

间伐对秦岭南坡红桦林土壤活性有机碳组分的影响

段学鑫<sup>1</sup>,王军会<sup>2</sup>,党坤良<sup>1\*</sup>,高媛<sup>1</sup>,王先初<sup>1</sup>

(1.西北农林科技大学 林学院,陕西 杨陵 712100;2.陕西省林产品开发贸易总公司,陕西 西安 710077)

**摘 要:**通过对秦岭南坡红桦林的研究,设置 5 个间伐区域(5%、10%、15%、20%和 25%)和对照(CK),研究抚育间伐对红桦林土壤活性有机碳(轻组分有机碳、易氧化有机碳、可溶性有机碳)的影响,为秦岭南坡红桦林的科学管理提供了理论依据。结果表明:1)每个间伐强度均能提高总有机碳含量,且 15%最高,为 26.05 g·kg<sup>-1</sup>;其含量在不同间伐强度的顺序为 15%>20%>10%>25%>5%>CK;每个土层的总有机碳含量都可以通过间伐强度来增加。2)随着间伐强度的加大轻组分有机碳的含量会降低,不同的间伐强度下轻组分有机碳含量顺序为 CK>5%>10%>15%>20%>25%;在不同间伐强度下,易氧化有机碳和总有机碳具有相同的变化规律,以间伐强度 15%最高,为 4.75 g·kg<sup>-1</sup>,不同间伐强度易氧化有机碳顺序为 15%>20%>25%>10%>5%>CK。间伐对表层易氧化有机碳含量有显著影响,对深层几乎无影响。间伐可提高可溶性有机碳含量,以强度 20%增加最明显,为 133.91 mg·kg<sup>-1</sup>,其含量顺序为 20%>15%>10%>25%>5%>CK。间伐能显著影响表层可溶性有机碳,对深层几乎无影响。3)3 种活性碳占总有机碳的百分比在强度 15%时均最低,分别为 11.12%~34.44%、16.07%~21.15%和 0.57%~0.82%。表明 15%的间伐强度不仅有利于土壤总有机碳的积累,而且能提高土壤有机碳的稳定性,因此间伐强度 15%可作为红桦林间伐的参考指标。

**关键词:**秦岭南坡;红桦林;间伐强度;活性有机碳;总有机碳

**中图分类号:**S792.15      **文献标志码:**A      **文章编号:**1001-7461(2020)01-0008-07

Effects of Thinning on Soil Active Organic Carbon Composition in *Betula albosinensis* Forest in Southern Slope of Qinling Mountains

DUAN Xue-xin<sup>1</sup>, WANG Jun-hui<sup>2</sup>, DANG Kun-liang<sup>1\*</sup>, GAO Yuan<sup>1</sup>, WANG Xian-chu<sup>1</sup>

(1. College of Forestry, Northwest A&F University, Yangling 712100, Shaanxi, China;

2. Shaanxi Forest Products Development and Trade Corporation, Xi'an 710077, Shaanxi, China)

**Abstract:** The effects of thinning on soil active organic carbon (light organic carbon, oxidized organic carbon, dissolved organic carbon) in *Betula albosinensis* forest were analyzed to provide a theoretical basis for planning the forest cultivation in the southern slope of Qinling Mountains. We established the intensity thinning into six categories: 0 (control), 5%, 10%, 15%, 20%, and 25%. The results showed that: 1) the total organic carbon content of the soil increased under each thinning intensity, and the average organic carbon content of the soil within the thinning intensity of 15% was the highest (26.05 g·kg<sup>-1</sup>); the total organic carbon content under different thinning intensity was 15%>20%>10%>25%>5%>control; each thinning intensity could increase the total organic carbon content of each soil layer. 2) The light fraction organic carbon decreased with the increase of thinning intensity. The order of light fraction of soil organic carbon within different thinning intensity was control>5%>10%>15%>20%>25%. The change trend

收稿日期:2019-03-03    修回日期:2019-04-10

基金项目:林业公益性行业科研专项:陕西秦岭林区森林抚育经营技术与成效监测(A2990215149)。

作者简介:段学鑫,男,硕士在读,研究方向:秦岭森林抚育间伐。E-mail:2322719000@qq.com

\* 通信作者:党坤良,男,副教授,硕士生导师,研究方向:森林抚育经营。E-mail:Dangkl@126.com

of oxidized organic carbon was the same with total organic carbon content, with the highest content of  $4.75 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$  under intensity of 15%. The order of oxidized organic carbon within different thinning soils was  $15\% > 20\% > 25\% > 10\% > 5\% > \text{control}$ . The thinning management had a great influence on the content of oxidized organic carbon in the surface soil, but had little effect on the deep layer. Thinning could increase the content of soluble organic carbon, which was most obvious with a 20% increase in strength ( $133.91 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ), and the contents of soluble organic carbon was in the order of  $20\% > 15\% > 10\% > 25\% > 5\% > \text{control}$ . Thinning could significantly affect the surface soluble organic carbon, and had almost no effect on the deep layer. 3) The percentages of ROC, LFOC and DOC in total organic carbon were all the lowest under 15% thinning intensity, ranged from 11.12%–34.44%, 16.07%–21.15% and 0.57%–0.82%, respectively. In summary, thinning with intensity of 15% was not only beneficial to the accumulation of total organic carbon in the soil, but also could improve the stability of soil organic carbon, which could be used as a reference index for the thinning intensity of *B. albosinensis* forest.

**Key words:** southern slope of Qinling Mountains; *Betula albosinensis* forest; thinning intensity; active organic carbon; total organic carbon

土壤活性有机碳占土壤碳库的一小部分,它是土壤有机碳的重要组成部分<sup>[1]</sup>,因为它不仅可以直接参与土壤的生化转化过程,同时会促进土壤养分的不断循环,可以为土壤中微生物的生命活动提供能量来源<sup>[2]</sup>,它对土壤碳库的稳定性和肥力具有重要意义<sup>[3]</sup>。另外,土壤活性碳是土壤有机碳动态变化敏感指标,可以有效反映土壤有机碳初期变化<sup>[4-6]</sup>。活性有机碳在总有机碳中的比例能较好地反映土壤有机碳库的稳定性。数值越低,土壤有机碳稳定性越高<sup>[7-8]</sup>。所以,探究森林土壤活性有机碳对研究森林土壤碳库动态具有重要意义<sup>[9]</sup>。

目前对土壤活性有机碳的研究主要集中在施肥、土地利用和不同类型的森林<sup>[10-12]</sup>。袁喆等<sup>[13]</sup>研究表明土壤活性有机碳对间伐的响应存在差异;翟凯燕等<sup>[14]</sup>研究间伐对马尾松(*Pinus massoniana*)人工林土壤活性有机碳的影响结果表明,间伐对土壤总有机碳和活性有机碳有明显影响。这些研究可以帮助人们了解间伐对土壤活性有机碳的影响情况,但有关间伐对红桦(*Betula albosinensis*)林土壤活性有机碳影响的研究尚未见报道,特别是间伐多年后,林地土壤活性有机碳变化的研究还很少。因此,有必要进一步探讨间伐对林地土壤活性碳影响以及间伐多年后土壤活性有机碳的变化特征。

红桦是秦岭山脉植被垂直分布的主要谱系森林之一,分布面积既大又广泛,它是秦岭林区最具代表性的森林类型之一。以红桦为对象,研究土壤活性有机碳对间伐的响应,揭示林地土壤有机碳稳定性与间伐强度的关系,为红桦林合理经营提供参考依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域概况

试验样地位于宁东林业局旬阳坝林场( $108^{\circ}16'$

$-108^{\circ}56' \text{ E}$ ,  $33^{\circ}14' - 33^{\circ}50' \text{ N}$ ),海拔  $1\,250 \sim 2\,889 \text{ m}$ 。年均气温  $13.3^{\circ}\text{C}$ ,极端高温  $36.2^{\circ}\text{C}$ ,极端低温  $-12.1^{\circ}\text{C}$ 。落叶阔叶林、针阔混交林、红桦林和亚高山针叶林等是主要的森林群落类型。主要树种有红桦、华山松(*P. armandii*)、锐齿栎(*Quercus aliena* var. *acuteserrata*)、等,主要伴生树种有漆树(*Toxicodendron vernicifluum*)、青榨槭(*Acer davidii*)等。土壤类型大多为暗棕壤,土层剖面平均深度约  $60 \text{ cm}$ 。

### 1.2 样地设置

试验于 2012 年初在陕西安东林业局旬阳坝林场,选择地形、林分因子基本一致的红桦林地段,按照 5%、10%、15%、20% 和 25% 的间伐强度,设置样地 and 对照样地 CK,每个样地重复 1 次,共 12 块样地,面积为  $20 \text{ m} \times 30 \text{ m}$ (表 1)。

### 1.3 样品采集

在每块样地内采用 5 点取样法挖 5 个土壤剖面,样品分层  $0 \sim 10$ 、 $10 \sim 30 \text{ cm}$  和  $30 \sim 60 \text{ cm}$ 。土样通过风干和预处理后用于测定轻组分有机碳、易氧化有机碳、可溶性有机碳和总有机碳。

### 1.4 测定方法

土壤总有机碳采用 Elementer 元素分析仪测定。土壤轻组分有机碳采用  $1.70 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$  碘化钠<sup>[15]</sup>。土壤易氧化有机碳采用  $0.02 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$  的高锰酸钾氧化法<sup>[16]</sup>。土壤可溶性有机碳采用硫酸钾浸提法<sup>[13]</sup>。

### 1.5 数据处理

选用 Excel 2013 对数据进行初步整理及制图,使用 SPSS 21.0 软件,对数据进行单因素方差分析,同时采用多重比较法进行差异性分析。

表 1 样地林分概况

Table 1 The plot overview of experimental study

间伐强度	海拔 /m	坡度 /(°)	平均胸径 /cm	平均树高 /m	郁闭度	灌木盖度 /%	草本盖度 /%	含水率 /%	土壤类型
CK	2 087	18	17.4	16.8	0.75	30	85	66.16	暗棕壤
T1(5%)	2 083	17	19.3	17.2	0.75	30	75	64.11	
T2(10%)	2 077	20	18.4	16.7	0.70	45	75	66.74	
T3(15%)	2 104	13	17.1	16.1	0.70	45	85	73.90	
T4(20%)	2 094	19	19.6	18.8	0.65	35	85	66.77	
T5(25%)	2 116	24	18.8	17.4	0.65	45	75	67.60	

2 结果与分析

2.1 不同间伐强度对土壤总有机碳的影响

间伐既可使林地枯落物量增加,又能明显改变林内生态环境条件,促使凋落物快速分解,使林地内总有机碳含量变化明显。通过对不同间伐强度红桦林土壤总有机碳的分析表明(表 2),间伐可有效增加土壤总有机碳含量,其中以间伐强度 T3 提高率最大,T1 最小。土壤总有机碳含量( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )顺序为: $T3(26.05) > T4(21.47) > T2(19.80) > T5(16.97) > T1(15.83)$ ;与 CK( $14.84$ )相比,分别增加了 62.11%、55.93%、44.68%、14.37% 和 6.71%。差异性分析表明,T2、T3、T4 和 T5 之间存在显著差异,且均与 CK、T1 存在显著差异( $P < 0.05$ ),T1 与 CK 无显著差异。表明间伐能显著提高红桦林总有机碳含量,并且在 T3 间伐强度下增加尤其显著。

表 2 不同间伐强度土壤总有机碳含量

间伐强度	Total organic carbon in soils with different thinning intensities ( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )			
	土层深度			
	0~10 cm	10~30 cm	30~60 cm	剖面平均
CK	28.98Aab	10.92Ba	6.98Ca	14.84a
T1	27.38Aa	11.63Ba	7.58Ca	15.83a
T2	34.99Ac	15.61Bb	8.81Cb	19.80c
T3	41.93Ae	25.45Bc	10.79Cc	26.05e
T4	39.51Ad	16.14Bb	8.75Cb	21.47d
T5	30.39Ab	11.90Ba	7.39Ca	16.97b

注:同行不同大写字母表示不同土层具有显著性差异( $P < 0.05$ );同列不同小写字母表示同一土层不同间伐强度具有显著性差异( $P < 0.05$ )。下表同。

不同间伐强度下土壤各层总有机碳含量在  $6.98 \sim 41.93 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,其随着土壤层的加深而显著减少( $P < 0.05$ )(表 2)。与对照相比,除间伐强度 T1 外,各土层总有机碳含量均明显增加。差异性分析表明,在 0~10 cm 土层,T2、T3 和 T4 之间存在显著差异,且均与 CK、T1、T5 间存在显著差异( $P < 0.05$ ),T1 和 T5 无显著差异,CK 与 T1 和 T5

无显著差异;在 10~30 cm 和 30~60 cm 土层,T2、T3 和 T4 均与 CK、T1、T5 呈显著差异,T3 与 T2、T4 间差异有显著性( $P < 0.05$ ),其余各间伐强度彼此没有显著差异。说明间伐能显著提高红桦林土壤各层总有机碳含量,且提高效果最明显的是间伐强度 T3。

2.2 不同间伐强度对土壤轻组分有机碳的影响

植物残体的微生物分解是土壤中轻质有机碳的主要成分,是土壤有机质的可变部分,它对土壤中有有机碳的动态更为敏感<sup>[17]</sup>。对土壤轻组分有机碳分析表明(表 3),间伐可显著降低土壤轻组分有机碳含量,并随着间伐强度的增加,降低程度越明显。不同间伐强度土壤轻组分有机碳含量( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )依次为: $CK(5.06) > T1(4.63) > T2(4.05) > T3(3.93) > T4(3.28) > T5(3.27)$ ,分别比 CK 降低了 8.50%、19.94%、22.25%、35.08% 和 35.37%。差异性分析表明,CK、T1、T2 和 T3 之间存在显著差异,且均与 T4、T5 存在显著差异( $P < 0.05$ ),T4 与 T5 间无显著差异。结果表明,间伐对轻组分有机碳有显著影响,当间伐强度加大到 T3 后,土壤轻组分有机碳含量变化不显著。

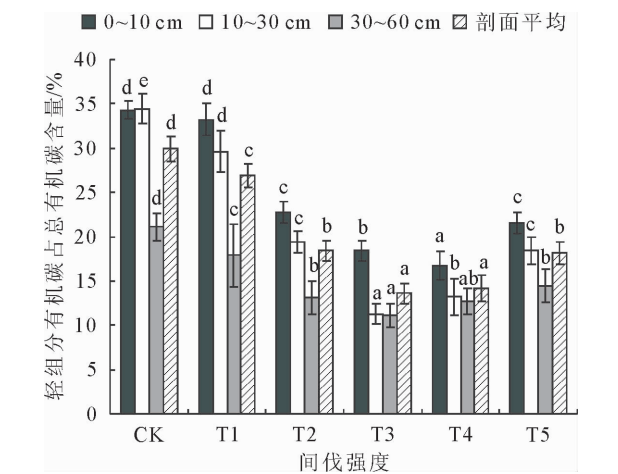
表 3 不同间伐强度土壤轻组分有机碳含量

间伐强度	Light fraction organic carbon with different thinning intensities ( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )			
	土层深度			
	0~10 cm	10~30 cm	30~60 cm	剖面平均
CK	9.94Ae	3.76Be	1.47Cb	5.06e
T1	9.08Ad	3.44Bd	1.35Cb	4.63d
T2	7.97Ac	3.02Bc	1.15Ca	4.05c
T3	7.72Ab	2.87Bb	1.20Ca	3.93b
T4	6.60Aa	2.13Ba	1.11Ca	3.28a
T5	6.55Aa	2.19Ba	1.07Ca	3.27a

不同间伐强度下,不同土层轻组分有机碳含量在  $1.07 \sim 9.94 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,并随着土壤层深度的增加显著减小( $P < 0.05$ )。对不同间伐强度各土层轻组分有机碳含量分析表明(表 3):不同土层轻组分有机碳含量随间伐强度的增加而降低。差异性分析表

明,在 0~10 cm 与 10~30 cm 土层,CK、T1、T2 和 T3 之间显著差异,且均与 T4、T5 存在显著差异 ( $P<0.05$ ),T4 与 T5 间无显著差异。表明间伐对表层土壤轻组分有机碳影响明显,当间伐强度加大到 T3 后,土壤轻组分有机碳含量不再随间伐强度的加大而变化;在 30~60 cm 土层,间伐强度 CK 和 T1 分别与 T2、T3、T4、T5 呈显著性差异 ( $P<0.05$ ),其余各间伐强度间无显著差异。表明随着间伐强度加大,对林地深层土壤的轻组分有机碳影响越小。

不同间伐强度林地土壤轻组分有机碳含量所占总有机碳百分比介于 11.12%~34.44%(图 1)。与 CK 相比,间伐均使土壤轻组分有机碳所占土壤总有机碳百分比降低。其大小顺序为 CK(29.94%)>T1(26.89%)>T2(18.41%)>T5(15.13%)>T4(14.22%)>T3(13.61%);差异性分析表明,间伐强度 CK 和 T1 均与其他间伐强度存在显著差异,T2、T5 与 T3、T4 呈显著差异 ( $P<0.05$ ),其余间伐强度相互间均呈无显著差异。表明间伐对土壤轻组分有机碳含量所占总有机碳百分比具有显著降低作用,且间伐强度 T3 影响最为明显。



注:不同字母表示不同土层具有显著性差异 ( $P<0.05$ )。下同。

图 1 土壤轻组分有机碳占总有机碳的比例

Fig. 1 The proportion of light fraction organic carbon in total organic carbon

2.3 不同间伐强度对土壤易氧化有机碳的影响

易氧化有机碳主要来自于凋落物、微生物和根系分泌物,间伐可有效改善林内温度和湿度条件,促进微生物活动和凋落物分解,提高树木根系生理活性,因此,它会对土壤易氧化有机碳产生影响。对不同间伐强度下红桦林土壤易氧化有机碳的分析表明(表 4),各间伐强度均使土壤易氧化有机碳增加,其中以间伐强度 T3 土壤易氧化有机碳增加最为显著。不同的间伐强度下剖面平均易氧化有机碳含量

( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )的顺序为:T3(4.75)>T4(4.09)>T5(3.96)>T1(3.77)>T2(3.60),与 CK(3.39)相比,分别增加了 40.02%、20.48%、16.68%、11.11%和 5.93%。差异性分析表明,T3 分别与 CK、T1、T2、T4 和 T5 间,CK 分别与 T4 和 T5 均呈显著差异 ( $P<0.05$ ),其余各间伐强度相互间均呈无显著差异。表明间伐提高了易氧化有机碳含量,且间伐强度 T3 增加最为明显。

各间伐强度不同土层易氧化有机碳含量介于 1.07~9.02  $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,并随土壤层加深而显著减小。对不同土层易氧化有机碳含量分析表明(表 4):间伐使 0~10 cm 与 10~30 cm 土层易氧化有机碳含量显著增加,但对 30~60 cm 土层影响不大。差异性分析表明,在 0~10 cm 土层,CK 与 T1 呈显著差异,CK、T1 与 T2、T3、T4、T5 相互间呈显著差异 ( $P<0.05$ ),其余各间伐强度相互间均呈无显著差异。在 10~30 cm 土层,T3 分别与 T1、T2、T4、T5 和 CK 间呈显著性差异 ( $P<0.05$ ),其余各间伐强度相互间均呈无显著差异。在 30~60 cm 土层,各间伐强度间均无显著差异 ( $P>0.05$ )。表明间伐增加了表层易氧化有机碳,对深层影响不大。

表 4 不同间伐强度土壤易氧化有机碳含量

间伐强度	Soil oxidized organic carbon with different thinning intensities ( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )			
	土层深度			
	0~10 cm	10~30 cm	30~60 cm	剖面平均
CK	6.80Aa	2.26Ba	1.12Ca	3.39a
T1	7.30Aab	2.42Ba	1.07Ca	3.60ab
T2	7.78Aabc	2.44Ba	1.10Ca	3.77ab
T3	9.02Ac	4.10Bb	1.14Ca	4.75c
T4	8.80Ac	2.40Ba	1.07Ca	4.09b
T5	8.32Abc	2.38Ba	1.19Ca	3.96b

不同间伐强度土壤易氧化有机碳含量占总有机碳的百分比为 16.07%~21.15%(图 2)。不同间伐强度土壤易氧化有机碳含量占总有机碳的百分比大小顺序为 T5(21.15%)>T1(20.53%)>CK(20.09%)>T2(16.77%)>T4(16.45%)>T3(16.07%)。差异性分析表明,T3 与 T5 呈显著差异,T3、T5 分别与 CK、T1、T2、T4 相互间呈显著差异,CK、T1 与 T2、T4 呈显著差异 ( $P<0.05$ ),其余各间伐强度互间均呈显著差异。表明间伐对易氧化有机碳占总有机碳的比例有显著影响,且间伐强度 T3 最低。

2.4 不同间伐强度对土壤可溶性有机碳的影响

通过对不同间伐强度下土壤可溶性有机碳的分析表明(表 5),各间伐强度均使可溶性有机碳增加。

各间伐强度土壤剖面平均可溶性有机碳含量( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )的大小顺序为:  $\text{T4}(133.91) > \text{T3}(131.21) > \text{T2}(127.85) > \text{T5}(124.03) > \text{T1}(117.31)$ , 与 CK ( $113.53$ ) 相比, 分别增加了  $17.95\%$ 、 $15.58\%$ 、 $12.61\%$ 、 $9.25\%$  和  $3.33\%$ 。差异性分析表明,  $\text{T2}$ 、 $\text{T3}$ 、 $\text{T4}$  均与  $\text{T1}$ 、 $\text{T5}$ 、CK 呈显著差异,  $\text{T5}$ 、CK 间存在显著差异 ( $P < 0.05$ ), 其余各间伐强度相互间均呈无显著差异。表明间伐对红桦林土壤可溶性有机碳含量有显著影响。

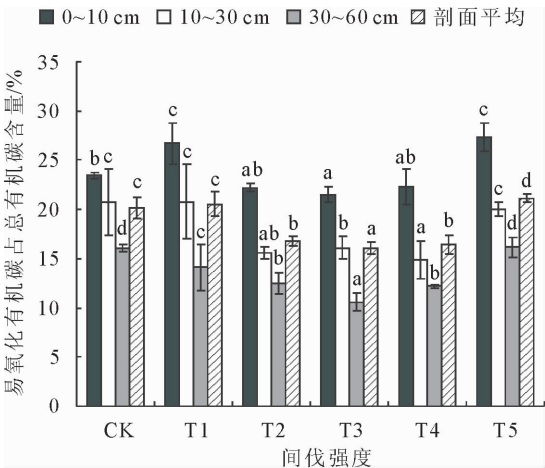


图2 土壤易氧化有机碳占总有机碳的比例

Fig. 2 The proportion of oxidized organic carbon in total organic carbon

$0.05$ ), 其余各间伐强度相互间均呈无显著差异。在  $30 \sim 60 \text{ cm}$  土层, 各间伐强度间均无显著差异 ( $P > 0.05$ )。表明间伐对表层可溶性有机碳具有显著影响, 对深层影响不大。

剖面土壤可溶性有机碳含量占总有机碳的百分比为  $0.59\% \sim 0.82\%$  (图 3)。不同间伐强度下含量大小顺序为  $\text{T5}(0.82\%) > \text{T4}(0.71\%) > \text{T1}(0.68\%) > \text{CK}(0.66\%) > \text{T2}(0.59\%) > \text{T3}(0.57\%)$ 。差异性分析表明,  $\text{T1}$ 、 $\text{T4}$ 、CK 均与  $\text{T2}$ 、 $\text{T3}$ 、 $\text{T5}$  呈显著差异,  $\text{T2}$ 、 $\text{T3}$  与  $\text{T5}$  间呈显著差异 ( $P < 0.05$ ), 其余各间伐强度互间均呈显著差异。表明间伐能够显著影响土壤可溶性有机碳占总有机碳的比例, 且间伐强度  $\text{T3}$  百分比最低。

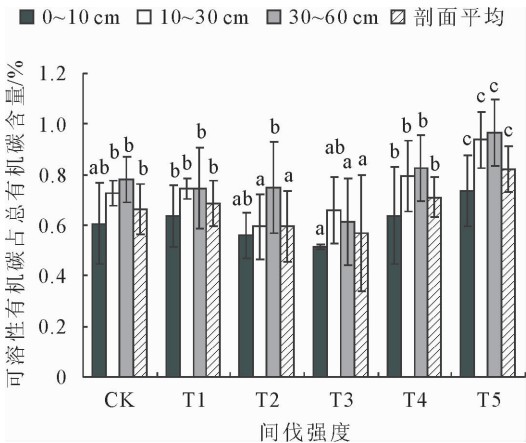


图3 土壤可溶性有机碳占总有机碳的比例

Fig. 3 The proportion of dissolved organic carbon in total organic carbon

表5 不同间伐强度红桦林土壤可溶性有机碳含量

Table 5 Dissolved organic carbon in soils of *Betula albosinensis* forests with different thinning intensities

( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )

间伐强度	土层深度			
	0~10 cm	10~30 cm	30~60 cm	剖面平均
CK	177.27Aa	110.28Ba	53.03Ca	113.53a
T1	180.95Aa	116.19Bab	54.80Ca	117.31ab
T2	194.25Ab	126.79Bbc	62.49Ca	127.85cd
T3	196.03Ab	133.42Bc	64.18Ca	131.21d
T4	192.86Ab	139.60Bc	69.26Ca	133.91d
T5	192.86Ab	117.59Bab	61.65Ca	124.03b

间伐强度不同土层的可溶性有机碳含量在  $53.03 \sim 196.03 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 随着土层的加深, 可溶性有机碳含量显著下降。对不同土层可溶性有机碳含量分析表明 (表 5): 间伐使  $0 \sim 10 \text{ cm}$  与  $10 \sim 30 \text{ cm}$  土层可溶性有机碳含量显著增加, 但对  $30 \sim 60 \text{ cm}$  土层影响不大。差异性分析表明, 在  $0 \sim 10 \text{ cm}$  土层, CK、 $\text{T1}$  与  $\text{T2}$ 、 $\text{T3}$ 、 $\text{T4}$ 、 $\text{T5}$  相互间存在显著差异 ( $P < 0.05$ ), 其余各间伐强度相互间均呈无显著差异。在  $10 \sim 30 \text{ cm}$  土层,  $\text{T3}$ 、 $\text{T4}$  与  $\text{T1}$ 、 $\text{T5}$ 、CK 相互间呈显著性差异,  $\text{T2}$  与 CK 呈显著性差异 ( $P <$

### 3 结论与讨论

#### 3.1 结论

随着土层深度的增加, 土壤总有机碳和活性有机碳含量将下降; 间伐强度  $15\%$  显著提高达到最高, 且对各层含量均具有显著影响; 各间伐强度均增加了易氧化有机碳与可溶性有机碳含量, 对表层易氧化有机碳含量有明显影响, 对深层影响较小; 在不同间伐强度下, 轻组分有机碳含量均降低。综合得出  $15\%$  间伐强度最利于土壤有机碳的积累。

各间伐强度均显著降低了土壤轻组分有机碳在总有机碳中的百分比,  $15\%$  降低最明显, 间伐强度  $15\%$  显著降低了土壤易氧化有机碳占总有机碳中的比值, 表明  $15\%$  间伐强度下土壤有机碳稳定性较高。因此可将间伐强度  $15\%$  作为红桦林抚育改造的参考指标。

#### 3.2 讨论

关于间伐对土壤总有机碳的影响, 王昌亮等<sup>[19]</sup>通过对不同间伐强度下落叶松 (*Larix gmelinii*) 人

工林土壤有机碳的影响研究,表明间伐可以有效地增加土壤各层有机碳的含量;于海群等<sup>[5]</sup>通过研究不同间伐强度对油松(*P. tabulaeformis*)幼龄人工林土壤质量的影响,表明间伐有利于提高土壤有机碳含量。本研究中,各间伐强度对土壤总有机碳含量均具有提高显著影响,且间伐强度 15% 提高最为明显,与前人结论相同。袁喆等<sup>[13]</sup>研究发现,间伐能影响土壤有机碳含量降低,与本研究结果不同。这可能是由于间伐会影响林内温度、光照、水分等环境因子,导致土壤有机质加快分解,释放增加,使碳积累变少。

关于间伐对土壤轻组分有机碳的影响,翟凯燕等<sup>[14]</sup>通过研究间伐对马尾松人工林轻组分有机碳的影响表明,随着土壤深度的增加,轻组分有机碳在土壤中的垂直分布呈下降趋势,且随着间伐强度的加大,土壤轻组分有机碳含量呈下降趋势,与本研究结果一致。这是因为低密度的轻组分有机碳更易被径流带走并且优先损失<sup>[20]</sup>。土壤轻组分有机碳占总有机碳的比例反映了土壤有机碳的稳定性<sup>[21]</sup>。吕茂奎等<sup>[22]</sup>研究表明,轻组分有机碳占总有机碳的比例为 29.10%~41.90%,而本研究得出比例为 11.12%~34.44%,低于其结果,这可能与不同林分以及不同林地处理方式有关。翟凯燕等<sup>[14]</sup>通过研究间伐对马尾松人工林土壤轻组分有机碳的影响,表明间伐可以降低土壤轻组分有机碳占总有机碳百分比。本研究中 5 种间伐强度都可以显著降低轻组分有机碳占总有机碳的比例,并且间伐强度 15% 降低最为明显。

关于间伐对土壤易氧化有机碳的影响,何传龙<sup>[23]</sup>研究表明,间伐会使易氧化碳含量增加。本研究发现间伐提高了土壤中易氧化有机碳的含量,且间伐强度 15% 提高最为明显,与其结果一致。首先,间伐改善了林内物种多样性,特别是对于草本植物<sup>[24]</sup>;其次 15% 间伐强度下土壤含水率相对较高,促进了真菌的活跃程度,有利于易氧化有机碳的积累。20%、25% 间伐强度下土壤含水率降低,真菌活性下降,不利于有机碳积累。间伐提高了 0~10 cm 与 10~30 cm 土层中易氧化有机碳含量,但对 30~60 cm 土层影响不大,这可能与表层土壤细根生物量的变化有关<sup>[25]</sup>。易氧化有机碳占总有机碳的百分比可以体现碳库的稳定状况,比例越低时,稳定性就越好<sup>[26]</sup>。本研究发现,15% 间伐的强度会使易氧化有机碳在总有机碳中的比例显著降低。

关于间伐对土壤可溶性有机碳的影响,窦艳星等<sup>[2]</sup>研究间伐对松栎混交林活性有机碳的影响,表明间伐对土壤可溶性有机碳有显著影响;崔鸿侠

等<sup>[27]</sup>研究表明可溶性有机碳含量会随着土层深度的加深而显著降低,与本研究结果一致。但也有相反的结论,如吴亚丛等<sup>[28]</sup>研究樟树(*Cinnamomum camphora*)林土壤活性有机碳发现,抚育林分的表层土壤可溶性有机碳含量低于对照,这可能是因为抚育间伐过后,林分内环境改变,林内光照、温度增强,有利于林下植被更新,降低了土壤矿化程度,同时减少了因地表径流流失的可溶性有机碳<sup>[29]</sup>。有研究表明,土壤可溶性有机碳含量占总有机碳的比值为 0.02%~0.16%<sup>[30]</sup>。而我们的研究发现,该值为 0.57%~0.82%,相较于前人的研究结果偏高。可能是由于 2017 年降雨量较往年增多,使得有机碳大量淋溶,土壤可溶性有机碳含量剧增。

参考文献:

[1] 谷丽萍,郭永清,泽桑梓,等. 云南干热河谷不同密度麻疯树人工林土壤活性有机碳特征[J]. 西北林学院学报,2014,29(2): 26-31.  
GU L P, GUO Y Q, ZE S Z, *et al.* Characteristics of soil active organic carbon in *Jatropha curcas* plantations with different density in Dry-Hot Valley area of Yunnan Province[J]. Journal of Northwest Forestry University 2014, 29(2): 26-31. (in Chinese)

[2] 窦艳星,侯琳,马红红,等. 间伐对松栎混交林土壤活性有机碳的影响[J]. 中南林业科技大学学报,2015,35(5): 64-69.  
DOU Y X, HOU L, MA H H, *et al.* Effects of forest thinning on soil labile organic carbon in a pine-oak mixed forest[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2015, 35(5): 64-69. (in Chinese)

[3] 钟春棋,曾从盛,全川. 不同土地利用方式对闽江口湿地土壤活性有机碳的影响[J]. 亚热带资源与环境学报,2010,5(4): 64-70.  
ZHONG C Q, ZEN C S, TONG C. Impacts of land-use on soil labile organic carbon contents in the Min River estuary wetlands[J]. Journal of Subtropical Resources and Environment, 2010, 5(4): 64-70. (in Chinese)

[4] 戴全厚,刘国彬,薛蕊,等. 侵蚀环境退耕撂荒地土壤活性有机碳与碳库管理指数演变[J]. 西北林学院学报,2008,23(6): 24-28.  
DAI Q H, LIU G B, XUE S, *et al.* Active organic matter and carbon pool management index of soil at the abandoned cropland in erosion environment[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2008, 23(6): 24-28. (in Chinese)

[5] 于海群,刘勇,李国雷,等. 油松幼龄人工林土壤质量对间伐强度的响应[J]. 水土保持通报,2008,28(3): 65-70.  
YU H Q, LIU Y, LI G L, *et al.* Response of soil quality to thinning intensity in young *Pinus tabulaeformis* plantations [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2008, 28(3): 65-70 (in Chinese)

[6] 戴全厚,刘国彬,薛蕊,等. 黄土丘陵区封禁对土壤活性有机碳与碳库管理指数的影响[J]. 西北林学院学报,2008,23(4): 18-22.



XUE Q H,LIU G B,XUE S,*et al.* Effect of soil labile organic matter and carbon management index under the closure in eroded Hilly Loess Plateau[J]. Journal of Central South University of Forestry,2008,23(4):18-22. (in Chinese)

[7] 张焕军,郁红艳,丁维新. 土壤碳水化合物的转化与累积研究进展[J]. 土壤学报,2013,50(6):1200-1206.

[8] 田舒怡,满秀玲. 大兴安岭北部主要森林类型土壤活性碳特征研究[J]. 水土保持学报,2015,29(6):165-171.

TIAN S Y,MAN X L. Study on characteristics of soil labile organic carbon in main forest types in the north of the Daxing'an Mountains[J]. Journal of Soil and Water Conservation,2015,29(6):165-171. (in Chinese)

[9] 向成华,栾军伟,骆宗诗,等. 川西沿海拔梯度典型植被类型土壤活性有机碳分布[J]. 生态学报,2010,30(4):1025-1034.

XIANG C H,LUAN J W,LUO Z S,*et al.* Labile soil organic carbon distribution on influenced by vegetation types along an elevation gradient in west Sichuan, China[J]. Acta Ecologica Sinica,2010,30(4):1025-1034. (in Chinese)

[10] 吴建国,张小全,王彦辉,等. 土地利用变化对土壤物理组分中有机碳分配的影响[J]. 林业科学,2002,38(4):19-29.

WU J G,ZHANG X Q,WANG Y H,*et al.* The effects of land use changes on the distribution of soil organic carbon in physical fractionation of soil[J]. Scientia Silvae Sincae,2002,38(4):19-29. (in Chinese)

[11] 王清奎,汪思龙. 天然次生阔叶林转变为杉木人工林对土壤微生物量的影响(英文)[J]. Journal of Forestry Research,2006,17(3):000197-200.

[12] 赵志霞,李正才,周君刚,等. 火烧对中国北亚热带天然马尾松林土壤有机碳的影响[J]. 生态学杂志,2016,35(1):135-140.

ZHAO Z X,LI Z C,ZHOU J G,*et al.* Effect of fire on soil organic carbon of natural *Pinus massoniana* forest in north subtropical area of China[J]. Chinese Journal of Ecology,2016,35(1):135-140. (in Chinese)

[13] 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.

[14] 翟凯燕,马婷瑶,金雪梅,等. 间伐对马尾松人工林土壤活性有机碳的影响[J]. 生态学杂志,2017,36(3):609-615.

ZHAI K Y,MA T Y,JIN X M,*et al.* Effects of thinning intensity on soil active organic carbon in *Pinus massoniana* plantation[J]. Chinese Journal of Ecology,2017,36(3):609-615. (in Chinese)

[15] SONG B,NIU S,ZHANG Z,*et al.* Light and heavy fractions of soil organic matter in response to climate warming and increased precipitation in a temperate steppe[J]. Plos One,2012,7(3):33217.

[16] CULMAN S W,SNAPP S S,FREEMAN M A,*et al.* Perman-ganate oxidizable carbon reflects a processed soil fraction that is sensitive to management[J]. Soil Science Society of America Journal,2012,76(2):494.

[17] 徐尚起,崔思远,陈阜,等. 耕作方式对稻田土壤有机碳组分含量及其分布的影响[J]. 农业环境科学学报,2011,30(1):127-132.

[18] ACEA M J,CARBALLAS T. Principal components analysis of the soil microbial population of humid zone of Galicia (Spain)[J]. Soil Biology & Biochemistry,1990,22(6):749-759.

[19] 王昌亮,王庆成,张程,等. 间伐强度对落叶松人工林土壤有机碳的影响[J]. 森林工程,2015,31(1):12-16.

[20] LAL R. ECOLOGY:managing soil carbon[J]. Science,2004,304(5669):393-393.

[21] ZHANG D,SUN X,ZHOU G,*et al.* Seasonal dynamics of soil CO<sub>2</sub> effluxes with responses to environmental factors in lower subtropical forests of China[J]. Science in China,2006,49(Suppl. 2):139-149.

[22] 吕茂奎,谢锦升,周艳翔,等. 红壤侵蚀地马尾松人工林恢复过程中土壤非保护性有机碳的变化[J]. 应用生态学报,2014,25(1):37-44.

LÜ M K,XIE J S,ZHOU Y X,*et al.* Dynamics of unprotected soil organic carbon with the restoration process of *Pinus massoniana* plantation in red soil erosion area[J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2014,25(1):37-44. (in Chinese)

[23] 何传龙. 不同间伐强度对柏木低效人工林土壤有机碳的初期影响[D]. 成都:四川农业大学,2014.

[24] 李瑞霞,闵建刚,彭婷婷,等. 间伐对马尾松人工林植被物种多样性的影响[J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版,2013,41(3):61-68.

LI R X,MIN J G,PENG T T,*et al.* Effects of thinning on understory species diversities of *Pinus massoniana* forests[J]. Journal of Northwest A&F University: Natural Science Edition,2013,41(3):61-68. (in Chinese)

[25] 李瑞霞. 间伐对马尾松细根生物量、形态和碳氮含量的影响[D]. 南京:南京林业大学,2014.

[26] 朱志建,姜培坤,徐秋芳. 不同森林植被下土壤微生物量碳和易氧化碳碳的比较[J]. 林业科学研究,2006,19(4):523-526.

[27] 崔鸿侠. 神农架巴山冷杉林土壤有机碳及其影响因素研究[D]. 北京:中国林业科学研究院,2015.

[28] 吴亚丛,李正才,程彩芳,等. 林下植被抚育对樟树人工林土壤活性有机碳库的影响[J]. 应用生态学报,2013,24(12):3341-3346.

WU Y C,LI Z C,CHEN C F,*et al.* Effects of understory removal on soil labile organic carbon pool in a *Cinnamomum camphora* plantation[J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2013,24(12):3341-3346. (in Chinese)

[29] 马少杰,李正才,王斌,等. 不同经营类型毛竹林土壤活性有机碳的差异[J]. 生态学报,2012,32(8):2603-2611.

MA S J,LI Z C,WANG B,*et al.* Changes in soil active organic carbon under different management types of bamboo stands[J]. Acta Ecologica Sinica,2012,32(8):2603-2611. (in Chinese)

[30] 陈国潮,何振立,黄昌勇. 红壤微生物生物量C周转及其研究[J]. 土壤学报,2002,39(2):152-160.