

不同间伐强度对柏木低效人工林土壤有机碳的影响

曾念念 何传龙 黄从德 季荣飞 张 健 李贤伟

(四川农业大学林学院 四川 雅安 625014)

摘 要:以德阳市旌阳区 33a 生柏木(*Cupressus funebris*)低效人工林为对象,研究了对照(CK, 0%)、弱度间伐(T1, 15%)、中度间伐(T2, 25%)、强度间伐(T3, 35%)和极强度间伐(T4, 50%) 5种强度下,柏木低效人工林土壤有机碳和活性碳的变化及其相关性。结果表明,在间伐 1a 后,土壤总有机碳、微生物量碳、易氧化碳和水溶性碳含量都随间伐强度的增加而增加,T4 和 T3 增加明显($p < 0.05$)。土壤有机碳与土壤微生物量碳、易氧化碳和水溶性碳之间均呈现极显著正相关($p < 0.01$)。研究结果说明,间伐有助于提高柏木低效人工林土壤的固碳能力。

关键词:间伐强度;低效柏木人工林;土壤有机碳及其组分

中图分类号:S718.5 文献标识码:A 文章编号:1003-5508(2015)03-0025-06

Effect of Thinning Intensity on Soil Organic Carbon of Low-efficiency *Cupressus funebris* Plantation

ZENG Nian-nian HE Chuan-long HUANG Cong-de JI Rong-fei

ZHANG Jian LI Xian-wei

(Forestry College of Sichuan Agricultural University, Ya'an 625014, Sichuan, China)

Abstract: In this paper, taking 33 years old low-efficiency *Cupressus funebris* plantation for an object, researches were conducted on the short-term effect of 15% (T1), 25% (T2), 35% (T3), and 50% (T4) thinning on the changes and correlation of its soil organic carbon and active carbon. This low-efficiency *Cupressus funebris* plantation is located in Jingyang District of Deyang City, Sichuan Province. The results indicated that after one year, the total organic carbon (TOC), microbial biomass carbon (MBC), readily oxidizable carbon (ROC), and water-soluble organic carbon (WSOC) increased with the strengthening of thinning intensity, while the positive effects of T3 and T4 were significant at the level of 0.05. Furthermore, there existed significant positive correlations among the TOC and ROC, WSOC and SMBC. Thus, the results displayed that the thinning could facilitate *Cupressus funebris* to sequester more carbon in the soil of the low-efficiency plantation within hilly regions of Sichuan.

Key words: Thinning intensity, Low-efficiency *Cupressus funebris* plantation, Soil organic carbon and its compositions

森林是陆地生态系统的主体,是人类社会经济发展的重要物质基础,也是保护良好生态环境、维持生态平衡、实现社会可持续发展战略的承担者。人

工林是目前陆地碳汇增长最主要的媒介之一,造林及合理的人工林经营都可以成为固定大气 CO₂、防止全球变暖的有效途径^[1-2]。国家林业局 2002 年

收稿日期:2014-12-10

作者简介:曾念念(1992-),女,四川省成都市人,硕士研究生,主要从事森林生态系统管理研究,E-mail:1585698069@qq.com。

通讯作者:黄从德(1969-),男,四川省内江市人,博士,教授,主要从事森林碳循环、森林资源调查理论与技术的研究,E-mail:lyyxq100@aliyun.com。

出版的《中国林业发展宏观战略研究总论》预计在今后 50 a 中我国人工林面积将净增加到 1 亿 hm^2 ^[3]。中国营造了全世界面积最大的人工林,但是碳库储量和碳密度却远低于世界平均水平。因此,迫切需要采取科学合理的管理手段来提高人工林的固碳潜力^[4-6]。而抚育间伐是一项重要的近自然经营措施,对于促进森林的可持续发育具有重要的意义^[7]。科学的抚育间伐能够调整森林结构,为林木生长创造良好的环境,从而提高森林的健康和稳定水平^[8],进而促进森林的固碳能力。

柏木(*Cupressus funebris*)是我国亚热带地区主要造林树种之一,四川东部、贵州东部与中部、湖北西部和湖南西北部是柏木主要产区。20 世纪 50 年代,四川盆地原有的天然针阔混交林大规模被破坏,生态环境急剧恶化,旱涝和水土流失问题异常严重^[9]。从 20 世纪 70 年代开始,我国进行植被恢复,营造了大量的柏木纯林。由于科学水平等因素限制,当时营造栽培的林分密度过高,形成了大量的低效林。如今柏木人工林林下植物物种稀少,生物多样性低下,病虫害严重,森林的水土保持等生态防护功能严重下降^[10]。对其进行抚育间伐,可促进目标树种快速生长、群落持续发育,提高森林生产力。基于此,本文以四川省德阳市旌阳区 33a 生柏木低效人工林为对象,研究了不同间伐强度对柏木(*Cupressus funebris*)低效人工林土壤有机碳的影响,初步揭示了柏木低效人工林间伐调控后土壤有机碳的变化

特征,以期为该地区柏木低效人工林生态系统结构优化、功能提升以及固碳能力的提高提供基础数据。

1 研究区概况

研究试验地选在川中丘陵区的德阳市旌阳区永新镇和新农村,地理位置位于 $104^{\circ}11'E - 104^{\circ}22'E$ 、 $31^{\circ}13'N - 31^{\circ}19'N$ 之间,海拔在 457 m ~ 764 m 之间。该区属亚热带湿润和半湿润气候区,四季分明,气候温和,雨量充沛,日照较少,自然灾害发生频率大,强度不一。常年平均气温 16.0°C ,最高气温 36.5°C ,最低气温 -6.7°C ,温差 43.2°C 。年平均日照时数 1 215.4 h,年平均降雨量 893.4 mm,其中夏季降雨量达 536 mm,占年平均降雨量的 60%。

2 研究方法

2.1 标准地设置

于 2012 年 1 月对同一柏木低效人工林进行本底调查后,选择立地条件基本一致且远离林缘的地块为实验样地。根据采伐柏木株数所占比例,设置 4 种间伐强度和一个对照,即对照(CK, 0%)、弱度(T1, 15%)、中度(T2, 25%)、强度(间伐 T3, 35%)和极强度间伐(T4, 50%),每种处理重复 3 次,共设置面积为 $20\text{ m} \times 20\text{ m}$ 的标准地 15 块,各标准地之间留有保留带或过渡带。采用单株间伐方式于 2012 年 3 月完成间伐作业。标准地基本情况见表 1。

表 1 标准地基本情况概况

Tab. 1 The characteristics of environmental factors of standard sites

标准地	间伐强度 (%)	林龄 (a)	间伐前			间伐 1 a 后			海拔 (m)	坡向	坡度 ($^{\circ}$)	土壤类型
			平均胸径 (cm)	平均树高 (m)	平均密度 (株 \cdot hm^{-2})	胸径 (cm)	树高 (m)	密度 (株 \cdot hm^{-2})				
CK	0	33	10.2	7.6	1 865	10.4	7.6	1 860	535	SE	31	紫色土
T1	15					10.6	7.9	1 575	540	SE	29	
T2	25					10.5	7.9	1 456	538	SE	30	
T3	35					10.7	8.3	1 203	541	SE	28	
T4	50					10.9	8.5	921	545	SE	32	

2.2 样品采集

2013 年 8 月,每一个标准地用五点采样法挖取土壤剖面,按四分法分层(0 cm ~ 10 cm、10 cm ~ 20 cm 和 20 cm ~ 40 cm)采取混合土样两袋。一份过 2 mm 筛后在 4°C 条件下保存,一周内测定微生物量碳(SMBA)和水溶性碳(WSOC);另一份风干后测定有机碳(SOC)和易氧化碳(ROC)。运输过程用冰袋保持土样在 $0^{\circ}\text{C} \sim 4^{\circ}\text{C}$ 。

2.3 森林土壤有机碳测定

有机碳采用重铬酸钾氧化-外加热法测定^[11];微生物生物量碳采用氯仿熏蒸- K_2SO_4 提取法测定^[12];水溶性碳采用蒸馏水提取法测定^[13];易氧化碳采用 $0.333\text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的高锰酸钾氧化法测定^[14]。

2.4 数据处理

应用 Excel 2007 作图,用 SPSS 20.0 对数据进行显著性分析。

3 结果与分析

3.1 间伐强度对土壤有机碳的影响

由表 2 可知 4 种间伐强度的柏木低效人工林土壤剖面平均有机碳含量大小排序为: T4 ($9.13 \pm 0.90 \text{ g C} \cdot \text{kg}^{-1}$) > T3 ($7.39 \pm 0.42 \text{ g C} \cdot \text{kg}^{-1}$) > T2 ($6.02 \pm 0.33 \text{ g C} \cdot \text{kg}^{-1}$) > T1 ($5.46 \pm 0.30 \text{ g C} \cdot \text{kg}^{-1}$), 与 CK ($5.18 \pm 0.39 \text{ g C} \cdot \text{kg}^{-1}$) 相比, 分别增加了 $3.95 \text{ g C} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $2.21 \text{ g C} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $0.84 \text{ g C} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $0.28 \text{ g C} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。进一步分析表明, T4 的土壤剖面平均有机碳含量显著高于其它处理 ($p < 0.05$), T3 的有机碳含量显著高于 T2、T1 和 CK ($p < 0.05$), T2、T1 和 CK 的土壤剖面平均有机碳含量差异不显著。这表明间伐增加了柏木低效人工林土壤有机碳含量, 并随间伐强度的增加而增大。

表 2 不同间伐强度的柏木低效人工林土壤有机碳含量 ($\text{gC} \cdot \text{kg}^{-1}$)

Tab. 2 The soil organic carbon content of different thinning intensity in low efficiency stands of *Cu-prssus funebris* ($\text{g C} \cdot \text{kg}^{-1}$)

间伐强度	土层 (cm)			剖面平均
	0~10	10~20	20~40	
T ₄	$15.63 \pm 1.40\text{Aa}$	$7.37 \pm 0.74\text{Ba}$	$4.40 \pm 0.56\text{Ca}$	$9.13 \pm 0.90\text{a}$
T ₃	$12.70 \pm 0.56\text{Ab}$	$6.03 \pm 0.40\text{Bb}$	$3.43 \pm 0.32\text{Cb}$	$7.39 \pm 0.42\text{b}$
T ₂	$9.87 \pm 0.31\text{Ac}$	$5.10 \pm 0.40\text{Bc}$	$3.10 \pm 0.30\text{Cbc}$	$6.02 \pm 0.33\text{c}$
T ₁	$8.80 \pm 0.30\text{Ad}$	$4.70 \pm 0.26\text{Bc}$	$2.87 \pm 0.35\text{Cbc}$	$5.46 \pm 0.30\text{c}$
CK	$8.27 \pm 0.47\text{Ad}$	$4.63 \pm 0.25\text{Bc}$	$2.63 \pm 0.45\text{Cc}$	$5.18 \pm 0.39\text{c}$

同一行的不同大写字母表示在 $p = 0.05$ 水平上差异显著; 同一列的不同小写字母表示在 $p = 0.05$ 水平上差异显著。下同。

3.2 间伐强度对土壤微生物量碳的影响

3.2.1 土壤微生物量碳含量

从表 3 可看出 4 种间伐强度的土壤剖面平均微生物量碳含量按大小排序为: T4 ($246.51 \pm 9.57 \text{ mgC} \cdot \text{kg}^{-1}$) > T3 ($217.92 \pm 4.88 \text{ mgC} \cdot \text{kg}^{-1}$) > T2 ($201.36 \pm 4.64 \text{ mgC} \cdot \text{kg}^{-1}$) > T1 ($200.00 \pm 1.74 \text{ mgC} \cdot \text{kg}^{-1}$), 与 CK ($198.37 \pm 1.83 \text{ mgC} \cdot \text{kg}^{-1}$) 相比, 分别增加了 $48.14 \text{ mgC} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $19.55 \text{ mgC} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $2.99 \text{ mgC} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $1.63 \text{ mgC} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。T4 显著高于其它处理 CK ($p < 0.05$); T3 显著高于 T2、T1 和 CK ($p < 0.05$); T2、T1 和 CK 无显著差异。这表明间伐增加了柏木低效人工林土壤微生物量碳, 并随间伐强度的增加而增大。

3.2.2 微生物量碳含量占总有机碳的比例

4 种间伐强度及 CK 各土层土壤微生物量碳占

表 3 不同间伐强度的柏木低效人工林土壤微生物量碳含量 ($\text{mgC} \cdot \text{kg}^{-1}$)

Tab. 3 The Microbial biomass carbon content of different thinning intensity in low efficiency stands of *Cu-prssus funebris* ($\text{mgC} \cdot \text{kg}^{-1}$)

间伐强度	土层 (cm)			剖面平均
	0~10	10~20	20~40	
T ₄	$427.07 \pm 19.98\text{Aa}$	$206.77 \pm 6.27\text{Ba}$	$105.70 \pm 2.55\text{Ca}$	$246.51 \pm 9.57\text{a}$
T ₃	$391.43 \pm 10.95\text{Ab}$	$174.53 \pm 2.06\text{Bb}$	$87.80 \pm 1.70\text{Cb}$	$217.92 \pm 4.88\text{b}$
T ₂	$359.50 \pm 8.95\text{Ac}$	$161.07 \pm 4.04\text{Bc}$	$83.50 \pm 1.13\text{Cc}$	$201.36 \pm 4.64\text{c}$
T ₁	$356.33 \pm 2.55\text{Ac}$	$160.43 \pm 1.90\text{Bc}$	$83.23 \pm 0.93\text{Cc}$	$200.00 \pm 1.74\text{c}$
CK	$357.20 \pm 2.55\text{Ac}$	$156.40 \pm 2.07\text{Bc}$	$81.50 \pm 0.95\text{Cc}$	$198.37 \pm 1.83\text{c}$

总有机碳的比例在 2.40% ~ 4.32% 之间 (图 1)。在 0 cm ~ 10 cm 土层中, CK 的土壤微生物量碳占总有机碳的比例最大, 达 4.32%; T4 的土壤微生物量碳占总有机碳的比例最小, 仅 2.73%。在 10 cm ~ 20 cm 土层, T4 的土壤微生物量碳占其总有机碳的比例略有上升, 占总有机碳含量的 2.81%。在 20 cm ~ 40 cm 土层中, 各处理的微生物量碳占总有机碳比例与 0 cm ~ 10 cm 层相同, 但相比 0 cm ~ 10 cm 下降了 12.08% ~ 28.38%。

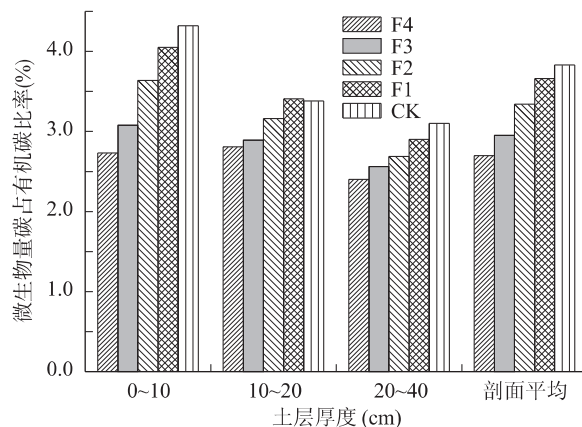


图 1 微生物量碳含量占总有机碳的比例

Fig. 1 The proportion of Microbial biomass carbon in total organic carbon

3.3 间伐强度对土壤水溶性碳的影响

3.3.1 水溶性碳含量

由表 4 可知 4 种间伐强度的柏木低效人工林土壤剖面平均水溶性碳含量按大小排序为: T4 ($154.06 \pm 8.56 \text{ mgC} \cdot \text{kg}^{-1}$) > T3 ($138.04 \pm 4.77 \text{ mgC} \cdot \text{kg}^{-1}$) > T2 ($122.04 \pm 5.34 \text{ mgC} \cdot \text{kg}^{-1}$) > T1 ($119.46 \pm 2.56 \text{ mgC} \cdot \text{kg}^{-1}$), 分别比 CK ($116.93 \pm 2.95 \text{ mgC} \cdot \text{kg}^{-1}$) 增加了 $37.13 \text{ mgC} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $21.11 \text{ mgC} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $5.11 \text{ mgC} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $2.53 \text{ mgC} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。其

中, T4 显著高于其它处理 ($p < 0.05$); T3 显著高于 T2、T1 和 CK ($p < 0.05$); T2、T1 和 CK 无显著差异。这说明间伐增加了柏木低效人工林土壤水溶性碳含量, 并随间伐强度的增加而增大。

表4 不同间伐强度的柏木低效人工林土壤水溶性碳含量 ($\text{mgC} \cdot \text{kg}^{-1}$)

Tab. 4 The water-soluble carbon content of different thinning intensity in low efficiency stands of *Cupressus funebris* ($\text{mgC} \cdot \text{kg}^{-1}$)

间伐强度	土层 (cm)			剖面平均
	0~10	10~20	20~40	
T4	240.63 ± 10.01Aa	151.43 ± 9.79Ba	70.10 ± 6.02Ca	154.06 ± 8.56a
T3	218.23 ± 6.76Ab	133.73 ± 6.25Bb	62.17 ± 1.35Cb	138.04 ± 4.77b
T2	187.50 ± 9.58Ac	119.80 ± 5.20Bc	58.83 ± 1.25Cb	122.04 ± 5.34c
T1	182.87 ± 7.07Ac	116.93 ± 1.50Bc	58.57 ± 0.72Cb	119.46 ± 2.56c
CK	179.40 ± 4.75Ac	112.73 ± 3.87Bc	58.67 ± 0.50Cb	116.93 ± 2.95c

3.3.2 水溶性碳含量占总有机碳的比例

4 种间伐强度及 CK 各土层水溶性有机碳占总有机碳的比例介于 1.54% ~ 2.49% 之间, 并且随着间伐强度的增加逐渐降低 (图 2)。4 种间伐强度及 CK 在 10 cm ~ 20 cm 土层的比例明显高出 0 cm ~ 10 cm 土层和 20 cm ~ 40 cm 土层。在 10 cm ~ 20 cm 土层所占比例达到 2.02% ~ 2.49%, T1 在该层的比例最高, 达 2.49%, CK 在该层的比例也高达 2.43%。

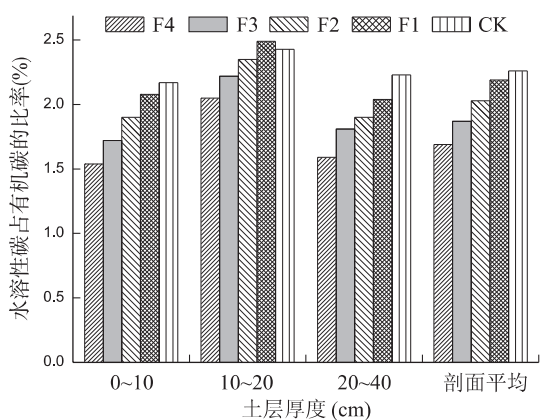


图2 水溶性碳含量占总有机碳的比例

Fig. 2 The proportion of water-soluble carbon in total organic carbon

3.4 间伐强度对土壤易氧化碳的影响

3.4.1 易氧化碳含量

从表 5 可以看出 4 种间伐强度的土壤剖面平均易氧化碳含量的大小顺序为: T4 ($1.63 \pm 0.12 \text{ gC} \cdot \text{kg}^{-1}$) > T3 ($1.37 \pm 0.05 \text{ gC} \cdot \text{kg}^{-1}$) > T2 ($1.17 \pm 0.06 \text{ gC} \cdot \text{kg}^{-1}$) > T1 ($1.02 \pm 0.06 \text{ gC} \cdot \text{kg}^{-1}$), 比

CK ($0.97 \pm 0.03 \text{ gC} \cdot \text{kg}^{-1}$) 分别高 $0.66 \text{ gC} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $0.40 \text{ gC} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $0.20 \text{ gC} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $0.05 \text{ gC} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。4 种间伐强度的易氧化碳含量均差异显著 ($p < 0.05$); T4、T3 和 T2 的土壤剖面易氧化碳含量均显著高于 CK ($p < 0.05$); T1 和 CK 的土壤剖面易氧化碳含量差异不显著 ($p > 0.05$)。这说明间伐增加了柏木低效人工林土壤易氧化碳含量, 且随间伐强度的增大而增大。

表5 不同间伐强度的柏木低效人工林土壤易氧化碳含量 ($\text{gC} \cdot \text{kg}^{-1}$)

Tab. 5 The carbon dioxide content of different thinning intensity in low efficiency stands of *Cupressus funebris* ($\text{gC} \cdot \text{kg}^{-1}$)

间伐强度	土层 (cm)			剖面平均
	0~10	10~20	20~40	
T4	2.58 ± 0.29Aa	1.55 ± 0.04Ba	0.76 ± 0.04Ca	1.63 ± 0.12a
T3	2.27 ± 0.07Ab	1.26 ± 0.02Bb	0.58 ± 0.06Cb	1.37 ± 0.05b
T2	1.93 ± 0.11Ac	1.15 ± 0.03Bc	0.42 ± 0.04Cc	1.17 ± 0.06c
T1	1.77 ± 0.08Ac	0.92 ± 0.09Bd	0.38 ± 0.02Cc	1.02 ± 0.06d
CK	1.65 ± 0.05Ac	0.90 ± 0.04Bd	0.36 ± 0.01Cc	0.97 ± 0.03d

3.4.2 易氧化碳占总有机碳的比例

由图 3 可知 4 种间伐强度及 CK 各土层土壤易氧化碳占总有机碳的比例介于 17.85% ~ 19.44% 之间。在 0 cm ~ 10 cm 土层, T1 的土壤易氧化碳所占总有机碳的比例最大, 为 20.11%, 比例最小的是 T4, 为 16.51%。4 种间伐强度在 10 cm ~ 20 cm 土层的土壤易氧化碳占总有机碳的比例均大于 CK。在 20 cm ~ 40 cm 土层, T3 和 T4 易氧化碳占总有机碳的比例大于 T1、T2 和 CK。这说明, 间伐对柏木低效人工林易氧化碳占总有机碳比例的影响会随着土壤深度的变化而变化。

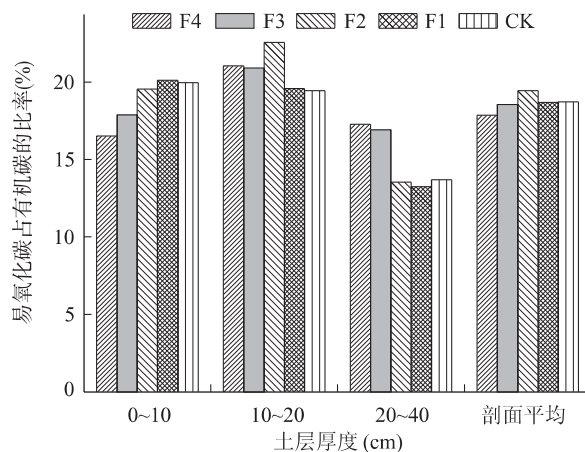


图3 易氧化碳占总有机碳的比例

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

3.5 土壤有机碳与活性有机碳的相关性

从表 6 可以看出,ROC、WSOC 和 SMBC 与 SOC 均为极显著正相关关系($p < 0.01$)。其中,ROC 与 SOC 相关性最强($r = 0.977, p < 0.01$),SMBC 与 SOC 相关性相对最弱($r = 0.944, p < 0.01$)。各活性有机碳之间的相关性表明,ROC、WSOC 和 SMBC 之间的相关性都呈现极显著关系($p < 0.01$);其中,ROC 与 WSOC 相关性最强($r = 0.989, p < 0.01$),ROC 与 SMBC 的相关性相对最弱($r = 0.961, p < 0.01$)。这表明,土壤各活性有机碳之间能够相互影响,并且会和总有机碳的变化保持一致,因为它们都是有机碳中活性较高的一部分。进一步说明,土壤活性有机碳的变化能够在一定程度上指示土壤总有机碳的变化。

表 6 土壤有机碳与活性有机碳的相关性

Tab. 6 The correlation of active organic carbon and total organic carbon

指标	TOC	ROC	WSOC	SMBC
TOC		0.977**	0.959**	0.944**
ROC			0.989**	0.961**
WSOC				0.974**

** 表示在 $p = 0.01$ 水平(双侧)上显著相关。

4 讨论

间伐通过改变林木的生长空间和林内微环境来影响林下植被生长,进而对土壤有机碳产生影响,但间伐对土壤有机碳的影响具有不确定性。本研究表明,间伐提高了土壤有机碳含量,且随着间伐强度的增大而增加。这是因为间伐促进了林下植被生长,使林下植被凋落物增加,同时间伐有利于林地光能的利用,提高林下土壤温度和湿度,有利于土壤有机碳积累。但也有研究得出相反的结论。如袁喆等^[15]对川西亚高山杉木人工林的研究表明,间伐导致森林土壤有机碳含量降低。这是因为未间伐林分具有较大的枯落物返还量,较厚的土壤表层枯落物和较高的腐殖质含量,有利于土壤有机碳的积累。不同结构的森林,土壤有机碳的来源会有较大差异,导致间伐对土壤有机碳的影响效果也会存在差异。可见,不同植被类型对间伐的响应存在差异。其影响机制还有待于进一步研究。

不同间伐强度下,由于人为伐除乔木量和林下植被恢复情况不同,对土壤有机碳的影响差异较大,进而对土壤活性有机碳不同组分产生影响。土壤微生物量碳一方面来源于土壤有机碳,另一方面来源

于微生物,主要受光照、通气和植被类型等的影响^[16]。袁喆等^[15]研究表明,土壤微生物量碳随间伐强度变化趋势为 $30\% > 10\% > 20\% > 0\%$, 30% 间伐强度林地显著高于对照林。本研究表明 A 种间伐强度都提高了柏木低效人工林土壤微生物量碳含量,随着间伐强度的增大而增加,以 $T4$ 和 $T3$ 显著高于其他处理($P < 0.05$)。这可能是间伐后林内环境发生改变,可以增强微生物活性,加速微生物量碳的周转,从而促进养分循环,增加了林下生物多样性,有利于林木生长。通过对植物多样性的调查, $T4$ 和 $T3$ 两个间伐强度有利于提高柏木低效人工林林下灌木多样性,而较高的植物多样性,能为土壤微生物的繁殖和活动创造更加有利的条件。另一方面,随着林下植被盖度的增加,土壤温度和湿度的变化也有利于土壤微生物量碳的积累。此外,有研究^[17]表明,土壤微生物生物量碳占有机碳的比率多在 $2\% - 4\%$ 之间。本研究表明 A 种间伐强度及 CK 各土层土壤微生物量碳占总有机碳的比例在 $2.70\% \sim 3.83\%$ 之间,这与前人的研究结果一致。 CK 大于 4 种间伐强度所占比例。这表明,不同间伐强度在增加土壤微生物量碳的同时还增强了土壤有机碳的稳定性。

土壤水溶性碳主要来源于有机质的淋溶和分解,其含量大小与凋落物的数量和分解速率有直接关系^[18]。已有研究^[19]指出,在一定程度上,增加土壤含水量能提高土壤有机碳的溶出,导致团聚体的分散,进而增加土壤水溶性有机碳含量。也有研究发现,土壤水溶性有机碳含量主要取决于土壤有机碳含量和土壤黏粒的吸附作用,且土壤水溶性有机碳和土壤微生物量碳有较好的正相关关系,森林中约有 $12.1\% \sim 40.3\%$ 的土壤水溶性有机碳被微生物直接利用和吸收^[20-22]。本研究表明,间伐增加了柏木低效人工林的水溶性碳含量,且随着间伐强度的增加而增加($p < 0.05$)。这可能是由于实验样地处于间伐初期,间伐后林分盖度下降,而伴随着降雨出现的土壤有机碳淋溶量有所增加,土壤温湿度也有一定程度的升高,而随着土壤温湿度增加,土壤微生物的活性和生长繁殖速度加快,含水量通过影响微生物活性间接影响土壤水溶性有机碳的含量。有研究表明^[23],土壤水溶性有机碳含量占总有机碳的比值介于 $0.02\% \sim 0.16\%$ 。本研究表明 A 种间伐强度的土壤水溶性碳含量占总有机碳的比值介于

1.69%~2.19%,远高于前人的研究结果。这可能是因为试验区2013年的降雨量比常年大,导致有机碳大量淋溶,土壤水溶性碳含量剧增。

土壤易氧化碳主要来源于植被凋落物、微生物、土壤腐殖质和根系分泌物,主要位于土壤团聚体的表面或大团聚体之间或处于游离状态,存在于松结合态复合体中,稳定性差,易氧化和矿化,能更好地反映土壤质量和土壤肥力的变化情况,并且与土壤理化性质关系密切^[24]。有研究表明,随着间伐强度的增加,人工云杉林土壤易氧化碳含量增加,有机质氧化稳定性降低,碳库管理指数上涨,促进了有机碳更新,且30%间伐强度林地的易氧化碳含量显著高于其他林地^[15]。本研究表明,间伐对柏木低效人工林土壤易氧化碳含量的增加有明显效果,且随间伐强度的增大而增强($p < 0.05$)。这可能是因为间伐后林分密度减小,林地透光性能和光照强度增加,地面温度升高,土壤动物和微生物的活性增强,从而加速了枯枝落叶的分解,增加了土壤有机碳,进而提高了土壤易氧化碳含量。

参考文献:

- [1] 冯瑞芳,杨万勤,张健.人工林经营与全球变化减缓[J].生态学报,2006,26(11):3870~3877.
- [2] 胡会峰,刘国华.森林管理在全球CO₂减排中的作用[J].应用生态学报,2006,17(4):709~714.
- [3] 国家林业局.中国林业发展宏观战略研究总论[M].北京:中国林业出版社,2002.
- [4] 刘国华,傅伯杰,方精云.中国森林碳动态及其对全球碳平衡的贡献[J].生态学报,2000,20(5):733~740.
- [5] 张小全,武曙红,何英,等.森林、林业活动与温室气体的减排增汇[J].林业科学,2005,41(6):150~156.
- [6] 胡会峰,刘国华.森林管理在全球CO₂减排中的作用[J].应用生态学报,2006,17(4):709~714.
- [7] Li R, He J F, Zhang W H, et al. Effects of close-to-natural thinning on ground vegetation and tree regeneration of *Quercus wutaishanica* forest[J]. Journal of Northwest A&F University(Natural Science Edition) 2011, 39(7): 83~91.
- [8] 方精云,陈安平.中国森林植被碳库的动态变化及其意义[J].植物学报,2001,43(9):967~973.
- [9] 吴鹏飞,朱波.川中丘陵区人工桧柏混交林的研究进展[J].水土保持研究,2005,12(6):4~7.
- [10] 龚国堂,陈俊华,张健,等.四川盆地四种柏木林分类型的水文效应[J].生态学报,2011,31(10):2717~2718.
- [11] Lin D Y. Soil Science Experiment Instruction[M]. China Forestry Publishing, 2004: 42~168.
- [12] Xie Z M, Ka L D, Huang C Y, et al. Effect of Cadmium, lead and zinc on microbial biomass carbon, nitrogen and phosphorus in red soil[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2000, 6(1): 69~74.
- [13] Jiang P K, Zhou G M, Xu Q F. Effect of intensive cultivation on the carbon pool of soil in phyllostachys praecox stands[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2002, 38(6): 6~11.
- [14] Ma M D, Li Q, Luo C D, Liu Y J. Study on soil labile organic carbon under some main forest types in Wolong nature reserve, China[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2009, 23(2): 127~131.
- [15] 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.
- [16] 廖崇惠,李健雄,杨悦屏,等.海南尖峰岭热带林土壤动物群落_群落结构的季节变化及其气候因素[J].生态学报,2003,23(1):139~147.
- [17] 陈国潮,何振立,黄昌勇,等.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.
- [18] 曹志平,胡诚,叶钟年,等.不同土壤培肥措施对华北高产农田土壤微生物生物量碳的影响[J].生态学报,2006,26(5):1486~1493.
- [19] Hagedom F, Kaiser R, Feyen H. Effects of redox conditions and flow processes on the mobility of dissolved organic carbon and nitrogen in a forest soil[J]. Journal of Environmental Quality, 2000, 29: 288~297.
- [20] 李忠佩,张桃林,陈碧云.可溶性有机碳的含量动态及其与土壤有机碳矿化的关系[J].土壤学报,2004,41(4):544~552.
- [21] 李淑芬,俞元春,何爆.土壤溶解性有机碳的研究进展[J].土壤与环境,2002,11(4):422~429.
- [22] 侯翠翠,宋长春,李英臣,等.不同水分条件下小叶章湿地表土有机碳及活性有机碳组分季节动态[J].环境科学,2011,32(1):290~297.
- [23] Chow M T, Tanji K K, Gao S D, et al. Temperature water content and wet-dry cycle effect on DOC production and carbon mineralization in agricultural peat soils[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2006, 38: 477~488.
- [24] 张晓琴.马尾松低效林改造对土壤理化性质与林分生物量的影响[D].四川农业大学,2008.