

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2022.06.004

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. 土壤, 2022, 54(6): 1117–1123.

喷施山梨醇螯合钙对花生生长及钾、钙、镁吸收的影响^①

李腾升, 魏倩倩, 王文昊, 崔玉照, 谭慧婷, 孙 伟, 杨 羽, 张欢洋, 韩传浩, 颜冬云*

(青岛大学环境科学与工程学院, 山东青岛 266071)

摘 要: 为探究不同山梨醇螯合钙喷施浓度对花生生长及养分吸收的影响, 采用大田试验, 以花育 22 号为试材, 在施基肥基础上设置 5 个钙素喷施浓度处理 (以 Ca^{2+} 计, 单位 g/L): 0 (CK)、1.4 (T1)、1.6 (T2)、1.8 (T3) 与 2.0 (T4), 测定了各处理对花生光合作用、收获期产量、品质、各器官干物质积累量及钾、钙、镁含量的影响。结果表明: ①与 CK 处理相比, 喷施山梨醇螯合钙提高了叶片 SPAD 值, 促进了花生光合作用, 尤其在结荚期; ②喷施山梨醇螯合钙能提高花生产量及粗脂肪、粗蛋白含量, 其中 T2 处理较 CK 处理分别提高 11.48%、5.74%、7.82%; ③喷施山梨醇螯合钙能够显著增加籽仁干物质积累量, 有效提高花生生殖器官干物质占比, 降低营养器官干物质分配比例, 以 T3 处理改善效果较为突出, 其次是 T2 处理; ④喷施山梨醇螯合钙对花生各器官钾、钙、镁含量的影响不同, 但总体上促进了花生对养分的吸收。主成分分析结果表明, 喷施山梨醇螯合钙显著影响了花生生长发育。综合来看, 喷施 Ca^{2+} 浓度为 1.6~1.8 g/L 的山梨醇螯合钙对花生增产提质效果更为突出。

关键词: 花生; 山梨醇螯合钙; 喷施浓度; 产量品质; 养分吸收

中图分类号: S963.9 **文献标志码:** A

Effects of Sorbitol Chelated Calcium on Peanut Growth and Absorption of Potassium, Calcium and Magnesium

LI Tengsheng, WEI Qianqian, WANG Wenhao, CUI Yuzhao, TAN Huiting, SUN Wei, YANG Yu, ZHANG Huanyang, HAN Chuanhao, YAN Dongyun*

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

Abstract: In order to explore the effects of different concentration of spraying sorbitol chelated calcium (Ca^{2+}) on the growth and nutrient absorption of peanuts, a field experiment was conducted with Huayu 22 as experimental material. Based on the application of base fertilizer, five Ca^{2+} spray concentrations were set up: 0 g/L (CK), 1.4 g/L (T1), 1.6 g/L (T2), 1.8 g/L (T3) and 2.0 g/L (T4), and their effects on photosynthesis, yield and quality of peanuts, dry matter accumulation, the contents of potassium (K), calcium (Ca) and magnesium (Mg) in various organs of peanuts were determined. The results show that: 1) Compared with CK, spraying sorbitol-chelated calcium can increase leaf SPAD value and promote peanut photosynthesis, especially in the pod setting stage; 2) Spraying sorbitol-chelated calcium can improve the yield, crude fat and crude protein contents, which are increased by 11.48%, 5.74% and 7.82% respectively under T2 compared with CK; 3) Spraying sorbitol-chelated calcium can significantly increase dry matter accumulation in kernels, effectively increase the dry matter ratio in peanut reproductive organs, and reduce the dry matter distribution in vegetative organs. The improvement effects of T3 are more prominent, followed by T2. 4) The effects of spraying sorbitol-chelated calcium on the contents of K, Ca and Mg are different in various organs of peanuts, but it generally promotes the absorption of nutrients in peanuts. The results of the principal component analysis show that the application of sorbitol-chelated calcium can significantly affect peanut growth under basic fertilization conditions. Generally speaking, the effect of spraying sorbitol-chelated calcium with Ca^{2+} concentration of 1.6 to 1.8 g/L is more prominent in the yield and quality of peanuts.

Key words: Peanut; Sorbitol chelated calcium; Spray concentration; Yield and quality; Nutrient uptake

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

* 通讯作者(yandongyun666@hotmail.com)

作者简介: 李腾升 (1997—), 男, 山东潍坊人, 硕士研究生, 研究方向为土壤生态与肥料应用。E-mail: tengsheng_li@126.com

花生是我国重要的食用油源和出口创汇产品,其种植面积在农作物中排第 7 位,总产量居油料作物之首,而持续提高花生产量与品质,是解决植物油供需矛盾、保障我国食用油脂安全的有效途径^[1-2]。作为典型喜钙作物,花生对钙素需求量高于磷,为第三大营养元素,每形成 100 kg 荚果吸收的钙高达 2.0 ~ 2.5 kg,而缺钙易造成花生空壳、减产等^[3]。前人研究表明,合理施用钙肥可显著影响花生光合作用、碳氮代谢等过程,促进根系及荚果发育,进而提高产量及品质^[4-6]。

糖醇螯合技术是利用糖醇多羟基结构特性经特定螯合反应与金属离子进行螯合的过程^[7-8]。作为螯合配体,糖醇是许多蔷薇科植物的初级光合产物,其在植物体内具有多种生物学效应,如维持细胞渗透压、清除活性氧、调节关键酶活性等;同时,糖醇分子量低且具有良好的润湿、渗透作用,叶面喷施含糖醇肥料易于被叶片吸收^[9]。此外,由于矿质元素,尤其钙、硼等元素,在植物体内迁移性较差,而经糖醇螯合后可显著促进其在韧皮部的运输,提高养分转运能力^[10-11]。大量研究表明^[10],与普通无机肥料相比,糖醇螯合肥可更有效地促进作物生长及养分吸收,提高作物产量及品质。然而,目前糖醇螯合肥供试作物主要集中在桃、苹果、黄瓜等果蔬经济作物,而鲜有对花生等大田作物的研究报道,其适宜施用量也尚不明确。同时,已有研究中应用的糖醇螯合肥无论是市售还是实验室自行合成的产品,均未标注其螯合率,而据本课题前期研究发现,螯合率不同可显著影响养分释放速率,从而导致肥效产生较大差异^[12]。因此,本研究利用螯合率已知的山梨醇螯合钙,通过研究其不同喷施浓度对花生生长及各器官钾、钙、镁含量的影响,探明其最佳施用量,以期促进山梨醇螯合钙在我国生态型农业中的推广并合理指导农业生产。

1 材料与方法

1.1 试验材料与试验地概况

试验于 2020 年 5—9 月在山东省青岛市即墨区后花园村 (36°35'20" N, 120°31'08" E) 花生试验田进行。该地区地势较为平坦,属温带季风气候,试验期间月平均气温及降雨量如图 1 所示。供试花生品种为花育 22。供试肥料为实验室自行研制的山梨醇螯合钙 (由山梨醇和硝酸钙经特殊工艺螯合而成, $\text{Ca}^{2+} \geq 160 \text{ g/L}$, 经测定螯合率约 60%^[13])。土壤类型为砂姜黑土,基本农化性质为: pH 6.33, 电导率

58.8 $\mu\text{S/cm}$, 有机质 13.2 g/kg, 碱解氮 80.71 mg/kg, 有效磷 29.95 mg/kg, 速效钾 133.4 mg/kg, 交换性钙 3.198 g/kg。

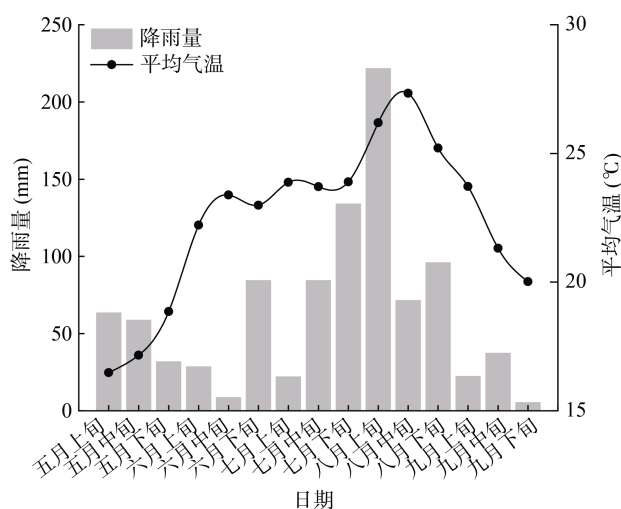


图 1 试验期间月平均气温及降雨量

Fig. 1 Monthly mean temperature and precipitation during test period

1.2 试验设计

花生于 2020 年 5 月 11 日种植, 9 月 13 日收获, 行间距 0.5 m, 种植密度为 1.8×10^5 株/hm²。试验在施基肥基础上共设置 5 个施钙水平 (以 Ca^{2+} 计), 分别为 0、1.4、1.6、1.8、2.0 g/L, 依次记为 CK、T1、T2、T3、T4。采用随机区组设计, 每个处理设置 3 个重复, 每个小区面积 20 m², 共 15 个小区, 处理间留有 1 m 保护行。所有处理均在晴朗无风的上午 8:00—10:00 进行喷施, 试验期间共喷施 4 次, 具体喷施时间分别为 6 月 27 日、7 月 14 日、7 月 26 日、8 月 10 日, 每个小区每次喷施用量为 2 L。所有处理播种前均进行基础施肥 (氮磷钾掺混肥料), 按 947.5 kg/hm² 一次性施入, 其他同田间日常管理。

1.3 测定项目及方法

1) 叶片 SPAD 值 (表征叶绿素相对含量) 测定: 在每次喷施后的第 3 ~ 4 天从每个小区选择长势一致的 6 株花生, 在其主茎倒三叶采用叶绿素仪 (SPAD-502) 进行测定。

2) 生物量测定: 花生收获期, 每个小区随机采集 20 株花生, 经晾晒后进行考种、测产。同时, 各处理采集 6 株花生进行干物质积累量测定: 整株从土壤中取出后, 洗净擦干, 然后按照各器官将其分开并于烘箱 105℃ 杀青 30 min, 70℃ 烘干至恒重。干物质质量称量完成后磨碎过筛, 置于密封袋中保存备用。

3) 品质指标测定: 在各处理中选取均匀一致的荚

果进行去壳处理,烘干、粉碎后分别采用索氏提取法和凯氏定氮法进行粗脂肪和粗蛋白含量测定^[8]。

4)矿质元素含量测定:粉碎后的各器官样品利用硝酸-高氯酸-氢氟酸进行消解,超纯水稀释定容后,运用电感耦合等离子体发射光谱仪测定钾、钙、镁含量。

1.4 数据处理及统计分析

采用 Excel 2019 进行数据整理, SPSS 25 进行统计分析, Duncan 新复极差法进行多重比较($P<0.05$);点线图和柱状图由 Origin 2018 完成,主成分分析(PCA)在美吉云平台(<https://cloud.majorbio.com/page/tools/>)上进行,使用 R 1.3 绘制相关性热图。

2 结果与分析

2.1 叶绿素含量

喷施山梨醇螯合钙可有效促进花生叶片叶绿素含量提高。由图 2 可知,随着花生生育期的推进,叶片 SPAD 值总体呈先升后降的趋势,在结荚期(7月 29 日)达到最大。山梨醇螯合钙喷施处理显著提高花生叶片 SPAD 值,增强其光合作用,与 CK 处理相比, T1、T2、T3 及 T4 处理的结荚期 SPAD 值分别提高 8.05%、12.29%、9.07% 及 7.18%;在饱果期(8月 13 日), T2 处理的 SPAD 值最高,其次是 T3 处理,分别较 CK 处理提高 9.45% 和 7.17%。

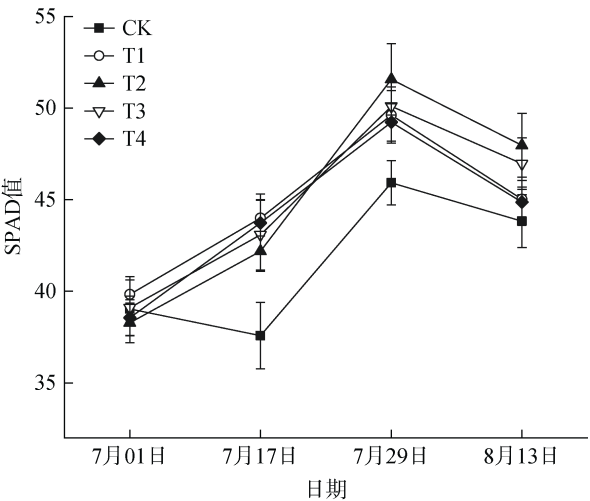


图 2 不同浓度山梨醇螯合钙对花生叶绿素含量的影响
Fig. 2 Chlorophyll contents in peanuts under different concentrations of sorbitol chelated calcium

2.2 产量及品质参数

外源喷施山梨醇螯合钙可不同程度影响花生产量及品质(表 1)。在产量方面, T2 处理较 CK 处理增产率最高,达 11.48%,其次为 T3 处理。籽仁粗脂

肪含量的变化与总产量变化趋势类似,其中 T1 与 T2 处理的粗脂肪含量显著高于 CK 处理,分别提高 7.56% 和 5.74%。喷施山梨醇螯合钙处理可显著提高籽仁粗蛋白含量,提升效果表现为 $T4 \approx T2 > T3 > T1$,分别较 CK 处理增加 7.86%、7.82%、5.59%、3.32%。

表 1 不同浓度山梨醇螯合钙对花生产量及品质的影响
Table 1 Peanut yields and qualities under different concentrations of sorbitol chelated calcium

处理	总产量 (10 ³ kg/hm ²)	粗脂肪 (g/kg)	粗蛋白 (g/kg)
CK	5.49 ± 0.27 bc	478.98 ± 8.67 b	219.96 ± 4.73 b
T1	5.34 ± 0.24 c	515.25 ± 3.96 a	227.27 ± 6.50 ab
T2	6.12 ± 0.38 a	506.49 ± 8.33 a	237.22 ± 8.39 a
T3	5.95 ± 0.20 ab	483.85 ± 8.75 b	232.25 ± 1.32 ab
T4	5.55 ± 0.32 bc	484.26 ± 8.67 b	237.35 ± 5.63 a

注: 同列不同小写字母表示处理间差异在 $P<0.05$ 水平显著,下同。

2.3 干物质积累量及分配比例

花生各器官干物质积累量对不同山梨醇螯合钙供应水平的响应程度不同(表 2)。喷施山梨醇螯合钙对叶片、茎秆及根系等营养器官干物质积累量影响较小,而显著提高了籽仁干物质积累量,与 CK 处理相比, T1、T2、T3 及 T4 处理增幅分别达 7.17%、22.09%、28.34%、24.01%。除 T1 处理较 CK 处理略低外,其他处理全株干物质积累量显著提高,增幅范围为 8.94%~16.98%。在干物质分配比例方面,喷施山梨醇螯合钙可降低营养器官干物质占比,提高荚果干物质质量比例,其中 T3 处理中籽仁干物质积累量占花生全株总干物质质量的 48.91%,比 CK 处理提高 17.80%,其次是 T2 处理(图 3)。

2.4 各器官钾、钙、镁含量

2.4.1 钾含量 除籽仁钾含量外,喷施山梨醇螯合钙处理提高了花生其他器官钾素含量(表 3)。T4 处理的叶片及果壳中钾素含量最高,较 CK 处理分别提高 27.23%、6.67%, T3 处理则显著提高了花生茎、根部钾含量,增幅分别为 45.89%、49.05%。然而,叶面喷施山梨醇螯合钙对花生果壳和籽仁钾含量的影响不显著。

2.4.2 钙含量 喷施不同浓度山梨醇螯合钙对花生各器官钙含量影响不同,如表 4 所示。花生叶片中钙含量最高,籽仁中含量最低,而喷施山梨醇螯合钙可促使花生地上部钙含量降低,增加地下部钙素含量。与 CK 处理相比, T1 处理显著降低了叶片、茎秆钙素含量,降幅分别为 21.79%、18.47%。T4 处理根系和果壳钙素含量均为最高,较 CK 处理分别提高

表 2 不同浓度山梨醇螯合钙对花生干物质积累量的影响(g/株)
Table 2 Dry matter accumulation in peanut various organs under different concentrations of sorbitol chelated calcium

处理	叶片	茎秆	根系	果壳	籽仁	全株
CK	4.16 ± 0.36 a	12.17 ± 2.81 a	1.15 ± 0.25 a	8.86 ± 0.40 ab	18.70 ± 2.40 b	45.04 ± 6.23 b
T1	3.50 ± 0.54 a	12.19 ± 0.14 a	1.24 ± 0.14 a	7.16 ± 1.11 b	20.04 ± 0.99 ab	44.12 ± 2.92 b
T2	3.73 ± 0.36 a	14.72 ± 2.33 a	1.37 ± 0.04 a	7.61 ± 0.51 b	22.83 ± 1.90 a	50.25 ± 5.14 a
T3	3.16 ± 0.34 a	12.37 ± 2.21 a	1.17 ± 0.27 a	8.37 ± 0.82 ab	24.00 ± 1.33 a	49.07 ± 4.98 ab
T4	3.83 ± 0.81 a	14.03 ± 1.47 a	1.18 ± 0.05 a	10.46 ± 2.24 a	23.19 ± 3.25 a	52.69 ± 7.81 a

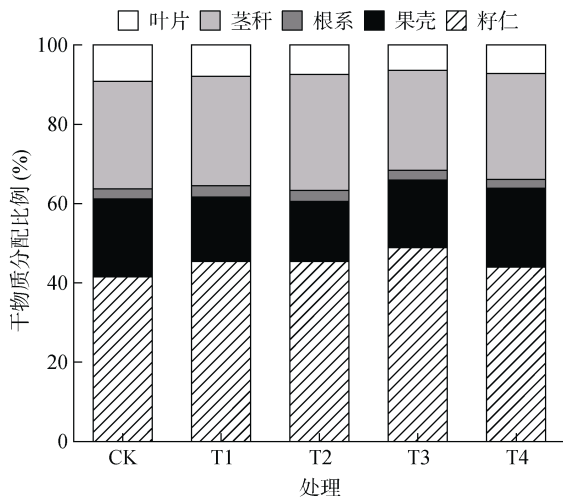


图 3 不同浓度山梨醇螯合钙对花生干物质分配比例的影响
Fig. 3 Dry matter distribution in peanut various organs under different concentrations of sorbitol chelated calcium

41.41% 及 18.14%。籽仁中钙含量则随施钙水平提高呈先上升后下降的趋势, 其中 T2 处理钙含量最高, 与 CK 处理相比显著提高 12.64%。

2.4.3 镁含量 与 CK 处理相比, 施钙处理显著影响了花生根系及果壳中镁含量, 而对茎秆和籽仁中镁

含量影响不明显 (表 5)。T1 处理的叶片镁含量显著高于其他处理, 而 T2、T3 及 T4 处理与 CK 处理差异不显著。施钙量由低到高各处理植株茎秆镁含量与 CK 处理相比分别降低 2.65%、13.10%、16.60%、7.97%, 而籽仁镁含量分别提高 2.33%、8.07%、6.38%、7.09%, 但各处理间差异不显著。T2、T3 处理显著提高了根部镁含量, 与 CK 处理相比分别提高 22.22% 和 20.71%。除 T1 处理外, 其余处理较 CK 处理提高了花生果壳镁含量, 其中 T4 处理差异显著。

2.5 主成分及相关性分析

对所有指标进行主成分分析, 结果显示, 主成分 1 (PC1) 和主成分 2 (PC2) 共解释了总累积方差贡献的 45.59%, 贡献率分别为 25.19% 和 20.40% (图 4A)。施钙处理与常规施肥(CK)处理得到明显区分, 其中 T1 处理沿 PC2 轴与 CK 处理明显区分, 其他处理则沿 PC1 轴与 CK 处理区分, 且 T2、T3 及 T4 处理之间的相对分散程度较为集中。相关分析结果表明(图 4B), 产量与根系干物质量及根系、籽仁中镁含量呈显著正相关; 根系干物质量及叶片、籽仁钙含量与籽仁粗脂肪含量呈显著正相关; 茎秆

表 3 不同浓度山梨醇螯合钙对花生各器官钾含量的影响(g/kg)
Table 3 K contents in peanut various organs under different concentrations of sorbitol chelated calcium

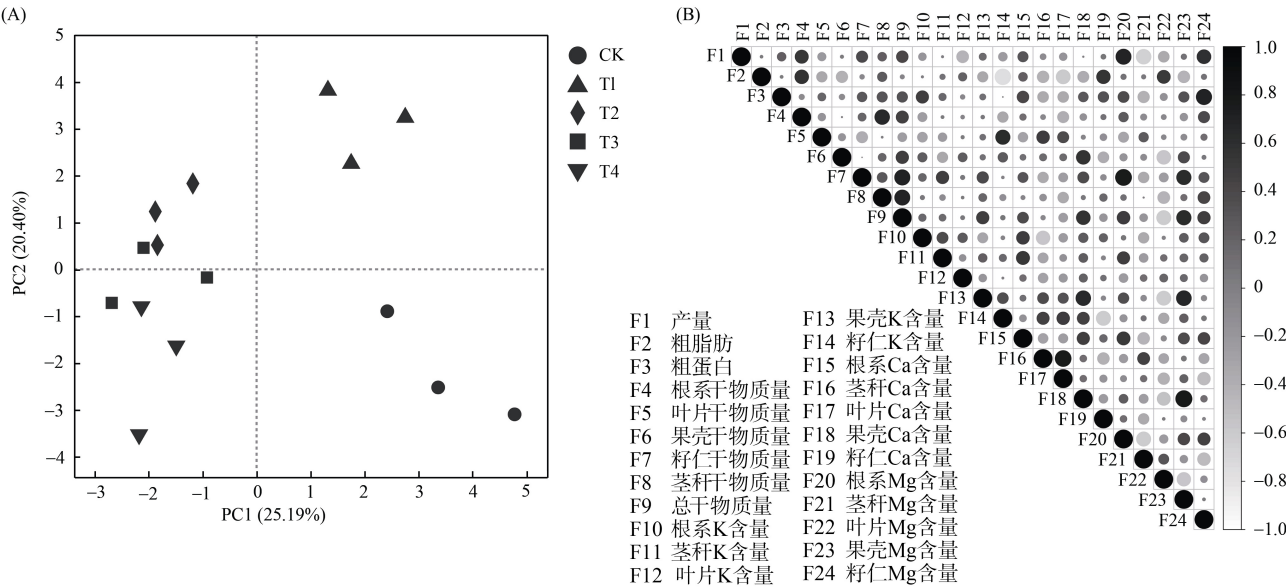
处理	叶片	茎秆	根系	果壳	籽仁
CK	11.64 ± 1.35 c	11.55 ± 0.61 b	10.03 ± 1.41 b	4.05 ± 0.59 a	7.55 ± 0.11 a
T1	14.19 ± 1.28 ab	14.67 ± 1.34 ab	13.85 ± 2.36 ab	3.38 ± 0.49 a	6.24 ± 0.42 a
T2	12.05 ± 1.64 bc	12.94 ± 1.50 ab	11.53 ± 1.98 ab	4.24 ± 0.48 a	6.33 ± 0.63 a
T3	10.65 ± 1.27 c	16.85 ± 2.10 a	14.95 ± 0.36 a	4.12 ± 0.17 a	6.95 ± 0.27 a
T4	14.81 ± 0.18 a	13.72 ± 3.39 ab	14.94 ± 2.72 a	4.32 ± 0.89 a	7.49 ± 1.04 a

表 4 不同浓度山梨醇螯合钙对花生植株各器官钙含量的影响(g/kg)
Table 4 Ca contents in peanut various organs under different concentrations of sorbitol chelated calcium

处理	叶片	茎秆	根系	果壳	籽仁
CK	32.26 ± 4.63 a	16.78 ± 0.42 a	11.81 ± 0.82 b	4.74 ± 0.16 b	0.87 ± 0.06 b
T1	25.23 ± 3.94 b	13.68 ± 1.35 b	15.41 ± 1.52 a	4.55 ± 0.29 b	0.95 ± 0.02 ab
T2	27.33 ± 0.91 ab	14.75 ± 1.39 b	15.73 ± 3.01 a	4.79 ± 0.48 b	0.98 ± 0.03 a
T3	28.59 ± 2.16 ab	14.08 ± 0.73 b	16.29 ± 1.20 a	5.01 ± 0.15 b	0.91 ± 0.03 ab
T4	27.62 ± 0.67 ab	14.76 ± 0.60 b	16.70 ± 1.71 a	5.60 ± 0.20 a	0.89 ± 0.03 ab

表 5 不同浓度山梨醇螯合钙对花生植株各器官镁含量的影响(g/kg)
Table 5 Mg contents in various organs of peanuts under different concentrations of sorbitol chelated calcium

处理	叶片	茎秆	根系	果壳	籽仁
CK	4.43 ± 0.33 b	7.16 ± 0.35 a	3.96 ± 0.42 b	0.80 ± 0.06 bc	1.97 ± 0.12 a
T1	5.06 ± 0.06 a	6.97 ± 1.00 a	4.14 ± 0.25 b	0.75 ± 0.09 b	2.02 ± 0.07 a
T2	4.34 ± 0.07 b	6.22 ± 0.14 a	4.84 ± 0.21 a	0.88 ± 0.05 bc	2.13 ± 0.06 a
T3	4.37 ± 0.17 b	5.97 ± 0.12 a	4.78 ± 0.21 a	0.95 ± 0.02 ab	2.10 ± 0.08 a
T4	4.24 ± 0.26 b	6.59 ± 0.83 a	4.38 ± 0.29 ab	1.07 ± 0.16 a	2.11 ± 0.16 a



(B 图中方格内圆点大小表示相关系数的大小)

图 4 花生各指标主成分及相关性分析

Fig. 4 Principal components and correlation analysis of various indexes of peanuts

及籽仁干物质量与全株干物质量呈显著正相关。在养分吸收方面，根系钙、镁含量之间为显著正相关；果壳钙、镁含量也存在显著正相关，而籽仁钾、钙含量则呈显著负相关关系。

3 讨论

钙素作为正常生长发育所必需的营养元素，广泛参与花生种子萌发、开花结果及产量构成等过程^[14-15]。本研究结果表明，喷施山梨醇螯合钙可促使花生产量提高，最大增幅达 11.48% (表 1)。这可能是由于钙素能通过改善花生单株饱果数、百果重与出仁率等荚果性状促使产量提高^[4-6]。同时，山梨醇在植物体内的多种生理功能使其作为碳源或肥料有利于提高作物代谢能力，且其渗透、湿润作用可降低液肥表面张力，促进作物对养分吸收^[9]，与钙素螯合后可共同提高花生产量^[16-17]。此外，本研究结果显示，随施钙浓度提高，产量基本呈先升高后降低趋势，这与林怡^[18]在蓝莓上喷施糖醇螯合钙的结论类似。

脂肪和蛋白质是构成花生籽仁的主要成分，也是

评价花生品质的重要指标^[19]。本试验结果表明，喷施山梨醇螯合钙能在一定程度上提高籽仁粗脂肪和粗蛋白含量，与 CK 处理相比，T2 处理分别提高 5.74% 和 7.82%，提质效果突出(表 1)，这与顾学花等^[20]研究结果类似。原因可能是由于增施钙肥促使 Ca²⁺ 结合钙调蛋白(CAM)启动一系列生理生化过程，提高花生叶片碳、氮代谢关键酶活性，促进光合产物合成与运输，提高籽仁中糖酵解过程，进而促使糖类物质向蛋白质与脂肪转化^[21-22]。作为山梨醇螯合钙主要成分，糖醇还可通过植物光合作用与碳代谢过程产生的糖信号参与代谢调节，提高根系活性与吸收能力，从而改善作物品质^[23-24]。叶片 SPAD 值的变化结果证明山梨醇螯合钙对叶片光合作用具有促进作用(图 2)。

作物较高的干物质积累量是实现高产、优产的重要前提^[25]。在本试验条件下，增施钙肥能够降低叶片干物质量，提高根系、茎秆及籽仁干物质量(表 2)，其中，T2 及 T3 处理的籽仁干物质积累量较 CK 处理分别提高 22.09% 和 28.34%，而全株干物质积累量则分别提高 11.57% 及 8.95%，这与于天一等^[26]

研究结果类似。喷施山梨醇螯合钙能够改变花生各器官干物质分配比例(图 3),降低营养器官干物质占比,提高花生籽仁干物质比例。这可能是由于外源施钙能有效促进花生植株碳水化合物转化与氮素代谢,避免氮素在营养器官过多积累,从而协调营养生长与生殖生长^[6]。

花生不同器官养分含量可反映其养分吸收能力^[27]。本试验结果(表 3)显示,喷施山梨醇螯合钙降低了花生籽仁中钾含量,而提高了其他器官中钾含量。尽管相关分析结果(图 4B)表明籽仁钾含量与钙含量呈负相关关系,但由于山梨醇螯合钙显著提高籽仁干物质质量(表 2),因此其钾积累量优于 CK 处理。钙可维持细胞膜及细胞壁完整性,防止胞内 K^+ 外渗,从而促进作物对钾的吸收^[28],但由于钾、钙元素间关系复杂,后续应加强山梨醇螯合钙对花生钾、钙交互作用的影响研究。与 CK 处理相比,施用山梨醇螯合钙促使花生地上部钙含量降低,而提高了地下部钙含量(表 4),说明喷施山梨醇螯合钙能够强化根及荚果对钙素的吸收。此外,与无机肥料不同的是,糖醇螯合钙在植物韧皮部内碱性环境下溶解度更高,能携带矿质养分以螯合(络合)物形式在植物体内快速迁移,因此喷施山梨醇螯合钙可能会加强植株地上部钙素向地下部转运,从而提高地下部钙含量^[10]。这与在小白菜^[29]和马铃薯^[30]上喷施糖醇螯合钙的研究结果类似。王飞等^[31]研究表明,增施钙肥可明显提高花生植株镁含量,且钙、镁产生了协同吸收效应。本研究结果显示,施钙提高了根部及荚果中镁含量,而对茎、叶中镁含量无显著影响(表 5)。同时,相关分析结果(图 4B)表明,根及籽仁镁含量与产量呈正相关,说明根及籽仁镁含量提高可促进花生增产。有研究表明,花生荚果区对镁的吸收存在颞颥作用^[32],但本研究结果显示,荚果对钙、镁吸收呈显著正相关关系,原因可能是由于 Mg^{2+} 在植株体内移动性高于 Ca^{2+} ,植物吸收的镁素可迅速迁移至新生组织^[33]。此外,叶面喷施作为土壤施肥的有效补充,能避免土壤环境因子对元素的固定,减缓离子间颞颥作用,有利于养分进行协同吸收。主成分分析(图 4A)结果进一步表明,喷施山梨醇螯合钙可显著改变花生生长及养分吸收状况。

4 结论

本试验条件下,喷施山梨醇螯合钙对花生生长及养分吸收具有一定促进作用,合理喷施能够有效提高叶片叶绿素含量,改善各器官干物质分配比例,促进

花生籽仁对钙、镁元素的吸收,从而提高花生产量及品质。综合来看,喷施钙浓度为 1.6~1.8 g/L 的山梨醇螯合钙对花生增产提质效果更为突出。

参考文献:

- [1] 周录英,李向东,王丽丽. 氮、磷、钾、钙肥不同用量对花生光合性能及产量品质的影响[J]. 花生学报, 2006, 35(2): 11-16.
- [2] 万书波,张佳蕾,张智猛. 花生种植技术的重大变革——单粒精播[J]. 中国油料作物学报, 2020, 42(6): 927-933.
- [3] 王建国,张昊,李林,等. 施钙与覆膜栽培对缺钙红壤花生钙素积累、分配及利用率的影响[J]. 华北农学报, 2017, 32(6): 205-212.
- [4] 张彩军,赵亚飞,司彤,等. 钙肥施用对花生荚果不同发育时期衰老特性和产量的影响[J]. 花生学报, 2021, 50(1): 54-59.
- [5] 秦文洁,郭润泽,邹晓霞,等. 膜下滴灌追肥种类对花生衰老特性和产量的影响[J]. 中国农学通报, 2021, 37(7): 28-36.
- [6] 田家明,张智猛,戴良香,等. 外源钙对盐碱土壤花生荚果生长及籽仁品质的影响[J]. 中国油料作物学报, 2019, 41(2): 205-210.
- [7] 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.
- [8] Liu C, Li Y P, Huo W T, et al. Effect of sorbitol calcium chelate on yield and calcium nutrient absorption of peanut[J]. American Journal of Biochemistry and Biotechnology, 2021, 17(2): 160-173.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 何键,聂兆广,李玲玉,等. 螯合肥料在农业上的应用效果研究[J]. 土壤通报, 2017, 48(2): 507-512.
- [12] 白利勇. 糖醇螯合肥检测技术及其应用[D]. 青岛: 青岛大学, 2019.
- [13] 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.
- [14] Benjamins R, Ampudia C S G, Hooykaas P J J, et al. PINOID-mediated signaling involves calcium-binding proteins[J]. Plant Physiology, 2003, 132(3): 1623-1630.
- [15] Zhang H F, Wei C H, Yang X Z, et al. Genome-wide identification and expression analysis of calcium-dependent protein kinase and its related kinase gene families in melon (*Cucumis melo* L.)[J]. PLoS One, 2017, 12(4): e0176352.
- [16] 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.
- [17] 于会丽,林治安,李燕婷,等. 喷施小分子有机物对小

- 油菜生长发育和养分吸收的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(6): 1560–1568.
- [18] 林怡. 喷施不同钙肥对蓝莓产量、果实品质及贮藏性的影响[J]. 中国南方果树, 2019, 48(6): 103–105, 109.
- [19] 王海鸥, 胡志超, 陈守江, 等. 收获时期及干燥方式对花生品质的影响[J]. 农业工程学报, 2017, 33(22): 292–300.
- [20] 顾学花, 孙莲强, 高波, 等. 施钙对干旱胁迫下花生生理特性、产量和品质的影响[J]. 应用生态学报, 2015, 26(5): 1433–1439.
- [21] Song Q B, Liu Y F, Pang J Y, et al. Supplementary calcium restores peanut (*Arachis hypogaea*) growth and photosynthetic capacity under low nocturnal temperature[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2020, 10: 1637.
- [22] 赵亚飞, 张彩军, 孟瑶, 等. 施钙对花生荚果不同发育时期光合特性及叶面积指数的影响[J]. 青岛农业大学学报(自然科学版), 2019, 36(4): 247–254.
- [23] Boriboonkaset T, Bunyakijjinda V, Cha-Um S, et al. Effect of exogenous sugar classes and concentrations on salt-tolerant ability of indica rice (*Oryza sativa* L.)[J]. *Acta Horticulturae*, 2007(764): 155–164.
- [24] Rolland F, Baena-Gonzalez E, Sheen J. Sugar sensing and signaling in plants: Conserved and novel mechanisms[J]. *Annual Review of Plant Biology*, 2006, 57: 675–709.
- [25] 刘娜, 曲胜男, 王晓光, 等. 钙钼硼肥对花生光合特性及产量品质的影响[J]. 沈阳农业大学学报, 2020, 51(1): 27–34.
- [26] 于天一, 郑亚萍, 邱少芬, 等. 酸化土壤施钙对不同花生品种(系)钙吸收、利用及产量的影响[J]. 作物杂志, 2021(4): 80–85.
- [27] 司贤宗, 张翔, 索炎炎, 等. 不同花生品种氮磷钾钙硫吸收、分配和利用的差异[J]. 中国农学通报, 2021, 37(16): 1–7.
- [28] 山东省花生研究所. 中国花生栽培学[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1982.
- [29] 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.
- [30] 李玉鹏, 杨光, 李飞, 等. 糖醇螯合钙肥对马铃薯产量、品质及养分吸收的影响[J]. 土壤, 2020, 52(4): 773–780.
- [31] 王飞, 王建国, 李林, 等. 施钙与覆膜栽培对缺钙红壤花生 Mg、Fe、Zn 吸收, 积累及分配的影响[J]. 核农学报, 2019, 33(11): 2261–2270.
- [32] Zharare G E, Asher C J, Blamey F P C. Magnesium antagonizes pod-zone calcium and zinc uptake by developing peanut pods[J]. *Journal of Plant Nutrition*, 2010, 34(1): 1–11.
- [33] 冯新维, 黄莺, 吴贵丽, 等. 不同钙浓度对烤烟生长及镁吸收的影响[J]. 作物杂志, 2021(3): 190–194.