

网络出版时间:2017-11-06 13:53 DOI:10.13207/j.cnki.jnwfufu.2017.12.007
网络出版地址:http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20171106.1353.014.html

间伐对马尾松人工林土壤活性氮组分的影响

马婷瑶^{1,2}, 翟凯燕^{1,2}, 金雪梅^{1,2}, 袁在翔^{1,2}, 陈 斌^{1,2}, 关庆伟^{1,2}

(1 南方现代林业协同创新中心, 江苏 南京 210037; 2 南京林业大学 生物与环境学院, 江苏 南京 210037)

【摘 要】【目的】研究实施不同强度间伐后的马尾松(*Pinus massoniana* Lamb.)人工林土壤活性氮组分在各季节的变化规律,以明晰间伐对土壤活性氮的影响程度,为确定适宜的间伐强度及森林土壤氮素管理提供科学依据。【方法】以南京市溧水区林场 2006 年实施不同强度(弱度 25%,中度 45%,强度 65%)间伐的 29 年生马尾松人工林为研究对象,以未间伐为对照,于 2015 年 4,7,10,12 月采集不同处理 0~10 和 10~20 cm 土层土样,测定不同土层 4 种活性氮组分(可溶性有机氮(DON)、微生物生物量氮(MBN)、铵态氮($\text{NH}_4^+\text{-N}$)、硝态氮($\text{NO}_3^-\text{-N}$))的含量,分析不同间伐强度对土壤活性氮组分的影响。【结果】各活性氮组分含量存在一定的季节差异性,DON、MBN 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量在夏季均较低, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量在夏季和秋季时较高。活性氮组分对间伐的响应存在一定的季节差异。与对照样地相比,各间伐强度显著($P<0.05$)降低了春季和冬季土壤的 DON 含量,提高了夏季和秋季土壤的 DON 含量。弱度和中度间伐显著($P<0.05$)提高了各季节土壤 MBN 含量;强度间伐显著($P<0.05$)提高了春季和冬季土壤 MBN 含量,降低了夏季和秋季土壤 MBN 含量。各间伐强度显著($P<0.05$)提高了春季和夏季土壤的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量,降低了秋季土壤的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量;对冬季土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量的影响不一致,弱度间伐显著($P<0.05$)升高,中度间伐显著($P<0.05$)降低,强度间伐影响不显著。与对照样地相比,弱度和中度间伐显著($P<0.05$)增加了春季土壤 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量,降低了秋冬季土壤 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量,弱度间伐对夏季土壤的 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量无显著影响,中度间伐显著($P<0.05$)提高夏季土壤 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量;强度间伐显著($P<0.05$)提高春季土壤 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量,降低夏季和冬季土壤的 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量,对秋季土壤 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量无显著影响。【结论】各间伐强度对土壤活性氮组分的含量均有一定影响,中度间伐可促进土壤活性氮组分的有效利用,为提高土壤氮素有效性,以实施中度间伐为宜。

【关键词】间伐;马尾松人工林;活性氮组分;季节变化

【中图分类号】S718.55

【文献标志码】A

【文章编号】1671-9387(2017)12-0044-10

Effects of thinning on soil active nitrogen in Masson pine plantation

MA Tingyao^{1,2}, ZHAI Kaiyan^{1,2}, JIN Xuemei^{1,2}, YUAN Zaixiang^{1,2},
CHEN Bin^{1,2}, GUAN Qingwei^{1,2}

(1 Collaborative Innovation Center of Sustainable Forestry in Southern China, Nanjing, Jiangsu 210037, China;

2 College of Biology and the Environment, Nanjing Forest University, Nanjing, Jiangsu 210037, China)

Abstract: 【Objective】To clarify the effects of thinning on soil activity nitrogen, and provide scientific basis for thinning and soil nitrogen managements in forests, this paper studied the seasonal variations of soil active nitrogen contents under different thinning intensities in a Masson pine (*Pinus massoniana* Lamb.) plantation. 【Method】The study was conducted in a 29 a Masson pine plantation thinned by three intensities (light thinning: 25% tree removal, moderate thinning: 45%, and high thinning: 65%) in 2006 in the Lishui Forest Farm of Nanjing. The soil samples were collected at layers of 0—10 and 10—20 cm in

【收稿日期】2016-10-24

【基金项目】国家重点基础研究发展计划(“973”计划)子专题(2012CB416904)

【作者简介】马婷瑶(1990—),女,山西壶关人,硕士,主要从事城市森林生态研究。E-mail:250511233@qq.com

【通信作者】关庆伟(1964—),男(满族),辽宁沈阳人,教授,博士,博士生导师,主要从事城市森林生态研究。

E-mail:guanjuan999@163.com

April, July, October, and December in 2015, and the contents of four soil active nitrogen components (dissolved organic nitrogen-DON, microbial biomass nitrogen-MBN, ammonium nitrogen- $\text{NH}_4^+\text{-N}$, and nitrate nitrogen- $\text{NO}_3^-\text{-N}$) were determined. The effects of thinning intensities on soil active nitrogen were analyzed using un-thinned stand as control. 【Result】 Active nitrogen contents showed seasonal variations. Soil DON, MBN and $\text{NO}_3^-\text{-N}$ contents were low in summer while $\text{NH}_4^+\text{-N}$ was high in summer and autumn. The responses of active nitrogen components to thinning intensity also changed with seasons. As compared to the control, thinning significantly ($P < 0.05$) reduced soil DON content in spring and winter, while increased it in summer and autumn. Light and moderate thinning significantly ($P < 0.05$) enhanced soil MBN content. High thinning significantly ($P < 0.05$) increased soil MBN content in spring and winter, but reduced it in summer and autumn. Thinning significantly raised soil $\text{NH}_4^+\text{-N}$ content in spring and summer, reduced it in autumn, but showed divergent effects in winter (light thinning had positive effect, moderate thinning had negative effect, while high thinning appeared to be neutral). As compared to the control, light and moderate thinning significantly increased soil $\text{NO}_3^-\text{-N}$ content in spring and reduced it in autumn. Light thinning had no effect while moderate thinning had significantly positive effects on $\text{NO}_3^-\text{-N}$ content in summer. High thinning significantly increased $\text{NO}_3^-\text{-N}$ content in spring, reduced it in summer and winter, but had no effect in autumn. 【Conclusion】 All thinning intensities had effects on soil active nitrogen contents, and moderate thinning improved the soil active nitrogen use efficiency. Therefore, it would be appropriate to employ moderate thinning to improve soil nitrogen status.

Key words: thinning; Masson pine plantation; active nitrogen; seasonal changes

森林土壤的氮素是植物生长所需要的营养元素之一,是森林生产力和产量的限制因素。森林土壤是整个森林生态系统最大的氮库,其含氮量占整个森林生态系统的 90% 以上^[1]。活性氮是近年来科学界提出的一个新概念,相对于非活性氮而言,它是能被动植物以及微生物直接吸收利用的那部分氮,包括氧化态氮、还原态氮、酰胺态氮、氨基酸和蛋白质^[2]。土壤可溶性有机氮(DON)、微生物生物量氮(MBN)、铵态氮($\text{NH}_4^+\text{-N}$)和硝态氮($\text{NO}_3^-\text{-N}$)是土壤活性氮库的几种重要组成成分,其含量的变化对土壤氮素的转化及利用具有重要意义。目前,国内外对这几种土壤活性氮组分已开展了许多研究,主要集中于农田生态系统的施肥^[3-5]、耕作^[6]、秸秆还田^[7-8]对活性氮组分含量的影响,以及森林生态系统的林分类型^[9-12]、氮沉降^[13]、海拔梯度^[14]对活性氮组分含量的影响,同时也有对盐沼地^[15]、河岸带^[16]等活性氮组分含量的研究。

间伐是森林形成后至成熟前的一种人为降低林分密度的森林经营技术,可优化森林结构,提高森林的生态功能^[17-18]。研究表明,适度间伐可改善土壤理化性质^[19],为保留木提供良好的生长条件,提高林木的质量^[20],增加林下植被的多样性^[21-22],提高凋落物的氮含量^[23]及其分解速率^[24],提高土壤微生物的数量^[25]并改变其生物多样性和生物量^[26],调节

林分土壤的酶活性^[27]等,从而改变森林生态系统的 C 和 N 循环。但是,间伐对林下土壤活性氮的影响研究目前还鲜有涉及。

本试验以南京市溧水区林场的 29 年生马尾松人工林为研究对象,研究了实施不同强度间伐 9 年后,马尾松人工林土壤 DON、MBN、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量在春、夏、秋、冬 4 个季节的变化规律,旨在明晰间伐对土壤活性氮的影响程度,以期确定为确定适宜的间伐强度及森林土壤氮素管理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究地位于江苏省南京市溧水区无想寺国家森林公园(119°01'E, 31°36'N),该地属北亚热带向中亚热带过渡气候,夏季高温多雨,冬季温暖潮湿,四季分明,全年无霜期 237 d,平均气温 16 °C,年平均降水量 1 036.9 mm,降水主要集中在夏季。土壤多属地带性黄棕壤,偏酸性。植被主要以人工林和通过封山育林形成的次生林为主,林分类型主要有马尾松(*Pinus massoniana* Lamb.) 纯林、杉木(*Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook.) 纯林、栎(*Quercus* Linn.) 类混交林、马尾松-栎树混交林、杉木-栎树混交林、湿地松-冬青(*Pinus elliottii* + *Ilex*

chinensis Sims.) 混交林、毛竹 (*Phyllostachys heterocycla* (Carr.) Mitford cv. *Pubescens*) 林等。

1.2 样地设置

2006 年于南京市溧水区无想寺国家森林公园小茅山的马尾松人工林中,在同一坡面的上、中、下坡位设置了 3 个区组,每个区组设置 4 块 20 m×20

m 的样地,以单株间伐的方式,按间伐株数所占的比例随机实施了 3 种强度的间伐处理:弱度间伐 (LIT, 25%)、中度间伐 (MIT, 45%) 和强度间伐 (HIT, 65%),以未间伐地作为对照 (CK, 0%)。间伐 9 年后的试验地林分概况如表 1 所示。

表 1 2015 年不同间伐强度处理林分的基本状况

Table 1 Basic status of stands thinned by different intensities in 2015

间伐 Thinning	坡向 Aspect	坡度/(°) Slope	林分密度/(株·hm ⁻²) Stand density	平均胸径/cm DBH	平均树高/m Height	郁闭度 Canopy
CK	西北 NW	20	2 580	13.51	11.65	0.90
LIT	西北 NW	20	1 920	17.47	13.62	0.85
MIT	西北 NW	20	1 410	18.70	13.83	0.65
HIT	西北 NW	20	900	19.22	14.07	0.55

1.3 土样的采集与测定

采样时间为 2015 年 4 月(春)、7 月(夏)、10 月(秋)和 12 月(冬)的下旬,在每个固定样地随机选 3 个点,用土钻取 0~20 cm 深的土柱(因样地土层较薄,所以只取到 20 cm 深),并将其分为两层(表土层 0~10 cm,亚表层 10~20 cm),将 3 个取样点相同土层的土样均匀混合,过孔径 2 mm 筛后放入密封袋,带回实验室。土样一部分风干,过孔径 0.147 mm 筛,用于测定土壤有机碳和全氮含量;另一部分 4℃ 冰箱保存,用于测定活性氮组分。在每次取样时,用土壤温湿度自动记录仪 (JL-01) 测定土壤温度,用铝盒取相同土层的样品,带回实验室用烘干法测定含水率。

土壤有机碳、全氮含量用元素分析仪 (Vario EL III, Germany) 测定^[28];土壤 DON 含量采用 K₂SO₄ 提取法^[29],用 TOC-VCPN 分析仪测定;土壤 MBN 含量采用氯仿熏蒸-K₂SO₄ 提取法^[29],用 TOC-VCPN 分析仪测定;土壤 NH₄⁺-N 和 NH₃⁻-N 含量采用比色法测定^[30]。

1.4 数据处理

用 Microsoft Excel 2007 整理原始数据,并计算

其平均值和标准误差,用 SPSS 19.0 中的单因素分析法结合 LSD 检验分析活性氮组分含量在同一季节、不同处理间的差异性,用一般线性分析中的多重比较分析间伐、季节、土层及其交互作用对活性氮组分的影响,显著性水平设为 α=0.05,用 Sigmaplot 12.5 完成数据作图。

2 结果与分析

2.1 间伐后马尾松人工林土壤理化性质的变化

由表 2 可知,间伐对土壤的理化性质产生了一定影响。与对照样地相比,间伐提高了春、夏、秋季 0~20 cm 土层的土壤温度,降低了冬季 0~20 cm 土层的土壤温度,但影响效果不太明显;土壤温度存在很大的季节性差异,表现为夏季>秋季>春季>冬季。弱度和强度间伐在各季节基本表现为显著 ($P<0.05$) 降低土壤含水率,中度间伐处理则大多显著 ($P<0.05$) 提高了土壤含水率;另外,秋季土壤含水率低于其他 3 个季节。间伐还降低了土壤的 C/N 比,且夏季和秋季的土壤 C/N 比低于春季和冬季。

表 2 间伐后马尾松人工林土壤基本理化性质的变化

Table 2 Changes of soil physical and chemical properties after thinning

季节 Season	间伐 Thinning	温度/℃ Temperature		含水率/% Water content		有机碳/(mg·g ⁻¹) SOC		全氮/(mg·g ⁻¹) TN		碳/氮 C/N	
		0~10 cm	10~20 cm	0~10 cm	10~20 cm	0~10 cm	10~20 cm	0~10 cm	10~20 cm	0~10 cm	10~20 cm
春 Spring	CK	14.44 b	13.87 c	25.55 a	19.80 b	18.22 a	14.71 a	1.38 b	1.26 a	13.22 a	11.65 a
	LIT	14.48 b	14.22 b	22.59 b	19.20 b	19.26 a	10.91 b	1.44 b	1.22 a	13.35 a	8.92 b
	MIT	14.53 b	14.13 b	25.59 a	22.90 a	18.21 a	9.92 b	1.53 a	1.13 b	11.91 a	8.77 b
	HIT	15.20 a	14.58 a	23.57 b	17.92 c	20.41 a	8.71 b	1.58 a	1.06 c	12.95 a	8.20 b
夏 Summer	CK	25.82 a	25.61 b	27.74 a	17.99 bc	20.71 a	11.10 a	1.88 a	1.45 a	11.04 a	7.65 a
	LIT	26.14 a	25.93 a	22.66 c	18.74 b	15.22 c	10.04 b	1.70 bc	1.39 a	8.94 b	7.24 a
	MIT	25.70 a	25.45 b	25.20 b	21.71 a	17.10 bc	8.21 c	1.76 b	1.30 b	9.73 b	6.31 b
	HIT	26.06 a	25.78 ab	23.43 c	17.04 c	18.39 b	7.07 d	1.65 c	1.18 c	11.12 a	6.00 b

表 2(续) Continued table 2

季节 Season	间伐 Thinning	温度/℃ Temperature		含水率/% Water content		有机碳/(mg·g ⁻¹) SOC		全氮/(mg·g ⁻¹) TN		碳/氮 C/N	
		0~10 cm	10~20 cm	0~10 cm	10~20 cm	0~10 cm	10~20 cm	0~10 cm	10~20 cm	0~10 cm	10~20 cm
秋 Autumn	CK	15.14 b	15.21 b	16.64 b	15.83 b	13.60 b	9.17 b	1.51 bc	1.29 c	8.99 bc	7.11 a
	LIT	15.54 ab	15.76 a	15.47 c	13.55 c	14.21 b	9.84 b	1.54 b	1.40 b	9.22 b	7.04 a
	MIT	15.83 ab	15.96 a	20.74 a	19.63 a	21.23 a	12.08 a	1.65 a	1.48 a	12.91 a	8.19 a
	HIT	15.93 a	16.10 a	13.10 d	11.06 d	11.20 c	7.20 c	1.47 c	1.36 b	7.62 c	5.30 b
冬 Winter	CK	6.68 a	7.15 a	20.82 b	15.85 c	14.21 d	9.80 c	1.29 d	1.17 d	11.02 a	8.35 a
	LIT	6.42 a	6.91 a	21.28 b	17.90 b	18.88 a	11.75 b	1.71 b	1.36 c	11.07 a	8.62 a
	MIT	6.41 a	7.01 a	25.38 a	22.81 a	16.95 b	12.97 a	2.10 a	1.58 a	8.08 c	8.20 a
	HIT	6.42 a	6.96 a	19.63 c	17.61 b	15.21 c	10.03 c	1.62 c	1.50 b	9.37 b	6.69 b

注:同列数据后标不同小写字母表示同一季节不同间伐强度间差异显著($P<0.05$)。
Note: Different lowercase letters represent the differences in each season under different thinning intensities were significant ($P<0.05$).

2.2 间伐后马尾松人工林土壤可溶性有机氮 (DON)含量的变化

由图 1 可知,未间伐时土壤 DON 含量的季节变化在表层土表现为夏季(10.11 mg/kg)<秋季(15.75 mg/kg)<冬季(17.45 mg/kg)<春季

(24.49 mg/kg),亚表层土表现为夏季(8.21 mg/kg)<秋季(9.66 mg/kg)<春季(11.02 mg/kg)<冬季(18.56 mg/kg)。间伐对土壤 DON 含量的影响在不同土层和不同季节表现不一致。

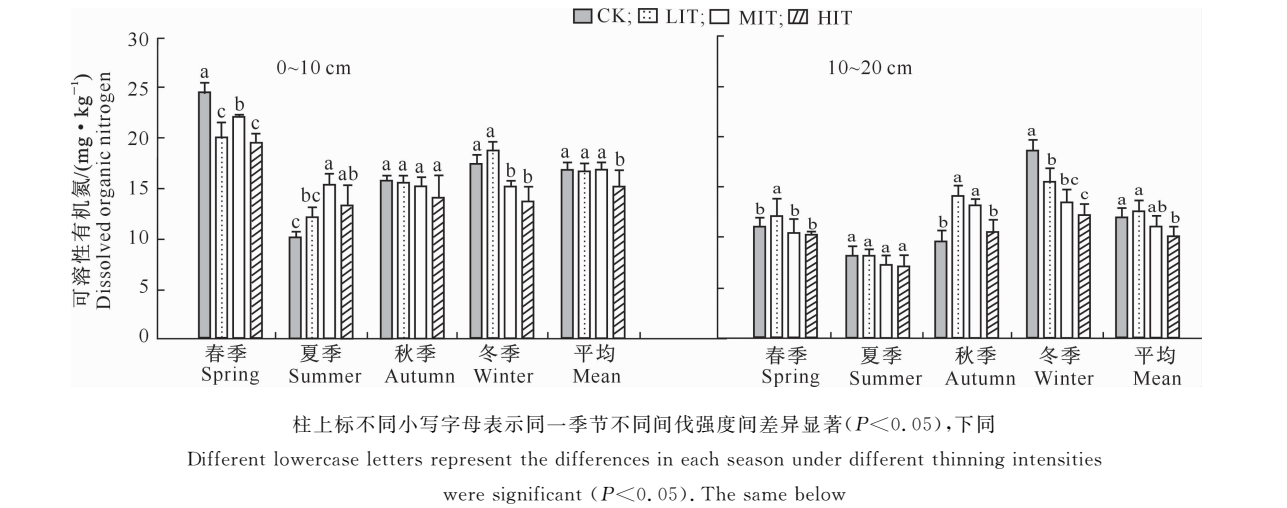


图 1 不同间伐强度下马尾松人工林土壤 DON 含量的变化

Fig.1 Changes of soil DON contents under different thinning intensities in Masson pine plantation

由图 1 可以看出,与对照样地相比,间伐对表层土 DON 的含量影响表现为:春季弱度间伐、中度间伐、强度间伐处理分别降低 18.44%,9.67%和 20.67%;冬季中度间伐和强度间伐处理分别降低 13.13%和 21.34%;夏季中度间伐、强度间伐处理分别升高 51.71%和 31.18%,弱度间伐处理在夏季和冬季对表层土 DON 含量无显著影响;秋季各个间伐强度处理对表层土壤 DON 含量影响均不显著。

图 1 显示,间伐对亚表层土的 DON 含量影响表现为:春季弱度间伐显著($P<0.05$)提高了 DON 含量,其他间伐强度对其无显著影响;冬季各个间伐强度处理土壤的 DON 含量均降低,弱度间伐、中度间伐、强度间伐处理分别较对照降低了 16.20%,

27.55%和 33.90%;夏季各个间伐强度对 DON 含量均无显著影响;秋季强度间伐影响效果不显著,但弱度间伐和中度间伐分别提高了 45.74%和 36.53%的 DON 含量。

由图 1 还可知,间伐对土壤年平均 DON 含量产生了一定影响,与对照样地相比,弱度间伐和中度间伐对土壤 DON 含量无显著影响,强度间伐处理土壤的 DON 含量显著($P<0.05$)降低,且表层土的 DON 含量(平均 16.411 mg/kg)高于亚表层土(平均 11.363 mg/kg)。

2.3 间伐后马尾松人工林土壤微生物生物量氮 (MBN)含量的变化

由图 2 可知,土壤 MBN 含量在夏季除了中度

间伐出现较高水平外,其他间伐强度在这个季节都处于全年最低水平。与对照样地相比,春季强度间伐对 2 个土层的影响均最为显著($P<0.05$),其中表层土的 MBN 含量提高了 58.27%,亚表层土提高了 117.32%;中度间伐和弱度间伐处理使亚表层土的 MBN 含量分别显著提高了 55.20%和 28.25%,而对表层土影响均不显著。

与对照样地相比,夏季中度间伐对 MBN 含量的影响比较明显,表层土和亚表层土分别提高了 2

倍和 0.5 倍;强度间伐对表层土 MBN 含量影响不显著,但亚表层土 MBN 含量显著($P<0.05$)降低了 28.68%;弱度间伐对 MBN 含量无显著影响(图 2)。

与对照样地相比,秋季中度间伐对 MBN 含量影响仍最明显,表层土提高了 74.12%,亚表层土提高了 85.44%;弱度间伐处理的表层土 MBN 含量有所提高,强度间伐的表层土 MBN 含量却显著($P<0.05$)下降,这两个间伐强度处理的亚表层土 MBN 含量无显著变化(图 2)。

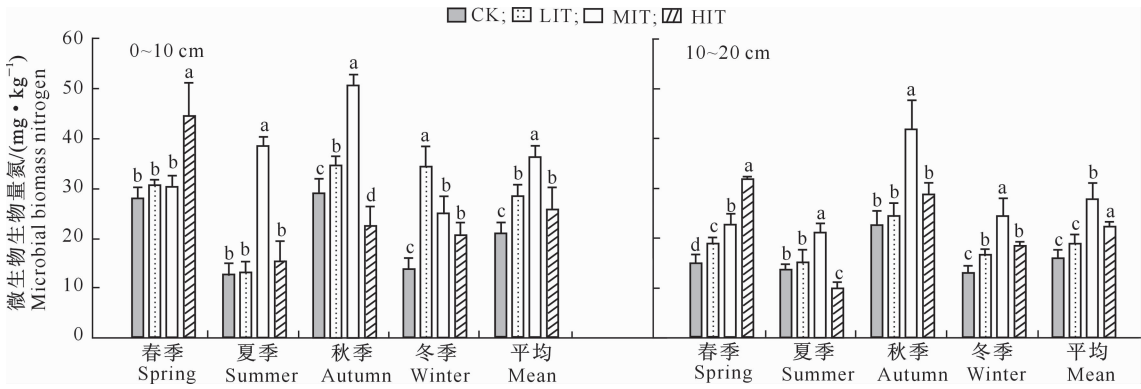


图 2 不同间伐强度下马尾松人工林土壤 MBN 含量的变化

Fig. 2 Changes of soil MBN contents under different thinning intensities in Masson pine plantation

与对照样地相比,冬季弱度、中度、强度间伐都显著($P<0.05$)提高了 MBN 的含量,表层土分别提高了 1.5 倍、0.8 倍和 0.5 倍左右,亚表层土分别提高了 0.3 倍、0.9 倍和 0.4 倍左右(图 2)。

图 2 中间伐后土壤年平均 MBN 含量表明,与对照样地相比,间伐显著($P<0.05$)增加了土壤 MBN 的含量,其中以中度间伐的提升效果最为明显,与对照样地相比,中度间伐土壤的 MBN 含量提高了 70% 以上。表层土 MBN 含量(平均 27.803 mg/kg)高于亚表层土(平均 21.175 mg/kg)。

2.4 间伐后马尾松人工林土壤铵态氮($\text{NH}_4^+\text{-N}$)含量的变化

由图 3 可知,除夏季的弱度、中度间伐和秋季的弱度间伐外,其他间伐处理后土壤表层土与亚表层土中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量的变化规律基本保持一致。 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量的季节性变化规律为夏季(4.22~7.03 mg/kg)和秋季(4.39~6.94 mg/kg)较高,春季(2.41~4.24 mg/kg)和冬季(2.79~3.95 mg/kg)较低。

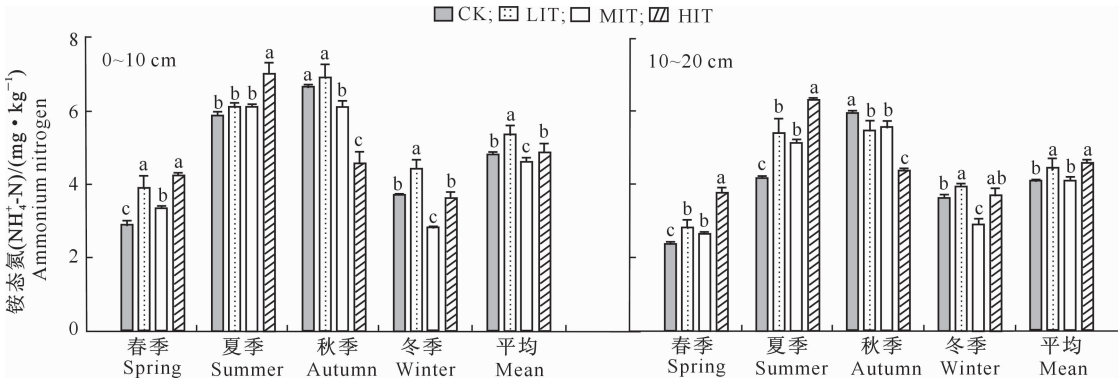


图 3 不同间伐强度下马尾松人工林土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量的变化

Fig. 3 Changes of soil $\text{NH}_4^+\text{-N}$ contents in soil under different thinning intensities in Masson pine plantation

由图 3 还可知,与对照样地相比,春季 3 种间伐强度均显著($P<0.05$)提高了土壤 NH_4^+-N 含量,其中强度间伐处理效果最为明显,表层土 NH_4^+-N 含量提高了 45.97%,亚表层土 NH_4^+-N 含量提高了 66.49%;其次是弱度间伐处理,其分别使表层土和亚表层土中 NH_4^+-N 含量提高了 34.48% 和 16.67%,中度间伐处理则分别提高了 15.65% 和 17.80%。

夏季,表层土中只有强度间伐对 NH_4^+-N 含量的影响具有显著性($P<0.05$),其他两个间伐强度对土壤 NH_4^+-N 含量无显著影响;亚表层土中也以强度间伐处理的提升效果最强(与对照样地相比提高了 50.21%),而弱度和中度间伐处理分别仅提高了 28.79% 和 22.99%(图 3)。

与对照样地相比,中度和强度间伐后,秋季表层土 NH_4^+-N 含量显著($P<0.05$)降低,分别降低了 7.53% 和 30.69%;亚表层土中 NH_4^+-N 含量在 3 个间伐处理后均显著($P<0.05$)降低,弱度间伐、中度间伐和强度间伐处理分别降低了 8.48%,6.93% 和 26.62%。

由图 3 可知,冬季表层土和亚表层土中 NH_4^+-N 含量受间伐强度影响的变化规律一致,与对照样地相比,弱度间伐分别使表层、亚表层土中 NH_4^+-N 含量增加了 19.42% 和 7.75%,中度间伐分别使表层、亚表层土中 NH_4^+-N 含量降低了 24.39% 和 20.90%,强度间伐影响效果不显著。

分析间伐后土壤 NH_4^+-N 含量年平均值的变化(图 3)发现,与对照样地相比,弱度和强度间伐增加了土壤的 NH_4^+-N 含量,使表层土、亚表层土中 NH_4^+-N 含量分别增加了 11.49%,8.42% 和 1.65%,12.30%;中度间伐处理则使土壤的 NH_4^+-N 含量至少降低了 4%。表层土的 NH_4^+-N 含量(平均 4.897 mg/kg)略高于亚表层土(平均 4.072 mg/kg)。

2.5 间伐后马尾松人工林土壤硝态氮(NO_3^--N)含量的变化

由图 4 可知, NO_3^--N 含量的季节性变化很强,夏季土壤 NO_3^--N 含量(0.23~0.79 mg/kg)远低于其他 3 个季节,土壤 NO_3^--N 含量的季节变化规律大致为秋季>冬季>春季>夏季。间伐对表层和亚表层土的 NO_3^--N 含量影响趋势基本一致。

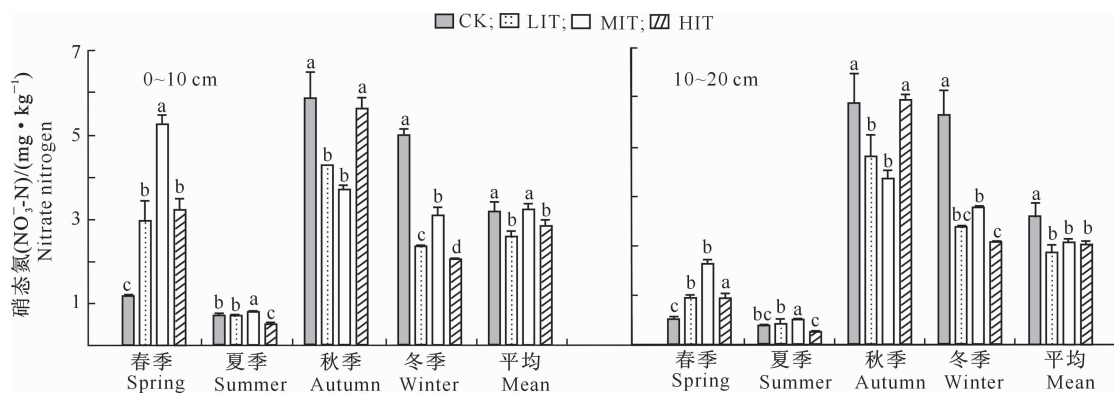


图 4 不同间伐强度下马尾松人工林土壤 NO_3^--N 含量的变化

Fig. 4 Changes of soil NO_3^--N contents in soil under different thinning intensities in Masson pine plantation

图 4 显示,与对照样地相比,3 种间伐强度均显著($P<0.05$)提高了春季土壤 NO_3^--N 含量,以中度间伐的影响效果最为突出,表层土提高了 3 倍多,亚表层土提高了 2 倍多;弱度间伐和强度间伐对 NO_3^--N 含量的提高程度基本一致,表层土均约提高 1.6 倍,亚表层土均约提高 0.8 倍。

由图 4 可以看出,与对照样地相比,夏季中度间伐可以显著($P<0.05$)提高土壤 NO_3^--N 含量,表层土和亚表层土的 NO_3^--N 含量分别提高了 12.94% 和 51.69%;强度间伐显著($P<0.05$)降低了表层土的 NO_3^--N 含量(30.15%),对亚表层土影响不显

著;弱度间伐在这个季节对 NO_3^--N 含量影响也不显著。

与对照样地相比,秋季强度间伐对 NO_3^--N 含量无显著影响;弱度间伐和中度间伐的作用基本一致,均显著降低了土壤 NO_3^--N 含量(图 4)。

由图 4 还可知,与对照样地相比,冬季各种间伐强度均显著($P<0.05$)降低了土壤 NO_3^--N 含量,弱度、中度、强度间伐处理表层土 NO_3^--N 含量分别降低了 52.79%,38.28% 和 58.92%,亚表层土 NO_3^--N 含量分别降低了 49.50%,40.69% 和 55.90%。

分析间伐后土壤年平均 NO_3^- -N 含量变化(图 4)发现,与对照样地相比,间伐总体降低了土壤的 NO_3^- -N 含量;弱度间伐处理表层土 NO_3^- -N 含量降低了 19.16%,亚表层土降低了 27.66%;中度间伐处理表层土 NO_3^- -N 含量变化不显著,亚表层土降低了 27.66%;强度间伐处理表层土 NO_3^- -N 含量降低了 10.94%,亚表层土降低了 21.33%。表层土的 NO_3^- -N 含量(平均 2.970 mg/kg)高于亚表层土(平

均 2.136 mg/kg)。

2.6 间伐强度、季节、土层及其交互作用对马尾松人工林土壤活性氮库的影响

由表 3 可以看出,间伐强度、季节变化、土层差异以及它们的交互作用对土壤活性氮库——可溶性有机氮(DON)、微生物生物量氮(MBN)、铵态氮(NH_4^+ -N)、硝态氮(NO_3^- -N)含量均有极显著($P<0.01$)影响。

表 3 间伐强度、季节及土层对马尾松人工林土壤活性氮库的影响

Table 3 Effect of thinning intensities, seasons and soil layers on reactive nitrogen in Masson pine plantation

处理 Treatment	自由度 df	DON		MBN		NH_4^+ -N		NO_3^- -N	
		F	P	F	P	F	P	F	P
T	3	18.453	<0.001	94.296	<0.001	49.199	<0.001	35.476	<0.001
S	3	145.241	<0.001	131.888	<0.001	1 423.924	<0.001	1 272.352	<0.001
L	1	434.442	<0.001	135.378	<0.001	287.958	<0.001	307.554	<0.001
T×S	9	8.391	<0.001	32.414	<0.001	100.158	<0.001	118.479	<0.001
T×L	3	4.944	0.004	5.989	0.001	13.548	<0.001	6.562	0.001
T×S×L	9	9.138	<0.001	11.751	<0.001	6.142	<0.001	12.906	<0.001

注:T. 间伐强度;S. 季节;L. 土层。
Note: T. Thinning intensity; S. Season; L. Soil layer.

3 讨 论

3.1 间伐对土壤 DON 和 MBN 含量的影响

土壤 DON 是微生物生长的氮源,也是有机氮矿化的基础物质,在被矿化氮素中占有很大比例^[14],本研究结果表明,间伐显著($P<0.05$)降低了春季和冬季土壤的 DON 含量,提高了夏季和秋季土壤的 DON 含量,且夏季土壤 DON 含量明显低于其他 3 个季节,这与 Hannam 等^[31]、殷睿等^[14]的研究结果一致,而与 Stevens 等^[32]、Michalzik 等^[33]、杨凯等^[34]的研究结果相反。土壤 DON 含量在夏季时较低,可能与土壤温度的季节变化有一定关系,有研究表明,温度是影响土壤氮矿化速率的主要因素,在同一研究区域内,土壤氮矿化速率随土壤温度的升高而增加^[31,35]。由表 2 可知,土壤温度受季节影响较大,夏季土壤温度较高,间伐对土壤温度的影响不太明显,因此夏季土壤 DON 的积累量较低;造成这一结果的原因,还可能与夏季植物生长旺盛,需求养分较高,促进了 DON 的矿化有关。森林生态系统中,凋落物的归还是森林土壤氮的最主要来源^[1,36-37],本研究中间伐对土壤 DON 含量的影响可能缘于间伐对凋落物分解速率的影响。据肖文娅^[38]在同一研究区对杉木人工林的研究发现,间伐降低了春季凋落物的分解速率,提高了夏季凋落物的分解速率,提高了秋季的凋落物量,并且弱度和强度间伐降低了冬季的凋落物量,这与本研究中间伐

对土壤 DON 含量的影响效果存在一定的一致性,说明土壤 DON 含量很大程度上受凋落物量及分解速率的影响。

土壤 MBN 是土壤氮素的缓冲器和转运站^[1],可在土壤养分过剩时将土壤氮贮存起来,防止流失,也可在土壤养分缺失时释放出来,供植物吸收利用。本研究中,在植物生长旺盛的夏季土壤 MBN 含量较低,秋冬季节 MBN 含量较高,这与殷睿等^[14]的研究结果一致。陈信力^[26]在同一研究区域对杉木林的研究发现,弱度和中度间伐不同程度地提高了土壤微生物的功能多样性;李瑞霞^[39]在同一试验地的研究发现,弱度和中度间伐显著提高了细根生物量,这与本研究中弱度和中度间伐显著($P<0.05$)提高了土壤 MBN 含量相一致,说明土壤 MBN 含量的变化与土壤微生物多样性以及细根生物量的改变有一定的关系。李瑞霞等^[22]的研究发现,间伐后林下植被多样性会显著提高,表明间伐对 MBN 含量的影响与间伐后林下植被的调节有关。

3.2 间伐对土壤 NH_4^+ -N 和 NO_3^- -N 含量的影响

本研究中,不同间伐强度处理土壤 NH_4^+ -N 和 NO_3^- -N 含量呈明显的季节变化,在夏季和秋季时 NH_4^+ -N 含量较高, NO_3^- -N 含量在夏季时含量较低。这是由于研究区夏季和秋季土壤 C/N 比较低,且此时温度较高,促进了土壤有机氮的矿化。而 NO_3^- -N 含量却在夏季表现出最低水平,这是由于夏季南京地区雨水较多,一部分 NO_3^- -N 容易随着雨

水的冲刷和流失而淋溶掉;另外植物偏好对 NO_3^- -N 的吸收^[1],有很大一部分 NO_3^- -N 会被植物吸收; NO_3^- -N 含量还与硝酸还原酶和亚硝酸还原酶活性有关,马婷瑶^[40]研究显示,夏季土壤中的硝酸还原酶和亚硝酸还原酶活性较强,促进了土壤的反硝化作用,使得一部分 NO_3^- -N 被还原成 NH_4^+ -N 或 N_2O 。

本研究结果显示,间伐对土壤 NH_4^+ -N 含量的影响存在一定的季节差异性,与对照样地相比,间伐提高了春季和夏季土壤的 NH_4^+ -N 含量;降低了秋季土壤的 NH_4^+ -N 含量;对冬季土壤 NH_4^+ -N 含量的影响不一致,其中弱度间伐显著($P<0.05$)提高,中度间伐显著($P<0.05$)降低,强度间伐影响不显著。间伐对土壤 NH_4^+ -N 含量的影响与土壤脲酶的改变有一定关系,脲酶可促进有机物质中肽键的水解,在有机氮矿化为 NH_4^+ -N 的过程中起到重要作用^[41]。郝俊鹏等^[27]在同一试验地的研究发现,间伐可提高土壤的脲酶活性,在适宜的温湿度条件下,间伐会促进土壤的氨化作用。而本试验结果中,间伐降低了秋季土壤 NH_4^+ -N 含量,这可能与林下植被多处于结果时期,需要大量的养分来补充营养有关。在本试验地中,林下植被的多样性随间伐强度增加而有所提高^[22],降低了 NH_4^+ -N 的净积累量。冬季土壤温度较低,矿化作用受到限制,为防止养分流失,间伐提高了土壤微生物的氮固持作用,一部分 NH_4^+ -N 会被微生物固持起来,而弱度间伐后土壤 NH_4^+ -N 的提高现象可能与此时温湿度及相关微生物的调节有一定关系。

间伐对土壤 NO_3^- -N 含量的影响与间伐后 NH_4^+ -N 含量、MBN 含量、下层植被盖度以及相关酶活性的变化有一定关系。 NH_4^+ -N 含量的变化直接影响了硝化作用生成的 NO_3^- -N,因此,3 种间伐强度都增加了春季土壤的 NO_3^- -N 含量,弱度和中度间伐降低了秋季土壤的 NO_3^- -N 含量;春季中度间伐的 NH_4^+ -N 含量较低, NO_3^- -N 含量却很高,这可能是由于此时中度间伐下土壤的硝酸还原酶活性较高,促进了 NO_3^- -N 的还原,进一步促进了 NH_4^+ -N 的硝化作用,导致一部分 NH_4^+ -N 向 NO_3^- -N 和 NO_2^- -N 转化^[40]。秋季强度间伐处理与对照间 NO_3^- -N 含量差异未表现出显著性,可能与下层植被的调节有一定关系。夏季由于雨量较大,土壤 NO_3^- -N 含量的变化与植被的雨水截留作用有一定关系,中度和强度间伐的下层植被盖度较大(中度约 70%,强度约 85%),一定程度上阻碍了雨水对

土壤的直接冲刷,减少了雨水对 NO_3^- -N 的淋溶,但由于强度间伐林分郁闭度低,乔木的截流量小,造成了中度间伐显著提高($P<0.05$)了 NO_3^- -N 含量,强度间伐显著($P<0.05$)降低了土壤 NO_3^- -N 含量。间伐对冬季土壤 NO_3^- -N 含量的降低作用,可能与微生物的氮固持量增多有一定关系。

4 结 论

间伐改变了土壤的活性氮组分含量,其影响存在一定的季节性差异。与对照样地相比,中度间伐提高了土壤的 MBN 含量,在植物生长需求养分较多的春夏季提高了有效氮的含量,但降低了养分需求量较少的秋冬季有效氮含量,促进了土壤活性氮组分的有效利用。因此,在今后的森林经营中,为科学管理土壤氮养分应实施中度间伐为宜。

本试验只对间伐后马尾松林下 1 年的 0~20 cm 土层土壤活性氮动态进行了分析,研究时间较短。为了更完善地探讨间伐对林下土壤活性氮组分的影响,应实施长期观测,并对 20 cm 以下的土层加以研究。

[参考文献]

- [1] 陈伏生,曾德慧,何兴元. 森林土壤氮素的转化与循环 [J]. 生态学杂志,2004,23(5):126-133.
Chen F S, Zeng D H, He X Y. Soil nitrogen transformation and cycling in forest ecosystem [J]. Chinese Journal of Ecology, 2004, 23(5): 126-133.
- [2] 周广胜. 全球碳循环 [M]. 北京:气象出版社,2003.
Zhou G S. The global carbon cycle [M]. Beijing: China Meteorological Press, 2003.
- [3] 高 强,唐艳凌,巨晓棠,等. 长期不同施肥处理对土壤活性氮库的影响 [J]. 水土保持学报,2009,23(2):95-98,114.
Gao Q, Tang Y L, Ju X T, et al. Effect of long-term fertilization on soil reactive nitrogen pool [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2009, 23(2): 95-98, 114.
- [4] Dalal R C, Henderson P A, Glasby J M. Organic matter and microbial biomass in a vertisol after 20 years of zero-tillage [J]. Soil Biol Biochem, 1991, 23(2): 117-124.
- [5] McDowell W H, Currie W S, Aber J D, et al. Effects of chronic nitrogen amendments on production of dissolved organic carbon and nitrogen in forest soils [J]. Water Air and Soil Pollution, 1998, 105: 175-182.
- [6] 郭晓霞,刘景辉,张星杰,等. 免耕对旱作燕麦田耕层土壤微生物生物量碳、氮、磷的影响 [J]. 土壤学报, 2012, 49(3): 575-582.
Guo X X, Liu J H, Zhang X J, et al. Effects of non-tillage on soil microbial C, N and P in plough layer of Oat field [J]. Acta Pedologica Sinica, 2012, 49(3): 575-582.

[7] 何传瑞,全 智,解宏图,等. 免耕不同秸秆覆盖量对土壤可溶性氮素累积及运移的影响 [J]. 生态学杂志,2016,35(4):977-983.
He C R,Quan Z,Xie H T,et al. Accumulation and transport of soil extractable N affected by corn stover mulching quantity in no-tillage system [J]. Chinese Journal of Ecology,2016,35(4):977-983.

[8] 王 磊,陶少强,夏 强,等. 秸秆还田对土壤氮素养分及微生物量氮动态变化的影响 [J]. 土壤通报,2012,43(4):810-814.
Wang L,Tao S Q,Xia Q,et al. Effect of straw returning on the dynamic of nitrogen nutrient and soil microbial biomass nitrogen [J]. Chinese Journal of Soil Science,2012,43(4):810-814.

[9] 万晓华,黄志群,何宗明,等. 杉木采伐迹地造林树种转变对土壤可溶性有机质的影响 [J]. 应用生态学报,2014,25(1):12-18.
Wan X H,Huang Z Q,He Z M,et al. Effects of tree species transfer on soil dissolved organic matter pools in a reforested Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*) woodland [J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2014,25(1):12-18.

[10] 夏江宝,陈印平,王贵霞,等. 黄河三角洲盐碱地不同造林模式下的土壤碳氮分布特征 [J]. 生态学报,2015,35(14):4633-4641.
Xia J B,Chen Y P,Wang G X,et al. Distribution characteristics of soil carbon and nitrogen under different afforestation modes of saline land in the Yellow River Delta [J]. Acta Ecologica Sinica,2015,35(14):4633-4641.

[11] Burtona J,Chen C R,Xu Z H,et al. Soluble organic nitrogen pools in adjacent native and plantation forests of subtropical Australia [J]. Soil Biology and Biochemistry,2007,39:2723-2734.

[12] Cui X Y,Zheng G Q. Soil nitrogen status of larch plantations in comparison with secondary broad-leaved forest [J]. Journal of Forestry Research,1998,9(1):13-15.

[13] Casals P,Romanya J,Cortina J F,et al. Nitrogen supply rate in Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) forests of contrasting slope aspect [J]. Plant and Soil,1995,62:67-73.

[14] 殷 睿,徐振锋,吴福忠,等. 川西亚高山不同海拔森林土壤活性氮库及净氮矿化的季节动态 [J]. 应用生态学报,2013,24(12):3347-3353.
Yin R,Xu Z F,Wu F Z,et al. Seasonal dynamics of soil labile nitrogen pools and net nitrogen mineralization in subalpine forests along an elevational gradient in western Sichuan,China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2013,24(12):3347-3353.

[15] Mozdzer T J,McGlatheery K J,Mills A L,et al. Latitudinal variation in the availability and use of dissolved organic nitrogen in Atlantic coast salt marshes [J]. Ecology,2014,95(12):3293-3303.

[16] 范志平,李胜男,李法云,等. 冻融交替对河岸缓冲带土壤无机氮和土壤微生物量氮的影响 [J]. 气象与环境学报,2013,29(4):106-111.
Fan Z P,Li S N,Li F Y,et al. Effect of freezing-thawing on soil dissolved inorganic nitrogen and soil microbial biomass nitrogen in riparian zone [J]. Journal of Meteorology and Environment,2013,29(4):106-111.

[17] Tian D L,Peng Y Y,Yan W D,et al. Effects of thinning and litter fall removal on fine root production and soil organic carbon content in Masson Pine plantations [J]. Pedosphere,2010,20(4):486-493.

[18] Zhu J J,Yang K,Yan Q L,et al. Feasibility of implementing thinning in even-aged *Larix olgensis* plantations to develop uneven-aged larch-broadleaved mixed forests [J]. Journal of Forest Research,2010,15(1):71-80.

[19] Widenfalk O,Weslien J. Plant species richness in managed boreal forests:effects of stand succession and thinning [J]. Forest Ecology and Management,2009,257(5):1386-1394.

[20] 董 鹏,张昊楠,关庆伟,等. 徐州侧柏林林分密度与林木生长关系的研究 [J]. 中国城市林业,2010,8(5):39-42.
Dong P,Zhang H N,Guan Q W,et al. A study on relationship between stand density and growth of *Platycladus orientalis* plantations in Xuzhou [J]. Journal of Chinese Urban Forestry,2010,8(5):39-42.

[21] 王祖华,李瑞霞,王晓杰,等. 间伐对杉木人工林林下植被多样性及生物量的影响 [J]. 生态环境学报,2010,19(12):2778-2782.
Wang Z H,Li R X,Wang X J,et al. Effects of thinning on biomass and species diversity of understory in Chinese fir plantations [J]. Ecology and Environmental Sciences,2010,19(12):2778-2782.

[22] 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. Effect of thinning on understory species diversities of *Pinus massoniana* forests [J]. Journal of Northwest A&F University(Nat Sci Ed),2013,41(3):61-68.

[23] Inagakia Y,Kuramotoa S,Torii A,et al. Effects of thinning on leaf-fall and leaf-litter nitrogen concentration in hinoki cypress (*Chamaecyparis obtusa* Endlicher) plantation stands in Japan [J]. Forest Ecology and Management,2008,255(5/6):1859-1867.

[24] 肖文姬,费 菲,刁娇娇,等. 杉木人工林凋落物中微生物数量对间伐的响应 [J]. 东北林业大学学报,2016,44(1):31-36.
Xiao W Y,Fei F,Diao J J,et al. Seasonal changes of microbial number of forest litter under different thinning intensity of Chinese fir [J]. Journal of Northeast Forestry University,2016,44(1):31-36.

[25] 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. Influence of thinning on soil fertility in artificial forests [J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2001,12(5):672-676.

[26] 陈信力. 间伐对杉木人工林土壤微生物活性及其功能多样性的影响 [D]. 南京:南京林业大学,2014.

- Chen X L. Thinning intensity effect on soil microbial activity and functional diversity in Chinese fir plantation [D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2014.
- [27] 郝俊鹏, 凌 宁, 李瑞霞, 等. 间伐对马尾松人工林土壤酶活性的影响 [J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2013, 37(4): 51-56.
- Hao J P, Ling N, Li R X, et al. Effects of thinning on the soil enzyme activity in the *Pinus massoniana* Lamb plantation [J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2013, 37(4): 51-56.
- [28] 刁娇娇. 间伐对溧水林场典型林分碳分配格局的影响 [D]. 南京: 南京林业大学, 2015.
- Diao J J. The effect of thinning intensity on carbon distribution pattern of typical forest stands in Nanjing Lishui Forestry Farm [D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2015.
- [29] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法 [M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2000.
- Lu R K. Analytical methods of soil agricultural chemistry [M]. Beijing: China Agriculture Science and Technology Press, 2000.
- [30] Anderson J M, Ingram J S I. Tropical soil biology and fertility: a handbook of methods [J]. Soil Science, 1994, 157(4): 265.
- [31] Hannam K D, Prescott C E. Soluble organic nitrogen in forests and adjacent clear cuts in British Columbia [J]. Canada Can J For Res, 2003, 33: 1709-1718.
- [32] Stevens P A, Wannop C P. Dissolved organic nitrogen and nitrate in an acid forest soil [J]. Plant Soil, 1987, 102: 137-139.
- [33] Michalzik B, Matzner E. Dynamics of dissolved organic nitrogen and carbon in A Central European Norway spruce ecosystem [J]. Soil Sciences, 1999, 50: 579-590.
- [34] 杨 凯, 朱教君, 张金鑫, 等. 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 [J]. 生态学报, 2009, 29(10): 5500-5507.
- Yang K, Zhu J J, Zhang J X, et al. Seasonal dynamics of soil microbial biomass C and N in two larch plantation forests with different ages in Northeastern China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(10): 5500-5507.
- [35] Zaman M, Chang S X. Substrate type, temperature, and moisture content affect gross and net N mineralization and nitrification rates in agroforestry systems [J]. Biology of Fertility of Soils, 2004, 39: 269-279.
- [36] 彭少麟, 刘 强. 森林凋落物动态及其对全球变暖的响应 [J]. 生态学报, 2002, 22(9): 1534-1544.
- Peng S L, Liu Q. The dynamics of forest litter and its responses to global warming [J]. Acta Ecologica Sinica, 2002, 22(9): 1534-1544.
- [37] Vitousek P M, Sanford R L. Nutrient cycling in moist tropical forest [J]. Annu Rev Ecol Syst, 1986, 17: 137-167.
- [38] 肖文姬. 间伐强度对杉木人工林凋落物分解的影响 [D]. 南京: 南京林业大学, 2015.
- Xiao W Y. Effects of different intensity thinning on litter decomposition in Chinese fir plantations [D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2015.
- [39] 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.
- Li R X. Fine root biomass, morphology, and C and N concentration response to thinning in a *Pinus massoniana* plantation [D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2014.
- [40] 马婷瑶. 间伐对马尾松人工林土壤 N_2O 释放通量的影响 [D]. 南京: 南京林业大学, 2016.
- Ma T Y. Effect of thinning on soil nitrous oxide fluxes in *Pinus massoniana* plantation [D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2016.
- [41] Krajewska B, Ureases I. Functional, catalytic and kinetic properties: a review [J]. Journal of Molecular Catalysis B: Enzymatic, 2009, 59(1/2/3): 9-21.