

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2020.04.017

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. 土壤, 2020, 52(4): 773–780.

糖醇螯合钙肥对马铃薯产量、品质及养分吸收的影响^①

李玉鹏, 杨光, 李飞, 白利勇, 黄明丽, 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: 采用恒温水浴加热的方法合成糖醇螯合钙(自制钙肥), 与美国布兰特公司生产的糖醇螯合钙(市售钙肥)同时进行马铃薯大田喷施试验, 研究糖醇钙对马铃薯产量、品质和钙素吸收、迁移转化的影响。研究表明: ①与不施钙肥(喷施等量清水)相比, 自制钙肥与市售钙肥处理分别增产 10.9% 和 12.1%, 大薯率分别提高 5.4% 和 3.7%, 两种钙肥处理均降低了中、小薯率; 自制钙肥与市售钙肥处理块茎硝态氮含量分别下降 28.8% 和 31.6%, 自制钙肥处理马铃薯的可溶性蛋白的含量和氮素积累量分别增加 7.2% 和 20.9%, 市售糖醇钙处理马铃薯的可溶性蛋白含量和氮素积累量均降低 3.2%。②钙肥处理均提高了马铃薯各器官的钙素含量, 在出苗后 80 d, 自制钙肥与市售钙肥处理的马铃薯根中钙含量分别增加 8.0% 和 9.0%, 茎中钙含量分别增加 10.1% 和 6.8%, 叶片中钙含量分别增加 1.8% 和 6.8%, 块茎中钙含量分别增加 26.7% 和 20.0%。③施用钙肥均提高了马铃薯各器官与全株的钙素积累量, 自制钙肥与市售钙肥处理的马铃薯根中钙素积累量均提高 20.0%, 茎中钙素积累量分别提升 97.1% 和 55.7%, 叶片中钙素积累量分别提升 56.5% 和 45.8%, 块茎中钙素积累量分别提高 56.3% 和 50.0%, 全株钙素积累量整体提高 62.1% 和 47.0%。自制钙肥处理的马铃薯根、茎、块茎和全株的钙素积累量均显著高于市售钙肥。综上, 在同等钙浓度下, 两种钙肥均促进了马铃薯产量提升, 与市售钙肥相比自制螯合钙肥更利于钙素的吸收和迁移。

关键词: 糖醇钙; 马铃薯; 产量品质; 钙素吸收、迁移

中图分类号: S963.9 **文献标志码:** A

Effects of Sugar Alcohol Chelated Calcium Fertilizer on Yield, Quality and Nutrient Uptake of Potato

LI Yupeng, YANG Guang, LI Fei, BAI Liyong, HUANG Mingli, LIU Kezhong, YAN Dongyun*

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

Abstract: In this paper, sugar alcohol chelated calcium (SACC) was synthesized by the method of heating in constant temperature water bath, and then conducted a field spraying experiment with our SACC and SACC by Brandt Company of USA (marketed SACC) to study their effects on the yield and quality of potatoes, and the absorption, migration and transformation of calcium. The results showed that compared with no application of calcium fertilizer (spraying equal amount of clear water), our and marketed SACCs increased potato yield by 10.9% and 12.1% respectively; increased the rate of big potatoes by 5.4% and 3.7% respectively, indicating SACC reduced the proportion of medium and small potatoes; decreased nitrate nitrogen contents in potato tubers by 28.8% and 31.6% respectively. Our SACC increased soluble protein content and nitrogen accumulation in potatoes by 7.2% and 20.9% respectively, while marketed SACC decreased them both by 3.2%. Besides, both our and marketed SACCs increased calcium contents in potato organs, at harvest, calcium contents were increased by 8.0% and 9.0% in roots, 10.1% and 6.8% in stems, 1.8% and 6.8% in leaves, 26.7% and 20.0% in tubers, respectively. In addition, both our and marketed SACCs increased calcium accumulation in potato organs and whole plant, both increased by 20.0% in roots, 97.1% and 55.7% in stems, 56.5% and 45.8% in leaves, 56.3% and 50.0% in tubers, 62.1% and 47.0% in whole plants. Calcium accumulations in various organs and whole plant treated by our SACC were all significantly higher than those treated with marketed one. In conclusion, both SACCs can promote potato yield, but ours were more conducive to the absorption and migration of calcium than

①基金项目: 山东省重点研发计划项目(2017GNC11116)和鲁化好阳光产学研横向课题(2016006)资助。

* 通讯作者(yandongyun666@hotmail.com)

作者简介: 李玉鹏(1995—), 男, 山东寿光人, 硕士研究生, 主要从事新型肥料与土壤环境化学研究。E-mail: lypsysan@126.com

marketed.

Key words: Sugar alcohol chelate calcium fertilizer; Potato; Yield and quality; Calcium absorption and migration

钙(Ca)是细胞壁、细胞膜和多种酶的组分,还具有促进光合产物运转、延缓植株衰老等作用,是植株生长必需的营养元素^[1-2]。钙素营养的失衡会导致植物生理活动的紊乱和病害的发生,降低农作物产量和品质。土壤一般不缺钙,作物却常常发生缺钙现象,这是由于钙在植株内难以移动,长距离的运输只能依赖蒸腾水流,加上钙元素无法由成熟器官再分配给新嫩组织,一旦外界条件(如干旱)引起蒸腾流变弱,钙就会出现供应不足的现象^[3-5]。施用钙肥可以改善作物缺钙症,但普通钙盐(如硝酸钙)在植株体内迁移性弱,利用率低。螯合态钙可改变这种困境,目前 EDTA、DTPA 等螯合剂应用较广^[6-7],但存在环境风险^[8-10]。氨基酸螯合肥技术成熟^[11],但多来源于畜禽毛发、蹄甲等的水解,导致肥料品质不高。糖醇是植物光合作用的初产物,作为高品质螯合剂具有明显的优势,山梨醇作为一种来自植物韧皮部的小分子糖醇,分子量低,容易被叶片吸收,同时其具有良好的渗透、湿润、降低表面张力及与中微量元素螯合的能力^[12-13],研究证实山梨醇具有携带营养元素在植株内移动的能力^[14-16],但目前还未发现其他科研人员以单一山梨醇为配体进行的螯合钙肥的研究工作。基于糖醇为螯合剂的生产及检测行业标准与国家标准目前仍未推出,因此国内该类肥料市场混乱,国外品牌(美国布兰特公司生产的糖醇螯合钙)也仅标注了钙浓度,并没有标注螯合态钙所占比例,因此糖醇螯合钙对作物的作用机理也是模糊的。

马铃薯是世界范围内除水稻、小麦、玉米以外第四大粮食作物,在我国广为种植,且对钙需求量大,在生产中易表现为块茎缺钙^[17-18]。本文以山梨醇为螯合剂^[19-21],采用恒温水浴加热的方法合成了山梨醇螯合钙(简称自制钙肥),与布兰特公司生产的糖醇螯合钙(简称市售钙肥)分别进行了马铃薯大田肥效试验,并运用本课题组发明的检测方法^[22]确定了两种肥料的螯合率,通过马铃薯不同生育时期地上部分与地下部分钙素含量变化及产量等指标参数探究山梨醇螯合钙的施用效果和对马铃薯产量、品质及钙素吸收、迁移的影响,为提高钙肥利用率,促进土壤生态环境的改善提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于2017年1—5月在山东省滕州市马铃薯试验基地进行(35°3'1"N、117°3'44"E)。供试土壤质地均匀,贮水性能良好,其理化性质见表1。

表1 供试土壤的基本理化性质
Table 1 Basic physiochemical properties of tested soil

pH	有机质 (g/kg)	碱解氮 (mg/kg)	有效磷 (mg/kg)	速效钾 (mg/kg)	交换性钙 (mg/kg)
5.96	10.23	140	7.77	35.84	1 631.5

1.2 试验材料

供试马铃薯品种及来源:马铃薯‘费乌瑞它’(荷兰十五)一级脱毒种薯。生产商:内蒙古格瑞得马铃薯种业有限公司。

供试钙肥:市售糖醇钙肥为丰利惠果蔬钙肥,美国布兰特股份有限公司生产($\text{Ca}^{2+} \geq 140 \text{ g/L}$,本试验室检测到铜、锌、铁等金属离子,螯合率为16.2%),自制糖醇螯合钙(山梨醇和硝酸钙经特殊工艺螯合, $\text{Ca}^{2+} \geq 160 \text{ g/L}$,螯合率为65.2%)。

1.3 试验设计

自制钙肥采用恒温水浴加热的方法,在试验前制备,装瓶待用。

田间试验于2017年1月20日进行播种,5月1日收获,株距25 cm,密度约为82 620株/hm²。设置3个处理,每个处理设置3个重复。每个小区的面积为80 m²(16 m × 5 m),共9个小区,每个处理间留有2 m宽的保护行。T1:不施钙肥;T2:市售钙肥;T3:自制钙肥。基肥(N:P₂O₅:K₂O=15:15:15)在种植前一次性施入,钙肥分别在出苗后35、54、69 d进行叶面喷施。钙的喷施浓度为4 500 g/hm²。

1.4 样品采集与测定指标及方法

田间试验共取样4次,分别在马铃薯出苗后34 d(苗期)、53 d(块茎形成末期)、68 d(块茎增长末期)和80 d(采收期),从每个小区选择代表性的植株3~5株进行相应指标的测定。

马铃薯整株从土壤中取出后,洗净黏附的泥土,用纸擦干,然后按照各器官分开剪切处理后置于牛皮信封中,放入烘箱,105 °C杀青30 min,然后于70 °C条件下烘干至恒重,干样磨碎过60目筛,置于密封袋中备用。

产量的测定:收获时测产,并进行品质参数的测定。

测定指标及方法:植株钙含量用浓 $\text{HNO}_3\text{-HClO}_4$ 消解,采用电感耦合等离子体发射光谱仪测定;块茎可溶性蛋白质采用考马斯亮蓝 G-250 法测定,可溶性糖采用蒽酮比色法测定,硝态氮采用 5% 水杨酸-硫酸法测定^[23]。

钙素累积量(mg)=钙含量(mg/g)×干物质重(g)

土壤样品的测定:pH、有机质测定采用常规测定方法^[24];土壤可交换钙采用乙酸铵溶液提取,电感耦合等离子体发射光谱仪测定^[25]。

1.5 数据处理

采用 DPS7.05 软件 Duncan 新复极差法($P \leq 0.05$)对试验数据进行统计分析,采用 Origin7.5 对试验数据进行作图处理。

2 结果与分析

2.1 不同处理对马铃薯块茎产量和经济性状的影响

试验结果表明(表 2),钙肥处理的马铃薯块茎产量均高于不施钙肥处理。与不施钙肥相比,自制钙肥和市售钙肥处理分别增产 10.9% 和 12.1%,单株结薯数分别增加 12.5% 和 15.1%,单薯鲜重分别增加 4.7%和 4.2%。施用钙肥提高了马铃薯的大薯率,与不施钙肥相比,自制钙肥和市售钙肥处理分别提高 5.4% 和 3.7%;商品薯率分别达到 74.0% 和 72.8%。以上结果表明,在马铃薯生育期喷施糖醇钙肥能有效增加马铃薯产量,提高商品薯率。两种钙肥相比,自制钙肥对马铃薯块茎单薯重量、大薯率和商品薯率的效果优于市售钙肥。

表 2 不同处理对马铃薯产量和经济性状的影响
Table 2 Yields and agronomic traits of potatoes under different treatments

处理	产量(t/hm ²)	单株结薯数	单薯重量(g)	单株产量(g)	大薯率(%)	中薯率(%)	小薯率(%)	商品率(%)
T1	51.77 ± 0.35 b	4.25 ± 0.23 a	153.64 ± 4.35 a	626.60 ± 4.21 b	62.50 ± 2.41 a	20.14 ± 3.21 a	17.36 ± 2.81 a	72.69 ± 7.94 a
T2	58.01 ± 1.11 a	4.89 ± 0.16 a	160.02 ± 1.79 a	702.19 ± 13.43 a	64.81 ± 2.88 a	12.75 ± 2.80 b	15.30 ± 2.35 a	72.79 ± 4.58 a
T3	57.43 ± 3.29 a	4.78 ± 0.27 a	160.87 ± 10.07 a	695.10 ± 39.77 a	65.86 ± 9.03 a	16.78 ± 4.52 ab	17.36 ± 3.23 a	73.96 ± 8.09 a

注:表中同列数据小写字母不同表示处理间差异达 $P < 0.05\%$ 显著水平,下同。

2.2 不同处理对马铃薯块茎品质及氮磷钾养分配比的影响

施用钙肥能有效改善马铃薯块茎品质。与不施钙肥相比,自制钙肥与市售钙肥处理均能显著降低硝态氮含量,分别降低 28.8% 和 31.6%;可溶性糖含量变化不显著;自制钙肥处理可溶性蛋白质含量增加了 7.2%,市售钙肥处理降低 3.2%,推测原因可能是市售钙肥中铜、锌等元素的交互作用所致,该分析还有

待进一步验证。

施用钙肥可促进马铃薯块茎对氮、磷、钾的养分吸收。与不施钙肥相比,自制钙肥处理马铃薯块茎全氮积累量增加 20.9%,市售钙肥处理马铃薯块茎全氮积累量降低 3.2%,自制钙肥处理效果优于市售钙肥;与不施钙肥相比,自制钙肥和市售钙肥处理马铃薯块茎磷素积累量分别提高 39.4%、38.1%,钾素积累量分别提高 31.6%、28.6%。

表 3 不同处理对马铃薯块茎品质及氮磷钾积累量的影响
Table 3 Tuber qualities and N, P, K accumulation of potatoes under different treatments

处理	可溶性糖含量 (mg/g, FW)	硝态氮含量 ($\mu\text{g/g}$, FW)	可溶性蛋白质含量 (mg/g, FW)	N 素积累量 (g/株)	P 素积累量 (g/株)	K 素积累量 (g/株)
T1	1.17 ± 0.09 a	158.31 ± 4.76 a	7.20 ± 0.03 a	1.87 ± 0.33 a	0.206 ± 0.02 b	0.802 ± 0.11 a
T2	1.36 ± 0.07 a	108.29 ± 4.29 b	6.97 ± 0.32 a	1.81 ± 0.27 a	0.271 ± 0.04 a	1.077 ± 0.16 a
T3	1.18 ± 0.13 a	112.69 ± 4.29 b	7.72 ± 0.30 a	2.26 ± 0.21 a	0.265 ± 0.10 ab	1.118 ± 0.43 a

2.3 不同处理对马铃薯干物质积累的影响

增施钙肥均能不同程度地提升马铃薯各器官的干物质积累量。收获后,与不施钙肥相比,自制钙肥与市售钙肥干物质的积累量分别增加 29.6% 和

25.4%,其中自制钙肥处理马铃薯根、茎、叶、块茎干物质积累量分别提高 18.2%、83.0%、50.7% 和 22.9%,两种钙肥处理相比,自制钙肥对马铃薯各器官干物质的积累效果更优。

表 4 马铃薯各器官干物质的积累量(g)
Table 4 Dry matter accumulation of potatoes under different treatments

器官	处理	出苗后天数(d)			
		34	53	68	80
根	T1	0.50 ± 0.11 a	1.28 ± 0.08 a	1.06 ± 0.15 a	0.99 ± 0.36 a
	T2	0.37 ± 0.11 a	1.24 ± 0.09 a	1.36 ± 0.08 a	1.13 ± 0.10 a
	T3	0.68 ± 0.15 a	1.38 ± 0.26 a	1.34 ± 0.36 a	1.17 ± 0.23 a
茎	T1	1.33 ± 0.31 a	5.91 ± 0.56 a	10.34 ± 1.80 a	7.48 ± 2.05 b
	T2	2.17 ± 0.52 a	7.07 ± 0.79 a	12.59 ± 1.47 a	10.79 ± 2.36 b
	T3	2.48 ± 0.85 a	8.41 ± 1.13 a	14.89 ± 3.13 a	13.69 ± 2.10 a
叶	T1	4.06 ± 0.60 a	9.55 ± 0.83 b	20.91 ± 1.23 a	16.20 ± 3.98 a
	T2	5.02 ± 1.80 a	12.15 ± 1.50 ab	24.28 ± 3.19 a	21.82 ± 2.23 a
	T3	7.19 ± 1.60 a	14.49 ± 0.66 a	24.64 ± 1.53 a	24.41 ± 2.79 a
块茎	T1	-	12.02 ± 2.68 a	52.97 ± 8.82 a	109.31 ± 13.94 b
	T2	-	20.86 ± 5.43 a	58.88 ± 6.32 a	134.31 ± 15.46 a
	T3	-	21.64 ± 2.71 a	76.54 ± 11.38 a	134.38 ± 49.30 a
全株	T1	5.89 ± 1.02 a	28.76 ± 1.38 a	85.28 ± 11.99 a	133.98 ± 20.33 b
	T2	7.56 ± 2.39 a	41.32 ± 6.79 a	97.11 ± 6.95 a	168.04 ± 11.80 a
	T3	10.34 ± 2.25 a	45.92 ± 3.89 a	117.40 ± 11.03 a	173.65 ± 48.90 a

注：表中同列数据小写字母不同表示同一马铃薯器官不同处理间干物质积累量差异达 $P < 0.05$ 显著水平。

2.4 不同处理对马铃薯各器官钙含量的影响

通过分析不同器官在整个采样期钙素含量的变化,发现马铃薯各器官中含钙量随着生育期的推进呈现动态变化,且不同处理对钙素吸收有不同程度的影响。表现为:叶片钙素含量呈上升趋势,茎中钙含量呈先下降后波动变化趋势,而块茎中钙含量在马铃薯块茎形成期后,随着生育进程的推进钙素含量逐渐降低(图 1)。

马铃薯根系钙素含量随着生育期的推进呈现先上升后下降的倒“V型”曲线变化,块茎增长期,自制钙肥和市售钙肥处理根中钙素含量分别降低 1.9% 和 3.2%,比不施钙肥低 19.1% 和 17.8%;至块茎增长末期,自制钙肥和市售钙肥处理根系钙素含量分别为 14.07 g/kg 和 13.05 g/kg,比不施钙处理提高 27.2% 和 18.0%,采收期,自制钙肥和市售钙肥处理的根部钙含量分别比空白处理高 8.0% 和 9.0%。

施钙处理与不施钙处理马铃薯茎中钙素含量差异显著。不施钙处理在苗后 68 d 钙素含量降至最低值,施钙处理在出苗后 53 d 钙素含量最低。出苗后 53 d,不施钙、自制钙肥和市售钙肥处理的钙素含量分别为 11.35、8.25 和 9.49 g/kg;出苗后 68 d,市售

钙肥和自制钙肥处理的钙素含量分别比不施钙肥高 23.1% 和 24.6%,达到显著性差异水平。

施钙处理促进叶片钙素含量的提升,具体表现为市售钙肥 > 自制钙肥。苗后 68 d,自制钙肥和市售钙肥处理的钙素含量比不施钙肥处理分别提高 21.4% 和 32.0%;苗后 80 d,自制钙肥和市售钙肥分别比不施钙肥处理高 1.8% 和 6.8%。

不同处理间马铃薯块茎中钙素含量差异显著。苗后 53 d,自制钙肥和市售钙肥处理的块茎钙素含量比不施钙肥处理分别高 75.0% 和 55.0%;采收期,自制钙肥和市售钙肥处理比不施钙肥钙素含量高 26.7% 和 20.0%,自制钙肥处理块茎中钙的含量高于市售钙肥。

2.5 不同处理对马铃薯钙积累量的影响

马铃薯在不同生育期对钙素的积累量有不同程度的差异,施钙处理促进了马铃薯植株钙素积累。3 个处理根、茎、块茎的钙素积累量均表现出明显的单峰曲线的变化趋势,叶及全株的钙素积累量变化趋势相近,均随着生育期的推进而逐渐递增(图 2)。整个生长期马铃薯根、茎、块茎钙素积累量自制钙肥处理的效果优于市售钙肥。

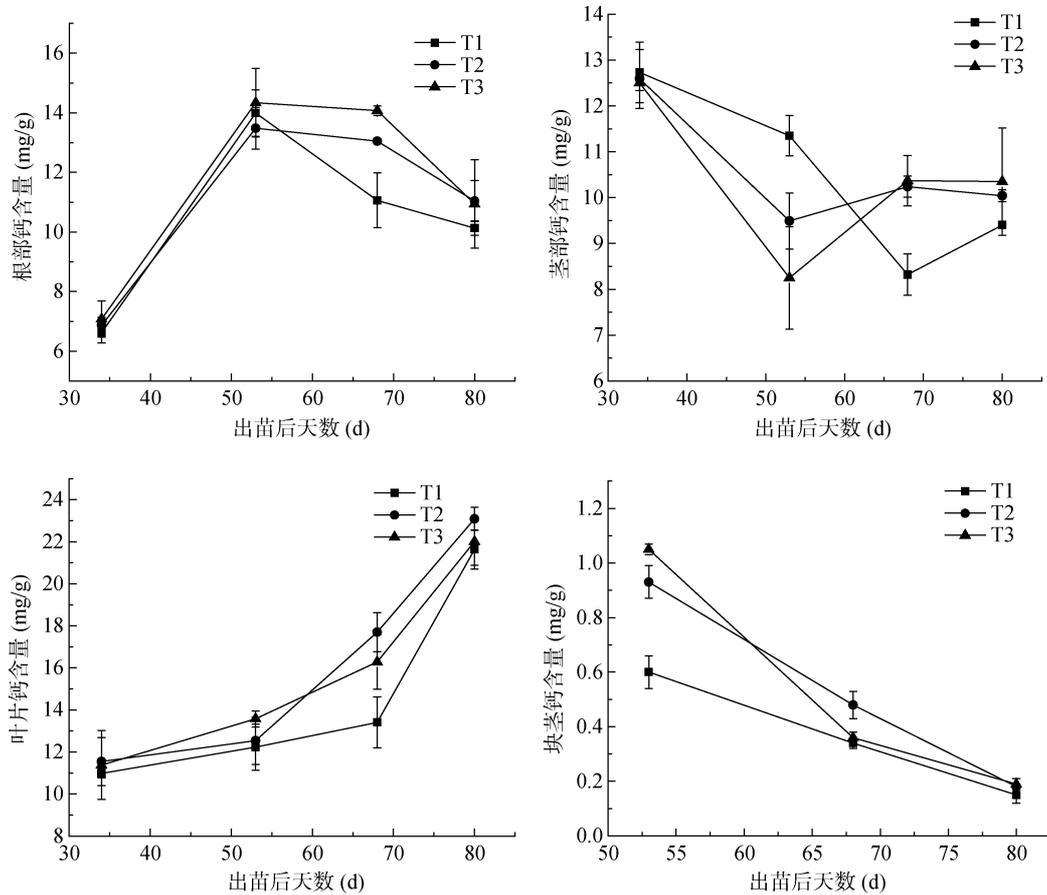


图1 不同处理马铃薯各器官钙素含量的动态变化

Fig. 1 Dynamic changes of calcium contents in different organs of potatoes under different treatments

钙肥处理下根的钙素累积量在出苗后 68 d 达到峰值, 空白处理在出苗后 53 d 达到峰值, 苗后 80 d, 自制钙肥和市售钙肥处理的马铃薯植株根部钙素累积量均比空白处理高 20.3%; 钙肥处理的茎部钙素累积量在苗后 68 d 达到峰值, 之后钙素累积量逐渐降低, 至苗后 80 d, 自制钙肥和市售钙肥处理的马铃薯茎部钙素累积量分别比空白处理高 97.4% 和 55.7%; 3 个处理的叶片钙素累积量均呈现出逐渐增加的趋势, 在出苗后 80 d 达到峰值, 自制钙肥和市售钙肥处理的马铃薯植株叶片钙素累积量分别为 543.72、506.63 mg/株, 比不施肥提高了 56.5% 和 45.8%。

块茎钙素累积量在采样期表现为先增加后降低的变化趋势, 在收获期, 自制钙肥处理分别比市售钙肥和空白处理提高 4.2% 和 56.3%, 增加效果明显。全株的钙累积量意味着吸收外源钙的多少, 本试验中施钙处理马铃薯全株钙素累积量均高于空白处理, 且整个生长期自制钙肥的优势明显, 其中不施钙肥、市售糖醇钙和自制糖醇螯合钙处理在块茎增长后期全株钙素累积量分别增加 11.3%、8.3%、17.9%, 到

采收期, 自制钙肥和市售钙肥处理的钙素累积量分别比不施钙肥处理的提高 62.1% 和 47.0%。

2.6 马铃薯块茎影响养分吸收的因素间相关性分析

表 5 表明, 马铃薯块茎干物质积累量与块茎产量, 钙、磷、钾积累量均呈显著正相关关系($P < 0.05$), 相关系数分别为 0.816、0.740、0.874 和 0.843; 钙积累量与磷积累量和钾积累量呈显著正相关关系, 相关系数分别为 0.842 和 0.823; 磷积累量和钾积累量呈极显著正相关($P < 0.01$), 相关系数为 0.980。而氮积累量与干物质积累量以及钙磷钾养分积累没有表现出明显的相关关系。

3 讨论

施用钙肥有效促进了马铃薯的生长发育, 提升了块茎产量与品质。Ozgen 和 Palta^[26]研究结果表明, 增加钙可以影响马铃薯产量构成要素。与对照相比, 施用糖醇钙肥处理的马铃薯单株结薯数、单薯重量、单株产量均有不同程度的增加, 钙离子能够促进匍匐

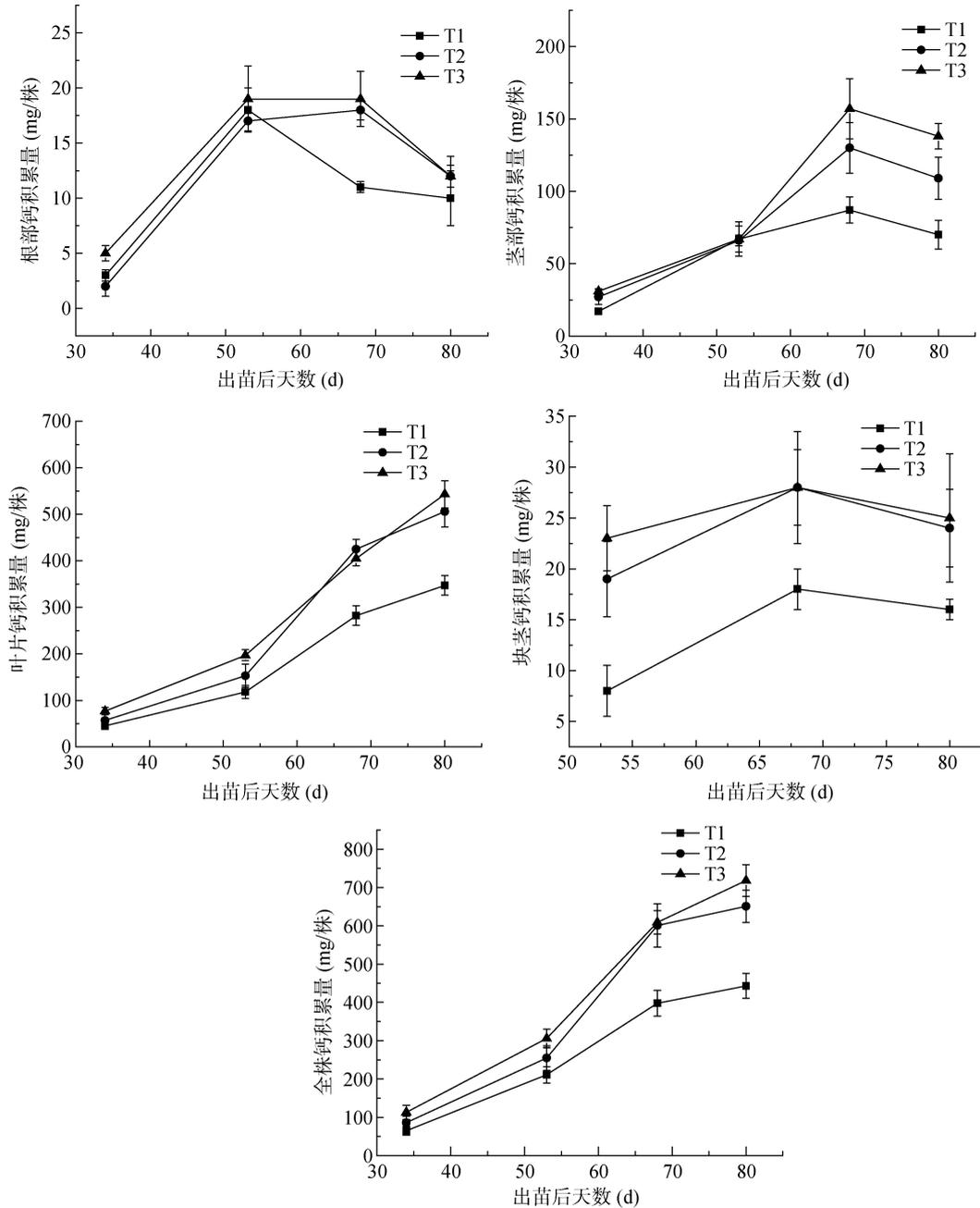


图 2 马铃薯各器官和全株钙积累量

Fig. 2 Calcium accumulation in various organs and whole plants of potatoes under different treatments

表 5 块茎产量、干物质积累量及营养元素间相关性分析

Table 5 Correlation of tuber yield, dry matter accumulation and nutrient elements

	产量	干物质积累量	钙积累量	氮积累量	磷积累量	钾积累量
产量	1					
干物质积累量	0.816*	1				
钙积累量	0.557	0.740*	1			
氮积累量	0.326	0.381	0.340	1		
磷积累量	0.691	0.874*	0.842*	0.321	1	
钾积累量	0.667	0.843*	0.823*	0.487	0.980**	1

注: *表示相关性达到 $P<0.05$ 显著水平, **表示相关性达到 $P<0.01$ 显著水平。

茎中细胞分裂和提升赤霉素的水平^[27]。本试验中,叶面喷施钙肥提高了马铃薯块茎的大薯率和商品薯产量。作物产量的基础是光合作用,研究表明,提高外源钙水平可提高叶绿素含量,提高光合电子传递效率,对维持叶片较高的光合速率有一定的促进作用,进而生产更多的光合产物,最终为产量的提高、品质的改善奠定了生理基础^[28-29]。两种钙肥相比,自制钙肥处理效果优于市售钙肥。

施用钙肥可提升块茎品质。自制钙肥处理块茎品质表现最好,可溶性蛋白质含量、氮磷钾积累量均有不同程度的增加,硝态氮含量明显低于空白对照,可溶性糖含量与空白对照相近。块茎糖含量影响马铃薯口感与加工,高温加工时还原糖与其他物质发生反应导致薯质变黑。钙离子可影响卡尔文循环、磷酸戊糖途径和糖酵解代谢关键酶的活性,从而导致糖代谢缓慢,糖分积累减少^[30]。蛋白质的增加主要是钙可以激发植株磷酸戊糖途径、糖酵解和三羧酸循环的进行,从而促进氨基酸的合成^[31]。

3个处理马铃薯全株干物质积累均呈现先慢后快的变化趋势,块茎形成期干物质积累速率比较慢,块茎增长后期干物质积累速率加快。施用外源钙肥后干物质积累量增多,表现为钙肥对马铃薯植株干物质积累的促进作用,自制钙肥的效果优于市售钙肥。

不同处理马铃薯同一器官中钙素含量存在差异,外源补钙可以提高马铃薯各器官的钙含量。施钙处理的马铃薯各器官中,根、茎、块茎器官中钙素含量出现峰值的时间均先于叶片,推测其主要原因是钙肥的施用能够延缓叶片衰老,延长叶片钙素吸收时间。结合马铃薯干物质的积累变化规律我们发现,钙肥能促进块茎干物质的积累,但块茎中钙素含量较低,随着生育进程的推进,钙素含量逐渐降低。由此推测,钙促进干物质的增加可能是钙提高了叶片光合作用效率,并参与植株体内的信息传递,从而使更多的无机和有机物质转运到块茎中^[17]。马铃薯的根部钙含量充足,有利于组织的构建与成长,进一步促进马铃薯对养分的吸收利用,而茎叶钙含量的提高可促进茎叶生长,增加光合面积,促进光合产物的产生和运输^[32],两种钙肥施用后,马铃薯根、茎、叶和块茎的钙含量均明显提升,这表明由叶面喷施的钙肥迁移到了其他部位。对比收获时两种钙肥处理下的马铃薯钙含量和钙素积累量,自制钙肥处理下茎和块茎的钙含量和钙素积累量显著高于市售钙肥,这表明叶面喷施后,自制钙肥更有利于钙素由叶片到茎再到块茎的迁移,究其原因,自制钙肥的钙以螯合态为主,不易固定因此

本次试验首次证明了以山梨醇为配体合成的螯合钙更有利于在马铃薯植株中的吸收和迁移,为钙素的有效利用提供了数据支持。

干物质的积累是作物产量形成的基础,喷施钙肥显著提高了块茎干物质的积累量,统计分析结果亦证明块茎干物质的积累与产量呈显著正相关。块茎中钙与磷、钙与钾、磷与钾素积累量均显著或极显著正相关,表明钙、磷与钾3种营养元素在块茎中的积累是互相影响的,当然也是土壤环境、马铃薯细胞结构与功能共同作用的结果^[33],增施钙肥有效提高了块茎中钙、磷、钾营养元素的积累量,其机理分析后续有待加强。

马铃薯全株钙积累量越高,其吸收外源钙就越多,钙肥的利用率也越高。出苗后80d,施用自制钙肥的马铃薯全株钙积累量最高,比市售钙肥高出10.30%,山梨醇作为一种来自植株韧皮部的天然小分子物质,与钙形成电中性的螯合钙后,穿过叶片角质层的速度比无机离子快,因此吸收效果好^[34]。

糖醇螯合钙肥的吸收迁移特性除了与中心离子钙有关外,还与配体山梨醇的性质和钙离子的螯合强度(稳定常数)有关。目前还没有关于螯合肥料螯合强度的统一界定标准,螯合强度与肥效的关系只能通过作物肥效试验间接论证,因此研发糖醇专用肥并开展相应的肥效试验对促进我国高端肥料的推广应用,实施“减肥增效”,提升农产品品质,促进土壤生态系统良性发展具有重要意义。

4 结论

本试验条件下,糖醇钙肥对马铃薯产量的提高和品质的改善有明显的促进作用,自制钙肥处理的各项指标基本优于市售钙肥,更为重要的是自制钙肥钙的运移能力显著高于市售钙肥,同时促进马铃薯对土壤中氮磷钾等养分的吸收利用,增加块茎等器官干物质的积累。本研究可为高品质糖醇螯合钙肥在重要大田作物马铃薯种植中的大规模应用提供理论依据和经验参考。

参考文献:

- [1] Ferguson I B. Calcium in plant senescence and fruit ripening[J]. *Plant Cell and Environment*, 1984, 7(6): 477-489.
- [2] 邹邦基,何雪晖.植物的营养[M].北京:农业出版社,1985.
- [3] 李燕婷,肖艳,李秀英.作物叶面施肥技术与应用[M].北京:科学出版社,2009.

- [4] 李合生. 现代植物生理学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2002.
- [5] Bukovac M J, Wittwer S H. Absorption and mobility of foliar applied nutrients[J]. *Plant Physiology*, 1957, 32(5): 428–435.
- [6] 陈海峰, 周东美, 仓龙, 等. 垂直电场对 EDTA 络合诱导铜锌植物吸收及其迁移风险的影响[J]. *土壤学报*, 2007, 44(1): 174–178.
- [7] 蒋先军, 骆永明, 赵其国, 等. 镉污染土壤植物修复的 EDTA 调控机理[J]. *土壤学报*, 2003, 40(2): 205–209.
- [8] Nowack B, Baumann U. Biologischer abbau der photolyseprodukte von FeIII-EDTA[J]. *Acta Hydrochimica et Hydrobiologica*, 1998, 26(2): 104–108.
- [9] Hangarter R P, Stasinopoulos T C. Effect of Fe-catalyzed photooxidation of EDTA on root growth in plant culture media[J]. *Plant Physiology*, 1991, 96(3): 843–847.
- [10] Metsärinne S, Rantanen P, Aksela R, et al. Biological and photochemical degradation rates of diethylenetriaminepentaacetic acid (DTPA) in the presence and absence of Fe(III)[J]. *Chemosphere*, 2004, 55(3): 379–388.
- [11] 袁伟, 董元华, 王辉. 植物氨基酸多元素肥料生物效应的研究进展[J]. *土壤*, 2009, 41(1): 16–20.
- [12] 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.
- [13] 吴文强, 刘瑜, 李萍, 等. 糖醇螯合钙对茄子生长、产量和品质的影响[J]. *中国蔬菜*, 2013(24): 46–48.
- [14] Brown P H, HU H N. Phloem mobility of boron is species dependent: evidence for phloem mobility in sorbitol-rich species[J]. *Annals of Botany*, 1996, 77(5): 497–506.
- [15] Transgenically enhanced sorbitol synthesis facilitates phloem boron transport and increases tolerance of tobacco to boron deficiency[J]. *Plant Physiology*, 1999, 119(1): 17–20.
- [16] Hu H, Penn S G, Lebrilla C B, et al. Isolation and characterization of soluble boron complexes in higher plants. The mechanism of phloem mobility of boron[J]. *Plant Physiology*, 1997, 113(2): 649–655.
- [17] 张丽秋. 外源钙对马铃薯生长发育和品质的影响[D]. 石河子: 石河子大学, 2009.
- [18] 徐雪风, 李朝周, 张俊莲. 轮作油菜对马铃薯生长发育及抗性生理指标的影响[J]. *土壤*, 2017, 49(1): 83–89.
- [19] 颜冬云, 杨光, 徐绍辉, 等. 一种马铃薯专用螯合肥: CN107188708A[P]. 2017-09-22.
- [20] 颜冬云, 何江龙, 徐绍辉, 等. 一种液态螯合肥生产装置: CN107138116A[P]. 2017-09-08.
- [21] 颜冬云, 杨光, 徐绍辉, 等. 一种植物复合肥: CN106146177A[P]. 2016-11-23
- [22] 颜冬云, 孙文轩, 李玉鹏, 等. 采用分光光度法测定糖醇螯合钙肥螯合率的方法 CN201810783391.7[P]. 2018-12-28.
- [23] 赵世杰. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2002.
- [24] 王囡囡, 朱凤莉, 张春峰, 等. 不同秸秆还田方式对白浆土土壤养分及大豆产量的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2016(1): 94–97.
- [25] 王丽丽, 杨举田, 张彦东, 等. 原子吸收光谱法测定植烟土壤中交换性钙镁含量[J]. *安徽农业科学*, 2016, 44(14): 136–137, 168.
- [26] Ozgen S, Palta J P. Supplemental calcium application influences potato tuber number and size[J]. *HortScience*, 2005, 40(1): 102–105.
- [27] Escalante B Z, Langille A R. Photoperiod, temperature, gibberellin, and an anti-gibberellin affect tuberization of potato stem segments *in vitro*[J]. *Hortscience*, 1998, 33(4): 701–703.
- [28] 钱宝云, 刘小龙, 李霞. 钙肥对不同内源钙含量水稻品种光合作用的影响[J]. *江苏农业学报*, 2014, 30(3): 467–473.
- [29] 李明悦, 朱静华, 廉晓娟, 等. 钾·钙·钠交互作用对小白菜生长和养分吸收的影响[J]. *安徽农业科学*, 2013, 41(5): 2031–2032, 2160.
- [30] Prado F E, Lázaro J J, Gorgé J L. Regulation by Ca of a cytosolic fructose-1, 6-bisphosphatase from spinach leaves[J]. *Plant Physiology*, 1991, 96(4): 1026–1033.
- [31] Hepler P K, Wayne R. Calcium and plant development[J]. *Annual Review of Plant Biology*, 1985, 36(1): 397–439.
- [32] 杜强. 钙对马铃薯植株生长及块茎品质的影响[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2013.
- [33] 侯爱敏, 彭少麟, 周国逸. 广东鼎湖山马尾松年轮元素含量及其相关性研究[J]. *生态学杂志*, 2002, 21(1): 6–9.
- [34] Sawan Z M, Hafez S A, Basyony A E. Effect of phosphorus fertilization and foliar application of chelated zinc and calcium on seed, protein and oil yields and oil properties of cotton[J]. *The Journal of Agricultural Science*, 2001, 136(2): 191–198.