

中亚热带4种林分类型土壤微生物生物量碳氮特征及季节变化

刘 宝 吴文峰 林思祖 林开敏*

(福建农林大学林学院, 福州 350002)

摘 要 以中亚热带常绿阔叶林及其改造而来的闽楠、毛竹及杉木人工林为研究对象, 采用氯仿熏蒸浸提法测定了4种林分类型表层(0~10 cm)和深层(40~60 cm)土壤微生物生物量碳(MBC)和氮(MBN), 并分析了其季节变化及与土壤理化性质之间的关系。结果表明: 4种林分类型表层土壤MBC和MBN均以常绿阔叶林最高, 其次为闽楠人工林、毛竹人工林和杉木人工林, 且前三者显著高于后者; 各林分深层土壤MBC和MBN无显著差异。4种林分类型的表层土壤MBC和MBN均显著高于深层土壤, 且各土层MBC和MBN均具有明显的季节变化, 总体呈现出“夏高冬低”单峰曲线变化模式。相关分析表明, 4种林分类型土壤MBC和MBN与土壤有机碳、全氮及土壤温度呈显著正相关关系, 与土壤容重呈显著负相关关系。表明常绿阔叶林改造成人工林30多年后, 表层土壤MBC和MBN呈下降趋势, 其中杉木人工林下降幅度最大(分别下降39.0%和49.8%), 而对深层土壤MBC和MBN的影响较小。凋落物数量和质量、土壤有机碳和总氮含量及土壤温度是导致各林分类型土壤微生物生物量碳氮差异和季节变化的主要因素。

关键词 森林转换; 土壤微生物生物量碳氮; 土层; 季节变化; 土壤理化性质

Characteristics of soil microbial biomass carbon and nitrogen and its seasonal dynamics in four mid-subtropical forests. LIU Bao, WU Wen-feng, LIN Si-zu, LIN Kai-min* (College of Forestry, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China).

Abstract: Taking evergreen broad-leaved forest in mid-subtropical areas, and its converted *Phoebe bournei*, *Phyllostachys heterocycla* and *Cunninghamia lanceolata* plantations as research objects, microbial biomass carbon (MBC) and nitrogen (MBN) in the surface (0–10 cm) and deep soil layer (40–60 cm) were measured by chloroform fumigation and extraction method, with their seasonal dynamics and the relationships with soil physicochemical properties in four types of forests being investigated. The results showed that the MBC and MBN in the surface soil was the highest in the evergreen broad-leaved forest, followed by *P. bournei*, *P. heterocycla* and *C. lanceolata* plantations, with that in the former three being significantly higher than in *C. lanceolata* plantation. There was no significant difference in the MBC and MBN contents in the deep soil layer among the four types of forests, while those in surface soil were significantly higher than in the deep soil layer. The MBC and MBN contents showed obvious seasonal dynamics, with highest values in summer and lowest in winter presenting a single peak change pattern. MBC and MBN had significantly positive correlations with soil total carbon (TC), total nitrogen (TN) and temperature, but significantly negative correlation with soil bulk density. The conversion of evergreen broad-leaved forest to the three plantation resulted in lower MBC and MBN in the surface soil to some degree, with *C. lanceolata* plantation being the first to be affected, but little change occurred in the deep soil layer. The quantity and

本文由国家自然科学基金项目(413712269)和国家重点研发计划项目(2016YFD0600300)资助 This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (413712269) and the National Key Research and Development Project of China (2016YFD0600300).

2018-08-16 Received, 2019-03-18 Accepted.

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: lkmyx@163.com

quality of litter, contents of TC, TN and soil temperature were the key factors driving the differences of MBC and MBN contents and their seasonal dynamics of the four types of forests.

Key words: forest conversion; soil microbial biomass carbon and nitrogen; soil layer; seasonal dynamics; soil physicochemical properties.

土壤微生物作为土壤有机质及土壤速效养分的关键要素,在整个生态系统能量流动和物质循环过程中起到十分重要的作用^[1-2].土壤中体积在 $5 \times 10^3 \mu\text{m}^3$ 以下的生物的总量称为土壤微生物生物量^[3].虽然土壤微生物生物量只占土壤有机质的很小部分,却是最活跃的部分^[4],其中的重要组成部分为土壤微生物生物量碳(MBC)和土壤微生物生物量氮(MBN).由于其转化速度快,能够较好地体现土壤全氮与土壤有机碳的动态变化^[2],在土壤养分的供应与转化过程中发挥着决定性作用,土壤质量好坏可通过其较好地体现出来.因此,通常把 MBC、MBN 作为开展土壤生物学相关研究的重要指标^[5-6].

土壤微生物受到土壤、气候及森林类型的显著影响.就算立地环境条件一致,不同的森林植被下的土壤微生物生物量也有显著差别^[4,7].因此,土壤微生物生物量可作为环境变化的重要生命指标之一.近年来,通过不断完善和改进微生物生物量测定方法,特别是氯仿熏蒸培养法的问世,进一步促进了土壤微生物生物量研究领域的发展^[8].国内外学者对土壤 MBC 和 MBN 进行了系列研究,主要涉及土壤微生物生物量对不同土地利用方式的响应^[9-11]、不同森林或植被类型对土壤微生物生物量的影响^[2,4,12-13]及土壤微生物生物量季节动态与相关影响因素的研究^[14-17].然而,在不同的森林生态系统下,土壤微生物对不同森林类型和有关生态因素的响应机制各不相同.相同气候环境条件下,土壤微生物生物量处于不同林分类型下的时空动态变化资料还相对缺乏,对影响土壤微生物生物量含量的季节动态变化的因子尚不明确^[4].此外,受深层土壤(大于 40 cm)取样困难、有机碳含量低等原因限制,目前对土壤微生物生物量的研究也主要集中在土壤表层(0~30 cm)^[18-19],而有关深层土壤这方面的报道相对较少.而相关研究表明,树木可能会对深层土壤微生物生物量含量产生较大的影响^[20].

我国亚热带地区跨度大,约占我国陆地面积的 25%.常绿阔叶林作为该区域独特的地带性植被类型,在全世界生态系统碳、氮循环过程中扮演着相当重要的角色^[21].长期以来,由于林地的综合开发利用及商品林基础建设等原因,大量的常绿阔叶林被

改造成树种单一、林分结构简单的人工林.目前,对该区域表层与深层土壤微生物生物量对林分类型转变的响应、时空变化规律及影响因素的研究还鲜见报道.本研究选取中亚热带地区常绿阔叶林以及由其砍伐后营建的闽楠人工林(阔叶人工林)、毛竹人工林与杉木人工林(针叶人工林)4 种典型林分类型作为研究对象,在各林分类型中测定具代表性的表层土壤(0~10 cm)和深层土壤(40~60 cm)的微生物生物量碳氮含量,探讨常绿阔叶林改造成 3 种人工林后的差异与时空变化规律,并探寻相关环境因子的影响机制,以期中亚热带造林树种的选择与不同森林生态系统的土壤碳氮循环的影响机制提供理论依据.

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于福建省南平市福建农林大学西芹教学林场($26^{\circ}56'22.90''\text{N}$, $118^{\circ}11'36.10''\text{E}$),处于武夷山脉的东南部.研究区属于典型的中亚热带季风气候,海拔在 180~220 m,平均坡度 $20^{\circ} \sim 25^{\circ}$,属典型的低山丘陵地貌,土壤为山地红壤,花岗岩片麻岩是其主要的成土母岩.年平均温度约 21.4°C ,相对湿度 73.2%,年均降水量约 2155 mm,降水主要集中在 3—9 月.

1.2 样地设置与调查

2014 年 8 月在全面踏查研究区内林分的基础上,在研究区内 2 km^2 范围内选取 4 片毗邻的土地利用历史、海拔、坡向、坡位、坡度基本一致的常绿阔叶林(evergreen broad-leaved forest, BF)、闽楠人工林(*Phoebe bournei* plantation, PB)、毛竹人工林(*Phyllostachys heterocycla* plantation, PH)和杉木人工林(*Cunninghamia lanceolata* plantation, CL)作为研究对象,并分别在 4 种林分中选取典型地段,采取随机区组设计方法,沿山体等高线在各林分中分别布设 4 块样地($20 \text{ m} \times 20 \text{ m}$),同时调查样地内全部林木的生长情况,记载树种名称、胸径(起测径阶 5 cm)、树高等生长指标.其中,常绿阔叶林面积约 1 hm^2 ,人为干扰少,是目前南平地区保存相对完好的天然林,林内植物种类丰富,乔木层主要优势树种有细柄阿

丁枫(*Altingia gracilipes*)、丝栗栲(*Castanopsis fargesii*)等,林下主要植物有黄楠(*Machilus grijsii*)、箬竹(*Indocalamus tessellatus*)等;闽楠人工林于1976年造林,前身为常绿阔叶林砍伐后的林地,林下常见植物种有山矾(*Symplocos sumuntia*)、细齿叶柃(*Eurya nitida*)等.毛竹人工林于1980年造林,前身亦为常绿阔叶林,林下植物常见种类有梅叶冬青(*Ilex asprella*)、毛冬青(*Ilex pubescens*)等.杉木人工林是1979年常绿阔叶林砍伐后再造林,林下植被常见种为杜茎山(*Maesa japonica*)、粗叶榕(*Ficus hirta*)等.4种林分类型状况及表层(0~10 cm)土壤理化性质详见表1.

1.3 土壤样品采集

采集土壤样品的时间为2015年4月(春季)、8月(夏季)、11月(秋季)和2016年1月(冬季).每次采集均为月初连续晴天3 d后进行,采集时在4种林分类型中的各个样地内,用内径为3.7 cm的土钻分别以“S”形等距离钻取12个点,每个点均钻取0~10 cm、10~20 cm、20~40 cm、40~60 cm土层的土壤,然后从中选取表层具有代表性的0~10 cm土壤和深层具有代表性的40~60 cm土壤的2个土层样品,并把同一层次的土壤样品混合均匀,去除小石块、根系等后,分别用自封袋装好,放置于装有冰块的保温箱内.将土样带回实验室后,用2 mm筛网过筛后分成2份:其中1份储存在4℃冰箱中,用来测定土壤微生物生物量碳氮含量,另1份自然风干,充分研磨后过0.149 mm筛,用于测定土壤有机碳(TC)、全氮含量(TN)、全磷(TP)、全钾(TK)和pH

值.此外,在每个样地内挖取土壤剖面,并用环刀分别在表层和深层土壤中采集3个土壤样品,带回室内用于测定土壤容重、含水率等.

1.4 测定方法

土壤温度采用便携式土壤碳通量观测系统(Li-cor-8100,美国)自带的温度探针进行测定;土壤含水率采用烘干法(105℃,12 h);采用环刀法测定土壤容重;土壤pH值用酸度计(PHS-3B)进行测定($M_{\pm}:V_{\text{水}}=1:2.5$);土壤有机碳(TC)和全氮(TN)含量用碳氮元素分析仪(Elemental EL MAX CNS analyzer,德国)测定;土壤全P采用H₂SO₄-HClO₄消煮法测定;土壤全K采用NaOH熔融-火焰光度计法测定;土壤微生物生物量碳氮(MBC、MBN)采用氯仿熏蒸浸提法测定^[22],土壤浸提液中的有机碳与全氮含量分别采用总有机碳分析(TOC-VCPH,日本岛津)和连续流动分析仪(Skalar San++,荷兰)测定.具体计算公式如下^[23]:

$MBC = (C_F - C_{NF}) / k_{EC}$

$MBN = (N_F - N_{NF}) / k_{EN}$

式中: k_{EC} 、 k_{EN} 分别代表微生物碳、氮的浸提系数, $k_{EC}=0.45$, $k_{EN}=0.45$;C_F、N_F分别代表熏蒸样品的有机碳、氮含量;C_{NF}、N_{NF}代表未熏蒸样品的有机碳、氮含量.

1.5 数据处理

采用Excel 2007和SPSS 20.0软件对数据进行统计分析,利用单因素方差分析(one-way ANOVA)及Duncan多重比较法检验不同林分类型土壤MBC、MBN的差异性(α=0.05),同时利用三因素方

表 1 4种林分类型概况
Table 1 General status of four forest types

因子 Parameter	林分类型 Forest type			
	BF	PB	PH	CL
平均树高 Mean tree height (m)	24.51±2.63a	18.71±2.82b	11.20±1.31c	19.53±1.90b
平均胸径 Mean DBH (cm)	45.21±4.92a	20.60±3.61b	9.52±1.51c	25.64±3.12b
林分密度 Stand density (plant·hm ⁻²)	1000±30a	1050±35a	3650±148b	1100±38a
土壤含水率 Soil water content (%)	22.96±3.79a	26.08±3.27a	26.89±1.18a	28.72±5.78ab
土壤容重 Soil bulk density(g·cm ⁻³)	0.71±0.18c	1.08±0.15ab	1.03±0.02b	1.19±0.08a
土壤 pH Soil pH	3.91±0.25a	4.34±0.27b	4.61±0.16b	4.55±0.31b
有机碳含量 Total organic carbon content (g·kg ⁻¹)	30.45±2.67a	26.52±1.05ab	28.03±2.34a	22.17±1.82c
全氮含量 Total nitrogen content (g·kg ⁻¹)	1.69±0.11a	1.56±0.09a	1.49±0.12ab	1.37±0.14b
全磷含量 Total phosphorus content (mg·g ⁻¹)	0.25±0.04a	0.30±0.09a	0.28±0.08a	0.33±0.06a
全钾含量 Total kalium content (mg·g ⁻¹)	10.82±4.15a	9.74±3.36a	13.35±5.76a	11.13±2.88a
年凋落物量 Litter biomass (t·hm ⁻² ·a ⁻¹)	2.54±0.74a	2.04±0.37a	1.65±0.41ab	0.75±0.14c
凋落物碳氮比 Litter C/N ratio	27.56±2.39a	32.69±4.98ab	35.01±5.51ab	56.16±7.68c

BF: 常绿阔叶林 Evergreen broad-leaved forest; PB: 闽楠人工林 *Phoebe bournei* plantation; CL: 杉木人工林 *Cunninghamia lanceolata* plantation; PH: 毛竹人工林 *Phyllostachys heterocycla* plantation.下同 The same below. 同行不同小写字母表示差异显著(P<0.05) Different small letters in the same row mean significant difference at 0.05 level.

差分析法检验林分类型、土层及季节对土壤 MBC、MBN 含量的影响.采用 Pearson 法对土壤 MBC、MBN 含量与土壤理化性质及相关环境因子进行相关分析.采用 Excel 2007 软件作图.图表中数据为平均值±标准差.

2 结果与分析

2.1 4 种林分类型土壤微生物生物量碳氮的变化

由图 1 可以看出,4 种林分类型表层土壤(0~10 cm)的 MBC、MBN 显著高于深层土壤(40~60 cm),说明随着土层的加深,4 种林分类型土壤 MBC、MBN 也下降.在表层土壤中,4 种林分类型土壤 MBC、MBN 表现出较一致的变化规律,即 4 种林分类型表层土壤 MBC、MBN 均以常绿阔叶林最高,其次为闽楠人工林、毛竹人工林和杉木人工林,且常绿阔叶林、闽楠人工林和毛竹林表层土壤的 MBC、MBN 显著高于杉木人工林,其 MBC 分别是杉木人工林的 1.64、1.39 和 1.38 倍,MBN 分别是杉木人工林的 1.99、1.55 和 1.60 倍.常绿阔叶林转变成闽楠、毛竹及杉木人工林后,表层土壤 MBC 分别下降

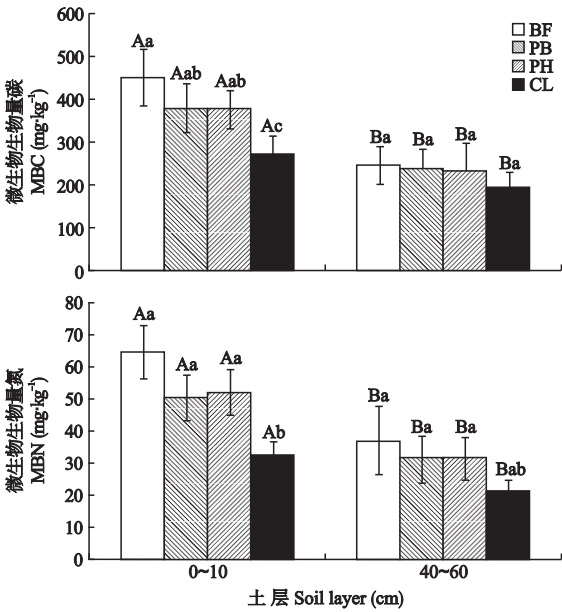


图 1 4 种林分不同土层土壤微生物生物量碳 (MBC)、氮 (MBN)

Fig.1 Contents of soil microbial biomass carbon (MBC) and nitrogen (MBN) in different soil layers under four forest types. BF: 常绿阔叶林 *Evergreen broad-leaved forest*; PB: 闽楠人工林 *Phoebe bournei* plantation; CL: 杉木人工林 *Cunninghamia lanceolata* plantation; PH: 毛竹人工林 *Phyllostachys heterocycla* plantation.不同小写字母表示同一土层不同林分间差异显著,不同大写字母代表同一林分不同土层间差异显著 ($P < 0.05$) Different lowercase letters meant significant difference among different plantations in the same soil layer, and different capital letters represented significant difference between different soil layers in the same forest type. 下同 The same below.

15.2%、15.9%和 39.0%,而 MBN 分别下降 22.1%、19.6%和 49.8%.4 种林分类型深层土壤的 MBC、MBN 均不存在显著差异.土壤微生物生物量碳氮比 (MBC/MBN) 的变动区间分别为:常绿阔叶林 (6.12~7.32)、闽楠人工林 (7.35~7.81)、毛竹人工林 (7.14~7.51)、杉木人工林 (8.02~8.87),林分类型对 MBC/MBN 具有显著影响 (表 2).

2.2 4 种林分类型土壤微生物生物量碳氮占土壤有机碳和全氮的比例

由图 2 可以看出,除了杉木人工林深层土壤 MBN 占 TN 的比例与表层土壤无显著差异外,相同林分类型土壤的 MBC/TC 和 MBN/TN 均为深层土壤显著高于表层土壤.4 种林分表层土壤的 MBC/TC 差异不显著;在深层土壤中,闽楠人工林的 MBC/TC 值最高,常绿阔叶林、闽楠林和毛竹林之间无显著差异,杉木人工林最低,且显著低于其他 3 种林分.表层土壤的 MBN/TN 值以常绿阔叶林最高,其次为毛竹人工林、闽楠人工林和杉木人工林,但 4 种林分间差异不显著;深层土壤的 MBN/TN 值以常绿阔叶林最高,其次为闽楠人工林、毛竹人工林和杉木人工林,杉木人工林显著低于其他 3 种林分,而常绿阔叶林、闽楠人工林和毛竹林三者差异不显著.

2.3 4 种林分类型土壤微生物生物量碳氮的季节变化

4 种林分类型表层和深层土壤的 MBC 均具有

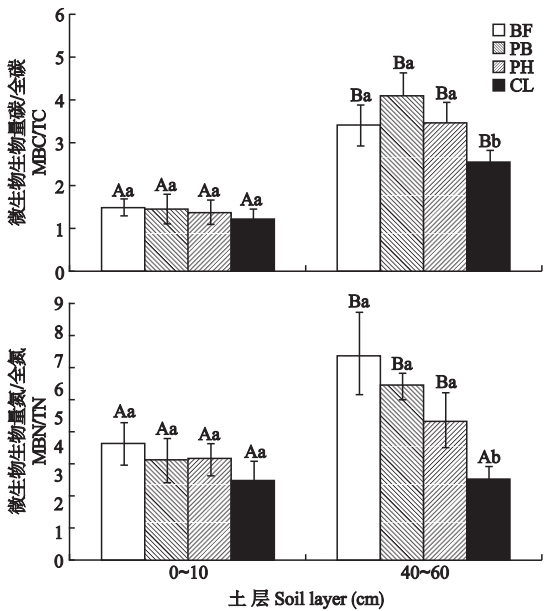


图 2 4 种林分类型不同土层土壤微生物生物量碳氮占土壤有机碳和全氮的比例

Fig.2 Ratio of soil microbial biomass carbon (MBC) and nitrogen (MBN) to total organic carbon and total nitrogen of different soil layers under four forest types.

明显的季节动态规律,即表现出明显的夏高冬低的“单峰型”曲线变化模式(图3).4种林分土壤的MBC最大值也各不相同,常绿阔叶林表层和深层土壤的MBC最大值分别是571.33和330.15 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,闽楠人工林分别是535.16和348.73 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,毛竹人工林分别是539.21和370.83 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,杉木人工林分别是379.56和272.84 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$.常绿阔叶林、闽楠人工林和毛竹人工林土壤MBC季节变幅均大于杉木人工林,各林分类型深层土壤的MBC季节变动幅度小于表层土壤.季节、林分类型及土层均对土壤的MBC具有显著影响,季节与土层、林分类型与土层的交互作用对土壤MBC

存在显著影响,而季节与林分类型,以及季节、林分类型和土层的交互作用对土壤MBC的影响均不显著(表2).

4种林分类型表层和深层土壤的MBN也表现出较明显的季节变化规律,除了杉木人工林深层土壤表现出春高冬低的变化模式外,其余的均表现为夏高冬低的“单峰型”曲线变化模式(图3).与深层土壤相比,表层土壤的MBN含量波动幅度更大.季节、林分类型和土层均对土壤MBN具有显著影响,季节与林分类型、季节与土层的交互作用对土壤MBN的影响达到显著水平,而林分类型与土层,以及季节、林分类型与土层的交互作用对土壤MBN的

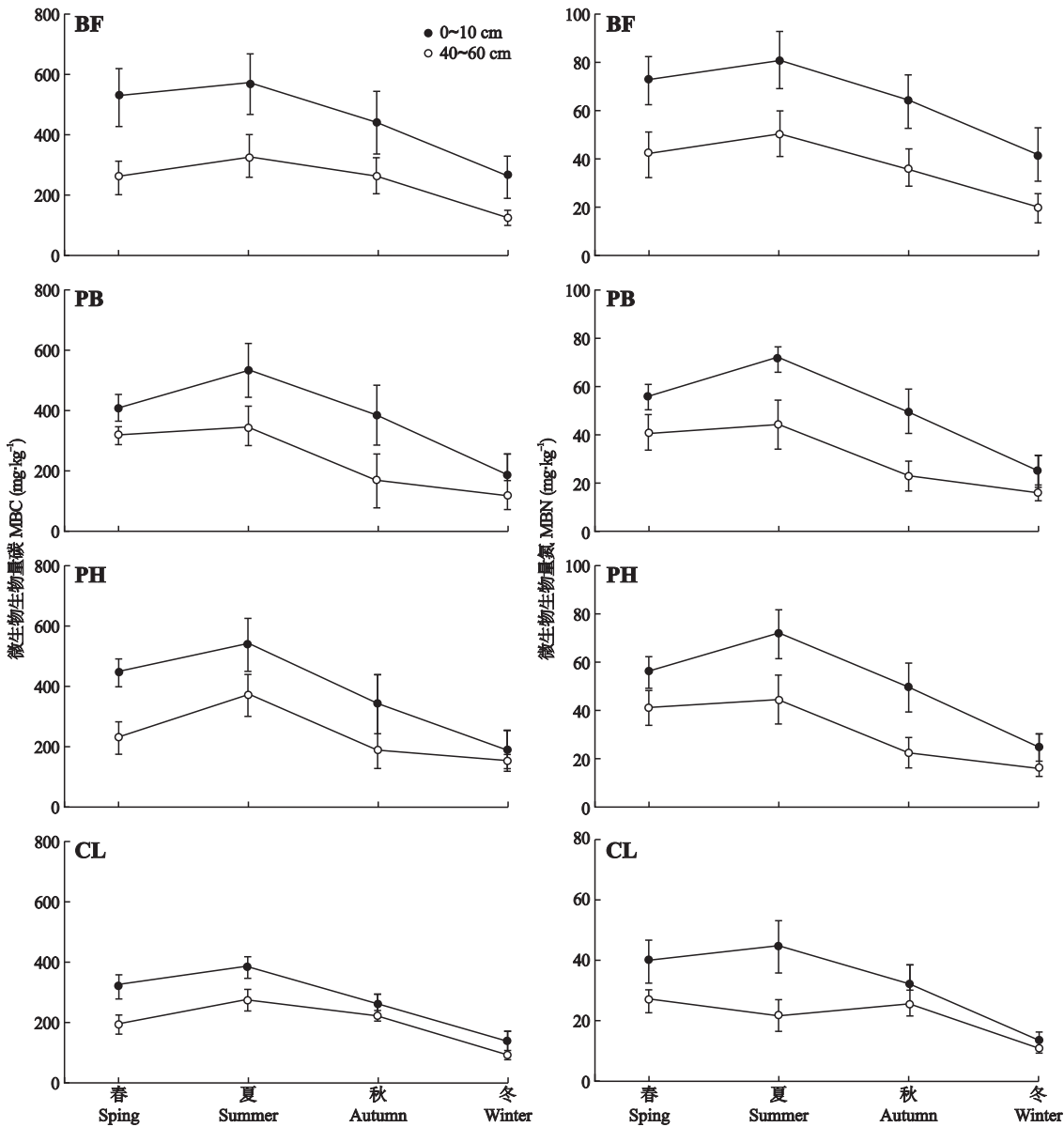


图3 4种林分类型土壤微生物生物量碳氮的季节动态
Fig.3 Seasonal dynamics of soil microbial biomass carbon and nitrogen under four forest types.

表 2 土壤微生物生物量碳 (MBC)、氮 (MBN) 及其比值的方差分析
Table 2 ANOVA of soil microbial biomass carbon (MBC) and nitrogen (MBN) as well as MBC/MBN

因素 Factor	MBC			MBN			MBC/MBN		
	自由度 <i>df</i>	<i>F</i>	<i>P</i>	自由度 <i>df</i>	<i>F</i>	<i>P</i>	自由度 <i>df</i>	<i>F</i>	<i>P</i>
季节 Season (S)	3	26.39	<0.001	3	53.21	<0.001	3	1.13	0.284
林分类型 Forest type (F)	3	5.24	<0.001	3	1.19	0.029	3	3.68	0.009
土层 Soil layer (Y)	1	43.27	<0.001	1	85.24	<0.001	1	0.13	0.649
季节×林分类型 S×F	9	1.02	0.451	9	3.34	0.018	9	1.37	0.067
季节×土层 S×L	3	3.69	0.024	3	3.88	0.014	3	0.45	0.752
林分类型×土层 F×Y	3	2.96	0.041	3	1.95	0.108	3	0.91	0.085
季节×林分类型×土层 S×F×Y	9	0.27	0.980	9	0.74	0.682	9	2.25	0.071

表 3 4 种林分类型土壤微生物生物量碳 (MBC)、氮 (MBN) 与土壤理化性质的相关系数
Table 3 Correlated coefficients between soil microbial biomass carbon (MBC) and nitrogen (MBN) with soil physicochemical properties

林分类型 Forest type	指标 Index	MBC	MBN	土壤温度 Soil temperature	土壤含水率 Soil water content	土壤容重 Soil bulk density	pH	有机碳 Total C	全氮 Total N	全磷 Total P	全钾 Total K
BF	MBC	1	0.672 **	0.650 **	0.222	-0.631 **	0.170	0.531 *	0.751 **	0.322	0.212
	MBN	0.672 **	1	0.211	0.273	-0.602 **	-0.051	0.811 **	0.633 **	0.214	0.061
PB	MBC	1	0.731 **	0.552 *	0.271	-0.441	0.112	0.762 **	0.522 *	0.061	0.324
	MBN	0.731 **	1	0.641 **	0.342	-0.562 *	0.162	0.813 **	0.731 **	0.122	0.174
PH	MBC	1	0.753 **	0.484 *	0.244	-0.742 **	0.233	0.882 **	0.892 **	0.341	0.252
	MBN	0.753 **	1	0.542 *	0.193	-0.772 **	0.314	0.691 **	0.822 **	0.281	0.331
CL	MBC	1	0.582 *	0.691 **	0.142	-0.541 *	0.242	0.490 *	0.584 *	0.481 *	-0.080
	MBN	0.582 *	1	0.522 *	0.312	-0.511 *	0.290	0.511 *	0.620 **	0.293	0.112

* $P<0.05$; ** $P<0.01$.

影响均未达到显著水平(表 2)。

2.4 土壤微生物生物量碳氮与土壤理化性质的关系

对 4 种林分类型土壤的 MBC、MBN 含量与土壤理化性质进行 Pearson 相关分析(表 3),结果显示,除了常绿阔叶林土壤 MBN 与土壤温度相关关系不显著外,其余 3 种林分类型土壤的 MBC、MBN 均与土壤温度呈显著正相关性;各林分类型土壤 MBC、MBN 均与土壤有机碳含量和全氮含量呈显著正相关,而与土壤容重呈显著负相关。4 种林分土壤 MBC、MBN 与土壤含水量、土壤 pH 值、土壤全磷、全钾均无显著的相关关系。

3 讨 论

3.1 不同林分类型土壤微生物生物量碳氮特征

森林凋落物的组成、森林内的小气候以及森林土壤微生物的代谢底物都受到不同森林类型、土地利用方式和林分结构的显著影响。因此,处于相同的气候带下,土壤微生物生物量也会有所差异^[15,24-27]。本研究中,4 种林分类型土壤平均 MBC、MBN 的变动范围分别在 195.02~450.06 mg·kg⁻¹和 21.32~64.82 mg·kg⁻¹,略低于相同气候带的结果^[4,28]。产

生差异的原因可能是土壤类型和气候条件不同造成的。此外,本研究中表层土壤的 MBC、MBN 为常绿阔叶林最高,其次是毛竹和闽楠人工林,杉木人工林显著低于其他 3 种林分;而深层土壤 4 种林分之间的 MBC、MBN 无显著差异。表明表层土壤 MBC、MBN 受林分类型的影响较大,而林分类型对深层土壤 MBC、MBN 的影响不显著。各林分表层土壤的 MBC、MBN 显著高于深层土壤。这与前人研究结果相符^[2,14,24,29]。由于表层土壤是植物根系与凋落物集中分布的区域,其微生物活性显著高于深层土壤^[30],土壤表层富集大量微生物生物量碳氮,表层矿质土壤对微生物生物量碳氮的强烈吸附作用造成表层土壤微生物生物量碳氮不容易渗透到深层土壤^[19]。相对于杉木人工林,阔叶林(常绿阔叶林、闽楠林)具有较高的凋落物数量和质量(C/N 较小),凋落物更容易分解,大量高质量的凋落物为土壤输送了丰富的养分,进而提高林地表层土壤微生物的数量和活性,而针叶林(杉木林)凋落物数量少且不容易分解,土壤微生物效应较差^[31]。毛竹林每年都有施肥、土壤复垦、除草等人为经营活动,也是其保持较高 MBC、MBN 的重要原因^[10]。相关研究表明,林分树种组成越复杂,为土壤输入的碳源更为丰富,也更有利

于土壤微生物生物量碳氮的积累^[32]. 闽楠与毛竹人工林的树种组成相对于常绿阔叶林较为单一, 因此, 常绿阔叶林土壤 MBC、MBN 略高于闽楠与毛竹人工林.

通常土壤 MBC、MBN 分别占土壤 TC 和 TN 含量的 1.0%~5.0% 和 2.0%~7.0%^[31]. 本研究中, 4 种林分类型土壤的 MBC、MBN 分别占 TC 和 TN 的比例范围分别是 1.2%~4.1% 和 2.8%~6.8%. 常绿阔叶林、闽楠人工林、毛竹人工林土壤 MBC、MBN 分别占土壤 TC 及 TN 含量的比例均高于针叶林(杉木人工林). 这与人研究结论基本一致^[4,33], 说明针叶林(杉木人工林)土壤 C、N 的累积能力与维持林地土壤微生物生物量碳氮的能力均弱于阔叶林和毛竹林. 此外, 深层土壤 MBC、MBN 分别占 TC 和 TN 的比例比表层土壤高, 说明表层土壤对土壤微生物生物量的累积能力弱于深层土壤. 这可能与林木根系在深层土壤中仍有大量分布有关^[18].

相关研究表明, 土壤中细菌和真菌的 C/N 值分别在 3~5 和 4~15 范围内. 真菌往往能够适应较差的土壤环境, 土壤中 MBC/MBN 越大, 真菌比例就越高^[34]. 因此, 土壤中微生物生物量的碳氮比不但可以体现出真菌与细菌在土壤中的比例, 同时也可以说明土壤环境状况^[35]. 本研究中, 杉木人工林的土壤 MBC/MBN 高于常绿阔叶林、闽楠和毛竹人工林, 表明杉木林真菌比其他 3 种林分更占优势, 与前人研究结论相符^[10,35]. 这主要是由于杉木的凋落物较难分解, 土壤养分状况较差, 细菌数量减少造成的^[36]. 何友军等^[28]在研究湖南会同地区杉木人工林与常绿阔叶林土壤的 MBC/MBN 时发现, 常绿阔叶林土壤的 MBC/MBN 值要高于杉木人工林(常绿阔叶林 8.49, 杉木人工林 5.87), 导致研究结论不一的原因可能是树种组成及气候条件等的差异. 不同林分类型之间 MBC/MBN 的差异也体现了土壤微生物在生态对策、生存方式以及群落结构等方面的差别^[37].

3.2 4 种林分类型土壤微生物生物量的季节动态

本研究中, 4 种林分的表层土壤和深层土壤的 MBC、MBN 基本上表现出夏高冬低的“单峰型”季节变化模式. 这与人研究的结论基本一致^[38-39], 夏季较高的土壤温湿度为土壤微生物的繁殖提供了良好的代谢环境, 从而增加了土壤 MBC、MBN, 冬季较低的土壤温度和湿度削弱了土壤微生物的代谢, 抑制了土壤微生物的生长与繁殖, 进而降低了土壤 MBC、MBN^[40]. 然而, 不同的气候带的土壤微生物生

物量的季节变化会有较大差异^[16], 相同气候条件下不同林分类型的土壤微生物生物量的季节变化规律也不同. 在温带地区, 森林土壤微生物生物量含量通常呈现出冬低夏高和冬高夏低的变动规律, 这与受到土壤温度和湿度的综合影响有关^[41]; 在热带地区, 由于微生物与植物对土壤养分的吸收不同步, 导致土壤微生物生物量出现不规则的季节变化^[17]; 而在热带地区, 森林土壤微生物生物量会出现干湿季交替循环变化, 主要是由该地区水分的干湿交替作用造成的^[42]. 土壤微生物生物量季节变动的复杂性是由于影响森林生态系统的主导因子不一造成的^[15].

本研究 4 种林分类型的土壤 MBC、MBN 的季节变化表现出较一致的规律, 但林分类型的差异导致植物生长情况、土壤理化性质及凋落物种类等的不同. 与其他 3 种林分相比, 杉木人工林的 MBC、MBN 相对更小, 季节波动幅度也相对较小, 各林分表层土壤 MBC、MBN 的季节波动幅度较深层土壤更大, 可能是由于表层土壤的底物输入变化较大造成的^[16].

3.3 土壤微生物生物量碳氮和土壤理化性质的关系

影响森林土壤 MBC、MBN 的因素是复杂多样的^[4]. 土壤微生物群落结构组成与其活性受到土壤温度的深刻影响, 同时也影响着森林凋落物的分解、树木的生长发育和土壤动物的分布及其活动. 因此, 土壤温度可能会在某种程度上影响土壤微生物生物量^[43]. 本研究发现, 4 种林分土壤的 MBC、MBN 与土壤温度呈显著的正相关关系, 随着土壤温度的升高, 土壤 MBC、MBN 有升高的趋势, 说明在该研究区域内, 土壤温度成为影响森林土壤微生物生物量碳氮的主要因子之一. 这与 Feng 等^[44]的研究结论一致. 但何容等^[45]在研究武夷山植物带土壤微生物生物量随海拔的变化时发现, 土壤微生物生物量与土壤温度无显著相关性. 王国兵^[46]在研究北亚热带地区火炬松(*Pinus taeda*)人工林和次生栎林土壤 MBC 的季节变化时发现, 土壤 MBC 与土壤温度呈显著的负相关关系. Verburg 等^[47]则认为, 随着土壤温度的升高, 土壤微生物的活性也在增强. 从以上分析可知, 土壤微生物生物量受温度的影响具有一定的复杂性, 不同的研究环境及气候条件得到的研究结论也不同.

本研究中, 4 种林分土壤含水量与土壤 MBC、MBN 之间无显著相关性. 这与李胜蓝等^[4]、杨凯等^[48]和 Ruan 等^[17]报道的结果相同, 说明在该研究

区域内,土壤含水量并不是影响 4 种林分类型土壤微生物生物量的重要因素.可能与中亚热带地区雨水比较丰富、各季节森林土壤的水分含量相差不大有关.此外,本研究中,土壤容重与土壤微生物生物量呈显著的负相关关系,与彭佩钦等^[49]在研究洞庭湖湿地土壤的微生物生物量特征时得出的结论一致.可能是由于容重较小的土壤相对于容重大的土壤具有更良好的透气透水性,从而更有利于林木根系的分布,进而更有益于土壤微生物的繁殖和生长^[16,50].本研究中,杉木人工林土壤容重显著大于其他 3 种林分(表 1),从而导致杉木人工林土壤微生物生物量显著小于其他 3 种林分.

土壤养分的循环与有效性受到土壤微生物的显著影响.土壤微生物一方面将土壤有机物转化为有效养分,一方面土壤的无机营养成分起固持与保蓄作用.土壤的保肥能力越强,说明土壤的微生物生物量越大,土壤微生物生物量促使土壤中的稳定态养分转变成有效态养分^[51].本研究表明,4 种林分类型土壤微生物生物量碳氮均与土壤有机碳和全氮之间存在显著的正相关关系,说明本研究区内土壤有机碳和全氮是影响土壤微生物生物量的重要因子.这主要是由于调节土壤微生物生物量增长的重要驱动因子来自于土壤可利用的 C、N 库^[7].这与何友军等^[28]、刘爽等^[16]的研究结论一致,说明土壤微生物生物量碳氮可以用来判断林分土壤肥力^[52].

综上所述,常绿阔叶林改造成 3 种人工林后,林地表层土壤的 MBC、MBN 呈下降趋势,尤其是杉木人工林下降最为明显.因此,在本区域的森林经营与管理过程中,应切实管护好常绿阔叶林,同时在人工造林树种的选择上,可提倡营造阔叶树人工林,避免营造大面积针叶纯林.这对维护林地生产力和实现森林的可持续经营具有积极的现实意义.

参考文献

- [1] Xu J-J (徐佳晶), Shao P-S (邵鹏帅), Zhang J-L (张教林), *et al.* Changes of soil microbial biomass in different forest types in Xishuangbanna. *Chinese Journal of Soil Science* (土壤通报), 2017, **48**(1): 94–100 (in Chinese)
- [2] Wu R (吴然), Kang F-F (康峰峰), Han H-R (韩海荣), *et al.* Soil microbial biomass properties under typical vegetation types in the Taiyue Mountain of China. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology* (应用与环境生物学报), 2016, **22**(3): 486–493 (in Chinese)
- [3] Wang Y (王岩), Shen Q-R (沈其荣), Shi R-H (史瑞和), *et al.* Soil microbial biomass and its ecological effects. *Journal of Nanjing Agricultural University* (南京农业大学学报), 1996, **19**(4): 45–51 (in Chinese)
- [4] Li S-L (李胜蓝), Fang X (方晰), Xiang W-H (项文化), *et al.* Soil microbial biomass carbon and nitrogen concentrations in four subtropical forests in hilly region of central Hunan Province, China. *Scientia Silvae Sinicae* (林业科学), 2014, **50**(5): 8–16 (in Chinese)
- [5] He H, Zhang W, Zhang X, *et al.* Temporal responses of soil microorganisms to substrate addition as indicated by amino sugar differentiation. *Soil Biology & Biochemistry*, 2011, **43**: 1155–1161
- [6] Ding L, Wu J, Xiao H, *et al.* Mobilisation of inorganic phosphorus induced by rice straw in aggregates of a highly weathered upland soil. *Journal of the Science of Food & Agriculture*, 2012, **92**: 1073, doi: 10.1002/jsfa.4717
- [7] Wardle DA. A comparative assessment of factors which influence microbial biomass carbon and nitrogen levels in soil. *Biological Reviews*, 1992, **67**: 321–358
- [8] Wang G-B (王国兵), Ruan H-H (阮宏华), Tang Y-F (唐燕飞), *et al.* A review on the dynamics of soil microbial biomass in forest ecosystems. *Journal of Anhui Agricultural University* (安徽农业大学学报), 2009, **36**(1): 100–104 (in Chinese)
- [9] Li J (李君), Lan G-Y (兰国玉), Li Y-W (李玉武). Soil microbial biomass properties under typical vegetation types in the Taiyue Mountain of China. *Journal of Northwest Forestry University* (西北林学院学报), 2016, **31**(3): 63–67 (in Chinese)
- [10] Li B (李斌), Gu X (辜翔), Fang X (方晰), *et al.* Responses of soil microbial indicators to land-use types in hilly area, central Hunan Province. *Journal of Central South University of Forestry & Technology* (中南林业科技大学学报), 2015(4): 72–77 (in Chinese)
- [11] Fang L-N (方丽娜), Yang X-D (杨效东), Du J (杜杰). Effects of land use pattern on soil microbial biomass carbon in Xishuangbanna. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2011, **22**(4): 837–844 (in Chinese)
- [12] Zhang Y-F (张义凡), Liu X-D (刘学东), Chen L (陈林), *et al.* Soil microbial biomass carbon and nitrogen in 3 typical communities of desert grassland. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica* (西北植物学报), 2017, **37**(2): 363–371 (in Chinese)
- [13] Saynes V, Hidalgo C, Etchevers JD, *et al.* Soil C and N dynamics in primary and secondary seasonally dry tropical forests in Mexico. *Applied Soil Ecology*, 2005, **29**: 282–289
- [14] Wang X-Q (王薪琪), Han Y (韩轶), Wang C-K (王传宽). Soil microbial biomass and its seasonality in deciduous broadleaved forests with different stand ages in the Mao'ershan region, Northeast China. *Chinese Journal of Plant Ecology* (植物生态学报), 2017, **41**(6): 597–609 (in Chinese)
- [15] Liu C (刘纯), Liu Y-K (刘延坤), Jin G-Z (金光泽). Seasonal dynamics of soil microbial biomass in six

- forest types in Xiaoxing'an Mountains, China. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2014, **34**(2): 451–459 (in Chinese)
- [16] Liu S (刘 爽), Wang C-K (王传宽). Spatio-temporal patterns of soil microbial biomass carbon and nitrogen in five temperate forest ecosystems. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2010, **30**(12): 3135–3143 (in Chinese)
- [17] Ruan HH, Zou XM, Scatena FN, *et al.* Asynchronous fluctuation of soil microbial biomass and plant litterfall in a tropical wet forest. *Plant and Soil*, 2004, **260**: 147–154
- [18] Sun W-Y (孙文义), Guo S-L (郭胜利). Effects of secondary and manmade forests on soil organic C and N in subsurface soil in hilly region of the Loess Plateau. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2010, **30**(10): 2611–2620 (in Chinese)
- [19] Xiao H-Y (肖好燕), Liu B (刘 宝), Yu Z-P (余再鹏), *et al.* Effects of forest types on soil dissolved organic carbon and nitrogen in surface and deep layers in subtropical region, China. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2016, **27**(4): 1031–1038 (in Chinese)
- [20] Rumpel C, Kögel-Knabner I. Deep soil organic matter: A key but poorly understood component of terrestrial C cycle. *Plant and Soil*, 2011, **338**: 143–158
- [21] Zhang R (张 睿), Bai Y (白 杨), Liu J (刘 娟), *et al.* Effects of conversion of natural broad-leaved forest to Chinese fir plantation on soil respiration in subtropical China. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2015, **26**(10): 2946–2952 (in Chinese)
- [22] Vance ED, Brooks PC, Jenkinson DS. An extraction method for measuring soil microbial biomass. *Soil Biology & Biochemistry*, 1987, **19**: 703–707
- [23] Wu J-S (吴金水). Soil Microbial Biomass: Methods and Application. Beijing: China Meteorological Press, 2006 (in Chinese)
- [24] Pang X (庞 绪), He W-Q (何文清), Yan C-R (严昌荣), *et al.* Effect of tillage and residue management on dynamic of soil microbial biomass carbon. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2013, **33**(4): 1308–1316 (in Chinese)
- [25] Thoms C, Gattinger A, Jacob M, *et al.* Direct and indirect effects of tree diversity drive soil microbial diversity in temperate deciduous forest. *Soil Biology & Biochemistry*, 2010, **42**: 1558–1565
- [26] Yang G (杨 刚), He X-Y (何寻阳), Wang K-L (王克林), *et al.* Effects of vegetation types on soil micro-biomass carbon, nitrogen and soil respiration. *Chinese Journal of Soil Science* (土壤通报), 2008, **39**(1): 189–191 (in Chinese)
- [27] Malchair S, Carnol M. Microbial biomass and C and N transformations in forest floors under European beech, sessile oak, Norway spruce and Douglas-fir at four temperate forest sites. *Soil Biology & Biochemistry*, 2009, **41**: 831–839
- [28] He Y-J (何友军), Wang Q-K (王清奎), Wang S-L (汪思龙), *et al.* Characteristics of soil microbial biomass carbon and nitrogen and their relationships with soil nutrients in *Cunninghamia lanceolata* plantations. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2006, **17**(12): 2292–2296 (in Chinese)
- [29] Wan X-H (万晓华), Huang Z-Q (黄志群), He Z-M (何宗明), *et al.* Effects of tree species transfer on soil dissolved organic matter pools in a reforested Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*) woodland. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2014, **25**(1): 12–18 (in Chinese)
- [30] Taylor JP, Wilson B, Mills MS, *et al.* Comparison of microbial numbers and enzymatic activities in surface soils and subsoils using various techniques. *Soil Biology & Biochemistry*, 2002, **34**: 387–401
- [31] Wang J-J (王娟娟), Zhu S (朱 莎), Jin S-K (靳士科), *et al.* Spatio-temporal distribution of soil microbial biomass carbon and nitrogen in three types of urban forest soils in Shanghai. *Journal of Ecology and Rural Environment* (生态与农村环境学报), 2016, **32**(4): 615–621 (in Chinese)
- [32] Xue S (薛 蕊), Liu G-B (刘国彬), Dai Q-H (戴全厚), *et al.* Dynamic changes of soil microbial biomass in the restoration process of shrub plantations in loess hilly area. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2008, **19**(3): 517–523 (in Chinese)
- [33] Xu QF, Xu J. Changes in soil carbon pools induced by substitution of plantation for native forest. *Pedosphere*, 2003, **13**: 271–278
- [34] Paul EA, Clark FE. Transformation of nitrogen between the organic and inorganic phase and to nitrate. *Soil Microbiology & Biochemistry*, 1989, **51**: 131–146
- [35] Fauci MF, Dick RP. Soil microbial dynamics: Short and long-term effects of inorganic and organic nitrogen. *Soil Science Society of America Journal*, 1994, **58**: 801–806
- [36] Witter E, Mårtensson AM, Garcia FV. Size of the soil microbial biomass in a long-term field experiment as affected by different N-fertilizers and organic manures. *Soil Biology & Biochemistry*, 1993, **25**: 659–669
- [37] Zhong Z, Makeschin F. Differences of soil microbial biomass and nitrogen transformation under two forest types in central Germany. *Plant and Soil*, 2006, **283**: 287–297
- [38] Chen CR, Xu ZH, Blumfield TJ, *et al.* Soil microbial biomass during the early establishment of hoop pine plantation: Seasonal variation and impacts of site preparation. *Forest Ecology and Management*, 2003, **186**: 213–225
- [39] Yang K, Zhu JJ, Zhang M, *et al.* 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*, 2010, **3**: 175–182
- [40] Bijayalaxmi DN, Yadava PS. 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**: 220–227

[41] Liu Y (刘 颖), Han S-J (韩士杰). Factors controlling soil respiration in four types of forest of Changbai Mountains, China. *Ecology & Environmental Sciences* (生态环境学报), 2009, **18**(3): 1061–1065 (in Chinese)

[42] Sugihara S, Funakawa S, Kilasara M, *et al.* Effect of land management and soil texture on seasonal variations in soil microbial biomass in dry tropical agroecosystems in Tanzania. *Applied Soil Ecology*, 2010, **44**: 80–88

[43] Zhang G-X (张鸽香). Variations of Soil Respiration and Microbial Biomass Carbon at The Different Vegetation Types of Urban Green Spaces. PhD Thesis. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2011 (in Chinese)

[44] Feng W, Zou X, Schaefer D. Above- and belowground carbon inputs affect seasonal variations of soil microbial biomass in a subtropical monsoon forest of southwest China. *Soil Biology & Biochemistry*, 2009, **41**: 978–983

[45] He R (何 容), Wang J-S (汪家社), Shi Z (施政), *et al.* Variations of soil microbial biomass across four different plant communities along an elevation gradient in Wuyi Mountains, China. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2009, **29**(9): 5138–5144 (in Chinese)

[46] Wang G-B (王国兵). Study on the Dynamics of Soil Carbon in a Secondary Oak Forest and a Pine Plantation in North Sub-tropical Area, South-eastern China. PhD Thesis. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2008 (in Chinese)

[47] Verburg PSJ, Dam DV, Hefting MM, *et al.* Microbial transformations of C and N in a boreal forest floor as affected by temperature. *Plant and Soil*, 1999, **208**: 187–197

[48] Yang K (杨 凯), Zu J-J (朱教君), Zhang J-X (张金鑫), *et al.* Seasonal dynamics of soil microbial biomass C and N in two larch plantation forests with different ages in Northeastern China. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2009, **29**(10): 5500–5507 (in Chinese)

[49] Peng P-Q (彭佩钦), Zhang W-J (张文菊), Tong C-L (童成立), *et al.* Vertical distribution of soil organic carbon, nitrogen and microbial biomass C, nat soil profiles in wetlands of Dongting Lake Floodplain. *Journal of Soil and Water Conservation* (水土保持学报), 2005, **19**(1): 49–53 (in Chinese)

[50] Zhu S-Y (朱胜英), Zhou B (周 彪), Mao Z-J (毛子军), *et al.* Space-time dynamics of fine root biomass of six forests in maoershan forest region. *Scientia Silvae Sinicae*(林业科学), 2006, **42**(6): 13–19 (in Chinese)

[51] Carter MR, Rennie DA. Dynamics of soil microbial biomass N under zero and shallow tillage for spring wheat, using ¹⁵N urea. *Plant and Soil*, 1984, **76**: 157–164

[52] Jenkinson DS, Ladd JN. Microbial biomass in soil: Measurement and turnover// Paul EA, Ladd JN, eds. *Soil biochemistry*. New York: Marcel Dekker, 1981: 415–471

作者简介 刘 宝,男,1980 年生,博士研究生,副教授. 主要从事森林土壤碳循环研究. E-mail: 40511779@qq.com

责任编辑 肖 红