

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

杨 凯^{1,2}, 朱教君^{1,*}, 张金鑫¹, 闫巧玲¹

(1. 中国科学院沈阳应用生态研究所, 沈阳 110016; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要:为从土壤微生物生物量角度分析不同林龄落叶松人工林的土壤肥力状况,对辽宁东部山区两种林龄(9年生,幼龄林;43年生,成熟林)落叶松人工林不同土层(腐殖质层和矿化层)微生物生物量碳、氮季节变化进行了监测,并分析了微生物生物量碳氮的季节变化与土壤养分及水分的关系。结果表明:两种林龄落叶松腐殖质层微生物生物量碳、氮含量均高于矿化层;在腐殖质层,幼龄林微生物生物量碳、氮含量高于成熟林。方差分析表明,在春、秋季节,同一土层两林龄土壤微生物生物量碳、氮含量之间差异达到显著水平($P < 0.01$)。在观测的3个季节内,幼龄林腐殖质层的微生物生物量碳基本无变化,而成熟林的微生物生物量碳在秋季达到最高;两种林龄落叶松微生物生物量氮均在夏季达到最高。在矿化层,两种林龄落叶松微生物生物量碳、氮均在秋季达到最大。相关分析发现,微生物生物量碳、氮之间以及土壤微生物生物量碳、氮与土壤有机碳、全氮呈显著正相关,而与土壤水分无相关性;另外,落叶松人工林内的灌木种类和数量以及季节性温度变化对土壤微生物生物量碳氮也有影响。上述结果表明,研究区域土壤微生物生物量碳、氮的季节波动与土壤养分状况密切相关,幼龄林土壤养分状况优于成熟林。

关键词:土壤微生物生物量碳;土壤微生物生物量氮;季节变化;落叶松人工林

文章编号:1000-0933(2009)10-5500-08 中图分类号:Q143, Q938, S718.8 文献标识码:A

Seasonal dynamics of soil microbial biomass C and N in two larch plantation forests with different ages in Northeastern China

YANG Kai^{1,2}, ZHU Jiao-Jun^{1,*}, ZHANG Jin-Xin¹, YAN Qiao-Ling¹

1 Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China;

2 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China

Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(10): 5500 ~ 5507.

Abstract: Aiming to exhibit the soil fertility of larch plantation forests based on the soil microbial biomass, the soil microbial biomass C and N were observed in two soil layer (i. e., humic layer and mineral layer) of two larch (*Larix olgensis*) plantation forests with different ages (nine years old: young plantation forest; forty-three years old: mature plantation forest) for one growing season in northeastern China. Meanwhile, the relationships between the seasonal dynamics of soil microbial biomass and the soil nutrient and soil water were also analyzed in this study. The results showed that microbial biomass C and N were higher in humic layer than those in mineral layer for both larch plantation forests. In humic layer, the microbial biomass C and N were higher in young plantation forest than those in mature plantation forest. In both spring and autumn, microbial biomass C and N in the same soil layer were significantly different between two plantation forests ($P < 0.01$). In humic layer, the microbial biomass C remained constant in young plantation forest through the growing season, while it reached maximum in autumn in mature plantation forest. The microbial biomass N was the highest in summer in humic layer for both plantation forests. In mineral layer, the microbial biomass C and N were the highest in autumn for both plantation forests. Microbial biomass C and N had a significant positive correlation with soil organic carbon

基金项目:国家“十一五”科技支撑资助项目(2006BAD03A0903);国家自然科学基金资助项目(30671669)

收稿日期:2008-06-13; 修订日期:2009-05-12

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: jiaojunzhu@iae.ac.cn

and total nitrogen, but exhibited no significant correlation with soil water in both larch plantation forests. In addition, the microbial biomass C and N were also influenced by species composition and quantities of shrubs, and seasonal fluctuation of temperature in the stands. The above results suggested that: (1) the seasonal dynamics of soil microbial biomass C and N in the test stands were closely related with soil nutrients, and (2) the soil nutrients in young plantation forest were better than those in mature plantation forest.

Key Words: soil microbial biomass C; soil microbial biomass N; seasonal dynamics; larch plantation forest

土壤微生物量(MB)是指土壤中体积小于 $50 \mu\text{m}^3$ 的生物总量,是活的土壤有机质组成部分,但活的植物体如土壤根系等不包括在内^[1]。土壤微生物是土壤内在的敏感因子,能精确地指示出土壤性质的变化过程和程度。已有研究表明,微生物量在养分循环及释放方面具有重要地位,能直接反映土壤的肥力状况^[2,3]。土壤微生物量既是土壤养分的重要来源,又是土壤养分的储库^[4],参与土壤碳、氮等元素的循环,对养分的转化和供应起着重要作用。

在森林生态系统中,以土壤微生物量作为评价土壤肥力状况势必要考虑其季节变异,土壤水分,温度和土壤养分等生态因子的季节变化都可能引起土壤微生物生物量的变化,研究这些因子对土壤微生物生物量的影响极其重要^[5,6]。东北林区是我国重要的木材生产基地,占全国森林面积的 31.4%,由于长期追求木材生产,该区天然林的面积逐渐减少,人工林的面积不断增加。落叶松(*Larix olgensis*)作为东北林区主要用材树种之一,自 20 世纪 50 年代开始营造了大面积纯林。然而,由于造林树种单一,林分结构简单等原因,落叶松人工纯林的地力衰退趋势日益明显。以往有关落叶松的研究主要集中在落叶松人工林地力衰退机理的研究^[7-11],而未从土壤养分,特别是土壤微生物生物量在不同林龄之间的变化进行分析。

因此,本研究选取辽宁东部山区不同林龄落叶松进行土壤微生物碳氮的季节动态研究,以期达到以下目的:(1)了解不同林龄落叶松人工林土壤微生物生物量碳、氮及其季节变化,从土壤微生物生物量角度分析不同林龄落叶松人工林的土壤肥力状况;(2)探讨影响土壤微生物碳氮季节变化的生物和非生物因子,如土壤有机碳、土壤全氮和土壤水分对其微生物量变化的影响,为落叶松人工林的合理经营提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究样地设在辽宁省东部山区清原满族自治县南部的中国科学院沈阳应用生态研究所清原森林生态实验站试验林地(清原站)($41^{\circ}51.102'N, 124^{\circ}54.543'E$),海拔 456~1116 m,土壤类型为棕色森林土,气候属温带大陆性季风气候。年平均气温 $3.9 \sim 5.4^{\circ}\text{C}$,极端最高气温 36.5°C ,最低气温 -37.6°C 。大于 10°C 的年活动积温 $2497.5 \sim 2943.0^{\circ}\text{C}$,无霜期 120~139d,年平均日照 2433 h,年降水量 700~850 mm,降雨集中在 6~8 月份,生长季为 4~9 月份^[12]。研究区每年的 10 月~翌年的 3 月份,天气寒冷,土壤为季节冻土。因此,本试验只测定了春、夏、秋 3 个季节土壤微生物量碳氮。

清原站地处长白山余脉龙岗山北麓,地带性顶极群落为阔叶红松(*Pinus koraiensis*)林,现存植被以天然次生林为主,该地区的次生林主要类型有以蒙古栎(*Quercus mongolica*),胡桃楸(*Juglans mandshurica*),水曲柳(*Fraxinus mandshurica*),黄波罗(*Phellodendron amurense*)等组成的硬阔叶林,桦木(*Betula* spp.)等组成的软阔叶林,以及槭类(*Acer* spp.)组成的杂木林。在 20 世纪 50 年代,由于次生林改造,营造了大量落叶松人工林和红松人工林^[12]。

2.2 研究方法

本试验选取幼龄(9 年生)落叶松和成熟(43 年生)落叶松林为研究对象,样地概况见表 1。其中,两林龄落叶松的起源和郁闭度有很大不同:9 年生落叶松林地在营造该林前为一代落叶松,林分未郁闭;43 年生落叶松在营造该林前为原始次生林,林分郁闭度为 0.85。由于郁闭度不同,两林分林内的温度不同,在研究的 3

个季节均为幼龄林内的温度高于成熟林。幼龄落叶松和成熟落叶松腐殖质层 pH 分别为 5.8 和 5.7, 矿化层 pH 分别为 5.5 和 5.6; 幼龄落叶松和成熟落叶松腐殖质层容重分别为 1.19 g cm^{-3} 和 1.21 g cm^{-3} , 矿化层容重均为 1.28 g cm^{-3} 。

表 1 样地基本特征

Table 1 General characteristic of the sampling plots

林分类型 Forest types	坡向 Exposure	坡位 Slope position	坡度(°) Slope	海拔(m) Elevation	年龄 Age
幼龄落叶松 Young larch plantation	东南 Southeastern	坡中 Mesoslope	20	592	9
成熟林落叶松 Mature larch plantation	东南 Southeastern	坡中 Mesoslope	20	633	43

林分类型 Forest Types	平均树高(m) Average tree height	凋落物层厚度(cm) Litter layer	平均胸径(cm) Average diameter at breast height	密度 Density ($\text{N} \cdot \text{hm}^{-2}$)	林下灌木组成 Shrub compositions
幼龄落叶松 Young larch plantation	3.5	2.6	3.7	5625	卫矛 <i>Eronymus</i> , 合欢 <i>Albizia kalkora</i> , 五味子 <i>Schisandra chinensis</i> , 毛榛子 <i>Corylus mandshurica</i> , 山楂叶悬钩子 <i>Rubus crataegifolius</i>
成熟林落叶松 Mature larch plantation	19.1	4.8	15.7	1317	软枣猕猴桃 <i>Actinidia arguta</i> , 五味子 <i>Schisandra chinensis</i>

表 2 土样采集时间及土壤养分、水分含量

Table 2 Sampling time and soil properties for the sampling plots

采样时间 Sampling time	季节 Season	植物生长周期 Growth season	林型 Forest types	土层 Soil layer	含水量 Water content (%)	有机碳 Organic carbon ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	全氮 Total nitrogen ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)
2007-04-28	春季 Spring	发芽期 Plant germination period	幼龄林 Young larch plantation	HL	30.28	62.78	4.815
			成熟林 Mature larch plantation	ML	20.05	11.11	1.095
		生长期 Plant growth period	幼龄林 Young larch plantation	HL	29.58	55.26	4.129
			成熟林 Mature larch plantation	ML	22.95	11.12	1.132
2007-07-17	夏季 Summer	落叶期 Plant abscission period	幼龄林 Young larch plantation	HL	32.46	67.53	5.235
			成熟林 Mature larch plantation	ML	20.14	12.23	1.212
		落叶期 Plant abscission period	幼龄林 Young larch plantation	HL	28.57	54.86	4.257
			成熟林 Mature larch plantation	ML	19.76	13.81	1.411
2007-09-20	秋季 Autumn	落叶期 Plant abscission period	幼龄林 Young larch plantation	HL	23.62	62.61	4.858
			成熟林 Mature larch plantation	ML	13.35	17.47	1.608
		落叶期 Plant abscission period	幼龄林 Young larch plantation	HL	26.00	64.00	4.851
			成熟林 Mature larch plantation	ML	11.80	20.25	1.966

HL: 腐殖质层 Humic layer (0~5 cm); ML: 矿化层 Mineral layer (15~30 cm)

在两种林龄林内分别设置 3 个 $20 \text{ m} \times 20 \text{ m}$ 的样方, 土壤样品的收集采用挖剖面法, 每个样点分腐殖质层和矿化层两层分别收集, 腐殖质层的采样为去除土壤表层凋落物后, 挖土壤剖面, 确定腐殖质层的厚度, 两林龄腐殖质层的厚度根据剖面确定基本相同(腐殖质层: 0~5 cm), 两林龄落叶松林地土层厚度均为 30 cm, 矿化层的采样深度取 15~30 cm。每次取样是在每个样地相同的样点进行的, 即在前一个样点附近取样, 尽量保持土壤样本的均一性。具体采样时间及对应的土壤养分、水分含量等见表 2。每个固定样方随机选取 5 个点进行分层采样, 将采集到的 5 个点混合作为一个样品, 土壤带回实验室过 2 mm 筛, 进行微生物碳氮熏蒸和浸提, 提取液为 $0.5 \text{ mol L}^{-1} \text{K}_2\text{SO}_4$ 溶液(1:4 土液比)将浸提液放到 $-15 \text{ }^\circ\text{C}$ 冷冻保存, 待测。剩余土壤自然风干, 过 0.25 mm 筛, 用于有机碳、全氮的测定。

土壤 pH 的测定采用玻璃电极法(土水比为1:2.5),土壤容重的测量用土壤烘干重除以采样用的环刀体积,土壤含水量采用烘干法($(105 \pm 2)^\circ\text{C}$, 8h)^[13],土壤有机碳和全氮含量测定采用干烧法^[14],用元素分析仪 ELEMENTAR (Vario EL III, Germany)测定。微生物生物量碳(MBC)和微生物生物量氮(MBN)采用氯仿熏蒸浸提法^[15],将浸提液解冻,过滤后直接在 Multi N/C 3000(德国)上测定,其中氯仿熏蒸杀死的微生物体中的碳、氮被浸提出来的比例分别为 0.38、0.45。

2.3 数据处理方法

数据处理采用 SPSS 13.0 进行统计分析,分别取幼龄林和成熟林 3 块样地的平均值比较不同季节、不同土层土壤微生物生物量碳氮的差异。微生物碳、氮与土壤养分、水分的相关分析采用 Pearson 双尾检验,用不同采样时间、不同土层的样本混合进行分析。

3 结果与分析

3.1 不同林龄落叶松人工林土壤微生物生物量碳的季节动态

从图 1 可以看出,2007 年 4 月~9 月,幼龄落叶松腐殖质层微生物生物量碳变动不大,而成熟落叶松林腐殖质层微生物生物量碳表现为持续升高,并在秋季维持较高水平。在整个生长季内,两种林龄落叶松微生物生物量碳差异显著($P < 0.01$)。幼龄落叶松微生物生物量碳变幅很小,为 $1024.6 \sim 1075.8 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,成熟落叶松变幅则较大,为 $549.5 \sim 838.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。幼龄落叶松林微生物生物量碳在生长季内是成熟林落叶松的 1.22~1.96 倍。

在矿化层,幼龄落叶松林和成熟落叶松林土壤微生物生物量碳的变化具有显著的季节动态(图 2),本研究区域内,虽然落叶松林龄不同,但矿化层土壤微生物生物量碳的季节变化趋势一致(图 2)。土壤微生物生物量碳在整个生长季持续上升,在 4 月和 7 月份,幼龄林微生物生物量碳高于成熟林,而在 9 月份,成熟林高于幼龄林。

成熟林土壤微生物生物量碳含量在腐殖质层和矿化层随着季节的变化均具有显著性差异($P < 0.01$),而幼龄林微生物生物量碳含量只在矿化层表现为季节差异显著($P < 0.01$)。

3.2 不同林龄落叶松人工林土壤微生物生物量氮的季节动态

从图 3 和图 4 可以看出,无论是在腐殖质层还是在矿化层,两种林龄的落叶松土壤微生物生物量氮季节变化明显。两种林龄落叶松在腐殖质层的变化规律为:微生物生物量氮在 7 月份最高,而到 9 月份显著下降。在腐殖质层,幼龄落叶松林微生物生物量氮的季节变幅

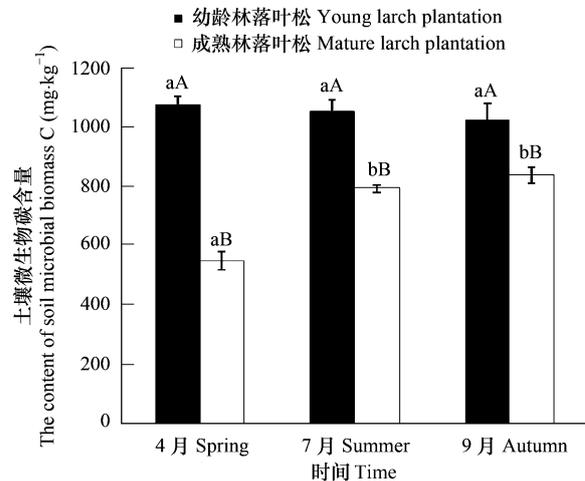


图 1 不同林龄落叶松腐殖质层土壤微生物生物量碳的季节变化
Fig.1 Seasonal dynamics in soil microbial biomass C in humic layer for different ages of Larch forests

同一林龄不同季节不同小写字母表示季节差异显著($P < 0.01$),不同林龄不同大写字母表示两林龄间差异显著($P < 0.01$),下同

Lower case letters indicate significant differences ($P < 0.01$) among different seasons within same aged larch plantation; Upper case letters indicate significant differences ($P < 0.01$) between young plantation forest and mature plantation forest; the same below

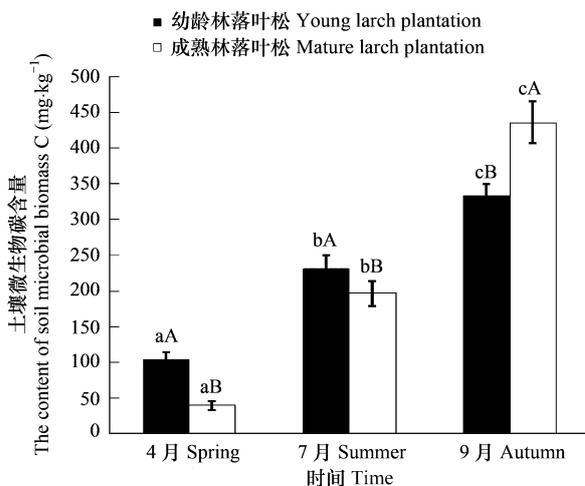


图 2 不同林龄落叶松矿化层土壤微生物生物量碳的季节变化
Fig.2 Seasonal dynamics in soil microbial biomass C in mineral layer for different ages of Larch forests

为:122.1 ~ 150.5 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,成熟林落叶松变幅在 86.5 ~ 151.5 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。在矿化层,两种林龄落叶松微生物生物量氮含量在整个生长季持续升高,9月份达到采样期内的最大值,这和微生物生物量碳的变化趋势一致。幼龄落叶松林微生物生物量氮在此层的季节变幅为:7.2 ~ 40.5 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,成熟落叶松林变幅在 17 ~ 55.7 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。微生物生物量氮在腐殖质层表现为幼龄落叶松林高于成熟落叶松林,而在矿化层则与此相反。

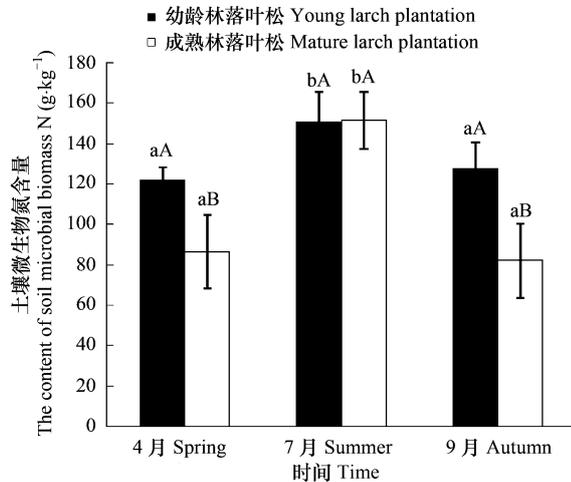


图3 不同林龄落叶松土壤腐殖质层微生物生物量氮的季节变化
Fig.3 Seasonal dynamics in soil microbial biomass N in humic layer for different ages of Larch forests

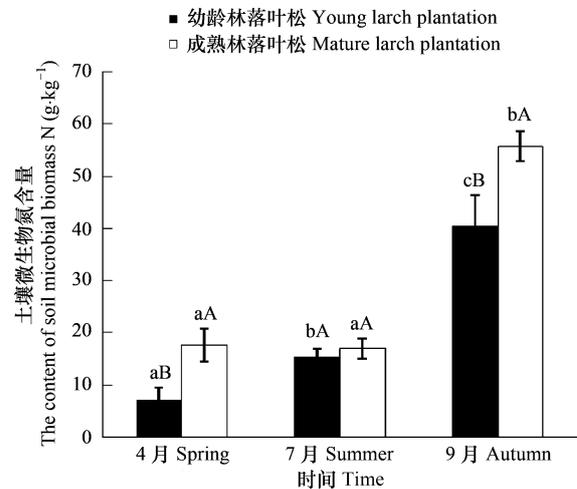


图4 不同林龄落叶松土壤矿化层微生物生物量氮的季节变化
Fig.4 Seasonal dynamics in soil microbial biomass N in mineral layer for different ages of Larch forests

3.3 落叶松人工林土壤微生物生物量碳、氮与土壤养分、水分的关系

微生物量碳、氮与土壤养分、水分相关分析表明(表3):微生物生物量碳与微生物生物量氮达到显著相关水平($P < 0.01$),微生物生物量碳、氮与土壤有机碳、全氮含量达到显著相关($P < 0.01$),而与土壤水分无相关性($P > 0.01$)。

4 讨论与结论

土壤微生物生物量的季节性动态变化是一个复杂过程,不同森林系统土壤微生物的季节变化不同^[16,17]。而在同一生态系统,即使气候条件相同,不同植被下土壤微生物量的季节变化也不相同^[18]。首先,土壤微生物生物量随季节性变化与温、湿度、土壤理化性质等环境因素有关^[16,19]。微生物生物量碳氮与土壤水分关系的研究报道较多^[20~22],但至今仍无确定性结论。本研究结果表明,土壤微生物生物量碳、微生物生物量氮与土壤水分无显著相关关系(表3),说明在本研究的落叶松人工林,土壤湿度不是影响土壤微生物生物量的限制性因子。另外,在两林龄落叶松人工林内,相关分析表明,土壤微生物生物量碳和氮与土壤有机碳、全氮呈显著正相关(表3),这表明土壤有机质是影响土壤微生物量的重要因素^[23],有机质含量高,能够为微生物在进行自身合成与代谢过程中提供足够的碳、氮物质来源以及能量来源^[24]。该观测结果与以往类似研究结论相同,如金发会等^[25]研究石灰性土壤微生物量碳、氮与土壤养分的关系结果表明,土壤微生物量碳和微生物量氮与土壤养分呈高度正相关。除土壤有机碳、全氮与土壤微生物生物量碳氮相关外,何友军等^[26]研究结果显示,土壤微生物量碳氮含量与铵态氮、全钾和速效钾含量之间存在显著正相关;刘占锋等^[27]研究发现,土壤微生物量碳与土壤全磷呈显著正相关。本研究的土壤理化性质如pH,土壤容重等在两林龄落叶松内无明显不同,而其他养分指标(如P、K)的不同可能也是影响土壤微生物量碳氮的重要因素,其对微生物量的影响需进一步研究。

其次,土壤微生物的季节变化还与地上植被的生长状况及温度有关。从整体来看,除了9月份矿化层外,微生物生物量碳在幼龄林的含量高于成熟林,产生这种结果的原因可能是幼龄落叶松林龄较小,林内光照、热量条件较好,使得林下的草本和灌木充分发育,有利于微生物的活动。本文对幼龄林和成熟林林下灌木的调

查也证实了幼龄林林下灌木种类和数量高于成熟落叶松(表 1)。闫德仁等^[10]研究二代落叶松土壤生物化学特性发现,落叶松二代连栽后,由于林龄较小(6a 落叶松),林内光照、热量条件得到明显改善,加之采伐后剩余物充足,幼林下的草本植物充分发育,有利于土壤微生物的活动,土壤微生物数量明显增加。而成熟林内林下光照不足,温度较低,形成相对封闭的小气候,造成土壤微生物数量的减少^[9]。

表 3 微生物量碳、氮之间及其与土壤养分、水分的相关系数

Table 3 Correlation coefficients between soil microbial biomass C, soil microbial biomass N, soil nutrients and soil water

	MBC	土壤有机碳 Soil organic carbon	全氮 Total nitrogen	土壤水分 Soil water
微生物生物量碳 MBC		0.9488 **	0.9591 **	0.6414ns
微生物生物量氮 MBN	0.9328 **	0.9163 **	0.9255 **	0.6916ns

$n = 12$, ns 为 $P > 0.01$, * 为 $P < 0.01$, ** 为 $P < 0.001$

两种林龄落叶松微生物生物量氮在矿化层 3 个季节的变化均达到了显著性水平($P < 0.01$),而在腐殖质层 7 月和 4 月、9 月份的变化达到显著性水平($P < 0.01$),而 4 月份和 9 月份的变化差异不显著。

最后,土层深度也是影响土壤微生物生物量季节变化的因素之一。有研究表明^[28],即使在同一植被下,不同土层微生物碳氮的变化也不尽相同,这是因为凋落物的数量、质量、分解率以及环境因子的变化是影响表层土壤微生物生物量变化的主要原因,而营养元素在土壤中的长期积累以及细根的生产 and 周转是影响下层土壤微生物量的主要原因。在本研究中两林龄落叶松人工林内,土壤腐殖质层的微生物碳、氮含量高于矿化层,这反映了土壤微生物随土层变化的分布格局,即微生物量随土层的加深而减少^[29],这与土壤有机碳和全氮的分布一致。而且,两种林龄落叶松土壤微生物生物量碳在矿化层具有明显的季节变化,与 Lipson^[30]对阿尔卑斯生态系统的研究结果基本一致,土壤微生物生物量均在秋季最高,而在植物开始生长的春季最低。微生物生物量在春季较低,可能是由于这个时期微生物活性小以及凋落物分解速率较慢有关。在本研究中,矿化层的土壤微生物生物量碳在整个生长季持续增加是由于大量落叶、根系衰老、碳水化合物由地上向地下转移等所致。而在腐殖质层,幼龄落叶松林和成熟落叶松林微生物生物量碳的季节变化不同,表明在不同土壤层次以及不同森林发育阶段,森林土壤微生物生物量的季节波动也会有很大差异^[31]。另外,土壤微生物生物量碳与微生物生物量氮在腐殖质层的季节变化不一致,微生物生物量氮在 4~7 月份呈现先升高,7~9 月份在下降的趋势,这与 Franzluebbbers^[32]在小麦田所做的实验结果相类似。在矿化层微生物生物量碳和微生物生物量氮的变化基本一致,其原因我们认为有两种可能:第一,本研究取的矿化层深度为 15~30 cm,两林龄落叶松微生物量受温度的影响远小于腐殖质层(0~5 cm);第二,季节性变化对土壤中微生物量碳和微生物量氮的影响程度是相同的,即土壤中微生物量碳氮对环境条件具有相同的适应能力。两林龄落叶松土壤微生物生物量氮在不同土层存在明显差异,在腐殖质层,幼龄落叶松微生物生物量氮在各季节高于成熟林落叶松;而在矿化层,表现为成熟落叶松林微生物生物量氮高于幼龄林落叶松,这可能是由于土壤环境和植物生长等的复杂交互作用影响了土壤微生物氮的分布^[33]。有研究表明,土壤微生物生物量氮与土壤所处的气候类型^[34],植物生产力及植物根系活动^[35]等综合作用有关。本研究区内,造成两种林龄落叶松不同土层微生物生物量氮含量不同可能与植物根系活动有关,有关植物根系对土壤微生物生物量氮活性的影响还需进一步研究。

Reference:

- [1] Wang Y, Shen Q R, Shi R H, Huang D M. Soil microbial biomass and its ecological effects. Journal of Nanjing Agricultural University, 1996, 19 (4): 45-51.
- [2] Yan D R, Liu Y J, Wang J Y, Yang M R. Study on the soil fertility and the microorganism content of pure larch plantations. Journal of Northeast Forestry University, 1996, 24(3): 46-50.
- [3] Chen G C, He Z L, Yao H Y. Study on seasonal change of red soil microbial biomass. Journal of Zhejiang University, 1999, 25(4): 387-388.
- [4] Lundquist E J, Jackson L E, Scow K M, Hsu C. Changes in microbial biomass and community composition, and soil carbon and nitrogen pools

- after incorporation of rye into three California agricultural soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 1999, 31(2): 221–236.
- [5] Classen A T, Overby S T, Hart S C, Koch G W, Whitham T G. Season mediates herbivore effects on litter and soil microbial abundance and activity in a semi-arid woodland. *Plant Soil*, 2007, 295: 217–227.
- [6] Bastida F, Barberá G G, García C, Hernández T. Influence of orientation, vegetation and season on soil microbial and biochemical characteristics under semiarid conditions. *Applied Soil Ecology*, 2008, 38(1): 62–70.
- [7] Liu S R, Li C Y. Nutrient cycling and stability of soil fertility in larch plantation in the eastern part of Northern China. *Journal of Northeast Forestry University*, 1993, 21(3): 19–24.
- [8] Pan J P, Wang H Z, Yang X Q. Research state and advance on soil degradation under larch plantations. *Journal of Northeast Forestry University*, 1997, 25(3): 59–63.
- [9] Cui G F. Depletion mechanism of forest plantation productivity and preventive strategy. *World Forestry Research*, 1996, 9(5): 61–69.
- [10] Yan D R, Wang J Y, Yang M R. Tendency of soil degradation in the pure larch plantations. *Chinese Journal of Ecology*, 1997, 16(2): 62–66.
- [11] Chen L X, Xiao Y. Evolution and evaluation of soil fertility in forest land in *Larix gmelinii* plantations at different development stages in Daxinganling forest region. *Science of Soil and Water Conservation*, 2006, 4(5): 50–55.
- [12] Zhu J J, Mao Z H, Hu L L, Zhang J X. Plant diversity of secondary forests in response to anthropogenic disturbance levels in montane regions of northeastern China. *Journal of Forest Research*, 2007, 12(6): 403–416.
- [13] Bao S D. Analysis of agricultural chemistry in soil. Beijing: China Agriculture Press, 2005.
- [14] Analytical Chemistry Staff room of Chemistry Department, Hongzhou University. Manual of Analytical Chemistry (the 2nd fascicule: chemical analyses). Beijing: Chemical Industry Press, 1982.
- [15] Lu R K. Soil agrochemical analysis method. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000.
- [16] Devi N B, Yadava P S. Seasonal dynamics in soil microbial biomass C, N and P in a mixed-oak forest ecosystem of Manipur, North-east India. *Applied Soil Ecology*, 2006, 31(3): 220–227.
- [17] Edwards K A, McCulloch J, Kershaw G P, Jefferies R L. Soil microbial and nutrient dynamics in a wet Arctic sedge meadow in late winter and early spring. *Soil Biology and Biochemistry*, 2006, 38(9): 2843–2851.
- [18] Liu M Q, Hu F, He Y Q, Li H X. Seasonal dynamics of soil microbial biomass and its significance to indicate soil quality under different vegetations restored on degraded red soils. *Acta Pedologica Sinica*, 2003, 40(6): 937–944.
- [19] Srivastava S C. Microbial C, N and P in dry tropical soils: Seasonal changes and influence of soil moisture. *Soil Biology and Biochemistry*, 1992, 24(7): 711–714.
- [20] Van Gestel M, Ladd J N, Amato M. Microbial biomass responses to seasonal change and imposed drying regimes at increasing depths of undisturbed topsoil profiles. *Soil Biology and Biochemistry*, 1992, 24(2): 103–111.
- [21] Li D P, Chen L J, Wu Z J, Zhu P, Ren J, Liang C H, Peng C, Gao H J. Dynamics of microbial biomass N in different fertilized black soil and its related factors. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(10): 1891–1896.
- [22] Jia G M, Wang C Y, Cao J, Wang G. Microbial biomass in soil during secondary forest succession in Ziwuling, Northwest China. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)*, 2007, 43(1): 80–83.
- [23] Zhang H Y, Xiao Y H, Zhang X D. Microbial biomass as an indicator for evaluation of soil fertility properties. *Chinese Journal of Soil Science*, 2006, 37(3): 422–425.
- [24] Jia G M, Cao J, Wang C Y, Wang G. Microbial biomass and nutrients in soil at the different stages of secondary forest succession in Ziwulin, northwest China. *Forest Ecology and Management*, 2005, 217(1): 117–125.
- [25] Jin H F, Li S Q, Lu H L, Li S X. Relationships of microbial biomass carbon and nitrogen with particle composition and nitrogen mineralization potential in calcareous soil. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18(12): 2739–2746.
- [26] He Y J, Wang Q K, Wang S L, Yu X J. Characteristics of soil microbial biomass carbon and nitrogen and their relationships with soil nutrients in *Cunninghamia lanceolata* plantations. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2006, 17(12): 2292–2296.
- [27] Liu Z F, Liu G H, Fu B J, Hu H F, Zheng X X, Wu Y Q. Dynamics of soil microbial biomass C, N along restoration chronosequences in pine plantations. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(3): 1011–1018.
- [28] Tonon G, Boldreghini P, Giocchini P. Seasonal changes in microbial nitrogen in an old broadleaf forest and in a neighboring young plantation. *Biology and Fertility of Soils*, 2005, 41: 101–108.
- [29] Chen T H, Chiu C Y, Tian G L. Seasonal dynamics of soil microbial biomass in coastal sand dune forest. *Pedobiologia*, 2005, 49(6): 645–653.
- [30] Lipson D A, Schmidt S K, Monson R K. Links between microbial population dynamics and plant N availability in an alpine ecosystem. *Ecology*, 1999, 80(5): 1623–1631.
- [31] Saynes V, Hidalgo C, Etchevers J D, Campo J E. Soil C and N dynamics in primary and secondary seasonally dry tropical forests in Mexico.

Applied Soil Ecology, 2005, 29(3): 282–289.

- [32] Franzluebbers A J, Hons F M, Zuberer D A. Seasonal changes in soil microbial biomass and mineralizable C and N in wheat management systems. *Soil Biology and Biochemistry*, 1994, 26(11): 1469–1475.
- [33] Wardle D A. Controls of temporal variability of the soil microbial biomass: A global-scale synthesis. *Soil Biology and Biochemistry*, 1998, 30(13): 1627–1637.
- [34] Dang Y A, Li S Q, Wang G D, Shao M A. Distribution characteristics of soil total nitrogen and soil microbial biomass nitrogen for the typical types of soils on the Loess plateau. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2007, 13(6): 1020–1027.
- [35] Bao Q, Zheng X G, Zheng X L, Zhang Q H, Yu J L. Age distribution and season dynamics of root biochore soil nutrition of white Birch-Korean pine stand. *Journal of Northeast Forestry University*, 1997, 25(1): 56–58.

参考文献:

- [1] 王岩, 沈其荣, 史瑞和, 黄东迈. 土壤微生物量及其生态效应. *南京农业大学学报*, 1996, 19(4): 45~51.
- [2] 闫德仁, 刘永军, 王晶莹, 杨茂仁. 落叶松人工林土壤肥力与微生物含量的研究. *东北林业大学学报*, 1996, 24(3): 46~50.
- [3] 陈国潮, 何振立, 姚槐应. 红壤微生物量的季节性变化研究. *浙江大学学报*, 1999, 25(4): 387~388.
- [7] 刘世荣, 李春阳. 落叶松人工林养分循环过程与潜在地力衰退趋势的研究. *东北林业大学学报*, 1993, 21(3): 19~24.
- [8] 潘建平, 王华章, 杨秀琴. 落叶松人工林地力衰退研究现状与进展. *东北林业大学学报*, 1997, 25(3): 59~63.
- [9] 崔国发. 人工林地力衰退机理及其防止对策. *世界林业研究*, 1996, 9(5): 61~69.
- [10] 闫德仁, 王晶莹, 杨茂仁. 落叶松人工林土壤衰退趋势. *生态学杂志*, 1997, 16(2): 62~66.
- [11] 陈立新, 肖洋. 大兴安岭林区落叶松林地不同发育阶段土壤肥力演变与评价. *中国水土保持学报*, 2006, 4(5): 50~55.
- [13] 鲍士旦. 土壤农化分析. 北京: 中国农业出版社, 2005.
- [14] 杭州大学化学系分析化学教研室编. 分析化学手册(第二分册: 化学分析). 北京: 化学工业出版社, 1982.
- [15] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [18] 刘满强, 胡峰, 何园球, 李辉信. 退化红壤不同植被恢复下土壤微生物量季节动态及其指示意义. *土壤学报*, 2003, 40(6): 937~944.
- [21] 李东坡, 陈利军, 武志杰, 朱平, 任军, 梁成华, 彭畅, 高红军. 不同施肥黑土微生物量氮变化特征及相关因素. *应用生态学报*, 2004, 15(10): 1891~1896.
- [22] 贾国梅, 王春艳, 曹靖, 王刚. 子午岭次生林恢复演替中土壤微生物量的变化动态. *兰州大学学报(自然科学版)*, 2007, 43(1): 80~83.
- [23] 张海燕, 肖延华, 张旭东. 土壤微生物量作为土壤肥力指标的探讨. *土壤通报*, 2006, 37(3): 422~425.
- [25] 金发会, 李世清, 卢红玲, 李生秀. 石灰性土壤微生物量碳、氮与土壤颗粒组成和氮矿化势的关系. *应用生态学报*, 2007, 18(12): 2739~2746.
- [26] 何友军, 王清奎, 王思龙, 于小军. 杉木人工林土壤微生物生物量碳氮特征及其与土壤养分的关系. *应用生态学报*, 2006, 17(12): 2292~2296.
- [27] 刘占锋, 刘国华, 傅伯杰, 胡会峰, 郑晓翀, 吴雅琼. 人工油松林 (*Pinus tabulaeformis*) 恢复过程中土壤微生物生物量 C、N 的变化特征. *生态学报*, 2007, 27(3): 1011~1018.
- [34] 党亚爱, 李世清, 王国栋, 邵明安. 黄土高原典型土壤全氮和微生物氮剖面分布特征研究. *植物营养与肥料学报*, 2007, 13(6): 1020~1027.
- [35] 包青, 郑晓光, 郑学良, 张秋华, 于景丽. 白桦和红松根际土壤养分的林龄分布及季节动态. *东北林业大学学报*, 1997, 25(1): 56~58.