

李元元,李洪民,唐忠厚,等.甘薯钾素营养及其生理机制研究进展[J].江苏农业科学,2014,42(4):13-15.

# 甘薯钾素营养及其生理机制研究进展

李元元,李洪民,唐忠厚,唐君,张安,曹清河

(中国农业科学院甘薯研究所/江苏徐淮地区徐州农业科学研究所,江苏徐州 221121)

**摘要:**甘薯是重要的粮食、饲料和工业加工原料,钾是甘薯中含量最丰富的矿质元素,而甘薯也是对钾肥需求最多的作物之一。综述了甘薯的钾素营养及生理机制,探讨了甘薯的钾肥效应、钾与甘薯的生理代谢和抗逆性的关系,以及钾素营养的生理机制等,以期甘薯的钾高效品质育种和原料加工提供借鉴。

**关键词:**甘薯;钾;碳氮代谢;抗逆性

**中图分类号:** S531.01 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2014)04-0013-03

甘薯富含淀粉、糖类物质<sup>[1]</sup>、矿物质<sup>[2]</sup>、生物活性物质<sup>[3-5]</sup>,钾是甘薯中最丰富的矿质元素<sup>[5]</sup>,而甘薯也是对钾肥需求最多的作物之一<sup>[6-7]</sup>。钾能促进植物体内的多种代谢反应,能增强植物的光合作用和抗逆性,被称为“品质元素”。由于我国大部分耕地土壤严重缺钾,同时我国的钾矿资源极度匮乏,因此作物钾素营养不良和施钾量低已经成为限制我国作物稳产、增产和品质提升的重要因素<sup>[8]</sup>。目前已经在水稻、小麦、玉米等重要粮食作物上开展了许多作物钾素营养生理与钾高效品质育种的研究<sup>[9-12]</sup>。甘薯作为重要的粮食、饲料和工业加工原料<sup>[13]</sup>,研究矿质元素钾与其生长发育和生理

代谢的关系,对于开展钾高效品质育种、增强甘薯的耐瘠能力、增加甘薯产量、提高其工业可加工性意义重大。本文综述了甘薯钾素营养与生理机制的研究成果,以期甘薯合理施肥和功能性品种选育提供一定的理论依据和借鉴。

## 1 甘薯的钾肥效应

施用钾肥是水稻<sup>[14]</sup>、玉米<sup>[15]</sup>、小麦<sup>[16]</sup>、大豆<sup>[17]</sup>等作物提高产量、改良品质的重要农艺栽培技术措施之一。Robbins等最早在甘薯中发现钾肥的增产效应显著<sup>[18]</sup>。甘薯作为喜钾作物,施用钾肥能明显促进薯块膨大,从而提高薯块重量<sup>[6,19]</sup>;在长期不施钾肥的条件下,薯块膨大期延迟,日增重减少,鲜薯产量下降;与施钾处理相比,虽然不施钾处理可以提高薯块的干物质含量,但是单位面积干物质产量却明显下降<sup>[20]</sup>;同时增施钾肥可以提高甘薯的干物质在块根中的分配比例,可以有效抑制地上部的茎叶徒长,提高块根产量<sup>[21]</sup>。研究表明,K<sub>2</sub>O用量在75~300 kg/hm<sup>2</sup>范围时,鲜薯产量和薯藤生物量会随施钾量的提高而增加,其中鲜薯产量的提高幅度大于薯藤<sup>[19]</sup>。基施或封垄期追施钾肥有利于甘薯基部茎节的发育和分枝,并且可以提高单薯质量和大薯比例,从而

收稿日期:2013-08-21

基金项目:国家甘薯产业技术体系(编号:CARS-11-B-02);农业部“948”计划子课题(编号:2011-G1-20);国家“863”计划子课题(编号:2012AA101204)。

作者简介:李元元(1984—),女,江苏沛县人,硕士,助理研究员,研究方向为甘薯科研与试验管理。Tel:(0516)82189210;E-mail:lyy\_0822@163.com。

通信作者:曹清河,博士,副研究员,研究方向为甘薯细胞遗传学与选用甘薯新品种的选育。E-mail:cqhe75@yahoo.com。

[68]李灿,李子忠.不同温度下药材甲对二氧化碳的敏感差异[J].农药,2006,45(11):748-750.

[69]李灿,李子忠,周波,等.高浓度二氧化碳对药材甲和烟草甲乙酰胆碱酯酶活性的影响[J].植物保护学报,2007,34(6):242-246.

[70]李灿,李子忠,郑兴旺,等.高浓度CO<sub>2</sub>气调胁迫对药材甲老熟幼虫磷酸酯酶活力的影响[J].植物保护,2008,34(1):123-126.

[71]李灿,李子忠,曹宇,等.高浓度CO<sub>2</sub>气调对药材甲羧酸酯酶活性的影响[J].西南师范大学学报:自然科学版,2009,34(1):89-92.

[72]Li C, Li Z Z, Cao Y, et al. Partial characterization of stress-induced carboxylesterase from adults of *Stegobium paniceum* and *Lasioderma serricorne* (Coleoptera: Anobiidae) subjected to CO<sub>2</sub>-enriched atmosphere[J]. J Pest Sci, 2009, 82(1): 7-11.

[73]李灿,李子忠,曹宇,等.药材甲与烟草甲羧酸酯酶和磷酸酯酶毒理学特性比较[J].植物保护学报,2013,40(1):78-82.

[74]李灿,徐琦,王世贵,等.2010.烟草甲乙酰胆碱酯酶基因的克隆与序列分析[J].植物保护学报,2010,37(5):475-476.

[75]王进军,赵志模.嗜卷书虱气调抗性形成过程中能源物质的积累与利用[J].中国昆虫科学:英文版,2002,9(4):41-46.

[76]程伟霞,王进军,陈志永.杀虫剂胁迫下嗜卷书虱和嗜书虱能源物质的代谢比较[J].动物学研究,2005,26(5):545-550.

[77]肖英方,毛润乾,万方浩.害虫生物防治新概念——生物防治植物及创新研究[J].中国生物防治学报,2013,29(1):1-10

[78]Wang J J, Zhao Z M, Li L S. Induced tolerance of the psocid, *Liposcelis bostrychophila* Badonnel (Psocoptera: Liposcelididae) to conditioned atmosphere[J]. Int J Pest Manag, 1999, 45(1): 75-79.

[79]Wang J J, Zhao Z M, Tsai J H. Resistance and some enzyme activities in *Liposcelis bostrychophila* Badonnel (Psocoptera: poscelididae) in relation to carbon dioxide enriched atmospheres[J]. J Stored Prod Res, 2000, 36: 297-308.

[80]李雪娇,何军,冯俊涛,等.西北地区106种植物杀虫活性的筛选[J].西北农林科技大学学报:自然科学版,2012,40(11):112-118.

[81]贾明慧,张辉,张爱华,等.植物次生代谢产物在国内农药开发方面的研究进展[J].中国植保导刊,2013,32(3):15-27.

显著提高块根产量,其中全部钾肥基施的增产效果相对最高,为 11.93%<sup>[22]</sup>。甘薯对氮素的吸收主要集中在甘薯生长的中前期,对磷钾的吸收主要在甘薯生长的中后期,即块根膨大期吸收较多<sup>[6,23]</sup>,因此钾主要积累在块根中<sup>[24]</sup>,块根中的钾含量极显著高于藤蔓<sup>[25]</sup>。不同的钾肥施用量对甘薯产量和品质的改善会有不同效果,施用氯化钾和硫酸钾均能提高甘薯产量和淀粉产量,但是甘薯产量表现为氯化钾处理高于硫酸钾处理,淀粉含量则相反<sup>[19]</sup>。合理把握钾肥的施用时期和施用量,可以有效发挥钾肥的增产效果,同时可以调控薯块中糖和淀粉的含量,进而满足工业加工或鲜食要求。

## 2 钾与甘薯的碳氮代谢

作物的生物产量取决于光合作用积累的干物质,经济产量取决于光合同化物的运输和分配,钾不但影响作物的光合作用,而且能促进光合同化物的输送<sup>[26]</sup>。甘薯施用钾肥能促进光合产物向地下运输,提高干物质在块根中的分配率,进而提高块根中的淀粉含量<sup>[27]</sup>。与此同时,钾能提高甘薯的抗逆性和耐储藏性,对提高甘薯产量、工业加工性和留种保存均具有重要意义。

钾在淀粉合成过程中具有重要作用<sup>[28]</sup>。田间试验发现,供应适量的钾素可以提高可溶性碳水化合物在甘薯叶片中的装载量和在块根中的卸载,从而使更多的光合产物向块根运输<sup>[21,29]</sup>。在甘薯块根膨大期,适宜的供钾处理能显著提高功能叶中蔗糖磷酸合成酶的活性和蔗糖含量,同时可以提高块根中蔗糖合成酶、不溶性酸性转化酶的活性,进而促进淀粉和可溶性糖在块根中的积累<sup>[30]</sup>。钾与氮的交互作用能明显提高氮素的利用效率,因为硝酸还原酶是植物氮代谢的关键酶之一,适当增施钾肥能显著或极显著提高硝酸还原酶活性,从而提高氮素利用率。施用钾肥可以提高甘薯中的蛋白质含量,但是由于不同基因型甘薯对钾素的敏感程度不同(即喜钾性的差异),导致相同的钾肥用量对不同基因型甘薯蛋白含量的提高幅度存在差异<sup>[31]</sup>。施用钾肥能促进甘薯的糖代谢,但对甘薯淀粉糊化特性没有显著影响,说明改变淀粉品质的关键因素是基因型<sup>[32]</sup>。

当植物受到病原菌入侵后,钾素可以通过调节受感染组织糖代谢相关酶的活性并协调受感染部位糖代谢过程,从而增强植物的抗病能力<sup>[33]</sup>。酚类物质代谢与作物的抗病性相关,可抑制昆虫的取食,同时木质素是酚类物质的代谢产物之一,可阻止真菌中酶和毒素向寄主扩散,施钾有利于提高苯丙氨酸解氨酶(PAL)、多酚氧化酶(PPO)和过氧化物酶(POD)等酚类物质代谢过程关键酶的活性<sup>[34]</sup>。Kim 等从甘薯中克隆了一个木质素形成的关键酶基因 *IbCAD1*,它在甘薯的抗逆性和组织发育中发挥着重要作用<sup>[35]</sup>。甘薯贮藏过程中除了受贮藏温度、湿度、块根的呼吸代谢和酶活性变化等因素影响外,较高的甘薯钾素含量也能增强其耐贮藏性<sup>[36]</sup>。

## 3 甘薯钾素营养的生理机制

钾与植物的生长发育和生理代谢密切相关。在低(缺)钾胁迫条件下,植物根细胞首先接收到外在环境的钾胁迫信号,并将这种信号传递到胞质中,从而诱导  $\text{Ca}^{2+}$  和 ROS 途径,并调节下游基因的转录和翻译,最终影响植物的生理和形态

变化<sup>[37]</sup>,因此植物根形态的变化是植物适应钾胁迫的重要形态指标<sup>[38]</sup>。此外,钾能激活植物体内许多生理代谢相关酶的功能活性,其中包括许多参与植物碳代谢的酶,例如丙酮酸激酶、磷酸果糖激酶和淀粉合成酶等均需要钾离子的激活作用<sup>[39]</sup>。以淀粉合成酶的活性需要钾离子为例<sup>[40]</sup>,在含有小麦、大豆、豌豆、马铃薯等作物淀粉酶的反应液中加入钾离子便能显著激活酶活性<sup>[41]</sup>。

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,在蔗糖分解和淀粉合成中具有重要作用,其分解产物为尿苷二磷酸葡萄糖(UDPG)和果糖,适宜供钾处理,能显著提高块根中的 SS 活性,从而促进淀粉的合成及果糖的积累。转化酶可将蔗糖不可逆地裂解成葡萄糖和果糖,液泡中的转化酶主要是可溶性酸性转化酶,可以调节蔗糖和己糖的贮存,而细胞壁中的转化酶能调节蔗糖从韧皮部卸出,控制库对蔗糖的吸收速率。适宜的供钾处理能显著提高块根中的可溶性转化酶活性,同时可以提高生长后期不溶性酸性转化酶活性,从而促进蔗糖向块根转运。 $\alpha$ -淀粉酶和  $\beta$ -淀粉酶是块根中淀粉的主要分解酶,适宜的供钾处理能显著提高  $\alpha$ -淀粉酶和  $\beta$ -淀粉酶活性,从而促进淀粉水解。适宜的供钾处理能使各时期功能叶的磷酸蔗糖合成酶(PPS)活性比对照提高<sup>[30]</sup>;施钾处理能使甘薯块根薄壁细胞膜结构完整、清晰、内含较多的线粒体和质体,从而使得块根细胞的呼吸速率和 ATP 含量较高<sup>[21]</sup>。Tanaka 等在甘薯中过量表达甘薯 *SRF1* 基因发现,转基因甘薯的干物质含量和淀粉含量显著高于原始品种,而葡萄糖和果糖含量则显著减少。基因表达分析发现,编码胞质转移酶的基因表达活性降低,说明 *SRF1* 调节块根碳代谢过程是通过对胞质转移酶基因的负调控进行的<sup>[42]</sup>。因此认为钾是通过调节作物生理代谢途径和生长发育过程中重要酶的活性变化来发挥其钾素营养作用的<sup>[43]</sup>。

## 4 结论与讨论

淀粉和糖类物质是甘薯块根干物质积累的主要成分,其含量高低决定了甘薯的用途,也是划分食用甘薯、兼用甘薯和淀粉甘薯的主要依据。钾素对甘薯块根中糖类和淀粉的形成与转化具有重要的调节作用,也与甘薯的抗逆性和耐贮藏性相关。一般工业用途的甘薯品种要求淀粉含量高而糖分低,但食用甘薯,例如鲜食和果脯等加工用甘薯品种则要求糖分高而淀粉低<sup>[31]</sup>。在栽培过程中,土壤供钾水平较高的地区适宜种植淀粉型甘薯,在土壤供钾水平较低的地区适宜种植紫色甘薯和食用甘薯<sup>[23]</sup>,这与土壤钾素营养状况调控甘薯糖类物质代谢相关。植物钾素营养性状是可遗传控制的<sup>[8]</sup>,甘薯的许多性状也符合数量遗传规律<sup>[44]</sup>,不同甘薯基因型间存在钾素利用效率差异<sup>[45]</sup>和钾素遗传特性的多样性<sup>[31]</sup>。

目前国内外对主要农作物钾素营养性状的生理机制和重要钾相关基因功能进行了系统研究,并开展了相关钾高效品质育种工作,关于甘薯钾素营养性状的品质研究和遗传改良工作相对较少。我国的甘薯产业主要分布在一些缺钾严重的贫瘠山地和红黄壤地区,因此需要研究甘薯对钾素利用效率的基因型差异和甘薯钾素营养性状的功能基因,以筛选并培育耐低钾的甘薯新品种,特别是针对不同种植生态环境区、不同产品加工需要应开发优质的专用甘薯品种,如适合淀粉生

产的高淀粉型甘薯,适用食品加工的高糖型甘薯,适合鲜食的水果型甘薯等<sup>[46]</sup>,同时在不同类型专用品种选育和推广过程中应配套栽培调控技术措施,从而提高甘薯的产量和品质,进而提高种植效益,具有重要现实意义。

#### 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.
- [2] 夏春丽,于永利,张小燕. 甘薯的营养保健作用及开发利用[J]. 食品工程,2008(3):28-31.
- [3] 于 森,邬应龙. 甘薯抗性淀粉对高脂血症大鼠降脂肝作用研究[J]. 食品科学,2012,33(1):244-247.
- [4] 刘森泉,高秋萍,阮 红,等. 紫心甘薯多糖对四氯化碳肝损伤小鼠的保护作用[J]. 浙江大学学报:理学版,2010,37(5):572-576.
- [5] 胡 燕,李育明,李 强,等. 甘薯中 10 种元素含量分析[J]. 中国农业科技导报,2010,12(3):131-137.
- [6] 苏祥坦. 甘薯对氮磷钾的需求规律及施肥技术[J]. 福建农业科技,2010(3):69-70.
- [7] 冯元琦. 我国有关钾肥的统计数据汇集[J]. 化肥设计,2011,49(1):55,60.
- [8] 武维华. 植物响应低钾胁迫及钾营养高效的分子调控网络机制研究[J]. 中国基础科学,2007(2):18.
- [9] 刘国栋,刘更另. 籼型杂交稻耐低钾基因型的筛选[J]. 中国农业科学,2002,35(9):1044-1048.
- [10] 王晓磊,于海秋,依 兵,等. 耐低钾玉米自交系灌浆至成熟期生理特性研究[J]. 华北农学报,2011,26(4):167-173.
- [11] 刘翠霞,韩燕来,谭金芳. 不同品种小麦耐低钾特性研究[J]. 中国土壤与肥料,2008(4):30-32.
- [12] 权月伟,李喜焕,常文锁,等. 大豆耐低钾种质资源筛选研究[J]. 华北农学报,2011,26(S1):51-55.
- [13] 刘庆昌. 甘薯在我国粮食和能源安全中的重要作用[J]. 科技导报,2004(9):21-22.
- [14] 廖育林,郑圣先,鲁艳红,等. 长期施钾对红壤水稻土水稻产量及土壤钾素状况的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2009,15(6):1372-1379.
- [15] 谭德水,金继运,黄绍文,等. 长期施钾对玉米连作土壤-作物系统钾素特征的影响[J]. 土壤通报,2009,40(6):1376-1380.
- [16] 王立河,孙 斌,裴瑞杰,等. 不同土壤钾素对强筋小麦物质形成和品质关系的影响[J]. 土壤通报,2009,40(2):352-358.
- [17] 曾玲玲,张兴梅,朱洪德,等. 钾肥对大豆产量和土壤养分的影响[J]. 土壤通报,2009,40(6):1381-1384.
- [18] Robbins W R, Nightingale G T, Schermerhorn L G, et al. Potassium in relation to the shape of the sweet potato[J]. Science, 1929, 70(1823):558.
- [19] 鲁剑巍,陈 防,许幼生,等. 甘薯施用钾肥研究[J]. 湖北农业科学,1998(6):41-44.
- [20] 张爱君,李洪民,唐忠厚,等. 长期不施钾肥对甘薯产量的影响[J]. 安徽农业大学学报,2010,37(1):22-25.
- [21] 史春余,王振林,赵秉强,等. 钾营养对甘薯块根薄壁细胞微结构、<sup>14</sup>C 同化物分配和产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2002,8(3):335-339.
- [22] 姚海兰,张立明,史春余,等. 施钾时期对甘薯植株性状及产量的影响[J]. 西北农业学报,2010,19(4):82-85.
- [23] 宁运旺,张永春,朱绿丹,等. 甘薯的氮磷钾养分吸收及分配特性[J]. 江苏农业学报,2011,27(1):71-74.
- [24] 柳洪阁,张立明,史春余,等. 甘薯矿质元素吸收与分配特性研究[J]. 中国土壤与肥料,2011(2):71-75.
- [25] 吕长文,赵 勇,唐道彬,等. 不同类型甘薯品种氮、钾积累分配及其与产量性状的关系[J]. 植物营养与肥料学报,2012,18(2):475-482.
- [26] 宁运旺,曹炳阁,朱绿丹,等. 施钾水平对甘薯干物质积累与分配和钾效率的影响[J]. 江苏农业学报,2012,28(2):320-325.
- [27] 郑艳霞. 钾对甘薯同化物积累和分配的影响[J]. 土壤肥料,2004(4):14-16.
- [28] 唐忠厚,李洪民,张爱君,等. 长期定位施肥对甘薯块根产量及其主要品质的影响[J]. 浙江农业学报,2010,22(1):57-61.
- [29] 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]. 植物营养与肥料学报,2002,8(1):81-85.
- [30] 柳洪阁,史春余,张立明,等. 钾素对食用型甘薯糖代谢相关酶活性的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2012,18(3):724-732.
- [31] 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.
- [32] 陆国权,唐忠厚,黄华宏. 不同施钾水平甘薯直链淀粉含量和糊化特性的基因型差异[J]. 浙江农业学报,2005,17(5):280-283.
- [33] 李文娟,何 萍,金继运. 钾素对玉米茎腐病抗性反应中糖类物质代谢的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2011,17(1):55-61.
- [34] 王 千,依艳丽,张淑香. 不同钾肥对番茄幼苗酚类物质代谢作用的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2012,18(3):706-716.
- [35] Kim Y H, Bae J M, Huh G H. Transcriptional regulation of the cinnamyl alcohol dehydrogenase gene from sweet potato in response to plant developmental stage and environmental stress[J]. Plant Cell Reports, 2010, 29(7):779-791.
- [36] 闫加启. 钾肥在甘薯生长中的作用[J]. 北京农业,2003(6):26.
- [37] Wang Y, Wu W H. Potassium transport and signaling in higher plants[J]. Annual Review of Plant Biology, 2013, 64:451-476.
- [38] Kellermeier F, Chardon F, Amtmann A. Natural variation of Arabidopsis root architecture reveals complementing adaptive strategies to potassium starvation[J]. Plant Physiology, 2013, 161(3):1421-1432.
- [39] Marschner H. Mineral nutrition in higher plants[M]. London: Academic Press, 1995.
- [40] Murata T, Akazawa T. Enzymic mechanism of starch synthesis in sweet potato roots. I. Requirement of potassium ions for potassium ions for starch synthetase[J]. Archives of Biochemistry and Biophysics, 1968, 126(3):873-879.
- [41] Nitsos R E, Evans H J. Effects of univalent cations on the activity of particulate starch synthetase[J]. Plant Physiology, 1969, 44(9):1260-1266.
- [42] Tanaka M, Takahata Y, Nakayama H, et al. Altered carbohydrate metabolism in the storage roots of sweet potato plants overexpressing the *SRF1* gene, which encodes a Dof zinc finger transcription factor[J]. Planta, 2009, 230(4):737-746.
- [43] Maathuis F J. Physiological functions of mineral macronutrients[J]. Current Opinion in Plant Biology, 2009, 12(3):250-258.
- [44] 后 猛,李 强,马代夫,等. 甘薯主要经济性状的遗传倾向及其相关性分析[J]. 西北农业学报,2011,20(2):99-103.
- [45] 陆国权,丁守仁. 甘薯钾素利用效率的基因型差异研究[J]. 植物营养与肥料学报,2001,7(3):357-360.
- [46] 杜方岭,王文亮,王守经. 甘薯的营养价值及其开发利用研究[J]. 中国食物与营养,2008(9):27-28.