

郑瑞丽, 韩传浩, 赵立, 马宗斌, 张明霞, 张念城, 周敏雪, 姜雨涵, 黄明丽, 颜冬云. 喷施山梨醇螯合钾对小麦叶片生理生化及叶际细菌群落的影响[J]. 土壤学报, 2026.

ZHENG Ruili, HAN Chuanhao, ZHAO Li, MA Zongbin, ZHANG Mingxia, ZHANG Niancheng, ZHOU Minxue, JIANG Yuhan, HUANG Mingli, YAN Dongyun. Effect of Foliar Application of Sorbitol-Chelated Potassium on Leaf Physiological, Biochemical Traits, and the Phyllosphere Bacterial Community in Wheat [J]. Acta Pedologica Sinica, 2026.

## 喷施山梨醇螯合钾对小麦叶片生理生化及叶际细菌群落的影响\*

郑瑞丽, 韩传浩, 赵立, 马宗斌, 张明霞, 张念城, 周敏雪, 姜雨涵, 黄明丽,  
颜冬云<sup>†</sup>

(青岛大学环境与地理科学学院, 山东青岛 266071)

**摘要:** 山梨醇螯合钾 (SK) 通过影响小麦叶片促进养分吸收利用的机制尚不明确。以山梨醇螯合钾为供试叶面肥, 以泰农 108 小麦为供试作物, 通过两季农田试验, 解析叶面喷施不同形态钾对小麦叶片生理生化指标与叶际微生物群落结构的影响, 并借助结构方程模型 (SEM) 量化各因子对小麦产量的贡献度, 为螯合钾肥的增效机制提供理论依据。结果表明, 与氯化钾 (K)、山梨醇与氯化钾的混合物 (S+K) 处理相比, SK 处理显著影响小麦叶片生理生化指标及细菌丰富度: (1) 年均产量分别增加 24.74%、18.76%; (2) 2023 年提高籽粒中锰含量 (16.14%、12.12%)、钾含量 (45.68%、21.96%)、灌浆后期叶片钾含量 (81.01%、24.44%) 及成熟期碳含量 (2.52%、1.95%); (3) 2023 年延缓过氧化氢酶、过氧化物酶、超氧化物歧化酶活性的下降, 降低丙二醛含量 (25.65%、7.51%), 维持蛋白质合成酶 (硝酸还原酶、谷氨酰胺合成酶、谷丙转氨酶) 在灌浆中期一后期活性; (4) 2023 年提高根际细菌厚壁菌门相对丰度 (57.36%、50.00%), 降低放线菌门 (21.63%、4.26%)、蓝藻门的相对丰度 (36.05%、62.03%)。SK 处理通过协同调控小麦叶片元素含量、抗氧化系统及蛋白质合成酶活性达到增产提质效果, SEM 模型进一步揭示, 所有测试指标均与小麦产量构成直接或间接关系。

**关键词:** 山梨醇螯合钾; 小麦产量; 叶片生理代谢; 叶际细菌群落; 结构方程模型 (SEM)

中图分类号: S145.2

文献标志码: A

### Effect of Foliar Application of Sorbitol-Chelated Potassium on Leaf Physiological, Biochemical Traits, and the Phyllosphere Bacterial Community in Wheat

ZHENG Ruili, HAN Chuanhao, ZHAO Li, MA Zongbin, ZHANG Mingxia, ZHANG Niancheng, ZHOU Minxue, JIANG Yuhan, HUANG Mingli, YAN Dongyun<sup>†</sup>

\*国家自然科学基金项目 (31972516) 和山东省自然科学基金项目 (ZR2025MS300) 资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 31972516) and the Natural Science Foundation of Shandong Province, China (No. ZR2025MS300)

<sup>†</sup>通讯作者 Corresponding author, E-mail: yandongyun666@hotmail.com

作者简介: 郑瑞丽 (1999—), 女, 山东济宁人, 硕士研究生, 研究方向: 糖醇螯合肥研发与应用。E-mail: Zhengruili1@163.com

收稿日期: 2025-09-04; 收到修改稿日期: 2026-04-03; 网络首发日期 (www.cnki.net):

**Abstract:** 【Objective】 This study aimed to elucidate the mechanism by which sorbitol-chelated potassium (SK) promoted nutrient uptake and utilization in wheat leaves. 【Method】 In this study, sorbitol-chelated potassium was used as the test foliar fertilizer and wheat cultivar Tainong 108 as the experimental material to elucidate the effects of foliar application of different potassium forms on leaf physiological and biochemical traits as well as phyllosphere microbial community structure. Structural equation modeling (SEM) was further employed to quantify the contribution of each factor to wheat yield, thereby providing a theoretical basis for the yield-enhancing mechanisms of chelated potassium fertilizers. 【Result】 Results from two consecutive field seasons showed that, compared with potassium chloride (K) and a mixture of sorbitol and potassium chloride (S+K), the SK treatment significantly affected wheat leaf physiological and biochemical characteristics and bacterial richness. (1) Mean yield increases were 24.74% and 18.76%, respectively. (2) Grain Mn concentration increased by 16.14% and 12.12%, grain K by 45.68% and 21.96%, late grain-filling stage leaf K by 81.01% and 24.44%, and maturity stage leaf C by 2.52% and 1.95%. (3) Activities of catalase, peroxidase and superoxide dismutase were better maintained, while malondialdehyde content decreased by 25.65% and 7.51%; the activities of protein synthesis enzymes (nitrate reductase, glutamine synthetase and glutamate-pyruvate transaminase) were sustained during mid-to-late grain filling stage. (4) Relative abundance of Firmicutes rose by 57.36% and 50.00%, whereas Actinobacteria declined by 21.63% and 4.26% and Cyanobacteria by 36.05% and 62.03%. 【Conclusion】 SK treatment enhanced yield and grain quality through the synergistic regulation of wheat leaf element content, antioxidant capacity and protein synthesis enzyme activities. SEM further demonstrated that all measured indicators were directly or indirectly linked to final grain yield.

**Key words:** Sorbate-chelated potassium; Wheat yields; Leaf physiological metabolism; Phyllospheric bacterial community; Structural equation modeling (SEM)

钾通过促进植株叶片细胞质中酶活化及作物体内蛋白合成等生理过程，提高作物光合速率，增强光合产物吸收转化。充足的钾供应是提高作物产量及品质的关键因素<sup>[1]</sup>。钾作为小麦生长发育所必需的矿质营养元素，主要以游离阳离子态在植株体内迁移<sup>[2]</sup>。叶面喷施离子态钾不仅可通过气孔被直接吸收，还能有效调节植物的基础代谢过程。施钾能够提高核酮糖-1,5-二磷酸加氧酶（Rubisco）与核酮糖-1,5-二磷酸羧化酶/加氧酶活化酶（Rubisco activase）活性，加快对活性氧的消除，提高叶片光合效率，进而增强作物叶片的光合作用<sup>[3]</sup>；喷施磷酸二氢钾能够促进小麦植株对钾、磷元素的吸收转运，调控植株碳、氮代谢过程，并通过促进籽粒氮同化过程，实现小麦增产提质的目的<sup>[4]</sup>。小麦生产中主要施用氯化钾或硫酸钾，其中，氯化钾因其含钾量高（K<sub>2</sub>O 600~620 g·kg<sup>-1</sup>）、成本低成为最主要的钾源<sup>[5]</sup>。中华人民共和国农业农村部（2025）数据显示中国水稻、小麦、玉米三大粮食作物化肥利用率为 42.6%，较农业发达国家或地区低 15%~20%<sup>[6]</sup>；此外，化学肥料的长期施用已导致土壤酸化、板结，同时引发养分失衡、地力下降等土壤退化问题，并对食品安全构成潜在影响。

针对上述问题，课题组前期研究发现，将离子态钾（氯化钾）转变为螯合态后有益于钾在小麦植株中的迁移、转化，促进灌浆期小麦对钾的吸收利用进而增产；与离子态钾、混合态钾（配体山梨醇与钾离子的混合物）两种形态钾相比，连续两季（2022—2023）喷施螯合态钾小麦均增产显著；进一步研究表明，叶面喷施螯合态钾通过增强根际土壤酶活性与微生物的优势菌种间接影响土壤养分利用<sup>[7]</sup>。然而，作为直接

作用位点的叶片生理生化响应，以及山梨醇螯合钾对叶际细菌群落的影响及其与产量的因果关系，目前尚缺乏系统探究。本文拟从叶面喷施的直接作用部位—小麦叶片的生理生化特征结合叶际细菌群落结构变化入手，探究叶面喷施山梨醇螯合钾促进小麦增产的内在机制，并借助结构方程模型对这种关系进行量化，以期深入解析螯合态钾的作用机制提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验区概况与供试材料

试验于 2021—2023 年在山东省青岛市即墨区后花园村试验基地 (36°35'20"N, 120°31'08"E) 开展。研究区属温带半湿润季风气候，首季 (2021 年 11 月—2022 年 6 月) 试验周期内平均气温 10.26 °C，总降水量 422.39 mm，第二季 (2022 年 11 月—2023 年 6 月) 平均气温 9.58 °C，总降水量 218.81 mm。两季试验期间具体气象数据变化如图 1 所示。该地块前茬作物为玉米，0~20 cm 耕层土壤的基础理化性质见表 1。

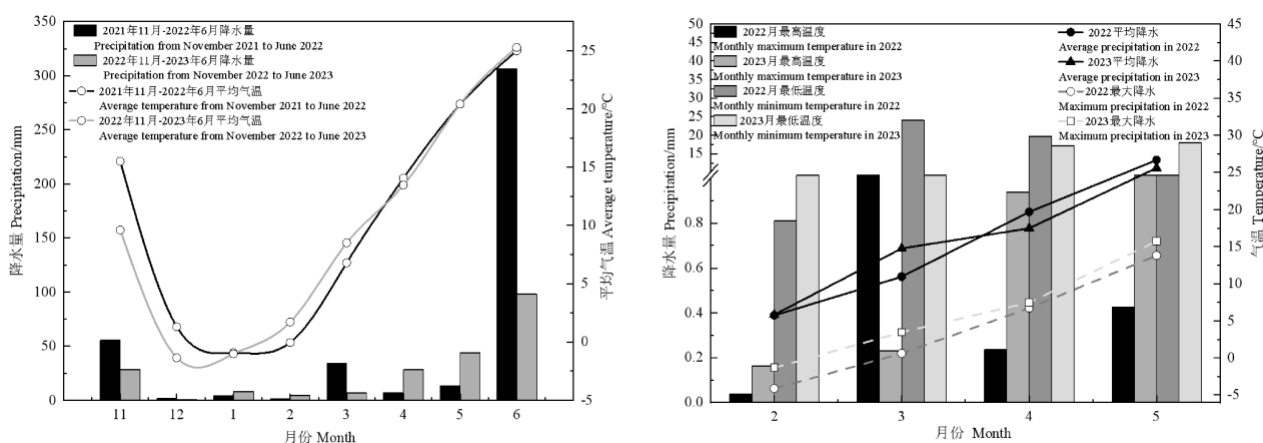


图 1 2021—2022 年、2022—2023 年试验周期内降水与气温变化

Fig. 1 Precipitation and temperature during the experimental periods in 2021-2022 and 2022-2023

表 1 供试土壤基本理化性质

Table 1 Basic physicochemical properties of the tested soil

土壤类型 Soil type	年份 Year	pH	EC/( $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ )	AHN/( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	AP/( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	AK/( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )
砂姜黑土 Lime concretion black soils	2022	6.56	72.10	102.80	73.50	151.60
	2023	6.44	67.70	119.60	68.07	148.22

注: EC: 电导率; AHN: 碱解氮; AP: 有效磷; AK: 速效钾。下同。Note: EC: Electric conductivity, AHN: Alkali-hydrolyzable nitrogen, AP: Available phosphorous, AK: Available potassium. The same below.

### 1.2 试验设计

试验选用“泰农108”为供试小麦品种，设置3种不同钾形态，共5个处理，分别为CK: 清水、S: 山梨醇、K: 氯化钾 (自由离子态钾)、S+K: 山梨醇与氯化钾的混合物 (混合态钾)、SK: 以氯化钾为钾源的山梨醇螯合钾 (螯合态钾: 螯合率98.6%，测定方法参照文献[8])。其中氯化钾由中化集团提供 ( $\text{K}_2\text{O}$ 大于

等于 $600\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ), 山梨醇由山东同创公司提供(山梨醇大于等于 $700\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ), 山梨醇螯合钾系实验室自制(合成方法参考专利[9])。试验采用随机区组设计, 每个处理设3次重复, 单个小区面积为 $30\text{ m}^2$  ( $5\text{ m}\times 6\text{ m}$ ), 共计15个小区, 小区之间设 $1.5\text{ m}$ 保护行。播种前作为基肥一次性施入氮/磷/钾掺混肥料(19-19-19 (*m:m:m*), 美盛)  $750\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。小麦灌浆期开始进行叶面喷施, 共喷施3次, 根据天气情况每次间隔 $5\sim 10\text{ d}$ , 选择晴朗无风或微风(风力小于等于2级)的上午 $8:00\text{—}10:00$ , 叶片干燥后进行。喷施浓度 $9\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$  (以 $\text{K}^+$ 计), 喷施量 $750\text{ L}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。试验地块为旱地(无水源), 病虫害等田间管理按照当地常规措施进行。

### 1.3 样品采集与分析方法

植株样品采集与分析: 2023年叶面喷施后, 于小麦灌浆前期(5月11日)、灌浆中期(5月17日)、灌浆末期(5月24日)及成熟期(6月10日)进行整株采集。每个处理随机选取代表性植株15株, 设置3次重复。采集后用去离子水清洗干净, 按根、茎、叶、穗分离, 置于烘箱 $105\text{ }^\circ\text{C}$ 杀青 $30\text{ min}$ ,  $45\text{ }^\circ\text{C}$ 烘至恒重, 研磨粉碎后过100目筛网, 密封保存备用。

土壤样品采集与分析: 2022年与2023年叶面喷施前, 避开小区边界效应, 采用网格布点法采集 $0\sim 20\text{ cm}$ 土层土壤, 置于阴凉通风干燥处风干, 去除石块及动植物残体等杂质, 过18目筛后保存于密封袋备用。参考鲍士旦<sup>[10]</sup>《土壤农化分析》方法测定土壤pH、电导率(EC)、碱解氮(AHN)、有效磷(AP)、速效钾(AK)。土壤pH按水/土质量比 $2.5:1$ 测定; 电导率按水/土质量比 $10:1$ 测定; AHN采用碱解扩散法测定; AK采用醋酸铵浸提, 利用电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-OES, Avio 200, PerkinElmer, Massachusetts, 美国)测试; AP含量采用碳酸氢钠浸提—紫外分光光度法比色测定。

产量构成要素及籽粒品质测定: 成熟期避开小区边界区域, 在各小区中心位置按照“一米双行”进行测产。每个处理重复3次, 收割后置于80目采样袋, 经自然晾晒后脱粒测产。同时, 各小区随机选取30株麦穗统计穗粒数; 随机数1000粒称重得小麦千粒重, 重复三次; 籽粒品质的测定, 取经处理后的籽粒样品 $0.2\text{ g}$ , 采用 $\text{HNO}_3\text{—H}_2\text{O}_2$  ( $6:1, v:v$ )微波消解法(Touchwin2.0-GS25, 奥普乐, 成都)消解并定容后上机ICP-OES测定矿质元素(钾、锰、铁、锌)含量。

叶片钾、碳、氮含量的测定: 称取100目叶片 $0.2\text{ g}$ , 微波消解定容后上机ICP-OES测定叶片中钾含量。用百万分之一天平(METTLER TOLEDO-XP6, 瑞士)称取约 $2\text{ mg}$ 叶片样品于锡舟中, 上机测定样品碳、氮含量(元素分析仪: Vario EL cube, Elementar, 德国)。

叶片酶测定: 2023年灌浆前期、中期、后期及成熟期, 选取代表性植株采集小麦上三叶, 迅速装入密封袋中放入带有冰盒的车载冰箱, 运回实验室置于 $-40\text{ }^\circ\text{C}$ 冰箱保存。超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)、过氧化氢酶(CAT)活性分别由其检测试剂盒(AKAO001C、AKAO005C、AKAO003-1U)测定。硝酸还原酶(NR)、谷氨酰胺合成酶(GS)、谷丙转氨酶(ALT)活性分别由其检测试剂盒(AKNM001U、AKAM008C、AKAM006C)测定。以上试剂盒均由北京盒子生工科技有限公司提供。丙二醛(MDA)含量测定参考硫代巴比妥酸(TBA)法测定。以上酶活性指标均在采样后一周内完成检测。

叶际微生物: 小麦灌浆后期, 避开小区边界区域, 每个小区随机选取3株长势一致的小麦植株, 佩戴一次性无菌手套采集小麦上三叶装入无菌密封袋中, 置于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。运至实验室置于 $-40\text{ }^\circ\text{C}$ 冰箱, 随后加干冰保存, 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高通量测序方法分析叶际细菌群落结构。使用OMEGA叶际试剂盒提取DNA, 利用Nanodrop 2000分光光度计检测DNA浓度与纯度, 并通过 $1\%$  (*m:v*)琼脂糖凝胶电泳检测其质量及完整性。利用引物

338F (ACTCCTACGGGAGGCAGCA) 和806R (GGACTACHVGGGTWTCTAAT), 对叶际细菌16S rDNA 基因V3~V4区进行PCR扩增<sup>[11]</sup>。基于平台Illumina Miseq进行PE300对端测序。

#### 1.4 数据处理

采用 Excel2019 进行数据记录与初步整理, 利用 SPSS 26.0 进行单因素方差分析 (One-way ANOVA) 及邓肯 (Duncan) 法进行多重比较分析和组间差异显著性检验 ( $P < 0.05$ ), 并借助 Origin2021 作图与皮尔逊 (Pearson) 相关性分析; 针对叶际微生物测序数据, 利用 R 3.3.1 进行主坐标分析 (PCoA)、统计分析与作图; 通过 Stata 建立结构方程模型 (SEM)。

## 2 结果

### 2.1 叶面喷施对产量及产量构成要素的影响

叶面喷施不同形态钾肥对小麦产量及其构成因子的影响如表 2 所示。结果表明, 喷施山梨醇螯合钾 (SK) 能显著提高籽粒产量 ( $P < 0.05$ )。与离子态钾 (K) 及混合态钾 (S+K) 处理相比, SK 处理在 2022 年分别增产 35.48% 与 27.44%, 在 2023 年分别增产 13.99% 与 10.07%; 就产量构成因子而言, 以 2023 年为例, SK 的千粒重较 K 与 S+K 处理分别显著提高 5.83%、3.58%, 穗粒数分别增加 3.29%、3.76%。双因素方差分析 (Two-way ANOVA) 显示, 年际变化 (Y)、叶面喷施处理 (T) 对小麦产量及千粒重均有极显著影响 ( $P < 0.001$ ), 对小麦穗粒数影响显著 ( $P < 0.05$ ); 此外, 年际变化与叶面喷施处理的交互作用 ( $Y \times T$ ) 对产量、穗粒数、及千粒重均达到显著或极显著水平。

两季试验增产趋势基本一致, 但 2022 年平均产量 (各处理产量的算术平均值) 较 2023 年显著降低 49.14%。这种显著的年际差异主要源于返青期及灌浆期气候条件的波动 (图 1)。具体而言, 2022 年返青期 (2 月下旬至 3 月中旬) 降水量为 35.17 mm, 显著高于 2023 年同期的 11.61 mm; 同时, 2023 年同期平均气温较高, 最高日温度差达 3.81 °C, 降雨量减少与温度升高可能抑制小麦返青期有效分蘖数的形成, 进而影响产量; 相比之下, 2023 年灌浆期 (4—5 月) 降水量较 2022 年同期增长 3.56 倍, 同时, 2023 年生长季温度相对偏低, 降水与气温等环境因子的综合作用, 是导致两年间产量差异性的重要因素。

表 2 小麦产量及其产量构成因子

Table 2 Wheat yield and component factors

年份	处理	产量	千粒重	穗粒数	增产率
Year	Treatment	Yield/ ( $10^3 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ )	1000-grain mass/ g	Kernels perspike/ pcs	Increasing rate/ %
2022	CK	6.85 ± 0.79b	40.49 ± 1.84b	29.59 ± 3.38b	-
	S	7.79 ± 0.83b	42.29 ± 0.38ab	33.35 ± 0.80a	13.72
	K	6.82 ± 1.01b	42.36 ± 2.03ab	30.76 ± 2.19ab	-0.43
	S+K	7.25 ± 0.44b	40.53 ± 1.23b	32.01 ± 2.04ab	5.84
	SK	9.24 ± 1.05a	44.39 ± 1.42a	33.19 ± 1.30a	34.89
2023	CK	3.36 ± 0.15c	44.95 ± 0.65c	34.19 ± 3.2a	-
	S	3.46 ± 0.28c	46.68 ± 1.34b	32.41 ± 1.86a	2.89
	K	3.93 ± 0.13b	46.97 ± 1.42b	33.16 ± 3.75a	16.96

S+K	4.07 ± 0.27b	47.99 ± 0.69b	33.01 ± 3.42a	21.13
SK	4.48 ± 0.23a	49.71 ± 0.99a	34.25 ± 2.60a	33.33
ANOVA				
年份 Year	***	***	*	
叶面喷施 Foliar fertilizer	***	***	*	
年份×叶面喷施 Year×Foliar fertilizer	**	*	**	

注：\*、\*\*、\*\*\*分别表示不同处理在 0.05、0.01、0.001 水平上差异显著。同列不同小写字母表示相同年份不同处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )。CK: 去离子水; S: 山梨醇; K: 氯化钾; S+K: 山梨醇混合氯化钾; SK: 以氯化钾为钾源的山梨醇螯合钾, 下同。Note: \*, \*\*, \*\*\* indicates a significant difference at the level. Different lowercase letters in the same column indicate significant differences at the 0.05 level between different treatments in the same period. CK: deionized water; S: sorbitol; K: potassium chloride; S+K: sorbitol mixed with potassium chloride; SK: sorbitol chelated with chloride potassium. The same below.

## 2.2 叶面喷施对小麦籽粒矿质元素含量的影响

叶面喷施不同形态钾影响籽粒矿质元素的含量 (表 3)。与 K 处理相比, SK 处理显著增加籽粒中钾、锰及铁的含量, 其中钾增幅高达 84.12%; 与 S+K 处理相比, SK 处理籽粒钾含量显著增加 28.14%; 与单施山梨醇处理 (S) 相比, SK 处理显著增加籽粒中钾、锰、铁的含量, 增幅分别达 50%、33.74% 和 27.63%。与空白对照处理 (CK) 相比, 所有喷施处理均显著降低了籽粒中锌含量, 降幅介于 24.88%~32.91%。因此, 钾的形态是调控籽粒矿质营养的主要因素, 山梨醇螯合钾对钾、锰、铁的吸收表现出显著的协同效应, 而不同形态钾营养的补充均对籽粒锌的吸收表现为拮抗作用。

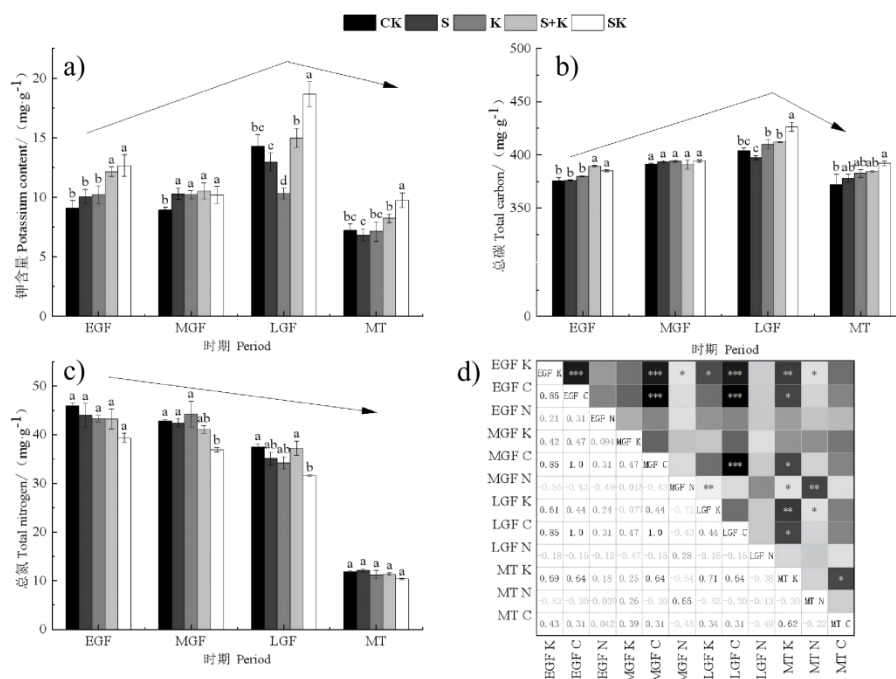
表 3 小麦籽粒矿质元素含量

Table 3 Mineral element content in wheat grains

处理 Treatment	钾 K/ (g·kg <sup>-1</sup> )	锰 Mn/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	铁 Fe/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	锌 Zn/ (mg·kg <sup>-1</sup> )
CK	3.03 ± 0.31cd	24.74 ± 0.86c	62.63 ± 2.34b	34.12 ± 1.86a
S	3.40 ± 0.37c	27.89 ± 0.31bc	60.98 ± 1.43b	24.80 ± 1.24b
K	2.77 ± 0.18d	31.28 ± 1.27b	66.29 ± 1.04b	22.89 ± 1.41b
S+K	3.98 ± 0.10b	32.78 ± 3.39ab	82.10 ± 3.53a	25.63 ± 0.45b
SK	5.10 ± 0.47a	37.30 ± 0.46a	77.83 ± 0.08a	24.25 ± 0.39b

## 2.3 叶面喷施对叶片钾、碳、氮含量的影响

叶面喷施不同形态钾对小麦灌浆期叶片钾、碳、氮含量具有调控效应 (图 2)。随灌浆阶段的推进, 叶片钾、碳含量基本呈先升后降趋势, 并于灌浆后期达到峰值; 而叶片总氮含量则随生育期推进持续下降, 至成熟期达到最低。与 K 处理相比, SK 处理显著提高灌浆后期及成熟期叶片钾含量, 增幅分别为 81.01% 与 36.60%; 同时, SK 处理下灌浆后期叶片碳含量显著提升 3.97%, 灌浆中期叶片氮含量降低 19.96%。与 S+K 处理相比, SK 处理下灌浆后期及成熟期叶片钾含量显著提高 24.44% 与 18.39%, 灌浆后期叶片碳含量提高 3.47%, 同时使灌浆后期叶片氮含量降低了 17.82%。相关性分析结果 (图 2d) 表明, 灌浆前期叶片钾含量与碳含量呈显著正相关, 灌浆中期、成熟期叶片氮元素与叶片中灌浆前期钾含量呈显著负相关。综上, 喷施以氯化钾为钾源的山梨醇螯合钾可促进叶片对钾、碳的吸收积累及氮的迁移。



注：EGF、MGF、LGF、MT分别为灌浆前期、中期、后期、成熟期，后面的K、C、N分别表示钾、碳和氮。\*、\*\*、\*\*\*分别表示不同处理在0.05、0.01、0.001水平上显著相关。下同。Note: EGF, MGF, LGF and MT stand for early, mid, late grain-filling, and maturity stages, while the following K, C, and N denote potassium, carbon, and nitrogen, respectively. \*, \*\*, and \*\*\* indicate significant correlations among different treatments at  $P < 0.05$ ,  $P < 0.01$ , and  $P < 0.001$ , respectively. The same below.

图2 小麦叶片钾 (a)、总碳 (b)、总氮 (c) 含量及其相关性 (d)

Fig. 2 Contents and correlations of potassium, carbon, and nitrogen in wheat leaf (a: Leaf potassium content; b: Total leaf carbon; c: Total leaf nitrogen; d: Correlation analysis)

## 2.4 叶面喷施对叶片抗氧化系统及生理活性的影响

叶面喷施钾肥可缓解小麦灌浆中期至成熟期叶片抗氧化酶 (CAT, POD, SOD) 活性的下降趋势 (图 3a~图 3c), 并显著抑制成熟期叶片MDA的积累 (图 3d)。灌浆期, 施钾处理 (K、S+K、SK) 均能有效维持CAT、SOD酶活性, 其中, 以SK处理调控效果最显著。具体表现为, SK处理在灌浆中期、灌浆后期CAT酶活性分别较CK显著提高 17.76%与 13.73%; 同生育期SOD酶活性在SK处理达到峰值  $237.35 \text{ U} \cdot \text{g}^{-1}$ , 至成熟期, SK处理POD活性高于K与S+K处理, 增幅分别达 115.53%、38.86%。与酶活性变化趋势相反, 叶面施钾可减少MDA含量的积累, 成熟期SK处理的MDA含量最低, 较S与S+K处理分别降低 25.65%与 7.51%。相关性分析 (图 4d) 表明, 小麦不同生育阶段叶片抗氧化酶活性之间存在相关性: 灌浆中期叶片CAT酶活性与POD、SOD酶活性呈正相关 ( $P < 0.05$ ); 灌浆前期POD酶活性与SOD酶活性亦呈正相关。此外, MDA含量与其他相关酶 (CAT、POD、SOD) 均呈负相关关系, 表明氧化损伤与抗氧化能力之间存在此消彼长的动态关系, 且二者在灌浆后期及成熟期表现出显著的负相关性。

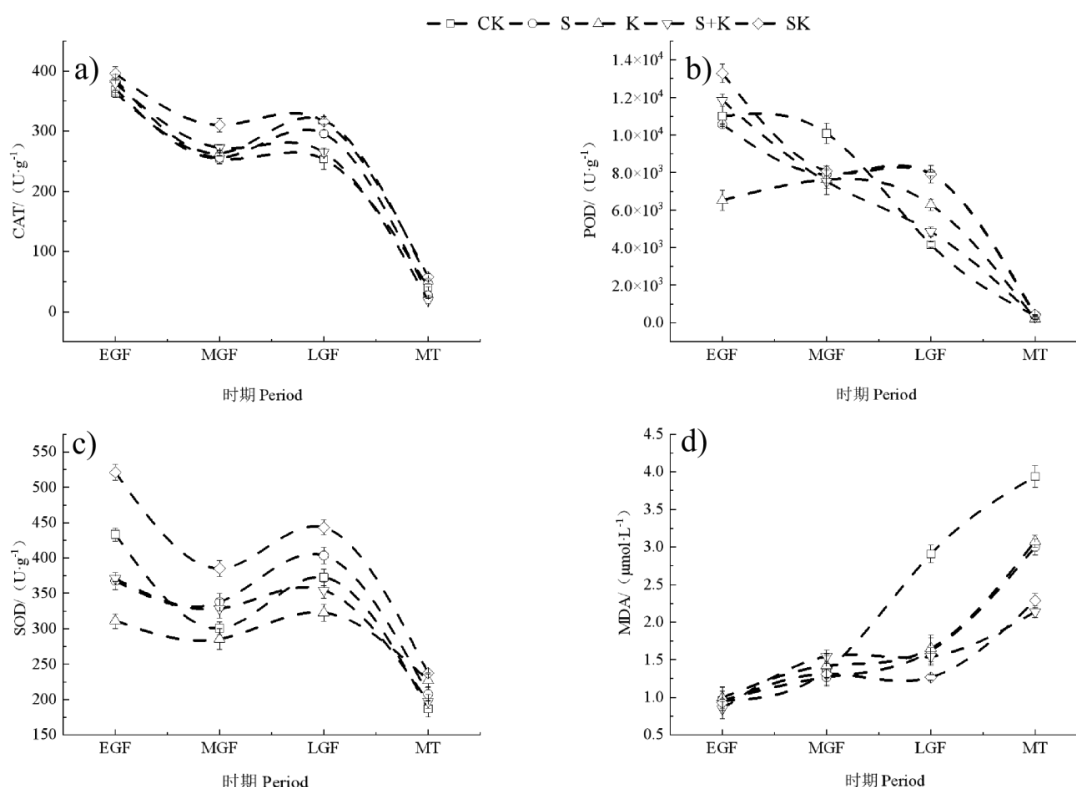


图3 小麦上三叶抗氧化系统 (a. 过氧化氢酶 (CAT) 活性; b. 过氧化物酶 (POD) 活性; c. 超氧化物歧化酶 (SOD) 活性; d. 丙二醛 (MDA) 含量)

Fig. 3 Antioxidant system in the flag leaf and upper two leaves of wheat (a. Catalase (CAT) activity; b. Peroxidase (POD) activity; c. Superoxide dismutase (SOD) activity; d. Malondialdehyde (MDA) content)

叶面喷施钾肥可维持叶片蛋白质合成酶活性 (ALT、GS、NR)。随灌浆期推进, 小麦上三叶 ALT、GS、NR 含量呈明显下降趋势, 直至成熟期达到最低 (图 4a~图 4c)。在不同形态钾肥处理中, SK 处理酶活性最高。具体而言, 与 K 处理相比, SK 处理缓解灌浆中期、后期 ALT 酶活性的下降速率, 降幅收窄 9.11%; 至成熟期, SK 处理的 NR 酶活性 (0.032 U·g<sup>-1</sup>) 较 K 与 S+K 处理分别显著提高 83.22%、229.79%; 在灌浆前期至灌浆后期阶段, SK 处理 GS 活性较 K 与 S+K 处理分别提高 11.42%、33.87%。相关性分析 (图 4d) 表明, 小麦叶片中三种关键蛋白质合成酶 (ALT、NR、GS) 的活性在不同生育阶段呈正相关关系。具体表现为, 灌浆后期 ALT 活性与灌浆期 NR 及各阶段 GS 酶活性呈极显著正相关 ( $P < 0.01$ ); 灌浆中后期 NR 酶活性与 ALT、GS 酶均呈显著正相关 ( $P < 0.05$ )。此外, 各生育阶段 GS 酶与灌浆后期、成熟期 ALT 酶活性及灌浆前期、中期 NR 酶呈极显著相关关系 ( $P < 0.01$ )。这揭示了蛋白质合成酶在籽粒灌浆阶段的协同增效机制。

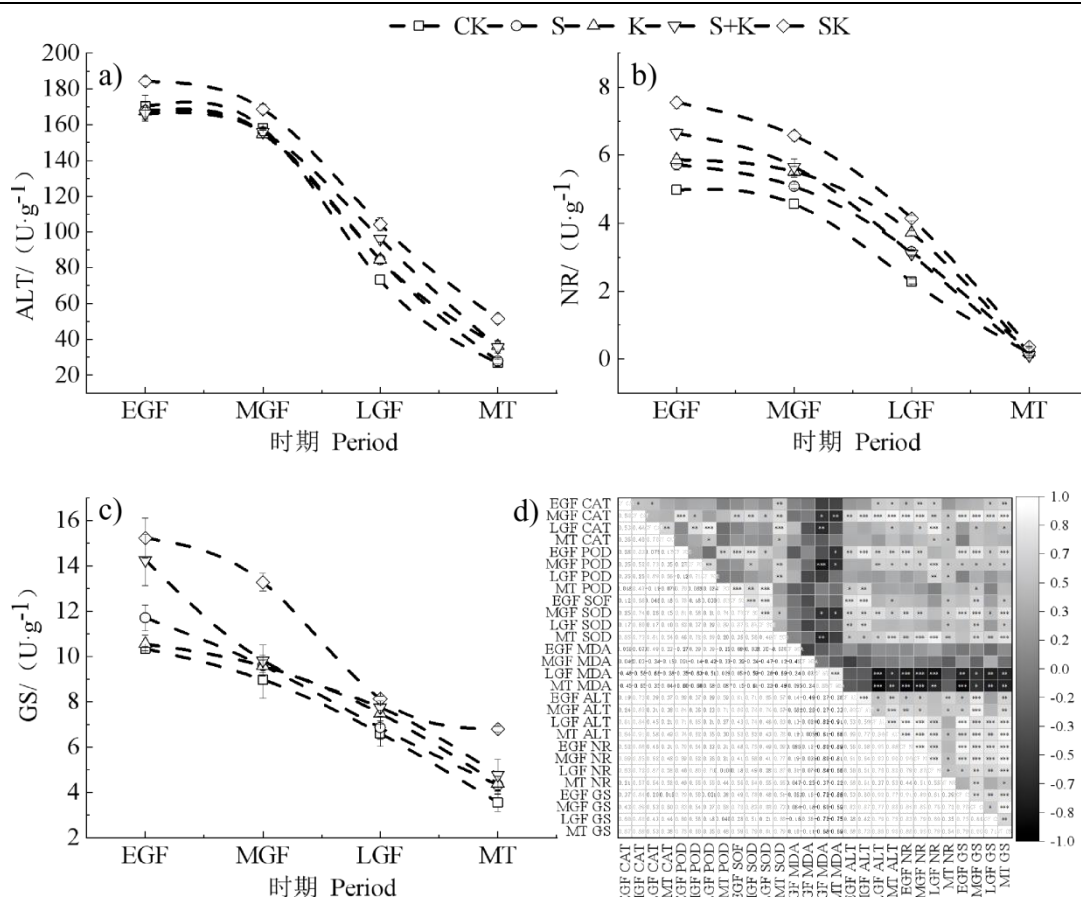


图4 小麦上三叶蛋白质合成酶活性 (a. 谷丙转氨酶 (ALT); b. 硝酸还原酶 (NR); c. 谷氨酰胺合成酶 GS); d. 相关性)

Fig. 4 Enzyme activities related to wheat leaf protein synthesis (a. Alanine aminotransferase activity (ALT); b. Nitrate reductase activity (NR); c. Glutamine synthetase activity (GS); d. Correlation analysis)

## 2.5 叶际细菌群落

**2.5.1 叶际细菌群落  $\alpha$  多样性** 叶面喷施不同形态的钾影响叶际细菌群落  $\alpha$  多样性 (表4)。K、S+K 和 SK 三种钾形态处理间细菌丰富度 (Chao1 指数和香农 Shannon 指数) 差异均未达显著水平。在群落多样性方面, SK 处理的香农 (Shannon) 与辛普森 (Simpson) 指数均为最低, 表明喷施山梨醇螯合钾在提高叶际细菌丰富度的同时也降低了细菌的群落多样性。此外, S 处理的 Shannon 与 Chao1 指数均最高, 说明单独喷施山梨醇可提高叶际细菌的丰富度与多样性。

表4 叶际细菌群落  $\alpha$  多样性指数

Table 4  $\alpha$  diversity index of phyllosphereic bacterial community

处理 Treatment	Chao 1 指数 Chao1 index	香农指数 Shannon index	辛普森指数 Simpson index
CK	5 622 ± 200b	9.01 ± 0.14ab	0.99a
S	6 628 ± 147a	9.26 ± 0.03a	0.99a
K	4 496 ± 452c	9.02 ± 0.10ab	0.99a
S+K	4 310 ± 82c	8.95 ± 0.15ab	0.99a

**2.5.2 叶际细菌群落与物种组成** 叶际细菌群落结构在门水平和属水平上均受到钾肥形态的影响。所有处理共检测到 52 个细菌门，其中相对丰度大于 1.3% 的优势菌门共有 9 个，分别为放线菌门 (Actinobacteriota)、变形菌门 (Proteobacteria)、厚壁菌门 (Firmicutes)、蓝藻门 (Cyanobacteria)、拟杆菌门 (Bacteroidota)、绿弯菌门 (Chloroflexi)、酸杆菌门 (Acidobacteriota)、浮霉菌门 (Planctomycetota)、芽单胞菌门 (Gemmatimonadota)。虽然不同处理间门水平细菌组成相似，但其相对丰度存在差异 (图 5a)。与 K、S+K 处理相比，SK 处理降低放线菌门的相对丰度 (21.63%、4.26%) 与蓝藻门相对丰度 (36.05%、62.03%)，增加厚壁菌门相对丰度 (57.36%、50.00%)。在属水平上，SK 处理对特定的有益菌属的富集作用尤为明显 (图 5b)，肠球菌属 (*Enterococcus*) 作为叶片中优势菌属，可利用碳源、氮源从而促进作物生长，其相对丰度在 0.004%~8.996% 之间，且 SK 处理显著高于其他处理。此外，鞘氨醇单细胞菌属 (*Sphingomonas*) 作为植物叶际固氮微生物群落的核心菌群，具有促进植物生长、提高植物抗逆性、促进养分循环等功能，该属在各处理中的相对丰度范围 2.476%~2.645%，与 CK 处理相比，所有叶面喷施钾处理 (K、S+K、SK) 均提高其相对丰度。

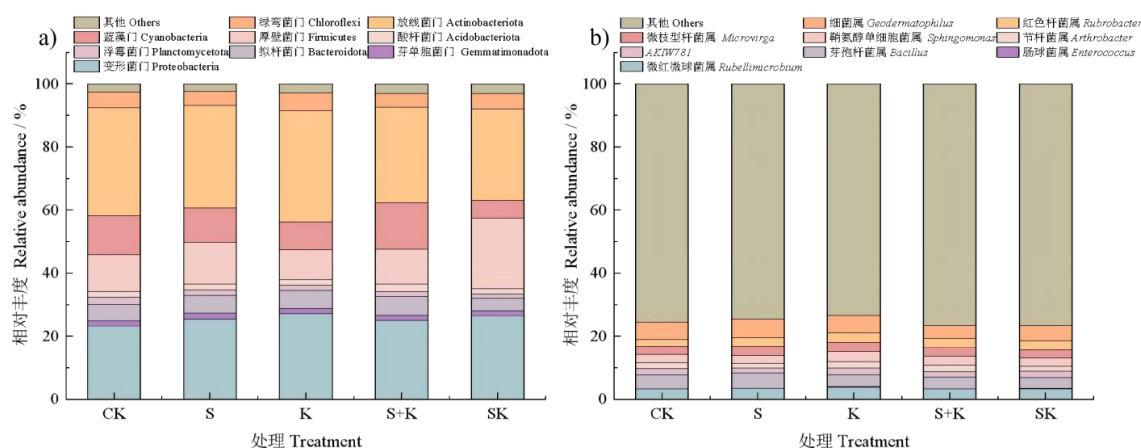
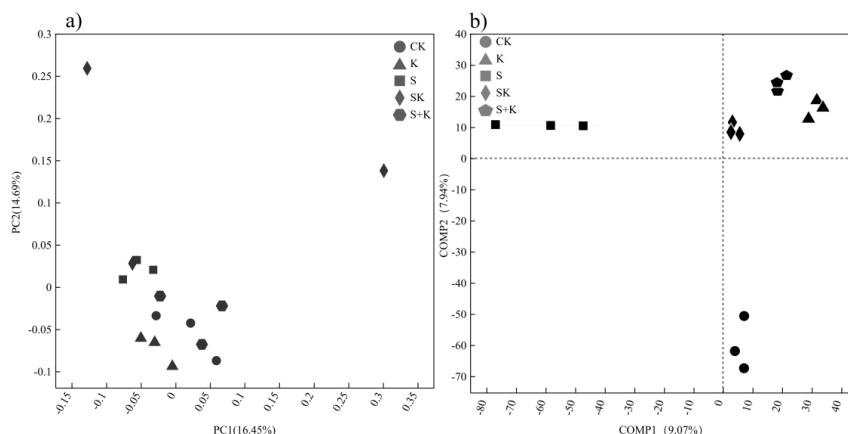


图 5 叶际细菌群落在门 (a) 和属 (b) 水平的差异

Fig. 5 Differences in phyllospheric bacterial community at the phylum (a) and genus (b) level

**2.5.3 叶际细菌群落  $\beta$  多样性** 主坐标分析 (PCoA) 与布雷-柯蒂斯距离算法 (Bray-Curtis) (图 6a) 表明，SK 处理与其他处理的叶际样本细菌群落之间差异显著。第一与第二坐标轴共解释 31.14% 的样本变异，其中第一主坐标轴 (PCoA1) 揭示 16.45% 的变异，第二主坐标轴 (PCoA2) 揭示 14.69% 的变异。就样本空间分布而言，SK 处理在 PCoA 空间中的分布具有很高的离散度，表明该处理对叶际细菌群落演替的诱导作用具有较高的异质性或特定的时间依赖性。相比之下，其他四个处理 (CK、S、K、S+K) 之间的样本间差异性较小，群落结构相似度相对更高。利用偏最小二乘判别分析 (PLS-DA) 对微生物丰度进行样品类别预测 (图 6b)，主成分 1 (COMP1) 揭示组间 9.07% 的差异，主成分 2 (COMP2) 揭示组间 7.94% 的差异。处理间样本聚类现象较好，组间存在明显差异。CK 处理样本点独立聚集在第四象限，与其他施肥处理 (位于第一、二象限) 显著区分，表明叶面施肥对叶际细菌群落结构存在显著调控作用。此外，S 处理 (位于第二象限，沿 COMP1 轴向左偏移) 与所有施钾处理 (SK、K、S+K，均聚集在第一象限) 沿 COMP1 轴得以区分。而不同形态的钾肥处理 (K、S+K、SK) 虽有一定分离，但聚类程度均高于 CK 和 S 处理，说明喷施不同形态的钾影响叶际细菌群落的结构组成，这种效应显著强于山梨醇单碳源处理。



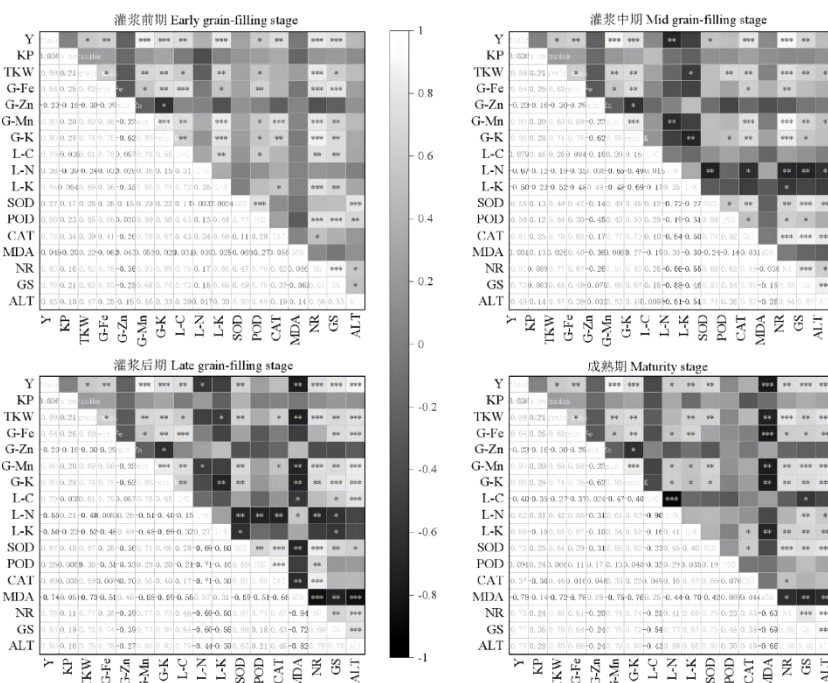
注: COMP: 主成分。Note: COMP: Component.

图 6 Bate 多样性分析 (a. 主坐标分析 (PCoA); b. 偏最小二乘法判别分析 (PLS-DA))

Fig. 6 Bate diversity analysis (a. Principal coordinate analysis (PCoA); b. Partial least squares discriminant analysis (PLS-DA) analysis)

## 2.6 叶片生理生化指标对产量的响应

斯皮尔曼相关性分析 (图 7) 表明, 小麦不同生育阶段与叶片生理生化指标对产量的形成存在多重贡献, 具体而言: 在养分水平上, 叶片氮含量在所有生育期均与产量呈显著正相关, 碳含量在灌浆前期、后期与产量显著正相关, 钾含量在灌浆前期与灌浆后期亦与产量呈显著正相关; 在抗氧化系统方面, 超氧化物歧化酶 (SOD) 活性在灌浆中期—灌浆后期与产量相关, 而成熟期丙二醛 (MDA) 与产量呈显著负相关关系 ( $P<0.001$ ); 在蛋白质合成酶活性上, NR、GS 的活性在整个灌浆周期均与产量指标呈显著正相关, 且 ALT 活性在灌浆后期—成熟期对产量与品质的形成发挥显著的协同效应。

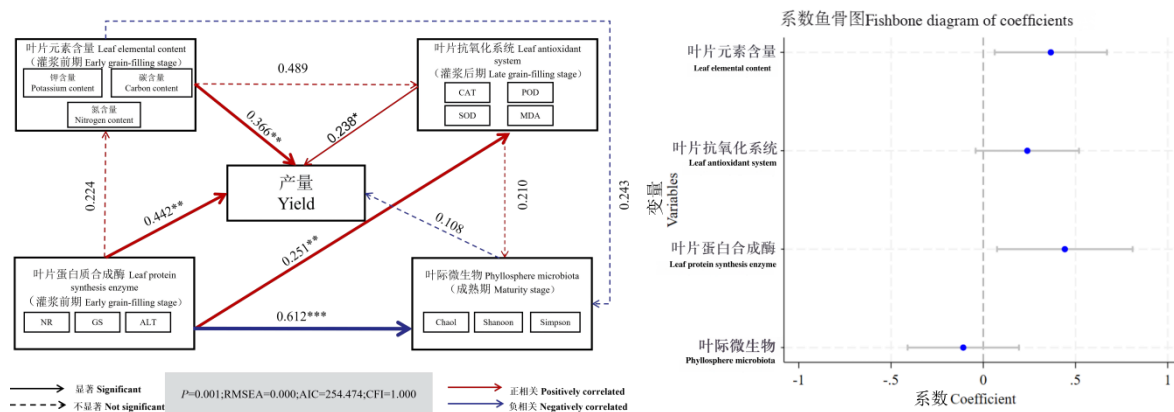


注: Y: 产量; KP: 穗粒数; TKW: 千粒重; G: 籽粒; L: 叶片; Fe: 铁; Zn: 锌; Mn: 锰; K: 钾; C: 碳; N: 氮。Note: Y: grain yield, KP: kernels per spike, TKW: thousand-kernel weight, G: grain, L: leaf, Zn: zinc, Mn: manganese, K: potassium, C: carbon, N: nitrogen.

图 7 各生育阶段小麦产量、品质及叶片生理生化指标相关性

Fig. 7 Correlation analysis of wheat yield, quality, and leaf physiological-biochemical indicators at different growth stages

结构方程模型 (SEM) (图8) 表明, 叶片元素含量、叶片抗氧化系统、叶片蛋白质合成酶及叶际微生物均影响小麦产量的形成。所有因子均对小麦产量形成直接或间接影响, 产量与叶片元素 (0.366,  $P<0.05$ )、叶片抗氧化系统 (0.238,  $P<0.1$ )、叶片蛋白质合成酶 (0.442,  $P<0.05$ ) 均呈显著正相关关系。其中, 叶面蛋白质合成酶不仅直接促进产量形成, 还与抗氧化系统存在显著正向协同 (0.521), 并与叶际微生物群落结构形成极显著负相关 (0.612,  $P<0.01$ ), 构成“直接作用+间接促进”的双重增产路径。



注: RMSEA: 近似误差均方根; AIC: 赤池信息准则; CFI: 比较拟合指数; \*, \*\*, \*\*\*分别表示不同处理在 0.05、0.01、0.001 水平上差异显著。Note: RMSEA: Root mean square error of approximation, AIC: Akaike information criterion, CFI: Comparative fit index. \*, \*\*, \*\*\* indicate significant difference at the level of 0.05, 0.01, 0.001, respectively.

图 8 小麦产量与叶片生理生化指标结构方程模型 (SEM)

Fig. 8 Structural equation model (SEM) of wheat yield and leaf physiological - biochemical indicators

### 3 讨论

#### 3.1 山梨醇螯合钾对小麦籽粒品质、产量及其构成要素的影响

叶面喷施钾肥通过增强叶片光合效率<sup>[12]</sup>、提高关键酶活性 (NR、GS 酶等)、优化碳氮代谢过程, 并促进矿质元素 (氮、磷、钾) 的吸收与分配, 从而有效提升小麦产量及其构成因子 (穗粒数、千粒重) <sup>[13-14]</sup> 两季田间试验结果表明, 相对于未喷施钾肥处理 (CK、S), 喷施钾肥处理 (K、S+K、SK) 可提高小麦产量, 其中, 以 SK 处理连续两年增产效果最突出 (表 2), 表现出较强的抗逆稳产优势。以氯化钾为钾源螯合的山梨醇螯合钾作为一种新型叶面肥, 其优势在于通过螯合反应使钾离子与配体山梨醇形成稳定螯合物后提升了钾的吸收利用效率, 山梨醇本身亦可作为渗透调节物质和碳源直接参与植株光合作用、呼吸作用等生理过程, 进而促进植物的生长<sup>[15-16]</sup>; 离子态钾转为螯合态钾后可加快在植物体内的吸收与韧皮部的迁移, 从而促进植物的生长发育。课题组前期研究结果<sup>[17]</sup>已证实, 喷施山梨醇螯合钾能够显著促进花生和小麦关键生育期地上部钾素积累、分配及向籽粒的转运, 最终实现增产效果。本研究结果表明, 山梨醇螯合钾进入叶片后, 通过激活叶片抗氧化系统 (SOD、POD、CAT 酶活性提高), 同时降低膜脂过氧化产物丙二醛 (MDA) 含量 (图 3), 减轻氧化损伤, 缓解叶片关键酶 (ALT、NR、GS) 活性下降 (图 4), 促进叶片酶活性间的协同作用, 提高叶片的光合碳同化与氮同化效率, 增强叶片作为“源”的碳、氮供应能力,

进而提升养分从小麦叶片向籽粒的迁移、吸收以及转化，最终增加小麦籽粒生物量，达到增产的目的。

叶面喷施不同形态的钾肥对小麦籽粒微量元素的积累具有重要调控作用。本研究结果（表 3）表明，施用不同形态钾肥显著影响籽粒对钾、锰、铁、锌的吸收，对钾、锰、铁表现为促进，但所有喷施处理均显著降低籽粒 Zn 含量。这一方面可能由于“稀释效应”，即产量的增加导致锌浓度的下降；另一方面可能由于  $K^+$  与  $Zn^{2+}$  在进入籽粒过程中存在竞争位点。SK 处理的收获期小麦籽粒钾积累量远超其他处理，表明螯合钾形态对钾及微量元素的协同转运具有独特优势。灌浆期是籽粒营养物质积累的关键阶段，此阶段的生理过程直接决定籽粒营养物质的含量<sup>[18]</sup>。本试验于灌浆期进行三次叶面喷施，钾离子经过气孔与角质层渗透进入叶片后，通过调节叶片中氮同化酶（如 NR、GS），促进叶片光合产物合成<sup>[19]</sup>；加快叶片中碳元素积累、氮元素的迁移（图 2），促进“源”（叶片）至“库”（籽粒）的养分迁移<sup>[20]</sup>；上调作物体内转运蛋白，驱动 Fe、Mn 等微量元素再分配（表 3），最终提高籽粒中微量元素含量<sup>[4]</sup>。上述机制与本研究结论一致，叶面喷施山梨醇螯合氯化钾可通过其独特的优势，缓解小麦叶片关键酶活性下降速率，增强叶片碳、氮代谢，促进营养物质再分配，从而提高籽粒中营养物质积累。

### 3.2 山梨醇螯合钾对不同生育时期叶片生理代谢的影响

叶片碳（C）、氮（N）含量及其比值（C/N）是反映小麦营养同化与转运效率的关键指标。研究表明，叶面喷施不同形态钾肥对叶片碳、氮代谢具有差异化调控作用。喷施钾肥处理（K、S+K、SK）均显著降低灌浆后期叶片总氮含量，而总碳含量在整个生育周期内呈上升—下降动态变化趋势；SK 处理表现最突出，在灌浆后期叶片总碳含量达到最高值，同时叶片总氮含量呈下降趋势，至成熟期达到最低值，致使成熟期叶片碳氮比达到最高 37.95，高于 K、S+K 处理（图 2）。叶片碳含量是植株合成其他物质的基础，钾素对小麦的碳代谢有显著影响，尤其在灌浆期，钾肥可促进茎和叶鞘中的碳水化合物向籽粒的运输与积累，加速碳水化合物从叶片向外转运，从而导致叶片中总碳含量的相对降低。在灌浆后期—成熟期，SK 处理叶片碳氮比呈上升趋势，并在成熟期碳氮比达到最高值（图 2）。叶片碳、氮含量的相对变化是衡量植株碳、氮代谢强度的重要指标，当碳氮比达到最大时意味着碳同化速率高于氮元素的需求，可为籽粒提供充足的碳水化合物，在灌浆后期，小麦需要大量的碳水化合物来支持籽粒的发育。较高的碳氮比可确保足够的碳源供应，这解释了表 2 中 SK 处理显著提升千粒重的原因，与前人关于“碳氮协同促进籽粒充实”的研究结果<sup>[21]</sup>相一致。

叶面喷施不同形态的钾对小麦叶片抗氧化系统的影响随灌浆进程而异（图 3）。随着活性氧（ROS）累积，细胞膜稳定性下降，导致膜脂过氧化产物丙二醛（MDA）含量升高，加速叶片老化。本研究结果发现，SK 处理表现出最佳抗氧化效能，其叶片 CAT、SOD、POD 酶活性高于 K、S+K 处理，且其 MDA 含量在灌浆末期与成熟期均维持在最低水平（图 3）。适宜的供钾可增强 ROS 清除能力、延缓衰老，这与大多数研究结果<sup>[22]</sup>一致。山梨醇不仅可作为矿质载体与渗透促进剂，其分子结构还可螯合钾离子形成稳定环状结构。 $K^+$  作为多种酶（如 SOD、ATP 酶）的活化剂，通过调控气孔运动增强叶片保水能力，并与山梨醇共同激活抗氧化系统<sup>[23]</sup>。本研究发现，以氯化钾为钾源的山梨醇螯合钾能够增强各个时期 ALT、GS、NR 的活性（图 4），与 Hu 等<sup>[24]</sup>的研究结果一致，棉花中的钾积累量与氮积累量呈线性关系，表明施钾能够影响棉花的氮代谢。此外，研究发现，钾可改善小麦在正常供水条件下的碳、氮代谢。小麦叶片在缺钾条件下，会减少韧皮部氨基酸从源端至库端的输出，SK 处理中山梨醇螯合钾因其独特的结构优势可在韧皮部内快速通过<sup>[25]</sup>。这种由 SK 介导的氮代谢增强，不仅解释了叶片氮含量的规律性下降，更从酶学水平证实了山梨醇螯合钾在

平衡植株碳氮代谢、提升籽粒品质方面的关键作用。

### 3.3 山梨醇螯合钾对叶际微生物的影响

叶际微生物可通过影响植物营养吸收、病害生物防治、生长激素的产生及植物非生物抗逆性等途径<sup>[26]</sup>，直接或间接地影响农作物的产量与品质，对农业的可持续发展与区域环境安全具有重要作用<sup>[27-28]</sup>。本研究结果（表 4）表明，叶面喷施钾肥降低了叶际细菌群落  $\alpha$  多样性（丰富度、多样性），这可能是由于叶面喷施钾肥相对于未喷施钾肥处理促进了叶片中碳、氮代谢过程及氮元素等营养物质向籽粒的迁移，具体表现为喷施钾肥后叶片氮元素含量的下降及成熟期籽粒矿质养分含量的提高（表 3），导致叶片微环境中可供微生物利用的氮源等营养相对不足，进而减少了微生物的定殖总量<sup>[29]</sup>。虽然叶际细菌多样性下降（表 3），但是喷施钾肥处理定向富集了具有促生功能的核心菌群。如 SK 处理显著改变门水平群落组成，降低放线菌门、蓝藻门的相对丰度，同时增加厚壁菌门相对丰度（图 5a），此结果与前人<sup>[30]</sup>报道小麦叶际微生物的优势菌门相一致。在属水平上，SK 处理中肠球菌属（*Enterococcus*）的相对丰度显著高于 S、S+K 两个处理（图 5b）。已有研究表明，肠球菌属能够利用多种碳源、氮源并具有促进作物生长的潜力，本研究与叶面喷施糖类物质可增加植物叶片中有益的肠球菌属的结果<sup>[31]</sup>相一致。此外，SK 处理中鞘氨醇单细胞菌属（*Sphingomonas*）相对丰度高于 CK 处理（图 5b），该菌属（*Sphingomonas*）作为植物叶际固氮微生物群落的核心菌群，可通过促进叶片碳、氮代谢等生理过程，提高小麦抗逆性、养分利用效率及促进养分循环等功能<sup>[32]</sup>。因此，叶面喷施钾肥虽降低了微生物总体多样性，但可能通过富集上述具有特定促生功能的关键有益菌属，优化叶际微生物细菌群落的功能构成，从而间接贡献于作物产量的形成与品质的提升。

### 3.4 影响产量的决定因素

本研究综合运用斯皮尔曼相关性分析与结构方程模型（SEM），旨在探究以氯化钾为钾源的山梨醇螯合钾处理对小麦叶片生理生化与叶际细菌群落协同增效的内在机制。首先，生理指标对产量的驱动作用，相关性分析（图 8b）表明，叶片元素含量（碳、氮、钾）、抗氧化系统（SOD、POD、CAT、MDA）及蛋白质合成酶（NR、GS、ALT）活性均与产量呈显著正相关。具体而言，灌浆期叶片碳与钾积累是生物量形成的主要驱动因子，与产量显著正相关，这与前人<sup>[33]</sup>研究结论相一致；抗氧化系统各指标的贡献与生育周期有关，SOD 活性在灌浆中后期与产量、品质显著相关，而成熟期 MDA 含量与产量的强负相关（图 8a），进一步印证了生育后期氧化胁迫对产量的抑制作用<sup>[33][34]</sup>；此外，蛋白质合成酶在四个生育阶段均与产量保持稳定正相关，ALT 在灌浆后期至成熟期与产量及品质呈正相关（图 8b），凸显了氮代谢过程对产量形成的持续贡献<sup>[35]</sup>。各体系间也存在相互关系，叶片蛋白质合成酶与叶片抗氧化系统呈显著相关，NR 酶与 GS 酶作为叶片氮同化关键酶，其活性与叶际细菌群落呈显著正相关（图 8a），推测是由于叶际微生物通过固氮微生物群落参与叶片氮代谢过程。综上，小麦产量形成受叶片生理过程多阶段、多途径的调控影响，灌浆前期以叶片元素（K、C、N）与蛋白质合成酶为主导，灌浆中后期由抗氧化系统与氮代谢酶（NR、GS）协同调控，而成熟期叶际微生物则通过氮代谢途径间接参与。

尽管本研究揭示了产量形成的关键因素，但其深层机制仍需深入探究。后续研究可利用分子生物学和代谢组学技术，验证山梨醇螯合钾在叶片细胞内的跨膜转运与信号传导途径；通过宏基因组学和分离培养手段，明确受山梨醇调控的关键叶际微生物种类及其生理功能；通过调控叶片生理与叶际微生物互作，实现作物增产与品质提升。

## 4 结 论

两年农田试验表明, 喷施不同形态钾肥均促进小麦产量的提升, 与氯化钾、山梨醇混合氯化钾处理相比, 以氯化钾为钾源的山梨醇螯合钾第一年(2022年)增产率分别为35.48%、27.44%; 第二年(2023年)增产率分别为13.99%、10.07%, 2022年千粒重分别增加4.79%、9.52%, 穗粒数分别增加7.90%、3.69%, 2023年千粒重分别增加5.83%、3.58%, 穗粒数分别增加3.29%、3.76%。2023年进行进一步深入分析, 发现其增产效应具体表现在喷施螯合态钾后, 提高叶片钾含量以及碳、氮含量, 激活叶片抗氧化系统及蛋白质合成酶活性, 调控叶片生理生化指标, 改变叶际细菌群落结构。表现为厚壁菌门相对丰度显著提升, 而放线菌门与蓝藻菌门丰度下降, 同时定向富集了肠球菌属与芽孢杆菌属。相关性分析及产量影响因子路径分析进一步表明, 叶片养分含量、抗氧化水平及蛋白质合成酶与产量均存在显著正相关关系。综上, 以氯化钾为钾源的山梨醇螯合钾作为新型叶面喷施肥, 对小麦增产提质有重要的应用价值。

## 参考文献 (References)

- [1] Shah I H, Wu J H, Li X Y, et al. Exploring the role of nitrogen and potassium in photosynthesis implications for sugar: Accumulation and translocation in horticultural crops[J]. *Scientia Horticulturae*, 2024, 327: 112832.
- [2] Li K L, Tang R J, Wang C, et al. Potassium nutrient status drives posttranslational regulation of a low-K response network in *Arabidopsis*[J]. *Nature Communications*, 2023, 14(1): 360.
- [3] Zhu L X, Sun Y M, Wang R F, et al. Applied potassium negates osmotic stress impacts on plant physiological processes: A meta-analysis[J]. *Horticulture Research*, 2024, 12(2): uhae318.
- [4] Gu X Y, Liu Y, Liu Y H, et al. Effects of foliar spraying of potassium fertilizer on the contents of microelement, phytic acid and HMW-GS in wheat flour[J]. *Journal of Cereal Science*, 2023, 110: 103621.
- [5] Meng Y D, Wu Y, Zhao Y J, et al. Dynamics of chemical fertilizer retail price in China and countermeasures for stabilizing price and ensuring supply[J]. *Phosphate & Compound Fertilizer*, 2023, 38(9): 8-12. [孟远夺, 吴优, 赵英杰, 等. 我国化肥零售价格动态与稳价保供对策[J]. 磷肥与复肥, 2023, 38(9): 8-12.]
- [6] Li B W. The effect of the stability of land transfer contract on the fertilization intensity and environmental efficiency of the farmer who transfers in land[J]. *Journal of Natural Resources*, 2019, 34(11): 2317-2332. [李博伟. 土地流转契约稳定性对转入土地农户化肥施用强度和效率的影响[J]. 自然资源学报, 2019, 34(11): 2317-2332.]
- [7] Han C H, Zhang H Y, Zhao L, et al. Effects of sorbitol-chelated potassium through foliar spraying on wheat yield, potassium availability, and rhizosphere microbiome[J]. *Soils*, 2025, 57(2): 290-299. [韩传浩, 张欢洋, 赵立, 等. 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[J]. 土壤, 2025, 57(2): 290-299.]
- [8] Cui Y Z, Bai L Y, Sun W, et al. Study on separation, purification and detection of sugar alcohol chelated calcium[J]. *Modern Chemical Industry*, 2022, 42(6): 227-231, 236. [崔玉照, 白利勇, 孙伟, 等. 糖醇螯合钙的分离纯化及检测方法研究[J]. 现代化工, 2022, 42(6): 227-231, 236.]
- [9] Yan D Y, Sun W, Li P C, et al. A preparation and detection method for a potassium fertilizer chelated with sorbitol: CN113603511A[P]. 2021-11-05. [颜冬云, 孙伟, 李鹏超, 等. 一种山梨醇螯合钾肥的制备及检测方法: CN113603511A[P]. 2021-11-05.]
- [10] Bao S D. Soil and agricultural chemistry analysis[M]. 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2000:106-107. [鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000: 106-107.]
- [11] Liu C S, Zhao D F, Ma W J, et al. Denitrifying sulfide removal process on high-salinity wastewaters in the presence of *Halomonas* sp.[J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2016, 100(3): 1421-1426.
- [12] Simkin A J, López-Calcagno P E, Raines C A. Feeding the world: Improving photosynthetic efficiency for sustainable crop production[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2019, 70(4): 1119-1140.
- [13] Hou W F. Physiological mechanism of combined application of nitrogen and potassium on improving rice yield and nitrogen use efficiency[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2019. [侯文峰. 氮钾配施提高水稻产量及氮肥利用效率的生理机制[D]. 武汉: 华中农业大学, 2019.]
- [14] Dai T B, Zou T X, Jing Q, et al. Effects of nitrogen and potassium fertilization on key regulation enzyme activities involved in grain protein formation in winter wheat[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(9): 4976-4982. [戴廷波, 邹铁祥, 荆奇, 等. 氮、钾水平对小麦籽粒蛋白质合成关键酶活性的影响[J]. 生态学报, 2009, 29(9): 4976-4982.]
- [15] Yang G, Li L Y, Huang M L, et al. Progresses in study on sorbitol effect on plants resistance[J]. *Soils*, 2018, 50(3): 446-454. [杨光, 李玲玉, 黄明丽, 等. 山梨醇对植株抗逆性作用的研究进展[J]. 土壤, 2018, 50(3): 446-454.]
- [16] Li M J, Li P M, Ma F W, et al. Sugar metabolism and accumulation in the fruit of transgenic apple trees with decreased sorbitol synthesis[J]. *Horticulture Research*, 2018, 5: 60.
- [17] Sun W, Zhang H Y, Wei Q Q, et al. Effects of foliar spraying of sorbitol chelated potassium on peanut yield and rhizosphere soil microbial community[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2024, 61(4): 1099-1110. [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.]
- [18] Love B. Plant hormones associated with increasing grain number and yield potential in wheat (*Triticum aestivum* L.) and their genetic regulation[M]. Nottingham: University of Nottingham (United Kingdom), 2021.
- [19] Hasanuzzaman M, Borhannuddin Bhuyan M H M, Nahar K, et al. Potassium: A vital regulator of plant responses and tolerance to abiotic stresses[J]. *Agronomy*, 2018, 8(3): 31.
- [20] Yilmaz O, Kazar G A, Cakmak I, et al. Differences in grain zinc are not correlated with root uptake and grain translocation of zinc in wild emmer and durum wheat genotypes[J]. *Plant and Soil*, 2017, 411(1): 69-79.

- [21] Xue L H, Yang L Z, Fan X H. Estimation of nitrogen content and C/N in rice leaves and plant with canopy reflectance spectra[J]. Acta Agronomica Sinica, 2006, 32(3): 430-435. [薛利红, 杨林章, 范小晖. 基于碳氮代谢的水稻氮含量及碳氮比光谱估测[J]. 作物学报, 2006, 32(3): 430-435.]
- [22] Sarwar M, Saleem M F, Maqsood H, et al. Strengthening leaf physiological functioning and grain yield formation in heat-stressed wheat through potassium application[J]. Frontiers in Plant Science, 2022, 13: 1005773.
- [23] Römheld V, Kirkby E A. Research on potassium in agriculture: Needs and prospects[J]. Plant and Soil, 2010, 335(1): 155-180.
- [24] Hu W, Zhao W Q, Yang J S, et al. Relationship between potassium fertilization and nitrogen metabolism in the leaf subtending the cotton (*Gossypium hirsutum* L.) boll during the boll development stage[J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2016, 101: 113-123.
- [25] Li T S, Wei Q Q, Huang M L, et al. Research progresses on the application of sugar alcohol chelated fertilizers in agriculture[J]. Acta Pedologica Sinica, 2021, 58(6): 1393-1403. [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.]
- [26] Bashir I, War A F, Rafiq I, et al. Phyllosphere microbiome: Diversity and functions[J]. Microbiological Research, 2022, 254: 126888.
- [27] Yang K, Wang H L, Ye K H, et al. Advances in research on phyllosphere microorganisms and their interaction with plants[J]. Journal of Yunnan Agricultural University(Natural Science Edition), 2021, 36(1): 155-164. [杨宽, 王慧玲, 叶坤浩, 等. 叶际微生物及与植物互作的研究进展[J]. 云南农业大学学报(自然科学版), 2021, 36(1): 155-164.]
- [28] Zhou Y, Deng M R, Du J, et al. Development of agricultural microbial industry in China[J]. Strategic Study of CAE, 2022, 24(5): 197-206. [周杨, 邓名荣, 杜娟, 等. 我国农业微生物产业发展研究[J]. 中国工程科学, 2022, 24(5): 197-206.]
- [29] Song Y, Chen H H, Zhang Y Y, et al. Research advances on plant phyllosphere microorganisms and their responses to fertilization[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2025, 31(5): 1017-1032. [宋毅, 陈航航, 张洋洋, 等. 植物叶际微生物及其对施肥响应的研究进展[J]. 植物营养与肥料学报, 2025, 31(5): 1017-1032.]
- [30] Yi Z H, Cui J J, Fu Y M, et al. The effect of wheat seedling density on photosynthesis may be associated with the phyllosphere microorganisms[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2020, 104(23): 10265-10277.
- [31] Perazzolli M, Nesler A, Giovannini O, et al. Ecological impact of a rare sugar on grapevine phyllosphere microbial communities[J]. Microbiological Research, 2020, 232: 126387.
- [32] Zhu Y G, Peng J J, Chen C, et al. Harnessing biological nitrogen fixation in plant leaves[J]. Trends in Plant Science, 2023, 28(12): 1391-1405.
- [33] Wang S, Mo J H, Wang Y, et al. Dry matter accumulation and N, P, K absorption and utilization in rice-ratoon rice system[J]. Chinese Journal of Rice Science, 2018, 32(1): 67-77. [王森, 莫菁华, 汪洋, 等. 水稻-再生稻体系干物质积累及氮磷钾养分的吸收利用[J]. 中国水稻科学, 2018, 32(1): 67-77.]
- [34] Lu Y, Li X L, Yu T Y, et al. Response of root morphology, leaf physiology and yield of stay-green and presenility types of peanut to foliar phosphorus application[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2020, 26(3): 532-540. [路亚, 李晓亮, 于天一, 等. 持绿和早衰花生品种根系形态、叶片生理及产量对叶面喷施磷肥的响应[J]. 植物营养与肥料学报, 2020, 26(3): 532-540.]
- [35] Qu W K, Xu X X, Zhao J K, et al. Effect of nitrogen application on photosynthetic physiology, grain-filling characteristics and yield and quality after anthesis of winter wheat under drip irrigation[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022, 36(5): 327-336. [曲文凯, 徐学欣, 赵金科, 等. 施氮对滴灌冬小麦花后光合生理、灌浆特性及产量品质的影响[J]. 水土保持学报, 2022, 36(5): 327-336.]

(责任编辑: 陈荣府)