

研究报告

不同施肥处理对‘赤霞珠’葡萄根际土壤养分和真菌群落的影响

撒晓梅¹, 李明^{*2,3}

1 宁夏大学葡萄酒与园艺学院, 宁夏 银川 750021

2 宁夏大学葡萄与葡萄酒研究院, 宁夏 银川 750021

3 葡萄与葡萄酒教育部工程研究中心, 宁夏 银川 750021

撒晓梅, 李明. 不同施肥处理对‘赤霞珠’葡萄根际土壤养分和真菌群落的影响[J]. 微生物学通报, 2023, 50(11): 4876-4893.

SA Xiaomei, LI Ming. Different fertilization treatments affect rhizosphere soil nutrients and fungal communities of ‘Cabernet Sauvignon’ grapes[J]. Microbiology China, 2023, 50(11): 4876-4893.

摘要: 【背景】宁夏贺兰山东麓葡萄产区忽视有机肥的施用, 果树枝条焚烧污染环境, 造成土壤养分缺失, 土壤质量下降。【目的】为解决长期施用化肥对土壤造成的一系列问题, 通过大田试验研究施肥及喷施不同浓度菌剂对土壤理化性质、真菌群落组成及多样性的影响, 为酿酒葡萄可持续健康发展提供科学依据。【方法】以‘赤霞珠’葡萄根际土壤为试验对象, 采用 Illumina MiSeq 高通量测序技术, 测定并分析根际土壤理化性质、真菌群落组成和多样性在 7 个处理[常规施肥(CK)、蚯蚓粪+腐熟枝条+100 倍菌剂(T1)、蚯蚓粪+腐熟枝条+200 倍菌剂(T2)、蚯蚓粪+腐熟枝条+300 倍菌剂(T3)、蚯蚓粪+未腐熟枝条+100 倍菌剂(A1)、蚯蚓粪+未腐熟枝条+200 倍菌剂(A2)和蚯蚓粪+未腐熟枝条+300 倍菌剂(A3)]的变化。【结果】相较于 CK, 葡萄根际土壤理化性质差异明显, 施肥处理增加了土壤有机质含量, 土壤 pH 含量无明显变化, 改良了土壤结构, 活化了土壤有效养分。相较于 CK, 各处理真菌分类操作单元(operational taxonomic unit, OTU)数均降低, A2 处理根际土壤丰富度及多样性均显著增加。真菌群落组成结果显示, 门水平下子囊菌门(*Ascomycota*)、担子菌门(*Basidiomycota*)、壶菌门(*Chytridiomycota*)和被孢霉门(*Mortierellomycota*)均为 7 个处理的优势菌, 占总相对丰度的 74.40%–86.97%。T2、A2 处理产量分别显著提高 19.34%、14.72%。相关性分析表明, 各处理全氮含量是影响真菌群落结构的主要因素, 微生物与产量无显著关系, 电导率、全氮是与产量密切相关的因子。【结论】T2、A2 处理改善了土壤微生物群落结构, 提高了土壤养分, 进而促进葡萄生长, 并提高产量和生产效益, 为葡萄选择适合的施肥方式提供了一定理论依据。

关键词: 蚯蚓粪; 高通量测序; 土壤真菌; 群落多样性; 产量

资助项目: 宁夏回族自治区重点研发计划(2021BEF02016)

This work was supported by the Key Research and Development Program of Ningxia Hui Autonomous Region (2021BEF02016).

*Corresponding author. E-mail: lm_y096@126.com

Received: 2023-03-31; Accepted: 2023-06-26; Published online: 2023-09-14

Different fertilization treatments affect rhizosphere soil nutrients and fungal communities of ‘Cabernet Sauvignon’ grapes

SA Xiaomei¹, LI Ming^{*2,3}

1 College of Enology & Horticulture, Ningxia University, Yinchuan 750021, Ningxia, China

2 Ningxia Grape and Wine Research Institute, Ningxia University, Yinchuan 750021, Ningxia, China

3 Engineering Research Center of Grape and Wine, Ministry of Education, Yinchuan 750021, Ningxia, China

Abstract: **[Background]** The grape production in eastern Helan Mountains has the problems of poor soil nutrients, neglect of organic fertilizer application, and environmental pollution caused by the burning of fruit plant branches. **[Objective]** In view of the problems caused by long-term application of chemical fertilizers to the soil, we carried out field experiments to study the effects of fertilizer application and fungicide spraying on the soil physicochemical properties and the fungal community composition and diversity, aiming to underpin the sustainable and healthy development of wine grapes. **[Methods]** The physicochemical properties of the rhizosphere soil of ‘Cabernet Sauvignon’ were examined. Illumina MiSeq high-throughput sequencing was performed to determine the fungal community composition and diversity in the rhizosphere soils in seven treatments: conventional fertilization (CK), earthworm manure+fermented branches+100×fungicide (T1), earthworm manure+fermented branches+200×fungicide (T2), earthworm manure+fermented branches+300×fungicide (T3), earthworm manure+unfermented branches+100×fungicide (A1), earthworm manure+unfermented branches+200×fungicide (A2), and earthworm manure+unfermented branches+300×fungicide (A3). **[Results]** Compared with CK, other treatments significantly changed the chemical properties of the rhizosphere soil. Specifically, the fertilization treatments increased the organic matter, did not alter the soil pH, improved the soil structure, and activated the available nutrients in soil. Compared with CK, The number of fungal operational taxonomic unit (OTU) decreased in all treatments, and A2 treatment increased the fungal richness and diversity in the rhizosphere soil. *Ascomycota*, *Basidiomycota*, *Chytridiomycota*, and *Mortierellomycota* were dominant in all the seven treatments at the phylum level, accounting for 74.40%–86.97% of the total relative abundance. T2 and A2 treatments increased the grape yield by 19.34% and 14.72%, respectively. The correlation analysis showed that total nitrogen was the main factor affecting the fungal community structure; microorganisms were not significantly related to yield; electric conductivity and total nitrogen were factors closely associated with yield. **[Conclusion]** T2 and A2 treatments improved the soil microbial community structure and soil nutrients, which promoted grape growth and improved yield and production efficiency, providing a theoretical basis for the selection of suitable fertilization schemes for grapes.

Keywords: earthworm manure; high-throughput sequencing; soil fungi; community diversity; yield

葡萄(*Vitis vinifera* L.)属于木质藤本植物,是世界四大果树之一,也是我国落叶果树种类之一,作为我国重要的经济类果树,还具有保健、抗衰作用,不仅果实多汁、美味,有助于消化,而且葡萄中含有大量诸如白藜芦醇、聚合苯酚等,可以防癌、预防高血压,深受消费者喜爱^[1-3]。目前多在甘肃、新疆、宁夏、河北、山东、北京和天津等地规模化种植^[4]。宁夏贺兰山东麓地区干旱少雨、日照充足、昼夜温差大,且面积广阔、土层深厚、富含钙质、有效积温高,有利于酿酒葡萄生长和品质形成^[5]。土壤环境是决定酿酒葡萄生长与品质的另一重要因素。该区域的土壤类型众多,以沙砾土面积最为广泛,土壤条件优劣并存,优势为土壤以砂质土、砾质土为主,土质多以松软、多孔和透气性好为主,富含大量钾元素和钙元素,有利于葡萄根系吸收其土壤中的养分物质,同时,该类土壤也会造成土壤容量过大、保水持肥能力差、营养元素时有亏缺等问题^[6]。贺兰山东麓葡萄园土壤贫瘠,忽视有机肥的施用,加之传统的管理方式和不科学、不合理的灌溉方式等,对原本贫瘠的土壤造成更加严重的伤害,导致土壤理化性质恶化,葡萄品质及产量逐年下降。另外,果树枝条的修剪量逐年增加,不仅占用大面积土地,甚至造成了环境的污染和生物资源的浪费,而仅依靠传统的施肥及处理方法效果较差。有学者指出,土壤的微生物群落构造和功能的改变会使土壤产生异常,例如土壤养分的耗尽、对土壤理化性质的侵蚀及植物自身毒素的积累^[7]。在缺乏养分的土壤环境中真菌和细菌相互合作,换言之,真菌菌丝有利于改善和平衡土壤中的养分,从而促进细菌的生长与代谢^[8]。Wang等^[9]研究结果表明,蚯蚓粪在抑制土壤病害方面有重要作用,发现

施入不同比例的蚯蚓粪可增加番茄土壤养分并改变土壤环境,但对微生物群落结构的影响不同。刘丽等^[10]发现,与施用牛粪相比,施用蚯蚓粪配施缓释肥可显著增加土壤中全氮、全钾、速效钾、速效磷和有机质等养分含量,对土壤起到很好的培肥作用。杨盼盼等^[11]研究光合细菌菌剂对微生物的影响发现,光合细菌具有调节土壤微生物结构、促进土壤肥力增加的作用,同时可以提高土壤细菌和土壤放线菌的数量,从而增加土壤有益微生物数量,抑制有害真菌的繁殖。Wang等^[12]研究发现,蚯蚓粪的施用通过改善土壤理化性质提高了微生物的多样性和丰富度以及真菌的丰度。苏宏等^[13]研究发现,适量添加葡萄枝条促进了木质素分解菌属相对丰度的增加,优化了土壤真菌群落结构,有利于木质素降解,并形成对病原真菌抑制作用的土壤,降低葡萄感染病害的风险。然而,针对蚯蚓粪、葡萄枝条及菌剂共同施入对土壤生态尤其是真菌群落结构影响的研究较少,因此本试验以施入蚯蚓粪、菌剂和葡萄枝条为研究对象,通过大田试验与高通量测序技术探讨不同施肥处理对根际土壤理化性质、土壤微生物群落特征的影响,以期为深入认识蚯蚓粪、菌剂及枝条还田对土壤质量的影响提供数据支撑。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地位于宁夏回族自治区贺兰山东麓葡萄产区,地理位置为 38°56'N 和 106°04'E,属于宁夏北部平原和山地地貌区,属于温带干旱气候,气候干燥,日照充足,光能资源丰富,全年平均日照时数为 3 039.6 h,日照率为 69%。降水较少,降水量介于 99.7–233.1 mm 之间,蒸

发量远大于降水量,年平均蒸发量为 1 583.2 mm,有利于优质酿酒葡萄种植和酿造。

1.2 材料

1.2.1 样品

葡萄品种为赤霞珠,来自宁夏农垦玉泉营苗木中心的脱毒苗;蚯蚓粪和葡萄枝条渣产自宁夏中青生物技术有限公司,葡萄枝条有经过腐熟和未腐熟两种,光合细菌菌剂产自山西果粟康生物技术有限公司,菌剂包含沼泽红假单胞菌(沼泽红假单胞菌有效活菌数 ≥ 2.0 亿/mL)。

1.2.2 主要试剂和仪器

H₂SO₄、CHClO₄、2,4-二硝基酚指示剂、NaOH 溶液、酒石酸锶钾、钼酸铵-硫酸溶液、钼锶混合液、无磷活性炭粉、NaOH 溶液、饱和 K₂SO₄ 溶液、催化剂和 NH₄OAc 溶液,银川昕泰昌盛生物有限公司; Phusion[®] High-Fidelity PCR Master Mix with GC Buffer, New England Biolabs 公司; GeneJET 胶回收试剂盒, Thermo Scientific 公司; NEBNext[®] Ultra[™] DNA Library Prep Kit for Illumina 建库试剂盒, New England Biolabs 公司。pH 计、电导率仪、分光光度计、凯氏定氮仪和火焰光度计(FP640),上海美谱达仪器有限公司。

1.3 试验设计

试验于 2021 年 4 月至 2022 年 10 月在宁夏回族自治区银川西夏区源石酒庄开展,土壤类型为沙石土壤,砾石含量高,供试品种为七年生酿酒葡萄‘赤霞珠’,株行距为 2.2 m \times 0.8 m,小区面积为 52.8 m²,南北走向。试验采用双因素随机区组设计,共设 7 个处理,分别为常规施肥(CK)、蚯蚓粪+腐熟枝条+100 倍光合细菌菌剂(T1)、蚯蚓粪+腐熟枝条+200 倍光合细菌菌剂(T2)、蚯蚓粪+腐熟枝条+300 倍光合细菌菌剂(T3)、蚯蚓粪+未腐熟枝条+100 倍光合细菌菌剂(A1)、蚯蚓粪+未腐熟枝条+200 倍光合细菌菌剂

(A2)和蚯蚓粪+未腐熟枝条+300 倍光合细菌菌剂(A3),其中每个树池各施入蚯蚓粪和枝条 5 kg,100、200 和 300 倍代表菌剂稀释倍数,每个处理设 3 个重复。试验于 2021 年 4 月 6 日施入蚯蚓粪和葡萄枝条,光合细菌菌剂分别于 6 月 1 日、6 月 15 日和 6 月 30 日进行叶面喷施,每个处理喷施菌剂量为 3 kg。

1.4 土样采集

对收获期根际土壤采用五点取样法,采集 0–20 cm 土壤,挖取葡萄根际 0–20 cm 范围根系土壤,一部分带回土壤实验室进行风干,过 1 mm 筛,用来检测土壤养分指标;另一部分用来检测土壤微生物高通量测序。

1.5 测定项目及方法

1.5.1 土壤理化性质的测定

pH 值和电导率使用 pH 计和电导率仪测定。土壤有机质采用重铬酸钾容量法-外加热法测定,土壤全氮和碱解氮采用凯氏定氮法测定,土壤全磷采用 HClO₄-H₂SO₄ 法测定,土壤有效磷采用 NaHCO₃-钼锶抗比色法测定,土壤速效钾采用 NH₄OAc-火焰光度法测定,上述土壤指标测定方法参照文献[14]。

1.5.2 土壤真菌 DNA 的提取与 PCR 扩增

采用十六烷基三甲基溴化铵法(hexadecyltrimethyl ammonium bromide, CTAB)对样本的基因组 DNA 进行提取,之后采用琼脂糖凝胶电泳检测 DNA 的纯度和浓度,取适量的样品于离心管中,使用无菌水稀释样品至 1 ng/ μ L,稀释后的基因组 DNA 为模板;根据测序区域的选择,使用带 Barcode 的特异引物,使用高效和高保真的酶进行 PCR,确保扩增效率和准确性。PCR 反应体系(30 μ L): Phusion[®] High-Fidelity PCR Master Mix 15 μ L,上、下游引物(0.2 μ mol/L)各 1 μ L,基因组 DNA 模板(10 ng/ μ L) 1 μ L, ddH₂O 补足 30 μ L。PCR 反应

条件: 98 °C 1 min; 98 °C 10 s, 50 °C 30 s, 72 °C 30 s, 30 次循环; 72 °C 5 min。上游引物序列为 5'-GGAAGTAAAAGTCGTAACAAGG-3', 下游引物序列为 5'-GCTGCGTTCTTCATCGAT GC-3'^[15]。

PCR 产物使用 2%的琼脂糖凝胶进行电泳检测, 使用 GeneJET 胶回收试剂盒回收产物。

使用 NEBNext® Ultra™ DNA Library Prep Kit for Illumina 建库试剂盒进行文库的构建, 构建好的文库经过 Qubit 进行定量和文库检测, 合格后使用 MiSeq 进行上机测序。

1.6 数据处理

利用 Excel 2022 和 SPSS 22.0 软件对数据进行处理与分析, 采用单因素方差分析进行 Duncan 检验; 利用 Origin 2020 绘制 OTU 稀释曲线、花瓣图、 α 多样性箱线图、土壤真菌门、目和属水平物种组成柱状图以及属水平双聚类热图。

2 结果与分析

2.1 不同施肥处理的根际土壤理化性质差异

由图 1A 可知, 各处理葡萄根际土壤 pH 值表现为 T1>A1>A3>CK>T3>T2>A2, 与 CK (8.45) 相比, T3、T2 和 A2 处理土壤 pH 值分别降低 0.12%、1.78%和 2.84%, T1、A1 和 A3 处理土壤 pH 值均有所提高, 处理间变化不显著, 以 T1、A1 处理土壤 pH 值最高, 分别为 8.65、8.55, 分别提高 23.67%、1.18%。由图 1B 可知, 根际土壤电导率 (elemental chlorine, EC) 表现为 A2>T2>T3>A1>A3>T1>CK, 与 CK (195.50 $\mu\text{s}/\text{cm}$) 相比, 各处理土壤 EC 值均有所提高, 其中 A2 和 T2 处理土壤 EC 值最高, 分别为 272.00 $\mu\text{s}/\text{cm}$ 和 249.00 $\mu\text{s}/\text{cm}$, 分别提高 39.13%和 27.37%。

如图 2A 所示, 各处理土壤全磷含量表现为 A3>T2>CK>T1>T3>A1>A2, 依次分别为 0.42、0.40、0.38、0.37、0.34、0.29 和 0.25 g/kg,

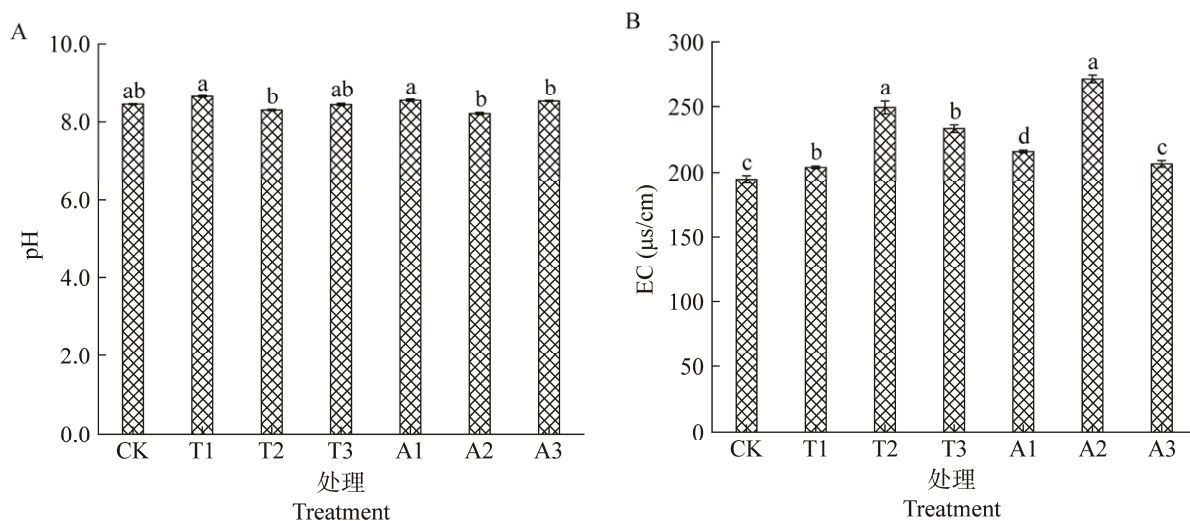


图 1 不同施肥处理对葡萄根际土壤 pH (A)及 EC (B)的影响 图中小写字母表示不同处理之间的显著性差异, 显著水平为 0.05. 下同

Figure 1 Effects of different fertilization treatments on pH (A) and EC (B) of grape rhizosphere soil. Lowercase letters in the graphs indicate significant differences between treatments at the 0.05 level of significance. The same below.

与CK相比, A3、T2处理土壤全磷含量最高, 依次分别提高10.53%、5.71%, A2处理土壤全磷含量最低, 降低34.21%。由图2B可知, 各处理土壤速效磷含量表现为A2>T1>T2>T3>CK>A1>A3, 与CK(15.60 mg/kg)相比, 除A1、A3处理外, 其他处理的土壤有效磷含量均有所提高, 分别为24.88、23.77、20.06和15.97 mg/kg, 依次分别提高59.49%、52.37%、28.59%和2.37%。

如图3A所示, 各处理葡萄根际土壤全氮含量表现为T2>A2>T3>A1>A3=CK>T1, 与CK(0.49 g/kg)相比, 除T1处理外, 其他各处理的土壤全氮含量均有所提高, 依次为0.65、0.62、0.57和0.55 g/kg, 其含量依次提高32.65%、26.53%、16.33%和12.24%。由图3B可知, 土壤碱解氮含量表现为T3>T1>T2>A2>CK>A3>A1, 与CK(39.61 mg/kg)相比, T3、T2、T1和A2处

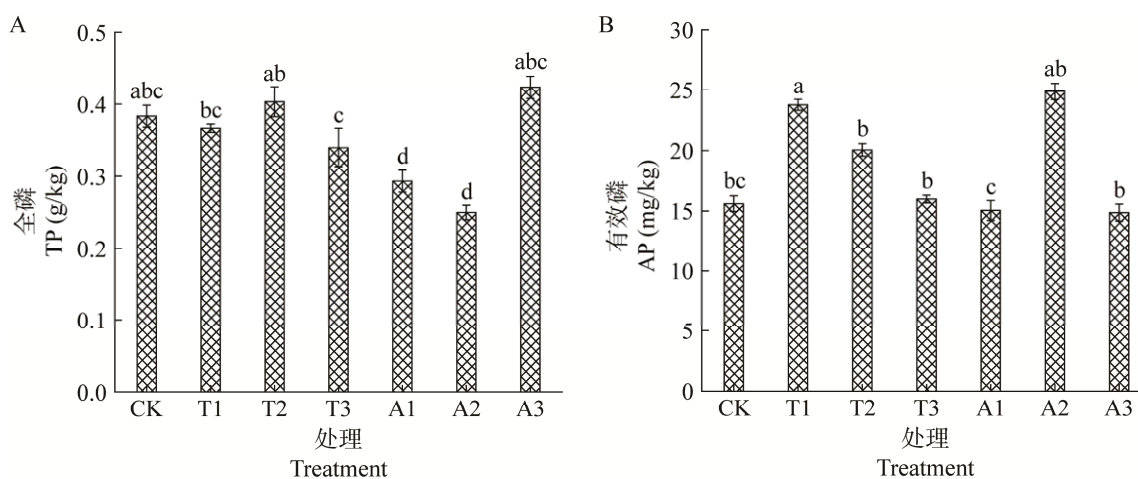


图2 不同施肥处理对葡萄根际土壤全磷(A)及有效磷(B)的影响

Figure 2 Effects of different fertilization treatments on total phosphorus (A) and available phosphorus (B) in grape rhizosphere soil.

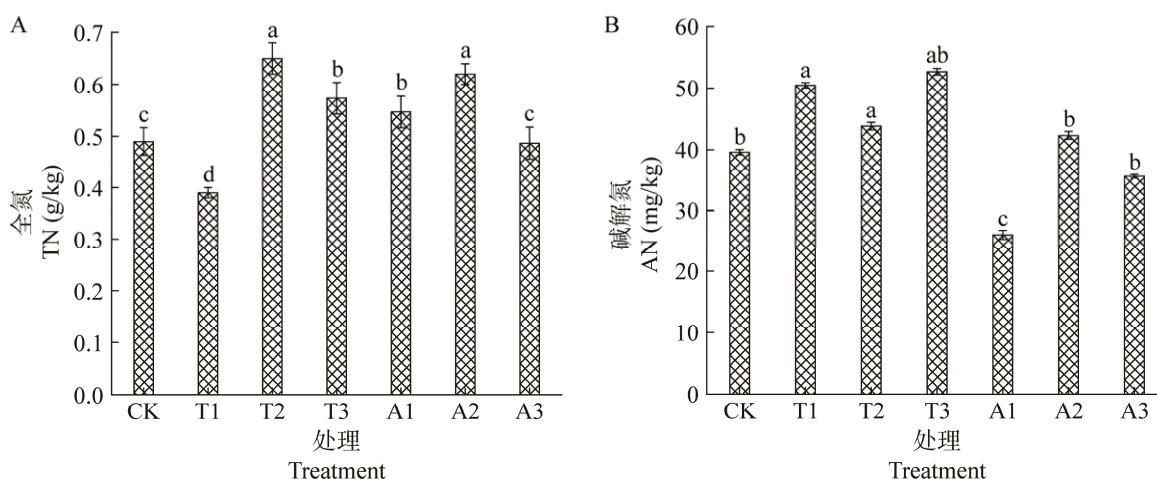


图3 不同施肥处理对葡萄根际土壤全氮(A)及碱解氮(B)的影响

Figure 3 Effects of different fertilization treatments on total nitrogen (A) and alkali-hydrolyzable nitrogen (B) in grape rhizosphere soil.

理土壤碱解氮含量均有所提高,依次为 52.71、50.48、43.80 和 42.32 mg/kg,其含量依次提高 32.07%、27.44%、10.58%和 6.84%,A1 处理土壤碱解氮含量最低,为 25.98 mg/kg,降幅为 34.41%。

由图 4A 可知,各处理葡萄根际土壤速效钾含量表现为 T2>T1>CK>A2>T3>A3>A1,依次为 420.00、355.00、323.00、301.00、285.00、284.00 和 266.00 mg/kg,与 CK 相比,T2、T1 处理的土壤速效钾含量提高 30.03%、9.91%,而其他处理的土壤速效钾含量均降低,分别降低 6.81%、11.76%、12.07%和 17.65%。由图 4B 可知,各处理土壤有机质含量表现为 T1>T2>A2>T3>A1>A3>CK,其含量依次为 6.49、6.13、5.77、5.46、5.40、5.35 和 5.34 g/kg,与 CK 相比,各处理土壤有机质含量均有所提高,分别提高 21.54%、14.79%、8.05%、2.25%、1.12%和 0.19%,其中 T1、T2 处理土壤有机质含量最高。

综上所述,施用腐熟枝条优于未腐熟枝条,200 倍稀释倍数较好,T2 处理可提高土壤养分含量。

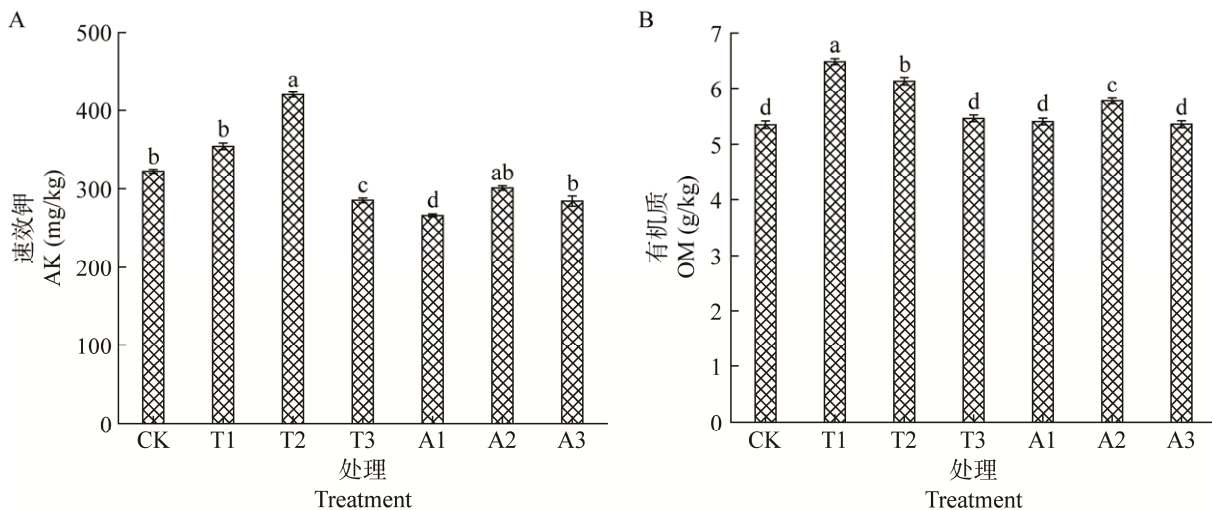


图 4 不同施肥处理对葡萄根际土壤速效钾(A)及有机质(B)的影响

Figure 4 Effects of different fertilization treatments on available potassium (A) and organic matter (B) in grape rhizosphere soil.

2.2 不同施肥处理对根际土壤样本真菌测序深度及测序结果的分析

稀释曲线(rarefaction curve)即土壤取样的深度,说明取样是否合理、土壤微生物群落结构是否能涵盖所有微生物的多样性。如图 5 所示,样本序列数相似度为 97%的情况下,随着样本序列数的增加,7 个处理的 observed 稀释曲线呈现平缓趋势;样本序列数在 30 000 左右时,分类操作单元(operational taxonomic unit, OTU)数目基本达到饱和状态,说明该试验测序深度较为合理,可信度高,可真实地反映这 21 个土壤样本的真菌群落组成。

2.3 不同施肥处理对根际土壤真菌花瓣图分析

由图 6 可知,7 个处理共产生的 OTU 数目为 3 359 个,各处理间共同具有的 OTU 数目为 360 个,占 OTU 总数目的 10.72%,CK、T1、T2、T3、A1、A2 和 A3 处理特有的 OTU 数目分别为 164、109、65、137、80、144 和 140 个,分别占 OTU 总数目的 19.55%、12.99%、7.75%、16.33%、9.54%、17.16%和 16.69%。7 个处理

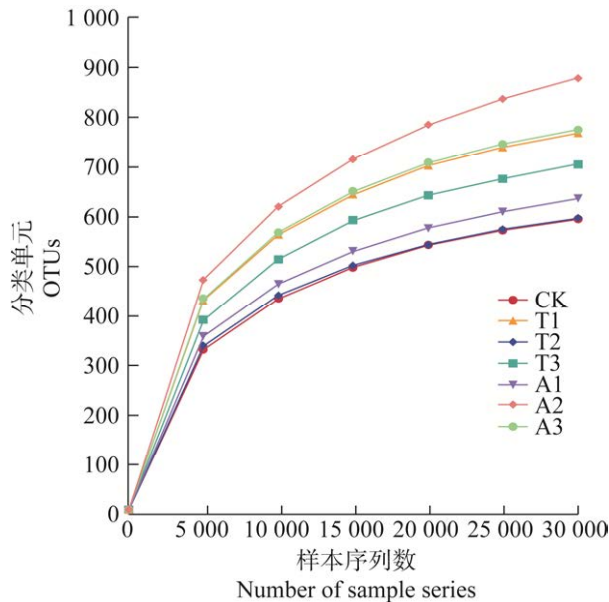


图5 操作分类单元的 observed 稀疏曲线

Figure 5 Observed coefficient curve of operational taxonomic units (OTUs).

所包含的 OTU 数目和特有的 OTU 数目均以 CK 最多、T2 最少; 与 CK 相比, 各处理中的 OTU 数目均呈下降趋势, 且分别降低 33.54%、60.37%、16.46%、12.20%、14.63%和 4.58%。

2.4 不同施肥处理对根际土壤真菌群落多样性的影响分析

如图 7 所示, 土壤真菌丰富度指真菌群落种类的数目, Chao1 和 Observed_species 指数可表示该样本群落的丰富度。7 个处理的 Chao1、Observed_species 指数均表现为 CK<T2<A1<T3<A3<T1<A2; 与 CK 相比, A2 处理的土壤真菌 Chao1、Observed_species 指数最高, 分别增加 89.31%、47.30%。Shannon 或 Simpson 指数值越高, 表明群落的多样性越高。7 个处理的 Shannon 指数表现为 A2>T1>A3>T3>CK>T2>A1, 与 CK (4.914 4) 相比, T2、A2 处理的 Shannon 指数减小, 其他处理的 Shannon 指数均增大, 以 A2 处理的 Shannon 指数最大, 为 5.434 3, 增幅为 10.58%, A1 处理的 Shannon 指数最小,

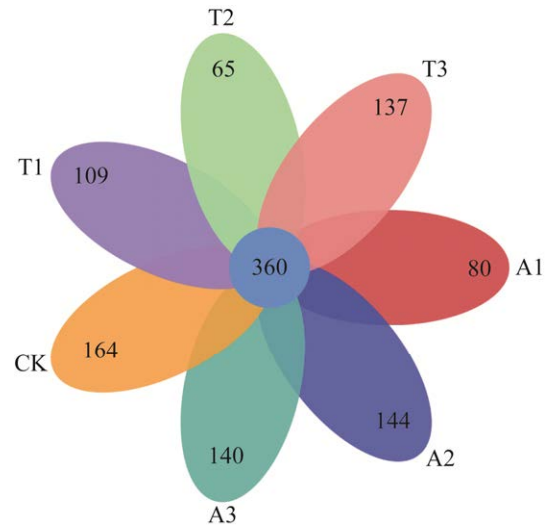


图6 不同施肥处理根际土壤的真菌 OTU 分布花瓣图

Figure 6 Petal diagram of fungal OTUs distribution in rhizosphere soil under different fertilization treatments.

为 4.565 1, 其降幅为 7.11%; 各处理的 Simpson 指数表现为 T3>T1>A2>CK>A3>T2>A1, 与 CK (0.907 4) 相比, T3、T1 和 A2 处理的 Simpson 指数均增加, 其中 T1、A2 两个处理的 Simpson 指数大小相差不大, 分别为 0.920 8、0.920 7, 增幅分别为 1.48%、1.47%。

基于 β 多样性距离的非度量多维尺度分析 (non-metric multi-dimensional scaling, NMDS) 比较各试验处理间土壤真菌在组内和组间的差异。如图 8 所示, NMDS 图谱显示不同处理的重复基本聚在一起表明样品重复性较好。A3 和 T3 处理样本间的真菌群落沿 NMDS2 方向差距明显, CK 处理样本间的真菌群落沿 NMDS1 方向差距明显, 表明施肥对土壤真菌群落结构组成产生了影响。

2.5 不同施肥处理对根际土壤真菌群落结构组成及相对丰度的影响分析

由图 9 可知, 子囊菌门 (*Ascomycota*)、担子菌门 (*Basidiomycota*)、壶菌门 (*Chytridiomycota*)

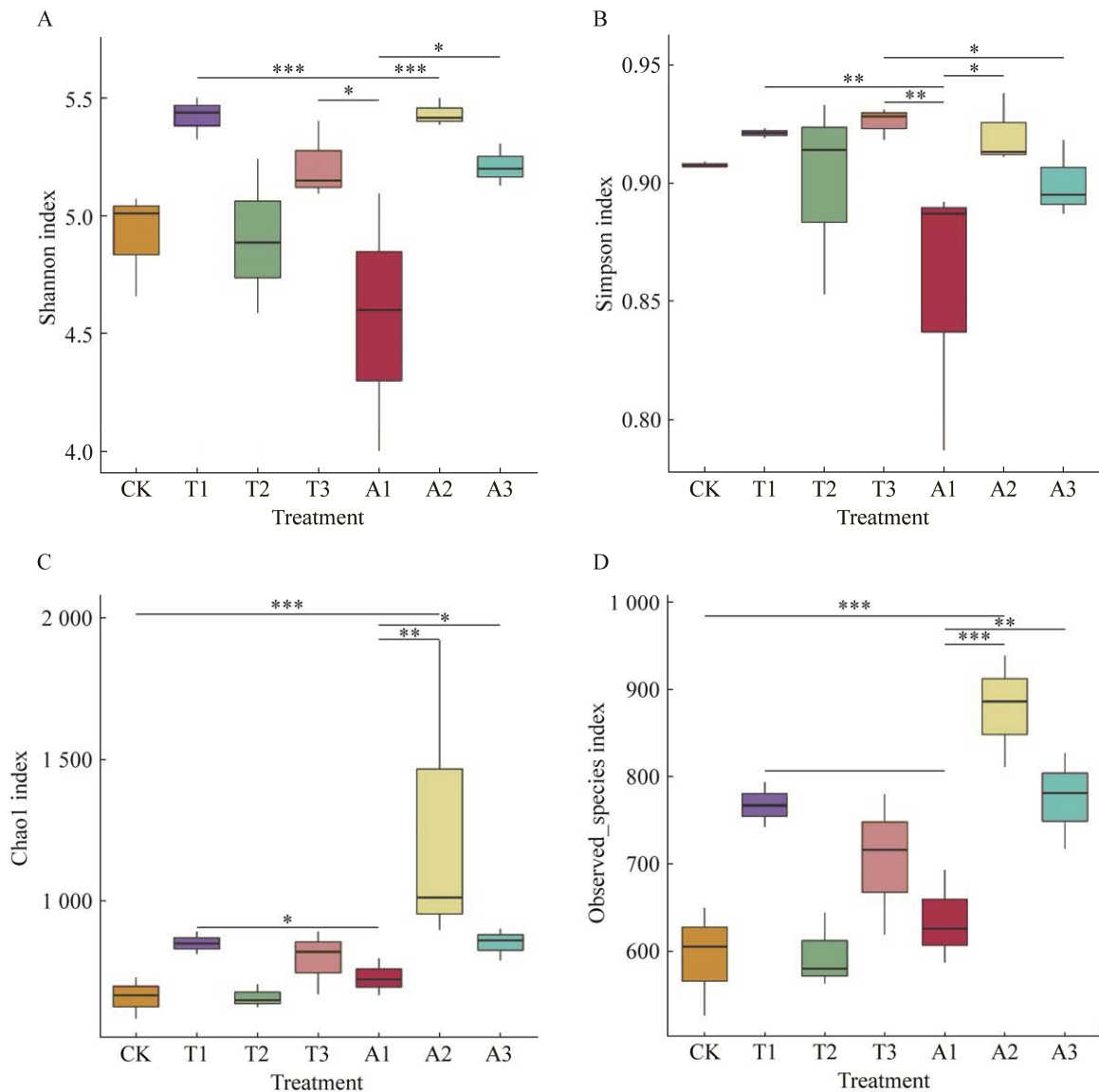


图7 不同施肥处理根际土壤真菌群落 α 多样性指数分组箱式图

Figure 7 Grouping box plot of alpha diversity index of rhizosphere soil fungal community under different fertilization treatments. A: Shannon index. B: Simpson index. C: Chao1 index. D: Observed_species index. *: $P=0.071$; **: $P=0.22$; ***: $P=0.034$.

和被孢霉门(*Mortierellomycota*)均为7个处理的优势菌, 占总相对丰度的74.40%–86.97%。各处理土壤子囊菌门(*Ascomycota*)相对丰度表现为A1>CK>T1>A2>A3>T2>T3, 与CK(73.5%)相比, A1处理子囊菌门相对丰度最高, 增幅为6.85%, T3处理其相对丰度显著低于其他处理,

降幅为12.16%。不同处理土壤*Basidiomycota*相对丰度表现为T2>CK>A1>T3>A3>A2>T1, 与CK(6.10%)相比, T2处理担子菌门相对丰度最高, 为9.91%, 增幅为62.46%, 其他各处理的担子菌门相对丰度均减小, 其中T1处理最小, 为1.64%, 降幅为73.11%。各处理*Chytridiomycota*

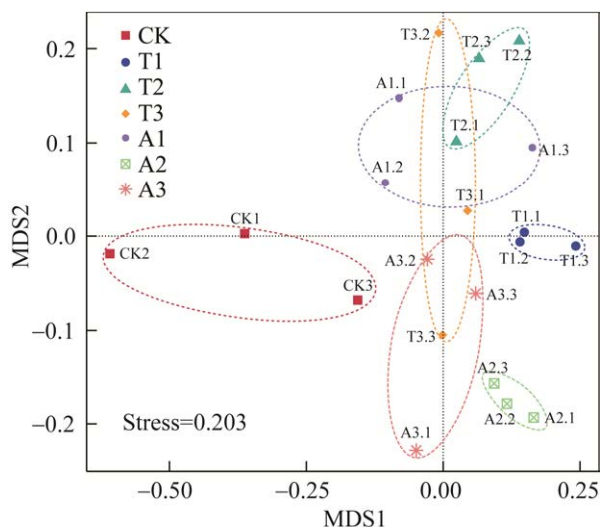


图 8 不同施肥处理根际土壤真菌群落 NMDA 分析
Figure 8 NMDA analysis of inter-root soil fungal communities in different fertilization treatments.

相对丰度表现为 T3>CK>T1>T2>A1>A3>A2, 与 CK (2.64%)相比, T3 处理壶菌门相对丰度最高, 为 4.04%,增幅为 53.03%。各处理 *Mortierellomycota* 相对丰度表现为 A2>A3>T3>T1>CK>T2>A1, 与 CK (2.56%)相比, 除 T2、A1 处理外, 各

理被孢菌门相对丰度均提高, 其中 A2 处理的相对丰度最高, 为 5.30%, 增幅为 107.03%。

由图 10 可知, 不同处理赤霉属(*Gibberella*) 相对丰度表现为 A3>CK>T2>T1>A2>A1>T3, 各处理间赤霉属相对丰度无显著差异, 与 CK (25.87%)相比, A3 处理的赤霉属相对丰度最大, 为 28.62%, 增加 10.63%, T3 处理的相对丰度最小, 为 20.11%, 降低 22.27%。各处理链格孢属(*Alternaria*)相对丰度表现为 A1>T3>T1>T2>CK>A2>A3, 与 CK (1.73%)相比, A1 处理的相对丰度最高, 为 11.17%, 提高 545.66%。各处理镰刀菌属(*Fusarium*)相对丰度表现为 T2>A3>CK>A1>A2>T3>T1, 与 CK (7.77%)相比, T2、A3 处理的镰刀菌属相对丰度分别为 10.74%、10.69%, 分别提高 38.22%、37.58%。各处理毛壳菌属(*Chaetomium*)相对丰度表现为 CK>A2>T3>A3>T1>A1>T2, 与 CK (0.11%)相比, 各处理毛壳菌属均降低, 除 CK 外, A2 处理毛壳菌属相对丰度最大, 为 0.10%, 较 CK 减少 9.10%。

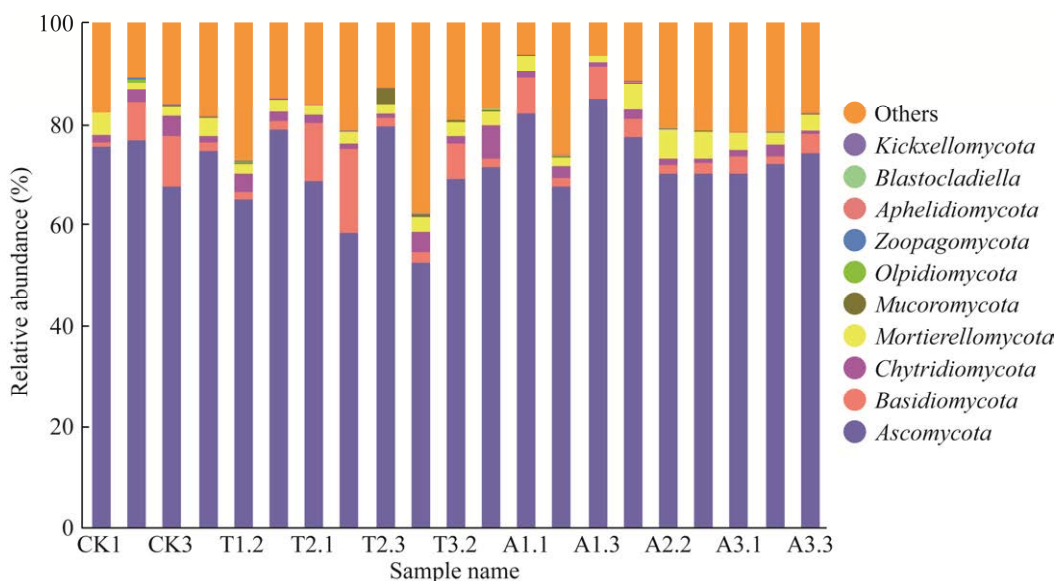


图 9 不同处理土壤真菌门水平组成及相对丰度

Figure 9 Composition and relative abundance of soil fungi phylum level in different treatments.

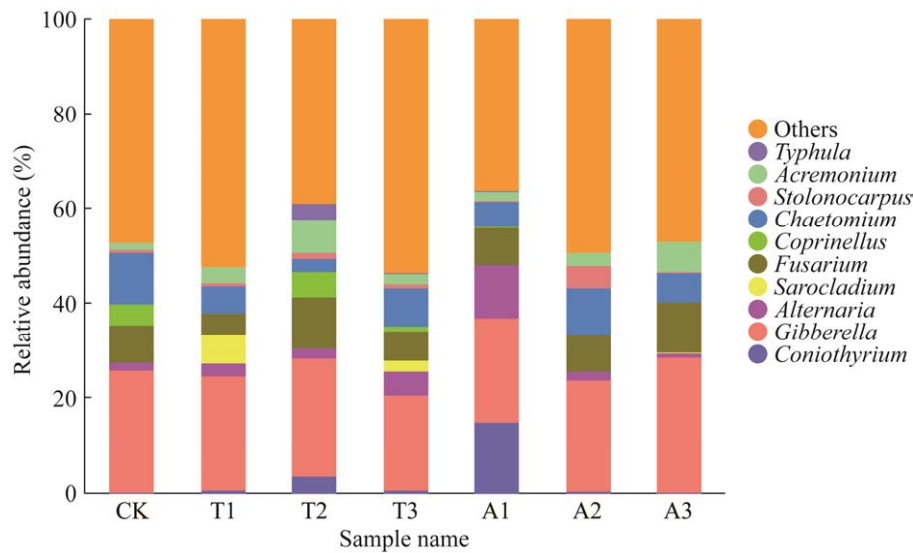


图 10 不同处理土壤真菌属水平组成及相对丰度

Figure 10 Genus-level composition and relative abundance of soil fungi genus level in different treatments.

2.6 不同施肥处理的葡萄根际土壤真菌属分类水平类群比较

由图 11 可知, 各处理葡萄根际土壤中真菌属间存在明显差异, 且不同处理葡萄土壤真菌群落可分为四大类, 分别为 T1 处理为一类, A3、CK、A2 处理归为一类, T2 为一类, T3、A1 处理归为一类。其中, T1 处理的笋顶孢属(*Acrostalagmus*)、枝穗霉(*Clonostachys*)、帚枝霉属(*Sarocladium*)、腐质霉属(*Humicola*)丰富度较高, A3 处理的镰刀菌属(*Fusarium*)、支顶孢属(*Acremonium*)、赤霉属(*Gibberella*)、*Leptasphaeria*、赭马勃属(*Calvatia*)、*Pseudobensingtonia* 丰富度最高, CK 处理的 *Coprinellus*、*Gaertneriomyces*、毛壳菌属(*Chaetomium*)、头束霉(*Cephalotrichum*)、*Cladorrhinum*、长胸肿腿金小蜂属(*Heydenia*)、假裸囊菌属(*Pseudogymnoascus*)丰富度最高, A2 处理的毛壳菌属(*Chaetomium*)、头束霉属(*Cephalotrichum*)、*Cladorrhinum*、f_*Nectriaceae*、*Stolonocarpus*、被孢霉属(*Mortierella*)、葡萄穗霉属(*Stachybotrys*)丰富度最高, T2 处理的

Coprinellus、核线菌属(*Typhula*)、根霉属(*Rhizopus*)、镰刀菌属(*Fusarium*)、支顶孢属(*Acremonium*)、黑孢壳属(*Melanospora*)、*Titaeta* 丰富度最高, T3 处理的网孢菌属(*Filobasidium*)、f_*Microascaceae*、根囊壶菌属(*Rhizophlyctis*)、枝孢霉属(*Cladosporium*)、曲霉属(*Aspergillus*)丰富度最高, A1 处理的网孢菌属(*Filobasidium*)、角担菌属(*Ceratobasidium*)、盾壳霉属(*Coniothyrium*)、链格孢属(*Alternaria*) 丰富度最高。

2.7 不同施肥处理间产量差异

由表 1 可知, 各处理葡萄产量表现为 T2>A2>T3>A1>A3>T1>CK, 与 CK 相比, 各处理均显著提高了葡萄产量, 其中 T2 处理产量最高, 提高 19.34%。

2.8 土壤理化性质、真菌优势菌群、真菌多样性和产量间的相关性分析

2.8.1 土壤真菌优势菌属与土壤理化性质相关性分析

通过 Pearson 秩相关(表 2)来研究不同处理下土壤理化性质与真菌优势菌群的相关性, 得到两两之间的相关性和显著性 *P* 值。结果显示

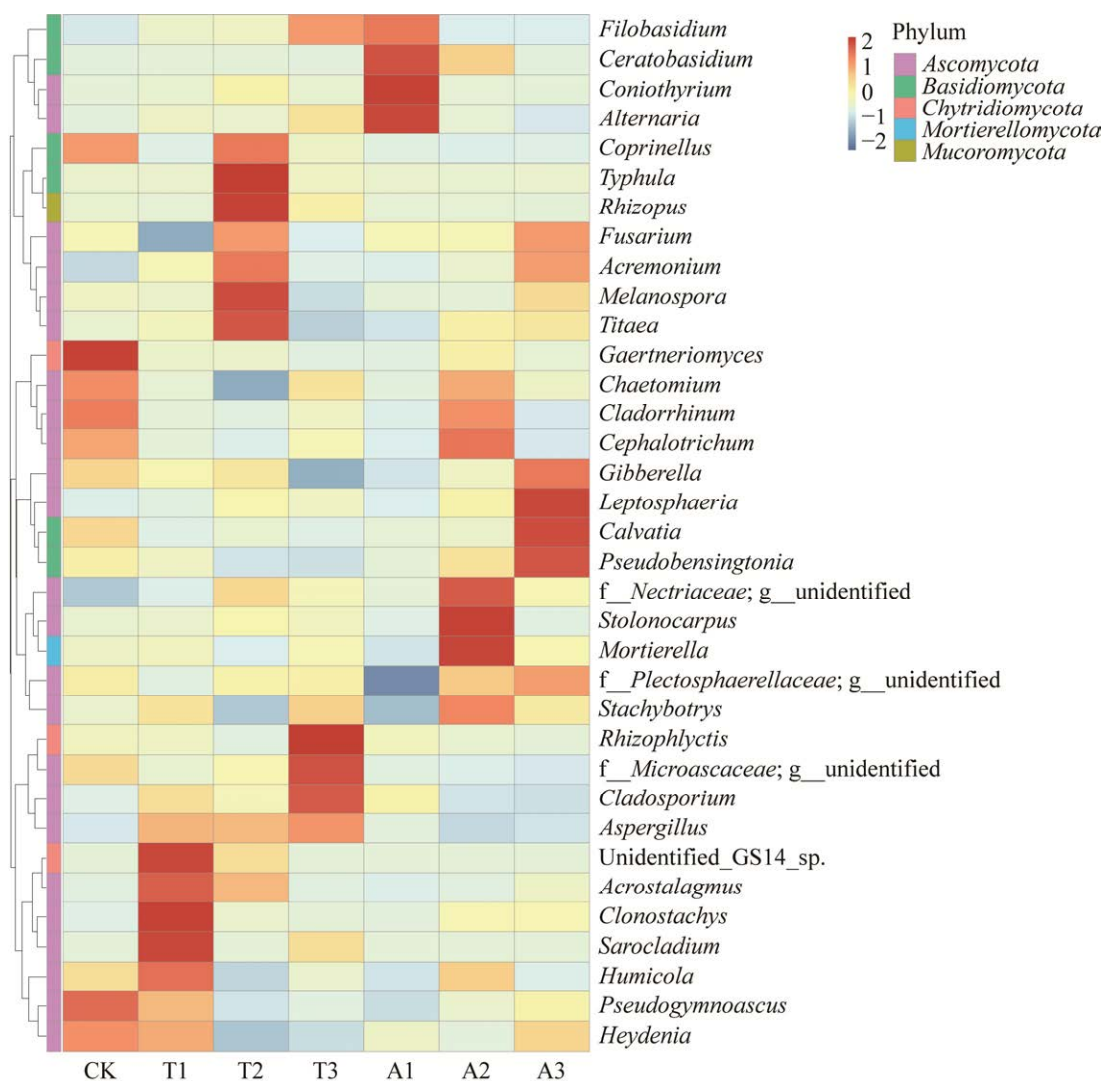


图 11 真菌属分类水平物种组成双聚类图

Figure 11 Biclustering map of species composition at the taxonomic level of the genus.

表 1 不同处理葡萄产量

Table 1 Grape yield under different treatments

处理	产量	单价	产值	成本	收益
Treatment	Yield (kg/hm ²)	Price (CNY/kg)	Output value (CNY/hm ²)	Cost (CNY/hm ²)	Profit (CNY/hm ²)
CK	6 960.15±48.97c	7.5	52 201.20	16 200	36 001.20
T1	7 263.00±33.44b	7.5	54 472.50	18 975	35 497.50
T2	8 306.40±30.19a	7.5	62 298.00	19 275	43 023.00
T3	7 753.50±46.13a	7.5	58 151.25	19 575	38 576.25
A1	7 027.95±36.67a	7.5	57 209.70	18 975	38 234.70
A2	7 984.80±39.42b	7.5	59 886.00	19 275	40 611.00
A3	7 350.00±34.56a	7.5	55 125.00	19 575	35 550.00

不同小写字母表示不同处理间差异显著(P<0.05)

Different lowercase letters indicate significant differences between different treatments (P<0.05).

表 2 不同施肥处理下葡萄土壤理化性质与真菌优势菌属的 Pearson 相关性分析

Table 2 Pearson correlation analysis between soil chemical properties and dominant fungal genera in grapevine under different fertilization treatments

Item	pH	EC	TP	AP	TN	AN	AK	OM
<i>Coniothyrium</i>	0.06	-0.01	-0.10	-0.18	0.19	-0.39*	-0.14	-0.13
<i>Gibberella</i>	0.08	-0.16	0.17	0.01	-0.21	-0.09	0.13	0.03
<i>Alternaria</i>	0.21	-0.05	-0.36*	-0.24	0.06	-0.31	-0.28	-0.18
<i>Sarocladium</i>	0.43*	-0.17	0.02	0.23	0.54**	0.43*	0.09	0.44*
<i>Fusarium</i>	-0.24	0.10	0.27	-0.26	0.39*	-0.45*	0.12	-0.28
<i>Coprinellus</i>	-0.19	-0.01	0.49*	-0.09	0.15	0.05	0.43*	0.01
<i>Chaetomium</i>	-0.12	-0.04	-0.47*	0.01	-0.14	0.09	-0.38*	-0.32
<i>Stolonocarpus</i>	-0.48*	0.46*	-0.34	0.38*	0.29	0.10	0.03	0.00
<i>Acremonium</i>	0.01	0.02	0.43*	-0.10	0.06	-0.10	0.21	0.05
<i>Typhula</i>	0.09	-0.12	0.34	-0.21	-0.02	-0.15	-0.13	-0.20

*: $P < 0.05$; **: $P < 0.01$. The same below.

pH 与 *Stolonocarpus* 呈显著负相关, 而与 *Sarocladium* 呈显著正相关; EC 与 *Stolonocarpus* 呈显著正相关; 全磷与 *Alternaria*、*Chaetomium* 呈显著负相关, 与 *Coprinellus*、*Acremonium* 呈显著正相关; 有效磷与 *Stolonocarpus* 呈显著正相关; 全氮与 *Sarocladium* 呈极显著正相关, 而与 *Fusarium* 呈显著正相关; 碱解氮与 *Coniothyrium*、*Fusarium* 呈显著负相关, 而与 *Sarocladium* 呈显著正相关; 速效钾与 *Coprinellus* 呈显著正相关, 而与 *Chaetomium* 呈显著负相关; 有机质与 *Sarocladium* 呈显著正相关。各处理土壤全磷、有效磷、碱解氮是影响土壤真菌微生物种丰富度及真菌优势菌群的土壤养分因子。

2.8.2 土壤真菌多样性、产量与土壤理化性质相关性分析

土壤理化性质与真菌多样性、产量的 Pearson 相关性结果显示(表 3), EC 与 Chao1 呈显著正相关, 而与产量呈极显著正相关; 全磷与产量呈显著正相关; 有效磷与 Chao1 和 Simpson 呈显著正相关, 而与 Observed_species 呈极显著正相关; 全氮与 Chao1 呈显著负相关; 碱解氮与 Shannon 和 Simpson 呈极显著正相关。各处理

EC、有效磷、全氮和碱解氮是影响真菌多样性的养分因子, 而 pH、EC 和全磷是影响葡萄产量的养分因子。

2.8.3 葡萄产量与土壤理化性质、真菌多样性相关性分析

葡萄产量与土壤理化性质、真菌多样性的 Pearson 相关性结果显示(表 4), pH 与产量呈显著正相关, 而 EC、全氮与产量呈极显著正相关, 各处理 EC 和全氮是与产量密切相关的因子。

表 3 不同施肥处理下土壤理化性质与真菌多样性及产量的 Pearson 相关性分析

Table 3 Pearson correlation analysis of soil chemical properties with fungal diversity and yield under different fertilization treatments

Item	Chao1	Observed_s	Shannon	Simpson	Yield
pH	-0.364	-0.159	-0.141	-0.068	-0.458*
EC	0.448*	0.361	0.151	0.201	0.614**
TP	0.11	-0.095	-0.12	-0.233	0.525*
AP	0.493*	0.529**	0.324	0.499*	-0.287
TN	-0.448*	0.363	0.071	-0.049	-0.287
AN	0.102	0.191	0.612**	0.551**	0.083
AK	-0.185	-0.284	0.154	0.023	0.247
OM	0.092	0.161	0.265	0.349	0.237

表 4 不同处理葡萄产量与土壤理化性质、真菌多样性的 Pearson 相关性分析

Table 4 Pearson correlation analysis of grape yield with soil chemical properties and fungal diversity in different treatments

Item	<i>r</i>
pH	0.458*
EC	0.614**
TP	-0.287
AP	0.247
TN	0.525**
AN	0.083
AK	0.247
OM	0.237
Chao1	0.111
Observed_s	0.031
Shannon	-0.016
Simpson	0.000

3 讨论

3.1 不同施肥处理对根际土壤理化性质的影响

土壤养分不仅是作物生长所需营养元素的重要来源, 还是土壤理化性质和生物学特征的综合反映, 土壤肥力是土壤质量的核心基础和本质属性, 土壤养分水平是评价土壤肥力状况的重要指标^[16-17]。在大田生产过程中存在着诸多问题, 如长期单施化肥或滥用化肥等导致土壤板结严重、肥力下降、养分失衡, 以及植物根系自我调节能力下降^[18]。

本试验中, 除施用未腐熟枝条 A2 处理外, 其他处理土壤 pH 值均提高, 且处理间差异不显著, 除常规施肥外, 其他处理土壤 EC 含量均显著提高, 与徐丽萍等^[19]、秦永美^[20]、王娟娟等^[21]研究结果相似, 这主要与施肥的试验土壤、施肥类型、施肥量及反应机理不同有关。周进^[22]通过研究微生物菌肥配施对葡萄土壤养分的影响发现, 微生物肥配施减量化肥能提高

土壤全氮及有机质含量, 与本试验研究结果一致, 而全磷研究结果不一致, 本试验中部分处理全磷含量降低, 原因可能是腐熟和未腐熟的枝条还田处理导致磷含量降低^[23]。范晓晖等^[24]研究结果表明, 化肥减量配施有机肥能有效提高土壤有机质含量, 以有机肥、复合肥配施硫酸钾效果最佳, 与本试验各处理均能促进土壤有机质含量的研究结果相似。由此可见, 配合施肥能提高土壤各种养分含量, 这与陈桂芬等^[25]研究有机无机配施对连作土壤养分变化的结果相似。赵永鑫等^[26]的研究结果表明, 在相同氮量条件下, 蚯蚓粪替代少量化肥改善了土壤化学性状, 土壤全氮、速效磷、速效钾及有机质含量显著增加, 与本研究结果一致, 主要原因是配合施肥后可增加土壤有机质含量, 促进土壤微生物环境得到改善, 使土壤中各种养分进行转化。游浩宇等^[27]研究结果表明, 基地原土基础上掺混蚯蚓粪和猕猴桃枝条可增加土壤全氮、碱解氮和有效磷养分, 显著提高土壤有机质含量, 与本试验研究结果一致, 而土壤速效钾含量变化与本试验施用蚯蚓粪、葡萄枝条和菌剂配合施肥的研究结果不一致, 原因可能是蚯蚓粪施入量过高所导致, 使蚯蚓粪中的钾元素未能及时转化为速效养分供植物吸收利用^[28]。

3.2 不同施肥处理对根际土壤真菌多样性的影响

土壤微生物在土壤微生态中起着至关重要的作用, 影响土壤理化性质, 参与土壤养分循环, 改善土壤肥力, 在物质循环和能量转化过程中, 如土壤养分合成与利用、土壤微生物参与土壤有机质分解转化、土壤团聚体形成等方面, 不仅与土壤进行生化反应, 而且是土壤的重要组成部分, 对维持土壤质量和促进植物生长有重要影响, 被认为是表征土壤质量变化最

有潜力的指标^[29-32]。有研究表明,土壤有机质含量与土壤多样性呈正相关,有机质含量提高,则土壤多样性增加^[33]。A2处理真菌多样性明显高于CK,研究发现^[34]可能是因为土壤pH值降低,进而刺激适宜酸性环境真菌的生长繁殖,与CK相比,A2处理有机质含量有所提高,且土壤pH值下降,使适宜在酸性环境生长的真菌数量增加,从而使真菌多样性指数得到提高。

3.3 不同施肥处理根际土壤养分对真菌群落的影响

土壤理化性质对真菌群落影响较大,本试验研究表明,全氮是影响真菌群落结构的主要因子。王楠等^[35]通过Pearson相关性分析发现,土壤全氮含量是影响真菌群落结构的主要养分因子,这一结论与本研究结果一致。席凯鹏等^[36]的研究结果表明,长期棉花秸秆配施有机肥中土壤pH是影响棉花产量的有效养分因子;郭鹏飞^[37]研究有机肥对酿酒葡萄土壤微生物及产量的影响中发现,全氮是影响酿酒葡萄的主导因子,这与本试验研究结果一致。本试验中,土壤子囊菌门、担子菌门和被孢霉门均为各处理优势菌门,与常芳娟等^[38]研究结果一致。另外,各处理土壤子囊菌门和担子菌门有所增加,而被孢菌门有所减少,这与马奎^[39]研究结果相似。有研究表明,在土壤木质素含量中子囊菌门和担子菌门为优势菌,大部分为土壤腐生真菌,起着分解各类复杂化合物及有机质的作用^[40],子囊菌门和担子菌门的相对丰度增加可能是土壤中的有机物质促进了腐生真菌的活动而导致的,为子囊菌门提供了适宜条件,使得子囊菌门丰富度得到提高,有利于土壤残渣的分解,提高土壤养分^[38]。毛壳菌属于生防菌的一种,具备降解木质素和纤维素的能力;*Fusarium*会引起植物的根腐病,在葡萄种植中,根腐病是由真菌引起、危害植物根部的一种植物常见病害,

严重影响葡萄的生长^[41]。综上所述,不同施肥处理对微生物群落的影响不同。因此,关于枝条还田及有机肥的综合效应改善土壤真菌群落结构组成的内在机制需要进一步的研究。

4 结论

研究施肥对葡萄根际土壤真菌群落结构的变化特征对葡萄种植具有重要意义。本试验通过高通量测序技术探索不同施肥处理对土壤理化性质及真菌群落结构的影响,得出以下结论:T2、A2处理均能提高葡萄根际土壤理化性质,增加土壤真菌群落丰富度及多样性;不同处理根际土壤优势真菌分别为子囊菌门和担子菌门,属水平下赤霉菌属为优势菌属;各处理均提高葡萄产量。

REFERENCES

- [1] 李博. 施用蚯蚓粪对葡萄生长品质及土壤的影响研究[D]. 天津: 天津农学院硕士学位论文, 2020.
LI B. Study on the effect of applying earthworm manure on grape growth quality and soil[D]. Tianjin: Master's Thesis of Tianjin Agricultural University, 2020 (in Chinese).
- [2] 刘俊, 晁无疾, 亓桂梅, 刘寅喆, 汉瑞峰. 蓬勃发展的中国葡萄产业[J]. 中外葡萄与葡萄酒, 2020(1): 1-8.
LIU J, CHAO WJ, QI GM, LIU YZ, HAN RF. Booming development of Chinese grape industry[J]. Sino-Overseas Grapevine & Wine, 2020(1): 1-8 (in Chinese).
- [3] 晁无疾. 中国葡萄品牌建设现状及发展展望[J]. 中外葡萄与葡萄酒, 2016(5): 135-140.
CHAO WJ. Present situation and development prospect of grape brand construction in China[J]. Sino-Overseas Grapevine & Wine, 2016(5): 135-140 (in Chinese).
- [4] 钟延平, 赵胜利, 刘俊, 张欣. 我国酿酒葡萄引种及品种选育概况[J]. 农业科技通讯, 2020(9): 214-220.
ZHONG YP, ZHAO SL, LIU J, ZHANG X. Introduction and variety selection of wine grapes in China[J]. Bulletin of Agricultural Science and Technology, 2020(9): 214-220 (in Chinese).
- [5] 沙海宁, 孙权, 周明, 王振平, 王国珍, 张晓娟, 郭洁. 宁夏贺兰山东麓酿酒葡萄园土壤酶活性分析[J].

- 中外葡萄与葡萄酒, 2010(3): 13-17, 22.
- SHA HN, SUN Q, ZHOU M, WANG ZP, WANG GZ, ZHANG XJ, GUO J. Enzyme activity of wine grape planting soil at the eastern foot of Helan Mountain in Ningxia[J]. Sino-Overseas Grapevine and Wine, 2010(3): 13-17, 22 (in Chinese).
- [6] 王锐. 贺兰山东麓土壤特征及其与酿酒葡萄生长品质关系研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学博士学位论文, 2016.
- WANG R. Study on soil characteristics in the eastern foot of Helan Mountain and its relationship with the growth and quality of wine grapes[D]. Yangling: Doctoral Dissertation of Northwest A&F University, 2016 (in Chinese).
- [7] YANG RP, MO YL, LIU CM, WANG YQ, MA JX, ZHANG Y, LI H, ZHANG X. The effects of cattle manure and garlic rotation on soil under continuous cropping of watermelon (*Citrullus lanatus* L.)[J]. PLoS One, 2016, 11(6): e0156515.
- [8] JIN N, JIN L, WANG SY, LI JW, LIU FH, LIU ZC, LUO SL, WU Y, LYU J, YU JH. Reduced chemical fertilizer combined with bio-organic fertilizer affects the soil microbial community and yield and quality of lettuce[J]. Frontiers in Microbiology, 2022, 13: 863325.
- [9] WANG L, LIU JB, NIE Y, WANG DQ, WANG HY. Effects of vermicompost on tomato *Fusarium* wilt and soil microbial community structure[J]. Acta Agriculturae Scandinavica, Section B—Soil & Plant Science, 2021, 71(9): 835-851.
- [10] 刘丽, 郭宝贝, 刘娟桃, 牛慈琼, 李全. 蚯蚓粪肥对‘玉露雪梨’果实品质及土壤理化性状和酶活性的影响[J]. 中国农学通报, 2019, 35(20): 38-43.
- LIU L, GUO BB, LIU JT, NIU CQ, LI Q. Effects of vermicompost fertilizer on fruit quality, soil physical and chemical properties and enzyme activity of ‘Yulu Xiang’ pear[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2019, 35(20): 38-43 (in Chinese).
- [11] 杨盼盼, 张海春, 刘丽辉, 蒲强, 彭桂香. 高效光合细菌菌剂对土壤微生物的影响[J]. 生物技术进展, 2015, 5(5): 371-376.
- YANG PP, ZHANG HC, LIU LH, PU Q, PENG GX. Effects of photosynthetic bacteria inoculants on soil microorganisms[J]. Current Biotechnology, 2015, 5(5): 371-376 (in Chinese).
- [12] WANG F, WANG YF, WU YK, MIAO LJ, JI TW, ZHANG HJ, DING Y, ZHU WQ. Using amendment derived from vermicompost combined with calcium and magnesium mineral to achieve safe production of eggplant and its microbial ecological effect in Cd-contaminated soil[J]. Journal of Soils and Sediments, 2023, 23(1): 1-14.
- [13] 苏宏, 张鹤, 黄建全, 商佳胤, 张娜, 王丹, 李凯. 添加葡萄枝条对土壤真菌群落结构及葡萄树体生长的影响[J]. 吉林农业大学学报, 2021. DOI: 10.13327/j.jjlau.2020.6047
- SU H, ZHANG H, HUANG JQ, SHANG JY, ZHANG N, WANG D, LI K. Effects of adding grapevine branches on soil fungal community structure and vine growth[J]. Journal of Jilin Agricultural University, 2021. DOI: 10.13327/j.jjlau.2020.6047 (in Chinese).
- [14] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- BAO SD. Soil and Agricultural Chemistry Analysis[M]. 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2000 (in Chinese).
- [15] WHITE TJ, BRUNS T, LEE S, TAYLOR JW. Amplification and direct sequencing of fungal ribosomal RNA genes for phylogenetics[M]//PCR Protocols: A Guide to Methods and Applications. New York: Academic Press, inc., 1990, 315-322.
- [16] 叶回春, 张世文, 黄元仿, 王胜涛. 北京延庆盆地农田表层土壤肥力评价及其空间变异[J]. 中国农业科学, 2013, 46(15): 3151-3160.
- YE HC, ZHANG SW, HUANG YF, WANG ST. Assessment of surface soil fertility and its spatial variability in Yanqing Basin, Beijing, China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2013, 46(15): 3151-3160 (in Chinese).
- [17] 张向前, 杨文飞, 徐云姬. 中国主要耕作方式对旱地土壤结构及养分和微生态环境影响的研究综述[J]. 生态环境学报, 2019, 28(12): 2464-2472.
- ZHANG XQ, YANG WF, XU YJ. Effects of main tillage methods on soil structure, nutrients and micro-ecological environment of upland in China: a review[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2019, 28(12): 2464-2472 (in Chinese).
- [18] 张凯, 陈咄圳, 张亿. 长期施用化肥对不同树龄苹果品质及土壤养分的影响[J]. 环境生态学, 2021, 3(3): 54-59.
- ZHANG K, CHEN PZ, ZHANG Y. Effects of long-term application of chemical fertilizers on the quality of different ages apples and soil nutrients[J]. Environmental Ecology, 2021, 3(3): 54-59 (in Chinese).
- [19] 徐丽萍, 梁永红. 有机肥替代化肥对土壤肥力的影响[J]. 农业工程技术, 2021, 41(5): 13-14.
- XU LP, LIANG YH. Effect of organic fertilizer instead

- of chemical fertilizer on soil fertility[J]. *Applied Engineering Technology*, 2021, 41(5): 13-14 (in Chinese).
- [20] 秦永美. 有机肥部分替代化肥对土壤性质和小麦生产的影响[J]. *农家参谋*, 2020(20): 60-61.
QIN YM. Effects of partial replacement of chemical fertilizers by organic fertilizers on soil properties and wheat production[J]. *Farmers' Counselor*, 2020(20): 60-61 (in Chinese).
- [21] 王娟娟, 朱紫娟, 钱晓晴, 王桂良. 减施化肥与不同有机肥配施对稻季土壤细菌群落结构的影响[J]. *土壤*, 2021, 53(5): 983-990.
WANG JJ, ZHU ZJ, QIAN XQ, WANG GL. Effects of reducing chemical fertilizer combined with application of different organic fertilizers on soil bacterial community structure during rice season[J]. *Soils*, 2021, 53(5): 983-990 (in Chinese).
- [22] 周进. 微生物菌肥配施对葡萄土壤养分和品质的影响[J]. *北方园艺*, 2020(24): 51-56.
ZHOU J. Effects of microbial bacterial manure combined with reduced fertilizer on soil nutrients and quality of grapes in greenhouse[J]. *Northern Horticulture*, 2020(24): 51-56 (in Chinese).
- [23] MAO XL, XU XL, LU KP, GIELEN G, LUO JF, HE LZ, DONNISON A, XU ZX, XU J, YANG WY, SONG ZL, WANG HL. Effect of 17 years of organic and inorganic fertilizer applications on soil phosphorus dynamics in a rice-wheat rotation cropping system in Eastern China[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2015, 15(9): 1889-1899.
- [24] 范晓晖, 陈慕松, 刘文婷, 林旭, 翁琳琳, 吴寿华, 谢星. 化肥减量配施有机肥对葡萄产量、品质及土壤质量的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2022(3): 46-51.
FAN XH, CHEN MS, LIU WT, LIN X, WENG LL, WU SH, XIE X. Effect of combined chemical fertilizer reduction with organic fertilizer on yield and quality of grape and soil quality[J]. *Soils and Fertilizers Sciences in China*, 2022(3): 46-51 (in Chinese).
- [25] 陈桂芬, 刘忠, 黄雁飞, 谭裕模, 唐其展, 黄太庆, 杨绍镠, 廖青, 邢颖. 不同施肥处理对连作蔗田土壤微生物量、土壤酶活性及相关养分的影响[J]. *南方农业学报*, 2015, 46(12): 2123-2128.
CHEN GF, LIU Z, HUANG YF, TAN YM, TANG QZ, HUANG TQ, YANG SE, LIAO Q, XING Y. Effects of different fertilizer treatments on microbial biomass, enzyme activity and related nutrients in soils of continuous cropping sugarcane field[J]. *Journal of Southern Agriculture*, 2015, 46(12): 2123-2128 (in Chinese).
- [26] 赵永鑫, 赵吉霞, 范茂攀, 王自林, 徐昆龙, 李永梅. 不同比例蚯蚓粪替代化肥对土壤化学性状及小白菜产量和品质的影响[J]. *中国瓜菜*, 2022, 35(6): 62-68.
ZHAO YX, ZHAO JX, FAN MP, WANG ZL, XU KL, LI YM. Different proportion of vermicompost replacing chemical fertilizer affects soil chemical properties and yield and quality of Chinese cabbage[J]. *China Cucurbits and Vegetables*, 2022, 35(6): 62-68 (in Chinese).
- [27] 游浩宇, 陈大刚, 徐开未, 彭丹丹, 肖苏杰, 罗中魏, 王祖华, 陈远学. 不同改良措施对猕猴桃园土壤理化性质变化的影响[J]. *四川农业大学学报*, 2022, 40(6): 826-837.
YOU HY, CHEN DG, XU KW, PENG DD, XIAO SJ, LUO ZW, WANG ZH, CHEN YX. Effect of different improvement treatments on the soil physicochemical property changes of kiwifruit orchard[J]. *Journal of Sichuan Agricultural University*, 2022, 40(6): 826-837 (in Chinese).
- [28] 张新建, 宁晓光, 郑桂亮, 孔凡涛, 赵秋. 有机肥替代化肥对土壤肥力及番茄产量和品质的影响[J]. *中国农学通报*, 2020, 36(14): 59-63.
ZHANG XJ, NING XG, ZHENG GL, KONG FT, ZHAO Q. Replacing chemical fertilizer with organic manure: effects on soil fertility and tomato yield and quality[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2020, 36(14): 59-63 (in Chinese).
- [29] 王海斌, 陈晓婷, 丁力, 邱丰艳, 叶江华, 贾小丽, 孔祥海. 不同树龄茶树根际土壤细菌多样性的 T-RFLP 分析[J]. *应用与环境生物学报*, 2018, 24(4): 775-782.
WANG HB, CHEN XT, DING L, QIU FY, YE JH, JIA XL, KONG XH. Using T-RFLP technology to analyze bacterial diversity in the rhizospheric soils of tea tree at different ages[J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2018, 24(4): 775-782 (in Chinese).
- [30] 姚小东, 李孝刚, 丁昌峰, 韩正敏, 王兴祥. 连作和轮作模式下花生土壤微生物群落不同微域分布特征[J]. *土壤学报*, 2019, 56(4): 975-985.
YAO XD, LI XG, DING CF, HAN ZM, WANG XX. Microzone distribution characteristics of soil microbial community with peanut cropping system, monocropping or rotation[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2019, 56(4): 975-985 (in Chinese).
- [31] FAN XF, YU HY, WU QY, MA J, XU H, YANG JH, ZHUANG YQ. Effects of fertilization on microbial abundance and emissions of greenhouse gases (CH₄ and

- N₂O) in rice paddy fields[J]. *Ecology and Evolution*, 2016, 6(4): 1054-1063.
- [32] SMITH AP. Microbial community structure varies across soil organic matter aggregate pools during tropical land cover change[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2014, 77: 292-303.
- [33] 李杨, 敖静, 孙玉禄, 高晓梅, 刘晓辉, 桓明辉, 池景良. 温室黄瓜连作土壤真菌多样性变化分析[J]. *中国土壤与肥料*, 2022(2): 34-41.
LI Y, AO J, SUN YL, GAO XM, LIU XH, HUAN MH, CHI JL. Analysis of fungal community structure and function changes in soil of cucumber continuous cropping in greenhouse[J]. *Soils and Fertilizers Sciences in China*, 2022(2): 34-41 (in Chinese).
- [34] 孙倩, 吴宏亮, 陈阜, 康建宏. 不同轮作模式下作物根际土壤养分及真菌群落组成特征[J]. *环境科学*, 2020, 41(10): 4682-4689.
SUN Q, WU HL, CHEN F, KANG JH. Characteristics of soil nutrients and fungal community composition in crop rhizosphere under different rotation patterns[J]. *Environmental Science*, 2020, 41(10): 4682-4689 (in Chinese).
- [35] 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[J]. *环境科学*, 2020, 41(5): 2476-2484.
WANG N, PAN XC, WANG CK, BAI SB. Effects of simulated acid rain on soil fungi diversity in the transition zone of moso bamboo and broadleaf forest[J]. *Environmental Science*, 2020, 41(5): 2476-2484 (in Chinese).
- [36] 席凯鹏, 杨苏龙, 席吉龙, 李永山, 张建诚, 武雪萍. 长期棉花秸秆配施有机肥对土壤理化性质及棉花产量的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2022(7): 82-90.
XI KP, YANG SL, XI JL, LI YS, ZHANG JC, WU XP. Effects of long-term cotton straw incorporation and manure application on soil characters and cotton yield[J]. *Soils and Fertilizers Sciences in China*, 2022(7): 82-90 (in Chinese).
- [37] 郭鹏飞, 葛新伟, 王锐, 孙权. 有机肥对酿酒葡萄土壤微生物、酶活性及产量的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2020, 38(3): 145-154.
GUO PF, GE XW, WANG R, SUN Q. Effects of organic manure on soil microbial community, enzyme activity and yield of wine grape[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2020, 38(3): 145-154 (in Chinese).
- [38] 常芳娟, 张贵云, 张丽萍, 吕贝贝, 刘珍, 范巧兰, 姚众. 生物熏蒸配施微生物菌剂对西瓜连作土壤真菌群落结构的影响[J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2022, 30(2): 248-257.
CHANG FJ, ZHANG GY, ZHANG LP, LYU BB, LIU Z, FAN QL, YAO Z. Effects of biological fumigation combined with microbial agents on fungi community structure in continuous watermelon cropping soil[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2022, 30(2): 248-257 (in Chinese).
- [39] 马垒. 不同养分分配比对土壤微生物群落组成和网络关系的影响[D]. 北京: 中国科学院大学博士学位论文, 2020.
MA L. Effects of different nutrient ratios on soil microbial community composition and network relationship[D]. Beijing: Doctoral Dissertation of University of Chinese Academy of Sciences, 2020 (in Chinese).
- [40] BASTIDA F, TORRES IF, MORENO JL, BALDRIAN P, ONDOÑO S, RUIZ-NAVARRO A, HERNÁNDEZ T, RICHNOW HH, STARKE R, GARCÍA C, JEHLICH N. The active microbial diversity drives ecosystem multifunctionality and is physiologically related to carbon availability in Mediterranean semi-arid soils[J]. *Molecular Ecology*, 2016, 25(18): 4660-4673.
- [41] 伍晓丽, 王钰, 刘飞, 陈大霞, 李隆云. 黄连根腐病镰刀菌属病原真菌鉴定[J]. *中国中药杂志*, 2020, 45(6): 1323-1328.
WU XL, WANG Y, LIU F, CHEN DX, LI LY. Identification of *Coptis chinensis* root rot disease pathogenic *Fusarium* spp. fungi[J]. *China Journal of Chinese Materia Medica*, 2020, 45(6): 1323-1328 (in Chinese).