

黄静玮, 屈会娟, 沈学善, 等. 不同形态钾肥对川紫薯 2 号花青素合成及其关键酶活性的影响[J]. 江苏农业学报, 2020, 36(6): 1382-1388.  
doi:10.3969/j.issn.1000-4440.2020.06.005

## 不同形态钾肥对川紫薯 2 号花青素合成及其关键酶活性的影响

黄静玮<sup>1</sup>, 屈会娟<sup>2</sup>, 沈学善<sup>3</sup>, 李明<sup>2</sup>, 冯俊彦<sup>2</sup>, 谭文芳<sup>3</sup>

(1. 成都大学/农业农村部杂粮加工重点实验室, 四川 成都 610106; 2. 四川省农业科学院生物技术核技术研究所, 四川 成都 610066; 3. 四川省农业科学院作物研究所, 四川 成都 610066)

**摘要:** 为科学选用钾肥种类, 促进紫色甘薯生产提质增效, 研究不同形态钾肥对川紫薯 2 号花青素合成及其关键酶活性的影响, 以无钾肥处理与不施肥处理为对照, 设置  $K_2SO_4$ 、 $KCl$ 、 $KH_2PO_4$ 、 $K_2HPO_4$  4 种不同形态钾肥处理, 在移栽后不同阶段取样测定紫薯块根鲜质量、干质量、花青素含量、花青素积累量和花青素合成关键酶活性。结果发现,  $K_2SO_4$  处理对川紫薯 2 号鲜质量、花青素含量和积累量提升最为明显。经 4 种不同形态钾肥处理后, 块根花青素合成关键酶活性与无钾肥对照组和不施肥对照组相比, 大部分活性有所提升, 但其变化趋势有所差异。表明, 川紫薯 2 号对于不同形态钾肥表现出不同的敏感性, 选择适合的钾肥, 可有效提高其花青素含量, 增加经济价值。

**关键词:** 紫色甘薯; 钾肥形态; 花青素含量; 酶活性

**中图分类号:** S539 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2020)06-1382-07

## Effects of different forms of potassium on the anthocyanin synthesis and the key enzymes activities of Chuanzishu 2

HUANG Jing-wei<sup>1</sup>, QU Hui-juan<sup>2</sup>, SHEN Xue-shan<sup>3</sup>, LI Ming<sup>2</sup>, FENG Jun-yan<sup>2</sup>, TAN Wen-fang<sup>3</sup>

(1. Chengdu University/Key Laboratory of Coarse Cereal Processing, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Chengdu 610106, China; 2. Institute of Biotechnology and Nuclear Technology, Sichuan Academy of Agricultural Sciences, Chengdu 610066, China; 3. Crop Research Institute, Sichuan Academy of Agricultural Sciences, Chengdu 610066, China)

**Abstract:** In order to select the kinds of potassium fertilizer scientifically and improve the quality and efficiency of purple sweet potato, the effect of different forms of potash fertilizer on anthocyanin synthesis and key enzymes activities of Chuanzishu 2 were studied by using six treatments of  $K_2SO_4$ ,  $KCl$ ,  $KH_2PO_4$ ,  $K_2HPO_4$ , potassium-free control and fertilizer-free control. The fresh root weight, dry root weight, anthocyanin content, anthocyanin accumulation and the key enzyme activity of anthocyanin synthesis were measured at different growth stages after transplanting. The results showed that the fresh root weight, anthocyanin content and anthocyanin accumulation of Chuanzishu 2 were significantly improved by  $K_2SO_4$  treatment. Compared with the control group, the activities of the key enzymes in anthocyanin synthesis in root were improved by four different potash fertilizers, but the change trend was different. Chuanzishu 2 showed different sensitivities to different potash fertilizers. Choosing the suitable potash fertilizer can effectively improve the anthocyanin content of Chuanzishu 2 and increase economic value.

significantly improved by  $K_2SO_4$  treatment. Compared with the control group, the activities of the key enzymes in anthocyanin synthesis in root were improved by four different potash fertilizers, but the change trend was different. Chuanzishu 2 showed different sensitivities to different potash fertilizers. Choosing the suitable potash fertilizer can effectively improve the anthocyanin content of Chuanzishu 2 and increase economic value.

**Key words:** purple sweet potato; potassium forms; anthocyanin content; enzyme activity

收稿日期: 2020-08-05

基金项目: 四川省财政创新能力提升专项(2018GYSH-001、2016GYSH-027); 四川省人文社科重点研究基地马铃薯主粮化战略研究中心项目(MLS1804); “十三五”四川省农作物及畜禽育种攻关项目(2016NYZ0051); 四川薯类创新团队项目(sccxt-2020-09); 公益性行业(农业)科研专项(201503121)

作者简介: 黄静玮(1985-), 四川成都人, 女, 博士, 讲师, 从事薯类作物营养与健康研究。(E-mail) huangjingwei1003@sina.com

通讯作者: 屈会娟, (E-mail) qhjuan120@126.com

据联合国粮食及农业组织 (FAO) 统计, 中国 2017 年甘薯种植面积和总产量分别为  $3.37 \times 10^6 \text{ hm}^2$  和  $7.20 \times 10^7 \text{ t}$ , 在全世界占比分别为 38.66% 和 63.84%, 均位列世界首位<sup>[1]</sup>。在中国, 甘薯种植面积分别居于农作物和粮食作物种植面积的 第 10 位 和第 6 位, 对国家粮食安全有重要意义<sup>[2]</sup>。花青素具有抗氧化、抗突变、抗肿瘤等功能<sup>[3]</sup>, 紫色甘薯富含矢车菊素、芍药素等花青素, 且具有较好的光稳定性<sup>[4]</sup>。与蓝莓等富含花青素的浆果类水果相比, 紫色甘薯具有适应性强、耐贫瘠、种植成本低、产量高、适宜在丘陵山区种植等特点, 因此其市场发展空间和在脱贫攻坚中的应用前景十分广阔<sup>[5]</sup>。

甘薯是喜钾作物, 钾元素对其块根膨大和物质积累有重要作用, 也是体内苯丙氨酸解氨酶 (PAL) 等 60 余种酶的活化剂, 合理施钾是甘薯提质增产的重要措施<sup>[6]</sup>。陈晓光等<sup>[7]</sup>指出甘薯封垄期和块根膨大期对钾肥的利用率与块根产量呈正相关; 齐鹤鹏等<sup>[8]</sup>指出钾肥施用有利于增加单株结薯数量, 不同品种甘薯产量随施钾量上升而提高, 而不同品种因其基因型差异对钾肥施用时期和施用量的敏感性有所差异; 宁运旺等<sup>[9]</sup>指出钾肥施用能提高苏薯 16 号单株结薯数和薯质量, 从而增加单季及周年产量; 尹子娟等<sup>[10]</sup>指出适量施钾可提高甘薯产量及蛋白质、淀粉等营养物质含量, 但施钾过量对产量和品质的提升效果有所下降。因此, 合理施钾是提高甘薯产量和品质的关键技术。

钾元素可促进花色苷前体物质酚类化合物向类黄酮转换<sup>[11]</sup>以及腺嘌呤核苷三磷酸的合成<sup>[12]</sup>, 在花青素合成代谢过程中具有重要作用。研究结果表明, 合理施用钾肥有助于提高紫色马铃薯<sup>[13]</sup>、棕红色稻米<sup>[14]</sup>、苹果<sup>[15]</sup>、凤梨<sup>[16]</sup>、冬枣<sup>[17]</sup>、无花果<sup>[18]</sup>等作物中花青素含量, 但当钾肥施用量过高时, 则可能抑制果实中花青素的积累<sup>[15]</sup>。研究发现氯化钾可提高万紫薯 56 号花青素含量<sup>[19]</sup>; 速效钾可提高紫罗兰、济黑 1 号等 6 个不同品种紫色甘薯块根中花青素含量, 但不同品种对钾肥的敏感性有所差异<sup>[20]</sup>。本课题组前期对绵紫薯 9 号、南紫薯 008 的研究结果表明, 钾肥合理施用可提高紫色甘薯产量和花青素含量, 有效降低生产成本, 提高经济效益<sup>[21-22]</sup>。然而, 目前针对不同形态钾肥对紫色甘薯花青素含量影响的相关研究较少, 其作用机理尚不明确。本研究以川紫薯 2 号为材料, 设置不同钾肥

形态处理, 研究不同阴离子相伴钾素对紫色甘薯产量、块根花青素含量、花青素积累量和花青素合成关键酶活性的影响, 明确不同形态钾肥对紫色甘薯花青素合成的影响, 为科学选用钾肥、紫色甘薯提质增产提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

供试材料采用川紫薯 2 号, 该品种由四川省农业科学院作物研究所选育, 2015 年通过四川省农作物品种审定委员会审定 (川审薯 2015005)。该品种为紫肉食用型、中熟品种, 鲜薯的花青素平均含量为  $0.1918 \text{ mg/g}$ 。

### 1.2 试验设计

试验于 2017 年 3-11 月在四川省农业科学院金堂县竹篙镇凤凰村试验基地进行, 试验地为黄红紫泥土, 土壤有机质含量  $9.87 \text{ g/kg}$ , 全氮含量  $0.75 \text{ g/kg}$ , 碱解氮含量  $67.0 \text{ mg/kg}$ , 速效磷含量  $7.7 \text{ mg/kg}$ , 速效钾含量  $98.0 \text{ mg/kg}$ , pH 为 8.52。试验共设 6 个处理 (1) 施用  $\text{K}_2\text{SO}_4$ ; (2) 施用  $\text{KCl}$ ; (3) 施用  $\text{KH}_2\text{PO}_4$ ; (4) 施用  $\text{K}_2\text{HPO}_4$ ; (5) 无钾肥对照; (6) 不施肥对照。处理 (1) ~ (4) 肥料用量为  $\text{N } 60 \text{ kg/hm}^2$ 、 $\text{P}_2\text{O}_5 \text{ } 60 \text{ kg/hm}^2$ 、 $\text{K}_2\text{O } 90 \text{ kg/hm}^2$ , 处理 (5)  $\text{N } 60 \text{ kg/hm}^2$ 、 $\text{P}_2\text{O}_5 \text{ } 60 \text{ kg/hm}^2$ 、 $\text{K}_2\text{O } 0 \text{ kg/hm}^2$ 。氮肥、磷肥基施, 钾肥基肥追肥比 1 : 1 (质量比, 基施时期为移栽成活后 7 d, 追施时期为薯块膨大期)。研究采用盆栽试验, 盆栽土壤取自试验田耕作层, 土壤自然风干后过筛, 每盆装土  $10 \text{ kg}$ , 移栽前与肥料充分混匀。每盆移栽 1 株薯苗, 每个处理 36 盆, 合计 216 盆。试验于 3 月上旬育苗, 6 月 15 日移栽, 11 月 8 日收获。

### 1.3 检测指标

1.3.1 取样时期及标准 块根膨大期开始, 于移栽后第 50 d、70 d、90 d、110 d、130 d 和 145 d 取样, 每个处理分别取长势一致的单株 6 株, 挖取块根, 用自来水充分洗净, 自然晾干后备用待测。

1.3.2 块根干物质积累测量 每次取样后, 分别测量川紫薯 2 号块根鲜质量, 测量后切成  $1 \text{ cm}^3$  薯丁, 充分混匀后随机取样 3 份,  $40^\circ\text{C}$  烘 72 h 至块根恒质量, 计算烘干率 (烘干率 = 块根干质量 / 块根鲜质量) 和干物质质量。将块根样品磨粉, 过 90 目筛网后  $-20^\circ\text{C}$  保存备用, 以检测紫色甘薯块根中花青素含量。

**1.3.3 花青素含量及花青素生物合成关键酶活性检测** 采用柠檬酸-磷酸氢二钠缓冲液(pH为3)提取法对方法1.3.2冻存的样品进行花色苷提取,用紫外分光光度法检测川紫薯2号块根中花青素含量<sup>[23-24]</sup>。分别称取鲜薯块根样品1.0 g,在低温下磨成粉末状,加入9 ml PBS(0.01 mol/L)溶液,轻柔摇匀至粉末完全溶解,定容至10 ml,4℃离心15 min(4 000 r/min),收集上清液,即为酶提取液。采用酶联免疫法<sup>[25]</sup>分别检测川紫薯2号块根中苯丙氨酸解氨酶(PAL)、查尔酮异构酶(CHI)、二氢类黄酮还原酶(DFR)和类黄酮糖基转移酶(UFGT)4种花青素合成关键酶活性。

#### 1.4 数据处理

采用Origin 9及SPSS 19对试验数据进行整理和分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 钾肥形态对川紫薯2号块根鲜质量和干质量的影响

川紫薯2号块根鲜质量和干质量均随生育期推

进而增加,但不同钾肥形态处理组的增质量速率和最终增质量有所差异(图1)。在块根膨大期和收获期,4个钾肥处理组块根鲜质量及干质量均高于无钾肥对照组和不施肥对照组。川紫薯2号在不同生育时期,对不同形态钾肥敏感性存在差异,在移栽后50~110 d川紫薯2号对 $K_2SO_4$ 、KCl和 $KH_2PO_4$ 更为敏感,在移栽后110 d, $K_2SO_4$ 、KCl和 $KH_2PO_4$ 处理组块根鲜质量和干质量较无钾肥对照组显著提高,鲜质量较无钾肥对照组分别提高10.47%、14.45%和10.58%,干质量较无钾肥对照组分别提高14.83%、14.92%和10.37%。而在移栽后110~145 d川紫薯2号对 $K_2SO_4$ 、KCl和 $K_2HPO_4$ 更为敏感,在收获期, $K_2SO_4$ 、KCl、 $KH_2PO_4$ 和 $K_2HPO_4$ 处理组块根鲜质量和干质量较无钾肥对照组和不施肥对照组均显著提高,块根鲜质量较无钾肥对照组提高25.11%、24.62%、12.13%和23.24%,干质量较无钾肥对照组提高20.77%、14.36%、10.39%和22.35%,其中 $K_2SO_4$ 、KCl和 $K_2HPO_4$ 处理组块根鲜质量和干质量提升较 $KH_2PO_4$ 处理组更为显著,且以 $K_2SO_4$ 处理组提高最为显著。

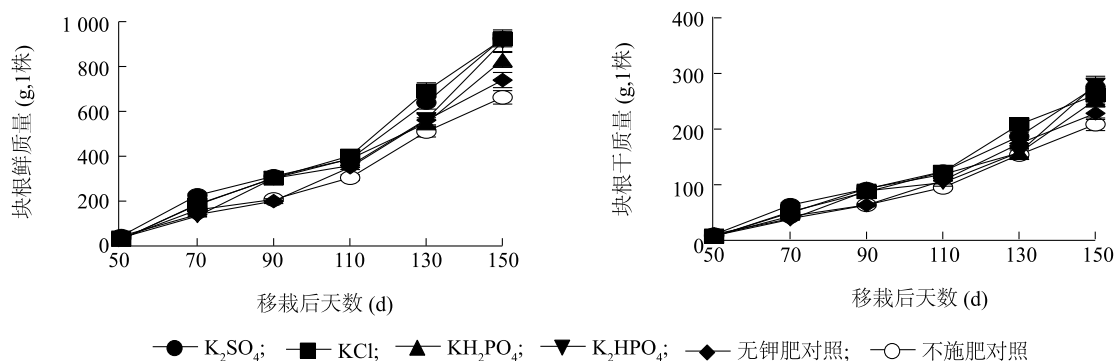


图1 钾肥形态对块根鲜质量和干质量的影响

Fig.1 Effects of potassium forms on the fresh and dry weight of root

### 2.2 钾肥形态对川紫薯2号块根花青素含量和积累量的影响

川紫薯2号块根花青素含量随生育期推进先下降后升高,4个钾肥处理组及不施肥对照组的花青素含量在移栽后90 d降至最低点而后升高,而无钾肥对照组花青素含量则在移栽后110 d降至最低点而后升高(图2a)。 $K_2SO_4$ 和 $KH_2PO_4$ 处理组块根花青素含量在收获期达到峰值,而KCl处理组块根花青素含量则在移栽后130 d达到峰值后略有下降。收获期, $K_2SO_4$ 、KCl、 $KH_2PO_4$ 处理组块根花青素含

量较无钾肥对照组增高, $K_2SO_4$ 处理组块根花青素含量最高,分别较无钾肥对照组和不施肥对照组升高13.83%和19.15%, $K_2SO_4$ 处理组块根花青素与无钾肥对照组相比无显著差异,与不施肥对照组相比有显著差异。

块根花青素积累量随生育期推进而增加,移栽后50~90 d花青素积累量增长平缓,移栽后90~145 d快速增加(图2b)。收获期以 $K_2SO_4$ 处理积累量升高最明显,较无钾肥对照组升高37.41%,而KCl、 $KH_2PO_4$ 和 $K_2HPO_4$ 处理组块根花青素积累量较无钾

肥对照组分别升高 19.98%、14.69% 和 22.32%, 4 种钾肥处理组块根花青素积累量与无钾肥对照组相

比均差异显著。

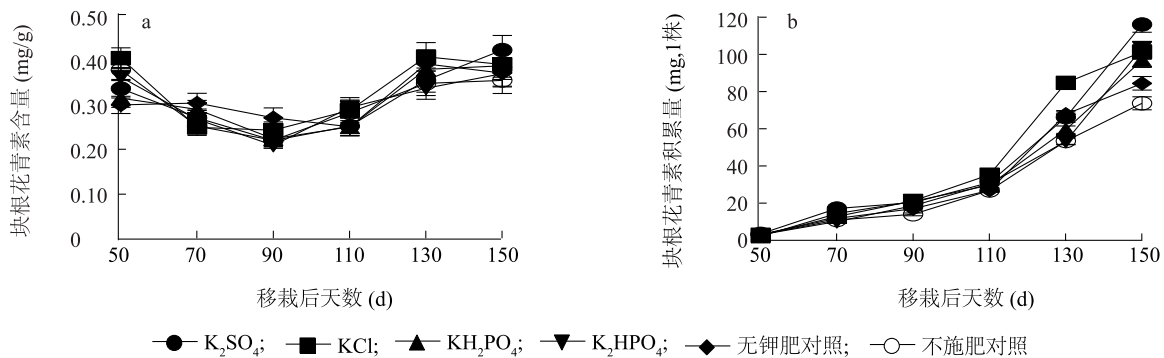


图2 钾肥形态对块根花青素含量和积累量的影响

Fig.2 Effects of potassium forms on the anthocyanin content and accumulation of root

### 2.3 钾肥形态对川紫薯2号块根花青素合成关键酶活性的影响

川紫薯2号块根 *PAL* 活性变化趋势差异较大,  $K_2SO_4$  处理组酶活性变化为先升高再降低, KCl、 $KH_2PO_4$ 、 $K_2HPO_4$  处理组和无钾肥对照组呈现升高-降低-再升高-再降低的“双峰”曲线, 而不施肥对照组 *PAL* 活性变化则为降低-升高-再降低(图 3a)。施用 KCl、 $KH_2PO_4$  和  $K_2HPO_4$  处理组以及无钾肥对照组, *PAL* 活性 2 次峰值分别出现在移栽后 70 d 和 110 d, 以  $KH_2PO_4$  处理组酶活性最高, 无钾肥对照组酶活性最低。而使用  $K_2SO_4$  处理, 酶活性在块根膨大期呈上升趋势, 于移栽后 110 d 达到峰值, 而后酶活性降低。各钾肥处理组和对照组, *PAL* 活性均以移栽后 110 d 最高,  $KH_2PO_4$  处理组峰值增高最为明显, 分别较无钾肥对照组和不施肥对照组提升 22.89% 和 23.83%, 而  $K_2SO_4$ 、KCl 和  $KH_2PO_4$  处理组则较无钾肥对照组分别提升 6.66%、11.78% 和 2.34%, 较不施肥对照组分别提升 7.47%、12.63% 和 3.13%。与结果 2.2 比较发现, 在花青素快速积累期(移栽后 90~130 d),  $K_2SO_4$ 、KCl、 $KH_2PO_4$  和  $K_2HPO_4$  处理组 *PAL* 平均活性分别较无钾肥对照组增加 7.06%、3.51%、11.11% 和 3.47%, 酶活性增加较移栽后 50~90 d 更为明显。

不同钾肥处理组块根 *CHI* 活性随生育期整体表现为上升趋势,  $K_2SO_4$  处理组、无钾肥对照组和不施肥对照组的块根 *CHI* 酶活性峰值为移栽后 130 d, 而 KCl、 $KH_2PO_4$ 、 $K_2HPO_4$  处理组的块根 *CHI* 活性峰值为移栽后 110 d(图 3b)。不同钾肥处理后, 以

KCl 处理组块根 *CHI* 平均活性最高, 较无钾肥对照组提升 11.61%, 而  $K_2SO_4$  处理组 *CHI* 平均活性较无钾肥对照组提升 0.21%。与结果 2.2 比较发现, 在花青素积累增长较快期(移栽后 90 d 开始),  $K_2SO_4$  和 KCl 处理组 *CHI* 平均活性则较无钾肥对照组有所增加, 分别增加 0.82% 和 9.81%。

川紫薯2号块根 *DFR* 活性在块根膨大期变化较大,  $K_2SO_4$  和  $KH_2PO_4$  处理组块根 *DFR* 活性变化趋势相似, 在移栽后 70 d *DFR* 活性最高, 而后下降, KCl、 $K_2HPO_4$  处理组及不施肥对照组, 块根 *DFR* 活性随生育期推进先降低后升高, 以移栽后 50 d 最高, 移栽后 110 d 最低, 而无钾肥对照组块根 *DFR* 活性随时间推移下降(图 3c)。块根膨大期, KCl 和  $KH_2PO_4$  处理组块根 *DFR* 平均活性较高, 较无钾肥对照组增高 14.90% 和 13.38%, 较不施肥对照组增高 20.21% 和 18.62%。与结果 2.2 比较发现, 在花青素积累较快期(移栽后 90 d 开始), KCl 和  $KH_2PO_4$  处理组块根 *DFR* 平均活性则较无钾肥对照组分别增加 22.74% 和 11.27%。

不同处理组块根 *UFGT* 活性在移栽后 50~90 d 变化平缓, 90~110 d 明显升高, 110~130 d 变化平缓, 不同处理间变化趋势有所差异,  $K_2SO_4$ 、 $KH_2PO_4$  处理组、无钾肥对照组和不施肥对照组的块根 *UFGT* 活性峰值为移栽后 110 d, 而 KCl 和  $K_2HPO_4$  处理的块根 *UFGT* 活性峰值为移栽后 130 d(图 3d)。  $K_2HPO_4$  处理组块根 *UFGT* 活性均值最高, 较无钾肥对照组和不施肥对照组提高 22.88% 和 22.15%, 而  $K_2SO_4$ 、KCl 和  $KH_2PO_4$  处理组较无钾肥对照组提升



9.88%、1.41% 和 12.74%，较不施肥对照组提升 9.23%、0.81% 和 12.07%。与结果 2.2 比较发现，在花青素积累较快期（移栽后 90~130 d）， $K_2SO_4$ 、

$KCl$ 、 $K_2HPO_4$  和  $KH_2PO_4$  处理组块根  $UFGT$  平均活性较无钾肥对照组和不施肥对照组提升率低于移栽后 50~90 d。

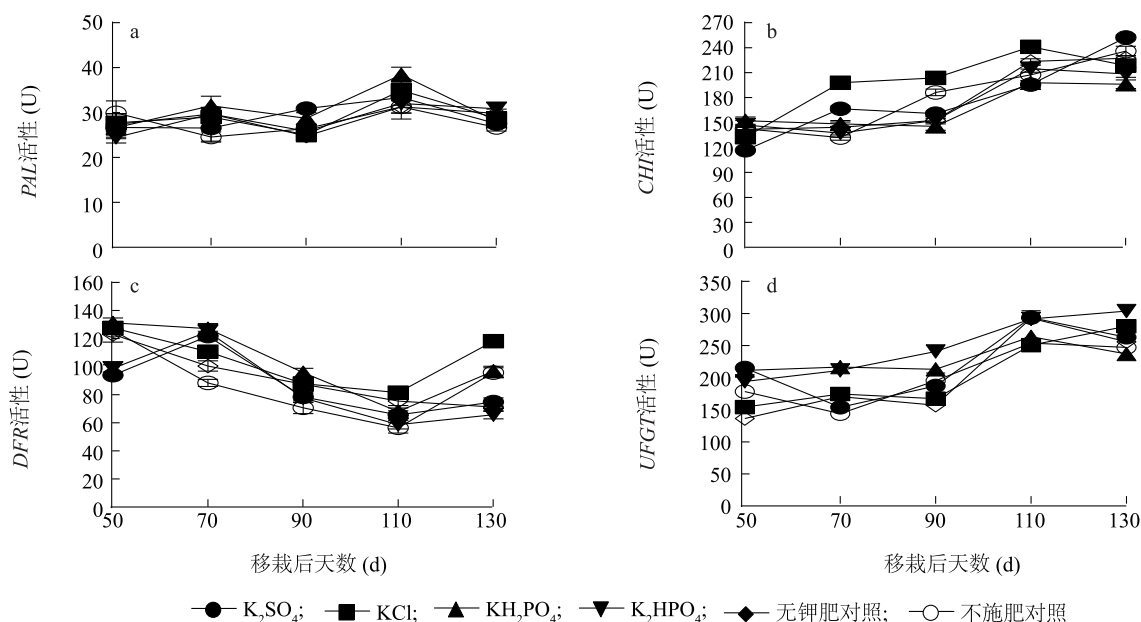


图3 不同钾肥形态对块根花青素合成关键酶活性的影响

Fig.3 Effects of potassium forms on the activities of key enzymes in anthocyanin synthesis in root

### 3 讨论

本研究结果表明,川紫薯2号对于 $K_2SO_4$ 、 $KCl$ 、 $KH_2PO_4$ 、 $K_2HPO_4$  4种钾肥的敏感性有差异。钾肥施用方式可显著影响甘薯产量及品质,适量增施钾肥可有效提高甘薯块根膨大率和干物质含量,增加收获期甘薯单株薯数及薯质量<sup>[9, 26]</sup>。本研究结果表明,与无钾肥对照组和不施肥对照组相比,4种钾肥处理均可提高川紫薯2号单株块根鲜质量和干质量,以 $K_2SO_4$ 提高最为显著。这与朱红等<sup>[27]</sup>使用 $KCl$ 和 $K_2SO_4$ 处理徐紫薯,当施用量为75~150 kg/hm<sup>2</sup>时,施用 $K_2SO_4$ 处理对于甘薯提质增产效果优于施用 $KCl$ 处理的结论相符。

本研究结果表明,钾肥施用能提高川紫薯2号花青素积累量,这与张茵等<sup>[19]</sup>在万紫薯56号,郭亮虎等<sup>[20]</sup>在济黑1号、济黑2号,朱玲等<sup>[21]</sup>在绵紫薯9号等紫色甘薯品种上的研究结果一致。另有研究表明,在苹果、凤梨等植物上,随着钾施用量不断提高,其花青素含量会随之先升后降,但当施用量过大时则会降低其提升花青素含量的效率,甚至抑

制花青素的合成<sup>[19, 28]</sup>,因此钾肥的适量施用是提升作物花青素含量和积累量的关键。同时,本研究结果表明,采用相同 $K_2O$ 施用量,川紫薯2号花青素合成量和积累量因钾素相伴阴离子差异而有所差异,在4种钾肥形态中,川紫薯2号对 $K_2SO_4$ 最为敏感,提升幅度最大,而对 $K_2HPO_4$ 敏感性则较低,选用 $K_2SO_4$ ,更有利于节本增效。

$PAL$ 是花青素生物合成途径的第一个关键酶,研究表明 $PAL$ 活性与花青素合成正相关<sup>[29-31]</sup>。本研究结果表明,钾肥施用可提高 $PAL$ 活性,促进花青素合成,钾肥处理后块根 $PAL$ 平均活性较无钾肥对照组和不施肥对照组在花青素快速积累期提升率更为显著,因此钾肥可通过提升 $PAL$ 活性,提高紫色甘薯块根中花青素含量,这与明兴加等<sup>[32]</sup>、李云萍<sup>[33]</sup>的研究结果所示紫色甘薯花青素含量与 $PAL$ 活性呈正相关的结果相符合。花青素含量与 $CHI$ 活性正相关,紫色甘薯渝紫263号 $CHI$ 在不同部位的表达量与其花青素含量呈正相关<sup>[34]</sup>。本研究中对川紫薯2号施用不同形态钾肥后, $K_2SO_4$ 、 $KCl$ 处理组块根 $CHI$ 平均活性高于无钾肥对照组,

并且在花青素快速积累期 $K_2SO_4$ 处理组 *CHI* 平均活性提升率高于其他时期,这可能是 $K_2SO_4$ 、 $KCl$  处理组收获期块根花青素含量和积累量均较高的原因之一。*DFR* 可利用 3 种二氢黄酮醇分别合成无色天竺葵素、无色飞燕草素和无色矢车菊素,与紫色甘薯花青素合成相关<sup>[35]</sup>。本研究中施用  $KCl$  和  $KH_2PO_4$  可提高 *DFR* 活性。郭晋雅等<sup>[36]</sup>、刘小强<sup>[37]</sup> 的研究结果则表明,*IbDFR* 能将二氢黄酮醇类底物还原为花色苷直接前体(无色原花色苷),以促进花色苷合成,紫色甘薯块根中 *IbDFR* 表达量与花青素含量变化趋势一致,这与我们的研究结果有所差异,分析原因可能是紫色甘薯品种不同所致,紫色甘薯对不同形态钾肥的敏感性可能与其基因型密切相关,而川紫薯 2 号 *DFR* 的编码基因和调控基因可能对  $KCl$  和  $KH_2PO_4$  更为敏感。*UFGT* 有利于改善花青素稳定性<sup>[38]</sup>,其编码基因 *UF3GT* 基因在紫色甘薯中表达量较高<sup>[39]</sup>。本研究结果表明 4 种钾肥施用后,川紫薯 2 号 *UFGT* 活性均有所升高,但其对不同钾肥形态敏感性有所差异,对 $K_2HPO_4$ 最为敏感。虽然 $K_2HPO_4$ 处理组 *PAL*、*DFR* 及 *CHI* 活性较无钾肥对照组无明显变化,但其花青素积累量较无钾肥对照组明显升高,这可能与 $K_2HPO_4$ 显著提高 *UFGT* 活性,增强块根中花青素稳定性相关。花青素合成量和积累量的改变是 *PAL*、*DFR*、*CHI*、*UFGT* 等多种酶共同作用的结果<sup>[40]</sup>,不同形态钾肥作用的靶酶有所差异,而 $K_2SO_4$ 处理后,*PAL*、*CHI*、*UFGT* 活性较无钾肥对照组和不施肥对照 组均有所提高,尤其是在花青素快速积累期提高更为显著,这可能是川紫薯 2 号在 $K_2SO_4$ 处理后花青素含量及积累量增加最为显著的原因。

钾肥处理川紫薯 2 号,可有效促进其块根生长,提高薯块质量,并通过增加花青素合成关键酶活性,促进花青素合成和积累,采用 $K_2SO_4$ 处理对川紫薯 2 号鲜质量、花青素含量和积累量提升最为明显。同时,川紫薯 2 号对于不同形态钾肥表现出不同的敏感性,选择适合的钾肥,可较大程度地提高其花青素含量,节约种植成本,增加经济价值。

## 参考文献:

- [1] 联合国粮食及农业组织.联合国粮食及农业组织统计资料 [EB/OL]. (2018-10-20) [2020-07-25]. <http://www.fao.org/statistics/zh/>
- [2] 秦建军,易中懿,徐雪高.我国甘薯种植业时空布局分析及产业发展建议[J].天津农业科学,2020,26(3):53-62.
- [3] JEZEK M, ZÖRB C, MERKT N, et al. Anthocyanin Management in Fruits by Fertilization [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2018,66(4):753-764.
- [4] 乔廷廷,郭玲.花青素来源、结构特性和生理功能的研究进展[J].中成药,2019,41(2):388-392.
- [5] 彭强,高彦祥,袁芳.紫甘薯及其花色苷的研究与开发进展[J].食品科学,2010,31(23):401-405
- [6] 张辉,张永春.肥料对甘薯营养品质影响的研究进展[J].江苏农业科学,2017,45(17):1-5.
- [7] 陈晓光,史春余,李洪民,等.施钾时期对食用甘薯光合特性和块根淀粉积累的影响[J].应用生态学报,2013,24(3):759-763.
- [8] 齐鹤鹏,安霞,刘源,等.施钾量对甘薯产量及钾素吸收利用的影响[J].江苏农业学报,2016,32(1):84-89.
- [9] 宁运旺,张辉,许仙菊,等.薯麦轮作体系钾肥全部施于薯季提高甘薯和周年产量[J].植物营养与肥料学报,2018,24(4):935-946.
- [10] 尹子娟,郭华春,李存芝.施钾对甘薯生长、产量及品质的影响[J].云南农业科技,2011(4):21-23.
- [11] ZHA J, KOFFAS MATTHEOS A G. Synthetic production of anthocyanins in metabolically engineered microorganisms: current status and perspectives [J]. Synthetic and Systems Biotechnology, 2017, 2(4): 259-266.
- [12] 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、 $^{14}C$ 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.
- [13] 钟巍然,黄世龙,任自明,等.P、K肥及种植密度对重庆市深丘低山区马铃薯紫云1号花青素含量的影响[J].中国马铃薯,2011,25(3):164-165.
- [14] 石洪芳,易志杰,杨特武,等.氮钾运筹模式对高花青素特种稻产量及糙米营养品质的影响[J].华中农业大学学报,2018,37(2):43-49.
- [15] 姜学玲,徐维华,李延菊,等.钾肥对富士苹果着色的影响及机理[J].中国农业科学,2014,47(5):946-954.
- [16] 张伟.钾对观赏凤梨苞片花青素合成的影响[J].农业科技通讯,2012(8):150-151.
- [17] 杜振宇,宋永贵,许元峰,等.钾对冬枣品质与产量的影响[J].中国土壤与肥料,2018(1):32-36.
- [18] 郭傲.不同施钾水平对无花果果实品质及糖代谢的影响[D].福州:福建农林大学,2019.
- [19] 张茜,王良平,黎华.密度和肥料对万紫薯56花青素含量的影响研究[J].陕西农业科学,2012,58(4):23-25,28.
- [20] 郭亮虎,逯腊虎,王镇,等.钾肥对紫甘薯花青素的影响[J].山西农业科学,2019,47(1):78-81.
- [21] 朱玲,沈学善,屈会娟,等.高花青素甘薯新品种‘绵紫薯9号’优化施肥技术研究[J].中国农学通报,2020,36(17):26-30.
- [22] 黄钢,沈学善,王平,等.供给侧改革与现代绿色薯业技术

- 创新[M].北京:科学出版社,2017:343-350.
- [23] YAMAKAWA O, YOSHIMOTO M. Sweetpotato as food material with physiological functions[J]. Acta Hort, 2002(583):179-185.
- [24] 赵冬兰,唐君,张允刚,等. 八种紫甘薯资源原花青素相对含量的比较[J]. 中国农学通报,2006(8):156-157.
- [25] 白鸽,郭玉蓉,陈磊,等. 苹果着色与冷藏期间多酚及相关酶活性的关系[J]. 食品科学,2015,36(6):246-250.
- [26] 张彬彬,史春余,柳洪鹏,等. 钾肥基施利于甘薯块根产量的形成[J]. 植物营养与肥料学报,2017,23(1):208-216.
- [27] 朱红,钮福祥,徐飞,等. 钾肥对甘薯产量、品质及淀粉RVA特性的影响[J]. 江苏农业科学,2016,44(5):138-139,195.
- [28] 金会翠,张林森,李丙智,等. 增施钾肥对红富士苹果叶片营养及果实品质的影响[J]. 西北农业学报,2007,16(3):100-104.
- [29] POMBO M A, MARTINE G A, CIVELO P M. Cloning of *FaPAL6* gene from strawberry fruit and characterization of its expression and enzymatic activity in two cultivars with different anthocyanin accumulation[J]. Plant Science, 2011,181(2):111-118.
- [30] 罗安才,阎晓灵,李利霞,等. 鸡爪槭叶色变化机制研究[J]. 江苏农业科学,2018,46(22):118-122.
- [31] 徐德,郑远静,高方平,等. 花色苷的生物合成及其影响因素研究进展[J]. 江苏农业学报,2019,35(5):1246-1253.
- [32] 明兴加,李坤培,叶小利,等. 紫色甘薯生长过程中花色素含量变化研究[J]. 西南师范大学学报(自然科学版),2006,31(4):162-166.
- [33] 李云萍. 紫心甘薯 [*Ipomoea batatas* (L.) Lam.] 花色苷的积累与合成酶活性的关系研究[D]. 重庆:西南大学,2010.
- [34] GUO J Y, ZHOU W, LU Z L, et al. Isolation and functional analysis of chalcone isomerase gene from purple-fleshed sweet potato [J]. Plant Molecular Biology Reporter, 2007,33(5):1451-1463.
- [35] KATSU K, SUZUKI R, TSUCHIYA W, et al. A new buckwheat dihydroflavonol 4-reductase (*DFR*), with a unique substrate binding structure, has altered substrate specificity[J]. BMC Plant Biology, 2017,17(1):239.
- [36] 郭晋雅,李云萍,傅玉凡,等. 紫心甘薯二氢黄酮醇4-还原酶基因表达及酶活性与花色苷积累的相关性[J]. 中国农业科学,2011,44(8):1736-1744.
- [37] 刘小强. 紫肉甘薯 [*Ipomoea batatas* (L.) Lam.] 花色苷生物合成的分子调控研究[D]. 重庆:西南大学,2010.
- [38] GUO J, ZHOU W, LU Z, et al. Cloning and characterization of the cDNA and promoter of UDP-glucose: flavonoid 3-O-glucosyltransferase gene from a purple-fleshed sweet potato[J]. South African Journal of Botany, 2016,106:211-220.
- [39] ANTONIO G L, MASARU O, TATSUHIITO F. Temporal and spatial expression of genes involved in anthocyanin biosynthesis during sweet potato [*Ipomoea batatas* (L.) Lam.] root development[J]. International Journal of Plant Sciences, 2006,167(2):249-256.
- [40] LIU Y, ZHANG M, MENG X, et al. Photoperiod and shading regulate coloration and anthocyanin accumulation in the leaves of malus crabapples[J]. Plant Cell Tissue & Organ Culture, 2015,121(3):619-632.

(责任编辑:陈海霞)