

DOI: 10.11766/trxb202301030003

孙伟, 张欢洋, 魏倩倩, 曾凡鹤, 李腾升, 赵立, 韩传浩, 张静, 张子琪, 石祥, 颜冬云. 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.

SUN Wei, ZHANG Huanyang, WEI Qianqian, ZENG Fanhe, LI Tengsheng, ZHAO Li, HAN Chuanhao, ZHANG Jing, ZHANG Ziqi, SHI Xiang, YAN Dongyun. 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.

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*

孙伟, 张欢洋, 魏倩倩, 曾凡鹤, 李腾升, 赵立, 韩传浩, 张静, 张子琪, 石祥, 颜冬云[†]

(青岛大学环境科学与工程学院, 山东青岛 266071)

摘要: 中国农用钾肥严重依赖进口, 通过改变钾元素的存在形态进一步提高钾的利用效率, 具有重要现实意义。以花生(品种为花育 22)为供试作物, 2020—2021 年连续进行了两季大田试验, 采用完全随机区组设计, 考察自由离子态钾(无机盐钾)与山梨醇螯合态钾对花生产量、干物质积累量、钾积累量以及花生根际土壤细菌群落结构的影响。在常规施肥基础上进行花生不同生育期喷施试验, 设置清水对照(CK)、无机钾(IK)、山梨醇混合无机钾(MK)、山梨醇螯合钾(SK, 自制)和市售螯合钾(LK, 国外产品)5 个处理。结果表明, 叶面追施钾肥可显著提高花生产量, 与 IK 或 LK 处理相比, SK 处理两年平均增产率分别提高 18.9%、14.97%, 产量构成要素百仁重、百果重、饱果率均得到显著提升; 山梨醇螯合钾处理的花生植株干物质积累量、钾积累量均得到显著提高, 说明自制山梨醇螯合钾能够促进钾营养元素在植株中的分配。与其他处理相比, 山梨醇螯合钾处理增加了花生根际土壤微生物多样性与丰富度。相关性分析表明, 产量的增加与钾元素吸收、分配及根际微生物变化显著相关。综上, 在相同的施钾水平上, 与无机盐钾形态相比, 山梨醇螯合钾更能促进花生植株对钾素的吸收和积累, 综合表现为产量的增加。该研究结果可为提高钾肥利用效率提供理论及实际参考。

关键词: 花生; 无机钾; 山梨醇螯合钾; 产量; 钾积累; 根际土壤微生物群落

中图分类号: S565.2 **文献标志码:** A

Effects of Foliar Spraying of Sorbitol Chelated Potassium on Peanut Yield and Rhizosphere Soil Microbial Community

SUN Wei, ZHANG Huanyang, WEI Qianqian, ZENG Fanhe, LI Tengsheng, ZHAO Li, HAN Chuanhao, ZHANG Jing, ZHANG Ziqi, SHI Xiang, YAN Dongyun[†]

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

* 国家自然科学基金项目(31972516)与山东省重点研发计划项目(2017GNC11116)共同资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 31972516) and the Key Research and Development Program of Shandong Province, China (No. 2017GNC11116)

[†] 通讯作者 Corresponding author, E-mail: yandongyun666@hotmail.com

作者简介: 孙伟(1995—), 男, 河南信阳人, 硕士研究生, 主要从事新型肥料研发与应用。E-mail: Sunwei0130@163.com

收稿日期: 2023-01-03; 收到修改稿日期: 2023-08-15; 网络首发日期(www.cnki.net): 2023-11-15

Abstract: 【Objective】 China depends heavily on agricultural potassium fertilizer imported from abroad. Thus, it is important to improve potassium utilization efficiency by changing the existing forms of potassium. 【Method】 In this paper, a two-year field trial (in 2020 and 2021) was set up using Virginia-type peanut Huayu 22 to investigate the effects of inorganic potassium (free ionic state) and sorbitol chelated potassium on peanut yield, dry matter accumulation, potassium accumulation, and bacterial community structure in peanut rhizosphere soil by a completely randomized block design. Under the premise of conventional fertilization, peanut spraying experiments were carried out at different growth stages and with five treatments: CK, water control; IK, inorganic potassium; MK, sorbitol mixed inorganic potassium; SK, sorbitol chelated potassium (self-made); and LK, commercially available chelated potassium (Canada). 【Result】 The results showed that foliar topdressing potassium fertilizer on leaves could significantly increase the peanut yield. Compared with the treatment of IK or LK treatments, the two-year average yield of SK treatments increased by 18.9% and 14.97%, respectively. The yield components of 100-seed weight, 100-pod weight, and full fruit rate were all significantly improved. Also, the dry matter accumulation and potassium accumulation of peanut plants treated with sorbitol-chelated potassium were significantly increased. Compared with CK, IK, and LK treatments, the total dry matter of peanut plants treated with SK increased by 19.5%, 19.1%, and 15.7% in the stage of the full pod, and increased by 22.8%, 27.4%, and 11.7% at the mature stage, respectively. Potassium accumulation in peanut kernels increased by 30.6%, 49.8% and, 44.8% in the stage of full pod, and increased by 30.8%, 59.1%, and 10.8% at the mature stage, respectively. The above results showed that self-made sorbitol-chelated potassium could promote the absorption and distribution of potassium nutrients in plants. Furthermore, the microbial diversity and richness of peanut rhizosphere soil increased under SK treatment compared with the other treatments. Compared with CK, MK, and LK treatments, the Sobs index of microbial communities in SK treatment increased by 10.7%, 12.5%, and 10.7%, respectively. The species significantly enriched in SK treatment were *p-Verrucomicrobiota_g-Roseimicrobium* and *p-Planctomycetota_c-vadinHA49*. The correlation analysis showed that the increase in production was significantly related to the absorption and distribution of potassium and the changes in rhizosphere microorganisms. 【Conclusion】 In summary, compared with inorganic potassium form, sorbitol-chelated potassium could promote the absorption and accumulation of potassium in peanuts at the same potassium application level, which is comprehensively reflected in production. The research results could provide theoretical and practical references for improving potassium efficiency.

Key words: Peanut; Inorganic potassium; Sorbitol chelated potassium; Yield; Potassium accumulation; Microbial community in rhizosphere soil

中国可溶性钾资源匮乏, 仅能满足当前农业需求的 50%左右^[1]。提高肥料利用效率, 不仅节约资源与能源, 也减少了环境污染^[2]。植株体内的钾素主要从土壤吸收, 但难以满足旺盛生长时期的需求, 并且土壤中钙、镁和钾之间相互制衡, 进一步影响土壤钾的供应能力^[3]。叶面施肥具有养分用量少、利用率高、见效快等优势, 已成为基础施肥的有效补充, 尤其在土壤养分水平较低的情况下^[4]。课题组前期研究^[5]证实, 与自由离子态钙养分相比, 以螯合态形式存在的钙更有助于土壤养分的输出, 促进作物增产、提升其品质参数。钾作为植株生长需求大量的营养元素, 离子态研究较多, 有关其变为螯合态后对作物的影响研究数据甚少^[6], 推测原因

可能存在两点: 其一, 与氮磷肥相比, 钾肥的来源相对稳定, 主要是速效的氯化钾与硫酸钾, 在土壤中不易固定, 利用率较高; 其二, 钾元素相较其他元素化合价低, 不容易发生螯合反应, 即使螯合后又存在难以分离纯化的问题^[7-8]。基于以上分析, 本文选择喜钾作物花生为供试作物, 选择光合作用初产物山梨醇为螯合配体, 自由离子态钾为中心离子, 通过水热合成法生成山梨醇螯合钾。设置清水对照、自由离子态钾、自由离子态钾与山梨醇混合液、山梨醇螯合钾、市售糖醇钾等 5 种处理进行连续两年的田间试验, 考察不同形态钾对花生生产、植株钾积累、花生根际土壤微生物群落结构的影响, 研究结果为进一步提高钾肥利用效率提供科学依据。

1 材料与方方法

1.1 试验区概况

试验于 2020—2021 年在山东省青岛市即墨区华山镇后花园村试验基地 (36°59'N, 120°52'E) 进行, 该区域属温带季风气候, 试验期间月平均

气温和降水量如图 1 所示。该地块土壤属于典型的中钾土壤, 砂姜黑土 (根据中国土壤发生分类方法划分), 其两年基本化学性质与主要养分含量见表 1。供试花生品种花育 22, 种植密度 1.8×10^5 株· hm^{-2} , 供试肥料为本实验室自行研制的山梨醇螯合钾肥。

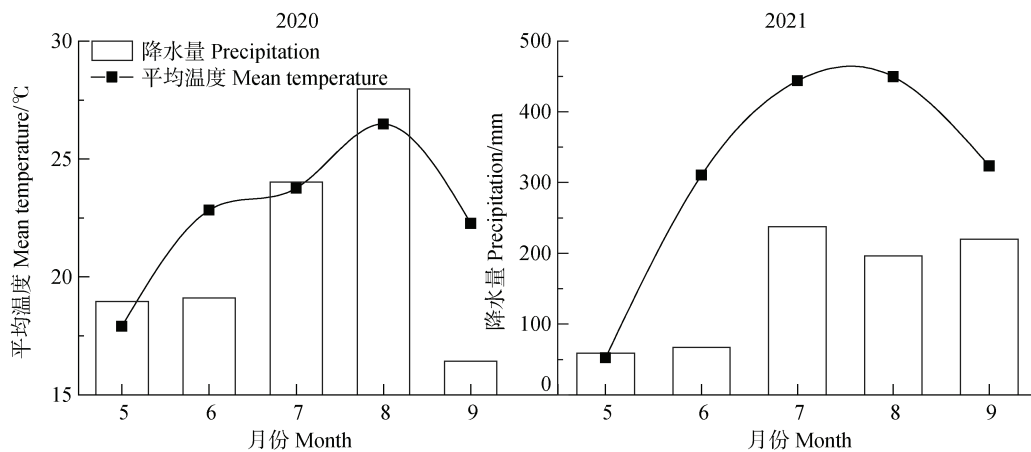


图 1 试验期间月平均气温及降水量

Fig. 1 Average monthly temperature and precipitation during the experiment

表 1 供试土壤基本化学性质

Table 1 Basic chemical properties of soil tested

年份 Year	pH	电导率 EC/ ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)	有机质 Organic matter/ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	碱解氮 Alkali-hydrolyzed nitrogen/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	有效磷 Available phosphorous/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	速效钾 Available potassium/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)
2020	6.33	58.8	13.2	80.71	29.95	133.4
2021	6.28	49.7	13.8	84.5	30.84	129.6

1.2 试验设计

田间试验连续进行两年, 一年两季, 花生与玉米轮作。花生基础施肥与播种同时进行, 一次性施入氮磷钾掺混肥料 (19-19-19) $947.5 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。2020 年: 5 月 11 日播种, 9 月 13 日收获; 2021 年: 5 月 3 日播种, 8 月 28 日收获。采用完全随机区组设计, 共设置 5 个处理, 每个处理设 3 个重复, 每个试验小区 30 m^2 ($5 \text{ m} \times 6 \text{ m}$), 小区之间设有 1.5 米保护行: ①CK: 喷施清水; ②IK: 无机钾肥; ③MK: 山梨醇与无机钾肥混合 (螯合态钾为 0); ④SK: 山梨醇螯合钾肥 (本实验室自行合成, 在课题组前期掌握的制备、分离等技术基础^[8-9]上, 对该肥料进行傅里叶红外光谱扫描, 结果如图 2 所示); ⑤LK:

市售螯合钾肥 (加拿大某公司生产)。

在花生的四个生育期 (结荚期、饱果初期、饱果末期、成熟期) 分别进行叶面喷施, 除对照处理 CK 喷施清水外, 其余处理喷施等量钾, 叶片正反面均匀布满雾状液滴 (以 K^+ 计, 浓度为 $1.6 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$, 前两次每小区每次用液量 2 L, 其余各次用液量 4 L, 2020 年喷施 4 次, 2021 年喷施 5 次), 依据天气状况每隔两周左右喷施一次。其他田间管理如虫害、除草或灌溉等, 按照当地常规田间管理进行。

1.3 样品采集与分析

分别在花生结荚期、饱果初期、饱果末期、成熟期进行整株花生的样品采集, 每个处理取有代表性 6 株花生, 叶片、茎秆、根、果壳、果仁各器官

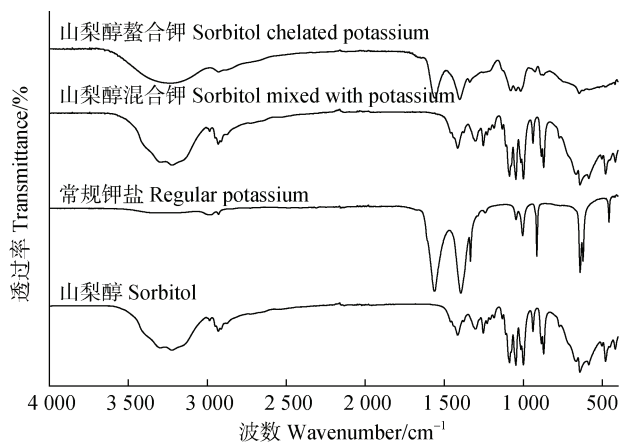


图2 山梨醇螯合钾肥的傅里叶红外光谱 (FT-IR)

Fig. 2 Fourier transform infrared spectra (FT-IR) of sorbitol-chelated potassium fertilizer

进行剪切分离, 置于烘箱 105℃杀青 30 min, 65℃烘至恒重, 称量各器官干物质质量。收获期, 避开边界区域, 每个小区靠近中心的同一位置采集 30 株花生, 摘取果实 (带壳), 洗净、风干后称重计产, 取平均数乘百为百果重, 将每个小区的花生果实剥去果壳后称重计数, 再计算平均数乘百为百仁重, 取每个小区中比较饱满的果实 (带壳) 并计数, 与果实总数相比则为饱果率。花生全钾含量测定采用硝酸-高氯酸-氢氟酸消解法 ($\text{HNO}_3 : \text{HClO}_4 = 4 : 1, 0.5 \text{ mL HF}$), 澄清透明后超纯水稀释定容, 运用电感耦合等离子体原子发射光谱仪 (ICP-OES, Avio200, PerkinElmer, 美国) 进行测试。

土壤化学性质测定参照《土壤农化分析》^[10]; 速效钾采用乙酸铵浸提后上机 ICP-OES 测试。

1.4 根际土壤微生物高通量测序

收获时避开小区边际, 随机选取 3 株花生, 抖落根区附着不紧密的土壤, 保留约 1~2 mm 附着于根系表层的土壤, 将花生根系置于盛有 15 mL 无菌水的离心管中剧烈摇晃, 将根取出, 重复同样步骤 3 次为一个小区样本, 共计 15 个样本, 置于带有冰盒的车载冰箱, 运至实验室后置于-40℃冰箱, 随后干冰保存寄送至上海美吉生物医药科技有限公司进行微生物测序。

根际土壤 DNA 的提取步骤严格按照试剂盒的操作说明 (Fast DNA[®] Spin Kit for Soil, MP Biomedicals, 美国) 进行。采用 PCR 仪 (GeneAmp[®] 9700 型, ABI, 美国) 实时荧光定量法对细菌 16S rRNA 基因中的 V3~V4 高变区进行 PCR 扩增, 引物为 338F (ACTCCTACGGGAGGCAGCAG) 和

806R (GGACTACHVGGGTWTCTAAT)。2%琼脂糖凝胶对上述扩增产物提取扩增子, 胶回收试剂盒对扩增子进行纯化, MiSeq 平台对 PCR 扩增产物进行高通量测序。高质量序列采用 USEARCH7-uparse 算法在相似性 97%的水平上对序列进行聚类。RDP classifier 贝叶斯算法对 97%相似水平的操作分类单元 (OTU) 代表序列进行分类学分析, 将特性序列与 Silva (Release138 <http://www.arb-silva.de>) 数据库进行对比, 分别在各个分类学统计各样本的群落物种组成。

1.5 数据处理

Excel 2016 记录试验数据; SPSS 25.0 进行统计分析, Origin 2021 和 R 语言进行绘图和可视化绘制。Mothur 1.30.2 进行指数分析, 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 (PC)、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分析。

2 结果

2.1 山梨醇螯合钾对花生产量及构成要素的影响

叶面喷施钾肥可不同程度地提高花生产量, 两年田间试验结果表明, 不同施肥处理显著影响成熟期花生产量及百果重、百仁重、饱果率等荚果性状 (表 2)。与 2020 年度相比, 2021 年的荚果产量整体上增加 18.79%, 5 个处理均有不同程度的增产现象, 分别增产 22.33%、31.79%、7.07%、11.9%、23.56%, 主要客观因素为 2020 年 7—8 月的降水量较 2021 年同期明显偏多, 气温平均降低 1.41℃ (图 1)。与喷施清水对照处理 CK、无机盐钾处理 IK、市售螯合钾处理 LK 相比, 山梨醇螯合钾处理 SK 两年产量分别平均提高 25.41%、18.9%、14.97%; 与混合钾处理 MK (螯合率为 0) 相比, 平均增产 19.52%, 差异显著。与无机盐钾处理 IK 相比, 山梨醇螯合钾处理 SK 的花生百果重、饱果率两年平均增加 6.52%、5.94%, 与市售同类产品处理 LK 相比, 两年平均分别增加 9.54%、13.64%, 差异显著。

2.2 山梨醇螯合钾对不同生育期花生植株干物质积累的影响

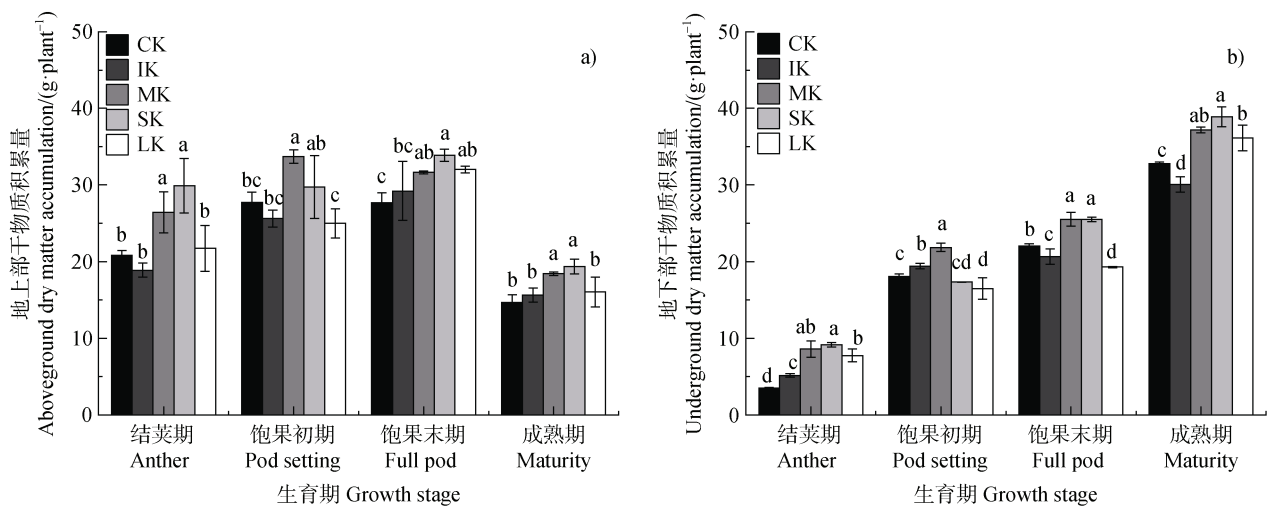
各施钾处理显著影响不同生育期花生各器官干物质的积累 (图 3)。整个生育期, 花生地下部分干物质质量持续增长, 结荚期、饱果初期、饱果末期前

表 2 不同施肥处理对花生产量及构成要素的影响

Table 2 Effects of different fertilization treatments on peanut production and component factors

年份	处理	百果重	百仁重	饱果率	产量
Year	Treatment	100-pod weight / g	100-seed weight / g	Full pods rate / %	Yield / (t·hm ⁻²)
2020	CK	190.4±2.38b	77.85±0.04d	74.85±1.52d	5.06±0.55c
	IK	198.2±2.31ab	81.75±0.55b	85.98±1.32b	5.19±0.15bc
	MK	192.8±10.4b	82.23±0.63ab	76.89±0.89d	5.66±0.21b
	SK	206.2±4.83a	83.37±1.38a	88.43±0.37a	6.63±0.02a
	LK	174.4±3.08c	79.97±0.84c	80.95±1.40c	5.56±0.03bc
2021	CK	205.5±3.87b	101.2±1.90ab	69.09±0.85ab	6.19±0.38c
	IK	209.1±9.87b	103.6±1.49a	64.72±3.38bc	6.84±0.26b
	MK	192.3±7.25c	98.57±0.70bc	68.80±2.55ab	6.06±0.15c
	SK	227.9±1.77a	102.6±2.86a	70.56±0.68a	7.42±0.05a
	LK	226.0±8.85a	96.11±0.95c	62.09±2.85c	6.87±0.21b

注: CK: 清水对照; IK: 无机钾肥; MK: 山梨醇与无机钾肥混合; SK: 山梨醇螯合钾肥; LK: 市售螯合钾肥; 同列不同小写字母表示同一时期不同处理在 0.05 水平上差异显著, 下同。Note: CK: Control group; IK: Inorganic potash fertilizer; MK: Sorbitol mixed with inorganic potash fertilizer; SK: Sorbitol chelates conventional potassium fertilizer; LK: Commercially available chelated potash fertilizer; Different lowercase letters in the same column showed significant differences at 0.05 level in different treatments in the same period. The same as below.



注: 不同小写字母表示同一时期不同处理在 0.05 水平上差异显著, 下同。Note: Different lowercase letters showed significant differences at 0.05 level in different treatments in the same period. The same as below.

图 3 不同施肥处理对花生植株不同生育期地上部 (a)、地下部 (b) 干物质积累量的影响

Fig. 3 Effects of different fertilization treatments on the accumulation of dry matter in the above-ground (a) and underground (b) parts of peanut plants at different growth stages

三个生育期, 花生地上部分干物质量持续增长, 成熟期花生地上部分干物质量下降。与 CK、IK 处理相比, 饱果末期花生地下部干物质量 SK 处理分别增加 15.8%、23.5%; 与 CK、IK、LK 处理相比,

成熟期 SK 处理分别增加 18.8%、29.4%、7.72%。与 CK、IK 相比, SK 处理饱果初期花生地上部干物质量分别增加 7.31%、16%, 饱果末期分别增加 22.4%、15.9%。与 CK、IK、LK 相比, SK 处理饱

果末期花生总干物质量分别增加 19.5%、19.1%、15.7%，成熟期分别增加 22.8%、27.4%、11.7%。

2.3 山梨醇螯合钾对不同生育期花生植株钾积累量及土壤速效钾的影响

各施肥处理显著影响不同生育期花生各器官钾的积累量与收获期土壤速效钾的含量(图4)。整个生育期,花生地下部分钾积累量持续增长,结荚期、饱果初期、饱果末期前三个生育期,花生地上部分钾积累量持续增长,成熟期花生地上部分钾积累量下降;籽仁中钾积累量持续增长;土壤有效钾含量显著受叶面施肥影响。SK处理的花生籽仁钾含量在饱果初期、饱果末期、成熟期分别为每株 26.9 mg、89.5 mg、173.6 mg;与 CK、IK、LK 处理相比,饱果末期花生籽仁钾积累量 SK 处理分别增加 30.6%、49.8%、44.8%,成熟期分别增加 30.8%、59.1%、

10.8%。与 CK、IK、LK 处理相比,SK 处理饱果末期花生植株地下部钾积累量分别增加 17.1%、30%、22.1%,成熟期地下部钾积累量分别增加 14%、33%、2.5%。不同施肥处理对地上部钾积累量与总钾积累量的影响变化趋势一致;与 CK、IK 处理相比,SK 处理饱果初期花生地上部钾积累量分别增加 65.6%、42.4%,饱果末期地上部钾积累量分别增加 20.5%、18%;成熟期各处理受干物质量影响,均有一定幅度的下降。与 CK、IK、LK 处理相比,SK 处理饱果初期总钾积累量分别增加 48.2%、25%、45%;与 CK、IK 处理相比,SK 处理饱果后期总钾积累量分别增加 19.5%、21.2%。土壤速效钾含量在 2020 年与 2021 年变化趋势基本一致,SK 处理的速效钾含量最低;2020 年,与 CK、IK 处理相比,SK 处理分别降低 10.8%、17.3%,2021 年,SK 处理分别降低 12.4%、24%。

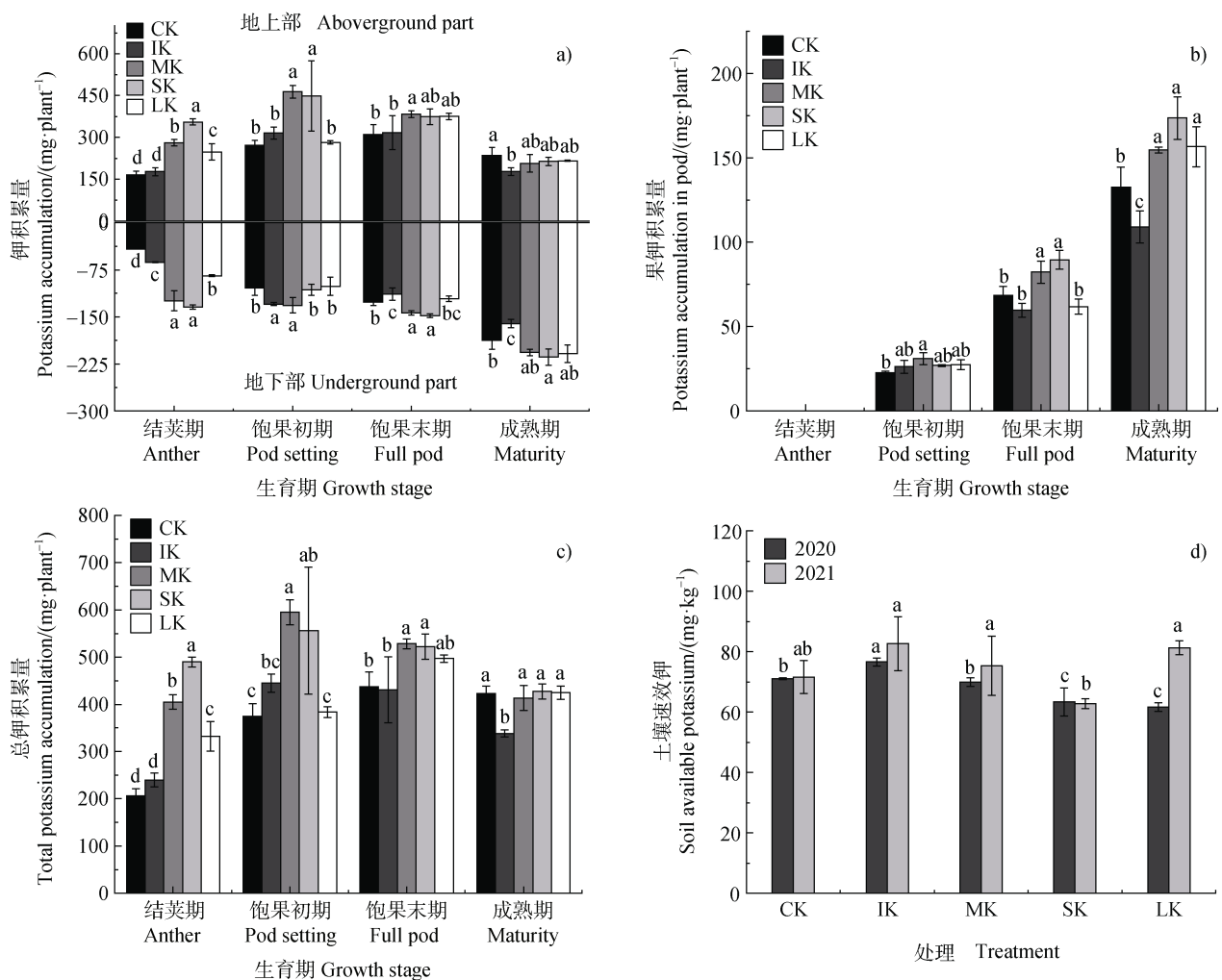


图4 不同施肥处理对花生植株不同生育期钾积累量(a, b, c)及成熟期土壤速效钾含量(d)的影响

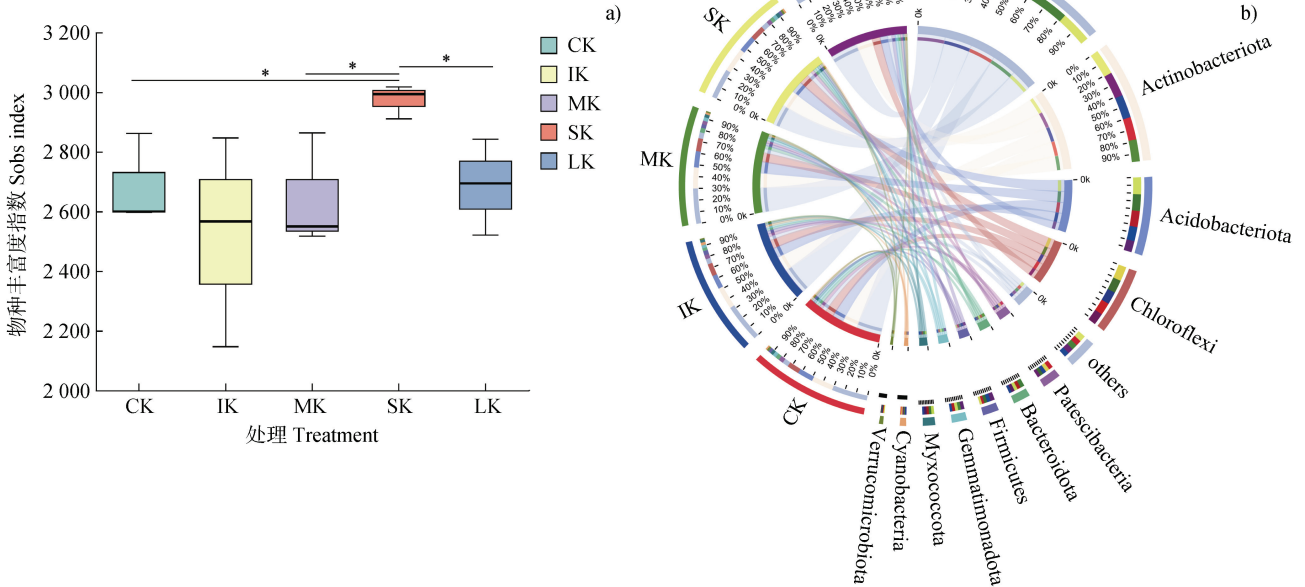
Fig. 4 Potassium accumulation in peanut plants at different growth stages (a, b, c) under different fertilization treatments and available potassium content in soil at maturity stage (d)

2.4 山梨醇螯合钾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和组成变化

本研究共获得 749 445 条高质量原生生物序列，聚类得到 6 544 个 OTU (操作分类单元)。如图 5a 所示，

各施钾处理显著提高了根际土壤细菌群落的 α 多样性 ($P < 0.05$)。与 CK、MK、LK 处理相比，SK 处理微生物群落的 Sobs 指数 (表征实际观测到的根际土壤微生物物种数目) 分别增加 10.7%、12.5%、10.7%。



注：*表示不同处理在 0.05 水平上差异显著，**表示不同处理在 0.01 水平上差异显著，下同。Note: * indicates significant difference at the level of 0.05, and ** indicates a significant difference at the level of 0.01. The same as below.

图 5 不同施肥处理下花生根际土壤细菌 α 多样性指数 (a) 及门水平优势微生物相对丰度 (b)

Fig. 5 Alpha diversity index of rhizosphere soil bacteria (a) and relative abundance of phylum level dominant microorganisms (b) under different fertilization treatments

OTU 物种分类学注释结果表明，原生生物群落分属 38 个门、124 个纲、308 个目、489 个科、870 个属和 1 888 个种。土壤细菌群落在门水平上的组成情况如图 5b 所示，5 个施肥处理的花生根际土壤中共检出 14 个细菌门，相对丰度较高的前 5 个细菌门分别为变形菌门 (Proteobacteria)、放线菌门 (Actinobacteriota)、酸杆菌门 (Acidobacteriota)、绿弯菌门 (Chloroflexi)、髌骨细菌门 (Patescibacteria)，其中前 4 个优势细菌门占比达 70% 以上。SK 处理提高了放线菌门、酸杆菌门、绿弯菌门、黏菌门、疣微菌门、浮霉菌门的相对丰度，同时降低了变形菌门、厚壁菌门的相对丰度。与 CK 处理相比，SK 处理根际土壤放线菌门、绿弯菌门的相对丰度分别增加 11.9%、15.4%，变形菌门、厚壁菌门的相对丰度

分别减少 16.2%、5.01%；与市售螯合钾处理 LK 相比，SK 处理根际土壤酸杆菌门、绿弯菌门的相对丰度分别增加 51.4%、21.8%，变形菌门、厚壁菌门的相对丰度分别减少 23.3%、47.7%。

2.4.2 根际土壤微生物群落结构变化及 LEfSe 物种差异 PC 通过对不同生境或微生物群落间的物种多样性进行组间比较，分析不同分组样本群落组成的相似性或差异性 (图 6a)。门水平上，第一主轴 (PC1) 和第二主轴 (PC2) 分别可解释不同施肥处理中所有差异的 63.42%、11.96%，细菌群落结构的改变主要由 PC1 引起。基于布雷-柯蒂斯距离算法 (Bray-curtis)，多元方差分析 (Adonis) 结果表明不同施肥处理间差异不显著 ($R^2=0.245 5$, $P=0.564$)。

物种差异分析 (LEfSe) 采用线性判别分析 (LDA) 估算每种细菌 (通过非参数因子 Kruskal-Wallis 秩和检验找到丰度显著性差异的细菌) 丰度对不同施肥处理的差异影响。通过 LDA 分布柱状图分析, 得到从门到属的微生物分类相对丰富的差异 (图 6b)。LEfSe 的 LDA 计算结果显示, 阈值大于 2.0 的差异物种主要来自厚壁菌门 (Firmicutes)、浮

霉菌门 (Planctomycetes)、变形菌门 (Proteobacteria)、绿弯菌门 (Chloroflexi)、黏菌门 (Myxococcota)、疣微菌门 (Verrucomicrobiota)。5 个施肥处理 CK、IK、MK、SK、LK 分别有 1、1、3、1、2 个科的细菌种群存在显著差异, 其中 SK 处理显著富集物种为 *p-Verrucomicrobiota_g-Roseimicrobium* 与 *p-Planctomycetota_c-vadinHA49*。

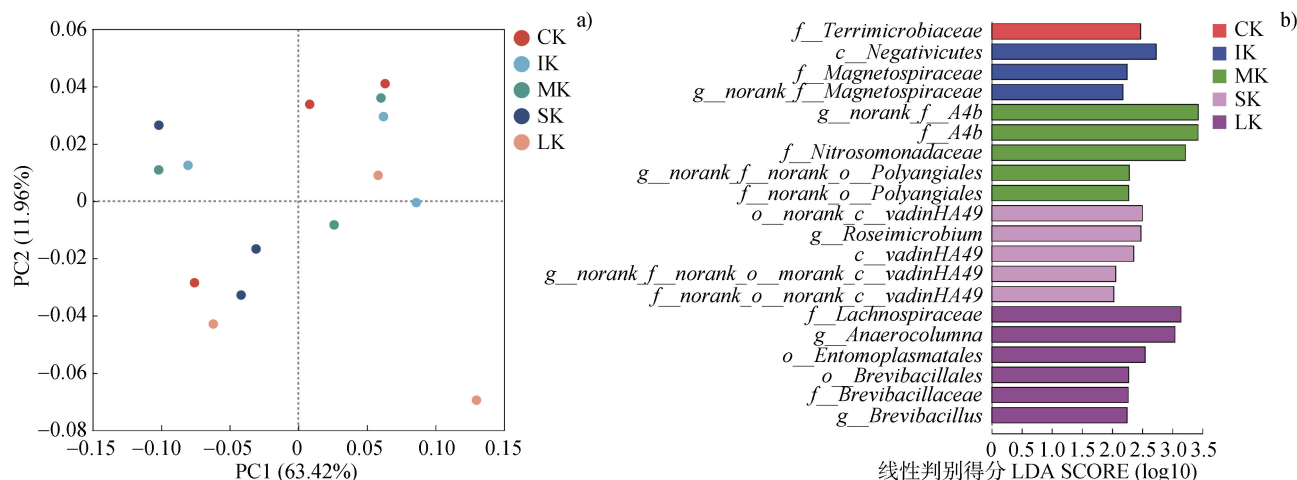


图 6 不同施肥处理花生根际土壤细菌群落主坐标分析 (PC, a) 及根际土壤微生物群落物种差异分析 (b)

Fig. 6 Principal coordinate analysis (PC) of bacterial community in peanut rhizosphere soil under different fertilization treatments (a) and species difference analysis of rhizosphere soil microbial community (b)

2.5 产量及构成要素与钾元素分布及根际土壤微生物群落相关性

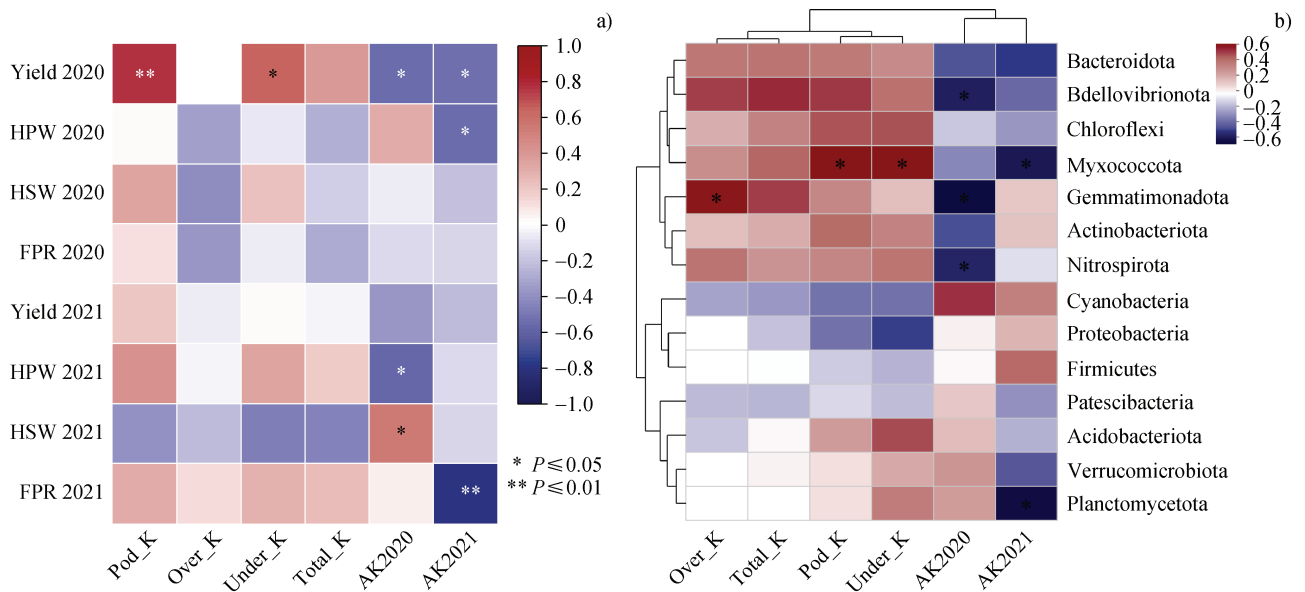
花生产量与钾元素分布及根际土壤细菌群落多样性关系密切 (图 7a, 图 7b)。相关性分析结果表明, 2020 年, 花生产量与籽粒钾含量呈极显著正相关 ($P < 0.01$), 与花生植株地下部分钾含量呈显著正相关 ($P < 0.05$), 与成熟期土壤速效钾含量呈显著负相关 ($P < 0.05$); 2021 年, 饱果率与成熟期土壤速效钾含量呈极显著负相关 ($P < 0.01$); 连续两年的百果重均与成熟期土壤速效钾含量呈显著负相关。微生物 Myxococcota 相对丰度与籽仁钾积累量、地下部钾积累量呈显著正相关 ($P < 0.05$), 微生物 Gemmatimonadota 相对丰度与地上部钾积累量呈显著正相关 ($P < 0.05$)。2020 年, 微生物 Bdellovibrionota、Gemmatimonadota、Nitrospirota 与成熟期土壤速效钾含量呈显著负相关 ($P < 0.05$); 2021 年, 微生物 Myxococcota、Planctomycetota 与成熟期土壤速效钾含量呈显著负相关 ($P < 0.05$)。

3 讨论

3.1 山梨醇螯合钾对花生干物质及钾积累量的影响

产量的形成最终取决于干物质的积累及对籽粒的分配^[11]。钾的不同存在形态 (离子态、非螯合态、螯合态) 显著影响花生的生长发育, 其中山梨醇螯合钾处理 (SK) 的增产效果更为突出 (表 2)。由于钾营养形态的改变, 由自由离子态转变为有机螯合态后, 更易于植株吸收、迁移、转化, 促进光合效率, 增加光合作用产物向储藏器官运输, 强化干物质的积累, 进一步提升根系吸钾水平^[5]。同时, 糖醇本身具有渗透、润湿、降低表面张力等特点, 能够促进花生叶片对钾的吸收^[6], 前期研究表明含山梨醇有机肥可显著提高土壤中速效养分的含量, 促进根系生长, 增强作物吸收土壤中的养分, 利于增产^[12]。

由于山梨醇的配位作用, 钾离子不再以自由离子态存在, 螯合态钾被叶面吸收后易于在花生植株内迁移, 减少在韧皮部的固定, 这与山梨醇促进钙



注：Yield：产量；HPW：百果重；HSW：百仁重；FPR：饱果率；Pod_K，籽仁钾积累量；Over_K：地上部钾积累量；Under_K：地下部钾积累量；Total_K：总钾积累量；AK2020：2020年成熟期土壤速效钾含量；AK2021：2021年成熟期土壤速效钾含量。Note：Yield：yield；HPW：100-pod weight；HSW：100-seed weight；FPR：full pods rate；Pod_K：potassium accumulation in seed kernel；Over_K：oveground potassium accumulation；Uuder_K：underground potassium accumulation；Total_K：total potassium accumulation；AK2020：soil available potassium content at maturity stage in 2020；AK2021：soil available potassium content at maturity stage in 2021.

图 7 产量构成要素与钾元素分布相关性 (a) 及土壤优势微生物群落与钾元素分布相关性 (b)

Fig. 7 Correlation analysis between yield components and potassium distribution (a) and correlation analysis between soil dominant microbial community and potassium distribution (b)

的转运^[13]相似，增加有效到达花生植株需钾旺盛的部位的概率^[14]，促进生育前期花生植株的生长。叶面喷施钾肥虽不能如土壤施钾类似直接作用于花生根系，但通过对地上部植株的影响间接作用于根系，从而影响植株地下部养分积累^[15]，促进花生根系生长，增强生育后期花生植株对土壤中钾素的吸收，同时改善花生植株体内钾素转移不均衡现象^[16]。植物在生长发育过程中，不断吸收外界的各种矿质养分，不同生育期，各器官积累钾元素的量不同^[17]，作物养分积累量是衡量作物生长发育状况重要指标，代表作物体内养分代谢强弱，保证养分以较高的比例转移至生殖器官，是实现作物优质高产的前提^[11]。研究^[18]指出植株钾素的充足供应是提高产量和含钾量的关键，本研究结果表明喷施山梨醇螯合钾可提高花生籽仁对钾素的利用率，有机螯合肥料能够促进果实对钾养分的利用（图 4b），进而促进产量的提高。

3.2 山梨醇螯合钾对花生根际土壤微生物群落的影响

植株通过根系结构、分泌物和黏液影响根系附

近的土壤微生物，根际土壤微生物是受植物影响最大的土壤微生物群体，根际土壤属性直接决定供肥效率，代谢能力高于非根际土壤^[19-20]。喷施山梨醇螯合钾（SK）不仅能够促进钾营养元素的吸收与迁移，而且影响花生植株根际土壤微域环境的细菌群落变化^[21]，改变优势菌种相对丰度，促进差异物种在不同处理中的显著富集，进而增强土壤细菌种群功能，表现在能量生产和转化、辅酶转运与代谢、信号传输等^[22]。首先，花生根部生长状况的改善影响根际微域环境的变化，根据植物-微生物的协同作用，土壤根际微生物刺激植物更有效地从土壤中提取养分和应对非生物胁迫，根际微生物的丰度增加可促进植株地上部的生长^[23]。同时，Ling 等^[24]指出新型生物肥可合理调控土壤微生物群落，保持植物健康生长。其次，植物根系生长代谢，增加根系分泌物，其化学成分有利于特异性细菌合成有机酸、酚类化合物和黄酮类物质，其中的氨基酸和糖可为土壤中的微生物提供物质和能量，显著增加微生物数量^[25]，根系还会分泌特定植物化学物质的混合物，

以帮助协调根际微生物的组合^[26]。

喷施山梨醇螯合钾处理提高了放线菌门、酸杆菌门、绿弯菌门、黏菌门、疣微菌门、浮霉菌门的相对丰度, 细菌种群 *p-Verrucomicrobiota_g-Roseimicrobium* 与 *p-Planctomycetota_c-vadinHA49* 得到显著富集(图 6b)。放线菌门经常出现在干旱的环境条件下, 能够作为病原菌的拮抗菌提高作物抗逆性等, 而酸杆菌门同样可合成和分泌多种抗生素, 利用各种机制对抗植物病原菌和害虫^[27]; 同时在土壤中, 绿弯菌门细菌及黏菌门能够降解和分解有机物质, 对土壤有机质的形成和更新有着重要的作用, 它们共同维持土壤的营养平衡和健康^[28-29]。有研究表明, 细菌 *Roseimicrobium* 在土壤中具有分解有机物、促进植物生长、抗氧化等功能^[30]; 而 *VadinHA49* 具有较强的生物修复能力及抗菌作用, 能够通过代谢转化有毒物质并抑制一些病原菌的生长繁殖^[31]。因此, 叶面喷施山梨醇螯合钾可直接或间接影响根际土壤微生物环境, 从而促进花生生长, 提高产量。

3.3 植株及土壤钾的分配变化与土壤根际细菌群落以及产量构成要素的相关性

植株钾营养元素的吸收分配与土壤微生物相互作用, 共同影响土壤中钾营养元素的释放和作物的生长^[32]。本研究结果表明, 芽单胞菌门、黏菌门与花生植株中钾的分布显著正相关, 与土壤速效钾显著负相关(图 7b); 叶面喷施的钾肥经过花生叶片的吸收进入植株后在成熟期向下运输, 促进芽单胞菌门、黏菌门的生长与代谢, 间接促进了土壤中速效钾养分的释放, 更多的钾被花生植株利用, 表现在产量的增加; 此外, 芽单胞菌门含有以叶绿素为基础的光营养物种, 可进一步支持基本的生物过程^[33]。结果还表明, 花生的产量与植株钾积累量显著正相关, 与土壤速效钾含量显著负相关, 土壤速效钾对产量构成要素影响较大(图 7a); 一方面, 通过采取不同处理提高果实钾积累量是提高作物产量的重要途径^[3], 在花生各生育期的叶片上喷施山梨醇螯合钾能更好地促进花生增长, 保证植株各器官的钾素充足供应, 另一方面, 山梨醇螯合钾(SK)促进地上部茎叶中的光合产物、营养成分等向花生根部转移, 间接促进花生根部生长和养分吸收能力增加^[15], 从而促进产量的提升。

4 结 论

两年田间试验结果表明, 在基础施肥前提下喷施钾肥可有效提高花生产量, 与喷施无机盐钾相比, 喷施山梨醇螯合钾平均增产 18.9%, 百果重与饱果率平均增加 6.52%、5.94%, 具体反映在促进花生全株干物质的积累, 提高花生籽仁中钾积累量, 增强植株对土壤养分吸收, 降低土壤中速效钾含量, 提高花生根际土壤微生物的多样性与丰富度, 显著提高放线菌门、酸杆菌门、绿弯菌门、黏菌门、疣微菌门、浮霉菌门的相对丰度, 降低变形菌门、厚壁菌门的相对丰度, 促进 *p-Verrucomicrobiota_g-Roseimicrobium* 与 *p-Planctomycetota_c-vadinHA49* 的显著富集。相关性分析表明, 花生产量与钾元素分布及根际土壤细菌群落多样性关系密切。因此, 山梨醇螯合钾作为一种新型钾肥对提升钾的利用率, 促进花生产业发展具有重要现实意义。

参考文献 (References)

- [1] Tan H T, Sun W, Cui Y Z, et al. Present situation of potash resources and analysis of development and application of polyhalite[J]. *Inorganic Chemicals Industry*, 2022, 54(6): 23—30. [谭慧婷, 孙伟, 崔玉照, 等. 钾矿资源现状与杂卤石的开发应用分析[J]. *无机盐工业*, 2022, 54(6): 23—30.]
- [2] Xia G M, Wang R M, Huang X, et al. Effects of nitrogen application rates on CO₂ sequestration and emissions, and yield in peanut field under regulated deficit irrigation[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2022, 53(6): 349—358. [夏桂敏, 王瑞敏, 黄旭, 等. 调亏灌溉下施氮量对农田 CO₂ 固定排放和花生产量的影响[J]. *农业机械学报*, 2022, 53(6): 349—358.]
- [3] Kang L Y, Li X H, Gao N N, et al. Effect of postponed potassium-fertilizer topdressing on its absorption utilization and the yield of muskmelon[J]. *Journal of Gansu Agricultural University*, 2021, 56(2): 76—82, 89. [康利允, 李晓慧, 高宁宁, 等. 钾肥追施时期后移对甜瓜钾吸收利用及产量的影响[J]. *甘肃农业大学学报*, 2021, 56(2): 76—82, 89.]
- [4] Ma J Z, Zhang M, Liu Z G, et al. Effects of foliar application of the mixture of copper and chelated iron on the yield, quality, photosynthesis, and microelement concentration of table grape (*Vitis vinifera* L.) [J]. *Scientia Horticulturae*, 2019, 254: 106—115.
- [5] Li T S, Wei Q Q, Sun W, et al. Spraying sorbitol-chelated calcium affected foliar calcium absorption and promoted

- the yield of peanut (*Arachis hypogaea* L.) [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2022, 13: 1075488.
- [6] 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.]
- [7] Hua K K, Wang D Z, Guo Z B, et al. Effects of long-term fertilization on soil potassium utilization and budgeting in vertisol relative to application method [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2017, 54 (4): 978—988. [花可可, 王道中, 郭志彬, 等. 施肥方式对砂姜黑土钾素利用及盈亏的影响 [J]. *土壤学报*, 2017, 54 (4): 978—988.]
- [8] Yan D Y, Sun W, Li P C, et al. Preparation and detection method of sorbitol chelated potash fertilizer : 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.]
- [9] Cui Y Z, Yan D Y, Niu J H, et al. Method for determining chelation rate of sugar alcohol chelated potassium by combining organic solvent precipitation method and spectrophotometric method : CN113686644A [P]. 2021-11-23. [崔玉照, 颜冬云, 牛军浩, 等. 有机溶剂沉淀法和分光光度法联用测定糖醇螯合钾螯合率的方法 : CN113686644A [P]. 2021-11-23.]
- [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] Zhou X R, Zhang L P, Jiang P, et al. Dynamics of dry matter and nitrogen, phosphorus, and potassium accumulation and nutrient requirements in the growing period of *Lyceum barbarum* in Ningxia [J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2021 (1): 262—272. [周喜荣, 张丽萍, 蒋鹏, 等. 宁夏枸杞生育期干物质与氮磷钾积累动态和养分需求规律 [J]. *中国土壤与肥料*, 2021 (1): 262—272.]
- [12] Fang D, Zhu M Z, Wei M Y, et al. Mechanisms in plant growth promotion by novel bio-organic fertilizer containing sorbitol [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2022, 59 (6): 1606—1615. [方丹, 朱明珠, 魏梦玉, 等. 含山梨醇的新型生物有机肥促生效应与机理研究 [J]. *土壤学报*, 2022, 59 (6): 1606—1615.]
- [13] Ding S S, Li Y T, Yuan L, et al. Effects of sugar alcohols and amino acids on growth, quality and calcium nutrition of Chinese cabbage [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2016, 22 (3): 744—751. [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] Lei J, Hao Y S, Wang X L, et al. Review of nutrient physiology and metabolism in potassium efficiency of plants [J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2014 (1): 1—5. [雷晶, 郝艳淑, 王晓丽, 等. 植物钾效率差异的营养生理及代谢机制研究进展 [J]. *中国土壤与肥料*, 2014 (1): 1—5.]
- [15] Lu Y, Wang C X, Yu T Y, et al. Effects of interaction of phosphorus (P) application in soil and leaves on root, nodule characteristics and nitrogen (N) metabolism in peanut [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2020, 46 (3): 432—439. [路亚, 王春晓, 于天一, 等. 土壤施磷与叶面追肥交互对花生根系形态、结瘤特性及氮代谢的影响 [J]. *作物学报*, 2020, 46 (3): 432—439.]
- [16] Hu W Z, Wang Q, Miao H Y, et al. Effect of basal and foliar applications of potassium fertilizer on flue-cured tobacco leaves [J]. *Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica*, 2010, 19 (9): 119—123. [胡文智, 王晴, 苗慧莹, 等. 钾肥基施与叶面喷施对烤烟含钾量的影响 [J]. *西北农业学报*, 2010, 19 (9): 119—123.]
- [17] Yan P K, Yu R, Wang D Q, et al. Annual dynamic change of N, P and K contents as well as fertilizer requirement of jujube trees (*Zizyphus jujuba* 'Tongxinyuanzao') in Ningxia [J]. *Journal of Fruit Science*, 2020, 37 (1): 77—87. [闫鹏科, 于茹, 王丹青, 等. '同心圆枣'树氮、磷、钾含量及需肥规律年动态变化 [J]. *果树学报*, 2020, 37 (1): 77—87.]
- [18] Li J, Zhang X Z, Li T X, et al. Effect of potash management on potassium absorption and utilization of flue cured tobacco [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2015, 21 (4): 969—978. [李静, 张锡洲, 李廷轩, 等. 钾肥运筹对烤烟钾吸收利用的影响 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2015, 21 (4): 969—978.]
- [19] Sugiyama A, Ueda Y, Zushi T, et al. Changes in the bacterial community of soybean rhizosphere during growth in the field [J]. *PLoS One*, 2014, 9 (6): e100709.
- [20] Chen H, Tang H Y, Guo J H, et al. Root exudates' roles and analytical techniques progress [J]. *Soils*, 2023, 55 (2): 225—233. [陈虹, 唐昊冶, 郭家欢, 等. 根系分泌物主要作用及解析技术进展 [J]. *土壤*, 2023, 55 (2): 225—233.]
- [21] Liu J G, Li X G, Wang X X. Effects of successive application of organic fertilizers on rhizosphere microbial populations and enzyme activities of monoculture peanut [J]. *Soils*, 2018, 50 (2): 305—311. [刘金光, 李孝刚, 王兴祥. 连续施用有机肥对连作花生根际微生物种群和酶活性的影响 [J]. *土壤*, 2018, 50 (2): 305—311.]
- [22] Ali N, Sorkhoh N, Salamah S, et al. The potential of epiphytic hydrocarbon-utilizing bacteria on legume leaves for attenuation of atmospheric hydrocarbon pollutants [J]. *Journal of Environmental Management*, 2012, 93 (1): 113—120.

- [23] Pii Y, Mimmo T, Tomasi N, et al. Microbial interactions in the rhizosphere: Beneficial influences of plant growth-promoting rhizobacteria on nutrient acquisition process. A review[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2015, 51 (4): 403—415.
- [24] Ling N, Deng K Y, Song Y, et al. Variation of rhizosphere bacterial community in watermelon continuous mono-cropping soil by long-term application of a novel bioorganic fertilizer[J]. *Microbiological Research*, 2014, 169 (7/8): 570—578.
- [25] Feng M, Xiang S D, Huang X J, et al. Effects of foliar iron fertilizer on growth, soil nutrients and microbial diversity of cabbage in Karst area[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2020 (5): 220—226. [冯密, 向书迪, 黄雪娇, 等. 叶面补铁对喀斯特土壤小白菜生长、土壤养分及微生物的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2020 (5): 220—226.]
- [26] Chaparro J M, Badri D V, Vivanco J M. Rhizosphere microbiome assemblage is affected by plant development[J]. *The ISME Journal*, 2014, 8 (4): 790—803.
- [27] Sui P X, Lian H L, Wang Z Y, et al. Effects of rotary tillage and straw incorporation on microbial community of brown soil[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2023, 42 (9): 2049—2060. [隋鹏祥, 廉宏利, 王峥宇, 等. 旋耕和秸秆还田方式对棕壤微生物群落特征的影响[J]. *生态学杂志*, 2023, 42 (9): 2049—2060.]
- [28] Xu M, Xian Y, Wu J, et al. Effect of biogas slurry addition on soil properties, yields, and bacterial composition in the rice-rape rotation ecosystem over 3 years[J]. *Journal of Soil & Sediments*, 2019, 19 (5): 2534—2542.
- [29] Górska E B, Stępien W, Cunha A, et al. Microbial diversity as an indicator of a diversified cropping system for luvisols in a moderate climate. Case study—Long term experiments from Poland[J]. *Ecological Indicators*, 2022, 141: 109—133.
- [30] Podar M, Turner J, Burdick L H, et al. Complete genome sequence of the novel *Roseimicrobium* sp. strain ORNL1, a Verrucomicrobium isolated from the *Populus deltoides* rhizosphere[J]. *Microbiology Resource Announcements*, 2020, 9 (27): e00617—20.
- [31] Song H J, Peng L, Li Z Y, et al. Metal distribution and biological diversity of crusts in paddy fields polluted with different levels of cadmium[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2019, 184: 109620.
- [32] Deng Y X, Wang W L, Zhou S M, et al. Relationships of potassium-releasing rhizosphere microorganisms with soil potassium content, potassium use efficiency and root vigor in wheat (*Triticum aestivum* L.)[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2021, 27(6): 1027—1043. [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.]
- [33] Zeng Y H, Feng F Y, Medová H, et al. Functional type 2 photosynthetic reaction centers found in the rare bacterial phylum Gemmatimonadetes[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2014, 111 (21): 7795—7800.

(责任编辑: 陈荣府)