

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2025.06.009

CSTR:32310.14.stbxb.2025.06.009

庞月健, 满秀玲, 曾晨阳, 等. 寒温带天然次生林土壤微生物量碳氮磷及化学计量特征[J]. 水土保持学报, 2025, 39(6): 320-329.

PANG Yuejian, MAN Xiuling, ZENG Chenyang, et al. Soil microbial biomass carbon, nitrogen, and phosphorus and stoichiometric characteristics in natural secondary forests of cold-temperate zone[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2025, 39(6): 320-329.

## 寒温带天然次生林土壤微生物生物量 碳氮磷及化学计量特征

庞月健, 满秀玲, 曾晨阳, 牛欣然

(东北林业大学林学院, 哈尔滨 150040)

**摘要:** [目的] 研究寒温带天然次生林土壤微生物生物量及其化学计量特征, 分析纯林及其混交林树种互作对土壤微生物生物量的改变, 为天然次生林土壤碳氮磷养分利用机制和养分循环研究提供参考。 [方法] 以寒温带白桦林、山杨林和白桦-山杨混交林(简称混交林)为研究对象, 在每种林型内选择典型地段设置3块20 m×30 m的样地, 在每个样地内, 按照“S”形设置5个采样点, 于2024年5—9月采集0~5、5~10、10~20 cm土层土壤样品, 采用改进的氯仿熏蒸法测定土壤微生物生物量碳( $C_{mic}$ )、氮( $N_{mic}$ )、磷( $P_{mic}$ )质量分数, 分析微生物生物量及其化学计量(记为 $C_{mic}:N_{mic}$ 、 $C_{mic}:P_{mic}$ 、 $N_{mic}:P_{mic}$ )和微生物熵( $qMBC=C_{mic}/\text{总有机碳} \times 100\%$ 、 $qMBN=N_{mic}/\text{全氮} \times 100\%$ 、 $qMBP=P_{mic}/\text{全磷} \times 100\%$ )特征, 探讨微生物生物量化学计量比与微生物熵之间, 以及微生物生物量及其化学计量比与土壤理化性质之间的相互关系。 [结果] 1) 3种次生林土壤 $C_{mic}$ 、 $N_{mic}$ 、 $P_{mic}$ 平均质量分数分别为58.72~681.72、40.88~118.33、3.45~29.03 mg/kg, 混交林土壤 $C_{mic}$ 、 $P_{mic}$ 平均质量分数均显著低于白桦林和山杨林( $p < 0.05$ )。5—9月, 3种次生林土壤 $C_{mic}$ 、 $N_{mic}$ 质量分数均表现为“U”形变化趋势, 峰值出现在5月或9月, 最小值出现在7月,  $P_{mic}$ 质量分数均呈“单峰”趋势变化, 于6月达到峰值, 9月降至最小值。2) 土壤 $C_{mic}:N_{mic}$ 、 $C_{mic}:P_{mic}$ 和 $N_{mic}:P_{mic}$ 平均值分别为0.18~5.12、7.23~57.81、2.36~35.19, 且混交林均显著高于2种纯林( $p < 0.05$ )。随着月份变化, 土壤微生物生物量化学计量比亦表现为“U”形变化趋势, 最小值在7月。3) 土壤总有机碳( $C_{soil}$ )、全氮( $N_{soil}$ )、全磷( $P_{soil}$ )、硝态氮和速效磷是微生物生物量及其化学计量比的关键驱动因子, 微生物熵与微生物生物量化学计量比之间也存在较强的相关性。 [结论] 寒温带天然次生林中, 混交林土壤微生物生物量均低于白桦纯林和山杨纯林, 但其化学计量比高于2种纯林。在生长季, 5—6月是寒温带天然次生林土壤微生物变化的“巅峰”, 且混交林土壤微生物生物量月动态变化比纯林更为显著。此外, 寒温带天然次生林土壤P向 $P_{mic}$ 转化受到很大限制, 存在供P不足现象, 混交林比纯林更为严重。

**关键词:** 微生物生物量; 化学计量比; 天然次生林; 微生物熵

中图分类号: S714.2

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2025)06-0320-10

## Soil Microbial Biomass Carbon, Nitrogen, and Phosphorus and Stoichiometric Characteristics in Natural Secondary Forests of Cold-Temperate Zone

PANG Yuejian, MAN Xiuling, ZENG Chenyang, NIU Xinran

(College of Forestry, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China)

**Abstract:** [Objective] This study aims to investigate the soil microbial biomass and its stoichiometric characteristics in cold-temperate natural secondary forests, and to analyze the variations in soil microbial biomass caused by tree species interactions in pure forests and mixed forests. The findings can provide a reference for research on utilization mechanisms and nutrient cycling of soil carbon, nitrogen, and phosphorus in natural secondary forests. [Methods] The cold-temperate birch (*Betula platyphylla*), aspen (*Populus davidiana*), and mixed birch-aspen forests (referred to as mixed forests) were selected as the research subjects. Three sample plots

收稿日期: 2025-03-31

修回日期: 2025-05-16

录用日期: 2025-06-02

网络首发日期(www.cnki.net): 2025-07-29

资助项目: 国家重点研发计划项目(2021YFD2200405)

第一作者: 庞月健(2000—), 男, 硕士研究生, 主要从事水土保持研究。E-mail: 488123532@qq.com

通信作者: 满秀玲(1964—), 女, 博士, 教授, 主要从事水土保持研究。E-mail: mannefu@163.com

http://stbxb.alljournal.com.cn

of 20 m×30 m were set up in typical areas within each forest type. Five sampling points were arranged in an S-shaped pattern in each sample plot, and soil samples were collected from the 0–5, 5–10, and 10–20 cm soil layers between May and September 2024. Soil microbial biomass carbon ( $C_{mic}$ ), nitrogen ( $N_{mic}$ ), and phosphorus ( $P_{mic}$ ) contents were determined using an improved chloroform fumigation method, and their stoichiometric ratios (denoted as  $C_{mic}:N_{mic}$ ,  $C_{mic}:P_{mic}$  and  $N_{mic}:P_{mic}$ ) were analyzed, as well as microbial entropy ( $qMBC=C_{mic}/\text{total organic carbon}\times 100\%$ ,  $qMBN=N_{mic}/\text{total nitrogen}\times 100\%$ ,  $qMBP=P_{mic}/\text{total phosphorus}\times 100\%$ ). Additionally, the relationships between stoichiometric ratios of microbial biomass and microbial entropy, as well as between stoichiometric ratios of microbial biomass and soil physicochemical properties were explored. [Results] 1) The average contents of  $C_{mic}$ ,  $N_{mic}$ , and  $P_{mic}$  in the soils of the three types of secondary forests ranged from 58.72 to 681.72 mg/kg, 40.88 to 118.33 mg/kg, and 3.45 to 29.03 mg/kg, respectively. The average contents of  $C_{mic}$  and  $P_{mic}$  in the soils of the mixed forests were significantly lower than those in the soils of birch and aspen forests ( $p<0.05$ ). From May to September, the soil  $C_{mic}$  and  $N_{mic}$  contents in the three types of secondary forests showed a "U"-shaped trend of change, with peak values occurring in May or September and the minimum values in July. The  $P_{mic}$  content showed a unimodal trend, reaching its peak in June and dropping to the minimum in September. 2) The average values of soil  $C_{mic}:N_{mic}$ ,  $C_{mic}:P_{mic}$ , and  $N_{mic}:P_{mic}$  ranged from 0.18 to 5.12, 7.23 to 57.81, and 2.36 to 35.19, respectively, with values in the mixed forests significantly higher than those in the two pure forests ( $p<0.05$ ). The stoichiometric ratios of soil microbial biomass also showed a "U"-shaped trend as the months changed, reaching the minimum value in July. 3) Soil total organic carbon ( $C_{soil}$ ), total nitrogen ( $N_{soil}$ ), total phosphorus ( $P_{soil}$ ), nitrate nitrogen, and available phosphorus were the key driving factors of microbial biomass and its stoichiometric ratios, and there was a strong correlation between microbial entropy and stoichiometric ratios of microbial biomass. [Conclusion] In the natural secondary forests of the cold-temperate zone, the soil microbial biomass contents of mixed forests are lower than those of pure birch and aspen forests, but their stoichiometric ratios are higher than those of both pure forests. During the growing season, the peak period for soil microbial activity in natural secondary forests of the cold-temperate zone is May to June, and the monthly dynamic variations of soil microbial biomass in mixed forests are more significant than those in pure forests. In addition, the conversion of soil P to  $P_{mic}$  in cold-temperate natural secondary forests is very limited, indicating phosphorus deficiency, which is more severe in mixed forests than in pure forests.

**Keywords:** microbial biomass; stoichiometric ratio; natural secondary forest; microbial entropy

**Received:** 2025-03-31

**Revised:** 2025-05-16

**Accepted:** 2025-06-02

**Online**(www.cnki.net): 2025-07-29

土壤微生物作为生态系统的重要组成成分,在获取资源构建微生物生物量(soil microbial biomass, SMB)的同时,还调控着碳、氮、磷等元素在生态系统中的循环<sup>[1]</sup>,在土壤养分供给和转换过程中发挥着重要作用。土壤SMB含量高低可反映土壤有机质周转率、土壤活力及生态系统生产力水平<sup>[2]</sup>,在维持土壤营养物质循环过程中具有十分重要的作用。土壤SMB含量受气候、土壤和植被等多方面的影响,纯林及其混交林土壤微生物生物量也会存在较大差异,BARGALI等<sup>[3]</sup>对印度喜马拉雅山中部3种森林类型研究发现,橡树混交林土壤 $C_{mic}$ 、 $N_{mic}$ 含量高于纯林,而黄澳等<sup>[4]</sup>对杉木、闽楠纯林与杉木-闽楠混交林研究却发现,混交林土壤 $C_{mic}$ 、 $N_{mic}$ 、 $P_{mic}$ 含量均低于纯林,且土壤SMB化学计量比也有较大差异。SMB化学计量比

( $C_{mic}:N_{mic}:P_{mic}$ )常被用作土壤肥力评价的关键指标<sup>[5]</sup>,有研究<sup>[6]</sup>发现,土壤SMB化学计量比对土壤养分的依赖程度低于SMB,能够保持一定的自稳定性。此外,土壤C、N、P的利用效率可用土壤微生物熵(qMB)表征,qMB受土壤有机质数量和质量及微生物可利用底物有效性的影响较大<sup>[7]</sup>,常被用于预测土壤养分库的细微变化、土壤退化程度监测及其恢复效果评价<sup>[2]</sup>。此前,有学者<sup>[8-9]</sup>对寒温带地区土壤SMB进行了研究,但大多集中在不同森林类型对土壤SMB含量的影响,且以兴安落叶松林为主<sup>[10-11]</sup>,关于次生纯林和混交林土壤SMB含量变化特征的研究相对较少。因此,开展寒温带次生林土壤微生物C、N、P含量和化学计量特征的研究,有助于全面了解寒温带森林生态系统土壤养分的供给水平和循环效率。

大兴安岭寒温带森林资源丰富,是重要的生态功能区与生态敏感区。由于森林火灾、采伐及人为破坏,产生大面积的天然次生林,次生林面积和蓄积占总森林面积和蓄积的 41.15% 和 41.59%<sup>[12]</sup>。近年来,已有学者<sup>[13-15]</sup>对寒温带次生林土壤养分特征、土壤活性碳、土壤磷有效性等方面进行了研究,但对天然次生林土壤 SMB 含量及化学计量变化特征的研究较少。为此,本研究以寒温带 3 种天然次生林(白桦林、山杨林、白桦-山杨混交林)为研究对象,探究:1) 生长季天然次生纯林和混交林土壤 SMB 含量变化特征;2) 土壤微生物量 C:N:P 化学计量特征及影响因素,为寒温带天然次生林有效经营管理及土壤养分循环研究提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究样地在黑龙江漠河森林生态系统国家

定位观测研究站,生态站位于 123° 15'30"E, 53°33'30"N,属寒温带大陆性季风气候,其特点是冬季漫长寒冷、夏季温暖多雨,夏季最高气温 36.7 °C,冬季最低气温达 -52.3 °C,年平均气温 -4.9 °C,平均无霜期为 89 d,冻结期长达 8~9 个月,年降水量为 350~500 mm,有效积温 1 400~2 000 °C,雨热同季,植物生长茂盛,地带性顶级植被为兴安落叶松(*Larix gmelinii*)林、白桦(*Betula platyphylla*)林、樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica*)林、山杨(*Populus davidiana*)林等森林类型。地带性土壤为棕色针叶林土,部分地段分布有草甸土和沼泽土等土壤类型。

### 1.2 样地设置和土壤样品采集

在前期踏查的基础上,选择次生林典型林分为研究对象,即白桦林、山杨林和白桦-山杨混交林,在每一林型内选择典型地段设置 3 块 20 m×30 m 的样地,进行样地基本信息调查(表 1)。

表 1 样地基本信息

Table 1 Basic information of sample plots

森林类型	密度/(株·hm <sup>-2</sup> )	林龄/a	坡度/(°)	平均树高/m	平均胸径/cm	郁闭度	树种组成
白桦林	1 823	47±5	6	13.1±4.1	11.5±5.5	0.9	10白
山杨林	2 209	43±4	7	16.5±6.8	16.2±6.3	0.7	8山2白
混交林	1 611	45±6	6	16.1±5.1	14.1±6.2	0.8	5白5山

注:表中数据为平均值±标准差。

于 2024 年 5—9 月进行样品采集,每月中旬取样 1 次。在每个样地内,按照“S”形设置 5 个采样点,去除凋落物层和草毡层后,采集 0~5、5~10、10~20 cm 土层的土样。将同一样地相同土层的样品进行等量混合,在采集土样的同时,测定不同土层的土壤温度。

采集的土样分成 2 份,一份储存于 4 °C 冰箱中,用于测定土壤 N<sub>mic</sub>、P<sub>mic</sub>、铵态氮、硝态氮、含水率等指标;另一份风干后研磨,过筛,密封保存,用于测定土壤 pH、总有机碳、全氮、全磷、有效磷等指标。

### 1.3 测定方法

1.3.1 土壤基本理化性质的测定 使用便携式温度计测定土壤温度,土壤含水量采用铝盒烘干法测定(105 °C, 24 h),土壤 pH 采用 pH 计法测定。总有机碳采用 multiN/C3100TOC 总有机碳/总氮分析仪测定;全磷、有效磷采用钼锑抗比色法<sup>[16]</sup>测定;全氮、铵态氮、硝态氮采用德国 AA-3 连续流动分析仪测定。

1.3.2 土壤 SMB 含量测定 土壤 C<sub>mic</sub>、N<sub>mic</sub> 含量采用改进的氯仿熏蒸-K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 浸提法<sup>[17]</sup>测定:将未熏蒸鲜土(20 g)用 0.5 mol/L K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 浸提,另一份土样经过 24 h 氯仿熏蒸后加入 0.5 mol/L K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 浸提,过滤后,使用 TOC 分析仪测定浸提液中的总可溶性 C、N 质量分数。测定 P<sub>mic</sub> 质量分数使用 0.5 mol/L 的 NH<sub>4</sub>F

溶液浸提,加入硫酸-钼锑抗混合显色剂,用紫外分光光度计比色测定。C<sub>mic</sub> 质量分数=(熏蒸土壤有机碳-未熏蒸土壤有机碳)/0.45, N<sub>mic</sub> 质量分数=(熏蒸土壤有机氮-未熏蒸土壤有机氮)/0.25, P<sub>mic</sub> 质量分数=(熏蒸土壤磷-未熏蒸土壤磷)/0.40。式中:0.45、0.25 和 0.40 为转换系数。

1.3.3 计算方法 根据 MOOSHAMMER 等<sup>[18]</sup>的方法,土壤 SMB 化学计量采用质量比表示,即 C<sub>mic</sub>:N<sub>mic</sub>、C<sub>mic</sub>:P<sub>mic</sub>、N<sub>mic</sub>:P<sub>mic</sub>。

土壤微生物熵碳(qMBC)、微生物熵氮(qMBN)和微生物熵磷(qMBP),计算公式为:

$$qMBC = (C_{mic}/C_{soil}) \times 100\%$$

$$qMBN = (N_{mic}/N_{soil}) \times 100\%$$

$$qMBP = (P_{mic}/P_{soil}) \times 100\%$$

### 1.4 数据分析

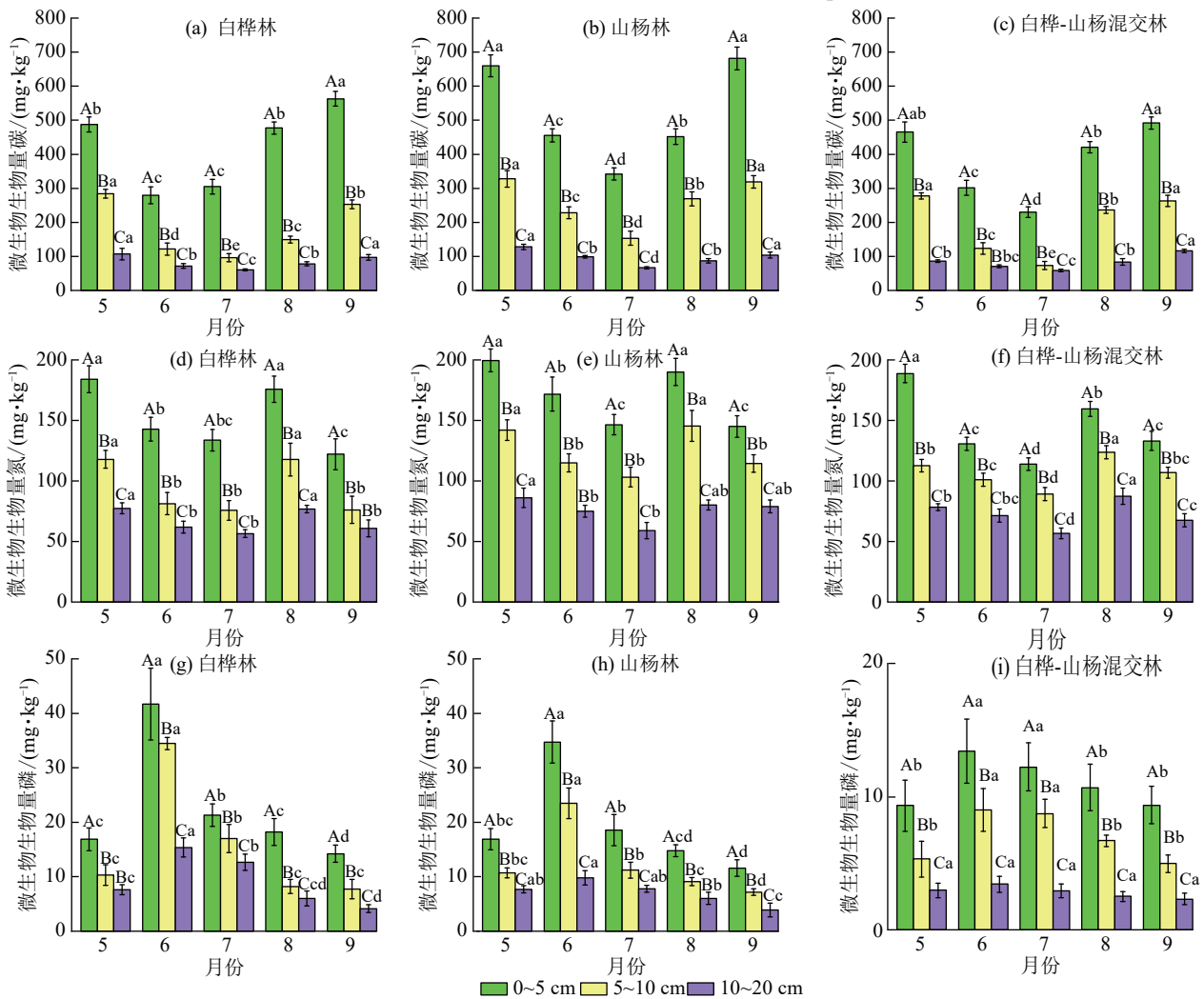
采用单因素方差分析和最小显著差异法(LSD)检验土壤 SMB 含量及其化学计量比的显著性差异。用冗余分析(RDA)分析评价 SMB 含量及其化学计量比的影响因子。统计分析均由 SPSS 26.0 软件完成,冗余分析用 Canoco 5 软件完成,绘图用 Origin 2024 软件完成。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同类型次生林土壤微生物生物量 C、N、P 质量分数特征

由图 1 可知,5—9 月 3 种次生林 0~20 cm 土层土壤  $C_{mic}$ 、 $N_{mic}$ 、 $P_{mic}$  质量分数呈现不同的变化趋势, $C_{mic}$  呈“U”形变化, $N_{mic}$  为波动式下降趋势, $P_{mic}$  则是“单峰”变化趋势。3 种林型 0~5、5~10、10~20 cm 土层土壤  $C_{mic}$  质量分数最低值均出现在 7 月(除白桦林 0~5 cm 土层外出现在 6 月,但与 7 月差异不显著),其中 5—7 月混交林  $C_{mic}$  平均质量分数降幅高达 56.32%,

7—9 月增长 53.19%,均高于其他 2 种次生林;土壤  $N_{mic}$  质量分数也呈下降趋势,混交林降幅最高,为 31.65%。3 种次生林土壤  $P_{mic}$  质量分数 5—6 月上升至峰值,白桦林、山杨林和混交林分别增加 1.63、0.92、0.47 倍,最小值在 9 月。5—9 月 3 种林型土壤  $C_{mic}$ 、 $N_{mic}$ 、 $P_{mic}$  总平均质量分数为山杨林(378.30 mg/kg) > 白桦林(349.27 mg/kg) > 混交林(302.48 mg/kg),其中混交林  $C_{mic}$ 、 $P_{mic}$  平均质量分数均显著低于白桦林和山杨林( $p < 0.05$ ),山杨林  $N_{mic}$  平均质量分数显著高于白桦林和混交林( $p < 0.05$ ),但白桦林和混交林间差异并不显著( $p > 0.05$ )。



注:图柱上方不同大写字母表示同一月份不同土层间差异显著( $p < 0.05$ );不同小写字母表示同一土层不同月份间差异显著( $p < 0.05$ )。

图 1 3 种次生林 0~20 cm 土层土壤微生物生物量 C、N、P 质量分数

Fig. 1 Contents of soil microbial biomass C, N, and P in 0~20 cm soil layer of three types of secondary forests

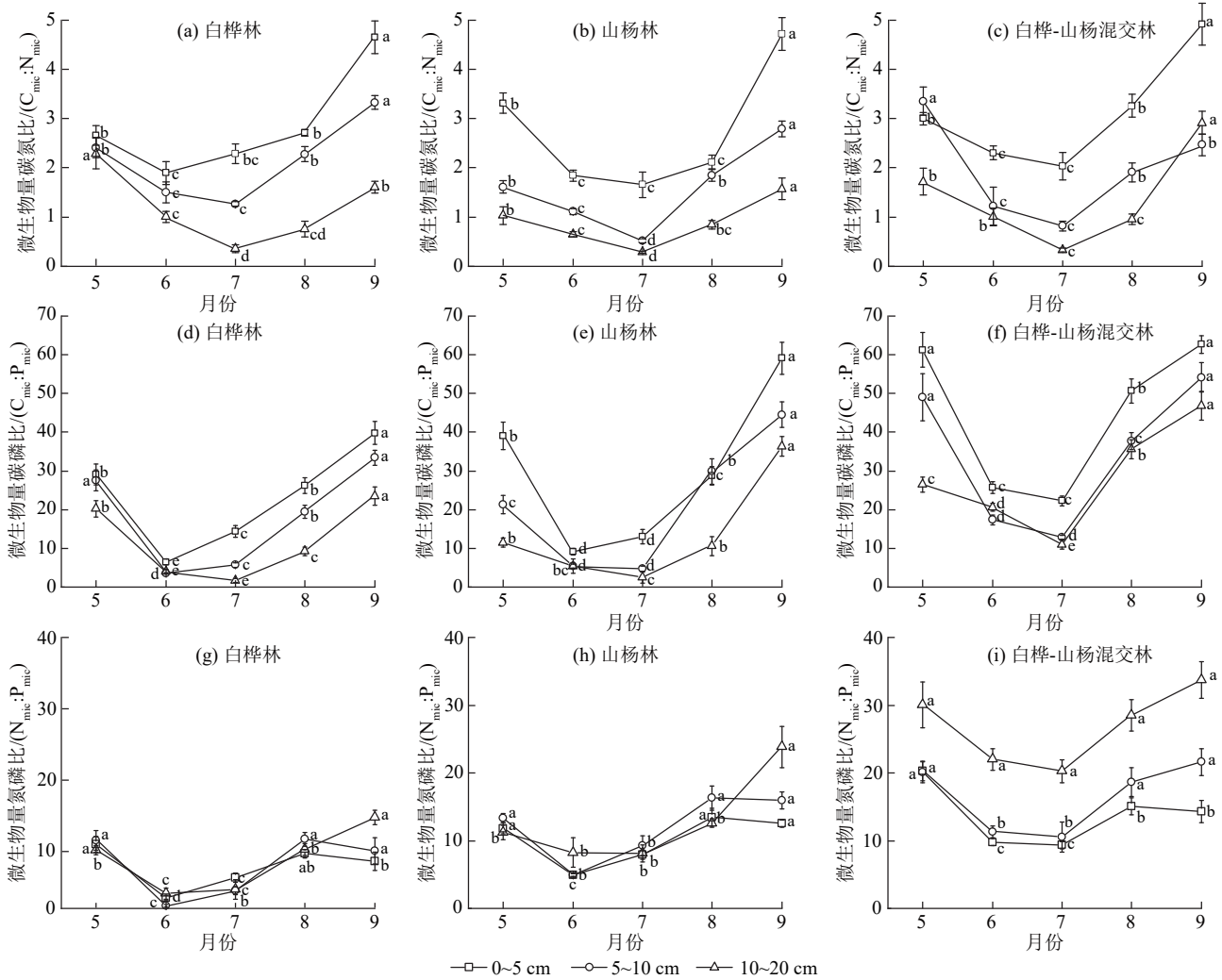
### 2.2 不同类型次生林土壤微生物生物量 C、N、P 化学计量特征

从图 2 可以看出,5—9 月 3 种次生林 0~20 cm 土层土壤  $C_{mic}:N_{mic}$ 、 $C_{mic}:P_{mic}$  和  $N_{mic}:P_{mic}$  整体均呈现“V”形变化趋势,最小值出现在 6 月或 7 月,8 月有明显回升。3 种林型 3 个土层土壤  $C_{mic}:N_{mic}$  5—7 月下降显著( $p < 0.05$ ),降幅为 28.26%~84.26%,7—9 月上升至

峰值,林型间差异不显著( $p > 0.05$ ),但土层间差异显著( $p < 0.05$ )。土壤  $C_{mic}:P_{mic}$  5—6 月下降低显著( $p < 0.05$ ),尤其 0~5、5~10 cm 土层 3 种林型降幅均高达 60% 以上,在 8 月又有明显回升( $p < 0.05$ ),增幅为 82.27%~523.17%,混交林显著大于白桦林和山杨林( $p < 0.05$ )。土壤  $N_{mic}:P_{mic}$  月份间整体变化幅度较小,并且白桦林和山杨林 3 个土层间差异不大,但混交林

则表现出随土层加深比值增大的显著趋势。5—9月 3 种次生林土壤  $C_{mic}:N_{mic}$ 、 $C_{mic}:P_{mic}$ 、 $N_{mic}:P_{mic}$  平均值分

别为 1.73~2.15、17.62~34.55、8.56~19.48,且混交林均显著高于白桦林和山杨林( $p<0.05$ )。



注:图中不同小写字母表示同一月份不同土层间差异显著( $p<0.05$ )。

图 2 3 种次生林 0~20 cm 土层土壤微生物生物量 C、N、P 化学计量比

Fig. 2 Stoichiometric ratios of soil microbial biomass C, N, and P in 0—20 cm soil layer of three types of secondary forests

### 2.3 不同类型次生林土壤微生物量熵特征

从图 3 可看出,5—9 月 3 种次生林 0~20 cm 土层土壤微生物量熵变化明显,qMBC、qMBN 和 qMBP 均呈现先升后降再升的变化趋势,峰值主要集中在 6 月,最小值在 8 月,回升在 9 月,且 qMBC 总体变化幅度高于 qMBN 和 qMBP。3 种林型随土层加深 qMBC 和 qMBN 逐渐变大,qMBP 则反之,而且 5—9 月山杨林 qMBN 相邻土层间差异均达到显著水平( $p<0.05$ )。白桦林 qMBC、qMBN 和 qMBP 均值都显著高于山杨林和混交林( $p<0.05$ ),尤其 qMBC 分别高出山杨林和混交林 49.46% 和 32.15%。混交林 qMBC、qMBN 和 qMBP 平均值显著低于白桦林和山杨林( $p<0.05$ ),其中 qMBC 比白桦林和山杨林低 0.26、0.22 倍,qMBP 低 0.71、0.43 倍。

### 2.4 土壤微生物生物量及化学计量相关性分析

以寒温带 3 种天然次生林类型 0~5、5~10、10~

20 cm 土层土壤  $C_{mic}$ 、 $N_{mic}$ 、 $P_{mic}$ 、 $C_{mic}:N_{mic}$ 、 $C_{mic}:P_{mic}$ 、 $N_{mic}:P_{mic}$ 、qMBC、qMBN 及 qMBP 作为响应变量,土壤基本理化性质作为解释变量进行冗余分析(RDA)(图 4)。结果表明,白桦林第 1 排序轴和第 2 排序轴对所有解释变量累计解释度为 63.87%,AP、TP、C:N、C:P、N:P、ST 和 AN 与响应变量呈显著正相关( $p<0.05$ ),其中 AP、C:P 为主导因子( $p=0.002$ ),贡献度分别为 35.7%、29.8%;山杨林第 1 轴、第 2 轴对所有解释变量共解释 62.53%,TOC、C:N、AP、TP、C:P 及 ST 与响应变量呈显著正相关( $p<0.05$ ),且 TOC、C:N 贡献率分别高达 37.8%、14.9%;混交林第 1 轴、第 2 轴对所有解释变量解释度共计 63.93%,TOC、NN、C:N、pH、SWC、AP、AN 及 ST 与响应变量呈显著正相关( $p<0.05$ ),TOC、NN 为主要影响因子,贡献度分别为 48.5%、16.9%( $p=0.002$ )。

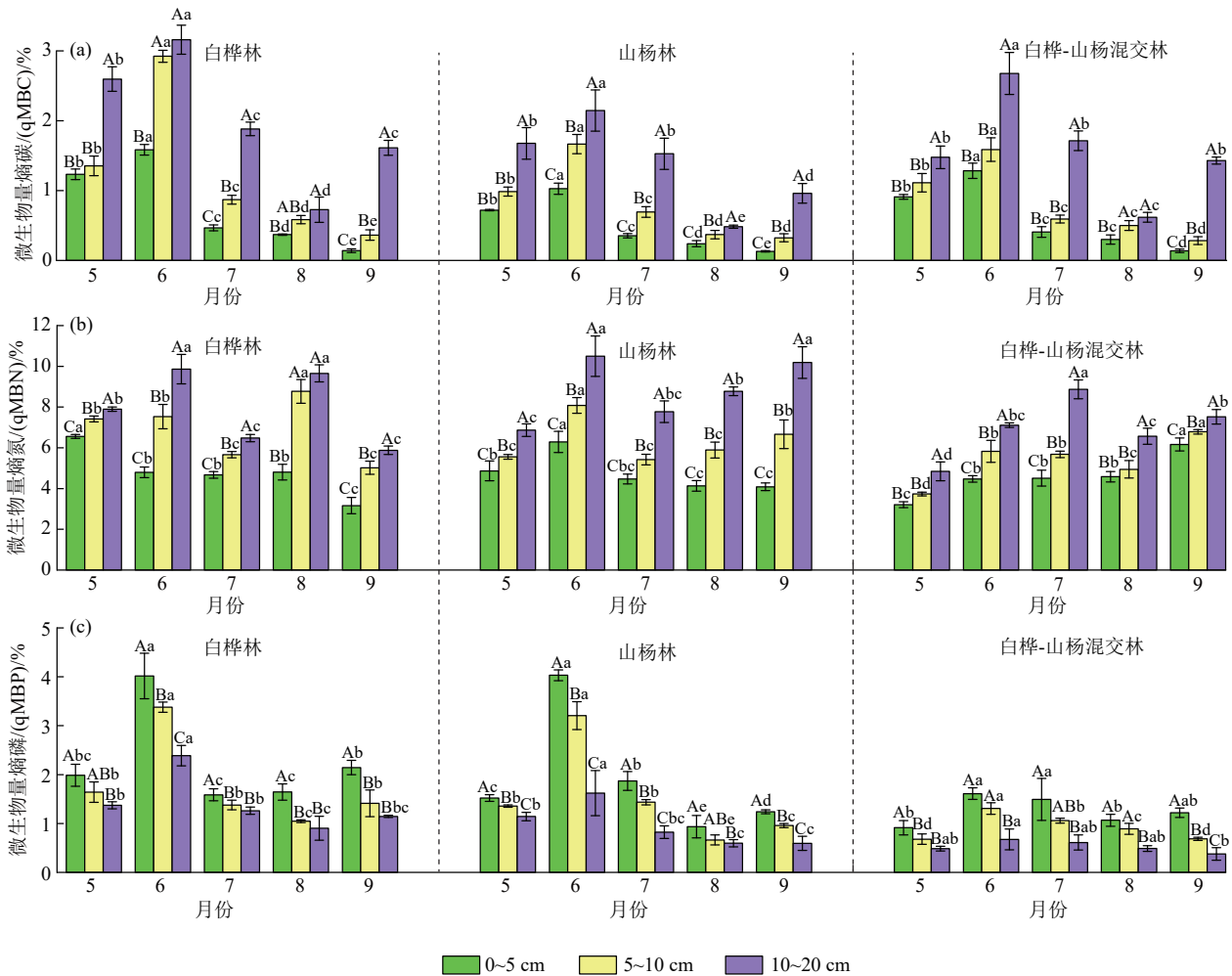
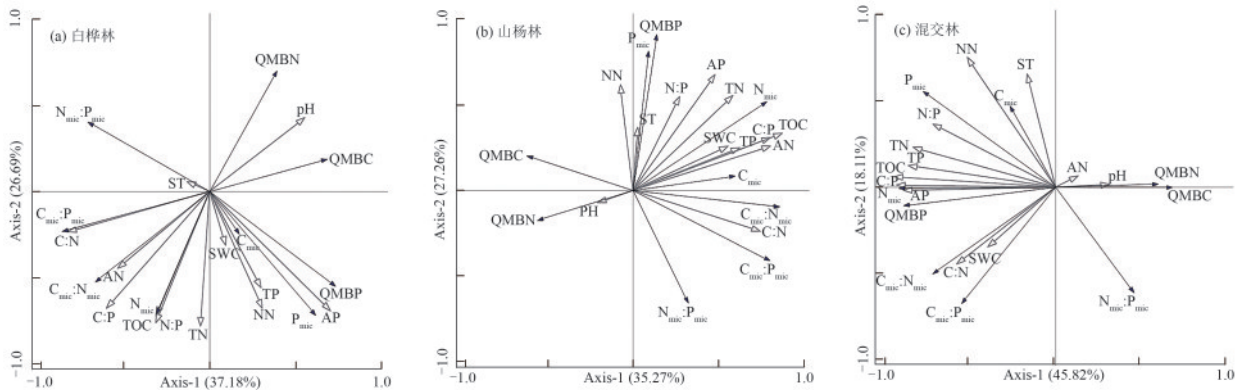


图 3 3种次生林 0—20 cm 土层土壤微生物熵

Fig.3 Soil microbial entropy in 0—20 cm soil layer of three types of secondary forests



注: C<sub>mic</sub>为微生物量碳; N<sub>mic</sub>为微生物量氮; P<sub>mic</sub>为微生物量磷; C<sub>mic</sub>:N<sub>mic</sub>为微生物量碳氮比; C<sub>mic</sub>:P<sub>mic</sub>为微生物量碳磷比; N<sub>mic</sub>:P<sub>mic</sub>为微生物量氮磷比; QMBC为微生物熵碳; QMBN为微生物熵氮; QMBP为微生物熵磷; TOC为土壤总有机碳; TN为全氮; TP为全磷; NN为硝态氮; AN为铵态氮; AP为有效磷; ST为土壤温度; SWC为土壤含水率; pH为土壤酸碱度; C:N为土壤碳氮比; C:P为土壤碳磷比; N:P为土壤氮磷比。

图 4 不同类型次生林土壤微生物量及化学计量比与影响因素冗余分析

Fig. 4 Redundancy analysis of soil microbial biomass, stoichiometric ratios, and influencing factors in different types of secondary forests

### 3 讨论

#### 3.1 不同类型次生林土壤微生物生物量 C、N、P 含量变化特征

土壤 SMB 含量变化是一个复杂过程,此过程受众多因素影响,包括土壤肥力<sup>[19]</sup>、土层深度、温张度高

低、含水率大小<sup>[9]</sup>等,进而使 SMB 含量具有不同的时空变化特征。本研究发现,5—9月寒温带3种天然次生林土壤 C<sub>mic</sub>、N<sub>mic</sub>含量呈现先下降后上升的显著变化趋势。EDWARDS等<sup>[20]</sup>研究表明,在高纬度寒冷地区,冬季微生物持续活动会积累较高的土壤微生物

量,同时耿莹莹等<sup>[9]</sup>研究也发现,春夏季节 SMB 含量呈下降趋势,秋末回升至较高水平,与本研究结果相似。其中原因除漫长的冬季积累较高的微生物量外,还可能是由于寒温带地区 5 月正处于冬春交替时期,积雪融化,温度升高,土壤微生物活动加剧,从而导致土壤  $C_{mic}$ 、 $N_{mic}$  含量较高。5—7 月,温度不断升高,积雪逐渐融化持续为土壤输入水分,树木及林下草本植物开始逐渐进入生长旺期,从土壤中吸收的养分增多,这时植物与微生物争夺土壤养分,限制微生物的生长繁殖<sup>[21]</sup>,导致土壤 SMB 的持续下降。8 月,土壤温度稳定在较高水平,降雨增多,水分含量充足,树木根系活动增强,根系向根际区域释放的有机化合物增多,因此土壤有机质矿化程度加深,为土壤微生物活动积累丰富的底物,直至 9 月 SMB 含量不断回升。本研究 RDA 分析(图 5)显示,土壤含水率与  $N_{mic}$  正相关性显著高于  $C_{mic}$ ,故  $N_{mic}$  受土壤水分变化的响应更强,所以  $N_{mic}$  在 9 月下降的原因可能是由于降雨减少,土壤含水率降低,导致其含量下降。

与赵紫薇等<sup>[22]</sup>研究暖温带-亚热带过渡带的结果不同,本研究中  $P_{mic}$  与  $C_{mic}$ 、 $N_{mic}$  月动态变化趋势不一致,呈现 5—6 月上升而后逐渐下降的趋势。原因可能为 5 月是寒温带冻土融化的主要时期,土壤反复冻融,在冻融过程中部分微生物细胞破裂,使得  $P_{mic}$  含量处于较低水平。6 月温度上升,一方面,冻融后微生物活性恢复,同化土壤有效磷<sup>[21]</sup>;另一方面,可能因为土壤  $P_{mic}$  比  $C_{mic}$ 、 $N_{mic}$  的周转速度相对更快<sup>[23]</sup>,微生物吸收和释放磷的过程非常活跃,导致 6 月  $P_{mic}$  含量急剧升高。7—9 月,由于生长季前期土壤营养底物消耗过大再加上植物继续生长与微生物争夺养分,导致  $P_{mic}$  含量下降。另有研究<sup>[24]</sup>指出, $P_{mic}$  与  $C_{mic}$ 、 $N_{mic}$  的此种差异可能还与植物群落等有关,而刘璐等<sup>[25]</sup>研究发现, $P_{mic}$  更可能受土壤含水量、pH、矿质养分等因素的综合影响。相比于土壤  $C_{mic}$  和  $N_{mic}$ , $P_{mic}$  快速周转使其在短期内波动较大,难以捕捉其稳定状态,加上相关研究较少,所以其含量月动态变化及具体影响机理还有待深入探索。

本研究中,白桦林和山杨林土壤 SMB 含量显著高于混交林,与黄澳等<sup>[4]</sup>研究亚热带杉木-闽楠混交林结果相似。RDA 分析(图 5)表明,TOC、TN、TP、AP 含量与  $C_{mic}$ 、 $N_{mic}$ 、 $P_{mic}$  均呈显著正相关,说明混交林土壤 SMB 含量低于白桦纯林和山杨纯林的原因很可能取决于土壤养分的丰缺,因为树种混交增加土壤细菌和真菌群落的多样性,促进养分循环,加快树

木吸收养分,从而导致植物归还土壤的养分减少,降低混交林土壤中 C、N、P 元素含量,因此使得土壤微生物因缺乏养分供给而 SMB 含量低于纯林。由分析结果 5—7 月混交林  $C_{mic}$ 、 $N_{mic}$  降幅显著高于白桦林和山杨林可以进一步佐证以上解释。此外,本研究还发现,混交林土壤  $P_{mic}$  含量月动态波动显著小于白桦纯林和山杨纯林,究其原因一方面可能是混交林土壤含水率明显低于 2 种纯林,所以冻融程度相对较低,故微生物活性变化较小;另一方面,混交林内树木从土壤中吸收大量养分,导致土壤微生物生长繁殖受到磷的限制,同时同化土壤有效磷,使得  $P_{mic}$  变化变缓。除此之外,郭李琦等<sup>[26]</sup>还从树种菌根类型层面研究分析微生物量的变化发现,菌根类型也可以影响特定微生物群落的丰度,改变根际微生物。根系分泌物数量和种类的改变主要影响土壤的物理、化学和生物特性,进而影响森林生态系统物质循环和能量转化<sup>[27]</sup>。具体影响机理和程度大小还需进一步探索。

### 3.2 不同类型次生林土壤微生物生物量化学计量比和土壤微生物熵变化特征

土壤 SMB 化学计量比可以判定微生物群落结构变化<sup>[28]</sup>。已有研究<sup>[29]</sup>表明,森林主要树种组成和物种数量及生物量、枯落物、根系等的数量和质量不同,其土壤微生物种类结构亦不同,从而影响土壤  $C_{mic}$ 、 $N_{mic}$ 、 $P_{mic}$  含量,同时导致其化学计量比发生变化。土壤  $C_{mic}$ : $N_{mic}$  反映土壤中真菌和细菌的比例,即比值越高意味着真菌数量越多,当  $C_{mic}$ : $N_{mic}$  为 3~5 时,细菌在土壤微生物群落中占据优势,而当其值为 4~15 时,则真菌为主导<sup>[30]</sup>。本研究中 3 种次生林土壤  $C_{mic}$ : $N_{mic}$  为 0.18~5.12,随着土层的加深比值减小,说明该研究区土壤微生物以细菌为主,且土层越深,细菌占比越大。此外,混交林土壤  $C_{mic}$ : $N_{mic}$  平均值大于白桦林和山杨林,表明混交林比 2 种纯林真菌占比更高,可能是白桦和山杨混交,增加土壤微生物多样性,改变根系分泌物的数量和质量,从而导致土壤微生物活性产生差异,使得土壤 SMB 含量变化不同。 $C_{mic}$ : $N_{mic}$  值 5—9 月先下降后上升的原因可能是,5—6 月树木及草本植物开始生长需要从土壤中吸取大量营养,土壤有机质矿化,而土壤真菌在有机质分解早期能大量繁殖,快速分解动植物残体中较简单的含 N 有机质<sup>[1]</sup>,故  $C_{mic}$ : $N_{mic}$  值可能大。6—8 月植物代谢旺盛,向土壤中释放较多根际分泌物刺激细菌繁殖来分解土壤中复杂的难分解的有机质,故土壤  $C_{mic}$ : $N_{mic}$  下降。9 月,植物落叶和细

根凋落物的输入,这些都是真菌擅长分解的, $C_{mic}:N_{mic}$ 回升。

本研究表明,5—9月3种次生林土壤 $C_{mic}:P_{mic}$ 和 $N_{mic}:P_{mic}$ 平均值分别为24.53和13.22。已有研究<sup>[1]</sup>显示,土壤 $C_{mic}:P_{mic}$ 反映土壤微生物对土壤P有效性的调节潜力。通常当比值 $>20$ 时,则意味着土壤处于缺P状态,循环周转释放P的潜力较小,并且与植物竞争土壤中的P养分。由此可以解释本研究中 $C_{mic}:P_{mic}$ 在5—7月下降的原因,植物逐渐生长旺盛需要从土壤中吸收更多的P,从而导致微生物生长繁殖因缺P而受限。同时本研究RDA分析(图5)也显示, $C_{mic}:P_{mic}$ 与AP呈极显著负相关,也进一步验证了这一解释。混交林 $C_{mic}:P_{mic}$ 平均值显著高于白桦林和山杨林,表明混交林可能比白桦林和山杨林更缺P素。土壤 $N_{mic}:P_{mic}$ 的大小反映植物对N和P的需求大小<sup>[1]</sup>,如果土壤 $N_{mic}:P_{mic}$ 变小,则表明植物对N的需求大过对P的需求;如果 $N_{mic}:P_{mic}$ 变大,则表明植物对P的需求比对N的需求更大。本研究中土壤 $N_{mic}:P_{mic}$ 平均值远高于全球平均水平(5.6),进一步验证此地区可能缺P。混交林 $N_{mic}:P_{mic}$ 显著高于白桦林和山杨林,混交林对P的需求大过白桦林和山杨林,说明混交林土壤可能严重缺P。综上,虽然本研究结果分析了SMB化学计量比在不同林型、不同土层、不同月份的变化特征,但是SMB化学计量比的影响机理还有待深入挖掘,尤其在微生物群落和物种组成方面。此外,报道 $P_{mic}$ 的研究较少,可能会导致 $C_{mic}:P_{mic}$ 和 $N_{mic}:P_{mic}$ 对土壤养分资源响应的不确定性。

qMB主要用来反映单位资源可支持的SMB含量,它通过反映土壤养分及其利用效率的变化来反映土壤生态系统的动态变化,是表征土壤质量变化的敏感指标<sup>[31]</sup>。有研究<sup>[7]</sup>发现,土壤化学性质是影响土壤微生物熵的主要因素,与本研究结果RDA分析(图5)结果保持一致。本研究结果中次生林土壤qMBC平均值为1.08%,低于全国森林平均水平(1.92%),说明寒温带地区土壤碳库可能不如国内其他地区活跃,土壤C向 $C_{mic}$ 转化的效率较低;土壤qMBN平均值为6.43%,显著高于全国森林平均水平(3.43%),可以推断本地区不受N素匮乏的限制,土壤N向 $N_{mic}$ 的转化良好;qMBP平均值为1.55%,远低于全国森林平均水平(3.76%),再次说明土壤P向 $P_{mic}$ 转化受到限制,尤其混交林qMBP比白桦林和山杨林分别低0.71和0.43倍,可能存在严重缺磷的现象。本研究结果显示,3种次生林qMBC、

qMBN和qMBP平均值为白桦林 $>$ 山杨林 $>$ 混交林,表明白桦林的土壤养分利用效率高于山杨林和混交林。

## 4 结论

1)3种天然次生林0~20 cm土层土壤 $C_{mic}$ 、 $N_{mic}$ 质量分数均表现为生长季中期低、后期高的特点, $P_{mic}$ 反之;混交林 $C_{mic}$ 、 $N_{mic}$ 、 $P_{mic}$ 质量分数均低于白桦纯林和山杨纯林,月动态变化也比2种纯林更为活跃。

2)5—9月,微生物生物量化学计量比同样均呈现生长季中期低、后期高的变化趋势;白桦-山杨混交林 $C_{mic}:N_{mic}$ 、 $C_{mic}:P_{mic}$ 和 $N_{mic}:P_{mic}$ 均高于2种纯林。

3)土壤总有机碳、全氮、全磷、硝态氮和速效磷是微生物生物量及其化学计量的关键驱动因子,微生物熵与微生物生物量之间也存在较强的相关性。

3种天然次生林土壤均存在供磷不足现象,并且混交林比纯林更为严重,土壤P向 $P_{mic}$ 转化受到较大限制。研究结果为理解微生物量C、N、P循环机制及其循环过程的耦合关系提供思路,对于寒温带地区天然次生林合理经营及土壤养分管理具有一定的理论和实践价值。

### 参考文献:

- [1] 李品,木勒德尔·吐尔汗拜,田地,等.全球森林土壤微生物生物量碳氮磷化学计量的季节动态[J].植物生态学报,2019,43(6):532-542.  
LI P, MULEDEER T, TIAN D, et al. Seasonal dynamics of soil microbial biomass carbon, nitrogen and phosphorus stoichiometry across global forest ecosystems [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2019, 43 (6) : 532-542.
- [2] 王清奎,汪思龙,冯宗炜,等.土壤活性有机质及其与土壤质量的关系[J].生态学报,2005,25(3):513-519.  
WANG Q K, WANG S L, FENG Z W, et al. Active soil organic matter and its relationship with soil quality [J]. Acta Ecologica Sinica, 2005, 25(3):513-519.
- [3] BARGALI K, MANRAL V, PADALIA K, et al. Effect of vegetation type and season on microbial biomass carbon in Central Himalayan forest soils, India [J]. Catena, 2018, 171:125-135.
- [4] 黄澳,及利,何功秀,等.杉木阔叶混交林根际土壤生态化学计量特征及其根际效应[J].生态学杂志,2025,44(7):2268-2276.  
HUANG A, JI L, HE G X, et al. Ecological stoichiometric characteristics and their rhizosphere effects of soil in mixed forests of *Cunninghamia lanceolata* and *Phoebe*

- bournei* [J]. Chinese Journal of Ecology, 2025, 44(7): 2268-2276.
- [5] 赵盼盼, 周嘉聪, 林开森, 等. 海拔梯度变化对中亚热带黄山松土壤微生物生物量和群落结构的影响[J]. 生态学报, 2019, 39(6): 2215-2225.  
ZHAO P P, ZHOU J C, LIN K M, et al. Effect of different altitudes on soil microbial biomass and community structure of *Pinus taiwanensis* forest in mid-subtropical zone[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(6): 2215-2225.
- [6] 喻阳华, 吴银菇, 宋燕平, 等. 不同林龄顶坛花椒林地土壤微生物浓度与生物量化学计量特征[J]. 生态环境学报, 2022, 31(6): 1160-1168.  
YU Y G, WU Y G, SONG Y P, et al. Stoichiometric characteristics of soil microbial concentration and biomass in *Zanthoxylum planispinum* var. *Dintanensis* plantations of different ages [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2022, 31(6): 1160-1168.
- [7] BANNING N C, GRANT C D, JONES D L, et al. Recovery of soil organic matter, organic matter turnover and nitrogen cycling in a post-mining forest rehabilitation chronosequence[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2008, 40(8): 2021-2031.
- [8] 丁令智, 满秀玲, 肖瑞晗, 等. 寒温带森林根际土壤微生物量碳氮含量生长季内动态变化[J]. 林业科学, 2019, 55(7): 178-186.  
DING L Z, MAN X L, XIAO R H, et al. Dynamics of soil microbial biomass carbon and nitrogen in the soil of rhizosphere during growing season in the cold temperate forests[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2019, 55(7): 178-186.
- [9] 耿莹莹. 大兴安岭典型林分土壤微生物生物量动态变化[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2012.  
GENG Y Y. Study on dynamics of soil microbial biomass in typical forest in Daxing'an Mountains [D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2012.
- [10] 孙龙, 武广源, 胡同欣. 大兴安岭火后不同恢复时期土壤微生物生物量动态变化[J]. 生态学杂志, 2017, 36(11): 3094-3101.  
SUN L, WU G Y, HU T X. Dynamic changes of soil microbial biomass in different restoration periods of Daxing'anling after fire disturbance [J]. Ecology Journal, 2017, 36(11): 3094-3101.
- [11] 杨立宾, 隋心, 朱道光, 等. 寒温带兴安落叶松林土壤细菌微生物量和群落组成研究[J]. 中南林业科技大学学报, 2018, 38(8): 67-75.  
YANG L B, SUI X, ZHU D G, et al. Study on soil microbial biomass and community composition of *Larix gmelinii* in cold temperate zone [J]. Journal of Central South University of Forestry and Technology, 2018, 38(8): 67-75.
- [12] 胡海清, 罗碧珍, 魏书精, 等. 大兴安岭 5 种典型林型森林生物碳储量[J]. 生态学报, 2015, 35(17): 5745-5760.  
HU H Q, LUO B Z, WEI S J, et al. Estimating biological carbon storage of five typical forest types in the Daxing'anling Mountains, Heilongjiang, China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(17): 5745-5760.
- [13] 王浩伊, 满秀玲, 王军, 等. 大兴安岭北部 2 种不同生活型针叶树种叶片生态化学计量特征研究[J]. 北京林业大学学报, 2023, 45(10): 36-46.  
WANG H Y, MAN X L, WANG J, et al. Leaf stoichiometry of two conifer species with different life forms in northern Daxing'an Mountains of northeastern China [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2023, 45(10): 36-46.
- [14] 田舒怡, 满秀玲. 大兴安岭北部森林土壤微生物量碳和水溶性有机碳特征研究[J]. 土壤通报, 2016, 47(4): 838-845.  
TIAN S Y, MAN X L. Characteristics of soil microbial biomass carbon and dissolved organic carbon in northern forest region of Daxing'an Mountains [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2016, 47(4): 838-845.
- [15] 陈韵如, 杨扬, 张喜亭, 等. 大兴安岭森林火烧恢复年限对土壤磷及其有效性的影响[J]. 生态学报, 2019, 39(21): 7977-7986.  
CHEN Y R, YANG Y, ZHANG X T, et al. Effects of after-burning rehabilitation times on soil phosphorus and its availability in the Daxing'anling forests [J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(21): 7977-7986.
- [16] BENJAMIN L T, ANDREW W B, PHILIP M H. Rapid estimation of microbial biomass in grassland soils by ultra-violet absorbance [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2001, 33: 913-919.
- [17] BROOKES P C, POWLSON D S, JENKINSON D S. Measurement of microbial biomass phosphorus in soil [J]. Soil Biology and Biochemistry, 1982, 113(14): 319-329.
- [18] MOOSHAMMER M, WANEK W, ZECHMEISTER-BOLTENSTERN S, et al. Stoichiometric imbalances between terrestrial decomposer communities and their resources: Mechanisms and implications of microbial adaptations to their resources [J]. Frontiers in Microbiology, 2014, 5: e22.
- [19] 王宁, 杨雪, 李世兰, 等. 不同海拔红松混交林土壤微生物量碳、氮的生长季动态[J]. 林业科学, 2016, 52(1): 150-158.  
WANG N, YANG X, LI S L, et al. Seasonal dynamics of soil microbial biomass carbon-nitrogen in the Korean pine mixed forests along elevation gradient [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2016, 52(1): 150-158.
- [20] EDWARDS K A, MCCULLOCH J, PETER KER-

- SHAW G, et al. Soil microbial and nutrient dynamics in a wet Arctic sedge meadow in late winter and early spring[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2006, 38(9):2843-2851.
- [21] 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.
- HE Z L. Soil microbial biomass and its significance in nutrient cycling and environmental quality assessment[J]. *Soils*, 1997, 29(2):61-69.
- [22] 赵紫薇, 阮宏华, 杨艳, 等. 干旱对杨树人工林土壤微生物生物量碳氮磷生态化学计量特征的影响[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2025, 49(3):33-40.
- ZHAO Z W, RUAN H H, YANG Y, et al. Effects of drought on the soil microbial biomass C, N, P ecological stoichiometric characteristics of poplar plantation [J]. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition)*, 2025, 49(3):33-40.
- [23] 赵琼, 曾德慧. 陆地生态系统磷素循环及其影响因素[J]. *植物生态学报*, 2005, 29(1):153-163.
- ZHAO Q, ZENG D H. Phosphorus cycling in terrestrial ecosystems and its controlling factors[J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 2005, 29(1):153-163.
- [24] BARDGETT R D, MCALISTER E. The measurement of soil fungal: Bacterial biomass ratios as an indicator of ecosystem self-regulation in temperate meadow grasslands[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 1999, 29(3):282-290.
- [25] 刘璐, 宋同清, 彭晚霞, 等. 木论喀斯特自然保护区土壤微生物生物量的空间格局[J]. *生态学报*, 2012, 32(1):207-214.
- LIU L, SONG T Q, PENG W X, et al. Spatial heterogeneity of soil microbial biomass in Mulun National Nature Reserve in Karst area[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(1):207-214.
- [26] 郭李琦. 温带森林树种菌根类型对根际微生物的影响[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2024.
- GUO L Q. The Influence of different mycorrhizal tree species in temperate forest on rhizosphere microorganisms [D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2024.
- [27] 吴林坤, 林向民, 林文雄. 根系分泌物介导下植物-土壤-微生物互作关系研究进展与展望[J]. *植物生态学报*, 2014, 38(3):298-310.
- WU L K, LIN X M, LIN W X, et al. Advances and perspective in research on plant-soil-microbe interactions mediated by root exudates [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2014, 38(3):298-310.
- [28] SUN Y, CHEN H Y H, JIN L, et al. Drought stress induced increase of fungi: Bacteria ratio in a poplar plantation[J]. *Catena*, 2020, 193:e104607.
- [29] OTAKI M, TSUYUZAKI S. Succession of litter-decomposing microbial organisms in deciduous birch and oak forests, northern Japan [J]. *Acta Oecologica*, 2019, 101:e103485.
- [30] MA Z L, CHEN H Y H, BORK E W, et al. Carbon accumulation in agroforestry systems is affected by tree species diversity, age and regional climate: A global meta-analysis [J]. *Global Ecology and Biogeography*, 2020, 29(10):1817-1828.
- [31] 杨成德, 龙瑞军, 陈秀蓉, 等. 东祁连山高寒草甸土壤微生物量及其与土壤物理因子相关性特征[J]. *草业学报*, 2007, 16(4):62-68.
- YANG C D, LONG R J, CHEN X R, et al. Study on microbial biomass and its correlation with the soil physical properties under the alpine grassland of the east of Qilian Mountains [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2007, 16(4):62-68.