chapin F S 3rd, Bai Y F. Plant diversity enhances productivity and soil carbon storage. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2018, 115(16): 4027-4032.
- [114] Ratcliffe S, Wirth C, Jucker T, van der Plas F, Scherer-Lorenzen M, Verheyen K, Allan E, Benavides R, Brulheide H, Ohse B, Paquette A, Ampoorter E, Bastias C C, Bauhus J, Bonal D, Bouriaud O, Bussotti F, Carnol M, Castagnérol B, Češko E, Dawud S M, De Wandler H, Domisch T, Finér L, Fischer M, Fotelli M, Gessler A, Granier A, Grossiord C, Guyot V, Haase J, Hättenschwiler S, Jactel H, Jaroszewicz B, Joly F X, Kambach S, Kolb S, Koricheva J, Liebersgesell M, Milligan H, Müller S, Muys B, Nguyen D, Nock C, Pollastrini M, Purschke O, Radoglou K, Raulund-Rasmussen K, Roger F, Ruiz-Benito P, Seidl R, Selvi F, Seiferling I, Stenlid J, Valladares F, Vesterdal L, Baeten L. Biodiversity and ecosystem functioning relations in European forests depend on environmental context. *Ecology Letters*, 2017, 20(11): 1414-1426.
- [115] Bauhus J, Forrester, D. I., Pretzsch, H. Mixed-species forests; the development of a forest management paradigm. In: Hans P, Forrester DI, Bauhus J (eds) *Mixed-species forests*. Springer Nature, Berlin, Germany, 2017, pp1-25.
- [116] Wang H, Song Z C, Wang J X, Yang Y J, Wang J, Liu S R. The quadratic relationship between tree species richness and topsoil organic carbon stock in a subtropical mixed-species planted forest. *European Journal of Forest Research*, 2022, 141(6): 1151-1161.
- [117] Xu H, Yue C, Zhang Y, Liu D, Piao S L. Forestation at the right time with the right species can generate persistent carbon benefits in China. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2023, 120(41): e2304988120.
- [118] Augusto L, Boča A. Tree functional traits, forest biomass, and tree species diversity interact with site properties to drive forest soil carbon. *Nature Communications*, 2022, 13(1): 1097.
- [119] Wang H, Ding Y, Zhang Y G, Wang J X, Freedman Z B, Liu P C, Cong W, Wang J, Zang R G, Liu S R. Evenness of soil organic carbon chemical components changes with tree species richness, composition and functional diversity across forests in China. *Global Change Biology*, 2023, 29(10): 2852-2864.
- [120] Wang H, Liu S R, Song Z C, Yang Y J, Wang J X, You Y M, Zhang X, Shi Z M, Nong Y, Ming A G, Lu L H, Cai D X. Introducing nitrogen-fixing tree species and mixing with *Pinus massoniana* alters and evenly distributes various chemical compositions of soil organic carbon in a planted forest in Southern China. *Forest Ecology and Management*, 2019, 449: 117477.
- [121] Lehmann J, Hansel C M, Kaiser C, Kleber M, Maher K, Manzoni S, Nunan N, Reichstein M, Schimel J P, Torn M S, Wieder W R, Kögel-Knabner I.

- Persistence of soil organic carbon caused by functional complexity. *Nature Geoscience*, 2020, 13: 529-534.
- [122] Wang Y, Wang S M, Liu C Z, Zhu E X, Jia J, Feng X J. Shifting relationships between SOC and molecular diversity in soils of varied carbon concentrations: evidence from drained wetlands. *Geoderma*, 2023, 433: 116459.
- [123] Davenport R, Bowen B P, Lynch L M, Kosina S M, Shabtai I, Northen T R, Lehmann J. Decomposition decreases molecular diversity and ecosystem similarity of soil organic matter. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2023, 120(25): e2303335120.
- [124] Jones A R, Dalal R C, Gupta V V S R, Schmidt S, Allen D E, Jacobsen G E, Bird M, Grandy A S, Sanderman J. Molecular complexity and diversity of persistent soil organic matter. *Soil Biology and Biochemistry*, 2023, 184: 109061.
- [125] Busch W, Miller C. The greenest revolution-harnessing the power of plants to help combat climate change. *The Biochemist*, 2022, 44(3): 13-18.
- [126] Schwander T, Schada von Borzyskowski L, Burgener S, Cortina N S, Erb T J. A synthetic pathway for the fixation of carbon dioxide in vitro. *Science*, 2016, 354(6314): 900-904.
- [127] Xiang Y Z, Li Y, Luo X Q, Liu Y, Huang P, Yao B, Zhang L Y, Li W L, Xue J M, Gao H J, Li Y H, Zhang W. Mixed plantations enhance more soil organic carbon stocks than monocultures across China: implication for optimizing afforestation/reforestation strategies. *Science of the Total Environment*, 2022, 821: 153449.
- [128] Gong C, Tan Q Y, Liu G B, Xu M X. Forest thinning increases soil carbon stocks in China. *Forest Ecology and Management*, 2021, 482: 118812.
- [129] Xiang W H, Xu L, Lei P F, Ouyang S, Deng X W, Chen L, Zeng Y L, Hu Y T, Zhao Z H, Wu H L, Zeng L X, Xiao W F. Rotation age extension synergistically increases ecosystem carbon storage and timber production of Chinese fir plantations in Southern China. *Journal of Environmental Management*, 2022, 317: 115426.