

不同林分类型对鄂尔多斯市圪秋沟流域土壤碳库及稳定性的影响

刘晓民^{1,2,3}, 白嘉骏^{2,3}, 杨耀天^{2,3}

(1.内蒙古农业大学 水利与土木建筑工程学院, 内蒙古自治区 呼和浩特 010018; 2.内蒙古黄河生态研究院, 内蒙古自治区 呼和浩特 010020; 3.黄河流域内蒙段水资源与水环境综合治理协同创新中心, 内蒙古自治区 呼和浩特 010018)

摘要: [目的] 探明不同林分类型对圪秋沟流域土壤碳库与土壤碳稳定性的影响, 为探讨土壤固碳机理、优化圪秋沟流域土壤管理及人工林选育措施, 实现圪秋沟流域土壤固碳减排和肥力提升提供理论依据。[方法] 于 2013—2021 年在内蒙古自治区鄂尔多斯市圪秋沟流域以 8 a 生的樟子松林、山桃林、油松林、杨树柠条混交林、油松侧柏混交林和沙棘山杏混交林及 CK 处理共 7 个样地为研究对象, 测定不同林分类型在不同土层深度的土壤总有机碳(TOC)、惰性有机碳(ROC)、易氧化有机碳(EOC)和微生物量碳(MBC)含量以及土壤碳储量, 研究其对土壤碳库的影响效果, 探讨不同林分类型与土壤碳稳定性间的相互关系。[结果] 与 CK 处理相比, 0—20 cm 和 20—40 cm 土层土壤总有机碳、惰性有机碳、易氧化有机碳和微生物量碳含量以及土壤碳储量, 增加了 9.46%~51.24%, 1.76%~44.89%, 16.48%~44.26% 和 9.03%~64.84% 以及 10.61%~55.52%。[结论] 不同林分类型人工林的种植均能提高 0—20 cm 和 20—40 cm 土层土壤 TOC、ROC、EOC 和 MBC 含量以及土壤碳储量; 土壤 TOC、EOC、MBC 含量和土壤碳储量整体上随着土层深度的增加而降低, ROC 含量随着土层增加而增加; 0—20 cm 和 20—40 cm 土层各林分类型土壤碳库指数与 CK 处理相比均增加, 樟子松林、山桃林、沙棘山杏混交林更有利于圪秋沟流域土壤“碳封存”。

关键词: 圪秋沟流域; 不同林分类型; 土壤碳库; 碳库管理指数; 内蒙古自治区鄂尔多斯市

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2022)05-0360-08

中图分类号: S158.3, S725.7

文献参数: 刘晓民, 白嘉骏, 杨耀天. 不同林分类型对鄂尔多斯市圪秋沟流域土壤碳库及稳定性的影响 [J]. 水土保持通报, 2022, 42(5): 360-367. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2022.05.043; Liu Xiaomin, Bai Jiajun, Yang Yaotian. Effects of different stand types on soil carbon pools and stability at Geqiugou watershed in Ordos City [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(5): 360-367.

Effects of Different Stand Types on Soil Carbon Pools and Stability at Geqiugou Watershed in Ordos City

Liu Xiaomin^{1,2,3}, Bai Jiajun^{2,3}, Yang Yaotian^{2,3}

(1. Water Conservancy and Civil Engineering College, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot, Inner Mongolia 010018, China; 2. Inner Mongolia Yellow River Institute of Ecological Research, Hohhot, Inner Mongolia 010020, China; 3. Collaborative Innovation Center for Integrated Management of Water Resources and Water Environment in the Inner Mongolia Reaches of the Yellow River, Hohhot, Inner Mongolia 010018, China)

Abstract: [Objective] The effects of different stand types on soil carbon pools and soil carbon stability in the Geqiugou watershed in Ordos City of Inner Mongolia Autonomous Region were analyzed in order to provide a theoretical basis for determining the mechanism of soil carbon sequestration, optimizing soil management and plant breeding measures in the Geqiugou watershed, and realizing soil carbon sequestration emission reduction and fertility improvement in the Geqiugou watershed. [Methods] Eight-year-old plantations of *Pinus sylvestris*, *Carya cathayensis*, *Pinus tabulaeformis*, *Poplar-Caragana* mixed forest, Chinese pine and arborvitae mixed forest, sea buckthorn and mountain apricot mixed forest, and a control (CK) treatment were used as the research objects in the Geqiugou watershed from 2013 to 2021. The contents of total organic

收稿日期: 2022-04-08

修回日期: 2022-06-26

资助项目: 内蒙古自治区科技重大专项“黄河流域典型退化区生态修复关键技术研究”(2021ZD0008)

第一作者: 刘晓民(1981—), 男(蒙古族), 内蒙古自治区赤峰市人, 博士, 副教授, 主要从事水利科学等方面研究。Email: 13204717007@163.com。

通信作者: 白嘉骏(1996—), 男(汉族), 内蒙古自治区赤峰市人, 硕士, 主要从事土壤环境与生物化学等方面的研究。Email: 1915360388@qq.com。

carbon (TOC), resistant organic carbon (ROC), easily oxidizable organic carbon (EOC), microbial biomass carbon (MBC), and soil carbon storage in different stand types at different soil depths were determined to study the effects of plantations on soil carbon pools, and to determine the relationship between different stand types and soil carbon stability. [Results] Compared with the CK treatment, the contents of TOC, ROC, EOC, MBC, and soil carbon storage in the 0—20 cm and 20—40 cm soil layers increased by 9.46%—51.24%, 1.76%—44.89%, 16.48%—44.26%, 9.03%—64.84%, and 10.61%—55.52%, respectively. [Conclusion] Plantations of different stand types can increase soil TOC, ROC, EOC, MBC contents and soil carbon storage in the 0—20 cm and 20—40 cm soil layers. The soil TOC, EOC, MBC contents and soil carbon storage decreased with increasing soil depth, and soil ROC content increased with soil layers. The soil carbon pool index for each stand type in the 0—20 cm and 20—40 cm soil layers was greater than that of the CK treatment. *P. sylvestris*, *C. cathayensis*, and mixed sea buckthorn and mountain apricot were more conducive to soil carbon sequestration in the Geqiugou watershed.

Keywords: Geqiugou watershed; different stand types; soil carbon pool; carbon pool management index; Ordos City of Inner Mongolia Autonomous Region

“碳达峰—碳中和”已正式成为国家战略,在全球碳循环中,土壤碳库约是森林和其他植被碳库的 5 倍,是大气碳库的 3 倍,而土壤碳库中 60% 的碳以有机质的形式存在于土壤之中^[1],位于黄河中游黄甫川支流纳林川的一级支沟—圪秋沟流域生态环境脆弱,农业生产系统稳定性差,因此,控制土壤碳排放,实现将“碳”固定在土壤中,对实现“碳中和”目标极为重要。

土壤碳库是陆地生态系统中最大的碳库^[2],土壤碳库的构成影响其累积和分解,并直接影响全球陆地生态系统碳平衡,同时也影响土壤质量变化。土壤有机碳的形成抵消了二氧化碳的排放,也促进了土壤结构的形成并提高其稳定性^[3],土壤碳库是抵消二氧化碳排放最重要的功能结构,土壤结构中不同有机碳库形成过程及影响因素成为全球气候变化研究中的热点之一。研究圪秋沟流域土壤碳库组成变化及其稳定性,对控制圪秋沟流域土壤碳排放,提高土壤质量有积极意义。

土壤碳库是全球碳循环的重要组成部分,也是土壤有机质(SOM)库的重要组分,造林作为一种人为的土地利用方式与陆地管理活动,能增加陆地碳储量^[4],土壤微生物量碳能够反映土壤养分循环及转化过程的重要参数,直观体现土壤微生物的生长状态和土壤肥力状况^[5],土壤易氧化有机碳在改善土壤质量、保持土壤肥力、维持土壤碳库平衡方面有重要意义,同时与土壤速效养分、土壤物理性状也具有更密切的联系,因而成为评价土壤质量及土壤管理的一个重要指标^[6],在土壤碳库中,大部分为惰性有机碳库,它能够长期、稳定地存在于土壤中,而碳库管理指数则体现了碳库中各组分在量和质上的变化,进而反映土壤质量的下降或更新程度^[7];杜振宇等^[8]通过对黄河三角洲内人工林土壤碳库研究发现,各人工林地土

壤碳库指标较荒地有所提高,王仁杰等^[9]对人工林土壤碳库研究发现,人工林碳库管理指数均高于对照处理,改善了土壤质地。

近年来,相关人员主要针对不同发育阶段人工林土壤碳储量和微生物数量等^[10-11]开展了大量研究,但是关于不同人工林对土壤碳库及其稳定性影响的研究较少,人工林对黄河流域土壤碳库的影响机制还尚待深入研究。因此,本文以黄河中游内蒙古自治区圪秋沟流域不同林分类型土壤为研究对象,分析了表层及亚表层土壤总有机碳、微生物量碳、易氧化有机碳、惰性有机碳含量和土壤碳储量以及碳库管理指数变化,以明确不同林分类型对土壤碳库及其稳定性的影响,为探讨土壤固碳机理、优化圪秋沟流域土壤管理及人工林选育措施、实现圪秋沟流域土壤固碳减排和肥力提升提供理论依据。

1 材料与方 法

1.1 试验地概况

本试验于内蒙古自治区鄂尔多斯市准格尔旗暖水乡圪秋沟流域内进行。流域内地形起伏较大,沟壑较多,水土流失严重。地理坐标为 39°42′—39°50′N, 110°25′—110°48′E,面积约为 96 km²,海拔 820~1 582 m,属中温带半干旱大陆性季风气候。

1.2 试验处理

试验区布设在已实行封禁措施的梁峁台地上,属砒砂岩丘陵沟壑区,坡度在 5°以下,整体较为平坦,土壤类型为以砒砂岩为母质的栗钙土。共有 7 个处理,分别为:①樟子松林;②山桃林;③油松林;④杨树柠条混交林;⑤油松侧柏混交林;⑥沙棘山杏混交林;⑦CK 处理:未种植植株的对照区域(即荒地)。6 种人工林均为 2013 年 6 月完成种植,于 2021 年 6 月

进行土壤样品取样,2021年7月进行分析测试。

试验区域内,各人工林间隔距离为1 m,所占面积均为 $0.2(100\text{ m}\times 20\text{ m})\text{hm}^2$;造林后连续抚育3 a,每年4—5月和7—8月松土除草各一次,深5—8 cm;夏季培修地埂,蓄水保墒;秋季根部培土,越冬保温;发现病虫害及时喷药防治。试验地土壤情况见表1,不同林分类型具体情况详见表2。

表1 圪秋沟人工林种植前土壤基本性质

土层深度/ cm	土壤总有机碳含量/ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	pH 值
0—20	7.35 ± 0.57	8.22 ± 0.37
20—40	7.31 ± 0.50	8.16 ± 0.92

表2 圪秋沟不同林分类型基本情况

项目	樟子松	山桃	油松	杨树柠条混交	油松侧柏混交	沙棘山杏混交
株行距/m	3×4	3×4	3×4	3×4	3×4	3×4
郁闭度/%	40	40	40	50	50	50
平均树高/m	2.09	2.05	3.37	4.06(杨树) 1.56(柠条)	2.82(侧柏)	1.95(沙棘) 1.97(山杏)
平均冠幅/m	0.95	1.82	2.16	2.65(杨树) 1.72(柠条)	1.65(侧柏)	1.52(沙棘) 0.95(山杏)

1.3 采样及测试方法

(1) 采样方法。按照“棋盘式”土壤取样法将7块试验地各分为10个区域,同时为了保证科学统计的随机原则,在每个区域内随机选取3个采样点,分别于0—20 cm和20—40 cm两个土层进行取样,同区域各土层分别混合均匀为一个土壤样品,总计140个土壤样品,采集的土样经室内风干,研磨过筛后待分析用。

(2) 测试方法。土壤总有机碳含量采用TOC分析仪进行测定;土壤微生物量碳(microbial biomass carbon, MBC)采用氯仿熏蒸法测定^[12];易氧化有机碳(easily oxidizable organic carbon, EOC)采用高锰酸钾(333 mM)氧化法测定^[13];惰性有机碳(resistant organic carbon, ROC)采用盐酸水解法^[14]测定。

由式(1)—(4)对反映SOC的不稳定程度的碳库管理指数(carbon management index, CMI)进行相关计算,参考Blair等^[14]:

$$CL = EOC / (SOC - EOC) \quad (1)$$

式中:CL表示碳库活度,EOC为土壤活性有机碳含量。

$$CLI = CL_{tr} / CL_{ck} \quad (2)$$

式中:CLI为碳库活度指数; CL_{tr} 和 CL_{ck} 分别为不同林分类型和CK处理的碳库活度。

$$CPI = TOC_{tr} / TOC_{ck} \quad (3)$$

式中:CPI为碳库指数; TOC_{tr} 和 TOC_{ck} 分别为不同林分类型和CK处理的TOC含量。

$$CMI = CPI \times CLI \times 100 \quad (4)$$

式中:CMI为碳库管理指数。

$$\text{土壤碳储量} = 10 C \rho h$$

式中:C为有机碳质量比(g/kg); ρ 为土壤容重

(g/cm^3); h 为实际土层高度(cm)(李艳琼等^[15])。

1.4 数据处理与分析

数据分析采用Microsoft Excel 2010,SPSS 19.0软件,采用单因素方差分析LSD方法进行5%水平的差异显著性分析。

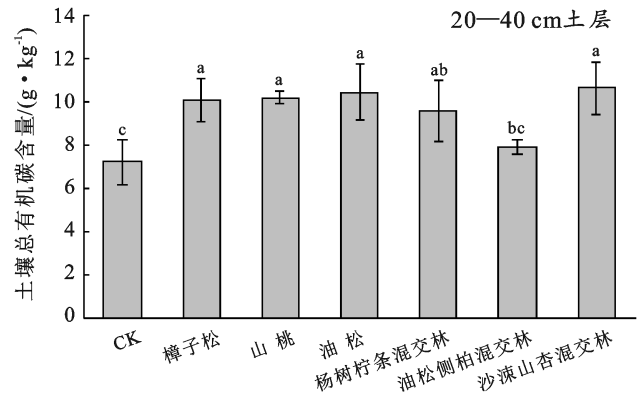
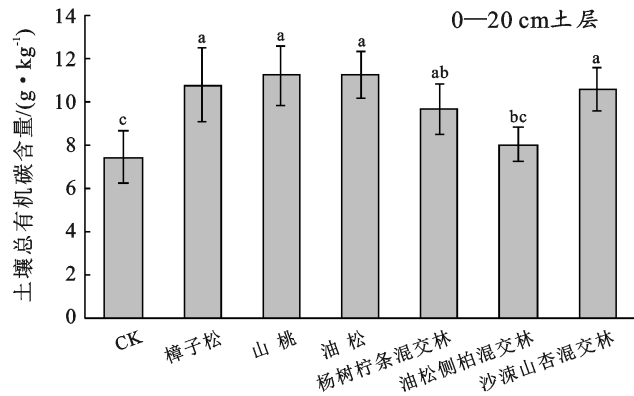
2 结果与分析

2.1 土壤碳库组成变化

由图1可知,土层深度影响着土壤总有机碳(TOC)含量的变化,但差异不显著,6种人工林的种植对试验区域内林下土壤总有机碳有着较好的提升作用,就0—20 cm土层深度而言,樟子松林、山桃林、油松林、杨树柠条混交林和沙棘山杏混交林均与CK处理差异显著($p < 0.05$),其中樟子松林、山桃林、油松林相较于CK处理提升幅度最大,达到45.30%,51.24%与51.15%,这说明樟子松林、山桃林、油松林对土壤表层TOC有着较强的提升效果。

对于亚表层(20—40 cm)而言,土壤TOC的变化规律与表层相似(图1),樟子松林、山桃林、油松林、杨树柠条混交林和沙棘山杏混交林较CK处理显著提升了39.11%,40.91%,44.33%,32.89%,47.28% ($p < 0.05$),综合来看,人工林的种植对圪秋沟流域土壤耕层有着良好的改良效果,这可能与根际输入或植被凋落物的进一步分解有关。

不同林分类型间,油松侧柏混交林与其他人工林相比,土壤总有机碳含量较低但仍高于CK处理,与其他人工林差异显著($p < 0.05$),这可能与凋落物的数量有关。



注:不同小写字母表示不同处理之间差异显著($p < 0.05$),下同。

图 1 圪秋沟不同林分类型土壤总有机碳含量的变化

根据图 2 可知,不同林分类型土壤易氧化有机碳(EOC)含量在土壤表层(0—20 cm)与亚表层(20—40 cm)之间相差不明显;就 0—20 cm 土层而言,樟子松林和山桃林较 CK 处理差异显著,其土壤 EOC 含量较 CK 处理显著增加了 26.40%和 42.96%($p < 0.05$),这说明土壤活性有机碳得以增加,有利于表层土壤“年轻化”,同时,油松林、杨树柠条混交林、油松侧柏混交

林和沙棘山杏混交林 EOC 含量也均大于 CK 处理,表现为分别较 CK 处理增加了 15.02%,17.68%,7.19%,20.95%,但差异不显著。

20—40 cm 所反映的规律与 0—20 cm 相似,山桃林与沙棘山杏混交林与 CK 处理差异显著($p < 0.05$),不同林分类型 EOC 含量较 CK 处理分别增长了 44.89%,15.40%,12.15%,1.76%,42.40%。

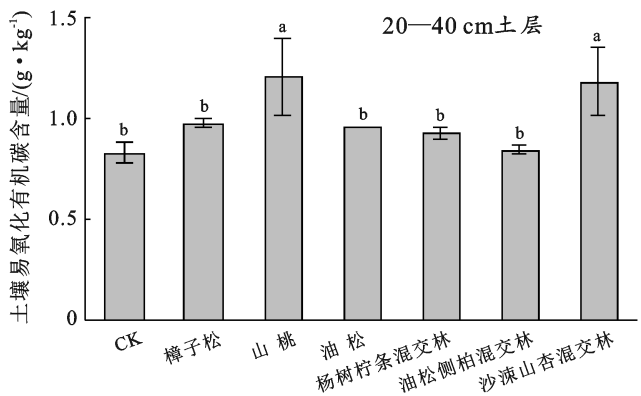
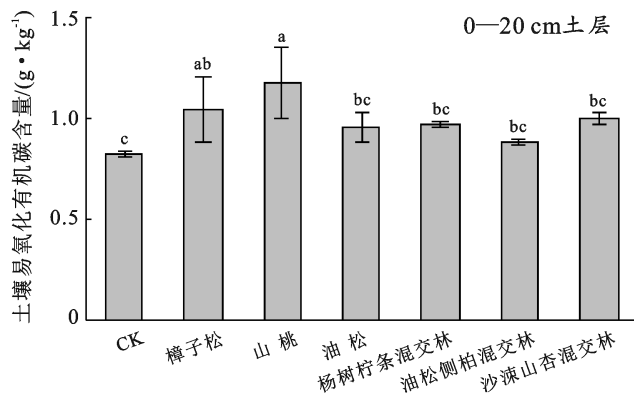


图 2 圪秋沟不同林分类型土壤易氧化有机碳含量的变化

对于不同林分类型而言,山桃林、樟子松林、沙棘山杏混交林在 0—20 cm 和 20—40 cm 土层土壤 EOC 含量较高,尤其是沙棘山杏混交林在 20—40 cm 土层 EOC 含量达到 1.20 g/kg,这可能与其发达且深入的根系有关。

不同林分类型土壤惰性有机碳(ROC)含量变化见图 3。在 0—40 cm 深度范围内,土壤 ROC 含量整体呈随深度增加而增加的趋势;就 0—20 cm 土层而言,樟子松林、山桃林、油松林、杨树柠条混交林、油松侧柏混交林、沙棘山杏混交林分别较 CK 处理增加了 39.35%,44.26%,45.22%,16.48%,27.66%,37.89%,其中樟子松林、山桃林、油松林、沙棘山杏混交林与 CK

处理差异显著($p < 0.05$),这说明在植物生长及土壤发育过程中,可能存在由不稳定有机碳向稳定性有机碳的转化,这对土壤固碳是有利的,且樟子松林、山桃林、油松林、沙棘山杏混交林惰性有机碳含量明显高于其他林分类型。

20—40 cm 土层不同林分类型土壤 ROC 含量变化情况表现为:不同林分类型土壤 ROC 含量均显著高于 CK 处理($p < 0.05$),樟子松林、山桃林、油松林、杨树柠条混交林、油松侧柏混交林、沙棘山杏混交林分别较 CK 处理提高了 36.76%,38.51%,41.06%,27.52%,23.09%,30.39%。20—40 cm 与 0—20 cm 变化规律一致。

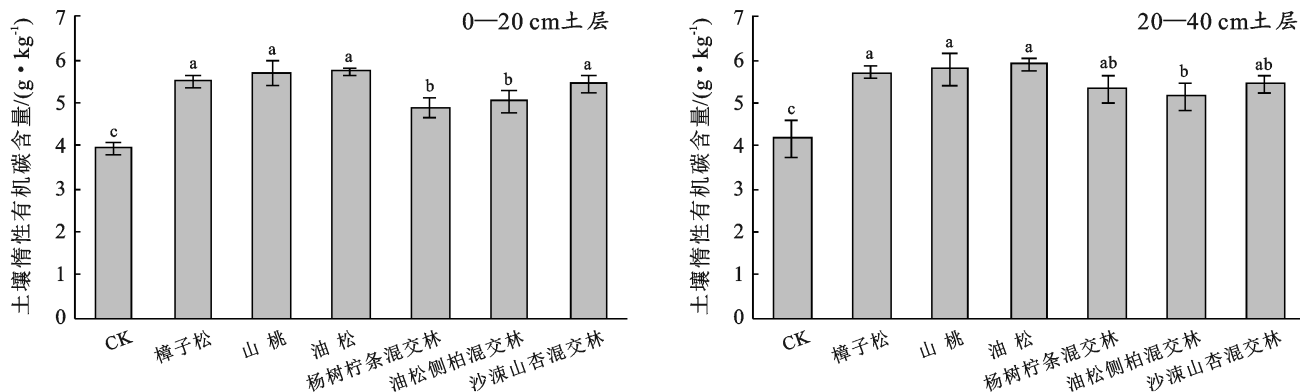


图 3 圪秋沟不同林分类型土壤惰性有机碳含量的变化

不同林分类型土壤微生物量碳(MBC)含量变化见图4。与CK处理相比,在0—40 cm深度范围内,不同林分类型对土壤MBC均有不同程度的提升效果,人工林的种植对土壤MBC有着积极的促进作用。0—40 cm深度范围内,土壤MBC含量整体上0—20 cm大于20—40 cm,即土壤MBC在垂直空间分布呈随深度增加而减少的趋势。

就0—20 cm深度范围内而言,不同林分类型中,

樟子松林、山桃林、油松林、油松侧柏混交林和沙棘山杏混交林土壤MBC含量与CK处理差异显著($p < 0.05$),但杨树柠条混交林与CK处理无显著差异($p < 0.05$),樟子松林、山桃林、油松林、杨树柠条混交林、油松侧柏混交林、沙棘山杏混交林分别较CK处理提升了62.84%,27.57%,41.95%,9.03%,52.91%,44.00%;20—40 cm表现为与0—20 cm相似的变化规律。

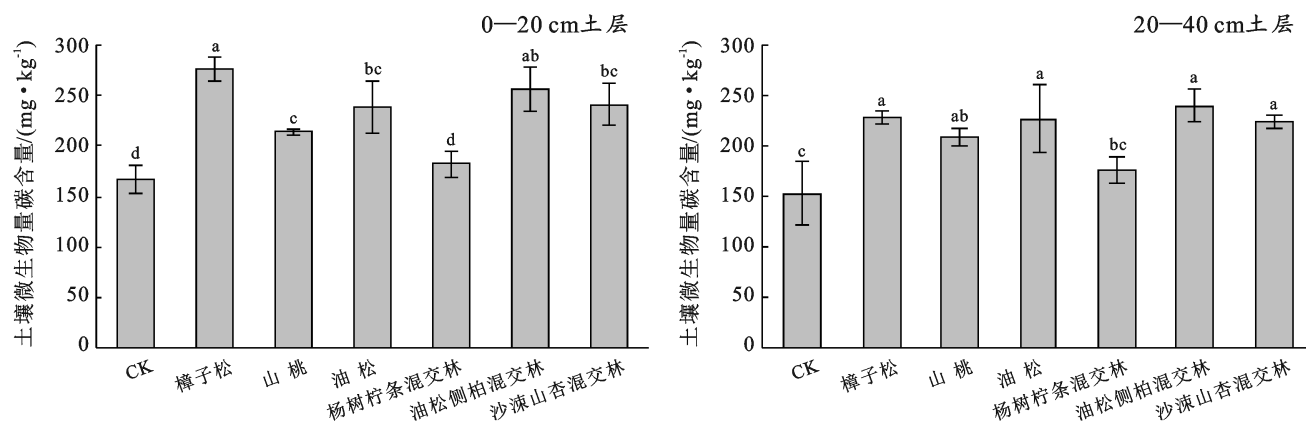


图 4 圪秋沟不同林分类型土壤微生物量碳含量的变化

不同林分类型土壤碳储量变化见图5。与CK处理相比,0—40 cm深度范围内不同林分类型土壤碳储量为867.20~1384.15 g/m²,均高于CK处理,0—20 cm深度樟子松林、山桃林、油松林、杨树柠条混交林、油松侧柏混交林、沙棘山杏混交林土壤碳储量分别较CK处理提升了49.63%,55.52%,52.48%,33.78%,10.61%,46.31%;20—40 cm深度不同林分类型土壤碳储量则较CK分别增长了43.29%,44.79%,45.60%,36.21%,12.19%,50.96%。这说明人工林的种植会有利于土壤碳储量的提高,能够减缓土壤碳库的消耗。0—20 cm与20—40 cm深度范围

内土壤碳储量变化规律与土壤总有机碳含量变化相似,且随着土层的加深土壤碳储量的变化亦均随着土层的加深而减少。总体来讲,人工林的种植使得土壤碳储量有所增加。根据表3可以看出,不同林分类型的土壤活性有机碳(易氧化有机碳、微生物量碳)与惰性有机碳之间的比例也不同,就0—20 cm土层来说,不同林分类型土壤活性有机碳所占比例均低于CK处理,而惰性有机碳所占比例则均高于CK处理,不同林分类型间差异均不显著;而20—40 cm土层与0—20 cm土层变化相似但不明显;这说明人工林的种植可能存在不稳定性碳向稳定性碳的转化。

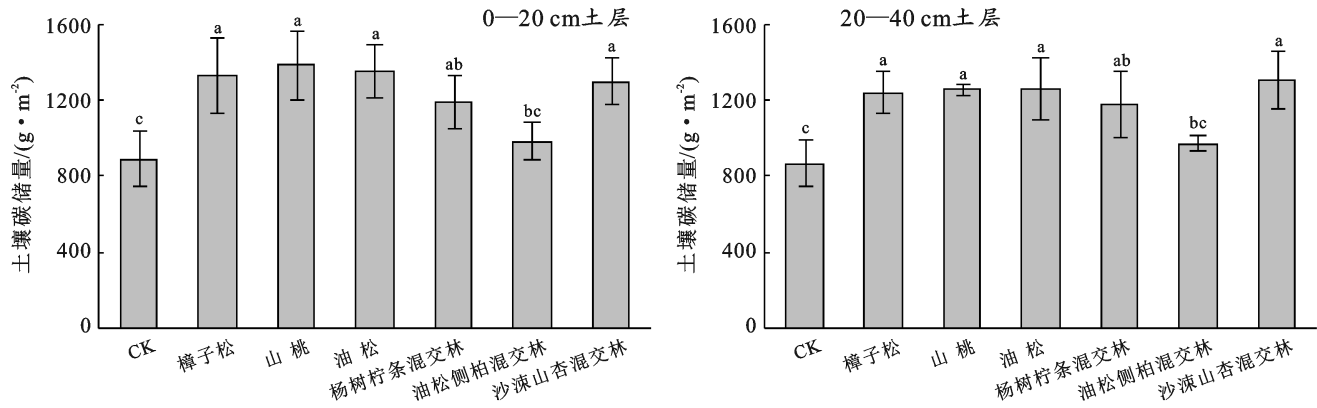


图 5 圪秋沟不同林分类型土壤碳储量的变化

表 3 圪秋沟土壤活性有机碳与惰性有机碳间比例变化

土层深度/cm	处理	活性有机碳比例/%	惰性有机碳比例/%
0—20	CK	20.13±0.94 ^a	79.87±0.94 ^b
	樟子松林	19.35±2.38 ^{ab}	80.65±2.38 ^{ab}
	山桃林	19.63±1.72 ^{ab}	80.37±1.72 ^{ab}
	油松林	17.16±0.80 ^b	82.34±0.80 ^a
	杨树柠条混交林	19.11±0.64 ^{ab}	80.89±0.64 ^{ab}
	油松侧柏混交林	18.50±0.95 ^{ab}	81.50±0.95 ^{ab}
	沙棘山杏混交林	18.57±0.57 ^{ab}	81.43±0.57 ^{ab}
20—40	CK	19.11±1.25 ^{abc}	80.89±1.25 ^{abc}
	樟子松林	17.41±0.25 ^{bc}	82.59±0.25 ^{ab}
	山桃林	19.63±2.86 ^{ab}	80.38±2.88 ^{bc}
	油松林	16.74±0.71 ^c	83.26±0.71 ^a
	杨树柠条混交林	17.21±0.68 ^{bc}	82.79±0.68 ^{ab}
	油松侧柏混交林	17.43±0.61 ^{bc}	82.57±0.61 ^{ab}
	沙棘山杏混交林	20.45±1.44 ^a	79.55±1.44 ^c

2.2 土壤碳库管理指数的变化

从表 4 可以看出,各林分类型的种植均增加了 0—20 cm 和 20—40 cm 土层的土壤碳库指数,0—20 cm 土层樟子松林、山桃林、油松林、杨树柠条混交林、油松侧柏混交林、沙棘山杏混交林分别较 CK 处理增长了 46.93%, 52.45%, 55.18%, 31.18%,

8.90%, 44.43%。20—40 cm 土层樟子松林、山桃林、油松林、杨树柠条混交林、油松侧柏混交林、沙棘山杏混交林分别较 CK 处理增长了 40.46%, 42.91%, 46.03%, 35.88%, 11.44%, 47.75%。综合来看,0—20 cm 与 20—40 cm 土层山桃林、油松林和沙棘山杏混交林均与 CK 处理差异显著 ($p < 0.05$)。

各林分类型的种植对 0—20 cm 和 20—40 cm 碳库管理指数均有所增加,0—20 cm 樟子松林、山桃林、油松林、杨树柠条混交林、油松侧柏混交林、沙棘山杏混交林分别较 CK 处理增加了 24.89%, 42.17%, 11.69%, 16.12%, 6.94% 和 18.52%; 20—40 cm 碳库管理指数则较 CK 处理分别增长了 15.43%, 47.46%, 12.76%, 10.46%, 1.15%, 43.15%。整体上碳库指数与碳库管理指数在 0—20 cm 和 20—40 cm 土层范围内规律相近。0—20 cm 和 20—40 cm 土层不同林分类型间碳库活度和碳库活度指数差异均不显著,纵向来看,各林分类型在 0—20 cm 与 20—40 cm 土层内土壤碳库活度、碳库活度指数无明显差异,但 0—20 cm 深度范围内各林分类型碳库活度与碳库活度指数均低于 CK 处理,其中油松林的下降幅度最大,分别较 CK 处理下降了 26.85% 和 24.32%。

表 4 圪秋沟土壤碳库管理指数

土层深度/cm	处理	碳库活度	碳库活度指数	碳库指数	碳库管理指数/%
0—20	CK	0.13±0.02 ^a	1.00±0.00 ^a	1.00±0.00 ^c	100.00±0.00 ^b
	樟子松林	0.11±0.04 ^a	0.87±0.20 ^a	1.47±0.26 ^{ab}	124.89±23.26 ^{ab}
	山桃林	0.12±0.03 ^a	0.95±0.25 ^a	1.52±0.17 ^a	142.17±24.17 ^a
	油松林	0.09±0.02 ^a	0.76±0.25 ^a	1.55±0.38 ^a	111.69±11.24 ^b
	杨树柠条混交林	0.11±0.01 ^a	0.89±0.05 ^a	1.31±0.08 ^{abc}	116.12±1.92 ^b
	油松侧柏混交林	0.13±0.01 ^a	0.99±0.13 ^a	1.09±0.11 ^{bc}	106.94±2.38 ^b
	沙棘山杏混交林	0.11±0.01 ^a	0.83±0.11 ^a	1.44±0.19 ^{ab}	118.52±4.17 ^{ab}
20—40	CK	0.13±0.03 ^a	1.00±0.00 ^a	1.00±0.00 ^b	100.00±0.00 ^b
	樟子松林	0.11±0.01 ^a	0.84±0.16 ^a	1.40±0.19 ^{ab}	115.43±7.09 ^{ab}
	山桃林	0.13±0.03 ^a	1.07±0.41 ^a	1.43±0.21 ^a	147.46±37.53 ^a
	油松林	0.10±0.02 ^a	0.79±0.19 ^a	1.46±0.26 ^a	112.76±10.14 ^{ab}
	杨树柠条混交林	0.11±0.02 ^a	0.86±0.29 ^a	1.36±0.36 ^{ab}	110.46±13.88 ^{ab}
	油松侧柏混交林	0.12±0.01 ^a	0.94±0.28 ^a	1.11±0.21 ^{ab}	101.15±11.55 ^b
	沙棘山杏混交林	0.12±0.00 ^a	0.97±0.25 ^a	1.48±0.06 ^a	143.15±32.36 ^a

3 讨论

3.1 人工林种植对有机碳库的影响

研究表明,0—40 cm 土层深度内,不同林分类型人工林均明显提升了土壤总有机碳(TOC)含量,特别是樟子松林、山桃林、油松林、杨树柠条混交林、沙棘山杏混交林均显著高于CK处理($p < 0.05$)。这主要取决于人工林具有较强的养分富集和培肥能力,除沙棘山杏混交林外,8 a 生人工林在 0—40 cm 土层土壤 TOC 含量随土层深度增加而减小,即表层(0—20 cm)土壤总有机碳含量大于亚表层(20—40 cm)土壤 TOC 含量,这与王时聪等^[16]、杨飞霞等^[17]的研究结果基本一致,尚雯等^[18]通过对梭梭人工林 4~36 a 的动态种植分析发现,随着种植年限增加,土壤总有机碳呈向表层聚集的趋势,这也与我们的研究结果相似。而沙棘山杏混交林在表层与亚表层之间土壤 TOC 含量没有明显差异的原因可能是与土壤微生物的活动能力有关。

不同树种种植 8 a 后,土壤易氧化有机碳(EOC)含量均增加(图 2),我们的研究结果与商素云等^[19]研究结果相似。这可能主要来自于植被凋落物等外源有机碳的输入,增加了土壤碳库储量^[20],有利于植被生长及土壤长久化利用。土壤 EOC 含量在不同深度(0—20 cm 与 20—40 cm)无明显差异,与刘雅洁等^[21]的研究结果一致,这可能是由于树种种植年限较长的原因,根系已发育至亚表层,根系分泌物为亚表层增加了活性碳储量^[22]。

不同树种土壤惰性有机碳(ROC)含量在 8 a 后均显著高于 CK 处理($p < 0.05$),这使更多的碳能够长期、稳定地存在于土壤中,Lehmann 等^[23]研究发现,森林土壤 ROC 含量在 10 a 后,明显高于对照处理,这与我们的研究结果相似,人工林的种植促进了土壤稳定性碳库的增长,这可能主要来源于根际输入作用^[24]。

本研究中,人工林种植 8 a 后土壤微生物量碳(MBC)提高幅度较大,这可能是由于不稳定有机碳可作为微生物基质被吸收利用^[25],同时,可能会促进不稳定有机 C 向稳定性有机碳的转化,Huang 等^[26]研究发现外源有机碳的输入改变了根际细菌群落,是不稳定碳含量的重要生物影响因素,导致 SOC 分子结构中相对稳定的芳基和邻芳基官能团分别增加了 213% 和 41%,羧基、烷基、N/O—烷基和甲氧基官能团减少。

土壤总有机碳含量往往是土壤碳储量变化的重要影响因子,本文研究结果表明,不同林分类型在不同土层深度下土壤碳储量的变化规律与土壤总有机碳相似,这与滕秋梅等^[27]的研究结果一致,进一步说

明了人工林的种植对土壤碳储量有着积极的促进作用。

3.2 人工林种植对土壤碳库管理指数的影响

鉴于土壤有机碳在提升土壤质量和碳源、碳汇等方面的重要功能,其活性碳库组成在表征土壤肥力和碳库平衡方面具有重要价值^[28],Blair 等^[13]建立土壤碳库活度指标和碳库管理指标,用来评估农业和生态系统中土壤碳的状态和转化速率,通过分析土壤总碳含量和土壤活性有机碳及非活性有机碳含量,进而反映土壤碳动态变化,根据我们的研究结果,这些碳库指标同时也反映了人工林的种植对土壤有机碳的稳定性具有积极作用,本研究 0—40 cm 深度范围内土壤碳库活度(CPL)无显著差异,表明各不同林分类型间土壤有机碳的活跃程度基本无差异,这可能是由于碳库活度通常受多种因素影响导致的,如水分、植被特性等^[29]。

碳库管理指数(CMI)是土壤碳储量与土壤总碳中不稳定碳活度指标的最终平衡结果,CMI 越高,越反映碳库的稳定性及增量,对于土壤表层而言,油松林、山桃林、樟子松林的提升程度最强(表 4)。即土壤活性有机碳的更新更快、流通量更大,土壤腐殖质和土壤的空隙、孔隙数量以及土壤的通气性也得以增加和提高^[27],说明人工林的种植有利于提高土壤质量,薛蕙等^[30]对黄土丘陵区人工刺槐林与坡耕地土壤碳库研究发现,人工林土壤碳库管理指数较坡耕地显著增加,土壤质量得以提高。杜振宇等^[8]研究发现,黄河流域人工林对土壤碳库管理指数有着较强的提升效果,对土壤具有较好的培肥作用,并处于良性管理状态,这与我们的研究结果相似。本研究中碳库指数(CPI)结果表明人工林的种植抑制或削弱了土壤活性碳库的不稳定性,CMI 结果表明樟子松林、山桃林、沙棘山杏混交林更有利于碳封存,同时,樟子松林、山桃林、沙棘山杏混交林对土壤总有机碳提升幅度也较大,因为凋落物是森林生态系统生物量的重要组成部分,是森林养分最基本的物质来源,能够维持土壤肥力,促进营养物质循环,调节养分平衡。而凋落物较多的林分类型(如樟子松)的固碳增汇能力也较强^[31],有研究表明固氮树种(如沙棘)能通过固氮作用潜在增加土壤氮的有效性,改善植物生产力,增加土壤碳输入,降低土壤微生物的呼吸速率,进而加速土壤固碳、增加土壤肥力^[32];山桃的根系一般都比较发达,主根、侧根之间明显,根系更加发达,表层凋落物较多,有机物输入量更大^[33]。因此,林分类型的碳积累速率和分配不同对土壤碳库会产生重要影响。碳库管理指数的增加说明了人工林的种植是区域土壤经营和管理的科学方法,土壤肥力水平得以提升。

4 结论

(1) 不同林分类型人工林的种植均能提高 0—20 cm 和 20—40 cm 土层土壤总有机碳、惰性有机碳、易氧化有机碳、微生物量碳含量和土壤碳储量,分别较 CK 处理增加了 9.46%~51.24%, 1.76%~44.89%, 16.48%~44.26%, 9.03%~64.84% 和 10.61%~55.52%;

(2) 土壤总有机碳、易氧化有机碳和微生物量碳含量以及碳储量整体上随着土层深度的增加而降低,惰性有机碳含量随着土层深度增加而增加;0—20 cm 和 20—40 cm 土层各林分类型土壤碳库指数与 CK 处理相比均增加,樟子松林、山桃林、沙棘山杏混交林的土壤碳库管理指数增加幅度最大,这更有利于提高土壤碳库及其稳定性,对实现圪秋沟流域土壤碳封存以及土壤肥力提升具有积极意义。

[参 考 文 献]

[1] 胡海清,魏书精,孙龙,等.气候变化、火干扰与生态系统碳循环[J].干旱区地理,2013,36(1):57-75.

[2] 曹彦,游巍斌,王方怡,等.森林生态系统粗死木质体碳储量研究进展[J].生态学报,2021,41(20):7913-7927.

[3] 蔡太义,黄耀威,黄会娟,等.不同年限免耕秸秆覆盖对土壤活性有机碳和碳库管理指数的影响[J].生态学杂志,2011,30(9):1962-1968.

[4] 董海凤,杜振宇,马丙尧,等.黄河三角洲人工林地土壤的水盐动态变化[J].水土保持学报,2013,27(5):48-53.

[5] 井大炜,邢尚军.鸡粪与化肥不同配比对杨树苗根际土壤酶和微生物量碳、氮变化的影响[J].植物营养与肥料学报,2013,19(2):455-461.

[6] 徐明岗,于荣,孙小凤,等.长期施肥对我国典型土壤活性有机质及碳库管理指数的影响[J].植物营养与肥料学报,2006,12(4):459-465.

[7] 井大炜,王明友,张红,等.樱桃栽培中施用蚯蚓粪对土壤有机碳氧化稳定性及碳库管理指数的影响[J].水土保持通报,2015,35(3):73-77.

[8] 杜振宇,董海凤,井大炜,等.黄河三角洲长期人工林地对土壤有机碳库的影响[J].水土保持通报,2016,36(5):56-61.

[9] 王仁杰,蒋焱,王勇,等.南亚热带不同红锥混交林土壤碳库稳定性与碳库管理指数变化[J].林业科学研究,2021,34(2):24-31.

[10] 焦如珍,杨承栋,孙启武,等.杉木人工林不同发育阶段土壤微生物数量及其生物量的变化[J].林业科学,2005,41(6):163-165.

[11] 尉海东,马祥庆.中亚热带不同发育阶段杉木人工林生态系统碳贮量研究[J].江西农业大学学报,2006,28(2):239-243.

[12] Brookes P C, Landman A, Pruden G, et al. Chloro-

form fumigation and the release of soil nitrogen: A rapid direct extraction method to measure microbial biomass nitrogen in soil [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1985,17(6):837-842.

- [13] Blair G J, Lefroy R, Lisle L. Soil carbon fractions based on their degree of oxidation, and the development of a carbon management index for agricultural systems [J]. *Australian Journal of Agricultural Research*, 1995,46(7):1459.
- [14] Rovira P, Vallejo V R. Examination of thermal and acid hydrolysis procedures in characterization of soil organic matter [J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2000,31(1/2):81-100.
- [15] 李艳琼,黄玉清,徐广平,等.桂林会仙喀斯特湿地芦苇群落土壤养分及微生物活性[J].生态学杂志,2018,37(1):64-74.
- [16] 王时聪,夏尚光,许邴,等.皖南山区人工林土壤化学性质的空间分异及影响因子[J].安徽农业大学学报,2020,47(2):185-191.
- [17] 杨飞霞,曹广超,于东升,等.宁夏引黄灌区不同类型土壤重组有机碳特征分析[J].水土保持通报,2017,37(6):85-91.
- [18] 尚雯,李德禄,魏林源,等.石羊河流域干旱荒漠区人工梭梭林对土壤碳库的影响[J].水土保持学报,2018,32(3):191-198.
- [19] 商素云,李永夫,姜培坤,等.天然灌木林改造成板栗林对土壤碳库和氮库的影响[J].应用生态学报,2012,23(3):659-665.
- [20] 张磊,贾淑娟,李啸灵,等.凋落物和根系输入对亚热带米楮天然林土壤有机碳组分的影响[J].水土保持学报,2021,35(3):244-251.
- [21] 刘雅洁,王亮,樊伟,等.海拔对杉木人工林土壤活性有机碳组分的影响[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2021,49(8):59-69.
- [22] 刘鑫铭,饶惠玲,丁新新,等.不同混交类型对毛竹林土壤有机碳和土壤呼吸的影响[J].应用与环境生物学报,2021,27(1):71-80.
- [23] Lehmann J, Kleber M. The contentious nature of soil organic matter [J]. *Nature*, 2015,528(7580):60-68.
- [24] 李娇,蒋先敏,尹华军,等.不同林龄云杉人工林的根系分泌物与土壤微生物[J].应用生态学报,2014,25(2):325-332.
- [25] Lehmann J, Rillig M C, Thies J, et al. Biochar effects on soil biota-A review [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2011,43(9):1812-1836.
- [26] Huang Ruilin, Zhang Zhenyi, Xiao Xian, et al. Structural changes of soil organic matter and the linkage to rhizosphere bacterial communities with biochar amendment in manure fertilized soils [J]. *The Science of the Total Environment*, 2019,692:333-343.

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): eaai9214.

[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CO₂、CH₄和N₂O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.

(上接第367页)

[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,薛蕙,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] 薛蕙,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.