



内蒙古砒砂岩地区沙棘根际和非根际土壤理化性质及真菌群落特征

孙美美, 田丽*, 乔紫薇, 张雪雅, 高泽文

榆林学院生命科学学院, 陕西 榆林 719000

孙美美, 田丽, 乔紫薇, 张雪雅, 高泽文. 内蒙古砒砂岩地区沙棘根际和非根际土壤理化性质及真菌群落特征[J]. 微生物学报, 2024, 64(6): 1747-1765.

SUN Meimei, TIAN Li, QIAO Ziwei, ZHANG Xueya, GAO Zewen. Physicochemical properties and fungal community characteristics of rhizosphere and non-rhizosphere soils of *Hippophae rhamnoides* in Pisha sandstone area of Inner Mongolia[J]. Acta Microbiologica Sinica, 2024, 64(6): 1747-1765.

摘要:【目的】以内蒙古砒砂岩区沙棘林为研究对象, 探究不同年限沙棘林根际土壤与非根际土壤的理化性质差异, 同时分析真菌群落结构差异, 并进一步探究两者之间的相互关系。【方法】在内蒙古鄂尔多斯砒砂岩区采集了不同年限沙棘林根际与非根际共计 12 个土壤样品, 采用传统土壤环境指标测定方法测定土壤理化性质, 利用高通量测序方法分析土壤真菌群落结构特征, 同时分析两者之间的相互关系。【结果】根际土壤全氮、碱解氮、速效钾、有机质和电导率显著高于非根际土壤($P<0.05$), 随着种植年限的增长, 土壤含水率显著增加($P<0.05$)。根际土壤群落丰富度和多样性整体高于非根际。子囊菌门(Ascomycota)、被孢霉门(Mortierellomycota)为共有优势菌门; 被孢霉属(Mortierella)、青霉菌属(Penicillium)、曲霉菌属(Aspergillus)为共有优势菌属。非根际真菌群落的关键类群是被孢霉属(Mortierella), 根际真菌群落的关键类群是赤霉菌属(Gibberella)。冗余分析表明, 土壤有机质是影响土壤真菌群落分布的关键因素。被孢霉属(Mortierella)与有机质、碱解氮和全钾之间具有显著相关性($P<0.05$); 赤霉菌属(Gibberella)与碱解氮、有机质和电导率之间具有显著相关性($P<0.05$)。【结论】内蒙古砒砂岩沙棘林种植提高了根际土壤养分和真菌群落的丰富度, 促进了土壤生态环境的稳定性。沙棘的种植也提高了该种植地的土壤含水率, 促进水土保持, 有助于该地区的生态恢复和建设。本研究不仅为该地区的生物多样性保护提供理论依据, 更为促进沙棘林生态恢复效果和可持续管理提供科学依据和数据支持。

关键词: 根际土壤; 沙棘林; 土壤真菌; 群落结构; 土壤理化性质

资助项目: 陕西省重点研发计划(2023-YBNY-250); 榆林学院博士科研启动基金(20GK19)

This work was supported by the Key Research and Development Program of Shaanxi Province (2023-YBNY-250) and the Doctoral Research Start-up Fund Project of Yulin University (20GK19).

*Corresponding author. E-mail: tianli820312@126.com

Received: 2023-12-30; Accepted: 2024-05-10; Published online: 2024-05-15

Physicochemical properties and fungal community characteristics of rhizosphere and non-rhizosphere soils of *Hippophae rhamnoides* in Pisha sandstone area of Inner Mongolia

SUN Meimei, TIAN Li*, QIAO Ziwei, ZHANG Xueya, GAO Zewen

College of Life Sciences, Yulin University, Yulin 719000, Shaanxi, China

Abstract: [Objective] To compare the physicochemical properties and fungal community characteristics between rhizosphere soil and non-rhizosphere soil of *Hippophae rhamnoides* growing for different years in Pisha sandstone area of Inner Mongolia. [Methods] A total of 12 rhizosphere and non-rhizosphere soil samples were collected from the Pisha sandstone area of Ordos. Chemical methods were used to analyze soil physicochemical properties, and the fungal community composition in soil was analyzed by high-throughput sequencing. The correlations between fungal community characteristics and soil properties were analyzed. [Results] Total nitrogen (TN), available nitrogen (AN), available potassium (AK), organic matter (OM), and electrical conductivity (EC) of rhizosphere soil were higher than those of non-rhizosphere soil ($P < 0.05$). Soil moisture content (SMC) increased as the planting years increased ($P < 0.05$). The fungal richness and diversity in rhizosphere soil were higher than those in non-rhizosphere. *Ascomycota* and *Mortierellomycota* were the common dominant phyla in rhizosphere soil and non-rhizosphere soil, and *Mortierella*, *Penicillium*, and *Aspergillus* were the common dominant genera. The key fungal groups in non-rhizosphere soil and rhizosphere soil were *Mortierella* and *Gibberella*, respectively. The redundancy analysis showed that OM was a key soil factor affecting the soil fungal distribution. *Mortierella* was correlated with OM, AN, and total potassium (TK) ($P < 0.05$). *Gibberella* was correlated with AN, OM, and EC ($P < 0.05$). [Conclusion] The planting of *H. rhamnoides* in Pisha sandstone area of Inner Mongolia increases the nutrients and fungal richness in the rhizosphere soil, improving the stability of the soil environment. Moreover, the cultivation of *H. rhamnoides* increases the soil moisture, improving soil and water conservation and contributing to the ecological restoration. This study provides a theoretical basis for biodiversity conservation in the study area as well as for the ecological restoration and sustainable management of *H. rhamnoides* shrubland.

Keywords: rhizosphere soil; *Hippophae rhamnoides* shrubland; soil fungi; community structure; soil physical and chemical properties

砒砂岩地区植被稀少，土地干旱，养分贫瘠，水土流失严重，治理难度极大。裸露的砒砂岩地区被誉为“世界水土流失之最”，被称为“地球环境癌症”^[1-4]。内蒙古砒砂岩地区同时遭

受水蚀与风蚀的双重侵蚀^[5]。恢复当地生态系统的有效方式是种植植被^[6]。通过多年的生态工程和植被恢复与重建，沙棘林已成为生态建设中分布和使用最广泛的树种之一^[7]。首先，

沙棘植株既耐严寒又耐干旱, 同时能够在贫瘠的土壤中生长, 具有极强的环境适应能力^[8-9]。其次, 沙棘根系发达, 具有很强的分蘖能力, 不仅繁殖速度快而且生物量很大。因此, 沙棘十分适合在水土流失严重且生态环境脆弱的地方种植, 可以帮助保持水土和生态恢复, 是砒砂岩地区具有独特优势的树种^[10]。

近年来, 根际微生物群落结构及多样性的研究逐渐成为研究重点。由于根系不仅吸收养分及水分, 同时会分泌大量物质, 根际区域又是根系生长及代谢对土壤影响最为显著的区域, 所以根际区域的土壤理化性质及微生物群落结构区别于非根际土壤^[11-13]。微生物种群之间的相互关系, 使生态系统在面对环境胁迫时表现出一定的抵抗力和稳定性^[14]。特别是干旱和半干旱等生态环境脆弱的地区, 植被的生长依赖于土壤微生物的响应^[15-16]。土壤微生物控制着土壤生态系统中的多个过程, 因此, 探究土壤微生物的组成与功能对于了解土壤微生物在生态系统中发挥的作用至关重要^[17]。土壤微生物中真菌比细菌群落拥有更多的生物标志物, 表现出更为紧密、复杂的生态网络^[18]。此外, 真菌群落对环境条件的变化非常敏感, 因此被认为是有效评估土壤质量的生物指标, 被广泛应用于监测和评估土壤生态恢复的过程^[19-20]。有研究指出, 环境因子(土壤和气象因子)对真菌群落的综合解释率为 86.6%, 其中土壤相关因素对微生物群落的影响明显高于气象因素^[21]。在喀斯特石漠化区林草间作的研究中, 土壤微生物中与土壤养分相关性更强的是真菌, 真菌群落丰富度与有机质及氮含量呈现显著相关性^[22]。此外, 土壤含水率在一定程度上会提高土壤养分含量, 进而影响土壤微生物的碳氮循环, 从而改变微生物的群落结构^[23-24]。在内蒙古不同类型草原土壤真菌及其土壤因子的研究中发现,

土壤含水率影响了真菌主要优势门的丰度, 在一定程度上改变了土壤真菌群落的结构^[25]。在降雨对黄土高原草原微生物多样性影响的研究中发现, 增加或减少降雨并不会对土壤中的细菌多样性产生影响, 但会提高真菌均匀度指数和丰富度指数, 并且改变了土壤微生物的群落结构^[26]。因此, 研究根际与非根际土壤的理化性质和真菌群落结构可以有效地揭示该生态区域种植的植被对该土壤生态环境的影响, 为该区域的生态恢复提供一些理论依据。

截至目前, 关于沙棘林的研究已有广泛的报道, 主要关注土壤水分特性^[27-29]、水土保持^[30]和土壤质量^[7,31], 而对于土壤性质与土壤微生物的耦合关系研究还比较有限。目前, 有学者关注到沙棘林土壤性质与土壤细菌群落结构的耦合关系, 例如, 在对毛乌素沙地的研究中发现, 该地区植物根际土壤细菌群落的多样性在很大程度上受到土壤 pH 和有效磷的影响^[11]。煤矿复垦区的沙棘林土壤细菌群落结构的主要影响因素是土壤 pH 和速效钾^[32]。同时, 也有学者对某些特定的真菌或细菌影响沙棘林的机理进行了研究。例如, Zhang 等^[33]研究发现, 丛枝菌真菌可以与解磷细菌互作, 活化土壤中难利用态的磷。接种丛枝菌真菌有助于缓解土壤养分对植物的限制作用, 其可以与沙棘形成良好共生关系, 促进土壤养分的活化, 为沙棘人工林提供更多的生态位^[34]。另外, 张明明等^[35]的研究表明, 弗兰克氏菌属的细菌会促进沙棘根系的固氮作用。然而, 我们对样本区沙棘林根际与非根际土壤的真菌群落结构及其与土壤因子的耦合效应知之甚少。因此, 我们选择水蚀、风蚀交错的砒砂岩区和沙棘林作为研究对象, 探究土壤微生物群落结构和多样性, 阐明土壤因子和土壤微生物之间的关系, 论证沙棘林的种植是否可以增加土壤养分含量以及有益真菌

的富集,从而改善当地的生态环境。以期为促进沙棘林生态恢复效果和可持续管理提供科学依据和数据支持。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

研究区位于内蒙古自治区鄂尔多斯市东胜区的砒砂岩丘陵沟壑区,为我国《晋陕蒙砒砂岩区十大孔兑沙棘生态减沙工程》的项目区位置,海拔 1 350–1 473 m,属温带大陆性气候;春季干旱多雨,降水集中在 7–9 月,多年平均降雨量约为 200–400 mm;多年平均气温在 5.6–7.3 °C 之间,≥10 °C 积温 2 500–3 100 °C,无霜期达 129–145 d;多年平均大风日数在 21–34 d 左右,平均风速在 2.2–4.3 m/s。土壤以栗钙土、砒砂岩为主,土壤肥力较低,不宜保持水土。植被分布主要以草本植物为主,主要植被类型是温带草原植被,这些植被群落结构简单,生态系统相对脆弱,导致土地沙化现象严重。近年来,当地政府通过人工种植沙棘林,有效改善了水土流失的状况。在种植沙棘林之前,该区域并未进行人工干预;在种植沙棘林之后,也并未对其进行施肥等处理。

1.2 试验设计及样品采集

在 2022 年 10 月,我们选取了鄂尔多斯砒砂岩区两个群落发育较为完整的、不同种植年限(9 年和 4 年)的人工沙棘林为调查样地(表 1),进行采样工作。经调查统计,两块人工沙棘林林下植物种类总共有 8 科,分别是菊科(*Asteraceae*)、

豆科(*Leguminosae*)、禾本科(*Gramineae*)、藜科(*Chenopodiaceae*)、莎草科(*Cyperaceae*)、蔷薇科(*Rosaceae*)、百合科(*Liliaceae*)和木贼科(*Equisetaceae*)。在各调查样地分别布设 3 块 10 m×10 m 的独立小区,任意两个小区之间的间距不小于 100 m。每个小区随机选取 3 株沙棘,分别收集根际土壤和非根际土壤,接着将同一小区的根际土壤混合成一个土壤样品,非根际土壤混合成一个土壤样品,最终得到了共计 12 个土壤样品。再将每一个土壤样品都分为两部分,一部分自然风干用于土壤环境因子指标的测定,另一部分保存于超低温冰箱,用于土壤真菌多样性分析。种植 4 年沙棘林的根际土壤标记为 G4,非根际土壤记为 F4;种植 9 年沙棘林的根际土壤记为 G9,非根际土壤记为 F9。

1.3 试验测定指标和方法

1.3.1 土壤理化性质分析^[36–37]

采用半微量凯氏定氮法检测土壤全氮含量(total nitrogen, TN);氢氧化钠熔融法-钼锑抗比色检测土壤全磷含量(total phosphorus, TP);氢氧化钠熔融法-火焰光度法检测土壤全钾含量(total potassium, TK);碱解扩散法检测土壤碱解氮含量(available nitrogen, AN);碳酸氢钠浸提-分光光度计法检测土壤有效磷含量(available phosphorus, AP);NH₄OAc 浸提-火焰光度法检测速效钾含量(available potassium, AK);重铬酸钾-浓硫酸外加热法检测土壤有机质含量(organic matter, OM);pH 测定仪(赛多利斯公司)检测土壤 pH;电导率仪(上海仪电科学仪器股份有限公司-雷磁)检测土壤电导率(electrical conductivity, EC);烘干法检测土壤含水率(soil moisture content, SMC)。

1.3.2 土壤真菌多样性测定

完成基因组 DNA 抽提后,利用 1%琼脂

表 1 内蒙古鄂尔多斯东胜区沙棘林样地概况
Table 1 Survey of *Hippophae rhamnoides* sample plot in Dongsheng District, Ordos, Inner Mongolia

Sample plot number	East longitude (E)	North latitude (N)	Altitude (m)
9a	109.525 983°	39.511 859°	1 461.9
4a	109.510 858°	39.533 890°	1 422.5

糖凝胶电泳检测抽提的基因组 DNA。PCR 扩增真菌 ITS1F_ITS2R 区域, 引物序列为 ITS1F (5'-CTTGGTCATTTAGAGGAAGTAA-3')和 ITS2R (5'-GCTGCGTTCT TCATCGATGC-3')。PCR 反应体系: 5×*FastPfu* Buffer 4 μL, dNTPs (2.5 mmol/L) 2 μL, 正、反向引物(5 μmol/L)各 0.8 μL, *FastPfu* Polymerase (5 U/μL) 0.4 μL, BSA 0.2 μL, Template DNA 10 ng, 补 ddH₂O 至 20 μL。PCR 反应条件: 95 °C 预变性 3 min; 95 °C 变性 30 s, 55 °C 退火 30 s, 72 °C 延伸 45 s, 35 个循环; 72 °C 延伸 10 min。PCR 仪(Bio-Rad 公司)。每样本 3 次重复。将同一样本的 PCR 产物混合后用 2% 琼脂糖凝胶电泳检测, 使用 AxyPrepDNA 凝胶回收试剂盒(Axygen 公司)切胶回收 PCR 产物, Tris-HCl 洗脱; 2% 琼脂糖电泳检测。参照电泳初步定量结果, 将 PCR 产物用蓝色荧光定量系统(Promega 公司)进行检测定量, 之后按照每个样本的测序量要求, 进行相应比例的混合。由上海美吉生物医药科技有限公司进行测序。使用 UPARSE (11)在 97% 相似度水平对所有样品的有效序列进行聚类, 使用 UNITE (8.0 真菌) ITS 数据库对操作分类单元 (operational taxonomic unit, OTU)的代表序列进行物种注释。

1.4 数据统计及分析

采用 Mothur (1.30.2)进行 α 多样性分析, 利用 R 语言(version 3.3.1)进行主坐标分析 (principal co-ordinates analysis, PCoA), 运用 Circos-0.67-7 绘制 Circos 样本与物种关系图, 使用 LEfSe 软件 all-against-all (more strict)多组比较策略进行 LEfSe 多级物种差异判别分析, 借助 R 软件(version 2.4.3)的 vegan 包进行冗余分析 (redundancy analysis, RDA)。采用 R 软件 (version 3.3.1)的 vegan 包进行方差膨胀因子分析 (variance inflation factor, VIF)。采用 R 软件

(version 3.3.1)的 pheatmap 包进行相关性 Heatmap 分析。使用 SPSS26.0 软件进行单因素方差分析 (one-way ANOVA), 使用 Waller-Duncan 法进行多重比较, 结果以均值±标准差表示。

2 结果与分析

2.1 土壤理化性质分析

TN、AN、AK、OM 含量和 EC 表现为根际土壤处理显著高于非根际土壤处理 ($P < 0.05$); 4 年生沙棘林 TN、AN、AK 和 EC 显著高于 9 年生沙棘林 ($P < 0.05$); 9 年生沙棘林 SMC 显著高于 4 年生沙棘林 ($P < 0.05$); 根际土壤与非根际土壤 SMC 无显著变化 ($P > 0.05$) (表 2)。

2.2 真菌群落丰度及多样性分析

随着测序数量的增加, 各样品稀释曲线逐渐趋于平缓, 序列数达到 35 000 后进入平台期, 由此可得, 该试验测序深度足够覆盖样品中的真菌群落结构, 测序数据量合理。真菌 ITS1 基因测序结果表明, 共获得优化序列 574 267 条, 141 456 443 bp, 平均序列长度 247 bp, 以 97% 的相似度对序列采用 USEARCH11-uparse 算法进行聚类, 共检测到 12 门 41 纲 101 目 233 科 432 属 647 种 1 532 OTUs。

由 α 多样性指数分析可知, 4 年生、9 年生根际土壤的 ACE 指数和 Chao1 指数显著高于 4 年生非根际土壤 ($P < 0.05$); 9 年生根际土壤的 Sobs 指数显著高于 4 年生非根际土壤 ($P < 0.05$); 各处理的 Shannon 指数和 Shannon's evenness 指数无显著差异 ($P > 0.05$); 覆盖度 (coverage) 均大于 99.00%, 说明测序结果能够代表样品的真实情况 (表 3)。通过 β 多样性分析可以判断各处理样品之间的差异程度, 基于 Bray-Curtis 距离的 PCoA 显示 (其中 F4 处理中 1 个样本误差较大被剔除), 土壤真菌群落基于门水平对比, 根际土壤与非根际土壤差异显著, 4 年生根际土壤与

表 2 沙棘林各处理土壤理化性质

Table 2 Soil physical and chemical characteristics of different groups of *Hippophae rhamnoides* field

Item	F4	F9	G4	G9
TN (g/kg)	0.36±0.02b	0.19±0.01d	0.47±0.01a	0.32±0.01c
TP (g/kg)	0.41±0.02ab	0.43±0.03a	0.39±0.05ab	0.35±0.01b
TK (g/kg)	17.74±1.56ab	15.75±0.41b	19.67±1.55a	19.75±0.24a
AN (mg/kg)	8.65±1.04c	7.79±0.71c	57.90±4.16a	27.39±1.47b
AP (mg/kg)	0.58±0.05b	0.72±0.13ab	0.72±0.03ab	0.90±0.10a
AK (mg/kg)	47.33±1.53b	35.33±0.58c	103.33±5.00a	43.00±2.65b
OM (g/kg)	2.18±0.40d	6.29±0.55c	11.42±0.70a	10.14±0.32b
pH	8.57±0.02c	8.87±0.01a	8.56±0.01c	8.65±0.02b
EC (μs/cm)	104.47±2.11b	48.20±2.03d	117.15±5.65a	74.00±4.56c
SMC (%)	2.88±0.10b	10.90±1.12a	2.73±0.44b	9.91±1.42a

Different lowercase letters in the same line indicated significant difference between different groups ($P<0.05$). F4: Four years non-rhizosphere; F9: Nine years non-rhizosphere; G4: Four years rhizosphere; G9: Nine years rhizosphere. The same below.

表 3 沙棘林根际与非根际土壤真菌 α 多样性分析Table 3 Alpha diversity analysis of the rhizosphere and non-rhizosphere soil fungi of *Hippophae rhamnoides*

Item	F4	F9	G4	G9
Sequences	35 848	35 848	35 848	35 848
ACE index	202.792±39.484b	390.423±160.626ab	493.567±118.710a	553.066±173.374a
Chao1 index	202.162±39.974b	392.195±160.933ab	488.060±117.839a	542.962±167.325a
Shannon index	2.730±0.428a	3.246±0.804a	3.567±0.284a	3.208±0.660a
Sobs index	198.330±39.463b	365.000±145.688ab	407.000±94.170ab	460.670±144.970a
Shannon's evenness	0.516±0.062a	0.551±0.101a	0.595±0.027a	0.523±0.082a
Coverage	99.967±0.000a	99.869±0.001ab	99.728±0.001bc	99.694±0.001c

9 年生根际土壤差异显著, 但是非根际土壤之间并无差异。能够解释真菌群落结构差异的 89.05% (图 1)。

2.3 沙棘根际与非根际土壤真菌群落组成的差异

子囊菌门 (*Ascomycota*)、被孢霉门 (*Mortierellomycota*) 和担子菌门 (*Basidiomycota*) 是门水平上的优势类群, 它们共占有所有单元分类序列的 93.84%–99.18% (图 2)。子囊菌门在根际土壤中的相对丰度比非根际土壤中的升高 (31.26%), 被孢霉门在根际土壤中的相对丰度比非根际土壤中的降低 (20.61%)。在属水平上 (图 3), 各处理真菌群落相对丰度排名前 5 的真菌分别为被孢霉属 (*Mortierella*, 4.26%–36.53%)、

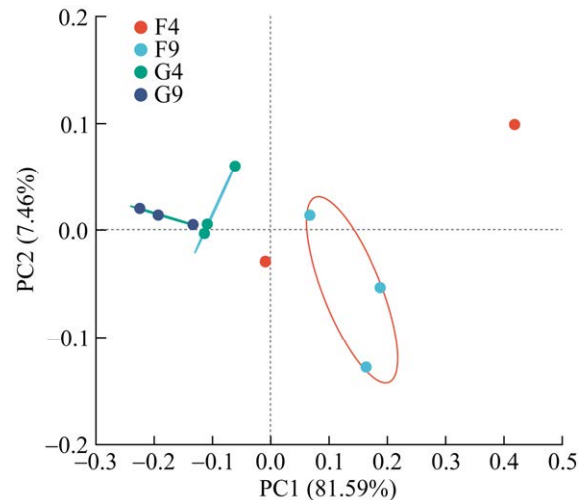


图 1 沙棘林根际与非根际土壤真菌 PCoA 分析
Figure 1 PCoA of fungal communities of the rhizosphere and non-rhizosphere soil of *Hippophae rhamnoides*.

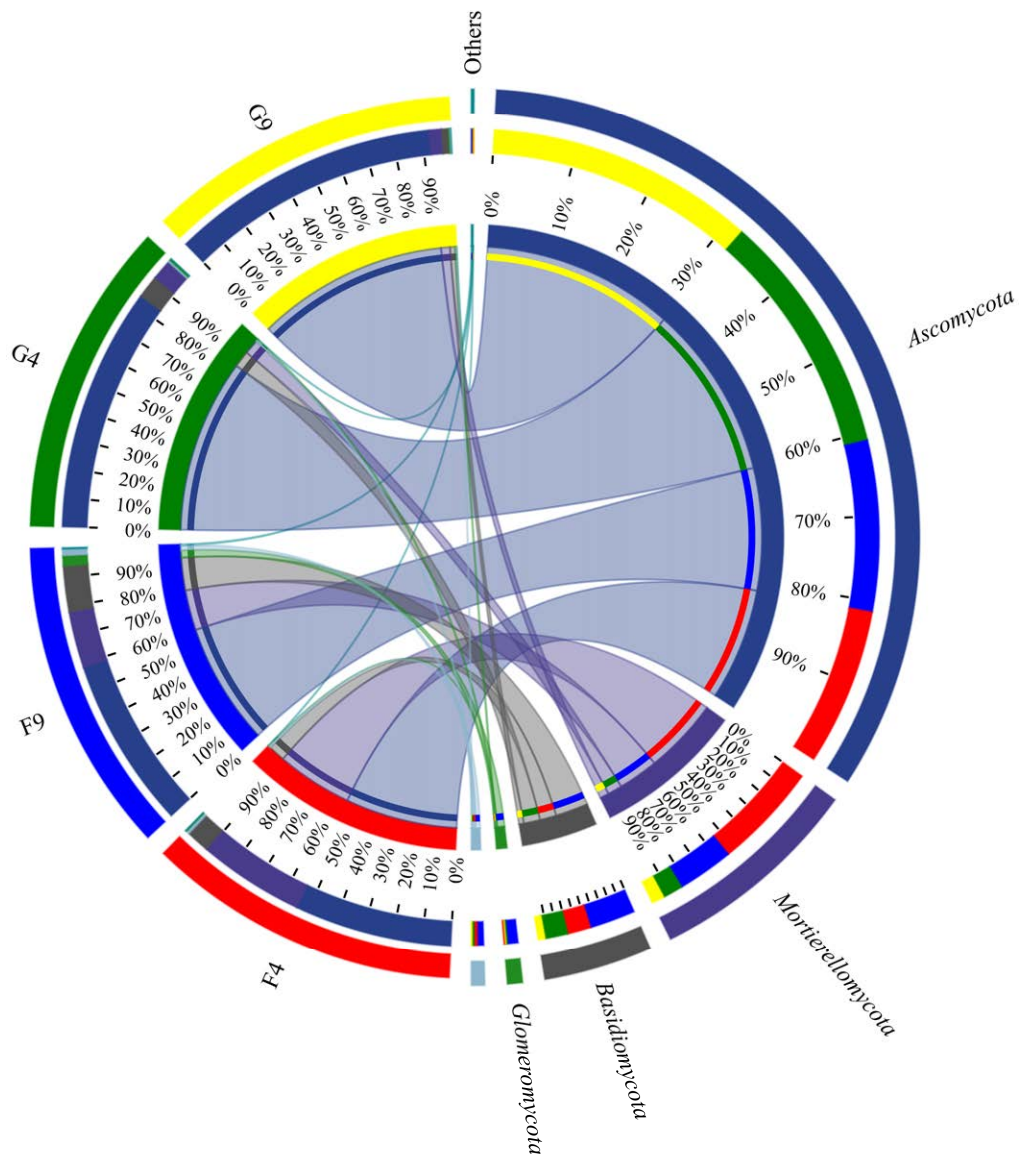


图 2 沙棘林根际与非根际土壤真菌 *Circos* 样本与物种关系图(门水平)

Figure 2 *Circos* sample and species relationship of the rhizosphere and non-rhizosphere soil fungi of *Hippophae rhamnoides* (phylum level).

青霉菌属(*Penicillium*, 10.68%–21.25%)、曲霉菌属 (*Aspergillus*, 0.31%–21.52%)、*Hygrocybe* (0.01%–12.30%) 和 赤霉菌属 (*Gibberella*, 0.51%–6.62%)。非根际土壤中被孢霉属(*Mortierella*) 和 *Hygrocybe* 的相对丰度显著高于根际土壤 ($P<0.05$)，根际土壤中的赤霉菌属(*Gibberella*) 的相对丰度显著高于非根际土壤($P<0.05$)。

LEfSe 利用线性判别分析测算物种丰度对差异效果的影响程度。通过线性判别分析(linear discriminant analysis, LDA) ($P<0.05$, $LDA>3$)，土壤真菌共有 15 个有显著差异的真菌类群，其中 F4 中含有 0 个，F9 中含有 8 个，G4 中含有 4 个，G9 中含有 3 个(图 4)。沙棘林根际土壤与非根际土壤之间共 44 个真菌分类群在统计学上差异显

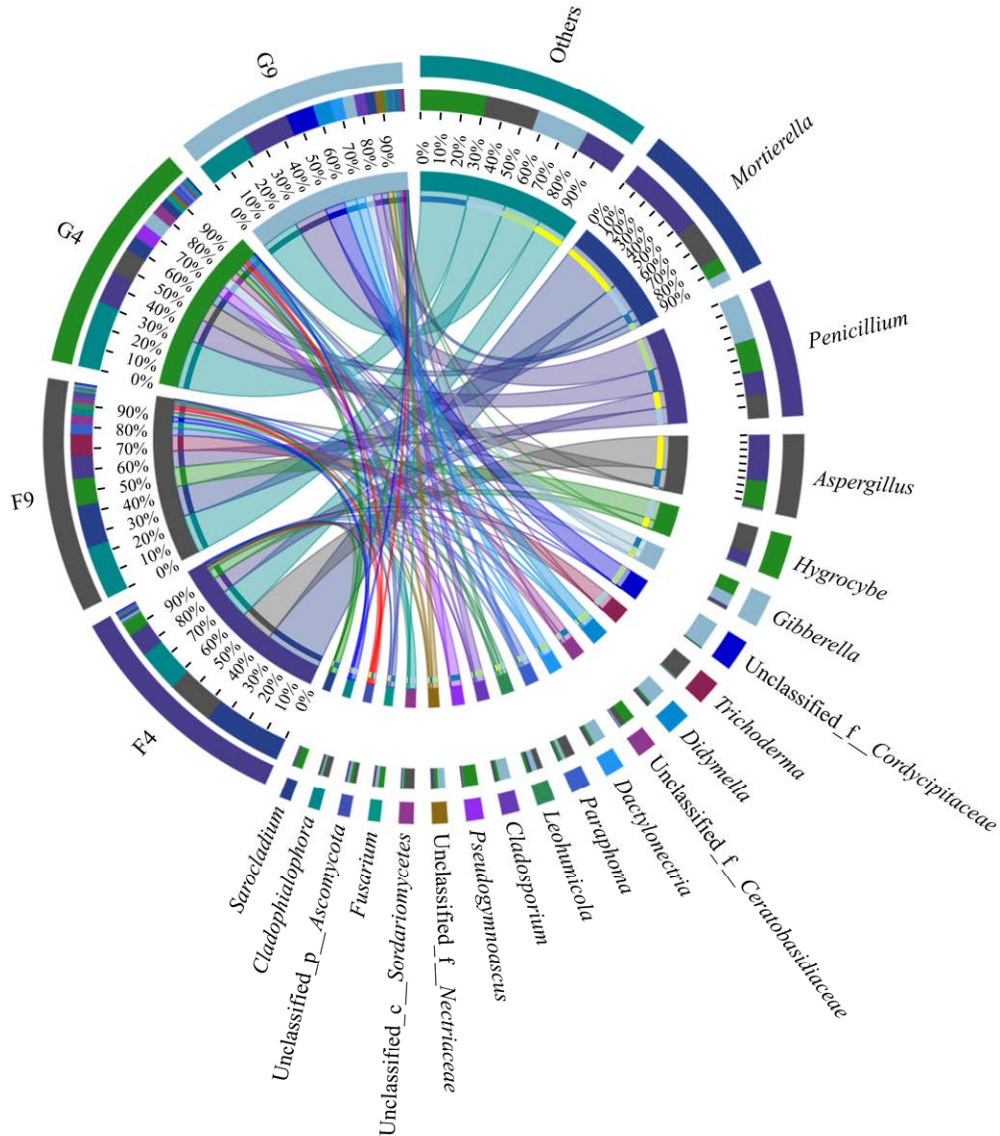


图 3 沙棘林根际与非根际土壤真菌 *Circos* 样本与物种关系图(属水平)

Figure 3 *Circos* sample and species relationship of the rhizosphere and non-rhizosphere soil fungi of *Hippophae rhamnoides* (genus level).

著($P < 0.05$, $LDA > 3$), 其中, 非根际(F)处理中被孢霉属(*Mortierella*)是真菌群落的关键类群, 根际(G)处理则为赤霉菌属(*Gibberella*) (图 5)。

2.4 土壤真菌群落结构与土壤理化因子间的关系

利用方差膨胀因子分析, 排除自相关性较大的因子(VIF 值 >10), 筛选出具有代表性的环

境因子。经过筛选的环境因子进行冗余分析, 第一轴解释率为 65.87%, 第二轴解释率为 5.12%, 累计解释率达到 70.99%, 表明图 6 可以准确地反映出土壤环境因子与土壤真菌群落的相互关系。对沙棘林根际和非根际土壤真菌群落结构具有重要影响的土壤指标为 OM ($r^2=0.7115$, $P=0.010$) (表 4)。

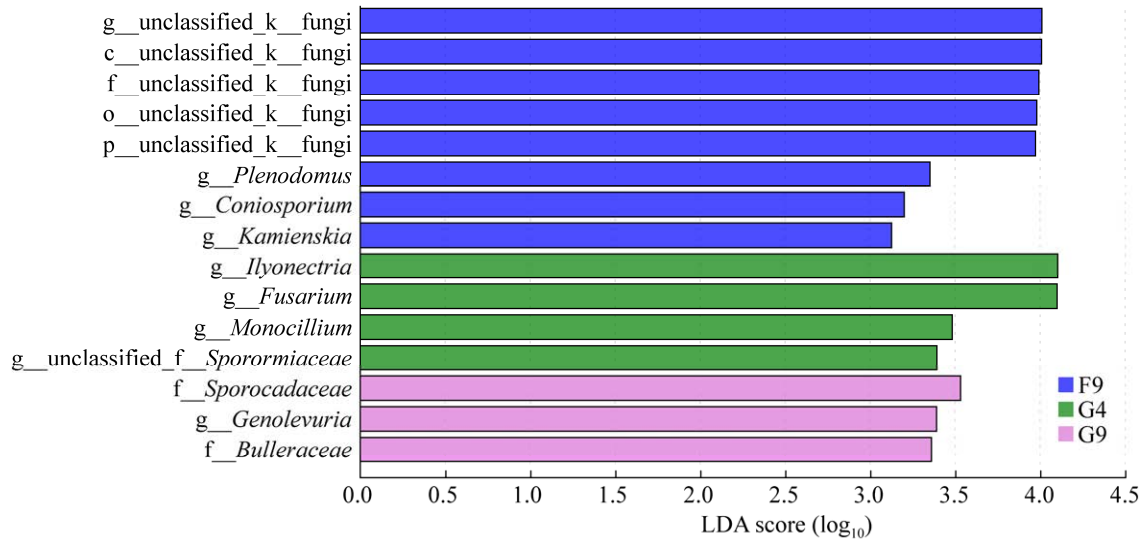


图 4 沙棘林根际与非根际土壤真菌 LDA 判别柱形图(从门到属水平)

Figure 4 LDA discriminant bar graph of the rhizosphere and non-rhizosphere soil fungi of *Hippophae rhamnoides* (from phylum to genus level).

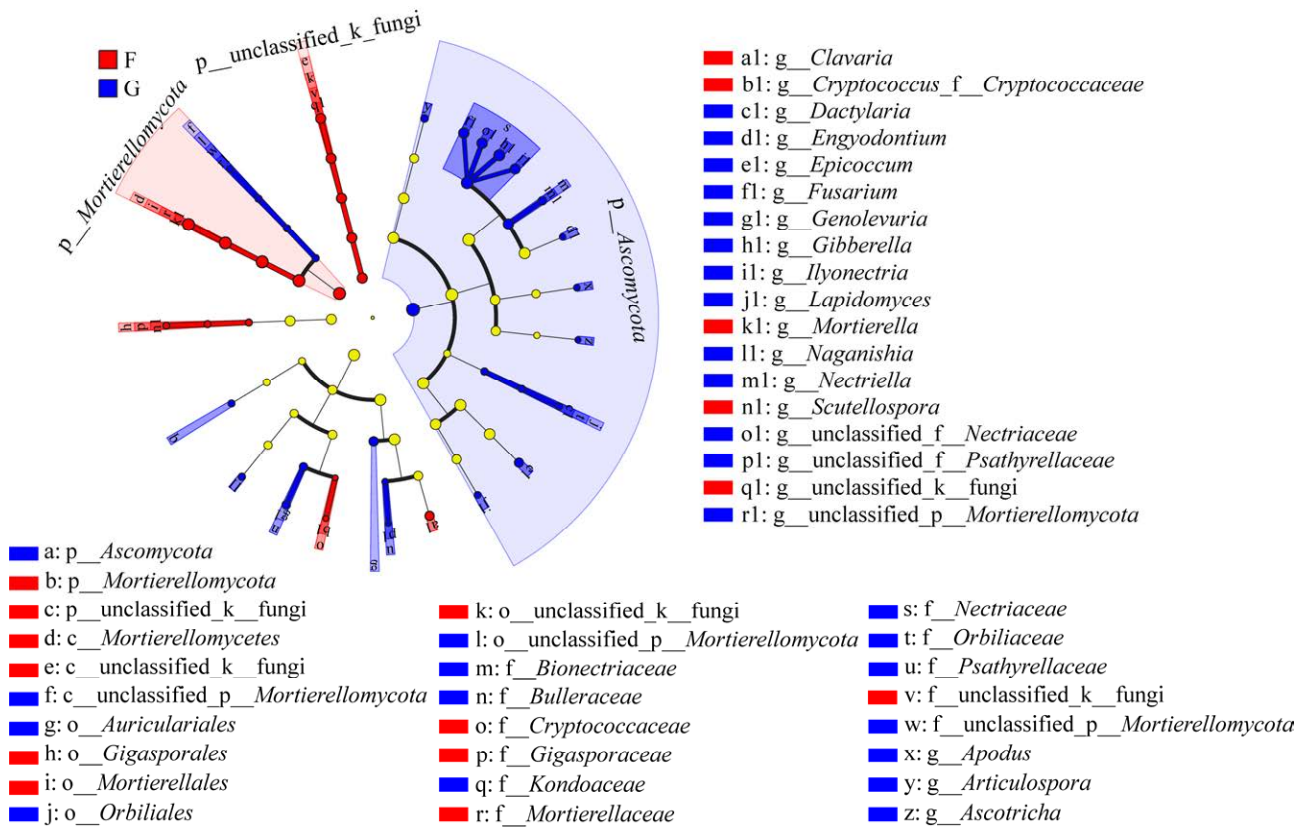


图 5 沙棘林根际与非根际土壤真菌 LEfSe 分析进化分支图(从门到属水平)

Figure 5 Evolutionary branch graph of LEfSe analysis of the rhizosphere and non-rhizosphere soil fungi of *Hippophae rhamnoides* (from phylum to genus level).

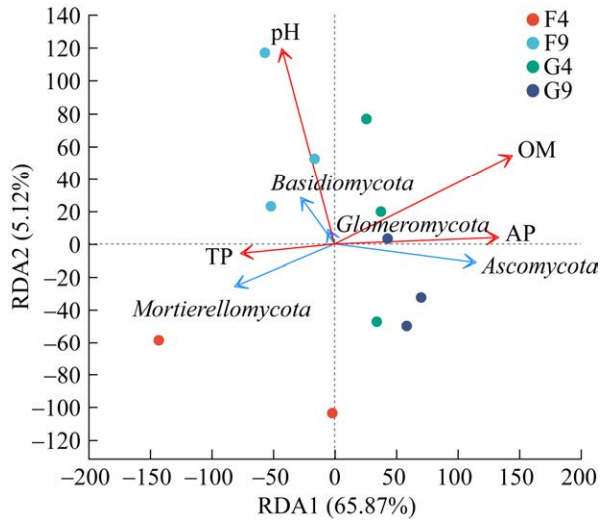


图 6 沙棘林根际与非根际土壤优势真菌门与土壤环境因子冗余分析

Figure 6 RDA of dominant fungi and soil environmental factors in rhizosphere and non-rhizosphere soils of *Hippophae rhamnoides*. The blue arrows represent fungi and the red arrows represent quantitative environmental factors.

表 4 优势真菌门与土壤环境因子 envfit 分析

Table 4 Envfit analysis of dominant fungi and soil environmental factors

Item	RDA1	RDA2	r ²	P
pH	-0.285 3	0.958 4	0.399 4	0.141
TP	-0.987 1	-0.160 2	0.160 9	0.492
AP	0.992 7	0.120 2	0.502 4	0.062
OM	0.919 4	0.393 3	0.711 5	0.010

通过分析门水平物种与环境因子的相关性情况可得(图 7), 子囊菌门(*Ascomycota*)与 AP 之间呈现极显著正相关($P<0.01$), 与 OM 和 TK 之间呈现显著正相关($P<0.05$)。被孢霉门(*Mortierellomycota*)与 OM 和 AN 之间呈现极显著负相关($P<0.01$), 与 TK 之间呈现显著负相关($P<0.05$)。通过分析属水平物种与环境因子的相关性情况可得(图 8), 被孢霉属(*Mortierella*)与 OM 和 AN 之间呈现极显著负相关($P<0.01$), 与 TK 之间呈现显著负相关($P<0.05$)。赤霉菌属

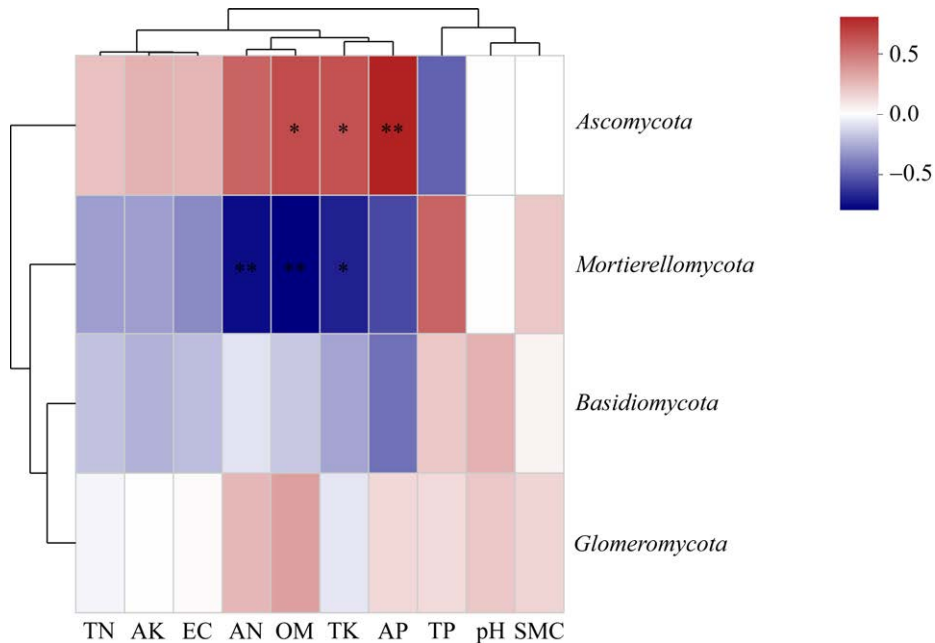


图 7 优势真菌门与环境因子相关性 Heatmap 图(Spearman)

Figure 7 Heatmap correlation analysis between dominant fungi and environmental factors at phylum level (Spearman). * and ** indicate significant correlation at the 0.05 and 0.01 levels, respectively. The same below.

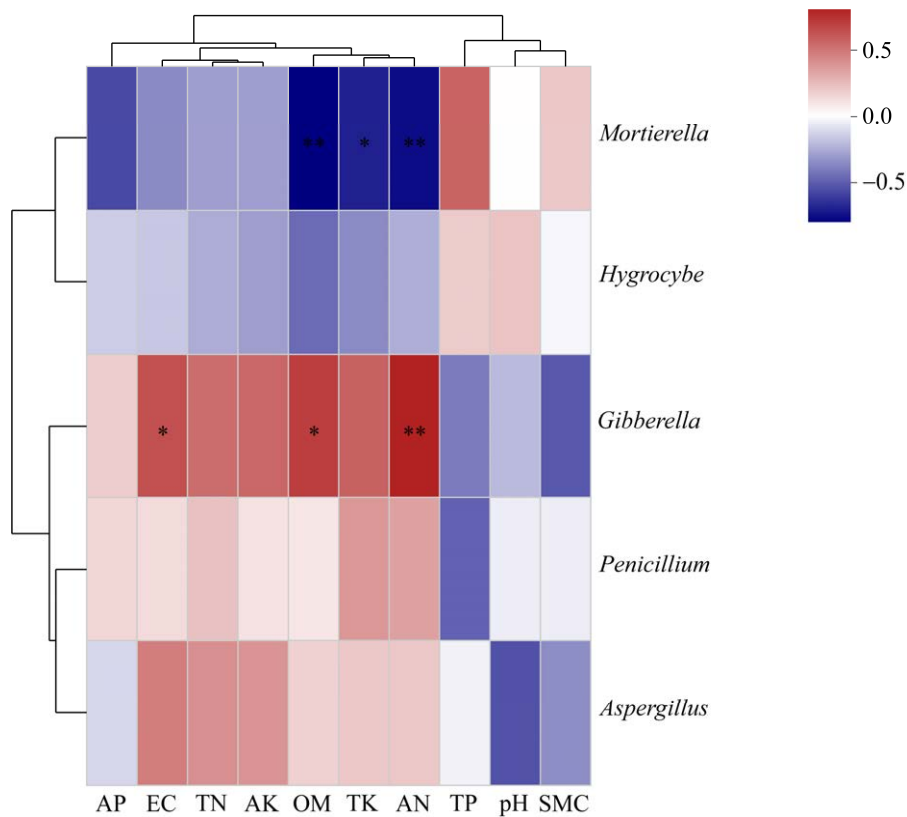


图 8 优势真菌属与环境因子相关性 Heatmap 图(Spearman)

Figure 8 Heatmap correlation analysis between dominant fungi and environmental factors at genus level (Spearman).

(*Gibberella*)与 AN 之间呈现极显著正相关($P < 0.01$), 与 OM 和 EC 呈现显著正相关($P < 0.05$).

3 讨论

3.1 内蒙古砒砂岩丘陵沟壑区沙棘根际/非根际土壤理化特征

通过以上研究结果可知, 全氮以及碱解氮含量根际土壤显著高于非根际土壤, 这与蒲琴等^[38]在红柳、沙棘的研究以及陈永成等^[39]在紫花苜蓿的研究中表现出一样的现象。首先是因为植株的凋落物以及丰富的根系分泌物会使土壤养分得到提高^[40], 其次是因为沙棘属于固氮植物, 固持氮的能力强^[1]。同时, 根际土壤中的有机质也显著高于非根际土壤, 这可能是因

为植株的根系会分泌有机物以及植株地上部残落物的积累, 使得旱生灌木根际土壤的有机质含量相对较高^[41]。侯杰等^[42]的研究证实了根际土壤的有机质含量普遍高于非根际土壤。随着种植年限的增加, 根际土壤中的有机质含量呈现降低的趋势, 这可能是因为随着植株的不断生长, 植株根系在不断地向更深更广的区域扩展, 导致根际周围无明显的养分富集效应, 根际对土壤养分的富集作用逐渐减弱^[43]。此外, 随着植物生长时间的延长, 根系对养分的吸收量和吸收效率也会有所不同, 这导致了不同生长阶段的植株在根际土壤和非根际土壤中养分含量存在差异^[44]。随着种植年限的增加, 根际土壤的碱解氮也在显著降低, 这可能是因为土

壤中的氮主要来源于有机质的分解^[45], 所以有机质和碱解氮的变化趋势相似。

在种植初期, 根际和非根际土壤的全磷含量无显著差别, 相关研究也表示, 根际与非根际全磷含量差异多不显著^[46-48]。然而, 沙棘林种植 9 年时, 非根际土壤中全磷含量显著高于根际土壤, 这可能是因为植株的生长消耗了大量的全磷。不同种植年限的沙棘根际土壤有效磷含量均高于非根际土壤, 有研究表明^[49-50], 根际土壤中的有效磷含量多呈现出高于非根际土壤的结果, 这与本研究的结果一致。首先可能是因为根系对有效磷具有较强的吸收和富集能力, 其次根际区域的微生物活性较高, 会影响土壤磷的转化速率和养分竞争强度, 进而影响了有效磷的含量^[51]。在本研究中, 随着种植年限的增加, 有效磷的含量呈现上升趋势, 速效钾的含量显著降低。刘军等^[52]在研究中发现有效磷和速效钾的含量呈现先增加后减少的趋势, 这是因为有效磷和速效钾主要来源于土壤母质, 在植被种植初期, 由于植株残落物的累积、土壤微生物的剧烈活动以及伴随着有机物质的分解会产生大量的有机酸、酚类物质和无机酸, 这会促进土壤母质中难溶性磷和钾的释放, 这时表现出来的就是有效磷和速效钾含量的增加, 但是有效磷和速效钾很难在土壤中储存, 极易随着雨水的冲刷而流失掉, 同时根系也会吸收利用土壤中的有效磷和速效钾, 这时土壤中有效磷和速效钾会出现下降的趋势^[53-54]。本研究中所采样的沙棘林在 4-9 年的生长过程中, 可能正处于有效磷的上升阶段和速效钾的下降阶段。

土壤电导率值与盐分含量密切相关, 电导率值增大表示土壤中可溶性盐离子浓度增高^[55]。在非盐渍化土壤的情况下, 含盐量是评测土壤肥力的一个综合性指标, 所以电导率可以有效、直接地反映待测土壤的肥力大小^[56-57]。本研究

中, 根际土壤的电导率值大于非根际土壤, 随着种植年限的增长, 电导率值显著降低。从侧面可以反映出根际土壤的肥力优于非根际土壤, 同时随着种植年限的增长, 土壤肥力呈现衰退的趋势。有研究表明^[27], 土壤的理化性质中, 土壤含水率对沙棘的影响十分关键, 影响着沙棘的存活、生长及繁殖整个生命周期。本研究中, 随着种植年限的增长, 土壤含水率显著增加。由此可得, 种植沙棘有助于砒砂岩地区的水分保持, 土壤含水率的增加有助于沙棘以及其他植物的生长, 由此可以形成正向循环, 有助于该地区的生态恢复和建设。

3.2 内蒙古砒砂岩丘陵沟壑区沙棘根际/非根际土壤真菌群落特征

高婷^[58]在沙蒿的研究中发现, 根际土壤中的微生物总数明显多于非根际土壤, 表现出明显的根际效应。这与本研究的结果一致, 由于植物的根系分泌物会吸引微生物在根际富集, 所以根际土壤中的微生物丰富度高于非根际土壤, 这对于植物的生长发育发挥着至关重要的作用^[59]。有人认为, 微生物群落的总体组成在不同的生境中可能存在很大差异, 但优势类群基本上是相似的^[60]。本研究 4 个处理中门水平下的优势类群为子囊菌门(*Ascomycota*)和被孢霉门(*Mortierellomycota*), 两类真菌的相对组成均超过 75.00%。

子囊菌门是真菌中种类最多的类群, 占真菌总数的 40%^[61]。子囊菌门大多是以腐生为主的真菌, 在土壤中扮演着重要的分解者角色, 在养分循环的过程中发挥着不可替代的作用^[62]。子囊菌门在干旱生态系统中对碳和氮循环起着重要的推动作用, 同时, 土壤中碳和氮的含量增加, 也有助于促进子囊菌门的生长, 在土壤养分丰富的情况下, 子囊菌门的相对丰度会显著增加^[63-65]。在本研究中, 根际土壤中子囊菌

门的相对丰度比非根际土壤中增加了 31.26%，随着种植年限的增长，子囊菌门的丰度也呈上升趋势。由此可得，种植沙棘可以起到提高土壤养分的作用。有研究表明^[66-67]子囊菌门在有有机质含量高的土壤中含丰富。这与本研究结果一致，子囊菌门与有机质之间呈显著正相关 ($P < 0.05$)。被孢霉门中有很多真菌具有溶磷作用，可以溶解土壤中难以被利用的磷，在磷含量低的环境中具有生存优势^[68-69]。本研究展现出了相似的趋势，相比于其他处理土壤中被孢霉门的占比，被孢霉门在有效磷含量低的 F4 土壤处理中更具生存优势。

有研究表明^[70-71]，曲霉属(*Aspergillus*)和青霉属(*Penicillium*)在干旱胁迫的环境下不仅出现的频率较高，而且丰度也较高。曲霉属的菌种普遍展现出极强的耐受性^[72]。这与本研究的结果一致，砒砂岩地区气候干旱，曲霉属和青霉属成为本研究中占优势地位的菌属。这可能是因为曲霉属和青霉属能够刺激植物合成植物激素，由此来调节植物抗旱信息的传递通路，从而提高植物的抗旱性^[71]。这些在干旱胁迫下可以富集的微生物很有可能也会对其他非生物胁迫有一定的抗性^[71]。

研究表明^[73-77]，土壤理化性质的变化，例如土壤中碱解氮、速效钾、有效磷、有机质、pH、全氮和含水率等的改变，会引起土壤真菌群落结构多样性的变化。在本研究中，沙棘林根际与非根际土壤真菌群落结构多样性具有重要影响因素的土壤指标为 OM ($r^2=0.7115$, $P=0.010$)，这与马建军等^[54]的研究结果相同。

4 结论

在内蒙古的砒砂岩丘陵沟壑区，种植沙棘林能够显著提高根际土壤中的全氮、碱解氮、速效钾、有机质含量以及电导率。随着种植时

间的延长(从 4 年到 9 年)，土壤含水率呈现增加的趋势。沙棘林的种植提高了根际真菌群落的丰富度，相比于种植年限的增加，根际与非根际之别对于真菌群落结构影响更大。土壤有机质是影响沙棘林土壤真菌群落结构的主要因素。综上所述，沙棘的种植提高了根际土壤的养分含量及真菌群落丰富度，有利于促进土壤生态环境的稳定。同时，沙棘的种植也提高了该地区的土壤含水率，有助于水土保持，促进了该地区生态环境的恢复和建设。

参考文献

- [1] 何京丽, 殷丽强, 郭建英, 韩利兵, 梁月, 李锦荣, 岳征文. 砒砂岩地区沙棘生态工程的土壤修复效果分析[J]. 国际沙棘研究与开发, 2013, 11(3): 19-23.
HE JL, YIN LQ, GUO JY, HAN LB, LIANG Y, LI JR, YUE ZW. The effectiveness analysis of soil remediation after the seabuckthorn ecological engineering in arsenic sandstone areas[J]. The Global Seabuckthorn Research and Development, 2013, 11(3): 19-23 (in Chinese).
- [2] 刘瑞霞. 晋陕蒙砒砂岩区十大孔兑水土流失治理浅析[J]. 内蒙古水利, 2013(6): 68-69.
LIU RX. Analysis on soil erosion control of ten caves in the Arisha sandstone area of Shanxi, Shaanxi and Mongolia[J]. Inner Mongolia Water Resources, 2013(6): 68-69 (in Chinese).
- [3] 王俊峰, 薛顺康, 高峰. 裸露砒砂岩地区沙棘治理成效、经验及发展战略问题[J]. 沙棘, 2002(1): 1-4.
WANG JF, XUE SK, GAO F. Issues on effectiveness, experience and development strategy of seabuckthorn management in exposed Pisha sandstone area[J]. Seabuckthorn, 2002(1): 1-4 (in Chinese).
- [4] 袁勤, 崔向新, 乔荣. 砒砂岩区不同人工林对土壤理化性质的影响[J]. 北方园艺, 2013(18): 52-55.
YUAN Q, CUI XX, QIAO R. Effect of different artificial forest plantations on soil physical and chemical properties of sandstone areas[J]. Northern Horticulture, 2013(18): 52-55 (in Chinese).
- [5] 赵国际. 内蒙古砒砂岩地区水土流失规律研究[J]. 水土保持研究, 2001, 8(4): 158-160.
ZHAO GJ. Research on the laws of soil and water loss in sand rock region, inner Mongolia[J]. Research of

- Soil and Water Conservation, 2001, 8(4): 158-160 (in Chinese).
- [6] CHEN M, ZHANG X, LI M, ZHANG JJ, CAO Y. Climate-growth pattern of *Pinus tabulaeformis* plantations and their resilience to drought events in the Loess Plateau[J]. *Forest Ecology and Management*, 2021, 499: 119642.
- [7] 周文洁, 魏天兴, 刘广全, 朱清科. 陕北典型退耕地沙棘群落与土壤因子的耦合关系[J]. *中国水土保持科学*, 2020, 18(2): 1-9.
ZHOU WJ, WEI TX, LIU GQ, ZHU QK. Coupling relationship between *Hippophae rhamnoides* community and soil factor in typical returning farmland to forest area in northern Shaanxi Province[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2020, 18(2): 1-9 (in Chinese).
- [8] 刘晓宇, 郭月峰, 姚云峰, 刘璐, 祁伟. 砒砂岩区不同留茬高度及坡向下沙棘根系分形特征[J]. *生态环境学报*, 2021, 30(1): 100-107.
LIU XY, GUO YF, YAO YF, LIU L, QI W. Fractal features of *Hippophae rhamnoides* roots under different stubble height and slopes in soft sandstone area[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2021, 30(1): 100-107 (in Chinese).
- [9] 杨方社, 李怀恩, 曹明明, 杨寅群. 小型人工沙棘林对砒砂岩沟道土壤有机质与水分的影响[J]. *干旱区资源与环境*, 2011, 25(9): 110-115.
YANG FS, LI HE, CAO MM, YANG YQ. Effects of small-scale artificial seabuckthorn forest on soil organic matter and soil moisture in the soft rock region gully[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2011, 25(9): 110-115 (in Chinese).
- [10] 郭月峰, 祁伟, 姚云峰, 王鑫. 留茬高度对砒砂岩区沙棘生理特征的影响[J]. *生态环境学报*, 2020, 29(6): 1116-1122.
GUO YF, QI W, YAO YF, WANG X. Effect of stubble height on the physiological characteristics of *Hippophae rhamnoides* in the sandstone region[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2020, 29(6): 1116-1122 (in Chinese).
- [11] 李林山, 王梓瑜, 白慧慧, 张凯煜, 刘米利, 史建国, 段义忠. 毛乌素沙地 4 种不同植物根际土壤细菌群落结构和多样性特征[J]. *干旱区资源与环境*, 2024, 38(2): 142-149.
LI LS, WANG ZY, BAI HH, ZHANG KY, LIU ML, SHI JG, DUAN YZ. Structure and diversity of bacterial communities in rhizosphere soil of four plant species in Mu Us Sandy Land[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2024, 38(2): 142-149 (in Chinese).
- [12] 刘旻霞, 李博文, 孙瑞弟, 张娅娅, 宋佳颖, 张国娟, 徐璐, 穆若兰. 高寒草甸黄帚橐吾种群根际/非根际土壤可培养微生物群落特征[J]. *生态学报*, 2021, 41(12): 4853-4863.
LIU MX, LI BW, SUN RD, ZHANG YY, SONG JY, ZHANG GJ, XU L, MU RL. Characteristics of culturable microbial communities in rhizosphere/non-rhizosphere soil of *Ligularia virgaurea* in alpine meadow elevation gradient[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(12): 4853-4863 (in Chinese).
- [13] 马志良, 赵文强, 刘美, 刘庆. 增温对高寒灌丛根际和非根际土壤微生物生物量碳氮的影响[J]. *应用生态学报*, 2019, 30(6): 1893-1900.
MA ZL, ZHAO WQ, LIU M, LIU Q. Effects of warming on microbial biomass carbon and nitrogen in the rhizosphere and bulk soil in an alpine scrub ecosystem[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, 30(6): 1893-1900 (in Chinese).
- [14] XIA ZW, BAI E, WANG QK, GAO DC, ZHOU JD, JIANG P, WU JB. Biogeographic distribution patterns of bacteria in typical Chinese forest soils[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2016, 7: 1106.
- [15] MENGUAL C, SCHOEBITZ M, AZCÓN R, ROLDÁN A. Microbial inoculants and organic amendment improves plant establishment and soil rehabilitation under semiarid conditions[J]. *Journal of Environmental Management*, 2014, 134: 1-7.
- [16] SAETRE P, STARK JM. Microbial dynamics and carbon and nitrogen cycling following re-wetting of soils beneath two semi-arid plant species[J]. *Oecologia*, 2005, 142(2): 247-260.
- [17] GRIFFITHS BS, KUAN HL, RITZ K, GLOVER LA, McCAIG AE, FENWICK C. The relationship between microbial community structure and functional stability, tested experimentally in an upland pasture soil[J]. *Microbial Ecology*, 2004, 47(1): 104-113.
- [18] CHEN J, NAN J, XU DL, MO L, ZHENG YX, CHAO LM, QU HT, GUO YQ, LI FS, BAO YY. Response differences between soil fungal and bacterial communities under opencast coal mining disturbance conditions[J]. *CATENA*, 2020, 194: 104779.
- [19] BI YL, XIAO L, SUN JH. An arbuscular mycorrhizal fungus ameliorates plant growth and hormones after moderate root damage due to simulated coal mining

- subsidence: a microcosm study[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, 26(11): 11053-11061.
- [20] JI CN, HUANG J, YU HC, TIAN Y, RAO XZ, ZHANG X. Do the reclaimed fungal communities succeed toward the original structure in eco-fragile regions of coal mining disturbances? A case study in North China loess-aeolian sand area[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2022, 13: 770715.
- [21] ZHANG ZY, QIANG FF, LIU GQ, LIU CH, AI N. Distribution characteristics of soil microbial communities and their responses to environmental factors in the sea buckthorn forest in the water-wind erosion crisscross region[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2023, 13: 1098952.
- [22] 黄沛, 张雷一, 纪署光, 李卫, 姚斌, 郑广, 李昭. 喀斯特石漠化区林草间作对土壤养分及微生物数量的影响[J]. *草业科学*, 2024. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/62.1069.s.20240304.1008.002.html>.
HUANG P, ZHANG LY, JI SG, LI W, YAO B, ZHENG G, LI Z. Effects of forest and grassland intercropping on soil nutrients and microbial population in karst rocky desertification area[J]. *Pratacultural Science*, 2024. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/62.1069.s.20240304.1008.002.html> (in Chinese).
- [23] MA HK, BAI GY, SUN Y, KOSTENKO O, ZHU X, LIN S, RUAN WB, ZHAO NX, BEZEMER TM. Opposing effects of nitrogen and water addition on soil bacterial and fungal communities in the Inner Mongolia steppe: a field experiment[J]. *Applied Soil Ecology*, 2016, 108: 128-135.
- [24] SARTO MVM, BORGES WLB, BASSEGIO D, PIRES CAB, RICE CW, ROSOLEM CA. Soil microbial community, enzyme activity, C and N stocks and soil aggregation as affected by land use and soil depth in a tropical climate region of Brazil[J]. *Archives of Microbiology*, 2020, 202(10): 2809-2824.
- [25] 徐林芳, 米媛婷, 柳兰洲, 温璐, 李永宏, 许继飞. 内蒙古不同类型草原土壤真菌群落结构及其影响因子的研究[J]. *草地学报*, 2023, 31(7): 1977-1987.
XU LF, MI YT, LIU LZ, WEN L, LI YH, XU JF. Study on the structure and driving factors of soil fungal community in different grassland types in inner Mongolia[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2023, 31(7): 1977-1987 (in Chinese).
- [26] 王誉陶, 李建平, 井乐, 张翼, 张娟. 模拟降雨对黄土高原典型草原土壤化学计量及微生物多样性的影响[J]. *生态学报*, 2020, 40(5): 1517-1531.
WANG YT, LI JP, JING L, ZHANG Y, ZHANG J. Effects of different precipitation treatments on soil ecological chemistry and microbial diversity in the Loess Plateau[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(5): 1517-1531 (in Chinese).
- [27] 代光辉, 李根前, 李甜江, 李孙玲, 肖智勇. 水分条件对中国沙棘生长及种群稳定性的影响[J]. *西北林学院学报*, 2011, 26(2): 1-8.
DAI GH, LI GQ, LI TJ, LI SL, XIAO ZY. Effects of water conditions on the growth and population stability of *Hippophae rhamnoides* subsp. *sinensis*[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2011, 26(2): 1-8 (in Chinese).
- [28] 闵梓骁, 张建新, 范文波, 杨海梅, 乔长录, 许忠宇. 不同立地条件下沙棘土壤水分分布特征及动态生长研究[J]. *水土保持学报*, 2022, 36(4): 204-210.
MIN ZX, ZHANG JX, FAN WB, YANG HM, QIAO CL, XU ZY. Soil moisture distribution and dynamic growth of *Hippophae rhamnoides* under different site conditions[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2022, 36(4): 204-210 (in Chinese).
- [29] 强大宏, 艾宁, 刘长海, 刘广全, 李阳, 强方方, 邵颖. 煤矿复垦区沙棘人工林土壤水分时空分布特征研究[J]. *灌溉排水学报*, 2019, 38(9): 82-87.
QIANG DH, AI N, LIU CH, LIU GQ, LI Y, QIANG FF, SHAO Y. Temporal and spatial distribution characteristics of soil moisture in seabuckthorn plantations in coal mine reclamation area[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2019, 38(9): 82-87 (in Chinese).
- [30] 孙成. 砒砂岩区小流域人工林水土保持生态功能及效益研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学硕士学位论文, 2022.
SUN C. Research on ecological function and benefit evaluation of soil and water conservation of plantation in small watershed of the feldspathic sandstone region[D]. Hohhot: Master's Thesis of Inner Mongolia Agricultural University, 2022 (in Chinese).
- [31] 赵满兴, 王俊, 杨帆, 马文全, 白二磊. 黄土丘陵区不同种植年限沙棘人工林土壤可溶性氮组分时空变化特征[J]. *西北林学院学报*, 2022, 37(6): 34-39.
ZHAO MX, WANG J, YANG F, MA WQ, BAI EL. Spatial distribution characteristics of soil soluble nitrogen component in *Hippophae rhamnoides* plantations with different stand ages in Loess Hilly Region[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2022, 37(6): 34-39 (in Chinese).

- [32] 同晓冬, 杨妮, 秦家凤, 刘广全, 艾宁, 刘长海. 煤矿复垦区不同恢复年限沙棘人工林土壤细菌群落结构与功能预测[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(32): 13747-13757.
TONG XD, YANG N, QIN JF, LIU GQ, AI N, LIU CH. Soil bacterial community structure and functional prediction of seabuckthorn plantation with different restoration years in coal mine reclamation area[J]. *Science Technology and Engineering*, 2023, 23(32): 13747-13757 (in Chinese).
- [33] ZHANG L, XU MG, LIU Y, ZHANG FS, HODGE A, FENG G. Carbon and phosphorus exchange may enable cooperation between an arbuscular mycorrhizal fungus and a phosphate-solubilizing bacterium[J]. *The New Phytologist*, 2016, 210(3): 1022-1032.
- [34] 王晓, 毕银丽, 王义, 田野, 李强, 杜昕鹏, 郭芸. 沙棘林密度和丛枝菌根真菌接种对林下植物和土壤性状的影响[J]. 林业科学, 2023, 59(10): 138-149.
WANG X, BI YL, WANG Y, TIAN Y, LI Q, DU XP, GUO Y. Effects of planting density of *Hippophae rhamnoides* and inoculation of AMF on understory vegetation growth and soil improvement[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2023, 59(10): 138-149 (in Chinese).
- [35] 张明明, 张情, 樊梦颖, 刘西平. 2 种立地条件下沙棘林地土壤中细菌多样性比较[J]. 西北林学院学报, 2020, 35(2): 32-39.
ZHANG MM, ZHANG Q, FAN MY, LIU XP. Comparison of bacterial diversity in forest soils of *Hippophae rhamnoides* growing in two different sites[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2020, 35(2): 32-39 (in Chinese).
- [36] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000: 101-103.
BAO SD. *Soil and Agricultural Chemistry Analysis*[M]. 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2000: 101-103 (in Chinese).
- [37] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1978: 76-78.
Nanjing Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences. *Physical and Chemical Analysis of Soil*[M]. Shanghai: Shanghai Scientific & Technical Publishers, 1978: 76-78 (in Chinese).
- [38] 蒲琴, 胡玉福, 李亨伟, 蒋双龙, 彭佳佳, 舒向阳. 高寒草地 2 种固沙灌木根际土壤碳氮特征[J]. 水土保持学报, 2016, 30(2): 272-276, 282.
PU Q, HU YF, LI HW, JIANG SL, PENG JJ, SHU XY. Characteristics of organic carbon and nitrogen in rhizosphere soil under 2 sand-fixation shrub of alpine desertified grassland[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2016, 30(2): 272-276, 282 (in Chinese).
- [39] 陈永成, 李肖, 蔡宜东, 郭志国, 张凡凡, 马春晖. 昆仑山沙区旱作紫花苜蓿根际/非根际土壤理化性质及真菌群落特征[J]. 草业科学, 2023, 40(5): 1232-1242.
CHEN YC, LI X, CAI YD, GUO ZG, ZHANG FF, MA CH. Physicochemical properties and fungal community characteristics of dry-cultivated alfalfa rhizosphere and non-rhizosphere soils in the sandy area of Kunlun Mountains[J]. *Pratacultural Science*, 2023, 40(5): 1232-1242 (in Chinese).
- [40] 郭二果, 张树礼, 蔡煜, 李静, 闫文慧, 杨力鹏, 李永胜, 张颖, 张波. 草原区露天煤矿开发对土壤环境质量的影响[J]. 露天采矿技术, 2012, 27(1): 93-97.
GUO EG, ZHANG SL, CAI Y, LI J, YAN WH, YANG LP, LI YS, ZHANG Y, ZHANG B. Impact of the open-pit coal mine on soil environment quality in grassland[J]. *Opencast Mining Technology*, 2012, 27(1): 93-97 (in Chinese).
- [41] 李金辉, 卢鑫, 周志宇, 赵萍, 金茜, 周媛媛. 不同种植年限紫穗槐根际非根际土壤磷组分含量特征[J]. 草业学报, 2014, 23(6): 61-68.
LI JH, LU X, ZHOU ZY, ZHAO P, JIN Q, ZHOU YY. Phosphorus contents in the rhizosphere and bulk soil under *Amorpha fruticosa* established in different years[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2014, 23(6): 61-68 (in Chinese).
- [42] 侯杰, 叶功富, 张立华. 林木根际土壤研究进展[J]. 防护林科技, 2006(1): 30-33.
HOU J, YE GF, ZHANG LH. Research progress of rhizosphere soil of forest trees[J]. *Protection Forest Science and Technology*, 2006(1): 30-33 (in Chinese).
- [43] 李茜, 刘松涛, 何俊, 孙兆军, 吕雯. 葡萄园土壤养分变化特征对不同栽培年限的响应[J]. 西南农业学报, 2020, 33(7): 1404-1409.
LI Q, LIU ST, HE J, SUN ZJ, LÜ W. Response of soil fertility change characteristics to different planting years in vineyard[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2020, 33(7): 1404-1409 (in Chinese).
- [44] 马月婷, 张丽静, 杜明新, 周志宇, 牛得草, 张宝林. 不同种植年限白沙蒿对根际土壤营养元素的影响[J]. 草业科学, 2014, 31(2): 224-231.
MA YT, ZHANG LJ, DU MX, ZHOU ZY, NIU DC, ZHANG BL. Effects of different ages *Artemisia*

- sphaerocephala* on the content of nutrient elements in rhizosphere soil[J]. Pratacultural Science, 2014, 31(2): 224-231 (in Chinese).
- [45] 马云波, 牛聪傑, 许中旗. 不同造林模式对铁尾矿地土壤性质的影响[J]. 水土保持学报, 2015, 29(3): 242-248.
MA YB, NIU CJ, XU ZQ. Impacts of different forestation pattern on soil properties of iron tailings[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2015, 29(3): 242-248 (in Chinese).
- [46] 苏永中, 赵哈林, 张铜会. 几种灌木、半灌木对沙地土壤肥力影响机制的研究[J]. 应用生态学报, 2002, 13(7): 802-806.
SU YZ, ZHAO HL, ZHANG TH. Influencing mechanism of several shrubs and subshrubs on soil fertility in Keerqin sandy land[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2002, 13(7): 802-806 (in Chinese).
- [47] 弋良朋, 马健, 李彦. 荒漠盐生植物根际土壤盐分和养分特征[J]. 生态学报, 2007, 27(9): 3565-3571.
YI LP, MA J, LI Y. Soil salt and nutrient concentration in the rhizosphere of desert halophytes[J]. Acta Ecologica Sinica, 2007, 27(9): 3565-3571 (in Chinese).
- [48] 张彦东, 白尚斌, 王政权, 王庆成. 落叶松根际土壤磷的有效性研究[J]. 应用生态学报, 2001, 12(1): 31-34.
ZHANG YD, BAI SB, WANG ZQ, WANG QC. Soil P availability in larch rhizosphere[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2001, 12(1): 31-34 (in Chinese).
- [49] 陈永亮, 韩士杰, 周玉梅, 邹春静, 张军辉. 胡桃楸、落叶松纯林及其混交林根际土壤有效磷特性的研究[J]. 应用生态学报, 2002, 13(7): 790-794.
CHEN YL, HAN SJ, ZHOU YM, ZOU CJ, ZHANG JH. Characteristics of available P in the rhizosphere soil in pure *Juglans mandshurica* and *Larix gmelinii* and their mixed plantation[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2002, 13(7): 790-794 (in Chinese).
- [50] 马斌, 周志宇, 张彩萍, 李雪瑞. 超旱生灌木根际土壤磷的含量特征[J]. 草业学报, 2005, 14(3): 106-110.
MA B, ZHOU ZY, ZHANG CP, LI XR. The character of phosphorus concentrations in rhizosphere soil of super-xerophytic shrubs[J]. Acta Pratacultural Science, 2005, 14(3): 106-110 (in Chinese).
- [51] 向明珠, 李佳君, 黄海梅, 李昌航, 肖纳, 尤业明, 招礼军, 黄雪蔓. 杉木林改造成阔叶林对根际和非根际土壤磷组分和转化的影响[J]. 广西植物, 2024. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/45.1134.Q.20240306.0743.004.html>.
- XIANG MZ, LI JJ, HUANG HM, LI CH, XIAO N, YOU YM, ZHAO LJ, HUANG XM. Effects of transformation of Chinese fir forest into broad-leaved forest on phosphorus components and transformation in rhizosphere and non-rhizosphere soil[J]. Botany of Guangxi, 2024. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/45.1134.Q.20240306.0743.004.html> (in Chinese).
- [52] 刘军, 丁霞, 张武文. 人工沙棘林对霍林河南露天煤矿排土场边坡土壤肥力的影响[J]. 干旱区资源与环境, 2017, 31(12): 150-154.
LIU J, DING X, ZHANG WW. Study on soil fertility of artificial sea-buckthorn woodlands in the waste dump of Huolinhe south-pit mine[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2017, 31(12): 150-154 (in Chinese).
- [53] 方瑛, 马任甜, 安韶山, 赵俊峰, 肖礼. 黑岱沟露天煤矿排土场不同植被复垦土壤酶活性及理化性质研究[J]. 环境科学, 2016, 37(3): 1121-1127.
FANG Y, MA RT, AN SS, ZHAO JF, XIAO L. Heidaigou opencast coal mine: soil enzyme activities and soil physical and chemical properties under different vegetation restoration[J]. Environmental Science, 2016, 37(3): 1121-1127 (in Chinese).
- [54] 马建军, 李青丰, 张树礼. 沙棘与不同类型植被配置下土壤微生物、养分特征及相关性研究[J]. 干旱区资源与环境, 2007, 21(6): 163-167.
MA JJ, LI QF, ZHANG SL. The correlation among soil microorganism and soil nutrient in different types of mixed stands of *Hippophae rhamnoides*[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2007, 21(6): 163-167 (in Chinese).
- [55] 董静, 邢锦城, 温祝桂, 洪立洲, 刘冲, 朱小梅, 赵宝泉, 贺亭亭, 赵小慧. 苏北滩涂盐碱地 3 种典型盐生植物根际土壤细菌多样性及群落结构分析[J]. 江苏农业科学, 2021, 49(8): 212-218.
DONG J, XING JC, WEN ZG, HONG LZ, LIU C, ZHU XM, ZHAO BQ, HE TT, ZHAO XH. Analysis of bacterial diversity and community structure in rhizosphere soil of three typical halophytes in saline-alkali land of northern Jiangsu[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2021, 49(8): 212-218 (in Chinese).
- [56] 秦焱鹤, 姚鹏伟, 韩秋静, 马静, 张格格, 叶协锋. 不同施肥措施对烟株生长发育及土壤盐分的影响[J]. 中国烟草学报, 2019, 25(1): 67-76.
QIN YH, YAO PW, HAN QJ, MA J, ZHANG GG, YE XF. Effects of different fertilizing practices on tobacco

- plant growth and soil salinity[J]. *Acta Tabacaria Sinica*, 2019, 25(1): 67-76 (in Chinese).
- [57] 姚世庭, 芦光新, 王军邦, 黄彩霞, 王志慧, 赵丽蓉. 模拟增温对土壤电导率的影响[J]. *干旱区研究*, 2020, 37(3): 598-606.
YAO ST, LU GX, WANG JB, HUANG CX, WANG ZH, ZHAO LR. Effect of simulated warming on soil conductivity[J]. *Arid Zone Research*, 2020, 37(3): 598-606 (in Chinese).
- [58] 高婷. 沙蒿根际、非根际微生物数量的动态变化研究[J]. *宁夏农林科技*, 2006, 47(3): 16, 22.
GAO T. Study on the dynamic changes of microorganisms in rhizosphere and non-rhizosphere of *Artemisia arenaria*[J]. *Ningxia Journal of Agriculture and Forestry Science and Technology*, 2006, 47(3): 16, 22 (in Chinese).
- [59] 刘京伟, 李香真, 姚敏杰. 植物根际微生物群落构建的研究进展[J]. *微生物学报*, 2021, 61(2): 231-248.
LIU JW, LI XZ, YAO MJ. Research progress on assembly of plant rhizosphere microbial community[J]. *Acta Microbiologica Sinica*, 2021, 61(2): 231-248 (in Chinese).
- [60] ZAK DR, HOLMES WE, WHITE DC, PEACOCK AD, TILMAN D. Plant diversity, soil microbial communities, and ecosystem function: are there any links?[J]. *Ecology*, 2003, 84(8): 2042-2050.
- [61] 张森, 陈裕凤, 陈龙, 黄飘玲, 韦露玲. 不同地区药用植物两面针根际土壤真菌种群多样性差异分析[J]. *生物技术通报*, 2020, 36(9): 167-179.
ZHANG M, CHEN YF, CHEN L, HUANG PL, WEI LL. Difference analysis of the community diversity of fungi in the rhizosphere soil of *Zanthoxylum nitidum* (roxb.) DC in different regions[J]. *Biotechnology Bulletin*, 2020, 36(9): 167-179 (in Chinese).
- [62] 孙倩, 吴宏亮, 陈阜, 康建宏. 宁夏中部干旱带不同作物根际土壤真菌群落多样性及群落结构[J]. *微生物学通报*, 2019, 46(11): 2963-2972.
SUN Q, WU HL, CHEN F, KANG JH. Fungal community diversity and structure in rhizosphere soil of different crops in the arid zone of central Ningxia[J]. *Microbiology China*, 2019, 46(11): 2963-2972 (in Chinese).
- [63] CHALLACOMBE JF, HESSE CN, BRAMER LM, McCUE LA, LIPTON M, PURVINE S, NICORA C, GALLEGOS-GRAVES LV, PORRAS-ALFARO A, KUSKE CR. Genomes and secretomes of Ascomycota fungi reveal diverse functions in plant biomass decomposition and pathogenesis[J]. *BMC Genomics*, 2019, 20(1): 976.
- [64] ZHOU J, JIANG X, ZHOU B, MA M, GUAN D, LI J, CHEN S, CAO F, SHEN D, QIN J. Thirty four years of nitrogen fertilization decreases fungal diversity and alters fungal community composition in black soil in northeast China[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2016, 95: 135-143.
- [65] 熊涵. 不同海拔对马缨杜鹃土壤真菌、根际真菌和根内生真菌群落结构的影响[D]. 贵阳: 贵州师范大学硕士学位论文, 2021.
XIONG H. Effects of different altitudes on community structure of soil fungi, rhizosphere fungi and root endophytic fungi in *Rhododendron delavayi* franch[D]. Guiyang: Master's Thesis of Guizhou Normal University, 2021 (in Chinese).
- [66] ROUSK J, BROOKES PC, BÅÅTH E. Fungal and bacterial growth responses to N fertilization and pH in the 150-year 'Park Grass' UK grassland experiment[J]. *FEMS Microbiology Ecology*, 2011, 76(1): 89-99.
- [67] QIAO QH, WANG FR, ZHANG JX, CHEN Y, ZHANG CY, LIU GD, ZHANG H, MA CL, ZHANG J. The variation in the rhizosphere microbiome of cotton with soil type, genotype and developmental stage[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7: 3940.
- [68] BAO ZH, MATSUSHITA Y, MORIMOTO S, HOSHINO YT, SUZUKI C, NAGAOKA K, TAKENAKA M, MURAKAMI H, KUROYANAGI Y, URASHIMA Y, SEKIGUCHI H, KUSHIDA A, TOYOTA K, SAITO M, TSUSHIMA S. Decrease in fungal biodiversity along an available phosphorous gradient in arable Andosol soils in Japan[J]. *Canadian Journal of Microbiology*, 2013, 59(6): 368-373.
- [69] 马垒, 赵文慧, 郭志彬, 王道中, 赵炳梓. 长期不同磷肥施用量对砂姜黑土真菌多样性、群落组成和种间关系的影响[J]. *生态学报*, 2019, 39(11): 4158-4167.
MA L, ZHAO WH, GUO ZB, WANG DZ, ZHAO BZ. Effects of long-term application of phosphorus fertilizer on fungal community diversity, composition, and intraspecific interactions and variation with application rate in a lime concretion black soil[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(11): 4158-4167 (in Chinese).
- [70] 刘宇, 韩淑梅, 宋希强, 丁琼, 王鹏, 赵莹. 不同海拔下海南凤仙花可培养根际真菌和细菌群落季节性变化[J]. *热带生物学报*, 2018, 9(1): 47-53.
LIU Y, HAN SM, SONG XQ, DING Q, WANG P,

- ZHAO Y. Seasonal variation of microbial communities in the rhizosphere of *Impatiens Hainanensis* (Balsaminaceae) at different altitudes[J]. *Journal of Tropical Biology*, 2018, 9(1): 47-53 (in Chinese).
- [71] 岳丹丹, 韩贝, Abid Ullah, 张献龙, 杨细燕. 干旱条件下棉花根际真菌多样性分析[J]. *作物学报*, 2021, 47(9): 1806-1815.
- YUE DD, HAN B, ULLAH A, ZHANG XL, YANG XY. Fungi diversity analysis of rhizosphere under drought conditions in cotton[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2021, 47(9): 1806-1815 (in Chinese).
- [72] ARAÚJO CAS, FERREIRA PC, PUPIN B, DIAS LP, AVALOS J, EDWARDS J, HALLSWORTH JE, RANGEL DEN. Osmotolerance as a determinant of microbial ecology: a study of phylogenetically diverse fungi[J]. *Fungal Biology*, 2020, 124(5): 273-288.
- [73] WANG D, RUI YC, DING K, CUI XY, HAO YB, TANG L, PANG Z, ZHANG B, ZHOU ST, WANG K, WANG YF. Precipitation drives the biogeographic distribution of soil fungal community in Inner Mongolian temperate grasslands[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2018, 18(1): 222-228.
- [74] 付莉娇, 李雪琴, 范继辉, 鲁旭阳, 鄢燕. 藏北高寒草原典型植物根际土壤细菌群落结构多样性及根系特征分析[J]. *草地学报*, 2022, 30(5): 1131-1140.
- FU LJ, LI XQ, FAN JH, LU XY, YAN Y. Analysis of rhizosphere soil bacterial community structure diversity and root characteristics of typical plants in alpine steppe of northern Xizang[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2022, 30(5): 1131-1140 (in Chinese).
- [75] 郭璞, 邢鹏杰, 宋佳, 吴玲玲, 李彬琦, 司滢汲, 李玉, 冀瑞卿. 蒙古栎根系与根区土壤真菌群落组成及与环境因子的关系[J]. *菌物研究*, 2022, 20(3): 173-182.
- GUO P, XING PJ, SONG J, WU LL, LI BQ, SI YJ, LI Y, JI RQ. Fungal community in roots and the root zone of *Quercus mongolica* and the correlations with the environmental factors[J]. *Journal of Fungal Research*, 2022, 20(3): 173-182 (in Chinese).
- [76] 邬嘉华, 王立新, 张景慧, 卓义, 武胜男, 王凤歌, 徐智超, 祁瑜, 温璐. 温带典型草原土壤理化性质及微生物量对放牧强度的响应[J]. *草地学报*, 2018, 26(4): 832-840.
- WU JH, WANG LX, ZHANG JH, ZHUO Y, WU SN, WANG FG, XU ZC, QI Y, WEN L. Response of soil properties and microbial biomass to different grazing intensities in temperate typical steppe[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2018, 26(4): 832-840 (in Chinese).
- [77] 张变华, 靳东升, 张强, 郜春花, 李建华, 卢晋晶, 籍晟煜. 煤矸石填埋区复垦土壤真菌多样性对施肥方式的响应[J]. *干旱区资源与环境*, 2020, 34(4): 183-188.
- ZHANG BH, JIN DS, ZHANG Q, GAO CH, LI JH, LU JJ, JI SY. Response of fungal diversity to fertilization application in reclaimed soil in coal gangue landfill area[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2020, 34(4): 183-188 (in Chinese).