

间伐强度对辽东落叶松人工林土壤理化性质的影响

马芳芳^{1,2} 贾翔³ 赵卫⁴ 周旺明¹ 周莉^{1*} 于大炮¹ 吴志军⁵ 代力民¹

(¹中国科学院沈阳应用生态研究所, 沈阳 110016; ²中国科学院大学, 北京 100049; ³长白山科学研究所, 吉林二道白河 133613; ⁴环境保护部南京环境科学研究所, 南京 210042; ⁵辽宁工程技术大学, 辽宁阜新 123000)

摘要 以辽东山区日本落叶松 (*Larix kaempferi*) 人工林为研究对象, 采集不同间伐强度 (对照、20%、30% 和 40%) 落叶松林的 0~10 cm (表层) 和 10~20 cm (下层) 土壤, 研究不同间伐强度处理 5 年后落叶松林土壤理化性质的变化特征。结果表明, 间伐 5 年后, 各间伐强度落叶松林土壤容重、总孔隙度、毛管孔隙度、全碳、全氮、C : N、N : P 以及 NO₃⁻-N 含量与对照之间差异性均不显著, 但高强度间伐 (40% 强度) 处理的落叶松林表层土壤田间持水量、全碳、全氮、N : P 及活性碳含量显著高于中度和强度间伐处理, 且高强度间伐处理更有利于大径材培育。因此, 对于辽东山区日本落叶松人工林经营管理, 其间伐强度为 40% 时更合理。

关键词 落叶松; 间伐; 土壤养分; 辽东山区

Effects of thinning intensity on soil physicochemical properties of *Larix kaempferi* plantation in eastern Liaoning Province. MA Fang-fang^{1,2}, JIA Xiang³, ZHAO Wei⁴, ZHOU Wang-ming¹, ZHOU Li^{1*}, YU Da-pao¹, WU Zhi-jun⁵, DAI Li-min¹ (¹*Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China*; ²*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*; ³*Changbai Mountain Academy of Sciences, Erdaobaihe 133613, Jilin, China*; ⁴*Nanjing Institute of Environmental Sciences, Ministry of Environmental Protection, Nanjing 210042, China*; ⁵*Liaoning Technical University, Fuxin 123000, Liaoning, China*).

Abstract: The present study investigated the response of soil physical and chemical properties of the larch (*Larix kaempferi*) plantation to thinning intensity after five years in eastern mountainous area of Liaoning Province, through collecting soil sample from the topsoil (0–10 cm) and subsoil (10–20 cm) along a thinning gradient (CK, 20%, 30% and 40%). The results indicated that there were no significant variations in the soil bulk density, total porosity, capillary porosity, total C content, total N content, C : N, N : P, and NO₃⁻-N content under different thinning intensities, compared to the CK treatment. However, the soil water-holding capacity, total C content, total N content, N : P, and active carbon content in the topsoil (0–10 cm) under the 40% thinning intensity were significantly higher than under the other two thinning intensities. Furthermore, 40% thinning intensity was beneficial to obtaining the large-diameter wood. Therefore, the 40% thinning intensity was preferable to the management of the larch plantations in the eastern mountainous area of Liaoning Province.

Key words: *Larix kaempferi*; thinning; soil nutrient; eastern mountainous area of Liaoning Province.

落叶松(*Larix kaempferi*)具有生长速度快、抗性强以及材质优良等特点,使其作为一种重要的商业用材树种在东北地区广泛种植(刘足根等,2007;朱教君等,2008),到 20 世纪 70 年代末,落叶松林已成为东北地区人工林的主体(梅莉等,2009)。但由于造林树种单一及林分结构简单,导致落叶松人工林物种多样性低下以及由密度过高引发的地力衰退等土壤质量问题日益明显(杨凯等,2009;Yang *et al.*, 2010;杨晓娟等,2013),直接影响了落叶松人工林的结构稳定和可持续发展。因此,通过合理调控落叶松人工林的结构来提高林分综合效益,已经成为当前落叶松人工林经营的重要研究内容(成向荣等, 2010)。

抚育间伐是调整林分结构的一项重要经营措施,合理的间伐对于促进人工纯林向复层异龄林或高效林农复合经营发展具有积极意义(沈国舫, 2001)。目前关于抚育间伐效果对人工林影响的研究有林分群落物种多样性(柏广新等,2011)、林分群落组成和结构(Crow *et al.*, 2002;曹云等,2005)、林分生物量及生产力(Karlsson *et al.*, 2002)以及凋落物基质物质分解速率等方面(李国雷等,2008)。此外,间伐可以通过改变林分密度、物种组成及林内生境小气候条件等林分因子,影响土壤的肥力状况,进而提高土壤立地质量(张鼎华等,2001;Sullivan *et al.*, 2002;Slodick *et al.*, 2005)。本研究以辽东山区 20 年生日本落叶松人工林为研究对象,研究不同抚育间伐强度对日本落叶松人工林凋落物及土壤理化性质的影响,为辽东山区日本落叶松人工林的合理经营提供科学指导。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于辽宁东部本溪市清原满族自治县草河口镇境内的辽宁省森林经营研究所实验林场(123°34'53"E— 125° 45' 42" E, 40° 48' 50" N—

41°33'50"N),海拔 200~600 m,属于低山丘陵。植物区系属长白植物区系,土壤以暗棕色森林土为主,其次为棕色森林土,也有少部分黑土和灰化土。年平均气温 6.1℃,最冷月(1 月)平均气温-12.5℃,最热月(7 月)平均气温 22.2℃,年蒸发量 1117.3 mm,年降水量 926.3 mm(田杰等,2012)。

1.2 样地设置

根据日本落叶松速生丰产林造林标准(LY/T 1058—2013),辽东地区日本落叶松人工造林密度为 2 m×2 m。参考辽宁省日本、长白落叶松速生丰产大径木林培育技术规程地方标准(DB21/T 1724—2009),抚育对象是同龄单层日本落叶松人工林,所以采取下层抚育法,间伐强度为中度间伐(间伐强度为 20%),清除非目的树种,并进行局部清场后,人工更新目的树种 1500~2400 株·hm⁻²。2010 年在研究区域选择林龄为 15 年、生长状况、立地条件及管理措施相一致的日本落叶松人工林,进行对照(没有进行间伐)、中度间伐(间伐掉总株数的 20%~30%,林分郁闭度在 0.7~0.8)、强度间伐(间伐掉总株数的 30%~40%,林分郁闭度在 0.6~0.7)和高强度间伐(间伐掉总株数的 40%~50%,林分郁闭度在 0.5~0.6)。2015 年 6 月在各间伐强度落叶松人工林内分别设置实验样地,每个样地设置 3 个重复,重复样地间距不少于 10 m,样地大小为 20 m×20 m,共设置调查样地 12 块(表 1)。2014 年 4 月—2015 年 5 月,在每块处理选取一块样地,利用美国 Onset HOBO 仪器监测每个处理 5 cm 土壤温度(每小时记录一次)。

1.3 样品的采集

在每个样地内随机选取 4 个大小为 20 cm×20 cm 的采样点,分别收集其凋落物,并采集 0~10 和 10~20 cm 的土壤样品,同一块地同一深度的土壤样品混合成一个样,样品装入自封袋后马上带回实验室。将带回实验室的新鲜土样分成两部分,一部分风干用于土壤理化性质的测定,另一部分保存于 4℃

表 1 不同间伐强度落叶松林样地基本概况
Table 1 Basic situation of the sampling plots of different thinning intensities

间伐强度	林龄(a)	平均胸径(cm)	坡向	密度(株·hm ⁻²)	凋落物量(t·hm ⁻²)	pH
CK	20	12.18±3.33 a	西南	1429~1619	6.43~14.65	5.46±0.22 a
MF	20	13.87±3.28 b	西南	1248~1482	3.78~15.31	5.53±0.12 a
SF	20	13.81±3.13 b	西南	960~1140	4.90~14.15	5.49±0.27 a
ESF	20	14.31±3.20 b	西南	672~798	7.63~13.70	5.49±0.27 a

CK.对照林分,MF.中度间伐落叶松林,SF.强度间伐落叶松林,ESF.高强度间伐落叶松林;不同小写字母代表不同间伐强度落叶松林之间差异性显著。下同。

的冰箱内,用于测定土壤活性有机碳(MBC/DOC)和矿质氮(NH₄⁺-N和NO₃⁻-N)含量。同时,土壤容重采用环刀法进行测定。采集的凋落物则直接磨碎过0.149 mm筛,进行全碳/全氮含量的测定。

1.4 分析方法

土壤基本的理化性质采用常规方法(鲁如坤,2000)测定。土壤pH值的测量选用上海雷磁PHS-3C型pH计测定;总有机碳(total organic carbon)、全氮(total nitrogen)的测量选用全自动分析仪vario MACRO cube测定;全磷采用浓H₂SO₄消煮-钼锑抗比色法测定;土壤微生物生物量碳(MBC)的测定采用氯仿熏蒸法(Vance *et al.*,1987;吴金水等,2004);可溶性有机碳含量(DOC)的测定采用K₂SO₄溶液浸提过0.45 μm的滤膜后,用DOC仪进行测定;土壤无机氮(NH₄⁺-N和NO₃⁻-N)含量的测定采用KCl溶液提取法测定。

其中土壤微生物生物量碳(MBC)含量以熏蒸和未熏蒸提取液中有机碳的差值乘以转换系数K_{EC}(0.38)计算得到(Vance *et al.*,1987),计算公式为:

$$MBC=E_c/K_{EC}$$

式中:E_c表示熏蒸与未熏蒸土样有机碳量的差值;K_{EC}为转换系数,取值0.38。

1.5 数据处理

数据经Excel 2007整理后,利用SPSS 19.0软件进行统计分析,测定结果取平均值,差异显著性检验采用LSD法,显著性水平设定为α=0.05,制图采用Origin 8.5软件。

2 结果与分析

2.1 土壤物理性质

不同处理的10~20 cm土壤容重高于0~10 cm土层的土壤容重,除未间伐林分的0~10和10~20

cm土层的土壤容重差异显著外,各间伐强度的0~10和10~20 cm土层的土壤容重差异不大(表2)。与对照处理相比,高强度间伐处理的0~10 cm土层土壤的毛管孔隙度增大,其余间伐强度落叶松林的两土层土壤的毛管孔隙度均减小,但差异性不显著;强度间伐落叶松林0~10 cm土层、中度和高强度间伐落叶松林10~20 cm土层土壤的非毛管孔隙度均显著高于对照林分的非毛管孔隙度,且强度间伐的非毛管孔隙度与中度和高强度间伐的非毛管孔隙度均表现出显著性差异;高强度间伐落叶松林0~10 cm土层土壤的田间持水量显著高于对照林分,中度和强度间伐落叶松林0~10 cm土层土壤的田间持水量显著低于对照林分。

2.2 土壤总碳、总氮、总磷特征

2.2.1 土壤总碳、总氮、总磷含量 除中度间伐落叶松林两土层土壤碳、氮含量差异性不显著外,其余间伐强度落叶松林0~10 cm土层土壤碳、氮含量均显著高于10~20 cm土层土壤;随着间伐强度的增大,土壤碳、氮含量大致呈增加的趋势,不同间伐处理与对照处理之间差异未达到显著性,但高强度间伐落叶松林0~10 cm土层土壤碳、氮含量均显著高于中、强度间伐落叶松林0~10 cm土层土壤的碳、氮含量(图1)。各间伐强度落叶松林两土层土壤全磷含量差异性显著,且随着间伐强度的增大,土壤全磷含量呈现出先增加后减少再增加的趋势,其中强度间伐落叶松林0~10 cm土层土壤全磷含量与其余间伐强度落叶松林之间差异性显著,中度间伐落叶松林10~20 cm土层土壤全磷含量与强度间伐落叶松林及对照林分之间差异性显著,与高强度间伐落叶松林之间差异性不显著(图1)。

2.2.2 土壤C:N、N:P化学计量学特征 间伐5年后,高强度间伐落叶松林两土层土壤C:N、N:P

表2 不同间伐强度落叶松人工林的土壤物理性质
Table 2 Soil physical properties of different thinning intensities

土层厚度 (cm)	森林 类型	容重 (g·cm ⁻³)	总孔隙度 (%)	毛管孔隙度 (%)	非毛管孔隙度 (%)	田间持水量 (%)
0~10	CK	1.10±0.07 Ba	54.14±3.30 Aa	37.91±1.08 Aab	16.23±2.22 Ab	72.96±3.57 Ab
	MF	1.22±0.09 Aa	52.64±2.47 Aa	35.55±1.56 Ab	17.09±0.88 Ab	64.76±6.36 Ac
	SF	1.26±0.06 Aa	58.54±2.81 Aa	29.66±2.37 Bb	28.88±0.44 Aa	61.96±4.44 Ac
	ESF	1.10±0.10 Aa	58.52±3.56 Aa	43.37±4.35 Aa	15.14±0.80 Ab	80.98±4.82 Aa
10~20	CK	1.42±0.03 Aa	48.68±0.33 Aa	37.66±1.19 Aa	11.03±0.86 Ac	60.91±7.83 Ba
	MF	1.36±0.01 Aa	54.30±1.89 Aa	33.92±2.90 Aa	20.38±1.01 Aa	59.98±5.90 Aa
	SF	1.21±0.05 Aa	46.55±1.00 Ba	35.88±2.78 Aa	10.67±1.78 Bc	57.35±5.33 Aa
	ESF	1.29±0.20 Aa	51.20±7.59 Aa	35.19±5.84 Aa	16.02±1.74 Ab	62.11±9.07 Ba

小写字母代表不同间伐强度落叶松林之间差异性显著,大写字母代表同一林型不同土层之间差异性显著。下同。

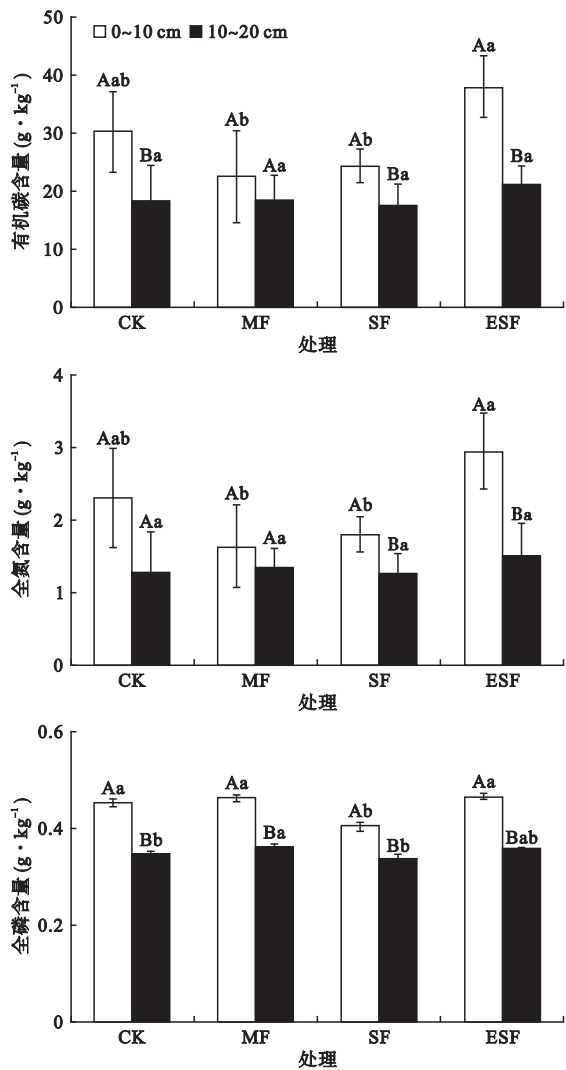


图 1 不同间伐强度落叶松人工林土壤养分含量
Fig.1 Soil nutrient content of *Larix kaempferi* plantations in different thinning intensities

之间差异性显著,中度和强度间伐落叶松林两土层土壤 C : N、N : P 之间差异性均不显著。各间伐强度落叶松林土壤 C : N、N : P 与对照林分之间均未表现出显著性差异,但是随着间伐强度的增大,各间伐林地土壤 N : P 呈现出逐渐增大的趋势,而且高强度间伐落叶松林 0~10 cm 土层土壤 N : P 显著高于中度间伐落叶松林、强度间伐落叶松林 0~10 cm 土层土壤 N : P (图 2)。

2.3 土壤 MBC/DOC 含量特征

间伐 5 年后,各间伐强度落叶松林两土层土壤 MBC 含量差异性显著。与对照相比,中度间伐落叶松林和强度间伐落叶松林的 0~10 cm 土壤 MBC/DOC 含量显著降低,高强度间伐落叶松林土壤 MBC/DOC 含量均提高;此外,高强度间伐落叶松林

土壤 MBC/DOC 含量显著高于中度和强度间伐落叶松林;在 10~20 cm 土层,高强度间伐土壤 MBC 含量显著低于对照林分 (图 3)。

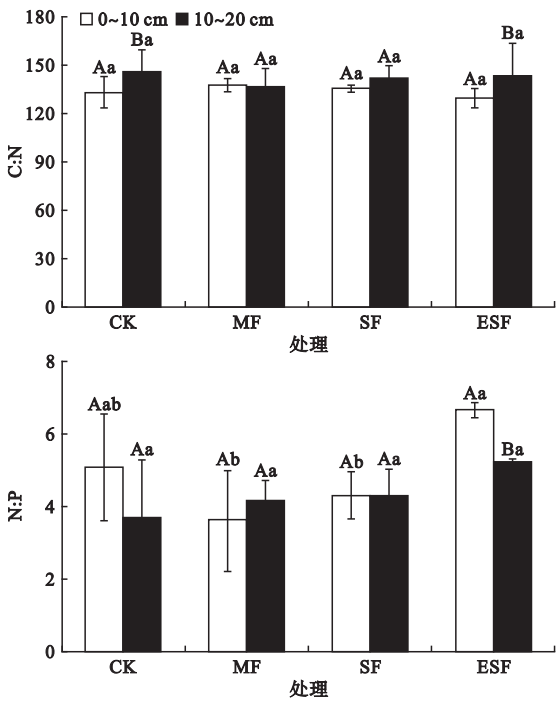


图 2 不同间伐强度落叶松人工林土壤碳氮比和氮磷比
Fig.2 Soil C : N, N : P of *Larix kaempferi* plantations in different thinning intensities

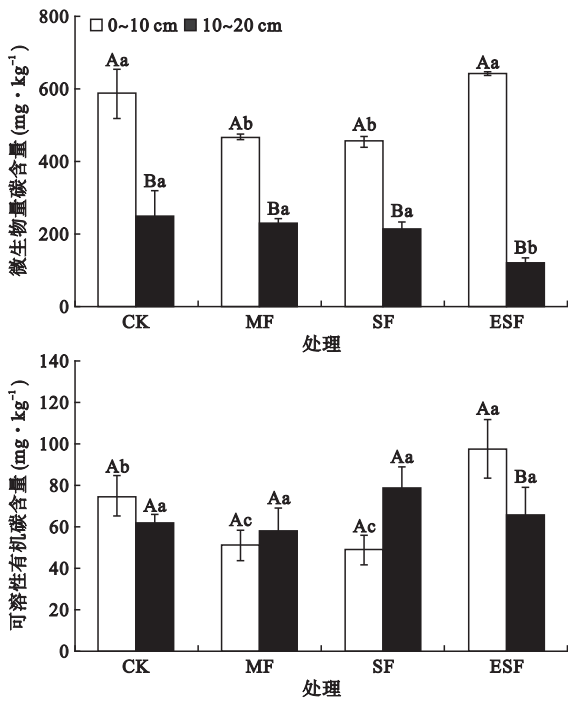


图 3 不同间伐强度落叶松人工林土壤 MBC 和 DOC 含量
Fig.3 Soil microbial biomass carbon and dissolved organic carbon content of *Larix kaempferi* plantations in different thinning intensities

2.4 土壤无机氮(NH₄⁺-N/NO₃⁻-N)含量特征

各间伐强度落叶松林两土层土壤 NH₄⁺-N/NO₃⁻-N 含量之间差异性均不显著。在 0~10 cm 土层,高强度间伐落叶松林土壤 NH₄⁺-N 含量与对照林分之间差异性显著,高强度间伐落叶松林土壤 NO₃⁻-N 含量显著高于中度间伐落叶松林和强度间伐落叶松林,但各间伐强度落叶松林土壤 NO₃⁻-N 含量与对照林分之间差异性均不显著;在 10~20 cm 土层,高强度间伐落叶松林土壤 NH₄⁺-N 含量与对照林分之间差异性显著,各间伐强度落叶松林土壤 NO₃⁻-N 含量与对照林分之间差异性均不显著(图 4)。

3 讨论

3.1 间伐对土壤物理性质的影响

土壤容重由于其对土壤紧实度的强敏感性,使其成为指示土壤质量的一个重要参数(李国雷等,2008)。本研究,各强度间伐落叶松人工林表土层(0~10 cm)、下土层(10~20 cm)土壤容重均与对照林分无显著差异(表 2),这可能是由于间伐处理的时间较短,间伐处理对土壤紧实度的影响还不明显(赵朝辉等,2012)。随着间伐强度的增大,土壤田间持水量呈现波动式变化,表现为高强度间伐落叶松林>对照林分>中度间伐落叶松林>强度间伐落叶松林,且各处理表土层田间持水量差异性显著(表 2),这主要是由于在间伐强度为高强度时林木长势较好、林下植被较为丰富,使得土壤更为疏松,可以储存较多的水分,使得高强度间伐落叶松林土壤持水供水能力优于未间伐林分(李旭等,2015)。因此,适宜的间伐强度会改善土壤物理性质。

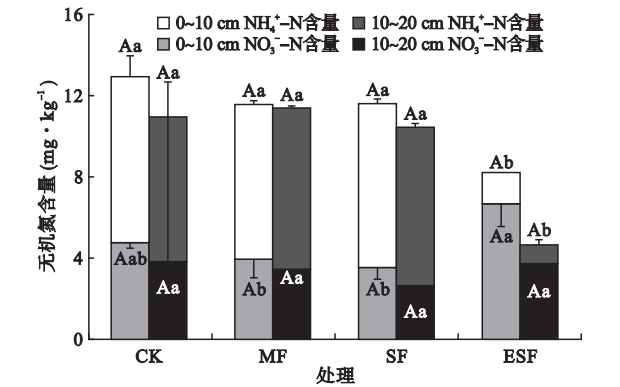


图 4 不同间伐强度落叶松人工林土壤矿质氮(NH₄⁺-N+NO₃⁻-N)含量
Fig.4 Soil mineral nitrogen content of *Larix kaempferi* plantations in different thinning intensities

3.2 间伐对土壤 C、N、P 含量的影响

土壤中 C、N、P 是土壤化学性质的重要组成部分,能够敏感地指示土壤质量的变化(曾凡鹏等,2016)。本研究中,高强度间伐落叶松林表层土壤碳、氮含量与其他间伐处理的落叶松林之间差异性显著,各间伐强度落叶松林土壤碳、氮含量与对照林分之间差异性均不显著。这是由于土壤中的有机碳主要来自凋落物,在间伐强度为中度和强度时,降低了土壤外源有机物质的输入,促进了土壤有机碳的矿化,增加了可溶性有机碳的淋溶,从而导致土壤有机碳含量降低(冯瑞芳等,2006)。而在高强度间伐处理的落叶松林,其林内的水热条件较好(图 5),有利于提高林地残留凋落物的分解速率,使得因采伐引起的有机物输入量减少得到有效缓解;此外,间伐后林下植物多样性增加也有利于提高森林土壤有机质含量(Trettin et al.,2011)。由于氮素主要来源于有机质的转化,因此土壤全氮含量变化规律与有机质的一致。本研究中,除强度间伐落叶松林土壤全磷含量显著低于未间伐林分外,中度和高强度间伐落叶松林土壤全磷含量与未间伐林分之间差异性均不显著,这可能是强度间伐有利于林下植被生物多样性的增加,而增加的植被物种对土壤全磷含量的需求量高所导致的(李旭等,2015)。

土壤 C : N 是指示土壤质量的重要指标(孟莹莹等,2014)。本研究中,不同间伐强度落叶松林土壤 C : N 之间无显著性差异,这可能主要是与这 4 种不同间伐强度落叶松林凋落物的输入量之间无显著性差异有关(表 1)。在多数生态系统中,土壤氮和磷作为限制植物生长的重要养分因子,使土壤

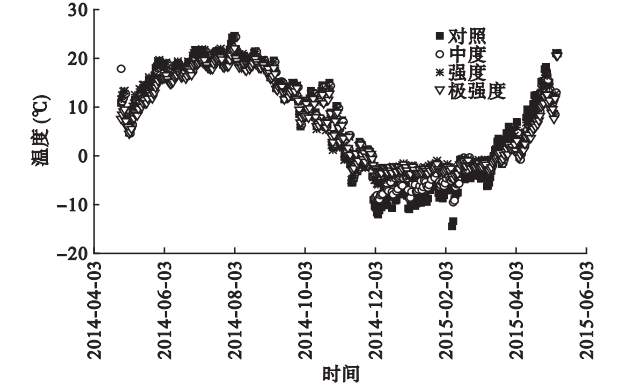


图 5 不同处理 5 cm 土壤温度季节变化
Fig.5 Seasonal variation of soil temperature at 5 cm in different treatments

N:P成为决定群落结构和功能的关键性指标(Elser *et al.*, 2000; 阎恩荣等, 2008)。研究显示, 当植被的N:P含量>16时, 表明植被生产力主要受磷素限制, 而<14时, 表明植物生长受氮素限制作用的程度更大, 介于两者之间表明植被生产力受到氮磷素的共同限制作用(Tessier *et al.*, 2003)。本研究中, 土壤和植被N:P均<14, 说明该林分生产力主要受氮素限制。

3.3 间伐对土壤活性碳/氮含量的影响

土壤活性有机碳虽然只占土壤有机碳总量很小的一部分, 但由于其可以敏感地反映土地管理措施等人为干扰活动所引起的土壤的微小变化(Haynes, 2005), 使其成为指示土壤质量变化的关键性指标(成向荣等, 2014)。本研究显示, 与对照相比, 高强度间伐处理显著提高了0~10 cm土壤DOC含量, 且两土层土壤活性有机碳含量之间差异性显著(图3), 主要是由于间伐降低了林分郁闭度, 增加了林地地表光照, 使土壤温度升高(图5), 为微生物分解有机质提供了一个更加适宜的环境, 且间伐增加了林分下层草、灌木的种类和数量(雷相东等, 2005), 土壤表层根系密度和微生物数量均高于下层, 促进了地上、地下凋落物的分解(傅民杰等, 2009)。而中度和强度间伐相比对照均显著降低了0~10 cm土层土壤MBC/DOC含量, 这可能是因其间伐强度较低, 对地表各方面影响相对有限所致。

本研究中, 高强度间伐落叶松林土壤 NO_3^- -N含量明显高于 NH_4^+ -N含量, 这与傅民杰等(2009)的研究结果一致, 而且相比对照处理, 高强度间伐后林分土壤总无机氮(NH_4^+ -N+ NO_3^- -N)含量显著降低, 这主要是由于高强度间伐极大地改善了林分环境条件, 使得土壤微生物活性增强, 进一步加强了土壤微生物对土壤氮素的固持所致(匡兴建等, 2013); 中度和强度间伐落叶松林土壤 NH_4^+ -N含量明显高于 NO_3^- -N含量, 这可能是由于落叶松林为酸性土壤(表2), 而酸性土壤不利于硝化作用的进行, 土壤硝化细菌活动的pH值在8左右, 低pH值降低了有机质的可溶性, 限制了硝化细菌的生长, 从而抑制了土壤硝化作用的进行, 使得 NH_4^+ -N含量高于 NO_3^- -N含量(徐宪根等, 2009)。

4 结 论

间伐5年后, 高强度间伐落叶松林表层土壤田间持水量显著高于对照样地; 高强度间伐落叶松林

表层土壤碳、氮含量、氮磷比及活性碳含量显著高于中度和强度间伐落叶松林; 此外, 高强度间伐显著降低了土壤 NH_4^+ -N含量, 增加了土壤 NO_3^- -N含量。综合考虑木材生产和土壤理化性质两方面因素, 从不同间伐处理结果的短期效果来看, 辽东山区日本落叶松间伐强度为40%时更合理。

致谢 感谢两位审稿专家提出的建设性建议和 Tohoku University 王庆伟博士对英文摘要的修改。

参考文献

- 柏广新, 张命军. 2011. 不同抚育间伐强度对长白山硬阔叶林林下植物多样性的影响. 东北林业大学学报, **39**(12): 27-29.
- 曹云, 杨劼, 宋炳煜, 等. 2005. 人工抚育措施对油松林生长及结构特征的影响. 应用生态学报, **16**(3): 397-402.
- 成向荣, 冯利, 虞木奎, 等. 2010. 间伐对生态公益林冠层结构及土壤养分的影响. 生态环境学报, **19**(2): 355-359.
- 成向荣, 袁建军, 刘佳, 等. 2014. 间伐对杉木人工林土壤酶和活性有机碳的短期影响. 中国农学通报, **30**(4): 17-22.
- 冯瑞芳, 杨万勤, 张健. 2006. 人工林经营与全球变化减缓. 生态学报, **26**(11): 3870-3877.
- 傅民杰, 王传宽, 王颖, 等. 2009. 四种温带森林土壤氮矿化与硝化时空格局. 生态学报, **29**(7): 3747-3758.
- 雷相东, 陆元昌, 张会儒, 等. 2005. 抚育间伐对落叶松云冷杉林混交林的影响. 林业科学, **41**(4): 78-85.
- 李国雷, 刘勇, 李瑞生, 等. 2008. 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. 北京林业大学学报, **30**(5): 52-57.
- 李旭, 王海燕, 杨晓娟, 等. 2015. 东北近天然落叶松云冷杉林不同间伐强度土壤肥力研究. 西北林学院学报, **30**(2): 1-7.
- 刘足根, 朱教君, 袁小兰, 等. 2007. 辽东山区长白落叶松种子雨和种子库. 生态学报, **27**(2): 579-587.
- 鲁如坤. 2000. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社.
- 梅莉, 张卓文, 谷加存, 等. 2009. 水曲柳和落叶松人工林乔木层碳、氮储量及分配. 应用生态学报, **20**(8): 1791-1796.
- 孟莹莹, 包也, 郭焱, 等. 2014. 长白山风倒区自然恢复26年后土壤碳、氮含量特征. 生态学杂志, **33**(7): 1757-1761.
- 沈国舫. 2001. 森林培育学. 北京: 中国林业出版社.
- 田杰, 于大炮, 周莉, 等. 2012. 辽东山区典型森林生态系统碳密度. 生态学杂志, **31**(11): 2723-2729.
- 匡兴建, 曲宏辉, 田野, 等. 2013. 间伐对长江滩地杨树人工林土壤有效氮素的影响. 南京林业大学学报: 自然科学版, **37**(4): 45-49.
- 吴金水, 肖和艾. 2004. 土壤微生物生物量碳的表现周转时

- 间测定方法. 土壤学报, **41**(3): 401-406.
- 徐宪根, 周 焱, 阮宏华, 等. 2009. 武夷山不同海拔高度土壤氮矿化对温度变化的响应. 生态学杂志, **28**(7): 1298-1302.
- 阎恩荣, 王希华, 周 武, 等. 2008. 天童常绿阔叶林不同退化群落的凋落物特征及与土壤养分动态的关系. 植物生态学报, **32**(1): 1-12.
- 杨 凯, 朱教君, 张金鑫, 等. 2009. 不同林龄落叶松人工林土壤微生物生物量碳氮的季节变化. 生态学报, **29**(10): 5500-5507.
- 杨晓娟, 王海燕, 刘 玲, 等. 2013. 不同林龄长白落叶松人工林土壤肥力. 东北林业大学学报, **41**(3): 51-56.
- 曾凡鹏, 迟光宇, 陈 欣, 等. 2016. 辽东山区不同林龄落叶松人工林土壤-根系 C:N:P 生态化学计量特征. 生态学杂志, **35**(7): 1819-1825.
- 张鼎华, 叶章发, 范必有, 等. 2001. 抚育间伐对人工林土壤肥力的影响. 应用生态学报, **12**(5): 672-676.
- 赵朝辉, 方 晰, 田大伦, 等. 2012. 间伐对杉木林林下地被物生物量及土壤理化性质的影响. 中南林业大学学报, **32**(5): 102-107.
- 朱教君, 刘足根, 王贺新. 2008. 辽东山区长白落叶松人工林天然更新障碍分析. 应用生态学报, **19**(4): 695-703.
- Crow TR, Buckley DS, Nauertz EA, *et al.* 2002. Effects of management on the composition and structure of northern hardwood forests in Upper Michigan. *Forest Science*, **48**: 129-145.
- Elser JJ, Fagan WF, Denno RF, *et al.* 2000. Nutritional constraints in terrestrial and freshwater food webs. *Nature*, **408**: 578-580.
- Haynes RJ. 2005. Labile organic matter fractions as central components of the quality of agriculture soils: An overview. *Advanced in Agronomy*, **85**: 221-268.
- Karlsson A, Albrektson A, Elfving B, *et al.* 2002. Development of *Pinus sylvestris* main stems following three different pre-commercial thinning methods in a mixed stand. *Scandinavian Journal of Forest Research*, **17**: 256-262.
- Slodicak M, Novak J, Skovsoard JP. 2005. Wood production, litter fall and humus accumulation in a Czech thinning experiment in Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.). *Forest Ecology and Management*, **209**: 157-166.
- Sullivan TP, Sullivan DS, Lindgren PMF, *et al.* 2002. Influence of conventional and chemical thinning on stand structure and diversity of plant and mammal communities in young lodgepole pine forest. *Forest Ecology and Management*, **170**: 173-187.
- Tessier JT, Raynal DJ. 2003. Use of nitrogen to phosphorus ratios in plant tissue as an indicator of nutrient limitation and nitrogen saturation. *Journal of Applied Ecology*, **40**: 523-534.
- Trettin CC, Jurgensen MF, Gale MR, *et al.* 2011. Recovery of carbon and nutrient pools in a northern forested wetland 11 years after harvesting and site preparation. *Forest Ecology and Management*, **262**: 1826-1833.
- Vance ED, Brookes PC, Jenkinson DS. 1987. An extraction method for measuring soil microbial biomass C. *Soil Biology and Biochemistry*, **19**: 703-707.
- Yang K, Zhu J, Zhang M, *et al.* 2010. Soil microbial biomass carbon and nitrogen in forest ecosystems of Northeast China: A comparison between natural secondary forest and larch plantation. *Journal of Plant Ecology*, **3**: 175-182.

作者简介 马芳芳, 1989年生, 硕士研究生, 主要从事森林群落和森林土壤生态方面的研究。E-mail: mafangfang0707@163.com

责任编辑 魏中青