

引用格式: 桑倩倩, 王锐, 王亚麒, 等. 有机改良剂对葡萄园土壤理化性质、微生物群落及果实品质的影响[J]. 浙江农林大学学报, 2026, 43(4): 1-13. SANG Qianqian, WANG Rui, WANG Yaqi, et al. Effects of organic amendments on soil physicochemical properties, microbial communities, and fruit quality in vineyards[J]. Journal of Zhejiang A&F University, 2026, 43(4): 1-13.

有机改良剂对葡萄园土壤理化性质、 微生物群落及果实品质的影响

桑倩倩¹, 王锐², 王亚麒², 闫雪燕¹, 刘嘉雯¹, 赵智鹏¹, 雷敏¹, 张亮^{1,3,4}

(1. 宁夏大学葡萄酒与园艺学院, 宁夏银川 750021; 2. 宁夏大学农学院, 宁夏银川 750021; 3. 宁夏大学葡萄与葡萄酒教育部工程研究中心, 宁夏银川 750021; 4. 宁夏大学宁夏葡萄与葡萄酒工程技术研究中心, 宁夏银川 750021)

摘要: 【目的】探究 2 种有机改良剂处理对干旱区葡萄园土壤理化性质、微生物群落及葡萄果实品质的调控效应, 为产区筛选高效土壤改良方案提供数据支撑。【方法】2024 年 5 月以葡萄‘赤霞珠’ *Vitis vinifera* ‘Cabernet Sauvignon’ 为研究对象, 采用随机区组设计, 设置矿源黄腐酸钾+护卫根 (LKY)、微生物改良菌剂 (LW) 以及不施有机改良剂 [对照 (ck)] 等 3 种处理, 分析测定葡萄园不同时期的土壤理化指标、团聚体特征, 采用高通量测序分析土壤、果实表皮微生物群落结构, 同时测定果实品质、酚类物质及产量。【结果】①LKY 处理显著降低土壤 pH、提升土壤碱解氮等速效养分 ($P < 0.05$); LW 处理则增加土壤有机质与全氮质量分数。②LKY 显著提高土壤中团聚体占比及团聚体稳定性 ($P < 0.05$), LW 处理则主要增加大团聚体占比。③2 种改良剂均显著影响土壤细菌群落结构 ($P < 0.05$)。④LKY 处理后果实可滴定酸、百粒重、果皮总酚、果皮总类黄酮、果籽总酚、果籽总类黄酮及产量均显著高于 LW 和 ck 处理 ($P < 0.05$)。⑤Spearman 和 Mantel test 分析表明: 土壤全磷、 >0.25 mm 团聚体、土壤 pH 等是影响土壤细菌群落结构及果实品质的关键因子。【结论】LKY 与 LW 处理均能通过改良土壤理化性质、优化土壤细菌群落结构, 改善果实品质, 其中 LKY 处理通过调控土壤 pH、增加土壤速效养分, 实现了果实产量、风味及功能成分的综合提升。图 7 表 5 参 32

关键词: 有机改良剂; 葡萄园; 土壤理化性质; 微生物群落; 果实品质

中图分类号: S663.1 文献标志码: A 文章编号: 2095-0756(2026)04-0001-13

Effects of organic amendments on soil physicochemical properties, microbial communities, and fruit quality in vineyards

SANG Qianqian¹, WANG Rui², WANG Yaqi², YAN Xueyan¹, LIU Jiawen¹,
ZHAO Zhipeng¹, LEI Min¹, ZHANG Liang^{1,3,4}

(1. School of Enology and Horticulture, Ningxia University, Yinchuan 750021, Ningxia, China; 2. School of Agriculture, Ningxia University, Yinchuan 750021, Ningxia, China; 3. Engineering Research Center for Grape and Wine of Ministry of Education, Ningxia University, Yinchuan 750021, Ningxia, China; 4. Ningxia Grape and Wine Engineering Technology Research Center, Ningxia University, Yinchuan 750021, Ningxia, China)

Abstract: [Objective] This study aims to evaluate the effects of two organic amendments—mineral-source potassium fulvate combined with a root-guard agent (LKY) and a microbial inoculant (LW)—on soil physicochemical properties, microbial community structure, and grape fruit quality in arid regions, so as to provide data support for selecting effective soil-improvement schemes in production areas. [Method] A field

收稿日期: 2026-01-15; 修回日期: 2026-04-16

基金项目: 宁夏回族自治区重点研发计划项目 (2024BBF02003); 国家自然科学基金资助项目 (32360804)

作者简介: 桑倩倩 (ORCID: 0009-0008-9709-0220), 从事葡萄水肥调控研究。E-mail: 12023131679@stu.nxu.edu.cn。

通信作者: 张亮 (ORCID: 0000-0002-0170-3619), 博士, 讲师, 从事葡萄矿质营养与生态栽培研究。

E-mail: zl2022@nxu.edu.cn

experiment was conducted in a *Vitis vinifera* ‘Cabernet Sauvignon’ vineyard in May 2024 using a randomized block design, with three treatments: LKY, LW, and a control with no organic amendment (ck). Soil physicochemical indicators and aggregate characteristics in the vineyard at different periods were analyzed and determined. High-throughput sequencing was employed to analyze the microbial community structure of soil and fruit skin. Fruit quality, phenolic substances, and yield were also measured. [Result] (1) LKY treatment significantly reduced soil pH and increased the content of available nutrients, especially available nitrogen ($P<0.05$), while LW treatment enhanced soil organic matter and total nitrogen. (2) LKY treatment significantly increased the proportion and stability of medium-sized soil aggregates ($P<0.05$), while LW treatment primarily increased the proportion of large aggregates. (3) Both amendments significantly affected soil bacterial and microbial community structure ($P<0.05$). (4) The titratable acidity, hundred-seed weight, total phenols in the peel and seeds, total flavonoids in the peel and seeds, and yield under LKY treatment were significantly higher than those under LW and ck treatments ($P<0.05$). (5) Spearman correlation and Mantel test analysis showed that soil total phosphorus, aggregates larger than 0.25 mm, and soil pH were key factors affecting soil bacterial community structure and fruit quality. [Conclusion] Both LKY and LW treatments can improve fruit quality by modifying soil physicochemical properties and optimizing the structure of soil bacterial communities. Among them, LKY treatment achieve a comprehensive improvement in yield, flavor, and functional components by regulating soil pH and increasing soil available nutrients. [Ch, 7 fig. 5 tab. 32 ref.]

Key words: organic amendments; vineyard; soil physicochemical properties; microbial community; fruit quality

宁夏贺兰山东麓是中国最大的酿酒葡萄 *Vitis vinifera* 产区，截至 2024 年酿酒葡萄种植面积为 4.0 万 hm^2 ，占全国种植面积近 40%^[1]。该产区地处干旱区，年降水量约为 200.0 mm，蒸发量达 2 000.0 mm。成土母质以冲积物为主，砂粒含量高，土壤结构粗糙、保水保肥性差。葡萄园长期采用清耕管理，导致耕层有机质、速效养分匮乏，团聚体稳定性差。这些因素严重制约了葡萄根系下扎、养分吸收及果实酚类物质合成。因此，如何改良该区域葡萄园土壤达到疏松肥沃且保水的目标，已成为亟需解决的问题。

有机改良剂如矿源黄腐酸钾、微生物菌剂等因环境友好、功能多元而在干旱区葡萄园土壤改良方面受到广泛关注^[2]。矿源黄腐酸钾可通过离子交换、螯合作用改良土壤结构，同时提升土壤养分供应能力。相关研究证实矿源黄腐酸钾能改善葡萄园土壤养分状况，提升葡萄果实品质与产量^[3]。微生物菌剂则通过接种有益菌群优化土壤微生态，可有效改善葡萄园土壤理化性质，且不影响葡萄果皮色素形成^[4]。

基于此，本研究在贺兰山东麓银川子产区张裕龙谕酒庄葡萄园，设置矿源黄腐酸钾+护卫根和微生物改良菌剂处理及对照，探究有机改良剂对葡萄园土壤理化性质、微生物群落结构和葡萄果实品质的影响，明晰关键理化因子对土壤微生物群落组成及果实品质的影响，为产区筛选经济高效且风味友好的改良方案提供数据支撑。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

研究区位于宁夏回族自治区贺兰山东麓酿酒葡萄种植带 (37°43′~39°05′N, 105°45′~106°27′E)。该区域光热资源充沛， $\geq 10\text{ }^\circ\text{C}$ 年有效积温为 3 000~3 300 $^\circ\text{C}$ ，昼夜温差大，年日照时数大于 3 000.0 h，年降雨量为 150.0~200.0 mm，是典型的干旱半干旱型农业生态系统。试验样地设于张裕龙谕酒庄‘赤霞珠’

‘Cabernet Sauvignon’葡萄园内。2024 年 5 月试验前土壤基本理化性质：0~20 cm 土层 pH 为 9.08，电导率为 474.67 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ ，有机质为 15.67 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，碱解氮为 10.86 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，速效磷为 21.47 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，速效钾为 286.85 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，全氮为 0.24 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，全磷为 91.65 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ；20~40 cm 土层 pH 为 8.86，电导率为 446.67 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ ，有机质为 14.68 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，碱解氮为 5.99 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，速效磷为 13.86 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，速效钾为

253.05 mg·kg⁻¹, 全氮为 0.22 g·kg⁻¹, 全磷为 96.52 mg·kg⁻¹。

1.2 试验材料

供试材料为 12 年生‘赤霞珠’葡萄, 厂字形架型。选择矿源黄腐酸钾+护卫根、微生物改良菌剂作为本试验的土壤改良剂。矿源黄腐酸钾+护卫根选于郑州海绿王绿色科技有限公司, 核心物料成分为矿物源黄腐酸、腐植酸、氧化钾, 质量分数分别为 56%、75%、13%, pH 为 10.4 (数据来源于厂家检测报告)。微生物改良菌剂选于洛阳欧克生物科技有限公司, 核心物料成分为枯草芽孢杆菌 *Bacillus subtilis*、地衣芽孢杆菌 *Bacillus licheniformis*、解淀粉芽孢杆菌 *Bacillus amyloliquefaciens*, 比例分别为 16.7、17.7、19.0 亿个·mL⁻¹, 总菌数 53.4 亿个·mL⁻¹, pH 为 5.0 (数据来源于农业农村部委托检验报告)。

1.3 试验方法

1.3.1 试验设计 于 2024 年 5、7、9 月开展试验。试验设置矿源黄腐酸钾+护卫根 (LKY)、微生物改良菌剂 (LW) 和不施有机改良剂 [对照 (ck)] 等 3 个处理, 每处理 3 次重复。以 15 m 行长的葡萄行作为 1 个小区, 栽培行距 2.5 m, 株距 0.8 m。各小区常规管理措施一致: 每 3 年秋季施有机肥 1 次, 单位面积施肥量为 30 t·hm⁻², 每年全生育期施无机水溶肥 600 kg·hm⁻², 年灌溉量 3 150 t·hm⁻²; 田间采用清耕管理模式 (定期人工除草)。LKY 处理: 各时期每个小区施用矿源黄腐酸钾 0.33 kg+护卫根 1.67 kg, 稀释用水 0.16 t, 并分 4 次施用; LW 处理: 各时期每个小区施用微生物改良菌剂 333 mL, 稀释用水 0.16 t, 并分 4 次施用; ck 处理: 各时期对照小区不施用任何土壤改良剂, 仅分 4 次施水 0.16 t。

1.3.2 样品采集与处理 土壤样品分别于 7、9 月采集。每个处理在各小区内采集 3 个重复样品, 刮除地表覆盖物后, 垂直采集 0~20、20~40 cm 土层原状土, 用无菌袋封装。果实样品于 9 月 23 日采集, 每小区随机选 5 株长势一致的结果母枝, 剪取中部果穗各 1 串, 装入灭菌保鲜袋并低温保存。将样品运回实验室用于后续实验。

1.4 指标测定

1.4.1 土壤理化指标测定 采用土壤理化分析方法测定土壤 pH、土壤电导率、土壤有机质质量分数及其他养分质量分数^[5], 湿筛法测定团聚体粒级分布, 采用平均质量直径、几何平均直径、>0.25 mm 团聚体质量分数评价团聚体稳定性^[6]。

1.4.2 土壤微生物和果实表皮微生物测定 ①样品预处理与 DNA 提取。称取 0.2~0.5 g 土壤样品, 经组织研磨仪 60 Hz 研磨后, 采用 OMEGA Soil DNA Kit 提取总 DNA。果实表皮微生物通过无菌棉签原位擦拭采集, 液氮速冻后提取总 DNA。提取方法与土壤相同。提取产物经琼脂糖凝胶电泳与 NanoDrop 检测完整性及纯度, 以满足后续聚合酶链式反应 (PCR) 扩增要求。②PCR 扩增与文库构建。细菌 16S rRNA 基因扩增区域为 V3~V4 区, 引物为 338F (5'-ACTCCTACGGGAGGCAGCA-3') 和 806R (5'-GGACTACHVG GGTWTCTAAT-3')。真菌 ITS 区扩增区域为 ITS1, 引物为 ITS5 (5'-GGAAGTAAAAGTCGTAACAAGG-3') 和 ITS2 (5'-GCTGCGTTCTTCATCGATGC-3')。PCR 反应体系 25 μL, PCR 产物经质量分数 2% 琼脂糖凝胶电泳检测后, 使用 Axygen 凝胶回收试剂盒纯化。③高通量测序与数据分析。纯化后的 PCR 产物采用 Quant-iT PicoGreen dsDNA Assay Kit 定量, 并按等摩尔比例混合。使用 Illumina TruSeq Nano DNA LT Library Prep Kit 构建测序文库, 文库经 Agilent 2100 Bioanalyzer 质检合格后, 使用 Illumina NovaSeq 6000 平台进行 2×250 bp 双端测序。

原始测序数据使用 QIIME2 (v2019.4) 平台进行质控、去噪、拼接和嵌合体去除, 生成特征序列 (ASVs)。细菌序列采用 Greengenes 数据库进行物种注释, 真菌序列采用 UNITE 数据库。去除丰度低于总测序量 0.001% 的扩增子序列变异体 (ASVs) 后, 为消除测序深度差异对多样性分析的影响, 所有样本按最小测序量进行抽平处理: 细菌样本抽平至 25 000 条序列, 真菌样本抽平至 10 000 条序列, 进行 Alpha 多样性分析 (Chao1 指数、Shannon 指数、Good's coverage 指数)。Good's coverage 指数 (Good's nonparametric coverage estimator) 用于计算群落中非 singleton 物种 (仅被检测到 1 次的 ASV/OTU) 占有物种的比例, 以此评估测序对群落中物种的覆盖程度。该指数越高则样本中未被检测出的物种所占比例越少, 其计算依据 Good^[7] 提出的非参数估计方法。同时进行 Beta 多样性分析 [基于 UniFrac 距离的主坐

标分析 (PCoA) 与非度量多维尺度分析 (NMDS)]。组间差异采用置换多元方差分析 (PERMANOVA) 检验, 共现网络分析采用 SparCC 算法筛选显著关联。

1.4.3 果实指标测定 采用手持糖量计测定可溶性固形物, 根据 GB/T 15038—2006《葡萄酒、果酒通用分析方法》, 采用酸碱滴定法 (以酒石酸计) 测定可滴定酸质量浓度。果实中的总酚、总单宁、总花色苷质量分数, 分别采用福林-肖卡法、甲基纤维素沉淀法、pH 示差法测定。参照 MARINOVA 等^[8]、朱艳云等^[9]的方法测定葡萄皮和葡萄籽中总类黄酮、总黄烷-3-醇质量分数。

1.4.4 产量指标测定 每小区选取 3 株代表性植株, 统计单株果穗数, 称取单穗平均质量, 并计算单株产量后, 结合株行距计算总产量。

1.5 统计分析

采用 SPSS 26.0 进行数据正态性与方差齐性检验, 满足条件后进行单因素方差分析 (ANOVA) 及 Duncan 多重比较 ($P < 0.05$)。不满足条件者采用 Kruskal-Wallis 非参数检验。使用 Origin 2022 绘图, Canoco 5.0 进行冗余分析 (RDA), 采用 Mantel 检验分析土壤综合指标与果实综合指标的关联性。

2 结果与分析

2.1 有机改良剂对土壤理化性质的影响

LKY、LW 处理对土壤理化性质的调控效果呈现时间与土层特异性。7 月, LKY、LW 处理均显著降低 pH ($P < 0.05$)。LKY、LW 处理显著提升 0~20 cm 土层土壤电导率 ($P < 0.05$), 分别增加 13.90%、7.80%; LKY 处理显著提升土壤碱解氮、土壤速效钾, LW 处理显著提升土壤有机质、土壤速效磷、土壤全氮 ($P < 0.05$)。9 月, LKY 处理显著降低土壤 pH 并提升土壤碱解氮, LW 处理则显著提升土壤全氮、土壤全磷 ($P < 0.05$)。在 20~40 cm 土层中, LKY 处理显著提升土壤速效磷 ($P < 0.05$), 增加了 100.21%。整体而言, LKY、LW 处理均能有效改善土壤养分状况, 其中 LKY 处理降低土壤 pH 并提升土壤有效养分, LW 处理则侧重增加土壤有机质与土壤全氮, 两者的效果因土层、月份存在差异 (表 1)。

2.2 有机改良剂对土壤团聚体的影响

7、9 月, LKY 处理土壤中团聚体占比显著高于 LW 处理与 ck ($P < 0.05$), 而 LW 处理土壤大团聚体占比显著高于 LKY 处理、ck ($P < 0.05$), ck 处理的土壤粉粒+黏粒占比最高; LKY 处理的土壤平均质量

表 1 不同有机改良剂对葡萄园土壤理化性质的影响

Table 1 Effects of different organic amendments on the physicochemical properties of the vineyard soil

月份	处理	pH		电导率/($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)		有机质/($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)		碱解氮/($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	
		0~20	20~40	0~20	20~40	0~20	20~40	0~20	20~40 cm
7	LKY	8.87±0.02 c	8.89±0.02 b	248.30±2.50 a	213.70±5.00 c	12.04±0.43 c	12.65±0.33 c	131.13±7.83 a	214.00±5.30 a
	LW	8.98±0.03 b	9.03±0.01 a	235.00±5.00 b	229.00±1.00 b	16.26±0.70 a	14.96±0.32 a	88.90±2.62 b	137.90±6.70 b
	ck	9.06±0.01 a	8.92±0.02 b	218.00±4.50 c	298.00±5.50 a	14.48±0.49 b	13.71±0.66 b	74.20±4.39 c	72.30±5.90 c
9	LKY	8.91±0.06 c	8.66±0.06 c	111.00±2.00 c	108.70±2.52 c	15.30±0.20 b	11.90±0.40 c	217.93±5.44 a	137.70±7.60 a
	LW	9.04±0.02 b	9.06±0.02 a	118.70±1.53 b	145.70±4.51 a	15.30±0.20 b	14.30±0.30 b	137.90±6.81 b	102.20±8.40 b
	ck	9.13±0.02 a	8.95±0.03 b	128.30±3.18 a	118.00±3.06 b	17.50±0.50 a	16.70±0.30 a	72.33±5.90 c	66.70±5.10 c

月份	处理	速效磷/($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)		速效钾/($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)		全氮/($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)		全磷/($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	
		0~20	20~40	0~20	20~40	0~20	20~40	0~20	20~40 cm
7	LKY	73.70±3.30 b	67.50±1.20 b	98.61±6.28 a	93.69±10.42 b	0.49±0.03 c	0.43±0.03 b	36.50±0.60 a	44.50±0.90 a
	LW	97.70±5.70 a	78.00±4.50 a	85.22±5.39 b	102.38±4.65 a	0.85±0.02 a	0.60±0.01 a	32.50±1.10 b	34.50±0.80 b
	ck	65.90±1.50 c	56.40±1.10 c	86.52±8.07 b	92.75±4.65 b	0.58±0.01 b	0.40±0.01 b	32.70±0.90 b	32.30±0.70 b
9	LKY	62.10±2.50 a	95.10±1.10 a	86.29±8.47 b	93.04±3.57 a	0.43±0.01 b	0.39±0.02 c	50.50±1.00 a	48.90±1.40 a
	LW	62.30±6.90 a	72.50±1.10 b	90.07±4.36 a	75.83±7.30 c	0.60±0.02 a	0.46±0.02 a	42.30±0.80 b	40.60±1.10 b
	ck	62.30±3.50 a	47.50±0.70 c	77.98±5.52 c	86.57±7.81 b	0.40±0.01 c	0.42±0.01 b	38.50±1.50 c	36.70±0.80 c

说明: 不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

直径、土壤几何平均直径及 >0.25 mm 土壤团聚体质量分数均显著优于其他处理 ($P<0.05$)。整体来看, LKY 处理更有利于提升土壤中团聚体占比与土壤团聚体稳定性, LW 处理优势集中在土壤大团聚体占比, ck 处理土壤团聚结构相对较差 (表 2)。

表 2 不同有机改良剂对葡萄园土壤团聚体的影响

Table 2 Effects of different organic amendments on soil aggregates of the vineyard soil

月份	处理	大团聚体/mm	中团聚体/mm	微团聚体/mm	粉粒+黏粒/mm	平均质量直径/mm	几何平均直径/mm	>0.25 mm 团聚体质量分数/%
7	LKY	4.71±0.26 b	37.15±2.69 a	28.16±0.99 b	29.97±1.48 b	0.58±0.00 a	0.27±0.00 a	41.86±0.27 a
	LW	5.73±0.22 a	29.97±0.45 b	33.62±0.77 a	30.68±0.83 b	0.53±0.00 b	0.24±0.00 b	35.70±0.45 b
	ck	3.90±0.18 c	22.89±0.14 c	34.92±0.37 a	38.29±0.07 a	0.41±0.00 c	0.18±0.00 c	26.79±0.07 c
9	LKY	4.50±0.18 b	40.97±1.26 a	26.41±0.64 c	28.12±1.46 b	0.62±0.01 a	0.30±0.00 a	45.47±0.37 a
	LW	6.94±0.19 a	33.65±1.04 b	31.21±0.66 a	28.20±0.76 b	0.60±0.00 b	0.28±0.00 b	40.59±0.32 b
	ck	4.71±0.32 b	34.46±0.88 b	29.15±0.51 b	31.67±1.07 a	0.56±0.00 c	0.26±0.00 c	39.17±0.41 c

说明: 不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($P<0.05$)。

2.3 有机改良剂对土壤微生物群落的影响

2.3.1 土壤微生物群落 Alpha 多样性分析 LKY 与 LW 处理组的土壤细菌 Chao1 指数较 ck 处理分别提升 3.94%、3.85%, 但差异均未达显著水平。Shannon 指数在各处理间也无显著差异, 说明改良剂施用未对土壤细菌群落多样性产生显著影响。LKY 处理的土壤真菌 Chao1 指数较 ck 处理提升 49.67%, LW 处理的土壤真菌 Chao1 指数较 ck 处理下降 3.55%, LKY 处理 Shannon 指数较 ck 处理上升 0.96%, 而 LW 处理 Shannon 指数较 ck 处理明显下降 13.73%, 2 种指数在各处理间均无显著差异。结合测序覆盖度 (细菌 $\geq 99.60\%$ 、真菌 $\geq 99.99\%$) 可知, 测序深度满足群落多样性分析需求 (表 3)。

2.3.2 土壤微生物群落组成分析 LKY、LW 处理在土壤细菌群落门水平上的优势类群为变形菌门 Proteobacteria 与芽单胞菌门 Gemmatimonadota, 相对丰度分别稳定在 21%~24%、19%~25% (图 1A); 在土壤真菌群落门水平上, LW 处理下子囊菌门 Ascomycota 相对丰度最高 (达 99%), 各处理间差异未达显著水平 (图 1B)。在土壤细菌群落属水平上, LKY 处理的其他类群相对丰度略高 (图 1C); 在土壤真菌群落属水平上, LKY 处理提高了葡萄孢毛壳属 *Botryotrichum* 的相对丰度, 达 16%, LW 处理提高了锥壳霉属 *Coniochaeta* 的相对丰度, 达 17%, 但与 ck 相比差异均未达显著水平 (图 1D)。

2.3.3 土壤微生物群落 Beta 多样性分析 主坐标分析 (PCoA) 结果显示: 前 2 个主坐标轴共解释土壤细菌群落变异的 48.5% (轴 1 为 35.1%, 轴 2 为 13.4%)。不同处理样品沿第 1 轴明显分离, 说明 2 种改良剂均改变了土壤细菌群落结构 (图 2A)。PERMANOVA 进一步证实处理间差异显著 ($F=2.02$, $R^2=0.40$, $P=0.005$, 表 4)。NMDS 应力系数为 0.000 1, 远小于 0.200 0, 表明二维图谱可准确反映样本间差异 (图 2B)。土壤真菌群落对改良处理的响应较弱, PCoA 前 2 个轴共解释土壤真菌群落变异的 52.9% (轴 1 为 30.8%, 轴 2 为 22.1%), 3 种处理组样品在排序图上呈现分离趋势 (图 2C)。PERMANOVA 结果显示差异不显著 ($F=1.08$, $R^2=0.27$, $P=0.357$, 表 4)。NMDS 应力系数为 0.158 0, 仍低于 0.200 0, 说明图谱可靠 (图 2D)。

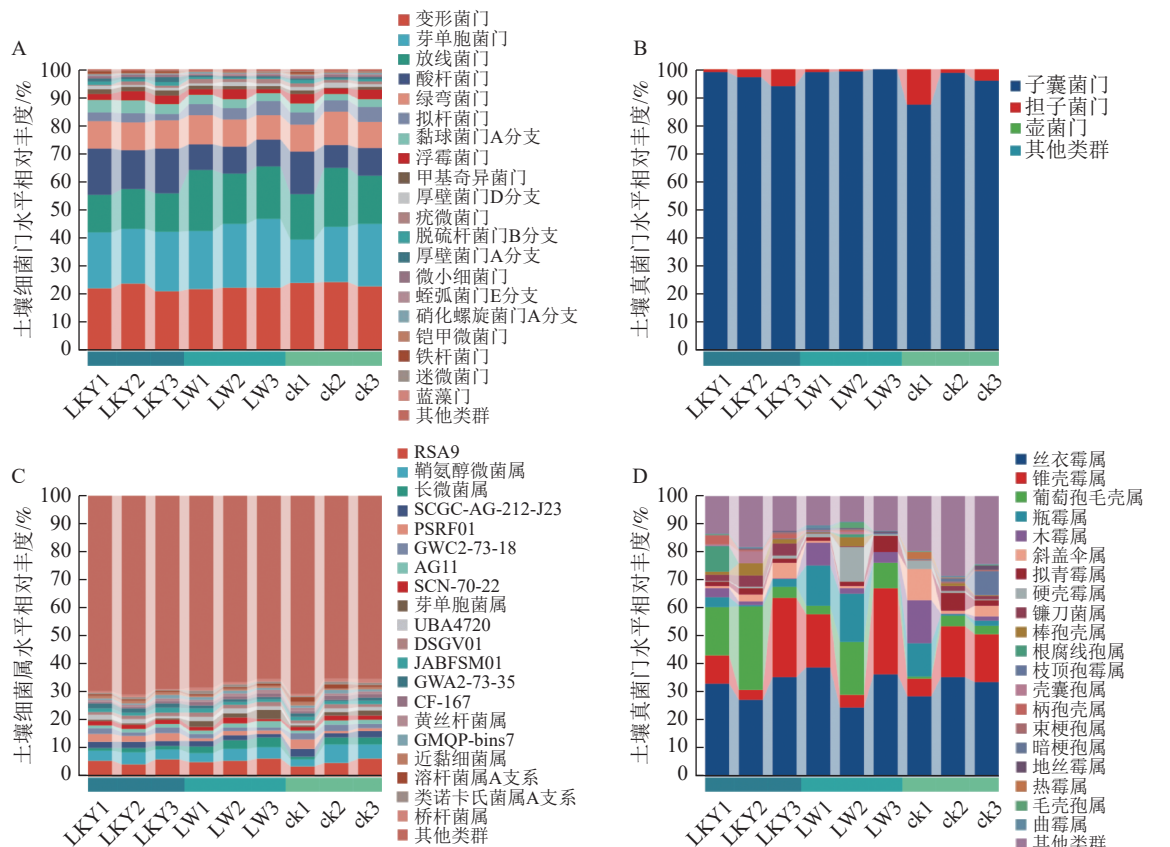
2.3.4 土壤微生物网络分析 基于共现网络分析, 筛选出满足 Connector 标准 ($Z_i \leq 2.5$, $P_i > 0.62$) 的关键节点。土壤细菌群落中关键属为 JAAUUD01 和 SpSt-583 (图 3A); 在土壤真菌群落中关键属为硬壳霉属和未分类子囊菌门属 Unclassified_p_Ascomycota (图 3B)。这些属在处理间起桥梁作用, 参与调控微生物群落稳定性。

表 3 葡萄园土壤细菌、真菌的 Alpha 多样性指数

Table 3 Alpha-diversity indices of soil bacteria and fungi of the vineyard soil

微生物类群	处理	Chao1 指数	Shannon 指数	Good's coverage 指数/%
细菌	LKY	3 913.04±219.72 a	10.76±0.12 a	99.73±0.05 a
	LW	3 909.59±95.45 a	10.78±0.08 a	99.67±0.06 a
	ck	3 764.66±87.86 a	10.81±0.10 a	99.69±0.09 a
真菌	LKY	204.80±35.03 a	4.19±0.15 a	99.99±0.00 a
	LW	131.97±49.32 a	3.58±0.44 a	99.99±0.00 a
	ck	136.83±12.91 a	4.15±0.16 a	100.00±0.00 a

说明: 相同小写字母表示不同处理间差异不显著 ($P>0.05$)。



A. 土壤细菌门水平群落组成; B. 土壤真菌门水平群落组成; C. 土壤细菌属水平优势物种; D. 土壤真菌属水平优势物种。各处理组间差异均未达显著水平 ($P>0.05$)。变形菌门Proteobacteria; 芽单胞菌门Gemmatimonadota; 放线菌门Actinobacteriota; 酸杆菌门Acidobacteriota; 绿弯菌门Chloroflexota; 拟杆菌门Bacteroidota; 黏球菌门A分支Myxococcota_A; 浮霉菌门Planctomycetota; 甲基奇杆菌门Methylomirabilota; 厚壁菌门D分支Firmicutes_D; 疣微菌门Verrucomicrobiota; 脱硫杆菌门B分支Desulfobacterota_B; 厚壁菌门A分支Firmicutes_A; 微小细菌门Patescibacteria; 蛭弧菌门E分支Bdellovibrionota_E; 硝化螺旋菌门A分支Nitrospirota_A; 铠甲微菌门Tectomicrobia; 铁杆菌门Eisenbacteria; 迷微菌门Elusimicrobiota; 蓝藻门Cyanobacteria。子囊菌门Ascomycota; 担子菌门Basidiomycota; 壶菌门Chytridiomycota。鞘氨醇微菌属*Sphingomicrobium*; 长微菌属*Longimicrobium*; 芽单胞菌属*Gemmatimonas*。黄丝杆菌属*Luteitalea*; 近黏细菌属*Vicinamibacter*; 溶杆菌属A支系*Lysobacter_A*; 类诺卡氏菌属A支系*Nocardioides_A*; 桥杆菌属*Pontibacter*。丝衣霉属*Byssoschlamys*; 锥壳霉属*Coniochaeta*; 葡萄孢毛壳属*Botryotrichum*; 瓶霉属*Phialemonium*; 木霉属*Trichoderma*; 斜盖伞属*Clitopilus*; 拟青霉属*Paecilomyces*; 硬壳霉属*Scytalidium*; 镰刀菌属*Fusarium*; 棒孢壳属*Corynascella*; 根腐线孢属*Dactylonectria*; 枝顶孢属*Acremonium*; 壳孢属*Mycoclamlus*; 柄孢壳属*Podospora*; 束梗孢属*Doratomyces*; 暗梗孢属*Meliniomyces*; 地丝霉属*Geomyces*; 热霉属*Thermomyces*; 毛壳孢属*Chaetomidium*; 曲霉属*Aspergillus*。

图1 不同有机改良剂对葡萄园土壤细菌、真菌相对丰度的影响

Figure 1 Effects of different organic amendments on the relative abundance of vineyard soil bacteria and fungi

2.4 有机改良剂对葡萄果实品质的影响

LKY处理可滴定酸、百粒重、产量均显著高于LW处理和ck处理 ($P<0.05$)，相比之下，LW处理仅可溶性固形物表现较好，其余指标均低于LKY处理。由此可见：LKY处理对葡萄果实的产量、果形及可滴定酸的提升效果最为突出(表5)。

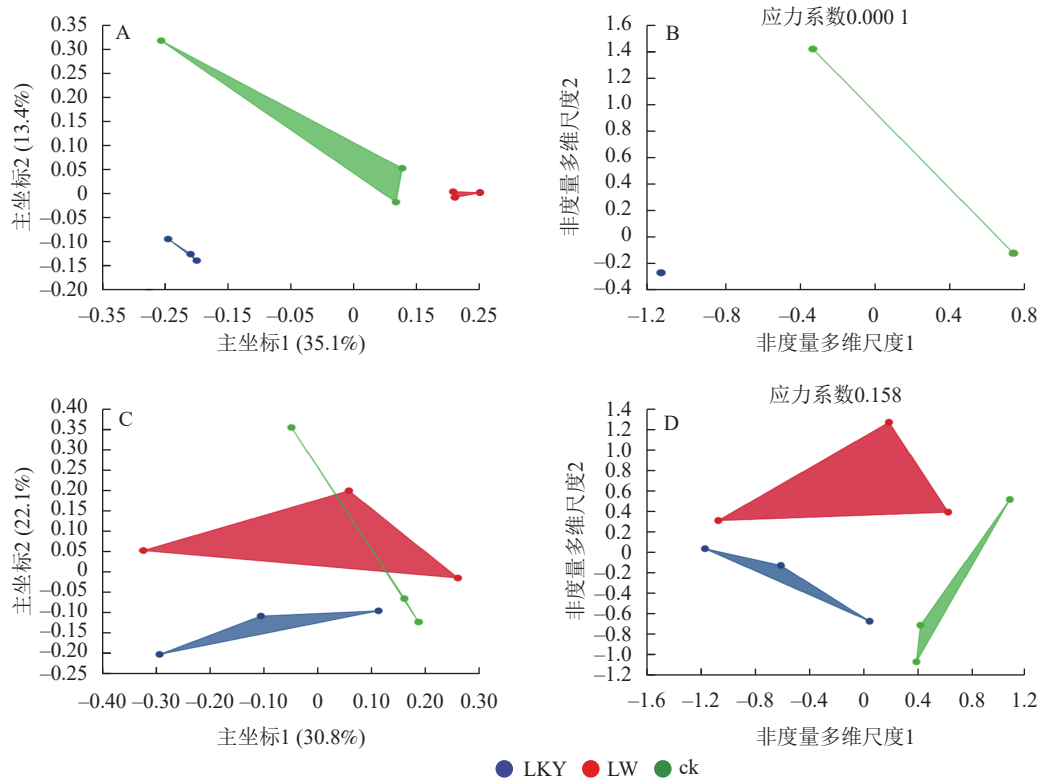
2.5 有机改良剂对葡萄酚类物质的影响

LKY处理的果皮总酚、果皮总类黄酮、果籽总酚、果籽总类黄酮质量分数均显著高于LW和ck处理 ($P<0.05$)，同时LKY处理对果皮总花色苷、果皮总黄烷-3-醇、果籽总花色苷、果籽总黄烷-3-醇质量分数也有明显提升，且高于LW和ck处理。整体来看，LKY处理对酚类物质的促进效果优于LW处理(图4)。

2.6 土壤环境因子与果实品质及果实表皮微生物的RDA分析

冗余分析(RDA)结果表明：前2轴(RDA1、RDA2)共解释了土壤微生物群落变异的53.0% (RDA1为35.3%，RDA2为17.7%)，其中土壤全磷 ($P=0.014$)、土壤中团聚体 ($P=0.026$)、 >0.25 mm团聚体质量分数 ($P=0.014$) 的驱动作用相对突出，是改变土壤细菌群落结构的关键环境因子(图5A)。

为明确土壤理化因子、土壤团聚体、土壤微生物与果实品质及果实表皮微生物群落的相关性，RDA分析显示：前2轴(RDA1、RDA2)共解释了果实品质与果实表皮微生物群落变异的79.45% (RDA1为54.27%，RDA2为25.18%)，这表明土壤环境因子对两者变化具有较强解释力(图5B)。其中 >0.25 mm团聚体质量分数 ($P=0.002$)、土壤碱解氮 ($P=0.002$)、中团聚体 ($P=0.008$)、土壤全磷 ($P=0.006$)、土壤pH



A. 土壤细菌群落主坐标分析；B. 土壤细菌群落非度量多维尺度分析；C. 土壤真菌群落主坐标分析；D. 土壤真菌群落非度量多维尺度分析。

图 2 葡萄园土壤细菌、真菌群落的主坐标与非度量多维尺度分析

Figure 2 Principal coordinate and non-metric multidimensional scaling analysis of vineyard soil bacterial and fungal communities

($P=0.002$)、土壤拟杆菌门 ($P=0.004$)、几何平均直径 ($P=0.002$)、土壤电导率 ($P=0.002$) 的驱动作用最为突出。

2.7 土壤环境因子与果实品质及果实表皮微生物群落的相关性分析

Spearman 秩相关热图 (图 6A) 及 Mantel 检验关联图 (图 6B) 结果显示：土壤全磷、土壤碱解氮、> 0.25 mm 团聚体质量分数与百粒重、果皮总酚、果皮总类黄酮等呈显著正相关 ($P < 0.05$)；土壤 pH、土壤电导率、土壤有机质与果皮总酚、果皮总类黄酮等存在显著负相关 ($P < 0.05$)。因此，土壤全磷、土壤碱解氮、> 0.25 mm 团聚体质量分数、土壤 pH 是调控果实品质及果皮微生物群落的关键环境因子。

2.8 有机改良剂处理下土壤理化结构-微生物群落-果实品质的偏最小二乘路径模型

偏最小二乘路径模型 (PLS-PM) 分析可见，模型整体拟合优度为 0.737 4。解析结果显示：土壤理化性质与结构对土壤微生物群落 (路径系数为 0.890 5)、果实酚类物质 (路径系数为 0.987 2) 均具有极显著的正向效应 ($P < 0.01$)。这说明土壤全磷、土壤碱解氮及土壤团聚体结构的改变是影响土壤微生物及果实酚类物质的关键因子。土壤微生物群落对果实表皮微生物群落 (路径系数为 0.747 3) 呈现显著的正向效应 ($P < 0.05$)。其余路径的效应均未达到统计学显著水平，其潜在关联需后续研究进一步验证 (图 7)。

3 讨论

3.1 有机改良剂对土壤环境因子的影响

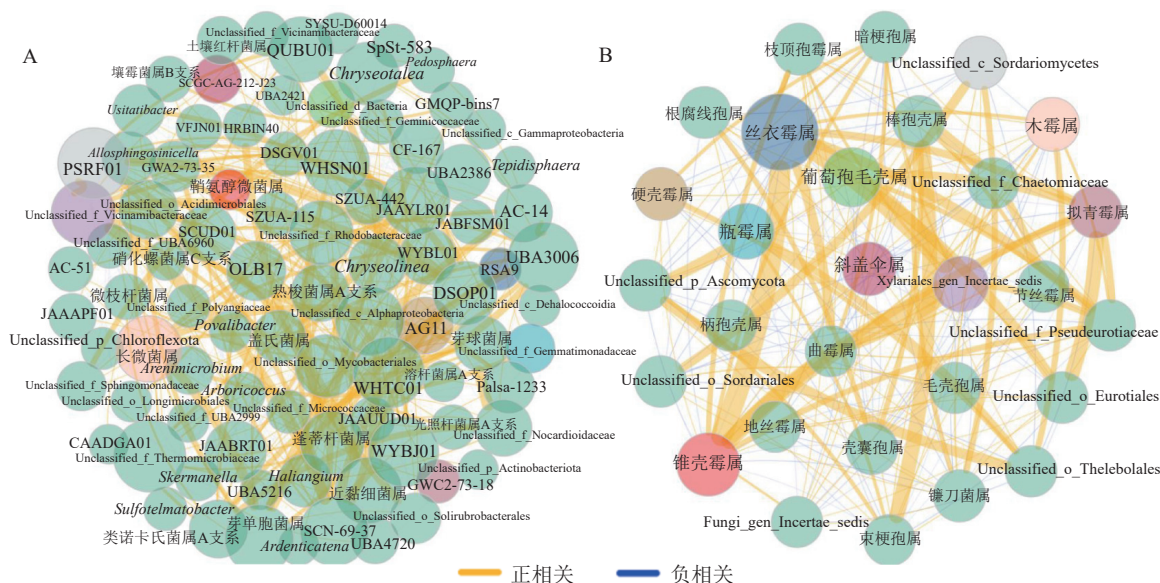
LKY 处理可显著提升土壤有效养分，与其整合特性利于速效养分的活化与保持相关，而 LW 处理更

表 4 葡萄园土壤细菌、真菌群落的 PERMANOVA 分析

Table 4 PERMANOVA analysis of the vineyard soil bacterial and fungal communities

来源	变异来源	自由度	总平方和	均方根	方差模型	决定系数	P
细菌	处理	2	0.44	0.22	2.02	0.40	0.005
	残差	6	0.66	0.11	—	0.60	—
	总计	8	1.10	—	—	1.00	—
真菌	处理	2	0.30	0.15	1.08	0.27	0.357
	残差	6	0.83	0.14	—	0.73	—
	总计	8	1.13	—	—	1.00	—

说明：—表示无此项。



A. 土壤细菌群落共现网络; B. 土壤真菌群落共现网络。连线粗细代表微生物间相关系数的绝对值, 连线越粗, 相关性越强; 连线颜色代表相关性方向, 黄色为正相关, 蓝色为负相关。节点大小代表该微生物属的相对丰度, 节点越大, 相对丰度越高; 节点颜色用于区分不同微生物属。

图3 葡萄园土壤微生物群落的共现网络分析

Figure 3 Co-occurrence network analysis of vineyard soil microbial communities

表5 不同有机改良剂处理下葡萄果实品质比较

Table 5 Comparison of grape berry quality under different organic-amendment treatments

处理	可滴定酸/(g·L ⁻¹)	可溶性固形物/%	百粒重/g	纵横径比	产量/(kg·hm ⁻²)
LKY	7.88±0.23 a	22.00±0.46 a	126.98±2.47 a	1.03±0.03 a	7165.03±214.89 a
LW	3.81±0.19 c	22.20±0.36 a	101.19±1.15 b	0.95±0.00 b	3976.55±174.77 b
ck	6.15±0.19 b	21.13±0.21 b	97.31±2.05 b	0.93±0.04 b	3144.21±133.08 c

说明: 不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

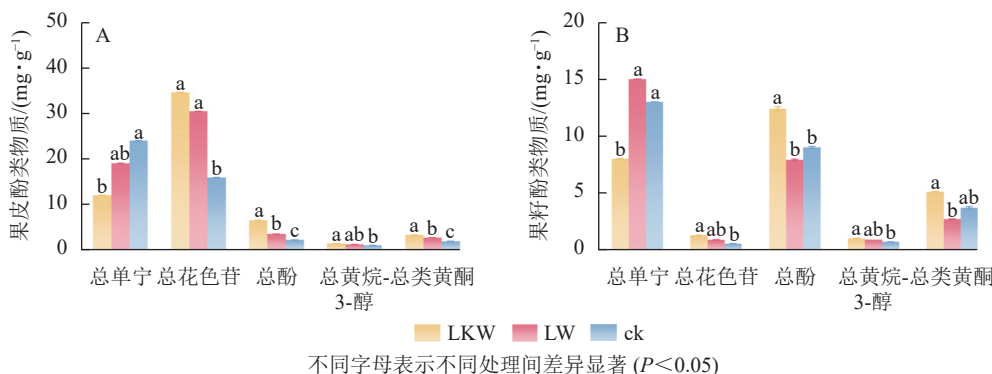


图4 不同有机改良剂处理下葡萄果皮、果籽酚类物质质量分数

Figure 4 Phenolic contents in grape skin and seed under different organic-amendment treatments

侧重提升土壤全氮、土壤有机质, 对土壤速效养分的提升效果较弱^[10-11]。LW 处理通过促进土壤有机质分解、释放难溶性氮素进而补充土壤全氮库^[12], 而干旱区土壤砂粒含量高、养分淋溶快, 使其对土壤速效养分的活化效果有限。这种功能差异随土层、时间变化: 0~20 cm 土层中 2 种改良剂在 7 月的效果均显著, 而在 20~40 cm 土层中仅在 9 月的 LKY 处理对提升土壤速效磷有突出效果。这既与改良剂在土壤中的垂直迁移能力有关, 也反映出干旱区深层土壤养分亏缺更严重、改良响应更慢。试验样地在 5 月采样前曾按酒庄常规管理进行了田间施肥, 导致土壤电导率、土壤速效钾、土壤全磷等指标短暂升高。随着葡萄植株在生育期内对养分需求的增加, 土壤养分逐渐下降。在 7、9 月施用改良剂后, 土壤碱解

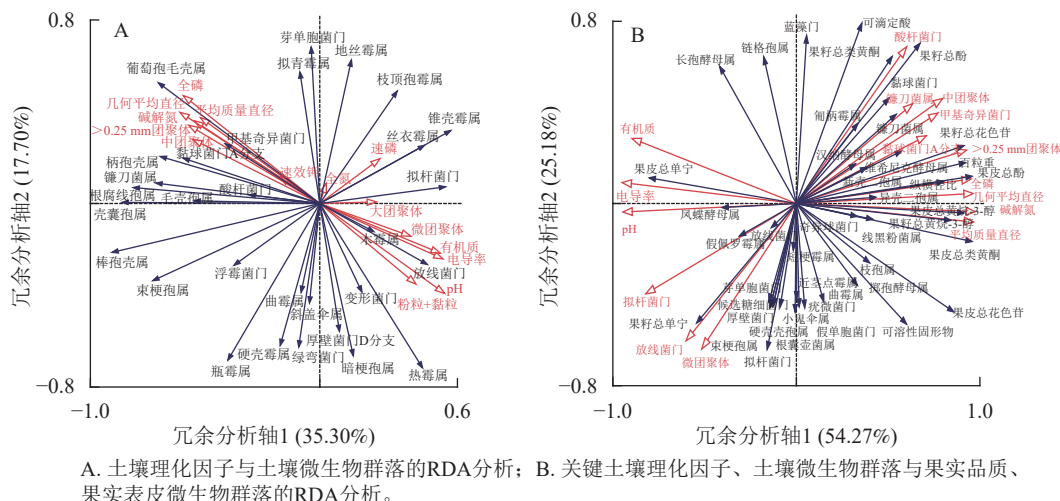


图 5 不同有机改良剂处理下葡萄园土壤理化因子、土壤微生物群落、果实品质及果实表皮微生物群落的 RDA 分析

Figure 5 Redundancy analysis of soil physicochemical factors, soil microbial community, berry quality, and berry epidermis microbiota in vineyards under different organic amendment treatments

氮、土壤速效磷、土壤全磷等指标较 ck 均明显提升，进一步印证了 2 种改良剂对土壤理化性质的改善作用，只是改良效果存在时空差异。

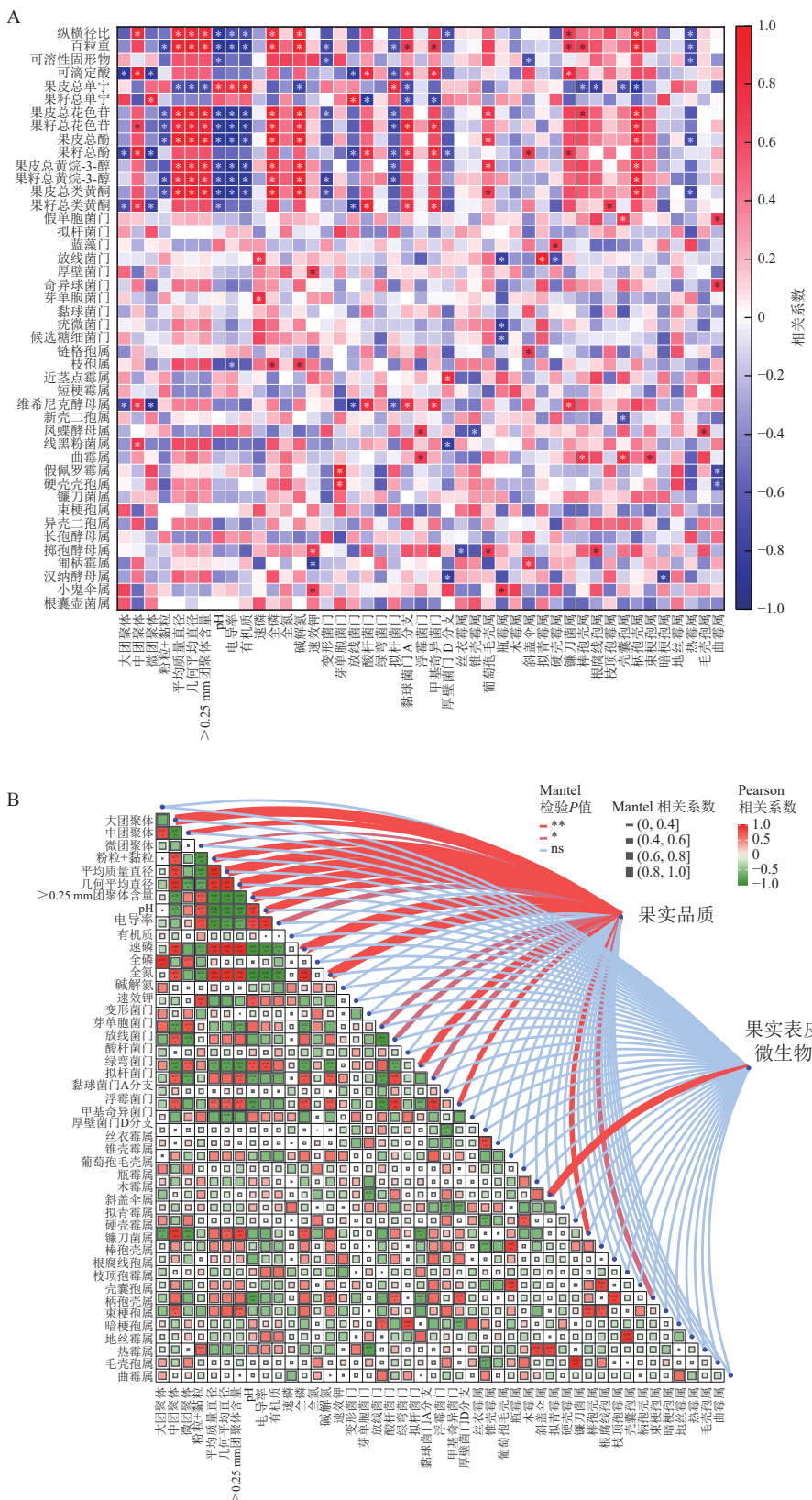
7 月各处理不同土层的土壤电导率明显高于 9 月，这主要是因为 7 月蒸发强烈，灌溉带入的盐分难以下渗，在各土层中快速聚集从而导致土壤电导率增加；9 月葡萄进入成熟后期，昼夜温差增大、灌溉频率降低且根系吸盐能力增强，盐分随水分下渗并被根系大量吸收，耕层盐分累积量大幅减少，土壤电导率随之降低^[13]。值得注意的是，9 月 LKY 处理的 0~20 cm 土层土壤碱解氮质量分数较 7 月明显增加，20~40 cm 土层则相反。这是由于 7 月 0~20 cm 土层湿度较低，导致 LKY 中的矿源黄腐酸活性受限、氮素矿化不足，而 20~40 cm 土层湿度相对稳定，根系氮素吸收量与矿化补充量基本平衡；9 月 0~20 cm 土层经灌溉维持湿度后，矿源黄腐酸活性被充分激发，加之葡萄表层根系分泌物的刺激，有机物料矿化速率提升，氮素活化量增加，使土壤碱解氮质量分数明显升高，而 20~40 cm 土层碱解氮降低则是因为 LKY 处理的养分主要集中在表层，活化的氮素未及时向下迁移，且深层根系对氮素的吸收量大于矿化补充量^[14]。此外，相较于 LKY、LW 处理，9 月 ck 处理的土壤有机质显著升高，这可能与秋季凋落物输入增加有关。外源有机碳输入对土壤碳库的调控效应也已被诸多研究证实^[15]。

2 种改良剂不仅对土壤化学养分存在差异化影响，对土壤物理结构的改良作用也表现出明显不同。LKY 处理显著提升中团聚体占比及团聚体稳定性，LW 处理则侧重增加大团聚体占比。推测是因为 LKY 处理中功能基团更易促进微团聚体的胶结^[16]，而 LW 处理中有机质输入更利于大团聚体的形成^[17]。

土壤理化性质与团聚体结构的改变进一步影响了土壤微生物群落的组成与结构^[18]。有机改良剂对土壤细菌群落结构有显著影响^[19]，土壤真菌群落仅表现出趋势性分离。这一差异可能是因为土壤细菌世代周期短、周转速率快，对土壤微环境变化更敏感^[20]，而土壤真菌细胞壁结构复杂，群落结构更稳定^[21]，因此改良剂对土壤细菌的调控更易体现。

3.2 有机改良剂对果实品质及酚类物质的影响

LKY 处理显著提升可滴定酸、百粒重、产量、果皮总酚、果皮总类黄酮、果籽总酚、果籽总类黄酮，这是因为 LKY 处理提升的土壤速效养分可更高效地被葡萄根系吸收，为果实发育提供充足的矿质营养，进而促进果实百粒重和可滴定酸质量浓度的显著升高，可能与 LKY 处理调控土壤 pH 后根系对矿质元素吸收效率的改变有关^[22]。值得注意的是，LW 处理可滴定酸显著低于 LKY 和 ck 处理，这一现象或与其养分调控特征及微生物特性相关：一方面，LW 侧重提升的土壤全氮为光合作用与蛋白质合成提供核心支撑，结合有机质分解释放的碳源与矿质元素，促进碳水化合物(可溶性糖)大量积累，进而通过稀释效应降低可滴定酸的相对含量^[23]；另一方面，LW 作为微生物菌剂，可调节葡萄根系对钾离子的吸收效率^[24]，而钾离子能调控有机酸代谢酶活性以减少酸积累^[25]。



A. 关键土壤环境因子、土壤微生物群落与果实品质、果实表皮微生物群落的相关性热图；B. 关键土壤环境因子、土壤微生物群落与果实品质、果实表皮微生物群落的相关性Mantel检验关联图。方框大小代表Pearson相关系数的绝对值，方框越大表示相关性越强；红色表示正相关，绿色表示负相关；*. $P < 0.05$, **. $P < 0.01$, ***. $P < 0.001$ 。

图6 不同有机改良剂处理下葡萄园土壤环境因子与果实品质及果实表皮微生物群落的相关性分析
Figure 6 Correlation analysis among soil environmental factors, berry quality parameters, and berry-surface microbiota in the vineyard under different organic-amendment treatments

LKY 处理产量最优的核心原因还在于其通过提升土壤中团聚体占比及平均质量直径，增加了土壤通气性与保水保肥能力，为根系下扎及养分吸收创造了稳定的微环境，同时土壤碱解氮等有效养分的持续供应，既促进平均单穗质量增加实现增产，也为果实酚类物质合成积累提供了稳定的根际养分条件^[26-28]；LW 处理虽能增加大团聚体占比，但速效养分提升有限，难以满足葡萄生长对养分的集中需求，因此产量与果实酚类物质积累的整体提升幅度均明显低于 LKY 处理。

3.3 有机改良剂处理下土壤环境、微生物、果实品质的相关性

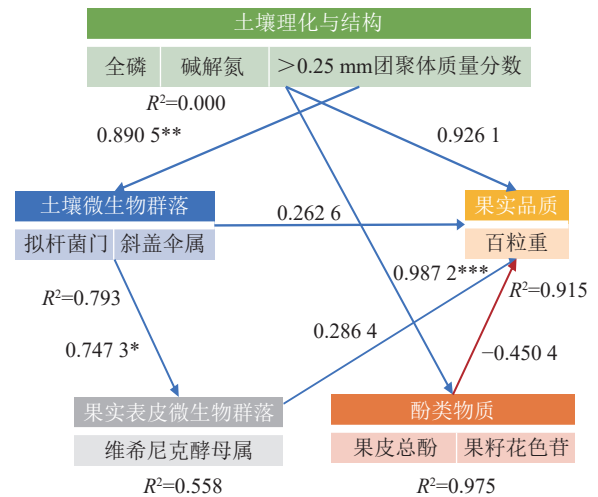
在土壤-微生物-果实品质的链式关联中，土壤环境因子对果实品质及果皮微生物群落的解释力高达 79.45%，充分证实了土壤环境因子是驱动葡萄果实品质形成的关键因素^[29]。此外，有机改良剂处理下，土壤微生物群落与果实表皮微生物群落呈现显著的正向效应，且 PLS-PM 模型已验证土壤理化结构对土壤微生物群落的驱动作用^[30-31]。这表明有机改良剂并非直接作用于果实表皮微生物，而是通过先调控土壤微生物群落结构，再借助根际微生物与地上部微生物的跨系统互作，间接影响果实表皮微生物群落^[32]，最终构建起土壤环境-微生物-果实品质的链式调控网络，揭示了有机改良剂改善葡萄果实品质的深层微生物学机制。

4 结论

LKY 与 LW 处理对土壤的改良具有时空特异性。LKY 处理侧重降低土壤 pH，增加土壤速效养分及中团聚体稳定性，LW 处理侧重提升土壤全氮、土壤有机质并促进大团聚体的形成，两者均显著影响土壤细菌群落结构。LKY 处理对果实品质、产量及酚类物质的综合提升效果均明显优于 LW 处理。LW 处理虽能增加土壤大团聚体占比，但其对土壤速效养分的提升有限，难以支撑产量的大幅提升。综上所述，在宁夏贺兰山东麓干旱区砂质葡萄园中，LKY 处理通过靶向改善土壤 pH、土壤有效养分及团聚体稳定性，明晰了土壤-微生物-果实之间的关系；偏最小二乘路径模型证实，这些关键因子构成的土壤理化结构是有机改良剂影响土壤微生物及果实酚类物质的核心驱动因子，故 LKY 处理是更适配该产区的有机改良剂。本研究明确了干旱区葡萄园土壤改良的核心靶点与技术方向，为产区实现绿色、高效的葡萄栽培提供了实践参考。

5 参考文献

- [1] 宁夏贺兰山东麓葡萄酒产业园区管委会. 宁夏贺兰山东麓葡萄酒产业园区概况 [EB/OL]. 2025-07-17. https://gxt.nx.gov.cn/zwgk/gjyjbxx/yqgk/202408/t20240801_4611721.html. Ningxia Eastern Foot of Helan Mountain Wine Industry Park Management Committee. Overview of Ningxia Helan Mountain East Foothills Wine Industry Park [EB/OL]. 2025-07-17. https://gxt.nx.gov.cn/zwgk/gjyjbxx/yqgk/202408/t20240801_4611721.html.
- [2] 王君正. 微生物菌剂在黄瓜育苗和基质栽培中应用效果的研究 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2021. WANG Junzheng. Study on the Application Effect of Microbial Agents in Cucumber Seedling and Substrate Culture [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2021.
- [3] 朱会调, 高登涛, 白茹, 等. 黄腐酸对土壤养分、葡萄品质和产量的影响 [J]. 新疆农业科学, 2021, 58(4): 672-681. ZHU Huidiao, GAO Dengtao, BAI Ru, et al. Effects of fulvic acid on soil nutrients, grape quality and yield [J]. Xinjiang



模型整体拟合优度为0.7374。箭头旁数值为路径系数。蓝色箭头表示正相关，红色箭头表示负相关；路径系数绝对值越大表示作用越强；决定系数(R^2)表示该变量被模型中其他影响因素所解释的变异比例，数值越接近1，解释程度越高。
*. $P < 0.05$, **. $P < 0.01$, ***. $P < 0.001$ 。

图 7 不同有机改良剂处理下葡萄园土壤理化结构-微生物群落-果实品质的偏最小二乘路径模型

Figure 7 PLS-PM linking soil physicochemical structure, microbial community, and fruit quality in vineyards treated with organic amendments

- Agricultural Sciences*, 2021, **58**(4): 672–681. DOI: [10.6048/j.issn.1001-4330.2021.04.010](https://doi.org/10.6048/j.issn.1001-4330.2021.04.010).
- [4] 刘璐, 代红军, 王振平. 微生物肥料对‘赤霞珠’葡萄生长及土壤质量的影响[J]. *北方园艺*, 2016(17): 175–179. LIU Lu, DAI Hongjun, WANG Zhenping. Effect of microbial fertilizers on the grape growth of ‘Cabernet Sauvignon’ and soil properties[J]. *Northern Horticulture*, 2016(17): 175–179. DOI: [10.11937/bfyy.201617043](https://doi.org/10.11937/bfyy.201617043).
- [5] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2008. BAO Shidan. *Soil Agrochemical Analysis*[M]. 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2008.
- [6] 王虹艳, 吴士文, 马海洋, 等. 浙南易蚀土壤的团聚体稳定性及其稳定机理[J]. *土壤通报*, 2010, **41**(2): 429–433. WANG Hongyan, WU Shiwen, MA Haiyang, *et al.* Stability and its mechanism of aggregates in easily eroded soils derived from purple rock in the south of Zhejiang Province[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2010, **41**(2): 429–433. DOI: [10.19336/j.cnki.trtb.2010.02.035](https://doi.org/10.19336/j.cnki.trtb.2010.02.035).
- [7] GOOD I J. The population frequencies of species and the estimation of population parameters[J]. *Biometrika*, 1953, **40**(3/4): 237–264. DOI: [10.1093/biomet/40.3-4.237](https://doi.org/10.1093/biomet/40.3-4.237).
- [8] MARINOVA D, RIBAROVA F, ATANASSOVA M. Total phenolics and total flavonoids in Bulgarian fruits and vegetables[J]. *Journal of the University of Chemical Technology and Metallurgy*, 2005, **40**(3): 255–260.
- [9] 朱艳云, 王晓宇, 杜国荣, 等. 利用多酚/蛋白互作模型研究多酚对葡萄酒涩感的影响[J]. *现代食品科技*, 2017, **33**(11): 63–69, 190. ZHU Yanyun, WANG Xiaoyu, DU Guorong, *et al.* Effects of polyphenols on the wine astringency by phenolic/protein interaction model[J]. *Modern Food Science & Technology*, 2017, **33**(11): 63–69, 190. DOI: [10.13982/j.mfst.1673-9078.2017.11.010](https://doi.org/10.13982/j.mfst.1673-9078.2017.11.010).
- [10] LÓPEZ-RAYO S, VALVERDE S, LUCENA J J. S, S-EDDS ligand as a soil solubilizer of Fe, Mn, Zn, and Cu to improve plant nutrition in deficient soils[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2023, **71**(25): 9728–9737. DOI: [10.1021/acs.jafc.3c02057](https://doi.org/10.1021/acs.jafc.3c02057).
- [11] ZHAO Yupeng, BIAN Qingyong, DONG Zhiduo, *et al.* The input of organic fertilizer can improve soil physicochemical properties and increase cotton yield in southern Xinjiang[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2025, **15**: 1520272. DOI: [10.3389/fpls.2024.1520272](https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1520272).
- [12] MUNNA M N H, LAL R. Long-term organic inputs effects on soil carbon and nitrogen sequestration in a temperate agroecosystem[J]. *Soil Use and Management*, 2026, **42**: e70161. DOI: [10.1111/sum.70161](https://doi.org/10.1111/sum.70161).
- [13] 常洁, 李秀芳, 郑兰香. 酒庄废水冬灌对葡萄酒园土壤理化性质和细菌群落结构的影响[J]. *土壤通报*, 2024, **55**(4): 1071–1079. CHANG Jie, LI Xiufang, ZHENG Lanxiang. Effects of winter irrigation with winery wastewater on soil physicochemical properties and bacterial community structure in vineyard[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2024, **55**(4): 1071–1079. DOI: [10.19336/j.cnki.trtb.2023071801](https://doi.org/10.19336/j.cnki.trtb.2023071801).
- [14] 孙浩然, 董琼, 李惠霞, 等. 不同种植年限对贺兰山东麓葡萄酒园土壤养分特性的影响[J]. *中国农学通报*, 2024, **40**(30): 75–83. SUN Haoran, DONG Qiong, LI Huixia, *et al.* Impact of different planting years on soil nutrient characteristics in grape vineyards at eastern foot of Helan Mountain[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2024, **40**(30): 75–83. DOI: [10.11924/j.issn.1000-6850.casb2024-0185](https://doi.org/10.11924/j.issn.1000-6850.casb2024-0185).
- [15] BELVISI G, GRISTINA L, SCALENGHE R. Cover crops drive soil carbon retention in semi-arid sloping vineyards[J]. *Ecological Processes*, 2025, **14**(1): 85. DOI: [10.1186/s13717-025-00650-9](https://doi.org/10.1186/s13717-025-00650-9).
- [16] HAYES M H B, ROULIA M. Relevance of organic matter compositions, structures and associations to soil aggregates and to sustainable productivity[J]. *Agronomy*, 2025, **15**(9): 2182. DOI: [10.3390/agronomy15092182](https://doi.org/10.3390/agronomy15092182).
- [17] 皇晓刚, 陈敏洁, 郑春丽, 等. 微生物菌剂对沙化土壤保水及促生长效应的影响[J]. *水土保持通报*, 2025, **45**(4): 153–160. HUANG Xiaogang, CHEN Minjie, ZHENG Chunli, *et al.* Effects of microbial inoculants on soil water retention and promotion of plant growth efficiency in desertified soil[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2025, **45**(4): 153–160. DOI: [10.13961/j.cnki.stbctb.2025.04.012](https://doi.org/10.13961/j.cnki.stbctb.2025.04.012).
- [18] 杨帆, 张亮, 程春颖, 等. 保护性耕作措施对酿酒葡萄园土壤的改良效果及作用机制[J]. *浙江农林大学学报*, 2026, **43**(3): 585–597. YANG Fan, ZHANG Liang, CHENG Chunying, *et al.* The improvement effect and mechanism of conservation tillage measures on soil structure in wine vineyards[J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2026, **43**(3): 585–597. DOI: [10.11833/j.issn.2095-0756.20250203](https://doi.org/10.11833/j.issn.2095-0756.20250203).
- [19] 李宝刚, 聂新军, 孔德雷, 等. 炭基肥对稻田土壤养分及细菌群落结构的影响[J]. *浙江农林大学学报*, 2025, **42**(6):

- 1243–1254. LI Baogang, NIE Xinjun, KONG Delei, *et al.* Effects of biochar based fertilizer on soil nutrients and bacterial community structure[J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2025, **42**(6): 1243–1254. DOI: [10.11833/j.issn.2095-0756.20250102](https://doi.org/10.11833/j.issn.2095-0756.20250102).
- [20] XU Risheng, LI Ke, CHEN Anlei, *et al.* Responses of soil microbial communities to abandoned paddy fields with different fertilization histories[J]. *Land Degradation & Development*, 2025, **36**(6): 1820–1833. DOI: [10.1002/ldr.5464](https://doi.org/10.1002/ldr.5464).
- [21] GAUTAM I, ANKUR A, SINGH K, *et al.* Breaking down the wall: solid-state NMR illuminates how fungi build and remodel diverse cell walls[J]. *PLoS Pathogens*, 2025, **21**(11): e1013678. DOI: [10.1371/journal.ppat.1013678](https://doi.org/10.1371/journal.ppat.1013678).
- [22] 田亚楠, 苏丽, 梁飞, 等. 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 Yanan, SU Li, LIANG Fei, *et al.* 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. DOI: [10.11869/j.issn.1000-8551.2024.10.1995](https://doi.org/10.11869/j.issn.1000-8551.2024.10.1995).
- [23] 牛生洋, 刘崇怀, 刘强, 等. 葡萄种质果实有机酸组分及其含量特性[J]. *食品科学*, 2022, **43**(12): 228–234. NIU Shengyang, LIU Chonghuai, LIU Qiang, *et al.* Composition and contents of organic acids in different grape germplasm[J]. *Food Science*, 2022, **43**(12): 228–234. DOI: [10.7506/spkx1002-6630-20210704-030](https://doi.org/10.7506/spkx1002-6630-20210704-030).
- [24] 白玉峰, 张文霞, 田亚楠, 等. 宁夏贺兰山东麓降 L-苹果酸葡萄酒酵母的筛选[J]. *中国酿造*, 2021, **40**(1): 49–54. BAI Yufeng, ZHANG Wenxia, TIAN Yanan, *et al.* Screening of yeast strains with L-malic acid degradation ability from Eastern Foothills of Helan in Ningxia[J]. *China Brewing*, 2021, **40**(1): 49–54. DOI: [10.11882/j.issn.0254-5071.2021.01.010](https://doi.org/10.11882/j.issn.0254-5071.2021.01.010).
- [25] WANG Jin, LU Yuhang, ZHANG Xuemei, *et al.* Effects of potassium-containing fertilizers on sugar and organic acid metabolism in grape fruits[J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2024, **25**(5): 2828. DOI: [10.3390/ijms25052828](https://doi.org/10.3390/ijms25052828).
- [26] LE GUYADER E, MORVAN X, MICONNET V, *et al.* Influence of date palm-based biochar and compost on water retention properties of soils with different sand contents[J]. *Forests*, 2024, **15**(2): 304. DOI: [10.3390/f15020304](https://doi.org/10.3390/f15020304).
- [27] WU Yuxia, LUO Zhengcheng, QI Liang, *et al.* A study of the relationship between initial grape yield and soil properties based on organic fertilization[J]. *Agronomy*, 2024, **14**(4): 861. DOI: [10.3390/agronomy14040861](https://doi.org/10.3390/agronomy14040861).
- [28] MAIRATA A, VALLS-FONAYET J, LABARGA D, *et al.* Influence of organic mulches and soil properties on the phenolic profile of leaves, canes and grape skins in grapevine (*Vitis vinifera* L.)[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2025, **105**(9): 4893–4904. DOI: [10.1002/jsfa.14215](https://doi.org/10.1002/jsfa.14215).
- [29] 郭紫嫣, 唐雯, 徐梦雨, 等. 葡萄园土壤因子与果实品质的关联及品种响应差异分析[J]. *园艺学报*, 2025, **52**(11): 2943–2958. GUO Ziyang, TANG Wen, XU Mengyu, *et al.* Association between vineyard soil factors and fruit quality: an analysis of cultivar response differences[J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2025, **52**(11): 2943–2958. DOI: [10.16420/j.issn.0513-353x.2024-0906](https://doi.org/10.16420/j.issn.0513-353x.2024-0906).
- [30] 闫芳彬, 郑景明, 宫殷婷, 等. 园林废弃物资源化处理对人工林土壤养分及微生物碳源利用的影响[J]. *浙江农林大学学报*, 2023, **40**(5): 1045–1053. YAN Fangbin, ZHENG Jingming, GONG Yinting, *et al.* Effects of garden waste reuse treatments on soil nutrients and microbial carbon source utilization in plantation soil[J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2023, **40**(5): 1045–1053. DOI: [10.11833/j.issn.2095-0756.20220620](https://doi.org/10.11833/j.issn.2095-0756.20220620).
- [31] 骆争荣, 郑伟成, 唐战胜, 等. 浙江九龙山香果树生境土壤微生物多样性及其影响因素[J]. *浙江农林大学学报*, 2024, **41**(5): 1013–1023. LUO Zhengrong, ZHENG Weicheng, TANG Zhansheng, *et al.* Soil microbial diversity and its influencing factors in the habitat of rare plant *Emmenopterys henryi* in Jiulongshan, Zhejiang Province[J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2024, **41**(5): 1013–1023. DOI: [10.11833/j.issn.2095-0756.20230532](https://doi.org/10.11833/j.issn.2095-0756.20230532).
- [32] LIU Menglong, YAO Xuenan, WANG Haiqi, *et al.* Carposphere microbiota alters grape volatiles and shapes the wine grape typicality[J]. *New Phytologist*, 2025, **246**(5): 2280–2294. DOI: [10.1111/nph.70152](https://doi.org/10.1111/nph.70152).