

庄静静, 鲜靖苹, 王晓冰, 等. 华北低丘陵山区人工林土壤微生物生物量碳氮变化及其影响因素 [J]. 福建农业学报, 2023, 38 (12): 1459-1465.
ZHUANG J J, XIAN J P, WANG X B, et al. Microbial Biomass Carbon and Nitrogen at Man-made Forests in Northern China Hilly Areas [J]. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, 2023, 38 (12): 1459-1465.

华北低丘陵山区人工林土壤微生物生物量碳氮变化及其影响因素

庄静静¹, 鲜靖苹¹, 王晓冰¹, 李振华¹, 程 翠^{2*}

(1. 新乡学院土木工程与建筑学院, 河南 新乡 453003; 2. 鹤壁市农业科学院, 河南 鹤壁 458030)

摘要:【目的】土壤微生物是土壤中重要的存在, 土壤中的微生物量碳和微生物量氮能直接或间接参与土壤理化过程, 是维持土壤质量的重要指标, 可综合反映土壤肥力特性和生物活性。【方法】在河南省济源市黄河小浪底生态系统定位站内选择3种人工纯林, 包括刺槐 (*Robinia pseudoacacia*) 林、栓皮栎 (*Quercus variabilis*) 林和侧柏 (*Platyclodous orientalis*) 林, 采集未分解枯落物层 (L层)、半分解/腐殖化枯落物层 (F/H层) 以及矿质土层 (0~10、10~20 cm) 的土壤样品, 测定微生物生物量碳 (Microbial biomass carbon, MBC)、微生物生物量氮 (Microbial biomass nitrogen, MBN)、MBC/MBN 以及枯落物层和土壤层总碳 (Total carbon, TC)、总氮 (Total nitrogen, TN)、可溶性有机碳 (Dissolved organic carbon, DOC) 和可溶性有机氮 (Dissolved organic nitrogen, DON), 研究探讨土壤微生物生物量 (Soil microbial biomass, SMB) 与树种、土深的关系及其机理。【结果】(1) 在枯落物层, 3种林型的 TC 最高值均出现在 F/H 层, 而 TN 的最高值则均出现在 L 层; 3种林型 TC 和 TN 均表现为 F/H 层 > L 层 > 0~10 cm、10~20 cm 土层, 差异显著 ($P < 0.05$)。3种林型的 DOC 表现为枯落物层高于矿质土壤层, DON 为矿质土壤层高于枯落物层。枯落物层3种林分之间的 DOC 含量均表现为栓皮栎林显著高于刺槐林, 二者与侧柏林之间差异不显著 ($P > 0.05$)。(2) 在枯落物层, 3种林型的 MBC 均表现为 F/H 层高于 L 层, 表现为刺槐林 > 栓皮栎林 > 侧柏林。在矿质土层中, 3种林型的 MBC 均为 0~10 cm 高于 10~20 cm 土层, 表现为栓皮栎林 > 刺槐林 > 侧柏林, 同一土层的刺槐林和栓皮栎林之间差异不显著 ($P > 0.05$)。枯落物层及矿质土层的 MBN 均表现为栓皮栎林 > 刺槐林 > 侧柏林。栓皮栎林在各个土层中均是 MBN 最高的树种, 且与侧柏林之间差异显著 ($P < 0.05$)。(3) L 和 F/H 层的 MBC/MBN 比值相差不大, 而在矿质土层中, 随土深增加 MBC/MBN 呈上升趋势。在矿质土层, 3种林型 MBC/MBN 均表现为 10~20 cm 显著高于 0~10 cm; 在 0~10 cm, 3种林型之间差异不显著 ($P > 0.05$), 在 10~20 cm, 刺槐林显著高于侧柏林 ($P > 0.05$), 而与栓皮栎林之间差异不显著 ($P < 0.05$)。(4) 相关性分析表明, 3种林型的 MBC 均与总碳、总氮呈极显著正相关 ($P < 0.01$), 其中栓皮栎林 MBC 与总碳的相关系数最大, 为 0.959。刺槐林和栓皮栎林的 C/N 与总碳、总氮呈负相关, 而侧柏林的 C/N 则与总碳、总氮呈正相关, 相关系数分别为 0.512 和 0.524。【结论】在华北低丘陵山区种植栓皮栎对土壤的生态恢复效果较好, 更有利于生态系统的碳氮循环。

关键词: 微生物量; 微生物量碳; 微生物量氮; 碳氮比; 人工林

中图分类号: S714

文献标志码: A

文章编号: 1008-0384 (2023) 12-1459-07

Microbial Biomass Carbon and Nitrogen at Man-made Forests in Northern China Hilly Areas

ZHUANG Jingjing¹, XIAN Jingping¹, WANG Xiaobing¹, LI Zhenhua¹, CHENG Cui^{2*}

(1. Institute of Civil Engineering and Architecture, Xinxiang University, Xinxiang, Henan 453003, China; 2. Hebi Academy of Agricultural Sciences, Hebi, Henan 458030, Chian)

Abstract: 【Objective】Microbial biomass carbon and nitrogen (MBC and MBN) in soil at the man-made forests on northern

收稿日期: 2023-01-07 修回日期: 2023-06-18

作者简介: 庄静静 (1988—), 女, 博士, 讲师, 主要从事森林生态学相关研究, E-mail: zhuangjingnd@126.com

* 通信作者: 程翠 (1985—), 女, 助理研究员, 主要从事农业生态环境修复相关研究, E-mail: 66394564@qq.com

基金项目: 河南省自然科学基金项目 (212300410219); 河南省科技攻关项目 (232102111008、232102321054); 河南省高等学校重点科研项目 (22B180014)

China hilly lands were studied. 【Method】 Three man-made forests that contained solely *Robinia pseudoacacia*, *Quercus variabilis* or *Platyclodus orientalis* trees at the Xiaolangdi Ecosystem Positioning Station of the Yellow River in Jiyuan, Henan were selected for the study. Soil samples in the layers of undecomposed litter (L), semi-decomposed/humic litter (F/H), and litter-free 0–10 cm and 10–20 cm depths were collected to determine the MBC, MBN, MBC/MBN ratio, and physiochemical properties. Correlations of the soil microbial biomass (SMB) with different tree species and soils were analyzed. 【Result】 (1) The highest total carbon (TC) in the soil that contained plant litter at the 3 forests was found in the F/H layer, and the greatest total nitrogen (TN) in the L layer. The TC and TN of the forests ranked in the order of F/H layer > L layer > 0–10 cm and 10–20 cm soils with no fallen wastes ($P < 0.05$). DOC was higher in the layers with litter than without, but opposite on DON. The DOC in the littered soil was significantly higher at the *Q. variabilis* forest than the *R. pseudoacacia* forest, and no significant difference between the two and the *P. orientalis* forest ($P > 0.05$). (2) In the soil layers with tree litter, MBC was higher in the F/H than in the L layer with a ranking of *R. pseudoacacia* > *Q. variabilis* > *P. orientalis* among the 3 forests. In the two layers of litter-free mineral soil, MBC was higher in the depth of 0–10 cm than in the deeper layer. It ranked among the different forests as *Q. variabilis* > *R. pseudoacacia* > *P. orientalis* with no significant difference between the *Q. variabilis* and *R. pseudoacacia* forests ($P > 0.05$). The MBNs of both the littered and litter-free soil at the forests were *Q. variabilis* > *R. pseudoacacia* > *P. orientalis*, while *Q. variabilis* generated the highest MBN that was significantly different from *P. orientalis* ($P < 0.05$). (3) The MBC/MBN ratios of the L and F/H layers did not differ significantly, whereas those of the mineral soils tended to increase with the depth. The 0–10 cm litter-free soil did not differ significantly on the ratio among the forests ($P > 0.05$). However, that of the 10–20 cm soil at the *R. pseudoacacia* forests were significantly higher than that at the *P. orientalis* forest ($P > 0.05$), but no significant difference between them and that at the *Q. variabilis* forest ($P < 0.05$). (4) Significant correlations existed between the MBC and the TC and TN at the 3 forests. The correlation coefficient of 0.959 between MBC and TC of *Q. variabilis* was the highest among all. The C/N ratios of *R. pseudoacacia* and *Q. variabilis* negatively, while the C/N of *P. orientalis* positively, correlated with TC and TN, with correlation coefficients of 0.512 and 0.524, respectively. 【Conclusion】 Conducive to environmental carbon and nitrogen cycling, *Q. variabilis* appeared to be a prudent choice of plant for the ecological restoration in the low mountainous areas in northern China.

Key words: Microbial biomass; microbial biomass carbon; microbial biomass nitrogen; C/N ratio; man-made forests

0 引言

【研究意义】土壤微生物作为土壤环境中不可或缺的分解者，是植物生长所需营养物质和能量的重要来源，同时驱动土壤养分循环，微生物在土壤中的实际含量和作用潜力可以通过其含量表现出来，在森林生态系统的能量循环过程中起着举足轻重的调节与控制作用^[1-2]。土壤微生物生物量 (Soil microbial biomass, SMB) 是反映土壤质地和碳氮循环机制的指标之一^[3]，可以反映土壤有机碳活性。因此，土壤微生物生物量与土壤肥力和土壤健康的关系十分紧密。【前人研究进展】多项研究表明，多种环境因子会影响 SMB^[4-5]。罗明霞等^[6]对川西亚高山不同林龄粗枝云杉人工林 SMB 及酶活性的研究指出，微生物生物量碳 (Microbial biomass carbon, MBC) 和微生物生物量氮 (Microbial biomass nitrogen, MBN) 随林龄的增加呈现先升后降的变化趋势。而刘宝等^[7]对中亚热带 4 种林分类型土壤微生物生物量碳氮特征及季节变化的研究指出，不同林分类型的 MBC 和 MBN 有明显的季节变化，呈现出“夏高冬低”的变化趋势。在森林演替和海拔梯度方面，柳杨等^[8]发现不同土层影响 SMB 的变化，其变化与不同土层的

有效养分差异、有机质分解程度以及空间位置有关，且相同气候带不同林型间的差异则表现为混交林高于纯林，阔叶林高于针叶林。李万年等^[9]在望天树人工幼林土壤微生物量碳氮及养分特征的研究中认为，与纯林相比，望天树混交林对土壤微生物环境和土壤质量的促进效果更明显。董敏慧等^[10]在研究中也指出，松树-樟树混交林比松树纯林以及樟树纯林更有利于提高微生物的量及代谢活性。【本研究切入点】华北低丘陵地区属石质山区，土壤水分含量少，植物生长所需营养物质含量少。该地区早期为农业耕种活动用地，是典型退耕还林的森林类型。该地因农耕活动造成了严重的山体裸露，土壤结构受到破坏，是目前我国进行林业生态建设的重点区域^[11]。但针对华北低山丘陵地区，不同树种人工纯林之间和不同土层深度之间的 MBC、MBN 差异还有待研究。【拟解决的关键问题】本研究在黄河小浪底森林生态系统定位站内选取 3 块不同研究区域，包括刺槐 (*Robinia pseudoacacia* L.) 纯林、栓皮栎 (*Quercus variabilis* L. Franco) 纯林和侧柏 (*Platyclodus orientalis* Bl.) 纯林，每个区域内随机设置样方进行采样，测定 MBC、MBN、MBC/MBN 以及总碳、总氮、可溶性有机碳和可溶性有机氮等指

标, 研究华北低丘陵地区不同树种和土壤深度对上述指标的影响以及两者之间的相关性, 探讨华北低山丘陵地区不同类型人工林以及枯落物层和不同土层深度的 MBC 和 MBN 变化, 以了解华北地区人工林的土壤生态系统碳氮循环过程, 从而更好地保护森林生态系统及经营管理人工林。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

试验地点位于河南省济源市黄河小浪底森林生态系统定位站内 (35°01'N, 112°28'E), 地处黄河中游, 北依太行山, 属于典型的低山丘陵石质山区^[12]。定位站中心海拔高度达 410 m, 具有暖温带大陆季风性气候和丘陵地区性气候两种特征, 研究区四季分明, 春季干旱少雨, 夏季湿润多雨, 冬季寒冷多

风, 全年平均气温为 12.4~14.3 °C, 累积多年平均降水量达到 641.7 mm, 其中, 6~9 月的降水量高达 438.0 mm, 约占全年的 68.3%。全年日照时数 2367.7 h, 年日照率 54%, ≥ 0 °C 的多年平均积温为 5282 °C, ≥ 10 °C 的多年平均积温达 4847 °C^[13]。区内土壤以棕壤和石灰岩风化母质淋溶性褐土为主^[14]。站区内以人工林为主, 刺槐、侧柏和栓皮栎为研究区的代表性树种^[15]。研究区域的植被群落分布层次较明显, 主要分为乔木层、灌木层和草本层。在树高小于 3 m 的灌木层中, 以扁担杆 (*Grewia biloba* G.Don)、桑树 (*Morus alba* L.) 等为主。草本层植物分布丰富, 由蛇莓 [*Duchesnea indica* (Andr.) Focke]、狗尾草 [*Setariaviridis* (L.) Beauv]、野葱 (*Alliumchrysanthum*) 等组成^[16] (表 1)。

表 1 样地基本情况

Table 1 Basic information on sampling sites

林型 Forest type	林龄 Stand age/a	坡向 Aspect	坡度 Slope/ (°)	平均树高 Mean tree height/m	平均胸径 Mean breast diameter/cm	林分密度 Stand density/ (株·hm ⁻²)	郁闭度 Canopy density
刺槐纯林R	45	南坡	20	9.66±0.57	11.35±0.67	1800±100	0.82±0.02
栓皮栎纯林Q	43	南坡	23	8.75±0.25	10.78±0.30	1900±100	0.86±0.06
侧柏纯林P	42	北坡	22	9.86±0.16	10.64±0.52	2900±100	0.90±0.04

1.2 研究方法

于 2021 年 7 月, 在研究区的每个林型内随机选取 3 个 10 m×10 m 的样地, 每个样地内随机设置 3 个 3 m×3 m 的样方。采用“S”型曲线法在样地内随机选择 5 个样点, 采集未分解枯落物层 (L 层) 和半分解/腐殖化枯落物层 (F/H 层), 并在采集点分别采集土层 0~10 cm 和 10~20 cm 的土壤样品, 对采样点重复采样 3 次, 取得的所有土样除去石块、凋落物、植物残根后过直径 2 mm 的筛, 过筛后的土样做好标记, 于 4 °C 冰箱保存。

采用元素分析仪测定土壤总碳 (Total carbon, TC)、总氮 (Total nitrogen, TN)^[17]。采用冷水溶液浸提^[18], 取 10 g 鲜土加入 40 mL 去离子水, 振荡 0.5 h 后 4000 r·min⁻¹ 离心 10 min, 过 0.45 μm 玻璃纤维滤膜, 采用连续流动分析仪 (Skalar San⁺⁺, 荷兰) 测定可溶性全氮 (Dissolved organic nitrogen, DON) 含量; 用总有机碳分析仪 (SHIMADZU TOC-VCPH/CPN analyzer, 日本岛津) 测定可溶性有机碳 (Dissolved organic carbon, DOC) 含量。MBC 采用氯仿熏蒸-K₂SO₄ 提取-仪器分析法测定分析, MBN 使用氯仿熏蒸-K₂SO₄ 提取-全氮测定法^[19]。MBC 的转换系数采用 0.38, MBN 的转换系数采用 0.54^[20]。

1.3 数据处理与分析

采用 SPSS 19.0 对数据进行单因素方差 (One-way ANOVA) 分析和 Pearson 相关性分析, 比较不同树种 MBC、MBN、MBC/MBN 和总碳、总氮、可溶性有机碳和可溶性有机氮的差异。应用 GraphPad Prism 9.0 软件作图。

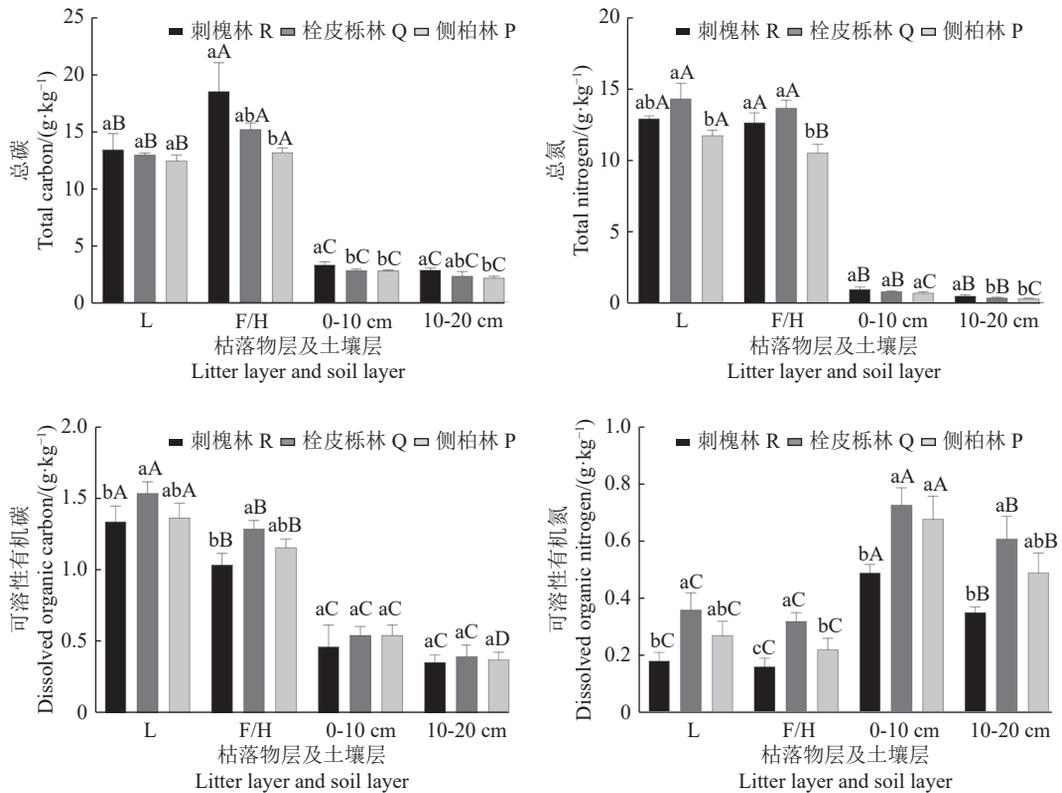
2 结果与分析

2.1 总碳、总氮、可溶性有机碳和可溶性有机氮的变化特征

由图 1 可知, 在枯落物层, 3 种林型的 TC 最高值均出现在 F/H 层, 其值分别为 18.58、15.25 和 13.19 g·kg⁻¹, 而 TN 的最高值则均出现在 L 层, 其值分别为 12.93、14.30 和 11.75 g·kg⁻¹; 3 种林型 TC 和 TN 均表现为 F/H 层>L 层>0~10 cm、10~20 cm 土层, 差异显著 ($P<0.05$)。不同林型 TC 含量比较, 在 L 层, 3 种林型的 TC 之间差异不显著 ($P>0.05$); F/H 层、10~20 cm 土层为刺槐林显著高于侧柏林 ($P<0.05$), 其他林分间差异不显著 ($P>0.05$); 0~10 cm 土层为刺槐林显著高于栓皮栎林和侧柏林 ($P<0.05$)。不同林型 TN 含量比较, 在 L 层, 栓皮栎林 TN 显著高于侧柏林 ($P<0.05$),

F/H层刺槐林和栓皮栎林 TN 显著高于侧柏林；0~10 cm 土层 3 种林型 TN 差异不显著，10~20 cm

土层，刺槐林显著高于栓皮栎林和侧柏林。



不同小写字母表示同一土层/枯落物层不同林型之间差异显著 ($P < 0.05$), 不同大写字母表示同一林型不同土层/枯落物层之间差异显著 ($P < 0.05$), 下同。

Data with different lowercase letters indicate significant difference between different forests on same soil or littered layer ($P < 0.05$); those with different uppercase letters, significant difference between different layers at same forest ($P < 0.05$).

图 1 不同林分及土层/枯落物层总碳、总氮、可溶性有机碳和可溶性有机氮的变化特征

Fig. 1 Changes in TC, TN, DOC and DON at test sites

不同林型及土壤深度的 DOC 和 DON 结果 (图 1) 显示, 3 种林型的 DOC 表现为枯落物层高于矿质土壤层, DON 为矿质土壤层高于枯落物层。3 种林型 F/H 的 DOC 显著高于 L 层, 0~10 cm 土层与 10~20 cm 土层显著低于枯落物层 ($P < 0.05$); 不同林分之间比较, 枯落物层 3 种林分之间的 DOC 含量均表现为栓皮栎林显著高于刺槐林, 二者与侧柏林之间差异不显著 ($P > 0.05$); 土壤层 3 种林分的 DOC 差异不显著。在枯落物层, 3 种林型 F/H 层与 L 层的 DON 差异均不显著, 显著低于 0~10 cm 土壤层和 10~20 cm 土壤层, 0~10 cm 土壤层显著高于 10~20 cm 土壤层; 不同林型比较, 不同土壤层的栓皮栎林 DON 均显著高于刺槐林 ($P < 0.05$)。

2.2 微生物生物量碳氮变化特征

2.2.1 微生物生物量碳的变化特征

由图 2 可知, MBC 随树种、枯落物层及矿质土壤层不同呈现出不同的变化趋势。3 种林型的 MBC 最高值均出现在 F/H 层, MBC 在枯落物层呈现

上升趋势, 在矿质土质中呈下降趋势。3 种林型的 MBC 均表现为 F/H 层高于 L 层, 为刺槐林 > 栓皮栎林 > 侧柏林; 同一枯落物层的刺槐林和栓皮栎林之间 MBC 差异不显著 ($P > 0.05$), 二者显著高于侧柏林 ($P < 0.05$); 在矿质土层中, 3 种林型的 MBC 均

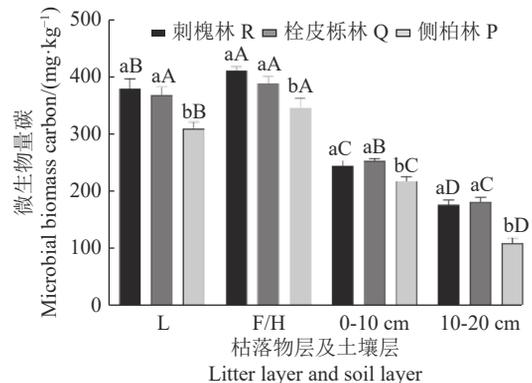


图 2 不同林型枯落物层及土壤层的微生物生物量碳
Fig. 2 MBC in littered and mineral soil layers at different forests

为 0~10 cm, 高于 10~20 cm 土层, 表现为栓皮栎林>刺槐林>侧柏林, 同一土层的刺槐林和栓皮栎林之间差异不显著 ($P>0.05$), 而二者显著高于侧柏林 ($P<0.05$)。总的来说, 3 种林型的 MBC 最高值均出现在 F/H 层, 且刺槐林为最大, 为 $412.14 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

2.2.2 微生物生物量氮的变化特征

如图 3 所示, 与 MBC 类似, 3 种林型的 MBN 最高值均出现在 F/H 层, MBN 在枯落物层呈现上升趋势, 在矿质土壤中呈下降趋势。不同林分之间比较发现, 枯落物层及矿质土壤层的 MBN 均表现为栓皮栎林>刺槐林>侧柏林。在 L 层, 刺槐林和栓皮栎林 MBN 之间差异不显著 ($P>0.05$), 二者显著高于侧柏林 ($P<0.05$)。在 F/H 层, 3 种林型之间 MBN 差异显著 ($P<0.05$)。在矿质土壤层, 3 种林型 0~10 cm 土层的 MBN 均高于 10~20 cm; 0~10 cm 土层栓皮栎林 MBN 显著高于侧柏林, 其他林分间差异不显著 ($P>0.05$)。整体上看栓皮栎林在各个土层中均是 MBN 最高的树种, 且与侧柏林之间差异显著 ($P<0.05$)。

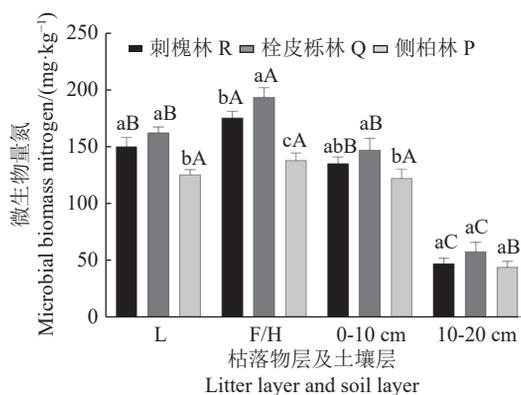


图 3 不同林型枯落物层及土壤层的微生物生物量氮
Fig. 3 MBN in littered and mineral soil layers at different forests

2.2.3 土壤微生物生物量碳氮比的变化特征

由图 4 可知, MBC/MBN 随枯落物层及土壤层和树种不同呈现不同的变化趋势。在 L 层, MBC/MBN 的最高值出现在刺槐林, 其值为 2.52, 但三者之间差异不显著。在 F/H 层, MBC/MBN 的最高值出现在侧柏林, 其值为 2.51, 显著高于栓皮栎林 ($P<0.05$)。在矿质土层, 3 种林型 MBC/MBN 均表现为 10~20 cm, 显著高于 0~10 cm; 在 0~10 cm, 3 种林型之间差异不显著 ($P>0.05$), 在 10~20 cm, 刺槐林显著高于侧柏林 ($P>0.05$), 而与栓皮栎林之间差异不显著 ($P<0.05$)。总体看来, L 和 F/H 层的 MBC/MBN 比值相差不大, 而在矿质土层中, 随土深增加 MBC/MBN 呈上升趋势。

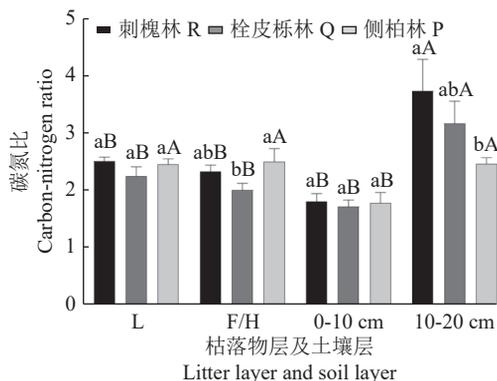


图 4 不同林型枯落物层及土壤层的微生物生物量碳氮比
Fig. 4 C/N ratio of microbial biomass in littered and mineral soil layers at different forests

2.3 微生物生物量碳氮变化与理化性质相关性分析

相关性分析表明 (表 2), 3 种林型的 MBC 与 TC 和 TN 之间存在极显著正相关 ($P<0.01$), 其中栓皮栎 MBC 与 TC 的相关系数最大, 值为 0.959。刺槐林和栓皮栎林 MBN 与 TC 呈极显著正相关 ($P<0.01$), 而侧柏林 MBN 与 TC 呈显著正相关 ($P<0.05$)。刺槐林和栓皮栎林 MBC/MBN 与 TC 和 TN 之间呈负相关, 而侧柏林 MBC/MBN 与 TC、TN 呈正相关。刺槐林和栓皮栎林 MBC/MBN 与 DOC 之间呈显著负相关 ($P<0.05$), 而侧柏林 MBC/MBN 与 DON 呈显著负相关 ($P<0.05$)。

表 2 土壤微生物生物量碳、氮及其比值与理化性质相关性分析
Table 2 Correlation between MBC, MBN, MBC/MBN, and physiochemical properties of soil

林型 Forest type	指标 Index	总碳 Total carbon	总氮 Total nitrogen	可溶性有机碳 Dissolved organic carbon	可溶性有机氮 Dissolved organic nitrogen
刺槐林 R	MBC	0.941**	0.957**	0.169	0.120
	MBN	0.750**	0.750**	0.389	0.142
	MBC/MBN	-0.255	-0.254	-0.594*	0.011
栓皮栎林 Q	MBC	0.959**	0.950**	0.321	0.293
	MBN	0.778**	0.744**	0.450	0.442
	MBC/MBN	-0.307	-0.279	-0.607*	-0.381
侧柏林 P	MBC	0.912**	0.892**	-0.043	-0.095
	MBN	0.681*	0.655*	-0.228	0.188
	MBC/MBN	0.512	0.524	0.425	-0.630*

*表示在 0.05 水平上呈显著相关, **表示在 0.01 水平上呈极显著相关。
*indicates significant difference at $P<0.05$; **indicates extremely significant difference at $P<0.01$.

3 讨论与结论

通过对不同树种、不同枯落层及土层的 MBC、

MBN 测定可知, 3 种林型的 MBC 和 MBN 最高值均现出在 F/H 层, 且同一林型不同土层之间 MBC 差异显著。在同一土层, 刺槐林和栓皮栎 MBC 之间差异不显著, 而与侧柏林之间差异显著。造成这种现象的原因可能是侧柏林与刺槐林、栓皮栎林因坡向不同导致温度不同而引起的差异^[19,21]。但侧柏林 MBC、MBN 与其他 2 种树种存在显著差异, 是否与坡向不同相关, 还有待进一步研究。南雅芳等^[22]对坡向和坡位对小流域梯田土壤有机碳、有机氮变化影响的研究中也指出, 同一坡位不同坡向上, 北向坡或阴坡土壤有机碳要比南向坡或阳坡高。本研究中, 栓皮栎林 MBC 在枯落物层低于刺槐林, 而在矿质土层中高于刺槐林, 且 MBN 也比刺槐林要高, 土壤总碳和总氮均要高于刺槐林, 即在华北低丘陵山区种植刺槐对土壤的生态恢复效果不如种植栓皮栎好。总的来说, 栓皮栎更有利于生态系统的碳氮循环。该结果与王风芹等^[23]的研究结果不一致, 其研究表明, 刺槐林的枯落物层 MBC、MBN 显著高于栓皮栎林。造成这种现象的原因可能与采集土样时间不同有关, 王风芹等的采集土样时间为 3 月, 而本研究采集土样时间为 7 月, 对比前人研究所得 MBC、MBN 有明显的“夏高冬低”趋势^[7], 判断季节对 MBC 与 MBN 有显著影响。在枯落物层及土壤层, MBC 与 MBN 显著不同, 且在土壤层随着土深增加, MBC 与 MBN 明显降低, MBC 虽然降低, 但 MBC/MBN 的值却明显上升。这与李胜蓝等^[24]的研究结果相一致, 枯落物层 MBC、MBN 的含量明显高于矿质土层, 这是由于枯落物层微生物含量多, 水热条件与养分物质优于矿质土层, 使得微生物的活动更加活跃。随着土壤层不断增加, 养分减少, 通透性不足, 因而限制了微生物的活动, 致使 MBC、MBN 随之降低。

本研究中, 3 种林型的 MBC 均与总碳、总氮呈极显著正相关, 而刺槐林和栓皮栎的 MBN 与总碳、总氮呈显著正相关。有研究表明^[25], 影响土壤微生物量与 MBC、MBN 的主要因素为有机碳和全氮, 与本研究结果相一致。

综上所述, 枯落物层的 TC、TN、DOC 和 DON 明显高于土壤层, 且 TC 和 TN 的最高值出现在刺槐林, 而 DOC 和 DON 的最高值出现在栓皮栎林, 说明地上植被通过凋落物的输入促进了土壤微生物的活性, 且不同树种的凋落物能为土壤微生物提供更多的基质。3 种林型土壤层的 MBC 和 MBN 均出现在栓皮栎林, 且最大值出现在 0~10 cm 土层, 说明在华北低丘陵山区种植阔叶树种栓皮栎更有利于其

土壤活性碳氮含量的增加。

参考文献:

- [1] 丁新景, 敬如岩, 黄雅丽, 等. 基于高通量测序的 4 种不同树种人工林根际土壤细菌结构及多样性 [J]. 林业科学, 2018, 54 (1): 81-89.
DING X J, JING R Y, HUANG Y L, et al. Bacterial structure and diversity of rhizosphere soil of four tree species in Yellow River Delta based on high-throughput sequencing [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2018, 54 (1): 81-89. (in Chinese)
- [2] 吴迪, 李良良, 张红军, 等. 马缨杜鹃的花叶凋落物配比对土壤微生物量与酶活性的影响 [J]. 西南农业学报, 2021, 34 (8): 1663-1667.
WU D, LI L L, ZHANG H J, et al. Effects of litter proportion of flowers and leaves of *Rhododendron delavayi* on soil microbial quantity and enzyme activity [J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2021, 34 (8): 1663-1667. (in Chinese)
- [3] 刘放, 吴明辉, 魏培洁, 等. 疏勒河源高寒草甸土壤微生物生物量碳氮变化特征 [J]. 生态学报, 2020, 40 (18): 6416-6426.
LIU F, WU M H, WEI P J, et al. Variations of soil microbial biomass carbon and nitrogen in alpine meadow of the Shule River headwater region [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40 (18): 6416-6426. (in Chinese)
- [4] 任江波, 李钠钾, 秦平伟, 等. 不同覆盖材料对土壤理化性状和微生物量碳氮含量的影响 [J]. 西南农业学报, 2018, 31 (10): 2140-2145.
REN J B, LI N J, QIN P W, et al. Effect of different mulching materials on physical and chemical characteristics of soil and microbial biomass [J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2018, 31 (10): 2140-2145. (in Chinese)
- [5] BAHRAM M, HILDEBRAND F, FORSLUND S K, et al. Structure and function of the global topsoil microbiome [J]. *Nature*, 2018, 560 (7717): 233-237.
- [6] 罗明霞, 胡宗达, 刘兴良, 等. 川西亚高山不同林龄粗枝云杉人工林土壤微生物生物量及酶活性 [J]. 生态学报, 2021, 41 (14): 5632-5642.
LUO M X, HU Z D, LIU X L, et al. Characteristics of soil microbial biomass carbon, nitrogen and enzyme activities in *Picea asperata* plantations with different ages in subalpine of western Sichuan, China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41 (14): 5632-5642. (in Chinese)
- [7] 刘宝, 吴文峰, 林思祖, 等. 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 [J]. 应用生态学报, 2019, 30 (6): 1901-1910.
LIU B, WU W F, LIN S Z, et al. Characteristics of soil microbial biomass carbon and nitrogen and its seasonal dynamics in four mid-subtropical forests [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, 30 (6): 1901-1910. (in Chinese)
- [8] 柳杨, 何先进, 侯恩庆. 鼎湖山森林演替和海拔梯度上的土壤微生物生物量碳氮变化 [J]. 生态学报, 2017, 36 (2): 287-294.
LIU Y, HE X J, HOU E Q. Changes in microbial biomass carbon and nitrogen in forest floor litters and mineral soils along forest succession and altitude gradient in subtropical China [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2017, 36 (2): 287-294. (in Chinese)

- [9] 李万年, 黄则月, 赵春梅, 等. 望天树人工幼林土壤微生物量碳氮及养分特征 [J]. 北京林业大学学报, 2020, 42 (12): 51-62.
LI W N, HUANG Z Y, ZHAO C M, et al. Characteristics of soil microbial biomass C, N and nutrients in young plantations of *Parashorea chinensis* [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2020, 42 (12): 51-62. (in Chinese)
- [10] 董敏慧, 张良成, 文丽, 等. 松树-樟树混交林、纯林土壤微生物量碳、氮及多样性特征研究 [J]. 中南林业科技大学学报, 2017, 37 (11): 146-153.
DONG M H, ZHANG L C, WEN L, et al. Soil microbial biomass C, N and diversity characteristics in pure and mixed forest of *Pinus* and *Cinnamomum* [J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2017, 37 (11): 146-153. (in Chinese)
- [11] 李泽东, 李亦然, 周晓莹, 等. 3种华北石质山区造林树种抗旱性评价 [J]. 中国水土保持科学, 2019, 17 (5): 100-109.
LI Z D, LI Y R, ZHOU X Y, et al. Drought resistance evaluation of three afforestation tree species in lithoid hilly area of North China [J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2019, 17 (5): 100-109. (in Chinese)
- [12] 赵娜, 孟平, 张劲松, 等. 华北低丘山地不同土地利用条件下的土壤呼吸比较 [J]. 林业科学, 2014, 50 (2): 1-7.
ZHAO N, MENG P, ZHANG J S, et al. Comparison of soil respiration under various land uses in hilly area of northern China [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2014, 50 (2): 1-7. (in Chinese)
- [13] 庄静静, 张劲松, 孟平, 等. 非生长季刺槐林土壤CH₄通量的变化特征及其影响因素 [J]. 林业科学研究, 2016, 29 (2): 274-282.
ZHUANG J J, ZHANG J S, MENG P, et al. Change of soil CH₄ fluxes of *Robinia pseudoacacia* stand during non-growing season and the impact factors [J]. *Forest Research*, 2016, 29 (2): 274-282. (in Chinese)
- [14] 同小娟, 张劲松, 孟平. 基于涡度相关法的森林生态系统碳交换及其控制机制 [J]. 温带林业研究, 2018, 1 (2): 1-9, 14.
TONG X J, ZHANG J S, MENG P. Carbon exchange between forest ecosystems and the atmosphere and its control mechanisms based on the eddy covariance method [J]. *Journal of Temperate Forestry Research*, 2018, 1 (2): 1-9, 14. (in Chinese)
- [15] 赵娜. 太行山南段低丘区不同土地利用方式土壤碳通量组成及其影响机理[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2014.
ZHAO N. The components and influence mechanism of soil carbon flux under different land use types in hilly area of southern Taihang Mountains, China[D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2014. (in Chinese)
- [16] 庄静静. 华北低山丘陵区刺槐林土壤甲烷通量变化特征及其影响机制[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2016.
ZHUANG J J. The characteristics and influencing mechanism of methane fluxes from *Robinia pseudoacacia* forest in the hilly area of North China[D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2016. (in Chinese)
- [17] 陈美玲, 刘鑫, 陈新峰, 等. 酸雨类型转变对杉木林土壤养分特征和微生物量碳氮的影响 [J]. 浙江农林大学学报, 2022, 39 (6): 1278-1288.
CHEN M L, LIU X, CHEN X F, et al. Effects of acid rain type change on soil nutrient characteristics and microbial C and N in the *Cunninghamia lanceolata* plantation [J]. *Journal of Zhejiang A & F University*, 2022, 39 (6): 1278-1288. (in Chinese)
- [18] 肖好燕, 刘宝, 余再鹏, 等. 亚热带典型林分对表层和深层土壤可溶性有机碳、氮的影响 [J]. 应用生态学报, 2016, 27 (4): 1031-1038.
XIAO H Y, LIU B, YU Z P, et al. Effects of forest types on soil dissolved organic carbon and nitrogen in surface and deep layers in subtropical region, China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, 27 (4): 1031-1038. (in Chinese)
- [19] 李洪杰, 刘军伟, 杨林, 等. 海拔梯度模拟气候变暖对高山森林土壤微生物量碳氮磷的影响 [J]. 应用与环境生物学报, 2016, 22 (4): 599-605.
LI H J, LIU J W, YANG L, et al. Effects of simulated climate warming on soil microbial biomass carbon, nitrogen and phosphorus of alpine forest [J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2016, 22 (4): 599-605. (in Chinese)
- [20] 张海燕, 张旭东, 李军, 等. 土壤微生物量测定方法概述 [J]. 微生物学杂志, 2005, 25 (4): 95-99.
ZHANG H Y, ZHANG X D, LI J, et al. Outline of soil microbial biomass measurement methods [J]. *Journal of Microbiology*, 2005, 25 (4): 95-99. (in Chinese)
- [21] 吴明辉, 瞿德业, 李婷, 等. 祁连山疏勒河源区冻土退化对土壤微生物量碳氮的影响 [J]. 地理科学, 2021, 41 (1): 177-186.
WU M H, QU D Y, LI T, et al. Effects of permafrost degradation on soil microbial biomass carbon and nitrogen in the Shule River headwaters, the Qilian Mountains [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2021, 41 (1): 177-186. (in Chinese)
- [22] 南雅芳, 郭胜利, 张彦军, 等. 坡向和坡位对小流域梯田土壤有机碳、氮变化的影响 [J]. 植物营养与肥科学报, 2012, 18 (3): 595-601.
NAN Y F, GUO S L, ZHANG Y J, et al. Effects of slope aspect and position on soil organic carbon and nitrogen of terraces in small watershed [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2012, 18 (3): 595-601. (in Chinese)
- [23] 王凤芹, 田丽青, 桑玉强, 等. 华北土石山区刺槐和栓皮栎人工林土壤微生物数量和微生物量碳、氮研究 [J]. 林业科学研究, 2016, 29 (6): 956-961.
WANG F Q, TIAN L Q, SANG Y Q, et al. Studies on soil microorganism quantity and soil microbial biomass carbon and nitrogen of *Robinia pseudoacacia* and *Quercus varabilis* plantations in North China [J]. *Forest Research*, 2016, 29 (6): 956-961. (in Chinese)
- [24] 李胜蓝, 方晰, 项文化, 等. 湘中丘陵区4种森林类型土壤微生物生物量碳氮含量 [J]. 林业科学, 2014, 50 (5): 8-16.
LI S L, FANG X, XIANG W H, et al. Soil microbial biomass carbon and nitrogen concentrations in four subtropical forests in hilly region of central Hunan Province, China [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2014, 50 (5): 8-16. (in Chinese)
- [25] 黄辉, 陈光水, 谢锦升, 等. 土壤微生物生物量碳及其影响因素研究进展 [J]. 湖北林业科技, 2008, 37 (4): 34-41.
HUANG H, CHEN G S, XIE J S, et al. Advances on soil microbial biomass carbon and its effect factor [J]. *Hubei Forestry Science and Technology*, 2008, 37 (4): 34-41. (in Chinese)