

樟子松人工林土壤多功能性特征及其影响因子

李丹丹¹, 赵珮杉¹, 高广磊^{1,2,3,4,5*}, 丁国栋^{1,3,4,5}, 张英^{1,3,4,5}, 任悦¹

(1 北京林业大学水土保持学院, 北京 100083; 2 林木资源高效生产全国重点实验室, 北京 100083; 3 宁夏盐池毛乌素沙地生态系统国家定位观测研究站, 盐池 751500; 4 林业生态工程教育部工程研究中心, 北京 100083; 5 水土保持国家林业和草原局重点实验室, 北京 100083)

摘要:【目的】揭示樟子松 (*Pinus sylvestris* var. *mongolica*) 人工林土壤多功能性特征及其影响因子, 为樟子松人工林可持续经营管理提供理论依据。【方法】以呼伦贝尔沙地、科尔沁沙地和毛乌素沙地樟子松人工林为研究对象, 采用野外调查和分子生物学相结合的方法, 利用 Illumina MiSeq 高通量测序分析樟子松人工林土壤真菌群落多样性, 采用均值法量化土壤多功能性并分析其影响因子。【结果】(1) 樟子松人工林土壤有机碳和水解性氮含量排序均依次为: 呼伦贝尔沙地、科尔沁沙地、毛乌素沙地, 且呈显著差异 ($P<0.05$); 毛乌素沙地土壤有效钴显著高于呼伦贝尔沙地和科尔沁沙地, 土壤有效铜、有效铁和有效锰则相反 ($P<0.05$)。樟子松人工林土壤多功能性依次排序为: 科尔沁沙地、呼伦贝尔沙地、毛乌素沙地, 且呈显著差异 ($P<0.05$)。 (2) 科尔沁沙地土壤真菌物种多样性最高, Chao 1 指数和物种丰富度指数显著高于呼伦贝尔沙地和毛乌素沙地, Shannon 指数显著高于毛乌素沙地 ($P<0.05$); 科尔沁沙地土壤真菌系统发育多样性指数最高, 且显著高于呼伦贝尔沙地和毛乌素沙地 ($P<0.05$)。樟子松人工林土壤 pH 值依次排序为: 毛乌素沙地、呼伦贝尔沙地、科尔沁沙地, 且呈显著差异 ($P<0.05$); 毛乌素沙地土壤电导率和土壤含水率显著高于其他两个沙地 ($P<0.05$); 呼伦贝尔沙地土壤温度显著高于其他两个沙地 ($P<0.05$)。 (3) 随机森林模型显示海拔、经度、纬度、土壤 pH、土壤温度、真菌 Shannon 指数和物种丰富度是识别土壤多功能性的重要预测因子, 解释度为 83.68%; 地理空间因子对土壤因子和土壤多功能性均表现极其显著正效应 ($P<0.001$), 土壤因子对土壤多功能性表现显著负效应 ($P<0.05$), 土壤真菌多样性指数对土壤多功能性无显著影响 ($P>0.05$)。【结论】科尔沁沙地樟子松人工林土壤多功能性最高, 土壤生态系统更为稳定; 土壤真菌多样性和非生物因子共同影响樟子松人工林土壤多功能性, 但非生物因子比生物因子更为重要。研究结果有助于从生物和非生物因子角度解析樟子松人工林土壤多功能性特征, 并为合理利用和科学管理樟子松人工林生态系统提供科学依据。

关键词: 土壤多功能性; 土壤真菌多样性; 樟子松; 影响因子

Characteristics of Soil Multifunctionality and Its Influencing Factors in *Pinus sylvestris* var. *mongolica* Plantations

Abstract: 【Objective】To illuminate the soil multifunctional characteristics and its influencing factors of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantations, and provide a theoretical basis for the sustainable management of *P. sylvestris* plantations. 【Method】We sampled the soils of *P. sylvestris* plantations in the Hulunbuir, Horqin and Mu Us Desert. The diversity of soil fungal communities were identified by Illumina MiSeq high-throughput sequencing, and soil multifunctionality was calculated by the Z-score method as well as its influencing factors. 【Result】(1) Soil organic carbon and hydrolyzable nitrogen of *P. sylvestris* plantations in desert showed significant differences (Hulunbuir Desert > Horqin Desert > Mu Us Desert, $P<0.05$); soil available cobalt in the Mu Us Desert was significantly higher than that in the Hulunbuir and Horqin Desert, while the soil available copper, available iron and available manganese were opposite ($P<0.05$). The soil multifunctionality of *P. sylvestris* plantations in desert showed significant differences (Horqin Desert > Hulunbuir Desert > Mu Us Desert, $P<0.05$). (2) The species diversity of soil fungi in the Horqin Desert was the highest, and Chao 1 and species richness index were significantly higher than those in the Hulunbuir and Mu Us Desert, and Shannon index was significantly higher than that in the Mu Us Desert ($P<0.05$); The phylogenetic diversity index of soil fungi in the Horqin Desert was the highest, which was significantly higher than that in the Hulunbuir and Mu Us Desert ($P<0.05$). Soil pH of *P. sylvestris* plantations in desert showed significant differences (Hulunbuir

基金项目: 国家自然科学基金项目 (32371962)

* 通讯作者, Corresponding author. E-mail: gaoguanglei@bjfu.edu.cn

Desert> Horqin Desert> Mu Us Desert, $P<0.05$); the soil electrical conductivity and soil moisture content in the Mu Us Desert were significantly higher than those in the other two Desert ($P<0.05$); the soil temperature in Hulunbuir Desert was significantly higher than that in the other two Desert ($P<0.05$). (3) The random forest model showed that altitude, longitude, latitude, pH, soil temperature, fungal Shannon index and species richness were important predictors for identifying soil multifunctionality, with an explanation of 83.68 %. Geospatial factors had extremely significant positive effects on soil factors and soil multifunctionality ($P<0.001$), soil factors had significant negative effects on soil multifunctionality ($P<0.05$), and soil fungal diversity index had no significant effect on soil multifunctionality ($P>0.05$). 【Conclusion】 The soil multifunctionality of *P. sylvestris* plantations in the Horqin Desert is the highest, and its soil ecosystem is more stable. Soil fungal diversity and abiotic factors drive soil multifunctionality of *P. sylvestris* plantations, but abiotic factors were more important than biotic factors. This improved information will provide a better understanding of soil multifunctional characteristics and comprehensive service ability of *P. sylvestris* plantations from the perspective of biotic and abiotic factors, as well as the rational utilization and scientific management of *P. sylvestris* plantations ecosystem.

Key words: soil multifunctionality; soil fungi diversity; *Pinus sylvestris* var. *mongolica*; affecting factors

土壤多功能性 (Soil multifunctionality, SMF) 是指土壤生态系统具有同时维持多种生态系统功能和服务的能力^[1]。土壤多功能性是生态系统多功能性的重要指标之一, 有利于评估环境因子的共同驱动效应, 可为生态系统功能和服务提供综合理解^[2]。目前, 荒漠生态系统存在物种多样性低、生态环境脆弱及可持续性发展差等问题, 其土壤生态系统功能和服务的稳定发挥面临严峻挑战^[3]。此外, 土壤生态系统功能的执行受生物和非生物因子共同影响, 土壤多功能性研究比单一的土壤功能更具有代表性^[4]。因此, 解析土壤多功能性特征及与环境因子的相关关系, 对维持荒漠土壤多功能性稳定意义重大。

土壤微生物群落是地球上种类最多样化、分布最广泛和数量最丰富的生物群落, 参与了养分循环、有机物分解和生态修复等基本功能, 对维持生态系统的稳定至关重要^[5]。其中, 土壤真菌作为荒漠生态系统的主要分解者, 是评价土壤生态状况的重要生物指标。土壤真菌因其具有复杂的物种多样性, 可以通过改变资源分配、养分供应和减轻环境胁迫等多种方式支持土壤生态系统多功能性; 同时在亲缘关系和进化角度上, 真菌谱系多样性是预测土壤生态系统功能的重要指标^[6-7]。此外, 土壤功能还受地理空间因子 (经纬度、海拔高度等) 和土壤因子 (pH、温度等) 等非生物因素直接或间接调控。温度因子在纬度梯度上的变化影响着土壤有机质的分解和矿化作用, 进而影响土壤养分供应和资源分配, 从而改变土壤多功能性; 同时土壤 pH、温度等非生物因子也能改变土壤微生物群落结构, 进而影响土壤生态系统功能间的耦合关系, 导致土壤多功能性抵抗力产生差异^[8-10]。因此, 阐明土壤真菌群落多样性和非生物影响因子对土壤多功能性的调节作用, 对深入理解土壤多功能性对环境变化的响应具有重要意义。

荒漠森林生态系统作为维持绿洲可持续发展的重要生态屏障, 具有调节气候、防风固沙及维持荒漠区生态平衡的重要功能^[11]。樟子松 (*Pinus sylvestris* var. *mongolica*) 具有较强适应性和抗逆性等优点, 是维持我国北方生态系统稳定的重要固沙造林树种^[12]。樟子松人工林在“三北”地区生态安全建设占有重要地位, 遏制其退化与加快修复对构建我国北方生态安全屏障具有重要意义^[13]。目前, 土壤真菌多样性已被证实是生态系统多功能性的直接驱动因素^[14]。但我们对不同沙地樟子松人工林土壤多功能性的差异, 以及土壤真菌多样性和其他环境因子对土壤多功能性的相对重要性的认识还不明确。鉴于此, 本研究以呼伦贝尔沙地、科尔沁沙地和毛乌素沙地樟子松人工林为研究对象, 分析不同沙地樟子松人工林土壤多功能性特征, 并揭示生物和非生物环境因子对土壤多功能性的影响。预期结果不仅有助于深入理解环境因子对土壤生态系统功能的调控机制, 还将为樟子松人工林生态系统评估和管理提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区分别位于内蒙古海拉尔国家森林公园, 地处呼伦贝尔沙地东南部, 属中温带半湿润大陆性季风气候

候；辽宁省阜新市彰武县的章古台沙地国家森林公园，地处科尔沁沙地的东南部，属中温带亚湿润大陆性季风气候；陕西榆林红石峡沙地植物园，地处毛乌素沙地东南部，属暖温带大陆性季风气候区（表 1）。

表 1 樟子松人工林基本信息

Table 1 The basic information of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantations

样地 Plots	纬度 Latitude/°N	经度 Longitude/°E	林龄 Age/a	平均树高 Average height t/m	平均胸径 A verage DB H/cm	优势灌草 Dominant shrub
HB	48°12'28"~49° 12'46"	119°35'22"~1 19°39'6"	HBh	27	5.94±0.89	13.57±1.25
			HBn	38	8.46±1.22	21.68±1.67
			HBm	47	10.97±1.45	27.04±1.78
HQ	42°41'27"~ 42°42'32"	122°29'23"~12 2°32'51	HQh	26	6.19±1.01	12.74±1.43
			HQn	39	10.05±0.99	15.82±1.39
			HQm	48	11.94±1.33	23.56±2.01
			Muh	26	9.13±1.04	13.56±1.57
MU	38°20'27"	109°42'44"	Mun	36	13.89±1.71	19.05±1.67
			Mum	47	16.46±1.35	24.53±2.23

HB：呼伦贝尔沙地，HQ：科尔沁沙地，MU：毛乌素沙地；h：中龄林，n：近熟林，m：成熟林，下同。

1.2 土壤样品采集与处理

2022 年 7 月，以呼伦贝尔沙地、科尔沁沙地和毛乌素沙地樟子松人工林为研究区。每个研究区内分别选取三个不同林龄的样地，每个样地分别布设 5 块 20 m×20 m 试验样方，并对樟子松人工林进行每木检尺（表 1）。随机选取每块样方内间隔 10 m 以上的 3 株标准木为采样对象，并在采样前用铲子去除地表覆盖物。土壤样本采集深度为 0-20 cm，同时去除其他植物杂质。将同一样方的 3 株标准木土壤样品充分混合，混合后的土壤样品分别装入塑料袋中并标注标号，一共采集 45 个样品（3 个研究区×3 个样地×5 个混合样品）。采集的土壤样本放置于-4 °C 便携保温盒中，带回实验室后放入-80 °C 冰箱中保存，用于后续样品处理。

1.3 气象数据获取和土壤理化性质测定

在中国气象科学数据中心（<http://data.cma.cn>）对气象数据进行收集，时间范围为 2007~2021 年，主要指标包括：年平均温度（Mean Annual Temperature, MAT）、年平均降水量（Mean Annual Precipitation, MAP）、年平均最高气温（Mean Annual Maximum Temperature, MAMT）、年平均最低气温（Mean Annual Minimum Temperature, MANT）和年平均相对湿度（Mean Annual Relative Humidity, MARH）。土壤样品风干、过筛后进行理化性质测定（表 2）。

表 2 土壤理化性质测量方法

Table 2 Measurement methods of soil physical and chemical properties

指标类型 Index type	具体指标 Specific index	测定方法 Assay method
土壤因子 Soil factors	pH	玻璃电极法 Glass electrode method
	土壤含水量 Soil water content	重量法 Gravimetric method
	土壤温度 Soil temperature	热阻法 Thermal resistance method
	土壤电导率 Soil electric conductivity	电导法 Conductance method
碳循环 Carbon cycle	有机碳 Organic carbon	重铬酸钾稀释热法 Potassium dichromate dilution heat method

	转化酶	分光光度终点反应法
	Invertase	Spectrophotometric endpoint reaction method
	纤维素酶	二硝基水杨酸比色法
	Cellulase	Dinitrosalicylic acid colorimetry
	全氮	硫酸-高氯酸消煮-靛酚蓝比色法
	Total nitrogen	Sulphate-perchloric acid deobiling indigophenol blue colorimetric method
氮循环	水解性氮	碱解扩散法
Nitrogen cycle	Hydrolyzable nitrogen	Alkalolytic diffusion method
	脲酶	苯酚钠-次氯酸钠比色法
	Urease	Sodium phenol-sodium hypochlorite colorimetric method
	全磷	硫酸-高氯酸消煮-钼锑抗比色法
	Total phosphorus	Sulfate-perchloric acid deboiling molybdenum-antimony resistance colorimetric method
磷循环	有效磷	碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法
Phosphorus cycle	Available phosphorus	Sodium bicarbonate extraction - molybdenum antimony resistance colorimetric method
	酸性磷酸酶	磷酸苯二钠比色法
	Acid phosphatase	Disodium phenyl phosphate colorimetric method
有效态微量元素	有效铜、有效钴、有效铁、有效锰、有效锌	二乙烯三胺五乙酸浸提-电感耦合等离子体发射光谱法
Available trace elements	Available copper, available cobalt, available iron, available manganese, available zinc	Diethylenetriamine pentaacetic acid extraction by inductively coupled plasma emission spectrometry

1.4 土壤真菌分子鉴定及多样性计算

根据 E.Z.N.A.soil ®DNA kit (Omega Bio-tek, Inc., USA) 说明书对土壤样本真菌 DNA 抽提, 经 1%琼脂糖凝胶电泳法, 使用 Nanodrop 2000 (ThermoFisher Scientific, Inc., USA) 对 DNA 质量和浓度检测。用真菌通用引物 ITS1F (5'-CTTGGTCATTTAGAGGAAGTAA-3') 和 ITS2 (5'-GCTGCGTTCTTCATCGATGC-3'), 对真菌 rDNA ITS 区段进行 PCR 扩增, 并通过北京奥维森生物技术有限公司在 Illumina MiSeq PE300 测序平台对扩增产物进行高通量测序。PCR 产物用于构建微生物多样性测序文库, 将原始序列分析结果传到 NCBI 的 SRA 数据库 (登录号 PRJNA1087156), 剔除低质量序列后, 以 97%为阈值对有效序列划分 OTU。为减少样本间因数据量不同造成的误差, 将样本序列数抽平为 24585。

土壤真菌群落 Chao 1 指数、Shannon 指数和物种丰富度 (Species richness) 借助 R 软件 “vegan” 包计算得到; Faith's 系统发育多样性指数 (Faith's phylogenetic diversity index, PD)、净种间亲缘关系指数 (Net relatedness index, NRI) 和净最近种间亲缘关系指数 (Net nearest taxa index, NTI) 借助 R 软件 “picante” 包计算得到^[15]。

1.5 土壤多功能指数计算

选取与土壤生态系统碳循环 (有机碳、转化酶、纤维素酶)、氮循环 (全氮、水解性氮、脲酶)、磷循环 (全磷、有效磷、酸性磷酸酶)、有效态微量元素 (有效铜、有效钴、有效铁、有效锰、有效锌) 相关的 14 个指标来表征土壤多功能性, 较好反映了生态系统养分循环、有机物分解和土壤生产力等多种功能^[16-18]。

对土壤功能指标分别进行 *Z-score* 标准化 (见公式 1), 再对各样地功能指标求平均值, 即为各样地的土壤多功能性指数。*Z-score* 标准化计算公式如下:

$$Z\text{-score} = \frac{F - \text{Mean}F}{SDF} \quad (1)$$

式中: *F* 表示实际测量值, *MeanF* 表示平均测量值, *SDF* 表示标准差。借助 R 软件 “multifunc” 中 “g

etFuncsMaxed”函数,采用多阈值法计算土壤多功能性。计算发现,多阈值法(最低阈值(26%)、多样性效应最大时阈值(45%)和最高阈值(94%))与均值法结果高度共线($P<0.001$)^[19–20],因此本文使用均值法计算土壤多功能性。

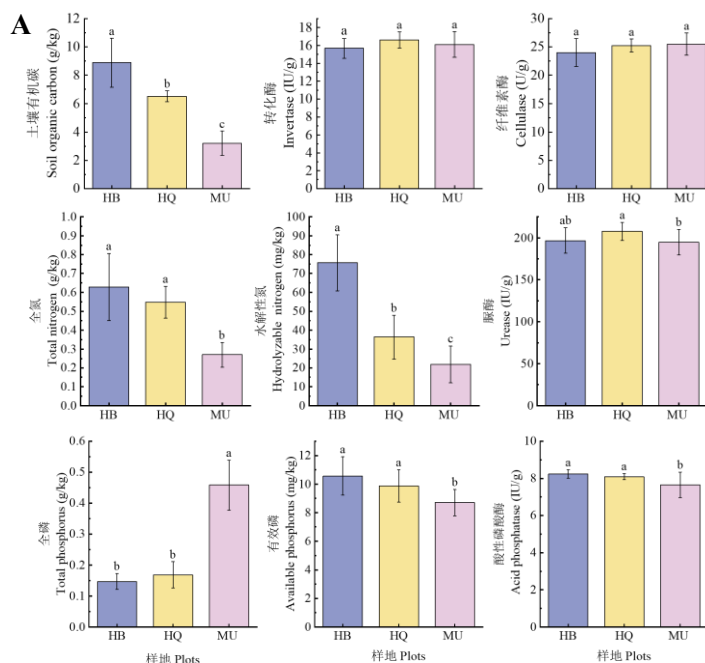
1.6 数据处理与分析

采用单因素方差分析(one-way ANOVA)中的 Least significant difference (LSD) 检验土壤真菌多样性指数和各项土壤功能指标在不同沙地樟子松人工林中的差异。使用随机森林模型对所有环境因子(气象因子、土壤因子、地理空间因子和真菌多样性指标)进行分析,确定土壤多功能性的主要预测因子。使用增加的均方误差(Increase in MSE%)展示这些因子重要性,数值越高意味因子越重要。再通过偏最小二乘路径(P LS-PM)下的结构方程模型(Structural equation model, SEM)进一步分析主要预测因子与土壤多功能性之间关系。统计均由 R 4.2.1 和 IBM SPSS 27.0 完成。

2 结果与分析

2.1 樟子松人工林土壤多功能性

碳循环指标中,樟子松人工林土壤有机碳含量排序依次为:呼伦贝尔沙地、科尔沁沙地、毛乌素沙地,且呈显著差异($P<0.05$);三个沙地土壤转化酶和纤维素酶含量无显著差异($P>0.05$)。氮循环指标中,呼伦贝尔沙地和科尔沁沙地土壤全氮显著高于毛乌素沙地($P<0.05$);土壤水解性氮含量排序依次为:呼伦贝尔沙地、科尔沁沙地、毛乌素沙地,且呈显著差异($P<0.05$);科尔沁沙地土壤脲酶显著高于毛乌素沙地($P<0.05$)。磷循环指标中,呼伦贝尔沙地和科尔沁沙地土壤有效磷和酸性磷酸酶显著高于毛乌素沙地,土壤全磷则相反($P<0.05$,图 1 A)。土壤有效微量元素中,毛乌素沙地土壤有效钴显著高于呼伦贝尔沙地和科尔沁沙地($P<0.05$),有效铜、有效铁和有效锰则相反($P<0.05$);科尔沁沙地土壤有效铜显著高于呼伦贝尔沙地($P<0.05$),其他有效微量元素在两个沙地间无显著性差异($P>0.05$)。樟子松人工林土壤多功能性大小排序依次为:科尔沁沙地、呼伦贝尔沙地、毛乌素沙地,且呈显著差异($P<0.05$,图 1 B)。



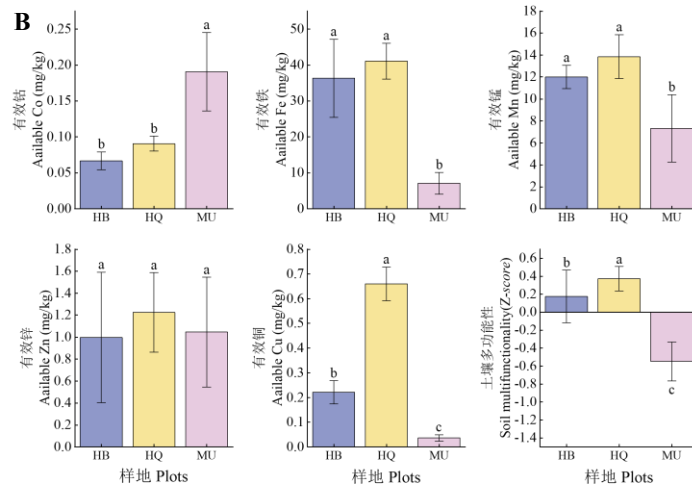


图1 樟子松人工林土壤碳、氮、磷养分指标(A)和有效微量元素含量及多功能性(B)。

Fig. 1 Soil carbon, nitrogen and phosphorus nutrient indexes(A) and content of available trace elements and multifunctionality in soil(B) of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantations.

不同字母表示沙地间存在显著差异 ($P<0.05$), 下同。

2.2 樟子松人工林土壤因子和土壤真菌多样性特征

樟子松人工林土壤 pH 值依次排序为: 毛乌素沙地、呼伦贝尔沙地、科尔沁沙地, 且呈显著差异 ($P<0.05$); 毛乌素沙地土壤电导率和土壤含水量显著高于其他两个沙地 ($P<0.05$), 呼伦贝尔沙地和科尔沁沙地间无显著差异 ($P>0.05$); 呼伦贝尔沙地土壤温度显著高于其他两个沙地 ($P<0.05$), 毛乌素沙地和科尔沁沙地间无显著差异 ($P>0.05$, 表 3)。

物种多样性中, 科尔沁沙地樟子松人工林土壤真菌物种多样性最高, 其中 Chao 1 指数和物种丰富度指数显著高于呼伦贝尔沙地和毛乌素沙地, Shannon 指数显著高于毛乌素沙地 ($P<0.05$); 呼伦贝尔沙地和毛乌素沙地物种丰富度无显著差异 ($P>0.05$, 图 2 A)。谱系多样性中, 呼伦贝尔沙地土壤真菌净种间亲缘关系指数和净最近种间亲缘关系指数最高, 且显著高于毛乌素沙地 ($P<0.05$); 科尔沁沙地土壤真菌系统发育多样性指数最高, 且显著高于其他两个沙地 ($P<0.05$, 图 2 B)。

表3 樟子松人工林土壤因子特性

Table.3 Soil factors characteristics of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantations

土壤因子 Soil factors	HB	HQ	MU
pH 值	6.74±0.16b	6.22±0.20c	7.46±0.15a
土壤含水量 (%) Soil water content	7.83±1.30b	6.57±0.03b	9.96±1.62a
土壤温度 (°C) Soil temperature	28.32±2.71a	25.69±3.65b	24.45±0.63b
土壤电导率 (mS/cm) Soil electric conductivity	0.01±0.01b	0.01±0.01b	0.02±0.1a

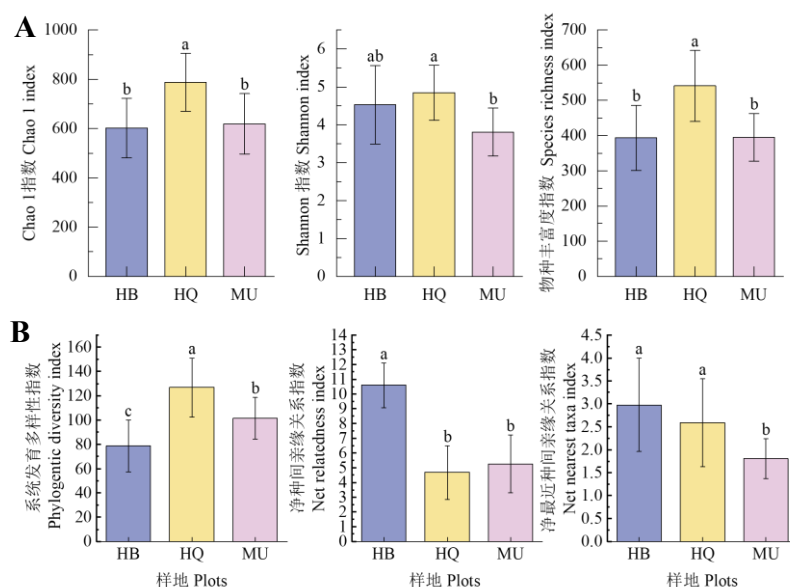


图 2 樟子松人工林土壤真菌物种多样性 (A) 和谱系多样性 (B)

Fig.2 Species diversity(A) and phylogenetic diversity(B) associated of soil fungi with *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantations

2.3 生物因子和非生物对土壤多功能性影响

随机森林模型显示地理空间因子、土壤 pH、土壤温度、土壤真菌香农指数和物种丰富度是识别樟子松人工林多功能性的重要预测因子，解释度为 83.68%，其中海拔高度为最重要的预测因子 ($P < 0.01$)。经度和纬度是识别土壤多功能性的极显著预测因子 ($P < 0.01$)，土壤 pH 和温度是识别土壤多功能性的显著预测因子 ($P < 0.05$ ，图 3)。结构方程模型显示地理空间因子对樟子松人工林土壤因子和土壤多功能性均表现极其显著正效应 ($P < 0.001$)；土壤因子对土壤多功能性表现显著负效应 ($P < 0.05$)，土壤真菌多样性指数对土壤多功能性无显著影响 ($P > 0.05$ ，图 4)。

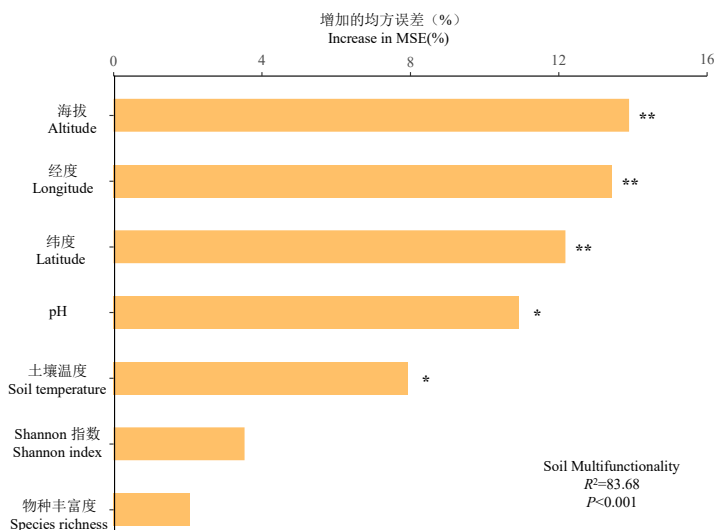


图 3 随机森林分析下樟子松人工林土壤多功能性的主要预测因子

Fig.3 Main predictors of soil multifunctionality with *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantations characterized by random forest modelling analysis.

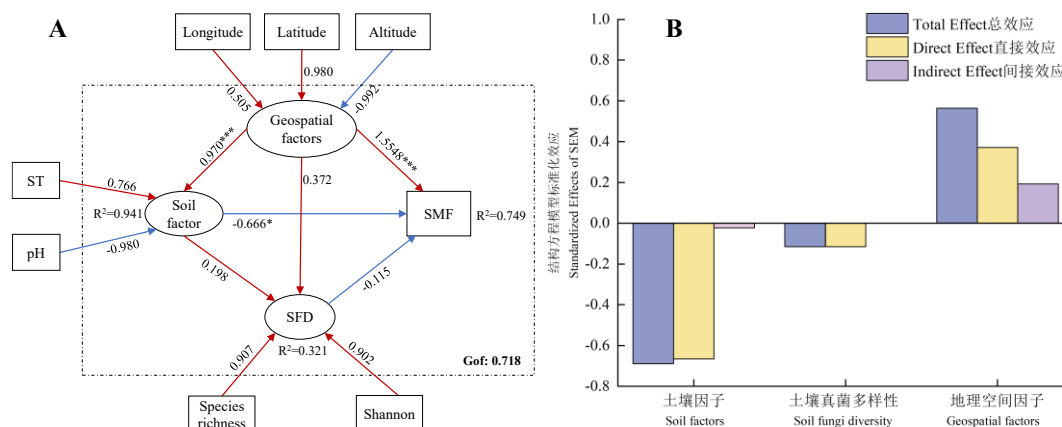


图4 偏最小二乘路径 (PLS-PM)下生物及非生物因子对樟子松人工林土壤多功能性的结构方程模型(A) 及标准化效应 (B)

Fig.4 Effects of abiotic and biotic factors on soil multifunctionality with *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantations (A) and standardized total effects (B) under partial least squares path model (PLS-PM).

*表示相关性显著, $P<0.05$; **表示相关性极显著, $P<0.01$; ***表示相关性极其显著, $P<0.001$; 红线表示正相关, 蓝线表示负相关; SFD: 土壤真菌多样性; SMF: 土壤多功能性。

3 讨论

3.1 樟子松人工林土壤多功能和土壤真菌多样性特征

土壤多功能指土壤生态系统所提供的多种功能,是评定土壤生态系统稳定的重要指标之一。碳循环指标中,呼伦贝尔沙地樟子松人工林土壤有机碳含量显著最高。土壤微生物在土壤有机碳输入,以及土壤有机质形成、稳定和分解过程中扮演着至关重要的角色^[21]。但科尔沁沙地土壤多功能性显著高于其他两个沙地,这可能是该地区土壤真菌群落在生态调节和适应环境变化方面的能力较强,有利于维持其土壤生态系统的稳定性^[22]。毛乌素沙地全氮和水解性氮均显著低于其他两个沙地,这可能与毛乌素沙地有机质含量最低有关,同时毛乌素沙地相对较低的土壤温度影响了有机质分解速率和氮素转化过程,因此导致土壤中氮素含量也较低^[23]。磷循环指标中,呼伦贝尔沙地和科尔沁沙地土壤有效磷和酸性磷酸酶显著高于毛乌素沙地,土壤全磷则相反。一方面,增加的土壤氮素含量使得土壤更容易酸化,并促进难溶性无机磷组分向易溶性无机磷转化,进而土壤有效磷含量增加^[24]。另一方面,土壤真菌是土壤-植物系统养分循环重要参与者,毛乌素沙地樟子松人工林土壤真菌对这些土壤养分更为敏感,且与有效磷含量多为正相关,因此土壤有效磷和酸性磷酸酶低于其他地区^[25]。有效态微量元素中,毛乌素沙地有效钴含量显著高于其他两个沙地,而其他有效态微量元素均较低。结果表明,土壤多功能性高低与养分循环及有效微量元素密切相关,毛乌素沙地土壤生态系统的养分利用和调节能力低于其他两个沙地,进而导致土壤多功能性最低。

科尔沁沙地樟子松人工林土壤真菌物种多样性最高,其中 Chao 1 指数和物种丰富度指数显著高于呼伦贝尔沙地和毛乌素沙地,且土壤多功能性也显著高于这两个沙地。一方面,土壤真菌通过它们的菌丝体网络形成稳定的土壤结构,有助于植物根系生长和水的渗透和保持,进而促进植物生长和土壤生态系统健康^[26]。另一方面,土壤真菌群落在物种多样性相对较高的情况下,稀有类群展现出与丰富类群不同的功能和环境响应特征,因此为群落提供广泛的功能冗余,增强其抵御环境变化的生物缓冲能力,从而可靠地维持土壤功能^[27]。同时,科尔沁沙地土壤真菌净最近种间亲缘关系指数显著低于呼伦贝尔沙地,但其土壤真菌系统发育多样性指数最高,且显著高于呼伦贝尔沙地和毛乌素沙地。这可能是因为在该地区,土壤真菌群落构建过程中,亲缘关系较近物种的竞争引发保守性状的过度发散,或者是环境对生态学上重要趋同性状进化了筛选,

结果导致土壤真菌群落呈现出向系统发育发散的趋势,但增加了土壤真菌物种共存和互作^[28—30]。另外,三个沙地土壤 pH 呈显著差异且在科尔沁沙地值最低。土壤 pH 是影响土壤真菌多样性的主要影响因子且呈负相关,表明土壤真菌更适宜在较酸的环境中生存^[31—32]。综上所述,科尔沁沙地樟子松人工林土壤真菌物种更丰富和竞争排斥作用更小,有利于稳定土壤生态系统和增强对外部环境变化抵抗能力,为林木健康生长创造更好环境条件。

3.2 樟子松人工林土壤多功能性的影响因子

土壤多功能性的差异通常不是单一环境因子造成的,而是由生物和非生物环境因子共同作用。本研究中,土壤真菌物种多样性起主导作用,同时受地理空间因子中海拔高度、经度和纬度及土壤因子中温度和 pH 等非生物因子显著影响。土壤真菌群落在有机质矿化和养分循环发挥了重要作用,是维持土壤多功能性稳定的重要预测因子^[33]。随着土壤真菌物种多样性的增加,反硝化过程也随之增加,这表明土壤真菌对森林土壤中的氮循环起着积极作用^[34]。但本研究中土壤真菌谱系多样性对土壤多功能性影响较小,这可能是没有进一步考虑特定真菌分类群造成的。微生物分类群在土壤环境中具有相同资源需求或生态位时,种群间竞争作用将促进系统发育多样性^[35]。因此将微生物分类纳入谱系多样性指标中,考虑 OTUs 相对丰度较高的谱系分类,将更有利于分析真菌谱系多样性和土壤多功能性之间的关系^[36—37]。多数研究表明,土壤真菌多样性与土壤多功能之间呈正相关关系,对促进土壤功能和维持生态系统稳定有重要作用^[14,38]。但本研究樟子松人工林土壤真菌物种多样性对土壤多功能性表现为负效应,这可能是由于非生物环境因子起主导作用导致的结果差异。土壤生态系统随着空间和时间变化呈现出明显的环境异质性,非生物环境因子直接影响微生物群落的生存机制和生态系统功能,因此真菌多样性与土壤多功能性相关性也会受到影响^[39]。

随机森林和结构方程模型分析提供了樟子松人工林土壤真菌群落多样性影响土壤多功能性的证据,但非生物因子是土壤多功能性更为重要的显著预测因子。虽然经纬度和海拔通常不被视为影响土壤多功能性的直接驱动因素,但地理环境因子的差异会导致温度、水分和 pH 等环境因素产生变化。这些环境因子差异直接影响土壤养分含量和土壤微生物的生存状态,进而导致显著土壤多功能性之间存在显著差异^[40]。另外,土壤微生物在地理上呈现明显的分布格局,其多样性与经纬度的变化有关,同时进一步研究也发现土壤微生物多样性分布格局与土壤 pH 和降水量高度相关^[41—42]。pH 直接或间接地影响土壤生态系统碳、氮等元素含量,与土壤肥力及养分循环密切相关,显著影响土壤多功能性^[43]。科尔沁沙地 pH 值最小,短期土壤酸化会对土壤生态系统多功能性产生负面影响,但其土壤多功能性最大,这可能是科尔沁沙地土壤全氮含量较高,导致土壤 pH 也相对较低^[30,44]。不同地区海拔差异较大,进而导致温度和降水等气候条件也具有较大差异。本研究中呼伦贝尔沙地土壤温度显著高于另外两个沙地,但土壤多功能性显著低于科尔沁沙地。这表明适宜的土壤温度对土壤养分循环至关重要,它不仅有利于有机物分解的迅速分解,还能减少养分的过度消耗,从而促进土壤养分的积累和增强土壤多功能性^[45]。但过高的温度会增大蒸散速率,导致土壤水分下降,进而影响微生物功能,间接地对土壤多功能性产生不利影响。综上所述,地理空间因子和土壤因子是土壤多功能性重要影响因子,且非生物因子比生物因子更为重要。

4 结论

科尔沁沙地樟子松人工林土壤真菌物种多样性和土壤多功能性最高,土壤真菌物种丰富的环境下土壤生态系统更为稳定,有利于增强对外部环境变化抵抗能力。土壤真菌多样性和非生物环境因子是识别樟子松人工林土壤多功能性的重要因子,非生物因子中地理空间因子(海拔、经度和纬度)是土壤多功能性的极显著预测因子,土壤因子(pH、温度)是土壤多功能性的显著预测因子,且非生物因子比生物因子更为重要。综上所述,研究结果对深入解析不同樟子松人工林土壤多功能性特征及其影响因子具有重要意义,有助于预测其土壤生态系统稳定性和进行科学管理。

参 考 文 献

- Manning P, van der Plas F, Soliveres S, Allan E, Maestre F T, Mace G, Whittingham M J, Fischer M. Redefining ecosystem multifunctionality. *Nature Ecology and Evolution*, 2018, 2(9): 27-436.
- 兰洁, 雷相东, 何潇, 高文强, 李玉堂. 吉林省天然阔叶混交林生态系统多功能性及驱动因素. *生态学报*, 2021, 41(13): 5128-5141.
- 贾阳阳, 秦文昊, 张涛, 冯固. 气候变化背景下丛枝菌根真菌维持荒漠生态系统稳定性研究进展. *科学通报*, 2023, 68(24): 3172-3184.
- Jing X, Sanders N J, Shi Y, He J S, Classen A T, Zhao K, Chen L T, Shi Y, Jiang Y X, He S. The links between ecosystem multifunctionality and above- and belowground biodiversity are mediated by climate. *Nature Communications*, 2015, 6: 8159.
- Locey K J, Lennon J T. Scaling laws predict global microbial diversity. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2016, 113(21): 5970-5975.
- Li J, Delgado-Baquerizo M, Wang J T, Hu H W, Cai Z J, Zhu Y N, Singh B K. Fungal richness contributes to multifunctionality in boreal forest soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 2019, 136: 107526.
- Perez-Valera E, Goberna M, Verdú M. Phylogenetic structure of soil bacterial communities predicts ecosystem functioning. *FEMS Microbiology Ecology*, 2015, 91(5): fiv031.
- 李婷, 邓强, 袁志友, 焦峰. 黄土高原纬度梯度上的植物与土壤碳、氮、磷化学计量学特征. *环境科学*, 2015, 36(8): 2988-2996.
- Ding J Y, Eldridge D J. Climate and plants regulate the spatial variation in soil multifunctionality across a climatic gradient. *Catena*, 2021, 201: 105233.
- Hu W G, Ran J Z, Dong L W, Du Q J, Ji M F, Yao S R, Sun Y, Gong C M, Hou Q Q, Gong H Y, *et al.* Aridity-driven shift in biodiversity-soil multifunctionality relationships. *Nature Communications*, 2021, 12(1): 5350.
- 曹美芹, 陈芸芝, 汪小钦, 丁金晨. 荒漠森林生态系统健康评价与分析——以塔里木河下游为例. *遥感信息*, 2021, 36(2): 72-80.
- Ren Y, Guo M S, Gao G L, Ding G D, Wang Y. Ectomycorrhizal fungi associated with *Pinus sylvestris* var. *mongolica* were altered by soil environments with aging plantation in a semi-arid desert. *Frontiers in Environmental Science*, 2022, 10: 858452.
- 路伟伟, 吴波, 白建华, 宋晓东, 时忠杰, 党宏忠, 李瀚之, 尹明宇. 樟子松人工林退化原因及研究展望. *科学通报*, 2023, 68(11): 1286-1297.
- Ma L N, Zhang C X, Xu X F, Wang C W, Liu G F, Liang C Z, Zuo X A, Wang C J, Lv Y, Wang R Z. Different facets of bacterial and fungal communities drive soil multifunctionality in grasslands spanning a 3500 km transect. *Functional Ecology*, 2022, 36(12): 3120-3133.
- Webb C O. Exploring the phylogenetic structure of ecological communities: An example for rain forest trees. *The American Naturalist*, 2000, 156(2): 145-155.
- Eldridge D J, Delgado-Baquerizo M, Quero J L, Ochoa V, Gozalo B, García-Palacios P, Escolar C, García-Gómez M, Prina A, Bowker M A, *et al.* Surface indicators are correlated with soil multifunctionality in global drylands. *Journal of Applied Ecology*, 2020, 57: 424-435.
- Eldridge D J, Delgado-Baquerizo M. Grazing reduces the capacity of Landscape Function Analysis to predict regional-scale nutrient availability or decomposition, but not total nutrient pools. *Ecological Indicators*, 2018, 90: 494-501.
- Vandendorj S, Eldridge D J, Travers S K, Delgado-Baquerizo M. Contrasting effects of aridity and grazing intensity on multiple ecosystem functions and services in Australian woodlands. *Land Degradation and Development*, 2017, 28: 2098-2108.
- Byrnes J E K, Gamfeldt L, Isbell F, Lefcheck J S, Griffin J N, Hector A, Cardinale B J, Hooper D U, Dee L E, Duffy J E. Investigating the relationship between biodiversity and ecosystem multifunctionality: challenges and solutions. *Methods in Ecology and Evolution*,

2014, 5(2): 111-124.

Delgado-Baquerizo M, Maestre F T, Reich P B, Jeffries T C, Gaitan J J, Encinar D, Berdugo M, Campbell C D, Singh B K. Microbial diversity drives multifunctionality in terrestrial ecosystems. *Nature Communications*, 2016, 7(1): 10541.

陈保冬, 付伟, 伍松林, 朱永官. 菌根真菌在陆地生态系统碳循环中的作用. *植物生态学报*, 2024, 48(1): 1-20.

李丹丹, 李佳文, 高广磊, 张英, 任悦, 柳叶, 赵珮杉. 科尔沁沙地樟子松 (*Pinus sylvestris* var. *mongolia*) 人工林土壤真菌群落结构和功能特征. *中国沙漠*, 2023, 43(4): 241-251.

Lehmann J, Kleber M. The contentious nature of soil organic matter. *Nature*, 2015, 528(7580): 60-8.

Wang R Z, Yang J J, Liu H Y, Sardans J, Zhang Y H, Wang X B, Wei C Z, Lu X T, Dijkstra F A, Jiang Y, *et al.* Nitrogen enrichment buffers phosphorus limitation by mobilizing mineral-bound soil phosphorus in grasslands. *Ecology*, 2022, 103(3): e3616.

赵珮杉, 郭米山, 高广磊, 丁国栋, 张英, 任悦. 半干旱-亚湿润干旱沙区樟子松根内真菌群落结构和功能时空动态特征. *环境科学*, 2022, 44(1): 502-511.

杨沐, 郭寰, 段国珍, 王占林, 樊光辉, 李建领. 丛枝菌根真菌在提高植物抗逆性与土壤改良中的作用与机制研究进展. *中国粉体技术*, 2024, 30(2): 164-172.

He P, Ling N, Lu X T, Zhang H Y, Wang C, Wang R Z, Wei C Z, Yao J, Wang X B, Han X G, *et al.* Contributions of abundant and rare bacteria to soil multifunctionality depend on aridity and elevation. *Applied Soil Ecology*, 2023, 188: 104881.

Webb C O, Ackerly D D, McPeck M A, Donoghue M J. Phylogenies and community ecology. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 2002, 3: 475-505.

牛红玉, 王峥峰, 练琚愉, 叶万辉, 沈浩. 群落构建研究的新进展: 进化和生态相结合的群落谱系结构研究. *生物多样性*, 2011, 19(3): 275-283.

Yang H S, Zhang Q, Koide R T, Hoeksema J D, Tang J J, Bian X M, Hu S J, Chen X. Taxonomic resolution is a determinant of biodiversity effects in arbuscular mycorrhizal fungal communities. *Journal of Ecology*, 2017, 105(1): 219-228.

王楠, 潘小承, 王传宽, 白尚斌. 模拟酸雨对毛竹阔叶林过渡带土壤真菌结构及其多样性的影响. *环境科学*, 2020, 41(5): 2476-2484.

任悦, 高广磊, 丁国栋, 张英, 赵珮杉. 毛乌素沙地樟子松人工林根内真菌群落结构与功能时间动态特征. *环境科学*, 2023, 1-5, doi: 10.13227/j.hjlx.202309131.

Delgado-Baquerizo M, Maestre F T, Reich P B, Jeffries T C, Gaitan J J, Encinar D, Berdugo M, Campbell C D, Singh B K. Microbial diversity drives multifunctionality in terrestrial ecosystems. *Nature Communications*, 2016, 7(1): 10541.

Li J, Delgado-Baquerizo M, Wang J T, Hu H W, Cai Z J, Zhu Y N, Singh B K. Fungal richness contributes to multifunctionality in boreal forest soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 2019, 136: 107526.

Gerhold P, Price J N, Püssa K, Kalamees R, Aher K, Kaasik A, Pärtel M. Functional and phylogenetic community assembly linked to changes in species diversity in a long-term resource manipulation experiment. *Journal of Vegetation Science*, 2013, 24(5): 843-852.

肖媛媛, 冯薇, 乔艳桂, 张宇清, 秦树高. 固沙灌木林地土壤微生物群落特征对土壤多功能性的影响. *生物多样性*, 2023, 31(4): 128-141.

Lankau R A, George I, Miao M. Crop performance is predicted by soil microbial diversity across phylogenetic scales. *Ecosphere*, 2022, 13(5): e4029.

Clemmensen K E, Finlay R D, Dahlberg A, Stenlid J, Wardle D A, Lindahl B D. Carbon sequestration is related to mycorrhizal fungal community shifts during long-term succession in boreal forests. *New Phytologist*, 2015, 205(4): 1525-1536.

Perez-Valera E, Goberna M, Verdú M. Phylogenetic structure of soil bacterial communities predicts ecosystem functioning. *FEMS Microbiology Ecology*, 2015, 91(5): fiv031.

- Suennemann M, Beugnon R, Breitzkreuz C, Buscot F, Cesarz S, Jones A, Lehmann A, Lochner A, Orgiazzi A, Reitz T, *et al.* Climate change and cropland management compromise soil integrity and multifunctionality. *Communications Earth Environment*, 2023, 4(1): 394.
- Li S G, Wang H, Tian P, Yao X, Sun H, Wang Q K, Delgado-Baquerizo M. Decoupled diversity patterns in bacteria and fungi across continental forest ecosystems. *Soil Biology and Biochemistry*, 2020, 144: 107763.
- Yang Y, Li T, Wang Y Q, Cheng H, Chang S X, Liang C, An S S. Negative effects of multiple global change factors on soil microbial diversity. *Soil Biology and Biochemistry*, 2021, 156: 108229.
- 张世航, 陶冶, 陈玉森, 郭浩, 陆永兴, 郭星, 刘朝红, 周晓兵, 张元明. 准噶尔荒漠土壤多功能性的空间变异特征及其驱动因素. *生物多样性*, 2022, 30(8): 140-150.
- Wei Y N, Jing X, Su F L, Li Z, Wang F W, Guo H. Does pH matter for ecosystem multifunctionality? An empirical test in a semi-arid grassland on the Loess Plateau. *Functional Ecology*, 2022, 36(7): 1729-1753.
- 张广帅, 邓浩俊, 杜锟, 林勇明, 马瑞丰, 俞伟, 王道杰, 吴承祯, 洪伟. 泥石流频发区山地不同海拔土壤化学计量特征——以云南省小江流域为例. *生态学报*, 2016, 36(3): 675-687.