

叶面喷施高螯合率山梨醇螯合钾对芹菜产量、品质及钾素吸收利用的影响^①

张 静, 孙 伟, 张子琪, 石 祥, 赵 立, 朱健龙, 郑瑞丽, 张明霞, 刘可忠, 颜冬云*

(青岛大学环境科学与工程学院, 山东青岛 266071)

摘要: 本试验以温室大棚种植实心芹菜为研究对象, 设叶面喷施清水对照 (CK), 喷施实验室自制螯合率为 60% (CR60)、70% (CR70)、80% (CR80)、90% (CR90) 和 100% (CR100) 的山梨醇螯合钾, 共 6 个处理, 探究叶面喷施不同螯合率山梨醇螯合钾对芹菜收获期产量、品质及钾素吸收利用的影响。结果表明: ①与 CK 处理相比, 叶面喷施不同螯合率的山梨醇螯合钾均能促进芹菜生长, 提高产量, 以 CR90 处理增产效果最佳, 较 CK 处理显著增产 27.9%。②CR90 和 CR100 处理的叶柄硝酸盐含量与 CR60、CR70、CR80 处理相比分别显著降低 13.8%~28.4%、21.2%~34.6%, 叶片硝酸盐含量分别降低 2.34%~18.9%、13.2%~27.9%; 与 CK、CR60、CR70 处理相比, CR90 处理的叶片可溶性糖含量显著提高 57.4%~82.9%; CR90 处理的叶柄可溶性蛋白含量比 CK、CR60、CR70、CR100 处理显著增加 16.3%~28.9%, CR70 处理的叶片可溶性蛋白较 CR60 处理显著增加 29.0%; CR100 处理的叶柄、叶片可溶性固形物比 CK、CR60、CR70、CR80、CR90 处理分别显著增加 4.26%~11.4%、17.0%~35.2%。③不同螯合率处理较 CK 处理均提高了收获期芹菜的钾素含量与累积量, 以 CR90 处理提升幅度最为显著, 芹菜叶片、叶柄和根系钾素含量分别提高 38.6%、11.8% 和 17.4%, 钾素累积量分别提高 33.60%、61.8% 和 35.1%; 基于土壤钾素表观平衡发现, 各处理均可促进植株吸收土壤钾素, 其中不同处理的土壤钾素盈余量为 K_2O 12.11~85.60 kg/hm², CR90 处理的盈余量最少, 为 12.11 kg/hm²。可见, 在芹菜生长旺盛期喷施高螯合率的山梨醇螯合钾肥, 可增加芹菜产量, 提高其营养品质, 降低硝酸盐含量, 提高叶面钾肥贡献率, 其中以螯合率 90% 最佳。

关键词: 融合率; 山梨醇螯合钾; 芹菜; 产量与品质; 钾素吸收与利用

中图分类号: S636.3; S143 文献标志码: A

Effects of Foliar Spraying Sorbitol-chelated Potassium with High Chelation Rate on Yield, Quality, Potassium Uptake and Utilization of Celery

ZHANG Jing, SUN Wei, ZHANG Ziqi, SHI Xiang, ZHAO Li, ZHU Jianlong, ZHENG Ruili, ZHANG Mingxia, LIU Kezhong, YAN Dongyun*

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

Abstract: In this study, the solid celery planted in greenhouse was used as the research object with six treatments: clear-water (CK), self-made sorbitol-chelated potassium fertilizer with the chelating rate of 60% (CR60), 70% (CR70), 80% (CR80), 90% (CR90) and 100% (CR100). The effects of foliar spraying with different chelation rates of sorbitol-chelated potassium on the yield, quality, potassium uptake and utilization of celery during harvest period were investigated. The results showed that: 1)Compared with CK, foliar spraying of sorbitol-chelated potassium accelerated celery growth and yield, CR90 showed the best effect of yield increase, which significantly increased the yield by 27.9% compared with CK. 2)Compared with CR60, CR70 and CR80, nitrate contents in petioles of CR90 and CR100 decreased by 13.8%~28.4% and 21.2%~34.6% respectively, while nitrate content in leaves reduced by 2.34%~18.9% and 13.2%~27.9%, respectively. Compared with CK, CR60 and CR70, soluble sugar content in leaves of CR90 was dramatically increased by 57.4%~82.9%. Soluble protein content of petiole of CR90 was remarkably enhanced by 16.3%~28.9% compared with CK, CR60, CR70 and CR100. Soluble protein content of leaves of CR70

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: 张静 (1999—), 女, 河南周口人, 硕士研究生, 主要从事新型肥料的研发与高效利用研究。E-mail: zhangjing3942@163.com

was greatly increased by 29.0% compared with CR60. Compared with CK, CR60, CR70, CR80 and CR90, soluble solids of petiole and leaf of CR100 were substantially promoted by 4.26%–11.4% and 17.0%–35.2%, respectively. 3)Compared with CK, CR treatments increased potassium content and accumulation in celery at harvest stage, and CR90 had the most obvious result, whose potassium content in celery leaves, petioles and roots increased by 38.6%, 11.8% and 17.4%, respectively, and the potassium accumulation increased by 33.60%, 61.8% and 35.1%, respectively. Based on plant potassium application, soil and leaf potassium uptake, the apparent balance of soil potassium was calculated. It was found that foliar application of different rates promoted the absorption of soil potassium by plants. The surplus of different chelation rates was K_2O 12.11–85.60 kg/hm², and the surplus of CR90 was the least, which was 12.11 kg/hm². In conclusion, the application of high chelation rate sorbitol-chelated potassium fertilizer could increase celery yield, improve its nutritional quality, reduce nitrate content, and ensure the contribution rate of foliar potassium fertilizer, of which the optimal chelation rate of sorbitol chelated potassium fertilizer was 90% for celery.

Key words: Chelating rate; Sorbitol-chelated potassium; Celery; Yield and quality; Potassium uptake and utilization

钾作为植物生长发育过程中所必需的大量矿质营养元素，在细胞酶、蛋白质和维生素的合成，营养物质的运输和吸收，抵抗非生物和生物胁迫以及提高作物产量等方面起着关键作用^[1]。因此传统钾肥在农业上被广泛应用，前人研究表明，钾肥不仅可以提高胡麻^[2]、棉花^[3]等的生长速度和产量，还可以影响苹果^[4]的硬度、甜度、酸度、色度等品质指标。但土施钾肥在提高产量与品质的同时也带来了肥料利用率低、土壤酸化、次生盐渍化等一系列问题，综合研究表明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^[5-6]。山梨醇作为一种新型螯合配体，以其为原料合成的山梨醇螯合肥可有效促进矿质元素在植物韧皮部的运输，补充植物营养^[7]。螯合肥的螯合率可通过测定中心离子不同状态物质的含量来确定，也是衡量螯合物品质的量化指标^[8]。课题组前期已在花生、番茄、小白菜等作物上进行试验，叶面喷施山梨醇螯合肥处理的作物产量与品质均高于对照处理，取得了良好的应用效果^[9-11]。

芹菜 (*Apium graveolens* L.) 作为一种广泛种植的蔬菜，其叶片和叶柄富含维生素C、膳食纤维、矿物质等营养成分^[12-13]。芹菜作为浅根系作物，对土壤深层养分吸收能力相对较弱。土壤中钾素难以满足其旺盛生长时期的需求，并且土壤中钙、镁和钾之间相互制衡，进一步影响土壤的供钾能力^[14]。在芹菜生长后期叶面喷施钾肥，不仅满足芹菜钾素需求，也降低了土壤板结与盐渍化的风险^[15]。关于螯合肥前人研究更多集中于叶面追施水溶肥，如氨基酸水溶肥^[16]、腐殖酸水溶肥^[17]等在蔬菜上提质增产的报道渐多，但这些研究没有定量分析蔬菜吸收的是游离态还是螯合态养分，关于作物吸收的钾素对品质的贡献则缺乏深入分析，且作物的钾素表观平衡与表层土壤有效钾的量化关系也不明确。因此，本研究在最适浓度

20 g/L、最适钾源乙酸钾的基础上，分析叶面喷施一系列螯合率梯度的山梨醇螯合钾肥对芹菜收获期产量、叶柄品质及植株各部位钾素吸收的影响，以阐明不同螯合率的山梨醇螯合钾肥施用效果与机理，为其推广应用提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验区基本概况

试验在山东省青岛市崂山区王哥庄街道固山社区(120°37'E, 36°16'N)碧海蓝田生态农业有限公司温室大棚内进行。该地区土壤类型为棕壤，0~20 cm 土壤基本化学性质：pH 5.93、碱解氮 193.5 mg/kg、有机质 31.9 g/kg、有效磷 196.6 mg/kg、速效钾 336.8 mg/kg。

1.2 供试材料

供试芹菜品种为青苗实心芹菜。

芹菜种植前施基础肥料：脲铵氮肥 282.75 kg/hm²(广东，瑞丰)、硫酸钾 282 kg/hm²(山东济宁，美顿)以及大量元素水溶肥(N-P-K: 20-20-20) 326.25 kg/hm²(山东临沂，史丹利)，一次性施入。

供试叶面肥为山梨醇螯合钾(钾源：乙酸钾；喷施浓度以 K^+ 计：20 g/L)，由实验室自行研发。具体流程为：将去离子水加入反应釜，设置水浴温度为 50~90 °C，待温度稳定后，将山梨醇加入反应釜中，恒温加热并不断搅拌，接着加入乙酸钾，充分搅拌，保持温度在 50~90 °C，反应时间 0.5~1 h，通过控制反应条件得到不同螯合率的山梨醇螯合钾母液。

1.3 试验设计

供试芹菜连续种植两季，第一季将山梨醇螯合钾浓度与钾源作为变量，探究其对芹菜产量、品质及钾素积累的影响，确定最适喷施浓度为 20 g/L，最适钾源为乙酸钾^[18]。根据第一季研究结果，进行螯合率田间探究试验，共设置 6 个处理：喷施清水(CK)；

分别喷施螯合率为 60%、70%、80%、90%、100% 的山梨醇螯合钾，记为 CR60、CR70、CR80、CR90、CR100。每个处理设置 4 个小区重复，每个小区长 1.6 m、宽 1 m，完全随机区组排列，小区间设 0.5 m 保护行。2022 年 1 月 24 日进行芹菜移栽；植株进入旺盛生长期开始进行喷施，每 5~7 d 施一次，共进行 3 次，分别于 2 月 26 日(定植 34 d)、3 月 5 日(定植 41 d)及 3 月 11 日(定植 47 d)采用手动小型喷雾器进行山梨醇螯合钾喷施，每个小区喷施量为 0.1 L/m²；3 月 16 日(定植 52 d)收获。

1.4 山梨醇螯合钾肥的螯合率测定

采用有机溶剂析出法，加入按一定比例混合的无水乙醇和丙酮为提取剂，于 60 °C 下水浴加热 30 min，室温放置 5 min，转速 6 000 r/min 下离心 20 min，将离心管中上清液转移后继续重复上述步骤 3~5 次，使山梨醇螯合钾沉淀中未进行螯合的反应物完全溶解至上清液中，沉淀即为山梨醇螯合钾。

准确称取 1 g 融合母液，收集并合并 3 次分离提纯后产生的上清液、底物，分别加水定容至 100 mL，在相同条件下分别测定融合母液 ($D_{\text{融合母液}}$)、上清液 ($D_{\text{上清液}}$) 及底物 ($D_{\text{底物}}$) 的电导率，根据以下公式计算融合率^[19]：

$$\text{融合率}(\%) = \left(1 - \frac{D_{\text{上清液}}}{D_{\text{融合母液}}} \right) \times 100$$

1.5 试验测定项目和方法

每次喷施前和收获前进行各小区叶绿素、叶柄粗和株高的测定，SPAD 使用叶绿素仪 (SPAD-502, Minolta INC., Japan) 测定，在每个小区选取具有代表性的 4 株芹菜用一体式园艺插地标签进行标记，选取标记芹菜的倒三叶分别进行两次测定，共计测定 8 次，取平均值为单个小区的 SPAD 值；叶柄粗使用数显游标卡尺(分辨率 0.01 mm)进行叶柄厚度测定，株高使用 80 cm(分辨率 0.1 cm)量程的直尺进行测量，在每个小区随机选取具有代表性的 10 株芹菜，取平均值为单个小区的叶柄粗、株高。

芹菜收获期，剔除残败叶，取各个小区地上部鲜物质量作为产量。测产完毕后，在每个小区样品中选取长势基本一致的 8 株芹菜，其中 4 株(去除根部)用于品质指标的测定，芹菜叶柄的硝酸盐含量采用紫外分光光度法测定；维生素 C 含量采用 2,6-二氯靛酚法测定；可溶性蛋白含量采用考马斯亮蓝 G-250 法测定；可溶性固形物含量采用折射仪 (PAL-101) 测定；可溶性糖含量采用蒽酮比色法测定。

另外 4 株(整株)收获后称量鲜重后分离叶柄、叶、根后，置于烘箱 105 °C 杀青 30 min，75 °C 烘干至恒重，磨碎密封袋保存。植株中的钾含量测定采用消解法 ($\text{HNO}_3 : \text{HClO}_4 : \text{HF} = 4 : 1 : 0.5$)，定容后用 0.45 μm 滤膜过滤，电感耦合等离子体原子发射光谱法 (ICP-OES) 测定。芹菜收获后采集土样，距离芹菜叶柄底部 5 cm 处采集 0~20 cm 表层土壤，阴凉通风处自然风干，过 1 mm 筛，土壤有效态钾采用醋酸铵浸提，ICP-OES 测定。以上测定方法参照《土壤农化分析》^[20]。

1.6 数据处理与分析

钾素积累量 (mg/株) = 植株各器官干物质量 × 植株各器官钾素含量；

土壤钾素表观平衡量 ($\text{K}_2\text{O kg/hm}^2$) = 钾素投入总量 - 作物带出土壤钾素总量；

叶面钾肥贡献率 (%) = (施叶面钾肥区作物产量 - 不施叶面钾肥区作物产量) / 叶面施钾肥区作物产量 × 100。

试验数据采用 Excel 2019 进行整理；通过 SPSS 25.0 进行统计分析，处理间单因素方差分析采用 Duncan 法($P < 0.05$)；利用 Origin 2021 进行绘图。

2 结果与分析

2.1 不同螯合率处理芹菜产量与生长性状

施用不同螯合率的山梨醇螯合钾均能增加芹菜产量(表 1)，与 CK 处理相比，CR60、CR70、CR80、CR90 和 CR100 处理的产量显著增加 14.8%~27.9%。随山梨醇螯合钾螯合率的提高，芹菜产量增幅表现为先增后减，螯合率为 90% 时(CR90 处理)产量最高，达 81.36 t/hm²，较 CR60、CR70、CR80、CR100 处理显著提高 7.15%~11.41%；当螯合率为 100% 时(钾离子全部以螯合态存在，自由离子态为零)，芹菜增产幅度下降。同一施肥水平下，不同螯合率处理的叶面钾肥贡献率表现为 CR90>CR80>CR100>CR70>CR60，CR90 处理的贡献率比 CR60、CR70、CR80、CR100 处理提高 21.1%~69.4%。

不同螯合率处理对芹菜叶片中叶绿素含量的影响显著，定植 34 和 41 d 时，CK 处理的 SPAD 值均为最低(图 1A)。定植 47 d 时，CR60、CR70、CR80 和 CR100 处理的 SPAD 值，与 CK 处理相比显著增加 3.06%~11.5%。定植 41 和 52 d 时，各螯合率处理间的 SPAD 值均无显著差异，但高于 CK 处理。随着生育期的推进，不同螯合率处理对芹菜株高和叶柄粗产生影响(图 1B、1C)。定植 34、41、47 和 52 d，

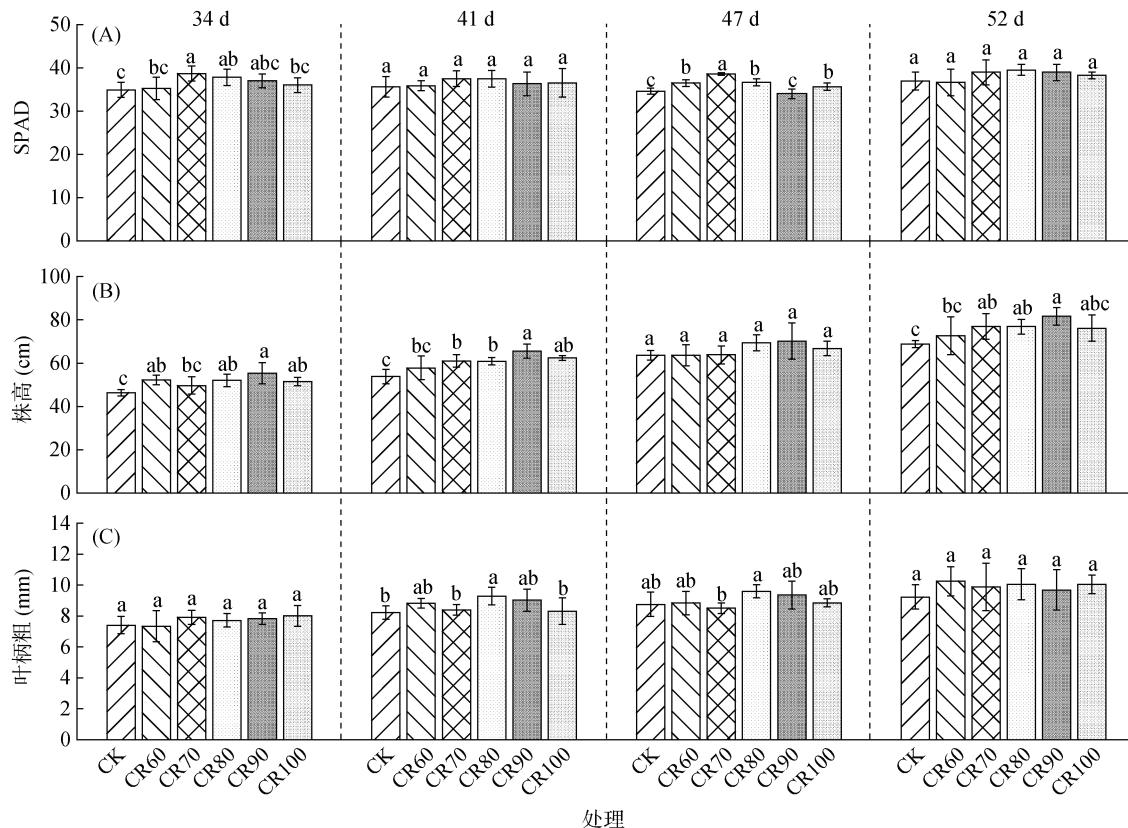
CK 处理的株高均为最低, CR90 处理最高。芹菜生长至 41 d 时, CR90 处理的株高, 与 CK、CR60、CR70、CR80 处理相比显著增加 7.41% ~ 21.8%; 52 d 时, CR90 处理的株高达到最高 81.7 cm, 与 CK 处理相比

显著提高 18.7%, 而各螯合率处理间均无显著差异。CR80、CR90 处理的叶柄粗在定植 41 d 时与 CK、CR70 和 CR100 处理相比分别增加 10.6% ~ 12.9%、7.48% ~ 9.67%, CR80 处理增加较为显著。

表 1 不同螯合率处理对芹菜产量的影响
Table 1 Effects of different chelation rates on celery yield

处理	产量 (t/hm ²)	较 CK 增产 (%)	叶面钾肥贡献率(%)
CK	63.59 ± 0.576 e	-	-
CR60	73.02 ± 1.308 d	14.8	12.89
CR70	74.52 ± 0.850 cd	17.2	14.65
CR80	77.59 ± 1.260 b	22.0	18.02
CR90	81.36 ± 0.886 a	27.9	21.83
CR100	75.92 ± 1.034 bc	19.4	16.22

注: 同列数据小写字母不同表示处理间差异显著 ($P<0.05$), 下表同。



(小写字母不同表示同一生长期不同处理间差异达 $P<0.05$ 显著水平, 下图同)

图 1 不同螯合率处理对芹菜定植后 SPAD (A)、株高 (B) 和叶柄粗 (C) 的影响

Fig.1 Effects of different chelation rates on SPAD (A), plant height (B) and petiole diameter (C) of celery at different days after planting

2.2 不同螯合率处理芹菜收获期品质

蔬菜品质一般包括营养品质和卫生品质。硝酸盐属卫生品质范畴, 维生素 C、可溶性糖、可溶性固形物及可溶性蛋白属营养品质。随着山梨醇螯合钾螯合率提高, 芹菜叶柄和叶片的硝酸盐含量均先升高后下降(图 2A)。CR70 处理的叶柄以及 CR80 处理的叶片硝酸盐含量最高, 分别为 0.83、0.65 g/kg, 与 CK 处

理相比分别显著提高 25.8%、10.3%; CR90 和 CR100 处理的叶柄硝酸盐含量与 CR60、CR70、CR80 处理相比分别显著降低 13.8% ~ 28.4%、21.2% ~ 34.6%, 叶片硝酸盐含量分别降低 2.34% ~ 18.9%、13.2% ~ 27.9%。如图 2B 所示, 处理间叶片维生素 C 含量无显著差异; 叶柄维生素 C 含量随螯合率的提升而下降, 与 CK、CR70 处理相比, CR90 和 CR100 处理

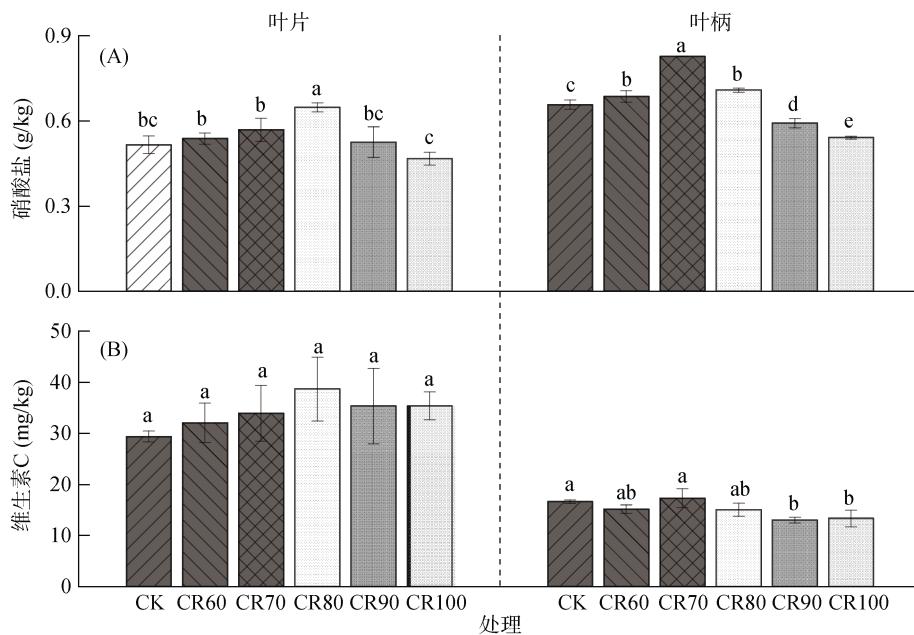


图 2 不同螯合率处理对芹菜叶柄和叶的硝酸盐 (A) 和维生素 C (B) 含量的影响
Fig. 2 Effects of different chelation rates on contents of nitrate (A) and VC (B) in celery petioles and leaves

的叶柄维生素 C 含量分别显著降低 21.6%、24.8% 和 19.7%、22.9%。

不同螯合率处理对芹菜地上部位叶片可溶性糖含量影响显著, 叶柄无显著差异(图 3A)。随螯合率提高, 芹菜叶片中可溶性糖含量呈增加趋势, 以 CR100 处理可溶性糖含量最高, 与 CK、CR60、CR70 处理相比, CR80、CR90 和 CR100 处理的叶片可溶性糖含量分别显著提高 36.4% ~ 58.5%、57.4% ~ 82.9%、59.7% ~ 85.5%。不同螯合率处理对地上部位叶片、叶柄可溶性蛋白含量产生影响 (图 3B), 以 CR70 处理的叶片和 CR90 处理的叶柄可溶性蛋白含量最高, 其中 CR70 处理的叶片可溶性蛋白含量较 CR60 显著提高 29.0%, CR90 处理的叶柄可溶性蛋白含量与 CK、CR60、CR70、CR100 处理相比显著增加 16.3% ~ 28.9%。

随螯合率增加, 芹菜叶片、叶柄中可溶性固形物含量呈先下降后上升的趋势(图 3C)。CR70 处理的叶片和叶柄中可溶性固形物含量最低, 与 CK、CR60 处理相比分别降低 13.4%、5.04% 和 6.4%、3.65%。当螯合率大于 70% 时, 叶柄、叶片可溶性固形物含量开始提高, CR100 处理的叶片、叶柄可溶性固形物含量最高, 与 CK、CR60、CR70、CR80、CR90 处理相比, 分别显著增加 17.0% ~ 35.2%、4.26% ~ 11.4%。除 CR100 处理外, 其余处理的叶片中可溶性固形物含量均无显著差异。

2.3 不同螯合率处理芹菜植株钾含量与吸收量

不同螯合率处理对芹菜叶片和根中的钾素含量

与钾素积累量影响显著(表 2)。CR70 处理的叶片钾素含量及 CR90 处理的根中钾素含量与其余处理差异显著, CR70 处理叶片钾素含量较 CK、CR60、CR80、CR90、CR100 处理显著增加 12.9% ~ 57.5%, CR90 处理根部钾素含量较其他处理显著增加 2.93% ~ 17.4%。不同螯合率处理整体表现为促进芹菜各器官中钾素的积累。叶柄、根部钾素积累量均以 CR90 处理最高, 与 CK、CR60、CR70、CR80、CR100 处理相比分别显著提高 21.3% ~ 64.1%、5.60% ~ 35.1%。叶片钾素积累量以 CR70 处理最高, 与 CK、CR60、CR80 处理相比显著提高 9.85% ~ 43.1%, CR90 和 CR100 处理与 CR70 处理差异不显著。

2.4 不同螯合率处理山梨醇螯合钾肥应用成本

随着螯合率的提高, 山梨醇的用量随之增加, 总叶面施肥成本也随之增加, CR60 的山梨醇螯合钾肥每公顷总成本(叶面肥成本+劳动力成本)仅为 CR100 处理的 1/2 (表 3)。CR60、CR70、CR80、CR90 的分配成本接近, 仅为 0.10 元/kg, 这是农民能够负担得起的, 并且可以生产高产量、富含钾养分的高品质芹菜。

2.5 不同螯合率处理土壤钾含量与表观盈余

不同螯合率山梨醇螯合钾喷施显著影响收获期土壤剩余有效钾含量 (图 4A), CR90 处理的土壤有效钾含量最低, 为 278.8 mg/kg, 与 CK、CR60、CR70、CR80、CR100 处理相比显著降低 16.45% ~ 24.40 %。图 4B 为芹菜收获后农田钾素表观盈余量的状况, 通

过计算土壤-芹菜系统钾素表观平衡发现, 不同螯合率山梨醇螯合钾喷施对土壤钾素平衡状况影响较大, 整体表现出正平衡; 以 CK 处理盈余量最高, 为 K_2O

$91.28 \text{ kg}/\text{hm}^2$, 而各螯合率处理盈余量较 CK 处理降低 $6.33\% \sim 86.8\%$, 除 CR60 处理外其他处理差异显著; CR90 处理盈余量最低, 仅 $K_2O 12.11 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 。

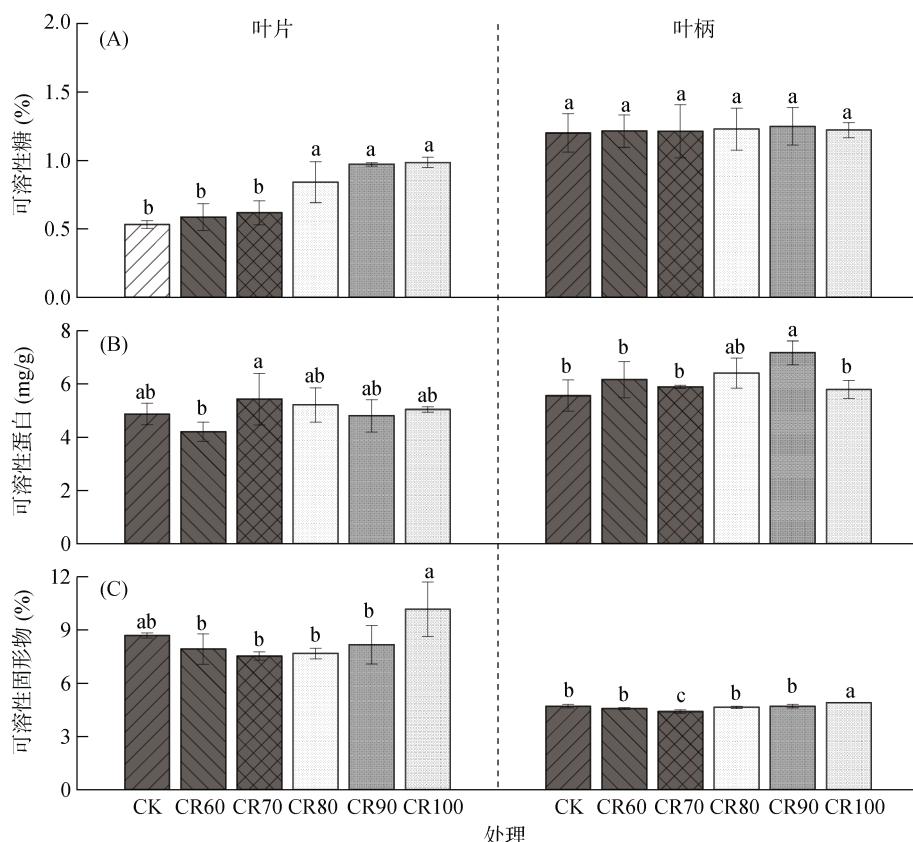


图 3 不同螯合率处理对芹菜叶柄和叶的可溶性糖 (A)、可溶性蛋白 (B) 和可溶性固形物 (C) 的影响

Fig. 3 Effects of different chelation rates on contents of soluble sugar (A), soluble protein (B) and soluble solids (C) in celery petioles and leaves

表 2 不同螯合率处理对收获期芹菜各器官钾素含量与积累量的影响

Table 2 Effects of different chelation rates on potassium contents and accumulation in different organs of celery at harvest stage

指标	处理	叶片	叶柄	根
钾素含量(mg/g)	CK	$25.45 \pm 1.14 \text{ c}$	$51.12 \pm 4.79 \text{ a}$	$29.92 \pm 0.49 \text{ e}$
	CR60	$34.30 \pm 1.90 \text{ b}$	$52.15 \pm 4.02 \text{ a}$	$31.28 \pm 0.35 \text{ d}$
	CR70	$40.09 \pm 1.61 \text{ a}$	$54.63 \pm 5.97 \text{ a}$	$32.83 \pm 0.30 \text{ c}$
	CR80	$32.86 \pm 1.32 \text{ b}$	$57.68 \pm 6.93 \text{ a}$	$34.11 \pm 0.23 \text{ b}$
	CR90	$35.28 \pm 0.60 \text{ b}$	$57.15 \pm 0.56 \text{ a}$	$35.12 \pm 0.20 \text{ a}$
	CR100	$35.51 \pm 3.04 \text{ b}$	$50.30 \pm 3.40 \text{ a}$	$34.12 \pm 0.64 \text{ b}$
钾素积累量(mg/株)	CK	$98.87 \pm 4.31 \text{ c}$	$359.9 \pm 40.17 \text{ d}$	$24.53 \pm 0.81 \text{ c}$
	CR60	$121.4 \pm 6.41 \text{ b}$	$354.9 \pm 27.20 \text{ d}$	$26.28 \pm 1.67 \text{ c}$
	CR70	$141.5 \pm 6.07 \text{ a}$	$480.0 \pm 57.99 \text{ b}$	$29.54 \pm 0.25 \text{ b}$
	CR80	$128.8 \pm 5.81 \text{ b}$	$406.4 \pm 48.62 \text{ cd}$	$30.02 \pm 0.50 \text{ b}$
	CR90	$132.1 \pm 2.35 \text{ ab}$	$582.3 \pm 1.61 \text{ a}$	$33.13 \pm 1.42 \text{ a}$
	CR100	$131.9 \pm 11.15 \text{ ab}$	$449.3 \pm 30.97 \text{ bc}$	$31.38 \pm 0.43 \text{ ab}$

表 3 不同螯合率处理叶面施肥成本投入
Table 3 Cost input of foliar fertilization of different chelation rates treatment

处理	产量 (t/hm ²)	叶面肥成本(元/hm ²)	劳动力成本(元/hm ²)	总成本(元/hm ²)	分配成本(元/kg)
CK	63.59	0	0	0	0
CR60	73.02	699	300	999	0.11
CR70	74.52	750	300	1 050	0.10
CR80	77.59	1 016	300	1 316	0.09
CR90	81.36	1 497	300	1 797	0.10
CR100	75.92	1 982	300	2 282	0.19

注：估算成本以 2024 年当地市场为基准；总成本为肥料成本和人工成本之和，分配成本为总成本/较 CK 增产量。叶面喷施共 3 次，雇佣人工成本计算为 100 元/(次·hm²)。70% 的山梨醇和乙酸钾的价格分别为 4 000 元/吨和 8 000 元/吨。

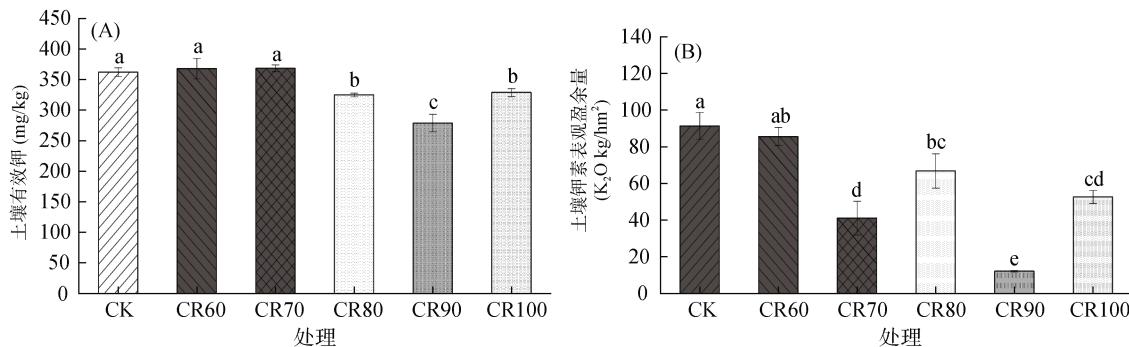


图 4 不同螯合率处理对土壤有效钾含量 (A) 及表观盈余 (B) 的影响
Fig. 4 Effects of different chelation rates on soil available potassium content (A) and apparent surplus (B)

2.6 不同螯合率处理对芹菜产量、品质与植株-土壤钾素含量相关性分析

芹菜叶柄、叶片钾素含量和积累量与产量呈极显著正相关($P<0.01$)，而与土壤有效钾含量呈负相关(表 4)。叶柄钾含量、积累量与叶柄可溶性蛋白呈显

著正相关($P<0.05$)；叶片钾积累量与叶片维生素 C、叶片可溶性糖呈正相关。土壤有效钾与叶柄可溶性蛋白、叶片可溶性糖呈显著负相关，与叶柄硝酸盐、叶柄维生素 C 呈显著正相关。这表明收获期土壤剩余速效钾含量过多会造成硝酸盐积累，直接影响植株体

表 4 收获期芹菜植株-土壤钾素含量与产量、品质的相关性
Table 4 Correlation among potassium contents in celery and soil, yield and quality of celery at harvest stage

因子	叶柄钾含量	叶柄钾积累量	叶片钾含量	叶片钾积累量	土壤有效钾含量
产量	0.364	0.662**	0.659**	0.758**	-0.711*
叶柄硝酸盐	0.155	-0.177	0.299	0.211	0.585*
叶柄维生素 C	-0.180	-0.411	-0.112	-0.218	0.692*
叶柄可溶性蛋白	0.540*	0.568*	0.205	0.286	-0.632**
叶柄可溶性糖	-0.285	-0.075	0.075	0.095	-0.113
叶柄可溶性固形物	-0.227	0.029	-0.364	-0.255	-0.412
叶片硝酸盐	0.407	-0.091	0.135	0.234	0.042
叶片维生素 C	0.313	0.235	0.431	0.578*	-0.368
叶片可溶性蛋白	-0.291	0.003	0.189	0.262	-0.050
叶片可溶性糖	0.103	0.534*	0.271	0.434	-0.779**
叶片可溶性固形物	-0.404	-0.05	-0.172	-0.148	-0.102
叶柄钾含量	1	0.586*	0.137	0.220	-0.365
叶柄钾积累量		1	0.463	0.523*	-0.689**
叶片钾含量			1	0.962**	-0.121
叶片钾积累量				1	-0.300

注：*、**分别表示相关性达 $P<0.05$ 、 $P<0.01$ 显著水平。

内有机营养物质形成、转化与分配^[21]。叶柄钾含量和积累量以及叶片钾含量和积累量呈显著正相关,土壤有效钾含量与植株中的钾含量与钾积累变化呈负相关关系,通过叶面喷施山梨醇螯合钾促进钾离子在植株体内迁移,增强植株对叶面喷施钾肥和土壤施入钾肥的吸收。

3 讨论

3.1 不同螯合率处理对芹菜产量与生长性状的影响

在芹菜的栽培生产过程中,生长后期补充钾肥的不同存在形态(离子态、非螯合态和螯合态)显著影响芹菜的生长发育,而生长性状株高和叶柄粗会直接影响产量形成。研究表明,在草莓定植后进入旺盛生长期、现蕾期、果实膨大期依次喷施中等螯合率的山梨醇螯合钙镁锌对草莓产量及株高、茎粗、SPAD值有显著影响^[22]。石祥等^[18]研究发现,不同浓度的山梨醇螯合钾肥可以明显改变芹菜的生物学经济性状,尤其是芹菜的株高、叶柄粗,增产增收效果较显著。本研究结果也验证此观点,叶面喷施不同螯合率的山梨醇螯合钾肥对芹菜产量影响显著(表1),其中CR90处理的芹菜增产效果最好;同时,芹菜植株的株高与叶柄粗在生育期内持续增长,CR90处理增幅较大(图1B、1C)。螯合肥的螯合率越高,说明螯合剂对无机离子的亲和力越强,形成的螯合物越稳定,有助于植株吸收^[23],进而提高叶面肥料利用率,促进作物增产。

3.2 不同螯合率处理对芹菜收获期品质的影响

蔬菜是一种需钾量较多的作物,其需钾量约为需氮量的两倍,金珂旭等^[24]在适量施用氮、磷肥的基础上增施钾肥,提高甘蓝的产量与品质的同时降低了硝酸盐含量。硝酸盐含量是影响叶菜类品质的指标之一,尤其设施蔬菜普遍高于露地,采用技术手段降低设施芹菜硝酸盐含量可有效保障其食用安全^[25]。本试验中,不同的螯合率水平下,叶面喷施山梨醇螯合钾肥对芹菜体内硝酸盐含量的影响具有双重性,CR70和CR80处理显著提高了地上部硝酸盐含量(图2A),而CR90和CR100处理均降低了芹菜地上部硝酸盐含量。分析原因,各处理的喷施钾含量相同,而山梨醇用量随着螯合率的增加而增加,说明CR90与CR100两高螯合率处理可以为芹菜叶片提供充足碳源,有助于氮代谢,提高硝酸还原酶活力,促进硝酸盐同化,降低硝酸盐含量^[26]。本试验中,喷施以增效助剂及天然螯合剂山梨醇为配体的螯合钾,不同螯合率处理的叶柄和叶片维生素C含量无显著差异

(图2B)。这表明在蔬菜生长后期喷施钾肥,对蔬菜的抗氧化性无显著影响,这与谷守宽等^[27]在莴苣上的研究结果一致。当螯合率大于70%时,叶片和叶柄中可溶性固形物含量开始增加,CR100处理的叶柄、叶片可溶性固形物含量最高(图3C)。可溶性蛋白的主要成分包括各类活性酶、转运蛋白等,是植物体内重要的营养物质,在植物整个生命中起免疫保护、控制生长分化功能^[28]。本试验虽然未施氮肥,但却显著提高了芹菜叶柄和叶片可溶性蛋白的含量,以叶柄中CR90处理和叶片中CR70处理提升最为显著(图3B)。这可能是因为钾促进了氮代谢相关酶活性,进而有利于氨基酸和蛋白质的合成^[29],这与郭傲等^[30]在无花果果实和康利允等^[31]在甜瓜果实上的研究结果一致。与常规施肥处理相比,喷施不同螯合率的山梨醇螯合钾均提高芹菜地上部可溶性糖总量(图3A),这与Tan等^[32]在油菜上的研究结果一致。

3.3 不同螯合率处理对芹菜植株-土壤系统钾素吸收利用的影响

芹菜各器官养分含量水平可反映其对养分的吸收能力,叶面施肥对植物的养分吸收和分配有重要影响^[9]。已有研究表明,外源施用表面活性剂等助剂是一种公认的提高肥料喷洒效率及减轻对作物生产不利影响的策略^[33],如佐剂氨基酸、山梨醇等分别与钙、钾等无机离子螯合后,螯合态钾的稳定性高于游离钾,不容易被固定,到达植物需钾的部位更快^[9-34]。但是以往研究中使用的螯合肥的螯合率相对较低,无法定量分析作物吸收的是游离态还是螯合态离子。本研究结果表明,CR70处理的叶片钾素含量及CR90处理的根中钾素含量较其他处理得到了显著提高;虽然叶柄钾含量差异不显著,但是与CK处理相比,CR80、CR90处理仍分别提高12.83%、11.8%(表2)。这表明,钾离子以螯合态形式存在时,穿过叶片角质层的效率高于无机离子,进入植物体内的螯合钾,以其溶解度大的优势更好地在植物韧皮部运输^[35],因此高螯合率的螯合钾肥更能促进芹菜各部位钾养分的吸收。作物养分积累量是衡量作物生长发育状况的重要指标,代表作物体内养分代谢强弱^[36]。孙伟等^[37]研究指出,在花生上喷施山梨醇螯合钾,花生钾含量与积累量得到显著提高,并以较高比例转移至生殖器官,表明与喷施离子态钾相比,螯合态钾对提高钾的利用效率至关重要^[38]。本研究中,螯合率≥80%的3组喷施处理(CR80、CR90、CR100)收获期土壤剩余有效钾含量均显著低于其他3组处理(CK、CR60、CR70)。Zhang等^[39]研究表明,成熟期土壤剩余有效

钾含量降低时会提高每公顷植株吸收的钾含量和经济产量。本研究结论与其一致, CR90 处理的收获期土壤剩余的有效钾含量最低, 而产量却在各螯合率处理中最高。

通过探讨叶面喷施不同螯合率山梨醇螯合钾在芹菜生长旺盛时期对土壤-植株钾素含量的影响, 根据植株叶柄、叶片、根的钾素输出, 化学钾肥的输入及叶面有机螯合肥钾素输入, 不考虑灌溉投入和大气沉降所带入的钾素, 计算钾素表观盈亏量(图 4B)。结果显示, 不同螯合率处理均较 CK 处理显著降低土壤钾素盈余量, CR90 处理的土壤钾素盈余量仅为 K_2O 12.11 kg/hm², 这说明在施化学钾肥的基础上, 在芹菜生长旺盛时期喷施螯合钾, 促进植株吸收土壤钾素, 降低了土壤肥料流失风险, 同时提高了叶面钾肥的贡献率(表 1), 促进作物生长后期对叶面钾素的吸收利用, 改善植株体内钾素转移不均衡现象^[40]。但当钾离子全部转化为螯合态时(螯合率由 90% 增加到 100%), 叶面钾肥利用率增幅由 21.83% 下降至 16.22%, 增幅降低 25.70%, 与之对应的芹菜产量也具有相似规律, 因此如何进一步提升叶面钾肥利用率促进芹菜生物量的增加, 后续还需深入探究。

3.4 不同螯合率处理芹菜植株钾素积累和产量、品质及土壤有效钾的关系

蔬菜体内氮磷钾的代谢具有协调性和一致性, 蔬菜中的硝酸盐含量不仅是氮素代谢的重要组成部分, 也与磷、钾关系密切^[21]。芹菜叶柄可溶性蛋白含量与叶柄钾含量和钾积累量呈正相关, 而与土壤有效钾含量呈负相关(表 4)。这是由于钾可以增强作物对土壤氮素的吸收, 并上调蛋白质的合成^[41]。成熟期土壤剩余的有效钾含量与产量及植株中钾素的变化多呈负相关关系, 说明叶面喷施山梨醇螯合钾肥虽不能如土壤施钾直接作用于芹菜根系, 但通过对地上部植株的影响间接作用于根系, 从而促进浅根系作物芹菜吸收土壤中可利用的钾^[42], 提高芹菜产量。

4 结论

1) 芹菜生长旺盛期, 叶面喷施不同螯合率的山梨醇螯合钾肥, 可显著增产提质, 以 CR90 和 CR100 处理效果较好。

2) 芹菜生长旺盛期, 叶面喷施不同螯合率的山梨醇螯合钾肥, 不仅促进了钾素营养在芹菜各器官的积累与分配, 增强作物养分积累量, 还显著降低土壤钾素盈余量, 促进浅根系作物芹菜吸收土壤中可利用的钾, 以 CR90 处理效果最好。

3) 芹菜生长旺盛期, 叶面喷施不同螯合率的山梨醇螯合钾肥, 分配成本为 0.09 ~ 0.19 元/kg, 其中 CR90 处理分配成本仅 0.10 元/kg, 显著提高了芹菜的经济效益。以山梨醇为配体的螯合钾肥是一种具有稳定性并能提供碳源的新型肥料, 推荐叶面喷施螯合率为 90% 的山梨醇螯合钾肥。

参考文献:

- [1] Zörb C, Senbayram M, Peiter E. Potassium in agriculture—status and perspectives[J]. Journal of Plant Physiology, 2014, 171(9): 656–669.
- [2] 张素梅, 刘杰, 曹丽, 等. 氮、磷、钾配施对胡麻产量的影响及推荐施肥量研究[J]. 中国土壤与肥料, 2022(8): 140–147.
- [3] 李林洋, 夏淑洁, 张润花, 等. 氮钾互作对长江流域棉花产量和氮肥利用效率的影响及适宜施肥水平研究[J]. 中国土壤与肥料, 2022(1): 40–46.
- [4] 谌琛, 同延安, 路永莉, 等. 不同钾肥种类对苹果产量、品质及耐贮性的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(1): 216–224.
- [5] 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.
- [6] Zareei E, Zaare-Nahandi F, Hajilou J, et al. Eliciting effects of magnetized solution on physiological and biochemical characteristics and elemental uptake in hydroponically grown grape (*Vitis vinifera* L. cv. Thompson Seedless)[J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2021, 167: 586–595.
- [7] 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.
- [8] Clemens D F, Whitehurst B M, Whitehurst G B. Chelates in agriculture[J]. Fertilizer Research, 1990, 25(2): 127–131.
- [9] 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.
- [10] 白利勇. 糖醇螯合肥检测技术及其应用[D]. 青岛: 青岛大学, 2019.
- [11] 黄明丽, 孙文轩, 颜冬云, 等. 一种草莓专用螯合肥: CN107056514B[P]. 2018-09-11.
- [12] Renna M, Castellino M, Leoni B, et al. Microgreens production with low potassium content for patients with impaired kidney function[J]. Nutrients, 2018, 10(6): 675.
- [13] Zhang G, Yan Z M, Wang Y H, et al. Exogenous proline improve the growth and yield of lettuce with low potassium content[J]. Scientia Horticulturae, 2020, 271: 109469.
- [14] 薛欣欣, 吴小平, 王文斌, 等. 植物-土壤系统中钾镁营养及其交互作用研究进展[J]. 土壤, 2019, 51(1): 1–10.
- [15] 夏桂敏, 王瑞敏, 黄旭, 等. 调亏灌溉下施氮量对农田 CO_2 固定排放和花生产量的影响[J]. 农业机械学报, 2022, 53(6): 349–358.

- [16] 刘雪锋, 姚焕平, 姚建宁, 等. 含氨基酸水溶肥料在芹菜上的肥效试验[J]. 蔬菜, 2015(1): 23–24.
- [17] 孙海龙. 含腐植酸水溶肥在芹菜上的应用效果[J]. 腐植酸, 2023(3): 28–30, 50.
- [18] 石祥, 刘妍妍, 孙伟, 等. 喷施不同浓度山梨醇螯合钾对温室大棚芹菜生长及钾的有效利用研究[J]. 土壤通报, 2024, 55(6): 1695–1704.
- [19] 颜冬云, 白利勇, 孙文轩, 等. 基于电导率法测定糖醇螯合钙肥螯合率的方法: CN109142450B[P]. 2019-07-05.
- [20] 鲍士旦. 土壤农化分析.3 版[M]. 中国农业出版社, 2000.
- [21] 狄彩霞, 李会合, 王正银, 等. 不同肥料组合对莴笋产量和品质的影响[J]. 土壤学报, 2005, 42(4): 652–659.
- [22] 吕涛, 孙晓东, 刘翠翠, 等. 不同螯合肥对草莓生长、产量和品质的影响[J]. 黑龙江农业科学, 2021(5): 18–22.
- [23] 何江龙, 张凤魁, 陆彦平, 等. 糖醇螯合钙肥的反应条件及其对螯合率的影响[J]. 环境工程, 2019, 37(6): 160–164.
- [24] 金珂旭, 王正银, 樊驰, 等. 不同钾肥对甘蓝产量、品质和营养元素形态的影响[J]. 土壤学报, 2014, 51(6): 1369–1377.
- [25] 胡文友, 陶婷婷, 田康, 等. 中国农田土壤环境质量管理现状与展望[J]. 土壤学报, 2021, 58(5): 1094–1109.
- [26] Aslam M, Travis R L, Rains D W. Differential effect of amino acids on nitrate uptake and reduction systems in barley roots[J]. Plant Science, 2001, 160(2): 219–228.
- [27] 谷守宽, 袁婷, 陈益, 等. 稼秆钾替代化肥钾对莴笋的营养效应研究[J]. 土壤, 2017, 49(4): 699–705.
- [28] 黄雯, 王森, 陶爱群, 等. IBA 处理对枣嫩枝扦插可溶性糖和蛋白质含量的影响[J]. 湖南生态科学学报, 2018, 5(4): 17–22.
- [29] Magalhaes J R, Wilcox G E. Tomato growth and nutrient uptake patterns as influenced by nitrogen form and light intensity[J]. Journal of Plant Nutrition, 1983, 6(11): 941–956.
- [30] 郭傲, 林绪坚, 高欢欢, 等. 不同施钾水平对无花果糖积累及相关酶活性的影响[J]. 福建农业学报, 2019, 34(12): 1388–1396.
- [31] 康利允, 李晓慧, 高宁宁, 等. 钾肥追施时期后移对甜瓜产量和品质及钾肥利用率的影响[J]. 河南农业大学学报, 2020, 54(6): 941–948.
- [32] Tan H T, Sun W X, Zhao L, et al. Exogenous application of sorbitol-chelated calcium enhances salt tolerance in rapeseed (*Brassica napus* L.)[J]. Journal of Soil Science and Plant Nutrition, 2024, 24(3): 4196–4210.
- [33] Kovalchuk N M, Simmons M J H. Surfactant-mediated wetting and spreading: Recent advances and applications[J]. Current Opinion in Colloid & Interface Science, 2021, 51: 101375.
- [34] 刘瑜, 郭宁, 赵凯丽, 等. 喷施氨基酸螯合钙对结球生菜产量、品质和养分吸收的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2022(9): 123–126.
- [35] 沈欣, 袁亮, 李燕婷, 等. 小分子有机物质螯合钙肥的应用效果[J]. 中国土壤与肥料, 2016(3): 87–92.
- [36] 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.
- [37] 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.
- [38] Qin Y J, Wu W H, Wang Y. ZmHAK5 and ZmHAK1 function in K^+ uptake and distribution in maize under low K^+ conditions[J]. Journal of Integrative Plant Biology, 2019, 61(6): 691–705.
- [39] Zhang Z Y, Tian X L, Duan L S, et al. Differential responses of conventional and bt-transgenic cotton to potassium deficiency[J]. Journal of Plant Nutrition, 2007, 30(5): 659–670.
- [40] 张舒予, 金梦灿, 马超, 等. 稼秆还田配施腐熟剂对水稻产量及钾肥利用率的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2018(1): 49–55.
- [41] El-Sayed S, Hassan H, El-Mogy M, et al. Growth, yield and nutrient concentration of potato plants grown under organic and conventional fertilizer systems s[J]. American-Eurasian Journal of Agricultural and Environmental Sciences, 2014, 14(7): 636–643.
- [42] 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.