·森林资源建设与保护 Construction and Protection of Forest Resources·

沙地主要人工林类型对土壤化学与生物学特性的差异化影响

陶喆[1]，周凤艳[1,2*]，王国晨[3]，赵国军[3]，张岩松[4]，韩艳刚[1,2]，雷泽勇[1,2,5]
（1. 辽宁工程技术大学 环境科学与工程学院，辽宁 阜新 123000；2. 辽宁工程技术大学 退化土地生态治理研究院，辽宁 阜新 123000；3. 辽宁省沙地治理与利用研究所，辽宁 阜新 123000；4. 中国科学院 沈阳应用生态研究所，沈阳 110016；5. 辽宁工程技术大学 阜新振兴发展研究院，辽宁 阜新 123000）

摘　要：为探究科尔沁沙地防风固沙林主要造林树种人工林对林下土壤化学和生物学性质的差异化影响，以章古台地区19年生的樟子松（*Pinus sylvestris* var. *mongolica*）、油松（*Pinus tabuliformis*）和小钻杨（*Populus xiaozhuanica*）人工林为研究对象，分析林下土壤化学和生物学指标间的差异及其相关关系。结果表明，在0~20 cm土层，小钻杨人工林的土壤镁离子质量摩尔浓度显著高于樟子松人工林43.88%，钠离子质量摩尔浓度分别是樟子松人工林和油松人工林4.40倍和2.87倍，差异显著（P<0.05），碳磷比（C∶P）显著高于樟子松人工林23.39%。β-葡萄糖苷酶活性分别显著高于樟子松人工林78.17%和油松人工林89.02%，乙酰氨基葡萄糖苷酶活性是樟子松人工林的2.16倍，差异显著（P<0.05），细菌生物量显著高于樟子松人工林42.30%，革兰氏阴性菌生物量分别显著高于樟子松人工林69.55%和油松人工林61.47%。该层次的樟子松人工林土壤纤维素水解酶活性和过氧化物酶活性分别是小钻杨人工林的2.00倍和1.58倍，差异显著（P<0.05）。在20~60 cm土层，小钻杨人工林土壤有机碳储量和矿质结合有机碳储量分别显著高于樟子松人工林53.47%~54.97%和59.08%~62.55%，而樟子松在60~100 cm土层土壤颗粒有机碳储量是小钻杨人工林的2.55倍，差异显著（P<0.05）。通过深入探究不同林分类型对土壤化学、生物学性质的差异化影响机制，揭示沙地土壤C∶P是解释土壤微生物群落功能的关键因子；小钻杨人工林能够显著提升表层土壤肥力，樟子松人工林在深层土壤的长期碳封存中更具优势，可根据不同的生态修复目标合理配置不同的树种。

关键词：科尔沁沙地；人工林；土壤；化学性质；生物学性质；有机碳组分；微生物；氮转化
中图分类号：S153.6　　**文献标识码：**A　　**DOI：**10.7525/j.issn.1006-8023.2026.05.004

Differential Effects of Major Plantation Types on Soil Chemical and Biological Properties in Sandy Lands

TAO Zhe[1], ZHOU Fengyan[1,2*], WANG Guochen[3], ZHAO Guojun[3], ZHANG Yansong[4], HAN Yangang[1,2], LEI Zeyong[1,2,5]
(1. College of Environmental Science and Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China; 2. Institute of Land Degradation and Ecological Restoration, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China; 3. Institute of Sandy Land Control and Utilization, Fuxin 123000, China; 4. Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Science, Shenyang 110016, China; 5. Fuxin Revitalization Development Research Institute, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China)

Abstract: To assess the differential effects of major afforestation species on soil chemical and biological properties in windbreak and sand-fixation forests of the Horqin Sandy Land, this study examined 19-year-old plantations of *Pinus sylvestris* var. *mongolica*, *Pinus tabuliformis*, and *Populus xiaozhuanica* in the Zhanggutai region. Soil chemical and biological indicators were analyzed to determine interspecific variation and their correlations. The results revealed that in the 0-20 cm soil layer, the soil Mg^{2+} concentration in *P. xiaozhuanica* was significantly higher than in *P. sylvestris* var. *mongolica* plantations by 43.88%. The Na^{+} concentration was 4.40 times and 2.87 times that of *P. sylvestris* var. *mongolica* and *P. tabuliformis* plantations, with significant differences (P<0.05). The C:P ratio was significantly higher

收稿日期：2025-12-01
基金项目：国家重点研发计划项目(2022YFF1302505-02)；辽宁省教育厅基本科研项目(JYTMS20230808)；国家自然科学基金项目(31570709)。
第一作者简介：陶喆，硕士研究生。研究方向为水土保持与荒漠防治化。E-mail：736345449@qq.com
***通信作者：**周凤艳，教授。研究方向为水土保持与荒漠化防治。E-mail：fengyanzhou@sohu.com
引文格式：陶喆，周凤艳，王国晨，等. 沙地主要人工林类型对土壤化学与生物学特性的差异化影响[J]. 森林工程，2026，42(5)：918-932.
Tao Zhe, Zhou Fengyan, Wang Guochen, et al. Differential effects of major plantation types on soil chemical and biological properties in sandy lands[J]. Forest Engineering, 2026, 42(5): 918-932.

than in *P. sylvestris* var. *mongolica* plantations by 23. 39%. The β-glucosidase activity was significantly higher than in *P. sylvestris* var. *mongolica* and *P. tabuliformis* plantations by 78. 17% and 89. 02%. The N-acetylglucosaminidase activity was 2. 16 times that of *P. sylvestris* var. *mongolica* plantations, with significant differences (P<0. 05). The bacterial biomass was significantly higher than in *P. sylvestris* var. *mongolica* plantations by 42. 30%, and the gram-negative bacterial biomass was significantly higher than that in *P. sylvestris* var. *mongolica* and *P. tabuliformis* plantations by 69. 55% and 61. 47%, respectively. In the same layer, the soil cellulase hydrolysis activity and peroxidase activity in *P. sylvestris* var. *mongolica* plantations were 2. 00 times and 1. 58 times that of *Populus xiaozhuanica* plantations, with significant differences (P<0. 05). In the 20-60 cm soil layer, soil organic carbon storage and mineral-associated organic carbon storage in *Populus xiaozhuanica* were significantly higher than in *P. sylvestris* var. *mongolica* plantations by 53. 47%-54. 97% and 59. 08%-62. 55%, respectively. In the 60-100 cm layer, the soil organic carbon storage in *P. sylvestris* var. *mongolica* plantations was 2. 55 times that of *Populus xiaozhuanica* plantations, with significant difference (P< 0. 05). By delving into the differential impacts of various forest types on soil chemical and biological properties, this study reveals that the soil C:P ratio in sandy lands serves as a critical factor explaining the functionality of soil microbial communities. *Populus xiaozhuanica* plantations significantly enhance the fertility of surface soil, while *P. sylvestris* var. *mongolica* plantations demonstrate greater advantages in long-term carbon sequestration within deeper soil layers. Different tree species can thus be rationally allocated based on specific ecological restoration objectives.

Keywords: Horqin Sandy Land; plantation; soil; chemical properties; biological properties; organic and factions; microoragnisms; nitrogen transformation

0　引言

土壤作为陆地生态系统的基础组分,不仅是森林生态系统中植物正常生长的基础,也是维持动植物生存和发展的重要载体,还是调控物质循环、提升生物量生产的重要介质[1-2]。土壤的物理、化学以及生物学特征与地表景观之间互相影响[3],人工林建设是干旱半干旱地区生态修复与土地退化防治的重要手段,不同造林树种通过凋落物输入的数量和质量差异,直接影响土壤有机碳的积累与分解过程,并显著改变土壤的化学环境[4]。同时,树种根系对土壤中矿质养分的吸收与再分配会改变其含量,并且不同树种的根系分泌物存在差异,会选择性地刺激或抑制特定微生物群落的生长繁殖,进而影响碳、氮、磷等关键元素的循环效率[5]。以上途径共同重塑土壤的化学和生物学环境,最终影响土壤肥力的恢复速度和生态系统功能的提升程度[6]。因此,深入探究不同造林树种对土壤性质的影响机制,对于精准评估人工林生态修复效果、科学指导人工林建设具有重要的理论与实践意义。

科尔沁沙地处于中国北方农牧交错带东南端,由于生态环境基质叠加气候条件变化以及不合理的人类活动影响,使其成为现代沙漠化最严重的区域之一[7]。该地区是我国北方重点生态修复区,经过多年的固沙植被建设,该地区的土壤风蚀量因显著提高的植被覆盖度而明显降低[8],而且通过建立稳定的人工植被,还显著提高了该地区的土壤质量[9]。然而,不同树种人工林对土壤性质影响的机制尚不明确,尤其是在土壤有机碳积累、养分循环和微生物群落等方面的差异仍需深入探究[10]。此外,沙地土壤通常表现为结构疏松、持水与保肥能力较弱等特征,这类理化背景可能调节植被恢复过程中树种对土壤碳氮过程与微生物的影响强度,但相关证据仍有限,有必要在控制立地条件的基础上进一步检验[11]。

本研究以章古台地区19年生的樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica*)、油松(*Pinus tabuliformis*)和小钻杨(*Populus xiaozhuanica*)人工林为研究对象,通过分析不同林分类型下土壤的化学性质、生物学性质及其相关关系,不仅关注单一指标差异,更通过化学性质与生物学性质的耦合分析,揭示沙地3种主要造林树种对土壤化学和生物学性质的综合影响。旨在针对不同生态修复目标提供合理的造林树种配置,为精准提升沙地人工林生态服务功能提供科学依据。

1　研究区概况

试验地位于辽宁省沙地治理与利用研究所章古台固沙林林场。该试验地处于科尔沁沙地东南缘,中心点位于42°42′N,122°29′E,平均海拔为225 m。该地区属于温带大陆季风气候,春季常出现大风及沙尘天气,年均气温7. 7 ℃,平均无霜期156 d。年均降水量474 mm,且季节分配不均,其中7、8月降水量占全年大部分,年均蒸发量为1 580 mm[12]。主要优势物种包括有中华委陵菜(*Potentilla anserina*)、中华隐子草(*Cleistogenes chinensis*)、胡枝子(*Lespedeza daurica*)、盐蒿(*Artemisia halodendron*)和大果榆(*Ulmus macrocarpa*)等[12];主要优势造林树种包括樟子松、油松和小钻杨等。主要土壤类型为典型半干润砂质新成土[10]。

1.1 样地设置

选取19年生的人工纯林作为研究对象，林分类型分别为樟子松、油松和小钻杨。每种林分类型分别设置5个20 m×20 m的重复样方，样地林分密度为初植密度，其间并未进行间伐等管理措施，各样地间距为200 m，所有样地均处于平坦地势，并且分布于10 km^2范围内，确保可以视作独立重复并且避免气候条件产生的影响。

表1 样地基本信息

Tab. 1 Basic information of sample plots

林分类型 stand type	林龄/a stand age	林分密度/(株·hm^{-2}) density	平均胸径/cm average DBH	平均树高/m average height
樟子松 *Pinus sylvestris* var. *mongolica*	19	550	14.58 ± 1.69	6.82 ± 0.79
小钻杨 *Populus xiaozhuanica*	19	520	11.83 ± 0.97	4.82 ± 0.53
油松 *Pinus tabuliformis*	19	617	19.34 ± 2.43	13.26 ± 0.95

1.2 样品采集

在各样地内按“S”形布点法选取5个采样点，利用环刀收集0~20、20~40、40~60、60~80、80~100 cm深度原状土，用于测定土壤容重。并利用土钻在上述各深度分别采集土壤样品，5个采样点的土壤样品分别独立处理(剔除根系和石块后过2 mm筛)。每个采样点、每一深度的过筛土壤样品再分为3份，分别进行风干、4 ℃冷藏和-18 ℃冷冻处理。风干处理用于后续测定土壤pH、有机碳质量分数、不同有机碳组分储量、全氮质量分数、全磷质量分数和交换性阳离子浓度；4 ℃冷藏处理用于后续测定土壤铵态氮质量分数、硝态氮质量分数、净氮矿化速率、净氮硝化速率和胞外酶活性；-18 ℃冷冻处理用于后续测定土壤微生物生物量。其中土壤容重、有机碳、全氮、全磷质量分数和不同有机碳组分储量的测定覆盖0~100 cm深度土壤，其余指标测定表层土壤(0~20 cm)。

1.3 样品测定

土壤理化指标测定：土壤容重采用环刀法测定；土壤pH采用电极法测定；土壤样品的有机碳质量分数采用重铬酸钾氧化-分光光度法测定；全氮质量分数采用凯氏消煮法测定；全磷质量分数采用碱熔-钼锑抗分光光度法测定；土壤NH_4^+-N质量摩尔浓度采用靛酚蓝比色法测定；土壤NO_3^--N质量摩尔浓度采用紫外分光光度法测定[13]；将冷藏土壤在室温下放置48 h后于30 ℃恒温培养箱中培养用于测定土壤净氮矿化速率和硝化速率[14]；土壤有机碳不同组分按粒径大小分为颗粒有机碳(粒径>53 μm)和矿物结合有机碳(粒径<53 μm)，采用湿筛法[15]进行测定；土壤交换性阳离子浓度采用乙酸铵浸提法提取，浸提液使用电感耦合等离子体发射光谱仪(5100 ICP-OES，Agilent Technologies，Santa Clara，USA)进行测定[16]。

土壤生物学指标测定：土壤胞外酶活性采用比色法测定[17-18]，土壤碳获取酶包括β-葡萄糖苷酶、纤维素水解酶、多酚氧化酶和过氧化物酶；土壤氮获取酶为乙酰氨基葡萄糖苷酶；土壤磷获取酶为酸性磷酸酶。土壤微生物群落组成采用磷脂脂肪酸(phospholipid fatty acids，PLFAs)法测定[19]。

1.4 数据处理

土壤净氮矿化速率和净氮硝化速率计算公式为

$$R_m = \frac{C_{TN,post} - C_{TN,pre}}{\Delta t}。\quad (1)$$

$$R_n = \frac{C_{NO3,post} - C_{NO3,pre}}{\Delta t}。\quad (2)$$

式中：R_m为土壤净氮矿化速率；R_n为土壤净氮硝化速率；C_{TN}为NH_4^+-N和NO_3^--N的总质量摩尔浓度；C_{NO3}为NO_3^--N的质量摩尔浓度；post为培养后；pre为培养前；Δt为培养时间。

土壤有机碳储量计算公式为

$$\varphi_s = \sum_{i=1}^{n}\left(S_i \times B_i \times T_i\right)。\quad (3)$$

式中：φ_s为土壤有机碳储量；S_i为第i层土壤有机碳质量分数；B_i为第i层土壤容重；T_i为第i层土壤厚度。

土壤氨氮质量摩尔浓度根据Henderson-Hasselbalch方程计算[20]，公式为

$$C_{NH3} = C_{NH4} \times 10^{pH-9.25}。\quad (4)$$

式中：C_{NH3}为土壤氨氮质量摩尔浓度；C_{NH4}为土壤铵态氮质量摩尔浓度；pH为土壤pH。

5个采样点作为样地内的空间重复，3种保存处理为同一样本的分样，不作为独立重复计入样本量。采用单因素方差分析法对3个不同林分类型的林下土壤化学性质、胞外酶活性和微生物性质进行差异分析，对土壤化学和生物学性质进行相关性分析。单因素方差

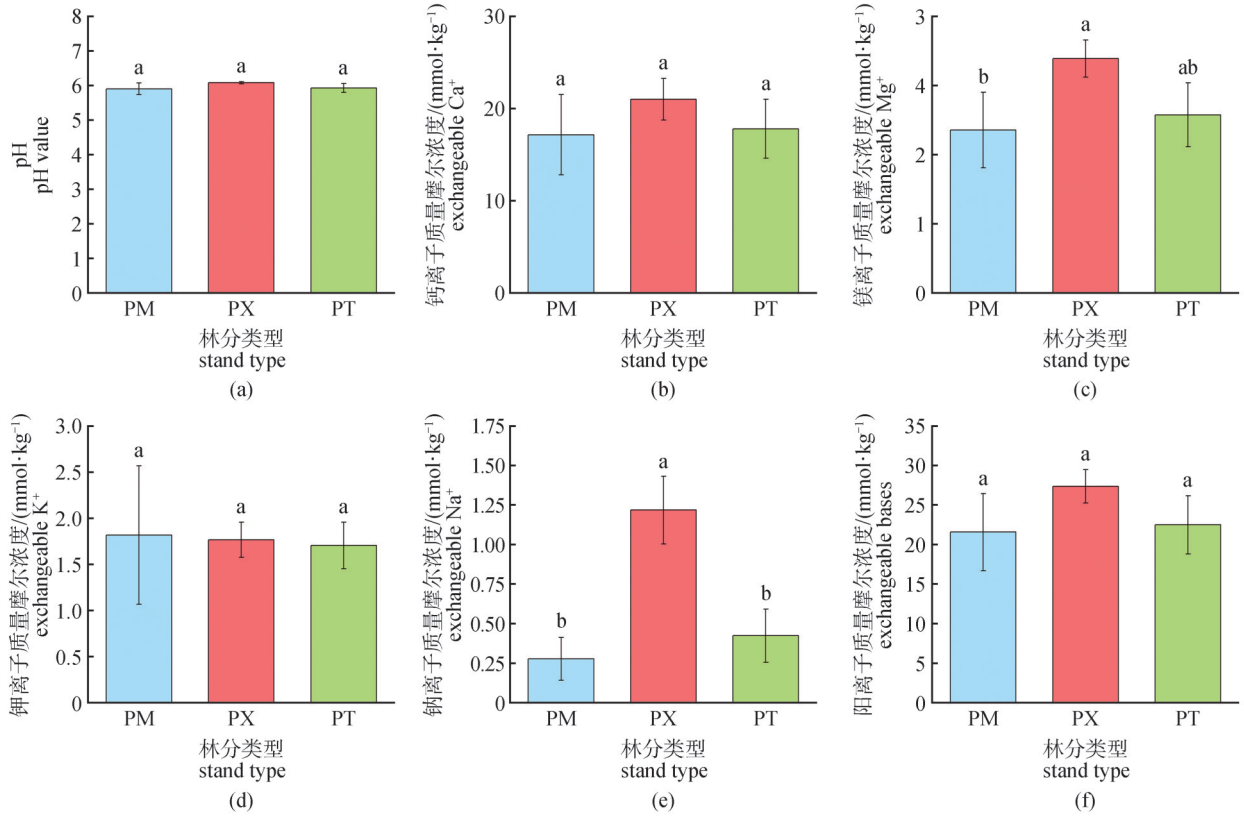
分析、相关性分析使用 SPSS 27.0 完成,冗余分析(redundancy analysis,RDA)使用语言软件 R 完成,画图使用 Origin 完成。

2　结果与分析

2.1　不同林分类型土壤化学性质特征

不同林分类型对土壤化学性质的影响见图1—图4。总的来看,3 种人工林林分在表层土壤 pH 以及交换性钙离子(exchangeable Ca^{2+},简写为 Ca^{2+})质量摩尔浓度、交换性钾离子(exchangeable K^{+},简写为 K^{+})质量摩尔浓度和交换性阳离子总量均无显著差异($P>0.05$),见图1。由图1表明,在相近立地与管理条件下,这些指标对树种更为"钝感",整体处于相似的酸碱饱和水平。

与此不同,土壤交换性镁离子和钠离子对林分类型反应更为敏感。土壤交换性镁离子(exchangeable Mg^{2+},简写为 Mg^{2+})和交换性钠离子(exchangeable Na^{+},简写为 Na^{+})在不同林分类型人工林之间存在显著差异($P<0.05$),其中小钻杨人工林土壤 Mg^{2+} 质量摩尔浓度高于樟子松人工林 43.83%,小钻杨人工林土壤 Na^{+} 质量摩尔浓度分别是樟子松人工林和油松人工林的 4.40 倍和 2.87 倍,差异极显著($P<0.01$)。这表明小钻杨林分在长期生长过程中可能通过凋落物归还和根系吸收-释放过程,促进了 Mg^{2+} 和 Na^{+} 在表层土壤中的富集,从而在一定程度上重塑了基础阳离子组成。



PM,樟子松;PX,杨树;PT,油松;不同小写字母表示不同树种间差异显著($P<0.05$),下同。

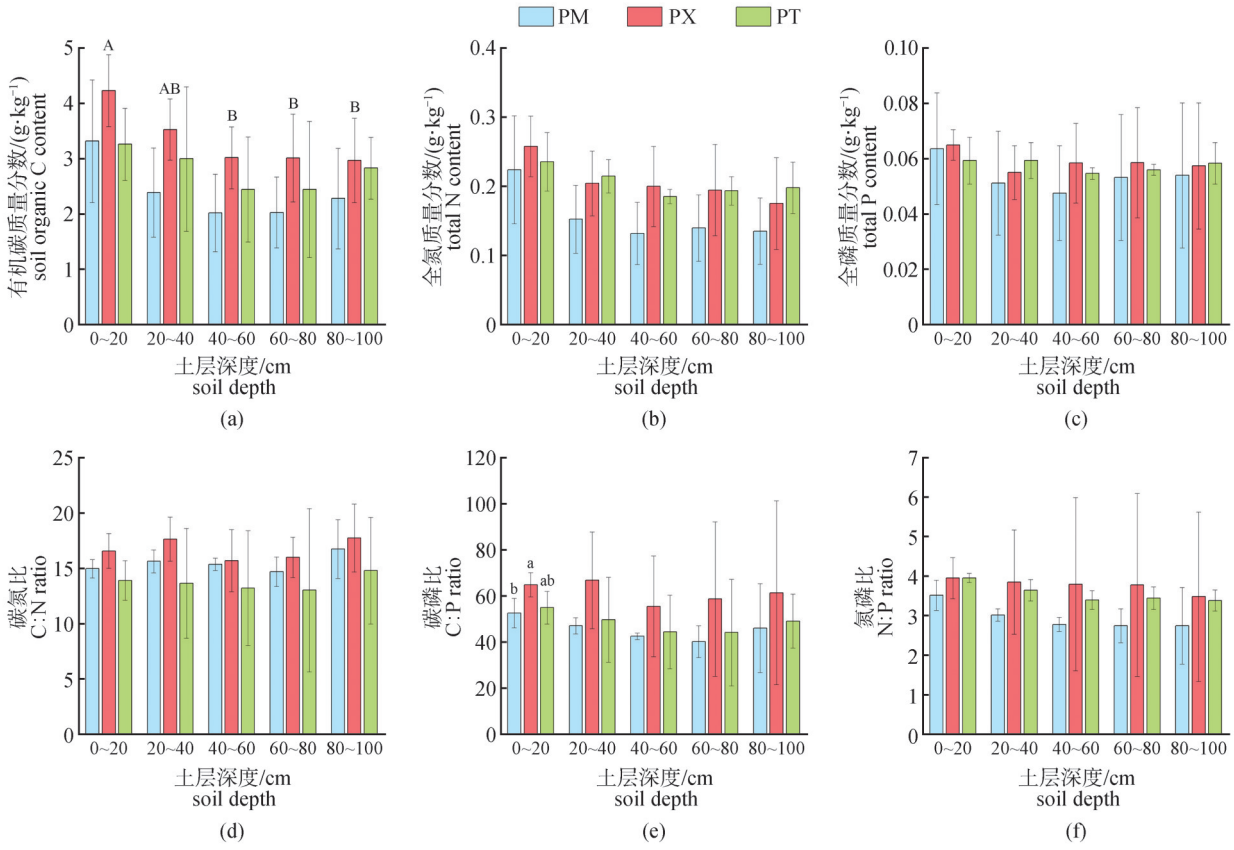
PM, *Pinus sylvestris* var. *mongolica*; PX, *Populus xiaozhuanica*; PT, *Pinus tabuliformis*; Different lowercase letters indicate significant differences among tree species ($P<0.05$), the same below.

图1　不同林分类型表层土壤(0~20 cm)酸碱和交换性阳离子特征

Fig. 1　Characteristics of surface soil (0–20 cm) acidity, alkalinity, and exchangeable cations in different stand types

在养分含量与化学计量特征方面,不同林分类型间土壤有机碳(SOC)、全氮(TN)、全磷(TP)的质量分数及 C∶N 和 N∶P 均无显著差异($P>0.05$),说明在研究时间尺度上,不同树种尚未在整体养分库量和 C、N、P 配比上形成强烈分化,见图2。但 C∶P 对林分类型较为敏感,其中小钻杨人工林土壤 C∶P 在 0~20 cm 土层深度显著高于樟子松人工林 23.39%($P<0.05$),提示小钻杨林分在表层土壤中积累了更多相对富碳的有机物质。

从剖面分布看,小钻杨人工林 SOC 质量分数在垂直方向呈明显表聚特征。其 0~20 cm 土层的 SOC 质量分数分别高于 40~60、60~80、80~100 cm 土层 40.40%、40.86% 和 42.76%($P<0.05$),反映出小钻杨林分凋落



不同大写字母表示同一树种不同土层深度之间差异显著(P<0.05);不同小写字母表示同一土层深度不同树种间差异显著(P<0.05),下同。

Different uppercase letters indicate significant differences among different soil depths for the same tree species (P < 0.05); different lowercase letters indicate significant differences among different tree species at the same soil depth (P < 0.05), the same below.

图2 不同林分类型土壤养分及其化学计量比特征

Fig. 2 Characteristics of soil nutrients and stoichiometric ratios in different stand types

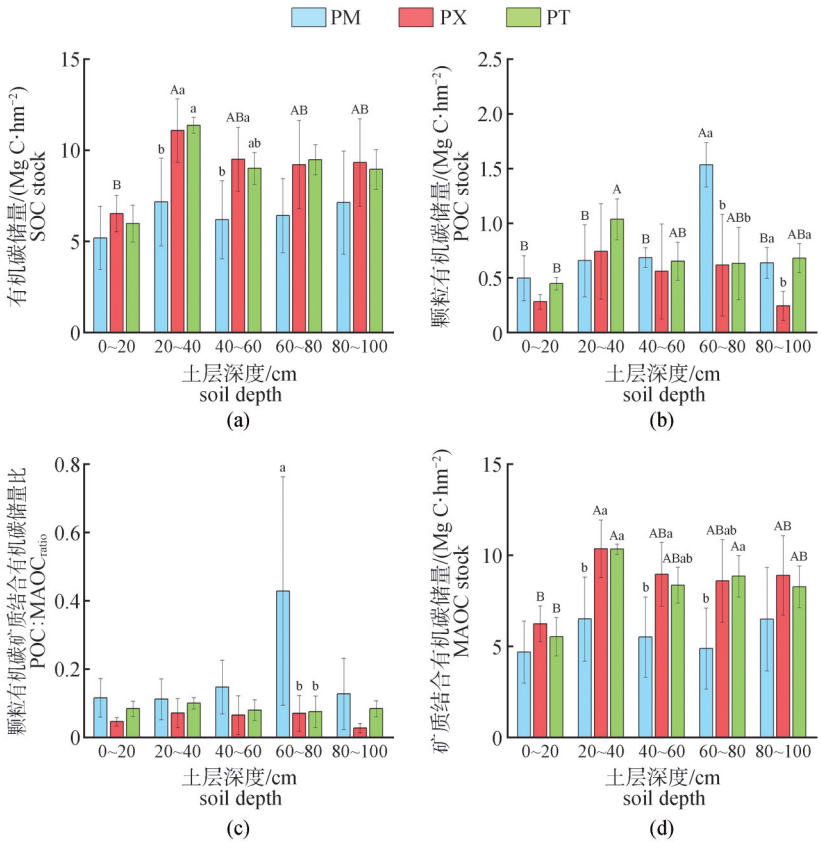
物和根系输入主要集中于表层,且向深层土壤的碳传输相对有限。

对土壤有机碳储量(soil organgic carbon stock, SOC_{stock})组分的分解揭示了不同树种在碳稳定性上的差异。小钻杨人工林SOC_{stock}在20~60 cm土层相较于樟子松人工林提高了53.47%~54.97%,油松人工林SOC_{stock}在20~40 cm土层相较于樟子松人工林提高了58.88%,这说明小钻杨和油松林分在亚表层具有更大的碳储潜力。

从颗粒有机碳(particulate organic carbon, POC)和矿质结合有机碳(mineral-associated organic carbon, MAOC)来看,樟子松人工林在深层土壤中以POC为主,其60~100 cm土层颗粒有机碳储量(POC_{stock})是小钻杨人工林的2.55倍,在60~80 cm土层又是油松人工林的2.43倍,表明樟子松林分在深层积累了更多易周转的颗粒态碳。与之形成对比的是,小钻杨和油松林分在中层土壤中以MAOC为主。小钻杨人工林矿质结合有机碳储量($MAOC_{stock}$)在20~60 cm土层相较于樟子松人工林提高了59.08%~62.55%,油松人工林$MAOC_{stock}$在20~40 cm和60~80 cm土层分别高于樟子松人工林58.77%和81.15%。这表明阔叶树种与另一针叶树种在中层土壤中更有利于形成与矿物结合紧密、周转速率较慢的稳定碳库。

P/M(POC_{stock}与$MAOC_{stock}$比值)在不同林分类型间整体差异不显著(P>0.05),见图3,但樟子松人工林在60~80 cm土层的P/M分别是PX和油松人工林的6.03倍和5.71倍,进一步印证了樟子松林分在深层土壤中更倾向于积累相对活跃的POC,而小钻杨与油松在中层土壤则更有利于形成稳定MAOC。

在垂直分布上,小钻杨人工林SOC_{stock}在不同土层之间存在显著差异(P<0.05),其中20~40 cm质量分数高于0~20 cm 70.20%,提示其碳输入和稳定过程在亚表层更为活跃。樟子松人工林和油松人工林POC_{stock}在不同土层之间存在显著差异(P<0.05),其中樟子松人工林POC_{stock}在60~80 cm分别是0~20、20~40、40~60、80~100 cm的3.09、2.33、2.24、2.41倍,油松人工



POC. 颗粒有机碳;MAOC. 矿质结合有机碳。

POC. particulate organic carbon; MAOC. mineral-associated organic carbon.

图 3　不同林分类型土壤有机碳储量特征

Fig. 3　Characteristics of soil organic carbon storage in different stand types

林 POC_{stock} 在 20~40 cm 是 0~20 cm 的 2. 12 倍。对于 $MAOC_{stock}$,小钻杨人工林和油松人工林在不同土层之间存在显著差异(P<0. 05),其中小钻杨人工林 $MAOC_{stock}$ 在 20~40 cm 高于 0~20 cm 65. 97%,油松人工林 $MAOC_{stock}$ 分别在 20~40 cm 和 60~80 cm 高于 0~20 cm 86. 96% 和 60. 14%。这些结果共同表明,不同树种通过调控碳在颗粒态和矿质结合态之间的分配以及在垂直土层中的分布,塑造了差异化的土壤碳稳定机制。

就氮有效性而言,不同林分类型间 0~20 cm 表层土壤无机氮质量分数及相关转化速率均未表现出显著差异(P>0. 05),见图 4,说明在当前发育阶段,树种更主要地通过改变碳库性质和碳在养分中配比,而非显著改变无机氮供给水平来调控土壤过程。

2. 2　不同林分类型土壤生物学特征

土壤胞外酶活性在一定程度上反映了微生物对底物限制和养分需求。不同林分类型间多酚氧化酶(polyphenol oxidase,POX)和酸性磷酸酶(acid phosphatase,AP)活性差异不显著(P>0. 05),表明褐腐/白腐相关酶系和磷获取酶在 3 种人工林中维持了相近的基线水平,见图 5。然而与碳和氮循环直接相关的几类酶对树种类型表现出明显响应。小钻杨人工林土壤 β-葡萄糖苷酶(β-glucasidase,BG)活性分别高于樟子松人工林和油松人工林 78. 17% 和 89. 02%,差异显著(P<0. 05),说明小钻杨林分中碳水化合物降解过程更为活跃,有利于促进可溶性碳的释放和周转。

相反,樟子松林分在纤维素及难降解有机质的分解方面更具优势,樟子松人工林土壤纤维素水解酶(cello biose hydrolase,CBH)活性是小钻杨人工林的 2. 00 倍,差异显著(P<0. 05),樟子松人工林土壤过氧化物酶(peroxidase,PER)活性分别是小钻杨人工林和油松人工林的 1. 58 倍和 2. 01 倍,差异显著(P<0. 05),这可能与针叶凋落物木质素含量高、分解难度大有关,从而诱导了更高水平的纤维素水解酶和过氧化物酶活性。与此同时,小钻杨人工林土壤乙酰氨基葡萄糖苷酶(N-acetyl glucosaminidase,NAG)活性是樟子松人工林的 2. 16 倍,差异显著(P<0. 05),表明其氮获取尤其是几丁质等含氮底物的分解更为强烈,有利于相对富碳环境下缓解氮限制。

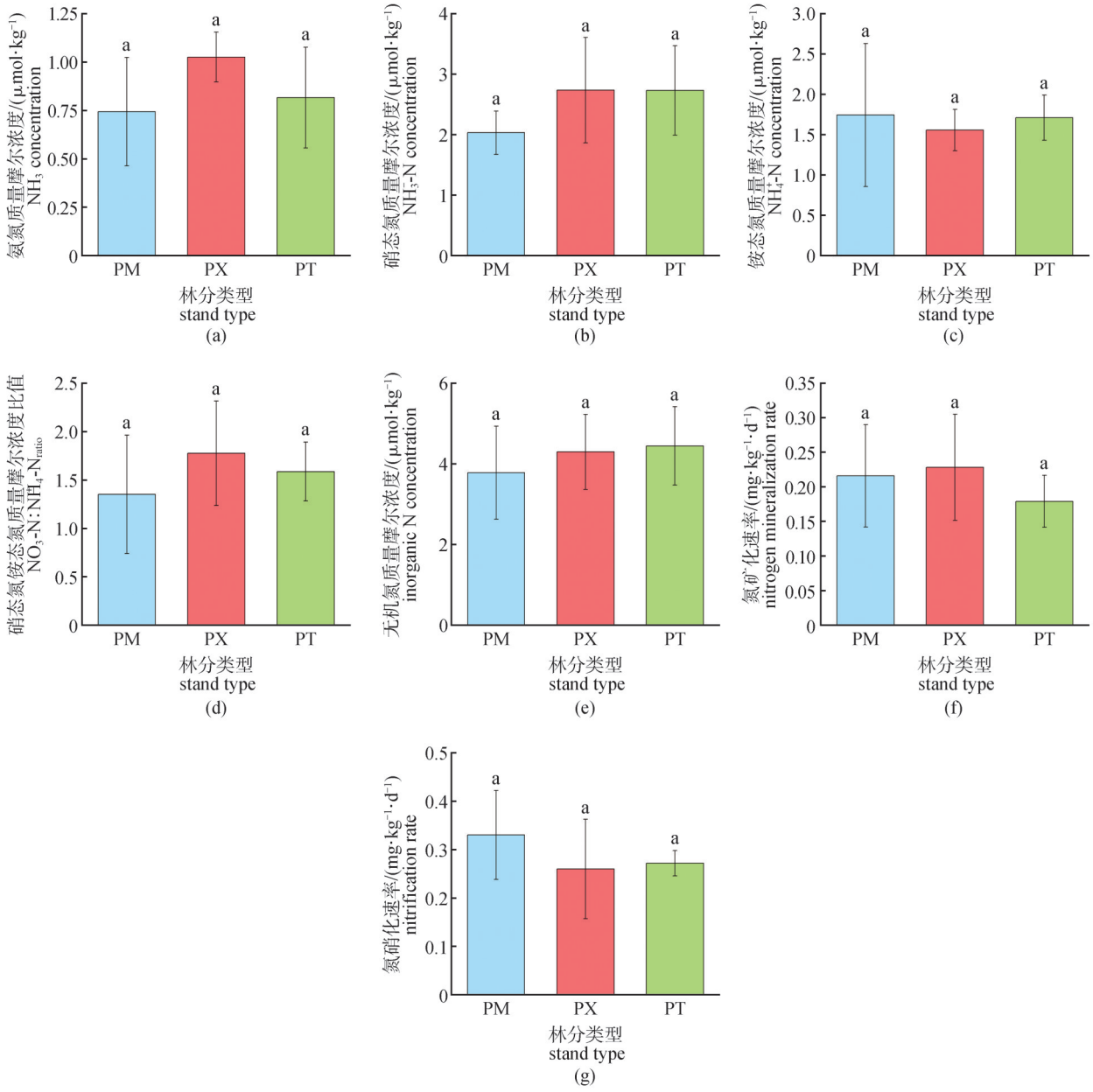


图 4 不同林分类型表层土壤(0~20 cm)氮有效性和转化速率特征

Fig. 4 Characteristics of surface soil (0–20 cm) nitrogen availability and transformation rates in different stand types

微生物群落数量与结构是反映土壤生物学特征的另一重要维度,见图6。总体来看,不同林分类型间土壤真菌(fungi,F)生物量、丛枝菌根真菌(arbuscular mycorrhizal fungi, AMF)生物量、革兰氏阳性菌(gram-positive bacteria,简写为G+)生物量、放线菌(actinomycetes)生物量和真菌与细菌比值(F∶B)均无显著差异(P>0.05),说明3种人工林在真菌-细菌功能平衡及AMF共生潜力方面整体相近。

革兰氏阴性菌(gram-negative bacteria)简写为G-,然而,细菌群落总量及G-细菌对林分类型较为敏感。小钻杨人工林细菌(bacterial)生物量高于樟子松42.30%,差异显著(P<0.05),小钻杨人工林G-生物量分别高于樟子松和油松人工林69.55%和61.47%,差异显著(P<0.05),小钻杨人工林总磷脂脂肪酸(total phospholipid fatty acids, PLFAs)高于樟子松人工林60.17%,差异显著(P<0.05)。这些结果表明,小钻杨林分有利于维持更高水平的细菌活性,特别是与可溶性碳利用密切相关的G-细菌,从而与其较高的BG活性和SOC水平相呼应。

对比可知革兰氏阴性菌比值(简写为G+/G-)分别

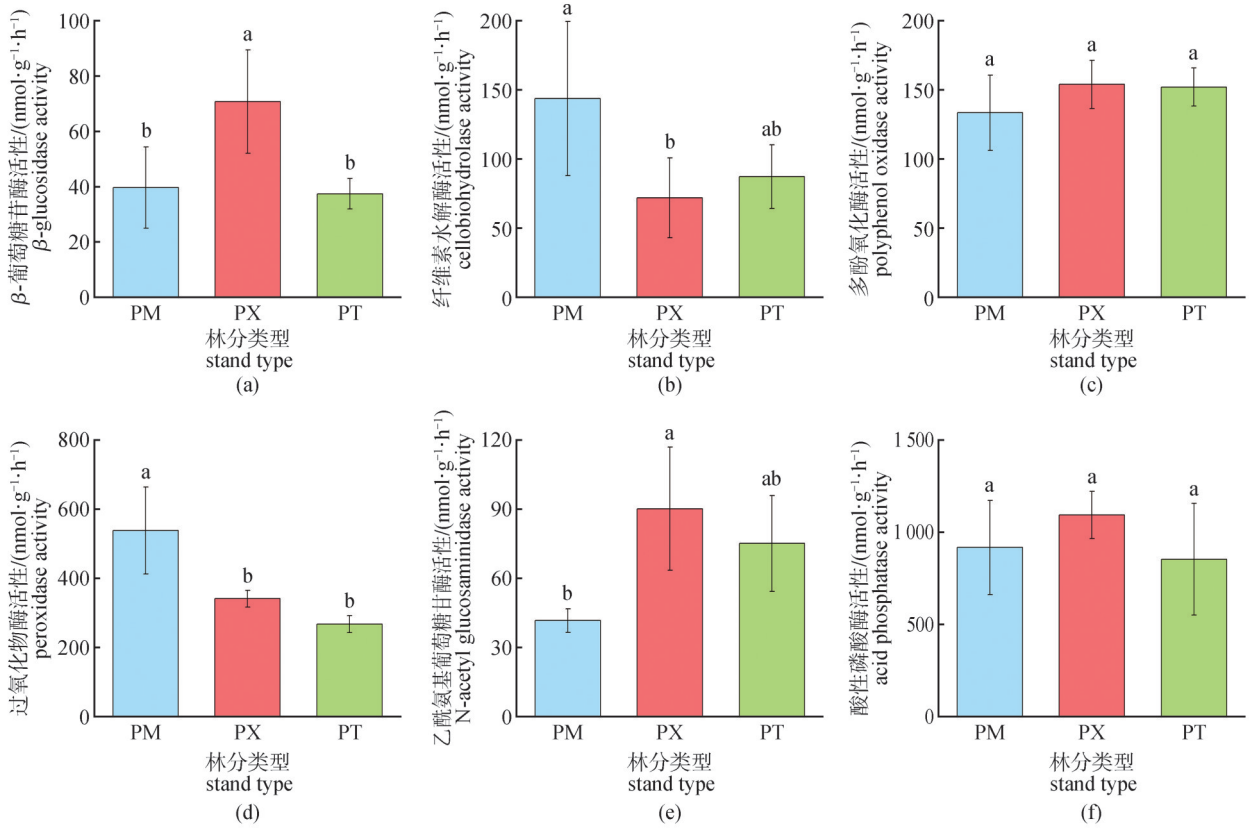


图 5　不同林分类型表层土壤(0~20 cm)胞外酶活性特征

Fig. 5 Characteristics of surface soil (0−20 cm) extracellular enzyme activities in different stand types

高于小钻杨人工林 39. 25% 和 40. 19%,差异显著(P<0. 05),暗示针叶林分中更偏向于结构较稳定、对环境胁迫更具耐受性的 G+细菌集团,这与其较高的纤维素和木质素分解相关酶活性相一致,体现出针叶林在有机质分解策略上的“稳态型”特征。

2. 3　表层土壤(0~20 cm)化学与生物学性质相关性分析

相关性分析进一步揭示了土壤理化性质、生物学特征与养分化学计量之间的耦合关系,见图 7。在化学性质与养分化学计量方面,土壤 pH 与 SOC 质量分数、NH_3^-–N 质量摩尔浓度和 C∶P 呈显著正相关(P<0. 05),说明在本研究区域内,适度偏高的 pH 有利于有机碳积累和铵态氮保持,从而提高 C∶P。土壤 Ca^{2+} 质量摩尔浓度与 SOC、TN 质量分数和 C∶P、N∶P 呈显著正相关(P<0. 05),土壤 Mg^{2+} 质量摩尔浓度与 SOC、TN 质量分数和 N∶P 呈显著正相关(P<0. 05),与 C∶P 呈极显著正相关(P<0. 01),表明碱性阳离子,特别是 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 的富集,有助于促进有机碳–氮的稳定和 C、N、P 配比的优化。与此相反,土壤 K^+ 质量摩尔浓度与土壤 TP 质量分数呈极显著负相关(P<0. 01),暗示 K 与 P 之间在土壤中可能存在一定的竞争或稀释效应。土壤 Na^+ 质量摩尔浓度与土壤 NH_3^-–N 质量摩尔浓度和 C∶N 呈显著正相关(P<0. 05),与 C∶P 呈极显著正相关(P<0. 01),反映出 Na^+ 富集土壤往往伴随更高的 C∶N 和 C∶P,比值偏高可能表示相对氮、磷限制更强。

胞外酶活性与化学计量特征之间存在较为一致的趋势。土壤 BG 活性与土壤 N∶P 呈显著正相关(P<0. 05),与 C∶P 呈极显著正相关(P<0. 01),说明在 C∶P 和 N∶P 较高、潜在氮磷限制较强的土壤中,微生物倾向于增强碳水化合物降解以获取更多可用碳并维持代谢需求。土壤 POX 活性与土壤 C∶P 呈显著正相关(P<0. 05),表明在富碳环境中木质素等难降解有机物的分解被进一步激发。土壤 NAG 活性与土壤 NO_3^-–N 质量摩尔浓度呈显著正相关(P<0. 05),与 C∶P、N∶P 呈显著正相关(P<0. 05),说明当土壤 C∶P、N∶P 较高时,微生物会提高含氮底物分解能力,以补偿无机氮供给相对不足。

微生物生物量与 SOC 以及氮素形态之间的相关性进一步印证了上述耦合关系。土壤 fungi 生物量与土壤 C∶P 呈显著正相关(P<0. 05),表明在相对富碳环境下,真菌在有机质分解中的作用更加突出。土壤 bacterial、G+生物量与土壤 NO_3^-–N 质量摩尔浓度呈显著正相关(P<0. 05),与 SOC 质量分数、C∶P 呈极显著正相关

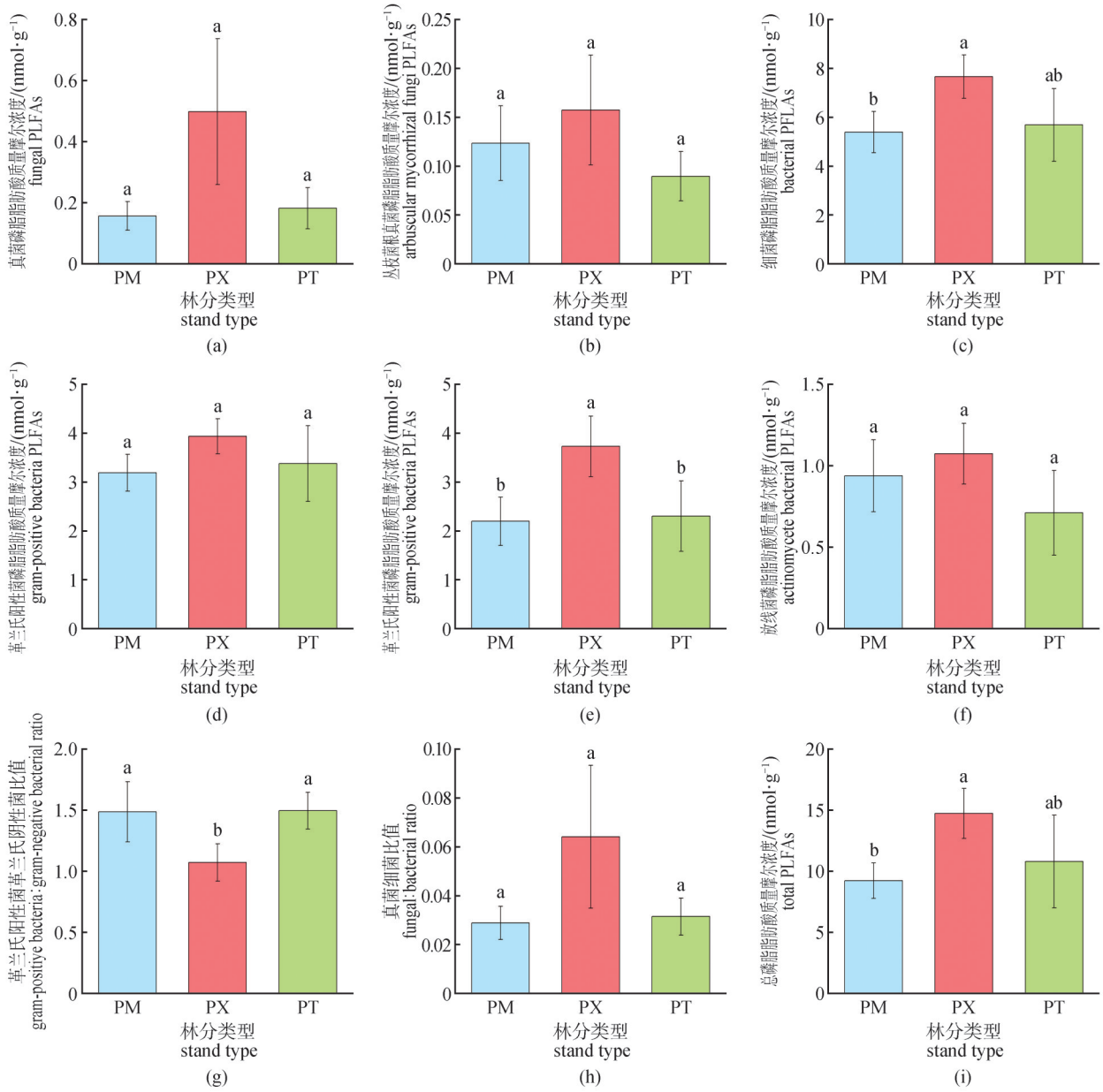


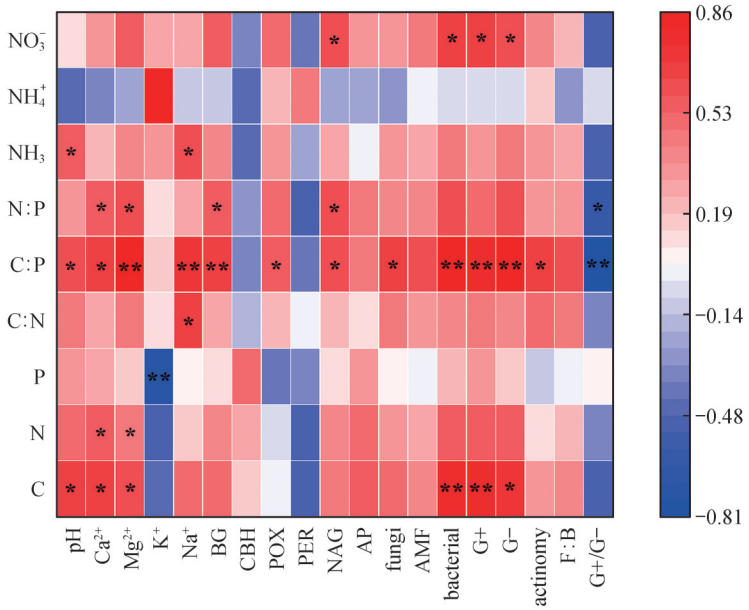
图 6 不同林分类型表层土壤(0–20 cm)微生物生物量特征

Fig. 6 Characteristics of surface soil (0–20 cm) microbial biomass in different stand types

(P<0.01),土壤G–生物量与SOC质量分数、NO_3^-–N质量摩尔浓度呈显著正相关(P<0.05),与C∶P呈极显著正相关(P<0.01),这说明无论是G+还是G–,其生物量增加均依赖于较高的有机碳水平及充足的无机氮供给,但在C∶P较高的土壤中,G–群落对碳输入的响应尤其敏感。放线菌生物量与C∶P显著正相关(P<0.05),体现其在富碳环境中对难降解有机物分解的贡献。

值得注意的是,土壤G+/G–与土壤N∶P呈显著负相关(P<0.05),与C∶P呈极显著负相关(P<0.01),即在C∶P、N∶P较高、潜在养分限制较强的土壤中,G–细菌相对优势提升,导致G+/G–下降。这与前述PX林分G–生物量较高、C∶P偏大的结果相一致,表明不同林分类型通过调控碱性阳离子蓄积、SOC形态分配以及微生物群落结构,共同塑造了表层土壤中化学与生物学过程的紧密耦合格局。

对不同林分类型林下土壤化学性质与生物学性质进行冗余分析,见图8。结果表明,土壤化学性质与土壤生物学性质之间存在显著的协变关系,前两轴累计解释量为77.84%,其中,RDA1轴解释了66.10%的变异,与Mg^{2+}(r=–0.849)和C∶P(r=–0.794)呈较强相关关系,RDA2轴解释了11.74%的变异。样本点在排序空间中分布较为离散,不同林分类型的95%置信椭圆重叠度较低(平均13.53%,最大19.50%),表明不同树种林分在土壤化学和生物学性质组合特征上存在明显差异。



*表示显著相关(P<0.05),**表示极显著相关(P<0.01)。

* indicates significant correlation(P<0.05); ** indicates highly significant correlation(P<0.01).

图 7　表层土壤(0~20 cm)化学、生物学性质和养分及其化学计量比的相关关系

Fig. 7　Correlations between chemical and biological properties, nutrients, and their stoichiometric ratios in surface soil (0–20 cm)

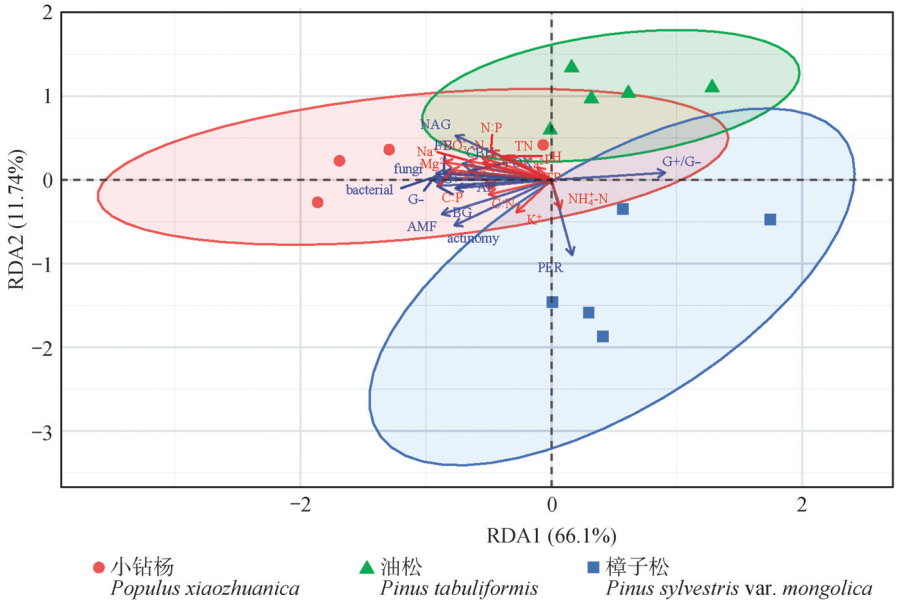


图 8　表层土壤(0~20 cm)化学与生物学性质 RDA 分析

Fig. 8　Redundancy analysis of chemical and biological properties in surface soil (0–20 cm)

3　讨论

3.1　不同林分类型土壤化学性质特征

土壤交换性阳离子质量摩尔浓度是评价土壤肥力和环境化学特性的重要指标,反映了土壤的养分保持能力和酸碱缓冲性能[21]。小钻杨人工林的土壤 Mg^{2+} 和 Na^{+} 质量摩尔浓度显著高于樟子松人工林(P<0.05)。这一差异可能与树种凋落物化学组成的差异有关,杨树凋落物富含碱基离子,其分解后释放更多可溶性盐基离子进入土壤[4]。相比之下,樟子松和油松的凋落

物富含树脂类化合物、单宁等有机酸物质，分解后产生的有机酸可能加速盐基离子的淋失[11]。此外，沙地土壤的疏松结构进一步加剧了盐基离子的迁移[10]，但杨树凋落物的快速分解特性通过微生物活动促进了这些离子的短期积累[22]。

土壤养分是维持森林生态系统生产力的关键因素，其质量分数和化学计量比直接反映了土壤的肥力状况和养分循环效率。小钻杨人工林在0~20 cm土层的SOC质量分数显著高于深层土壤(40~100 cm)(P<0.05)，表明凋落物输入对表层SOC积累有显著影响，这一结果与已有的研究结果一致，即凋落物的分解和腐殖化过程主要集中在表层土壤，相比之下，深层SOC主要依赖于根系分泌物和淋溶作用[23]，而杨树约75%的细根分布在0~30 cm土层，其根系分泌物(如有机酸、糖类)直接贡献有机碳[24]，导致深层土壤碳输入量锐减。小钻杨人工林土壤C∶P在0~20 cm土层显著高于樟子松人工林(P<0.05)，可能是因为杨树属于速生树种，其对于土壤中的磷利用策略为优先将磷分配给生长而非储存，导致土壤磷库消耗较快，剩余有机碳积累[25]。

土壤有机碳储量及其组成特征直接影响土壤质量及养分循环效率，土壤颗粒有机碳被认为是土壤活性有机碳组分中周转相对较快的一部分[26]，土壤矿物通过吸附、络合、共沉淀和物理保护等机制稳定有机碳，形成矿物结合有机碳，能够将有机碳长期封存[27]。小钻杨人工林在20~60 cm土层表现出更高的SOC_{stock}和$MAOC_{stock}$(比樟子松高53.47%~62.55%)(P<0.05)，可能与杨树凋落物相较于樟子松凋落物更易分解的特性有关。杨树凋落物含有较多的可溶性碳和低分子有机酸，通过微生物活动快速转化为小分子有机物，能够与土壤矿物颗粒发生表面络合作用，进而促进矿质-有机复合体的形成，最终转化为物理化学性质稳定的MAOC[28]。此外，小钻杨人工林土壤较高的细菌生物量(尤其是G-)和BG活性进一步促进了有机碳的矿化和矿物吸附过程[22]。小钻杨人工林表层SOC质量分数显著高于深层土壤(P<0.05)，符合凋落物输入集中于表层的规律，但20~40 cm土层SOC_{stock}反而高于0~20 cm(+70.20%)(P<0.05)，可能与深层根系分泌物、腐殖质输入及淋溶作用导致的有机质向下迁移有关[29]。樟子松人工林在深层土壤(60~100 cm)的POC_{stock}是小钻杨人工林的2.55倍，差异显著(P<0.05)，且P/M在60~80 cm土层是小钻杨人工林的4.74倍，差异显著(P<0.05)，这可能源于樟子松凋落物富含木质素和丹宁[11]，难降解物质在深层形成POC，而深层土壤微生物转化效率低导致MAOC形成受限[30]。此外，樟子松林下土壤较高的PER活性，表明其凋落物分解更依赖氧化过程，进一步延缓了碳向矿物相的转移。樟子松人工林60~80 cm土层POC_{stock}是表层的3.09倍，差异显著(P<0.05)，可能与沙地土壤结构疏松促进凋落物碎屑向下迁移有关[10]，同时干旱条件抑制了深层土壤微生物活动，导致POC滞留。油松人工林土壤$MAOC_{stock}$在20~40 cm和60~80 cm土层显著高于樟子松58.77%~81.15%(P<0.05)，但其POC_{stock}较低，可能因为油松凋落物既能提供部分易降解碳源促进MAOC形成，又因含一定树脂类物质而抑制POC的过度积累[31]。

不同林分类型并未显著影响土壤氮有效性和转化速率，可能是因为在低温或干旱条件下，微生物分解有机质和氮转化的能力显著降低，这种抑制作用可能导致不同植被类型下的净氮矿化速率差异被环境压力掩盖[32]。

3.2 不同林分类型土壤生物学特征

土壤的生物学性质是土壤的重要组分之一，能够促进土壤中的一切生化反应，能快速且准确地体现土壤的健康状况，被看成是指示土壤肥力或评估土地利用效益的重要指标[33]。土壤胞外酶作为土壤与植物系统之间的关键媒介，其来源主要涵盖土壤微生物的代谢活动及植物根系的分泌过程，是生态系统功能的关键驱动因子[34]。土壤胞外酶活性的动态变化能够有效表征土壤生物化学过程的强度与发展趋向[35]。小钻杨人工林土壤β-葡萄糖苷酶(BG)活性和乙酰氨基葡萄糖苷酶(NAG)活性显著高于樟子松人工林(P<0.05)，而CBH活性和PER活性又显著低于樟子松(P<0.05)，可能是因为杨树人工林凋落物的C∶N低，易分解有机质质量分数较丰富，刺激分泌β-葡萄糖苷酶(BG)(分解纤维二糖)和乙酰氨基葡萄糖苷酶(NAG)(降解几丁质)，低木质素、纤维素质量分数减少对过氧化物酶(peroxidase，PER)(木质素降解)和纤维素水解酶(CBH)(纤维素降解)的需求，导致其活性降低[23]。相关性分析结果显示，土壤BG和NAG活性与C∶P呈显著正相关，可能因为在高C∶P土壤环境中，微生物通过增加BG活性加速纤维素分解获取能量，同时提升NAG活性矿化几丁质获取氮源，以维持自身化学计量比平衡[36]。因此，小钻杨人工林土壤较高的C∶P也印证了林分土壤BG、NAG活性的变化。

土壤微生物通过促进团聚体形成、驱动生物固氮以及分泌促生物质等方式，在改善土壤结构、增强氮素供应和调控植物生长方面发挥着不可替代的作用[37]。小钻杨人工林土壤总微生物生物量和细菌生物量显著高于樟子松人工林(P<0.05)，小钻杨人工林G-生物量

显著高于另外两个针叶树种(P<0.05),小钻杨人工林G+/G−显著低于另外两个针叶树种(P<0.05)。这种差异可能与不同树种凋落物质量及其对微生物底物供给的影响有关。已有研究表明,杨树凋落物通常表现为木质素质量分数较低、可溶性碳比例较高,更易被微生物分解利用,从而有利于细菌生长;而樟子松等针叶树种凋落物木质素和单宁质量分数较高,分解速率较慢,可能对细菌增殖产生抑制作用[30]。此外,相关文献报道杨树根系分泌物中有机酸和可溶性碳组分相对丰富,可能为G−菌提供更易利用的碳源,从而促进其增殖[38]。同时,小钻杨人工林土壤Mg^{2+}和Na^{+}质量摩尔浓度较高,已有研究表明适宜的盐基离子水平有利于维持细菌代谢活性[39],这也可能在一定程度上促进了细菌生物量的增加。相关性分析结果显示,土壤细菌、G+、G−生物量与C∶P呈极显著正相关,G+∶G−与C∶P呈极显著负相关,可能因为在高C∶P土壤环境中,细菌通过增加生物量合成和调整细胞壁成分来平衡高碳低磷环境中的化学计量失衡,从而维持自身化学计量比平衡[40],G+菌相比G−菌因其缺乏外膜结构,在磷限制时更依赖代价高昂的有机酸分泌来获取磷,导致其在竞争中处于劣势[41]。因此,小钻杨人工林土壤较高的C∶P也印证了林分土壤细菌、G+、G−生物量及G+/G−的变化。

3.3　不同林分类型对土壤化学、生物学特征的影响机制

不同林分类型主要通过凋落物输入和根系活动的差异,塑造了独特的土壤化学环境[42]。本研究表明,3种人工林林下土壤化学性质的分异主要体现在交换性阳离子质量摩尔浓度和不同有机碳组分储量上。小钻杨作为阔叶树种,其凋落物具有低木质素、高可溶性碳和富含盐基离子等特点,其分解速率快,能快速向土壤中释放Mg^{2+}、Na^{+}等盐基离子,导致其林下表层土壤(0~20 cm)的Mg^{2+}和Na^{+}质量摩尔浓度显著高于樟子松林。此外,小钻杨作为速生树种,其对磷的吸收利用策略更为积极,导致土壤磷库消耗相对较快,加之其较高的凋落物和细根分泌物输入,共同驱动了表层土壤(0~20 cm)C∶P的升高。与之相反,樟子松的针叶凋落物富含木质素、单宁等难降解物质,分解过程缓慢,分解过程中产生的有机酸促进了盐基离子的淋失,导致其林下表层土壤(0~20 cm)的Mg^{2+}、Na^{+}质量摩尔浓度较低。樟子松凋落物的难分解特性使得其有机残体更容易以POC的形式在土壤中积累,特别是在物理迁移作用下,难分解的碎屑向深层土壤(60~100 cm)迁移,加之深层微生物活性低,转化效率差,导致其在深层土壤(60~100 cm)中的POC_{stock}显著高于小钻杨人工林。油松作为另一种针叶树种,其土壤化学性质呈现出过渡特征。其凋落物中含有的松脂酸等树脂类物质既形成物理屏障抑制了分解,其间隙中又含有可溶性糖类和有机酸,为土壤提供了部分易降解碳源[43],因此其$MAOC_{stock}$显著高于樟子松,但POC_{stock}较低。

林分类型通过改变土壤底物质量和微环境,进而调控了土壤微生物群落结构和酶活性[44]。小钻杨人工林凋落物低C∶N、低木质素等特点为微生物提供了丰富的易利用碳源,显著刺激了细菌(尤其是G−菌)的增殖,导致其表层土壤(0~20 cm)的总微生物生物量、细菌生物量和G−菌生物量均显著高于樟子松林。在酶活性方面,易分解的底物环境降低了对木质素降解酶(PER)和纤维素降解酶(CBH)的需求,但为了快速获取碳源和氮源,其BG(分解纤维二糖)和NAG(降解几丁质)的活性显著升高。樟子松人工林凋落物(高C∶N、高木质素)难分解,且含有单宁等抑菌物质,抑制了细菌的增殖。其贫瘠的底物环境需要微生物分泌更多的氧化酶和纤维素酶来分解复杂的有机物,因此其PER和CBH活性显著高于小钻杨林[45]。这种环境更有利于细胞壁结构坚韧、更耐贫瘠的G+菌生存[46],导致其G+/G−显著高于小钻杨人工林。油松人工林的土壤生物学性质同样介于二者之间,其树脂包裹的凋落物在一定程度上限制了微生物的接触,但内部可溶性物质仍能维持一定的微生物活性[31],未能形成如小钻杨人工林或樟子松人工林那样极端的生物学特征。

土壤化学与生物学性质并非独立,而是通过“林分类型−土壤化学环境−微生物群落与功能”的链条紧密耦合[47]。本研究发现,土壤C∶P是连接化学与生物学性质的关键耦合因子。相关性分析表明,土壤C∶P与BG、NAG活性以及细菌、G+、G−生物量均呈极显著正相关,与G+/G−呈极显著负相关。小钻杨人工林土壤的高C∶P环境为微生物提供了丰富的碳源,但同时也造成了磷限制。微生物通过调整其群落结构(增加细菌特别是G−菌的生物量)和功能(提升BG和NAG活性来加速获取碳和氮),以维持其自身的化学计量平衡。较高的微生物活性又进一步促进了小分子有机物的形成以及与矿物颗粒的结合,从而正向反馈于MAOC的形成与积累,解释了小钻杨林在20~60 cm土层更高的$MAOC_{stock}$。反之,樟子松人工林土壤的低C∶P环境,以及凋落物中的抑菌物质,共同抑制了细菌群落的发展,塑造了擅长降解复杂有机物的微生物群落结构和高PER、CBH活性的功能特征。这种生物学特性与难分解有机碎屑的物理迁移相结合,最终导致有机碳以POC的形式在深层土壤中封存。

综上所述，林分类型是初始驱动力，其通过凋落物输入和根系活动创建了差异化的土壤化学环境，土壤化学环境作为选择压力，进而调控了微生物的群落结构与酶活性。最终，特定的微生物功能促使了不同的土壤碳封存和生态策略，形成了小钻杨的快速周转、提升表层土壤肥力和樟子松的缓慢分解、深层土壤碳封存的差异化生态修复功能。

4 结论

通过对章古台地区19年生樟子松、油松和小钻杨人工林土壤化学、生物学性质的系统分析，揭示了不同造林树种对土壤化学与生物学特征的差异化影响机制。研究发现，在化学性质方面，小钻杨人工林土壤Mg^{2+}和Na^{+}质量摩尔浓度显著高于樟子松人工林，MA-OC_{stock}在20~60 cm土层中也显著高于樟子松人工林；而樟子松人工林则在深层土壤(60~100 cm)中表现出更强的有机质积累能力，POC_{stock}显著高于小钻杨人工林。在土壤生物学特征方面，小钻杨人工林的土壤微生物总生物量和G-生物量显著高于樟子松人工林，同时其BG和NAG活性也显著高于樟子松人工林；相比之下，樟子松人工林的CBH和PER活性更高。结果表明，小钻杨人工林相较于樟子松和油松人工林能够有效提升表层土壤肥力，而樟子松人工林在深层土壤碳封存方面更有潜力，揭示了土壤C∶P是调控沙地土壤微生物群落功能的关键因子。在生态修复中可根据目标(如短期肥力提升或长期碳封存)合理配置树种，为科尔沁沙地及其他类似生态脆弱区的生态修复提供了重要参考。

参 考 文 献

[1] 任启文，毕君，李联地，等. 冀北山地3种森林植被恢复类型对土壤质量的影响[J]. 生态环境学报，2018，27(10)：1818-1824.
Ren Qiwen，Bi Jun，Li Liandi，et al. Effects of three forest vegetation restoration types on soil quality in northern Hebei mountain area[J]. Ecology and Environmental Sciences，2018，27(10)：1818-1824.

[2] Mishra G，Marzaioli R，Giri K，et al. Soil quality assessment across different stands in tropical moist deciduous forests of Nagaland，India[J]. Journal of Forestry Research，2019，30(4)：1479-1485.

[3] Guo N，Degen A A，Deng B，et al. Changes in vegetation parameters and soil nutrients along degradation and recovery successions on alpine grasslands of the Tibetan plateau[J]. Agriculture，Ecosystems & Environment，2019，284：106593.

[4] Hobbie S E，Reich P B，Oleksyn J，et al. Tree species effects on decomposition and forest floor dynamics in a common garden[J]. Ecology，2006，87(9)：2288-2297.

[5] Lambers H，Raven J A，Shaver G R，et al. Plant nutrient-acquisition strategies change with soil age[J]. Trends in Ecology & Evolution，2007，23(2)：95-103.

[6] Kuzyakov Y，Xu X L. Competition between roots and microorganisms for nitrogen：mechanisms and ecological relevance[J]. The New phytologist，2013，198(3)：656-669.

[7] 李玉强，王旭洋，郑成卓，等. 科尔沁沙地防沙治沙实践与生态可持续修复浅议[J]. 中国沙漠，2024，44(4)：302-314.
Li Yuqiang，Wang Xuyang，Zheng Chengzhuo，et al. The practice on prevention and control of aeolian desertification and suggestion on the ecologically sustainable restoration in the Horqin Sandy Land[J]. Journal of Desert Research，2024，44(4)：302-314.

[8] 昝国盛，王翠萍，李锋，等. 第六次全国荒漠化和沙化调查主要结果及分析[J]. 林业资源管理，2023(1)：1-7.
Zan Guosheng，Wang Cuiping，Li Feng，et al. Key data results and trend analysis of the sixth national survey on desertification and sandification[J]. Forest Resources Management，2023(1)：1-7.

[9] 高亮，高永，韩彦隆，等. 不同治理措施下科尔沁沙地南缘土壤质地与持水特性研究[J]. 水土保持通报，2018，38(4)：1-6.
Gao Liang，Gao Yong，Han Yanlong，et al. Soil structure and water retention capacity in southern Horqin sandy land under different control measures[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation，2018，38(4)：1-6.

[10] Chen F S，Zeng D H，Fahey J T，et al. Organic carbon in soil physical fractions under different-aged plantations of Mongolian pine in semi-arid region of Northeast China[J]. Applied Soil Ecology，2010，44(1)：42-48.

[11] 陶佳，雷泽勇，王国晨，等. 沙地樟子松人工林叶凋落物的分解与养分释放[J]. 干旱区资源与环境，2023，37(12)：131-139.
Tao Jia，Lei Zeyong，Wang Guochen，et al. Decomposition and nutrient release of leaf litter in *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantations[J]. Journal of arid land resources and environment，2023，37(12)：131-139.

[12] 于东伟，雷泽勇，张岩松，等. 沙地樟子松人工林的生长对土壤氮变化的影响[J]. 干旱区资源与环境，2020，34(6)：179-186.
Yu Dongwei，Lei Zeyong，Zhang Yansong，et al. Effects of the growth of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantation on soil nitrogen change in sandy land[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment，2020，34(6)：

179-186.

[13] 鲁如坤,土壤农业化学分析方法[M]. 北京:中国农业科学技术出版社,2000.
Lu Rukun. Analytical methods for soil and argo-chemistry [M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000.

[14] 冯奥哲,孔涛,孙溥璠,等. 沙地不同密度樟子松人工林土壤矿化氮质量分数与矿化特征[J]. 东北林业大学学报,2021,49(10):96-103.
Feng Aozhe, Kong Tao, Sun Pufan, et al. Soil mineralized nitrogen content and mineralization characteristics of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantations with different densities in sandy land[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2021, 49(10): 96-103.

[15] Cambardella C A, Elliott E T. Particulate soil organic-matter changes across a grassland cultivation sequence [J]. Soil Science Society of America Journal, 1992, 56 (3): 777-783.

[16] Dong Y, Yang J L, Zhao X R, et al. Contribution of different proton sources to the acidification of red soil with maize cropping in subtropical China[J]. Geoderma, 2021, 392: 114995.

[17] 殷陶刚,李玉泽. 土壤酶活性影响因素及测定方法的研究进展[J]. 矿产勘查,2019,10(6):1523-1528.
Yin Taogang, Li Yuze. Research progress on factors affecting soil enzyme activity and its determination methods [J]. Mineral Exploration, 2019, 10(6): 1523-1528.

[18] 周礼恺,张志明. 土壤酶活性的测定方法[J]. 土壤通报,1980(5):37-38,49.
Zhou Likai, Zhang Zhiming. Determination method of soil enzyme activity[J]. Chinese Journal of Soil Science, 1980 (5): 37-38, 49.

[19] 颜慧,蔡祖聪,钟文辉. 磷脂脂肪酸分析方法及其在土壤微生物多样性研究中的应用[J]. 土壤学报,2006 (5):851-859.
Yan H, Cai Z C, Zhong W H. PLFA analysis and its applications in the study of soil microbial diversity [J]. Acta Pedologica Sinica, 2006(5): 851-859.

[20] Norman J S, Barrett J E. Substrate availability drives spatial patterns in richness of ammonia-oxidizing bacteria and archaea in temperate forest soils[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2016, 94: 169-172.

[21] Brady N C, Weil R R. The nature and properties of soils [M]. 14th ed. Upper Saddle River, USA: Pearson Prentice Hall, 2008.

[22] Bhatnagar M J, Peay G K, Treseder K K. Litter chemistry influences decomposition through activity of specific microbial functional guilds [J]. Ecological Monographs, 2018, 88(3): 429-444.

[23] Six J, Conant T R, Paul A E. Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturation of soils [J]. Plant and Soil, 2002, 241(2): 155-176.

[24] Bolan S N, Naidu R, Mahimairaja S, et al. Influence of low-molecular-weight organic acids on the solubilization of phosphates[J]. Biology and Fertility of Soils, 1994, 18 (4): 311-319.

[25] Rietz D N, Haynes R J. Effects of irrigation-induced salinity and sodicity on soil microbial activity[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2003, 35(6): 845-854.

[26] Samson M, Chantigny H M, Vanasse A, et al. Coarse mineral-associated organic matter is a pivotal fraction for SOM formation and is sensitive to the quality of organic inputs [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2020, 149: 107935.

[27] Kleber M, Bourg I C, Coward E K, et al. Dynamic interactions at the mineral - organic matter interface[J]. Nature Reviews Earth & Environment, 2021, 2(6): 402-421.

[28] Cotrufo F M, Ranalli G M, Haddix L M, et al. Soil carbon storage informed by particulate and mineral-associated organic matter [J]. Nature Geoscience, 2019, 12 (12): 989-994.

[29] Rumpel C, Kögel-Knabner I. Deep soil organic matter — A key but poorly understood component of terrestrial C cycle[J]. Plant and Soil, 2011, 338(1/2): 143-158.

[30] Prescott E C. Litter decomposition: what controls it and how can we alter it to sequester more carbon in forest soils?[J]. Biogeochemistry, 2010, 101(1/2/3): 133-149.

[31] Tamura M, Suseela V, Simpson M, et al. Plant litter chemistry alters the content and composition of organic carbon associated with soil mineral and aggregate fractions in invaded ecosystems [J]. Global Change Biology, 2017, 23 (10): 4002-4018.

[32] Lebauer D S, Treseder K K. Nitrogen limitation of net primary productivity in terrestrial ecosystems is globally distributed[J]. Ecology, 2008, 89(2): 371-379.

[33] 李娟,杨满元,杨宁. 紫色土不同土地利用类型的土壤质量综合评价[J]. 森林与环境学报,2024,44(6):662-672.
Li Juan, Yang Manyuan, Yang Ning. Comprehensive assessment of purple soil characteristics under different land use types [J]. Journal of Forest and Environment, 2024, 44(6): 662-672.

[34] 石亮,王凯,张日升,等. 樟子松人工林间伐宽度对土壤养分的影响[J]. 生态学杂志,2020,39(10):3203-3210.
Shi Liang, Wang Kai, Zhang Risheng, et al. Effects of thinning width on soil nutrients in *Pinus sylvestris* var. *mon-*

golica plantations[J]. Chinese Journal of Ecology, 2020, 39(10):3203-3210.

[35] Chen H, Li D J, Xiao K C, et al. Soil microbial processes and resource limitation in karst and non-karst forests[J]. Functional Ecology, 2018, 32(5):1400-1409.

[36] Sinsabaugh R L, Lauber C L, Weintraub M N, et al. Stoichiometry of soil enzyme activity at global scale[J]. Ecology Letters, 2008, 11(11):1252-1264.

[37] Netherway T, Bengtsson J, Krab E J, et al. Biotic interactions with mycorrhizal systems as extended nutrient acquisition strategies shaping forest soil communities and functions[J]. Basic and Applied Ecology, 2021, 50:25-42.

[38] Haichar Z E F, Santaella C, Heulin T, et al. Root exudates mediated interactions belowground [J]. Soil Biology & Biochemistry, 2014, 77:69-80.

[39] Fierer N, Breitbart M, Nulton J, et al. Metagenomic and small-subunit rRNA analyses reveal the genetic diversity of bacteria, archaea, fungi, and viruses in soil [J]. Applied and environmental microbiology, 2007, 73(21): 7059-7066.

[40] Fierer N, Bradford M A, Jackson R B. Toward an ecological classification of soil bacteria [J]. Ecology, 2007, 88(6):1354-1364.

[41] Bergkemper F, Schöler A, Engel M, et al. Phosphorus depletion in forest soils shapes bacterial communities towards phosphorus recycling systems [J]. Environmental microbiology, 2016, 18(8):2767.

[42] Augusto L, De Schrijver A, Vesterdal L, et al. Influences of evergreen gymnosperm and deciduous angiosperm tree species on the functioning of temperate and boreal forests [J]. Biological reviews of the Cambridge Philosophical Society, 2015, 90(2):444-466.

[43] Graça J, Pereira H. Methanolysis of bark suberins: analysis of glycerol and acid monomers [J]. Phytochemical Analysis, 2000, 11(1):45-51.

[44] Prescott C E, Grayston S J. Tree species influence on microbial communities in litter and soil: Current knowledge and research needs[J]. Forest Ecology and Management, 2013, 309:19-27.

[45] Sinsabaugh R L. Phenol oxidase, peroxidase and organic matter dynamics of soil [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2009, 42(3):391-404.

[46] Fierer N, Jackson R B. The diversity and biogeography of soil bacterial communities [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2006, 103(3):626-631.

[47] Zhou Z H, Wang C K, Luo Y Q. Effects of forest degradation on microbial communities and soil carbon cycling: A global meta-analysis [J]. Global Ecology and Biogeography, 2018, 27(1):110-124.