

网络出版时间:2016-09-07 09:02 DOI:10.13207/j.cnki.jnwafu.2016.10.011
网络出版地址:http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20160907.0902.022.html

抚育间伐对秦岭南坡锐齿栎天然次生林碳密度的影响

武朋辉,党坤良,常 伟,李明雨

(西北农林科技大学 林学院,陕西 杨凌 712100)

【摘 要】 【目的】探索森林抚育间伐强度对秦岭南坡锐齿栎天然次生林不同碳库的影响,为秦岭林区锐齿栎林合理抚育间伐提供参考。【方法】在陕西省宁东林业局沙沟林场,按照不同坡向(阴坡和阳坡)和抚育间伐强度设置锐齿栎天然次生林标准地 24 块,间伐强度分别为林分蓄积量的 5%,15%和 25%,并设置不间伐的对照样地。通过样地调查,研究不同强度间伐 3 年后锐齿栎天然次生林植被层、枯落物层以及土壤层有机碳密度的变化规律。【结果】5%间伐对阳坡和阴坡乔木层碳密度均无显著影响,而阳坡 15%,25%间伐的林分乔木层碳密度分别比对照低 10.53%和 21.00%,阴坡分别低 14.91%和 23.39%;阳坡 5%,15%间伐的林分乔木层有机碳密度增加量分别比对照高 19.03%和 21.19%,而 25%间伐的林分与对照无显著差异;阴坡 5%间伐的林分乔木层有机碳密度增加量比对照高 16.76%,而 15%和 25%间伐的林分均与对照无显著差异;阳坡、阴坡林下灌木和草本植物碳密度均随抚育间伐强度的增加而增大;不同抚育间伐强度对枯落物层和土壤层有机碳密度均没有显著影响;5%间伐对 2 个坡向的锐齿栎次生林总有机碳密度均无显著影响,15%,25%间伐分别使阳坡林分总有机碳密度降低 7.10%和 13.64%,使阴坡林分总有机碳密度降低 8.84%和 13.66%。【结论】抚育间伐在一定程度上降低了秦岭南坡锐齿栎天然次生林的碳储量,然而合理的抚育间伐强度能够提高其乔木层单位面积碳吸存量;秦岭南坡锐齿栎天然次生林在阳坡采取 15%间伐强度、阴坡采取 5%间伐强度短期内有利于提高林分的固碳能力。

【关键词】 间伐强度;锐齿栎;天然次生林;碳密度

【中图分类号】 S753.7⁺5;S792.189.02 【文献标志码】 A 【文章编号】 1671-9387(2016)10-0075-08

Effects of forest thinning on carbon density of *Quercus aliena* var. *acuteserrata* natural secondary forest on southern slope of Qinling Mountains

WU Penghui,DANG Kunliang,CHANG Wei,LI Mingyu

(College of Forestry,Northwest A&F University,Yangling,Shaanxi 712100,China)

Abstract: 【Objective】 Effects of forest thinning on carbon density of *Quercus aliena* var. *acuteserrata* natural secondary forest were analyzed to provide reference for optimal thinning in Qinling Mountains. 【Method】 The carbon density of different pools (tree,soil,underground vegetation and litter) of *Q. aliena* var. *acuteserrata* natural secondary forest on southern slope of Qinling Mountains was investigated with 24 experimental plots. The thinning intensities were 0% (control),5%,15%,and 25%. After 3 years of thinning,the carbon densities in vegetation layer,litter layer and soil layer were investigated. 【Result】 The 5% thinning had no significant effect on tree carbon density on both sunny and shady slopes,15% and 25% thinning decreased the tree carbon density by 10.53% and 21.00% on sunny slope,and by 14.91% and

【收稿日期】 2015-03-19

【基金项目】 林业公益性行业科研专项“秦岭天然次生公益林抚育经营关键技术研究”(201204502)

【作者简介】 武朋辉(1990—),陕西西安人,在读硕士,主要从事森林生态学和森林抚育经营技术研究。E-mail:ttwph@163.com

【通信作者】 党坤良(1960—),陕西蒲城人,副教授,硕士生导师,主要从事森林生态学和森林抚育经营技术研究。
E-mail:Dangkl@126.com

23.39% on shady slope. The increases of organic carbon density of tree layer in 5% and 15% thinning stands were 19.03% and 21.19% higher than that of control on sunny slope. The 25% thinning treatment had no difference compared to control while 5% thinning stand had 16.76% higher increase compared to that of control on shady slope. The carbon density of underground vegetation increased with the increase of thinning intensity on both sunny and shady slopes. Thinning intensity had no significant effect on soil and litter carbon density. The 5% thinning had insignificant effects on total carbon density of ecosystem on both sunny and shady slopes. In 15% and 25% thinning plots, total carbon densities of ecosystem were decreased by 7.10% and 13.64% on sunny slope and 8.84% and 13.66% on shady slope. 【Conclusion】 Thinning decreased the carbon density of *Q. aliena* var. *acuteserrata* natural secondary forests on southern slope of Qinling Mountains. Carbon sequestration in tree layer might be increased by suitable thinning intensity. The suggested thinning intensity was 15% (in volume) on sunny slope and 5% on shady slope.

Key words: thinning intensity; *Quercus aliena* var. *acuteserrata*; natural secondary forest; carbon density

抚育间伐通过调整林分密度、优化林木的生长环境和营养空间来促进林木生长,是森林经营的重要措施^[1]。森林碳库是陆地生态系统碳库的主体,在吸收和固定 CO₂、应对全球气候变化中发挥着重要作用^[2]。前人就抚育间伐对森林生态系统植被和土壤 2 个碳库的影响已有一些研究,成向荣等^[3]、Horner 等^[4]、游伟斌等^[5]的研究结果均显示,合理的抚育间伐强度能够增加乔木层碳密度;徐金良等^[6]、Nilsen 等^[7]的研究结果则显示,抚育间伐在不同程度上降低了乔木层的碳储量;一些研究表明抚育间伐后森林土壤碳密度不同程度降低^[8-10],也有研究表明抚育间伐对土壤碳密度没有产生显著影响^[2-3,6,11]或在一定程度上有所增加^[12]。这些不同甚至相反的结论可能是研究的立地条件、林分类型、抚育间伐强度、起始期和间伐后持续时间各异所致。以往的研究对象多集中在杉木、马尾松、落叶松等人工林类型中,而关于抚育间伐对天然次生林影响的研究则较少。中幼龄天然次生林是中国森林的主体,在结构组成、林木生长、生产力、林分环境等方面与原始林和人工林显著不同^[13]。研究抚育间伐对天然次生林碳库的影响有利于其碳库管理水平的提高。

20 世纪 50—80 年代采伐后恢复的中幼龄锐齿栎天然次生林是秦岭林区的主要森林类型之一,其分布面积约占该林区的 40%,在该地区发挥着非常重要的生态作用^[14]。由于缺乏必要的经营管理措施,秦岭锐齿栎次生林普遍存在密度过大、丛生等现象,其生产力低下,碳汇功能难以得到充分发挥。目前针对秦岭锐齿栎林群落类型^[14]、生产力^[15]以及碳密度^[16]等方面已有研究,而抚育间伐等森林经营活动对其碳汇能力的影响则未见报道。本研究以秦岭南坡锐齿栎天然次生林为对象,研究了阳坡和阴坡

锐齿栎天然次生林植被层、枯落物层及土壤层碳库对抚育间伐强度的响应,以期为秦岭林区锐齿栎天然次生林碳库管理及科学经营提供参考。

1 研究区概况

试验样地设置在秦岭南坡宁陕县境内的陕西省宁东林业局沙沟林场。地理位置 108°33′~108°48′E,33°43′~34°47′N。年平均气温 6~10℃,海拔 964~2 362 m,年降水量 920~1 230 mm。该地区森林植被在 20 世纪 50—80 年代遭到过度砍伐,90 年代基本恢复,形成大面积天然次生林。常见森林群落类型有锐齿栎林、阔叶混交林、松栎混交林、油松林、华山松林等。主要成林树种有锐齿栎(*Q. aliena* var. *acuteserrata*)、油松(*Pinus tabulaeformis*)、华山松(*Pinus armandii*)等,主要伴生树种有漆树(*Toxicodendron verniciifluum*)、青榨槭(*Acer davidii*)、灯台树(*Bothrocaryum controversum*)等。其土壤主要为山地棕色森林土,土层厚约 50 cm。

研究样地设在林龄 35 年左右的锐齿栎天然次生林中,树种组成为锐齿栎 64.8%~84.0%,漆树 9%~18%,灯台树 11%~16%,青榨槭、华榎(*Tilia chinensis*)、灰榆(*Ulmus glaucescens*)等阔叶树种 2%~13%(以蓄积量计),阳坡样地中散生有个别油松和华山松。主要灌木为悬钩子类及白檀(*Symplocos paniculata*)、菝葜(*Smilax china*)等,主要草本植物为白茅(*Imperata cylindrica*)、蛇梅(*Duchesnea indica*)、茜草(*Rubia cordifolia*)等。

2 研究方法

2.1 研究样地的布设与调查

2011 年 9 月分别在阳坡和阴坡选择生长状况

基本相似的锐齿栎林,在坡面中部按照不同的抚育间伐强度设置面积为 20 m×20 m 的研究样地共 24 块,间伐强度分别为林分蓄积量的 5%(T5)、15%(T15)和 25%(T25),并设置不间伐的对照样地(CK),不同处理在 2 个坡向各重复 3 次。间伐样地采用下层抚育的方法进行抚育间伐处理,优先伐除林分平均胸径以下长势较差及干形不良的林木个

体,间伐木就地打枝,树干移出林地,剩余物均匀铺于林地表层。利用 GPS 确定每个样地的位置,记录每块样地的海拔、坡度、坡位、坡向等立地因子。调查林分郁闭度,进行每木检尺,分别记录每个样地内每株乔木(胸径>4 cm)的树种、树高、胸径和冠幅,并对其进行编号和标记。2014 年 9 月份对研究样地进行复测。研究样地概况见表 1。

表 1 秦岭南坡锐齿栎天然次生林研究样地概况
Table 1 General information of plots in *Quercus aliena* var. *acuteserrata* natural secondary forest on southern slope of Qinling Mountains

间伐强度/% Thinning intensity	坡向 Slope aspect	海拔/m Elevation	坡度/(°) Slope gradient	平均胸径/cm Breast diameter	平均树高/m Tree height	胸高断面面积/ (m ² ·hm ⁻²) Basal area at breast height
0 (CK)	阳坡 Sunny slope	1 456~1 580	15~25	13.8±1.6	16.2±0.8	23.8±2.2
	阴坡 Shady slope	1 445~1 550	13~20	14.5±2.0	16.4±0.8	22.5±2.4
5	阳坡 Sunny slope	1 472~1 620	15~26	13.1±1.6	15.9±0.6	23.6±2.9
	阴坡 Shady slope	1 426~1 530	15~20	13.7±1.6	16.1±0.7	22.1±2.5
15	阳坡 Sunny slope	1 456~1 570	17~24	13.7±1.7	16.2±0.3	24.0±3.9
	阴坡 Shady slope	1 476~1 560	14~22	14.6±1.5	16.6±0.2	23.8±3.2
25	阳坡 Sunny slope	1 436~1 502	14~25	14.3±1.2	16.4±0.5	23.1±4.1
	阴坡 Shady slope	1 456~1 520	13~18	13.9±1.1	16.3±0.5	25.6±2.8

2.2 乔木、林下植被及枯落物碳密度测算

2014 年 9 月在每个研究样地内选取 2 株平均标准木,分别采集叶、皮、枝、干(去皮)和根各 1 000 g 左右记录其质量,带回实验室在 85 ℃下烘至恒质量,测定各器官的含水率。利用研究区已有的锐齿栎生物量估算模型^[15],根据样地调查数据分别估算出 2011 年和 2014 年锐齿栎林乔木各器官生物量。样地内所有乔木个体生物量相加即为样地乔木生物量。在每个样地沿对角线布设灌木(2 m×2 m)、草本(1 m×1 m)和枯落物(1 m×1 m)调查样方各 3 个。采用收获法将每个样方内灌木和草本连根挖出,枯落物全部收集。分别称量每个样方内灌木叶、枝干和根,草本地上和地下部分鲜质量,以及枯落物鲜质量。分别取样,带回实验室在 85 ℃下烘至恒质量,测定其含水率。根据样方均值估算每个样地灌木和草本单位面积生物量及枯落物量。将烘干的植物和枯落物样品粉碎,过 0.074 mm (200 目)筛,用德国 ELEMENTAR 公司 LIQUIC TOC II 总有机碳分析仪测定各部分含碳率。各部分单位面积生物量乘以含碳率即为其碳密度。

2.3 乔木层有机碳密度增加量的计算

为了研究抚育间伐强度对不同坡向锐齿栎次生林乔木碳吸存的影响,本研究以抚育间伐后乔木层碳密度的增加量估算乔木层有机碳积累量,它可以反映抚育间伐后短期内乔木层吸收和固定 CO₂ 能

力的大小。不同间伐处理的样地乔木层有机碳密度增加量为其 2014 年复测时的碳密度与 2011 年间伐后碳密度的差值,计算公式如下:

$$I=D_{2014}-D_{2011}。$$
 (1)

式中:*I* 为乔木层有机碳密度增加量(t/hm²),*D*₂₀₁₄ 为 2014 年乔木层碳密度(t/hm²),*D*₂₀₁₁ 为 2011 年伐后乔木层碳密度(t/hm²)。

2.4 土壤有机碳密度测定

在每个调查样地内沿对角线挖取 3 个土壤剖面,按照 0~15,15~30 和 30~45 cm 分层,在每层中间取样,将同一样地相同土层的 3 个土样混合。同时用环刀法分别测定各土层土壤体积质量,挑出其中的植物根和粒径大于 2 mm 的砾石,用排水法测定其体积含量。土样风干后磨碎,过 0.074 mm (200 目)筛,用德国 ELEMENTAR 公司 LIQUIC TOC II 总有机碳分析仪测定样品含碳率,土壤有机碳密度计算公式如下:

$$SOC D=\sum_{i=1}^n(\rho_i\times(1-\theta_i)\times c_i\times d_i\div 10)。$$
 (2)

式中:*SOC D* 为土壤有机碳密度(t/hm²),*n*=3,*ρ_i* 为第 *i* 层土壤平均体积质量(g/cm³),*θ_i* 为第 *i* 层粒径>2 mm 石砾含量(%),*c_i* 为第 *i* 层土壤含碳率(g/kg),*d_i* 为第 *i* 层土层厚度(cm)。

2.5 数据处理

数据统计分析采用 EXCEL 2003 和 SPSS 18.0 统计软件。用单因素方差分析(ANOVA)和 Dun-

can's 新复极差法判断不同间伐处理间锐齿栎林乔木层、林下植被层、枯落物层和土壤层碳密度的差异显著性,以 $P<0.05$ 表示差异显著。

3 结果与分析

3.1 抚育间伐对不同坡向锐齿栎天然次生林乔木层有机碳密度的影响

研究结果(图 1)表明,不同抚育间伐强度对阳

坡和阴坡锐齿栎天然次生林乔木层有机碳密度均影响显著,且均表现为 $CK>T5>T15>T25$ 。在 2 个坡向上,乔木层有机碳密度在 T5 样地与 CK 样地间均无显著差异,而 T15、T25 样地则显著低于 CK 和 T5 样地。阳坡 T15、T25 样地乔木层有机碳密度分别比 CK 低 10.53% 和 21.00%,阴坡 T15、T25 样地乔木层有机碳密度分别比 CK 低 14.91% 和 23.39%。

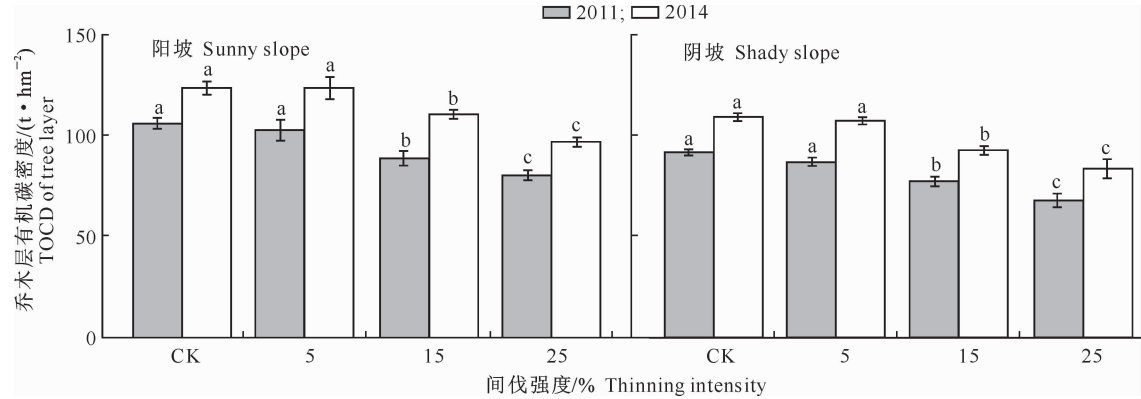


图 1 间伐强度对秦岭南坡锐齿栎天然次生林乔木层有机碳密度的影响

图柱上标不同小写字母表示在 $P<0.05$ 水平上差异显著。下图同

Fig. 1 Effect of thinning intensity on total organic carbon density (TOCD) of tree layer of *Quercus aliena* var. *acuteserrata* secondary forest on southern slope of Qinling Mountains
Different small letters mean significant difference ($P<0.05$). The same below

由图 2 可知,2 个坡向不同间伐强度的样地间伐 3 年后乔木层碳密度较刚间伐时均有不同程度增加,阳坡乔木层有机碳密度的增加量为 $T15(20.69 t/hm^2)>T5(20.32 t/hm^2)>T25(17.12 t/hm^2)>CK(17.07 t/hm^2)$,与 2011 年刚间伐时相比,CK、T5、T15、T25 样地分别增加了 16.19%,19.79%,23.13% 和 21.37%;T5 和 T15 样地乔木层有机碳密度增加量显著高于 CK,分别高出 CK 19.03% 和 21.19%,T25 样地略高于 CK,但差异不显著。阴坡乔木层有机碳密度增加量为 $T5(19.32 t/hm^2)>CK(16.54 t/hm^2)>T15(15.47 t/hm^2)>T25(14.64 t/hm^2)$,与 2011 年刚间伐后相比,CK、T5、T15 和 T25 分别增加了 18.03%,22.26%,20.18% 和 21.42%;T5 样地乔木层有机碳密度增加量显著高于 CK,高出 CK 16.76%,T15 和 T25 样地与 CK 相比则略有降低,分别比 CK 样地低 6.49% 和 11.54%,但彼此之间以及与 CK 之间差异均不显著。由图 2 还可以看出,阳坡不同抚育间伐强度的林分乔木层有机碳密度增加量均高于阴坡,这可能是因为在秦岭林区水分条件较好的情况下,阳坡较好的光照条件更有利于锐齿栎的生长和乔木层碳密度的积累。

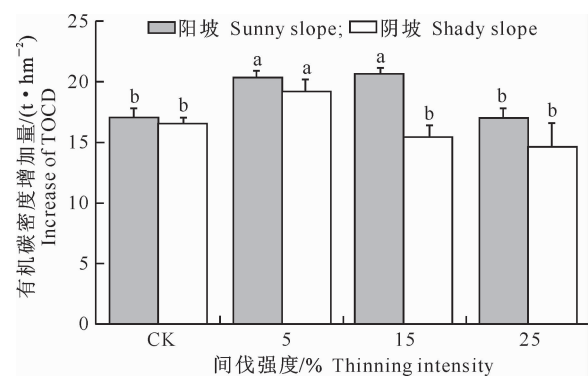


图 2 间伐强度对秦岭南坡锐齿栎天然次生林乔木层有机碳密度增加量的影响

Fig. 2 Effect of thinning intensity on increase of organic carbon density of tree layer of *Quercus aliena* var. *acuteserrata* secondary forest on southern slope of Qinling Mountains

3.2 抚育间伐对不同坡向锐齿栎天然次生林林下植被和枯落物碳密度的影响

林下植被和枯落物碳库在森林生态系统中所占的比例较小,然而由于其周转较快,是森林生态系统植被碳库向土壤碳库转移的重要途径,因此在生态系统碳循环中具有重要作用。由表 2 可知,不同坡

向灌木碳密度均随抚育间伐强度的增加而增大。2 个坡向 T15 和 T25 灌木碳密度均较 CK 显著增加, 阳坡分别比 CK 样地高出 72. 26% 和 125. 55%, 阴坡分别高出 60. 95% 和 66. 67%。草本碳密度在不同坡向也均随抚育间伐强度增加而增大。阳坡 T15 和 T25 草本碳密度较 CK 显著增加, 分别比 CK 高

出 51. 22% 和 90. 24%; 阴坡不同抚育间伐强度的样地草本碳密度均较 CK 显著增加, T5、T15、T25 分别比 CK 高出 54. 84%, 90. 32% 和 119. 35%。不同坡向枯落物碳密度均随抚育间伐强度的增加而减小, 但 2 个坡向各处理间差异均不显著。

表 2 间伐强度对秦岭南坡锐齿栎天然次生林林下植被和枯落物碳密度的影响

Table 2 Effect of thinning intensity on carbon density of underground vegetation and litter of <i>Quercus aliena</i> var. <i>acuteserrata</i> secondary forest on southern slope of Qinling Mountains									t/hm ²
坡向 Slope aspect	间伐强度/% Thinning intensity	灌木 Shrub			草本 Herb			枯落物 Litter	
		地上 Above ground	地下 Under ground	总计 Total	地上 Above ground	地下 Under ground	总计 Total		
阳坡 Sunny slope	0 (CK)	0. 82±0. 21 b	0. 55±0. 12 b	1. 37±0. 33 b	0. 15±0. 02 d	0. 26±0. 02 b	0. 41±0. 04 c	1. 26±0. 26 a	
	5	1. 11±0. 17 b	0. 80±0. 07 b	1. 91±0. 24 b	0. 21±0. 03 c	0. 31±0. 01 b	0. 51±0. 04 bc	1. 20±0. 24 a	
	15	1. 38±0. 17 a	0. 98±0. 09 a	2. 36±0. 26 a	0. 30±0. 03 b	0. 32±0. 03 b	0. 62±0. 06 b	1. 20±0. 15 a	
	25	1. 83±0. 27 a	1. 25±0. 17 a	3. 09±0. 44 a	0. 36±0. 03 a	0. 41±0. 03 a	0. 78±0. 08 a	1. 09±0. 13 a	
阴坡 Shady slope	0 (CK)	0. 63±0. 08 c	0. 43±0. 06 c	1. 05±0. 14 c	0. 11±0. 01 c	0. 20±0. 01 c	0. 31±0. 01 c	0. 84±0. 17 a	
	5	0. 72±0. 14 bc	0. 46±0. 08 b	1. 16±0. 19 bc	0. 18±0. 01 b	0. 30±0. 04 b	0. 48±0. 05 b	0. 87±0. 13 a	
	15	0. 98±0. 14 ab	0. 67±0. 10 b	1. 69±0. 17 b	0. 23±0. 01 a	0. 36±0. 01 a	0. 59±0. 02 a	0. 83±0. 13 a	
	25	1. 05±0. 21 a	0. 70±0. 13 a	1. 75±0. 34 a	0. 27±0. 04 a	0. 40±0. 03 a	0. 68±0. 07 a	0. 79±0. 15 a	

3. 3 抚育间伐对不同坡向锐齿栎天然次生林土壤有机碳密度的影响

由表 3 可以看出, 阳坡不同间伐强度的样地土壤有机碳密度均低于 CK, T5、T15、T25 分别比 CK 低 3. 17, 2. 29 和 3. 18 t/hm²; 阴坡 T5 处理的土壤有机碳密度比 CK 高 0. 50 t/hm², T15 和 T25 则分别比 CK 低 1. 20 和 1. 19 t/hm²。阳坡 0~15 cm 土层土壤有机碳密度在不同间伐强度的林分中相比于 CK 均有下降趋势, T5、T15、T25 分别比 CK 低 2. 09, 1. 23 和 1. 81 t/hm²; 阴坡 T5 处理 0~15 cm 土层土壤有机碳密度比 CK 高 0. 99 t/hm², 而 T15

和 T25 则分别比 CK 低 0. 97 和 0. 74 t/hm²。15~30 cm 土层土壤有机碳密度在阳坡和阴坡均有随抚育间伐强度增加而下降的趋势, 阳坡和阴坡不同间伐强度处理的样地分别较 CK 下降 0. 70~1. 49 和 0. 35~0. 73 t/hm²。30~45 cm 土层土壤有机碳密度在 2 个坡向随抚育间伐强度均无明显变化规律。方差分析结果表明, 在阳坡和阴坡不同抚育间伐强度的林分各土层碳密度和土壤剖面总碳密度均与 CK 之间无显著差异。可见抚育间伐强度在较短时期内对阳坡和阴坡锐齿栎林土壤有机碳密度不会产生实质性影响。

表 3 间伐强度对秦岭南坡锐齿栎天然次生林土壤有机碳密度的影响

Table 3 Effect of thinning intensity on carbon density of soil of <i>Quercus aliena</i> var. <i>acuteserrata</i> secondary forest on southern slope of Qinling Mountains						t/hm ²
坡向 Slope aspect	间伐强度/% Thinning intensity	土层/cm Soil layer			总计 Total	
		0~15	15~30	30~45		
阳坡 Sunny slope	0 (CK)	42. 73±3. 04	19. 57±3. 64	10. 51±1. 16	72. 81±4. 67	
	5	40. 64±2. 74	18. 87±3. 44	10. 13±1. 59	69. 64±2. 93	
	15	41. 50±2. 71	18. 23±1. 30	10. 78±0. 94	70. 52±2. 50	
	25	40. 92±2. 41	18. 08±3. 30	10. 64±1. 68	69. 63±3. 04	
阴坡 Shady slope	0 (CK)	46. 40±2. 76	19. 59±4. 69	10. 17±0. 92	76. 16±7. 27	
	5	47. 39±2. 64	19. 24±4. 86	10. 03±3. 02	76. 66±8. 13	
	15	45. 43±2. 04	19. 14±2. 76	10. 38±1. 69	74. 96±4. 18	
	25	45. 66±3. 26	18. 86±4. 45	10. 45±2. 49	74. 97±2. 88	

3. 4 抚育间伐对不同坡向锐齿栎天然次生林总有机碳密度的影响

阳坡和阴坡不同间伐强度间锐齿栎天然次生林总有机碳密度(包括乔木、林下植被、枯落物和土壤)

差异均显著, 均表现为 CK>T5>T15>T25(图 3)。T5 与 CK 在阳坡和阴坡差异均不显著; 阳坡 T15、T25 总有机碳密度分别比 CK 低 7. 10% 和 13. 64%, 阴坡 T15、T25 总有机碳密度分别比 CK 低 8. 84%

和 13.66%。阳坡 CK、T5、T15、T25 乔木层碳密度占林分总碳密度的比例分别为 61.88%、62.67%、59.59%和 56.59%；阴坡 CK、T5、T15、T25 乔木层碳密度占林分总碳密度的比例分别为 58.07%、57.32%、54.17%和 51.47%。2 个坡向乔木层碳库均为锐齿栎次生林碳库的主体部分,占林分碳库一半以上。由于采伐木的移除,乔木在锐齿栎次生林碳库中的比例在 2 个坡向均随间伐强度增加而降低。

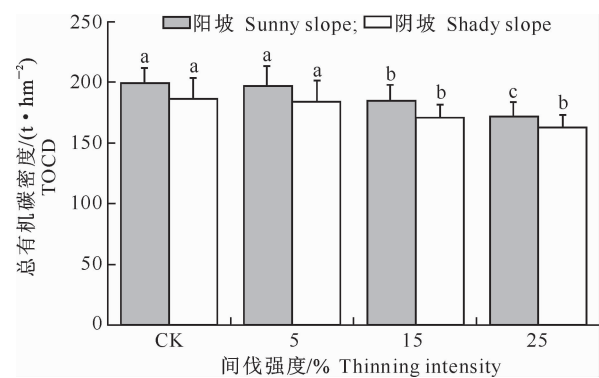


图 3 间伐强度对秦岭南坡锐齿栎天然次生林总有机碳密度的影响

Fig. 3 Effect of thinning intensity on total organic carbon density of *Quercus aliena* var. *acuteserrata* secondary forest on southern slope of Qinling Mountains

4 结论与讨论

本研究结果表明,由于采伐木的移除,不同间伐强度均在一定程度上降低了秦岭南坡锐齿栎天然次生林乔木层的碳储量,这与徐金良等^[6]、Nilsen 等^[7]的研究结果相同。Horner 等^[4]、成向荣等^[3]、游伟斌等^[5]的研究结果则显示,中度抚育间伐增加了乔木层碳密度;明安刚等^[17]的研究结果显示乔木层碳密度随抚育间伐强度的增加而增大。这可能是因为不同的研究中间伐起始期、间伐强度、间伐方式不尽相同,抚育间伐对保留木生长的促进不同,而且由于树种特性、年龄结构、立地条件以及气候等自然条件均会对林木的生长产生影响,因此间伐强度对林分乔木层碳密度积累的影响可能存在差异。

不同强度的抚育间伐虽然提高了保留木的单株生产力和生物量^[18],然而由于单位面积株数的减少,单位面积生物量和生产力并不随间伐强度任意加强而增加,反而可能会降低^[19]。这使得不同间伐强度的林分乔木层碳密度的积累量不同。在本研究中,阳坡间伐强度为 5%和 15%的林分以及阴坡间伐强度为 5%的林分乔木层有机碳密度增加量显著

高于对照林分,这表明秦岭南坡锐齿栎次生林在阳坡采取 5%和 15%的间伐强度、在阴坡采取 5%的间伐强度能够提高乔木层的固碳能力。由于碳密度积累量的提高,从长期来看,阳坡 5%和 15%间伐的林分以及阴坡 5%间伐的林分乔木层有机碳密度有可能会高于未间伐的林分。然而抚育间伐对林分生长的影响会随时间的推移而逐渐减弱^[20],抚育间伐强度对秦岭锐齿栎次生林乔木碳密度的长期影响有待于进一步研究。

本研究中阳坡和阴坡的灌木与草本碳密度均随间伐强度增加而增大,这与方晰等^[9]、马履一等^[21]、赵朝辉等^[22]、段劼等^[23]的研究结果相同。抚育间伐改善了林内光照和水分条件,从而促进了林下植被的生长发育,因此林下植被生物量和碳密度增加。Campbell 等^[18]认为,间伐后林下植被的发育能够在一定程度上补偿采伐木移除带走的碳储量,本研究中由于林下植被在生态系统碳库中所占的比例较小,这种补偿效果并不明显。由于采伐木的移除,较大强度的抚育间伐短期内会减少林分枯落物的年凋落量^[10]。间伐后林分密度减小,地面温度升高,因而会加快枯枝落叶的分解^[24],然而间伐后林下植被的发育则在一定程度上增加了枯落物的输入^[8],间伐后枯落物理化性质的变化也可能影响其分解速率^[25]。抚育间伐对枯落物输入与分解速率相互关系的影响决定了抚育间伐后枯落物层碳密度的变化。本研究中阳坡和阴坡锐齿栎次生林枯落物层碳密度在不同间伐强度 and 对照林分之间均无显著差异。这可能是枯落物输入与分解动态平衡的结果。枯落物在生态系统碳库中所占的比例虽然较小,但却是植物碳库与土壤碳库的重要纽带,在生态系统物质循环中具有重要作用。抚育间伐强度对秦岭锐齿栎林枯落物层碳库的影响机制值得进一步研究。

本研究中抚育间伐强度对锐齿栎次生林土壤有机碳密度没有显著影响。以往的研究结果表明,经过不同强度间伐后林地透光性增强,土壤温度升高,增强了土壤生物活性,土壤呼吸增强,加速了土壤有机质的分解和释放,从而导致林地土壤中的碳储量下降^[7,9,26]。然而林下植被的发育能够减小抚育间伐对土壤水分和温度的影响^[8],采伐剩余物的分解能够增加土壤有机碳的输入^[3],从而增加土壤碳密度。在本研究中,林下植被碳密度随间伐强度的增加而增大,林下植被的发育以及采伐剩余物的分解补偿了土壤呼吸带来的有机碳的释放,这可能是本研究中抚育间伐短期内对土壤有机碳密度的影响较

小的主要原因。

综上所述,间伐后 3 年内,不同间伐强度均在一定程度上降低了秦岭南坡锐齿栎天然次生林的碳储量,然而阳坡 5% 和 15% 间伐的林分以及阴坡 5% 间伐的林分乔木层有机碳密度增加量显著高于对照林分。因此,对于秦岭南坡胸高断面积为 23 m²/hm² 的锐齿栎天然次生林,阳坡采取 15% 间伐强度、阴坡采取 5% 间伐强度在短期内有利于提高林分的固碳能力。

参考文献

- [1] Mäkinen H, Isomäki A. Thinning intensity and growth of Norway spruce stands in Finland [J]. *Forestry*, 2004, 77(4): 349-364.
- [2] Ruiz-Peinado R, Bravo-Oviedo A, López-Senespleda E, et al. Do thinnings influence biomass and soil carbon stocks in Mediterranean maritime pine woods? [J]. *European Journal of Forest Research*, 2013, 132(2): 253-262.
- [3] 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.
Cheng X R, Yu M K, Ge L, et al. Carbon density and its spatial distribution in *Quercus acutissima* plantations under different thinning intensities [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012, 23(5): 1175-1180.
- [4] Horner G J, Baker P J, Nally R M, et al. Forest structure, habitat and carbon benefits from thinning floodplain forests: managing early stand density makes a difference [J]. *Forest Ecology and Management*, 2010, 259(3): 286-293.
- [5] 游伟斌, 梁 芳, 贾忠奎, 等. 抚育间伐对北京山区油松林乔木层碳储量的影响 [J]. *北方园艺*, 2011(23): 203-206.
You W B, Liang F, Jia Z K, et al. Influence of thinning on the carbon storage of *Pinus tabulaeformis* arborescent stratum [J]. *Northern Horticulture*, 2011(23): 203-206.
- [6] 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.
Xu J L, Mao Y M, Cheng X R, et al. Long-term effects of thinning on carbon storage in *Cunninghamia lanceolata* plantations [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014, 25(7): 1898-1904.
- [7] 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.
- [8] 袁 喆, 罗承德, 李贤伟, 等. 间伐强度对川西亚高山人工云杉林土壤易氧化碳及碳库管理指数的影响 [J]. *水土保持学报*, 2010, 24(6): 127-131.
Yuan Z, Luo C D, Li X W, et al. Soil readily oxidizable carbon and carbon pool management index in spruce plantation (*Picea asperata*) with different thinning intensity in western Sichuan [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2010, 24(6): 127-131.

- [9] 方 晰, 田大伦, 项文化. 间伐对杉木人工林生态系统碳贮量及其空间分配格局的影响 [J]. *中南林业科技大学学报*, 2010, 30(11): 47-53.
Fang X, Tian D L, Xiang W H. Effects of thinning on carbon storage and its spatial distributions in Chinese fir plantation ecosystem [J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2010, 30(11): 47-53.
- [10] 刘明国, 苏芳莉, 谭学仁, 等. 不同间伐强度下天然次生林凋落物分解进程研究 [J]. *土壤通报*, 2010, 41(4): 877-881.
Liu M G, Su F L, Tan X R, et al. Decomposition course of litter in secondary broad-leaved forests with different thinning intensity [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2010, 41(4): 877-881.
- [11] 王海燕, 雷相东, 张会儒, 等. 近天然落叶松云冷杉林土壤有机碳研究 [J]. *北京林业大学学报*, 2009, 31(3): 11-16.
Wang H X, Lei X D, Zhang H R, et al. Soil organic carbon in semi-natural mixed larch-spruce-fir stands of northeastern China [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2009, 31(3): 11-16.
- [12] 吕竟斌, 张秋良, 于楠楠, 等. 蜜山油松及华北落叶松抚育间伐对土壤理化性质及微生物影响 [J]. *林业资源管理*, 2012(4): 74-79, 85.
Lü J B, Zhang Q L, Yu N N, et al. The impacts of intermediate felling on the soil physicochemical characteristics and microorganism of Chinese pine and *Larix* spp in Manhan Mountains [J]. *Forest Resources Management*, 2012(4): 74-79, 85.
- [13] 朱教君. 次生林经营基础研究进展 [J]. *应用生态学报*, 2002, 13(12): 1689-1693.
Zhu J J. A review on fundamental studies of secondary forest management [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 13(12): 1689-1693.
- [14] 赵永华, 雷瑞德, 贾 夏, 等. 秦岭锐齿栎群落数量特征的研究 [J]. *应用生态学报*, 2003, 14(12): 2123-2128.
Zhao Y H, Lei R D, Jia X, et al. Quantitative analysis on sharp-tooth oak stands in Qinling Mountains [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 14(12): 2123-2128.
- [15] 陈存根, 龚立群, 彭 鸿, 等. 秦岭锐齿栎林的生物量和生产力 [J]. *西北林学院学报*, 1996, 11(增): 103-114.
Chen C G, Gong L Q, Peng H, et al. Biomass and productivity of the sharptooth oak forests in the Qinling Mountains [J]. *Journal of Northwest Forestry College*, 1996, 11(S): 103-114.
- [16] 沈 彪, 党坤良, 常 伟, 等. 秦岭中段南坡锐齿栎林碳密度研究 [J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2014, 42(5): 55-61.
Sheng B, Dang K L, Chang W, et al. Carbon density of *Quercus aliena* var. *acuteserrata* forest on the southern slope of the middle Qinling Mountains [J]. *Journal of Northwest A&F University (Nat Sci Ed)*, 2014, 42(5): 55-61.
- [17] 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): 1-5.
Ming A G, Zhang Z J, Sheng H H, et al. Effects of thinning on the biomass and carbon storage in *Pinus massoniana* planta-

tion [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2013, 49(10): 1-5.

[18] 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.

[19] 李春明, 杜纪山, 张会儒. 抚育间伐对森林生长的影响及其模型研究 [J]. 林业科学研究, 2003, 16(5): 636-641.

Li C M, Du J S, Zhang H R. The effects of thinning on forest growth and model study [J]. Forest Research, 2003, 16(5): 636-641.

[20] 雷相东, 陆元昌, 张会儒, 等. 抚育间伐对落叶松云冷杉混交林的影响 [J]. 林业科学, 2005, 41(4): 78-85.

Lei X D, Lu Y C, Zhang H R, et al. Effects of thinning on mixed stands of *Larix olgensis*, *Abies nephrolepis* and *Picea jazoensis* [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2005, 41(4): 78-85.

[21] 马履一, 李春义, 王希群, 等. 不同强度间伐对北京山区油松生长及其林下植物多样性的影响 [J]. 林业科学, 2007, 43(5): 1-9.

Ma L Y, Li C Y, Wang X Q, et al. Effects of thinning on the growth and the diversity of undergrowth of *Pinus tabulaeformis* plantation in Beijing mountains areas [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2007, 43(5): 1-9.

[22] 赵朝辉, 方 晰, 田大伦, 等. 间伐对杉木林林下地被物生物量及土壤理化性质的影响 [J]. 中南林业科技大学学报, 2012, 32(5): 102-107.

Zhao C H, Fang X, Tian D L, et al. Effects of thinning on biomass of under-story, soil physical and chemical properties in *Cunninghamia lanceolata* plantation [J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2012, 32(5): 102-107.

[23] 段 劫, 马履一, 贾黎明, 等. 抚育间伐对侧柏人工林及林下植被生长的影响 [J]. 生态学报, 2010, 30(6): 1431-1441.

Duan J, Ma L Y, Jia L M, et al. Effect of thinning on *Platycladus orientalis* plantation and the diversity of undergrowth vegetation [J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(6): 1431-1441.

[24] 王祖华, 刘红梅, 王晓杰. 经营措施对森林生态系统碳储量影响的研究进展 [J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2011, 39(1): 83-88.

Wang Z H, Liu H M, Wang X J. Progress of management on carbon storage of forest ecosystems [J]. Journal of Northwest A&F University (Nat Sci Ed), 2011, 39(1): 83-88.

[25] 李国雷, 刘 勇, 李瑞生, 等. 油松叶凋落物分解速率、养分归还及组分对间伐强度的响应 [J]. 北京林业大学学报, 2008, 30(5): 52-57.

Li G L, Liu Y, Li R S, et al. Responses of decomposition rate, nutrient return and composition of leaf litter to thinning intensities in *Pinus tabulaeformis* plantation [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2008, 30(5): 52-57.

[26] Tian D L, Yan W D, Fang X, et al. Influence of thinning on soil CO₂ efflux in Chinese fir plantations [J]. Pedosphere, 2009, 19: 273-280.

(上接第 74 页)

[23] Mo J M, Zhang W, Zhu W X, et al. Nitrogen addition reduces soil respiration in a mature tropical forest in southern China [J]. Global Change Biology, 2008, 14(2): 403-412.

[24] Ding W X, Cai Y, Cai Z C, et al. Soil respiration under maize crops: effects of water, temperature, and nitrogen fertilization [J]. Soil Science Society of America Journal, 2007(71): 944-951.

[25] Ding W X, Yu H Y, Cai Z C, et al. Responses of soil respiration to N fertilization in a loamy soil under maize cultivation [J]. Geoderma, 2010, 155(3): 381-389.

[26] Kuzyakov Y. Sources of CO₂ efflux from soil and review of partitioning methods [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2006, 38(3): 425-448.

[27] Treseder K K. Nitrogen additions and microbial biomass: a meta-analysis of ecosystem studies [J]. Ecology Letters, 2008, 11(10): 1111-1112.

[28] Persson H, Ahlstr K, Clemensson-Lindell A. Nitrogen addition and removal at Gårdsjön-effects on fine-root growth and fine-root chemistry [J]. Forest Ecology and Management, 1998, 101(1): 199-205.

[29] 段 雷, 郝吉明, 谢绍东, 等. 用稳态法确定中国土壤的硫沉降和氮沉降临界负荷 [J]. 环境科学, 2002, 23(2): 7-12.

Duan L, Hao J M, Xie S D, et al. Estimating critical loads of sulfur and nitrogen for Chinese soils by steady state method [J]. Environmental Science, 2002, 23(2): 7-12.

[30] 贾淑霞, 王政权, 梅 莉, 等. 施肥对落叶松和水曲柳人工林土壤呼吸的影响 [J]. 植物生态学报, 2007, 31(3): 372-379.

Jia S X, Wang Z Q, Mei L, et al. Effect of nitrogen fertilization on soil respiration in *Larix gmelinii* and *Fraxinus mandshurica* plantations in China [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2007, 31(3): 372-379.