

网络出版时间:2019-10-08 10:45 DOI:10.13207/j.cnki.jnwafu.2020.04.010
网络出版地址:http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20191008.1044.020.html

间伐对秦岭南坡锐齿栎林土壤腐殖质及微生物的影响

王先初¹,董鹏飞²,党坤良¹,段学鑫¹,李杰茹¹,强浪浪¹

(1 西北农林科技大学 林学院,陕西 杨凌 712100;2 陕西省宁东林业局,陕西 西安 710000)

【摘 要】【目的】以秦岭南坡锐齿栎林为研究对象,探讨间伐对锐齿栎林地土壤腐殖质及土壤微生物的影响,为秦岭林区锐齿栎林抚育经营提供理论依据。【方法】2012 年 3 月,在秦岭南坡陕西省宁东林业局沙沟林场林地阳坡的中下部选择生长状况接近、林分密度基本一致的锐齿栎天然次生林,设置锐齿栎天然次生林样地 12 块,间伐强度分别为林分蓄积量的 0(CK)、5%(T1)、10%(T2)、15%(T3)、20%(T4)和 25%(T5),2018 年 7 月采集 0~30 cm 土层土样,测定土壤腐殖质及其组分(胡敏酸、富啡酸和胡敏素)含量以及土壤微生物(细菌、真菌、放线菌)数量,并分析土壤胡敏酸、富啡酸和胡敏素含量与细菌、真菌、放线菌数量的相关性。【结果】(1)间伐 6 年后,在 0~30 cm 土层,各间伐强度处理土壤腐殖质含量平均值均大于 CK,且 T1 处理的土壤腐殖质含量最高,为(60.78±10.53) g/kg。各间伐强度下土壤胡敏酸含量平均值较 CK 均有明显减少,不同处理土壤胡敏酸含量平均值由大到小依次为 CK>T4>T3>T5>T2>T1。除 T3 处理外,其余间伐强度处理土壤富啡酸含量平均值均高于 CK,富啡酸含量平均值由大到小依次为 T2>T1>T5>T4>CK>T3。与 CK 相比,除 T1 处理外,其余各间伐强度处理土壤胡敏素含量平均值均增加,各间伐强度处理土壤胡敏素含量平均值由大到小依次为 T2>T3>T4>T5>CK>T1。(2)不同间伐强度下土壤胡敏酸/腐殖酸含量比值(PQ)由大到小依次为 CK>15%>20%>25%>10%>5%。(3)间伐 6 年后,在 0~30 cm 土层,土壤微生物总量随着间伐强度的增加呈先增加后减少的趋势,微生物总量在间伐强度为 10%时达到最高;土壤细菌、放线菌数量在间伐强度为 5%~10%时较高,真菌数量在间伐强度为 15%~20%时较高。(4)土壤细菌、真菌和放线菌数量均与土壤胡敏酸、胡敏素含量呈极显著正相关,土壤真菌数量与富啡酸含量呈显著正相关。【结论】土壤微生物各种群数量可以显著影响土壤腐殖质的积累,合理的抚育间伐可以显著增加土壤腐殖质含量及微生物数量,选择 10%~15%的间伐强度作为提高林地土壤腐殖质的参考指标较为合理。

【关键词】秦岭南坡;锐齿栎林;抚育间伐;土壤腐殖质;土壤微生物

【中图分类号】S753.51

【文献标志码】A

【文章编号】1671-9387(2020)04-0075-08

Effects of thinning on soil humus and microbes in *Quercus aliena* var. *acuteserrata* forest on the southern slope of the Qinling Mountains

WANG Xianchu¹, DONG Pengfei², DANG Kunliang¹, DUAN Xuexin¹,
LI Jieru¹, QIANG Langlang¹

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

2 Ningdong Forestry Bureau of Shaanxi Province, Xi'an, Shaanxi 710000, China)

Abstract: 【Objective】 This study investigated effects of thinning on soil humus and soil microorganisms in *Quercus aliena* var. *acuteserrata* forest on the southern slope of the Qinling Mountains to provide basis for the tending and management of *Quercus aliena* var. *acuteserrata* forest. 【Method】 In March 2012,

【收稿日期】 2019-04-08

【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】 王先初(1993—),男,陕西石泉人,在读硕士,主要从事秦岭南坡森林抚育间伐研究。E-mail:1229572163@qq.com

【通信作者】 党坤良(1960—),男,陕西蒲城人,副教授,硕士生导师,主要从事秦岭南坡森林抚育间伐研究。E-mail:438012160@qq.com

in the middle and lower parts of the sunny slope of Shagou Forest Farm, Ningdong Forestry Bureau, Shaanxi, on the southern slope of the Qinling Mountains, 12 plots of natural secondary forest of *Quercus aliena* var. *acuteserrata* with similar growth status and stand density were set up. The thinning intensity was 0(CK), 5% (T1), 10% (T2), 15% (T3), 20% (T4) and 25% (T5), respectively. In July 2018, 0–30 cm soil samples were collected to determine contents of humus and its components (humic acid, fulvic acid and humin) and numbers of soil microorganisms (bacteria, fungi and actinomycetes). The correlations between contents of humic acid, fulvic acid and humin and numbers of bacteria, fungi and actinomycetes were also analyzed. 【Result】 (1) Six years after thinning, the average content of humus in 0–30 cm soil layer was higher than CK in all treatments, and T1 had the highest content of (60.78+10.53) g/kg. The average humic acid content of soils under different thinning intensities was significantly lower than CK in the order of CK>T4>T3>T5>T2>T1. Except for T3 treatment, the average content of fulvic acid in other treatments was higher than CK with the order of T2>T1>T5>T4>CK>T3. Except for T1 treatment, the average humin content of all thinning intensity treatments increased in the order of T2>T3>T4>T5>CK>T1. (2) The ratio of humic acid to humic acid (PQ) in soil under different thinning intensities was in the order of CK>15%>20%>25%>10%>5%. (3) Six years after thinning, the numbers of soil microorganisms increased first and then decreased with the increase of thinning intensity. The number of microorganisms reached the highest when thinning intensity was 10%. The numbers of bacteria and actinomycetes were higher when thinning intensity was 5%–10%, and the number of fungi was higher when thinning intensity was 15%–20%. (4) The numbers of soil bacteria, fungi and actinomycetes were positively correlated with the contents of humic acid and humin, and the number of fungi was positively correlated with the content of fulvic acid. 【Conclusion】 The amounts of soil microbial communities can significantly affect the accumulation of soil humus. Reasonable thinning can significantly increase soil humus and microorganisms. The thinning intensity of 10%–15% is suggested for improving soil humus in forest land.

Key words: southern slope of the Qinling Mountains; *Quercus aliena* var. *acuteserrata* forest; tending thinning; soil humus; soil microorganism

腐殖质(humus, HS)是具有特殊化学和生物性质、构造较为复杂的高分子化合物,是土壤有机物存在的一种特殊形式,其含量约占土壤有机质的50%~65%,包括胡敏酸(humic acid, HA)、富啡酸(fulvic acid, FA)和胡敏素 C(humin, HM)3个组分,被认为是衡量土壤肥力的重要标志^[1-2]。生态环境的变化会显著影响土壤腐殖质的形成^[3-7]。土壤微生物是生态系统物质循环的主要参与者,参与腐殖质合成过程^[8-9]。因此研究土壤腐殖质及微生物的变化特征对林地土壤管理、土壤腐殖质积累及土壤固碳能力提高有重要意义^[10]。

锐齿栎林既是秦岭林区分布面积较大、范围较广的林分类型,也是秦岭山地植被垂直带谱主要成分。抚育间伐是森林经营的主要措施,既能显著改变林内生态环境条件,也对土壤腐殖质合成和微生物活动具有重要影响^[11-12]。有关抚育间伐对锐齿栎林地土壤养分和活性有机碳的影响已有较多研究^[13-14],但有关抚育间伐对林地土壤腐殖质性质及

微生物影响的研究却鲜见报道。本研究旨在揭示抚育间伐对锐齿栎林地土壤腐殖质与微生物的影响,以及不同间伐强度间的差异特征及变化规律,以期对锐齿栎林科学经营提供理论依据。

1 试验地概况

本研究样地设置在秦岭南坡陕西省宁东林业局沙沟林场(108°33′–108°48′E, 33°43′–34°47′N)。该区森林植被均为20世纪80年代经过人为采伐后恢复起来的天然次生林,主要成林树种为锐齿栎(*Quercus aliena* var. *acuteserrata*)、油松(*Pinus tabulaeformis*)和华山松(*Pinus armandii* Franch)等。试验地海拔964~2362 m,年平均温度12.7℃,年降水量920~1230 mm,年均蒸发量875 mm。研究样地内的锐齿栎林龄约为38年,土壤类型主要为棕色森林土,平均厚度约60 cm,成土母岩主要为花岗岩、片麻岩和变质砂岩。

2 研究方法

2.1 样地设置

2012 年 3 月在试验林地阳坡的中下部选择生长状况接近、林分密度基本一致的锐齿栎天然次生林,按不同抚育间伐强度设置面积为 20 m×30 m 的研究样地共 12 块,间伐强度分别为林分蓄积量的

0(CK)、5%(T1)、10%(T2)、15%(T3)、20%(T4)和 25%(T5),每个处理重复 2 次。间伐采用下层抚育的方法,优先伐除林地内平均胸径以下的长势不良或者干形较差的林木个体,并将间伐产生的全部剩余物(包括树干、枝条等)截断后均匀铺散于林地表层。2018 年 7 月对样地进行复测,记录间伐后林分基本信息,见表 1。

表 1 秦岭南坡锐齿栎天然次生林样地概况

Table 1 Overview of natural secondary forest samples of *Quercus aliena* var. *acuteserrata* on the south slope of Qinling Mountains

间伐强度/% Thinning intensity	海拔/m Altitude	平均胸径/cm Mean DBH	平均树高/m Average tree height	林分密度/ (株·hm ⁻²) Stand density	郁闭度 Canopy density	灌木盖度/% Shrub coverage	土壤 pH Soil pH
0 (CK)	1 490~1 520	14.3±0.3	16.6±1.1	2 810	0.75	70	6.78
5 (T1)	1 467~1 492	15.3±0.9	16.7±0.8	2 800	0.65	75	6.64
10 (T2)	1 455~1 486	14.7±0.9	15.5±2.2	2 750	0.65	75	6.42
15 (T3)	1 463~1 494	15.1±1.2	16.1±1.2	2 740	0.60	80	6.40
20 (T4)	1 461~1 488	15.0±2.0	15.9±0.8	2 690	0.60	85	6.22
25 (T5)	1 460~1 484	15.5±1.7	16.5±0.5	2 660	0.60	85	6.03

在样地内以“S”形布设 5 个土壤采样点,每个采样点均按 0~10,10~20,20~30 cm 分层取样,每个土层取样 2 份,其中一份土样置于 4 ℃下的保温盒中保存,用于室内土壤微生物培养和测定^[15];另一份土样带回室内风干、磨碎、过筛,用于土壤腐殖质的分析^[16]。

土壤腐殖质各组分的提取是,先利用 0.1 mol/L Na₄P₂O₇-NaOH 混合溶液提取土壤中的腐殖酸,再从腐殖酸中分离富啡酸得到胡敏酸沉淀,以腐殖酸与胡敏酸含量的差值求得富啡酸含量,胡敏素含量为腐殖质与腐殖酸含量的差值。土壤腐殖质各组分有机碳含量测定均采用重铬酸钾外加热法^[16]。

土壤微生物数量的测定采用稀释平板法,利用选择性培养基进行土壤微生物培养计数^[15]。

2.2 数据处理

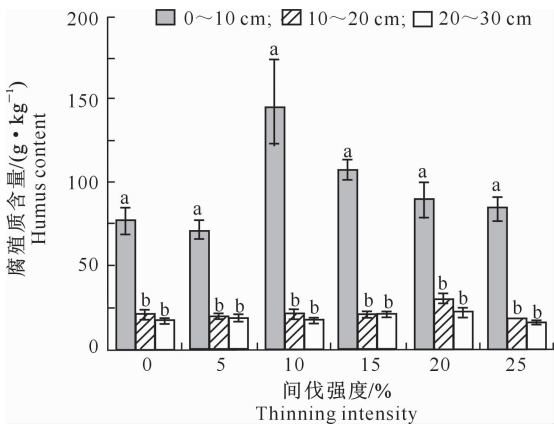
利用 SPSS 17.0 软件对试验数据进行方差分析、相关性检验以及线性回归分析;利用 ORIGIN 2017 软件绘图。

3 结果与分析

3.1 间伐对锐齿栎林土壤腐殖质的影响

3.1.1 土壤腐殖质及其组分含量 图 1 显示,不同间伐强度对不同土层深度土壤腐殖质含量影响明显,各间伐强度下土壤腐殖质含量均随土层加深而降低。各间伐强度下不同土层间的土壤腐殖质含量差异性分析表明,0~10 cm 土层分别与 10~20,

20~30 cm 土层有显著差异($P<0.05$),10~20 cm 与 20~30 cm 土层间无显著差异($P>0.05$),表明间伐对表层土壤腐殖质含量影响较为显著,而对深层土壤腐殖质含量的影响较小。



图柱上标不同小写字母表示同一间伐强度下不同土层间差异显著($P<0.05$)。下图同

Different lowercase letters indicate significant differences among different soil layers ($P<0.05$). The same below

图 1 不同间伐强度下秦岭南坡锐齿栎林各土层土壤腐殖质含量

Fig.1 Humus content in different soil layers of *Quercus aliena* var. *acuteserrata* forest on southern slope of Qinling Mountains under different thinning intensities

由图 2 和图 3 可知,各间伐强度下土壤胡敏酸和土壤胡敏素含量均随着土层的加深而急剧减少。各间伐强度下 0~10 cm 土层土壤胡敏酸、胡敏素含量分别与 10~20,20~30 cm 土层有显著差异($P<$

0.05),10~20 cm 与 20~30 cm 土层间总体无显著差异($P>0.05$)。同时,0~10 cm 土层土壤胡敏酸、

胡敏素含量对间伐强度的响应较为明显,表明间伐强度主要显著影响表层土壤的胡敏酸和胡敏素形成。

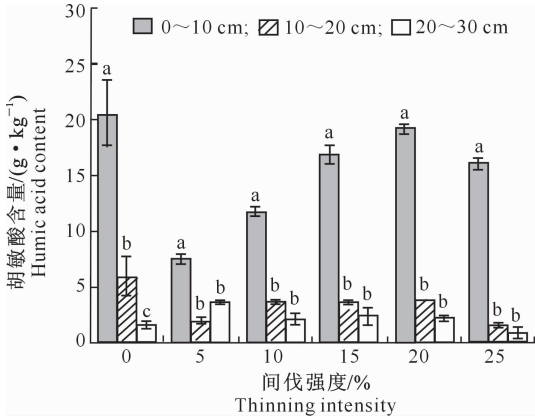


图 2 不同间伐强度下秦岭南坡锐齿栎林各土层土壤胡敏酸含量

Fig. 2 Humic acid contents in different soil layers of *Quercus aliena* var. *acuteserrata* forest on southern slope of Qinling Mountains under different thinning intensities

富啡酸分子小、芳化度低、离解度大^[17]。由图 4 可知,当间伐强度为 0 时,随着土层深度的增加,富啡酸含量呈增大的趋势,其中 10~20,20~30 cm 土层显著高于 0~10 cm 土层;当间伐强度为 5%~25%时,10~20 cm 土层富啡酸含量最高,其次是 20~30 cm 土层(间伐强度为 10%时除外),0~10 cm 土层最低,表明富啡酸多集中在土壤中下部。

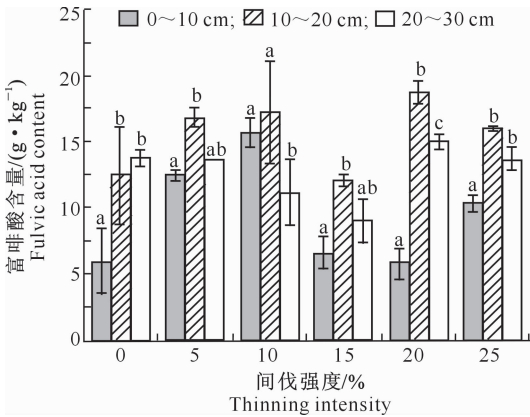


图 4 不同间伐强度下秦岭南坡锐齿栎林各土层土壤富啡酸含量

Fig. 4 Fulvic acid contents in different soil layers of *Quercus aliena* var. *acuteserrata* forest on southern slope of Qinling Mountains under different thinning intensities

0~30 cm 土层土壤腐殖质及其各组分含量的平均值见表 2。由表 2 可知,间伐强度对土壤腐殖质有显著影响。与 CK 相比,T1~T5 处理土壤腐殖质含量平均值均有不同程度增加,增加幅度大小

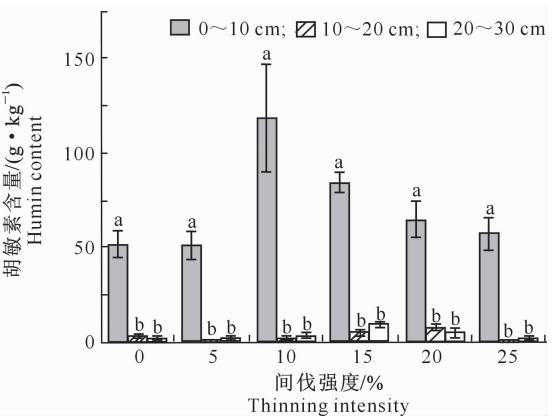


图 3 不同间伐强度下秦岭南坡锐齿栎林各土层土壤胡敏素含量

Fig. 3 Humin contents in different soil layers of *Quercus aliena* var. *acuteserrata* forest on southern slope of Qinling Mountains under different thinning intensities

依次为 T2(56.8%)>T3(28.8%)>T4(22.3%)>T5(2.8%)>T1(2.3%)>CK,其中,T2 与 CK、T1、T3、T4、T5 处理间,CK、T1、T5 分别与 T3 处理间均有显著差异($P<0.05$),CK、T1、T4、T5 处理间均无显著差异($P>0.05$),可知间伐均可使土壤腐殖质含量增加,其中间伐强度为 10%时土壤腐殖质含量增幅最高,间伐强度 15%和 20%处理次之,而间伐强度 5%和 25%处理土壤腐殖质含量增幅最小。

由表 2 可知,间伐强度对土壤腐殖酸含量平均值的影响不明显,不同间伐强度下,除 T3 处理土壤腐殖酸含量平均值低于 CK,且与 CK 呈显著差异外($P<0.05$),其余各处理间差异均不显著($P>0.05$)。

从表 2 可以看出,各间伐强度下土壤胡敏酸含量平均值较 CK 均有明显减少,不同处理土壤胡敏酸含量平均值由大到小依次为 CK>T4>T3>T5>T2>T1,其中 T1、T2、T3、T5 处理均与 CK 差异显著($P<0.05$),T4 处理分别与 T1、T2、T5 处理间有显著差异($P<0.05$),T2 与 T5、CK 与 T4 处理间均无显著差异。说明间伐降低了土壤中胡敏酸含量,其中以 T1 处理土壤胡敏酸含量降低幅度最大。

从表 2 可以看出,除 T3 处理外,其余间伐强度下土壤富啡酸含量平均值均高于 CK,增幅由大到小依次为 T2(37%)>T1(33.7%)>T5(24.4%)>T4(23.5%)>CK>T3(-14%)。T1、T2、T4、T5 处理与 CK 和 T3 处理有显著差异($P<0.05$),T1、

T2、T4、T5 处理间无显著差异($P>0.05$)。除 T3 处理外,其余处理不仅有利于土壤富啡酸的积累,而且对其影响也较为显著。

胡敏素为惰性物质,其性质较为稳定^[16]。表 2 表明,与 CK 相比,除 T1 处理土壤胡敏素含量平均值略有下降外,其余间伐强度处理土壤胡敏素含量平均值均增加,且随间伐强度增大,胡敏素含量平均

值增加幅度减小。各间伐强度处理土壤胡敏素含量平均值由大到小依次为 $T2>T3>T4>T5>CK>T1$ 。差异性分析表明,T2 和 T3 处理与 CK、T1、T3、T4、T5 处理间有显著差异($P<0.05$),CK、T1、T4、T5 处理间无显著差异($P>0.05$)。可知间伐强度为 10%和 15%时不仅能够显著增加土壤胡敏素含量,而且对其影响较为显著。

表 2 不同间伐强度下秦岭南坡锐齿栎林 0~30 cm 土层土壤腐殖质及其各组分含量的平均值
Table 2 Average contents of humus and its components in 0—30 cm soil layer of *Quercus aliena* var. *acuteserrata* forest on southern slope of Qinling Mountains under different thinning intensities

间伐强度/% Thinning intensity	腐殖质含量/ (g·kg ⁻¹) Humus content	腐殖酸含量/ (g·kg ⁻¹) Humic acid content	胡敏酸 Humic acid		富啡酸 Fulvic acid		胡敏素 Humin		胡敏酸/腐殖酸 PQ
			含量/ (g·kg ⁻¹) Content	占全碳比例/% Proportion of total carbon	含量/ (g·kg ⁻¹) Content	占全碳比例/% Proportion of total carbon	含量/ (g·kg ⁻¹) Content	占全碳比例/% Proportion of total carbon	
0(CK)	38.76±2.24 ab	20.06±0.29 bcd	9.33±1.61 d	24.07	10.73±1.57 a	27.68	18.70±2.42 a	48.25	0.46
5 (T1)	39.65±3.36 ab	18.73±0.33 b	4.38±0.06 a	11.95	14.35±0.29 b	39.15	17.92±3.09 a	48.89	0.23
10 (T2)	60.78±10.53 d	20.49±2.08 cd	5.79±0.47 b	9.53	14.70±2.54 b	24.19	40.29±8.75 b	66.29	0.28
15 (T3)	49.93±2.39 c	16.86±0.47 a	7.63±0.51 c	15.28	9.23±0.15 a	18.49	33.07±1.95 c	66.23	0.45
20 (T4)	47.39±3.87 bc	21.63±0.46 d	8.38±0.17 cd	17.68	13.25±0.48 b	27.96	25.76±4.05 a	54.36	0.39
25 (T5)	39.83±2.46 ab	19.53±0.26 bc	6.17±0 b	15.49	13.35±0.25 b	33.53	20.30±2.22 a	50.98	0.32

注:表中数据为“平均值±标准差”。同列数据后标不同小写字母代表差异性在 $P<0.05$ 水平显著。表 3 同。
Note: The data in the table are “average+standard error”. Different lowercase letters in the same column indicate significant difference at the level of $P<0.05$.
The same for Table 3.

3.1.2 土壤胡敏酸与腐殖酸含量比值 土壤胡敏酸/腐殖酸含量比值(PQ)是衡量土壤腐殖质品质的重要指标,比值越大,胡敏酸含量越高,土壤腐殖质的聚合程度就越大,稳定性就越高^[18]。由表 2 可知,CK 的 PQ 值最大为 0.46,T1~T5 处理的 PQ 值均小于 CK,表明抚育间伐在一定程度上降低了土壤腐殖质的稳定性。

3.2 间伐对锐齿栎林土壤微生物数量的影响

不同间伐强度下秦岭南坡锐齿栎林各土层土壤的微生物数量结果见图 5。图 5 显示,土壤微生物数量多集中在土壤表层,且随着土层的加深而急剧减少。不同间伐强度下,0~10 cm 土层土壤微生物各种群数量总体均与 10~20 cm,20~30 cm 土层差异显著($P<0.05$),10~20 cm 与 20~30 cm 土层间总体无显著差异($P>0.05$),表明间伐对表层土壤微生物数量影响显著。

表 3 显示,在 0~30 cm 土层,间伐强度对土壤微生物总量和细菌数量有显著影响,不同间伐强度下土壤微生物总量和细菌数量均大于 CK,且随着间伐强度的增加呈现先增加后下降的趋势。其中,T2 处理的土壤微生物总量和细菌数量均最高,分别为 508.65×10^5 和 442.67×10^5 CFU/g。差异性检

验表明,T1、T2 处理的土壤微生物和细菌数量与 CK、T4、T5 处理间差异显著($P<0.05$),T3、T4、T5 处理间均无显著差异,表明间伐均能增加土壤微生物总量及细菌数量,其中当间伐强度为 5%和 10%时对土壤微生物总量和细菌数量影响最显著。

表 3 显示,不同间伐强度下,0~30 cm 土层的真菌数量均明显高于 CK,其中 T3 处理真菌数量最高,为 104.33×10^3 CFU/g。T3、T4 处理与 CK 有显著差异($P<0.05$),CK、T1、T2、T5 处理间均无显著差异,表明间伐能够增加土壤真菌数量,且当间伐强度为 15%和 20%时,其对土壤真菌数量影响最明显。

表 3 显示,在 0~30 cm 土层,与 CK 相比,各间伐强度下土壤放线菌数量均有增加,其中 T1 处理土壤放线菌数量最高,为 121.00×10^5 CFU/g;其次为 T2 和 T5 处理,土壤放线菌数量分别为 94.00×10^5 , 80.00×10^5 CFU/g。T1 与 CK、T2、T3、T4、T5 处理间有显著差异($P<0.05$),T2、T5 分别与 CK、T3、T4 处理间有显著差异($P<0.05$),CK、T3、T4 处理间均无显著差异。表明间伐能够明显增加土壤放线菌数量,且当间伐强度为 5%时对放线菌数量的影响最为显著。

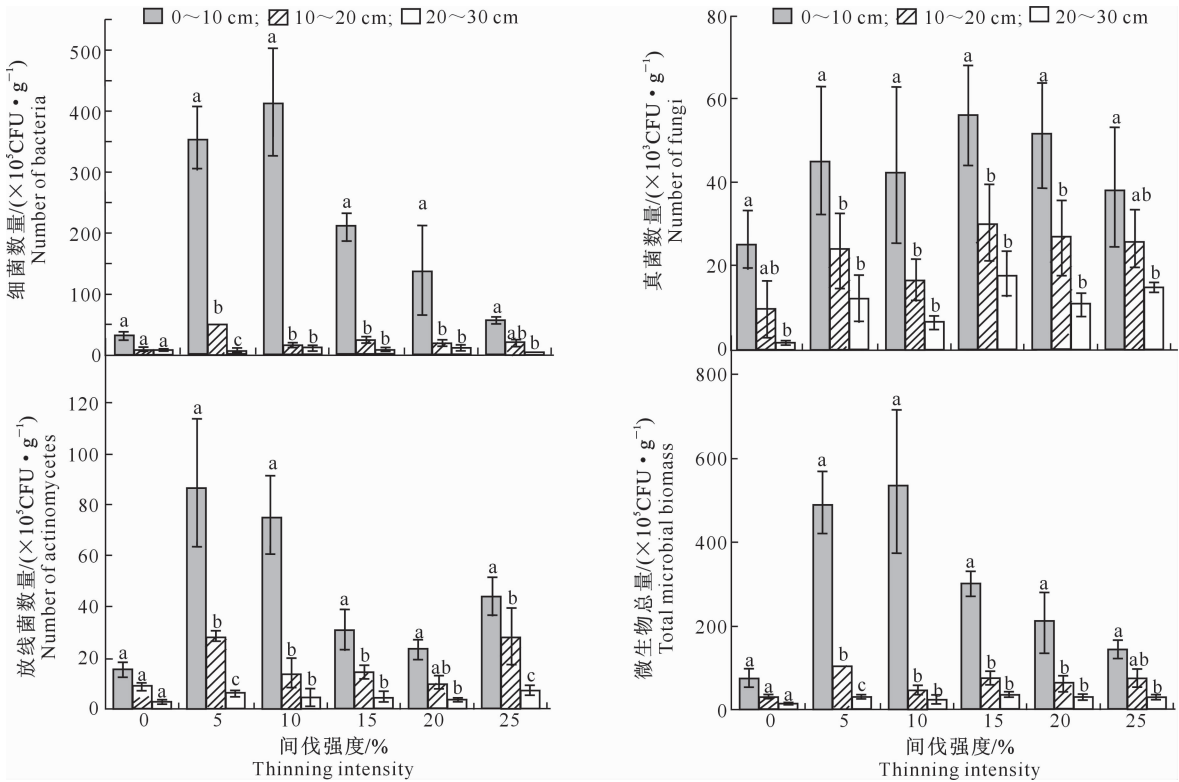


图 5 不同间伐强度下秦岭南坡锐齿栎林各土层土壤的微生物数量

Fig. 5 Microbial quantities in different soil layers of *Quercus aliena* var. *acuteserrata* forest on southern slope of Qinling Mountains under different thinning intensities

表 3 不同间伐强度下秦岭南坡锐齿栎林 0~30 cm 土层土壤微生物数量的变化

Table 3 Changes of soil microbial numbers in 0—30 cm soil layer of *Quercus aliena* var. *acuteserrata* forest on south slope of Qinling Mountains under different thinning intensities

间伐强度/% Thinning intensity	细菌数量/ ($\times 10^5 \text{ CFU} \cdot \text{g}^{-1}$) Number of bacteria	真菌数量/ ($\times 10^3 \text{ CFU} \cdot \text{g}^{-1}$) Number of fungi	放线菌数量/ ($\times 10^5 \text{ CFU} \cdot \text{g}^{-1}$) Number of actinomycetes	微生物总量/ ($\times 10^5 \text{ CFU} \cdot \text{g}^{-1}$) Total microbial biomass
0(CK)	55.00±5.29 a	36.33±28.57 a	26.67±4.16 a	91.70±31.62 a
5 (T1)	416.67±45.06 b	81.33±31.66 ab	121.00±24.64 c	498.81±76.82 c
10 (T2)	442.67±288.77 b	65.33±27.21 ab	94.00±9.17 b	508.65±261.29 c
15 (T3)	249.67±9.29 ab	104.33±19.50 b	50.67±4.16 a	355.04±11.72 bc
20 (T4)	175.00±79.92 a	89.67±25.70 b	37.67±7.09 a	265.56±77.75 ab
25 (T5)	85.00±14.00 a	79.00±26.85 ab	80.00±15.52 b	164.79±34.06 ab

3.3 锐齿栎林土壤腐殖质含量与土壤微生物数量的相关性

表 4 显示,土壤细菌、真菌、放线菌数量均与胡敏酸和胡敏素含量呈极显著正相关关系($P <$

0.01),表明土壤细菌、真菌、放线菌数量对土壤胡敏酸和胡敏素的形成有显著影响;土壤真菌数量与富啡酸含量呈显著正相关关系($P <$ 0.05),表明真菌影响土壤富啡酸的形成。

表 4 不同间伐强度下秦岭南坡锐齿栎林土壤腐殖质含量与土壤微生物数量的相关性

Table 4 Correlation between soil humus and soil microorganisms of *Quercus aliena* var. *acuteserrata* forest on south slope of Qinling Mountains under different thinning intensities

指标 Index	胡敏酸 Humic acid	富啡酸 Fulvic acid	胡敏素 Humin
细菌数量 Number of bacteria	0.389 **	−0.06	0.690 **
真菌数量 Number of fungi	0.613 **	0.328 *	0.706 **
放线菌数量 Number of actinomycetes	0.363 **	0.017	0.669 **

注: ** 表示在 $P < 0.01$ 水平上相关性极显著, * 表示在 $P < 0.05$ 水平上相关性显著。

Note: ** indicates very significant at the level of $P < 0.01$, and * indicates significant at the level of $P < 0.05$.

4 讨 论

土壤微生物可以直接或间接影响土壤腐殖质的合成^[18-21]。本试验结果表明,土壤腐殖质含量与土壤微生物数量之间存在较高的相关性,且不同间伐强度对土壤腐殖质含量和土壤微生物数量的影响不同。

间伐可以通过改善林地内环境条件进一步影响土壤微生物的数量^[7,10,12]。本研究中,较低的间伐强度有利于土壤细菌和放线菌数量的提高,而较高的间伐强度有利于真菌数量的提高,这可能是因为低间伐强度对林地状况改善较小,对土壤养分流动、有机酸释放作用较小,因此土壤 pH 中性偏酸,更适合土壤细菌和放线菌生长繁殖;而较高的间伐强度对林地状况改善明显,促进了土壤有机酸的释放,土壤 pH 值较小,更利于土壤真菌的生长繁殖^[20]。

关于间伐对土壤腐殖质含量的影响,前人的研究结果并不一致。袁喆等^[22]通过对不同间伐强度下川西亚高山人工云杉林土壤有机质的研究表明,林地间伐可以加快土壤有机质分解,促进土壤腐殖质形成。而卢万鹏^[7]认为,整地等营林措施会使土壤腐殖质积累呈下降趋势。本研究中,各间伐强度对土壤腐殖质含量的积累均有影响,当间伐强度为 10% 时,0~30 cm 土层土壤腐殖质含量的平均值最大,当间伐强度为 5% 和 25% 时土壤腐殖质平均含量较低。这可能是因为过低的间伐强度对林分的改善作用不明显,土壤有机物质归还较少,影响土壤腐殖质的积累;而过高的间伐强度虽然对林分的光照、温度等环境因子改善作用明显,可以有效促进土壤有机物质的积累,但林内温度的升高也同时加速了土壤的矿化作用,从而影响到腐殖质的积累。因此,土壤腐殖质含量会随着间伐强度的增加呈现先上升后下降的趋势。

PQ 值是衡量土壤腐殖质品质的重要指标,其值越小,土壤腐殖质稳定性越差^[18]。常庆瑞等^[23]研究表明,秦岭北坡土壤富啡酸含量大于胡敏酸含量,富啡酸游离度较高。干扰也会增加土壤中小分子腐殖物质含量而降低 PQ 值,导致腐殖质整体向着简单化、年轻化发展^[23-25]。本研究结果表明,间伐后生成的腐殖质虽然形成速度加快但稳定性下降。其原因可能是间伐后土壤生态环境变化明显,微生物数量急剧增加,但土壤不能为微生物提供足够的养分,导致微生物无法合成土壤腐殖质所需的一些中间产物(如醌、氨基酸等),腐殖质结构趋于简单,PQ 值

下降^[26-29]。

5 结 论

土壤微生物各种群数量可以显著影响土壤腐殖质各组分的形成,合理的森林抚育间伐可以显著改善林地土壤微生物数量,进而影响腐殖质的合成。综合考虑各项指标,当选择间伐强度为 10%~15% 时,最有利于锐齿栎林地土壤腐殖质的积累。

[参考文献]

- [1] Cruvinel P E, Flocchihi R G, Crestana, et al. Studying the influence of the aggregate sizes on some elements of an oxisol with pixe [J]. Soil Science, 1993, 155(2): 100-104.
- [2] Xu L, Wang C, Zhu J, et al. Latitudinal patterns and influencing factors of soil humic carbon fractions from tropical to temperate forests [J]. Journal of Geography, 2018, 28(1): 15-30.
- [3] 周桂玉, 窦 森, 刘世杰. 生物质炭结构性质及其对土壤有效养分和腐殖质组成的影响 [J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(10): 2075-2080.
Zhou G Y, Dou S, Liu S J. The structural properties of biochar and their effects on the composition of soil available nutrients and humus [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2011, 30(10): 2075-2080.
- [4] Martin-Neto L, Rosell R, Sposito G. Correlation of spectroscopic indicators of humification with mean annual rainfall along a temperate grassland climosequence [J]. Geoderma, 1998, 81(3/4): 305-311.
- [5] 程励励, 文启孝, 阮立山. 母质对形成腐殖质的影响 [J]. 土壤学报, 1987, 24(2): 105-110.
Cheng L L, Wen Q X, Ruan L S. The effect of parent material on the formation of humus [J]. Acta Pedologica Sinica, 1987, 24(2): 105-110.
- [6] 窦 森, 于水强, 张晋京. 不同 CO₂ 浓度对玉米秸秆分解期间土壤腐殖质形成的影响 [J]. 土壤学报, 2007, 44(3): 458-466.
Dou S, Yu S Q, Zhang J J. Effects of different CO₂ concentrations on soil humus formation during decomposition of corn straw [J]. Acta Pedologica Sinica, 2007, 44(3): 458-466.
- [7] 卢万鹏. 桉树人工林土壤腐殖质及其与土壤主要养分的关系 [D]. 南宁: 广西大学, 2015.
Lu W P. *Eucalyptus* plantation soil humus and its relationship with soil nutrients [D]. Nanning: Guangxi University, 2015.
- [8] 贾树海, 王薇薇, 张日升. 不同林型土壤有机碳及腐殖质组成的分布特征 [J]. 水土保持学报, 2017, 31(6): 189-195.
Jia S H, Wang W W, Zhang R S. Distribution characteristics of soil organic carbon and humus composition in different forest types [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2017, 31(6): 189-195.
- [9] Stevenson F J. Humus chemistry: genesis, composition, reactions [J]. Soil Science, 1982, 135(2): 129-130.
- [10] 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):74-85.
- Lü J B, Zhang Q L, Yu N N, et al. Effects of thinning of *Pinus tabulaeformis* and *Larix principis rupprechtii* on soil physical and chemical properties and microorganism [J]. Forestry Resource Management, 2012(4):74-85.
- [11] 张鼎华, 叶章发, 范必有, 等. 抚育间伐对人工林土壤肥力的影响 [J]. 应用生态学报, 2001, 12(5):672-676.
- Zhang D H, Ye Z F, Fan B Y, et al. Effects of thinning on soil fertility in artificial forests [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2001, 12(5):672-676.
- [12] 陈军军, 侯琳, 李银, 等. 秦岭松栎混交林土壤微生物及酶活性 [J]. 东北林业大学学报, 2014(3):103-111.
- Chen J J, Hou L, Li Y, et al. Soil microorganisms and enzyme activities in mixed forest of pine and *Quercus* in Qinling Mountains [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2014(3):103-111.
- [13] 武朋辉, 党坤良, 常伟, 等. 抚育间伐对秦岭南坡锐齿栎天然次生林碳密度的影响 [J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2016, 44(10):75-82.
- Wu P H, Dang K L, Chang W, et al. Effects of thinning on carbon density of *Quercus aliena* var. *acuteserrata* natural secondary forest on the southern slope of Qinling Mountains [J]. Journal of Northwest A&F University(Natural Science Edition), 2016, 44(10):75-82.
- [14] 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(5):64-69.
- Dou Y X, Hou L, Ma H H, et al. Effects of thinning on soil labile organic carbon in pine oak mixed forests [J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2015(5):64-69.
- [15] 吴东梅, 郭剑芬, 张政, 等. DOM 对米槠次生林不同土层土壤微生物呼吸及其熵值的影响 [J]. 生态学报, 2018, 38(11):3806-3815.
- Wu D M, Gou J F, Zhang Z, et al. Effects of DOM on soil microbial respiration and its entropy in different soil layers of *Castanopsis carlesii* secondary forest [J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(11):3806-3815.
- [16] 傅积平. 土壤结合态腐殖质分组测定 [J]. 土壤通报, 1983(2):36-37.
- Fu J P. Soil bound humus grouping determination [J]. Chinese Journal of Soil Science, 1983(2):36-37.
- [17] 韦婧, 宋静, 黄玉娟, 等. 溶解性富里酸对土壤中多环芳烃迁移的影响 [J]. 土壤学报, 2013, 50(2):230-236.
- Wei J, Song J, Huang Y J, et al. Effects of soluble fulvic acid on the migration of polycyclic aromatic hydrocarbons in soil [J]. Acta Pedologica Sinica, 2013, 50(2):230-236.
- [18] 李艳, 窦森, 刘艳丽, 等. 微生物对暗棕壤添加玉米秸秆腐殖化进程的影响 [J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(5):931-939.
- Li Y, Dou S, Liu Y L, et al. Effects of microorganisms on humification of dark brown soil with corn straw [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2016, 35(5):931-939.
- [19] 李艳, 窦森, 尹显宝, 等. 纯培养条件下蓝细菌形成腐殖物质的可能性研究 [J]. 土壤学报, 2016, 53(6):1452-1463.
- Li Y, Dou S, Yin X B, et al. Study on the possibility of formation of humic substances by cyanobacteria in pure culture [J]. Acta Pedologica Sinica, 2016, 53(6):1452-1463.
- [20] 蔡甜, 高士珩, 赵颖, 等. 死亡放线菌细胞对土壤中碱提取物及组分的影响 [J]. 吉林农业大学学报, 2016, 38(4):446-451.
- Cai T, Gao S H, Zhao Y, et al. Effects of actinomycete cells on alkali extracts and components in soil [J]. Journal of Jilin Agricultural University, 2016, 38(4):446-451.
- [21] Gai C, Rej B. Effects of ecological restoration on microbial activity, microbial functional diversity, and soil organic matter in mixed-oak forests of southern Ohio, USA [J]. Applied Soil Ecology, 2007, 35(2):281-290.
- [22] 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. Effects of thinning intensity on soil carbon dioxide and carbon pool management index in subalpine spruce forests in Western Sichuan [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2010, 24(6):127-131.
- [23] 常庆瑞, 雷梅. 秦岭北坡垂直带谱土壤腐殖质特性研究 [J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 1997, 25(4):39-44.
- Chang Q R, Lei M. Characteristics of soil humus in the vertical band of the northern slope of Qinling Mountains [J]. Journal of Northwest A&F University(Natural Science Edition), 1997, 25(4):39-44.
- [24] 彭福泉, 高坤林, 车玉萍. 我国几种土壤中腐殖质性质的研究 [J]. 土壤学报, 1985, 22(1):64-73.
- Peng F Q, Gao K L, Che Y P. Studies on the properties of humus in several soils of China [J]. Acta Pedologica Sinica, 1985, 22(1):64-73.
- [25] McCallister D L, Chien W L. Organic carbon quantity and forms as influenced by tillage and cropping sequence. [J]. Communications in Soil Science & Plant Analysis, 2000, 31(3/4):465-479.
- [26] 吕家珑, 张一平, 王旭东, 等. 长期单施化肥对土壤性状及作物产量的影响 [J]. 应用生态学报, 2001, 12(4):569-572.
- Lü J L, Zhang Y P, Wang X D, et al. Effects of long-term single application of chemical fertilizers on soil properties and crop yields [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2001, 12(4):569-572.
- [27] 张晓曦, 刘增文, 祁源皓, 等. 内蒙半干旱低山区不同纯林土壤腐殖质分异特征及其与其他生物化学性质的关系 [J]. 应用生态学报, 2014, 25(10):2819-2825.
- Zhang X X, Liu Z W, Yuan Y H, et al. The characteristics of soil humus differentiation and their relationship with other biochemical properties in different pure forests of semi-arid and low mountains in Inner Mongolia [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2014, 25(10):2819-2825.

99.

[15] 庞圣江,张 培,马 跃,等. 白木香容器苗基质配比与缓释肥施用量的生长效应 [J]. 东北林业大学学报,2018,46(11):14-17.

Pang S J,Zhang P,Ma Y,et al. Effect of substrate ratio and slow-release fertilizer dose on the growth of containerized *Aquilaria sinensis* seedlings [J]. Journal of Northeast Forestry University,2018,46(11):14-17.

[16] 刘志贤,莫罗坚,欧 薇,等. 林下套种对土沉香生长及黄野螟危害的影响分析 [J]. 南方林业科学,2018,46(2):39-41.

Liu Z X,Mo L J,Ou W,et al. Effect of underforest intercropping on growth of *Aquilaria sinensis* and pest occurrence of *Heortia vitessoides* [J]. South China Forestry Science,2018,46(2):39-41.

[17] 田耀华,原慧芳,倪书邦,等. 沉香属植物研究进展 [J]. 热带亚热带植物学报,2009,17(1):98-104.

Tian Y H,Yuan H F,Ni S B,et al. Advances in studies on endangered *Aquilaria* plant [J]. Journal of Tropical and Subtropical Botany,2009,17(1):98-104.

[18] 张 浩,庄雪影,黄永芳,等. 华南乡土树种在松杉林下生长及林下植物多样性研究 [J]. 林业科学研究,2008,21(2):139-144.

Zhang H,Zhuang X Y,Huang Y F,et al. Growth of some native broad-leaved trees and plant diversity in the coniferous plantation of south China [J]. Forest Research,2008,21(2):139-144.

[19] Zhu J J,Matsuzaki T,Lee F,et al. Effect of gap size created by thinning on seedling emergency, survival and establishment in a coastal pine forest [J]. Forest Ecology and Management,2003,182(1):339-354.

[20] 朱凯月,王庆成,吴文娟. 林隙大小对蒙古栎和水曲柳人工更新幼树生长和形态的影响 [J]. 林业科学,2017,53(4):150-157.

Zhu K Y,Wang Q C,Wu W J. Effect of gap size on growth and morphology of transplanted saplings of *Quercus mongolica* and *Fraxinus mandshurica* [J]. Scientia Silvae Sinicae,2017,53(4):150-157.

[21] 袁莲珍,史富强,侯云萍,等. 遮光度对白木香种子萌发和幼苗生长的影响 [J]. 福建林业科技,2015,42(3):110-112.

Yuan L Z,Shi F Q,Hou Y P,et al. Study on the effects of shading on seed germination and seedling growth of *Aquilaria sinensis* (Lour.) Glg [J]. Journal of Fujian Forestry Sci and Tech,2015,42(3):110-112.

[22] 原慧芳,魏丽萍,田耀华,等. 遮阴处理对土沉香幼苗生长和叶片解剖特征的影响 [J]. 浙江农业学报,2013,25(4):747-752.

Yuan H F,Wei L P,Tian Y H,et al. Effects of shading on seedling growth and leaf anatomical characteristics of *Aquilaria sinensis* [J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis,2013,25(4):747-752.

[23] Przemyslaw P,Pierre B R. Constraints of space in plant development [J]. Journal of Experimental Botany,2010,61(8):2117-2129.

[24] 余碧云,张文辉,何 婷,等. 秦岭南坡林窗大小对栓皮栎实生苗构型的影响 [J]. 应用生态学报,2014,25(12):3399-3406.

Yu B Y,Zhang W H,He T,et al. Effects of forest gap size on the architecture of *Quercus variabilis* seedlings on the south slope of Qinling Mountains, West China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2014,25(12):3399-3406.

[25] 李 罡,张文辉,于世川,等. 辽东栎林内不同小生境下幼树植冠构型分析 [J]. 西北植物学报,2016,6(3):588-595.

Li G,Zhang W H,Yu S C,et al. Architectural analysis of crown geometry of saplings of *Quercus liaotungensis* forest in different habitats [J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica,2016,6(3):588-595.

(上接第 82 页)

[28] 苏芳莉,刘明国,谭学仁,等. 不同间伐强度天然次生林凋落物性质的研究 [J]. 辽宁林业科技,2007(2):1-3.

Su F L,Liu M G,Tan X R,et al. Study on litter properties of natural secondary forests with different thinning intensities [J]. Liaoning Forestry Science and Technology,2007(2):1-3.

[29] 来航线,程丽娟,王中科. 几种微生物对土壤腐殖质形成的作用 [J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版),1997,25(6):79-82.

Lai H X,Cheng L J,Wang Z K. Effects of several microorganisms on soil humus formation [J]. Journal of Northwest A&F University(Natural Science Edition),1997,25(6):79-82.