

间伐对油松人工林碳储量的长期影响

段梦成², 王国梁^{1,2}, 史君怡¹, 周昊翔¹

(1. 西北农林科技大学水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 间伐不仅能改变人工林林木生长状况, 还会影响整个森林碳储量, 研究间伐对人工林碳固存的长期影响, 有助于准确评价人工林的碳汇功能, 为人工林的科学经营管理提供参考。2016年8月, 以黄土高原森林区营造于1962年, 间伐于1985年的4种(强度间伐、中度间伐、轻度间伐、对照)油松人工林为对象, 保留密度分别为800, 1 500, 2 200, 2 900株/hm², 研究了间伐对油松人工林不同植被层、叶凋落物、粗木质残体和土壤有机碳库的影响。结果表明: 轻度和中度间伐下油松人工林系统碳储量较对照显著提高了28.54%和21.33%, 强度间伐碳储量(154.66 t/hm²)与对照(169.26 t/hm²)无显著差异。乔木层是油松人工林的主要碳库, 占人工林总碳储量的64.85%~74.62%。不同处理下乔木层树干碳储量所占比例最高(52.05%~56.43%), 树根和树枝次之(22.27%~22.60%和17.73%~18.32%), 树叶最低(3.56%~7.01%)。中度和强度间伐下在提高林下灌草多样性的同时, 总的灌草碳储量分别比对照高24.27%和25.24%。间伐显著降低了叶凋落物碳储量, 其中, 强度间伐下的叶凋落物只有对照的48.15%。土壤碳库的变化主要是由土壤表层0—20 cm有机碳变动所引起, 中度和强度间伐土壤表层碳储量较对照分别减少了17.68%和33.76%, 而轻度间伐(51.23 t/hm²)与对照(50.96 t/hm²)无显著差异。土壤表层碳储量与植物多样性和基础呼吸呈显著负相关。轻度和中度间伐有助于森林生态系统碳固定, 其中轻度间伐不仅有利于地上植被碳固定, 而且还有助于土壤碳库的维持。

关键词: 间伐; 碳储量; 粗木质残体; 基础呼吸

中图分类号: S753.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2018)05-0190-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2018.05.031

Long-term Effects of Thinning on Carbon Storage in *Pinus Tabulaeformis* Plantations

DUAN Mengcheng², WANG Guoliang^{1,2}, SHI Junyi¹, ZHOU Haoxiang¹

(1. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

Abstract: The growth condition of crop trees as well as the entire forest carbon storage can be affected by thinning. Studying the long-term effects of thinning on the carbon sequestration of plantations contributes to accurately evaluate the carbon sink function and the scientific management of plantations. The *Pinus tabulaeformis* plantations constructed in 1962 on the Loess Plateau forest area, were thinned to 4 different densities: 800 (Heavy), 1 500 (Medium), 2 200 (Light) and 2 900 (Unthinning) stem/hm² in 1985. In August 2016, the effects of thinning on different vegetation layers, leaf litter, coarse wood debris and soil organic carbon pools were studied. The results showed that the total carbon storages of the *Pinus tabulaeformis* plantations under Light and Medium thinning were significantly increased by 28.54% and 21.33% respectively compared with the control, but no significant difference observed between the Heavy (154.66 t/hm²) and the control (169.26 t/hm²). The arbor layers were the main carbon pools of plantations, accounting for 64.85%~74.62% of the total carbon storage. Under different treatments, the carbon storage of stems in the arbor layers was the highest (52.05%~56.43%), followed by the roots and branches (22.27%~22.60% and 17.73%~18.32%), and the lowest in leaves (3.56%~7.01%). While Medium and Heavy thinning improved the diversity of shrubs and herbs, the total carbon storages of shrubs and herbs under those were 24.27% and 25.24% respectively higher than that of the control. Thinning significantly reduced leaf litter, which un-

收稿日期: 2018-03-28

资助项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0504601); 中国科学院科技服务网络计划项目(KFJ-STZ-ZDTP-036); 国家自然科学基金项目(41671513)

第一作者: 段梦成(1994—), 男, 硕士研究生, 主要从事森林生态研究。E-mail: 315331614@qq.com

通信作者: 王国梁(1971—), 男, 副研究员, 主要从事森林生态研究。E-mail: glwang@nwsuaf.edu.cn

der heavy thinning declined to 48.15% of the control. The changes of soil carbon pool were mainly caused by the disturbance of topsoil 0—20 cm. The surface carbon storages under Medium and Heavy thinning fell by 17.68% and 33.76% respectively compared with the control, while the difference between Light thinning (51.23 t/hm²) and the control (50.96 t/hm²) was not significant. There was a significant negative correlation between soil surface carbon storages and plant diversities and basal respirations. In conclusion, Light and Medium thinning could increase carbon sequestration in forest ecosystems, and Light thinning was not only conducive to carbon sequestration in above-ground vegetation but also contributed to the maintenance of soil carbon pools.

Keywords: thinning; carbon storage; coarse wood debris; basal respiration

森林生态系统储存着陆地上 80% 以上的植物碳和 70% 以上的土壤有机碳^[1],它是陆地上最大的碳储库和碳吸收汇。人工林是全球森林系统重要组成部分,其面积占全球森林面积的 7%^[2],在缓解全球气候变化、维持生态系统碳平衡中发挥重要作用。已有研究^[3]表明,通过造林以及合理的森林管理在一定程度上可缓解全球 CO₂ 浓度的上升。

间伐是一种常见的人工林管理措施,在改善林分环境、促进林木生长、优化林分结构和改良土壤养分状况等方面发挥着重要作用。研究间伐对人工生态系统碳库的作用,有利于充分理解人工林的固碳特征和发展碳汇人工林。以往国内外关于人工林间伐的研究大多集中在林木生长、林分空间结构、林下植物多样性和乡土物种更新等方面^[4],而间伐对人工林碳汇功能影响的研究还不足。在已有的研究中,间伐对人工林碳储量的影响尚无一致结论,有研究^[5]表明,间伐有利于整个人工林生态系统碳储量的增加,但也有研究^[6-7]指出,间伐对人工林碳储量无明显影响,甚至降低人工林碳储量。就间伐后恢复时间而言,短期内的间伐会降低地上碳储量,但长远来看,地上部分可恢复到原有水平^[8],进而改变森林碳储量,然而,目前这样长期影响的研究还很缺乏。另外,整个森林碳库可分为植被层、凋落层、粗木质残体和土壤层 4 个亚系统^[3],但是目前已有的研究往往容易忽略森林地面中粗木质残体和断枝的碳核算,进而低估了森林的固碳潜力。

油松是黄土高原森林区和森林草原区的重要造林树种,具有良好的水土保持和生态防护功能,同时,对该区域的碳固存和碳循环具有重大意义。本研究以黄土高原森林区营造于 1962 年,间伐于 1985 年的不同保留密度的油松人工林为研究对象,探讨不同间伐强度对油松人工林不同亚系统(植被层、凋落层、粗木质残体和土壤层)碳储量的长期影响,以期为该地区油松人工林系统碳汇功能的精准评价和科学的林分管理提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区域位于黄土高原黄龙山林区蔡家川林场

(35°42′—35°49′N, 108°57′—109°54′E),海拔 1 165 ~ 1 300 m,属暖温带半湿润与半干旱气候的过渡地带,年均气温 8.6 °C,年均降水量 611.8 mm,降水主要集中在 7—9 月。研究区域内的气候顶级群落是辽东栎(*Quercus liaotungensis*)为优势种的针阔混交林,主要乔木建群种为辽东栎,主要伴生种为油松、榆树(*Ulmus pumila*)、茶条槭(*Acer ginnala*)等,林下灌丛物种主要有葱皮忍冬(*Lonicera ferdinandi*)、卫矛(*Euonymus alatus*)、陕西荚蒾(*Viburnum schensianum*)、红瑞木(*Swida alba*)等,组成林下草本群落主要物种有披针苔草(*Carex nceolata*)、铁杆蒿(*Artemisia sacrorum*)、早开堇菜(*Viola prionantha*)等。

1.2 样地设置

本试验选取的油松人工林营造于 1962 年,初植密度 3 300 株/hm²。1985 年,林场对部分林地进行了 3 种强度(强度、中度和轻度)的间伐试验,间伐方式是采伐干扰树(病虫害木、劣质木和不利于目标树发展的林木)和保留生态目标树(对林分结构发展起良好作用的林木),干扰树的地上部分全部移除,未伐林地是该试验中的对照组,最终以上 4 种处理对应的保留密度分别为 800, 1 500, 2 200, 2 900 株/hm²。以上每个处理各设置 5 块 20 m×20 m 的样地,共 20 块样地,样地间距>30 m。2016 年 8 月对各个样地的植被和土壤进行了调查和取样。样地基本情况见表 1。

1.3 样品采集与测定

(1) 乔木和灌木生物量测定。对样地内的乔木进行每木检尺,记录各间伐类型下胸径≥5 cm 林木胸径、基径、树高、冠幅和枝下高等参数,油松生物量估算采用马钦彦^[9]在该地区建立的油松人工林生物量方程(表 2)。

在每块样地内分别设置 4 个 5 m×5 m 灌木样方和 4 个 1 m×1 m 草本样方,调查每个样方中灌木株数、高度和盖度,灌木收割的具体方法是针对 4 个灌木样方中重复出现的同种灌木,按照植株高度序列,选取 3~5 株具有代表性的个体连根拔起,非重复出现的灌木同样被全部收割,现场称取不同灌木不同器官鲜重,不同灌木各自混合后按 30% 比例取样。

草本样方中全部的草本均被收割,称取鲜重,最后带回实验室烘干称重,计算生物量。

表 1 样地基本概况

指标	对照	轻度间伐	中度间伐	强度间伐
密度/(株·hm ⁻²)	2887±24a	2181±12b	1450±27c	781±33d
胸径/cm	13.91±0.39d	17.15±0.30c	21.92±0.54b	24.16±0.41a
树高/m	8.41±0.02c	12.85±0.23b	12.27±0.10b	14.05±0.08a
郁闭度/%	95	91	80	69
灌木 Shannon 指数	1.79±0.03bc	1.67±0.08c	2.12±0.12b	2.62±0.20a
草本 Shannon 指数	0.95±0.06c	1.30±0.04b	1.82±0.02a	1.99±0.12a
pH	8.49±0.02a	8.45±0.02a	8.40±0.01b	8.38±0.01b
土壤容重/(g·cm ⁻³)	0.96±0.03b	0.94±0.02b	0.95±0.01b	0.85±0.02c
土壤含水量/%	29.69±0.54ab	30.21±0.65a	33.02±0.29a	33.59±1.51a
土壤有机碳/(g·kg ⁻¹)	17.14±0.31b	17.95±0.29a	14.18±0.16c	13.41±0.31d
土壤全氮/(g·kg ⁻¹)	1.41±0.04ab	1.33±0.03b	1.46±0.05a	1.43±0.02ab
土壤碳氮比	12.22±0.44a	13.54±0.23a	9.92±0.84b	9.37±0.32b
土壤全磷/(mg·kg ⁻¹)	0.48±0.01c	0.52±0.02b	0.56±0.01a	0.59±0.02a

注:表中数据为平均值±标准误差;同行不同字母表示 0.05 水平上差异显著;表中土壤理化性质为 0—20 cm 土层。下同。

表 2 油松单木生物量估算方程

回归方程	器官	a	b	r	p
$\ln W = a + b + \ln(D^2 \cdot H)$	树干	-3.40824	0.927516	0.991	0.940
	树枝	-3.86239	0.850470	0.980	0.918
	树叶	-1.53547	0.416061	0.838	0.872
	树根	-3.74208	0.862277	0.979	0.864

注:D 表示胸径(cm);H 表示树高(m)。

(2) 叶凋落物现存量和粗木质残体生物量测定。每块样地中随机收集 4 块 20 cm×20 cm 样方的叶凋落物,现场称取鲜重,最后带回烘干称重。每块样地设置 2 条 20 m 长的样线,用于调查大径级(≥10 cm)断枝数量,直径小于 10 cm 的断枝未被统计,一是细枝生物量极小且分布不均,二是目前尚无合适方法估算其生物量。另外,统计样地内所有枯倒木的数量,并测量其直径,大径级断枝和枯倒木生物量的估算方法参考 Wagner^[10] 研究结果。地上植物有机碳含量参照孟蕾等^[11] 在子午岭人工油松林的测定结果。

(3) 土壤碳储量估算。每块样地中设置一个土壤剖面,将其分为 0—20,20—40,40—60 cm 3 个土层,使用环刀取样,每层 4 个重复,用于测定土壤容重和含水量。在样方中随机设置 15 个取样点,使用直径 3.8 cm 土钻对以上 3 个土层分别进行取样,然后按四分法混合取样,4 ℃ 保存一部分鲜土用于测定土壤基础呼吸,另一部分土样被自然风干,用于土壤 pH、有机碳、全氮、全磷和易氧化有机碳理化性质分析。

土壤碳储量(SOC,t/hm²)计算公式为:

$$SOC = \sum_i C_i \times D_i \times H_i \times 10$$

式中: C_i 为土壤有机碳含量(g/kg); D_i 为土壤容重(g/cm³); H_i 为土层厚度(cm)。

(4) 土壤基础呼吸和理化性质测定。基础呼吸测定

参考 Hueso 等^[12] 研究方法,每个样地称取 3 份 30 g 鲜土,置于敞口但有可密封性橡胶塞的烧瓶中,调节土壤含水量至 50%~60% 的饱和持水量,将敞口烧瓶放到 28 ℃ 的培养箱中孵化 1 周后,使用红外气体分析仪测定密封烧瓶中 CO₂ 的浓度。采用电位法测定土壤 pH,采用硫酸—重铬酸钾氧化法测定有机碳含量,采用凯式定氮法测定全氮,采用钼锑抗比色法测定全磷^[13]。

1.4 数据处理

采用 SAS 8.0 对地上植物生物量和土壤理化性质进行方差分析,对土壤表层碳储量和土壤生态因子进行 Pearson 相关分析,使用 Excel 2010 和 Origin 9.2 软件绘制图表。

2 结果与分析

2.1 乔木层生物量和碳储量的变化

由表 3 可知,3 种间伐强度下总的乔木生物量均高于对照,轻度、中度和强度间伐分别比对照高 50.98%,45.35%,4.14%,其中,轻度和中度间伐与对照之间的差异达到显著水平($p < 0.05$)。与总的乔木生物量一样,树干、树枝和树根生物量也表现出相同的规律。从叶生物量来看,中度和强度间伐较对照分别显著减少了 15.45% 和 47.12%。

表 3 不同间伐强度下乔木层的生物量

部位	单位:t/hm ²			
	对照	轻度	中度	强度
树干	105.60±6.21b	166.82±7.87a	163.97±5.84a	119.22±5.01b
树枝	37.18±2.12b	55.44±2.43a	52.79±1.71a	37.46±1.59b
树叶	14.24±0.73a	15.24±0.40a	12.04±0.37b	7.53±0.35c
树根	45.85±2.65b	68.80±3.21a	66.07±2.17a	47.05±2.00b
总计	202.87±11.68b	306.30±13.84a	294.88±9.85a	211.26±8.91b

由图 1 可知,轻度和中度间伐总的乔木碳储量

(159.28, 153.25 t/hm²) 均显著高于对照(109.77 t/hm²),其中以树干的增量最为明显,但是强度间伐与对照间并无显著差异。不同处理下油松树干碳储量所

占比例最高(52.05%~56.43%),是整个乔木层最重要的固碳部分,树根和树枝次之(22.27%~22.60%和 17.73%~18.32%),树叶最低(3.56%~7.01%)。

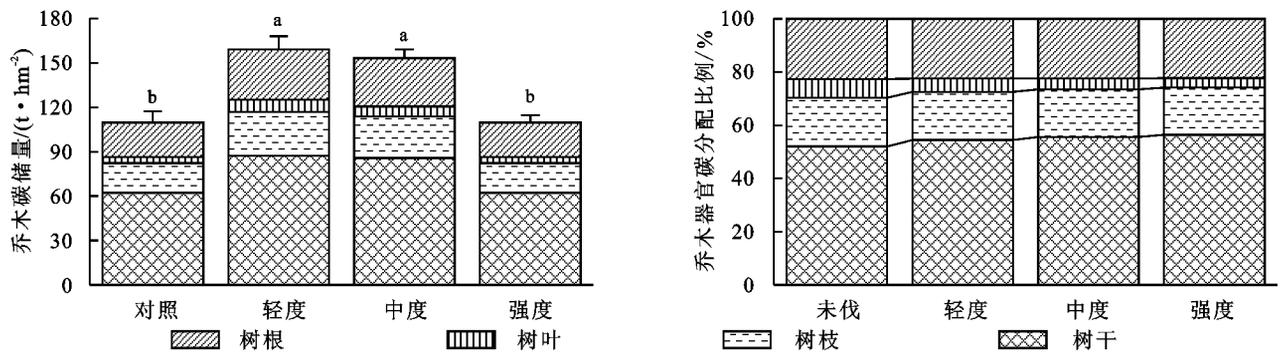


图 1 不同间伐强度下油松人工林乔木碳储量及其分配

2.2 灌草层和森林地面的生物量和碳储量的变化

与对照相比,中度和强度间伐显著提高了灌木生物量,相应的,灌木碳储量也有明显增加,其储量分别是对照的 13.5、14.5 倍,相反,中度和强度间伐下草本生物量比对照显著降低了 40.49%和 40.17%(表 4)。间伐对灌草根系碳储量无明显影响,但是中度和强度间伐下总的灌草碳储量比对照高 24.27%和 25.24%。叶凋

落物的生物量和碳储量随间伐强度增加而减少,其中,中度和强度间伐下叶凋落物生物量只有对照的 65.66%和 48.15%(表 4)。另外,强度间伐下粗木质残体的生物量(0.45 t/hm²)显著低于其他处理,因为该种间伐强度下枯倒木和断枝(直径≥10 cm)极少出现。从整体上看,植物残体的碳储量随间伐强度增加而逐渐减少,中度和强度间伐下的碳储量分别比对照低 33.38%和 51.80%。

表 4 不同间伐强度下林下灌草和森林地面的生物量和碳储量

指标	含碳量/ %	对照		轻度		中度		强度	
		生物量/ (t·hm ⁻²)	碳储量/ (t·hm ⁻²)						
灌木	46.22	0.10±0.02b	0.04	0.10±0.02b	0.05	1.17±0.10a	0.54	1.25±0.09a	0.58
草本	39.26	1.63±0.10a	0.64	1.74±0.12a	0.68	0.97±0.07b	0.38	0.91±0.07b	0.36
根系	42.99	0.81±0.15a	0.35	0.81±0.09a	0.35	0.84±0.16a	0.36	0.82±0.14a	0.35
总计		2.54	1.03	2.65	1.08	2.98	1.28	2.98	1.29
森林地面叶凋落物	46.37	14.62±0.62a	6.78	12.37±0.24b	5.73	9.60±0.17c	4.45	7.04±0.14d	3.26
森林地面粗木质残体	50.00	0.89±0.11a	0.44	1.08±0.17a	0.54	0.71±0.14ab	0.36	0.45±0.08c	0.22
总计		15.51	7.22	13.45	6.27	10.31	4.81	7.49	3.48

注:表中生物量数据为平均值±为标准误差。

2.3 土壤碳储量的变化

有机碳储量随土壤深度增加而逐渐减少,间伐主要影响的是土壤表层的有机碳储量。4 种密度的林分中,只有中度和强度间伐显著降低了 0—20 cm 土层的有机碳储量,同对照相比,其储量分别减少 17.68%和 33.76%,而在 20—60 cm 土层中不同处理间的碳储量无显著差异。在 0—60 cm 土层中,中度和强度间伐其碳储量较对照分别减少了 10.17%和 21.68%,但是轻度间伐和对照间其碳储量比较接近(50.96,51.23 t/hm²)(表 5)。

2.4 油松人工林生态系统碳储量的变化

由图 2 可知,4 种保留密度(由高到低)的油松人工林生态系统碳储量分别为 169.26,217.57,205.37,154.66 t/hm²,其中,轻度和中度间伐碳储量较对照显著提高了 28.54%和 21.33%,但是强度间伐与对照无显

著差异($p>0.05$)。整个系统中,不同处理下油松乔木碳储量所占比例最高(64.85%~74.62%),即乔木对森林碳储量贡献值最大,轻度和中度间伐乔木层碳储量分配比例明显高于对照和强度间伐,相比之下,土壤碳储量是森林碳系统的第 2 重要组分(22.41%~30.27%),强度间伐和对照下的土壤碳储量分配比例高于轻度和中度间伐,森林地面植物残体和灌草碳储量所占比例最低(2.25%~4.27%,0.50%~0.83%)。

表 5 不同间伐强度下土壤碳储量

土层深度/cm	对照	轻度	中度	强度
0—20	34.38±2.40Aa	33.67±2.09Aa	28.30±1.20Ab	22.77±2.04Ac
20—40	10.25±0.64Ba	10.60±0.95Ba	10.79±1.31Ba	10.73±1.09Ba
40—60	6.61±0.22Ca	6.67±0.48Ca	6.94±0.11Ca	6.62±0.74Ca
总计	51.23±2.53a	50.96±1.88a	46.02±1.01b	40.12±2.10c

注:同列不同大写字母表示同一处理下不同土层间差异显著;同行不同小写字母表示同一土层不同处理间差异显著($p<0.05$)。

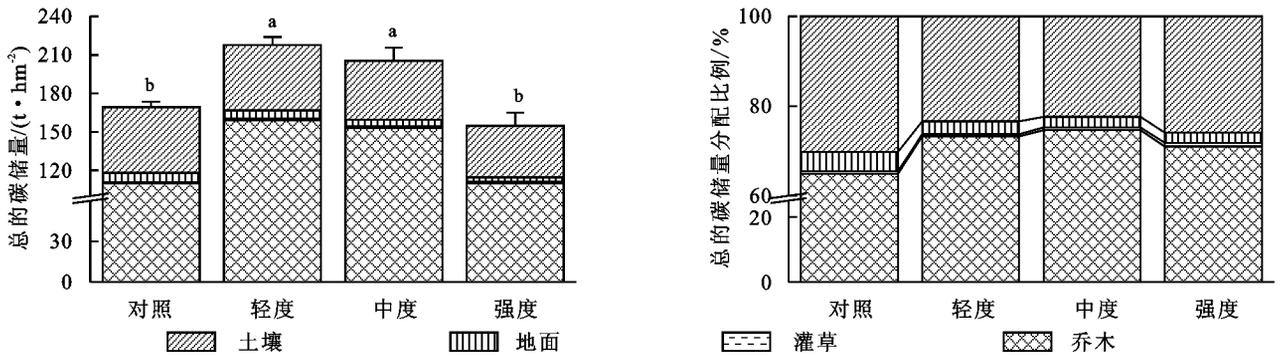


图 2 不同间伐强度下油松人工林生态系统碳储量及其分配

2.5 油松人工林土壤基础呼吸的变化

由图 3 可知,3 种间伐强度下土壤基础呼吸均高于对照,且中度和强度间伐与对照之间差异显著,分别比对照高 38.60% 和 69.85%。

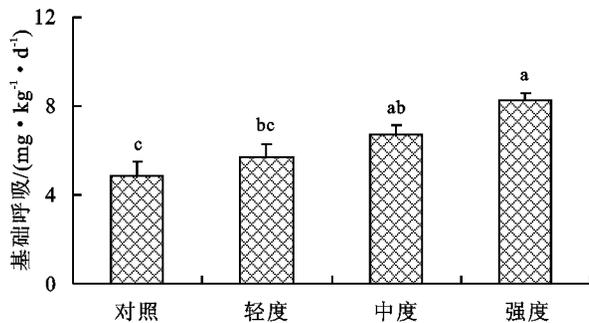


图 3 不同间伐强度下油松人工林土壤表层基础呼吸

2.6 森林土壤表层有机碳与环境因子间的关系

Pearson 相关分析表明,油松人工林土壤表层碳储量与灌木多样性、草本多样性、含水量、全磷和基础呼吸呈显著负相关,相关系数分别为 -0.775^{**} , -0.887^{**} , -0.691^{**} , -0.894^{**} , -0.625^{**} , 与叶凋落物生物量和碳氮比显著正相关,相关系数分别为 0.862^{**} , 0.926^{**} , 而与全氮相关性不显著。

3 讨论

3.1 间伐对乔木层人工林碳储量的影响

本研究中,随着间伐恢复时间的增加,轻度和中度间伐下乔木碳储量显著高于对照,强度间伐与对照相当,表明中度和强度间伐有利于乔木层碳储量的积累,而强度间伐下其储量可恢复到未伐之前水平。在短期的间伐试验中,贵州间伐 3 年后^[6]和广西间伐 8 年后^[7]的杉木人工林,其乔木碳储量均随间伐强度增加而逐渐减少,然而,在一个间伐 17 年后马尾松人工林,3 种间伐强度下乔木碳储量均高于对照,且轻度和中度间伐增加最为明显^[14]。类似的,在一个美国黄松林的间伐研究表明,间伐 25 年后,轻度和中度间伐显著增加地上生物量,强度间伐下略低于对照^[15]。显然,间伐后短期内林分碳储量很难超过未伐林地,但长期间伐有助于乔木层碳储量的恢复和累积。然

而,一个间伐 22 年后的杉木人工林研究^[16]表明,所有间伐强度下乔木碳储量均低于对照,这可能是由于林分本身初植密度不高,间伐虽有利单株乔木碳储量增加,但不利于整个乔木层固碳。孙志虎等^[17]研究表明,落叶松人工林经 2~4 次低强度间伐,40 年后其乔木碳储量和对照相近。以上也说明了乔木层碳储量变化不仅与间伐强度和恢复时间有关,还与树种、初植密度和间伐频度等因素有关。另外,本研究中,各处理下乔木层碳储量占人工林总碳储量的 64.85%~74.62%,是油松人工林主要碳库,其储量为 109.68~159.28 t/hm²,明显高于中国森林植被平均碳储量(57.07 t/hm²)^[18],也高于浙江天童山枫香—马尾松群落和黄毛耳草—毛竹群落碳储量(103.19, 40.76 t/hm²)^[19]。

3.2 间伐对灌草层和森林地面碳储量的影响

间伐能够调整林分结构,改善林下微环境,增加林下植物的多样性和生物量^[15,20]。尽管本研究中灌草碳储量只占森林总碳储量的 0.50%~0.83%,但是中度和强度间伐能显著提高林下灌草碳储量,在更长的时间尺度上,林下灌草的补偿作用不容忽视。Campbell 等^[21]研究表明,间伐 16 年后的美国黄松人工林林下灌草在一定程度上补偿了地上部分的损失。凋落物碳储量随间伐强度的增加而减少,强度间伐下叶凋落物碳储量最少,只有对照的 48.15%。这与现有的一些研究结论一致。Nilsen 等^[22]研究表明,间伐 33 年后的挪威云杉地表凋落物较对照有显著降低。成向荣等^[5]和明安刚等^[14]研究表明,人工林叶凋落物碳储量随间伐强度增加而减少。间伐会减少叶凋落物碳储量原因有:首先,本试验间伐的是整株干扰树,没有进行凋落物返还;其次,中度和强度间伐显著降低林分密度的同时,乔木层的叶生物量也相应减少,最终导致凋落物的输入减少;最后,间伐开辟了冠层,林下阔叶乔灌木的定殖和更新改变了凋落物质量,加速了凋落物的分解。另外,本研究发现,强度间伐显著降低了粗木质残体碳储量,主要是强度间伐极大缓解了林木资源竞争压力,使得该林分没有出现枯

倒木,且大径级断枝也较少出现。

3.3 间伐对土壤碳储量的影响

土壤是油松人工林第二大碳库,对照、轻度、中度和强度间伐下碳储量占人工林总碳储量的 22.41%~30.47%,其具体碳储量分别为 51.24, 50.94, 46.03, 40.12 t/hm²,远低于全国森林土壤平均碳储量(193.55 t/hm²)^[18],还低于同地区辽东栎林碳储量(114.3 t/hm²)^[23],这也暗示人工林土壤有极大的固碳潜力。与对照相比,中度和强度间伐下土壤碳储量分别降低了 10.17%和 21.68%。已有研究^[14,20]表明,长期间伐会减少土壤碳储量,短期间伐研究发现间伐对土壤碳储量无显著影响^[5,7]。本研究中,中度和强度间伐增加了土壤表层基础呼吸,分别比对照高 38.60%和 69.85%,而土壤有机碳与环境因子相关分析表明,土壤有机碳与基础呼吸显著负相关,说明中度和强度间伐在增加基础呼吸的同时,也加速了土壤有机质的消耗。另外,土壤有机碳还与植物多样性显著负相关,这可能是因为中度和强度间伐在增加植物多样性同时,叶凋落物和根系分泌物异质性也在增加,进而改变土壤有机质的质量,最终改变了土壤碳储量。Chen 等^[24]研究表明,强度间伐会增加针叶林土壤中易氧化有机碳(EOC)的含量,相应的,土壤惰性有机碳的含量减少,微生物易利用性资源增加。土壤碳氮比影响着微生物群落的组成,碳氮比越低,越有利于细菌群落的繁殖,进而加速有机质的分解,这也是中度和强度间伐下土壤表层碳储量降低了一个主要原因。

3.4 间伐对油松人工林生态系统总碳储量的影响

不同保留密度的油松人工林碳储量为 154.66~217.57 t/hm²,稍低于同地区柴松林和辽东栎林碳储量(238.22, 235.75 t/hm²)^[23],远低于降水充足的广西成熟软阔林碳储量(421.98 t/hm²)^[25]。轻度和中度间伐下人工林总碳储量比对照高 28.54%和 21.33%,有利于人工林生态系统固碳。轻度和中度间伐人工林乔木层碳储量的显著增加是其总碳储量增加的主要原因,强度间伐下人工林土壤碳储量的减少是其总碳储量减少的主要原因。徐金良等^[16]研究表明,中度和强度间伐对杉木人工林土壤碳储量无显著影响,但显著降低乔木层碳储量,进而降低森林碳储量。也有研究^[6]表明,短期间伐虽然能显著增加土壤碳储量,但是乔木层碳储量的降低最终导致森林碳储量减少。总体上,乔木层碳储量变化对森林碳储量变化起关键作用,但是当间伐强度、恢复时间、树种和立地条件等因素不同时,研究结果不完全相同。

4 结论

轻度间伐下油松人工林生态系统碳储量最高(217.57 t/hm²),是人工林固碳的最佳间伐强度,中度间伐次之(205.37 t/hm²),这 2 种间伐强度下乔木层碳储量贡献最大,分别占总碳储量的 73.21%和 74.62%。强度间伐不利于人工林的碳固存,虽然强度间伐下乔木层碳储量(109.68 t/hm²)与对照(109.77 t/hm²)相当,但是其土壤碳储量比对照少 21.68%。中度和强度间伐减少了叶凋落物的输入,改变了林下植被组成,降低了土壤碳氮比,增加了土壤基础呼吸,最终减少了土壤碳储量。

参考文献:

- [1] Six J, Callewaert P, Lenders S, et al. Measuring and understanding carbon storage in afforested soils by physical fractionation [J]. Soil Science Society of America Journal, 2002, 66(6): 1981-1987.
- [2] Keenan R J, Reams G A, Achard F, et al. Dynamics of global forest area: Results from the FAO Global Forest Resources Assessment 2015 [J]. Forest Ecology and Management, 2015, 352: 9-20.
- [3] Seedre M, Shrestha B M, Chen Y H, et al. Carbon dynamics of North American boreal forest after stand replacing wildfire and clearcut logging [J]. Journal of Forest Research, 2011, 16(3): 168-183.
- [4] 吴建强, 王懿祥, 杨一, 等. 干扰树间伐对杉木人工林林分生长和林分结构的影响[J]. 应用生态学报, 2015, 26(2): 340-348.
- [5] 成向荣, 虞木奎, 葛乐, 等. 不同间伐强度下麻栎人工林碳密度及其空间分布[J]. 应用生态学报, 2012, 23(5): 1175-1180.
- [6] 丁波, 丁贵杰, 李先周, 等. 短期间伐对杉木人工林生态系统碳储量的影响[J]. 中南林业科技大学学报, 2016, 36(8): 66-71.
- [7] 黄雪蔓, 尤业明, 蓝嘉川, 等. 不同间伐强度对杉木人工林碳储量及其分配的影响[J]. 生态学报, 2016, 36(1): 156-163.
- [8] Bartels S F, Chen Y H, Wulder M A, et al. Trends in post-disturbance recovery rates of Canada's forests following wildfire and harvest [J]. Forest Ecology and Management, 2016, 361: 194-207.
- [9] 马钦彦. 中国油松生物量的研究[J]. 北京林业大学学报, 1989, 11(4): 1-10.
- [10] Wagner C E. The line intersect method in forest fuel sampling [J]. Forest Science, 1968, 1(14): 20-26.
- [11] 孟蕾, 程积民, 杨晓梅, 等. 黄土高原子午岭人工油松林碳储量与碳密度研究[J]. 水土保持通报, 2010, 30(2):

- 133-137.
- [12] Hueso S, Hernandez T, Garcia C. Resistance and resilience of the soil microbial biomass to severe drought in semiarid soils: The importance of organic amendments [J]. *Applied Soil Ecology*, 2011, 50: 27-36.
- [13] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000: 22-166.
- [14] 明安刚, 张治军, 湛红辉, 等. 抚育间伐对马尾松人工林生物量与碳贮量的影响[J]. *林业科学*, 2013, 49(10): 1-6.
- [15] Sullivan T P, Sullivan D S. Acceleration of old-growth structural attributes in lodgepole pine forest: Tree growth and stand structure 25 years after thinning [J]. *Forest Ecology and Management*, 2016, 365: 96-106.
- [16] 徐金良, 毛玉明, 成向荣, 等. 间伐对杉木人工林碳储量的长期影响[J]. *应用生态学报*, 2014, 25(7): 1898-1904.
- [17] 孙志虎, 王秀琴, 陈祥伟. 不同抚育间伐强度对落叶松人工林生态系统碳储量影响[J]. *北京林业大学学报*, 2016, 38(12): 1-13.
- [18] 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.
- [19] 郭纯子, 吴洋洋, 倪健. 天童国家森林公园植被碳储量估算[J]. *应用生态学报*, 2014, 25(11): 3099-3109.
- [20] Nave L E, Vance E D, Swanston C W, et al. Harvest impacts on soil carbon storage in temperate forests [J]. *Forest Ecology and Management*, 2010, 259(5): 857-866.
- [21] Campbell J, Alberti G, Martin J, et al. Carbon dynamics of a ponderosa pine plantation following a thinning treatment in the northern Sierra Nevada [J]. *Forest Ecology and Management*, 2009, 257(2): 453-463.
- [22] Nilsen P, Strand L T. Thinning intensity effects on carbon and nitrogen stores and fluxes in a Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) stand after 33 years [J]. *Forest Ecology and Management*, 2008, 256(3): 201-208.
- [23] 杨晓梅, 程积民, 孟蕾, 等. 黄土高原子午岭森林碳储量与碳密度研究[J]. *水土保持学报*, 2010, 24(6): 123-126.
- [24] Chen X L, Han Y H, Chen X, et al. Soil labile organic carbon and carbon-cycle enzyme activities under different thinning intensities in Chinese fir plantations [J]. *Applied Soil Ecology*, 2016, 107: 162-169.
- [25] 陈莉, 宋敏, 宋同清, 等. 广西不同林龄软阔林碳储量及其分配格局[J]. *生态学杂志*, 2017, 36(3): 592-600.
- (上接第 189 页)
- [6] 成艳红, 武琳, 孙慧娟, 等. 稻草覆盖和香根草篱对红壤水稳性团聚体组成及有机碳含量的影响[J]. *生态学报*, 2016, 36(12): 3518-3524.
- [7] Tyler S W, Wheatcraft S W. Fractal scaling of soil particle-size distributions: Analysis and limitations [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1992, 56(2): 362-369.
- [8] 李娟, 廖洪凯, 龙健, 等. 喀斯特山区土地利用对土壤团聚体有机碳和活性有机碳特征的影响[J]. *生态学报*, 2013, 33(7): 2147-2156.
- [9] 杨培岭, 罗远培, 石元春. 用粒径的重量分布表征的土壤分形特征[J]. *科学通报*, 1993, 38(20): 1896-1899.
- [10] 井大炜, 王明友, 张红, 等. 鸡粪对芸豆土壤有机碳氧化稳定性与碳库管理指数的影响[J]. *农业机械学报*, 2016, 47(8): 192-200.
- [11] Huang R, Lan M L, Liu J, et al. Soil aggregate and organic carbon distribution at dry land soil and paddy soil: The role of different straws returning [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, 24(36): 27942-27952.
- [12] 李江涛, 钟晓兰, 赵其国. 施用畜禽粪便和化肥对土壤活性有机碳库和团聚体稳定性影响[J]. *水土保持学报*, 2010, 24(1): 233-238.
- [13] 杨滨娟, 黄国勤, 兰延, 等. 施氮和冬种绿肥对土壤活性有机碳及碳库管理指数的影响[J]. *应用生态学报*, 2014, 25(10): 2907-2913.
- [14] 张贵龙, 赵建宁, 宋晓龙, 等. 施肥对土壤有机碳含量及碳库管理指数的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2012, 18(2): 359-365.
- [15] 樊红柱, 张建辉, 王勇, 等. 川北山区坡耕地侵蚀耕作对土壤团聚体碳的影响[J]. *农业机械学报*, 2015, 46(11): 157-164.
- [16] 蔡苗, 孟延, Mohammad A A, 等. 长期不同施肥对玉米根茬生物量及养分累积量的影响[J]. *应用生态学报*, 2015, 26(8): 2387-2396.
- [17] 杨金玲, 李德成, 张甘霖, 等. 土壤颗粒粒径分布质量分形维数和体积分形维数的对比[J]. *土壤学报*, 2008, 45(3): 413-419.
- [18] 马帅, 赵世伟, 李婷, 等. 子午岭林区植被自然恢复下土壤剖面团聚体特征研究[J]. *水土保持学报*, 2011, 25(2): 157-161.
- [19] 何翠翠, 王立刚, 王迎春, 等. 长期施肥下黑土活性有机质和碳库管理指数研究[J]. *土壤学报*, 2015, 52(1): 194-202.