

钾素对食用型甘薯糖代谢相关酶活性的影响

柳洪鹃¹, 史春余^{1*}, 张立明², 张海峰¹, 王振振¹, 柴沙沙¹

(1 山东农业大学农学院, 作物生物学国家重点实验室, 泰安 271018; 2 山东省农业科学院, 济南 250100)

摘要: 为了探讨钾素提高甘薯块根可溶性糖含量的生理基础。选用典型的食用型甘薯品种“北京 553”, 设置不同施钾处理, 于 2009 ~ 2010 年 2 个生长季在山东农业大学农学试验站进行试验。采用甘薯块根膨大过程中定期取样的方法, 测定块根可溶性糖和淀粉含量及相关酶活性、功能叶蔗糖含量及相关酶活性。结果表明, 与对照比较, 施用钾肥能显著提高块根产量、可溶性糖及各糖组分含量, 其中 K_2O 用量为 24 g/m^2 处理增幅最大, 为最适用量。进一步研究发现, 适宜供钾处理显著提高了功能叶磷酸蔗糖合成酶活性和蔗糖含量, 生育期内平均增幅分别为 10.31% 和 34.13%, 同时提高了块根中蔗糖合成酶、不溶性酸性转化酶的活性, 生育期内平均增幅为 16.47% 和 3.66%, 在提高源端光合产物供应的同时促进蔗糖在库端的卸载, 促进块根中淀粉和可溶性糖的积累; 适宜供钾处理还提高了块根中 α -和 β -淀粉酶的活性, 生育期内平均增幅分别为 26.06% 和 14.64%, 促进淀粉向可溶性糖转化。此外, 适宜供钾处理还显著提高了生长前期和后期块根中可溶性酸性转化酶活性、以及生长后期块根中蔗糖-蔗糖果糖基转移酶活性, 促进了葡萄糖、果糖和果聚糖在块根中的积累。在甘薯收获期, 块根可溶性糖和淀粉含量分别提高了 13.52% 和 3.02%。即钾肥能够增加块根中蔗糖的供应量, 促进块根对蔗糖的吸收, 促进淀粉水解, 是其提高块根可溶性糖含量的生理原因。

关键词: 甘薯; 钾肥; 块根; 可溶性糖; 糖代谢酶

中图分类号: S143.3⁺2

文献标识码: A

文章编号: 1008-505X(2012)03-0724-09

Effect of potassium on related enzyme activities in sugar metabolism of edible sweet potato

LIU Hong-juan¹, SHI Chun-yu^{1*}, ZHANG Li-ming², ZHANG Hai-feng¹, WANG Zhen-zhen¹, CHAI Sha-sha¹

(1 Agronomy College, Shandong Agricultural University/State Key Laboratory of Crop Biology, Tai'an 271018, China;

2 Shandong Academy of Agricultural Sciences, Jinan 250100, China)

Abstract: In order to clarify the physiological basis of increasing soluble sugar content in storage roots of edible sweet potato by potassium fertilization, the typical cultivar of edible sweet potato (Beijing 553) was grown in a replicated experiment at the Agricultural Experiment Station of Shandong Agricultural University in two summer crop seasons of 2009 and 2010. The treatments included the control and treatments with different dosages of potassium. The changes of starch content, soluble sugar content and related enzyme activities of storage roots, sucrose content and related enzyme activities of functional leaves were determined by using periodic sampling during the enlargement of sweet potato storage roots. The results show that compared with the control, the application of potassium can increase yield, the content of soluble sugar and its components of storage roots, and the largest increase appears in the treatment with $24\text{ g K}_2\text{O}$. In other words, the dosage of this treatment is the optimum one. The sucrose phosphate synthase (SPS) activity and sucrose content of functional leaves are increased significantly, with the average increase of 10.31% and 34.13%, and the sucrose synthase (SS) activity and insoluble acid invertase activity of storage roots are increased observably with the average increase of 16.47% and 3.66% during whole growth period in the treatment with the optimum dosage. These results indicate the transports of photosynthate

收稿日期: 2011-07-20

接受日期: 2012-01-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(31000689); 国家甘薯产业技术体系北方薯区栽培岗位科学家项目资助。

作者简介: 柳洪鹃(1985—), 女, 山东栖霞人, 博士研究生, 研究方向为作物生理生态。E-mail: liumei0535@126.com

* 通讯作者 E-mail: scyu@sdau.edu.cn

from functional leaves to storage roots are improved. As a result, the accumulations of soluble sugar and starch in storage roots are achieved. Meanwhile the amylase activities in the treatment with the optimum dosage are increased significantly with the average increase of 27.90% and 14.26%, respectively for α - and β -amylase, which enhances the conversion from starch to soluble sugar. Besides, the treatment with the optimum dosage can increase activity of soluble acid invertase during the pre and post growth periods of sweet potato, and can increase sucrose; sucrose 1-fructosyltransferase (SST) activity at the later growth stage of sweet potato as well. The improvement of soluble acid invertase activity and SST activity is benefit to the accumulation of glucose and fructose in storage roots. At the harvest, the contents of soluble sugar and starch are increased by 13.52% and 3.02% respectively. To sum up, the physiological reasons of increasing soluble sugar content in storage roots caused by potassium application are that it can increase supply of sucrose, promote absorption of sucrose and promote hydrolysis of starch.

Key words: sweet potato; potassium; storage root; soluble sugar; sugar metabolic enzyme

食用型甘薯富含可溶性糖、维生素 C 和 β -胡萝卜素等营养物质,具有良好的营养保健作用,日益受到消费者的青睐^[1-2]。其中,可溶性糖是食用型甘薯最重要的品质指标之一,与块根蒸煮后的适口性和风味密切相关^[3-7]。而钾肥是重要的品质要素之一^[8],能显著提高果实中可溶性糖含量,因此,研究钾肥对食用型甘薯块根可溶性糖含量的调控效应,具有理论和实践意义。

葡萄和瓜尔豆等作物上的研究表明,施用钾肥可以显著提高果实可溶性糖含量^[9-17]。胡春梅等的研究表明,适量钾肥能显著提高瓜尔豆叶片的净光合速率,加速糖类物质由叶片向子粒中的运转,促进子粒中糖类物质的积累^[15]。葡萄等作物上的研究表明钾肥处理能提高功能叶中磷酸蔗糖合成酶 (SPS) 的活性^[11-12,16-17],增加蔗糖的供应;在西瓜上的研究则表明,钾肥能提高果实中转化酶的活性,促进果实中还原糖的积累^[17]。在甘薯上的研究表明,钾肥能促进光合产物向根部运转,提高可溶性糖含量^[9-10]。以上研究均表明,施用钾肥能提高作物中可溶性糖含量,但其提高可溶性糖含量生理机理的研究尚不全面,甘薯中的研究更是鲜见报道。本试验通过大田种植典型的食用型甘薯品种“北京 553”,并进行钾肥处理,研究块根中可溶性糖含量及相关酶活性的变化规律,期望阐明钾肥提高甘薯块根中可溶性糖含量的生理基础,为钾肥应用于优质农产品生产提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料与设计

试验于 2009~2010 年在山东农业大学农学试验站进行。供试品种为“北京 553”;供试肥料为硫

酸钾(K_2O 含量 50%);供试土壤质地为砂壤土,养分平均含量为有机质 13.70 g/kg、碱解氮(N) 72.86 mg/kg、速效磷(P) 21.62 mg/kg、速效钾(K) 65.79 mg/kg。

试验共设 4 个处理, K_2O 用量分别为 0、12、24 和 36 g/m² 用硫磺平衡各处理硫元素的施用量,肥料全部基施。小区面积 20 m²,每个处理重复 3 次,随机排列。分别于 5 月 3 日和 5 月 6 日栽秧,10 月 19 日和 10 月 22 日收获,行距 80 cm、株距 25 cm。

1.2 样品采集和测定方法

于甘薯块根开始膨大后(栽秧后 50 d 左右),在取样区内每 20 d 取样 1 次,直到收获。在每个小区选择典型且生长一致的 5 株,剪掉地上部,挖出所有的块根。取功能叶(顶部第四和第五展开叶)和典型块根的中间部位,经液氮速冻后,置 -40℃ 低温冰柜中保存,用于测定有关酶活性。将地上部分为叶片、叶柄和茎蔓,将块根切成薄片,在 60℃ 烘箱中烘干后粉碎用于测定淀粉、可溶性糖以及糖组分含量。收获期测定块根产量。

采用蒽酮比色法测定可溶性糖和淀粉含量;采用高效液相色谱法测定块根可溶性糖各组分含量。具体操作如下:准确称取 0.1 g 粉碎的干样品,用 80% 乙醇 80℃ 水浴 30 min 提取 3 次,收集所有提取液并蒸干,用蒸馏水溶解,高速离心,过 C_{18} 柱去色素后用 0.45 μ m 微孔滤膜过滤,滤液用于 HPLC 测定。用 Waters 公司产测糖专用 Sugar-PAK I 型柱,流动相为双蒸馏水(0.1 mmol/L EDTA Na_2 -Ca),流速为 0.5 mL/min,柱温 90℃,检测器为 Waters 2414 示差折光检测器,进样量为 10 μ L。根据标样的色谱峰面积计算葡萄糖(G)、果糖(F)和蔗糖(S)含量,根

据折光系数与 S 相近的原理,以 S 标样的色谱峰面积计算果聚糖含量。

磷酸蔗糖合成酶 (SPS) 活性的测定 参照 Douglas 等^[18]和 Tsai-Mei 等^[19]的方法提取酶液,略有改动,具体如下:称取 0.5 g 叶片,加入 7 mL Hepes-NaOH 缓冲液 (pH 7.5),冰浴研磨,匀浆转入离心管,10000 × g 4℃ 离心 10 min,上清液即为酶液。活性测定参考於新建^[20]和 Natalie 等^[21]的方法,略有改动,具体如下:50 μL 酶液加入 50 μL 缓冲液、40 μL 25 mmol/L MgCl₂、40 μL 50 mmol/L UDPG 和 20 μL 100 mmol/L 6-磷酸果糖,30℃ 保温 30 min,100℃ 沸水浴 1 min,加入 100 μL 2 mol/L NaOH 混匀,100℃ 水浴 10 min,加入 2.0 mL 30% HCl 和 1 mL 1% 间苯二酚,混匀后 80℃ 保温 10 min,冷却后 480 nm 波长下比色,测定生成磷酸蔗糖量,用蔗糖生成量表示酶活性。酶液经沸水浴后加入反应液为对照。

蔗糖合成酶 (SS) 活性的测定 参考 Douglas 等^[18]和 Tsai-Mei 等^[19]的方法提取 SS 酶液,略有改动,具体如下:称取 1.50 g 鲜块根,加入 8 mL Hepes-NAOH (pH 7.5) 缓冲液,冰浴研磨转入离心管,即为酶提取液。SS 活性测定参考 Douglas 等^[18]和 Tsai-Mei 等^[19]的方法,略有改动,具体如下:50 μL 反应液冰浴 5 min 后加入 50 μL 酶液,30℃ 水浴 30 min,沸水浴 1 min 终止反应,冷却后加入 1.9 mL 水和 1 mL 显色剂,沸水浴 5 min,540 nm 波长下比色。酶液经沸水浴后加入反应介质为对照。

蔗糖-蔗糖果糖基转移酶 (SST) 活性的测定 1 g 鲜样品加 5 mL 100 mmol/L pH 5.0 醋酸-醋酸钠缓冲液,内含 20 mmol/L EDTANa₂、20 mmol/L DTT(硫代苏糖醇),10% PVP,冰浴研磨,10000 × g

冷冻离心 10 min,上清液即为酶粗提液。SST 活性测定参照 Cairns (1989)、Housley 等 (1987) 的方法^[22-23],反应体系为 50 μL pH 5.0 醋酸-醋酸钠缓冲液、200 μL 2 mol/L 蔗糖、100 μL 10 mg/mL BSA (牛血清蛋白)、150 μL H₂O,加入 500 μL 酶液后起始反应,30℃ 保温反应 30 min 后,沸水浴 2 min 终止反应。用葡萄糖氧化酶法测定生成的葡萄糖量及酶液中葡萄糖含量^[24],用二者差值计算 SST 活性。

参考 Lowell 等^[25]和 Hubbard 等^[26]的方法提取转化酶酶液,参考 Lowell 等^[25]的方法测定酸性转化酶的活性。用 3,5-二硝基水杨酸法测定淀粉酶活性^[27]。

1.3 统计分析

图表数据均为两年试验的平均值,采用 F 检验统计分析,最小显著差异法 (LSD 法) 进行多重比较。

2 结果与分析

2.1 收获期块根产量、淀粉和可溶性糖含量

从表 1 可以看出,与对照 (K0) 比较,收获期钾肥处理显著提高块根产量和可溶性糖含量,增幅随施用量的增加先升高后降低,其中 K24 处理的增幅最大,分别为 22.66% 和 13.52%。钾肥处理收获期块根中淀粉含量略有增加,K24 处理增幅最大。甘薯块根中的可溶性糖各组分含量由高到低依次为蔗糖、果聚糖、果糖和葡萄糖。与对照比较,钾肥处理显著提高了蔗糖、葡萄糖、果糖和果聚糖等的含量,其中 K24 处理增幅最大,增幅分别为 23.19%、31.37%、10.57% 和 4.12%。由此可知,氧化钾的最适用量为 24 g/m²。

表 1 收获期食用型甘薯块根产量 (kg/m²) 及淀粉和可溶性糖含量 (% , DW)

Table 1 Storage root yield and contents of starch and soluble sugar in storage roots of edible sweet potato at harvest

处理 Treatment	产量 Yield	淀粉 Starch	可溶性糖 Soluble sugar	蔗糖 Sucrose	果聚糖 Fructan	果糖 Fructose	葡萄糖 Glucose
K0	3.89 c	53.37 a	23.07 b	9.66 c	8.49 b	2.65 b	1.53 c
K12	4.34 b	54.06 a	24.72 b	10.56 b	8.76 a	2.76 b	1.83 b
K24	4.77 a	54.98 a	26.19 a	11.99 a	8.84 a	2.93 a	2.01 a
K36	4.74 a	54.29 a	25.98 a	11.46 a	8.78 a	2.81 a	1.95 a

注 (Note): 同列数值后不同字母表示不同处理间差异达 5% 显著水平 Within a column, values followed by different letters are significantly different between treatments at the 0.05 probability level.

2.2 不同生长期甘薯块根淀粉、可溶性糖含量及相关酶活性

2.2.1 块根淀粉、可溶性糖含量的变化 由图 1 可知,在甘薯块根膨大过程中,块根可溶性糖含量的变化趋势为栽秧后 50 ~ 110 d 下降,110 ~ 170 d 上升;而块根淀粉含量的变化趋势为栽秧后 50 ~ 110 d 上升,110 ~ 170 d 下降,与可溶性糖含量呈现“此消彼长”的变化趋势。与对照(K0)相比,适宜供钾处理(K24)各时期块根的平均可溶性糖含量极显著提高($P=0.0001$),生长后期增幅较大;块根的平均淀粉含量略有升高($P=0.13$),生长前期增幅较大。

从表 2 可看出,与对照(K0)相比,适宜供钾处理(K24)降低了栽秧后 50 ~ 110 d 块根中果聚糖的含量,显著增加了栽秧后 130 ~ 170 d 块根中果聚糖

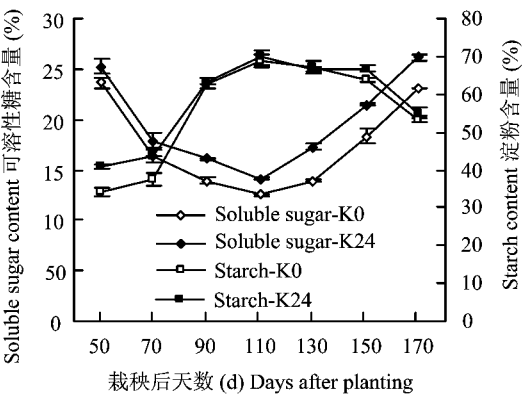


图 1 块根淀粉和可溶性糖含量变化动态
Fig. 1 Dynamic changes of starch and soluble sugar contents in storage roots

表 2 不同生长期块根可溶性糖各组分含量(%, DW)
Table 2 Contents of components of soluble sugar in storage roots in different growth periods

糖组分 Sugar component	处理 Treatment	栽秧后天数 Days after planting (d)						
		50	70	90	110	130	150	170
果聚糖 Fructan	K0	9.40 a	8.26 a	5.48 a	5.20 a	5.67 b	7.66 b	8.49 b
	K24	9.03 b	7.47 b	5.35 a	5.19 a	6.14 a	8.12 a	8.84 a
蔗糖 Sucrose	K0	12.21 a	7.62 a	6.34 b	6.10 b	6.90 b	7.39 b	9.66 b
	K24	9.47 b	7.41 a	7.02 a	6.75 a	7.79 a	10.11 a	11.99 a
葡萄糖 Glucose	K0	0.39 b	0.35 b	0.42 a	0.22 b	0.17 b	1.11 b	1.53 b
	K24	0.41 a	0.40 a	0.40 a	0.27 a	0.20 a	1.37 a	2.01 a
果糖 Fructose	K0	0.83 b	0.58 b	0.53 a	0.24 b	0.39 b	1.42 b	2.65 b
	K24	1.59 a	0.78 a	0.55 a	0.33 a	0.46 a	1.63 a	2.94 a

注(Note): 同列数字后的不同字母表示不同处理间差异达 5% 显著水平 Within a column, values followed by different letters are significantly different between treatments at the 0.05 probability level.

含量;降低了栽秧后 50 ~ 70 d 块根中蔗糖含量,显著提高了栽秧后 90 ~ 170 d 块根中蔗糖含量;还提高了全生育期块根中葡萄糖和果糖的含量,其中生长后期(栽秧后 150 d 左右)葡萄糖增幅较大、而生长前期(栽秧后 70 d 左右)果糖增幅较大。

2.2.2 块根中糖代谢相关酶活性的变化 蔗糖合成酶(SS)是植物贮藏器官中促进蔗糖分解的主要功能酶,对促进蔗糖分解以及淀粉合成有重要作用,其分解产物为尿苷二磷酸葡萄糖(UDPG)和果糖。由表 3 可知,栽秧后 110 d 块根中 SS 活性最高,栽秧后 70 d 和 150 d 块根中 SS 活性次之。与对照(K0)相比,适宜供钾处理(K24)显著提高了主要生长期块根中的 SS 活性,增幅分别为 25.00%、5.39% 和

19.01%,进而促进淀粉的合成及果糖的积累。
转化酶又称蔗糖酶或 β -呋喃果糖苷酶,可将蔗糖不可逆地裂解成葡萄糖和果糖。包括酸性转化酶(AI)和碱性转化酶(NI),AI 又可分为可溶性和不溶性 2 种,前者分布在液胞中或细胞自由空间,后者存在于细胞壁上^[28]。液泡中的转化酶可以调节蔗糖和己糖的贮存,而处在细胞壁中的转化酶能调节蔗糖从韧皮部卸出,并且控制库对蔗糖的吸收速度^[29]。由表 3 可以看出,与对照(K0)相比,适宜供钾处理(K24)提高了块根中可溶性转化酶的活性,且生长前期和生长后期增幅较大;同时提高了生长后期不溶性酸性转化酶活性。不溶性酸性转化酶促进了块根对蔗糖的吸收,提高了块根的库强度。而

表 3 主要生长期块根酸性转化酶(可溶性转化酶和不溶性转化酶)和蔗糖合成酶活性变化 [Glucose mg/(g·h), FW]
Table 3 Changes of acid invertase (soluble AI and insoluble AI) and the sucrose synthase (SS) activities in storage roots in key growth periods

酶活性 Enzyme activity	处理 Treatment	栽秧后天数 Days after planting (d)		
		70	110	150
蔗糖合成酶	K0	9.26 b	13.50 b	8.95 b
Sucrose synthase (SS)	K24	11.57 a	14.68 a	10.65 a
可溶性酸性转化酶	K0	8.38 b	8.41 a	9.84 b
Soluble acid invertase	K24	9.14 a	8.52 a	10.87 a
不溶性酸性转化酶	K0	11.96 a	11.25 a	11.06 b
Insoluble acid invertase	K24	12.27 a	11.49 a	11.64 a

注 (Note): 同列数字后不同字母表示不同处理间差异达 5% 显著水平 Within a column, values followed by different letters are significantly different between treatments at the 0.05 probability level.

生长前、后期可溶性 AI 活性的大幅提高,则为葡萄糖和果糖的积累奠定基础。

从图 2 可看出,β-淀粉酶活性远高于α-淀粉酶活性,是块根中淀粉的主要分解酶。随着块根的膨大,β-淀粉酶活性不断提高。与对照(K0)相比,适宜供钾处理(K24)显著提高了块根中α-和β-淀粉酶活性,生育期内平均增幅分别为 26.06% 和 22.04%,能促进淀粉的水解,增加可溶性糖含量。其中,生长后期β-淀粉酶活性的增幅远高于前期,这可能是钾肥处理后期块根中葡萄糖含量增幅较大的生理原因之一。

蔗糖-蔗糖果糖基转移酶(SST)主要催化聚合度(DP)为 3 的果聚糖的合成,这是果聚糖合成的第一步,也是控制碳素向果聚糖库分配的关键^[30-31]。由图 3 可知,块根中 SST 活性栽秧后 130 d 之前变化较为平稳,此后活性迅速升高,即生长后期可能为

果聚糖的主要积累时期。与对照(K0)比较,适宜供钾处理(K24)显著提高生长后期块根中 SST 活性,为果聚糖含量的大幅提高奠定基础;而生长前中期酶活性有降低趋势,这与块根中果聚糖含量的变化趋势一致。

2.3 甘薯不同生长期地上部各器官糖含量

从表 4 可以看出,与对照(K0)相比,适宜供钾处理(K24)显著提高了生长前期和后期功能叶蔗糖含量,平均增幅为 18.14%;明显提高栽秧后 70 d 叶柄中蔗糖含量,降低栽秧后 110 d 和 150 d 叶柄中蔗糖含量,平均降幅为 17.02%;显著降低了栽秧后茎蔓中蔗糖含量,3 个生育期内平均降幅为 16.39%。因此,适宜供钾处理叶片中蔗糖含量增加,前期柄中蔗糖含量增加,说明改善了“源端”光合产物的供应;茎蔓蔗糖含量相似或降低,说明“库端”光合产物的卸载没有受到不良影响。

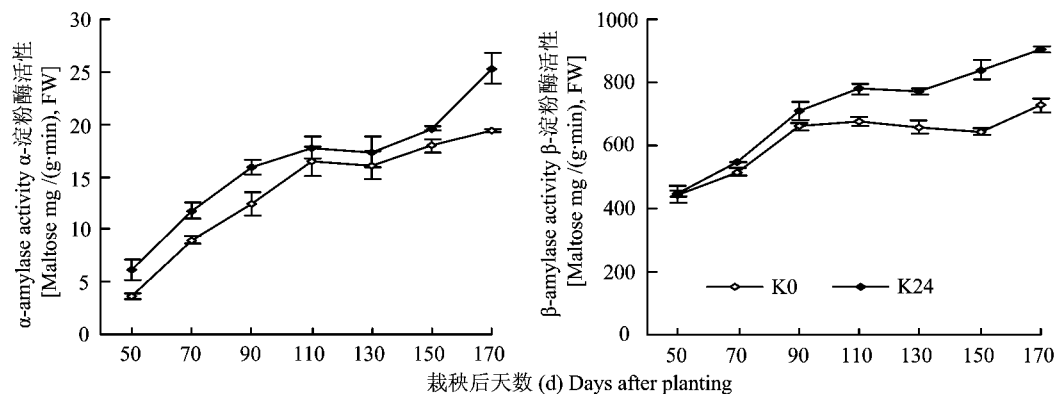


图 2 块根淀粉酶活性动态变化

Fig. 2 Dynamics of α- and β-amylase activities in storage roots

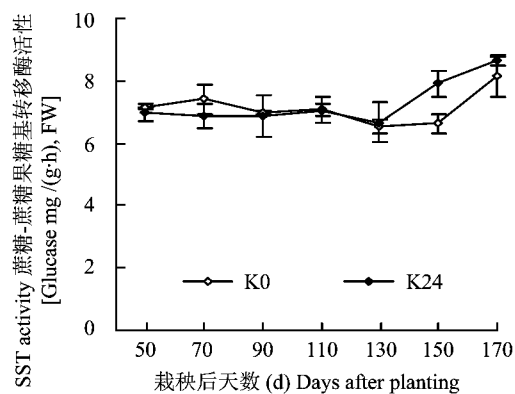


图3 块根蔗糖-蔗糖果糖基转移酶活性动态变化
Fig. 3 Dynamic changes of sucrose:sucrose 1-fructosyltransferase (SST) activity in storage roots

功能叶磷酸蔗糖合成酶 (SPS) 活性的变化趋势为栽秧后 50 ~ 90 d 下降, 90 ~ 170 d 上升。适宜供钾处理 (K24) 各时期功能叶中 SPS 活性均高于对照 (K0), 生长前中期增幅较小, 平均增幅为 5.58%, 生长后期增幅较大, 平均增幅为 16.60%, 与块根中蔗糖含量的变化趋势一致 (图 4)。

3 讨论

施用钾肥可以显著提高收获期甘薯块根中可溶性糖含量, 这与前人在西瓜、葡萄、瓜尔豆等作物上的研究结果一致^[9-13]。源端光合产物的供应是库中可溶性糖含量的重要来源。前人的研究表明钾肥能提高叶片中 SPS 活性^[11-12] 和 SS (合成方向) 活性^[17], 抑制叶片中酸性转化酶活性^[11,17], 保证源端

表4 不同生长期地上部各器官蔗糖含量
Table 4 Sucrose contents of above-ground organs in different growth periods (% , DW)

器官 Organ	处理 Treatment	栽秧后 70 d 70 days after planting	栽秧后 110 d 110 days after planting	栽秧后 150 d 150 days after planting
叶片 Leaf	K0	2.14 b	3.16 a	3.46 b
	K24	2.44 a	3.10 a	4.22 a
叶柄 Petiole	K0	2.76 b	7.89 a	16.93 a
	K24	3.86 a	6.59 b	13.94 b
茎蔓 Stem	K0	3.31 a	6.44 a	9.54 a
	K24	2.81 b	5.58 b	7.56 b

注 (Note): 同列数字后不同字母表示不同处理间差异达 5% 显著水平 Within a column, values followed by different letters are significantly different between treatments at the 0.05 probability level.

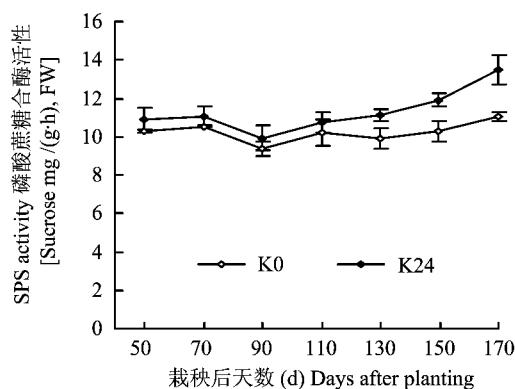


图4 功能叶磷酸蔗糖合成酶活性变化动态
Fig. 4 Dynamic changes of the sucrose phosphate synthase (SPS) activity in functional leaves in different growth periods

充足的蔗糖供应, 促进光合产物向库中运输^[15], 增加库中可溶性糖含量^[11-12]。另一方面, 畅通的“流”和高活力的“库”也为库中可溶性糖的积累奠定了基础。SS (分解方向) 的活性被认为是库强的重要标志之一^[32], 而细胞壁中的酸性转化酶能调节蔗糖从韧皮部卸出, 并且控制库对蔗糖的吸收速度^[29]。牛振明等^[12]的研究发现, 施用钾肥能提高葡萄果实中转化酶活性, 增强蔗糖降解的能力, 造成源库间递减的浓度梯度, 有利于蔗糖在源端的装载和库端的卸载。胡春梅^[13]的研究表明, 施钾能促进瓜尔豆光合产物由叶片向子粒中的转运, 增强“库”的活力, 促进“流”的畅通。本研究结果显示, 适量供钾能提高功能叶中 SPS 活性, 提高蔗糖含量, 这有利于增加源端光合产物的供应; 而茎中蔗糖含量降低, 表明蔗糖在库端的卸载流畅。同时适量供钾能提高生长前

期块根中 SS 活性及生长后期块根中不溶性酸性转化酶活性,说明提高了块根中蔗糖的卸载能力。综上,增加源端光合产物的供应、增强库端的卸载能力是适量施钾提高块根中可溶性糖含量的生理原因之一。

淀粉水解是可溶性糖积累的又一重要来源,作物贮藏器官中淀粉的分解主要是在 α -和 β -淀粉酶的作用下进行的,最终产物是葡萄糖, β -淀粉酶是甘薯块根淀粉分解的主要酶^[33]。本研究发现,适量供钾能显著提高甘薯块根的 α -和 β -淀粉酶活性。且适量供钾既能提高块根中 SS 活性,又可提高淀粉水解酶活性,因此,认为适量供钾处理在促进淀粉合成的同时,可促进淀粉分解,是其提高块根可溶性糖含量的又一原因。

本研究还发现,在甘薯生长后期,适量供钾处理的块根中蔗糖、果聚糖和葡萄糖含量的增幅较大,而果糖含量则在生长前期有较大增幅。适量供钾可以提高甘薯主要生长期块根中 SS 活性,且生长后期增幅小于生长前期,这可能是生长后期块根中蔗糖含量增幅较大的生理原因;适量供钾可显著提高生长后期块根中 SST 活性,为后期果聚糖含量大幅提高奠定基础;同时,适量供钾显著提高块根中淀粉酶的活性,且后期增幅较大,这有利于后期葡萄糖含量的大幅提高。果糖主要来自蔗糖的分解,包括两条途径,一是蔗糖合成酶的分解作用,二是可溶性酸性转化酶的水解作用^[11,34]。在葡萄上的研究表明,钾能提高果实中转化酶活性,促进蔗糖向果糖和葡萄糖转化^[12]。本研究发现,适量供钾能提高块根中 SS 和可溶性酸性转化酶活性,且生长前期增幅较大,这可能是造成前期果糖含量增幅较大的原因。

4 结论

1) 适量供钾可显著提高块根产量和可溶性糖含量,增幅分别为 14.23% 和 13.52%。适量供钾提高块根可溶性糖含量主要是通过增加源端光合产物供应和增强库端光合产物的卸载能力、以及促进淀粉分解两条途径实现的。

2) 收获期,适量供钾处理块根中可溶性糖各组分含量均有显著提高。其中,果聚糖和葡萄糖含量的提高是通过提高块根中蔗糖-蔗糖果糖基转移酶(SST)和淀粉酶活性实现的,主要作用时期为生长后期;果糖含量的提高是通过提高块根中蔗糖酶(SS)和可溶性酸性转化酶活性实现的,主要作用时

期为生长前期;而蔗糖含量的提高与 SS 活性变化有关,生长后期有利于蔗糖积累。

参考文献:

- [1] 江阳,孙成均. 甘薯的营养成分及其保健功效研究进展[J]. 中国农业科技导报, 2010, 12(4): 56-61.
Jiang Y, Sun C J. Advances in studies on nutritious components of sweet potato and their health-promoting functions[J]. J. Agric. Sci. Technol., 2010, 12(4): 56-61.
- [2] 赵秀玲. 甘薯的营养成分与保健作用[J]. 中国食物与营养, 2008, (10): 58-60.
Zhao X L. Nutritional value and health benefits of sweetpotato [J]. Food Nutr. China, 2008, (10): 58-60.
- [3] 张立明,王庆美,王荫墀. 甘薯的主要营养成分和保健作用[J]. 杂粮作物, 2003, 23(7): 162-166.
Zhang L M, Wang Q M, Wang Y C. The main nutrient components and health care function of sweetpotato[J]. Rain Fed Crops, 2003, 23(7): 162-166.
- [4] 陆国权,黄华宏,何腾弟. 甘薯维生素 C 和胡萝卜素含量的基因型、环境及基因型与环境互作效应的分析[J]. 中国农业科学, 2002, 35(5): 482-486.
Lu G Q, Huang H H, He T D. Genotype and environmental effects on vitamin C and carotene contents in sweetpotato[J]. Sci. Agric. Sin., 2002, 35(5): 482-486.
- [5] 史春余,王振林,郭风法,等. 甘薯块根膨大过程中 ATP 酶活性、ATP 和 ABA 含量的变化[J]. 西北植物学报, 2002, 22(2): 315-320.
Shi C Y, Wang Z L, Guo F F et al. Changes of ATPase activity, ATP and ABA content in storage roots during storage root thickening of sweetpotato [J]. Acta Bot. Bor.-Occid. Sin., 2002, 22(2): 315-320.
- [6] 林汝湘,谢春生,冯祖虾,等. 我国南方甘薯品种资源部分营养成分分析研究[J]. 中国农业科学, 1995, 28(4): 39-45.
Lin R X, Xie C S, Feng Z X et al. A study on several nutritional compositions of sweetpotato germplasm in south China[J]. Sci. Agric. Sin., 1995, 28(4): 39-45.
- [7] 李良,廖嘉信,赖昭蓉. 甘薯食用品质特性与理化性质间之关系[J]. 中华农学会报, 1991, 156: 83-94.
Li L, Liao J X, Lai Z R. Relationship between eating quality components and physico-chemical properties in sweetpotato[J]. J. Chin. Agron. Assoc., 1991, 156: 83-94.
- [8] 赵平,林克惠. 钾肥对农作物品质的影响[J]. 云南农业大学学报, 2001, 16(1): 56-59.
Zhao P, Lin K H. Effect of potassium fertilizer on quality of crops [J]. J. Yunnan Agric. Univ., 2001, 16(1): 56-59.
- [9] 姚海兰,史春余,王汝娟. 腐植酸钾对食用甘薯块根品质的调控效应[J]. 腐植酸, 2009, (1): 24-27.
Yao H L, Shi C Y, Wang R J. Effects of potassium humate on storage root quality of edible sweetpotato[J]. Humic Acid, 2009, (1): 24-27.

- [10] 史春余,王振林,赵秉强,等. 钾营养对甘薯某些生理特性和产量形成的影响[J]. 植物营养与肥科学报, 2002, 8(1): 81-85.
Shi C Y, Wang Z Z, Zhao B Q *et al.* Effect of potassium nutrition on some physiological characteristics and yield formation of sweet potato[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2002, 8(1): 81-85.
- [11] 马全民,饶立华,陆定志. 钾调节茎用芥菜同化物运输及茎部膨大的作用机理[J]. 园艺学报, 1992, 19(4): 347-352.
Ma Q M, Rao L H, Lu D Z. Studies on mechanism of the action of potassium on the assimilate transport and stem expand of stem mustard (*Brassica juncea* cass *ver tumidatsent* L.) [J]. Acta Hortic. Sin., 1992, 19(4): 347-352.
- [12] 牛振明. 磷、钾运输途径及其对葡萄品质的影响[D]. 北京: 中国农业大学硕士学位论文, 2004. 14-15.
Niu Z M. Transportation pathway of potassium or phosphorous and their effect on grape fruit quality[D]. Beijing: Ms thesis, China Agricultural University, 2004. 14-15.
- [13] 胡春梅. 瓜尔豆半乳甘露聚糖和产量形成的生理基础及氮、钾影响的研究[D]. 山东泰安: 山东农业大学博士论文, 2003. 41-45.
Hu C M. Physiological bases of galactomannan accumulation and seed yield forming of Guar (*Cyamopsis tetragonoloba* L.) and effect of nitrogen and potassium[D]. Tai'an Shandong: PhD dissertation, Shandong Agricultural University, 2003. 41-45.
- [14] 唐忠厚,李洪民,张爱君,等. 施钾对甘薯常规品质性状及其淀粉 RVA 特性的影响[J]. 浙江农业学报, 2011, 23(1): 46-51.
Tang Z H, Li H M, Zhang A J *et al.* Effect of potassium fertilizer application on main quality traits and starch RVA characters of sweetpotato[J]. Acta Agric. Zhejiangensis, 2011, 23(1): 46-51.
- [15] 胡春梅,王秀峰,季俊杰. 钾对瓜尔豆光合及胚乳中糖类含量的影响[J]. 植物营养与肥科学报, 2006, 12(6): 858-863.
Hu C M, Wang X F, Ji J J. Effects of potassium on photosynthesis and endospermous carbohydrates contents of Guar [*Cyamopsis Tetragonoloba* (L.) Taub.] [J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2006, 12(6): 858-863.
- [16] 王旭东,于振文,王东. 钾对小麦旗叶蔗糖和籽粒淀粉积累的影响[J]. 植物生态学报, 2003, 27(2): 196-201.
Wang X D, Yu Z W, Wang D. Effect of potassium on sucrose content of flag leaves and starch accumulation of kernels in wheat [J]. Acta Phytoecol. Sin., 2003, 27(2): 196-201.
- [17] 陈敏志,陶勤南,陈云香. 关于西瓜氮磷钾矿质营养生理特性的研究[J]. 园艺学报, 1991, 18(3): 227-232.
Chen M Z, Tao Q N, Chen Y X. Studies on the physiological properties of nitrogen phosphorus and potassium in watermelon plants[J]. Acta Hortic. Sin., 1991, 18(3): 227-232.
- [18] Douglas C D, Tsung M K, Frederick C F. Enzymes of sucrose and hexose metabolism in development kernels of two inbreds of maize[J]. Plant Physiol., 1988, 86: 1013-1019.
- [19] Tsai M, Ou L, Tim L S. Effect of increased temperature in apical regions of Maize Ears on starch-synthesis enzymes and accumulation of sugars and starch [J]. Plant Physiol., 1985, 79: 852-855.
- [20] 於新建. 植物生理学实验手册[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1985. 148-149.
Yu X J. Experimental manual of plant physiology[M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Publication, 1985. 148-149.
- [21] Hubbard N L, Huber S C, Pharr D M. Sucrose phosphate synthase and acid invertase as determinants of sucrose concentration in developing muskmelon (*Cucumismelo* L.) fruits [J]. Plant Physiol., 1989, 91: 1527-1534.
- [22] Cairn A J, Winters A, Pollock C J. Fructan biosynthesis in excised leaves of *Lolium temulenrum* L. III. A comparison of the *in vitro* properties of frucosyl transferase activities with the characteristics of *in vivo* fructan accumulation[J]. New Phytol., 1989, 112: 343-352.
- [23] Housley T L, Daughtry C S T. Fructan content and synthesis in leaf tissues of *Festuca arundinacea* L. [J]. Plant Physiol., 1987, 83: 4-7.
- [24] 张振清. 植物生理学实验手册[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1985. 134-138.
Zhang Z Q. Handbook of plant physiology experiments[M]. Shanghai: Shanghai Scientific and Technological Publication, 1985. 134-138.
- [25] Lowell C A, Tomlinson P T, Koch K E. Sucrose-metabolizing enzymes in transport tissue and adjacent sink structures in developing citrus fruit [J]. Plant Physiol., 1989, 90: 1394-1402.
- [26] Hubbard N L, Pharr D M, Huber S C. Sucrose phosphate synthase and other sucrose metabolizing enzymes in fruits of various species[J]. Plant Physiol., 1991, 82: 191-196.
- [27] 郝建军,刘延吉. 植物生理学试验技术[M]. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 2001. 138.
Hao J J, Liu Y J. Plant physiology experiment[M]. Shenyang: Liaoning Scientific and Technological Publication, 2001. 138.
- [28] 王永章,王小芳,张大鹏. 苹果果实转化酶的种类和特性研究[J]. 中国农业大学学报, 2001, 6(5): 9-14.
Wang Y Z, Wang X F, Zhang D P. Study of invertase in apple fruit[J]. J. China Agric. Univ., 2001, 6(5): 9-14.
- [29] Bachelier C, Graham J, Machray G *et al.* Integration of an invertase gene to control sucrose metabolism in strawberry cultivars[J]. Acta Hortic., 1997, 439: 161-164.
- [30] Pollock C J, Lloyd E J, Stoddard J L. Growth, photosynthesis and assimilate partitioning in *lolium temulentum* exposed to chilling temperature[J]. Plant Physiol., 1983, 59: 257-262.
- [31] Pontis H G, del Campillo E. Fructans[A]. Dey P M, Dixon R

- A. Biochemistry of storage carbohydrates in green plants [C]. London: Academic Press, 1985. 205-227.
- [32] Wang F, Sanz A, Brenner M L, Smith A. Sucrose synthase, starch accumulation, and tomato fruit sink strength [J]. *Plant Physiol.* 1993, 101: 321-327.
- [33] 谢逸萍, 李洪民, 王欣. 贮藏期甘薯块根淀粉酶活性变化趋势[J]. *江苏农业学报*, 2008, 24(4): 406-409.
- Xie Y P, Li H M, Wang X. Changes of amylase activities in sweetpotato roots during storage[J]. *Jiangsu Agric. Sci.*, 2008, 24(4): 406-409.
- [34] 韩启厚. 不同生育期施钾肥对温室番茄蔗糖代谢的调控[D]. 北京: 中国农业科学院硕士学位论文, 2009. 26-27.
- Han Q H. Regulation effects of potash applied at different growth phases on sucrose metabolism of Tomato in greenhouse [D]. Beijing: Ms thesis, Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2009. 26-27.