网络出版时间:2025-12-05 DOI:10.13207/j.jnwafu.2026.06.013

营养液钾钙比对樱桃番茄果实糖代谢及相关酶活性的影响

贺一容,苏凯琪,王立龙,周佳萌,张悦青,张玉亭,孙胜,王军娥,邢国明
(山西农业大学 园艺学院,山西 太谷 030801)

[摘 要] 【目的】研究不同生育时期樱桃番茄果实中糖分积累与代谢对不同钾钙比(物质的量比)营养液的生理响应,为进一步揭示营养液钾钙比对果实糖代谢的影响机理提供理论依据。【方法】以'Saopolo'樱桃番茄品种为试验材料,共设置17个处理(T1~T15、CK1、CK2),分别在植株幼苗期、开花坐果期和结果期浇灌不同钾钙比的营养液,测定不同处理番茄白熟期、转色期和成熟期第3穗果实的糖分种类及其含量,同时测定糖代谢相关酶活性。【结果】在樱桃番茄成熟期,果实葡萄糖和蔗糖含量均以T14处理最高,其葡萄糖含量较CK1、CK2分别增加了18.94%和20.89%,蔗糖含量分别增加了8.19%和55.70%;果糖含量以T11处理最高,较CK1、CK2分别显著增加了28.04%和45.49%;淀粉含量以T15处理最高,较CK1、CK2分别显著增加了217.86%和125.32%。不同处理各时期果实糖代谢相关酶(中性转化酶、酸性转化酶、蔗糖合成酶、蔗糖磷酸合成酶)活性较CK1、CK2变化不同。随着果实成熟度的提高,中性转化酶活性逐渐升高,至果实成熟期达到最高;酸性转化酶活性在果实各时期总体上高于其余3种酶;蔗糖合成酶活性在果实各时期均高于蔗糖磷酸合成酶,但蔗糖磷酸合成酶活性变化幅度较小。【结论】在番茄植株幼苗期浇灌0.5倍剂量的标准营养液、在开花坐果期和结果期分别浇灌钾钙比为1.6∶1和1.7∶1的营养液(T11处理)对果糖和蔗糖含量的提升效果均最佳;幼苗期和开花坐果期营养液钾钙比不变,在结果期采用钾钙比为2.0∶1的营养液进行浇灌(T14处理)对果实葡萄糖含量提升的综合表现最佳。

[关键词] 樱桃番茄;营养液钾钙比;糖代谢;糖代谢相关酶
[中图分类号] S641.2 [文献标志码] A [文章编号] 1671-9387(2026)06-0124-10

Effects of potassium-calcium ratio in nutrient solution on sugar metabolism and related enzyme activities in cherry tomato fruits

HE Yirong, SU Kaiqi, WANG Lilong, ZHOU Jiameng, ZHANG Yueqing, ZHANG Yuting, SUN Sheng, WANG Jun'e, XING Guoming
(*College of Horticulture, Shanxi Agricultural University, Taigu, Shanxi* 030801, *China*)

Abstract: 【Objective】 This study investigated the physiological responses of sugar accumulation and metabolism in cherry tomato fruits to nutrient solutions with different potassium-to-calcium molar ratios across different growth stages, providing a theoretical basis for further elucidating the regulatory mechanisms by which the potassium-to-calcium ratio in nutrient solutions affected sugar metabolism. 【Method】 Using 'Saopolo' as the test variety, a total of 17 treatments (T1－T15, CK1, CK2) were set up. Nutrient solutions with different

[收稿日期] 2025-04-02 [修回日期] 2025-05-25
[基金项目] 山西省重点研发计划项目(202102140601015);山西省现代农业产业技术体系建设项目(2024CYJSTX08-16);山西农业大学"产学研融合推进工程"项目(2024CXYRH-401);晋中国家农高区水果番茄智慧标准化技术研究教授、博士工作站项目(JZNGQBSGZZ004)
[作者简介] 贺一容(1998—),女,山西临汾人,在读硕士,主要从事蔬菜栽培生理生态研究。E-mail:besthehe518@163.com
[通信作者] 孙胜(1977—),男,吉林榆树人,教授,主要从事蔬菜栽培生理生态研究。E-mail:sunsheng_2004@126.com

potassium-calcium molar ratios were applied for irrigation at the seedling stage, flowering and fruit-setting stage, and fruiting stage. The types and contents of sugars in tomato fruits at the third spike white-ripe stage, color-changing stage, and maturity stage under different treatments were determined, and the activities of related sugar metabolism enzymes were also measured.【Result】When tomato plants at different growth stages were treated with nutrient solutions of different potassium-calcium ratios, the contents of glucose and sucrose in the mature fruits of the 3rd spike were the highest under treatment T14. Compared with CK1 and CK2, its glucose content increased by 18.94% and 20.89%, respectively. The sucrose content increased by 8.19% and 55.70%, respectively. The fructose content was the highest under treatment T11, which significantly increased by 28.04% and 45.49% compared with CK1 and CK2, respectively. The starch content was the highest under treatment T15, which significantly increased by 217.86% and 125.32% compared with CK1 and CK2, respectively. For different treatments, the activities of sugar metabolism-related enzymes (neutral invertase, acid invertase, sucrose synthase, sucrose phosphate synthase) in fruits at various stages showed different patterns of change compared with CK1 and CK2. With the increase in fruit maturity, the activity of neutral invertase gradually increased and reached the highest at the maturity stage. In general, the activity of acid invertase was higher than that of the remaining three enzymes at all fruit stages. The activity of sucrose synthase was higher than that of sucrose phosphate synthase at all fruit stages, but the range of activity change of sucrose phosphate synthase was smaller.【Conclusion】Treatment T11, which used 0.5 times the standard nutrient solution dosage at the seedling stage and nutrient solutions with potassium-calcium ratios of 1.6∶1 and 1.7∶1 during the flowering and fruit-setting stage and fruiting stage, respectively, was most effective in improving fructose and sucrose contents. Meanwhile, treatment T14, which maintained the same potassium-calcium ratios of nutrient solutions at the seedling stage and flowering and fruit-setting stage, using a nutrient solution with a ratio of 2.0∶1 during the fruiting stage demonstrated the optimal comprehensive performance in enhancing glucose content.

Key words: cherry tomato; nutrient solution potassium-to-calcium ratio; sugar metabolism; sugar metabolism-related enzymes

番茄（*Solanum lycopersicum* L.）是茄科茄属的一年生或多年生草本植物，以成熟多汁浆果作为产品，具有很高的营养价值，被称为“神奇的菜中之果”。中国番茄的种植面积及产量均位居世界第一。随着物质文化生活水平的不断提高，人们对番茄营养成分及口感的要求也更高。樱桃番茄（*Solanum lycopersicum*. var.）在众多番茄中独具优势，与其他番茄相比，其生育期短，能更快地完成生长周期，实现收获；供应期长，保证了市场上较长时间的稳定供应[1]。不仅如此，樱桃番茄拥有典型的酸甜口感，风味浓郁，这种独特滋味深受消费者喜爱[2]。糖分作为评价番茄果实品质的关键指标备受关注，其组分主要包括果糖、葡萄糖和蔗糖[3]，其中果糖甜度最高，葡萄糖最低[4]。前人从亏缺灌溉[5]、单盐胁迫[6-7]、植物生长调节物质的应用[8]、铁锌硒配施[9]、微生物菌肥[10]等多个方面，对番茄糖分含量及蔗糖代谢[11]的各类影响因素进行了大量的研究。营养液富含多种养分，能从口感、营养等方面优化农产品品质[12]，在番茄种植中，营养液的成分配比是影响其生长发育与果实品质的关键变量。不同生育期植株对养分需求有别，通过精准调控营养液配方，有望对番茄果实的糖分积累及糖代谢途径产生深刻影响，进而改善果实口感与营养价值，这为高品质番茄栽培提供了新的探索方向。目前，前人关于番茄果实糖分含量变化的研究主要聚焦于总糖含量，而针对营养液配方对番茄果实中糖分的种类、含量影响及糖代谢机制的研究鲜有报道。因此，本研究探讨了营养液钾钙物质的量比对樱桃番茄糖分积累的影响，以期为樱桃番茄的优质高效栽培提供科学依据与技术支撑。

1　材料与方法

1.1　试验材料

试验所用樱桃番茄品种为‘Saopolo’（法国GAUTIER公司）；营养液配方中的肥料均由山西金兰化工股份有限公司生产；蚯蚓粪由山西省祁县子洪口农牧专业合作社生产。

1.2 试验地土壤理化性质及基础养分

试验地土壤理化性质及基础养分含量为:pH 7.11,EC 1 190 μs/cm,土壤体积质量1.69 g/cm^3,孔隙度36.23%,全氮0.75 g/kg,速效氮434 mg/kg,全磷1.62 g/kg,速效磷151.43 mg/kg,速效钾6.7 mg/kg。

1.3 试验营养液配方

试验所用营养液在荷兰温室研究所岩棉培滴灌配方(K、Ca物质的量比为1.9:1)的基础上,保持其他元素比例不变,采用四水硝酸钙调整营养液的钾钙比,营养液pH使用0.1 mol/L的氢氧化钠和醋酸溶液调控。荷兰温室研究所岩棉培滴灌配方为:四水合硝酸钙886 mg/L,硝酸钾303 mg/L,磷酸二氢钾204 mg/L,硫酸铵33 mg/L,硫酸钾218 mg/L,七水合硫酸镁247 mg/L。微量元素采用通用微量元素配方为:EDTA-2NaFe 20 mg/L,硼酸2.86 mg/L,四水合硫酸锰2.13 mg/L,七水合硫酸锌0.22 mg/L,五水合硫酸铜0.08 mg/L,四水合钼酸铵0.02 mg/L。

1.4 试验设计

试验于2023-10-08至2024-03-15在山西农业大学园艺站日光温室内进行,该温室具有良好的通风、控温、调湿设备,日平均温度(26±5) ℃(昼)/(18±5) ℃(夜),湿度控制在50%~70%。樱桃番茄采用高畦方式栽培,定植前各处理施用20 kg蚯蚓粪作基肥,其他栽培管理同常规。供试番茄于10月8日定植,试验共设17个处理,每处理1个小区,每小区面积4.7 m^2,种植12株番茄,每处理重复3次。

试验设置标准营养液对照(CK1)和清水对照(CK2)。试验设置幼苗期(A)施用0.5倍剂量的标准营养液,开花坐果期(B)施用K、Ca比(物质的量比)分别为K:Ca=1.4:1(B1)、K:Ca=1.5:1(B2)、K:Ca=1.6:1(B3)和结果期(C)施用K、Ca比(物质的量比)分别为K:Ca=1.7:1(C1)、K:Ca=1.8:1(C2)、K:Ca=1.9:1(C3)、K:Ca=2.0:1(C4)、K:Ca=2.1:1(C5)的营养液,组成AB1C1(T1)、AB1C2(T2)、AB1C3(T3)、AB1C4(T4)、AB1C5(T5)、AB2C1(T6)、AB2C2(T7)、AB2C3(T8)、AB2C4(T9)、AB2C5(T10)、AB3C1(T11)、AB3C2(T12)、AB3C3(T13)、AB3C4(T14)、AB3C5(T15)共15个处理组。

幼苗期(2023-10-08至2023-11-18)用0.5倍剂量的标准营养液进行浇灌,营养液用量依植株生长和天气情况而定;开花坐果期(2023-11-19至2023-12-20)每隔4 d浇1次营养液,每次500 mL/株;在第一批果实开始膨大时逐渐增加浇水量,每隔4 d浇1次营养液,每次1 000 mL/株;结果期(2023-12-21至2024-02-28)每隔4 d浇1次,每次1 500 mL/株。营养液统一在晴天的上午(8:00至11:00)浇灌,阴雨雪天均不进行浇灌。

1.5 测定项目与方法

在每个处理第3穗果实的白熟期、转色期和成熟期,随机采集果实样本,打浆混合,进行相关指标测定。

葡萄糖、果糖、蔗糖含量参照刘丽杰[13]的方法进行测定:葡萄糖含量采用蒽酮比色法测定,果糖和蔗糖含量采用Seliwanoff法测定,淀粉含量采用高氯酸水解法测定。可溶性糖含量为葡萄糖、果糖、蔗糖含量之和。葡萄糖增加量为果实成熟期葡萄糖含量减去果实白熟期葡萄糖含量;果糖增加量为果实成熟期果糖含量减去果实白熟期果糖含量。蔗糖转化量为果实白熟期蔗糖含量减去果实成熟期蔗糖含量;淀粉转化量为果实白熟期淀粉含量减去果实成熟期淀粉含量。

糖代谢相关酶活性测定:中性转化酶(neutral invertase,NI)、酸性转化酶(acid invertase,AI)、蔗糖合成酶(sucrose synthase,SS)及蔗糖磷酸合成酶(sucrose phosphate synthase,SPS)活性参照张明方等[14]的方法进行测定,并加以改进。

1.6 数据处理与分析

采用Excel 2010和SPSS 23.0软件进行数据统计与分析,采用GraphPad Prism 8.0.2软件绘图。

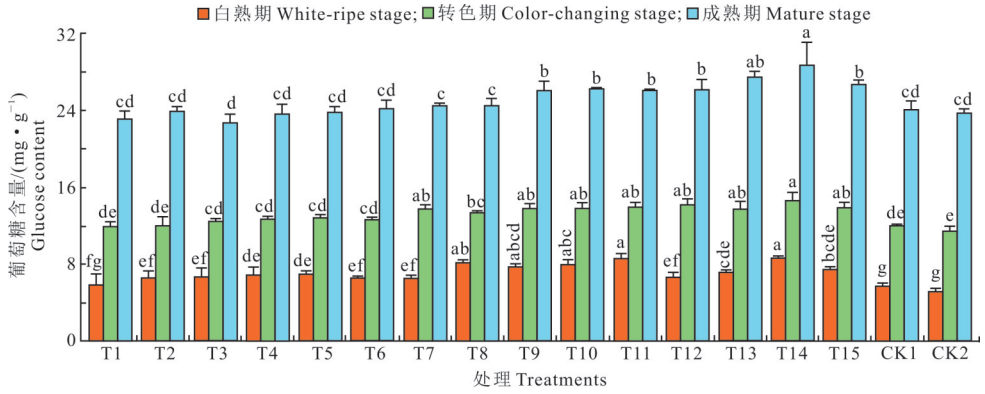
2 结果与分析

2.1 营养液钾钙比对樱桃番茄果实糖含量的影响

2.1.1 葡萄糖含量 由图1可知,随着果实成熟度的提高,葡萄糖含量在逐渐增加。在白熟期和转色期,T14处理的葡萄糖含量最高,且显著高于CK1和CK2。在成熟期,T14处理的葡萄糖含量最高,显著高于除T13处理外的其他处理,且较CK1、CK2分别显著增加了18.94%和20.89%;T13处理次之,较CK1、CK2分别显著增加了13.92%和15.80%;T3处理最低,较CK1、CK2分别降低了6.35%和4.63%。试验结果显示,成熟期果实葡萄糖含量从大到小排序为:T14>T13>T15>T10>T12>T9>T11>T8>T7>T6>CK1>T2>T5>

CK2＞T4＞T1＞T3。

2.1.2　果糖含量　由图2可知，与葡萄糖含量变化趋势相同，各处理果实果糖含量均在成熟期最高。在白熟期，T15处理的果糖含量最高，显著高于CK1和CK2。在转色期，T14处理的果糖含量最高，显著高于CK2。在成熟期，T11处理的果糖含量最高，显著高于除T12和T14处理外的其他处理，且较CK1、CK2分别显著增加了28.04%和45.49%；T14处理次之，其较CK1、CK2分别显著增加了25.18%和42.24%；CK2最低。试验结果显示，成熟期果实果糖含量从大到小排序为：T11＞T14＞T12＞T13＞T9＞T10＞T7＞T15＞T8＞T4＞T5＞T3＞T6＞T1＞T2＞CK1＞CK2。



图柱上标不同小写字母表示同一时期不同处理间差异显著（$P<0.05$）。下同。

Different lowercase letters above the bars indicate significant differences among treatments in the same stage ($P<0.05$). The same below.

图 1　营养液钾钙物质的量比对樱桃番茄果实葡萄糖含量的影响

Fig. 1　Effects of potassium-to-calcium molar ratio in nutrient solution on glucose content in cherry tomato fruits

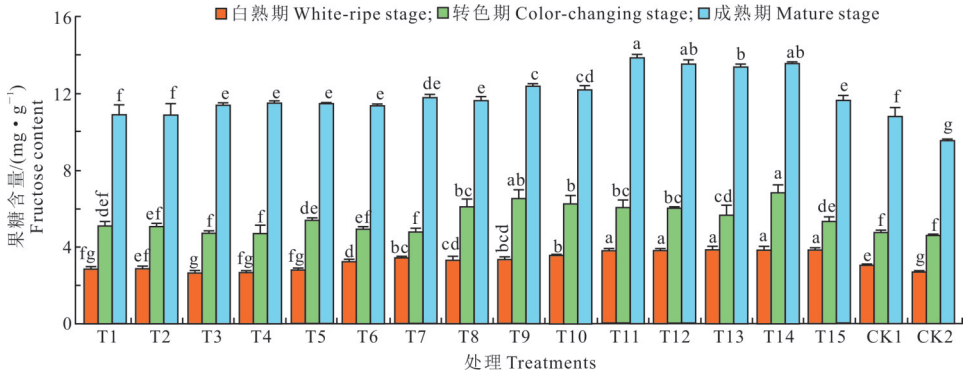


图 2　营养液钾钙物质的量比对樱桃番茄果实果糖含量的影响

Fig. 2　Effects of potassium-to-calcium molar ratio in nutrient solution on fructose content in cherry tomato fruits

2.1.3　蔗糖含量　由图3可知，随着果实成熟度的提高，蔗糖含量在逐渐减少。在白熟期，T11处理的蔗糖含量最高，显著高于CK1、CK2和T5处理。在转色期，T13处理的蔗糖含量最高，显著高于CK1和CK2。在成熟期，T14处理的蔗糖含量最高，显著高于除T9、T10、T11、T12、T13、T15处理外的其他处理，且较CK1、CK2分别显著增加了8.19%和55.70%；T10处理次之，较CK1、CK2分别显著增加了45.18%和52.53%；T6处理最低，较CK1、CK2分别降低31.75%和25.40%。试验结果显示，成熟期果实蔗糖含量从大到小排序为：T14＞T10＞T13＞T12＞T11＞T15＞T9＞T3＞T1＞CK1＞CK2＞T4＞T7＞T2＞T8＞T5＞T6。

2.1.4　淀粉含量　由图4可知，与蔗糖含量变化趋势一致，各处理果实淀粉含量均在白熟期最高。在白熟期，T10处理的淀粉含量最高，显著高于CK1和CK2。在转色期，T12处理的淀粉含量最高，显著高于CK1、CK2和T2处理。在成熟期，T15处理的淀粉含量最高，显著高于除T9、T10、T11、T12、T14处理外的其他处理，且较CK1、CK2分别显著增加了217.86%和125.32%；T14处理次之，较CK1、CK2分别显著增加182.14%和100.00%；CK2最低。试验结果显示，成熟期果实淀粉含量从大到小排序为：T15＞T14＞T9＞T10＞T11＞T12＞T13＞

T5>T4>T6>T8>T1>T3>T2>T7>CK2> CK1。

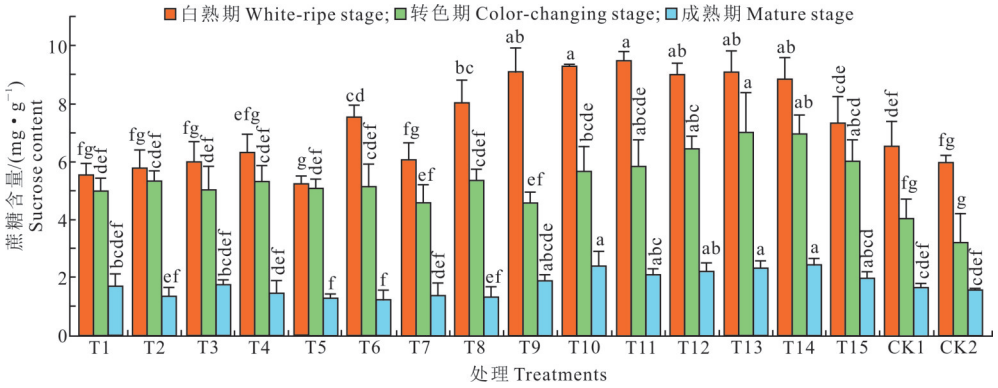


图 3 营养液钾钙物质的量比对樱桃番茄果实蔗糖含量的影响

Fig. 3 Effects of potassium-to-calcium molar ratio in nutrient solution on sucrose content in cherry tomato fruits

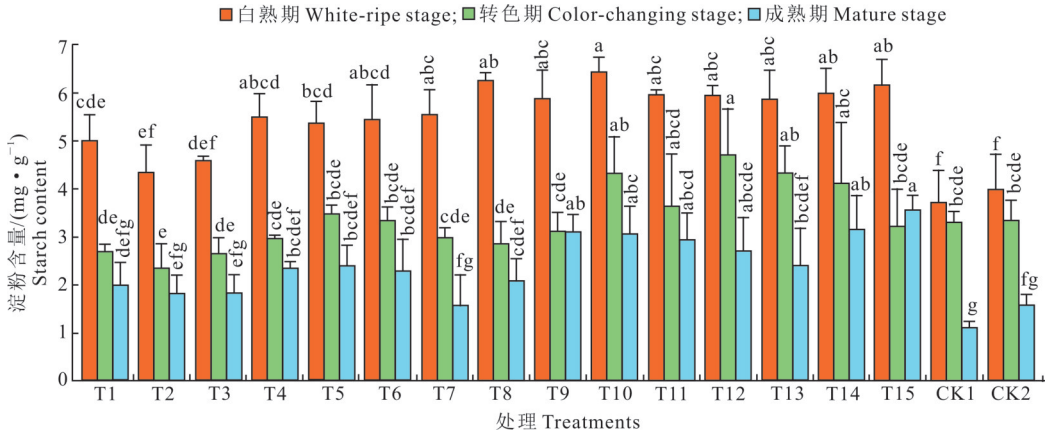


图 4 营养液钾钙物质的量比对樱桃番茄果实淀粉含量的影响

Fig. 4 Effects of potassium-to-calcium molar ratio in nutrient solution on starch content in cherry tomato fruits

2.1.5 可溶性糖含量 由图5可知,在白熟期,T11处理果实的可溶性糖含量最高,显著高于CK1和CK2。在转色期,T14处理的可溶性糖含量最高,显著高于CK1和CK2。在成熟期,T14处理的可溶性糖含量最高(44.73 mg/g),显著高于除T13处理外的其他处理;T13处理次之,较CK1、CK2分别显著增加了18.02%和24.01%;CK2最低(34.86 mg/g)。试验结果显示,成熟期果实可溶性糖含量从大到小排序为:T14>T13>T11>T12>T10>T9>T15>T7>T8>T6>T4>CK2>T5>T2>T3>T1>CK2。

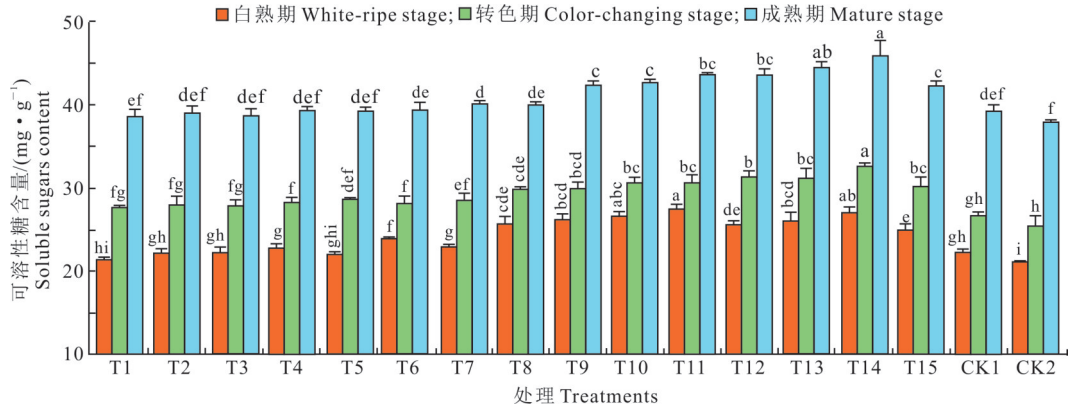


图 5 营养液钾钙物质的量比对樱桃番茄果实可溶性糖含量的影响

Fig. 5 Effects of potassium-to-calcium molar ratio in nutrient solution on soluble sugar content in cherry tomato fruits

2.2　营养液钾钙比对樱桃番茄果实糖分含量变化量的影响

由图 6 可知，果实葡萄糖增加量以 T13 处理最高，增幅为 20.30 mg/g；T14 处理次之，较 CK1、CK2 分别显著增加了 8.69% 和 8.57%；T3 处理最低，较 CK1、CK2 分别降低了 15.13% 和 15.25%。T11 处理的果糖增加量最高，增加了 10.06 mg/g；T14 处理次之，较 CK1、CK2 分别显著增加了 24.78% 和 41.07%；CK2 最低。T11 处理的蔗糖转化量最高，转化了 7.36 mg/g；T9 处理次之，较 CK1、CK2 分别显著增加了 47.64% 和 63.41%；T1 处理最低，较 CK1、CK2 分别降低了 27.15% 和 14.88%。T8 处理的淀粉转化量最高，转化了 4.17 mg/g；T7 处理次之，较 CK1、CK2 分别显著增加了 51.72% 和 63.64%；CK2 最低。

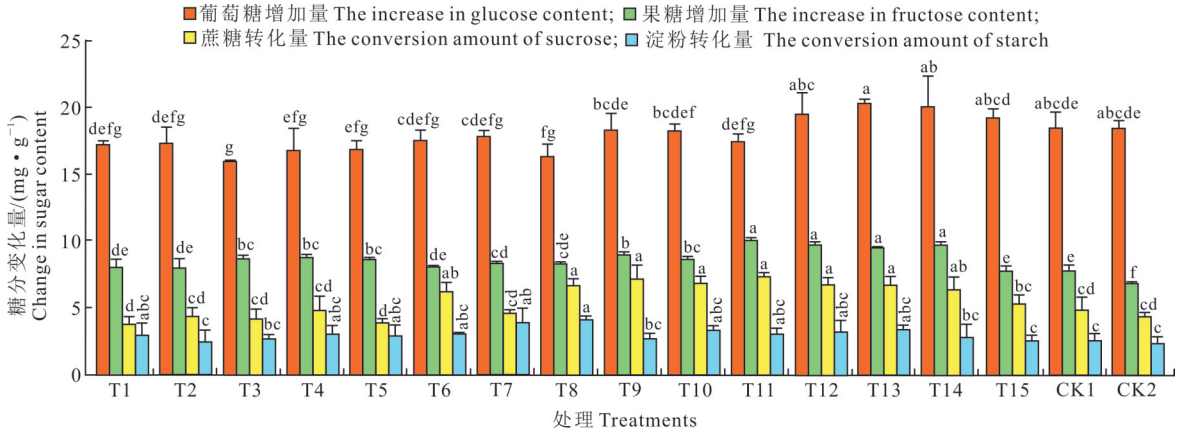


图 6　营养液钾钙物质的量比对樱桃番茄果实糖分变化量的影响

Fig. 6　Effects of potassium-to-calcium molar ratio in nutrient solution on sugar dynamics in cherry tomato fruits

2.3　营养液钾钙比对樱桃番茄果实糖代谢相关酶活性的影响

由图 7 可知，随着果实成熟度的提高，中性转化酶活性逐渐升高，至果实成熟期达到最高；酸性转化酶活性在果实各时期总体上高于其余 3 种酶活性；蔗糖合成酶活性在果实各时期均高于蔗糖磷酸合成酶活性，但蔗糖磷酸合成酶活性变化幅度较小。

果实中性转化酶活性在白熟期以 T4 处理最高，T14 处理最低，在转色期以 T1 处理最高，T13 处理最低。在成熟期，T5 处理的中性转化酶活性最高，显著高于除 T1、T2、T3、T4、T6、CK1、CK2 处理外的其他处理；CK2 次之；T13 处理最低，较 CK1、CK2 分别显著减少了 53.45% 和 65.85%。

果实酸性转化酶活性在白熟期以 T13 处理最高，T8 处理最低，在转色期仍以 T13 处理最高，T1 处理最低。在成熟期，T14 处理的酸性转化酶活性最高，显著高于除 T9、T10、T12 处理外的其他处理；T10 处理次之，较 CK1、CK2 分别增加了 9.94% 和 33.00%；T1 处理最低，较 CK1、CK2 分别显著降低了 45.43% 和 20.21%。

果实蔗糖合成酶活性在白熟期以 T1 处理最高，CK1 最低，在转色期以 T2 处理最高，T15 处理最低。在成熟期，T1 处理的蔗糖合成酶活性最高，显著高于其他处理；T4 处理次之，较 CK1 增加了 21.44%，较 CK2 显著增加了 47.40%；T8 处理最低，较 CK1 显著降低了 83.82%，较 CK2 降低了 51.45%。

由图 7 可知，果实蔗糖磷酸合成酶活性在白熟期以 T3 处理最高，T14 处理最低，在转色期以 T5 处理最高，T15 处理最低。在成熟期，T4 处理的蔗糖磷酸合成酶活性最高，显著高于除 T1、T3、T5、T14、CK1、CK2 处理外的其他处理；T5 处理次之，较 CK1、CK2 分别显著增加了 18.18% 和 19.12%；T11 处理最低，较 CK1、CK2 分别显著减少了 74.48% 和 73.10%。

2.4　樱桃番茄果实中糖含量与糖代谢相关酶活性的相关性

由表 1 可知，番茄果实中的葡萄糖和果糖的含量均与 NI 和 AI 活性呈极显著正相关，与 SS 和 SPS 活性呈极显著负相关；蔗糖和淀粉的含量与 NI 和 AI 活性呈极显著负相关，与 SS 和 SPS 活性呈极显著正相关。结果表明，在本试验条件下，番茄果实中的糖分积累代谢与糖代谢相关的 1 种酶之间均有显著相关性。

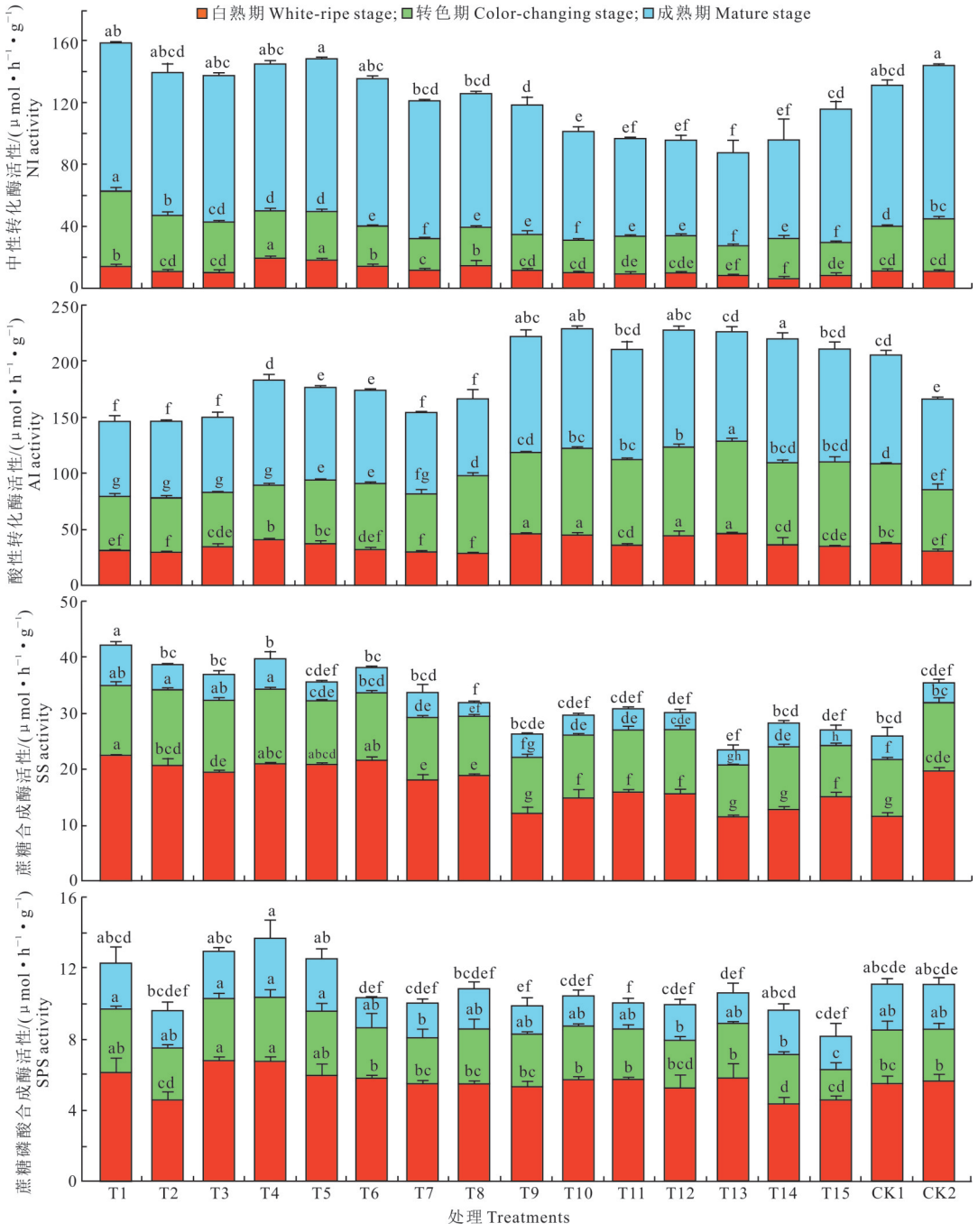


图 7 营养液钾钙物质的量比对樱桃番茄果实各时期糖代谢相关酶活性的影响

Fig. 7 Effects of potassium-to-calcium molar ratio in nutrient solution on the activities of sugar-metabolizing enzymes at different developmental stages of cherry tomato fruits

表 1 樱桃番茄果实中糖含量与糖代谢酶活性的相关性

Table 1 Correlation between sugar content and sugar-metabolizing enzyme activities in cherry tomato fruits

糖含量 Sugar content	中性转化酶活性 NI activity	酸性转化酶活性 AI activity	蔗糖合成酶活性 SS activity	蔗糖磷酸合成酶活性 SPS activity
葡萄糖含量 Glucose content	0.900**	0.888**	−0.916**	−0.813**
果糖含量 Fructose content	0.885**	0.872**	−0.901**	−0.769**
蔗糖含量 Sucrose content	−0.890**	−0.681**	0.725**	0.690**
淀粉含量 Starch content	−0.753**	−0.594**	0.694**	0.727**

注:*和**分别表示在 $P<0.05$ 和 $P<0.01$ 水平相关显著。

Note: * and ** indicate significant correlation at the $P<0.05$ and $P<0.01$ levels, respectively.

3　讨　论

在番茄果实生理学与栽培学中，钾元素对塑造果实品质至关重要。常蕊[15]、韩启厚[16]研究证实，增施钾肥能够有效提升果实的糖分含量，在适宜浓度范围内，钾能够显著促进果实中果糖与葡萄糖的积累，表明钾在果实糖分积累过程中发挥着积极的正向调控作用。齐红岩等[17]研究揭示了成熟番茄果实中糖分积累的特征，即以葡萄糖和果糖为主要组分。另外，齐红岩等[18]研究指出，在果实发育进程中，蔗糖会通过一系列酶促反应逐步代谢转化为果糖和葡萄糖。BECKLES[19]发现，钾深度参与糖类的合成与分解代谢，能够有效促进多糖的转运及在果实中的积累。此外，冯璞玉[20]研究发现，适量的钾供应对于维持糖代谢关键酶的活性具有重要意义，能够优化果实的糖分累积过程。

随着精准栽培技术的发展，基于营养液的养分精准调控是优化果实生长的关键。而糖的种类和含量则是衡量果实品质的关键[21]，因此基于前人的研究基础，本研究深入探讨了营养液中不同钾钙比条件下樱桃番茄果实糖类动态变化规律。结果表明，随着营养液中钾钙比的逐渐增加，果实中的葡萄糖、果糖和蔗糖含量呈现出先上升后下降的趋势，这与前人关于钾可提高果实糖类含量的研究结论[15-16]高度一致，这可能是由于过高的钾离子浓度对糖类代谢途径产生了反馈抑制，从而阻碍了糖分的进一步积累。在果实糖类组成特征方面，本研究发现果实中葡萄糖含量最高，果糖次之，蔗糖含量最低，这一结果与前人研究结论[18]相契合。此外，本研究发现随着钾钙比的增加，果实淀粉含量虽然有所上升，但其增幅显著小于葡萄糖，这一结果不仅验证了前人关于钾促进多糖积累的观点[19]，而且进一步揭示了钾对多糖积累的促进效果相较于单糖更为有限。

果实中糖分的积累直接受制于糖代谢相关酶的活性[22]。在果实糖代谢的研究领域，前人已开展了大量富有成效的探索。有研究表明，同一植株不同生育期的糖代谢相关酶催化活性存在显著差异[23]。华明艳等[24]针对苹果果实的研究指出，糖代谢关键酶活性与果实糖类积累及品质密切相关。白蓓蓓等[25]指出，植物SPS在糖代谢及蔗糖与淀粉转化过程中发挥着重要作用。HUBER等[26]研究表明，植物叶片中SPS活性与淀粉含量呈负相关，与蔗糖含量呈正相关。王丽娟等[27]和LU等[28]研究表明，蔗糖含量与SS活性呈显著正相关，果糖、葡萄糖含量与AI活性呈显著正相关，果糖含量与SS活性负相关。在果实成熟时AI活性高于NI。另外，宁秀娟[29]研究发现，果实发育过程中NI活性与蔗糖含量呈负相关。

本研究结果表明，随着番茄生育期的推移，果实中葡萄糖和果糖含量呈持续上升趋势，至果实成熟期达到峰值，而蔗糖和淀粉含量的变化趋势则与之相反。这一现象与番茄果实中糖代谢相关酶活性随生育期进展的动态变化密切相关。随着果实的逐渐成熟，转化酶的活性会持续增强，这种酶的作用是将蔗糖分解成葡萄糖、果糖等糖类；当果实完全成熟时，转化酶的活性达到顶峰，此时蔗糖的含量相对较低，而葡萄糖和果糖的含量则达到最高，这与李娟等[30]的研究结果一致。说明在番茄果实的发育过程中，蔗糖的积累受到了转化酶活性的抑制，证实了钾与植株体内糖代谢关键酶活性之间存在密切关联。适量的钾供应能够显著增强相关酶的活性，进而有效促进果实糖分的累积；而高钾或不施钾处理则会导致酶活性受到抑制，这为解释钾钙比过高时果实糖分含量降低的现象提供了有利的生理生化依据。本研究发现，随着营养液中钾钙比的增加，NI、SS和SPS活性呈降低趋势，而AI活性升高。在白熟期，果实SS和SPS活性相对较高，通过催化蔗糖合成导致果实中蔗糖和淀粉含量较高。随着果实生育期的推移，SS和SPS活性显著下降，蔗糖合成量减少，进而引起果实中蔗糖和淀粉含量降低；与此同时，AI和NI活性迅速升高，促使贮存的淀粉分解，且运输至果实中的蔗糖被大量水解为葡萄糖和果糖，最终导致果实甜度提高。这意味着钾钙比的增加能够抑制SS和SPS的活性，从而减少蔗糖积累，同时促进蔗糖向果糖、葡萄糖的转化，最终提高番茄果实可溶性总糖含量，优化果实的风味和口感。本试验中SPS活性与糖分含量的相关性与前人的研究结果[26]不同，这可能是因为番茄果实和叶片的酶活性存在固有差异，相同酶在植株不同部位所承担的生理功能和扮演的角色有所不同。总体而言，本研究中果糖含量与AI、NI、SS活性的特征以及相关性，均与前人研究结果[27-29]高度一致，进一步验证了糖代谢规律在不同果实种类间的普遍性与特殊性，为深入理解果实糖代谢机制提供了新的视角和实证依据。

4 结 论

在樱桃番茄的栽培过程中,营养液钾钙比对提高果实糖分含量至关重要,适当的钾钙比能显著提高果实的糖分含量。在番茄植株幼苗期浇灌0.5倍剂量的标准营养液、在开花坐果期和结果期分别浇灌钾钙比为1.6∶1和1.7∶1的营养液(T11处理)对果实果糖和蔗糖含量提升效果最佳;幼苗期和开花坐果期钾钙比例不变,在结果期浇灌2.0∶1的营养液(T14处理)对果实葡萄糖含量的提升作用表现最佳。

[参考文献]

[1] 陈军. 不同种类的樱桃番茄营养品质分析及其耐弱光效应研究[D]. 南京:南京农业大学,2016.
CHEN J. Study on the nutritional quality analysis of different varieties of cherry tomatoes and their responses to weak light stress[D]. Nanjing:Nanjing Agricultural University,2016.

[2] 吴丽艳,龚亚菊,黎志彬,等. 樱桃番茄种质资源果实相关性状的多元统计分析[J]. 西南农业学报,2012,25(5):1818-1822.
WU L Y,GONG Y J,LI Z B,et al. Multivariate statistical analysis of fruit-related traits of cherry tomato germplasm resources[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences,2012,25(5):1818-1822.

[3] BECKLES D M. Factors affecting the postharvest soluble solids and sugar content of tomato(*Solanum lycopersicum* L.)fruit[J]. Postharvest Biology and Technology,2012,63(1):129-140.

[4] MISSIO J C,RENAU R M,ARTIGAS F C,et al. Sugar-and-acid profile of Penjar tomatoes and its evolution during storage[J]. Scientia Agricola,2015,72(4):314-321.

[5] 崔一琼,李菊,刘晓奇,等. 水分亏缺对设施基质栽培番茄果实蔗糖和淀粉代谢的影响[J]. 园艺学报,2024,51(11):2607-2619.
CUI Y Q,LI J,LIU X Q,et al. Effects of water deficit on sucrose and starch metabolism in tomato fruits cultivated in facility substrate[J]. Acta Horticulturae Sinica,2024,51(11):2607-2619.

[6] 杨滟. 番茄植株耐盐性对海藻糖的响应机制[D]. 兰州:甘肃农业大学,2023.
YANG Y. Response mechanism of tomato plant salt tolerance to trehalose[D]. Lanzhou:Gansu Agricultural University,2023.

[7] 秦娟,孔海燕,刘华. 马尾松不同林型土壤C、N、P、K的化学计量特征[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版),2016,44(2):68-76,82.
QING J,KONG H Y,LIU H. Stoichiometric characteristics of soil C,N,P and K in different *Pinus massoniana* forest[J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition),2016,44(2):68-76,82.

[8] 豆建华. 外源褪黑素对番茄果实品质的影响[D]. 兰州:甘肃农业大学,2023.
DOU J H. Effects of exogenous melatonin on the quality of tomato fruits[D]. Lanzhou:Gansu Agricultural University,2023.

[9] 张玉静,张铖锋,栗国栋,等. 铁锌硒配施对番茄生长、果实抗氧化能力和糖代谢的影响[J]. 中国土壤与肥料,2024(8):154-162.
ZHANG Y J,ZHANG C F,LI G D,et al. Effects of iron, zinc and selenium on growth, fruit antioxidant capacity and sugar metabolism in tomato[J]. Soils and Fertilizers Sciences in China,2024(8):154-162.

[10] 武杞蔓,刘朋宇,张颖,等. 微生物菌肥对番茄生长、品质及糖代谢相关酶的影响[J]. 江苏农业科学,2022,50(24):125-130.
WU Q M,LIU P Y,ZHANG Y,et al. Effects of microbial fertilizer on tomato growth,quality and sugar metabolism-related enzymes[J]. Jiangsu Agricultural Sciences,2022,50(24):125-130.

[11] 齐红岩,李天来,陈元宏,等. 叶面喷施磷酸二氢钾与葡萄糖对番茄光合速率和蔗糖代谢的影响[J]. 农业工程学报,2005,21(14):137-142.
QI H Y,LI T L,CHEN Y H,et al. Effects of foliage applications of KH_2PO_4 and glucose on photosynthesis and sucrose metabolism of tomato[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2005,21(14):137-142.

[12] 周志宏,陈小明,丁扣琪,等. 大棚番茄的需肥特性及平衡施肥技术[J]. 现代农业科技,2007(21):22.
ZHOU Z H,CHEN X M,DING K Q,et al. Fertilizer requirements characteristics of tomatoes in greenhouses and the balanced fertilization technology[J]. Modern Agricultural Science and Technology,2007(21):22.

[13] 刘丽杰. 低温下ABA调控冬小麦糖代谢及抗寒基因表达的研究[D]. 哈尔滨:东北农业大学,2013.
LIU L J. Effects of ABA on sugar metabolism and expression of antifreeze genes of winter wheat[D]. Harbin:Northeast Agricultural University,2013.

[14] 张明方,李志凌,陈昆松,等. 网纹甜瓜发育果实糖分积累与蔗糖代谢参与酶的关系[J]. 植物生理与分子生物学学报,2003,29(5):455-462.
ZHANG M F,LI ZHI l,CHEN K S,et al. Relationship between sugar accumulation and enzymes involved in sucrose metabolism during fruit development in netted muskmelon[J]. Journal of Plant Physiology and Molecular Biology,2003,29(5):455-462.

[15] 常蕊. 亚适宜温光环境下增施钾肥对黄瓜生长、生理指标和产量的影响[D]. 洛阳:河南科技大学,2015.
CHANG R. Effect of potassium level on cucumber growth, physiological indices and yield under sub-optimum temperature and light intensity[D]. Luoyang:Henan University of Science and Technology,2015.

[16] 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,2009.
HAN Q H. Regulation effects of potash applied at different

growth phases on sucrose metabolism of tomato in greenhouse [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2009.

[17] 齐红岩，李天来，邹琳娜，等. 番茄果实不同发育阶段糖分组成和含量变化的研究初报[J]. 沈阳农业大学学报，2001，32(5)：346-348.
QI H Y, LI T L, ZOU L N, et al. Preliminary report on the changes of sugar composition and content in different developmental stages of tomato fruits[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2001, 32(5): 346-348.

[18] 齐红岩，李天来，张洁，等. 番茄果实发育过程中糖的变化与相关酶活性的关系[J]. 园艺学报，2006，33(2)：294-299.
QI H Y, LI T L, ZHANG J, et al. Relationship between sugar changes and enzyme activities during tomato fruit development [J]. Acta Horticulturae Sinica, 2006, 33(2): 294-299.

[19] BECKLES D M. Factors affecting the postharvest soluble solids and sugar content of tomato (*Solanum lycopersicum* L.) fruit[J]. Postharvest Biology and Technology, 2012, 63(1): 129-140.

[20] 冯璞玉. 番茄果实糖分累积对水分与钾素供应的响应及其机理[D]. 陕西杨凌：西北农林科技大学，2016.
FENG P Y. Responses and mechanisms of sugar accumulation in tomato fruits to water and potassium supply[D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2016.

[21] TEIXEIRA R T, KNORPP C, GLIMELIUS K. Modified sucrose, starch, and ATP levels in two alloplasmic male-sterile lines of *B. napus*[J]. Journal of Experimental Botany, 2005, 56(414): 1245-1253.

[22] 齐红岩. 番茄光合运转糖－蔗糖的运转、代谢及其相关影响因素的研究[D]. 沈阳：沈阳农业大学，2003.
QI H Y. Studies on translocation, metabolism and related influencing factors of sucrose of photosynthate transportation of tomato[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2003.

[23] 袁野，吴凤芝，周新刚. 光氮互作对番茄果实糖积累及蔗糖代谢相关酶活性的影响[J]. 中国农业科学，2009，42(4)：1331-1338.
YUAN Y, WU F Z, ZHOU X G. Interactive effects of light intensity and nitrogen supply on sugar accumulation and activities of enzymes related to sucrose metabolism in tomato fruits [J]. Scientia Agricultural Sinica, 2009, 42(4): 1331-1338.

[24] 华明艳，宋兰芳，崔少杰，等. 钾肥处理对草莓果实糖积累及相关酶活性的影响[J]. 北方园艺，2019，43(16)：38-43.
HUA M Y, SONG L F, CUI S J, et al. Effects of potassium fertilizer treatment on sugar accumulation and related enzyme activities in strawberry fruits[J]. Northern Horticulture, 2019, 43(16): 38-43.

[25] 白蓓蓓，陈业渊，王鹏. 植物蔗糖合酶家族基因鉴定及序列和进化分析[J]. 分子植物育种，2018，16(7)：2175-2179.
BAI B B, CHEN Y Y, WANG P. Identification, sequence analysis and evolutionary inference of plant sucrose synthase family genes[J]. Molecular Plant Breeding, 2018, 16(7): 2175-2179.

[26] HUBER S C. Role of sucrose-phosphate synthase in partitioning of carbon in leaves[J]. Plant Physiology, 1983, 71(4): 818-821.

[27] 王丽娟，李天来. 夜间亚低温对番茄果实糖含量和糖代谢酶活性的影响[J]. 安徽农业科学，2011，39(20)：12021-12023.
WANG L J, LI T L. Effects of mild night chilling on sugar content and activities of sugar metabolism enzymes in tomato fruits[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2011, 39(20): 12021-12023.

[28] LU S, LI T, JIANG J. Effects of salinity on sucrose metabolism during tomato fruit development[J]. African Journal of Biotechnology, 2010, 9(6): 842-849.

[29] 宁秀娟. 高钾水平对温室番茄生长发育和蔗糖代谢的影响[D]. 北京：中国农业科学院，2011.
NING X J. Effects of high potassium nutrition levels on growth, development and sucrose metabolism of tomato in greenhouse[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2011.

[30] 李娟，田萍，李建设，等. 微咸水灌溉对设施番茄果实糖积累及蔗糖代谢相关酶活性的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版)，2018，46(3)：101-110.
LI J, TIAN P, LI J S, et al. Effects of saline water irrigation on sugar accumulation and activities of sucrose-metabolizing enzymes of greenhouse tomato[J]. Journal of Northwest A&F University(Natural Science Edition), 2018, 46(3): 101-110.

（责任编辑：马秋明）