

叶面喷施 K_2SO_4 对‘瑞雪’ 苹果果实糖代谢的影响

贾荣俭, 胡宇, 杨杰, 贺颖, 马永涛, 王元基, 赵政阳

(西北农林科技大学园艺学院, 陕西 杨凌 712100)

摘要:为探究喷施不同浓度叶面钾肥对苹果品种‘瑞雪’果实品质的影响,确定最适宜‘瑞雪’的钾肥浓度,以4年生的‘瑞雪’为试验材料,叶面钾肥种类为 K_2SO_4 ,设置3个浓度梯度分别为 T1(0.1%)、T2(0.3%)和 T3(0.5%),以喷施清水为对照(CK)。叶面钾肥分5次施入,第一次施肥时间为5月22日(花后38 d),此后每隔一个月喷施一次。各处理分别于花后45、75、105、135 d和180 d采集果实样品并测定糖组分、糖代谢相关酶活性以及果实基本品质等指标。结果表明:与对照相比,处理组(T1、T2、T3)均显著提高了‘瑞雪’果实的单果质量,分别比CK高12.6%、25.9%和4.4%;果实硬度分别比CK显著提高7.7%、29.6%和12.1%;可溶性固形物含量分别比CK显著提高了1.14、1.95和0.87个百分点;处理组均显著降低了可滴定酸含量,分别比CK降低了0.04、0.05和0.09个百分点。其中,T2处理后的果实单果质量、硬度、可溶性固形物含量最高,单果质量为335.75 g,硬度为9.82 $kg \cdot cm^{-2}$,可溶性固形物含量为16.35%。T3处理后的果实可滴定酸含量最低,为0.19%。施钾显著提高了新梢叶片中N、P、K、Ca和Mg的含量,显著提高了果实中N、K、Ca和Mg的含量,果实中P含量并没有显著上升。T2处理后成熟果实中果糖、蔗糖和葡萄糖含量显著上升,与CK相比分别提高了35.54%、33.22%、25.31%。钾可以提高果实中酸性转化酶(AI)、山梨醇氧化酶(SOX)、山梨醇脱氢酶(SDH)和蔗糖合酶(SS)的活性,在花后180 d时,T2处理AI、SOX、SDH、SS活性相比于CK分别提升了4.54%、2.08%、19.11%、12.81%。相关分析表明,施钾与果实中葡萄糖含量在花后45 d和75 d具有极显著正相关性($r_{45DAB} = 0.879^{**}$ 、 $r_{75DAB} = 0.893^{**}$);与山梨醇含量在花后180 d具有极显著负相关性($r_{180DAB} = -0.861^{**}$)。施钾与果实中的中性转化酶活性在花后135 d具有极显著正相关性($r_{135DAB} = 0.763^{**}$);与山梨醇氧化酶活性在花后45 d和75 d具有极显著正相关性($r_{45DAB} = 0.717^{**}$ 、 $r_{75DAB} = 0.880^{**}$);与蔗糖合酶在花后180 d具有极显著正相关性($r_{180DAB} = 0.739^{**}$)。最适宜‘瑞雪’苹果喷施 K_2SO_4 叶面肥的浓度水平为0.3%(T2),此浓度下可以显著提高果实产量和品质。

关键词:‘瑞雪’苹果;钾肥;叶面喷施;糖代谢;果实品质

中图分类号:S661.1;S147.5 文献标志码:A

Effects of foliar spraying K_2SO_4 on sugar metabolism in ‘Ruixue’ apple fruit

JIA Rongjian, HU Yu, YANG Jie, HE Ying, MA Yongtao, WANG Yuanji, ZHAO Zhengyang

(College of Horticulture, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: To explore the effects of spraying different concentrations of foliar potassium fertilizer on the fruit quality of apple variety ‘Ruixue’, the most suitable concentration of potassium fertilizer for ‘Ruixue’ was determined. Four-year-old ‘Ruixue’ was used as the experimental material. The type of foliar potash fertilizer was K_2SO_4 , and three concentration gradients were set as T1 (0.1%), T2 (0.3%) and T3 (0.5%), respectively. Spraying clear water was used as control (CK). Foliar potash fertilizer was divided into 5 stages, the first fertilization time was May 22 (38 days after bloom), and then sprayed every other month. Fruit samples were collected at 45, 75, 105, 135 d and 180 d after anthesis, respectively. The indexes of sugar components, activities of enzymes related to glucose metabolism and basic fruit quality were determined. The results showed that compared with the

收稿日期:2023-09-25

修回日期:2023-12-19

基金项目:财政部和农业农村部:国家现代农业产业技术体系(CARS-27);旱地矮化苹果园生草及肥水管理技术研究(Z1090122026)

作者简介:贾荣俭(1999-),男,甘肃庆阳人,硕士研究生,研究方向为果树栽培生理。E-mail:jjr16882021@163.com

通信作者:赵政阳(1964-),男,陕西渭南人,教授,主要从事苹果育种与遗传改良研究。E-mail:zhaozy@nwsuaf.edu.cn

control, the treatment group (T1, T2, T3) significantly improved the fruit quality of ‘Ruixue’, which was 12.6%, 25.9% and 4.4% higher than CK, respectively; the fruit firmness of the treatment group was 7.7%, 29.6% and 12.1% higher than that of CK, respectively; and the soluble solid content of the treatment group was significantly increased by 1.14, 1.95 and 0.87 percentage points, respectively. The titratable acid content in the treatment group was significantly reduced by 0.04, 0.05 and 0.09 percentage points, respectively ($P < 0.05$). Among them, the single fruit weight, firmness and soluble solids of T2 treatment were the highest, the mass of single fruit was 335.75 g, the firmness was $9.82 \text{ kg} \cdot \text{cm}^{-2}$, and the content of soluble solids was 16.35%. The titratable acid content of the fruit treated with T3 was the lowest, and the content was 0.19%. Potassium application significantly increased the contents of N, P, K, Ca, and Mg in leaves, and significantly increased the contents of N, K, Ca, and Mg in fruit, but the content of P in fruit did not increase significantly. After T2 treatment, the contents of fructose, sucrose and glucose in mature fruits increased significantly, increased by 35.54%, 33.22% and 25.31% respectively compared with CK. Potassium increased the activities of acid invertase (AI), sorbitol oxidase (SOX), sorbitol dehydrogenase (SDH) and sucrose synthase (SS) in fruits. At 180 days after anthesis, the activities of AI, SOX, SDH and SS in T2 treatment increased by 4.54%, 2.08%, 19.11% and 12.81% respectively compared with CK. In terms of correlation analysis, there was an extremely positive correlation between potassium application rate and glucose content in fruit at 45 days and 75 days after anthesis ($r_{45\text{DAB}} = 0.879^{**}$, $r_{75\text{DAB}} = 0.893^{**}$), and an extremely significant negative correlation with sorbitol content at 180 days after anthesis ($r_{180\text{DAB}} = -0.861^{**}$). There was an extremely significant positive correlation between potassium application rate and neutral invertase activity in fruit at 135 days after anthesis ($r_{135\text{DAB}} = 0.763^{**}$), an extremely significant positive correlation with sorbitol oxidase activity at 45 days and 75 days after anthesis ($r_{45\text{DAB}} = 0.717^{**}$, $r_{75\text{DAB}} = 0.880^{**}$), and an extremely significant positive correlation with sucrose synthase activity at 180 days after anthesis ($r_{180\text{DAB}} = 0.739^{**}$). The most suitable concentration of K_2SO_4 fertilizer sprayed on the leaves of ‘Ruixue’ apple was 0.3% (T2), which could significantly improve the fruit yield and quality.

Keywords: ‘Ruixue’ apple; potassium; foliar spraying; sugar metabolism; fruit quality

苹果 (*Malus domestica* Borkh.) 是世界四大水果之一, 营养丰富, 包含了多种维生素、氨基酸、糖分、有机酸和膳食纤维等, 对人体大有裨益, 深受消费者喜爱。‘瑞雪’是西北农林科技大学赵政阳团队培育出的黄绿色晚熟苹果新品种, 2019年通过国审, 有希望成为黄土高原主产区更新换代的主栽品种^[1]。

钾是植物进行正常生命活动所必需的元素, 参与植物的各种生理和生化过程^[2], 合理施用钾肥可以提升果实品质并增加果树产量。金会翠等^[3]发现对‘富士’苹果施用 K_2SO_4 可以显著提高果实产量。Kaack等^[4]研究发现, 钾不仅可以提高苹果果实的产量和硬度, 还可以促进可溶性固形物的积累。前人研究表明, 苹果果实中的糖类主要包括蔗糖、果糖、葡萄糖和山梨醇等, 钾肥主要通过提高果实的可溶性糖含量来提升果实品质。施钾可以促进苹果中这几种糖含量的增加, 同时糖的积累和糖代谢酶密切相关。糖代谢酶主要包括酸性转化酶 (AI)、中性转化酶 (NI)、蔗糖合酶 (SS)、蔗糖磷酸合成酶 (SPS)、山梨醇氧化酶 (SOX) 和山梨醇脱氢

酶 ($NAD^+ - SDH$) 等。张雯^[5]对盆栽‘嘎拉’施入 KCl 后发现, 钾肥可以显著提高果实中 AI、NI、SS 和 SPS 等 4 种酶的活性。Lester 等^[6]研究发现, 钾元素通过提高蔗糖磷酸合成酶活性, 从而促进果实中葡萄糖、果糖和蔗糖的积累。

在生产中发现, 苹果喷施钾肥后可以提升其果实品质, 但是关于‘瑞雪’苹果 K_2SO_4 叶面肥施用的适宜浓度还没有相关文献报道, 并且喷施 K_2SO_4 对‘瑞雪’果实糖组分的影响以及对果实糖代谢的机理尚不明确。因此, 本研究以 4 年生‘瑞雪’/M26 为试材, 探究不同浓度 K_2SO_4 叶面肥调控‘瑞雪’苹果果实糖分代谢的机理, 以为‘瑞雪’苹果合理施用叶面钾肥及其优质高效生产提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验于 2022 年在陕西省渭南市白水县西北农林科技大学白水苹果试验站 ($109^{\circ}32'49'' \text{ E}, 35^{\circ}12'49'' \text{ N}$) 进行, 试验站海拔高度为 908 m, 年平均温度 11.8°C , 果园年降雨量 577 mm, 主要集中在 7—9 月, 占年降

雨量的 50% 以上。果园土壤为黄绵土,其基本营养状况为有机质 $14.22 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、全氮 $1.21 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、硝态氮 $25.49 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、铵态氮 $2.13 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、有效磷 $23.59 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、速效钾 $182.28 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, pH 值为 8.10。试验材料是 4 年生的矮化自根砧‘瑞雪’(砧木为 M26)2019 年 8 月进行嫁接的坐地苗,果树定植株行距为 $1.5 \text{ m} \times 4 \text{ m}$,细长纺锤形树体结构,树体进行常规周年管理。

1.2 试验设计

2022 年在白水苹果试验站选取健康无病害、树势健壮一致的 4 年生‘瑞雪’进行挂牌标记。试验共设置 3 个处理,分别为喷施 0.1% (T1)、0.3% (T2) 和 0.5% (T3) 浓度的 K_2SO_4 溶液,以喷施等量清水作为对照 (CK)。每个处理选择 10 棵果树,重复 3 次。 K_2SO_4 溶液分为 5 个时期进行喷施,自花后 38 d (5 月 22 日) 开始喷施第一次,此后每隔一个月喷施一次,最后一次喷施时间为花后 158 d (9 月 22 日)。各处理分别在花后 45 d (5 月 29 日)、75 d (6 月 29 日)、105 d (7 月 29 日)、135 d (8 月 29 日)、180 d (10 月 14 日) 采集果实样品。

1.3 测定指标与方法

各处理采集果实样品 30 个,迅速将样品用锡箔纸包裹,做好标记后放入液氮中冷冻保存,返回实验室后装入 -80°C 冰箱保存待测。在果实成熟期每个处理各采集果实样品 30 个和新梢叶片 10 份,每份 50 片叶子,用于测定矿质元素含量。

单果质量测定采用分析天平 (MP1100B, 舜宇恒平仪器);果实硬度测定采用 GS-15 型水果质地分析仪 (南京铭奥仪器公司);可溶性固形物含量测定采用日本手持 ATAGO 数显糖度仪 (ATAGO);可滴定酸含量测定采用 GMK-835 型酸度计 (G-WON Korea)。

果实可溶性糖含量用高效液相色谱法进行测定^[7],使用 Sugar-Pak TMI (300 mm \times 6.5 mm) 色谱柱 (美国 Waters 公司) 和 2414 示差折光检测器 (美国 Waters 公司),所有标准品均为色谱级。

酸性转化酶 (AI)、中性转化酶 (NI)、山梨醇氧化酶 (SOX)、蔗糖合酶 (SS) 的酶液制备参照 Keller 和 Ludlow 的方法^[8];取果实冻样 0.5 g 冰浴研磨,加入 3.5 mL 提取液研磨成匀浆。提取液成分包括: $50 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ HEPES-NaOH (pH 7.5) 缓冲液,内含 $2.5 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ DTT, $5 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ MgCl_2 , 0.05% (v/v) Triton X-100, $1 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ EDTA, 0.1% (w/v) BSA, 2% (w/v) PVP。13 000 g 4°C 离心 10~15 min,上清液过 Sephadex G25 PD-10 脱盐柱脱盐,平

衡缓冲液为 $50 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ HEPES-NaOH (pH 7.5) 缓冲液,内含 $2.5 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ DTT, $5 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ MgCl_2 , $1 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ EDTA。在 4°C 下保存酶提取液,用于酶活性测定。 NAD^+ -山梨醇脱氢酶 (NAD^+ -SDH) 的酶液制备参照 Park 等^[9] 和 Yamaguchi 等^[10] 的方法。提取液和缓冲液成分不同,提取方法同上。AI、NI、SS 以及 SOX 活性的测定参考 Lowell 等^[11] 的方法,通过 540 nm 比色,测定生成的还原糖含量来定量。 NAD^+ -SDH 活性测定参考 Park 等^[9] 的方法,通过测定 340 nm 下生成的 NADH 含量来定量,酶液测定所用仪器为全波长多功能酶标仪 (Infinite M200pro)。

对果实和新梢叶片进行矿质元素含量测定,将果实和叶片在 105°C 下杀青 15 min 后,于 65°C 烘干后进行研磨。采用 H_2SO_4 - H_2O_2 法进行消煮,连续流动分析仪 (Flowsys) 测定叶片和果实中全 N、全 P、全 K;采用 H_2NO_3 - H_2O_2 法进行消煮,火焰光度计测定叶片和果实中的 Ca 和 Mg。

1.4 数据处理与分析

试验数据采用 Excel 2016 进行统计和图表绘制,用 SPSS 27.0 软件对数据进行方差分析及相关性分析 (LSD 法多重比较, $P < 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 喷施 K_2SO_4 对‘瑞雪’果实品质的影响

2.1.1 不同施钾水平对果实发育过程中单果质量的影响 由图 1 可知,‘瑞雪’苹果果实发育速率呈现“快-慢”的生长曲线。与花后 75~105 d 相比,在花后 45~75 d 时,各处理的单果质量增长趋势相近,增长速率较快;随着果实发育,在花后 75~105 d 时,单果质量的增长速度是整个发育期最快的;花后 105 d 以后,单果质量的增长速度下降。在花后 105 d 时, T1 和 T2 处理的单果质量大于 T3 处理和 CK;随着施钾次数的增加,各处理的差异逐渐加大,在果实成熟时, T1、T2 以及 T3 处理的单果质量相比 CK 分别提高了 12.6%、25.9% 和 4.4%。由此可见,钾肥可以显著提高果实单果质量 ($P < 0.05$),且随着钾肥浓度的增加,单果质量增大,但钾肥浓度过高时,单果质量反而会降低, T3 处理的单果质量比 T2 处理降低了 17.08%。

2.1.2 不同施钾水平对果实发育过程中果实硬度的影响 由图 2 可知,随着‘瑞雪’果实的发育,果实硬度逐渐下降,花后 75 d 后,表现出“快-慢”的下降趋势。花后 75~105 d 时,硬度下降较快;花后 105 d 以后,硬度下降的趋势开始变缓,105 d 时 T2

处理的硬度最高,显著高于对照 16.6%。T1 和 T3 处理在果实的整个发育期内硬度相差不大,均高于对照,低于 T2 处理;在果实成熟后,T1、T2 和 T3 处理的果实硬度分别比 CK 高 7.7%、29.6%和 12.1%。这就说明喷施 K_2SO_4 可以提升果实硬度,并且具有最适钾肥浓度。

2.1.3 不同施钾水平对果实发育过程中可溶性固形物含量的影响 图 3 结果表明,‘瑞雪’果实在发育过程中的可溶性固形物含量呈现出逐渐上升的趋势。T2 处理在各个时期的可溶性固形物含量均高于其他处理和对照;在果实成熟后,T2 处理的可溶性固形物含量为 16.34%,CK 的可溶性固形物含量为 14.4%,T2 处理显著高于 CK。果实成熟时,各处理的可溶性固形物含量为 $T2 > T1 > T3 > CK$,这就说明喷施钾肥可以促进果实可溶性固形物的积累,但随着钾肥浓度的升高,‘瑞雪’果实可溶性固形物含量逐渐降低。

2.1.4 不同施钾水平对果实发育过程中可滴定酸含量的影响 由图 4 可以看出,在‘瑞雪’果实的整个发育期,可滴定酸含量呈现出下降的趋势;在花后 45~75 d 时,可滴定酸下降趋势最为明显,CK 的

可滴定酸含量由 1.17% 下降到 0.50%;在花后 75 d 以后,可滴定酸的下降趋势趋于平缓。T3 处理在果实发育各时期的可滴定酸含量均低于其他处理和对照,这说明钾可以有效降低果实内的可滴定酸含量,并且可滴定酸含量随着钾浓度的升高而降低。

2.2 喷施 K_2SO_4 对‘瑞雪’果实及叶片矿质元素含量的影响

如表 1 所示,与 CK 相比,T1 处理后果实中 N 含量显著增加了 6.5%,但是 T2 和 T3 处理后,果实和新梢叶片中 N 含量低于 CK。这就说明低浓度钾肥可以提高‘瑞雪’果实和叶片中 N 含量,高浓度钾肥作用则相反。叶面喷施钾肥使得新梢叶片 P 含量显著高于 CK,T3 处理后叶片 P 含量最高,为 $0.12 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$,果实 P 含量高于 CK 但差异并不显著。喷钾处理后的‘瑞雪’果实和新梢叶片 K 含量均显著高于 CK,并且随着叶面钾肥浓度的升高,果实和新梢叶片中 K 含量均会有升高的趋势。喷钾处理后新梢叶片中各处理 Ca、Mg 含量显著高于 CK;果实中 Ca 含量高于 CK,但只有 T2 处理与 CK 间差异显著,其余处理与 CK 间差异均不显著;果实中 Mg 含量高于 CK,T1 和 T2 处理与 CK 间差异显著。

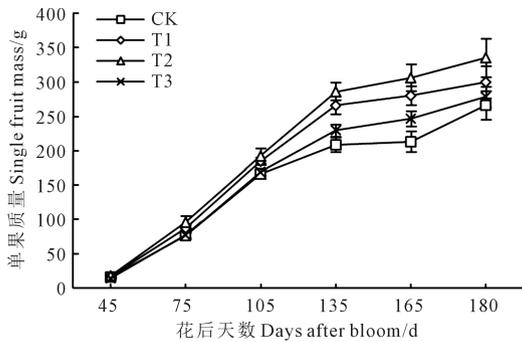


图 1 施钾对‘瑞雪’果实发育过程中单果质量的影响

Fig.1 Effects of potassium on single fruit mass during ‘Ruixue’ fruit development

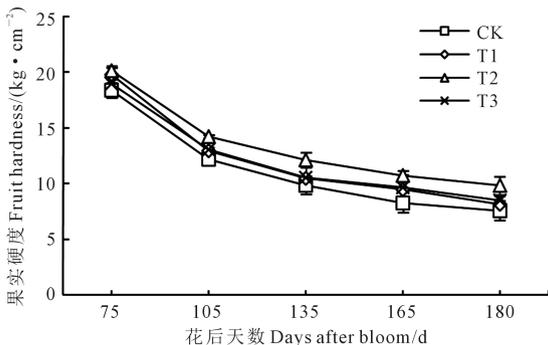


图 2 施钾对‘瑞雪’果实发育过程中果实硬度的影响

Fig.2 Effects of potassium on fruit firmness during ‘Ruixue’ fruit development

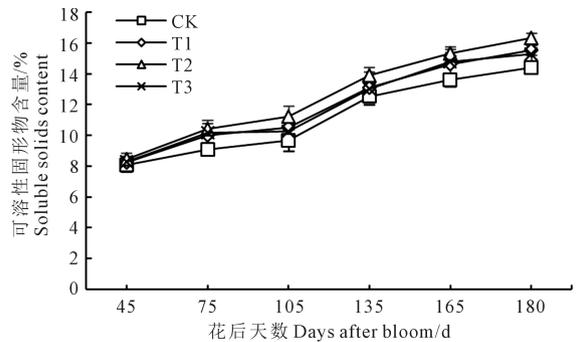


图 3 施钾对‘瑞雪’果实发育过程中可溶性固形物的影响

Fig.3 Effects of potassium on soluble solids content of fruit during ‘Ruixue’ fruit development

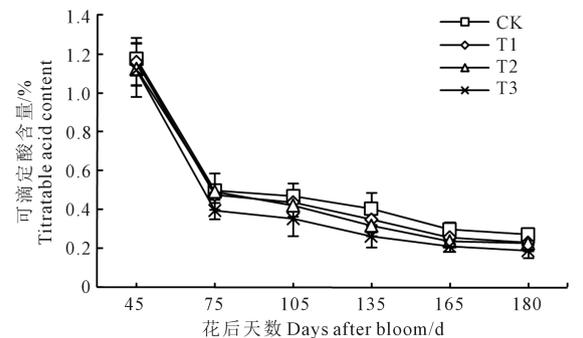


图 4 施钾对‘瑞雪’果实发育过程中可滴定酸的影响

Fig.4 Effects of potassium on titratable acid content of fruit during ‘Ruixue’ fruit development

2.3 喷施 K_2SO_4 对‘瑞雪’果实发育过程中可溶性糖含量的影响

叶面喷施不同浓度的钾肥对果实中糖含量的影响如图 5 所示,随着‘瑞雪’果实的生长发育,葡萄糖、蔗糖和果糖的含量呈现上升的趋势,山梨醇含量则呈现先下降后上升的趋势,并且果糖含量最高,葡萄糖含量介于果糖和蔗糖之间,山梨醇含量最低。

在果实整个发育过程中,T2 和 T3 处理的果实葡萄糖含量显著高于 CK,T1 处理与 CK 并没有显著差异,直到果实成熟时,T1 处理才显著高于 CK。

在果实的整个发育期,T2 处理对促进葡萄糖的积累影响最大。说明叶面喷施 K_2SO_4 会显著提高‘瑞雪’果实葡萄糖的含量,但相比于高浓度的 K_2SO_4 ,低浓度 K_2SO_4 对增加果实中葡萄糖含量的影响较小。

在花后 45 d 时,各个处理的果实蔗糖含量均显著高于 CK。在花后 135 d 以后,蔗糖含量在各处理间的表现为 $T2>T1>T3>CK$,且各处理均显著高于 CK。由此可见,叶面喷施 K_2SO_4 对果实中蔗糖含量的积累具有促进作用,但高浓度钾肥并不利于蔗糖的积累。

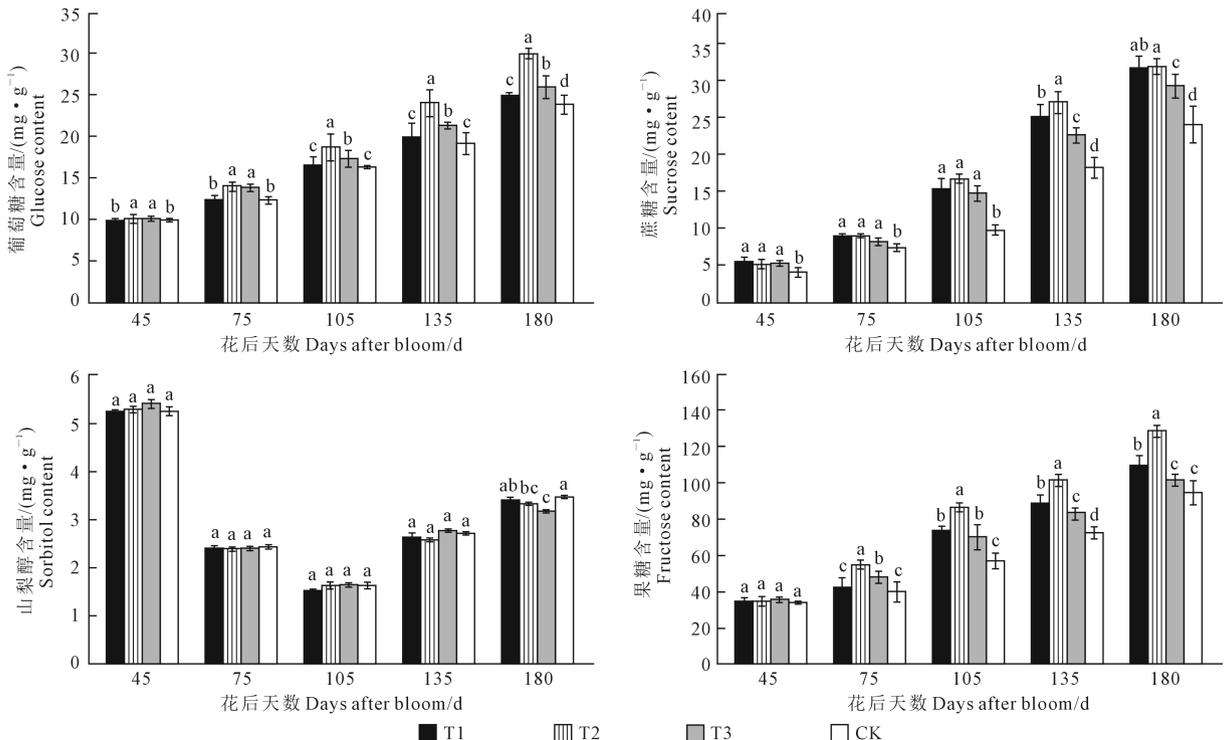
表 1 施钾对‘瑞雪’果实和新梢叶片矿质元素含量的影响/($mg \cdot g^{-1}$)

Table 1 Effects of potassium on fruit and new shoot leaves mineral element contents of ‘Ruixue’

样品 Specimen	处理 Treatment	N	P	K	Ca	Mg
果实 Fruit	T1	1.31±0.02a	0.07±0.01a	467.72±1.35b	0.90±0.05b	0.44±0.01b
	T2	1.22±0.02b	0.08±0.01a	481.26±2.00a	1.14±0.04a	0.49±0.01a
	T3	1.15±0.02c	0.09±0.00a	482.81±2.08a	0.88±0.01b	0.40±0.00c
	CK	1.23±0.02b	0.06±0.01a	453.63±1.51c	0.86±0.02b	0.39±0.01c
叶片 Leaf	T1	7.46±0.13a	0.09±0.00b	532.86±1.66a	9.82±0.25a	3.69±0.05ab
	T2	7.08±0.15ab	0.11±0.01a	535.26±1.78a	10.01±0.15a	3.73±0.06a
	T3	6.98±0.11b	0.12±0.00a	536.52±1.78a	9.75±0.17a	3.52±0.06b
	CK	7.27±0.10ab	0.08±0.01c	511.38±2.01b	8.58±0.12b	3.25±0.05c

注:在果实或叶片组织下,同列不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)。

Note: Different lowercase letters in the same column under fruit or leaf tissue indicated significant differences among different treatments ($P<0.05$).



注:柱形图上方不同字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)。下同。

Note: Different letters above columns indicate statistical significances at $P<0.05$ among treatments.

图 5 施钾对‘瑞雪’果实发育过程中可溶性糖含量的影响

Fig.5 Effects of potassium on soluble sugar content of fruit during ‘Ruixue’ fruit development

随着‘瑞雪’果实的生长发育,果实中的果糖含量呈现出逐渐上升的趋势。在花后 75 d 以后,T2 处理的果实果糖含量均显著高于其他处理,并且在果实成熟期时果糖含量最高,含量为 $127.38 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 。说明叶面喷 K_2SO_4 有利于‘瑞雪’果实果糖的积累,且存在喷施钾肥最适浓度。

在花后 45 d 时,果实中山梨醇的含量最高,含量为 $5.396 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$;在花后 105 d 时,山梨醇含量最低,为 $1.65 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$,因此山梨醇的含量呈现先降低后升高的趋势。花后 75~135 d,各个处理对山梨醇含量的影响并不显著。说明叶面喷施 K_2SO_4 对于发育期果实中山梨醇含量并无明显影响。

2.4 喷施 K_2SO_4 对‘瑞雪’果实发育过程中糖代谢相关酶活性的影响

如图 6 所示,随着‘瑞雪’果实的生长发育,酸

性转化酶的活性呈现出逐渐下降、最终趋于稳定的趋势。花后 45~135 d,酸性转化酶在 T2 处理后的活性显著高于 CK 处理;花后 180 d 时,T2 处理的酸性转化酶活性虽然高于 CK,但差异并不显著。这就说明在幼果期和果实发育期叶面喷施 K_2SO_4 可以显著提高‘瑞雪’果实中酸性转化酶活性,但在果实成熟期,喷施钾肥对酸性转化酶活性影响较小。

在果实发育进程中,中性转化酶活性随时间逐渐降低(图 6)。各个处理和 CK 的差异并不显著,说明喷施钾肥对‘瑞雪’果实发育过程中中性转化酶活性影响不大。

随着‘瑞雪’果实的生长发育,蔗糖合酶的活性逐渐降低并趋于稳定(图 6)。在幼果期(花后 45 d),各处理与 CK 的蔗糖合酶活性并无显著差异;花后 75~180 d,相比于 CK,各处理的酶活性多数显著

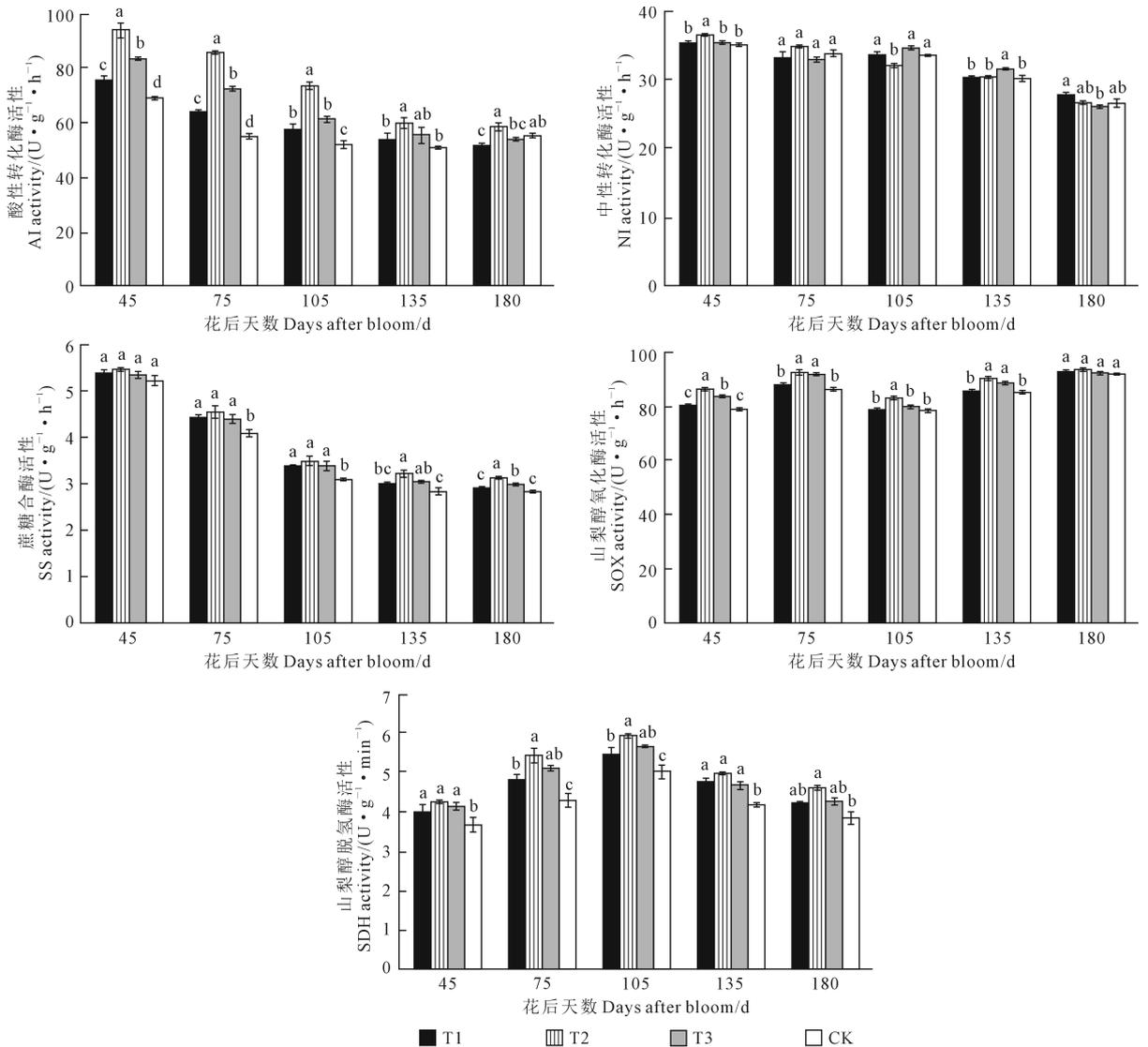


图 6 施钾对‘瑞雪’果实发育过程中糖代谢相关酶活性的影响

Fig.6 Effects of potassium on activities of sugar metabolism-related enzymes during ‘Ruixue’ fruit development

提高。说明在果实发育前期喷施钾肥对果实的蔗糖合酶活性影响不大,而在果实发育中、后期,钾肥可以显著提升该酶活性。

‘瑞雪’果实山梨醇氧化酶活性呈现出“升高-降低-升高”的变化趋势(图 6)。喷钾对于山梨醇氧化酶活性的影响与其对酸性转化酶活性的影响类似。T2 处理的山梨醇氧化酶活性在各时期均为最高,并且在花后 45~135 d, T2 处理的酶活性均显著高于 CK。在花后 180 d(果实成熟)时,各个处理之间并未有显著差异, T2 处理的酶活性仅仅比 CK 高 2.08%。说明在果实发育期喷施 K_2SO_4 可以提高山梨醇氧化酶活性,但在果实接近成熟期时喷钾处理对于该酶活性影响较小。

山梨醇脱氢酶活性随着果实的生长发育表现出先升高后降低的趋势,并且各处理的酶活性均高于 CK(图 6)。在花后 45~135 d, CK 处理山梨醇脱氢酶活性均显著低于 K_2SO_4 处理的酶活性。在花后 180 d, T2 处理显著高于 CK, 比 CK 高 19.10%。除花后 75 d 和花后 105 d 时, T1 和 T2 处理之间存在显著差异外,其余各施钾处理之间在整个果实发育期并无显著差异。说明在果实发育期内,叶面喷施 K_2SO_4 可以提高山梨醇脱氢酶的活性,但是不同浓度 K_2SO_4 处理对于酶活性的影响并不相同。

2.5 不同生长发育时期喷施 K_2SO_4 与‘瑞雪’果实中可溶性糖含量及糖代谢相关酶活性的相关性分析

2.5.1 不同发育时期施钾与果实可溶性糖含量的相关性分析

如表 2 所示,施钾与果实中蔗糖含量在花后 105 d 具有显著正相关关系($r_{105DAB} = 0.584^*$, DAB 表示花后天数);与果糖含量在花后 75 d 具有显著正相关关系($r_{75DAB} = 0.651^*$);与葡萄糖含量在花后 45 d 和 75 d 具有极显著正相关关系($r_{45DAB} = 0.879^{**}$, $r_{75DAB} = 0.893^{**}$),在花后 135 d 具有显著正相关关系($r_{135DAB} = 0.603^*$);与山梨醇含量在花后 180 d 具有极显著负相关关系($r_{180DAB} = -0.861^{**}$)。

2.5.2 不同发育时期施钾与果实糖代谢相关酶活性的相关性分析

如表 3 所示,施钾与果实中的酸性转化酶活性在花后 45 d 和 75 d 具有显著正相关关系($r_{45DAB} = 0.682^*$, $r_{75DAB} = 0.681^*$);与中性转化酶活性在花后 135 d 具有极显著正相关关系($r_{135DAB} = 0.763^{**}$);与山梨醇氧化酶活性在花后 45 d 和 75 d 具有极显著正相关关系($r_{45DAB} = 0.717^{**}$, $r_{75DAB} = 0.880^{**}$),在花后 135 d 具有显著正相关关系

($r_{135DAB} = 0.700^*$);与山梨醇脱氢酶活性在花后 75 d 和 105 d 具有显著正相关关系($r_{75DAB} = 0.689^*$, $r_{105DAB} = 0.657^*$);与蔗糖合酶活性在花后 135 d 具有显著正相关关系($r_{135DAB} = 0.594^*$),在花后 180 d 具有极显著正相关关系($r_{180DAB} = 0.739^{**}$)。

表 2 不同发育时期施钾与果实可溶性糖含量的相关系数
Table 2 Correlation coefficients between potassium and fruit soluble sugar contents in different periods during apple fruit development

花后天数 Days after bloom	蔗糖 Starch	果糖 Fructose	葡萄糖 Glucose	山梨醇 Sorbitol
45	0.451	0.469	0.879 ^{**}	0.392
75	0.288	0.651 [*]	0.893 ^{**}	-0.176
105	0.584 [*]	0.414	0.543	0.106
135	0.404	0.418	0.603 [*]	0.009
180	0.428	0.116	0.523	-0.861 ^{**}

注:表中*表示差异显著($P < 0.05$),**表示差异极显著($P < 0.01$)。下同。

Note: * indicate significant differences ($P < 0.05$), ** indicate extremely significant differences ($P < 0.01$). The same below.

表 3 不同发育时期施钾与糖代谢相关酶活性的相关系数
Table 3 Correlation coefficients between potassium and activities of sugar metabolism-related enzyme in different periods during apple fruit development

花后天数 Days after bloom	酸性转 化酶 AI	中性转 化酶 NI	山梨醇 氧化酶 SOX	山梨醇脱 氢酶 SDH	蔗糖合酶 SS
45	0.682 [*]	0.286	0.717 ^{**}	0.457	0.304
75	0.681 [*]	-0.057	0.880 ^{**}	0.689 [*]	0.455
105	0.542	0.255	0.487	0.657 [*]	0.490
135	0.512	0.763 ^{**}	0.700 [*]	0.448	0.594 [*]
180	0.129	-0.418	0.271	0.464	0.739 ^{**}

3 讨论

3.1 钾对‘瑞雪’果实品质的影响

钾是植物进行生命活动所必需的元素之一,在植物细胞中以阳离子的形式大量存在^[12]。钾对于果实品质形成和产量的提升有着积极的作用^[13]。前人研究发现,喷施适当浓度的钾肥可以有效提高果实单果质量、硬度及可溶性固形物含量等^[14-15]。本研究的结果表明,叶面喷施 K_2SO_4 可以显著提高‘瑞雪’苹果果实的单果质量、硬度和可溶性固形物含量,这也与温志静^[16]、薛文辉^[17]和 Zhang 等^[18]得出的关于钾在其他苹果品种上对果实品质影响的结论一致。但是施钾与果实硬度之间的关系还存在争议,本研究发现,施钾可以显著提高‘瑞雪’果实的硬度,而 Fallahi E 等^[19]、湛琛^[20]研究认为施钾会显著降低果实硬度。这可能是由于苹果品种不同而产生了不同的结论。施钾导致果实的钙含量

下降,使得果实硬度降低。此外,钾促进果实成熟导致细胞壁物质降解也是果实硬度降低的原因之一^[21-22]。钾对果实硬度的影响是受到施钾种类、方式、时间及浓度等多个因素的综合作用,其具体机制目前还不清楚,需要进一步研究。在本研究中,T2处理对于‘瑞雪’果实的单果质量、硬度和可溶性固形物提升最为显著,T3处理对于可滴定酸的降低作用最为明显。这就说明叶面钾肥对‘瑞雪’的单果质量、硬度和可溶性固形物含量等指标的影响具有最适浓度,并没有呈现出随钾肥浓度升高,单果质量、硬度和可溶性固形物含量随之升高的趋势,这与郭志刚^[23]在‘元帅’苹果上和张弦^[24]在‘嘎啦’苹果上的研究结论一致。

3.2 钾对‘瑞雪’果实和新梢叶片矿质含量的影响

果树对钾肥的吸收利用会影响叶片和果实中的其他矿质元素含量,进而影响果树的生命活动和果实的品质形成^[16, 25]。在本研究中,叶面喷施钾肥显著提高了‘瑞雪’果实中大量元素N和K以及微量元素Ca和Mg的含量,而P的含量变化不大;在新梢叶片中N、P、K、Ca和Mg的含量均显著升高。武晓^[26]研究发现钾肥可以显著提高黄冠梨果实和叶片中N、P、K含量,这与本试验的研究结论基本一致。施钾后‘瑞雪’果实中P含量未出现显著变化,可能是由于试验材料不同或叶面钾肥浓度较低导致果实中P含量的变化不大。在‘元帅’苹果上研究发现,施钾处理后新梢叶片的Ca、Mg含量显著低于对照^[23],而这与本试验中‘瑞雪’苹果施钾处理后新梢叶片Ca、Mg含量显著升高所得出的结果正好相反。这可能是因为 K^+ 与 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 之间既存在协同作用又存在拮抗作用,而由于果树品种不同,新梢叶片适宜的 K^+ 浓度不同,高浓度 K^+ 抑制吸收,低浓度促进吸收,这会影响 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 离子的吸收,从而导致产生不同的结果。此外,施钾方式对于新梢叶片的Ca、Mg含量也会有极大的影响,叶面喷施直接作用于叶片,而土施钾肥则是作用于根系,再转运至叶片之中。

3.3 钾对‘瑞雪’果实糖代谢的影响

可溶性糖是影响果实品质的重要因素之一,糖的含量和种类都会决定着果实的甜度和风味。本研究结果表明,‘瑞雪’果实中主要包含4种可溶性糖,含量由高到低分别是果糖、蔗糖、葡萄糖和山梨醇。叶面喷施钾肥可以提高‘瑞雪’果实中果糖、蔗糖、葡萄糖的含量,这说明钾肥可以促进这几种糖的积累,这与郭志刚^[23]在‘元帅’苹果上和吴翠云^[27]在骏枣上的研究结论一致。在本研究中,‘瑞

雪’果实中 K^+ 增强了糖代谢相关酶的活性,影响淀粉和各种糖类的合成和分解,进而对果糖、蔗糖和葡萄糖的积累有促进作用^[28]。‘瑞雪’果实的山梨醇含量在整个果实发育期呈先下降再升高的变化趋势,但钾肥对山梨醇含量的影响并不显著,这与郭志刚^[23]在‘元帅’苹果上的研究结论一致。但是温志静^[16]认为钾肥会降低‘嘎啦’苹果果实中山梨醇的含量,申长卫^[29]则认为钾肥可以促进梨果实中山梨醇的含量。因此,物种或品种不同,钾肥种类、施肥方式以及施肥量等因素均会对山梨醇的含量产生影响。

代谢酶的活性受到 K^+ 的调控, K^+ 是许多种酶的活化剂^[30]。本研究对糖代谢相关酶的活性进行了测定。研究表明,钾提高了NI和SDH在‘瑞雪’果实整个发育期的活性,分别提高了SOX在花后45~135 d和SS在75~180 d的活性,而钾对于NI活性的影响并没有明显的规律。叶面喷施钾肥会提高果实内糖代谢相关酶的活性,这可能与 K^+ 是代谢酶的辅因子有关^[28]。另一方面,Oura等^[31]研究发现 K^+ 并不会直接促进AI的活性;Bantog等^[32]认为转录水平会决定SDH的活性。由此可以推测, K^+ 可能是在转录水平上影响‘瑞雪’果实糖代谢相关酶活性的高低。

可溶性糖含量的变化与糖代谢相关酶密切相关^[33]。本试验研究结果表明SDH的活性在‘瑞雪’果实的整个发育期呈现出先上升后下降的趋势,这可能是由于在果实发育前期,果糖含量较少,山梨醇含量较高,SDH活性升高,将山梨醇转化为果糖;而‘瑞雪’果实发育后期果糖含量上升,山梨醇含量也升高,两者的可逆反应减缓,SDH活性下降。有研究发现,SOX活性在整个苹果果实发育期内变化不大^[34],这与在‘瑞雪’果实发育过程中SOX活性变化得出的结论一致。这可能是由于SOX活性较低,对于果实糖积累的影响较小,导致该酶活性变化不大。本研究结果表明,AI、NI和SS这3种酶的活性随着‘瑞雪’果实的发育均呈现出下降趋势,张弦^[24]和张雯^[5]在‘嘎啦’苹果上也得出了类似结论。这可能是因为‘瑞雪’果实在发育的前中期果糖和葡萄糖含量较低,蔗糖分解为葡萄糖和果糖的反应加快,酶活性升高;而发育后期的果糖和葡萄糖含量升高,抑制了蔗糖的分解,进而导致酶活性降低。

4 结 论

通过叶面喷施不同浓度钾肥研究了钾对于‘瑞雪’苹果果实品质及糖代谢的影响,所得结论如下:

(1)通过对单果质量、果实硬度、可溶性固形物和可滴定酸含量等指标的比较,综合来看,叶面喷施 0.3%的 K_2SO_4 (T2 处理)对于‘瑞雪’苹果果实品质提升效果最佳。

(2)钾通过提高果实整个发育期内 SOX 和 SDH 活性、幼果期和果实发育期 SI 的活性以及果实发育中后期 SS 的活性,促进了果糖、蔗糖和葡萄糖的积累。钾通过对‘瑞雪’果实糖代谢相关酶活性的影响,进而对果实糖代谢产生了影响。相关性分析结果表明,施钾与‘瑞雪’果实中的葡萄糖、蔗糖、果糖和山梨醇均存在着显著相关性,与 AI、NI、SOX、SDH 和 SS 活性均存在显著相关性。这也进一步说明施钾可以明显提升‘瑞雪’果实的可溶性糖含量。

参考文献:

- [1] 赵政阳, 高华, 王雷存. 晚熟苹果新品种——瑞阳、瑞雪[J]. 科学种养, 2018, (3): 56-57.
ZHAO Z Y, GAO H, WANG L C. New varieties of late ripening apple-Ruiyang and Ruixue[J]. Scientific Breeding, 2018, (3): 56-57.
- [2] FELIZIANI E, SMILANICK J L, MARGOSAN D A, et al. Preharvest fungicide, potassium sorbate, or chitosan use on quality and storage decay of table grapes[J]. Plant Disease, 2013, 97(3): 307-314.
- [3] 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.
JIN H C, ZHANG L S, LI B Z, et al. Effect of potassium on the leaf nutrition and quality of Red Fuji Apple[J]. Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica, 2007, 16(3): 100-104.
- [4] KAACK K, PEDERSEN H L. Effects of potassium, phosphorus and nitrogen fertilization on endogenous ethylene and quality characteristics of apples (*Malusdomestica* L.)[J]. Journal of Plant Nutrition, 2014, 37(7): 1148-1155.
- [5] 张雯. 钾对苹果果实品质的影响及其与 6-磷酸海藻糖代谢途径的关系[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2017.
ZHANG W. Effects of potassium on fruit quality and its association with metabolic pathway of trehalose 6-phosphate in apple [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2017.
- [6] LESTER G E, JIFON J L, MAKUS D J. Supplemental foliar potassium applications with or without a surfactant can enhance netted muskmelon quality[J]. HortScience, 2006, 41(3): 741-744.
- [7] 李娅楠, 闫雷玉, 张波, 等. 不同苹果品种果实糖酸组分特征研究[J]. 果树学报, 2021, 38(11): 1877-1889.
LI Y N, YAN L Y, ZHANG B, et al. A study on sugar and organic acid components in different apple cultivars[J]. Journal of Fruit Science, 2021, 38(11): 1877-1889.
- [8] KELLER F, LUDLOW M M. Carbohydrate metabolism in drought-stressed leaves of pigeonpea (*Cajanuscajan*) [J]. Journal of Experimental Botany, 1993, 44(8): 1351-1359.
- [9] PARK S W, SONG K J, KIM M Y, et al. Molecular cloning and characterization of four cDNAs encoding the isoforms of NAD-dependent sorbitol dehydrogenase from the Fuji apple[J]. Plant Science, 2002,

162(4): 513-519.

- [10] YAMAGUCHI H, KANAYAMA Y, SOEJIMA J, et al. Changes in the amounts of the NAD-dependent sorbitol dehydrogenase and its involvement in the development of apple fruit[J]. Journal of the American Society for Horticultural Science Jashs, 1996, 121(5): 848-852.
- [11] LOWELL C A, TOMLINSON P T, KOCH K E. Sucrose-metabolizing enzymes in transport tissues and adjacent sink structures in developing citrus fruit [J]. Plant Physiology, 1989, 90(4): 1394-1402.
- [12] GRABOV A. Plant KT/KUP/HAK potassium transporters: single family-multiple functions[J]. Annals of Botany, 2007, 99(6): 1035-1041.
- [13] KANAI S, OHKURA K, ADU-GYAMFI J J, et al. Depression of sink activity precedes the inhibition of biomass production in tomato plants subjected to potassium deficiency stress[J]. Journal of Experimental Botany, 2007, 58(11): 2917-2928.
- [14] GHANEM M, MIMOUN M B. Effect of potassium foliar spray on two plum trees cultivars: ‘Strival’ and ‘Black Star’ [J]. Acta Horticulturae, 2010, 874(874): 83-90.
- [15] JIFON J L, LESTER G E. Effect of foliar potassium fertilization and source on cantaloupe yield and quality[J]. Better Crops, 2011, 95(1): 13-15.
- [16] 温志静. 叶面喷施不同浓度的氮、钾肥对‘嘎拉’苹果糖代谢的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2017.
WEN Z J. Effects of foliar spraying different concentrations of nitrogen and potassium fertilizer on sugar metabolism in ‘Gala’ apple [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2017.
- [17] 薛文辉. 施用钾肥对苹果产量及果实品质的影响[J]. 现代农业科技, 2015, (5): 103-104.
XUE W H. Influence of potassium fertilizer application on yield and fruit quality of apple[J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2015, (5): 103-104.
- [18] ZHANG W, ZHANG N S, ZHAO J J, et al. Potassium fertilization improves apple fruit (*Malusdomestica* Borkh. Cv. Fuji) development by regulating trehalose metabolism[J]. The Journal of Horticultural Science and Biotechnology, 2017, 92(5): 539-549.
- [19] FALLAHI E, FALLAHI B, NEILSEN G H, et al. Effects of mineral nutrition on fruit quality and nutritional disorders in apples[J]. Acta Horticulturae, 2010, 868(868): 49-60.
- [20] 谌琛. 长期施钾对苹果产量、品质和耐贮性的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2015.
SHEN C. Effect of long-term potassium fertilizer application on apple yield, quality and storability of Fuji apple [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2015.
- [21] LIU H, CHEN F S, LAI S J, et al. Effects of calcium treatment and low temperature storage on cell wall polysaccharide nanostructures and quality of postharvest apricot (*Prunusarmeniaca*) [J]. Food Chemistry, 2017, 225: 87-97.
- [22] 郭丹, 韩英群, 魏鑫, 等. 1-MCP 处理对“岳帅”苹果冷藏软化及相关生理指标的影响[J]. 食品科学, 2017, 38(17): 266-272.
GUO D, HAN Y Q, WEI X, et al. Effect of 1-MCP treatment on softening and related physiological indices in “Yueshuai” apples during cold storage[J]. Food Science, 2017, 38(17): 266-272.