

杂卤石配方施肥对苹果产质量及土壤典型性状的影响^①

曾凡鹤¹, 谭慧婷¹, 石祥¹, 赵立¹, 朱健龙¹, 刘可忠¹, 范晓晖², 颜冬云^{1*}

(1 青岛大学环境科学与工程学院, 山东青岛 266071; 2 英美资源集团植物营养, 英国约克郡 YO11 3ZB)

摘要: 在控制等量氮、磷、钾的前提下, 在山东即墨开展连续 2 年田间试验, 探究杂卤石配施硫酸钾对苹果生长及土壤质量的影响。结果表明: 与单施硫酸钾(S)相比, 杂卤石配施硫酸钾显著促进苹果生长, 提升土壤质量。其中, 基础施肥期 16% 杂卤石 + 84% 硫酸钾配施(SP)处理产量最高, 显著高于 S 处理($P<0.05$), 两年平均增幅达 24.00%; 与 S 处理相比, 杂卤石配施硫酸钾处理一定程度上提升果实 VC、可溶性固体、花青素、可溶性糖等品质指标含量, 但处理间大多差异不显著($P>0.05$)。与 S 处理相比, 杂卤石配施硫酸钾处理有效缓解土壤酸化, 增强土壤养分供应能力。其中, SP 与 SP1 处理(基础施肥期 16% 杂卤石+84% 硫酸钾肥配施、坐果期 8% 杂卤石 + 92% 硫酸钾配施)土壤 pH 分别平均提升 0.32、0.45 个单位; SP1 处理显著增加土壤交换性钙、镁含量($P<0.05$), 分别平均提高 34.97%、32.10%。与 S 处理相比, SP 处理根区土壤微生物丰富度提高, 群落结构发生改变。其中, Chao1 指数、Shannon 指数分别提高 12.15%、4.04%, 酸杆菌门相对丰度提高 7.53%, 变形菌门相对丰度降低 5.72%。综上, 与单施硫酸钾相比, 杂卤石部分代替硫酸钾对胶东苹果产区果实增产提质、改善土壤环境具有积极意义, 且仅在基础施肥阶段以 16% 的杂卤石代替硫酸钾施用效果较好。

关键词: 杂卤石; 苹果; 产质量; 土壤化学性质; 根区土壤微生物

中图分类号: S661.1 文献标志码: A

Effects of Polyhalite Formula Fertilization on Apple Yield, Quality and Typical Soil Characteristics

ZENG Fanhe¹, TAN Huiting¹, SHI Xiang¹, ZHAO Li¹, ZHU Jianlong¹, LIU Kezhong¹, FAN Xiaohui², YAN Dongyun^{1*}

(1 College of Environmental Science and Engineering, Qingdao University, Qingdao, Shandong 266071, China; 2 Anglo American Plant Nutrition, Yorkshire YO11 3ZB, UK)

Abstract: The effects of potassium sulfate combined with polyhalite on apple growth and soil quality were investigated in a field experiment conducted in Jimo, Shandong Province for two consecutive years under the control of equal amounts of nitrogen, phosphorus and potassium. The results showed that compared with potassium sulfate alone (S), polyhalite combined with potassium sulfate significantly promoted apple growth and soil quality. Among them, 16% polyhalite + 84% potassium sulfate combined treatment at the basic fertilization stage (SP) had the highest yield, which was significantly higher than that of S treatment ($P<0.05$), with an average increase of 24.00% in two years. Compared with S treatment, the contents of VC, soluble solid, anthocyanin, soluble sugar and other quality indexes were increased to a certain extent in polyhalite combined with potassium sulfate treatment, but most of the differences among treatments were not significant ($P>0.05$). Compared with S treatment, polyhalite combined with potassium sulfate treatment effectively alleviated soil acidification and enhanced soil nutrient supply capacity. Among them, SP and SP1 (16% polyhalite + 84% potassium sulfate combined application in fruit setting stage) treatments increased soil pH by 0.32 and 0.45 units on average, respectively. SP1 treatment significantly increased the contents of exchangeable Ca and Mg in soil ($P<0.05$), with an average increase of 34.97% and 32.10%, respectively. Compared with S treatment, SP treatment increased soil microbial richness and changed community structure in root zone. Among them, the Chao1 index and Shannon index increased by 12.15% and 4.04% respectively. The relative abundance of Acidobacteria increased by 7.53%, and that of Proteobacteria

①基金项目: 英美资源集团项目(141000-QINGD-141011-20)与国家自然科学基金项目(31972516)资助。

* 通信作者(yandongyun666@hotmail.com)

作者简介: 曾凡鹤(1998—), 男, 山东济宁人, 硕士研究生, 研究方向为土壤生态与肥料应用。E-mail: zengfanhe2023@163.com

decreased by 5.72%. In conclusion, compared with the single application of potassium sulfate, the partial replacement of potassium sulfate with polyhalite has positive significance for fruit yield, quality and soil environment improvement in Jiaodong apple producing area, and the application of 16% polyhalite instead of potassium sulfate is better in the basic fertilization stage.

Key words: Polyhalite; Apple; Yield and quality; Soil chemistry properties; Root zone soil microorganisms

苹果(*Malus pumila* Mill.)作为世界上广泛种植的一种水果, 果实含有600多种化合物, 可补充人体所需的维生素、矿物质和微量元素, 具有重要的经济价值^[1]。我国苹果种植面积与产量均居世界首位, 现已发展成为带动各地生产、旅游的支柱性农业产业^[2]。因此, 探究苹果种植中科学的施肥模式, 对实现农户增产增收, 促进苹果产业稳定、可持续发展具有重要现实意义。

钾作为苹果生长和发育过程中必不可少的元素之一, 是果实产量形成、品质提高的物质基础^[3], 在实际生产中常通过外源施加硫酸钾等肥料来满足作物的生长需求。传统硫酸钾肥需要经过天然钾盐再加工制得, 给自然环境和农户生产成本均带来一定压力^[4]。同时, 果园生产中长期重视氮、磷、钾大量元素而忽视钙、镁等中微量元素的施肥模式, 引起的土壤酸化板结、作物养分失衡、微生物多样性降低等问题, 直接导致了果实品质下降、产量降低^[5]。随着集约化农业的发展, 为保证作物充足的养分供应, 钾肥需求量不断攀升, 钾肥价格一直波动上涨^[6]。而我国钾盐资源相对匮乏, 每年50%左右的钾肥依赖从加拿大、俄罗斯、白俄罗斯等国家进口, 严重制约了我国农业的安全可持续发展。因此, 优化施肥制度、拓宽钾肥供应渠道成为缓解我国钾肥资源短缺的必要措施。

杂卤石($K_2SO_4 \cdot MgSO_4 \cdot 2CaSO_4 \cdot 2H_2O$)作为一种富含钾、钙、镁、硫元素的天然矿石, 理论上含 K_2O 15.62%、 CaO 18.60%、 MgO 6.69%、 SO_3 53.11%(以

质量分数计)^[4]。1932年Fraps^[7]提出将杂卤石直接用作农业中的钾肥, 并在玉米上进行的肥效试验中发现, 磨细(20目)的杂卤石钾素有效性与传统硫酸钾肥相当。1974年我国学者袁见齐^[8]提出, 在矿石品质较高、开采条件较好的情况下, 杂卤石经过简单的破碎加工处理即可直接作为肥料施用。近年来在玉米^[9]、樱桃^[10]等作物上的研究表明, 杂卤石施用对作物增产提质、土壤环境改善具有积极效果。杂卤石含有较高的钙、硫元素, 单独施用易导致土壤元素过量, 适宜与常规钾肥进行配施, 但不同施肥方式、不同配比导致杂卤石肥效存在一定差异。

基于以上, 本研究以苹果为研究对象, 在我国北方典型种植区开展田间试验, 将杂卤石与传统硫酸钾肥进行一定比例的配施(总钾量一致), 研究不同施肥方式、不同杂卤石配比对苹果产量、品质及土壤微生态环境的影响, 以筛选科学合理的施肥措施, 为指导我国苹果产业高质量发展提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地点及材料

2020年11月—2022年11月在青岛市即墨区店集镇大官庄村苹果园(120°61'E, 36°53'N)进行连续两年的苹果种植试验。该地属暖温带季风大陆型气候, 年平均日照时数2 305.8 h, 年均降水量和气温分别为431.9 mm、13.9 °C。试验期间降水量和气温如图1

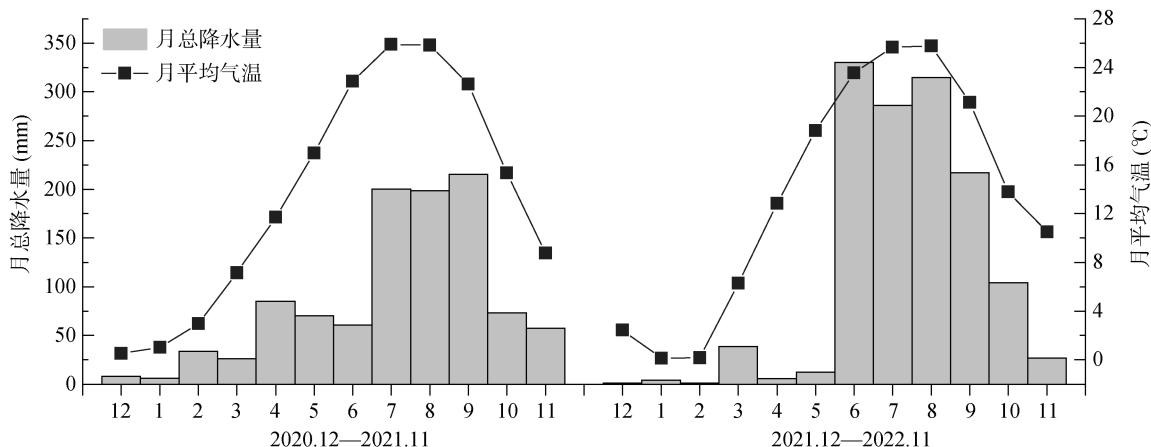


图1 试验期间月平均气温及月总降水量

Fig. 1 Average monthly temperature and total monthly rainfall during the experiment period

所示。果园土壤类型为棕壤，试验开始前，采用网格布点法采集表层(0~30 cm)土壤样品，其基本化学性质如下：pH 6.73，电导率 118.5 $\mu\text{S}/\text{cm}$ ，有机质 15.73 g/kg，碱解氮 77.00 mg/kg，有效磷 63.28 mg/kg，速效钾 212.55 mg/kg，交换性钙 4.45 cmol/kg，交换性镁 0.99 cmol/kg，有效硫 172.69 mg/kg。

供试苹果品种选择占中国苹果种植面积近 70% 的富士系苹果——“烟富 0”红富士，砧木为山定子 (*Malus baccata*)。该品种因产量高，抗病虫害、抗寒能力强，在当地广泛种植，树龄为 7 年，树形为自由纺锤形，株行距 1.2 m × 3.8 m，属于高密度种植果园。

供试氮素来自市售尿素(N 460 g/kg)和磷酸氢二铵(N 170 g/kg, P₂O₅ 400 g/kg)，磷素来自市售磷酸氢二铵(N 170 g/kg, P₂O₅ 400 g/kg)，均由云南云天化股份有限公司提供。钾素来自杂卤石(K₂O 140 g/kg, CaO 170 g/kg, MgO 60 g/kg, SO₃ 480 g/kg，英国约克郡钾肥公司)和市售的硫酸钾(K₂O 520 g/kg, S ≥ 170 g/kg, Cl ≤ 15 g/kg，国投新疆罗布泊钾盐有限责任公司)。

1.2 试验设计

试验共设置 4 个处理，完全随机区组排列，每个处理设置 3 个重复。选取长势基本一致的 4 棵果树作

为 1 个重复小区，共 48 棵果树。除 CK 处理不施钾肥外，其余各处理单季养分施入量分别为 N 300 kg/hm²、P₂O₅ 150 kg/hm²、K₂O 300 kg/hm²。不同处理氮、磷肥施入量及施用方法完全一致，钾肥施用方案如表 1 所示：①CK，无 K₂O；②S，K₂O 全部由市售硫酸钾提供；③SP，基础施肥阶段 16% 的 K₂O 由杂卤石提供，其余 84% 的 K₂O 由市售硫酸钾提供；④SP1，基础施肥阶段 16% 的 K₂O 由杂卤石提供，其余 84% 的 K₂O 由市售硫酸钾提供，同时第二次追肥阶段 8% 的 K₂O 由杂卤石提供，其余 92% 的 K₂O 由市售硫酸钾提供。2020 年 11 月苹果收获、清理园区后进行基础施肥，于次年开花期(4 月)、坐果期(6 月)和果实膨大期(7 月)共计进行 3 次追肥。仅基施和第二次追施(坐果期)阶段进行杂卤石替代施用，其余追肥时期均按照果农施肥习惯以硫酸钾为钾源施用。2021 年 11 月收获后，开展下一年度的重复施肥试验。其中，氮肥每次施入量为总施肥量的 40%、20%、20%、20%；磷肥为 60%、20%、20%、0%；钾肥为 40%、0%、40%、20%。采用土钻在树干东、西两侧各钻取 1 个直径 15 cm、深 30 cm 的洞进行穴施。所有试验处理田间日常管理工作，如灌溉、防虫和除草等，均根据当地常规农艺措施进行。

表 1 各处理施肥方案
Table 1 Potassium fertilization scheme for each treatment

| 处理 | 基础施肥 (K ₂ O, 120 kg/hm ²) | 第一次追肥 (K ₂ O, 0 kg/hm ²) | 第二次追肥 (K ₂ O, 120 kg/hm ²) | 第三次追肥 (K ₂ O, 60 kg/hm ²) |
|-----|---|--|--|---|
| CK | - | - | - | - |
| S | K ₂ SO ₄ | - | K ₂ SO ₄ | K ₂ SO ₄ |
| SP | 16% 杂卤石 + 84% K ₂ SO ₄ | - | K ₂ SO ₄ | K ₂ SO ₄ |
| SP1 | 16% 杂卤石 + 84% K ₂ SO ₄ | - | 8% 杂卤石 + 92% K ₂ SO ₄ | K ₂ SO ₄ |

1.3 果实产量及品质测定

果实测产及样品的采集工作分别于 2021 年 11 月 6 日、2022 年 11 月 15 日进行。测产时，对每棵果树果实进行全部采摘、分级(按果实横径大小进行分类)、称重，并统计单株果树产量、单株果树结果数和单果重。果实品质测定则从每个重复小区中随机选取 20 个苹果进行。其中，果肉硬度采用水果硬度仪(CY-4)测定；果肉可溶性固形物含量采用便携式折光仪(PAL-101)测定；果肉维生素 C(VC)含量参照高俊风^[11]的 2, 6-二氯靛酚滴定法测定；果肉可溶性糖参照 NY/T2742—2015^[12]测定；果肉可滴定酸含量参照张志良和李小方^[13]的 NaOH 中和滴定法测定；果皮花青苷含量参照张志良和李小方^[13]的分光光度法测定^[13]。

1.4 土壤基本化学性质测定

分别于 2021 年 11 月 6 日、2022 年 11 月 15 日采集 0~30 cm 土层土样。采样时，沿果树两侧树冠外围滴水线处(避开施肥区域)设置 2 个采样点，每个重复小区共 8 个采样点，采用根钻法(根钻直径 6 cm)进行取样，采集的土样用四分法保留 1 kg，置于阴凉干燥处风干，研磨过 2 mm 筛网，装瓶备用，根据《土壤农化分析》^[14]进行后续土壤主要化学性质测定。其中，碱解氮采用碱解扩散法测定，有效磷采用 0.05 mol/L HCl + 0.025 mol/L 1/2H₂SO₄ 法测定，速效钾、交换性钙镁采用 1 mol/L 乙酸铵浸提，ICP-OES(电感耦合等离子体原子发射光谱，Avio200，PerkinElmer，美国)测定；土壤 pH($m_{\pm} : V_{\text{水}} = 1 : 2.5$)采用 PHS-3E 型 pH 计测定。

1.5 根区土壤微生物测定

在连续两年施肥试验后,于2022年9月28日,采用多点混合取样法采集苹果根区土壤用于测定根区土壤微生物。采样时,以树干为中心,去除地表落叶及杂草,采用无菌铲挖取东、西两个方向离树干约50 cm、0~30 cm深度的行内土壤^[15]。从挖出的土壤中取出根系,抖落根系上附着的大块颗粒,收集根系上附着的粒状或粉状土壤装入无菌塑封袋,并将4个样点的根区土样均匀混合成1个重复样本,低温(-40 °C)短暂保存,干冰冷藏运输至北京奥维森基因科技有限公司进行DNA提取与测序。

按照PowerSoil DNA分离试剂盒(MoBio Laboratories, Carlsbad, CA)说明步骤提取土壤DNA。采用1%琼脂糖凝胶和NanoDrop 2000分光光度计(ThermoFisher Scientific, Inc., USA)检测基因组DNA的纯度和质量。使用引物338F(5'-ACTCCTACGGGAGGCAGCAG-3')和806R(5'-GGACTACHVGGTWTCTAAT-3')扩增细菌16S rRNA基因的V3~V4区。每个土壤样品在正、反向引物(北京Allwogene公司提供)的5'端添加8位条形码序列。PCR产物使用Agcourt AMPure XP核酸纯化试剂盒(Beckman Coulter, Inc., USA)进行纯化,在北京奥维森科技有限公司 Illumina MiSeq PE300平台(Illumina, Inc., USA)进行深度测序,并使用Illumina Analysis Pipeline Version 2.6进行图像分析、碱基调用和误差估计。

1.6 数据处理与统计分析

测序得到的原始数据(Raw reads)经过拆分、拼接、过滤短序列(<120 bp)、去除嵌合体等处理得到优质序列。使用Vsearch(v2.7.1)软件的Uparse算法,以97%的相似度将合格的reads聚类为操作分类单元

(Operational taxonomic units, OTU)。使用核糖体数据库项目(RDP)分类器工具根据SILVA数据库(Release 128/132https://www.arb-silva.de/)将所有序列划分为不同的分类群。不同处理特有OTU及共有OTU数目以维恩图来表示。基于OTU聚类分析结果,参照Chao1、Observed_species、Shannon、Simpson指数进行根区微生物群落多样性及物种丰富度分析。结合物种分类信息,进行微生物组成结构分析。

所有数据均经单因素方差分析(One-way ANOVA),在P<0.05的水平上使用Duncan多重比较法进行显著性差异检验。使用Excel 2019记录试验数据,并利用SPSS 26.0进行数据分析。通过奥维森云平台(<http://218.2.224.234:8888/>)及Origin 2019完成作图。

2 结果与分析

2.1 杂卤石配施硫酸钾对苹果产量的影响

两年间,不同施钾处理苹果产量差异显著,单株结果数仅在2022年表现出显著性差异,单果重无显著差异(表2)。杂卤石配施硫酸钾处理较不施钾肥处理产量提升明显,SP处理产量最高,平均增产42.02%;其次为SP1处理,平均增产31.44%。与CK处理相比,SP、SP1处理在第二季显著增加苹果单株结果数;常规单施硫酸钾为钾源的S处理两年间单果重均最小。除2021年S处理外,产量和单株结果数均呈正相关关系。2022年苹果产量与单株结果数均显著低于2021年,分别降低35.88%~50.46%、18.66%~53.29%。杂卤石配施硫酸钾可改善苹果产量和单株结果数减少现象,SP处理下降幅度最小,分别降低35.88%、18.66%;其次是SP1处理,分别降低36.25%、19.23%。

表2 不同处理苹果产量及其构成要素
Table 2 Apple yields and their components under different treatments

| 年份 | 处理 | 单果重(g) | 单株结果数 | 产量($10^3 \text{ kg}/\text{hm}^2$) | 增产率(%) | 较上季减产率(%) |
|------|-----|------------------|-----------|-------------------------------------|--------|-----------|
| 2021 | CK | 273.14 ± 38.84 a | 69 ± 10 a | 40.65 ± 0.33 c | — | — |
| | S | 214.47 ± 25.41 a | 96 ± 11 a | 45.21 ± 0.52 b | 11.22 | — |
| | SP | 341.90 ± 62.06 a | 70 ± 13 a | 50.33 ± 2.16 a | 23.81 | — |
| | SP1 | 313.94 ± 50.23 a | 69 ± 10 a | 46.73 ± 0.61 ab | 14.96 | — |
| 2022 | CK | 260.01 ± 19.25 a | 37 ± 1 b | 20.14 ± 1.69 b | — | -50.46 |
| | S | 234.11 ± 7.07 a | 45 ± 3 ab | 23.61 ± 0.88 b | 17.23 | -47.78 |
| | SP | 248.45 ± 26.53 a | 57 ± 6 a | 32.27 ± 1.10 a | 60.23 | -35.88 |
| | SP1 | 236.71 ± 11.86 a | 56 ± 8 a | 29.79 ± 4.41 ab | 47.91 | -41.95 |

注: 同列数据后不同小写字母表示同一年份不同处理之间差异显著(P<0.05),下同。

2.2 杂卤石配施硫酸钾对苹果品质的影响

不同施肥处理显著影响苹果品质(表 3)。各施钾处理均提高了果实 VC、可溶性固形物、可溶性糖含量及糖酸比, 杂卤石配施硫酸钾处理整体优于单施硫酸钾处理。2021 年, 与 CK 处理相比, SP1 处理显著提高果实 VC 含量; 2022 年, 不同处理 VC 含量无显著差异, 但 SP、SP1 处理 VC 含量整体高于 CK、S

处理。两年间, SP 处理可溶性固形物含量、花青苷含量及糖酸比最高, 与 S 处理相比分别平均提高 8.06%、27.75%、24.78%; SP1 处理较 CK 处理果实可溶性糖含量平均显著提高 23.04%; 果实可滴定酸含量在 4.19~6.64 g/kg, 各处理间无显著差异。2022 年, 果实可溶性固形物、可滴定酸均高于 2021 年, 果实花青苷、可溶性糖含量及糖酸比呈现出相反的趋势。

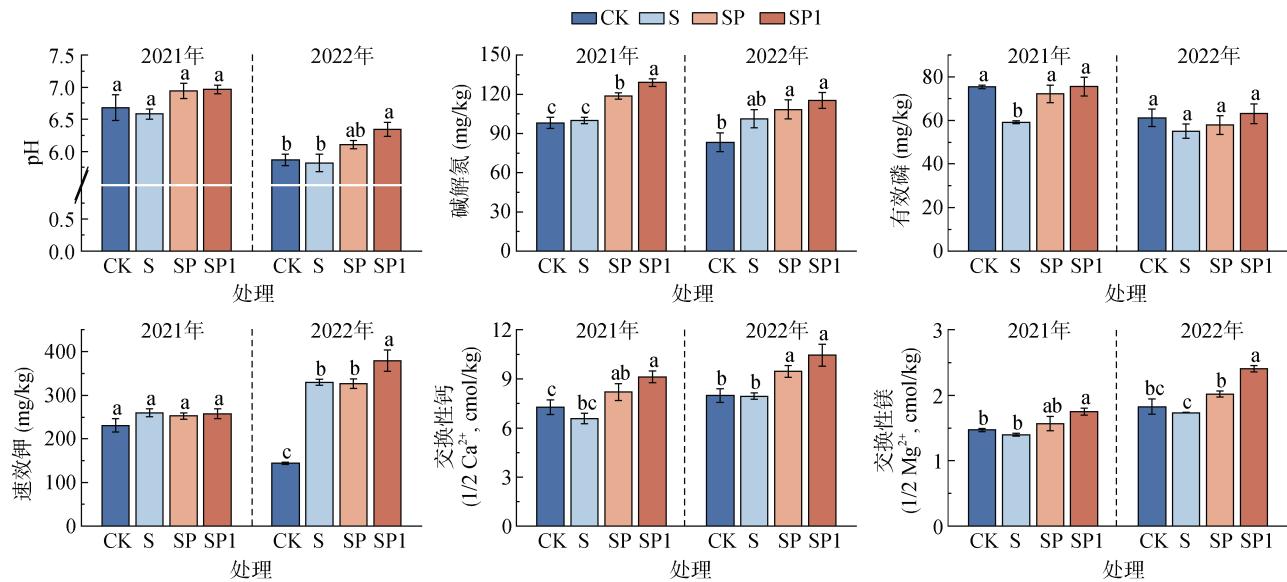
表 3 不同处理苹果品质
Table 3 Apple qualities under different treatments

| 年份 | 处理 | VC(mg/100g) | 可溶性固形物(g/kg) | 花青苷(nmol/cm ²) | 可溶性糖(g/kg) | 可滴定酸(g/kg) | 糖酸比 |
|------|-----|----------------|------------------|----------------------------|------------------|---------------|-----------------|
| 2021 | CK | 1.20 ± 0.08 b | 119.33 ± 2.33 c | 23.99 ± 1.99 c | 98.90 ± 4.18 b | 4.19 ± 0.04 a | 23.67 ± 1.21 b |
| | S | 1.75 ± 0.40 ab | 129.00 ± 1.53 b | 35.34 ± 0.29 b | 113.97 ± 1.62 a | 4.18 ± 0.12 a | 26.73 ± 0.64 ab |
| | SP | 1.81 ± 0.08 ab | 137.67 ± 1.45 a | 44.07 ± 1.05 a | 120.23 ± 3.94 a | 4.38 ± 0.01 a | 28.73 ± 1.56 a |
| | SP1 | 2.28 ± 0.05 a | 136.00 ± 2.08 a | 43.57 ± 3.56 a | 115.37 ± 1.23 a | 4.33 ± 0.26 a | 26.87 ± 1.90 ab |
| 2022 | CK | 1.68 ± 0.14 a | 130.67 ± 4.10 b | 18.68 ± 1.61 b | 87.37 ± 11.30 b | 6.38 ± 0.52 a | 14.12 ± 2.70 b |
| | S | 1.84 ± 0.04 a | 142.00 ± 2.52 ab | 20.00 ± 2.63 ab | 96.60 ± 0.69 ab | 6.64 ± 0.05 a | 14.54 ± 0.21 b |
| | SP | 2.03 ± 0.41 a | 145.53 ± 5.47 a | 26.16 ± 1.98 a | 110.33 ± 4.96 ab | 5.36 ± 0.12 a | 20.58 ± 0.53 a |
| | SP1 | 2.02 ± 0.29 a | 143.33 ± 2.33 ab | 13.68 ± 1.82 b | 113.13 ± 5.59 a | 6.29 ± 0.72 a | 18.28 ± 1.38 ab |

2.3 杂卤石配施硫酸钾对土壤化学性质的影响

不同施肥处理对收获期土壤化学性质影响显著(图 2)。与 2021 年相比, 2022 年土壤 pH 下降 0.74~0.84 个单位。两年间, 单独施硫酸钾肥的 S 处理 pH 最低, 杂卤石配施硫酸钾的 SP1 处理在维持土壤 pH 方面表现最好, 其次是 SP 处理。与 S 处理相比, SP1、SP 处理 pH 分别平均提高 7.41%、5.17%。综合两年来看, 与 S 处理相比, SP、SP1 处理有效提高土壤中

碱解氮、有效磷、交换性钙、交换性镁的含量, 碱解氮、有效磷含量在 2021 年差异显著, 交换性钙、镁含量在 2022 年差异显著, 其中, SP1 处理最为突出, 4 项指标平均分别提高 21.38%、21.31%、34.97%、32.10%。施钾提高了土壤中速效钾含量, 随着施肥年限的增加, 不同处理间土壤 pH、速效钾差异性提高。2022 年, 各施钾处理土壤速效钾含量均显著高于 CK 处理; 在施钾处理中, SP1 处理显著高于 S、SP 处理。



(图中不同小写字母表示同一年份不同处理间差异显著($P<0.05$), 下同)

图 2 不同处理土壤化学性质

Fig. 2 Soil chemical properties under different treatments

2.4 杂卤石配施硫酸钾对根区土壤微生物多样性的影响

不同施肥处理对土壤细菌 α 多样性具有一定影响, 但处理间差异不显著(表 4)。不同处理样本反映群落丰富度的 Chao1 指数、Observed_species 指数在 4 610.40 ~ 5 170.56、2 801.00 ~ 3 089.00; 反映群落多样性的 Shannon 指数、Simpson 指数在 9.52 ~ 9.98、0.99 ~ 1.00。SP 处理 Chao1、Observed_species、Shannon 和 Simpson 指数最高, S 处理最低。与 CK、S 处理相比, SP 处理 Chao1 指数分别提高 5.87%、

12.15%, Shannon 指数分别提高 1.34%、4.04%。结果表明, 杂卤石配施硫酸钾可提高土壤微生物丰富度和多样性, 且仅在基础施肥期以杂卤石代替 16% 的硫酸钾处理效果最佳。

通过维恩图(图 3)分析可以发现, 各处理苹果根区土壤样本共有 OTU 2 229 个, CK、S、SP 和 SP1 处理中的特有 OTU 分别为 743、592、450、869 个。各处理样本微生物特有 OTU 表现出一定差异性, 说明不同施肥方式对根区土壤细菌群落结构产生影响。

表 4 不同处理土壤微生物多样性
Table 4 Soil microbial diversities under different treatments

| 处理 | Chao1 指数 | Observed_species 指数 | Shannon 指数 | Simpson 指数 |
|-----|---------------------|---------------------|---------------|-----------------|
| CK | 4 883.79 ± 137.82 a | 2 913.00 ± 100.30 a | 9.78 ± 0.13 a | 0.997 ± 0.003 a |
| S | 4 610.40 ± 278.15 a | 2 801.00 ± 237.12 a | 9.53 ± 0.34 a | 0.993 ± 0.003 a |
| SP | 5 170.56 ± 117.31 a | 3 089.00 ± 43.30 a | 9.92 ± 0.04 a | 1.00 ± 0.000 a |
| SP1 | 4 932.40 ± 170.22 a | 2 915.00 ± 96.11 a | 9.77 ± 0.15 a | 0.993 ± 0.003 a |

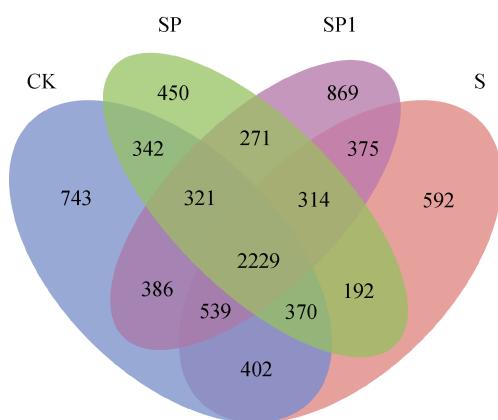


图 3 不同处理 OTU 数量维恩图

Fig. 3 Venn diagram of the numbers of OTUs under different treatments

2.5 杂卤石配施硫酸钾对门、纲水平上根区土壤微生物群落组成的影响

各处理样本在门水平上的优势菌门为变形菌门(Proteobacteria, 38.20% ~ 44.03%)、酸杆菌门(Acidobacteriota, 17.39% ~ 27.34%)、拟杆菌门(Bacteroidota, 5.28% ~ 8.00%)和芽单胞菌门(Gemmatimonadota, 5.35% ~ 7.84%)(图 4A)。不同施肥处理对土壤微生物群落结构影响不同。施钾处理中, 随着杂卤石施用量及施用时期的差异, 土壤变形菌门、拟杆菌门等优势菌门相对丰度出现波动变化。SP1 处理土壤变形菌门、拟杆菌门、芽单胞菌门相对丰度均最高, 酸杆菌门相对丰度最低; SP 处理呈相反趋势。与 CK 处理相比, S 处理变形菌门的相对丰

度提高 15.05%, 酸杆菌门、芽单胞菌门的相对丰度分别降低 21.24%、26.87%。

在纲水平上(图 4B), γ 变形菌纲(Gammaproteobacteria, 19.05% ~ 29.24%)相对丰度最高, 其次是 α 变形菌纲(Alphaproteobacteria, 11.28% ~ 15.51%)、酸杆菌纲(Acidobacteriia, 7.13% ~ 17.17%)。与 CK 处理相比, S 处理 α 变形菌纲、酸杆菌纲相对丰度分别降低 26.14%、36.09%, γ 变形菌纲相对丰度显著提高 52.88%; SP1 处理 γ 变形菌纲相对丰度提高 27.75%, 酸杆菌纲相对丰度显著降低 57.99%。

3 讨论

3.1 不同施肥处理对苹果产量的影响

钾在苹果增产提质中的关键作用被广泛认可^[16], 本研究也印证了类似结论。两年间, 施钾处理均有效增加苹果产量, 主要归因于钾素通过提高果树光合效率、维持离子和水的稳态等生理代谢过程^[17], 增强同化产物的积累和向果实的运输^[18], 进而提高果实产量。杂卤石部分代替硫酸钾的 SP、SP1 处理产量均显著优于单独施用硫酸钾的 S 处理(表 1), 一方面是因为杂卤石为土壤提供的钾、钙、镁、硫等元素使得土壤肥力提高, 促进苹果生长。如外源施钙通过影响植物养分吸收、碳氮代谢等生理过程^[19], 提高产量和果实质品; 镁作为植物叶绿体的重要组成, 又是植物生理代谢过程中多种酶的活化剂, 适当的镁含量能有效提高作物产量^[20]。另一方面是因为前期供应

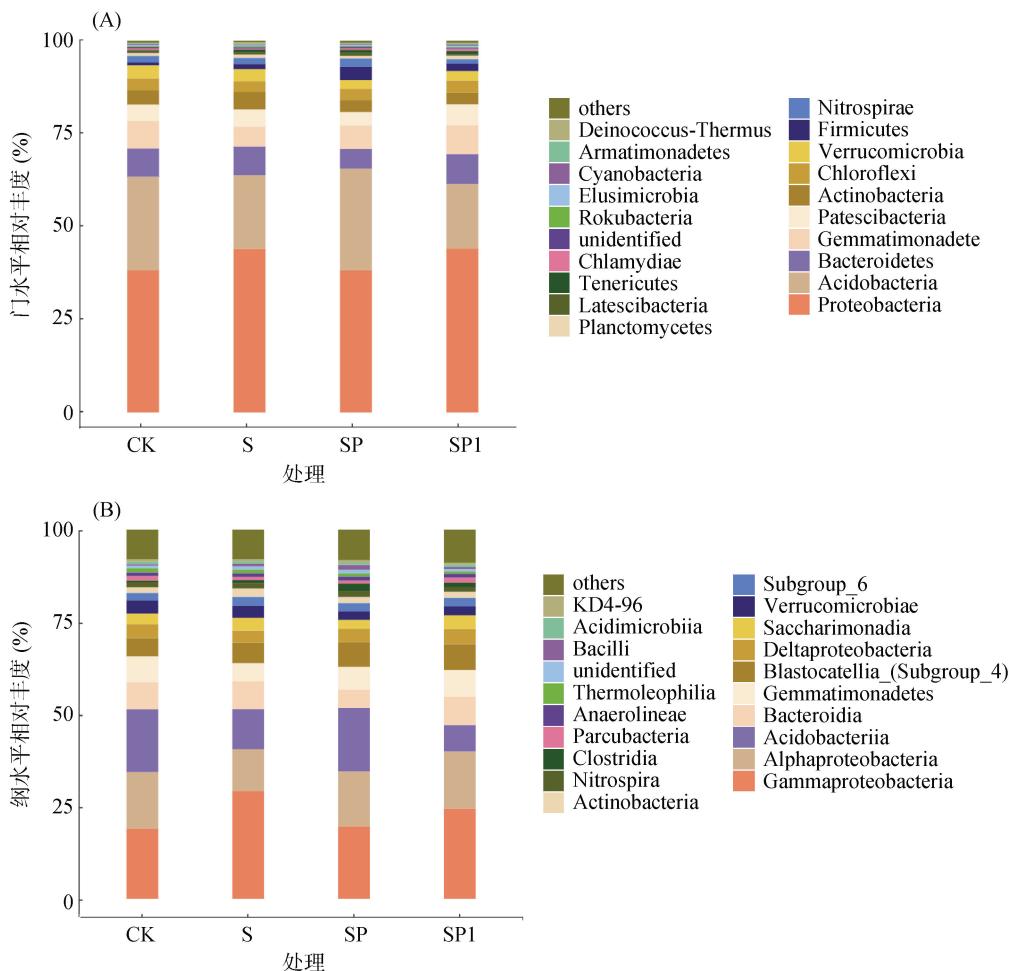


图 4 不同施肥处理根区土壤细菌群落结构
Fig. 4 Soil bacterial colony structures in root zones under different fertilization treatments

充足、中后期可持续的养分供给模式最利于作物生长^[21]。速效钾肥料可及时地为作物提供养分，杂卤石中钙、硫等养分多以缓效态形式存在，两者配施更符合作物的养分吸收规律^[8]。因此，与 SP 处理相比，在果实养分需求量较大的膨大期配施杂卤石的 SP1 处理产量有所降低。同时前人研究表明，以杂卤石为钾源，其肥效与常规速效钾相似甚至优于速效钾，且向植物提供钾、钙、镁和硫方面效率较高^[22]。本研究中，两年间苹果产量变化主要归因于以下两点：①极端天气原因。6月正值苹果由花期向坐果期过渡的关键时期，需要大量的养分以防止生理性落果。2022年6月降水量同比2021年5倍以上(图1)，且存在连续阴雨天气，导致土壤养分随水流失，同时，果实授粉受阻、坏果裂果概率增加，最终影响果树产量^[23]。②果树生长中普遍存在“大小年”现象。植物营养元素年际不均衡分配，引起花芽分化数量的差异，导致两年间产量出现差异^[24]。杂卤石因其自身元素组成和缓释特性，可为作物提供均衡养分，其

配施硫酸钾处理在 2022 年能有效削弱极端降雨及果树“大小年”带来的负面影响。

3.2 不同施肥处理对苹果品质的影响

钾被誉为作物营养中的“品质元素”，合理施钾可显著改善果实品质^[16]。本研究中，施钾处理有效改善苹果 VC、可溶性糖、可溶性固形物等品质指标，这与前人在苹果上的研究结果一致^[16]。钾与植物代谢过程有着密切关系，能有效促进果实中的淀粉向糖转化，进而提高果实中含糖量^[25]。与单独施用硫酸钾处理相比，杂卤石配施硫酸钾处理果实品质显著提升，这与杂卤石中富含钙、镁元素相关。果实中可溶性糖主要以葡萄糖、果糖和蔗糖为主，是植物碳代谢的主要产物^[26]。果实糖分主要来源于叶片光合作用产生的蔗糖，通过韧皮部传输到果实，并在相关酶的作用下分解成葡萄糖、果糖积累^[27]。镁作为叶绿素的中心原子，直接影响到植物光合作用中蔗糖的形成；钙可以通过抑制胞浆 Fru-1, 6-bisPase(果糖-1, 6-二磷酸酶)、激活 SPS(蔗糖-淀粉代谢关键酶磷酸酯

合成酶)活性以及促进 P-蛋白的转化等途径调节碳水化合物的合成^[19]。另有研究证实, 钙镁作为叶面肥喷施后, 果实中磷酸果糖激酶活性下降抑制糖酵解途径, 实现果糖和可溶性糖积累^[28]。杂卤石处理通过促进上述生理反应过程, 果实糖分等有机物质快速积累, 果实品质得到提高。气温、降水等气候条件、果树自身的生理/生化变化及病虫害等因素均会对不同年份果实品质产生影响, 最终导致两年间可溶性固形物、可溶性糖、可滴定酸含量等出现差异。

3.3 不同施肥处理对土壤化学性质的影响

施肥是农业生产中补充养分的重要措施, 被广泛用于提高土壤肥力和作物产量, 直接或间接影响土壤的理化性质^[29]。杂卤石营养元素丰富, 可为作物提供良好的生长环境, 提高土壤可持续生产力^[6]。前人研究表明, 杂卤石与传统肥料配施可有效缓解土壤酸化, 通过增加土壤中钾、钙、镁有效养分含量改善土壤质量^[5]。本研究中, 杂卤石配施硫酸钾的 SP、SP1 处理提高了土壤 pH 及有效养分含量。硫酸钾为生理酸性肥料, 施入后土壤 pH 下降, 杂卤石为中性肥料, 杂卤石配施硫酸钾能缓冲对土壤 pH 的影响^[9]。另外, 杂卤石中富含的钙、镁元素为土壤提供更多的碱性阳离子, 可以取代土壤胶体中 Al^{3+} , 中和土壤溶液中的 H^+ , 从而提高土壤 pH^[30]。同时, 传统水溶性钾肥在土壤中流动性较强, 容易随农田灌溉和雨水淋失迁移; 而杂卤石具有缓释特性, 养分释放缓慢, 可有效提高土壤中交换性钙、镁含量。本研究中, 杂卤石替代硫酸钾处理向土壤提供了钙元素, 土壤钙的“激活效应”活化了土壤氮、磷元素^[31], 使得苹果根区土壤碱解氮、有效磷含量提升。

3.4 不同施肥处理对根区土壤微生物群落结构的影响

土壤微生物群落和多样性调控土壤生态系统的多功能性, 进而影响土壤本身的抵抗力和恢复力, 对维持土壤肥力、提高作物产量至关重要^[32-33]。不同施肥措施通过改变土壤环境和营养状况进而影响土壤微生物的群落组成与多样性^[34]。杂卤石配施硫酸钾处理的微生物多样性指数高于常规钾肥处理, 这是由于土壤微生物更倾向于在营养丰富、空间充裕的环境生存^[6]。杂卤石独特的晶格结构与提供多种矿物养分的特性, 促进土壤团聚体松散状态的保持, 为微生物创造适宜的生存环境。另外, 土壤细菌群落多样性受土壤 pH 的影响^[35]。施用杂卤石可降低土壤酸度, 进而导致土壤微生物结构的变化。研究表明, 变形菌门、放线菌门、酸杆菌门等为果园根际微生物的核心菌

门^[34], 本研究结果与之相似。SP1 处理变形菌门在微生物群落中占主导, 该菌门属典型富营养型微生物, 对养分浓度敏感, 易在养分丰富处聚集。杂卤石配施可增加土壤养分含量, 为变形菌门的生长、繁殖与聚集提供良好物质基础, 推测这是 SP1 处理中变形菌门占主导的因素之一。前人研究多认为, 酸杆菌门细菌丰度与土壤 pH 呈负相关关系^[36], 本研究中, SP1 处理也呈现出类似结果, 但 SP 处理的结果却与之相反, 这主要归因于不同追肥时期杂卤石配施比例不同所致。而且并非所有的酸杆菌都嗜酸, SP 处理增加了酸杆菌门中与 pH 呈正相关的细菌门类。此外, 土壤有机碳含量等因素的差异也会对细菌群落结构产生影响。各种因素综合作用下导致不同处理的酸杆菌门细菌丰度与土壤 pH 关系的差异。

4 结论

苹果生长周期中存在“大小年”现象, 且与施肥措施密切相关。将杂卤石与硫酸钾配施, 苹果产量显著提升, 特别是在面临过量降雨等极端气候条件时, 杂卤石配施硫酸钾有助于实现苹果稳产保收。杂卤石配方施肥在促进作物生长、改善果实品质的同时, 通过增加土壤中有效矿质养分, 缓解土壤酸化程度, 显著优化土壤微生物菌群结构。杂卤石不同配施方式增产提质效果存在差异, 实际生产中建议在施基肥时使用杂卤石代替 16% 的硫酸钾进行施肥, 以实现苹果的增产增收。

参考文献:

- [1] Milošević T, Milošević N, Mladenović J. The influence of organic, organo-mineral and mineral fertilizers on tree growth, yielding, fruit quality and leaf nutrient composition of apple cv. ‘Golden Delicious Reinders’[J]. Scientia Horticulturae, 2022, 297: 110978.
- [2] 陈士更, 张民, 丁方军, 等. 腐植酸土壤调理剂对酸化果园土壤理化性状及苹果产量和品质的影响[J]. 土壤, 2019, 51(1): 83–89.
- [3] 樊红柱, 同延安, 吕世华, 等. 苹果树体钾含量与钾累积量的年周期变化[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2007, 35(5): 169–172.
- [4] 谭慧婷, 孙伟, 崔玉照, 等. 钾矿资源现状与杂卤石的开发利用分析[J]. 无机盐工业, 2022, 54(6): 23–30.
- [5] 伍少福, 韩科峰, 吴良欢. 生物有机肥加专用肥对葡萄园土壤养分、微生物和产量的影响[J]. 园艺学报, 2024, 51(5): 1099–1112.
- [6] Tan H T, Cui Y Z, Liu C, et al. Toward the replacement of conventional fertilizer with polyhalite in Eastern China to improve peanut growth and soil quality[J]. Chemical and

- Biological Technologies in Agriculture, 2022, 9(1): 94.
- [7] Fraps G S. Availability to plants of potash in polyhalite[J]. Texas Agricultural Experiment Station Bulletin, 1932.
- [8] 袁见齐. 国外杂卤石资料简介[J]. 化工矿山技术, 1974, 3(6): 47–58.
- [9] 陈修光. 不同类型钾肥配施杂卤石对玉米生长、根际微环境和土壤质量的影响[D]. 济南: 山东大学, 2023.
- [10] 刘彤彤. 杂卤石不同比例替代钾肥对大樱桃产量、品质及土壤特性的影响[D]. 泰安: 山东农业大学, 2023.
- [11] 高俊凤. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [12] 中华人民共和国农业部. 水果及制品可溶性糖的测定 3, 5-二硝基水杨酸比色法: NY/T 2742—2015[S]. 北京: 中国农业出版社, 2015.
- [13] 张志良, 李小方. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 高等教育出版社, 2016.
- [14] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2009.
- [15] 杨敏, 殷绒, 张国涛, 等. 基于高通量测序技术的香格里拉葡萄酒产区根际微生物多样性研究[J]. 云南农业大学学报(自然科学), 2020, 35(3): 392–400.
- [16] 路永莉, 杨宪龙, 李茹, 等. 不同施肥时期对红富士苹果产量和品质的影响[J]. 应用生态学报, 2015, 26(4): 1179–1185.
- [17] Srivastava A K, Shankar A, Nalini Chandran A K, et al. Emerging concepts of potassium homeostasis in plants[J]. Journal of Experimental Botany, 2020, 71(2): 608–619.
- [18] Tränkner M, Tavakol E, Jákli B. Functioning of potassium and magnesium in photosynthesis, photosynthate translocation and photoprotection[J]. Physiologia Plantarum, 2018, 163(3): 414–431.
- [19] Li T S, Wei Q Q, Sun W, et al. Foliar application of organic sorbitol-chelated calcium promotes peanut (*Arachis hypogaea* L.) growth and changes phyllosphere bacterial community structure[J]. Journal of Soil Science and Plant Nutrition, 2024, 24 (1): 561–571
- [20] 李秉毓. 施镁对苹果 C、N 吸收利用及产量品质的影响 [D]. 泰安: 山东农业大学, 2020.
- [21] Li J Y, Liu Y, Tang Y F, et al. Optimizing fertilizer management based on controlled-release fertilizer to improve yield, quality, and reduce fertilizer application on apples[J]. Journal of Soil Science and Plant Nutrition, 2022, 22(1): 393–405.
- [22] Dal Molin S J, Nascimento C O, Teixeira P C, et al. Polyhalite as a potassium and multinutrient source for plant nutrition[J]. Archives of Agronomy and Soil Science, 2020, 66(5): 667–678.
- [23] 韩文静, 姜会飞, 霍治国, 等. 中国北方苹果连阴雨灾害时空分布特征[J]. 中国农业资源与区划, 2022, 43(6): 81–91.
- [24] Guittot B, Kelner J J, Celton J M, et al. Analysis of transcripts differentially expressed between fruited and deflowered ‘Gala’ adult trees: A contribution to biennial bearing understanding in apple[J]. BMC Plant Biology, 2016, 16: 55.
- [25] 黄显淦, 王勤, 赵天才. 钾素在我国果树优质增产中的作用[J]. 果树科学, 2000, 17(4): 309–313.
- [26] 邹晓霞, 张甜, 王丽丽, 等. 黑曲霉菌肥施用对花生碳氮代谢、产量及籽仁品质的影响[J]. 植物生理学报, 2020, 56(9): 1974–1984.
- [27] 郭志刚. 钾对黄土高原旱塬区元帅苹果糖酸代谢调控机理研究[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2021.
- [28] 彭俊杰, 杜婧加, 马武强, 等. 钙镁叶面肥对‘妃子笑’荔枝果实糖含量及糖代谢酶活性的影响[J]. 热带生物学报, 2024, 15(2): 217–223.
- [29] 王乐. 长期施肥下华北土壤化学肥力指标和作物产量演变及影响因素分析[D]. 北京: 中国农业科学院, 2020.
- [30] 赵丽芳, 黄鹏武, 陈翰, 等. 土壤调理剂与有机肥配施治理红壤茶园土壤酸化与培育地力的效果[J]. 浙江农业科学, 2022, 63(11): 2692–2695.
- [31] 张峻霄, 刘啸威, 井盼, 等. 减氮条件下外源钙对风沙区土壤氮、磷和花生产量的影响[J]. 沈阳农业大学学报, 2023, 54(6): 662–672.
- [32] 孔亚丽, 秦华, 朱春权, 等. 土壤微生物影响土壤健康的作用机制研究进展 [J]. 土壤学报, 2024, 61(2): 331–347.
- [33] 孙伟, 张欢洋, 魏倩倩, 等. 叶面喷施山梨醇螯合钾对花生产量及根际土壤微生物群落的影响[J]. 土壤学报, 2024, 61(4): 1099–1110.
- [34] 郭伟, 周云鹏, 陈美淇, 等. 秸秆与有机无机肥配施对潮土关键微生物及小麦产量的影响. 土壤学报, 2024, 61(4): 1134–1146.
- [35] 崔佩佩, 武爱莲, 王劲松, 等. 不同施肥处理对高粱根际土壤微生物功能多样性的影响[J]. 华北农学报, 2018, 33(5): 195–202.
- [36] 夏群, 刘宇松, 李诚勇, 等. 两种改良剂对酸化苹果园土壤环境及果树生长的影响[J]. 土壤, 2024, 56(1): 112–119.