第45卷 第3期 华 中 农 业 大 学 学 报 Vol.45 No.3
2026年 5月 Journal of Huazhong Agricultural University May 2026,235~245

刘颖,马玉华,周俊良,等.凤梨废弃植株覆盖对火龙果根际土壤理化性质及微生物群落的影响[J].华中农业大学学报,2026,45(3):235-245.
DOI:10.13300/j.cnki.hnlkxb.2026.03.021

凤梨废弃植株覆盖对火龙果根际土壤理化性质及微生物群落的影响

刘颖[1],马玉华[2],周俊良[1],肖图舰[1],毛永亚[1]

1.贵州省农业科学院果树科学研究所,贵阳 550006;
2.贵州省农业科学院亚热带作物研究所,贵阳 550006

摘要 为探究覆盖处理对火龙果根际土壤及果实品质的影响,以'黔蜜龙'火龙果为试验材料,利用火龙果果园套种产生的凤梨废弃植株进行覆盖处理(SM),不覆盖为对照(CK),覆盖1 a后采集土壤样品及果实样品,分析凤梨废弃植株覆盖处理对火龙果根际土壤的理化性质、酶活性、土壤微生物群落结构多样性及火龙果果实品质的影响。结果显示,与对照相比,覆盖后火龙果根际土壤有机质含量增加了119.26%,显著提高了土壤养分含量,硝酸还原酶活性、脲酶活性、纤维素酶活性和蔗糖酶活性分别显著提高了107.37%、13.70%、16.37%和25.74%,火龙果单果质量、可溶性固形物含量、可溶性糖含量和可滴定酸含量分别提升22.10%、5.80%、3.25%和11.76%;覆盖显著提高细菌变形菌门、酸杆菌门以及真菌子囊菌门和担子菌门的相对丰度,较对照分别提高了20.35%、15.81%、12.08%和58.58%,细菌绿弯菌门和放线菌门的相对丰度较对照显著降低了16.13%和12.97%;Alpha多样性分析结果显示,覆盖对土壤细菌群落的影响不显著;真菌群落的Shannon指数、Simpson指数、Invsimpson指数和Pielou指数较对照显著提高了37.72%、15.66%、61.42%和60.00%;相关性分析及结构方程模型显示,土壤碱解氮是影响火龙果果实可溶性固形物和可滴定酸含量的主效因子,其次是土壤脲酶活性。以上结果表明,凤梨废弃植株覆盖措施可显著增加土壤有机质含量,利于土壤细菌群落和真菌群落繁殖,调节土壤微生物群落结构多样性和丰度,正向提高土壤碱解氮含量和脲酶活性,提升火龙果果实产量及内在品质。

关键词 火龙果;覆盖;土壤理化性质;酶活;微生物群落

中图分类号 S667.9 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2026)03-0235-11

火龙果(*Hylocereus undatus* Britt. & Rose)是仙人掌科(Cactaceae)多年生攀援性热带果树,是贵州精品特色水果和喀斯特石漠化山区治理的良好经济作物。在果树栽培过程中,土壤覆盖对果树生长和果实品质提升具有重要作用,果树的生长发育、果实形态及品质积累与土壤理化性质和微生物群落结构功能密切相关[1-2]。成文竞等[3]连续2 a采用蟠桃果园修剪的碎枝对桃园进行复合覆盖,结果发现土壤有机质、全氮、有效磷、速效钾和含水率显著提升,达到果园增产提质的效果。钟昌宏等[4]研究发现,覆盖能显著降低火龙果园土壤温度,提高果园土壤有机质、碱解氮和有效磷含量,显著提高火龙果花苞数和果实产量。田玉莉等[5]分析了3种不同覆盖措施对果园土壤酶活性的影响,结果发现覆盖措施不同程度地提高了0~40 cm各土层土壤绝对酶活性,且土壤相对酶活性变化与绝对酶活性变化基本一致。刘子涵等[6]研究发现,不同覆盖方式处理均显著改变了土壤微生物的群落结构和多样性。因此,果园土壤覆盖对改变土壤微生物群落、改善土壤理化性质及提升果实品质具有重要意义。

贵州火龙果种植区域土壤大多存在土层薄、有机质缺乏、易板结且保水保肥能力较差等劣势,加之近年来的异常气候频繁出现,火龙果产区常出现持续性干旱和降雨现象,产区集中降雨量占全年降雨量的80%以上,导致多数果园生产管理受干旱期给水不足、集中降雨期恶性杂草生长快、果园的管理成本增加的影响较为严重。笔者所在课题组前期开展火龙果行间套种凤梨研究发现,凤梨废弃植株可用

收稿日期:2025-06-16
基金项目:贵州省科技计划项目(黔科合成果[2023]一般071);贵州省科技平台及人才计划项目(黔科合平台人才-GCC[2022]025-1)
刘颖,E-mail:ly15761636417@163.com
通信作者:毛永亚,E-mail:463033952@qq.com

于火龙果根部土壤的覆盖，能有效地减少火龙果根际恶性杂草生长，且能更好地保水保湿，有利于火龙果生长，但是利用凤梨废弃植株进行果园覆盖及覆盖后对土壤理化性质、微生物群落及果实品质的影响尚未见报道。因此，本研究利用火龙果果园套种产生的凤梨废弃植株对火龙果进行覆盖处理，研究覆盖处理后土壤理化性质、土壤酶活性和微生物群落特性等变化规律及差异，旨在明确影响火龙果生长发育及果实品质性状的关键土壤因子，优化火龙果园管理措施。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

本研究试验地位于贵州省果树科学研究所镇宁基地（25°31′24″N，105°46′16″E），试验地土壤为黄壤土，海拔400 m，年平均气温20.1 ℃，绝对低温5 ℃，年降雨量1 100 mm，年日照时数为2 765 h，全年无霜。土壤基础肥力见表1。

表1 试验地土壤基础肥力

Table 1 Soil base fertilizer of the experimental field

土壤指标 Soil parameter	测定值 Measured value
有机质/(g/kg) Organic matter	6.66
全氮/(g/kg) Total nitrogen	0.91
全磷/(g/kg) Total phosphorus	0.30
全钾/(g/kg) Total potassium	14.90
碱解氮/(mg/kg) Alkaline hydrolyzed nitrogen	36.40
有效磷/(mg/kg) Available phosphorus	0.30
速效钾/(mg/kg) Available potassium	68.00
pH	7.09

1.2 试验设计

供试火龙果品种为‘黔蜜龙’，2023年7月采用排架式起垄定植，垄高20 cm，垄宽50 cm，垄面采用“Z”字形进行火龙果双行种植，株行距为50 cm×30 cm。2023年10月‘黔蜜龙’火龙果上架，11月利用凤梨废弃植株对火龙果垄面进行全覆盖（厚度为10 cm，时间为12个月），设置对照组（CK）和覆盖组（SM）2个处理，每个处理3次重复。覆盖期间，田间栽培管理措施均一致。

1.3 土壤样品采集

于2024年11月进行土壤样品采集，参照文献[7]的方法，取得的土样混合均匀后过2 mm筛，平均分成3份，分别用于土壤养分、土壤酶活性、土壤微生物群落测定。

1.4 土壤养分含量、酶活性测定

土壤理化指标参照文献[8]的方法进行测定，土壤pH值采用电位法测定；土壤含水率采用烘干法测定；土壤碱解氮的测定采用碱解扩散法；土壤全氮含量采用凯式法消解（硫酸-催化剂消解法）测定；土壤全钾、速效钾利用FP6410-火焰光度计进行火焰光度法测定；土壤全磷采用NaOH熔融法-钼锑抗比色法进行测定；土壤有效磷采用（酸性）双酸浸提-钼锑抗比色法测定。

土壤酶活性指标测定均采用试剂盒测定，由上海原鑫生物科技有限公司提供，参照文献[9]的方法测定土壤α-葡萄糖苷酶、几丁质酶、脲酶、纤维素酶、蔗糖酶、硝酸还原酶和亚硝酸还原酶的活性。

1.5 土壤微生物高通量测序

土壤微生物群落结构的16S rRNA基因V3～V4可变区域和ITS区域通过高通量扩增子测序分析，委托贵州百洛尼检测技术有限公司代理完成。首先进行土壤样本微生物群落基因组DNA抽提，然后用1%的琼脂糖凝胶电泳检测DNA的提取质量，并测定DNA浓度和纯度。土壤细菌16S rRNA基因的V3～V4可变区域以具有条形码的特异性引物341F（5′-CCTAYGGGRBGCASCAG-3′）和806R（5′-GGACTACNNGGGTATCTAAT-3′）进行PCR扩增，土壤真菌ITS区域通过引物ITS1FI2（5′-GTGARTCATCGAATCTTTG-3′）和ITS2（5′-TCCTCCGCTTATTGATATGC-3′）进行PCR扩增。为确保可靠性，每个样本进行3次PCR重复试验，回收足够的PCR产物后纯化，用2%琼脂糖凝胶电泳检测，并进行检测定量。使用VAHTS® Universal Plus DNA Library Prep Kit for MGI V2进行相应的文库建库并进行高通量测序。利用fastp软件对原始测序序列进行质控，使用FLASH软件进行拼接，筛选出高质量的有效数据。设定97%的同一性阈值，对序列进行操作分类单元（OTU）聚类，选取每个OTU中最长的序列作为该OTU的代表序列。最后进行OTU代表序列的物种注释，以确定分类地位。

1.6 果实品质测定

于2024年11月同步采集火龙果果实样品，每个处理5个果，3次重复，每个处理共15个果实样品用于单果质量、可溶性固形物含量等指标检测。使用电子天平（精确到0.01 g）测量果实单果质量，使用PAL-1糖度计（爱拓，Japan）测定果实可溶性固形物，可滴定酸含量、可溶性糖含量分别用酸碱中和滴定

法(以柠檬酸计)[10]、蒽酮-硫酸比色法[11]检测。

1.7　数据处理与分析

使用Microsoft Excel 2019 软件进行数据统计分析;使用SPSS 25.0 软件对土壤理化指标、土壤酶活性和果实品质数据进行显著性分析;使用Mothur1.3.0.2 计算微生物群落的Alpha多样性[12];使用R语言(version 3.3.1)进行统计、绘制群落柱形图、样本层级聚类图,采用vegan软件包(vsesion2.4.3)进行非度量多维尺度(non-metric multidimensional scaling, NMDS)分析和作图。使用Origin软件进行土壤因子与火龙果果实品质性状的相关性分析。基于相关性分析结果,参照文献[13]的方法,采用AMOS v23.0(IBM公司,美国)构建结构方程模型(SEM),探究土壤关键理化指标和微生物群落Alpha多样性对火龙果品质的直接效应和间接效应,其中选取Simpson指数代表微生物多样性。

2　结果与分析

2.1　火龙果果实品质

由表2可知,火龙果垄面覆盖显著提升火龙果果实单果质量及果实内在品质,覆盖后火龙果单果质量、可溶性固形物含量、可溶性糖含量和可滴定酸含量较对照分别提升22.10%、5.80%、3.25% 和11.76%。

表2　2种模式下火龙果果实品质比较

Table 2　Comparison of pitaya fruit quality under two modes

处理 Treatment	单果质量/g Single fruit weight	可溶性固形物/% Soluble solids	可溶性糖/(mg/g) Soluble sugar	可滴定酸/% Titratable acid
对照 CK	321.53±0.74b	15.00±0.25b	12.28±0.22b	0.17±0.11b
覆盖 SM	392.60±0.92a	15.87±0.42a	12.68±0.86a	0.19±0.22a

注:不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$);下同。Note: Different lowercase letters indicates significant difference between different treatments ($P<0.05$); the same below.

2.2　火龙果根际土壤理化性质及酶活性

由表3可知,覆盖处理显著增加了火龙果根际土壤中有机质、全磷、全钾、碱解氮、有效磷和速效钾等指标含量,较对照分别提高了119.26%、15.79%、5.86%、64.80%、199.87% 和9.80%,而土壤pH值和土壤全氮含量较对照分别降低了11.53% 和31 .62%。

由表4可知,覆盖处理显著提高了火龙果根际土壤蔗糖酶、纤维素酶、脲酶和硝酸还原酶等土壤酶活性,较对照分别增加25.74%、16.37%、13.70% 和107.37%,但对α-葡萄糖苷酶、几丁质酶和亚硝酸还原酶活性均无显著影响。

表3　2种模式下火龙果根际土壤理化性质比较

Table 3　Comparison of physicochemical properties of pitaya rhizosphere soil under two modes

处理 Treatment	pH	有机质/(g/kg) Organic matter	全氮/(g/kg) Total nitrogen	全磷/(g/kg) Total phosphorus	全钾/(g/kg) Total potassium	碱解氮/(mg/kg) Alkaline hydrolyzed nitrogen	速效钾/(mg/kg) Available potassium	有效磷/(mg/kg) Available phosphorus
对照CK	7.63±0.04a	8.88±0.11b	1.54±0.01a	0.38±0.01b	19.80±0.11b	48.01±1.69b	153.75±1.19b	7.75±0.17b
覆盖SM	6.75±0.03b	19.47±0.56a	1.17±0.01b	0.44±0.01a	20.96±0.08a	79.12±1.12a	168.82±2.30a	23.24±0.49a

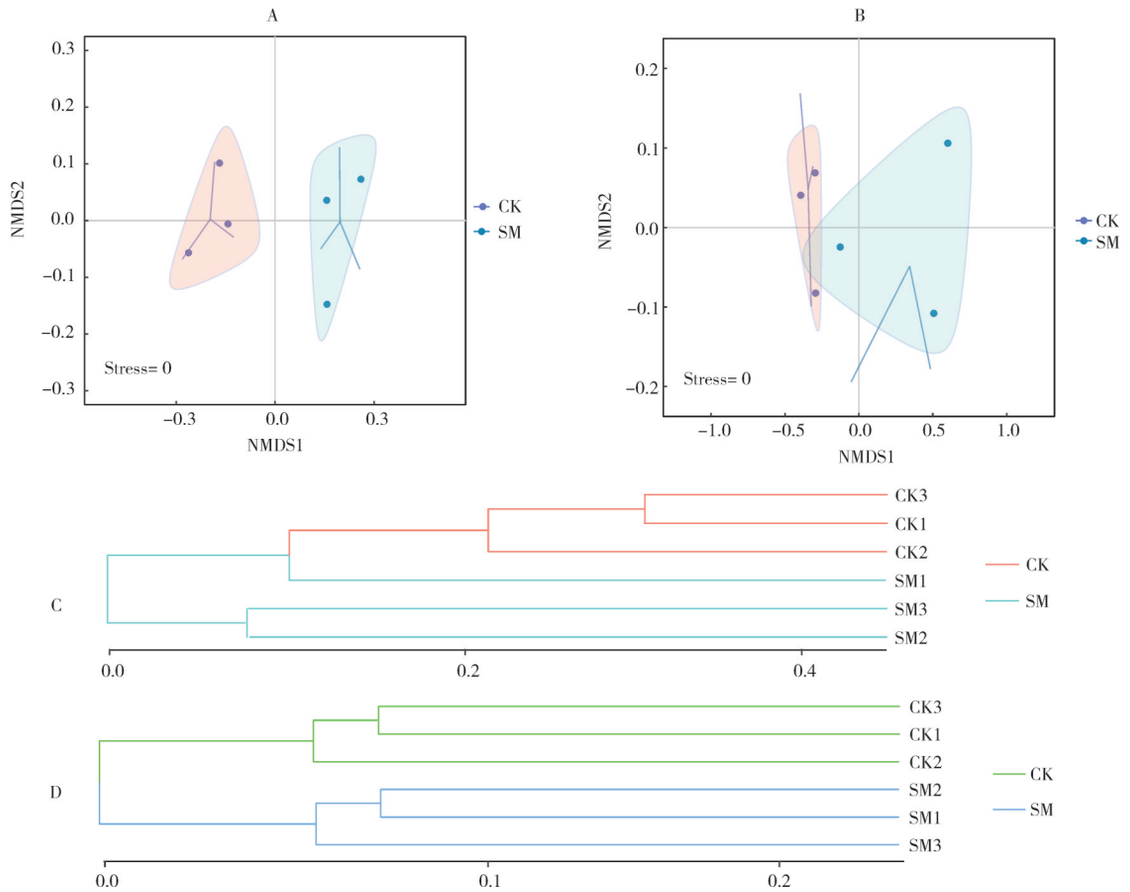
表4　2种模式下火龙果根际土壤酶活性比较

Table 4　Comparison of enzyme activity of pitaya rhizosphere soil under two modes

处理 Treatment	α-葡萄糖苷酶/[μmol/(d·g)] α-Glucosidase	蔗糖酶/[mg/(d·g)] Sucrase	纤维素酶/[mg/(d·g)] Cellulase	几丁质酶/[μg/(d·g)] Chitinase	硝酸还原酶/[μmol/(d·g)] Nitrate reductase	亚硝酸还原酶/[μmol/(d·g)] Nitrite reductase	脲酶/[μg/(d·g)] Urease
对照CK	6.46±1.62a	59.24±0.85b	31.95±1.15b	149.80±2.46a	0.95±0.31b	10.66±1.59a	290.43±1.68b
覆盖SM	14.93±2.14a	74.49±0.82a	37.18±1.53a	150.20±2.48a	1.97±0.42a	11.46±1.05a	330.23±1.46a

2.3　火龙果根际土壤微生物群落

利用高通量测序技术从火龙果根际土壤样本中分别获得788 212、669 530条序列数据用于细菌和真菌微生物分析。由图1可知,SM处理和CK处理条件下,根际土壤的细菌群落处于不同聚类圈内,2种土壤样本的细菌群落分成2个分支,说明SM处理和CK处理土壤样本的细菌结构存在差异。土壤样本真菌的NMDS分析和层次聚类结果表明,SM处理



A和B分别为基于未加权 UniFrac 的细菌和真菌 NMDS；C和D分别为基于未加权 UniFrac 距离的细菌和真菌多样性聚类树。A and B are bacterial and fungi NMDS based on the unweighted UniFrac ; C and D are bacterial and fungi based on unweighted UniFrac distance diversity clustering tree.

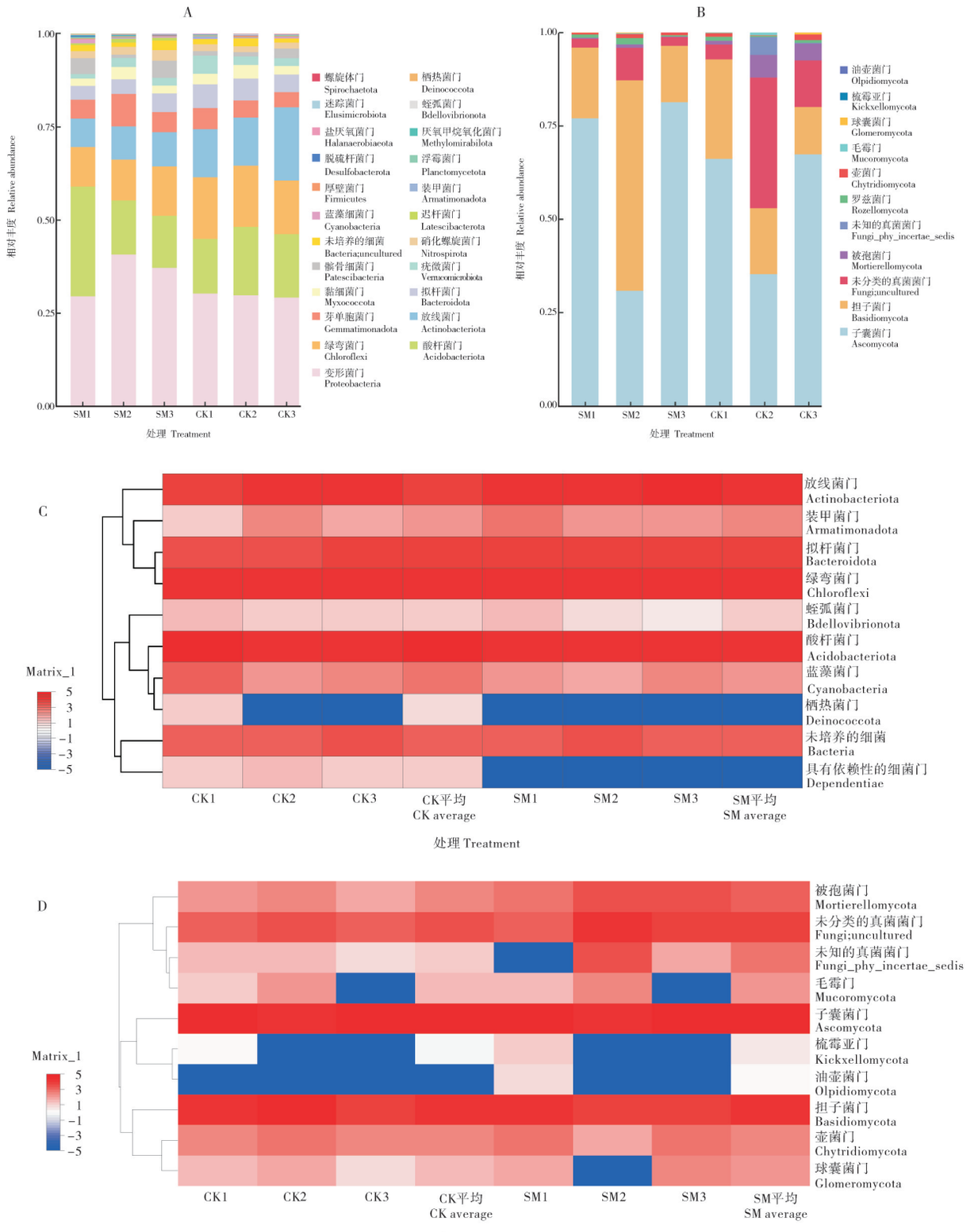
图1 2种模式下火龙果根际土壤微生物的聚类信息

Fig. 1 Clustering information of pitaya rhizosphere soil microorganisms under two modes

和CK处理之间真菌的群落结构差异不明显。

由图2A可知，2种模式的根际土壤中，细菌群落相对丰度由高到低的前10个门分别为变形菌门(29.73%～35.78%)、酸杆菌门(16.70%～19.34%)、绿弯菌门(13.58%～15.77%)、放线菌门(13.42%～15.16%)、芽单胞菌门(4.78%～6.39%)、拟杆菌门(4.22%～5.67%)、黏菌门(2.43%～2.92%)、疣微菌门(1.93%～3.08%)、髌骨细菌门(1.66%～3.25%)和硝化螺旋菌门(1.66%～2.26%)；优势菌门为变形菌门、酸杆菌门、绿弯菌门和放线菌门，其相对丰度总和占比为73.43%～86.05%。在门水平上，覆盖模式下细菌的优势菌群类别与对照总体相似，但其丰度存在差异。凤梨废弃植株覆盖提高了变形菌门和酸杆菌门的相对丰度，较对照分别提高了20.35%和15.81%；凤梨废弃植株覆盖降低了绿弯菌门和放线菌门的相对丰度，较对照分别降低了16.13%和12.97%(图2A)。通过OTU分析确定在门水平上土壤的细菌微生物组主要包括蛭弧菌门、拟杆菌门、异常球菌门、蓝藻菌门、酸杆菌门、弯曲菌门、绿弯菌门、装甲菌门和放线菌门。火龙果根际土壤中放线菌门、酸杆菌门和绿弯菌门的细菌平均丰度较高(图2C)。

2种模式下火龙果园根际土壤真菌群落主要为子囊菌门、担子菌门、未分类的真菌以及被孢霉门构成；其丰度较高的门为子囊菌门(56.25%～63.05%)和担子菌门(19.01%～30.15%)。覆盖模式下真菌的优势菌群类别在门水平上与对照总体相似，但其丰度上存在差异(图2B)。凤梨废弃植株覆盖提高子囊菌门和担子菌门相对丰度，较对照分别提高了12.08%和58.58%；通过OTU分析确定在门水平上土壤的真菌微生物组主要包括球囊菌门、壶菌门、担子菌门、油壶菌门、梳霉亚门、子囊菌门、毛菌门和被孢菌门等。火龙果根际土壤中的子囊菌门和担子菌门的真菌平均丰度较高(图2D)。



A 和 B 表示细菌和真菌门水平上的丰度直方图；C 和 D 为土壤细菌、真菌微生物丰度热图，红色越深表示丰度越高。A and B represents histograms of abundance at the bacterial and fungal phylum level; C and D is a heat map of microbial abundance in the core of soil bacteria and fungi, and the depth of the red indicates the strength of the abundance.

图 2　2 种模式下火龙果根际土壤微生物群落的组成分类

Fig. 2　Classification of pitaya rhizosphere soil microbial community composition under two modes

2.4 根际土壤微生物群落物种Alpha多样性分析

由表5可知，测序结果中细菌和真菌群落的覆盖率均高于99%，说明测序结果能够较好地反映其物种多样性。果园覆盖模式下，火龙果根际土壤细菌群的Shannon指数、Simpson指数和Invsimpson指数、Chao1指数、ACE指数和Pielou指数无明显变化，真菌群落的Shannon指数、Simpson指数、Invsimpson指数和Pielou指数显著提高，说明进行覆盖处理能够显著提高真菌物种的多样性和均匀度。综上可知，利用凤梨废弃植株对火龙果果园进行覆盖，对土壤细菌群落的丰富度、均匀度及多样性的作用并不显著，却能显著提高土壤真菌群落的均匀度和多样性。

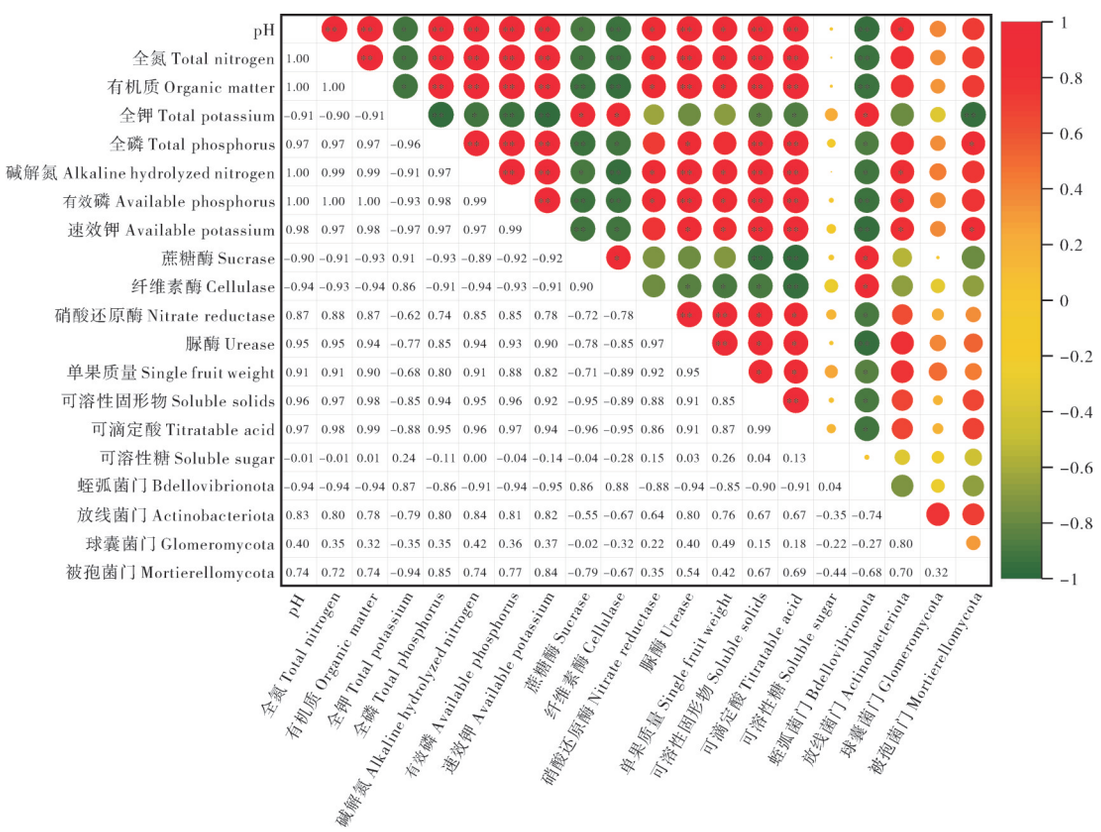
表5 2种模式下火龙果根际土壤微生物Alpha多样性指数

Table 5 Alpha diversity index of pitaya rhizosphere soil microorganisms under two modes

土壤微生物 Soil microorganism	处理 Treatment	Chao1指数 Chao1 index	Shannon指数 Shannon index	Simpson指数 Simpson index	Invsimpson指数 Invsimpson index	Pielou指数 Pielou index	ACE指数 ACE index	覆盖度/% Coverage
细菌 Bacteria	CK	1627.16±18.23a	6.07±0.04a	0.99±0.01a	180.30±8.90a	0.83±0.01a	1609.39±17.22a	99.91±0.00a
	SM	1612.67±23.13a	6.14±0.07a	0.99±0.01a	220.88±13.08a	0.84±0.01a	1603.71±18.53a	99.91±0.00a
真菌 Fungi	CK	339.84±21.32a	2.89±0.24b	0.83±0.07b	17.73±2.52b	0.50±0.04b	334.19±16.42a	99.94±0.00b
	SM	205.88±25.27a	3.98±0.13a	0.96±0.01a	28.62±2.76a	0.80±0.07a	209.31±23.84a	99.98±0.00a

2.5 相关性及结构方程模型分析

由图3可知，火龙果单果质量与土壤pH、全氮、有机质、碱解氮、有效磷、速效钾呈显著正相关，与硝酸还原酶、脲酶活性呈极显著正相关，与纤维素酶活性呈显著负相关，与蛭弧菌门相对丰度呈显著负相关；可溶性固形物含量与土壤pH、全氮、有机质、全磷、碱解氮、有效磷、速效钾呈极显著正相关，与硝酸还原酶、脲酶活性呈显著正相关；可滴定酸含量与土壤pH、全氮、有机质、全磷、碱解氮、有效磷、速效钾呈极显著正相关，与硝酸还原酶、脲酶活性呈显著正相



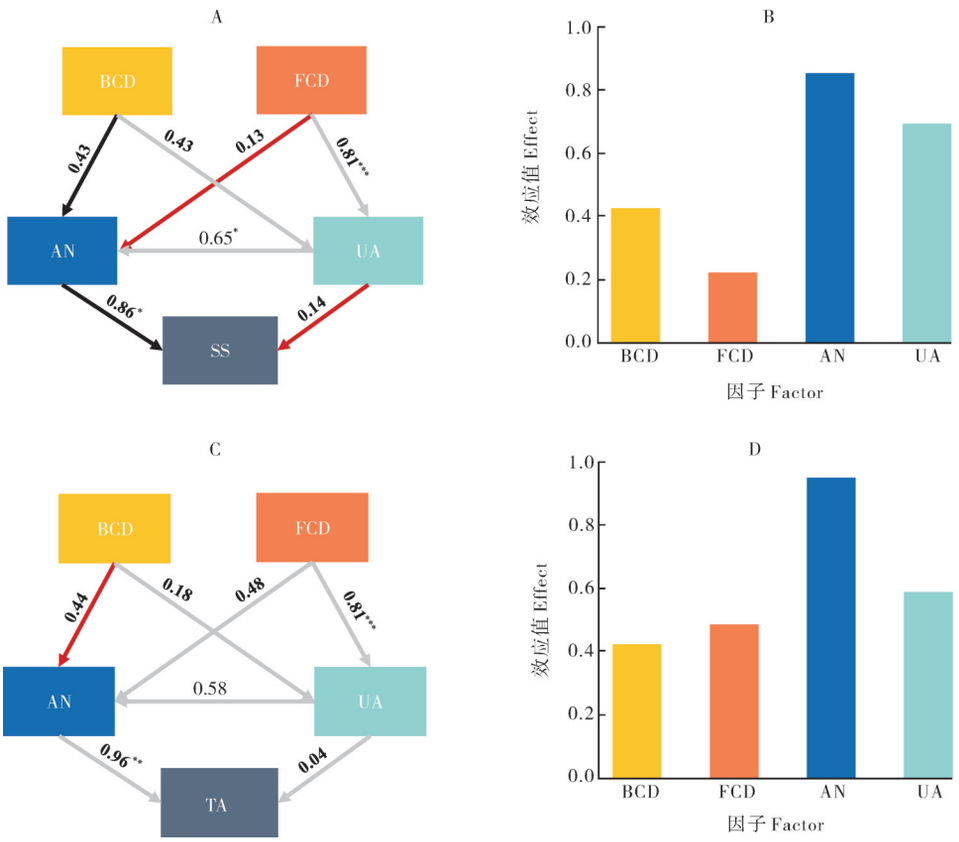
*表示相关性达显著水平（$P<0.05$），**表示相关性达极显著水平（$P<0.01$）。绿色代表负相关关系，红色代表正相关关系，颜色越深表示相关性越大。* indicates a significant level of correlation ($P<0.05$), ** indicates a very significant level of correlation ($P<0.01$). Green represents a negative correlation, red represents a positive correlation, and the depth of the color indicates the strength of the correlation.

图3 火龙果果实性状与土壤因子的相关性分析

Fig. 3 Correlation analyses between pitaya fruit traits and soil factors

关，可溶性糖含量与各土壤因子无明显相关性。

采用结构方程模型进一步确定上述指标和火龙果内在品质的关系，由图 4 可知，覆盖模式下土壤碱解氮含量和火龙果果实可溶性固形物含量、可滴定酸含量为显著正相关，是影响火龙果果实内在品质的主效因子。细菌群落多样性对碱解氮含量和脲酶活性无显著影响，真菌群落对碱解氮含量无显著影响，但其对土壤脲酶活性具有正向的显著影响，表明其主要通过提升脲酶活性进而间接促进火龙果对碱解氮的吸收，最终影响火龙果果实的内在品质。细菌群落多样性、真菌群落多样性、碱解氮和脲酶等因子对火龙果果实内在品质影响效应不同，碱解氮的效应最大，其次是脲酶。细菌群落多样性对可溶性固形物和可滴定酸含量的影响效应相近。真菌群落多样性对可滴定酸含量的影响高于细菌群落，但对可溶性固形物的影响较小。



A 和 C 分别表示结构方程模型分析土壤微生物群落多样性与理化指标对火龙果果实可溶性固形物含量和可滴定酸含量的影响路径；B 和 D 分别表示各土壤指标变量对火龙果果实可溶性固形物含量和可滴定酸含量的标准化效应值。BCD：细菌群落多样性；FCD：真菌群落多样性；AN：碱解氮；UA：脲酶；SS：可溶性固形物；TA：可滴定酸。路径系数标注于箭头旁，*表示 $P<0.05$，**表示 $P<0.01$，***表示 $P<0.001$。A and C represent the structural equation modeling of soil microbial community diversity and physicochemical indicators to soluble solids content and titratable acid content of pitaya fruit; B and D represent the standardized path coefficients of each soil parameter on the soluble solids content and titratable acid content of pitaya fruit. BCD: Bacterial community diversity; FCD: Fungal community diversity; AN: Alkaline hydrolyzed nitrogen; UA: Urease activity; SS: Soluble solids; TA: Titratable acid. Path coefficients are adjacent to arrows, *indicates $P<0.05$, **indicates $P<0.01$, ***indicates $P<0.001$.

图 4　关键因子对火龙果内在品质的影响及其标准化效应的结构方程模型

Fig. 4　Structural equation model showing effects of key factors on the intrinsic quality of pitaya fruit and their standardized effects

3　讨　论

土壤养分是果树生长发育的重要来源，土壤理化性质会影响果树对土壤养分的吸收与利用[14]。生物覆盖能直接或间接改善土壤物理结构、增加土壤有机质、提升土壤肥力[15]。王倩等[16]对果园进行生草覆盖后发现，土壤有机质含量较对照提高了 55.19%，孙萌等[17]利用碎木屑进行桃园覆盖后土壤中脲酶和纤维素酶活性较对照提高了 9.8% 和

47.3%,温晓霞等[18]研究表明,秸秆覆盖使得苹果园土壤蔗糖酶活性提升了79.10%,白雪等[19]利用生物降解地膜覆盖发现,0~20 cm 土层硝酸还原酶活性较对照提高了42 .86%,本研究中覆盖后有机质含量、脲酶、蔗糖酶、纤维素酶和硝酸还原酶活性较对照分别提高119.26%、13.70%、25.74%、16.37% 和107.37%,与上述研究结果一致。本研究中覆盖模式显著降低了火龙果根际土壤的pH值,这与宋锦浩等[20]研究结果一致,可能是由于随着覆盖时间的增加,凤梨废弃植株在分解过程中产生一定的弱酸性物质,从而使得土壤酸性增强。前人研究发现覆盖可不同程度提高土壤碱解氮、有效磷、速效钾和全氮等养分含量[21-24],本研究结果表明,覆盖模式下各土壤养分含量均显著高于对照,进一步验证利用凤梨废弃植株对火龙果根部进行有机覆盖能够提升果园土壤肥力。

作为土壤中最活跃的生物体,土壤微生物群落对土壤环境较为敏感,覆盖影响土壤微生物群落OTU数量,提高其丰富度和多样性[25]。本研究发现,覆盖模式下火龙果根际土壤中细菌群落OTU数量大于真菌群落OTU数量,这与蔡晓布等[26]的研究结果相似。覆盖模式下火龙果根际土壤中细菌优势菌门以变形菌门、酸杆菌门、绿弯菌门和放线菌门为主,真菌优势菌门为子囊菌门和担子菌门,与前人研究结果一致[27-28]。变形菌门的亚硝化单胞菌属有氧化铵的能力,能在植物根表面稳定繁殖并产生多种次级代谢产物,促进植物生长发育[29]。放线菌门能够分解土壤及残留植株中的纤维和木质素,利于土壤中残留有机体的分解[30]。子囊菌门利于土壤根际微环境充分利用并分解有机物质,促进植物生长[31],担子菌利于植物残体的多糖降解,加快木质素分解[32],担子菌作为优势菌群,可与火龙果根系形成外生菌根,加快火龙果对土壤水分和土壤养分的吸收利用[33]。

覆盖模式有利于维持土壤微生物多样性,提高土壤微生物的丰富度和群落物种的均匀度[34]。本研究发现,覆盖模式下火龙果根际土壤中细菌Alpha多样性无显著变化,真菌群落的Shannon指数、Simpson指数、Pielou指数和覆盖度显著提高,这与刘子涵等[6]研究结果并不相同,分析可能原因是利用凤梨废弃植株作为覆盖物改善了土壤温度、水分和理化性质,从而为真菌生长创造了更优的环境。进一步的相关性分析表明,利用凤梨废弃植株覆盖可以显著增加土壤有机质含量,为微生物群落提供养料和良好的生存环境,同时促进土壤中全氮、全磷、碱解氮、有效磷和速效钾等养分的积累,提高硝酸还原酶和脲酶活性。结构方程模型也验证了该结果,覆盖模式提升了土壤微生物群落多样性,微生物群落多样性通过对土壤脲酶活性产生正向的显著影响,促使脲酶活性增加,正向影响土壤碱解氮含量。

合理的栽培措施是提升火龙果果实品质的重要方法之一,前人研究表明,覆盖可显著提升果实单果质量[4]、可溶性糖[35]、可溶性固形物[23]、可滴定酸[24]等果实品质,本研究发现,覆盖显著提高火龙果果实单果质量、可溶性固形物、可溶性糖和可滴定酸含量,与上述研究结果一致。相关性结果表明,覆盖有利于土壤中的有机质含量积累,促进土壤微生物群落繁殖,调节土壤微生物群落结构多样性和丰度,有效地提高土壤养分含量、硝酸还原酶、脲酶、纤维素酶和蔗糖酶等土壤酶活性,促进火龙果对养分的吸收,最终提高火龙果果实产量及内在品质。结构方程模型进一步显示,土壤碱解氮是影响火龙果果实内在品质的主效因子,真菌群落多样性、碱解氮与脲酶活性显著正相关,碱解氮与可溶性固形物含量、可滴定酸含量显著正相关,这表明覆盖显著提升了土壤真菌群落多样性,并增加土壤养分和土壤酶活性,这与矣小鹏等[36]研究结果一致。分析原因,良好的土壤环境和养分循环是火龙果健康生长的重要保障,对火龙果根部进行凤梨废弃植株覆盖措施显著提高土壤微生物多样性,增加脲酶活性,促进氮循环和碱解氮含量,从而提高火龙果植株对氮素的利用率,进而提升火龙果果实中可溶性固形物和可滴定酸的积累。

本研究主要基于高通量测序与差异性分析及关联性分析来揭示土壤理化性质、酶活、土壤微生物与火龙果果实品质的相关性,初步确定了利用凤梨废弃植株对火龙果覆盖后其提升火龙果果实品质的主效因子,但未能直接验证这些微生物在土壤氮、磷、钾等代谢合成途径及提升火龙果果实品质的功能机制,未来将结合根际土壤微生物特定功能菌群分离纯化、基因敲除等分子生物学方法,进一步验证关键微生物对火龙果根际营养供应和果实品质形成的作用。

参考文献 References

[1] 尹晓宁,刘兴禄,董铁,等.苹果园不同覆盖材料对土壤与近

地微域环境及树体生长发育的影响[J].中国生态农业学报，2018，26(1)：83-95.YIN X N，LIU X L，DONG T，et al.Effects of different mulching materials on soil and near-surface environment and of apple orchard tree growth[J].Chinese journal of eco-agriculture，2018，26(1)：83-95 (in Chinese with English abstract).

[2] 刘文球，韩玉国，王晓学，等.不同地面覆盖方式对晋西地区苹果园土壤水分及果树生长的影响[J].中国农业大学学报，2025，30(4)：106-118. LIU W Q，HAN Y G，WANG X X，et al.Effect of different mulching measures on soil moisture and apple fruit trees growth in the Loess Plateau of western Shanxi Province，China[J].Journal of China Agricultural University，2025，30(4)：106-118 (in Chinese with English abstract).

[3] 成文竞，张琴，佘为为，等.不同覆盖方式对桃园土壤性状及果实产量品质的影响[J].中国南方果树，2024，53(5)：124-129. CHENG W J，ZHANG Q，SHE W W，et al.Effects of different mulching methods on soil properties and fruit yield and quality in peach orchard[J].South China fruits，2024，53(5)：124-129 (in Chinese with English abstract).

[4] 钟昌宏，赵鹏飞，周义良，等.不同覆盖基质对火龙果果园土壤性质和作物生长的影响[J].中国土壤与肥料，2024(12)：103-109. ZHONG C H，ZHAO P F，ZHOU Y L，et al.Effects of different covering substrates on soil properties and crop growth in dragon fruit orchards[J].Soil and fertilizer sciences in China，2024(12)：103-109 (in Chinese with English abstract).

[5] 田玉莉，吴小苹，陈欣佛，等.黄土高原果园不同覆盖模式对土壤酶活性的影响[J].草地学报，2022，30(10)：2581-2589. TIAN Y L，WU X P，CHEN X F，et al.Effect of diversity mulching model on soil enzyme activities in the Loess Plateau orchard[J].Acta agrestia sinica，2022，30(10)：2581-2589 (in Chinese with English abstract).

[6] 刘子涵，黄方园，黎景来，等.覆盖模式对旱作农田土壤微生物多样性及群落结构的影响[J].生态学报，2021，41(7)：2750-2760. LIU Z H，HUANG F Y，LI J L，et al.Effects of farmland mulching patterns on soil microbial diversity and community structure in dryland [J]. Acta ecologica sinica，2021，41(7)：2750-2760 (in Chinese with English abstract).

[7] 赵强，章洁琼，汪灿，等.不同间作模式下糯高粱根际土壤特性及产量变化[J].南方农业学报，2022，53(8)：2122-2132. ZHAO Q，ZHANG J Q，WANG C，et al. Rhizosphere soil characteristics and yield changes of waxy sorghum under different intercropping patterns[J].Journal of southern agriculture，2022，53(8)：2122-2132 (in Chinese with English abstract).

[8] 鲍士旦.土壤农化分析[M].3版.北京：中国农业出版社，2000. BAO S D.Soil and agricultural chemistry analysis[M].3rd ed. Beijing：China Agriculture Press，2000(in Chinese).

[9] 关松荫.土壤酶及其研究法[M].北京：农业出版社，1986. GUAN S Y.Soil enzyme and its research method[M].Beijing：Agriculture Press，1986(in Chinese).

[10] 高俊凤.植物生理学实验指导[M].北京：高等教育出版社，2006：144-199. GAO J F. Experimental guidance for plant physiology[M].Beijing：Higher Education Press，2006：144-199(in Chinese).

[11] 杨勤，谷文超，周浓，等.苯酚-硫酸法与蒽酮-硫酸法测定地参多糖的比较研究[J].食品科技，2020，45(1)：343-350. YANG Q，GU W C，ZHOU N，et al.Comparison of phenol-sulfuric acid and anthrone-sulfuric methods for determination of polysaccharide in *Lycopus lucidus* Tilrcz. var. *hirtus* Regel [J].Food science and technology，2020，45(1)：343-350 (in Chinese with English abstract).

[12] 朱瑜，周信雁，魏宇飞，等.嫁接对番茄植株根际微生物群落组成的影响[J].西南农业学报，2024，37(1)：199-209. ZHU Y，ZHOU X Y，WEI Y F，et al.Effects of grafting on soil microbial community compositions in rhizospheres of tomatoes [J].Southwest China journal of agricultural sciences，2024，37(1)：199-209 (in Chinese with English abstract).

[13] HOU Z G，MA X J，ZHAN M Q，et al.Effects of nano-selenium addition on the nitrogen cycle during composting：mechanistic regulation of denitrification and organic nitrogen metabolism [J/OL]. Journal of environmental management，2025，391：126526 [2025-06-16]. https://doi. org/10.1016/j. jenvman.2025.126526.

[14] 薛婷婷，程春颖，杨帆，等.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，et al.Effect of organic mulching practices on soil properties in vineyards：a review [J].Journal of China Agricultural University，2024，29(6)：206-218 (in Chinese with English abstract).

[15] 朱嘉雯，马蔚红，井涛，等.生物覆盖对果园土壤质量与热带果树生长发育影响的研究进展[J].贵州农业科学，2021，49(3)：25-39.ZHU J W，MA W H，JING T，et al.Research progress on effect of biological mulching on soil quality in orchard，and growth and development of tropical fruit trees[J].Guizhou agricultural sciences，2021，49(3)：25-39 (in Chinese with English abstract).

[16] 王倩，安贵阳，李世芳，等.不同覆盖模式对旱地苹果园土壤养分、微生物和酶活性的影响[J].西北农业学报，2015，24(7)：69-74.WANG Q，AN G Y，LI S F，et al.Soil nutrients，enzyme activities and microbes in non-irrigation apple orchard under different mulching managements [J]. Acta agriculturae boreali occidentalis sinica，2015，24(7)：69-74 (in Chinese with English abstract).

[17] 孙萌，刘洋，李寒，等.有机物覆盖对核桃园土壤有机碳库及酶活性的影响[J].植物营养与肥料学报，2018，24(1)：270-278.SUN M，LIU Y，LI H，et al.Effects of organic mulching on soil organic carbon pool and soil enzyme activity in walnut orchard[J].Journal of plant nutrition and fertilizers，2018，24(1)：270-278 (in Chinese with English abstract).

[18] 温晓霞，殷瑞敬，高茂盛，等.不同覆盖模式下旱作苹果园土

壤酶活性和微生物数量时空动态研究[J].西北农业学报，2011，20(11)：82-88.WEN X X，YIN R J，GAO M S，et al.Spatiotemporal dynamics of soil enzyme activities and microbes in apple orchard soil under different mulching managements[J].Acta agriculturae boreali-occidentalis sinica，2011，20(11)：82-88 (in Chinese with English abstract).

[19] 白雪，周怀平，解文艳，等.不同类型地膜覆盖对玉米农田土壤酶活性的影响[J].农业资源与环境学报，2018，35(4)：381-388.BAI X，ZHOU H P，XIE W Y，et al.Effects of different plastic film mulching on soil enzyme activity in maize farmland[J].Journal of agricultural resources and environment，2018，35(4)：381-388 (in Chinese with English abstract).

[20] 宋锦浩，郝婉怡，姜文婷，等.生草覆盖对枣园土壤理化性质的影响[J].中国农学通报，2024，40(33)：102-110.SONG J H，HAO W Y，JIANG W T，et al.Effects of grass mulching on soil physicochemical properties of jujube orchard[J].Chinese agricultural science bulletin，2024，40(33)：102-110 (in Chinese with English abstract).

[21] BURKE J A，LEWIS K L，RITCHIE G L，et al.Net positive soil water content following cover crops with no tillage in irrigated semi-arid cotton production[J/OL].Soil and tillage research，2021，208：104869 [2025-06-16]. https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104869.

[22] 杨江山，常永义，李玟璇.不同覆盖方式对红地球葡萄园土壤物理性质的影响[J].中外葡萄与葡萄酒，2010(7)：10-13.YANG J S，CHANG Y Y，LI W X.Effects of different mulching on physical properties of soil in Red Globe vineyard[J].Sino-overseas grapevine & wine，2010(7)：10-13 (in Chinese with English abstract).

[23] 孙鹏鹏，查倩，殷向静，等.葡萄园行间土壤覆盖方式对土壤理化性质及树体生长的影响[J].中国农学通报，2025，41(10)：115-121.SUN P P，ZHA Q，YIN X J，et al.Effects of soil mulching modes in vineyard rows on soil physicochemical properties and tree growth[J].Chinese agricultural science bulletin，2025，41(10)：115-121 (in Chinese with English abstract).

[24] 庞群虎，王竞，孙权，等.生草覆盖对酿酒葡萄园土壤养分及浆果品质的影响[J].西南农业学报，2019，32(8)：1833-1838.PANG Q H，WANG J，SUN Q，et al.Effects of grass covering on soil nutrients and berry quality in winegrowers[J].Southwest China journal of agricultural sciences，2019，32(8)：1833-1838 (in Chinese with English abstract).

[25] 李晓莎，武宁，刘玲，等.不同秸秆还田和耕作方式对夏玉米农田土壤呼吸及微生物活性的影响[J].应用生态学报，2015，26(6)：1765-1771.LI X S，WU N，LIU L，et al.Effects of different straw recycling and tillage methods on soil respiration and microbial activity[J].Chinese journal of applied ecology，2015，26(6)：1765-1771 (in Chinese with English abstract).

[26] 蔡晓布，钱成，张元，等.西藏中部地区退化土壤秸秆还田的微生物变化特征及其影响[J].应用生态学报，2004，15(3)：463-468.CAI X B，QIAN C，ZHANG Y，et al.Microbial characteristics of straw-amended degraded soils in central Tibet and its effect on soil fertility[J].Chinese journal of applied ecology，2004，15(3)：463-468 (in Chinese with English abstract).

[27] 宋李霞，吴心瑶，宋稳锋，等.“旱三熟”制下不同覆盖处理对玉米根际土壤微生物多样性及群落结构的影响[J].土壤学报，2025，62(4)：1210-1220.SONG L X，WU X Y，SONG W F，et al.Effects of different mulching treatments on soil microbial diversity and community structure in rhizosphere soil of maize under the“dryland triple intercropping”system[J].Acta pedologica sinica，2025，62(4)：1210-1220 (in Chinese with English abstract).

[28] 张翰林，白娜玲，郑宪清，等.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，et al.Effects of straw returning and fertilization 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 with English abstract).

[29] EBRAHIMI-ZARANDI M，ETESAMI H，GLICK B R.Fostering plant resilience to drought with Actinobacteria：unveiling perennial allies in drought stress tolerance[J/OL].Plant stress，2023，10：100242 [2025-06-16]. https://doi.org/10.1016/j.stress.2023.100242.

[30] 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 with English abstract).

[31] LI Y，ZHANG X C，YANG N，et al.Long-term straw and plastic film mulching have divergent effects on maize rhizosphere enzyme activity and bacterial community structure[J/OL].Agriculture，ecosystems & environment，2024，364：108894[2025-06-16].https://doi.org/10.1016/j.agee.2024.108894.

[32] 陈丹梅，陈晓明，梁永江，等.种植模式对土壤酶活性和真菌群落的影响[J].草业学报，2015，24(2)：77-84.CHEN D M，CHEN X M，LIANG Y J，et al.Influence of cropping system on enzyme activities and fungal communities in soil[J].Acta prataculturae sinica，2015，24(2)：77-84 (in Chinese with English abstract).

[33] 孙文泰，董铁，刘兴禄，等.陇东旱塬地表覆盖方式对苹果生育后期叶片质量及根际土壤微环境的影响[J].干旱地区农业研究，2019，37(1)：95-101.SUN W T，DONG T，LIU X L，et al.Effects of ground mulching on leaf quality in late apple growth stage and rhizosphere environment in the dryland of eastern Gansu Province[J].Agricultural research in the arid areas，2019，37(1)：95-101 (in Chinese with English abstract).

[34] 陈月星，温晓霞，孙瑜琳，等.地表覆盖对渭北旱作苹果园土

壤细菌群落结构及多样性的影响[J].微生物学报,2015,55(7):892-904.CHEN Y X,WEN X X,SUN Y L,et al.Effect of ground mulch managements on soil bacterial community structure and diversity in the non-irrigated apple orchard in Weibei Loess Plateau[J].Acta microbiologica sinica,2015,55(7):892-904 (in Chinese with English abstract).

[35] 李宏建,王宏,于年文,等.地面覆盖对苹果树体生长和果实品质的影响[J].果树学报,2019,36(3):296-307.LI H J,WANG H,YU N W,et al.Effects of mulching on the growth and fruit quality of apple trees[J].Journal of fruit science,2019,36(3):296-307 (in Chinese with English abstract).

[36] 矣小鹏,廖永琴,韩天华,等.轮作对植烟土壤理化和生物学特性及烟叶化学成分影响的Meta分析[J].中国土壤与肥料,2025(2):236-248.YI X P,LIAO Y Q,HAN T H,et al.*Mata* analysis of effects of crop rotation on physicochemical and biological properties of tobacco-planting soil and chemical composition of tobacco leaves[J].Soil and fertilizer sciences in China,2025(2):236-248 (in Chinese with English abstract).

Effects of mulching pineapple residue on physicochemical properties and microbial community in rhizosphere soil of pitaya

LIU Ying[1],MA Yuhua[2],ZHOU Junliang[1],XIAO Tujian[1],MAO Yongya[1]

1.*Institute of Fruit Science Research, Guizhou Academy of Agricultural Sciences, Guiyang 550006, China*;
2.*Institute of Subtropical Crops, Guizhou Academy of Agricultural Sciences, Guiyang 550006, China*

Abstract　The 'Qianmilong' pitaya fruit variety was used to study the factors affecting the effects of mulching on the rhizosphere soil and the quality of pitaya fruit. Pineapple residue generated from intercropping in pitaya orchards was used for mulching treatment (SM), with no mulching as the control (CK). Samples of soil and fruit were collected after one year of coverage to analyze the effects of mulching pineapple residue on the physicochemical properties, activity of enzyme, structural diversity of microbial community in rhizosphere soil, and the quality of pitaya fruit. The results showed that, compared to the control, mulching increased soil organic matter content by 119.26% and significantly enhanced overall soil nutrient levels .The activities of nitrate reductase, urease, cellulase, and sucrase significantly increased by 107.37%、13.70%、16.37% and 25.74%, respectively.Regarding fruit quality, single fruit weight, total soluble solids, soluble sugar, and titratable acid increased by 22.10%, 5.80%, 3.25%, and 11.76%, respectively.Mulching significantly increased the relative abundances of bacterial phyla Proteobacteria and Acidobacteriota and fungal phyla Ascomycota and Basidiomycota by 20.35%, 15.81%, 12.08% and 58.58%, respectively.The relative abundances of bacterial Chloroflexi and Actinobacteriota were significantly reduced by 16.13% and 12.97%, respectively. The results of Alpha diversity analysis showed that mulching had no significant effect on the bacterial communities in soil. The Shannon index, Simpson index, Invasimpson index, and Pielou index of fungal communities in SM significantly increased by 37.72%, 15.66%, 61.42%, and 60.00% compared to that in CK. The results of correlation analysis and structural equation modeling showed that the alkali-hydrolyzable nitrogen in soil was the primary factor driving the content of total soluble solids and titratable acid in pitaya fruit, followed by the activity of urease in soil. It is indicated that the measure of mulching pineapple residue can significantly increase the content of organic matter in soil, promote the proliferation of bacterial and fungal communities in soil, regulate the structural diversity and abundance of microbial community in soil, positively improve the content of alkali-hydrolyzable nitrogen and the activity of urease in soil, and enhance the yield and intrinsic quality of pitaya fruit.

Keywords　pitaya; mulching; physicochemical properties of soil; activities of enzyme; microbial community

(责任编辑:葛晓霞)