

引用格式: 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. 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.

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

杨帆¹, 张亮^{1,2}, 程春颖¹, 赵欣茹¹, 杨偲淇¹, 桑倩倩¹, 薛婷婷^{1,2}

(1. 宁夏大学葡萄酒与园艺学院, 宁夏银川 750021; 2. 宁夏大学葡萄与葡萄酒教育部工程研究中心/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】探究保护性耕作措施处理下, 宁夏贺兰山东麓酿酒葡萄园土壤的理化性质、团聚体和微生物群落的变化趋势, 阐明土壤理化性质与微生物群落的相关关系。【方法】以酿酒葡萄‘赤霞珠’ *Vitis vinifera* ‘Cabernet Sauvignon’ 为试验材料, 设置自然生草 (NT)、枝条覆盖 (CTS) 和自然生草+枝条覆盖 (NTS) 作为处理, 同时以清耕 (ck) 作为对照, 测定分析宁夏贺兰山东麓酿酒葡萄园葡萄开花期 (5月)、果实膨大期 (7月) 和果实成熟期 (9月) 土壤 pH、电导率、团聚体稳定性, 氮、磷、钾、有机质质量分数, 细菌、真菌相对丰度及多样性等指标。【结果】①与 ck 相比, NT、CTS 和 NTS 处理显著提高了葡萄不同生长时期的土壤 pH 以及全磷、碱解氮、有效磷、有机质质量分数 ($P < 0.05$), 其中在 9 月, NT、CTS 和 NTS 处理的土壤有机质分别增加了 34.71%、93.33%、68.73%。②与 ck 相比, NT、CTS 和 NTS 处理的土壤团聚体稳定性显著提高 ($P < 0.05$), 特别是在 9 月, NTS 处理的团聚体平均质量直径显著增加 26.23%, 团聚体平均几何直径显著增加 67.65%, 大于 0.250 mm 团聚体百分比显著增加 31.33% ($P < 0.05$), 土壤结构得到了改善。③NT、CTS 和 NTS 处理显著提高了土壤中细菌、真菌的相对丰度和多样性 ($P < 0.05$), 改变了微生物群落结构。【结论】在‘赤霞珠’酿酒葡萄园中 NT、CTS 和 NTS 处理均能显著改善土壤理化性质及微生物性质。图 4 表 3 参 54

关键词: 酿酒葡萄园; 自然生草; 枝条覆盖; 土壤养分; 土壤团聚体; 土壤微生物

中图分类号: S663.1 文献标志码: A 文章编号: 2095-0756(2026)03-0585-13

Improvement effect and mechanism of conservation tillage measures on soil structure in wine vineyards

YANG Fan¹, ZHANG Liang^{1,2}, CHENG Chunying¹, ZHAO Xinru¹, YANG Siqi¹,
SANG Qianqian¹, XUE Tingting^{1,2}

(1. College of Enology and Horticulture, Ningxia University, Yinchuan 750021, Ningxia, China; 2. Engineering Research Center of Grape and Wine, Ministry of Education/Ningxia Grape and Wine Engineering Technology Center, Ningxia University, Yinchuan 750021, Ningxia, China)

Abstract: [Objective] The objective is to investigate the changes in soil physicochemical properties, aggregates and microbial communities in the wine vineyards at the eastern foot of Helan Mountains in Ningxia under conservation tillage measures, and to elucidate the correlation between soil physicochemical properties and microbial communities. [Method] Taking the wine grape variety *Vitis vinifera* ‘Cabernet Sauvignon’ as the experimental material, natural grass (NT), branch mulching (CTS), and natural grass + branch mulching (NTS) were set up as treatments and clean tillage (ck) was used as the control. The indicators such as soil pH, electrical conductivity (EC), aggregate stability, nitrogen, phosphorus, potassium, organic matter contents, and

收稿日期: 2025-03-14; 修回日期: 2025-06-12

基金项目: 宁夏自然科学基金资助项目 (2023AAC03143, 2023AAC03064); 国家自然科学基金资助项目 (32360804)

作者简介: 杨帆 (ORCID: 0009-0006-9127-8623), 从事葡萄生理及栽培研究。E-mail: yangfan2324@163.com。通信作者: 薛婷婷 (ORCID: 0000-0003-1721-5756), 副教授, 博士, 从事酿酒葡萄冬季免埋土和生态栽培研究。E-mail: xtt@nxu.edu.cn

relative abundance and diversity of bacteria and fungi were measured and analyzed in the wine vineyards during the flowering period (May), fruit swelling period (July), and fruit ripening period (September). [Result] (1) Compared with ck, NT, CTS, and NTS treatments significantly increased soil pH and total phosphorus, alkali-hydrolyzable nitrogen, available phosphorus, and organic matter contents at different growth stages of the grapes ($P < 0.05$). In September, the soil organic matter content in NT, CTS, and NTS treatments increased by 34.71%, 93.33%, and 68.73%, respectively. (2) Compared with ck, the stability of soil aggregates under NT, CTS, and NTS treatments was significantly improved ($P < 0.05$). Particularly in September, NTS significantly increased the mean weight diameter (MWD) of aggregates by 26.23%, the mean geometric diameter (MGD) of aggregates by 67.65%, and the percentage of aggregates larger than 0.250 mm ($R_{0.25}$) by 31.33%, resulting in an improvement in soil structure. (3) NT, CTS, and NTS treatments significantly increased the relative abundance and diversity of bacteria and fungi in the soil ($P < 0.05$), and altered the microbial community structure. [Conclusion] NT, CTS, and NTS treatments can significantly improve soil physical-chemical and microbial properties in the ‘Cabernet Sauvignon’ vineyard. [Ch, 4 fig. 3 tab. 54 ref.]

Key words: wine vineyard; natural grass; branch mulching; soil nutrients; soil aggregates; soil microorganisms

土壤是一种退化程度高,再生速率很低的自然资源,是农业生态系统的重要组成部分。它作为维持植物、动物和人类生存的重要生态系统,在农业生产中发挥着重要的作用。土壤质量是土壤物理性质、化学性质和生物特性的综合^[1]。通过测定土壤团聚体^[2]、颗粒物有机质、活性碳、全氮、全磷、全钾、微生物生物量、酶、pH、阳离子交换能力、水分、盐度、容重等指标可以确定土壤质量^[3-4]。土壤质量是土地生产力的基础,也是影响农作物产量的重要因素^[5]。健康的土壤能够给植物提供水分和养分,植物生长需要的许多营养元素都来自土壤^[6],因此,保持土壤健康对于实现农业优质高产至关重要。

宁夏贺兰山东麓地区以其适宜酿酒葡萄 *Vitis vinifera* 种植和酿造的自然条件而闻名,已成为中国优质葡萄酒的重要产区之一。然而,该地区使用的还是传统的土壤管理方法——清耕。相关研究指出:清耕不仅破坏土壤结构,导致水土流失,造成土壤质量不佳和肥力供应不足等问题^[7],还会增加葡萄园的生产成本,因此,尽量减少人为干扰和自然侵蚀对于提高葡萄园土壤的物理化学特性和促进土壤健康至关重要^[8]。

保护性耕作措施,如免耕、轮作、生草覆盖、枝条覆盖、秸秆覆盖、作物覆盖和地膜覆盖等,已经在世界范围内得到了广泛应用^[9-10],特别是生草覆盖和枝条覆盖已被证明是改善土壤质量和防止土壤侵蚀的有效措施^[11-12]。自20世纪70年代末以来,覆盖栽培技术在中国各地得到了引进和推广。相关研究表明:保护性耕作措施有助于土壤有机质的积累^[13-14],保持土壤水分^[15-16],有效提高土壤质量^[17-18]。目前,果园生草或枝条覆盖的管理措施已经在中国众多果园内得到了应用。果园生草覆盖指在果树行间利用自然生长或人工种植的禾本科 Gramineae 或豆科 Fabaceae 植物,覆盖在土壤表面,每年刈割,并将刈割后的植物残体覆盖在土壤表面或者翻耕入表层土壤,避免土壤裸露的一种覆盖方式^[19-21]。枝条覆盖是将修剪后的果树枝条或其他林木枝条覆盖在土壤表面的覆盖方法,可分为直接覆盖或翻埋覆盖,直接覆盖又分为枝条粉碎覆盖和整段枝条覆盖。枝条覆盖中所选果树枝条粉碎长度一般小于3 cm^[22],而林木枝条粉碎长度为5~10 cm^[23]。目前,自然生草和枝条覆盖等保护性耕作措施对土壤团聚体和微生物群落的作用研究还相对不足。基于自然生草和枝条覆盖等保护性耕作措施会促使宁夏贺兰山东麓酿酒葡萄园土壤的理化性质、团聚体和微生物发生显著变化的假设,本研究探索清耕、自然生草和枝条覆盖对酿酒葡萄园土壤理化性质、团聚体和微生物的影响,旨在为改善土壤质量和提升酿酒葡萄产量提供科学依据。

1 研究区与方法

1.1 研究区概况

研究区位于宁夏贺兰山东麓酿酒葡萄产区青铜峡子产区的塞上江南酒庄(38°07'45"~38°07'49"N, 105°87'01"~105°87'33"E)。该地土质以灰钙土为主,属于中温带干旱大陆性气候。降雨稀少,冬季寒冷

时日长,持续 5~6 个月,而夏季炎热时日短只有 2~3 个月,温差大,日照充足,无霜期短。该区域海拔为 1 126.0~1 300.0 m,年平均气温为 9.2 ℃,年平均日照时数为 2 892.2 h,年平均降水量为 181.7 mm,年平均无霜期为 127.0~164.0 d。

1.2 试验设计

本研究以酿酒葡萄品种‘赤霞珠’‘Cabernet Sauvignon’为试验材料,并设置 4 个处理:以清耕(ck)为对照,设置自然生草(NT)、枝条覆盖(CTS)、自然生草+枝条覆盖(NTS),每个处理 3 次重复。每个试验小区面积为 12 m×7 m,种植 12 株葡萄,12 个小区共计种植葡萄 144 株,边缘设置保护行。统一田间管理,所有处理灌溉、修剪和病虫害防治措施一致。本研究于 2023 年 4 月开始至 2023 年 10 月。2023 年 4 月前对试验地进行出土和清耕处理,清除所有植物残留物,之后对不同小区施行各自的处理。清耕:在生长季中当行间草生长高度到达 10 cm 左右时进行清除,每 2 周进行 1 次。自然生草:在生长季中不清耕,保持行间自然草的高度为 15~20 cm,过长时进行刈割,并将刈割后的草覆盖在土壤表面。枝条覆盖:收集酿酒葡萄冬季修剪后的枝条,并于 3 月进行粉碎,将粉碎后的枝条覆盖于葡萄定植带,覆盖厚度为 5 cm。

1.3 样品采集与测定

在 2023 年葡萄开花期(5 月)、果实膨大期(7 月)、果实成熟期(9 月),以五点采样法采集葡萄园内各小区 0~20 cm 土层的土壤。剔除土壤中的石块、植物及其根系,将样品放入硬质塑料盒和无菌自封袋内,利用冰袋降温并保存后运回实验室。土壤样品分为 3 个部分:①将用于土壤理化性质测定的样品保存于 4 ℃ 冰箱。②将土壤样品风干,沿土壤结构的自然缝隙轻轻剥开成直径约 5 mm 的小土块,并除去作物根系和小石块等杂质,将土样摊平,置于通风透气处自然风干,用于土壤团聚体相关指标的测定。③将用于测定各粒级土壤微生物群落的土样用干筛法进行分级后,保存在-80 ℃ 冰箱中。

土壤理化性质参照文献[24]测定。土壤 pH 和电导率采用超纯水浸提,水土比(质量比)为 2.5:1.0,浸泡 20 min 后,玻璃电极法测量;土壤速效钾(AK)采用乙酸铵浸提-火焰光度计法测定;土壤有效磷(AP)采用碳酸氢钠提取-钼锑抗比色法测定;土壤碱解氮(AN)采用碱解扩散法测定;土壤全磷(TP)采用钼锑抗比色法测定^[25];土壤全氮(TN)采用凯氏定氮法测定;土壤有机质(SOM)采用重铬酸钾外加热法测定。

参考 ELLIOTT^[26]的湿筛法,将土壤团聚体分为 4 个粒级:>2.000、>0.250~2.000、>0.053~0.250、≤0.053 mm,并采用平均质量直径(MWD)、平均几何直径(GMD)、>0.250 mm 团聚体百分比($R_{0.25}$)来评价土壤团聚体稳定性。计算方法参照文献[27]。

1.4 土壤细菌和真菌高通量测序

土壤 DNA 采用试剂盒(OMEGA Soil DNA Kit,目录号 D5625-01)提取,提取步骤按试剂盒说明书进行。用质量分数为 0.8% 琼脂糖凝胶电泳进行分子大小判断,利用紫外分光光度计对 DNA 进行定量。使用 16S rDNA V3-V4 区特异性引物,338F(5'-ACTCCTACGGGAGGCAGCA-3'),806R(5'-GGACTACHVGGGTWTCTAAT-3')对细菌进行聚合酶链式反应(PCR)扩增;使用 ITS rDNA 特异性引物,上游 ITS5F(5'-GGAAGTAAAAGTCGTAAGG-3'),下游引物 ITS1R(5'-GCTGCGTTCTT CATCGATGG')对真菌进行 PCR 扩增。扩增结果用质量分数为 2.0% 琼脂糖凝胶电泳确认,切取目的片段后用 Axygen 凝胶回收试剂盒回收目的片段。在上海派森诺生物科技股份有限公司的协助下,对 Illumina MiSeq 进行双端(Paired-end)测序,并进行生物信息学分析和可视化分析。采用非量度多维尺度分析(NMDS)描述土壤微生物的 β 多样性。NMDS 分析是通过对样本距离矩阵作降维分解,简化数据结构,从而在特定距离尺度下描述样本的分布特征。与主坐标(PCoA)分析不同,NMDS 分析不依赖于特征根和特征向量的计算,而是通过对样本距离进行等级排序,使样本在低维空间中的排序尽可能符合彼此之间的相似距离的远近关系(而非确切的距离数值),使用 NMDS 的应力值(S)对 NMDS 的结果进行评估。NMDS 应力值越小越好,一般认为当该值小于 0.2 时,NMDS 分析的结果较可靠^[28]。

1.5 数据处理与统计分析

使用 Excel 2019 软件,对数据进行整理与统计分析。使用 SPSS 26 的单因素方差分析(one-way ANOVA)对所需数据进行整理及对比分析,运用 Origin 2021 软件绘制相应的统计图表。采用 NMDS 描

述样本的分布特征。采用 Spearman 相关性分析研究不同土壤环境与微生物的关系。

2 结果与分析

2.1 保护性耕作措施对酿酒葡萄园土壤理化性质的影响

保护性耕作措施对酿酒葡萄园中葡萄不同生育期土壤 pH、土壤电导率, 以及土壤养分质量分数的影响如表 1 所示。由表 1 可知: NT、CTS、NTS 处理能提高土壤的全效养分和速效养分, 并降低碱性土壤的 pH, 使其向中性转变。土壤 pH 随着时间的延长而增加, 但是整体来说保护性耕作措施均可以降低土壤 pH。在 7 和 9 月, 只有 NT 处理显著降低了土壤 pH, 而在 5 月, NT、CTS、NTS 处理均显著降低了土壤的 pH ($P < 0.05$); 在 9 月, 与 ck 相比, NT、CTS、NTS 处理的 pH 分别降低了 9.36%、5.75%、6.65%。在 5 和 7 月, NTS 显著增加了土壤电导率, 而在 9 月, NTS 则显著降低了土壤电导率 ($P < 0.05$)。保护性耕作措施增加了土壤中全效养分质量分数。在 5 月, 与 ck 相比, NT、CTS、NTS 处理均显著降低了土壤全磷质量分数 ($P < 0.05$), 但是随着时间的推移, 保护性耕作措施增加了土壤全磷的质量分数, 特别是在 9 月, 保护性耕作措施增加了土壤全磷质量分数, 并且 CTS 和 NTS 处理显著增加。ck、CTS、NT 处理下的全氮变化一致, 均呈现先升高后平稳的趋势, NTS 处理下的全氮质量分数则呈先不变后升高的趋势; 9 月, 保护性耕作措施均使全氮质量分数显著高于 ck ($P < 0.05$)。保护性耕作措施也提高了土壤速效养分的质量分数, 特别是 9 月, NT、CTS、NTS 处理显著提高了土壤速效磷质量分数 ($P < 0.05$)。ck 相比, NT、CTS、NTS 处理使得 9 月的土壤速效磷质量分数分别增加了 10.55%、123.59%、85.74%。保护性耕作措施能够增加土壤有机质的质量分数。在 9 月, NT、CTS、NTS 处理土壤有机质质量分数分别比 ck 增加了 34.71%、93.33%、68.73%。综上所述, 保护性耕作措施能够显著增加土壤有机质质量分数, 并降低碱性土壤的 pH。

表 1 不同生长时期各处理酿酒葡萄园的土壤理化性质

Table 1 Soil physicochemical properties of wine vineyards under different treatments at different periods

月份	处理	pH	电导率/ ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)	全氮/ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	全磷/ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	碱解氮/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	速效磷/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	速效钾/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	有机质/ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)
5	ck	7.99±0.05 a	144.67±6.71 c	0.08±0.01 a	0.70±0.06 a	7.93±0.81 b	30.65±0.24 c	162.43±7.41 d	9.46±0.36 b
	NT	7.83±0.04 b	200.33±6.18 b	0.09±0.01 a	0.30±0.02 b	9.33±0.81 b	50.80±0.47 a	225.58±10.11 b	7.66±0.95 c
	CTS	7.64±0.03 c	126.23±4.29 c	0.08±0.01 a	0.28±0.01 b	9.80±1.40 b	36.27±1.17 b	190.51±10.53 c	11.34±0.38 a
	NTS	7.76±0.04 b	325.00±36.35 a	0.10±0.01 a	0.26±0.01 b	13.07±1.62 a	26.68±0.47 d	250.24±7.58 a	9.19±0.57 b
7	ck	8.37±0.04 a	124.00±4.50 c	0.09±0.01 c	0.51±0.01 a	8.87±0.81 a	52.97±2.09 d	240.75±10.64 b	5.55±0.27 c
	NT	7.74±0.05 b	114.47±9.42 c	0.10±0.01 ab	0.67±0.01 a	9.10±0.70 a	73.84±0.71 b	198.29±11.90 c	6.41±0.27 b
	CTS	8.55±0.06 a	162.37±5.20 b	0.10±0.01 b	0.49±0.01 a	9.33±0.40 a	83.59±2.95 a	259.86±16.75 ab	7.74±0.23 a
	NTS	8.48±0.03 a	245.40±12.21 a	0.10±0.01 a	0.28±0.01 b	8.17±0.40 a	57.92±1.42 c	278.45±18.20 a	6.57±0.47 b
9	ck	8.87±0.02 a	115.63±4.66 a	0.09±0.01 c	0.24±0.01 b	14.47±2.14 a	27.77±0.71 b	174.82±9.30 a	4.35±0.38 c
	NT	8.04±0.02 b	155.4±3.60 a	0.10±0.01 b	0.26±0.02 b	15.87±0.81 a	30.70±0.71 a	177.59±7.77 a	5.86±0.26 bc
	CTS	8.36±0.01 a	90.2±1.61 a	0.10±0.01 b	0.33±0.03 a	14.93±3.52 a	62.09±0.71 a	228.22±5.40 a	8.41±1.28 a
	NTS	8.28±0.02 a	88.17±0.35 b	0.11±0.01 a	0.34±0.02 a	14.47±1.62 a	51.58±0.97 a	183.92±13.98 a	7.34±0.19 ab

说明: 数据为平均值±标准差。ck. 清耕; NT. 自然生草; CTS. 枝条覆盖; NTS. 自然生草+枝条覆盖。不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

2.2 保护性耕作措施对酿酒葡萄园土壤团聚体的影响

2.2.1 土壤团聚体粒级组成 保护性耕作措施对不同生长时期酿酒葡萄园中土壤团聚体的影响如图 1 所示。土壤团聚体以 $>0.250\sim 2.000$ mm 的小团聚体为主。在 5 月, 与 ck 相比, NT 处理增加了 $>0.250\sim 2.000$ mm 和 ≤ 0.053 mm 的土壤团聚体质量分数; CTS 处理增加了 >2.000 和 $>0.250\sim 2.000$ mm 的土壤团聚体质量分数; NTS 降低了 >2.000 和 ≤ 0.053 mm 的土壤团聚体质量分数 ($P < 0.05$)。在 7 月, NT 处理降低了 $>0.250\sim 2.000$ 和 ≤ 0.053 mm 的土壤团聚体质量分数, CTS 处理显著增加了 $>0.250\sim 2.000$ 和

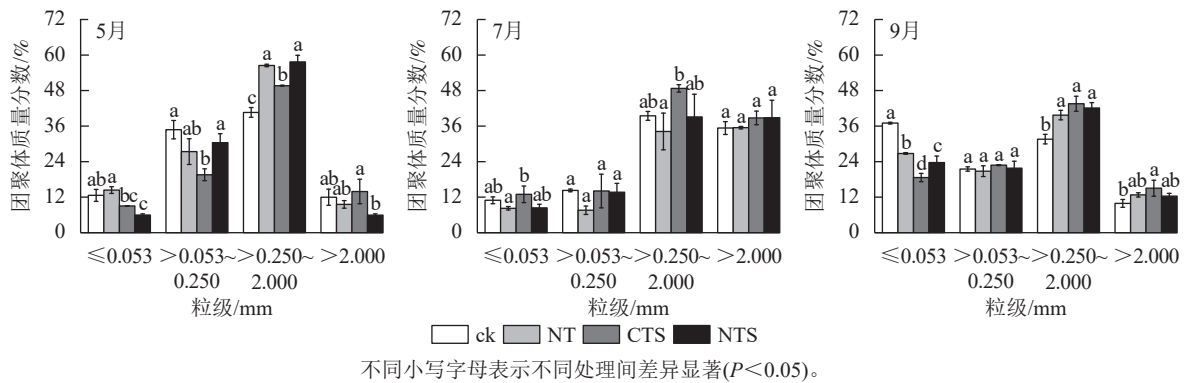


图 1 不同生长时期下各处理的土壤团聚体组成

Figure 1 Composition of soil aggregates in different treatments at different stages

≤0.053 mm 的土壤团聚体质量分数 ($P < 0.05$)。在 9 月，NT 和 NTS 处理增加了 >0.250~2.000 mm 的土壤团聚体质量分数，CTS 处理增加了 >2.000 和 >0.250~2.000 mm 的土壤团聚体质量分数。整体而言，保护性耕作措施，特别是 NT、CTS 和 NTS 处理会增加土壤中 >0.250~2.000 mm 的团聚体质量分数，使 ≤0.053 mm 土壤团聚体质量分数降低。

2.2.2 土壤团聚体稳定性 团聚体平均质量直径 (MWD)、几何平均直径 (GWD) 和土壤中大于 0.250 mm 团聚体百分比 ($R_{0.25}$) 是评价土壤团聚体稳定性的重要指标，其数值越大土壤结构越稳定。5 月，与 ck 相比，NT、CTS 和 NTS 处理显著增加了几何平均直径和 $R_{0.25}$ ($P < 0.05$, 表 2)。7 月，仅有 CTS 处理显著降低了平均质量直径 ($P < 0.05$)，其他处理间差异不显著。9 月，与 ck 相比，NT、CTS 与 NTS 处理的平均质量直径、几何平均直径和 $R_{0.25}$ 变化最显著，NT、CTS 和 NTS 处理的平均质量直径分别提高了 22.95%、36.07%、26.23%，几何平均直径分别提高了 50.00%、38.24%、67.65%， $R_{0.25}$ 分别增加了 26.46%、41.14%、31.33%。综上所述，NT、CTS 和 NTS 处理增加了土壤团聚体平均质量直径、几何平均直径和 $R_{0.25}$ ，改善了土壤结构。

表 2 不同生长时期下各处理的土壤团聚体稳定性指标

Table 2 Soil aggregates stability indicators of different treatment at different stages

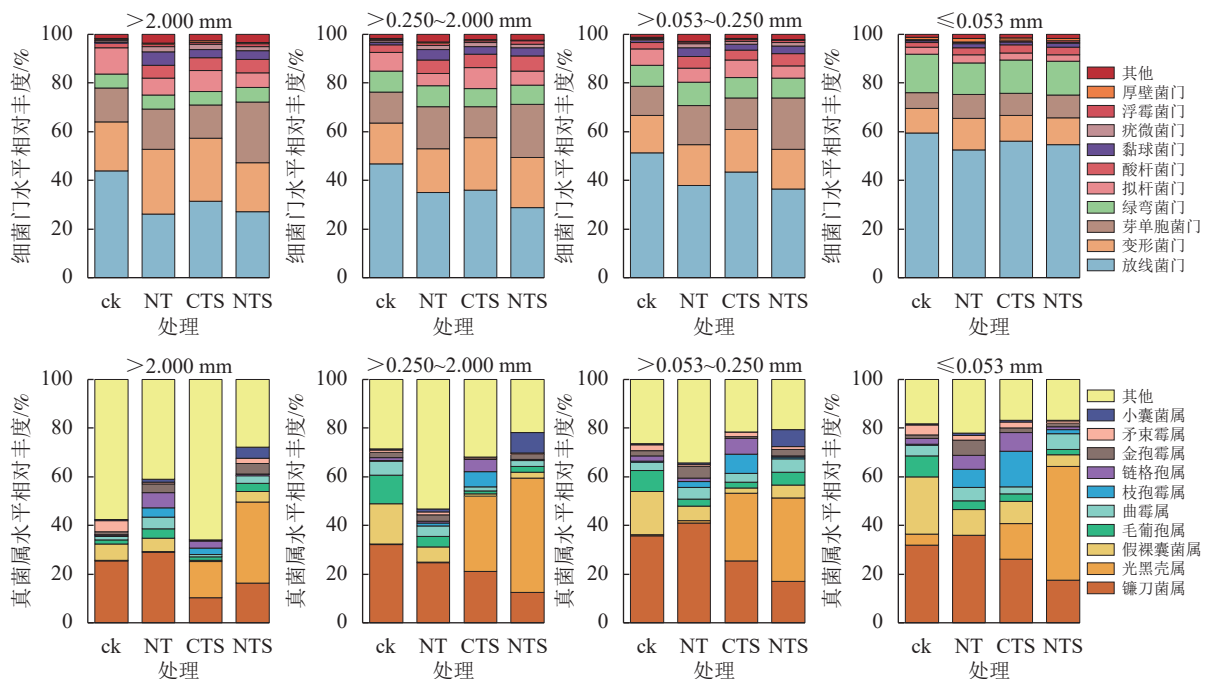
月份	处理	MWD/mm	GWD/mm	$R_{0.25}/\%$
5	ck	0.76±0.03 a	0.41±0.01 b	52.60±1.09 b
	NT	0.86±0.02 a	0.52±0.01 a	66.04±0.87 a
	CTS	0.88±0.08 a	0.54±0.06 a	63.57±4.32 a
	NTS	0.82±0.03 a	0.53±0.03 a	63.62±2.67 a
7	ck	1.18±0.03 a	0.74±0.03 a	74.79±0.71 a
	NT	1.27±0.01 a	0.92±0.01 a	84.19±0.82 a
	CTS	1.00±0.09 b	0.72±0.15 a	72.96±8.50 a
	NTS	1.24±0.04 a	0.83±0.01 a	77.92±1.80 a
9	ck	0.61±0.01 c	0.34±0.00 c	41.49±0.61 c
	NT	0.75±0.02 b	0.51±0.06 ab	52.47±1.68 b
	CTS	0.83±0.03 a	0.47±0.04 b	58.57±1.31 a
	NTS	0.77±0.03 b	0.57±0.06 a	54.49±2.34 b

说明：数据为平均值±标准差。ck. 清耕；NT. 自然生草；CTS. 枝条覆盖；NTS. 自然生草+枝条覆盖。MWD. 平均质量直径；GWD. 几何平均直径； $R_{0.25}$. 土壤中 >0.250 mm 团聚体百分比。同列不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

2.3 保护性耕作措施对酿酒葡萄园土壤微生物群落的影响

2.3.1 土壤微生物群落分类组成 通过物种注释结果发现：在门水平上，ck、NT、CTS、NTS 处理的细菌门类水平数分别为 8.00、9.67、10.00、10.33。4 个处理和 4 个团聚体粒度下土壤细菌门水平数量较多的均为放线菌门 Actinobacteriota、变形菌门 Proteobacteria、芽单胞菌门 Gemmatimonadota，绝对丰度占

各处理的总绝对丰度的比例为 69.20%~78.56%。NT、CTS 和 NTS 处理下 > 2.000 、 $> 0.250\sim 2.000$ 、 $> 0.053\sim 0.250$ 、 ≤ 0.053 mm 土壤中变形菌门、芽单胞菌门的相对丰度显著高于 ck 处理下各粒级土壤的相对丰度 ($P < 0.05$, 图 2)。与 ck 相比, NT、CTS 和 NTS 处理不同粒级下放线菌门的相对丰度显著降低 ($P < 0.05$)。在属水平上, ck、NT、CTS、NTS 处理的真菌属水平数分别为 75.00、90.33、97.67、85.00。各处理 4 个粒级下土壤真菌属水平数量最多的真菌属均为镰刀菌属 *Fusarium*, 绝对丰度占各处理总绝对丰度的比例为 10.32%~41.05%, ck 和 NT 处理的优势菌群还有玫红假裸囊菌属 *Pseudogymnoascus*, CTS 和 NTS 处理的优势菌群还有光黑壳属 *Preussia*。与 ck 相比, CTS 和 NTS 处理显著增加了各粒级土壤光黑壳属 *Preussia* 的相对丰度 ($P < 0.05$), 最大涨幅为 583.35%, 最小的为 89.80%, NT、CTS 和 NTS 处理还显著增加了各粒级中枝孢菌属 *Cladosporium* 丰度 ($P < 0.05$), 最大涨幅为 436.92%, 最小则为 12.45%。从图 2 还可以发现: $> 0.250\sim 2.000$ 和 $> 0.053\sim 0.250$ mm 土壤的微生物群落结构较为复杂, 有益菌群 (变形菌门、酸杆菌门 *Acidobacteriota*) 的相对丰度较高。综上所述, NT、CTS 和 NTS 处理显著改变了土壤微生物群落结构, 增加了微生物群落的相对丰度。



ck. 清耕处理; NT. 自然生草处理; CTS. 枝条覆盖处理; NTS. 自然生草+枝条覆盖处理。放线菌门 *Actinobacteriota*; 变形菌门 *Proteobacteria*; 芽单胞菌门 *Gemmatimonadota*; 绿弯菌门 *Chloroflexota*; 拟杆菌门 *Bacteroidota*; 酸杆菌门 *Acidobacteriota*; 黏球菌门 *Mycobacteriota*; 疣微菌门 *Verrucomicrobiota*; 浮霉菌门 *Planctomycetes*; 镰刀菌属 *Fusarium*; 光黑壳属 *Preussia*; 假裸囊菌属 *Pseudogymnoascus*; 毛孢霉属 *Botryotrichum*; 曲霉属 *Aspergillus*; 枝孢霉属 *Cladosporium*; 链格孢属 *Alternaria*; 金孢霉属 *Chrysosporium*; 矛束霉属 *Doratomyces*; 小囊菌属 *Microascus*。

图 2 不同处理下各粒级土壤的微生物组成

Figure 2 Microbial composition of soils of different aggregates under different treatments

2.3.2 土壤微生物 α 多样性 细菌和真菌的 α 多样性分析结果如表 3 所示。观察不同处理下细菌的多样性情况, 发现 NT、CTS 和 NTS 处理的土壤细菌 Chao1 和 Shannon 指数显著高于 ck ($P < 0.05$), 分别高出 9.68%~22.77% 和 1.72%~4.98%, 并且 NT 和 NTS 处理下细菌的 Simpson 指数显著高于 ck ($P < 0.05$), 表明 NT、CTS 和 NTS 处理后土壤细菌的丰富度、均匀度和多样性均有明显的增强。观察不同粒级下细菌的多样性情况, 发现 $> 0.250\sim 2.000$ mm 土壤团聚体中各指数最大, 表明土壤细菌的丰富度和多样性受该团聚体的影响最大, 与前文 $> 0.250\sim 2.000$ mm 小团聚体质量分数最多相符。对于土壤真菌而言, 与 ck 相比, NT 处理显著增加了土壤中 Chao1、Shannon 和 Simpson 指数 ($P < 0.05$), CTS 和 NTS 处理下的土壤真菌 Shannon 指数、Simpson 指数和 Chao1 指数无显著性差异, ≤ 0.053 mm 土壤团聚体中 Chao1 指数和 Simpson 指数最大, 表明土壤真菌的丰富度和多样性受该团聚体的影响最大。

2.3.3 土壤微生物 β 多样性 运用非量度多维尺度分析 (NMDS), 可以很好地区分 ck 与 NT、CTS 和

表 3 不同处理下各粒级团聚体土壤的微生物 α 多样性指标

Table 3 Soil microbial α diversity indicators of different aggregates under different treatments

处理	粒级/mm	细菌			真菌		
		Chao1	Shannon	Simpson	Chao1	Shannon	Simpson
ck	>2.000	2 006.20±71.17 b	9.53±0.11 b	1.00±0.01 a	162.55±13.88 ab	3.74±0.27 b	0.80±0.05 b
	>0.250~2.000	2 237.06±31.24 c	9.82±0.03 d	1.00±0.01 b	178.99±7.59 b	4.62±0.28 a	0.90±0.03 ab
	>0.053~0.250	2 213.83±62.17 c	9.72±0.05 b	1.00±0.01 c	230.72±10.56 b	4.74±0.08 ab	0.90±0.01 a
	≤0.053	2 300.59±170.68 ab	9.67±0.02 b	1.00±0.01 a	234.49±12.98 b	4.68±0.08 a	0.91±0.01 a
NT	>2.000	2 509.17±187.36 a	10.05±0.16 a	1.00±0.01 a	213.68±24.56 a	5.06±0.30 a	0.93±0.02 a
	>0.250~2.000	2 896.80±185.59 a	10.32±0.06 a	1.00±0.01 a	216.11±10.62 a	4.89±0.23 a	0.91±0.02 a
	>0.053~0.250	2 451.07±161.11 ab	10.10±0.08 a	1.00±0.01 b	254.07±14.43 a	4.94±0.10 a	0.90±0.01 a
	≤0.053	2 289.61±36.09 ab	9.91±0.05 a	1.00±0.01 a	281.23±17.73 a	4.96±0.20 a	0.91±0.02 a
CTS	>2.000	2 519.79±93.82 a	10.03±0.15 a	1.00±0.01 a	155.44±46.46 b	3.41±0.49 b	0.80±0.03 b
	>0.250~2.000	2 718.53±29.79 ab	10.23±0.01 b	1.00±0.01 b	206.73±17.52 ab	4.18±0.16 b	0.88±0.01 ab
	>0.053~0.250	2 577.46±85.67 a	10.08±0.04 a	1.00±0.01 bc	238.86±5.59 ab	4.42±0.45 b	0.88±0.03 a
	≤0.053	2 439.60±183.10 a	9.86±0.04 a	1.00±0.01 b	289.61±7.68 a	4.84±0.15 a	0.91±0.01 a
NTS	>2.000	2 275.32±185.04 ab	9.95±0.10 a	1.00±0.01 a	182.43±13.00 ab	4.82±0.28 a	0.90±0.04 a
	>0.250~2.000	2 551.98±127.59 b	10.11±0.05 c	1.00±0.01 a	221.89±20.58 a	4.50±0.21 ab	0.87±0.02 b
	>0.053~0.250	2 265.89±99.04 bc	9.99±0.05 a	1.00±0.01 a	229.12±13.06 b	4.86±0.18 ab	0.91±0.01 a
	≤0.053	2 108.61±38.23 b	9.84±0.07 a	1.00±0.01 a	231.40±21.95 b	3.92±0.73 b	0.79±0.09 b

说明：ck. 清耕处理；NT. 自然生草处理；CTS. 枝条覆盖处理；NTS. 自然生草+枝条覆盖处理。不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($P<0.05$)。

NTS 处理之间土壤微生物的差异性。真菌和细菌 NMDS 的应力值 (S) 分别为 0.122、0.144，均小于 0.200，这表明 NMDS 图的拟合效果较好。由图 3 可知：NT、CTS 和 NTS 处理与 ck 之间呈现明显的样品分离情况，表明与 ck 相比，NT、CTS 和 NTS 处理使细菌和真菌群落结构发生了显著变化。图 3 中 NT 和 NTS 处理的样本分布较为集中，表明 NT 和 NTS 处理下不同粒径土壤团聚体的微生物群落结构较为相似；ck 和 CTS 处理的样本分布较为分散，则表明 ck 和 CTS 处理下不同粒径土壤团聚体的微生物群落结构差异较大。通过观察不同粒级土壤的微生物发现：不同处理下 >2.000 和 ≤0.053 mm 的土壤样本在 NMDS 图中较为分散，表明这 2 个粒级土壤团聚体的微生物群落结构对不同处理方式的响应较为敏感。

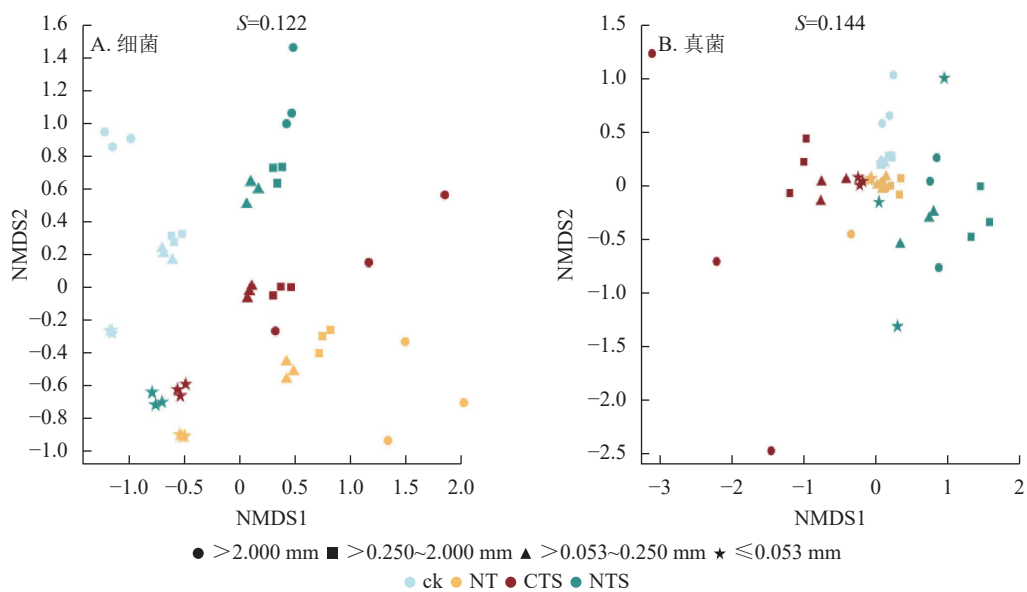
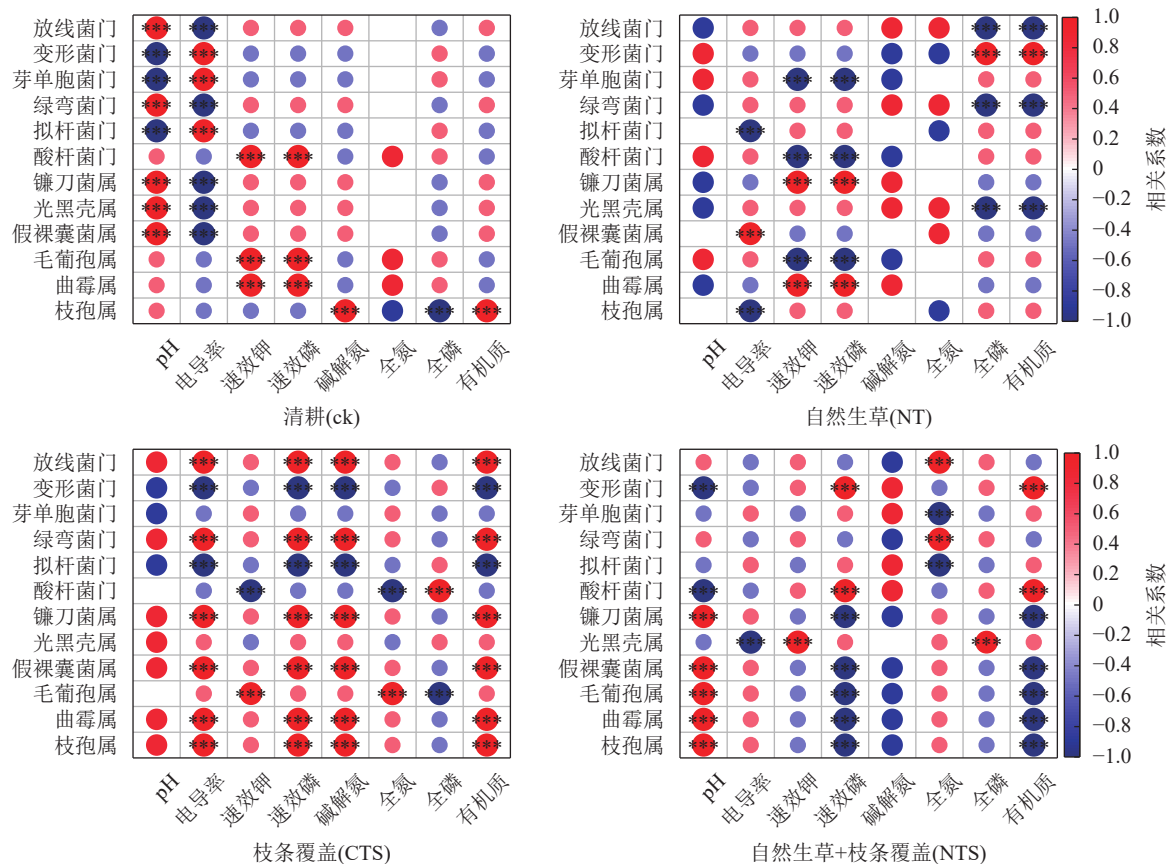


图 3 不同处理下各粒级土壤的 NMDS 分析

Figure 3 NMDS analysis of different aggregates of soil under different treatments

2.4 土壤环境因子与土壤微生物群落结构的相关性

对土壤环境与微生物进行 Spearman 相关性分析 (图 4) 发现: 不同处理下土壤理化指标和土壤微生物的相关性呈现出多样化特征。在 ck 处理下, pH 与放线菌门、绿弯菌门、镰刀菌属、光黑壳属、假裸囊菌属呈极显著正相关 ($P < 0.001$), 而与变形菌门、芽单胞菌门、拟杆菌门呈极显著负相关 ($P < 0.001$); 速效钾和速效磷与毛葡萄属和曲霉属呈极显著正相关 ($P < 0.001$)。在 NT 处理下, 速效钾和速效磷与镰刀菌属、曲霉属呈极显著正相关 ($P < 0.001$), 与芽单胞菌门、酸杆菌门和毛葡萄属呈极显著负相关 ($P < 0.001$); 全磷和有机质与放线菌门、绿弯菌门、光黑壳属呈极显著负相关 ($P < 0.001$), 而与变形菌门呈极显著正相关 ($P < 0.001$)。在 CTS 处理下, 电导率、速效磷、碱解氮和有机质与放线菌门、绿弯菌门、镰刀菌属、假裸囊菌属、曲霉属、枝孢属呈极显著正相关 ($P < 0.001$), 与变形菌门、拟杆菌门呈极显著负相关 ($P < 0.001$)。NTS 处理下, 速效磷与有机质变形菌门、酸杆菌门呈极显著正相关 ($P < 0.001$), 与镰刀菌属、毛葡萄属、假裸囊菌属、曲霉属、枝孢属呈极显著负相关 ($P < 0.001$), 而 pH 与之相反。保护性耕作措施改变了土壤中微生物与理化性质之间的相关性关系, 其中有机质与许多微生物都存在显著相关性。



放线菌门、变形菌门、芽单胞菌门、绿弯菌门、拟杆菌门和酸杆菌门均属于细菌水平相对丰度; 镰刀菌属、光黑壳属、假裸囊菌属、毛葡萄属、曲霉属、枝孢属均属于真菌水平相对丰度。***. $P < 0.001$ 。

图 4 不同处理下酿酒葡萄园土壤理化性质和土壤微生物的 Spearman 相关分析

Figure 4 Spearman correlation analysis of soil physicochemical properties and soil microorganisms in wine vineyards under different treatments

3 讨论

3.1 保护性耕作措施对土壤理化性质的影响

土壤 pH 是影响土壤肥力的一个重要指标, 过低或过高的 pH 会对葡萄生长产生威胁。NT、CTS 和 NTS 处理等保护性耕作措施可以调节土壤 pH 至中性^[29]。本研究表明: NT、CTS 和 NTS 处理在试验前期对土壤 pH 的影响不同, 而在试验末期会不同程度地降低土壤 pH, 其中 NT 处理在试验全程中均使土壤 pH 呈现出降低趋势, 并且效果最为显著。这可能是因为生草或者枝条等植物残体的加入, 改善了土

壤的通气性, 并且植物残体的分解产生了较多的二氧化碳和有机酸, 从而降低了土壤的 pH^[30]。本研究还发现: 酿酒葡萄园土壤 pH 呈现出一定程度的增加趋势, 这与葡萄园土壤 pH 的季节变化有关, 也有可能是夏季宁夏地区降水少, 高温导致蒸发量增加, 使得盐分在表层聚集进而导致土壤 pH 升高^[31]。本研究中出现的 pH 增加趋势, 是因为本试验年度宁夏地区的夏季降雨少, 导致盐分在表层聚集而引起 pH 升高。保护性耕作措施在前期降低程度不够明显, 可能是因为处理的时间不够, 未能充分改变土壤。这与前人的研究一致^[32-33]。本研究显示: 对比 ck, NT、CTS 和 NTS 处理均提高了有效磷、碱解氮、全氮和全磷质量分数。有部分研究指出: 生草能够有效增加土壤速效养分, 但是对全效养分的影响很小^[34-35]。还有部分研究表明: 草种不同对土壤养分的影响也不同^[36], 枝条覆盖可以显著提高土壤氮、磷、钾和有机质质量分数^[37-38]。生草和枝条覆盖通过降低土壤容重、增加土壤孔隙度和水稳性团聚体, 改善土壤的物理性质。这些物理性质的改变会影响土壤中养分的保留和有效性, 同时由于植物残体和根系分泌物的增多, 改变了土壤的 pH 和电导率, 改善了土壤矿质营养的配比。在生长季, 土壤养分有所降低, 这与自然生草前期杂草与树体竞争土壤养分, 造成土壤养分消耗大于积累有关^[39]。有机质是土壤肥力和健康的重要指标, 能够为植物的生长发育提供多种营养, 对土壤耕作措施很敏感。本研究指出: 与 ck 相比, NT、CTS 和 NTS 处理显著增加了 7 和 9 月土壤有机质质量分数。这种变化是多种因素共同作用的结果。首先, 土壤没有经过耕作会减缓土壤有机质的氧化; 其次, 自然生草和枝条覆盖处理下动植物残体数量增多, 增加了土壤微生物数量, 有利于土壤有机质的积累^[40], 提高葡萄果实产量。可见, 自然生草、枝条覆盖和自然生草+枝条覆盖是具有潜力和可持续发展的耕作措施。

3.2 保护性耕作措施对土壤团聚体的影响

土壤团聚体是土壤结构的重要组成部分, 直接影响土壤的通气性、水分保持能力和养分供应能力。本研究表明: 与 ck 相比, NT 和 NTS 处理增加了 $>0.250\sim 2.000$ mm 土壤团聚体质量分数, CTS 处理增加了 >0.250 mm 土壤团聚体质量分数, 并降低了 ≤ 0.053 mm 土壤团聚体质量分数。这一结果与 ELLIOTT^[26] 的研究一致。这是因为 NT 和 CTS 处理既减少了人为对葡萄园土壤扰动的频率和强度, 又增加了有机质的输入, 促进了植物根系和土壤微生物的活动, 使它们的代谢产物增多, 土壤有机胶结物质和载体介质的量增加, 从而促进了大团聚体的形成^[41]。本研究还发现: 在 5 和 9 月, 各处理 >2.000 mm 土壤团聚体质量分数最低, 这与宁夏地区 4 月葡萄出土和成熟时人工以及机械对土壤团聚体的破坏有关。也有研究指出: 人为干扰频率高的旱地和田地土壤稳定性较差, 而受人为扰动较小的林地土壤稳定性较好^[36, 42]。还有多项研究表明: 土壤团聚体的稳定性与平均质量直径和几何平均直径成正比^[43-45]。在 5 和 9 月, NT、CTS 和 NTS 处理显著增加了土壤的平均质量直径、几何平均直径和 >0.250 mm 团聚体百分比, 表明这些保护性耕作措施能够显著提高土壤结构的稳定性。本研究中土壤团聚体稳定性的增强, 主要归因于土壤表层由于自然生草和枝条覆盖而带来的丰富的凋落物和植株根系分布增多。它们为表层土壤提供了大量有机质, 促进了大团聚体的形成, 并且使得团聚体的稳定性相应增强^[46]。

3.3 保护性耕作措施对土壤微生物群落的影响

土壤微生物作为土壤的重要组成部分, 对土壤养分的循环和利用起着推动作用, 是评价土壤养分和土壤微生物环境变化的重要指标^[47]。本研究表明: 保护性耕作措施显著改变了土壤微生物群落结构, 增加了有益菌群 (如变形菌门和酸杆菌门) 的相对丰度。这与 TRIVEDI 等^[48-49] 的研究结果一致。本研究中自然生草可以改变土壤真菌的相对丰度, 以及它们在属水平上的组成, 而且可以从土壤中检测到更高的细菌多样性和丰富度, 这与前人的研究结果一致^[50-51]。这是由于自然生草后根系分泌物与凋落物增多, 为土壤微生物的生长提供了适宜的营养环境, 从而提高了土壤的微生物丰富度和多样性。本研究中, CTS 增加了土壤中变形菌门、芽单胞菌门的相对丰度。变形菌门属于富营养型类群, 参与土壤有机质的分解, 这符合于波等^[52] 的研究结果。变形菌门常富集于有机质高的土壤, 能够反映土壤肥力, 酸杆菌门能够预示土壤磷质量分数和积累消耗情况, 放线菌门可以抑制病原菌并维持土壤微生态平衡。了解土壤微生物和理化性质以及具体功能之间的关联, 可以为精准调控土壤微生物组, 提升生态系统服务提供科学依据。刘思等^[53] 的研究也表明: 葡萄园秸秆和枝条覆盖下的优势菌门为变形菌门、酸杆菌门和放线菌门。本研究中, CTS 处理下土壤细菌的 Chao1 和 Shannon 指数显著高于 ck 处理, 真菌多样性指数则无

显著差异。这可能是因为枝条覆盖腐解之后带来了丰富的有机质和分泌物,进而促进了微生物数量和多样性的变化,而土壤中真菌的数量和种类显著小于细菌,所以环境的改变对真菌群落的影响不大。段鑫垚等^[54]的研究也表明:碎枝段覆盖可增加土壤中的微生物数量。本研究中,NT处理改善土壤微生物组成的效果比CTS处理更显著,可能是因为枝条的腐解率会影响土壤微生物的变化,需要多年的覆盖才会产生更为明显的效果。土壤团聚体的形成依赖于有机质等胶结物质的参与,而微团聚体通过有机质的胶结作用进一步构成大团聚体^[47]。本研究中土壤细菌的丰富度和多样性受 $>0.250\sim 2.000$ mm土壤的影响最大,这可能是因为NT和CTS处理为土壤带来了丰富的有机质,促进了土壤中大团聚体的形成,为微生物的生存提供了保护机制,进而增加了土壤微生物的数量和多样性。

4 结论

NT、CTS和NTS处理能显著影响宁夏贺兰山东麓酿酒葡萄园土壤的理化性质、团聚体质量分数和微生物群落。与ck相比,‘赤霞珠’酿酒葡萄园中NT、CTS和NTS处理均降低了土壤的pH,提高了土壤中磷、氮、有机质质量分数,使土壤团聚体稳定性指标平均质量直径、几何平均直径和 >0.250 mm团聚体百分比显著升高,并且促进了细菌和真菌群落之间的竞争关系,改变了土壤的微生物结构,进而提高了细菌群落的多样性和丰富度。本研究为保护性耕作措施在宁夏贺兰山地区的推广提供了理论依据,并为酿酒葡萄园的可持续发展提供了技术支持。

5 参考文献

- [1] CHEN Ruirui, SENBAYRAM M, BLAGODATSKY S, *et al.* Soil C and N availability determine the priming effect: microbial N mining and stoichiometric decomposition theories[J]. *Global Change Biology*, 2014, **20**(7): 2356–2367. DOI: [10.1111/gcb.12475](https://doi.org/10.1111/gcb.12475).
- [2] OLIVER D P, BRAMLEY R G V, RICHES D, *et al.* Review: soil physical and chemical properties as indicators of soil quality in Australian viticulture[J]. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 2013, **19**(2): 129–139. DOI: [10.1111/ajgw.12016](https://doi.org/10.1111/ajgw.12016).
- [3] DELGADO-BAQUERIZO M, GARCÍA-PALACIOS P, MILLA R, *et al.* Soil characteristics determine soil carbon and nitrogen availability during leaf litter decomposition regardless of litter quality[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2015, **81**: 134–142. DOI: [10.1016/j.soilbio.2014.11.009](https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2014.11.009).
- [4] COONAN E C, KIRKBY C A, KIRKEGAARD J A, *et al.* Microorganisms and nutrient stoichiometry as mediators of soil organic matter dynamics[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2020, **117**(3): 273–298. DOI: [10.1007/s10705-020-10076-8](https://doi.org/10.1007/s10705-020-10076-8).
- [5] DU Zhangliu, REN Tusheng, HU Chunsheng, *et al.* Soil aggregate stability and aggregate-associated carbon under different tillage systems in the North China Plain[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2013, **12**(11): 2114–2123. DOI: [10.1016/S2095-3119\(13\)60428-1](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(13)60428-1).
- [6] 张瑞洁. 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[D]. 泰安: 山东农业大学, 2017. ZHANG Ruijie. *Effects of Hairy Vetch (Vicia villosa) Combining with Natural Grass on the Integrated Soil Fertility in Apple Orchard*[D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2017. DOI: [10.7666/d.D01212412](https://doi.org/10.7666/d.D01212412).
- [7] GOLOSOV V N, COLLINS A L, DOBROVOLSKAYA N G, *et al.* Soil loss on the arable lands of the forest-steppe and steppe zones of European Russia and Siberia during the period of intensive agriculture[J]. *Geoderma*, 2021, **381**: 114678. DOI: [10.1016/j.geoderma.2020.114678](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114678).
- [8] VELOSO M G, ANGERS D A, CHANTIGNY M H, *et al.* Carbon accumulation and aggregation are mediated by fungi in a subtropical soil under conservation agriculture[J]. *Geoderma*, 2020, **363**: 114159. DOI: [10.1016/j.geoderma.2019.114159](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.114159).
- [9] CHEN Yuexing, WEN Xiaoxia, SUN Yulin, *et al.* Mulching practices altered soil bacterial community structure and improved orchard productivity and apple quality after five growing seasons[J]. *Scientia Horticulturae*, 2014, **172**: 248–257. DOI: [10.1016/j.scienta.2014.04.010](https://doi.org/10.1016/j.scienta.2014.04.010).
- [10] DARYANTO S, FU Bojie, WANG Lixin, *et al.* Quantitative synthesis on the ecosystem services of cover crops[J]. *Earth-Science Reviews*, 2018, **185**: 357–373. DOI: [10.1016/j.earscirev.2018.06.013](https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2018.06.013).

- [11] 涂倩, 李媛媛, 周书博, 等. 葡萄废弃枝条资源化利用研究进展及对策[J]. *北方园艺*, 2022(17): 129–136. TU Qian, LI Yuanyuan, ZHOU Shubo, *et al.* The vineyard research progress on abandoned branches resource utilization and tactics[J]. *Northern Horticulture*, 2022(17): 129–136. DOI: 10.11937/bfyy.20221089.
- [12] MARINARI S, MANCINELLI R, BRUNETTI P, *et al.* Soil quality, microbial functions and tomato yield under cover crop mulching in the Mediterranean environment[J]. *Soil and Tillage Research*, 2015, **145**: 20–28. DOI: 10.1016/j.still.2014.08.002.
- [13] LU Fei. How can straw incorporation management impact on soil carbon storage? A meta-analysis[J]. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 2015, **20**(8): 1545–1568. DOI: 10.1007/s11027-014-9564-5.
- [14] POEPLAU C, DON A. Carbon sequestration in agricultural soils *via* cultivation of cover crops—a meta-analysis[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2015, **200**: 33–41. DOI: 10.1016/j.agee.2014.10.024.
- [15] LIU Yang, GAO Maosheng, WU Wei, *et al.* The effects of conservation tillage practices on the soil water-holding capacity of a non-irrigated apple orchard in the Loess Plateau, China[J]. *Soil and Tillage Research*, 2013, **130**: 7–12. DOI: 10.1016/j.still.2013.01.012.
- [16] BASCHE A D, KASPAR T C, ARCHONTOULIS S V, *et al.* Soil water improvements with the long-term use of a winter rye cover crop[J]. *Agricultural Water Management*, 2016, **172**: 40–50. DOI: 10.1016/j.agwat.2016.04.006.
- [17] BALOTA E L, CALEGARI A, NAKATANI A S, *et al.* Benefits of winter cover crops and no-tillage for microbial parameters in a Brazilian Oxisol: a long-term study[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2014, **197**: 31–40. DOI: 10.1016/j.agee.2014.07.010.
- [18] MITCHELL J P, SHRESTHA A, MATHESIUS K, *et al.* Cover cropping and no-tillage improve soil health in an arid irrigated cropping system in California’s San Joaquin Valley, USA[J]. *Soil and Tillage Research*, 2017, **165**: 325–335. DOI: 10.1016/j.still.2016.09.001.
- [19] de OLIVEIRA F É R, de MATOS OLIVEIRA J, Da SILVA XAVIER F A. Changes in soil organic carbon fractions in response to cover crops in an orange orchard[J]. *Revista Brasileira de Ciência Do Solo*, 2016, **40**: S0100-6832016000100504. DOI: 10.1590/18069657rbcS20150105.
- [20] 沈良英, 蒋红明, 黎梅杰, 等. 基于文献计量的果园生草栽培技术研究进展[J]. *中国农业大学学报*, 2023, **28**(2): 74–89. SHEN Liangying, JIANG Hongming, LI Meijie, *et al.* Research progress of cultivation technology for interplanting grass in orchard based on bibliometrics[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2023, **28**(2): 74–89. DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2023.02.007.
- [21] 曹铨, 沈禹颖, 王自奎, 等. 生草对果园土壤理化性状的影响研究进展[J]. *草业学报*, 2016, **25**(8): 180–188. CAO Quan, SHEN Yuying, WANG Zikui, *et al.* Effects of living mulch on soil physical and chemical properties in orchards: a review [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2016, **25**(8): 180–188. DOI: 10.11686/cyxb2015500.
- [22] 李祥, 柯希恒, 孙喜军, 等. 苹果枝条不同还田模式对果园土壤性状及苹果质量的影响[J]. *江苏农业科学*, 2021, **49**(23): 238–242. LI Xiang, KE Xiheng, SUN Xijun, *et al.* Influences of returning patterns of apple branches on orchard soil properties and apple quality[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2021, **49**(23): 238–242. DOI: 10.15889/j.issn.1002-1302.2021.23.041.
- [23] 张茹, 李建平, 彭文栋, 等. 柠条枝条覆盖对宁夏荒漠草原土壤水热及补播牧草生物量的影响[J]. *草业学报*, 2021, **30**(4): 58–67. ZHANG Ru, LI Jianping, PENG Wendong, *et al.* Effects of mulching with *Caragana* (*Caragana intermedia*) branches on soil moisture content and temperature and reseeded forage biomass in desertified grassland in Ningxia Province, China[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2021, **30**(4): 58–67. DOI: 10.11686/cyxb2020172.
- [24] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000. BAO Shidan. *Soil and Agricultural Chemistry Analysis*[M]. 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- [25] 陈立新. 土壤实验实习教程[M]. 哈尔滨: 东北林业大学出版社, 2005. CHEN Lixin. *Soil Experiment Practice Course*[M]. Harbin: Northeast Forestry University, 2005.
- [26] ELLIOTT E T. Aggregate structure and carbon, nitrogen, and phosphorus in native and cultivated soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1986, **50**(3): 627–633. DOI: 10.2136/sssaj1986.03615995005000030017x.
- [27] 范清华, 刘晓君, 李鹏, 等. 植被恢复条件下红壤水-土-养分淋溶特征及归因分析[J]. *浙江农林大学学报*, 2025, **42**(3): 444–456. FAN Qinghua, LIU Xiaojun, LI Peng, *et al.* Characterization and attribution of water-soil-nutrient leaching from

- red soil under vegetation restoration conditions[J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2025, **42**(3): 444–456. DOI: [10.11833/j.issn.2095-0756.20240473](https://doi.org/10.11833/j.issn.2095-0756.20240473).
- [28] SALMINEN H, HUUSKO K, TUKIAINEN H, *et al.* The effects of land use on fine-scale geodiversity: ski resorts as an example[J]. *Science of the Total Environment*, 2025, **988**: 179830. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2025.179830](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.179830).
- [29] 杨娟, 刘占军, 任振强, 等. 贺兰山西坡不同植被类型土壤理化性质和酶活性特征[J]. *浙江农林大学学报*, 2024, **41**(4): 787–796. YANG Juan, LIU Zhanjun, REN Zhenqiang, *et al.* Characteristics of soil physicochemical properties and enzyme activities in different vegetation types on the western slope of Helan Mountain[J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2024, **41**(4): 787–796. DOI: [10.11833/j.issn.2095-0756.20230485](https://doi.org/10.11833/j.issn.2095-0756.20230485).
- [30] 杨露, 毛云飞, 胡艳丽, 等. 生草改善果园土壤肥力和苹果树体营养的效果[J]. *植物营养与肥料学报*, 2020, **26**(2): 325–337. YANG Lu, MAO Yunfei, HU Yanli, *et al.* Effects of orchard grass on soil fertility and apple tree nutrition[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2020, **26**(2): 325–337. DOI: [10.11674/zwyf.19104](https://doi.org/10.11674/zwyf.19104).
- [31] 王芳, 陈浩楠, 赵占宁, 等. 再生水灌溉模式对葡萄园土壤环境、微生物群落结构和葡萄生长的影响[J]. *生态学杂志*, 2023, **42**(9): 2138–2147. WANG Fang, CHEN Haonan, ZHAO Zhanning, *et al.* Effects of reclaimed water irrigation modes on soil environment, microbial community structure, and grape growth in vineyards[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2023, **42**(9): 2138–2147. DOI: [10.13292/j.1000-4890.202309.029](https://doi.org/10.13292/j.1000-4890.202309.029).
- [32] 王波波. 葡萄园行内生草对土壤及植株矿质营养和果实品质的影响研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2021. WANG Bobo. *Effects of Intar-row Cover Crop on Soil and Plant Mineral Nutrition and Fruit Quality in Vineyard*[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2021. DOI: [10.27630/d.cnki.gznky.2021.000771](https://doi.org/10.27630/d.cnki.gznky.2021.000771).
- [33] WANG Yuanji, LIU Li, LUO Yu, *et al.* Mulching practices alter the bacterial-fungal community and network in favor of soil quality in a semiarid orchard system[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **725**: 138527. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2020.138527](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138527).
- [34] 秦秦, 宋科, 孙丽娟, 等. 猕猴桃园行间生草对土壤养分的影响及有效性评价[J]. *果树学报*, 2020, **37**(1): 68–76. QIN Qin, SONG Ke, SUN Lijuan, *et al.* Effect of inter-row sod system on the contents and availability of soil nutrients in a kiwifruit orchard[J]. *Journal of Fruit Science*, 2020, **37**(1): 68–76. DOI: [10.13925/j.cnki.gsxb.20190241](https://doi.org/10.13925/j.cnki.gsxb.20190241).
- [35] 黄素芳, 高素梅, 王振亮, 等. 不同覆盖方式对枣园土壤水分、温度及病害发生的影响[J]. *中国果树*, 2020(6): 70–73. HUANG Sufang, GAO Sumei, WANG Zhenliang, *et al.* Effects of different mulching methods on soil moisture, temperature and disease occurrence in jujube orchard[J]. *China Fruits*, 2020(6): 70–73. DOI: [10.16626/j.cnki.issn1000-8047.2020.06.015](https://doi.org/10.16626/j.cnki.issn1000-8047.2020.06.015).
- [36] 郭茜, 陆扣萍, 胡国涛, 等. 死猪炭和竹炭对菜地土壤理化性质和蔬菜产量的影响[J]. *浙江农林大学学报*, 2017, **34**(2): 244–252. GUO Xi, LU Kouping, HU Guotao, *et al.* Greenhouse soil properties and vegetable yield with dead pig and bamboo biochars[J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2017, **34**(2): 244–252. DOI: [10.11833/j.issn.2095-0756.2017.02.007](https://doi.org/10.11833/j.issn.2095-0756.2017.02.007).
- [37] 郭军成, 王明国, 李欣, 等. 覆盖腐熟和不腐熟林木枝条对宁夏葡萄园沙地土壤水肥的影响[J]. *农业科学研究*, 2019, **40**(3): 14–18. GUO Juncheng, WANG Mingguo, LI Xin, *et al.* Effects of returning forest branches to field on soil water and fertilizer in sandy land of Ningxia vineyard[J]. *Journal of Agricultural Sciences*, 2019, **40**(3): 14–18. DOI: [10.3969/j.issn.1673-0747.2019.03.003](https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-0747.2019.03.003).
- [38] 段鑫垚, 高飞飞, 韩星, 等. 覆盖处理对媚丽葡萄果实品质及土壤理化指标的影响[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2022, **50**(3): 107–114, 124. DUAN Xinyao, GAO Feifei, HAN Xing, *et al.* Effects of mulching treatments on fruit quality of *Vitis vinifera* cv. Meili and physical and chemical indicators of topsoil[J]. *Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition)*, 2022, **50**(3): 107–114, 124. DOI: [10.13207/j.cnki.jnwafu.2022.03.014](https://doi.org/10.13207/j.cnki.jnwafu.2022.03.014).
- [39] 余明杨, 陈燕, 郭凯璐, 等. 自然生草对梨园土壤理化性质及果实品质的影响[J]. *中国果树*, 2024(8): 8–18. YU Mingyang, CHEN Yan, GUO Kailu, *et al.* Effects of natural grass on soil physical and chemical properties and fruit quality in pear orchard[J]. *China Fruits*, 2024(8): 8–18. DOI: [10.16626/j.cnki.issn1000-8047.2024.08.002](https://doi.org/10.16626/j.cnki.issn1000-8047.2024.08.002).
- [40] VERZEAUX J, ALAHMAD A, HABBIB H, *et al.* Cover crops prevent the deleterious effect of nitrogen fertilisation on bacterial diversity by maintaining the carbon content of ploughed soil[J]. *Geoderma*, 2016, **281**: 49–57. DOI: [10.1016/j.geoderma.2016.06.035](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.06.035).
- [41] 付学琴, 杨星鹏, 陈登云, 等. 南丰蜜橘果园生草栽培对土壤团聚体和有机碳特征及果实品质的影响[J]. *园艺学报*, 2020, **47**(10): 1905–1916. FU Xueqin, YANG Xingpeng, CHEN Dengyun, *et al.* Effects of sod culture on soil aggregates, organic carbon characteristic and fruit quality of Nanfeng tangerine orchard[J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2020, **47**(10):

- 1905–1916. DOI: [10.16420/j.issn.0513-353x.2020-0118](https://doi.org/10.16420/j.issn.0513-353x.2020-0118).
- [42] 罗晓虹, 王子芳, 陆畅, 等. 土地利用方式对土壤团聚体稳定性和有机碳含量的影响[J]. *环境科学*, 2019, **40**(8): 3816–3824. LUO Xiaohong, WANG Zifang, LU Chang, *et al.* Effects of land use type on the content and stability of organic carbon in soil aggregates[J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(8): 3816–3824. DOI: [10.13227/j.hjcx.201812140](https://doi.org/10.13227/j.hjcx.201812140).
- [43] 何绍浪, 黄尚书, 钟义军, 等. 耕作深度对红壤坡耕地土壤水稳性团聚体特征的影响[J]. *水土保持研究*, 2019, **26**(6): 127–132. HE Shaolang, HUANG Shangshu, ZHONG Yijun, *et al.* Effects of tillage depth on the characteristics of soil water-stable aggregates in sloping farmland of red soil[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2019, **26**(6): 127–132. DOI: [10.13869/j.cnki.rswc.2019.06.019](https://doi.org/10.13869/j.cnki.rswc.2019.06.019).
- [44] 何季, 向仰州, 张雪娇, 等. 生草栽培对刺梨园土壤团聚体分布及有机碳含量的影响[J]. *山地农业生物学报*, 2020, **39**(4): 74–81. HE Ji, XIANG Yangzhou, ZHANG Xuejiao, *et al.* Effects of grass cultivation on soil aggregate distribution and organic carbon content in *Rosa roxbunghii* orchard[J]. *Journal of Mountain Agriculture and Biology*, 2020, **39**(4): 74–81. DOI: [10.15958/j.cnki.sdnyswxb.2020.04.011](https://doi.org/10.15958/j.cnki.sdnyswxb.2020.04.011).
- [45] 王凯, 那恩航, 张亮, 等. 阜新露天煤矿排土场边坡土壤团聚体稳定性及分形特征[J]. *干旱区研究*, 2021, **38**(2): 402–410. WANG Kai, NA Enhang, ZHANG Liang, *et al.* Soil aggregates stability and fractal features on dump slopes of opencast coal mine in Funxin, China[J]. *Arid Zone Research*, 2021, **38**(2): 402–410. DOI: [10.13866/j.azr.2021.02.11](https://doi.org/10.13866/j.azr.2021.02.11).
- [46] 马瑞萍, 刘雷, 安韶山, 等. 黄土丘陵区不同植被群落土壤团聚体有机碳及其组分的分布[J]. *中国生态农业学报*, 2013, **21**(3): 324–332. MA Ruiping, LIU Lei, AN Shaoshan, *et al.* Soil organic carbon and its fractions in aggregates under different plant communities in the hill-gully region of the Loess Plateau[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2013, **21**(3): 324–332. DOI: [10.3724/SP.J.1011.2013.00324](https://doi.org/10.3724/SP.J.1011.2013.00324).
- [47] 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).
- [48] TRIVEDI P, ANDERSON I C, SINGH B K. Microbial modulators of soil carbon storage: integrating genomic and metabolic knowledge for global prediction[J]. *Trends in Microbiology*, 2013, **21**(12): 641–651. DOI: [10.1016/j.tim.2013.09.005](https://doi.org/10.1016/j.tim.2013.09.005).
- [49] TRIVEDI P, ROCHESTER I J, TRIVEDI C, *et al.* Soil aggregate size mediates the impacts of cropping regimes on soil carbon and microbial communities[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2015, **91**: 169–181. DOI: [10.1016/j.soilbio.2015.08.034](https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2015.08.034).
- [50] 杨金鹏, 牟兰, 仇嘉悦, 等. 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]. *草地学报*, 2025, **33**(2): 419–428. YANG Jinpeng, MU Lan, QIU Jiayue, *et al.* Effects of grass cultivation on soil enzyme activity and microbial community diversity of apple orchards in Dianzhong area of China[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2025, **33**(2): 419–428. DOI: [10.11733/j.issn.1007-0435.2025.02.010](https://doi.org/10.11733/j.issn.1007-0435.2025.02.010).
- [51] NOVARA A, CATANIA V, TOLONE M, *et al.* Cover crop impact on soil organic carbon, nitrogen dynamics and microbial diversity in a Mediterranean semiarid vineyard[J]. *Sustainability*, 2020, **12**(8): 3256. DOI: [10.3390/su12083256](https://doi.org/10.3390/su12083256).
- [52] 于波, 秦嗣军, 吕德国. 自然生草制苹果园土壤微生物、酶活性和养分含量对行间草耕翻还田的响应[J]. *应用生态学报*, 2023, **34**(1): 145–150. YU Bo, QIN Sijun, LÜ Deguo. Responses of soil microorganisms, enzyme activities and nutrient contents to inter-row grass ploughing and returning to the field in a natural sod culture apple orchard[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2023, **34**(1): 145–150. DOI: [10.13287/j.1001-9332.202301.013](https://doi.org/10.13287/j.1001-9332.202301.013).
- [53] 刘思, 徐国前, 张军翔. 葡萄行内覆盖对土壤细菌群落结构的影响[J]. *核农学报*, 2020, **34**(12): 2865–2871. LIU Si, XU Guoqian, ZHANG Junxiang. Effects of soil bacterial community structure in vineyard intra-row mulching[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2020, **34**(12): 2865–2871. DOI: [10.11869/j.issn.100-8551.2020.12.2865](https://doi.org/10.11869/j.issn.100-8551.2020.12.2865).
- [54] 段鑫垚. 不同行内覆盖处理对葡萄园土壤性质和葡萄果实品质的影响研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2021. DUAN Xinyao. *Research on the Influence of Different in-row Mulching Treatments on Soil Properties and Berry Quality in Vineyard*[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2021. DOI: [10.27409/d.cnki.gxbnu.2021.001323](https://doi.org/10.27409/d.cnki.gxbnu.2021.001323).