

# 叶面喷施山梨醇螯合钾对小麦产量、钾利用率及根际土壤微生物群落的影响<sup>①</sup>

韩传浩, 张欢洋, 赵立, 朱健龙, 石祥, 张子琪, 刘可忠, 颜冬云\*

(青岛大学环境与地理科学学院, 山东青岛 266071)

**摘要:** 小麦生育中后期对钾的需求量大, 叶面施钾可有效改善土壤钾素供应不足。本文以小麦(泰农 108)为供试作物, 设置喷施去离子水(CK)、山梨醇(S)、氯化钾(K)、山梨醇混合氯化钾(S+K)、山梨醇螯合氯化钾(SK) 5 个处理, 于 2021—2023 年连续进行两季大田试验, 考察常规施肥基础上叶面不同喷施处理对开花后小麦钾的吸收利用情况。结果表明: ①与 CK 处理相比, 两年间 SK 处理小麦分别增产 34.89%、33.33%, 差异显著; ②SK 处理的小麦根、茎、叶、穗各器官钾含量在成熟期均高于其他 4 个处理, 整株钾积累量分别比 CK、S、K、S+K 处理增加 48.3%、58.1%、34.2%、48.3%; ③与其他 4 个处理相比, SK 处理显著增强小麦灌浆中期、灌浆末期土壤过氧化氢酶与蔗糖酶活性, 以及成熟期土壤脲酶与酸性磷酸酶活性; ④SK 处理提高了小麦根际土壤放线菌门的相对丰度, 相关性分析表明, 小麦产量与放线菌门呈显著正相关。综上, 于小麦开花后叶面喷施山梨醇螯合钾能促进钾素的综合利用, 进而显著提高小麦产量。

**关键词:** 山梨醇螯合钾; 小麦产量; 钾素利用; 土壤酶; 根际微生物

**中图分类号:** S963.9 **文献标志码:** A

## Effects of Sorbitol-chelated Potassium Through Foliar Spraying on Wheat Yield, Potassium Availability, and Rhizosphere Microbiome

HAN Chuanhao, ZHANG Huanyang, ZHAO Li, ZHU Jianlong, SHI Xiang, ZHANG Ziqi, LIU Kezhong, YAN Dongyun\*

(College of Environmental Science and Engineering, Qingdao University, Qingdao, Shandong 266071, China)

**Abstract:** Potassium demand is high in the middle and late stage of wheat growth, and foliar spraying potassium can effectively relieve soil potassium deficiency. In this study, wheat (Tainong 108) was used as the test crop, and two consecutive field experiments were conducted from 2021 to 2023, in which a completely random block design was set up with five treatments: deionized water (CK), sorbitol (S), potassium chloride (K), sorbitol mixed potassium chloride (S+K), and sorbitol-chelated potassium chloride (SK). On the basis of conventional fertilization, potassium uptake and utilization of wheat after flowering under different spraying treatments were investigated. The results showed that: 1) SK significantly increased wheat yield by 34.89% in 2022 and 33.33% in 2023, compared with CK. 2) Potassium contents in roots, stems, leaves, and spikes of wheat under SK were higher than those of other treatments at the maturity stage, resulting in an increase of accumulated potassium in the whole plant by 48.3%, 58.1%, 34.2% and 48.3%, respectively, compared with other treatments. 3) Compared with the other four treatments, SK significantly increased soil peroxidase and sucrase activities in the milk filling stage and the end of milk filling stage, as well as soil urease and acid phosphatase activities at the maturity stage. 4) SK enhanced the relative abundance of the phylum of Actinobacteriota. Correlation analysis indicated a significant positively correlation between wheat yield and bacteria p-Actinobacteriota. In conclusion, foliar spraying sorbitol-chelated potassium after wheat flowering can significantly increase wheat yield by promoting the comprehensive availability of potassium.

**Key words:** Sorbate-chelated potassium; Wheat yields; Potassium utilization; Soil enzymes; Rhizosphere microorganisms

①基金项目: 国家自然科学基金项目(31972516)和山东省重点研发计划项目(2017GNC11116)资助。

\* 通信作者(yandongyun666@hotmail.com)

作者简介: 韩传浩(1998—), 男, 山东济宁人, 硕士研究生, 主要从事新型肥料与土壤环境化学研究。E-mail: hanchuanhao11@163.com

国家统计局发布数据显示, 2021—2023 年我国小麦年均产量分别为 5 692.35、5 766.3、5 788.05 kg/hm<sup>2</sup>, 同时期小麦进口量占国内总产量的 7.5%、7.74%、8.86%。钾是小麦生长所需的大量元素之一, 在多种生命活动中起重要作用。钾能促进光合作用以及碳氮代谢<sup>[1]</sup>, 增强植株的呼吸作用, 改善能量代谢<sup>[2]</sup>, 延缓植株衰老; 钾可以作为多种酶的活化剂, 没有其他离子可以代替其作用<sup>[3]</sup>。我国约 1/3 的耕地缺钾, 多数农田的钾素收支处于负平衡的状态<sup>[4]</sup>, 增施钾肥已是现代农业中必不可少的措施。我国优质钾矿资源匮乏, 自 2021 年连续 3 年氯化钾进口量分别占总消费量的 52.2%、51.6%、68.1%, 这也导致生产成本增加。如何进一步提高钾的利用效率关系到我国钾肥应用的战略安全, 也是促进小麦生产可持续发展的必然要求<sup>[5-6]</sup>。

相比生育前期, 小麦在生育后期需要更多的钾作为补充<sup>[3]</sup>。而与根施相比, 叶面喷施是土壤施肥的有效补充, 其用量少、见效快、对环境友好, 可以选择作物特定生育期内进行定向、定量的施肥补充<sup>[7]</sup>。钾主要以自由离子态供植株吸收利用, 在土壤中容易固定或流失, 在植株体内流动性较好, 螯合态钾在植株体内的流动性或者到达需求部位的效率更高<sup>[8]</sup>。山梨醇作为光合作用的初产物, 本身具有润湿与生物刺激素作用, 携带矿质养分在植株体内迁移转化的能力较强<sup>[9-10]</sup>。因此, 本文采用实验室自行研制的山梨醇螯合钾, 通过小麦生育后期的叶面喷施试验, 考察其对小麦不同器官钾含量以及土壤酶活性、根区土壤微生物丰富度和种群的影响, 并运用统计方法分析上述指标与小麦产量的相互关系, 为促进小麦增产提质提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况及试验设计

试验于 2021 年 10 月—2023 年 6 月在山东省青岛市即墨区后花园村(36°35'20"N, 120°31'08"E)试验基地进行。小麦整个生育期内试验区降水量与平均气温如图 1 所示。该地总体为山后平原, 属温带半湿润季风气候。作物一年两季, 小麦与玉米轮作。供试小麦品种为泰农 108, 分别于 2021 年 10 月 4 日、2022 年 10 月 2 日播种, 播种前一次性施入氮磷钾掺混肥料(19-19-19, 美盛)750 kg/hm<sup>2</sup>, 分别于小麦始花期、灌浆前期、灌浆中期进行叶面喷施, 2022 年 6 月 8 日、2023 年 6 月 10 日测产收获。供试土壤基本理化性质如表 1 所示。

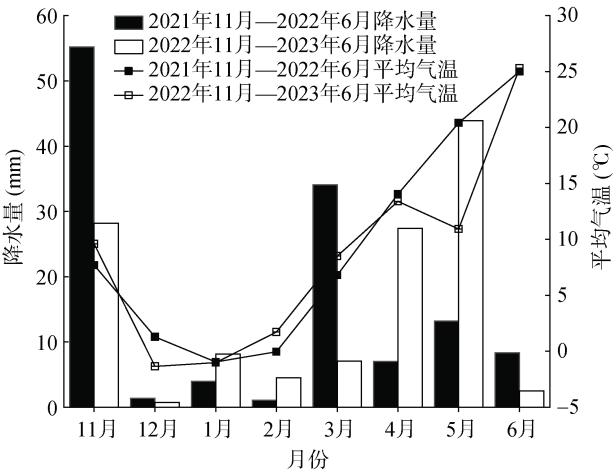


图 1 2021 年 11 月—2022 年 6 月以及 2022 年 11 月—2023 年 6 月试验地降水量与平均气温

Fig. 1 Precipitations and average temperatures in test site from November 2021 to June 2022 and from November 2022 to June 2023

表 1 供试土壤基本理化性质					
Table 1 Basic physicochemical properties of tested soil					
年份	pH	EC (μS/cm)	速效钾 (mg/kg)	有效磷 (mg/kg)	碱解氮 (mg/kg)
2022	6.56	72.10	151.60	73.50	102.80
2023	6.44	67.70	148.22	68.07	119.60

采用随机区组设计, 共设置 5 个处理: 喷施去离子水(CK)、山梨醇(S)、氯化钾(K)、山梨醇混合氯化钾(S+K)、山梨醇螯合氯化钾(SK)。每个处理设 3 个小区作为重复, 共 15 个小区, 每个小区面积 30 m<sup>2</sup>(5 m × 6 m), 处理间留有 1.5 m 保护行。K、S+K、SK 3 个处理喷施钾含量一致(以 K<sup>+</sup> 计), 喷施浓度 9 g/L; S、S+K、SK 3 个处理山梨醇用量一致, 均为 21 g/L。小麦开花期开始喷施, 共喷施 3 次, 每次间隔 5 ~ 10 d, 喷施量为 750 L/hm<sup>2</sup>。所有喷施处理均在晴朗无风或微风(风力二级以下)的上午 8:00—10:00 进行。该地块无水源, 病虫害等按照当地田间常规管理进行。

1.2 植株、土壤样品采集和测定

2023 年分别在灌浆前期、灌浆中期、灌浆末期和成熟期进行整株小麦样品采集, 每个处理取有代表性 15 株小麦带回实验室, 根、茎、叶、穗洗净进行剪切分离, 置于烘箱 105 °C 杀青 30 min, 45 °C 烘至恒重, 保存备用。各时期取样同时抖落根际附着不紧密的土壤, 剩余土壤抖落至密封袋中, 放入带有冰盒的车载冰箱, 后置于 -40 °C 保存, 用于土壤酶的测定。成熟期测产: 避开小区边界区域, 在靠近中心的同一位置按照“一米双行”的取样方法进行取样, 重复 3 次; 装入 80 目网兜做好标记带回实验室, 自然晾干, 称重记产。

小麦各部位钾含量采用  $\text{HNO}_3\text{-H}_2\text{O}_2$  微波消解仪 (Touchwin 2.0, 奥普乐仪器有限公司, 中国) 煮消, 电感耦合等离子体原子发射光谱法 (ICP-OES, Avio 200, PerkinElmer, Massachusetts, USA) 测定。土壤过氧化氢酶、蔗糖酶、脲酶、酸性磷酸酶活性分别采用高锰酸钾滴定法、3,5-二硝基水杨酸比色法、苯酚钠-次氯酸钠比色法、酸性磷酸酶试剂盒 (北京盒子生物科技有限公司) 进行测定。

### 1.3 根际土壤微生物高通量测序

收获时避开边界区域, 随机选取 3 株小麦, 整株拔出, 去除大颗粒土壤后继续抖动, 将剩余附着紧密土壤的根系置于装有 15 mL 无菌水的离心管中, 轻轻抖动收集根际土 (距离根系周围 0~2 mm), 立即装入带有冰盒的车载冰箱, 同样步骤重复 3 次即为一个小区样本。将样品运至实验室后置于  $-40^\circ\text{C}$  冰箱暂存, 加干冰后保存寄送至奥维森基因科技有限公司进行微生物测序。采用 16S rDNA 高通量测序方法进行土壤微生物群落结构分析。OMEGA 土壤试剂盒对所采样本进行 DNA 提取, 通过 Nanodrop 2000 分光光度计和 1% 琼脂糖凝胶电泳检测其质量及完整性。利用引物 338F: ACTCCTACGGGAGGCAGCAG 及 806R: GGACTACHVGGGTWTCTAAT, 对土壤细菌 16S rDNA 基因 V3~V4 区进行 PCR 扩增。基于平台 Illumina Miseq 进行 PE300 测序。

### 1.4 数据处理及分析

钾素积累量 ( $\text{mg}/\text{株}$ ) = 植株各器官干物质质量  $\times$  植株各器官钾素含量

分别利用 Excel 2019 记录试验数据, SPSS 26.0 进行数据分析, Origin 2021 进行绘图。分别通过 Circos-0.67-7 绘制 Circos 样本与物种关系图, R 3.3.1 进行主坐标分析 (PCA)、相关性热图统计分析和作图, 物种差异分析 (LEfSe) 进行多级物种差异判别。

## 2 结果与分析

### 2.1 叶面喷施对小麦产量及产量构成要素的影响

叶面喷施山梨醇螯合钾增产效果显著, 两年数据重现性良好 (表 2)。2022 年, 与 CK、S、K、S+K 相比, SK 处理产量分别提高 34.89%、18.61%、35.48%、27.45%, 差异显著; 产量构成要素千粒重与穗粒数均存在差异性。2023 年, 与 CK、S、K、S+K 相比, SK 处理产量分别提高 33.33%、29.48%、13.99%、10.07%; 籽粒千粒重有着相似的规律, 与 CK 处理相比, SK 处理千粒重提高 10.6%, 差异显著; 各处理间穗粒数差异不显著。受年际变化的影响, 2023 年

产量比 2022 年平均降低 49.14%。主要客观因素为该种植地块无水源, 2023 年小麦返青期缺少降雨, 基本没有形成有效分蘖; 而灌浆期 4—5 月降雨量较 2022 年同期又明显增多, 且环境温度偏低 (图 1)。

表 2 不同施肥处理对小麦产量及其构成要素的影响  
Table 2 Effects of different fertilization treatments on wheat yield and component factors

年份	处理	产量 ( $10^3 \text{ kg}/\text{hm}^2$ )	千粒重 (g)	穗粒数 (pcs)
2022	CK	$6.85 \pm 0.79 \text{ b}$	$40.49 \pm 1.84 \text{ b}$	$29.59 \pm 3.38 \text{ b}$
	S	$7.79 \pm 0.83 \text{ b}$	$42.29 \pm 0.38 \text{ ab}$	$33.35 \pm 0.80 \text{ a}$
	K	$6.82 \pm 1.01 \text{ b}$	$42.36 \pm 2.03 \text{ ab}$	$30.76 \pm 2.19 \text{ ab}$
	S+K	$7.25 \pm 0.44 \text{ b}$	$40.53 \pm 1.23 \text{ b}$	$32.01 \pm 2.04 \text{ ab}$
	SK	$9.24 \pm 1.05 \text{ a}$	$44.39 \pm 1.42 \text{ a}$	$33.19 \pm 1.30 \text{ a}$
2023	CK	$3.36 \pm 0.15 \text{ c}$	$44.95 \pm 0.65 \text{ c}$	$34.19 \pm 3.20 \text{ a}$
	S	$3.46 \pm 0.28 \text{ c}$	$46.68 \pm 1.34 \text{ b}$	$32.41 \pm 1.86 \text{ a}$
	K	$3.93 \pm 0.13 \text{ b}$	$46.97 \pm 1.42 \text{ b}$	$33.16 \pm 3.75 \text{ a}$
	S+K	$4.07 \pm 0.27 \text{ b}$	$47.99 \pm 0.69 \text{ b}$	$33.01 \pm 3.42 \text{ a}$
	SK	$4.48 \pm 0.23 \text{ a}$	$49.71 \pm 0.99 \text{ a}$	$34.25 \pm 2.60 \text{ a}$

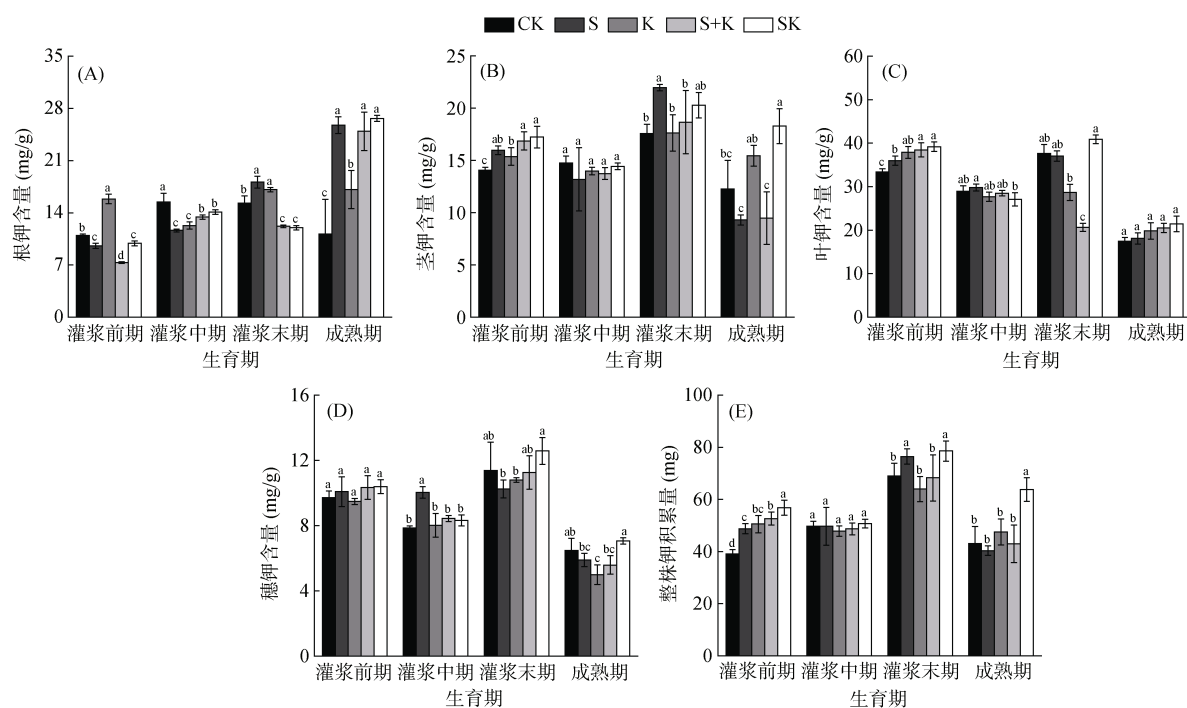
注: 同列数据小写字母不同表示同一年份不同处理间差异显著 ( $P < 0.05$ ), 下同。

### 2.2 不同生育期小麦各器官钾含量动态变化

不同喷施处理显著影响不同生育时期小麦各器官钾含量与整株钾积累量 (图 2)。S、S+K、SK 处理根部钾含量在成熟期达到最高值, 分别为 25.76、24.92、26.67  $\text{mg}/\text{g}$ 。SK 处理与 CK 处理相比在灌浆前期、成熟期茎钾含量均显著增加, 分别为灌浆前期增加 22.46%, 成熟期增加 49.10%。灌浆前期、成熟期叶钾含量均表现为  $\text{SK} > \text{S} + \text{K} > \text{K} > \text{S} > \text{CK}$ ; 与 CK、S 处理相比, SK 处理灌浆前期叶钾含量分别显著增加 17.45%、8.92%。SK 处理麦穗钾含量在灌浆末期显著高于 S 处理, 在成熟期显著高于 K 处理。成熟期, SK 处理植株的根、茎、叶、穗的钾含量均高于其他处理, 其中根、茎两部位与 CK 处理间差异达显著水平, 说明叶面喷施山梨醇螯合钾可以促进成熟期小麦植株对钾的吸收。整株钾积累方面, 除灌浆中期处理间差异不显著, 其余 3 个时期 SK 处理均显著高于 CK、S+K 处理, 说明螯合态钾更有利于小麦植株生育期对钾的吸收运移。

### 2.3 小麦不同生育期土壤酶活性动态变化

不同喷施处理显著影响小麦植株各生育期土壤酶活性 (图 3)。小麦灌浆中期、灌浆末期、成熟期各处理土壤过氧化氢酶活性差异显著, 并且均为 SK 处理活性最高, 较其他处理分别提高 14.2%~34.2%、6.6%~20.2%、17.3%~60.3%。SK 处理土壤蔗糖酶活性在小麦灌浆中期与灌浆末期显著高于其他处理,



(图中小写字母不同表示同一生育期不同处理差异显著( $P < 0.05$ ); 下同)

图2 不同施肥处理对小麦各生育期根、茎、叶、穗钾含量以及整株钾积累量的影响

Fig. 2 Effects of different fertilization treatments on potassium contents in roots, stems, leaves, ears, and potassium accumulation in the whole plant of wheat in various stages

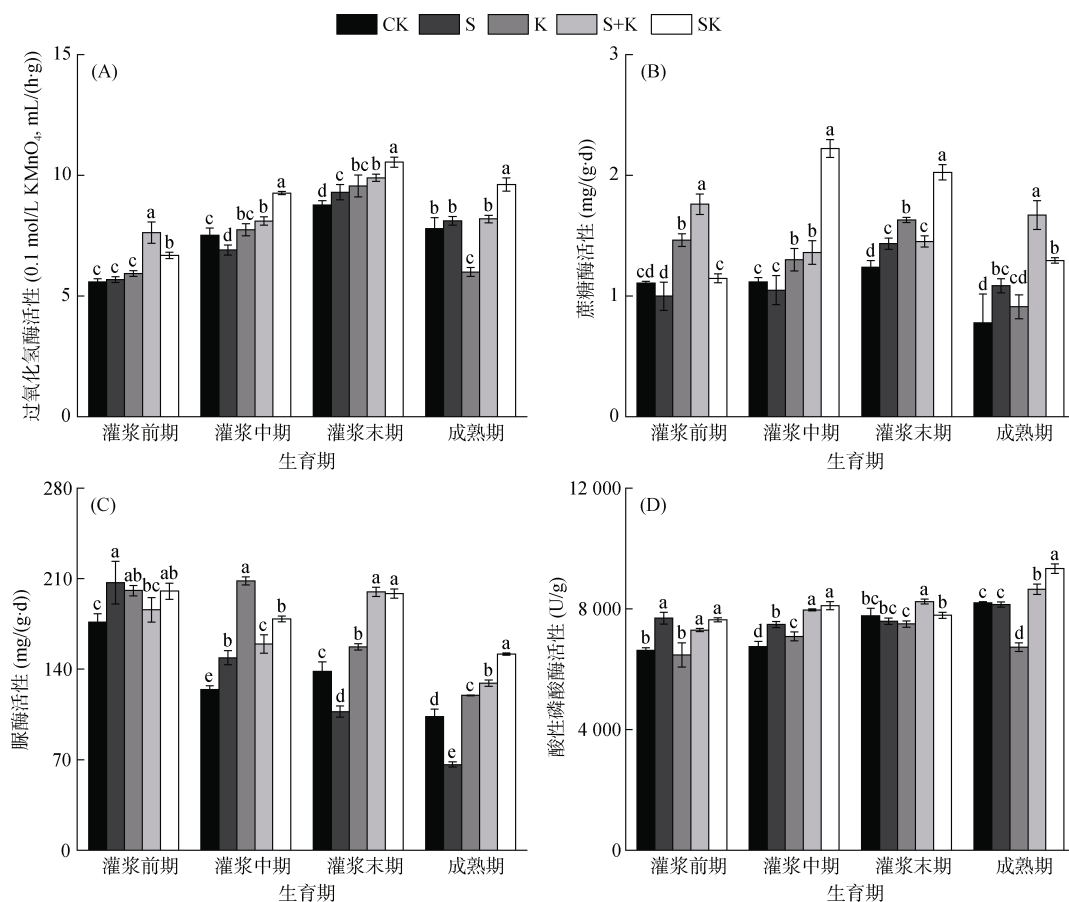


图3 不同施肥处理对小麦各生育期土壤过氧化氢酶、蔗糖酶、脲酶、酸性磷酸酶活性的影响

Fig. 3 Effects of different fertilization treatments on soil catalase, sucrase, urease, and acid phosphatase activities of wheat in various stages

与 S+K 处理相比,分别提高 63.4%、39.4%;小麦灌浆前期和成熟期 S+K 处理土壤蔗糖酶活性最高,比 SK 处理显著提高 53.5%、29.0%。SK 处理在小麦成熟期土壤脲酶活性显著高于 CK、S、K、S+K 处理,分别提高 46.8%、129.0%、26.6%、17.4%;小麦灌浆末期, S+K 与 SK 处理间脲酶活性差异不显著,但与 CK 相比分别显著提高 44.5%、43.5%。SK 处理在小麦成熟期酸性磷酸酶活性也显著高于其他处理,与 CK、S、K、S+K 处理相比,分别提高 13.8%、14.6%、38.7%、7.9%。

## 2.4 叶面喷施对根际土壤微生物群落的影响

### 2.4.1 根际土壤微生物群落多样性

微生物群落组成及丰度是评价土壤质量的重要指标。本文在细菌门水平上统计分析样品的物种相对丰度,并将相对丰度<1%的物种归为其他类(others)。门水平上土壤细菌物种组成情况如图 4A 所示,共有 20 个细菌门被检出。相对丰度较高的前 5 类细菌为放线菌门

(Actinobacteriota)、变形菌门(Proteobacteria)、拟杆菌门(Bacteroidota)、酸杆菌门(Patescibacteria)、酸杆菌门(Acidobacteriota)。放线菌门在 CK、S、K、S+K、SK 处理中的相对丰度(图 4B)分别为 29.7%、34.1%、32.0%、39.2%、41.2%,其中 SK 处理中相对丰度显著高于 CK 处理( $P<0.05$ ),说明叶面喷施山梨醇螯合钾能够显著改变根际土壤微生物放线菌门群落组成。基于布雷-柯蒂斯距离算法(Bray-Curtis)的主坐标分析(PCoA)研究土壤样本门水平上细菌群落之间的差异性(图 4C),结果表明,第一与第二坐标轴共解释 67.37% 样本间的差异性,其中第一坐标轴揭示了 46.90% 的差异,第二坐标轴揭示了 20.47% 的差异。S+K 处理与 SK 处理在 4 个象限中的分布较为接近,说明样本间差异性较小。

### 2.4.2 根际土壤微生物差异物种分析

物种差异分析(LEfSe)与线性判别分析(LDA>3)基于对物种差

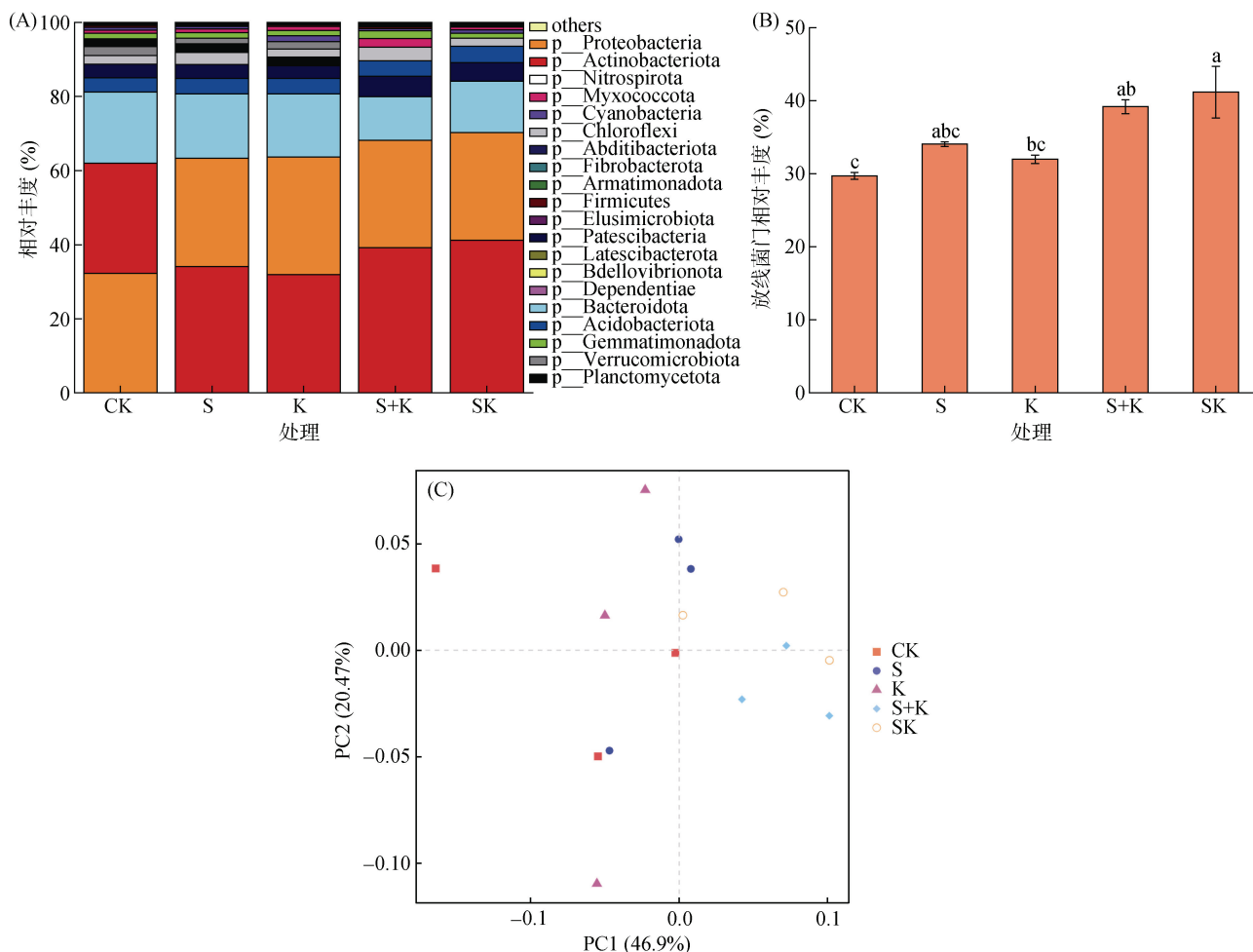


图 4 不同施肥处理下小麦根际土壤细菌门水平优势物种相对丰度(A)、放线菌门的显著性分析(B)及根际土壤细菌群落主坐标分析(C)

Fig. 4 Relative abundance of dominant species in wheat rhizosphere at bacterial phylum level (A), significance analysis of Actinobacteria (B), and principal coordinate analysis of soil bacterial communities under different fertilization treatments (C)



异检验进而分析不同处理间富集的差异物种。从图 5A 可以看出, S、K、S+K、SK 处理的差异物种主要分布在纲、目、科水平上。其中, CK、S、K 和 SK 处理分别有 7、2、5、4 个显著差异的菌种, 而 S+K 处理没有显著差异的菌种。线性判别分析结果展示了同组中丰度有显著差异的物种以及对其组间差异效果影响程度, LDA 值越大, 表示该物种丰度对差异的贡献度越大。LDA 分析结果表明(图 5B), CK、S、K、S+K、SK 处理分别有 9、3、9、1、6

个富集物种。阈值大于 3.0 的差异物种主要来自放线菌门(Actinobacteriota)、绿弯菌门(Chloroflexi)、浮霉菌门(Planctomycetes)、变形菌门(Proteobacteria)、厚壁菌门(Firmicutes)、疣微菌门(Verrucomicrobiota)。结果表明, CK 与 K 处理富集物种相同, 但 K 处理多数物种相对丰度小于 1%, 表明叶面喷施对富集物种丰度影响较小。S+K 处理放线菌门(Actinobacteriota) LDA 值最高, 表明该物种显著影响根际土壤微生物组间差异程度。

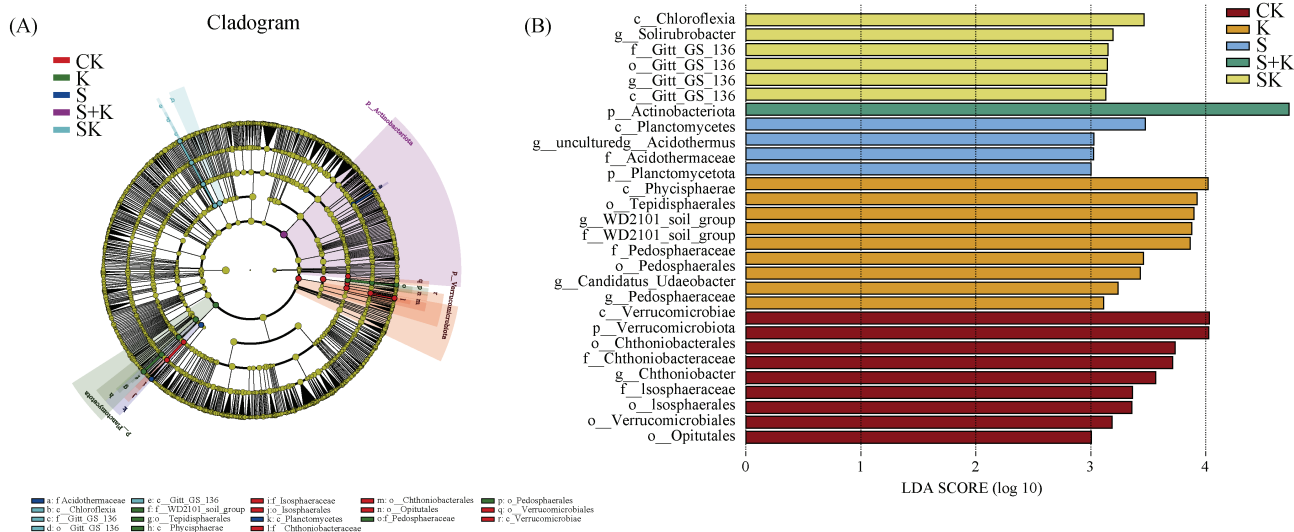


图 5 不同施肥处理下小麦根际微生物基于 LEfSe 分析的进化分支图(A)及 LDA 分布柱状图(B)

Fig. 5 Evolutionary branching diagram (A) and LDA distribution histogram (B) of LEfSe analysis of wheat rhizosphere soil microorganisms under different fertilization treatments

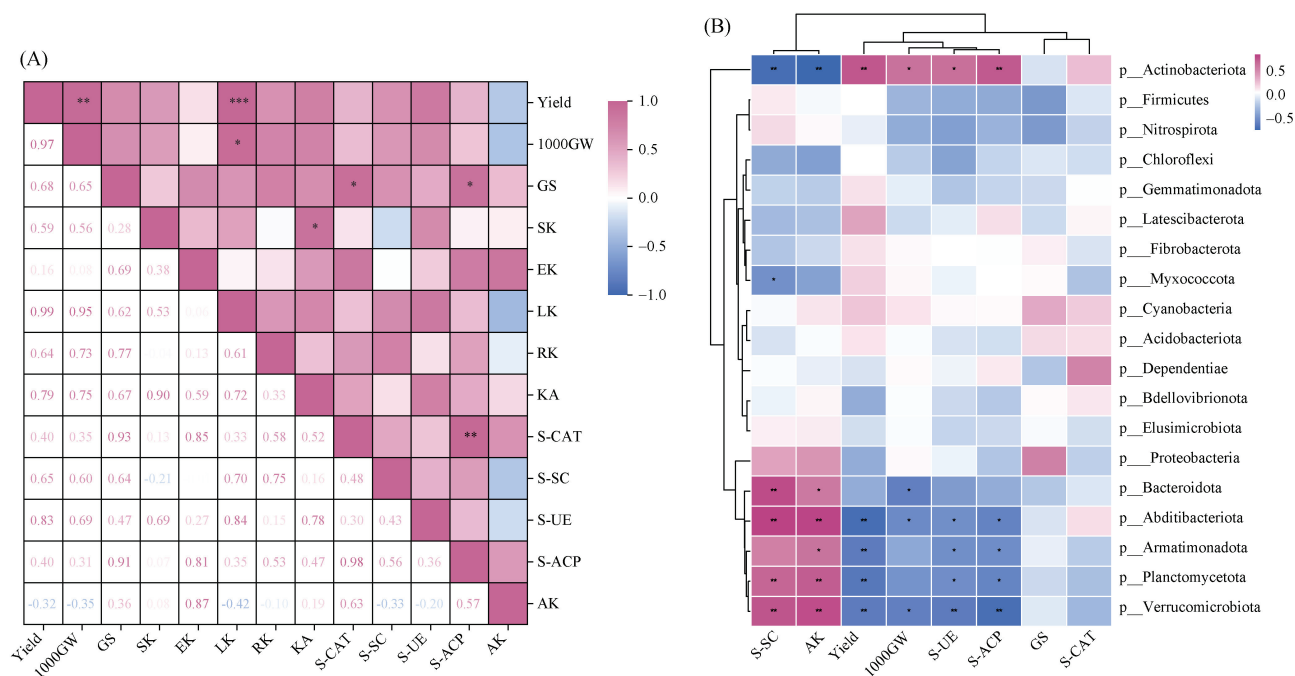
## 2.5 成熟期小麦产量与土壤环境要素的相关性

小麦产量与成熟期植株各器官钾含量、土壤酶活性有着密切的关联(图 6A)。相关性分析结果表明, 小麦产量与千粒重呈极显著正相关, 叶片钾含量与产量、千粒重分别呈极显著正相关、显著正相关, 说明叶面喷施显著影响小麦产量。整株钾积累量与茎钾含量显著正相关, 土壤酸性磷酸酶与土壤过氧化氢酶呈极显著正相关。小麦生理指标与微生物群落有着紧密的关系, 相关性热图显示细菌门水平上优势物种与小麦产量及其构成要素、土壤酶活性存在潜在关联(图 6B)。疣微菌门(Verrucomicrobiota)、浮霉菌门(Planctomycetota)与土壤蔗糖酶呈极显著正相关, 与小麦产量、土壤脲酶、土壤酸性磷酸酶呈显著或极显著负相关; 而放线菌门(Actinobacteriota)与小麦产量、千粒重、土壤脲酶、土壤酸性磷酸酶呈显著或极显著正相关, 与土壤蔗糖酶呈极显著负相关。穗粒数、土壤过氧化氢酶与细菌门水平优势物种没有显著相关性。

## 3 讨论

### 3.1 山梨醇螯合钾对小麦产量及其构成要素的影响

本研究结果显示, 叶面喷施有利于小麦产量的提高, 其中 SK 处理增产效果最明显, 该处理的千粒重与穗粒数也同样最突出。与 CK 处理相比, S、K、S+K 处理产量均有不同程度提高。至今尚未查到关于叶面喷施山梨醇螯合氯化钾的研究报道, 但叶面喷施钾肥有学者进行了分析, 研究<sup>[11]</sup>发现, 在生育关键阶段叶面喷施氯化钾可以显著提高小麦产量, 并获得最佳经济效益。Saifullah 等<sup>[12]</sup>研究结果表明, 叶面施钾显著提高小麦产量, 同时显著增强籽粒与茎对氮磷的吸收。山梨醇螯合钾是一种新型肥料, 利用螯合剂改变了矿质养分钾的形态, 其中山梨醇作为光合作用的初产物, 存在于各种植株体内, 具有独特的生物学效能<sup>[9]</sup>。此外, 山梨醇分子量小, 多羟基结构具有一定的润湿功能<sup>[13]</sup>, 同时可作为运输物质携带矿质养分在植物体内进行迁移<sup>[14]</sup>。钾在小麦生育期内的重



(Yield: 产量; 1000GW: 千粒重; GS: 穗粒数; RK: 根钾含量; SK: 茎钾含量; LK: 叶钾含量; EK: 穗钾含量; KA: 整株钾积累量; S-CAT: 土壤过氧化氢酶; S-SC: 土壤蔗糖酶; S-UE: 土壤脲酶; S-ACP: 土壤酸性磷酸酶; AK: 土壤速效钾。\*、\*\*、\*\*\*表示相关性达  $P<0.05$ 、 $P<0.01$ 、 $P<0.001$  显著水平)

图 6 小麦产量及其构成要素、钾元素分布和土壤酶活性相关性热图(A)及各要素与细菌门水平优势物种相关性热图(B)  
 Fig. 6 Correlation heat map of yield and its components, potassium distribution, soil enzyme activities (A), and correlation heat map between the above elements and dominant species at bacterial phylum level (B)

要作用已被证实,而山梨醇在养分迁移过程中又扮演关键角色。课题组前期研究结果<sup>[10,15]</sup>表明,将矿质元素转变为螯合态后,其在花生、马铃薯等植株体内的吸收、迁移、转化效率得以增强,进而在生物量的积累方面表现为由营养器官向生殖器官的转移。因此,将山梨醇作为配体改变钾的赋存形态,更有利于小麦植株对养分的吸收利用,起到增产提质的作用。

### 3.2 山梨醇螯合钾对不同生育时期小麦植株钾素的影响

小麦产量的提升取决于生育期对养分的吸收、运转与积累,并实现各器官间的合理分配<sup>[16]</sup>。研究表明,施用适量浓度钾肥可以增大茎维管束韧皮部及木质部面积,增加茎部节间壁厚,促进维管束发育,提高茎秆强度<sup>[17-18]</sup>。同时,山梨醇又有携带矿质元素在植物韧皮部运输的优势,增强作物对养分的吸收<sup>[9]</sup>。本研究结果表明,SK处理的小麦茎钾含量在灌浆前期、成熟期两个生育期内均显著高于CK处理,也从侧面反映出叶面喷施山梨醇螯合钾可以提升钾在茎部的积累,进而增强茎部向末端籽粒转运的潜力。叶面喷施山梨醇螯合钾可在植株生长期有效促进其对土壤养分的吸收<sup>[19]</sup>,叶面施肥虽不能直接作用于作物根系,但通过增强地上部的光合效率,间接影响

根系对养分的吸收与积累,促进作物生长<sup>[8,20]</sup>。钾在作物光合作用中起着基础性的作用,在缺钾条件下,用于植株生长的光合同化物降低,进而影响同化物从叶片向果实的转运,对产量与品质造成负面影响<sup>[3]</sup>。本研究在灌浆前期、成熟期小麦叶钾含量均表现为SK>S+K>K>S>CK,且SK处理整株钾积累量在这两个时期内均显著高于其他处理。因此,与氯化钾或山梨醇混合氯化钾相比,山梨醇螯合钾的生物有效性更强,增产效果显著,综合表现突出。

### 3.3 山梨醇螯合钾对不同生育时期土壤酶活性及根际土壤微生物的影响

土壤酶活性可以表征土壤中物质的分解和转化程度<sup>[21]</sup>。土壤过氧化氢酶直接参与土壤呼吸过程的物质代谢,与土壤微生物数量关系密切;土壤蔗糖酶参与土壤碳循环,同时也能反映有机碳的积累程度;土壤脲酶作为催化剂参与尿素的水解,表征土壤供氮能力;酸性磷酸酶则在土壤磷循环中起重要作用<sup>[22]</sup>。但前期研究针对叶面喷施对土壤酶影响的研究极少涉及。有研究<sup>[23]</sup>表明,土壤施用有机肥料后,与空白对照相比,土壤脲酶、酸性磷酸酶活性增强,本研究叶面喷施结果与此相似。长期施用氯化钾缓释肥能提高脲酶活性,还可促进根系养分吸收<sup>[24]</sup>。土壤脲

酶主要由脱辅基酶和辅因子组成,钾离子可激活辅因子,提高酶活性<sup>[25]</sup>。研究表明,施用钾长石可显著提高猕猴桃种植土壤的脲酶、酸性磷酸酶活性<sup>[26]</sup>。也有研究显示,施用有机肥后,土壤过氧化氢酶、蔗糖酶、脲酶、酸性磷酸酶活性均高于对照<sup>[27]</sup>。本研究采取叶面喷施的方式得到与土壤施肥相似的结果,其中SK处理的4种酶活性在各生育期均高于CK处理,结合前面讨论结果,说明叶面喷施通过增加小麦植株对钾的吸收间接影响土壤酶活性,进而促进土壤养分的有效利用。

作物根际是土壤微生物活动的重点区域,存在着种类多样、数量丰富的微生物,与作物生长发育、抗胁迫能力息息相关,也是待开发的农业资源宝库<sup>[28]</sup>。植物-土壤-微生物之间的相互作用推动着初级生产力,是农业-生态系统功能的基础<sup>[29]</sup>。有研究显示,植物光合作用固定的碳中有21%以上通过根系分泌物进入土壤,从而影响根际土壤微生物群落结构<sup>[30]</sup>。因此,研究根际土壤微生物的变化可为农业可持续发展、农业生产力的提高提供理论基础。本文研究结果表明,喷施山梨醇螯合钾提高了根际土壤微生物放线菌门、变形菌门、拟杆菌门、髌骨细菌门、酸杆菌门的相对丰度,其中放线菌门在山梨醇螯合钾喷施处理中显著富集。研究表明,变形菌对小麦的光合作用和抗病性有着重要的作用;拟杆菌可促进小麦能量的吸收和储存,为作物增产提供基础;酸杆菌具有降解植物残体的功能,同时还参与铁循环和单碳化合物的代谢<sup>[31]</sup>。还有研究显示,髌骨细菌与小麦产量呈显著正相关<sup>[32]</sup>。此外,放线菌门在甜菜生长发育过程中可促进叶绿素合成与生物量的积累<sup>[33]</sup>。本研究中不同喷施处理的优势菌门均有差异性表达,综合其他参数指标可以表明,喷施山梨醇螯合钾处理在一定程度上影响了土壤微生物的群落结构与优势菌群丰富度,这种改变对促进小麦的营养吸收是有益的。

### 3.4 测试指标之间及其与小麦产量的相互关系

钾元素对小麦产量、植株钾素吸收、根际土壤农化特性、微生物多样性均有显著影响<sup>[34]</sup>。本研究结果表明,小麦叶片钾含量与产量、千粒重显著正相关。研究发现,叶面施钾可以增强作物吸收土壤钾素的能力<sup>[19]</sup>。由此得出,叶面喷施山梨醇螯合钾可提高叶片钾含量,改善光合活性,增强同化物的转运,促进土壤中养分的吸收与利用,进而提高产量<sup>[35]</sup>。土壤酶在土壤系统中发挥着重要的作用,且大多数土壤酶由土壤微生物产生<sup>[36]</sup>。植物根系、根际土壤微生物相互作用完成根际环境中的各种生理活动,而土壤酶

是这些活动的主要参与者<sup>[37]</sup>。微生物分泌的土壤酶在养分循环(如固氮、磷吸附和解吸、钾释放等)及土壤结构维持和作物生产中发挥着关键作用<sup>[38]</sup>。因此,研究作物营养物质的迁移、土壤生化性质与微生物的关系有十分重要的意义。本研究中喷施山梨醇螯合钾通过促进钾素的吸收与迁移,进而改变细菌群落组成,调节作物生长发育。结果表明,疣微菌门与土壤酸性磷酸酶呈极显著负相关;放线菌门与土壤酸性磷酸酶显著正相关。有研究表明,疣微菌门可以合成多种对植物有益的萜烯簇及次级代谢物<sup>[39]</sup>;放线菌门能够参与土壤氮素循环,调节土壤硝态氮浓度,减少氮素流失<sup>[40]</sup>。

在门水平上分析优势物种与土壤酶潜在关联,进而探明这种关联对小麦及其构成要素的影响。微生物疣微菌门、浮霉菌门与小麦产量、土壤蔗糖酶活性、土壤脲酶活性、土壤酸性磷酸酶活性均存在显著的相关性。植物根系为根际微生物提供了丰富的底物,促进微生物数量的增加,进而影响土壤酶的活性<sup>[41]</sup>。叶面喷施山梨醇螯合钾可改善钾元素的分配,间接影响根际生理代谢活动,从而促使产量的提升。

## 4 结论

两年农田试验结果表明,叶面喷施山梨醇螯合钾可显著提高小麦产量,与喷施氯化钾处理相比,两年间先后增产35.48%、13.99%,具体表现在显著提高小麦植株开花后叶片中钾含量,增强土壤过氧化氢酶、土壤脲酶活性,促进根际微生物的多样性与丰富度,提高放线菌门、变形菌门、拟杆菌门、髌骨细菌门、酸杆菌门的相对丰度,其中放线菌门显著影响根际微生物组间差异程度。相关性分析表明,小麦产量与叶片钾含量、土壤酶、根际微生物关系密切,植物-土壤-微生物协同作用,共同调节小麦植株的养分吸收、生理代谢等生命活动。本研究为提高钾的利用效率及山梨醇螯合钾的推广应用提供了科学依据。

## 参考文献:

- [1] Lakudzala D D. Potassium response in some Malawi soils[J]. International Letters of Chemistry, Physics and Astronomy, 2013, 13: 175-181.
- [2] 曾维军. 氮、磷、钾肥对紫色小麦光合生理特性、产量及主要品质的影响[D]. 贵阳: 贵州大学, 2019.
- [3] 顾小燕. 钾肥叶面喷施对冬小麦品质形成的影响及其机理[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2021.
- [4] 孙洪仁, 张吉萍, 江丽华, 等. 中国小麦土壤速效钾丰缺指标与适宜施钾量研究[J]. 土壤, 2019, 51(5): 895-902.



- [5] 徐易如, 赵艳艳, 孙福来, 等. 小麦成熟期产量及钾效率相关性状的全基因组关联分析[J]. 植物营养与肥料学报, 2020, 26(6): 1081–1090.
- [6] 周健民, Magen H, 谢建昌, 等. 土壤钾素动态与钾肥管理[M]. 南京: 河海大学出版社, 2008.
- [7] Niu J H, Liu C, Huang M L, et al. Effects of foliar fertilization: A review of current status and future perspectives[J]. Journal of Soil Science and Plant Nutrition, 2021, 21(1): 104–118.
- [8] 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.
- [9] 李腾升, 魏倩倩, 黄明丽, 等. 糖醇螯合肥在农业上的应用研究进展[J]. 土壤学报, 2021, 58(6): 1393–1403.
- [10] Li P C, Geng C Z, Li L Y, et al. Calcium-sorbitol chelating technology and application in potatoes[J]. American Journal of Biochemistry and Biotechnology, 2020, 16(1): 96–102.
- [11] Khan M Z, Muhammad S, Naeem M A, et al. Response of some wheat (*Triticum aestivum* L.) varieties to foliar application of N & K under rainfed conditions[J]. Pakistan Journal of Botany, 2006, 38(4): 1027.
- [12] Saifullah A, Ranjha M, Yaseen M, et al. Response of wheat to potassium fertilization under field conditions[J]. Pakistan Journal of Agricultural Sciences, 2002, 39(4): 269–272.
- [13] 丁双双, 李燕婷, 袁亮, 等. 糖醇和氨基酸对小白菜钙营养及生长、品质的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(3): 744–751.
- [14] Loescher W H. Physiology and metabolism of sugar alcohols in higher plants[J]. Physiologia Plantarum, 1987, 70(3): 553–557.
- [15] 李腾升, 魏倩倩, 王文昊, 等. 喷施山梨醇螯合钙对花生生长及钾、钙、镁吸收的影响[J]. 土壤, 2022, 54(6): 1117–1123.
- [16] 丁锦峰, 訾妍, 杨佳凤, 等. 稻茬小麦公顷产量 9000kg 群体钾素积累、分配与利用特性[J]. 作物学报, 2014, 40(6): 1035–1043.
- [17] 范存留, 杨国涛, 范永义, 等. 钾、硅肥处理对杂交水稻 II 优 838 抗倒伏性的作用研究[J]. 云南大学学报(自然科学版), 2015, 37(4): 623–631.
- [18] 谷贺贺, 李静, 张洋洋, 等. 钾肥与我国主要作物品质关系的整合分析[J]. 植物营养与肥料学报, 2020, 26(10): 1749–1757.
- [19] 魏倩倩. 糖醇螯合钾对花生产量、养分利用及土壤基本农化性质的影响[D]. 青岛: 青岛大学, 2022.
- [20] 路亚, 王春晓, 于天一, 等. 土壤施磷与叶面追肥互作对花生根系形态、结瘤特性及氮代谢的影响[J]. 作物学报, 2020, 46(3): 432–439.
- [21] Yang Y H, Li M J, Wu J C, et al. Impact of combining long-term subsoiling and organic fertilizer on soil microbial biomass carbon and nitrogen, soil enzyme activity, and water use of winter wheat[J]. Frontiers in Plant Science, 2022, 12: 788651.
- [22] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京: 农业出版社, 1986.
- [23] Liu Z P, Xie W Y, Yang Z X, et al. Effects of manure and chemical fertilizer on bacterial community structure and soil enzyme activities in North China[J]. Agronomy, 2021, 11(5): 1017.
- [24] Li Z L, Qiu L X, Zhang T J, et al. Long-term application of controlled-release potassium chloride increases maize yield by affecting soil bacterial ecology, enzymatic activity and nutrient supply[J]. Field Crops Research, 2023, 297: 108946.
- [25] Kathpalia R, Bhatla S C. Plant mineral nutrition[J]. Plant Physiology, Development and Metabolism, 2018: 37–81.
- [26] Hu T, Gu J, Zhen L S, et al. Influences of potassium solubilizing bacteria and K-feldspar on enzyme activities and metabolic activities of the bacterial communities in kiwifruit planting soil[J]. Journal of General and Applied Microbiology, 2021, 67(3): 106–113.
- [27] 刘佳欢, 王倩, 罗人杰, 等. 黄腐酸肥料对小麦根际土壤微生物多样性和酶活性的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2019, 25(10): 1808–1816.
- [28] 王捧娜, 代雯慈, 于敏, 等. 倒春寒对开花期小麦根际土壤真菌群落的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2023, 31(10): 1565–1578.
- [29] 崔铭翰. 小麦根际微生物及钙离子结合蛋白 TaCGD1 调控耐碱功能及机制研究[D]. 济南: 山东大学, 2023.
- [30] Guo Z B, Liu H, Wan S X, et al. Fertilisation practice changes rhizosphere microbial community structure in the agroecosystem[J]. Annals of Applied Biology, 2019, 174(2): 123–132.
- [31] Ma Z, Yi Z H, Bayar K, et al. Community dynamics in rhizosphere microorganisms at different development stages of wheat growing in confined isolation environments[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2021, 105(9): 3843–3857.
- [32] Ren N, Wang Y, Ye Y L, et al. Effects of continuous nitrogen fertilizer application on the diversity and composition of rhizosphere soil bacteria[J]. Frontiers in Microbiology, 2020, 11: 1948.
- [33] Jia Q E, Song B Q, Huo J L, et al. Eliciting the response of rhizospheric soil microbial community structure to zinc amendment: A case study of sugar beet cultivation in black soil[J]. Sugar Tech, 2023, 25(5): 1173–1186.
- [34] 邓永兴, 王文亮, 周苏玫, 等. 小麦根际解钾微生物与土壤钾含量、钾素利用率及根系活力的关系[J]. 植物营养与肥料学报, 2021, 27(6): 1027–1043.
- [35] Ishfaq M, Kiran A, Wakeel A, et al. Foliar-applied potassium triggers soil potassium uptake by improving growth and photosynthetic activity of wheat and maize[J]. Journal of Plant Nutrition, 2023, 46(11): 2691–2706.

- [36] Cheng L, Wang H Y. Responses of soil bacterial communities and enzyme activities to straw return and potassium fertilization with two soils under soil potassium balance condition in rice-wheat system[J]. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 2023, 23(2): 1845–1859.
- [37] Gianfreda L. Enzymes of importance to rhizosphere processes[J]. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 2015.
- [38] 施鸿鑫, 张骞, 钱海山, 等. 蚯蚓有机肥对枇杷土壤理化性状与细菌群落演变的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2023(5): 36–44.
- [39] Stephen N, Simon R, Rekha S, et al. A genomic catalog of earth's microbiomes[J]. *Nature Biotechnology*, 2020, 39(4): 499–509.
- [40] Ma Q, Qian Y S, Yu Q Q, et al. Controlled-release nitrogen fertilizer application mitigated N losses and modified microbial community while improving wheat yield and N use efficiency[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2023, 349: 108445.
- [41] 邵天韵, 燕潇, 贾秉志, 等. 种植草本植物狗牙根改良滨海黏性盐碱地的研究[J]. *土壤*, 2023, 55(4): 764–770.