

氯吡苯脲对台农1号芒果果实糖分及相关酶活性的影响

袁辉林¹, 郭利军², 郭彬¹, 肖朝霞¹, 刘金霞¹

(1. 海南省农民科技教育培训中心, 海口 571100; 2. 海南省农业科学院热带果树研究所, 海口 571100)

摘要:为明确喷施不同质量浓度氯吡苯脲(CPPU)对芒果果实糖分代谢和相关酶活性的影响,探索CPPU对芒果蔗糖代谢的影响机制,以台农1号芒果植株为材料,分别于谢花后7、14 d喷施64 mg/L和256 mg/L的CPPU,以喷施清水为对照(CK),于成熟后测定果实淀粉、蔗糖、葡萄糖和果糖含量以及酸性转化酶(AI)、蔗糖磷酸合成酶(SPS)和腺苷二磷酸葡萄糖焦磷酸化酶(AGP)、结合态淀粉合成酶(GBSS)、淀粉分支酶(SBE)、可溶性淀粉合成酶(SSS)、总淀粉酶的活性,并分析果实糖组分与酶活性的相关性。结果表明,与CK相比,64 mg/L的CPPU处理对芒果果实的蔗糖、果糖和葡萄糖含量无显著影响;而256 mg/L CPPU处理则显著降低果糖和蔗糖含量,并显著提高淀粉含量。2个CPPU处理均显著提高芒果AGP的活性,同时降低SPS和AI的活性,并且256 mg/L的CPPU处理达到显著水平。果实糖组分与酶活性相关分析显示,淀粉含量与AGP活性呈正相关,蔗糖和果糖含量与SPS活性呈显著正相关,且蔗糖和果糖含量间呈极显著正相关;高质量浓度256 mg/L的CPPU处理降低果实糖组分含量的机理可能是通过降低SPS活性、降低蔗糖含量,同时通过提高AGP活性、增加果实淀粉含量,从而延缓果实淀粉向糖分转化进程。

关键词:台农1号芒果; CPPU; 淀粉; 糖分代谢; 酶活性

中图分类号: S667.7 文献标识码: A 文章编号: 1002-2481(2024)05-0124-06

Effects of CPPU on Sugar and Related Enzyme Activities of Mango Variety Tainong 1

YUAN Huilin¹, GUO Lijun², GUO Bin¹, XIAO Zhaoxia¹, LIU Jinxia¹

(1. Hainan Education and Training Center for Agricultural Science and Technology, Haikou 571100, China;

2. Institute of Tropical Fruit Trees, Hainan Academy of Agricultural Sciences, Haikou 571100, China)

Abstract: In order to clarify the effects of spraying different concentrations of Forchlorfenuron(CPPU) on sugar metabolism and related enzyme activities in mango plant, and to explore the influence mechanism of CPPU on mango sucrose metabolism, in this study, the fruit of mango variety Tainong 1 was used as the material, 64 mg/L of CPPU and 256 mg/L of CPPU were sprayed at 7 d and 14 d after flower shedding, respectively, and spraying clear water was taken as the control(CK). After picking, the fruit starch, sucrose, glucose, and fructose content and acid conversion enzyme(AI), sucrose phosphate synthase(SPS) and adenosine diphosphate glucose pyrophosphorylase(AGP), bound starch synthetase(GBSS), starch branching enzyme(SBE), soluble starch synthase(SSS), total amylase activity were determined, then the correlation between the fruit sugar component and the enzyme activity was analyzed. The results indicate that compared to CK, 64 mg/L concentration of CPPU treatment had no significant effect on the sucrose, fructose, and glucose content of mango fruit. However, 256 mg/L concentration of CPPU treatment significantly reduced the fructose and sucrose content, and significantly increased the starch content. The two treatments of CPPU significantly increased the activity of mango AGP, and simultaneously reduced the activities of both SPS and AI, in particular, the 256 mg/L concentration of CPPU treatment reached a significant level. The correlation analysis results of fruit sugar component and enzyme activity showed that a positive correlation between starch content and AGP activity, the content of sucrose and fructose was significantly positively correlated with SPS activity, and the sucrose content was extremely significantly positively correlated with the fructose content. The mechanism by which high-quality concentration of 256 mg/L CPPU treatment reduced fruit sugar content might be through reducing SPS activity and sucrose content, while increasing AGP activity and fruit starch content, thereby delaying the conversion process of fruit starch to sugar.

Key words: mango variety Tainong 1; CPPU; starch; sugar metabolism; enzymatic activity

收稿日期: 2024-01-02

基金项目: 海南省自然科学基金项目(320RC753); 海南省芒果产业技术体系(HNARS-07)

作者简介: 袁辉林(1984-), 男, 湖南新化人, 正高级农艺师, 硕士, 主要从事农业技术推广工作。

通信作者: 郭利军(1983-), 男, 河北蠡县人, 副研究员, 硕士, 主要从事果树栽培研究工作。

芒果(*Mangifera indica* L.)是漆树科常绿大乔木,原产于印度半岛至东南亚一带,被誉为“热带水果之王”。海南省2023年统计年鉴显示,截至2022年,全省芒果种植面积达到7.18万 hm^2 ,收获面积达到5.94万 hm^2 ,产量达到84.59万t,产值超70亿元,种植面积和产量均位居全国第3,但产值居全国之首。氯吡脲(CPPU)是一种新型高效细胞分裂素类生长调节剂,有促进细胞分裂、促进着果和果实膨大等作用^[1-3],已被广泛应用于水果、蔬菜、粮食等不同种类农作物和烟草等经济作物上。已有研究显示,合理使用CPPU能显著促进菠萝、葡萄、猕猴桃、黄瓜、水稻等多种作物增加产量,提高作物品质,改善果实风味^[4-10]。但当前芒果生产中由于部分果农片面追求产量而滥用CPPU,造成芒果品质和风味下降,严重的甚至出现了采后风味变淡、果实畸形,且成熟后表皮不转色等一系列问题。

李丽平等^[11]研究认为,CPPU促进果实膨大的机理可能通过细胞分裂素信号途径直接激活赤霉素生物合成基因的表达,促进赤霉素生物合成,进而促进果实膨大。而目前CPPU对糖代谢的影响研究国内寥寥无几,仅本课题组前期研究表明,256 mg/L的CPPU会严重降低果实可溶性固形物含量,同时增加可滴定酸含量近1倍,降低固酸比1倍多,导致芒果果实风味严重变淡^[12]。对梨的研究也表明,CPPU能抑制梨果实中淀粉向可溶性糖的转化,同时提高淀粉酶、转化酶和蔗糖合成酶活性,降低蔗糖磷酸合成酶的活性,从而影响果实风味^[13]。目前,关于CPPU对芒果糖代谢影响的研究还未见报道。

本试验以海南主栽的小果型芒果品种台农1号为研究对象,在前期研究基础上^[12],开展64 mg/L和256 mg/L等2个浓度CPPU对果实糖分及关键酶活性影响研究,以期从生理层面探索CPPU对芒果蔗糖代谢的影响机制,从而为芒果生产中科学合理施用CPPU提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 试验地概况

本试验在海南省乐东县黄流镇佛老村(东经108.79°,北纬18.54°)进行,海拔30 m。该地属热带季风气候,年均气温25.5℃,年均降雨量1 000~1 300 mm。土壤类型为滨海沙土,pH值为5.5~6.5。

1.2 试验材料

供试CPPU购于上海生工工程有限公司。试

验对象为10年生台农1号芒果植株。

1.3 试验方法

果园常规田间管理,生长结果正常。芒果开花后至采收,仅进行防病虫药物喷施,无任何处理。选取树势、冠幅、花期相对一致的1株芒果植株,分别于花后7、14 d用电动喷雾器喷施64、256 mg/L CPPU,以喷施清水(CK)为对照,每株喷施3 L。每个处理重复3株。

1.4 测定项目及方法

于谢花后90 d采摘,随后现场切取适量果肉,快速装入提前备好的锡箔纸后,马上放入液氮,返回实验室后置于-80℃冰箱中保存备用。采用碘显色法测定果肉淀粉含量^[14]。参考李雯等^[15]方法测定总淀粉酶活性。结合态淀粉合成酶(GBSS)活性测定参照龚魁杰等^[16]的方法。淀粉分支酶(SBE)活性测定参照KUBO等^[17]的方法。腺苷二磷酸葡萄糖焦磷酸化酶(AGP)活性测定参照龚魁杰等^[16]的方法。可溶性淀粉合成酶(SSS)活性测定参照梁建生等^[18]的方法。蔗糖、果糖、葡萄糖等可溶性糖测定采用液相色谱法,具体参照张秀梅等^[19]的方法。酸性转化酶(AI)和中性转化酶(NI)活性测定参照王惠聪等^[20]的方法。蔗糖磷酸合成酶(SPS)活性测定参考王永章等^[21]的方法。

1.5 数据分析

通过Excel 2013进行数据整理和制图,采用SAS 9.1.3软件对测定结果进行方差分析,用皮尔逊相关分析法进行相关性分析。

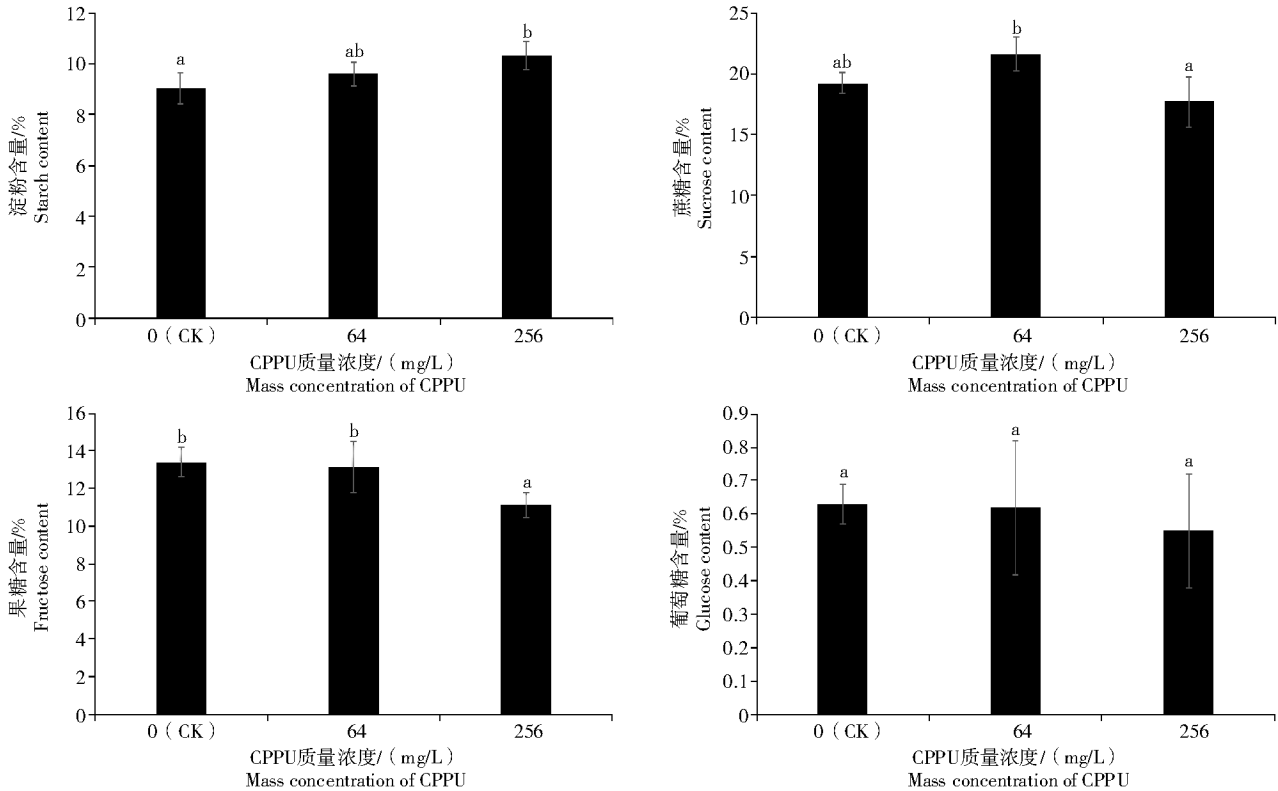
2 结果与分析

2.1 CPPU对芒果果实淀粉及糖分含量的影响

从图1可以看出,每克鲜质量果肉淀粉含量平均达9.04%,即90.4 mg,蔗糖含量19.24 mg,果糖含量13.41 mg,葡萄糖含量水平极低,约0.63 mg。这表明青熟期芒果果实淀粉含量较高,可溶性糖分以蔗糖、果糖为主,葡萄糖含量很低。同时,与CK相比,64 mg/L CPPU处理的淀粉含量增加了0.56个百分点,达到显著水平($P<0.05$);蔗糖含量增加2.38 mg,差异不显著;果糖含量减少0.3 mg,差异不显著;葡萄糖含量减少0.01 mg,差异不显著。256 mg/L CPPU处理的淀粉含量增加1.29个百分点,蔗糖含量减少1.15 mg,果糖含量减少2.31 mg,差异均显著($P<0.05$);葡萄糖含量减少0.08 mg,差异不显著。可见,随着喷施CPPU浓度的提高,淀粉含量也随之提高,蔗糖含量先增加后减少,果糖和

葡萄糖含量则随之减少。综上可知,64 mg/L CPPU 处理能显著增加了蔗糖含量,但对淀粉、果糖含量的影响很小,葡萄糖基本没有变化;256 mg/L CPPU 处理能显著增加了淀粉含量($P<0.05$),降低

了蔗糖和葡萄糖含量,显著降低果糖含量。随着喷施 CPPU 浓度的提高,淀粉含量也提高,呈正相关,但蔗糖、果糖和葡萄糖却表现各异。



柱形图上不同小写字母表示不同处理在 $P<0.05$ 差异显著。下同

Different lowercase letters in the figure indicated significant differences between treatments ($P<0.05$). The same as below

图1 CPPU对台农1号芒果淀粉及糖分含量的影响

Fig.1 Effect of CPPU on the starch and sugar content in Tainong 1

2.2 CPPU 处理对芒果有关酶活性的影响

由图2可知,与CK相比,64 mg/L CPPU 处理的AI活性降低了 $20.45 \mu\text{g}/(\text{g}\cdot\text{min})$,差异达显著水平($P<0.05$);256 mg/L CPPU 处理的AI活性降低了 $8.73 \mu\text{g}/(\text{g}\cdot\text{min})$,差异不显著。64 mg/L CPPU 处理的SPS活性降低了 $6.75 \mu\text{g}/(\text{g}\cdot\text{min})$,差异不显著;256 mg/L CPPU 处理的SPS活性降低了 $41.45 \mu\text{g}/(\text{g}\cdot\text{min})$,差异显著($P<0.05$)。64 mg/L CPPU 处理后,AGP活性水平提高了 $4.4 \mu\text{g}/(\text{g}\cdot\text{min})$,差异显著($P<0.05$);256 mg/L CPPU 处理后,AGP活性提高了 $6.42 \mu\text{g}/(\text{g}\cdot\text{min})$,差异显著($P<0.05$)。64 mg/L CPPU 处理的GBSS活性提高了 $1.69 \mu\text{g}/(\text{g}\cdot\text{min})$,256 mg/L CPPU 处理的GBSS活性提高了 $1.7 \mu\text{g}/(\text{g}\cdot\text{min})$,差异均不显著。64 mg/L CPPU 处理的SBE活性提高了 $5.91 \mu\text{g}/(\text{g}\cdot\text{min})$,256 mg/L CPPU 处理的SBE活性提高了 $8.64 \mu\text{g}/(\text{g}\cdot\text{min})$,差异均不显著。64 mg/L CPPU 处理的

SSS活性降低了 $0.9 \mu\text{g}/(\text{g}\cdot\text{min})$,256 mg/L CPPU 处理的SSS活性提高了 $0.52 \mu\text{g}/(\text{g}\cdot\text{min})$,差异均不显著。64 mg/L CPPU 处理的总淀粉酶活性提高了 $0.01 \mu\text{g}/(\text{g}\cdot\text{min})$,差异显著($P<0.05$);256 mg/L CPPU 处理的总淀粉酶活性则没有提高。可见,随着喷施 CPPU 浓度的增加,AI活性先降低后升高,SPS活性呈下降趋势,AGP活性呈上升趋势,GBSS活性呈上升趋势,SBE活性呈上升趋势,SSS活性先下降后升高,总淀粉酶活性则先上升后下降。综上表明,64 mg/L CPPU 处理和256 mg/L CPPU 处理,均对具有淀粉水解功能的GBSS、SBE、SSS和总淀粉酶活性无显著影响,但却显著提升了AGP活性,且64 mg/L CPPU 处理后,AI活性下降程度达到了显著水平,256 mg/L CPPU 处理的SPS活性也达到了显著水平。随着喷施 CPPU 浓度的增加,AGP、SBE活性提升,SPS活性则降低。

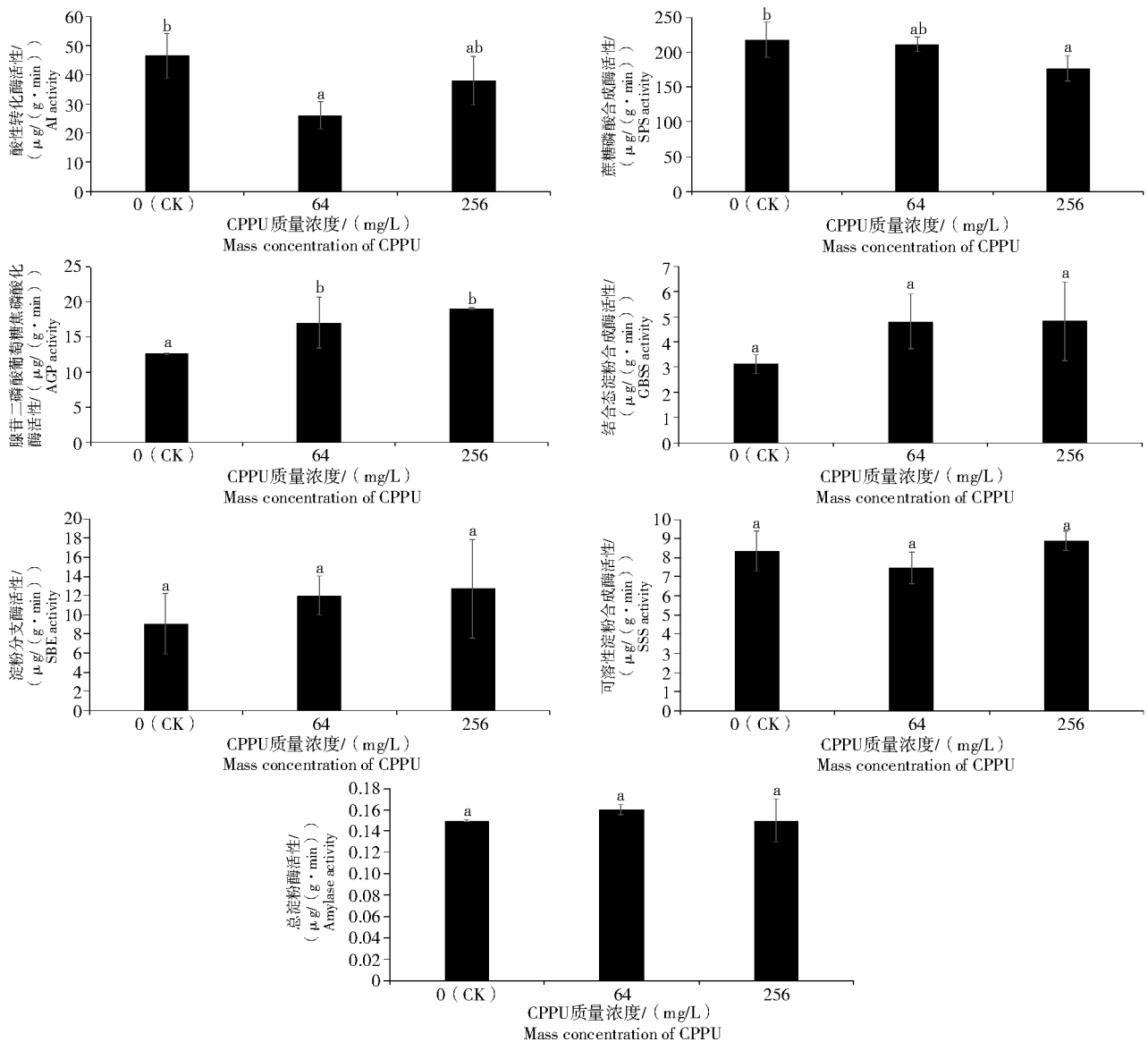


图2 CPPU对台农1号芒果有关酶活性的影响
Fig.2 Effect of CPPU on related enzyme activities in Tainong 1

2.3 相关性分析

从表1可以看出,果实糖组分积累和酶活性的相关性分析结果显示,256 mg/L CPPU处理条件下,淀粉含量与AGP酶活性相关性较强,相关系数为0.70,但未达到显著相关水平;蔗糖含量与SPS

酶活性呈极显著相关($P < 0.01$),相关系数达0.95;果糖含量与蔗糖含量呈极显著相关($P < 0.01$),相关系数达0.94,同时果糖含量也与SPS酶活性显著相关($P < 0.05$),相关系数达0.91。

表1 256 mg/L CPPU处理条件下果实糖组分积累和酶活性的相关性
Tab.1 Correlation between accumulation of sugar components and enzyme activity in fruit under 256 mg/L CPPU treatment

指标 Index	蔗糖含量 Sucrose content	果糖含量 Fructose content	淀粉含量 Starch content	酸性转化酶活性 AI activity	蔗糖磷酸合成酶 活性 SPS activity	腺苷二磷酸葡萄糖 焦磷酸化酶活性 AGP activity
淀粉含量 Starch content	-0.29	-0.36	1.00	0.54	-0.45	0.70
蔗糖含量 Sucrose content	1.00	0.94**	-0.29	-0.26	0.95**	-0.19
果糖含量 Fructose conten	0.94**	1.00	-0.36	-0.22	0.91*	-0.11

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

Note: * indicated significant difference($P < 0.05$); ** indicated extremely significant difference($P < 0.01$).

3 结论与讨论

芒果属于呼吸跃变型果实,其糖积累类型为淀粉转化型^[22]。在果实发育过程中,积累非结构糖如淀粉和蔗糖等,淀粉和蔗糖水平决定果实的口感和品质。大量研究表明^[21,23-25],在水果果实发育中单果质量和淀粉酶活性同时增加,在成熟过程中淀粉含量降低,还原糖和非还原糖增加。本研究结果表明,与喷施 CPPU 处理相比,不喷施 CPPU 处理的淀粉含量降低,蔗糖、果糖含量升高,相应糖代谢关键酶活性均有不同程度提高,这与前人研究结果是一致的。在淀粉和糖分含量方面,64 mg/L CPPU 处理能显著增加芒果果肉的蔗糖含量,对淀粉、果糖和葡萄糖含量影响较小,而 256 mg/L CPPU 处理能显著提高淀粉含量,可降低蔗糖、果糖和葡萄糖含量,其中果糖含量显著降低。酶活研究进一步发现,喷施 256 mg/L CPPU 显著提升了 AGP 活性,从而保持了较高水平的淀粉含量,这与唐湘如等^[26]研究结论类似。可见,较高浓度 CPPU(如 256 mg/L)影响芒果果实品质的原因主要是提高 AGP 活性,提高淀粉含量,同时降低蔗糖、果糖含量,延缓果实淀粉向糖分转化的生理进程,但较低水平 CPPU(如 64 mg/L)对果实品质的影响没有达到显著水平。结合态淀粉合成酶、淀粉分支酶、可溶性淀粉合成酶和腺苷二磷酸葡萄糖焦磷酸化酶是淀粉代谢的关键酶,其中腺苷二磷酸葡萄糖焦磷酸化酶(AGP)催化 G-1-P 形成 ADPG 作为合成淀粉的直接底物,是淀粉生物合成过程中的关键酶^[22]。唐湘如等^[26]用 CPPU 喷施水稻,能提高籽粒的 GBSS、SBE、SSS 等的活性。本研究酶活性分析表明,256 mg/L CPPU 处理降低了参与蔗糖分解的 AI 活性,显著降低了参与蔗糖合成的 SPS 活性,显著提高了参与淀粉合成的 AGP 活性,而对参与淀粉分解的相关酶 GBSS、SBE、SSS、 α -淀粉酶和 β -淀粉酶活性影响非常小。同时,从淀粉及糖分的相关性分析结果来看,淀粉含量下降与 AGP 活性相关性最强,达到 0.7,分析认为,256 mg/L CPPU 通过提高 AGP 活性增加果实淀粉含量;同时淀粉含量与 AI 酶活性呈正相关,可能是由喷施 CPPU 降低酸性转化酶活性,降低蔗糖含量分解,进而导致淀粉分解减少所致;此外,与蔗糖磷酸合成酶活性呈负相关,可能是由喷施 CPPU 降低蔗糖磷酸合成酶活性,进而减少蔗糖合成量,从而减少淀粉分解所致。果实糖组分积累和酶活性的相关性分析也显示,蔗糖含量与

SPS 活性呈极显著正相关。由此可知,较高质量浓度(256 mg/L)的 CPPU 显著降低蔗糖磷酸合成酶活性是蔗糖含量下降的主要原因。表明 256 mg/L CPPU 可通过降低 SPS 酶活性和蔗糖含量,同时通过提高 AGP 酶活性增加果实淀粉含量。

源于快速生长的组织总是有高水平的 AI 活性,而 NI 的活性比 AI 的活性低很多^[27-28]。武红霞等^[29]研究表明,在台农和 KRS 芒果果实整个发育期,AI 活性相对较高,NI 活性在整个发育期持续稳定保持很低水平。这与本试验并未能检出 NI 活性结果是一致的,可能是由于 NI 在台农 1 号芒果青熟阶段酶含量或者活性水平很低。

本研究结果表明,喷施较高质量浓度 256 mg/L CPPU 能提高 AGP 酶活性进而加速淀粉合成量,同时降低参与蔗糖分解的 AI 活性和参与蔗糖合成的 SPS 活性,从而降低果实果糖和蔗糖含量,升高淀粉含量,这可能是较高浓度 CPPU 降低果实糖分的主要原因所在。同时研究也表明,喷施 64 mg/L CPPU 对台农 1 号芒果糖分和淀粉含量影响较小。本研究为 CPPU 滥用导致降低果实品质提供了参考依据。

参考文献:

- [1] 张卫炜,杨永珍. 氯吡啶的研究及应用进展[J]. 农药科学与管理,2006,27(5):36-40.
ZHANG W W, YANG Y Z. Advances in research and application of forchlorfenuron[J]. Pesticide Science and Administration, 2006,27(5):36-40.
- [2] United States Environmental Protection Agency. Pesticides fact sheet for forchlorfenuron[R]. Washington: US EPA, 2015: 1-18.
- [3] KIM J G, TAKAMI Y, MIZUGAMI T, et al. CPPU application on size and quality of hardy kiwifruit[J]. Scientia Horticulturae, 2006, 110(2): 219-222.
- [4] 孙凤杰,罗淑芬,颜廷才,等. 氯吡啶处理对莲子细胞壁多糖降解特性的影响[J]. 食品科学, 2019, 40(5): 242-249.
SUN F J, LUO S F, YAN T C, et al. Effect of 1-(2-Chloropyridin-4-yl)-3-phenylurea treatment on degradation characteristics of cell wall polysaccharides in *Lotus* seeds[J]. Food Science, 2019, 40(5): 242-249.
- [5] 郑建立,杨越伟,徐坤,等. 不同 CPPU 浓度处理对蓝莓产量以及果实糖酸的影响[J]. 果树学报, 2021, 41(1): 33-35.
ZHENG J L, YANG Y W, XU K, et al. Effects of different CPPU concentrations on yield sugar and acid content of blueberry[J]. Journal of fruit science, 2021, 41(1): 33-35.
- [6] 张鲁斌,宋康华,贾志伟,等. 氯吡啶(CPPU)处理对采后芒果保鲜及生理效应的影响[J]. 果树学报, 2016, 33(5): 604-611.
ZHANG L B, SONG K H, JIA Z W, et al. Physiological effect of CPPU on delaying senescing of mango fruit during storage[J]. Journal of Fruit Science, 2016, 33(5): 604-611.
- [7] 苏晓兰,童巧云,张雪梅,等. CPPU 对设施栽培玫瑰香葡萄无核化及果实品质的影响[J]. 山西农业科学, 2023, 51(11): 1290-1298.

- SU X L, TONG Q Y, ZHANG X M, et al. Effects of CPPU on seedless and fruit quality of Muscat Hamburg grape in greenhouse[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2023, 51(11): 1290-1298.
- [8] 董金磊, 郭文川. 不同质量浓度氯吡脲对猕猴桃果实理化参数的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2015, 43(10): 145-151.
- DONG J L, GUO W C. Effects of forchlorfenuron concentration on physical and chemical properties of kiwifruits[J]. Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition), 2015, 43(10): 145-151.
- [9] 熊浩, 郑浩, 韩佳欣, 等. CPPU处理对猕猴桃果实品质的影响[J]. 植物科学学报, 2022, 40(1): 74-83.
- XIONG H, ZHENG H, HAN J X, et al. Effects of CPPU treatment on fruit quality in *Actinidia*[J]. Plant Science Journal, 2022, 40(1): 74-83.
- [10] 李运合, 孙光明. 喷施外源CPPU和GA对菠萝果实品质的影响[J]. 热带作物学报, 2009, 30(9): 1252-1255.
- LI Y H, SUN G M. Effect of exogenous CPPU and GA treatments on fruit quality of pineapple[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2009, 30(9): 1252-1255.
- [11] LI L L, LI Q, CHEN B, et al. Identification of candidate genes that regulate the trade-off between seedling cold tolerance and fruit quality in melon (*Cucumis melo* L.) [J]. Horticulture Research, 2023, 10(7): uhad093.
- [12] 郭利军, 范鸿雁, 邓会栋, 等. 氯吡苯脲和吲哚酯对台农1号芒果果实发育及品质的影响[J]. 江苏农业科学, 2016, 44(6): 266-268.
- GUO L J, FAN H Y, DENG H D, et al. Effects of diflubenzuron and indate on fruit development and quality of Tainong No. 1 mango[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2016, 44(6): 266-268.
- [13] 程云. CPPU对梨果实生长发育及生理生化特性的影响[D]. 南京: 南京农业大学, 2007.
- CHENG Y. Effects of CPPU on development and physiological and biochemical characteristics of pear fruits[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2007.
- [14] 徐昌杰, 陈文峻, 陈昆松, 等. 淀粉含量测定的一种简便方法: 碘显色法[J]. 生物技术, 1998, 8(2): 41-43.
- XU C J, CHEN W J, CHEN K S, et al. A simple method for determining the content of starch-iodine colorimetry[J]. Biotechnology, 1998, 8(2): 41-43.
- [15] 李雯, 邵远志, 陈维信. 淀粉酶活性测定方法的改进[J]. 植物生理学通讯, 2005, 41(5): 655-656.
- LI W, SHAO Y Z, CHEN W X. Improved method for determining amylase activity[J]. Plant Physiology Communications, 2005, 41(5): 655-656.
- [16] 龚魁杰, 陈利容, 赵全胜, 等. 鲜食糯玉米采后糖代谢相关酶活性变化[J]. 植物生理学通讯, 2010, 46(11): 1159-1163.
- GONG K J, CHEN L R, ZHAO Q S, et al. Changes of enzyme activities associated with carbohydrate metabolism in postharvest fresh *Zea mays* L. *sinensis* Kulesh[J]. Plant Physiology Communications, 2010, 46(11): 1159-1163.
- [17] KUBO A, FUJITA N, HARADA K, et al. The starch-debranching enzymes isoamylase and pullulanase are both involved in amylopectin biosynthesis in rice endosperm[J]. Plant Physiol, 1999, 121(2): 399-409.
- [18] 梁建生, 曹显祖, 徐生, 等. 水稻籽粒库强与其淀粉积累之间关系的研究[J]. 作物学报, 1994, 20(11): 685-691.
- LIANG J S, CAO X Z, XU S, et al. Studies on the Relationship between the grain sink strength and its starch accumulation in rice (*O. sativa*) [J]. Acta Agronomica Sinica, 1994, 20(11): 685-691.
- [19] 张秀梅, 杜丽清, 谢江辉, 等. 蔗糖代谢相关酶在卡因菠萝果实糖积累中的作用[J]. 果树学报, 2006, 23(5): 707-710.
- ZHANG X M, DU L Q, XIE J H, et al. Roles of sucrose-metabolizing enzymes in accumulation of sugars in Cayenne pineapple fruit[J]. Journal of Fruit Science, 2006, 23(5): 707-710.
- [20] 王惠聪, 黄辉白, 黄旭明. 荔枝果实的糖积累与相关酶活性[J]. 园艺学报, 2003, 30(1): 1-5.
- WANG H C, HUANG H B, HUANG X M. Sugar accumulation and related enzyme activities in the litchi fruit of 'Nuomici' and 'Feizixiao'[J]. Acta Horticulturae Sinica, 2003, 30(1): 1-5.
- [21] 王永章, 张大鹏. 乙烯对成熟期新红星苹果果实碳水化合物代谢的调控[J]. 园艺学报, 2000, 27(6): 391-395.
- WANG Y Z, ZHANG D P. Regulating effects of ethylene on carbohydrate metabolism in 'starkrimson' Apple fruit during the ripening period[J]. Acta Horticulturae Sinica, 2000, 27(6): 391-395.
- [22] 张上隆, 陈昆松. 果实品质形成与调控的分子生理[M]. 北京: 中国农业出版社, 2007: 1-2.
- ZHANG S L, CHEN K S. Molecular physiology of fruit quality development and regulation[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2007: 1-2.
- [23] BERÜTER J. Sugar accumulation and changes in the activities of related enzymes during development of the apple fruit[J]. Journal of Plant Physiology, 1985, 121(4): 331-341.
- [24] HUBBARD N L, PHARR D M, HUBER S C. Role of sucrose phosphate synthase in sucrose biosynthesis in ripening bananas and its relationship to the respiratory climacteric[J]. Plant Physiology, 1990, 94(1): 201-208.
- [25] 孙娅辉, 郑中兵, 字楠华, 等. 不同土壤改良剂对杧果果实产量和品质的影响[J/OL]. 河南农业科学, 1-9[2024-08-20]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/41.1092.S.20240703.1336.002.html>.
- SUN Y H, ZHENG Z B, ZI N H, et al. Effects of different soil amendments on yield and quality of mango fruit[J/OL]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 1-9[2024-08-20]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/41.1092.S.20240703.1336.002.html>.
- [26] 唐湘如, 谭中文, 李之林, 等. CPPU和PP333对杂交稻3个淀粉合成酶活性和米质的影响[J]. 杂交水稻, 2002, 17(3): 44-46.
- TANG X R, TAN Z W, LI Z L, et al. Effects of CPPU and PP333 on three starch synthase activity and grain quality of hybrid rice[J]. Hybrid Rice, 2002, 17(3): 44-46.
- [27] 张明方, 李志凌. 高等植物中与蔗糖代谢相关的酶[J]. 植物生理学通讯, 2002, 38(3): 289-295.
- ZHANG M F, LI Z L. Enzymes related to sucrose metabolism in higher plants[J]. Plant Physiology Communications, 2002, 38(3): 289-295.
- [28] 雷钰欣, 曹子千, 李纪璇, 等. 高等植物转化酶的研究进展[J]. 分子植物育种, 2024, 22(4): 1242-1250.
- LEI Y X, CAO Z Q, LI J X, et al. Research progress of invertase in higher plants[J]. Molecular Plant Breeding, 2024, 22(4): 1242-1250.
- [29] 武红霞, 邢姗姗, 王松标, 等. '台农1号'芒果果实发育过程中的糖分积累与相关酶活性研究[J]. 西北植物学报, 2011, 31(9): 1811-1815.
- WU H X, XING S S, WANG S B, et al. Sugar accumulation and related enzyme activities in the developing mango fruits cv. 'Tainong 1'[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2011, 31(9): 1811-1815.