

# 生态修复的固碳机制、实现途径及碳中和对策

贾国栋, 张龙齐, 余新晓

(北京林业大学 水土保持与荒漠化防治国家林草局重点实验室, 北京 100083)

**摘要:** [目的] 明确生态修复固碳核算指标, 为进一步制定固碳的政策措施和开展相关研究, 如期实现碳中和目标提供科学依据。[方法] 综述了生态修复固碳的内涵与作用, 介绍了生态修复固碳的机制及途径, 并分析了不同生态修复固碳措施的效果, 提出了生态修复固碳实现途径和对策。[结果] 生态修复主要的3种途径包括林草、土壤、湿地, 其固碳效果显著, 固碳潜力巨大, 具有长期性和持续性。[结论] 为了实现更大程度的固碳, 需要在生态修复领域寻求新的突破, 推动生态系统提质增效, 全面加强资源保护, 持续挖掘生态固碳增长的潜力, 进一步推进生态修复治理工程 and 建设。

**关键词:** 生态修复; 固碳; 碳中和

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2022)05-0393-05

中图分类号: S157.2, X171.1

**文献参数:** 贾国栋, 张龙齐, 余新晓. 生态修复的固碳机制、实现途径及碳中和对策[J]. 水土保持通报, 2022, 42(5): 393-397. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2022.05.047; Jia Guodong, Zhang Longqi, Yu Xinxiao. Carbon sequestration mechanism, realization way and carbon neutralization strategy of ecological restoration [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(5): 393-397.

## Carbon Sequestration Mechanism, Realization Way and Carbon Neutralization Strategy of Ecological Restoration

Jia Guodong, Zhang Longqi, Yu Xinxiao

(Key Laboratory of Soil and Water Conservation and Desertification Combating, National Forestry and Grassland Administration, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

**Abstract:** [Objective] The accounting targets for carbon sequestration in ecological restoration were clarified in order to provide a scientific basis for further formulating policies and measures for carbon sequestration and carrying out relevant research to achieve carbon neutrality as scheduled. [Methods] The meaning and function of carbon sequestration in ecological restoration were reviewed. The mechanisms and approaches of carbon sequestration in ecological restoration were introduced. The effects of different measures on carbon sequestration in ecological restoration were analyzed. Potential methods and countermeasures for carbon sequestration in ecological restoration were proposed. [Results] The three main pathways for ecological restoration include forest and grass, soil, and wetlands. The carbon sequestration effect is remarkable, and carbon sequestration potential is huge, long-term, and sustainable. [Conclusion] In order to achieve a greater degree of carbon sequestration, it is necessary to seek new breakthroughs in the field of ecological restoration, promote improvement in ecosystem quality and efficiency, comprehensively strengthen resource protection, continue to tap the potential of ecological carbon sequestration growth, and further promote ecological restoration and governmental engineering and construction projects.

**Keywords:** ecological restoration; carbon sequestration; carbon neutrality

气候变化给人类的生存与发展带来了严峻的威胁与挑战, 其中由于人类活动导致的大气中温室气体浓度增加是加剧全球气候变暖的主要根源<sup>[1]</sup>。为了

应对气候变化, 早日实现碳达峰与碳中和的目标, 中国将固碳减排与生态环境保护作为经济发展的主要任务。与工业固碳相比, 生态修复固碳增汇具有更多

收稿日期: 2022-03-04

修回日期: 2022-04-28

资助项目: 国家重点研发计划课题“坝上高原及华北北部山地沙化土地治理与治沙产业技术研发及示范”(2016YFC0500802); 国家自然科学基金面上项目“季节性干旱的树木水分利用适应机制研究”(41877152)

第一作者: 贾国栋(1986—), 男(汉族), 河北省邢台市人, 博士, 副教授, 主要从事水土保持与生态水文研究。Email: jiaguodong@bjfu.edu.cn

通信作者: 余新晓(1961—), 男(汉族), 甘肃省平凉市人, 博士, 教授, 主要从事水土保持与生态水文研究。Email: yuxinxiao111@126.com

的成本效益,是世界各国应对气候变化的重要战略。通过改善或恢复现有生态系统的结构和功能,优化区域生态系统的空间布局,有效发挥森林、草原、湿地和土壤的固碳作用,是实现碳达峰、碳中和目标的重要途径<sup>[2]</sup>,也是目前最经济、最安全、最有效的固碳手段<sup>[3]</sup>。治理水土流失,保护、改良和合理利用水土资源,建立良好生态环境不仅仅是生态文明建设的需求<sup>[4]</sup>,也是实现碳中和目标的重要途径。近些年来,中国的生态修复工作已经取得了飞速发展,生态修复固碳在中国固碳减排方面发挥举足轻重的作用。相关研究表明,生态修复区域的碳汇有56%是由生态修复工程带来的<sup>[5]</sup>。厘清持生态固碳的实现途径和对策,系统评价生态固碳贡献研究,对于生态修复固碳减排研究具有重要意义,同时可为推动实现碳达峰和碳中和提供科学依据。

## 1 生态修复的内涵及作用

生态修复是指在生态学原理指导下,以生物修复为基础,结合各种物理修复、化学修复以及工程技术措施,通过优化组合,使之达到最佳效果和最低耗费的一种综合的修复环境的方法。通俗来讲就是指严禁人为因素影响与干扰,合理减轻生态系统的过载压力,通过生态系统自身的规律性,根据生态系统自身进化演变到自然状况。与此同时,考虑到损伤的生态系统修复的合理加速,以及生态系统的健康运行,可以加入人工方式进行干预,合理提升生态系统的恢复速率<sup>[6]</sup>。生态修复包括两个含义:一个是自然修复,另一个是人工建设修复。在过载压力的作用下,由于生态系统发生紊乱,导致其失去了组织调整和自我修复的能力。生态修复就是指通过合理有效的措施与手段,依照科学的生态基础理论,消除危害生态系统的多种因素,使生态自然环境恢复到正常发展趋势情况,全方位维护生态环境,最终使生态环境达到自然状态。

## 2 生态修复固碳机制

### 2.1 林草固碳机制

林草生态系统是地球陆地生态系统的主体,是应对气候变化的一个关键因素,也是陆地表面最大的碳库<sup>[7]</sup>。林草生态系统在吸收、固定CO<sub>2</sub>和全球碳循环研究中有着非常重要的地位,它通过同化作用吸收固定大气中的温室气体,抑制其浓度上升,对于应对气候变化问题具有积极意义和重要作用。

从生物物理性质来看,林草生态系统是一个能够积累或释放碳的储存场所或系统。具体来说,是指通过光合作用促进森林和草原植被吸收大气中的

CO<sub>2</sub>,将其固定在植被或土壤中,并通过造林和草地管理将其转化为有机碳<sup>[8]</sup>。这种生态过程的实现是植被的固碳功能,这种去除和积累CO<sub>2</sub>的过程、活动或机制被称为“林草碳汇”或“林草固碳”。森林和草地的生物量是巨大的,并且在调节全球碳循环中的温室气体、减缓气候变暖和改变空气污染等方面发挥着重要作用。研究结果表明,林木生长每产生169 g干物质需固定(吸收)264 g CO<sub>2</sub>,释放192 g O<sub>2</sub>。2010—2020年,中国实施退耕还林还草约7.20×10<sup>6</sup> hm<sup>2</sup>。“十三五”期间,累计完成造林3.63×10<sup>7</sup> hm<sup>2</sup>,森林抚育4.25×10<sup>7</sup> hm<sup>2</sup>。2020年底,全国森林面积2.20×10<sup>8</sup> hm<sup>2</sup>,全国森林覆盖率达到23.04%,草原综合植被覆盖率达到56.1%,湿地保护率达到50%以上,森林植被碳储备量9.19×10<sup>9</sup> t,“地球之肺”发挥了重要的碳汇价值。

### 2.2 土壤固碳机制

土壤有机碳是指土壤中各种含碳有机物,是土壤极其重要的组成部分,在陆地生态系统碳循环中发挥了重要的作用。根据联合国政府间气候变化专门委员会的第四次评估报告,农业土壤固碳可以贡献全球固碳减排的20%。因此,对土壤有机碳的动态变化和固存机制的探究具有重要的理论和现实意义,同时能为全球固碳减排工作提供重要依据。全球土壤有机碳库约1500 Pg(以C计),由于其碳储量巨大,微小变化也会导致全球气候产生较大变化。植物通过光合作用将CO<sub>2</sub>固定在大气中,进入土壤的有机碳是微生物降解的植物残留物的剩余部分。植被凋落物是土壤有机碳的重要来源,天然植被70%的净初级生产力最终将通过分解流入地下,微生物大量繁殖,并立即进入快速分解阶段,形成土壤碳汇<sup>[9]</sup>。中国地质调查局近年来对四川、湖南、吉林、江苏、陕西、河北省6大区域1.60×10<sup>6</sup> km<sup>2</sup>国土面积开展了土壤地球化学调查,资料表明:0—1.8 m深度土壤碳储量估算最高的四川省是24813 t/km<sup>2</sup>,最低的河北省为10525 t/km<sup>2</sup>。据此粗略估算,大陆在深度范围0—1.8 m平均土壤碳储量为1533 t/km<sup>2</sup>;土壤平均碳密度为48.8 t/hm<sup>2</sup><sup>[10]</sup>。

### 2.3 湿地固碳机制

湿地是重要的生态系统,具有不可替代的重要功能。它不仅可以直接或间接地为人类提供各种产品和服务,还具有许多环境功能,如保护生物多样性、降解污染、控制侵蚀等<sup>[11]</sup>。湿地碳汇是指湿地植物通过光合作用吸收大气中的CO<sub>2</sub>,并在微生物活动相对较弱的湿地中积累,根、茎、叶、果实枯萎,形成由动植物残体和水组成的泥炭。由于泥炭中过饱和水的

厌氧特性,从植物残渣中分解和释放  $\text{CO}_2$  的过程非常缓慢,从而有效地固定了植物残渣中的大部分碳。通过湿地植物的光合作用,大气中的  $\text{CO}_2$  被吸收并转化为有机物。植物死亡后的残渣通过腐殖化和泥炭化形成腐殖质和泥炭,储存在湿地土壤中。

湿地的固碳单元主要包括河流和湖泊水体中生物的生物量、水体中溶解有机碳、湿地沉积物碳储量等 3 类。数据显示,中国湿地土壤有机碳库(5.04~6.19 Pg) > 湿地水体有机碳储量(0.13~0.50 Pg) > 湿地植被碳储量(0.13~0.50 Pg),分别占到中国湿地有机碳库的 85.4%~93.5%, 4.1%~7.7% 和 2.4%~6.9%。

### 3 生态修复固碳的实现途径与成效

#### 3.1 林草途径

生态修复固碳林草途径对应的措施主要包括:造林、种草、封育、生态修复、植物护路、梯田、水平阶、草田轮作、横坡带状间作和休闲地绿肥等。其原理是:植物在光能的作用下,将叶片等幼嫩组织吸收的  $\text{CO}_2$  和根系输送的水分转化为糖和氧,糖在各种酶的催化下形成纤维素和水。正是植物的光合作用使植物吸收的  $\text{CO}_2$  以有机质的形式储存起来,形成树干、树枝和树叶,有效地扩大了林草植被的生物量,提高了林草生态系统的碳吸收率和能力,直接促进生态固碳效率的提高。

中国科学院碳专项中有关陆地生态固碳研究成果表明,中国陆地的生态固碳量为  $95.15 \pm 5.71$  Pg,其中森林生态系统碳存储量占 38.9%<sup>[12]</sup>。方精云等<sup>[13]</sup>基于换算因子连续函数法测算中国陆地林草植被生态固碳储量为 5.9 Pg。朴世龙等<sup>[14]</sup>研究证明:20 世纪 80 年代和 90 年代,中国陆地生态系统碳储量平均每年增加 0.19~0.26 Pg。中国陆地生态系统生态固碳大小相当于此间中国工业源  $\text{CO}_2$  总排放量的 28%~37%,显著地高于欧洲(7%~12%),跟美国相近(20%~40%)。张坤<sup>[15]</sup>基于中国第六次森林资源普查中的按树种调查统计的森林蓄积量资料,得出中国森林的碳储量为 5.50 Gt。李奇等<sup>[16]</sup>利用中国第七次和第八次森林资源清查中各优势树种的面积和蓄积量数据,采用材积源生物量法,估算了中国森林(乔木林)总碳储量为 6 135.68 Tg,碳密度为 37.28 Mg/hm<sup>2</sup>(以 C 计)。相应地,合理的生态恢复和综合治理将有助于促进土壤碳素积累,增强土壤生态固碳功能。

#### 3.2 土壤途径

生态固碳土壤途径对应的措施主要包括:造林、

种草、封育、生态修复等。土壤途径发生生态固碳作用,主要是以不同农业经营和林草管理等调水保土、工程措施蓄水保土等方式,直接或者间接从 2 个方面起到了增加生态固碳的效果:①蓄水保土:保护或减缓现有土壤的侵蚀流失,保护现有土壤碳素的流失;②改良土壤:通过增加地表生物量使土壤中的根系分泌物增加,土壤的理化性质得到改善。农田土壤中的地面植被残体、根系和作物残茬、还田秸秆和绿肥是土壤有机质的主要来源。每年都有大量的有机残留物被提供给土壤。例如,树木、灌木、草及其残留物。在此过程中,土壤有机质逐渐增加,土壤固碳能力提高。

土壤有机碳的固定是缓解全球气候变化和维持农田生态系统生产力的重要驱动力,是推动土壤肥力和生态服务功能实现的重要媒介。全球土壤数据整合计量表明,深度为 1 m 内的土壤碳储量为 1 505 Pg,约是植被有机碳储量的 2.43 倍,大气碳储量的 1.71 倍,深度为 2 m 内的土壤碳汇储量超过 2 000 Pg<sup>[17]</sup>。鉴于以往对土壤碳储量的评估缺乏地形和山坡斜率的考虑,土壤碳储量甚至被低估。同时,土壤碳的流动能够占到全球陆地碳循环总量的 80%<sup>[18]</sup>。中国拥有  $9.60 \times 10^6$  km<sup>2</sup> 的土地,土壤覆盖了  $9.28 \times 10^6$  km<sup>2</sup>,大概占国土面积的 97.07%,土壤碳汇巨大,有关测算中国的土壤碳汇总额达到 89.14 Gt<sup>[19]</sup>。中国发展土壤碳汇的潜力巨大,中国土壤碳汇的密度变化非常大,最低仅为 1.43 t/hm<sup>2</sup>,最高达 4 463 t/hm<sup>2</sup><sup>[20]</sup>。土壤碳汇的密度与植被情况密切相关,植被覆盖情况比较好的东北、西南和港澳地区土壤碳汇密度较高,而西北地区的土壤碳汇密度最低<sup>[21]</sup>。

#### 3.3 湿地途径

湿地一直被认为是温室气体重要的碳汇,是地球上重要的有机碳库,影响着温室气体的全球平衡。湿地也是温室气体的源,土壤中的有机质经微生物矿化分解产生的  $\text{CO}_2$  和在厌氧环境下经微生物作用产生的  $\text{CH}_4$ ,都被直接释放到大气中。因此植物碳吸收与碳释放之间的平衡也会改变。湿地生态系统中植被  $\text{CO}_2$  净同化与生态系统  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  净释放间的平衡决定了湿地生态系统是大气的碳源或碳汇<sup>[22]</sup>。尽管  $\text{CH}_4$  的温室效应大约是  $\text{CO}_2$  的 25 倍,但研究表明,多数湿地的  $\text{CO}_2$  固定量都远高于  $\text{CH}_4$  的释放量<sup>[23]</sup>,有机质被大量储存在土壤中,湿地植物净同化的碳仅仅有 15% 被释放到大气。由此可知,绝大部分天然湿地都表现为碳汇属性,有助于大气中含碳温室气体的平衡。

湿地的固碳过程是其生态系统应对全球气候变化的关键环节。湿地生态系统固碳效率高并且具有

长期性与持续性。在全球范围内,湿地储存的碳比例很大,约占碳库的 18%~30%。中国的湿地面积为  $6.50 \times 10^7 \text{ hm}^2$ , 占世界湿地总面积的 10%, 固碳潜力巨大。

## 4 通过生态修复实现碳中和的对策

### 4.1 扩大林草面积, 巩固提升生态固碳能力

按照统筹山水林田湖草沙系统治理的要求, 以提升碳汇能力为导向, 认真落实《全国重要生态系统生态保护和修复重大工程总体规划(2021—2035年)》《“十四五”林业草原保护发展规划纲要》确定的国土绿化目标任务。充分考虑森林草原植被覆盖率和修复森林草原面积等数量目标, 以期实现生态系统固碳能力以及生产力的提升。科学实施山水林田湖草沙生态修复工程, 要充分认识到基于自然的解决方案(nature-based solution, NbS)在生态修复固碳增汇方面的潜力。积极开展国家储备林建设, 深入开展全民义务植树, 拓展全民义务植树新载体, 创新义务植树管理机制, 积极推进森林城市建设和农村绿化美化, 注重城乡绿化一体化。

### 4.2 提升林草质量, 提高生态固碳增量

实现林草高质量发展是生态系统固碳增汇的根本手段之一, 加强林草应对气候变化, 对于实现固碳增汇具有重要意义。调节森林基本构造与比例, 适度提升混交林比例, 增加轮伐期, 同时加强森林与草地生态系统的理论技术的研究, 执行以生态固碳能力为方向的森林管理机制。加强森林保养和衰退森林恢复, 加强人工林更新改造, 提倡多用途森林管理方法, 以抵御气候问题, 恢复森林生态修复能力。实施森林质量品质精准提升工程项目, 科学制订森林管理方法方案, 不断完善管理体系, 执行提升森林管理方法外汇交易的对策。科学整体规划草原生态维护和恢复新项目, 结合当地实际情况, 不断完善草原资源优化配置管理体系, 创建草原生态和草原农牧区可持续发展能力, 改变草原衰退和土地荒漠化发展趋势。执行科学的湿地保护和恢复新项目, 恢复湿地公园生态作用, 恢复湿地公园生态碳汇能力。在全面评定和预测分析气候变化规律层面, 维护和恢复沙漠植物, 提升干旱气候绿色植物的生态碳固定。

### 4.3 全面加强资源保护, 因地制宜, 减少碳库损失

大自然保护协会(The Nature Conservancy, TNC)协同 15 个机构的一项研究表明, NbS 能为 2030 年减排目标贡献 30% 的减排量<sup>[24]</sup>, 具有极大的减排潜力。生态系统具有一定的自然恢复能力, 如果忽视生态系统本身自然恢复能力, 一味地采取高强度

的人工措施搞生态工程, 不仅造成高成本投入与高碳排放, 生态系统往往也不具备自我维持和正向演替能力, 所产生的生态效益也很可能短暂低效, 甚至产生逆向演替<sup>[25]</sup>。因此, 生态修复需要按照当地水质土壤等是否适合植物的生长、各区域间的空间差异、地区的经济发展状况等方面进行科学规划, 需要合理细致分析区域布局与生态系统之间的相互关系, 分清轻重缓急, 合理有序治理地域性的碳流失。在植被重建或引入物种时, 充分考虑植被类型、林龄、物种数、物种丰富度等因素对固碳能力的影响, 选择适宜当地的优势植物种类, 优化乔、灌、草相结合的植物群落的物种组成或空间结构, 充分利用生态位分化和生态补偿效应, 提高生态系统稳定性和净初级生产力, 实现生态系统生产力提高与增汇。

### 4.4 明确固碳核算指标, 加大宣传, 鼓励实施生态修复固碳

在总结试点示范实践的基础上, 结合最新相关科研成果, 研究制定生态修复碳汇统计汇总和会计规范, 明确指标体系、具体算法、数据来源和统计口径, 促进生态碳汇统计和会计标准化, 同时在实际行动中加强宣传, 提高全民生态修复意识, 增强全民对于生态修复的长期坚持意识, 为建立统一标准化的生态碳汇会计统计体系奠定基础。鼓励在重点生态受损区域实施生态修复, 增加相应的生态修复措施数量, 同时建立多层次投入机制, 以此保证生态修复工作得以持续进行, 同时继续监测和测量生态修复措施与设施的生长过程, 以便充分发挥其多重效益。

## 5 结论

碳中和是顺应时代发展, 符合人类社会需求的大趋势, 与中国绿色发展目标相一致。生态修复的综合及有效利用是实现碳中和的重要途径。经过多年的努力, 中国生态修复工作取得了显著成绩, 但是目前生态修复所面临的困难还非常大。

(1) 国内很多学者都对我国生态修复固碳进行了估算, 但是由于选取的数据资料和研究方法不一致, 估算结果仍存在很大的不确定性。如何建立一套公认的科学的研究方法是今后研究的一项重点和难点。

(2) 目前, 关于生态修复固碳措施的机制还存在较大的分歧, 今后的研究应将各种固碳机制综合起来, 全面评价固碳增汇措施。

(3) 综合分析发现, 当前采用的增汇措施多以单个生态系统为对象, 缺乏系统和整体性, 修复后的生态系统稳定性存在风险。

本文从生态修复固碳增汇角度, 重点探讨了林

草、土壤、湿地等固碳途径的机制,总结了各个途径的固碳成效,并针对性的提出了生态修复的碳中和对策,以期为中国生态修复实现碳中和提供借鉴。

为了更好地适应碳中和背景,大力促进中国生态修复工作的发展,生态修复固碳增汇需从以下4个方面构建新路径:①扩大林草面积,巩固提升生态固碳能力;②提升林草质量,提高生态固碳增量;③全面加强资源保护,因地制宜,减少碳库损失;④明确固碳核算指标,加大宣传,鼓励实施生态修复固碳。

#### [参 考 文 献]

- [1] 肖海龙,盛茂银.陆地森林植被植物细根对全球气候变化的响应研究进展[J].生态科学,2020,39(2):199-206.
- [2] 孔凡婕,应凌霄,文雯,等.基于国土空间生态修复的固碳增汇探讨[J].中国国土资源经济,2021,34(12):70-76.
- [3] 高扬,何念鹏,汪亚峰.生态系统固碳特征及其研究进展[J].自然资源学报,2013,28(7):1264-1274.
- [4] 余新晓,贾国栋,郑鹏飞.碳中和的水土保持实现途径和对策[J].中国水土保持科学(中英文),2021,19(6):138-144.
- [5] Lu Fei, Hu Huifeng, Sun Wenjuan, et al. Effects of national ecological restoration projects on carbon sequestration in China from 2001 to 2010 [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2018,115(16):4039-4044.
- [6] 廖贵彩.我国水土保持生态修复中存在的问题及其解决措施浅析[J].南方农业,2021,15(3):18-19.
- [7] 刘世荣,马姜明,缪宁.中国天然林保护、生态恢复与可持续经营的理论与技术[J].生态学报,2015,35(1):212-218.
- [8] 李姝,喻阳华,袁志敏,等.碳汇研究综述[J].安徽农业科学,2015,43(34):136-139.
- [9] 肖胜生,方少文,杨洁,等.水土流失区植被恢复过程中土壤碳汇的形成机理[J].中国水土保持,2011(12):25-28.
- [10] 方星,孙健,魏永霞.安徽省地质碳汇潜力及二氧化碳地质储存[J].安徽地质,2010,20(2):81-84.
- [11] 闫苏.温带长白山天然阔叶林沼泽生态系统碳储量研究[D].黑龙江 哈尔滨:东北林业大学,2018.
- [12] Pecl G T, Araújo M B, Bell J D, et al. Biodiversity redistribution under climate change: Impacts on ecosystems and human well-being [J]. Science, 2017, 355 (6332): eaa19214.
- [13] 方精云,郭兆迪,朴世龙,等.1981—2000年中国陆地植被碳汇的估算[J].中国科学(D辑:地球科学),2007,37(6):804-812.
- [14] Piao Shilong, Fang Jingyun, Ciais P, et al. The carbon balance of terrestrial ecosystems in China [J]. Nature, 2009,458(7241):1009-1013.
- [15] 张坤.森林碳汇计量和核查方法研究[D].北京:北京林业大学,2007.
- [16] 李奇,朱建华,冯源,等.中国森林乔木林碳储量及其固碳潜力预测[J].气候变化研究进展,2018,14(3):287-294.
- [17] 邓万刚,吴蔚东,罗微,等.垦殖橡胶对海南热带土壤有机碳的影响[J].中国农学通报,2007,23(8):482-484.
- [18] 张维理, Kolbe H, 张认连.土壤有机碳作用及转化机制研究进展[J].中国农业科学,2020,53(2):317-331.
- [19] 王斌,刘某承,周志春.1999—2008年间中国森林土壤碳汇功能初步估算[J]. Journal of Resources and Ecology, 2022,13(1):17-26.
- [20] Yu D S, Shi X Z, Wang H J, et al. Regional patterns of soil organic carbon stocks in China [J]. Journal of Environmental Management, 2007,85(3):680-689.
- [21] 崔俊富,苗建军,陈金伟.低碳经济与中国碳汇发展研究:基于森林碳汇、土壤碳汇和地质碳汇的讨论[J].华北电力大学学报(社会科学版),2015(4):1-6.
- [22] 栾军伟,崔丽娟,宋洪涛,等.国外湿地生态系统碳循环研究进展[J].湿地科学,2012,10(2):235-242.
- [23] 牟长城,石兰英,孙晓新.小兴安岭典型草丛沼泽湿地CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O的排放动态及其影响因素[J].植物生态学报,2009,33(3):617-623.
- [24] 安岩,顾佰和,王毅,等.基于自然的解决方案:中国应对气候变化领域的政策进展、问题与对策[J].气候变化研究进展,2021,17(2):184-194.
- [25] 卞正富,于昊辰,韩晓彤.碳中和目标背景下矿山生态修复的路径选择[J].煤炭学报,2022,47(1):449-459.
- [26] 薛蕊,刘国彬,潘彦平,等.黄土丘陵区人工刺槐林土壤活性有机碳与碳库管理指数演变[J].中国农业科学,2009,42(4):1458-1464.
- [27] 滕秋梅,沈育伊,徐广平,等.桂北不同林龄桉树人工林土壤碳库管理指数和碳组分的变化特征[J].广西植物,2020,40(8):1111-1122.
- [28] Chen Wenfu, Meng Jun, Han Xiaori, et al. Past, present, and future of biochar [J]. Biochar, 2019, 1 (1):75-87.
- [29] 戴全厚,刘国彬,薛蕊,等.侵蚀环境人工灌木林土壤活性有机碳与碳库管理指数演变[J].西北农业学报,2008,17(5):215-219.
- [30] 薛蕊,刘国彬,潘彦平,等.黄土丘陵区人工刺槐林土壤活性有机碳与碳库管理指数演变[J].中国农业科学,2009,42(4):1458-1464.
- [31] 于海春.内蒙古退化土地人工林固碳增汇技术研究[D].内蒙古 呼和浩特:内蒙古农业大学,2014.
- [32] 罗红,吴建普,普布顿珠,等.人工林土壤碳库及其影响因素[J].贵州林业科技,2020,48(2):36-41.
- [33] 史利江,高杉,姚晓军,等.晋西北黄土丘陵区不同植被恢复下的土壤碳氮累积特征[J].生态环境学报,2021,30(9):1787-1796.

(上接第367页)