



范瑾,王宏,孙霄,殷旭东,李明. 不同生草覆盖对‘马瑟兰’葡萄园土壤营养成分和微生物群落的影响[J]. 中国农业大学学报, 2025,30(08):25-37.
FAN Jin, WANG Hong, SUN Xiao, YIN Xudong, LI Ming. Effects of different grass cover on soil nutrient composition and the microbial community structure in ‘Matheran’ vineyards[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2025,30(08):25-37.
DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2025.08.03

不同生草覆盖对‘马瑟兰’葡萄园土壤营养成分和微生物群落的影响

范瑾¹ 王宏² 孙霄² 殷旭东¹ 李明^{1,3,4*}

(1. 宁夏大学 葡萄酒与园艺学院, 银川 750021;

2. 宁夏君祥酒庄有限公司, 银川 750021;

3. 葡萄与葡萄酒教育部工程研究中心, 银川 750021;

4. 宁夏回族自治区黄河水联网数字治水重点实验室, 银川 750021)

摘要 为筛选出适宜贺兰山东麓葡萄园的生草覆盖草种,在宁夏回族自治区君祥酒庄的‘马瑟兰’葡萄园,设置紫花苜蓿(AM)、黑麦草(LP)、白三叶(TR)3种生草覆盖处理,以清耕(CK)为对照,测定土壤理化、酶活和微生物群落组成等指标,分析不同生草覆盖对‘马瑟兰’葡萄园土壤营养成分和微生物群落结构的影响。结果表明:1)与CK相比,AM、LP、TR的土壤盐渍化程度分别降低17.42%、8.52%、21.91%;有机质和有机碳含量分别升高19.75%、8.23%、24.03%;全磷和速效磷含量均显著增加,过氧化氢酶(Catalase)、脲酶(Urease)、纤维素酶(Cellulase)的活性均显著升高,以LP处理效果最好;2)在细菌门分类水平上,放线菌门(Actinobacteriota)、变形菌门(Proteobacteria)、芽单胞菌门(Gemmatimonadota)为优势细菌类群,仅在LP和TR的芽单胞菌门的相对丰度升高13.54%和42.06%;在真菌门分类水平上,子囊菌门(Ascomycota)、担子菌门(Basidiomycota)和壶菌门(Chytridiomycota)为优势真菌类群,3种生草覆盖下,担子菌门相对丰度分别升高20.62%、19.84%、62.49%;3)基于Tax4Fun和FunGuild功能预测分析,3种生草覆盖处理的新陈代谢(Metabolism)功能细菌丰度分别升高0.26%、0.45%和0.45%,AM和TR有利于土壤病理-腐生营养型(Pathotroph-Saprotroph)真菌的繁殖,分别升高21.96%和3.63%;4)主成分分析显示,各处理综合得分由高到低为TR>LP>AM>CK。综上,3种生草覆盖均有利于葡萄园微生态环境的改善,白三叶覆盖处理(TR)的效果最好,因此,在宁夏贺兰山东麓‘马瑟兰’葡萄园生产中可优先考虑使用白三叶作为覆盖草种。

关键词 葡萄园; 生草覆盖; 土壤营养成分; 微生物群落; 功能预测

中图分类号 S663.1

文章编号 1007-4333(2025)08-0025-13

文献标志码 A

Effects of different grass cover on soil nutrient composition and the microbial community structure in ‘Matheran’ vineyards

FAN Jin¹, WANG Hong², SUN Xiao², YIN Xudong¹, LI Ming^{1,3,4*}

(1. College of Wine and Horticulture, Ningxia University, Yinchuan 750021, China;

2. Ningxia Junxiang Winery Co., Ltd., Yinchuan 750021, China;

3. Grape and Wine Engineering Research Center, Yinchuan 750021, China;

4. Key Laboratory of Digital Water Management for Yellow River Water Networking of Ningxia Autonomous Region, Yinchuan 750021, China)

收稿日期: 2024-12-25

基金项目: 宁夏回族自治区重点研发计划(2024BBF01003-03); 宁夏回族自治区自然科学基金(2023AAC03113)

第一作者: 范瑾(ORCID: 0009-0007-7406-740X), 硕士研究生, E-mail: 15121815261@163.com

通讯作者: 李明(ORCID: 0000-0003-4413-8944), 副研究员, 主要从事土壤微生物生态学研究, E-mail: lm_y096@126.com

Abstract In order to screen suitable raw grasses for vineyards biograss mulching in the eastern foothills of the Helan Mountain, the ‘Matherland’ vineyard of Junxiang Winery, Ningxia Hui Autonomous Region was taken as study object. Three different raw grass mulching treatments with *Medicago sativa* L. (AM), *Lolium perenne* L. (LP), *Trifolium repens* L. (TR) were set up, and clean tillage (CK) was used as control. The soil physicochemical, enzyme and microbial indexes were measured, and the differences of indexes in different grass mulches were analyzed. The effects of different grass mulches on the nutrient composition and microbial community structure of the ‘MatTerland’ vineyard soil were evaluated. The results showed that: 1) Compared with CK, the degrees of soil salinization of AM, LP and TR decreased by 17.42%, 8.52%, and 21.91%, respectively; The organic matter and organic carbon content were elevated by 19.75%, 8.23% and 24.03%, respectively. The content of total phosphorus and available phosphorus were significantly increased in all treatments, as well as catalase, urease and cellulase activities, with the LP treatment being the most effective. 2) At the level of bacterial phylum classification, Actinobacteriota, Proteobacteria, and Gemmatimonadota were the dominant microbial bacterial community, and the relative abundance of Gemmatimonadota was elevated by 13.54% and 42.06% in LP and TR treatments, respectively; At the level of fungal phylum classification, Ascomycota, Basidiomycota and Chytridiomycota were the dominant fungal community, and the relative abundance of Basidiomycota was elevated by 20.62% (AM), 19.84% (LP), and 62.49% (TR) under the three types of biograss cover, respectively. 3) Based on Tax4Fun and FunGuild functional prediction analyses, the bacterial relative abundance values of metabolism was improved by 0.26%, 0.45%, and 0.45%, respectively. The AM and TR treatments were beneficial for soil Pathotroph-Saprotroph fungal colonization, which was enhanced by 21.96% and 3.63% under the two treatments, respectively. 4) Principal component analysis showed that the composite scores of the treatments from high to low were TR>LP>AM>CK. In conclusion, all three types of raw grass covering are beneficial for improving the micro-ecological environment of the vineyard, among which the *Trifolium repens* L. mulching has the best effect and can be given priority in the production of ‘Marselan’ vineyards in the eastern foot of Helan Mountain, Ningxia.

Keywords vineyard; raw grass cover; soil nutrients; microbial community; functional prediction

果园生草是指在园区内或果树行间种植优质牧草,使其完全覆盖地表蓄水保墒,充分利用光照和水热资源,提高土地复种指数,以达到改善果园生态环境、提高土壤质量、抑制杂草生长、提高果实品质及产量等目的^[1]。而贺兰山东麓葡萄酒园土壤较为贫瘠,绝大多数葡萄园以清耕为主,长期地表裸露会导致土壤结构破坏,肥力下降。因此,探寻可持续发展的土壤管理制度对贺兰山东麓酿酒葡萄产业的发展具有重要意义。

在果园中适宜种植的草种一般为禾本科和豆科植物^[2-3]。杨金鹏等^[4]研究发现,果园种植牧草可降低土壤容重,提高土壤孔隙度,生草覆盖下可有效提高土壤中全氮、全磷、全钾、有机质和速效养分等含量,同时随种植年限的增加,效果会更加显著。李晓龙等^[5]在对果园病虫害的研究中也提出,生草可控制果园杂草和病虫害的发生,通过改变生物群落结构,使生物多样性增加,从而形成稳定的复合生态系统。井赵斌等^[6]研究发现,间作可提高土壤

过氧化氢酶、脲酶活性,促进土壤中大量有益菌群的形成。土壤酶活性是土壤有机碳降解及营养元素转化的关键因子,其活性不仅影响着土壤生态系统的更新变化,而且也是评价土壤肥力与健康水平的关键^[7]。微生物是土壤养分的源和汇,其群落结构决定着养分循环、有机物分解及能量流动的速率,是衡量土壤质量优劣的重要指标^[8]。因此,果园生草覆盖对土壤酶活性和微生物群落结构的影响成为当前研究的热点。

国家统计局数据^[9]显示,截至2023年,宁夏、山东等地酿酒葡萄种植已经形成规模化,宁夏新增酿酒葡萄种植面积1 266.67 hm²,总面积达40.13万hm²,其中贺兰山东麓产业园是主要种植地。然而,园区土壤较为瘠薄,管理模式以清耕为主,长期的地表裸露,以及肥料、农药的滥用,导致土壤退化,生产成本增加^[10]。目前针对贺兰山东麓葡萄酒园不同生草覆盖对土壤结构功能的影响,以及适宜草种筛选方面的研究鲜见报道。本研究以君祥酒庄‘马瑟

兰’葡萄园为试验基地,选择播种紫花苜蓿、黑麦草和白三叶3种草种,并设置清耕作为对照,测定分析不同处理的土壤理化、酶活和微生物指标,旨在探究不同生草覆盖对葡萄园土壤结构的影响,筛选出适宜贺兰山东麓葡萄园的生草覆盖草种,以期为行间生草栽培模式在贺兰山东麓葡萄园的推广提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地位于宁夏贺兰山东麓君祥酒庄有限公司‘马瑟兰’葡萄园(38°34′23″N, 106°01′54″E, 海拔1164 m),该区域土壤资源丰富,土壤类型为淡灰钙土,年平均气温9.8℃,年降水量190 mm,年日照时数3032 h,具有生产酿酒葡萄的最佳水、土、光、热资源组合^[11]。

1.2 试验设计

供试材料为2年生‘马瑟兰’葡萄园,园区葡萄架型为水平厂字型,南北行向,株行距为1.5 m×3.0 m,冬季以短梢修剪为主,其他栽培措施等均一致。于2023年5月进行播种,设置4个处理,每个处理种植3个小区,每个小区面积约为60 m²:设紫花苜蓿(AM)、黑麦草(LP)和白三叶(TR)3种生草覆盖,以清耕(CK)为对照,各处理土壤以及植株管理条件一致,生草前期需要额外浇水并铲除杂草,于2023年9月牧草生长旺盛时期进行样品采集。

1.3 样品采集

2023年9月进行土壤样品的采集,每个采样区内采用“S”形随机取样,利用 $d=5$ cm的土钻取样15次,取样深度为0—20 cm,去除可见根和石砾后混合,过2 mm筛网后迅速运回实验室。采取的土壤样品分为3部分:第1部分自然风干后用于土壤理化性质检测;第2部分于4℃保存,测定土壤酶活性;第3部分于-20℃条件下保存,测定土壤微生物活性。

1.4 测定项目及方法

1.4.1 土壤理化性质

土壤理化性质测定均参考鲍士旦^[12]的方法,土壤全氮(TN)采用凯氏定氮法测定,碱解氮(AP)采用碱解扩散法测定,土壤全磷(TP)和速效磷(AP)采用钼锑抗比色法测定,土壤有机质(SOM)和有机碳(SOC)含量采用重铬酸钾容量法检测。土壤pH

用赛多利斯科学仪器(北京)有限公司的酸度计测定,电导率(EC)用上海仪电科学仪器股份有限公司的电导率仪测定。

1.4.2 土壤酶活

参照关松荫^[13]的方法,以高锰酸钾滴定法测定土壤过氧化氢酶活性;靛酚蓝比色法测定土壤脲酶活性;采用萘酚比色法测定土壤纤维素酶活性;磷酸苯二钠比色法测定土壤碱性磷酸酶活性。

1.4.3 土壤微生物

采用北京诺禾致源生物信息科技有限公司的土壤基因组快速抽提试剂盒提取土壤样品基因组DNA,通过NanoDrop对DNA的浓度及纯度进行检测。对细菌16S rRNA基因序列的片段和真菌ITS DNA序列的片段进行PCR扩增,产物使用2%浓度的琼脂糖凝胶进行电泳检测扩增,检测PCR产物浓度,纯化后的产物用美国Thermo Scientific公司提供的GeneJET胶回收试剂盒回收产物,合格后使用Illumina Miseq测序,测序工作由北京诺禾致源科技股份有限公司完成。

1.5 数据处理

利用Excel 2019整理试验数据,采用SPSS 25.0对土壤理化指标、酶活性、微生物 α 多样性等做方差分析,并结合Origin 2021软件进行柱状图和相关性热图绘制。土壤微生物数据利用诺禾云平台(<https://magic.novogene.com>)进行分析,利用Tax4Fun和FunGuild数据库对土壤微生物群落进行功能预测。

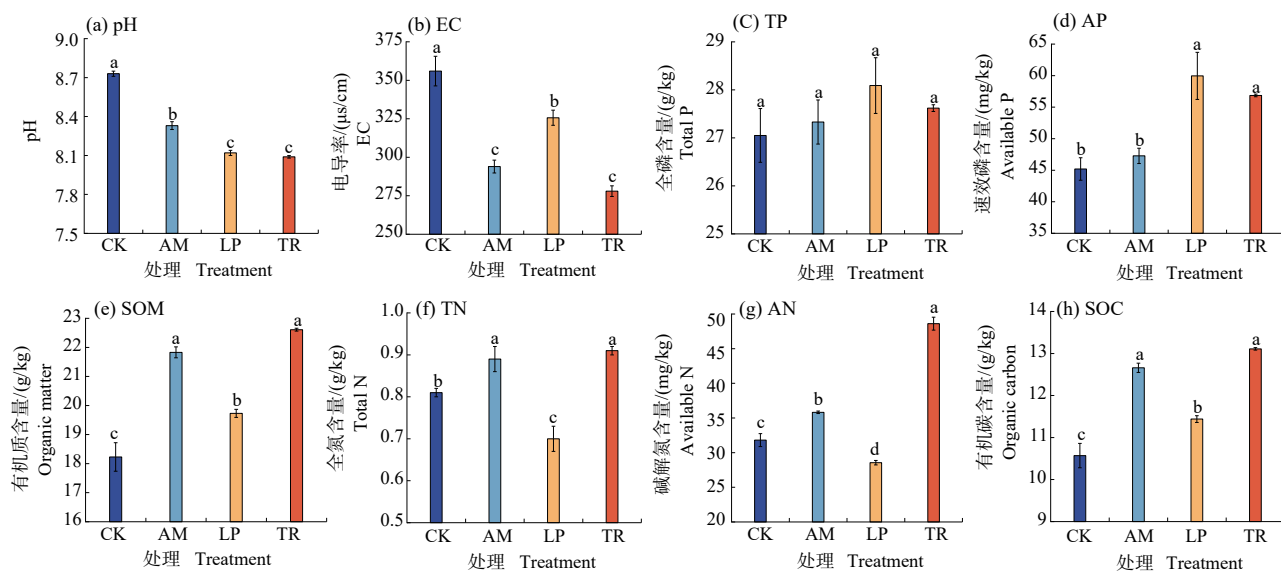
2 结果与分析

2.1 不同生草覆盖对土壤理化性质的影响

由图1可知,紫花苜蓿(AM)、黑麦草(LP)和白三叶(TR)3种生草覆盖处理的土壤pH、EC均显著低于清耕(CK),其中AM、LP和TR的土壤pH分别较CK低0.40、0.61、0.64,EC分别降低17.42%、8.52%、21.91%。与CK相比,AM、LP和TR的土壤全磷含量分别升高1.03%、3.84%和2.11%,速效磷含量分别升高4.60%、32.65%和25.80%,其中LP的速效磷含量最高,为59.96 mg/kg。有机质和有机碳含量均分别升高19.75%(AM)、8.23%(LP)、24.03%(TR)。不同处理的土壤全氮和碱解氮含量差异均达显著水平,全氮含量由高到低为TR(0.91)>AM(0.89)>CK(0.81)>LP(0.70 g/kg),

碱解氮含量由高到低为 TR(48.62) > AM(35.8) > CK(31.82) > LP(28.55 mg/kg)。综上,3种生草覆

盖在一定程度上可以降低土壤盐渍化程度,调节土壤 pH,提高土壤养分含量。



AM, 紫花苜蓿; LP, 黑麦草; TR, 白三叶; CK, 清耕组。下同。

AM, *Medicago sativa* L.; LP, *Lolium perenne* L.; TR, *Trifolium repens* L.; CK, clean tillage. The same below.

图1 不同生草覆盖的土壤理化指标

Fig. 1 Soil physicochemical indicators of different grass cover

2.2 不同生草覆盖对土壤酶活性的影响

由图2可知,与CK相比,3种生草覆盖均可显著提高土壤过氧化氢酶(CAT)、脲酶(URE)和纤维

素酶(CEL)的活性,AM的3种酶活性分别升高6.15%、0.90%、6.58%,LP分别升高29.17%、7.70%、25.13%,TR分别升高10.96%、4.65%、

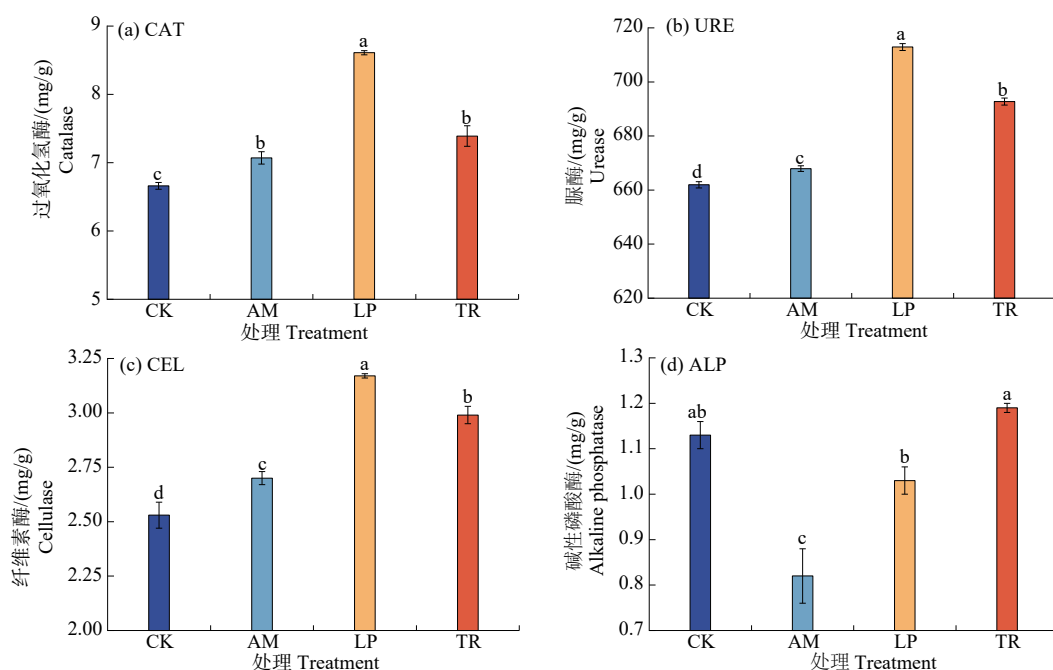


图2 不同生草覆盖的土壤酶活性

Fig. 2 Soil enzyme activities under different herbaceous cover

18.16%, AM 和 LP 的土壤碱性磷酸酶活性分别降低 27.43% 和 9.14%, 而 TR 的则升高 5.02%。

2.3 不同生草覆盖对土壤微生物群落的影响

2.3.1 不同生草覆盖对土壤微生物多样性的影响

由表 1 可知, AM、LP 和 TR 覆盖下土壤微生物测序深度指数均 >99%, 说明测序结果可以满足试验要求, 能够反映‘马瑟兰’葡萄园不同生草处理的微生物群落组成。不同生草覆盖下土壤细菌群落 α

多样性存在差异, 3 种生草覆盖下 Chao 1 和特征序列数均显著高于清耕(CK), 4 个处理中 AM 的效果最佳, Chao 1 和特征序列数分别为 2 355.91 和 2 144.00。土壤细菌香浓指数由高到低为 AM > LP > TR > CK。土壤真菌群落 Chao 1 指数、Ace、PD_whole_tree 由高到低均为 LP > CK > TR > AM, 香浓指数为 LP > CK > AM > TR, 4 个处理中土壤真菌物种丰富度最高均为 LP(表 2)。

表 1 不同生草覆盖下土壤细菌群落的 α 多样性

Table 1 α diversity of soil bacterial communities under different herbaceous covers

处理 Treatment	Chao 1 指数 Chao 1 index	测序深度指数 Goods_coverage index	特征序列数 Observed_otus	香浓指数 Shannon index
CK	1 616.42±216.46 ^b	0.99±0.00 ^a	1 544.67±186.71 ^b	9.78±0.16 ^a
AM	2 355.91±228.53 ^a	0.99±0.00 ^a	2 144.00±198.60 ^a	10.17±0.15 ^a
LP	2 201.55±147.99 ^{ab}	0.99±0.00 ^a	1 993.33±144.30 ^{ab}	10.14±0.08 ^a
TR	2 148.10±75.43 ^{ab}	0.99±0.00 ^a	1 934.00±61.02 ^{ab}	10.06±0.06 ^a

注: AM, 紫花苜蓿; LP, 黑麦草; TR, 白三叶; CK, 清耕组。同列数据不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$), 相同字母表示差异不显著 ($P > 0.05$)。下同。

Note: AM, *Medicago sativa* L.; LP, *Lolium perenne* L.; TR, *Trifolium repens* L.; CK, Clean tillage. Within the same column, different letters represent significant differences ($P < 0.05$), while the same letters represent no significant differences ($P > 0.05$). The same below.

表 2 不同生草覆盖下土壤真菌群落的 α 多样性

Table 2 α diversity of soil fungal communities under different herbaceous covers

处理 Treatment	Chao 1 指数 Chao 1 index	香浓指数 Shannon index	Ace 指数 Ace index	PD_whole_tree 指数 PD_whole_tree index
CK	528.19±3.29 ^b	3.92±0.17 ^a	543.01±7.33 ^a	187.59±9.25 ^a
AM	416.20±8.51 ^c	3.43±0.09 ^a	421.03±10.20 ^b	139.87±6.68 ^b
LP	560.87±14.31 ^b	4.24±0.40 ^a	548.72±19.35 ^a	196.35±2.51 ^a
TR	468.10±28.26 ^c	3.37±0.56 ^a	478.52±25.81 ^b	174.15±15.26 ^a

2.3.2 不同生草覆盖对土壤微生物群落结构组成的影响

由图 3 可知, 在细菌门水平上, 与 CK 相比, AM、LP、TR 的土壤中绿弯菌门(Chloroflexi)丰度分别增加 23.37%、34.17%、17.80%, 酸杆菌门(Acidobacteriota)的丰度分别增加 9.79%、12.55%、1.14%, 浮霉菌门(Planctomycetota)分别增加 54.85%、69.47%、57.68%。3 种生草覆盖处理均显著增加蓝藻菌门(Cyanobacteria)和泉古菌门(Crenarchaeota)的丰度, 丰度增幅由高到低为 AM > LP > TR > CK。与 CK 相比, AM、LP、TR 的放线菌门(Actinobacteriota)的丰度分别降低 9.41%、

8.15%、6.89%, 变形菌门(Proteobacteria)的丰度分别降低 4.51%、9.38%、10.38%, 拟杆菌门(Bacteroidota)的丰度分别降低 22.30%、32.59%、38.00%, 粘菌门(Myxococcota)的丰度分别降低 3.88%、9.21%、15.85%。与 CK 相比, LP 和 TR 的芽单胞菌门(Gemmatimonadota)的丰度分别增加 13.54% 和 42.06%, 疣微菌门(Verrucomicrobiota)丰度分别增加 10.95% 和 5.33%。在真菌门水平上, 与 CK 相比, AM、LP、TR 的土壤中担子菌门(Basidiomycota)的丰度分别增加 20.62%、19.84%、62.49%, 炎霉门(Calcarisporiellomycota)丰度显著增加, 丰度增幅由高到低为 AM > TR > LP > CK, 丰

富了捕虫霉门(Zoopagomycota)的丰度,毛霉门(Mucoromycota)的丰度分别降低92.13%、89.31%、4.45%,Fungi-phy-Incertae-sedis的丰度分别降低1.80%、39.16%、25.09%。与CK相比,LP和TR的子囊菌门(Ascomycota)的丰度分别降低26.53%和

4.73%,AM则增加6.06%。LP的壶菌门(Chytridiomycota)的丰度增加65.33%,TR的被孢霉菌门(Mortierellomycota)和球囊菌门(Glomeromycota)的丰度分别降低11.15%和28.57%(图3(b))。

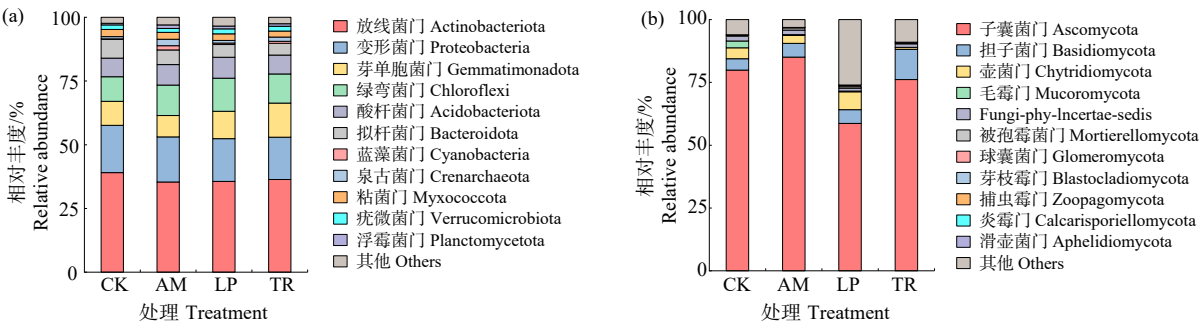


图3 不同生草覆盖下土壤细菌(a)和真菌(b)门水平的优势物种相对丰度

Fig. 3 Relative abundance of dominant species at the level of soil bacterial (a) and fungal (b) phyla under different herbaceous covers

2.3.3 不同生草覆盖下土壤细菌群落功能的预测分析

利用Tax4Fun工具对不同生草覆盖处理的土壤细菌群落进行功能预测,结果归类于6个KEGG一级代谢通路,涵盖生物体系统(Organismal_Systems)、人类疾病(Human_Diseases)、遗传信息处理(Genetic_Information_Processing)、新陈代谢(Metabolism)、细胞过程(Cellular_Processes)、环境信息处理(Environmental_Information_Processing)

等(表3),不同生草覆盖处理的细菌功能在统计学上的差异未达到显著水平($P>0.05$),但与CK相比,AM的Metabolism、Genetic_Information_Processing、Human_Diseases的相对丰富度分别增加0.26%、0.53%、1.38%,LP的Metabolism、Unclassified、Human_Diseases、Organismal_Systems相对丰富度分别增加0.45%、1.37%、0.71%、0.03%,TR的Metabolism、Cellular_Processes相对丰富度分别增加0.45%、0.11%。

表3 不同生草覆盖下土壤细菌一级功能相对丰富度

Table 3 Relative functional richness of soil bacteria at the primary level under different grass cover

处理 Treatment	新陈代谢 Metabolism	遗传信息处理 Genetic_Information_Processing	环境信息处理 Environmental_Information_Processing	细胞过程 Cellular_Processes	人类疾病 Human_Diseases	生物体系统 Organismal_Systems
CK	48.61±0.11 ^a	22.49±0.10 ^a	12.31±0.09 ^a	7.37±0.01 ^a	2.51±0.01 ^a	1.88±0.00 ^a
AM	48.74±0.08 ^a	22.61±0.16 ^a	12.12±0.10 ^a	7.31±0.05 ^a	2.55±0.02 ^a	1.87±0.01 ^{ab}
LP	48.83±0.17 ^a	22.30±0.26 ^a	12.22±0.00 ^a	7.35±0.04 ^a	2.53±0.04 ^a	1.88±0.01 ^a
TR	48.84±0.11 ^a	22.45±0.16 ^a	12.17±0.05 ^a	7.37±0.02 ^a	2.50±0.02 ^a	1.85±0.00 ^b

2.3.4 不同生草覆盖下土壤真菌群落功能的预测分析

由图4可知,相对丰度>0.01%土壤真菌主要可分为8种,即病理-腐生营养型(Pathotroph-Saprotroph)、腐生营养型(Saprotroph)、腐生-共生营养型

(Saprotroph-Symbiotroph)、病理-腐生-共生营养型(Pathotroph-Saprotroph-Symbiotroph)、共生营养型(Symbiotroph)、病理营养型(Pathotroph)、病原体-腐生-共生营养型(Pathogen-Saprotroph-Symbiotroph)、病理-共生营养型(Pathotroph-Symbiotroph)。3种生

草覆盖处理的真菌群落功能丰度存在显著差异;相较于 CK, AM 和 TR 的土壤病理-腐生营养型真菌群落相对丰度分别升高 21.96% 和 3.63% ($P < 0.05$); CK 中病

理-腐生-共生营养型、病理-腐生营养型、共生营养型真菌群落占比分别为 0.54%、0.02%、0.13%。因此,3 种生草覆盖均可显著提高 3 种类型真菌的群落丰度。

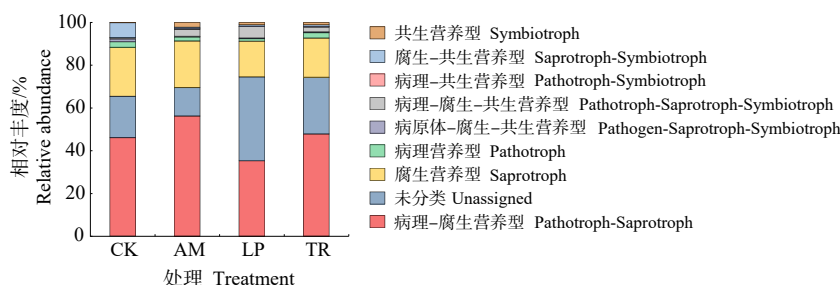


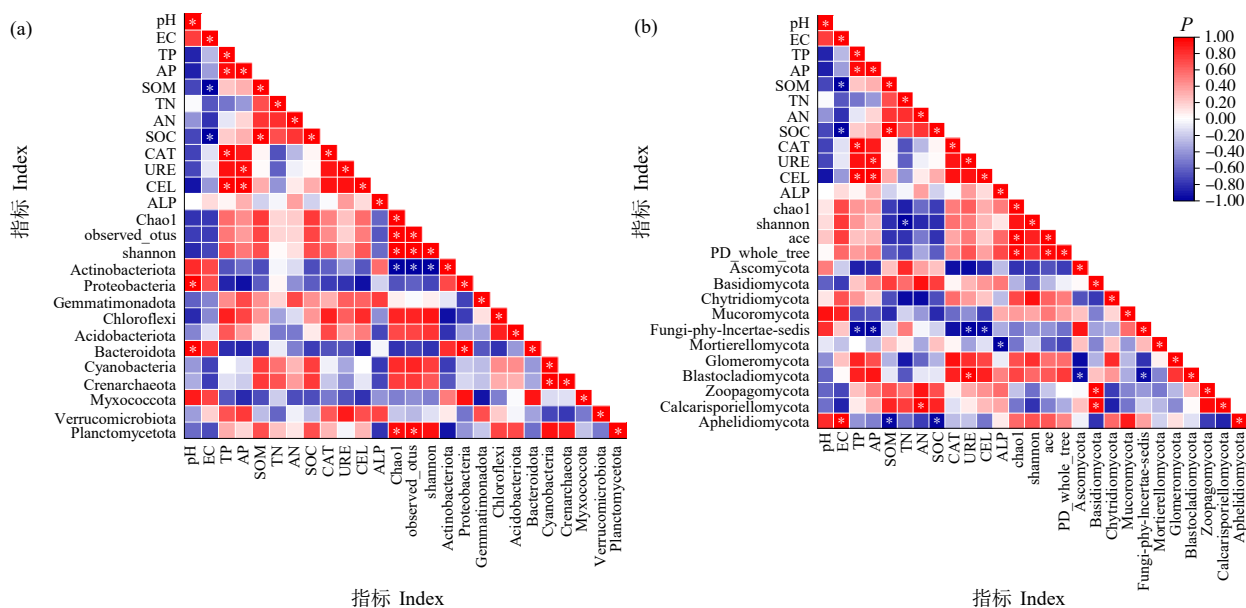
图 4 不同生草覆盖下真菌群落功能预测分析

Fig. 4 Predictive analysis of fungal community function under different herbaceous covers

2.4 不同生草覆盖下土壤微生物群落与环境因子的关系

由图 5 可知,细菌门水平上,土壤 pH 与变形菌门、拟杆菌门相对丰度均呈显著正相关 ($P < 0.05$)。真菌门水平上,土壤 EC 与壶菌门相对丰度呈显著

正相关 ($P < 0.05$),全磷、速效磷含量和脲酶、纤维素酶活性与 Fungi-phy-Incertae-sedis 相对丰度均呈显著负相关 ($P < 0.05$),有机质、有机碳含量与壶菌门相对丰度均呈显著负相关 ($P < 0.05$),全氮含量与香浓指数呈显著负相关 ($P < 0.05$),碱解氮含量



EC, 电导率; TP, 全磷; AP, 速效磷; SOM, 有机质; TN, 全氮; AN, 碱解氮; SOC, 有机碳; CAT, 过氧化氢酶; URE, 脲酶; CEL, 纤维素酶; ALP, 碱性磷酸酶; Chao1, Chao1 指数; Observed_otus, 细菌特征序列数; Shannon, 香农指数; Ace, 真菌 ace 指数; PD_whole_tree, 真菌 PD_whole_tree 指数; Actinobacteriota, 放线菌门; Proteobacteria, 变形菌门; Gemmatimonadota, 芽单胞菌门; Chloroflexi, 绿弯菌门; Acidobacteriota, 酸杆菌门; Bacteroidota, 拟杆菌门; Cyanobacteria, 蓝藻菌门; Crenarchaeota, 泉古菌门; Myxococcota, 粘菌门; Verrucomicrobiota, 疣微菌门; Planctomycetota, 浮菌门; Ascomycota, 子囊菌门; Basidiomycota, 担子菌门; Chytridiomycota, 壶菌门; Mucoromycota, 毛霉门; Mortierellomycota, 被孢霉门; Glomeromycota, 球囊菌门; Blastocladiomycota, 芽枝霉门; Zoopagomycota, 捕虫霉门; Calcarisporiellomycota, 炎霉门; Aphelidiomycota, 滑壶菌门。*表示 $0.01 < P < 0.05$ 水平为相关。

TP, total phosphorus; AP, available phosphorus; SOM, organic matter; TN, total nitrogen; AN, available nitrogen; SOC, organic carbon; CAT, catalase; URE, urease; CEL, cellulase; ALP, alkaline phosphatase. * indicates that the $0.01 < P < 0.05$ level is correlated.

图 5 生草覆盖下土壤微生物群落与环境因子相关性分析

Fig. 5 Correlation analysis between soil microbial community and environmental factors under biograss cover

与炎霉门相对丰度呈显著正相关($P<0.05$),脲酶活性与芽枝霉门相对丰度呈显著正相关($P<0.05$),碱性磷酸酶活性与被孢霉菌门相对丰度呈显著负相关($P<0.05$)。

2.5 不同生草覆盖的综合评价

由表4可知,主成分1、主成分2、主成分3特征值分别为9.06、7.38、2.56,方差贡献率分别为47.68%、38.86%、13.45%,累积方差贡献率达到99.99%,表

明所提取的主成分能够较为全面地表征生草效应。在主成分1、主成分2和主成分3中,速效磷、有机质、有机碳、纤维素酶的载荷值均为正值,说明3种生草覆盖处理对这4个指标有较大的影响。

由表5可知,3种生草覆盖的综合得分均高于清耕(CK),不同生草覆盖下的综合得分排序为TR>LP>AM>CK。说明3种生草覆盖均有助于提升土壤养分状况、酶活性和微生物群落结构,其中TR的效果最佳。

表4 不同生草覆盖对土壤各指标因子的特征值和累计方差贡献率
Table 4 Factor eigenvalues and cumulative variance contributions of different grass cover to various soil indicators

指标 Index	主成分1 PC ₁	主成分2 PC ₂	主成分3 PC ₃
pH	-0.219 81	-0.270 24	-0.094 78
EC	-0.320 71	-0.037 24	-0.150 47
全磷 Total phosphorus	0.065 19	0.360 57	-0.024 13
速磷 Available phosphorus	0.070 49	0.345 54	0.169 40
有机质 Organic matter	0.322 93	0.014 46	0.144 86
全氮 Total nitrogen	0.216 45	-0.243 90	0.230 91
碱解氮 Available nitrogen	0.213 57	-0.068 15	0.464 93
有机碳 Organic carbon	0.323 00	0.014 31	0.144 37
过氧化氢酶 Catalase	0.018 84	0.362 13	-0.105 46
脲酶 Urease	-0.022 92	0.357 43	0.142 49
纤维素酶 Cellulase	0.091 67	0.350 36	0.082 64
碱性磷酸酶 Alkaline phosphatase	-0.134 54	0.058 13	0.563 34
细菌 Chao1 指数 Bacterial Chao1	0.283 21	0.143 79	-0.217 27
细菌特征序列数 Bacterial observed_otus	0.280 46	0.127 47	-0.255 91
细菌香农指数 Bacterial shannon	0.257 66	0.185 42	-0.237 89
真菌 Chao1 指数 Fungi Chao1	-0.270 20	0.211 59	0.055 73
真菌香农指数 Fungi shannon	-0.256 54	0.203 54	-0.195 64
真菌 ace 指数 Fungi ace index	-0.290 97	0.162 88	0.120 43
真菌 PD_whole_tree 指数 Fungi PD_whole_tree index	-0.249 83	0.206 33	0.216 83
特征值 Eigenvalue	9.060 14	7.384 14	2.555 72
方差贡献率/% Variance contribution rate	47.684 95	38.863 89	13.451 15
累计贡献率/% Cumulative contribution rate	47.684 95	86.548 85	100.000 00

表5 不同生草覆盖的主成分因子得分及综合得分的综合得分

Table 5 Composite scores of principal component factor scores and composite scores of different herbaceous covers

处理 Treatment	主成分1 PC ₁	主成分2 PC ₂	主成分3 PC ₃	综合得分 Comprehensive score	排名 Rank
CK	-1.234 32	-0.831 06	0.189 18	-1.876 20	4
AM	0.899 89	-0.661 95	-1.001 01	-0.763 07	3
LP	-0.385 39	1.361 57	-0.497 59	0.478 59	2
TR	0.719 82	0.131 44	1.309 42	2.160 68	1

3 讨 论

3.1 不同生草覆盖对葡萄园土壤理化性质的影响

氮、磷、钾是植物生长发育所必需的营养物质,也是构成土壤肥力的物质基础,其含量及存在状态直接关系着植物的生长发育、产量和质量^[14]。本研究发现,紫花苜蓿(AM)、黑麦草(LP)和白三叶(TR)覆盖处理均可显著提高土壤全磷和速效磷含量,全磷含量分别升高1.03%、3.84%、2.11%,速效磷含量分别升高4.60%、32.65%、25.80%,与赵思东^[15]研究结果一致,而本研究中土壤速效养分含量的增幅高于全量养分含量(图1),其原因可能是速效养分对环境变化的敏感度更高。马震珠等^[16]研究发现土壤氮、磷、钾含量与土壤保水保肥能力及地表植物种类有关,种植白三叶可提高碱解氮含量,而种植高羊茅可提高速效钾含量。本研究还发现,种植豆科植物紫花苜蓿(AM)和白三叶(TR)提升碱解氮含量的效果显著高于禾本科植物黑麦草(LP),而LP提升土壤速效磷含量的效果强于AM和TR处理(图1)。任嘉欣等^[17]的研究结果也证实,种植豆科植物或者含豆科植物的混播处理可显著提高土壤碱解氮含量,其原因可能是由于豆科植物通过生物固氮提高土壤碱解氮的能力强于禾本科植物;而种植禾本科植物或含禾本科植物的混播处理可显著提高土壤速效磷含量,其原因可能是禾本科植物对土壤有机态磷的活化能力强于豆科植物^[18]。土壤有机质累积程度是土壤肥力的重要特征,是影响土壤物理性状、供肥保肥和养分有效性的关键因子^[19]。本研究发现,3种生草覆盖均可显著提高葡萄园土壤有机质含量,且呈现出TR>AM>LP>CK(图1),与张帆等^[20]研究结果相似,其原因可能是植物根系和根系分泌物活化了土壤中的元素^[21],为有机碳提供了来源,使土壤有机质含量

显著提升。

3.2 不同生草覆盖对葡萄园土壤酶活性的影响

土壤酶参与生物化学过程,其活性影响着土壤生态系统的更新变化,通常作为土壤健康状况和质量的重要评价指标^[22]。植物根系的胞外分泌物可增加土壤酶种类,且根系分泌物和植被有机残体可为土壤微生物提供能量物质,从而增加了土壤酶和微生物的活性^[23]。惠竹梅等^[24]研究发现,葡萄园行间生草覆盖可显著提高土壤过氧化氢酶、脲酶、蔗糖酶、纤维素酶、碱性磷酸酶的活性。本试验中,3种生草覆盖处理的土壤过氧化氢酶、脲酶、纤维素酶活性均显著升高,其中以LP的效果最佳(图2)。王娜等^[25]也在长期生草对柑橘园不同土层土壤化学及生物学性质的影响研究中提出,植物生物学特征的不同也会对土壤养分和酶活性产生不同的影响。其原因可能是禾本科植物相较于豆科植物可以更好地提高土壤有机碳含量,土壤有机碳含量与酶活性密切相关,进而推测禾本科植物可以更好地提高土壤酶活性^[26]。王莹莹^[27]研究发现,草木樨、多年生黑麦草、多年生黑麦草+紫花苜蓿能显著提高0—20 cm土层碱性磷酸酶的活性,而本研究发现,LP和AM的土壤碱性磷酸酶活性均低于CK(图2),其原因可能与土壤肥力有关,还需做进一步考证。本研究结果表明,3种生草覆盖可以提高土壤有机质含量,提高微生物生物量,进而提高土壤酶活性,其原因是土壤酶活性主要受有机碳、氮、磷等含量的影响,生草覆盖可以提高土壤碳氮比,增加土壤微生物多样性,进而释放更多的酶^[28]。

3.3 不同生草覆盖对葡萄园土壤微生物群落结构的影响

由于土壤微生物群落对环境因子敏感,覆盖作物可通过改变土壤的理化性质来影响群落结构^[29]。本研究通过高通量测序分析技术发现,3种生草覆盖下土壤细菌门水平上优势菌群均主要含有放线

菌门、变形菌门、芽单胞菌门,这与薛晓敏等^[30]研究结果基本一致。在细菌群落中绿弯菌门具有促进土壤有毒物质降解的功能^[31],酸杆菌门大多是嗜酸菌,喜欢养分含量较低的土壤环境^[32],变形菌门的微生物多为兼性或者专性厌氧及异养微生物,该门的亚硝化单胞菌属有氧化铵的能力,放线菌门能够分解纤维和木质素,丰富的放线菌有利于土壤中植物有机残体的分解,芽单胞菌门具有典型的植物促生作用,可进行生物固氮并诱导植物分泌激素,进而提高土壤肥力或抑制病原微生物生长^[33]。本研究发现,AM、LP、TR的绿弯菌门丰度分别增加23.38%、34.17%、18.00%;酸杆菌门的丰度增加9.79%、12.55%、1.14%;LP和TR的芽单胞菌门增加13.54%、42.06%,AM则降低10.86%;表明3种生草覆盖有利于土壤中有毒物质的降解和养分含量的积累,改善土壤生态环境,这与杨金鹏等^[4]的研究结果一致;放线菌门的丰度分别降低9.41%、8.15%、6.89%,变形菌门的丰度分别降低4.51%、9.38%、10.38%,其原因可能与果园的施肥管理、生态环境等因素有关,还需做进一步考证。利用Tax4Fun预测分析发现,3种生草覆盖下土壤细菌功能在统计学上与CK的差异未达到显著水平($P>0.05$),但新陈代谢通路丰度分别升高0.26%(AM)、0.45%(LP)和0.45%(TR),这与冀明辉等^[34]的结果基本一致。

3种生草覆盖下土壤真菌群落门水平中子囊菌门、担子菌门和壶菌门作为优势菌门,它们均是以腐生营养型为主,在纤维素降解、有机物转化及养分循环等方面发挥着重要的作用^[34-36]。王守乐等^[37]对枣园土壤真菌群落结构研究发现,生草覆盖下土壤腐生营养型真菌相对丰度增加,而不同耕作模式间作用存在差异。本研究发现,3种生草覆盖下担子菌门相对丰度均显著升高,表现出 $TR>AM>LP$ (图3),与张翰林等^[38]研究结果一致,其原因可能是豆科植物属于高固氮植物,而担子菌门属于寡养微生物,在豆科植物覆盖下土壤C/N降低幅度大于禾本科植物,从而促进了担子菌门的繁殖^[39]。而子囊菌门仅在AM中丰度显著升高(图3),同时基于FUNGuild功能预测发现,3种生草覆盖下土壤腐生营养型真菌相对丰度均显著低于CK,其原因可能与土壤中腐殖质含量有关,还需做进一步验证分析。AM和LP均可显著提高被孢霉菌相对丰度,

被孢霉菌是土壤中养分转化的关键菌群,在枯根和凋零物的分解过程中发挥重要作用^[40],同时,被孢霉菌存在于具有病原微生物的环境中,可作为土壤健康状况的评价指标^[41]。基于FUNGuild功能预测发现,3种生草覆盖下病理-腐生-共生营养型、病理-共生营养型、共生营养型微生物显著增加(图4),这与王守乐等^[37]的研究结果基本一致。

4 结 论

3种生草覆盖均能改善贺兰山东麓葡萄园土壤微生物环境,与清耕(CK)相比,紫花苜蓿(AM)、黑麦草(LP)和白三叶(TR)覆盖的土壤盐渍化程度分别降低17.42%、8.52%、21.91%,有机质含量分别升高19.75%、8.23%、24.03%,全磷、速效磷含量也均显著增加,过氧化氢酶、脲酶、纤维素酶活性均显著升高。基于KEGG数据库,利用Tax4Fun工具对土壤细菌群落进行功能预测,新陈代谢(Metabolism)在所有通路中丰度最高, $\geq 48.76\%$,3种生草覆盖处理的新陈代谢功能细菌丰度分别升高0.26%(AM)、0.45%(LP)和0.45%(TR),利用FunGuild数据库对土壤真菌群落进行功能预测,3种生草覆盖下病理-腐生-共生营养型、病理-共生营养型、共生营养型真菌群落丰度均显著增加,AM分别增加5.21、5.89、16.12倍,LP分别增加9.10、3.01、7.70倍,TR分别增加3.44、0.17、7.39倍。主成分分析发现,CK、AM、LP和TR的综合得分分别为-1.876 20、-0.763 07、0.478 59和2.160 68,TR最高。综上,3种生草覆盖均有利于葡萄园生态环境的改善,白三叶覆盖处理(TR)的效果最好,因此,在宁夏贺兰山东麓‘马瑟兰’葡萄园生产中可优先考虑使用白三叶。

参考文献 References

- [1] 耿沙,张钦,段春芳,车彬,沈正松,熊贤坤,严炜,刘倩. 人工生草对干热河谷区芒果园杂草多样性和群落结构的影响[J/OL]. 草地学报, [2024-12-19]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3362.S.20241012.1011.006.html>
Geng S, Zhang Q, Duan C F, Che B, Shen Z S, Xiong X K, Yan W, Liu Q. Effects of artificial grass on weed diversity and community structure in mango orchard in dry-hot valley area [J/OL]. *Grassland Journal*, [2024-12-19]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3362.S.20241012.1011.006.html> (in Chinese)
- [2] 陈学森,张瑞洁,王艳廷,王楠,姜生辉,许海峰,刘静轩,王得云,曲常志,张艳敏,姜远茂,毛志泉. 苹果园种植长柔毛野豌豆结合自然生草对

- 土壤综合肥力的影响[J]. 园艺学报, 2016, 43(12): 2325-2334
- Chen X S, Zhang R J, Wang Y Y, Wang N, Jiang S H, Xu H F, Liu J X, Wang D Y, Qu C Z, Zhang Y M, Jiang Y M, Mao Z Q. Effects of growing hairy vetch (*Vicia villosa*) on the soil nutrient, enzyme activities and microorganisms in apple orchard [J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2016, 43(12): 2325-2334 (in Chinese)
- [3] Li L Y, Chen P, Wang K L, Zhang R Q, Yuan X L, Ge L, Li Q, Liu Y, Zhang X Q, Li Z G. Gramineae-legumes mixed planting effectively reduces soil and nutrient loss in orchards [J/OL]. *Agricultural Water Management*, [2023-11-01]. DOI: 10.1016/J.AGWAT.2023.108513
- [4] 杨金鹏, 牟兰, 仇嘉悦, 吴宗辉, 张鑫亮, 张美艳, 蔡明, 黄必志. 生草对滇中苹果园土壤酶活性和微生物群落多样性的影响[J/OL]. 草地学报, [2024-12-19]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3362.S.20241210.1353.002.html>
- Yang J P, Mou L, Qiu J Y, Wu Z Y, Zhang X L, Zhang M Y, Cai M, Huang B D. Effects of grass planting on soil enzyme activities and microbial community diversity in apple orchards in central Yunnan [J/OL]. *Grassland Journal*, [2024-12-19]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3362.S.20241210.1353.002.html> (in Chinese)
- [5] 李晓龙, 马军, 褚燕南, 岳海英, 王芳, 岳芬芬, 刘婷, 李元, 王媛, 吴昊, 贾永华, 田建文. 果园生草条件下苹果病虫害发生特征[J]. 植物保护, 2024, 50(6): 183-199
- Li X L, Ma J, Zhu Y N, Yue H Y, Wang F, Yue F F, Liu T, Li Y, Wang Y, Wu H, Jia Y H, Tian J W. Characteristics of apple pest and disease occurrence under orchard grass conditions [J]. *Plant Protection*, 2024, 50(6): 183-199 (in Chinese)
- [6] 井赵斌, 李鹏飞, 龙明秀, 马文娟. 生草对猕猴桃园土壤酶活性和土壤微生物的影响[J]. 草业科学, 2020, 37(9): 1710-1718
- Jing Z B, Li T F, Long M X, Ma W J. Effects of planted grasses on soil enzyme activities and microbial communities in a kiwifruit orchard [J]. *Pratacultural Science*, 2020, 37(9): 1710-1718 (in Chinese)
- [7] 薛婷婷, 程春颖, 杨帆, 张亮, 徐国前, 李茹一, 王江林, 张立霞, 梁泽炫, 周建华. 葡萄园有机覆盖措施对土壤特性的影响研究进展[J]. 中国农业大学学报, 2024, 29(6): 206-218
- Xue T T, Cheng C Y, Yang F, Zhang L, Xu G Q, Li R Y, Wang J L, Zhang L X, Liang Z X, Zhou J H. Effect of organic mulching practices on soil properties in vineyards: A review [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2024, 29(06): 206-218 (in Chinese)
- [8] Liu Z, Sun Y F, Zhang Y Q, Feng W, Lai Z R, Qin S G. Soil microbes transform inorganic carbon into organic carbon by dark fixation pathways in desert soil [J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2021, 126(5): 1-35
- [9] 王婧雅, 马楠. 以宁夏风土酿世界顶级葡萄酒[N]. 宁夏日报, 2024-02-20(001)
- Wang J Y, Ma N. Brewing world-class wines with Ningxia terroir [N]. *Ningxia Daily*, 2024-02-20(001) (in Chinese)
- [10] 田亚楠, 苏丽, 梁飞, 孙霄, 陈建胜, 李明. 行间生草对霞多丽葡萄及葡萄酒品质的影响研究[J]. 核农学报, 2024, 38(10): 1995-2002
- Tian Y N, Su L, Liang F, Sun X, Chen J S, Li M. Effect of inter-row planting grass on the quality of chardonnay grapes and wines [J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2024, 38(10): 1995-2002 (in Chinese)
- [11] 胡泽军, 张亚红, 张晓煜, 王锐. 宁夏贺兰山东麓酿酒葡萄不同子产区土壤肥力特征与评价[J]. 中国土壤与肥料, 2021(6): 35-41
- Hu Z J, Zhang Y H, Zhang X Y, Wang R. Characteristics and evaluation of soil fertility in different grape production areas at the eastern foot the eastern foothills of Helan Mountain, Ningxia [J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2021(6): 35-41 (in Chinese)
- [12] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 第3版. 北京: 中国农业出版社, 2013
- Bao S D. *Soil Agricultural Chemistry Analysis* [M]. 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2013 (in Chinese)
- [13] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京: 农业出版社, 1986
- Guan S Y. *Soil Enzymes and its Research Methods* [M]. Beijing: Agriculture Press, 1986 (in Chinese)
- [14] 毛文静, 杜天宇, 贺海耘, 卢璐, 孙琳娜, 陈鸿, 翟梅枝. 长期施肥对核桃产量及不同生育期土壤养分的影响[J]. 四川农业大学学报, 2024, 42(2): 1-16
- Mao W J, Du T Y, He H Y, Lu L, Sun L N, Chen H, Zhai H Z. Effects of long-term fertilization on walnut yield and soil nutrients at different growth stages [J]. *Journal of Sichuan Agricultural University*: 2024, 42(2): 1-16 (in Chinese)
- [15] 赵思东, 张琳, 谢志明, 袁德义. 覆草栽培对梨园土壤理化性质的影响[J]. 中南林学院学报, 2005, 25(4): 66-70
- Zhao S D, Zhang L, Xie Z M, Yuan D Y. Effects of grass covering grass plantation on the physical and chemical characteristics of soil in pear orchard [J]. *Journal of Central South Forestry University*, 2005, 25(4): 66-70 (in Chinese)
- [16] 马震珠, 魏倩倩, 李尚玮, 杨文权, 寇建村. 覆盖和埋置白三叶对黄土高原苹果园土壤细菌多样性的影响[J]. 水土保持通报, 2019, 39(5): 143-151
- Ma Z Z, Wei Q Q, Li S W, Yang W Q, Kou J C. Effects of covering or burying Trifolium repens on diversity of soil bacteria community in an apple orchard in Loess Plateau [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation Bulletin*, 2019, 39(5): 143-151 (in Chinese)
- [17] 任嘉欣, 黎昊, 兰翔伟, 王洁, 王顶, 谢军, 张宇亭, 石孝均. 覆盖作物多样性对橘园土壤理化性质的影响及综合评价[J/OL]. 中国草地学报, 2023, 45(09): 98-106
- Ren J X, Li H, Lan X W, Wang J, Wang D, Xie J, Zhang Y T, Shi X J. Effects of cover crop diversity on soil physicochemical properties in Citrus orchards and a comprehensive evaluation [J]. *Chinese Journal of Grassland Science*, 2023, 45(9): 98-106 (in Chinese)
- [18] 张永亮, 于铁峰, 郝凤. 施肥和混播对人工草地土壤速效养分含量的影响[J]. 中国草地学报, 2021, 43(9): 88-96.
- Zhang Y L, Yu T F, Hao F. Responses of soil available nutrients content in legume-grass mixture grassland to fertilization and mixed sowing ratio [J]. *Chinese Journal of Grassland*, 2021, 43(9): 88-96 (in Chinese)
- [19] Wu L P, Zheng H N, Wang X J. Effects of soil amendments on fractions and stability of soil organic matter in saline-alkaline paddy [J/OL]. *Journal of Environmental Management*, (2021-06-10), DOI: 10.1016/j.jenvman.2021.112993
- [20] 张帆, 马宗桓, 李文芳, 毛娟, 陈佰鸿. 生草类型对旱作区苹果园土壤营养及果实品质的影响[J]. 甘肃农业大学学报, 2024, 59(1): 135-143
- Zhang F, Ma Z H, Li W F, Mao J, Chen B H. Effects of grass types on soil nutrition and fruit quality of apple orchards in dryland area [J]. *Journal of Gansu Agricultural University*, 2024, 59(1): 135-143 (in Chinese)
- [21] 杨叶华, 张松, 王帅, 刘正兰, 方林发, 张学良, 刘瑞, 张建伟, 张宇亭, 石孝均. 中国不同区域常见绿肥产量和养分含量特征及替代氮肥潜力评估[J]. 草业学报, 2020, 29(06): 39-55
- Yang Y H, Zhang S, Wang S, Liu Z L, Fang L F, Zhang X L, Liu R, Zhang J W, Zhang Y T, Shi X J. Yield and nutrient concentration in common green manure crops and assessment of potential for nitrogen replacement in different regions of China [J]. *Acta Prataculturalae Sinica*,

- 2020, 29 (6): 39-55 (in Chinese)
- [22] Sun L Y, Zhang J, Zhao J, Lu X H, Xiao C L, Xiao Z F, Zhang T, Gu Y Q, Sun H, Liu H, Li Y L. Effects of Cinnamomum camphora coppice planting on soil fertility, microbial community structure and enzyme activity in subtropical China[J/OL]. *Frontiers in Microbiology*, [2023-01-10]. DOI: 10.3389/FMICB.2023.1104077
- [23] Compant S, Reiter B, Sessitsch A, Nowak J, Clément C, Ait Barka E. Endophytic colonization of *Vitis vinifera* L. by plant growth-promoting bacterium *Burkholderia* sp strain PsJN[J]. *Applied and environmental microbiology*, 2005, 71(4): 1685-1693
- [24] 惠竹梅, 李华, 龙妍, 张瑾, 庞学良. 葡萄园行间生草体系中土壤微生物数量的变化及其与土壤养分的关系[J]. 园艺学报, 2010, 37(9): 1395-1402
- Xi Z M, Li H, Long Y, Zhang J, Pang X L. Variation of soil microbial populations and relationships between microbial factors and soil nutrients in cover cropping system of vineyard [J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2010, 37 (9): 1395-1402 (in Chinese)
- [25] 王娜, 李乐, 勾蒙蒙, 简尊吉, 胡建文, 陈会玲, 肖文发, 刘常富. 长期生草对柑橘园土壤化学及生物学性质的影响[J/OL]. 生态学报, 2023, 43 (14): 5890-5901
- Wang N, Li L, Gou M M, Jian Z J, Hu J W, Chen H L, Xiao W F, Liu C F. Effects of long-term living grass mulching on soil chemical and biological properties in different soil layers of citrus orchards [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2023, 43(14): 5890-5901 (in Chinese)
- [26] 程滨, 赵瑞芬, 滑小赞, 郑普山, 王森, 王钊. 行间生草对核桃园土壤养分、有机碳组分及酶活性影响[J/OL]. 中国土壤与肥料, 2021(6): 57-64
- Cheng B, Zhao R F, Hua X Z, Zheng P S, Wang S, Wang Z. Effects of interrow grass on soil nutrients, organic carbon components and enzyme activities in walnut orchard[J]. *Chinese Soil and Sciences in China*, 2021 (6): 57-64 (in Chinese)
- [27] 王莹莹. 渭北旱塬苹果园行间生草及树盘覆盖对土壤理化性质和微生物群落的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2023
- Wang Y Y. Effects of inter row grass and tree canopy coverage on soil physicochemical properties and microbial communities in apple orchards on the Weibei arid plateau [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2023 (in Chinese)
- [28] 余高, 赵仕龙, 孙约兵, 罗有亮, 陈芬. 覆盖材料对云贵高原柑橘园土壤理化性质和细菌群落特征以及柑橘品质的影响[J/OL]. 生态学报, 2024, 44(8): 3408-3422
- Yu G, Zhao S L, Sun Y B, Luo Y L, Chen F. Effects of mulching materials on soil physio-chemical properties, bacterial community characteristics and citrus quality in orange orchards on the the Yunnan-Guizhou Plateau [J/OL]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, 44(8): 3408-3422 (in Chinese)
- [29] 孙文泰, 杨阳, 马明, 董铁, 尹晓宁, 牛军强. 覆膜对陇东旱地苹果根际土壤化感物质积累与真菌群落特征的影响[J]. 果树学报, 2024, 41 (7): 1342-1358
- Sun W T, Yang Y, Ma M, Dong T, Yin X N, Niu J Q. Effects of film mulching on allelopathic material accumulation and fun-gal community characteristics in rhizosphere soil of apple in Longdong dryland [J]. *Journal of Pomology*, 2024, 41 (7): 1342-1358 (in Chinese)
- [30] 薛晓敏, 王来平, 韩雪平, 陈汝, 王金政. 不同树盘覆盖对矮砧苹果园土壤微生物群落结构和多样性的影响[J]. 生态学报, 2021, 41 (4): 1528-1536
- Xue X M, Wang L P, Han X P, Chen R, Wang J Z. Effects of different tree disk mulching on soil microbial community structure and diversity in dwarfing rootstock apple orchard [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41 (4): 1528-1536 (in Chinese)
- [31] 陈海生, 刘守平, 梁国钱, 何道根. 3种西兰花种植方式对根际土壤细菌群落结构和多样性的影响研究[J]. 核农学报, 2021, 35 (6): 1457-1465
- Chen H S, Liu S P, Liang G Q, He D G. Study on the Effects of three cropping patterns on bacterial community structure and diversity in rhizosphere of broccoli [J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2021, 35 (6): 1457-1465 (in Chinese)
- [32] Meng H, Li K, Nie M, Wan J R, Quan Z X, Fang C M, Chen J K, Gu J D, Li B. Responses of bacterial and fungal communities to an elevation gradient in a subtropical montane forest of China [J]. *Applied Microbiology & Biotechnology*, 2013, 97 (5): 2219-2230
- [33] 李昱龙, 韩正敏. 嗜麦芽窄食单胞菌在环保和农业生产上的应用[J]. 生物技术通报, 2015, 31 (8): 35-43
- Li Y L, Han Z M. The applicatioin of *Stenotrophomonas maltophilia* in environmental remediation and agriculture [J]. *Biotechnology Bulletin*, 2015, 31 (8): 35-43 (in Chinese)
- [34] 冀明辉, 徐金涛, 马庆叠, 李龙飞, 刘欢, 高丽娟, 郝宝峰. 梨园行内蛇莓覆盖在季节更替中的土壤微生物群落研究[J]. 中国土壤与肥料, 2024 (9): 23-36
- Ji M H, Xu J T, Ma Q D, Li L F, Liu H, Gao L J, Hao B F. Study of soil microbial communities of Indian-strawberry covering in pear orchard rows during seasonal turnover [J/OL]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2024(9): 23-36 (in Chinese)
- [35] 赵竟茹, 晏蒙, 吴远诺, 刘天赐, 李绍兵, 冷珂, 项兴佳, 刘佳. 添加毛叶苕子对红壤旱地土壤真菌群落的影响[J]. 微生物学报, 2024, 64 (2): 581-596
- Zhao J R, Yan M, Wu Y N, Liu T C, Li S B, Leng K, Xiang X J, Liu J. The effect of adding Mao Ye Tiaozi on soil fungal community in red soil dryland [J]. *Acta Microbiologica Sinica*, 2024, 64 (2): 581-596 (in Chinese)
- [36] Beimforde C, Feldberg K, Nylinder S, Rikinen J, Tuovila H, D rfelt H, Gube M, Jackson D J, Reitner J, Seyfullah L J, Schmidt A R. Estimating the phanerozoic history of the ascomycota lineages: Combining fossil and molecular data [J]. *Molecular Phylogenetics and Evolution*, 2014, 78: 386-398
- [37] 王守乐, 王中堂, 李盼, 张琼. 生草模式对枣园土壤真菌群落结构组成与共线性网络的影响[J]. 生态学报, 2024, 44 (18): 8423-8433
- Wang S L, Wang Z T, Li P, Zhang Q. Effects of grass mode in jujube orchard on the structural composition and co-occurrence network of soil fungal community [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, 44 (18): 8423-8433 (in Chinese)
- [38] 张翰林, 白娜玲, 郑宪清, 李双喜, 张娟琴, 张海韵, 周胜, 孙会峰, 吕卫光. 秸秆还田与施肥方式对稻麦轮作土壤细菌和真菌群落结构与多样性的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2021, 29 (3): 531-539
- Zhang H L, Bai N L, Zheng X Q, Li S X, Zhang J Q, Zhang H Y, Zhou S, Sun H F, Lu W G. Effects of straw returning and fertilization methods on soil bacterial and fungal community structures and diversities in rice-wheat rotation soil [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture* 2021, 29 (3): 531-539 (in Chinese)
- [39] 胡颖祺, 梁辰飞, 金锦, 王潇璇, 叶子豪, 吴家森. 长期生草栽培对山核桃人工林土壤真菌群落和酶活性的影响[J]. 环境科学, 2023, 44(5): 2945-2954
- Hu Y B, Liang C F, Jin J, Wang X X, Ye Z H, Wu J S. Effects of long-term sod cultivation on Chinese hickory plantation soil fungal community and enzyme activites [J]. *Environmental Science*, 2023, 44 (5): 2945-

2954 (in Chinese)

- [40] 宁琪, 陈林, 李芳, 张丛志, 马东豪, 蔡泽江, 张佳宝. 被孢霉对土壤养分有效性和秸秆降解的影响[J]. 土壤学报, 2022, 59 (1): 206-217

Ning Q, Chen L, Li F, Zhang C Z, Ma D H, Cai Z J, Zhang J B. Effects of Mortierella on nutrient availability and straw decomposition in soil[J].

Acta Pedologica Sinica, 2022, 59 (1): 206-217 (in Chinese)

- [41] Yang C, Tang W, Sun J Q, Guo H P, Sun S S, Miao F H, Yang G F, Zhao Y R, Wang Z Y, Sun J. Weeds in the alfalfa field decrease rhizosphere microbial diversity and association networks in the North China Plain [J/OL]. *Frontiers in Microbiology*, [2022-02-07]. DOI: 10.3389/FMICB.2022.840774

责任编辑: 吕晓梅



第一作者简介: 范瑾, 宁夏大学葡萄酒与园艺学院农艺与种业专业硕士研究生。曾参与宁夏回族自治区自然科学基金项目(2024AAC02025; 2021AAC03090); 荣获宁夏大学 2023—2024 学年三等学业奖学金。



通讯作者简介: 李明, 博士, 宁夏大学葡萄酒与园艺学院副教授, 硕士生导师, 主要从事葡萄园生态系统调控、土壤肥力提升研究工作。目前主持宁夏回族自治区自然科学基金项目(2021AAC03090, 2023AAC03113, 2024AAC02025)、宁夏回族自治区重点研发项目子课题(2021BEF02016-1, 2024BBF01003-03)。近 5 年, 在核心期刊发表相关论文 10 余篇, 获得宁夏回族自治区自然科学优秀学术论文奖 1 项、申请发明专利 1 项。