

山西太岳山典型植被类型土壤微生物量特征*

吴然¹ 康峰峰¹ 韩海荣^{1**} 程小琴¹ 韩秀丽² 周文嵩¹ 赵敬¹ 纪文婧¹

¹北京林业大学省部共建森林培育与保护教育部重点实验室 100083 北京

²山西太岳山国有林管理局好地方林场 山西 046599

摘要 以山西太岳山4种不同植被类型为对象,研究其土壤微生物量碳、氮(MBC、MBN)含量以及土壤和凋落物养分含量的变化特征,并利用通径分析模型,探讨土壤和凋落物养分含量对土壤微生物量的效应。结果显示:MBC、MBN和土壤有机碳(SOC)、全氮(TN)含量随土层深度加深逐渐减小。各层土壤SOC、TN含量均表现为草甸>华北落叶松人工纯林>华北落叶松白桦混交林>灌木林;MBC和MBN含量分别为143-900 mg/kg和22-155 mg/kg,两者均在草甸和华北落叶松白桦混交林中显著高于华北落叶松人工纯林和灌木林;土壤微生物量碳氮比在A(0-10 cm)、B(10-20 cm)两层的变化范围为6-8,在C(20-30 cm)、D(30-40 cm)两层的变化范围为4-10。土壤微生物熵在华北落叶松白桦混交林和灌木林下达到较高水平,碳熵和氮熵的变化范围分别为0.6%-2.8%和1.4%-5.4%。通径分析结果表明,土壤理化性质、凋落物养分含量和土壤微生物量之间存在不同程度的相关性,凋落物N含量是影响土壤微生物量的直接因素之一。总体来说,不同植被类型对土壤微生物量有重要的影响,落叶松人工纯林和草甸对碳库的作用更大,有利于养分的积累。(图5表8参43)

关键词 土壤微生物量;土壤微生物碳氮比;土壤微生物熵;凋落物养分;植被类型;通径分析

CLC S714.33:Q148

Soil microbial biomass properties under typical vegetation types in the Taiyue Mountain of China*

WU Ran¹, KANG Fengfeng¹, HAN Hairong^{1**}, CHENG Xiaoqin¹, HAN Xiuli², ZHOU Wensong¹, ZHAO Jing¹ & JI Wenjing¹

¹Key Laboratory of Forest Cultivation and Conservation of Ministry of Education, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

²Haodifang Forest Farm, National Forest Administration of Taiyue Mountain, Changzhi 046599, China

Abstract In order to understand the effect of vegetation type on soil microbial biomass, this paper investigated the variation of soil microbial biomass with the soil and litter nutrient content in Mt. Taiyue, Shanxi, China. We measured soil microbial biomass and analyzed its correlation with soil physical-chemical properties and litter nutrient content by using path analysis model for *Larix principis-rupprechtii* Mayr. artificial pure forest (PF), *Larch-Betula platyphylla* Suk. mixed forests (MF), shrubbery (S) and meadow (M). The results showed that: (1) the content of soil microbial biomass C and N, soil organic carbon (SOC) and total nitrogen (TN) gradually decreased with the soil depth. (2) The content of SOC, TN, MBC and MBN of each layer decreased in the order of M > PF > MF > S. The content of MBC and MBN in M and MF were significantly higher than those in PF and S. (3) The range of MBC/MBN was 6-8 in layers A and B and 4-10 in layers C and D. (4) The soil microbial entropy in MF and S were significantly higher than those in PF and M. (5) Path analysis showed certain degree of correlation between soil microbial biomass and soil physical-chemical properties or litter nutrient content. (6) The vegetation type had an effect on soil microbial biomass, with PF and M the most beneficial to soil carbon contents.

Keywords soil microbial biomass; soil microbial biomass C/N; soil microbial entropy; litter nutrient; vegetation types; path analysis

土壤微生物参与有机质的分解和腐殖质的合成,对物质循环和能量流动起着决定性的作用^[1-3]。在植被-土壤系统中,土壤微生物受地上植被的影响,同时由于自身对凋落物的分解作用,将凋落物养分归还到土壤中,并通过植物根系影响地上植被,与植被形成相互作用的反馈体系^[4-6],其对凋落物

降解、碳氮平衡、养分循环、土壤理化性质的改善也有很大影响^[7-9]。近年来,越来越多的研究将土壤微生物量、分布格局及群落结构作为土壤健康状况的指标^[10],土壤微生物量是指土壤中体积小于 $5 \times 10^3 \mu\text{m}^3$ 的生物总量,是土壤有机质中最为活跃的部分,包括细菌、真菌、放线菌和小型动物,但不包括植物残体^[11]。虽然只占很小一部分,但土壤微生物量在很大程度上反映了土壤质量^[12-14],其组成包括土壤微生物量碳(MBC)、土壤微生物量氮(MBN)、土壤微生物量磷

收稿日期 Received: 2015-09-23 接受日期 Accepted: 2015-11-11

*林业公益性行业科研专项(201404213)资助 Supported by the Forestry Special Funds for Public Welfare Projects (201404213)

通讯作者 Corresponding author (E-mail: hanhr@bjfu.edu.cn)

(MBP)等, MBC和MBN的转化速率快, 可以很好地反映土壤有机碳(SOC)、全氮(TN)的含量及变化特征, 因此常将MBC和MBN作为土壤生物学指标开展研究^[15-17]. 土壤微生物量在空间上分布的差异性较大, 对其在不同土层分布特征的研究也是必要的一部分^[18].

凋落物输入是植物间接向土壤微生物提供物质和能量的途径之一, 不同树种的微生物群落组成各异^[19-20]. 植被通过地上部分凋落物及地下部分凋落物为土壤微生物提供有机质和养分元素, 土壤微生物量与凋落物有机碳、全氮含量及凋落物碳氮比有密切关系^[21-23]. 不同植被类型下调落物的有机质、养分元素含量不一样, 这都会影响土壤表层微生物的活性, 植被类型不同, 土壤温湿度、土壤有机质、养分元素含量、pH值也各不相同^[24]. 因此, 明确不同植被类型下调落物与土壤碳、氮的关系及其微生物学机制是非常重要的. 目前, 国内外对不同植被类型下土壤碳氮含量的研究较多, 但对土壤微生物的研究相对较少^[25-26]. 我们对山西省太岳山好地方林场4种典型植被类型即华北落叶松人工纯林、华北落叶松白桦混交林、灌木林和草甸的土壤微生物量的变化规律进行研究, 旨在探讨不同植被类型土壤微生物量的差异, 并分析地上植被和土壤微生物量的相互关系, 以期为温带森林生态系统土壤微生物量的变化规律提供理论依据.

1 研究地区与研究方法

1.1 研究地概况

研究地点位于山西省长治市沁源县太岳山好地方林场(东经111°91′-112°04′, 北纬36°35′-36°53′), 境内海拔2 100-2 400 m. 该区气候属于温带大陆性气候, 四季分明, 年平均气温为8.6 °C, 年降雨量660 mm, 雨量集中在6、7、8月, 占全年降雨量的60%以上. 日照2 500-2 700 h. 好地方林场总经营面积4 553.20 hm², 活立木蓄积220 803.70 m³, 森林覆盖率为84.7%. 华北落叶松(*Larix principis-rupprechtii*)和白桦(*Betula platyphylla*)是本区最具代表性的乔木树种, 灌木主要有毛榛(*Corylus mandshurica*)、黄刺梅(*Rosa xanthina*)、忍冬(*Lonicera japonica*)、胡枝子(*Lespedeza bicolor*)、悬钩子(*Rubus corchorifolius*)等, 草本的优势种为细叶苔草(*Carex rigescens*)、小红菊(*Dendranthema chanetii*)等. 主要土壤类型有草甸土、棕壤、褐土等, 其中以棕壤、褐土为主.

1.2 实验方法

2014年7月于山西太岳山好地方林场选取华北落叶松人工纯林、华北落叶松白桦混交林、灌木林和草甸4种植被类型, 在每种植被类型内分别布设面积为20 m × 30 m的样地, 并在各样地内随机设置3个3 m × 3 m小样方, 共计12个. 样地基本特征见表1. 采用“V”字形法在每个小样方内随机选取3个采样点, 用直径50 mm的土钻分别在0-10 cm(A层)、10-20 cm(B层)、20-30 cm(C层)、30-40 cm(D层)土层进行采样. 所有土壤样品除去残根及凋落物后过2 mm筛, 一部分保存于4 °C冰箱内用于MBC、MBN的测定, 一部分风干后分别过1 mm筛和0.25 mm筛, 过1 mm筛的风干土用于pH值测定, 过0.25 mm筛的风干土用于土壤理化性质(SOC、TN、DOC及含水率等)的测定. 在样地内随机选择3个小样方, 收集地上

4种植被类型的叶凋落物, 带回后用元素分析仪测定其碳氮含量.

表1 样地基本特征

Table 1 Basic conditions of the sample plots

植被类型 Vegetation type	坡向 Slope direction	坡位 Slope position	坡度(α/°) Inclination	海拔(h/m) Elevation	年龄(t/a) Forest age
PF	南坡 South	中部 Central	29	2199	32
MF	南坡 South	中部 Central	31	2196	30
S	南坡 South	中部 Central	32	2159	—
M	南坡 South	中部 Central	28	2201	—

PF: 华北落叶松人工纯林; MF: 华北落叶松白桦混交林; S: 灌木林; M: 草甸.

PF: *Larix principis-rupprechtii* artificial pure forest; MF: *Larch-Betula platyphylla* mixed forests; S: shrubbery; M: meadow.

土壤基本理化性质测定方法:

将风干土过0.25 mm筛, 土壤SOC含量用重铬酸钾外加热氧化法测定; 土壤TN含量通过385 °C高温消煮, 将消煮液定容到100 mL, 并用AA3连续流动分析仪测定其含量; 土壤DOC用0.5 mol/L⁻¹的硫酸钾溶液提取, 将提取液置于Multi N/C 3100 TOC分析仪测定其含量^[27]; 将过1 mm筛的风干土按照水土比5:2的比例置于Sartorius PB-10型pH计内测定土壤pH值^[28]; 土壤含水率采用烘干法测定.

MBC、MBN含量利用氯仿熏蒸浸提法进行处理并利用Multi N/C 3100 TOC分析仪测定, 具体操作方法如下:

称取5 g鲜土放入100 mL白色塑料瓶中, 和氯仿与氢氧化钠一起放入玻璃真空干燥器内熏蒸24 h, 另称取5 g土样放入100 mL白色塑料瓶中, 不做熏蒸处理. 将熏蒸完全和未经过熏蒸处理的土样同时加入20 mL 0.5 mol/L⁻¹的K₂SO₄溶液, 振荡30 min后过滤. 将滤液置于Multi N/C 3100 TOC分析仪中进行测定. MBC、MBN分别用下式求得:

$$MBC = E_c / 0.38$$

$$MBN = E_n / 0.54$$

式中, E_c 、 E_n 分别为熏蒸和未熏蒸浸提液中土壤有机碳和土壤全氮的差值, 0.38、0.54为校正系数^[29].

1.3 数据处理

实验数据主要采用SPSS19.0软件中的单因素检验法及Pearson相关性检验法进行分析. 并采用Sigmaplot10.0软件进行制图. 利用通径分析模型检验各变量间的作用方向、强度和解释能力.

通径分析模型是多元统计分析方法的一种, 通过联立方程组求解通径系数, 以单向箭头表示通径系数, 双向箭头表示相关系数, 定义外生变量(Exogenous variable)和内生变量(Endogenous variable)以及它们之间的因果关系. 通径系数是标准化的偏回归系数, 变量之间的作用强度可通过线性可加的通径系数的代数和来描述^[2, 30].

2 结果与分析

2.1 不同植被类型下土壤理化性质特征

由表2可以看出, 不同植被类型土壤SOC、TN含量随着土层加深呈逐渐减小的趋势; 华北落叶松人工纯林、灌木

表2 土壤理化性质特征
Table 2 Soil physical-chemical properties

土层 Soil layer	植被类型 Vegetation type	土壤有机碳 SOC (w/g kg ⁻¹)	可溶性有机碳 DOC (w/g kg ⁻¹)	土壤全氮 TN (w/g kg ⁻¹)	pH值 Value of pH	含水率(w%) Moisture content
A (0-10 cm)	PF	35.495 ± 1.982b	135.355 ± 12.491a	2.36 ± 0.002b	7.237 ± 0.112a	0.3371
	MF	27.129 ± 1.793c	135.464 ± 2.321a	2.336 ± 0.008b	6.74 ± 0.053b	0.5791
	S	22.062 ± 1.892d	98.701 ± 6.724b	1.747 ± 0.115c	6.79 ± 0.098b	0.1546
	M	50.573 ± 0.195a	151.357 ± 12.285a	3.919 ± 0.006a	6.05 ± 0.026c	0.5553
B (10-20 cm)	PF	33.231 ± 2.199b	127.647 ± 3.473a	2.364 ± 0.001b	7.317 ± 0.126a	0.3890
	MF	24.073 ± 1.638c	135.635 ± 3.912a	1.838 ± 0.039c	7.033 ± 0.042b	0.4851
	S	15.066 ± 0.062d	71.157 ± 5.167b	1.118 ± 0.046d	7.16 ± 0.056b	0.1518
	M	49.185 ± 2.365a	135.649 ± 7.287a	3.914 ± 0.006a	6.17 ± 0.01c	0.4842
C (20-30 cm)	PF	32.831 ± 7.552b	115.849 ± 5.153b	1.967 ± 0.01b	7.58 ± 0.089ab	0.2987
	MF	25.314 ± 1.384b	138.646 ± 4.188a	1.499 ± 0.01c	7.377 ± 0.263a	0.4533
	S	11.024 ± 0.482c	66.971 ± 0.892c	0.77 ± 0.053d	7.18 ± 0.017b	0.1796
	M	37.962 ± 3.466a	139.993 ± 3.018a	3.275 ± 0.097a	6.55 ± 0.078c	0.4284
D (30-40 cm)	PF	22.298 ± 0.283b	133.440 ± 3.064b	1.407 ± 0.045c	7.67 ± 0.072a	0.3474
	MF	20.552 ± 1.1b	135.979 ± 7.328a	1.597 ± 0.053b	7.203 ± 0.006b	0.4628
	S	11.351 ± 0.353c	53.636 ± 2.010c	0.749 ± 0.092d	7.397 ± 0.121b	0.1682
	M	34.761 ± 3.652a	143.271 ± 3.682a	3.165 ± 0.123a	6.67 ± 0.151c	0.4054

PF: 华北落叶松人工纯林; MF: 华北落叶松白桦混交林; S: 灌木林; M: 草甸. 不同小写字母表示不同植被类型差异显著 ($P < 0.05$).
PF: *Larix principis-rupprechtii* artificial pure forest; MF: *Larch-Betula platyalla* mixed forests; S: shrubbery; M: meadow. Different small letters indicate significant difference at 0.05 level between vegetation types.

林、草甸的DOC含量随土层加深基本呈下降趋势,而华北落叶松白桦混交林的DOC含量没有明显的垂直变化规律. 各层土壤SOC、TN含量均表现为草甸>华北落叶松人工纯林>华北落叶松白桦混交林>灌木林,其中草甸显著高于其他植被类型,华北落叶松人工纯林和华北落叶松白桦混交林均显著高于灌木林,在A、B两层,华北落叶松人工纯林土壤SOC含量显著高于华北落叶松白桦混交林,在C、D两层,纯林与混交林没有显著差异. 土壤DOC含量表现为草甸>华北落叶松白桦混交林>华北落叶松人工纯林>灌木林,灌木林显著低于其他植被类型. pH值随土层深度加深呈逐渐增加的趋势,不同植被类型的pH值基本表现为华北落叶松人工纯林>灌木林>华北落叶松白桦混交林>草甸. 土壤含水率在4种植被类型中主要表现为华北落叶松白桦混交林>草甸>华北落叶松人工纯林>灌木林,灌木林的土壤含水率明显小于其他植被类型.

2.2 不同植被类型下土壤微生物量碳 (MBC) 含量变化特征

对不同植被类型和土层下土壤MBC含量进行二维方差分析,可以看出,土壤MBC含量在不同植被类型和不同土层间差异极显著,植被类型及各土层对土壤MBC含量产生极显著的交互作用(表3). 不同植被类型下MBC含量为143-900 mg/kg (图1),在土壤垂直剖面上的分布主要表现为随着土层深度加深,MBC含量逐渐减小. A层中MBC含量的变化情况为草甸>华北落叶松白桦混交林>灌木林>华北落叶松人工纯林,草甸土壤的MBC含量显著高于其他植被类型,华北落叶松白桦混交林与灌木林和华北落叶松人工纯林的MBC含量均有显著差异;B层MBC含量为草甸>华北落叶松白桦混交林>华北落叶松人工纯林>灌木林,4种植被类型土壤中MBC含量均有显著性差异;A、B层均表现为草甸的MBC含量最高. C、D两层MBC含量变化情况为华北落叶松白桦混交林>草甸>灌木林>华北落叶松人工纯林. 华北落叶松白桦混交林的土壤MBC含量显著高于其他3种植

被类型,4种植被类型的土壤MBC含量均有显著性差异 ($P < 0.05$).

表3 植被类型和土层对土壤MBC含量的影响
Table 3 Effects of soil layer and vegetation type on soil MBC

因素 Factor	F	P
植被类型 Vegetation type	238.704	<0.001
土层 Soil layer	843.720	<0.001
植被类型×土层 Vegetation type × Soil layer	24.365	<0.001

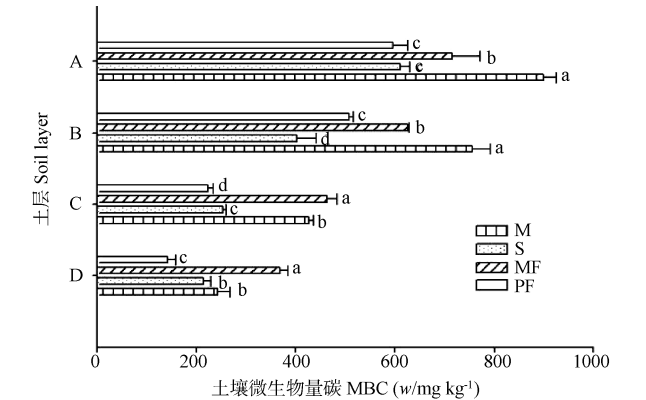


图1 不同植被类型下土壤微生物量碳. 不同小写字母表示不同植被类型差异显著 ($P < 0.05$). PF: 华北落叶松人工纯林; MF: 华北落叶松白桦混交林; S: 灌木林; M: 草甸.
Fig. 1 Microbial biomass carbon under different vegetation types. Different small letters indicate significant difference at 0.05 level between vegetation types. PF: *Larix principis-rupprechtii* artificial pure forest; MF: *Larch-Betula platyalla* mixed forests; S: shrubbery; M: meadow.

2.3 不同植被类型下土壤微生物量氮 (MBN) 含量变化特征

在不同植被类型和不同土层间土壤MBN含量差异极显著,植被类型及各土层对土壤MBN含量产生显著的交互作用(表4). 从图2可以看出,不同植被类型下MBN含量在土壤垂

直剖面上的变化规律与MBC相同,即表现为随着土层加深MBN含量逐渐减小,其含量在22-155 mg/kg之间。在A、B层,土壤MBN含量在4种植被类型下的变化规律与MBC一致,A层表现为草甸>华北落叶松白桦混交林>灌木林>华北落叶松人工纯林,B层表现为草甸>华北落叶松白桦混交林>华北落叶松人工纯林>灌木林,且草甸土壤的MBN含量显著高于其他植被类型。C层MBN含量的变化规律为草甸>华北落叶松白桦混交林>华北落叶松人工纯林>灌木林,草甸土壤MBN含量显著高于其他植被类型,D层MBN含量为华北落叶松白桦混交林>草甸>华北落叶松人工纯林>灌木林。华北落叶松白桦混交林的土壤MBN含量显著高于其他3种植被类型,4种植被类型的土壤MBN含量均有显著性差异($P < 0.05$)。

表4 植被类型和土层对土壤MBN含量的影响

Table 4 Effects of soil layer and vegetation type on soil MBN

因素 Factor	F	P
植被类型 Vegetation type	337.321	<0.001
土层 Soil layer	696.715	<0.001
植被类型×土层 Vegetation type × Soil layer	27.871	<0.001

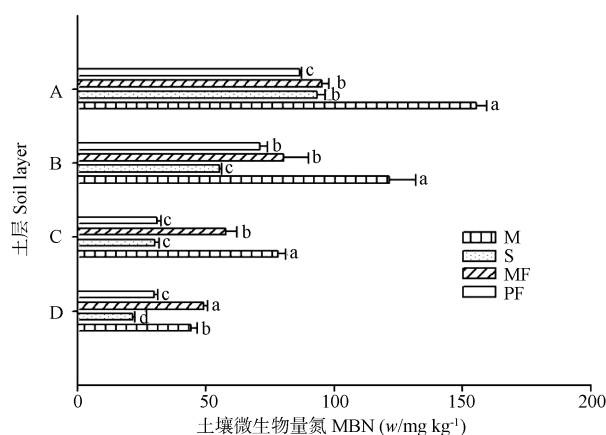


图2 不同植被类型下土壤微生物量氮。不同小写字母表示不同植被类型差异显著($P < 0.05$)。PF: 华北落叶松人工纯林; MF: 华北落叶松白桦混交林; S: 灌木林; M: 草甸。

Fig. 2 Microbial biomass nitrogen under different vegetation types. Different small letters meant significant difference at 0.05 level between vegetation types. PF: *Larix principis-rupprechtii* artificial pure forest; MF: *Larch-Betula platyalla* mixed forests; S: shrubbery; M: meadow.

2.4 不同植被类型下土壤微生物量碳氮比的变化

图3表示不同植被类型下土壤MBC/MBN的变化情况。4种植被类型的MBC/MBN在A、B两层的变化范围为6-8,在C、D两层的变化范围是4-10。A、B两层土壤MBC/MBN均在华北落叶松白桦混交林中最大,比值为8左右,且显著高于草甸;C、D两层MBC/MBN均为灌木林最大,比值在10左右,草甸比值最小,为5左右,草甸与华北落叶松白桦混交林有差异显著($P < 0.05$)。

图4、5表示不同植被类型下土壤MBC/SOC和MBN/TN情况。分析结果表明,在4种植被类型中,MBC/SOC的变化范围在0.6%-2.8%,MBN/TN的变化范围在1.4%-5.4%。各土层均表现为MBC/SOC在华北落叶松白桦混交林和灌木林下最大,

且显著高于华北落叶松人工纯林和草甸($P < 0.05$)。

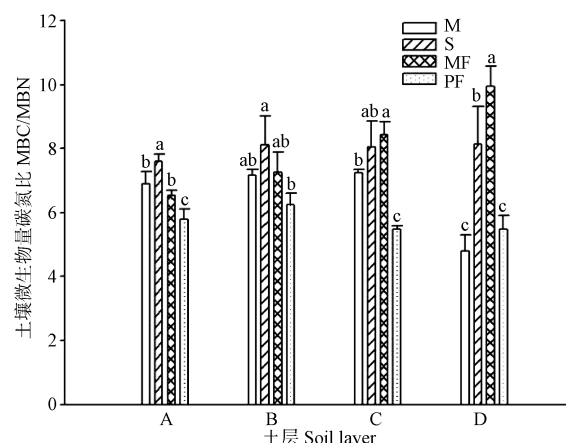


图3 不同植被类型下土壤微生物量碳氮比。不同小写字母表示不同植被类型差异显著($P < 0.05$)。PF: 华北落叶松人工纯林; MF: 华北落叶松白桦混交林; S: 灌木林; M: 草甸。

Fig. 3 Microbial biomass C/N under different vegetation types. Different small letters meant significant difference at 0.05 level between vegetation types. PF: *Larix principis-rupprechtii* artificial pure forest; MF: *Larch-Betula platyalla* mixed forests; S: shrubbery; M: meadow.

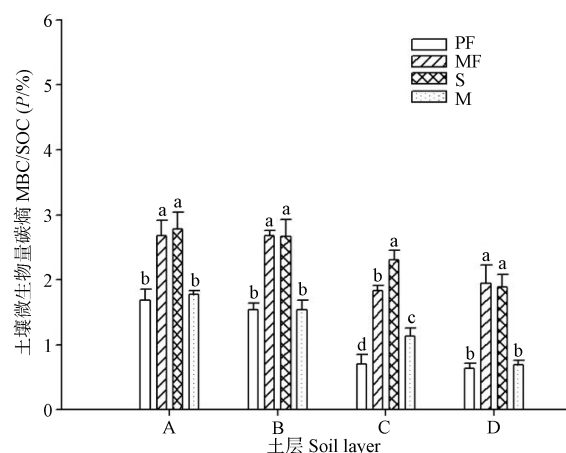


图4 不同植被类型下土壤微生物量碳占总有机碳的比例。不同小写字母表示不同植被类型差异显著($P < 0.05$)。PF: 华北落叶松人工纯林; MF: 华北落叶松白桦混交林; S: 灌木林; M: 草甸。

Fig. 4 Proportion of microbial biomass carbon in total organic carbon under different vegetation types. Different small letters meant significant difference at 0.05 level in different vegetation types. PF: *Larix principis-rupprechtii* artificial pure forest; MF: *Larch-Betula platyalla* mixed forests; S: shrubbery; M: meadow.

从图5可以看出,在A层,MBN/TN在灌木林达到较高水平,且显著高于其他3种植被类型;在B、C、D层,MBN/TN在华北落叶松白桦混交林和灌木林下达到较高水平,显著高于华北落叶松人工纯林和草甸($P < 0.05$)。

2.5 凋落物元素含量特征

不同植被类型凋落物元素含量如表5所示,凋落物碳含量表现为华北落叶松白桦混交林>草甸>华北落叶松人工纯林>灌木林,这与土壤含水率在4种不同植被类型下的变化情况一致,说明凋落物碳含量与土壤含水率有正相关关系;各植被类型凋落物有机碳含量间有显著差异。凋落物氮含量为草甸>华北落叶松白桦混交林>华北落叶松人工

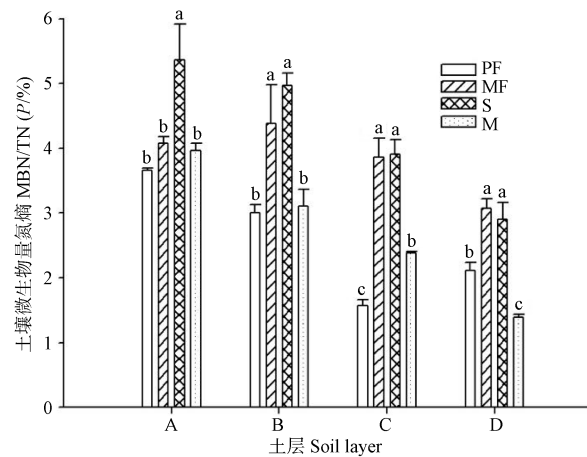


图5 不同植被类型下土壤微生物量氮占全氮的比例. 不同小写字母表示不同植被类型差异显著 ($P < 0.05$). PF: 华北落叶松人工纯林; MF: 华北落叶松白桦混交林; S: 灌木林; M: 草甸.
Fig. 5 Proportion of microbial biomass nitrogen in soil total nitrogen under different vegetation types. Different small letters meant significantly difference at 0.05 level in different vegetation types. PF: *Larix principis-rupprechtii* artificial pure forest; MF: *Larch-Betula platyalla* mixed forests; S: shrubby; M: meadow.

纯林>灌木林,这与DOC的变化情况一致;且凋落物氮含量在草甸中明显增加,显著高于其他植被类型,这与土壤有机碳、全氮在草甸有明显升高的情况一致,说明凋落物氮含量与土壤的有机碳、养分元素有正相关关系.凋落物C/N表现为华北落叶松人工纯林>灌木林>华北落叶松白桦混交林>草甸,草甸的凋落物C/N显著低于其他植被类型($P < 0.05$).

表5 不同植被类型凋落物元素含量特征
Table 5 Element concentrations of litters under different vegetation types

植被类型 Vegetation type	C (w/g kg ⁻¹)	N (w/g kg ⁻¹)	C/N
PF	322.812 ± 8.73a	12.263 ± 0.238a	26.324 ± 0.462a
MF	380.525 ± 3.57b	15.935 ± 0.164b	23.882 ± 0.444b
S	289.085 ± 2.944c	11.171 ± 0.429a	25.898 ± 0.836a
M	323.964 ± 5.993d	48.620 ± 1.054c	6.664 ± 0.138c

PF: 华北落叶松人工纯林; MF: 华北落叶松白桦混交林; S: 灌木林; M: 草甸.
PF: *Larix principis-rupprechtii* artificial pure forest; MF: *Larch-Betula platyalla* mixed forests; S: shrubby; M: meadow.

表6 土壤微生物特性与凋落物、土壤理化性质相关矩阵
Table 6 Relationship of soil microbial characteristics with the litter and soil physical-chemical properties

特征 Property	微生物量碳 MBC	微生物量氮 MBN	土壤有机碳 SOC	土壤全氮 TN	可溶性有机碳 DOC	pH	土壤碳氮比 Soil C/N	凋落物碳 Litter C	凋落物氮 Litter N	凋落物碳氮比 Litter C/N
MBC	1									
MBN	0.926**	1								
SOC	0.754**	0.839**	1							
TN	0.894**	0.926**	0.951**	1						
DOC	0.595*	0.564	0.784**	0.776**	1					
pH	-0.905**	-0.918**	-0.596*	-0.780**	-0.385	1				
Soil C/N	-0.302	-0.136	0.284	-0.025	0.129	0.467	1			
Litter C	0.247	-0.055	0.022	0.145	0.468	-0.027	-0.358	1		
Litter N	0.936**	0.988**	0.887**	0.967**	0.639*	-0.893**	-0.115	0.024	1	
Litter C/N	-0.935**	-0.993**	-0.867**	-0.954**	-0.620*	0.909**	0.137	-0.005	-0.998**	1

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

2.6 土壤微生物、土壤理化性质与凋落物养分含量的相关性分析

土壤微生物量碳、氮与土壤理化性质、凋落物养分含量有显著的相关关系(表6). (1)土壤MBC含量与土壤SOC和DOC含量均有显著正相关性($P < 0.05$),与土壤TN和凋落物氮含量呈极显著正相关,与pH值和凋落物C/N呈极显著负相关($P < 0.01$); (2)土壤MBN含量与土壤SOC、TN及凋落物氮含量有极显著正相关性,与pH值和凋落物C/N有极显著负相关性. (3)土壤MBC与土壤MBN有极显著相关关系.

土壤理化性质与凋落物初始养分含量有相关关系,表现为: (1)土壤SOC含量与凋落物氮含量有极显著正相关性,与凋落物C/N呈极显著负相关,与凋落物碳含量无显著相关性; (2)土壤TN与凋落物初始氮含量有极显著正相关性,与凋落物C/N有极显著负相关; (3)DOC与凋落物N有显著正相关关系; (4) pH值与凋落物C/N呈极显著正相关关系.

2.7 通径分析

采用通径分析进一步明确土壤微生物量与土壤养分、凋落物元素含量之间的关系. 利用通径分析构建联立方程组,将凋落物碳、氮含量和土壤SOC、TN含量对土壤MBC、MBN含量的影响分解为直接效应和间接效应,试图从元素循环的角度理解几者间的关系.

通径分析结果见表7、8. 可以看出,凋落物氮对土壤MBC的直接效应最大(表7);土壤SOC和TN对土壤MBC的直接效应为0,但通过对凋落物碳、氮等因子的影响,使得土壤SOC和TN对土壤MBC产生较大的间接效应,均表现出极显著的正相关关系. 由此可见,不能通过相关矩阵分析简单得出相关性大的即为直接效应较大. 土壤SOC、TN及凋落物碳、氮按绝对值大小,对土壤MBC的贡献率为凋落物N > TN > SOC > 凋落物碳,且直接影响土壤MBC的因素为凋落物碳、氮含量.

凋落物N对土壤MBN的直接效应最大(表8),这与表5中凋落物氮对MBC直接效应最大的结果一致;土壤SOC和凋落物碳对土壤MBN的直接效应为0,但均通过土壤TN和凋落物氮等因素对土壤MBN产生较大的间接效应,尤其通过凋落物氮产生的间接效应较大;土壤TN对土壤MBN有较小的直接负效应;土壤SOC、TN、凋落物碳、氮对土壤MBN的贡献率为凋落物氮 > SOC > TN > 凋落物碳,且直接影响土壤

表7 土壤MBC受其他因子影响的通径系数

Table 7 Path coefficient from environment factors to soil microbial biomass C

影响因子 Environment factor	直接作用 Direct action	间接作用 Indirect action				合计 Total	总效应 Total effect
		土壤有机碳 SOC	土壤全氮 TN	凋落物碳 Litter C	凋落物氮 Litter N		
SOC	0	—	0	0.005	0.825	0.83	0.83
TN	0	0	—	0.032	0.899	0.931	0.931
Litter C	0.224	0	0	—	0.022	0.022	0.246
Litter N	0.930	0	0	0.005	—	0.005	0.935

表8 土壤MBN受其他因子影响的通径系数

Table 8 Path coefficient from environment factors to soil microbial biomass N

影响因子 Environment factor	直接作用 Direct action	间接作用 Indirect action				合计 Total	总效应 Total effect
		土壤有机碳 SOC	土壤全氮 TN	凋落物碳 Litter C	凋落物氮 Litter N		
SOC	0	—	-0.425	0	1.260	0.835	0.835
TN	-0.447	0	—	0	0.967	0.967	0.52
Litter C	0	0	-0.065	—	0.034	-0.031	-0.031
Litter N	1.421	0	1.374	0	—	1.374	2.795

MBN的因素为土壤TN和凋落物N。

3 讨论

土壤微生物量的影响因素众多, 其中, 植被类型是最重要的因素之一^[25]。很多研究表明, 表层土壤碳源输入较多, 随着对碳源的吸收, 土壤微生物活性增加, 种类增多, 因此表层的微生物量碳、氮含量大于亚表层^[9, 31-32]。本研究同样发现, 山西太岳山好地方林场4种植被类型的土壤有机碳、全氮含量及土壤微生物量均在表层最大, 凋落物和细根是微生物的主要碳源^[25], 导致其活性增强, 促进了植物残体及地表凋落物的分解及腐殖质化, 加快了有机质的积累^[33]。本研究还发现, 可溶性有机碳并没有明显的垂直变化规律, 可能的原因是可溶性有机碳在土壤中移动性相对较强, 可能随水分流失致使土壤养分损失^[34]。

何振立等发现, 由于草甸庞大的根系, 使得其土壤微生物量大于林地^[35]。本研究结果同样表明, 草甸的土壤微生物量碳、氮含量最大, 并且凋落物N含量很高。凋落物分解过程中由于较高的养分含量使微生物活性增强; 另外, 草甸的根系生物量大、根际分泌物多, 为土壤微生物提供的能量较多^[2], 因此土壤微生物量含量最高。本研究还发现, 华北落叶松白桦混交林的土壤微生物量高于华北落叶松人工纯林和灌木林, 同时, 华北落叶松白桦混交林的凋落物碳、氮含量最大, 较高的凋落物碳、氮含量供给, 导致土壤微生物生长的养分元素较多, 因此土壤微生物量也较大。很多研究认为, 两种凋落物混合在一起时, 分解速率加快^[36-38], 土壤微生物量增加, 因此混交林土壤微生物量含量较纯林和灌木林高, 这与本研究结果一致。

灌木林的土壤微生物量在所研究的4种植被类型中处于较低水平, 这与彭艳^[39]和徐秋芳^[21]等对灌木林土壤微生物量的研究结果不一致。彭艳认为, 其研究的喀斯特地区灌丛处于退化土壤恢复初期, 浅表层有较多的根系和分泌物, 为微生物提供丰富的能源物质; 徐秋芳则认为, 矮灌形成庞大的根系, 且无乔木的遮盖现象, 因此微生物活性较强。而本研

究认为, 灌木林的凋落物及根系分泌物相比于华北落叶松人工纯林和混交林较低, 碳源输入量较小, 因此微生物量较低。

土壤微生物量碳氮比MBC/MBN与土壤有机质质量相关, 黄昌勇等认为土壤微生物量碳氮比可以反映土壤微生物的种类和区系^[40]。一般认为, 细菌碳氮比在5:1左右, 放线菌在6:1左右, 真菌在10:1左右^[41-42]。本研究发现, 在4种植被类型下, A、B两层中土壤微生物量碳氮比均在华北落叶松白桦混交林中最大, 比值为8左右, 草甸中比值最小, 为6左右; C、D两层中均为灌木林最大, 比值在10左右, 草甸比值最小, 为5左右。说明A、B层混交林中真菌和放线菌含量相对丰富, 放线菌在草甸中含量较大; C、D层灌木林中真菌和草甸土中的细菌含量相对丰富。土壤微生物熵代表土壤有机碳、全氮向微生物量碳、氮转化的效率、土壤碳氮的损失及土壤矿物对有机质等的固定能力, 能够避免对不同有机碳含量的土壤进行比较时出现的一些问题^[43]。本研究中, 土壤微生物熵基本表现为在华北落叶松白桦混交林和灌木林下达到较高水平, 显著高于华北落叶松人工纯林和草甸。这可能是由于华北落叶松白桦混交林向土壤输入的有机质较高, 导致土壤微生物活性较高, 促进了土壤有机质的分解和转化; 而灌木林的土壤有机碳、全氮含量相比于其他植被类型而言较低, 即MBC/SOC和MBN/TN的比值较大, 所以土壤有机质向微生物量转化效率高, 导致灌木林的土壤微生物熵较大。研究结果表明, 华北落叶松白桦混交林和灌木林的土壤SOC、TN向土壤微生物量碳、氮转化效率较大, 说明土壤活性有机碳较大, 土壤碳库稳定性较差, 同时养分含量较低^[43]。

本研究发现, 土壤微生物量与土壤pH值、土壤有机碳、全氮、凋落物N含量均有极显著相关性, 凋落物C/N的变化改变了土壤pH值, 从而影响到土壤微生物群落结构的改变, 土壤微生物量随之发生变化。通径分析结果显示, 在4种植被类型中, 凋落物N对土壤MBC、MBN的总贡献均最大, 说明土壤微生物量主要受到凋落物元素含量的调控。同时, 凋落物N对土壤MBC、MBN的直接效应也最大, 即凋落物N含量是影响土壤微生物量的直接因素之一; 土壤SOC对MBN与土壤TN对MBC一样, 均没有直接作用; 土壤有机碳、全氮及

凋落物养分含量对土壤微生物量有强烈的促进作用。

参考文献 [References]

- 1 Diacono M, Montemurro F. Long-term effects of organic amendments on soil fertility. A review [J]. *Agro Sus Dev*, 2010, **30** (2): 401-422
- 2 张燕燕, 曲来叶, 陈利顶, 卫伟. 黄土丘陵沟壑区不同植被类型土壤微生物特性[J]. *应用生态学报*, 2010, **21** (1): 165-173 [Zhang YY, Qu LY, Chen LD, Wei W. Soil microbial properties under different vegetation types in Loess hilly region [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2010, **21** (1): 165-173]
- 3 张景源. 长期不同施肥措施下红壤旱地土壤微生物的生物量和多样性[D]. 武汉: 华中农业大学, 2008 [Zhang JY. Soil microbial biomass and diversity under long-term different fertilization utilizations [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2008]
- 4 赵彤, 闫浩, 蒋跃利, 黄懿梅, 安韶山. 黄土丘陵区植被类型对土壤微生物量碳氮磷的影响[J]. *生态学报*, 2013, **33** (18): 5615-5622 [Zhao T, Yan H, Jiang YL, Huang YM, An SS. Effects of vegetation types on soil microbial biomass C, N, P on the Loess Hilly Area [J]. *Acta Ecol Sin*, 2013, **33** (18): 5615-5622]
- 5 Blouin M, Zuily-Fodil Y, Pham-Thi AT, Laffray D, Reversat G, Pando A, Tondoh J, Lavelle P. Below-ground organism activities affect plant above ground phenotype, inducing plant tolerance to parasites [J]. *Ecol Lett*, 2005, **8**: 202-208
- 6 Wardle DA. The influence of biotic interactions on soil biodiversity [J]. *Ecol Lett*, 2006, **9**: 870-886
- 7 Ladd JN, Amato M, Veen HA. Soil microbial biomass. Its assay and role in turn over of organic matter C and N [J]. *Soil Biol Bioc*, 2004, **36**: 1369-1372
- 8 Jia GM, Cao J, Wang CY, Wang G. Microbial biomass and nutrients in soil at the different stages of secondary forest succession in Ziowuling northwest China [J]. *For Ecol Manage*, 2005, **217**: 117-125
- 9 Sinha S, Mastro RE, Ram LC. Rhizosphere soil microbial index of tree species in a coal mining ecosystem [J]. *Soil Biol Biochem*, 2009, **41**: 1824-1832
- 10 宋长青, 吴金水, 陆雅海, 沈其荣, 贺纪正, 黄巧云, 贾仲君, 冷疏影, 朱永官. 中国土壤微生物学研究10年回顾[J]. *地球科学进展*, 2013, **28** (10): 1087-1105 [Song CQ, Wu JS, Lu YH, Shen QR, He JZ, Huang QY, Jia ZJ, Leng SY, Zhu YG. Advances of soil microbiology in the last decade in China [J]. *Adv Ear Sci*, 2013, **28** (10): 1087-1105]
- 11 Jackson DS, Ladd JN. Microbial biomass in soil: measurement and turnover [J]. *Soil Biochem*, 1981, **5**: 415-417
- 12 王岩, 黄东迈. 土壤微生物量及其生态效应[J]. *南京农业大学学报*, 1996, **19** (4): 45-51 [Wang Y, Huang DM. Soil microbial biomass and its ecological effects [J]. *J Nanjing Agri Univ*, 1996, **19** (4): 45-51]
- 13 杨芳, 吴家森, 钱新标, 吴丽君. 不同施肥雷竹林土壤微生物量碳的动态变化[J]. *浙江林学院学报*, 2006, **23** (1): 70-74 [Yang F, Wu JS, Qian XB, Wu LJ. Dynamic changes of soil microbial biomass carbon in *Phyllostachys praecax* stand with different fertilizers [J]. *J Zhejiang For Col*, 2006, **23** (1): 70-74]
- 14 曹裕松, 胡文杰, 周兵, 周升团, 宋勇生. 武功山高山草甸土壤微生物生物量碳及其影响因素[J]. *井冈山大学学报 (自然科学版)*, 2013, **34** (5): 26-30 [Cao YS, Hu WJ, Zhou B, Zhou ST, Song YS. Study on soil microbial biomass carbon and its factors in alpine meadow in Wugongshan mountains [J]. *J Jinggangshan Univ*, 2013, **34** (5): 26-30]
- 15 Broockes PC, Mcgrath SP. Effects of metal toxicity on the size of the soil microbial biomass [J]. *J Soil Sci*, 1984, **35**: 341-346
- 16 He H, Zhang W, Zhang X. Temporal responses of soil microorganisms to substrate addition as indicated by amino sugar differentiation [J]. *Soil Biol Bioc*, 2011, **43** (6): 1155-1161
- 17 Ding LJ, Wu JS, Xiao H, Zhou P, Syers JK. Mobilisation of inorganic phosphorus induced by rice straw in aggregates of a highly weathered upland soil [J]. *J Sci Food Agric*, 2012, **92** (5): 1073-1079
- 18 Joergensen RG, Wu JS, Brookes PC. Measuring soil microbial biomass using an automated procedure [J]. *Soil Biol Bioc*, 2011, **43** (5): 873-876
- 19 Bach LH, Grytnes JA, Halvorsen R, Ohlson M. Tree influence on soil microbial community structure [J]. *Soil Biol Bioc*, 2010, **42**: 1934-1943
- 20 陈国潮, 何振立. 红壤微生物量的季节性变化研究[J]. *浙江大学学报 (农业与生命科学版)*, 1999, **25** (4): 387-388 [Chen GC, He ZL. Study on seasonal change of red soil microbial biomass [J]. *J Zhejiang Univ*, 1999, **25** (4): 387-388]
- 21 徐秋芳, 姜培坤, 沈泉. 灌木林与阔叶林土壤有机碳库的比较研究[J]. *北京林业大学学报*, 2005, **27** (2): 18-22 [Xu QF, Jiang PK, Shen Q. Comparison of organic carbon pool of soil in bush and broad leaved forests [J]. *J Beijing For Univ*, 2005, **27** (2): 18-22]
- 22 张鸽香. 城市不同植被类型土壤呼吸与微生物量碳研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2011 [Zhang GX. The variations of soil respiration and microbial biomass carbon at the different vegetation types of urban green spaces [D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2010]
- 23 Wang FE, Chen YX, Tian GM, Kumar S, He YF, Fu QL, Lin Q. Microbial biomass carbon, nitrogen and phosphorus in the soil profiles of different vegetation covers established for soil rehabilitation in a red soil region of southeastern China [J]. *Nut Cycl Agroecol*, 2004, **68**: 181-189
- 24 王国兵, 郝岩松, 王兵, 阮宏华. 土地利用方式的改变对土壤呼吸及土壤微生物生物量的影响[J]. *北京林业大学学报*, 2006, **28** (Z2): 73-79 [Wang GB, Hao YS, Wang B, Ruan HH. Influence of land-use change on soil respiration and soil microbial biomass [J]. *J Beijing For Univ*, 2006, **28** (Z2): 73-79]
- 25 吴则焰, 林文雄, 陈志芳, 方长旬, 张志兴, 吴林坤, 周明明, 沈嘉花. 武夷山国家自然保护区不同植被类型土壤微生物群落特征[J]. *应用生态学报*, 2013, **24** (8): 2301-2309 [Wu ZY, Lin WX, Chen ZF, Fang CX, Zhang ZX, Wu LK, Zhou MM, Shen LH. Characteristics of soil microbial community under different vegetation types in Wuyishan National Nature Reserve, East China [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2013, **24** (8): 2301-2309]
- 26 尚爱军. 黄土高原植被恢复存在的问题及对策研究[J]. *西北林学院学报*, 2008, **23** (5): 46-50 [Shang AJ. Existing problems and countermeasures of vegetation restoration in the Loess Plateau [J]. *J NW For Univ*, 2008, **23** (5): 46-50]
- 27 文都日乐, 李刚, 张静妮, 赖欣, 易津, 范国艳, 杨殿林. 呼伦贝尔不同草地类型土壤微生物量及土壤酶活性研究[J]. *草业学报*, 2010, **19** (5): 94-102 [Wendu RL, Li G, Zhang JN, Lai X, Yi J, Fan GY, Yang DL. The study of soil microbial biomass and soil enzyme activity on different grassland in Hulunbeier, Inner Mongolia [J]. *Acta Prat Sin*, 2010, **19** (5): 94-102]
- 28 魏孝荣, 邵明安. 黄土沟壑区小流域土壤pH值的空间分布及条件

- 模拟[J]. 农业工程学报, 2009, **5**: 61-67 [Wei XR, Shao MA. Spatial distribution and conditional simulation of soil pH values in small watershed of loessial gully region [J]. *Tran CSAE*, 2009, **5**: 61-67]
- 29 杨凯, 朱教君, 张金鑫, 闫巧玲. 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 JJ, Zhang JX, Yan QL. Seasonal dynamics of soil microbial biomass C and N in two larch plantation forests with different ages in northeastern China [J]. *Acta Ecol Sin*, 2009, **29** (10): 5500-5507]
- 30 郭志刚. 社会统计分析方法[M]. 北京: 中国人民大学出版社, 1999
- 31 何友军, 王清奎, 汪思龙, 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[J]. 应用生态学报, 2006, **17** (12): 2292-2296 [He YJ, Wang QK, Wang SL, Yu XJ. Characteristics of soil microbial biomass carbon and nitrogen and their relationships with nutrients in *Cunninghamia lanceolata* plantations [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2006, **17** (12): 2292-2296]
- 32 Yan Y, He H, Zhang X, Chen Y, Xie H, Bai Z, Zhu P, Ren J, Wang L. Long-term fertilization effects on carbon and nitrogen in particle-size fractions of a Chinese mollisol [J]. *Soil Sci*, 2012, **92**: 509-519
- 33 王启兰, 曹广民, 王长庭. 高寒草甸不同植被土壤微生物数量及微生物生物量的特征[J]. 生态学杂志, 2007, **26** (7): 1002-1008 [Wang QL, Cao GM, Wang CT. Quantitative characters of soil microbes and microbial biomass under different vegetation in alpine meadow [J]. *Chin J Ecol*, 2007, **26** (7): 1002-1008]
- 34 Perakis SS, Hedin LO. Nitrogen loss from unpolluted South American forests mainly via dissolved organic compounds [J]. *Nat*, 2002, **415**: 416-419
- 35 何振立. 土壤微生物量及其在养分循环和环境质量评价中的意义[J]. 土壤, 1997, **29** (2): 61-69
- 36 Blair JM. Decay rates, nitrogen fluxes and decomposer communities of single and mixed species foliar litter [J]. *Ecology*, 1990, **71** (5): 1976-1985
- 37 Briones MI, Ineson P. Decomposition of eucalyptus leaves in litter mixtures [J]. *Soil Biol Biochem*, 1996, **28**: 1381-1388
- 38 Carlyle JC, Malcolm DC. Nitrogen availability beneath spruce and mixed larch and spruce stands growing on deep peat. I. Net mineralization measured by field and laboratory incubations [J]. *Plant Soil*, 1986, **93**: 95-113
- 39 彭艳, 李心清, 程建中, 邢英, 闫慧. 贵阳喀斯特地区植被类型与季节变化对土壤微生物生物量和微生物呼吸的影响[J]. 地球化学, 2010, **39** (3): 266-273 [Peng Y, Li XQ, Cheng JZ, Xing Y, Yan H. Influence of vegetation types and seasonal variation on soil microbial biomass and microbial respiration in Karst region of Guiyang, southwest China [J]. *Geoc*, 2010, **39** (3): 266-273]
- 40 黄昌勇. 土壤学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000: 50-64
- 41 陈国潮, 何振立. 红壤不同利用方式下的微生物量研究[J]. 土壤通报, 1998, **29** (6): 276-278
- 42 Wardle DA. Controls of temporal variability of the soil microbial biomass: a global synthesis [J]. *Soil Biol Biochem*, 1998, **30** (13): 1627-1637
- 43 邱雷, 陈信力, 丁辉, 关庆伟. 间伐对侧柏人工林土壤微生物生物量碳、氮的影响[J]. 江苏林业科技, 2013, **12** (6): 14-19 [Qiu L, Chen XL, Ding H, Guan QW. Effect of thinning on soil microbial biomass carbon and nitrogen for *Platycladus orientalis* plantation [J]. *J Jiangsu For Sci Technol*, 2013, **12** (6): 14-19]