

采后短时高温对樱桃番茄果实品质的影响

刘雅慧^{1, #}, 曾德雯^{1, 2, #}, 孟恒宇¹, 张辉¹, 杨学东¹, 朱为民^{1, 2}, 朱龙英¹, 张迎迎^{1, *}

¹上海市农业科学院园艺研究所, 上海市设施园艺技术重点实验室, 上海201403

²上海海洋大学水产与生命学院, 上海201306

[#]并列第一作者

^{*}通信作者(renlife@163.com)

摘要: 番茄(*Solanum lycopersicum*)是深受消费者喜爱的果蔬, 其营养物质包括各种氨基酸、糖、有机酸、脂类、番茄红素和维生素C等。在番茄采摘和贮运过程中, 会受到不同环境因素(如短期高温)对其的影响。本文利用核磁共振技术、高效液相色谱技术和味觉分析系统研究了采后短期高温(1、2和4 h)对番茄果实品质和味觉的影响。结果表明: 番茄果实中大部分氨基酸的含量在高温处理1 h后显著降低; 随着高温处理时间的延长, 果糖、葡萄糖、柠檬酸和维生素C含量显著升高; 蔗糖、番茄红素和脂类含量显著降低; 甜味、鲜味和涩味的味觉强度增强。短期高温同时会影响与番茄果实品质相关基因的表达, 其中*AGPLI*在处理4 h其表达与0 h相比, 表达量显著上调。*LOX*、*Beta/old-gold (B/OG)*、*PSY1*、*Tangerine (T)*的表达具有随处理时间的延长而下调的趋势。因此, 番茄果实在采后应权衡各活性物质升高或损失的比例, 尽快采用合理的贮运方式, 以降低高温环境对番茄果实货架期造成的影响。

关键词: 番茄果实; 采后; 短期高温; 品质; 基因

Effect of short-term high temperature treatment on fruit quality of cherry tomato after harvest

LIU Yahui^{1, #}, ZENG Dewen^{1, 2, #}, MENG Hengyu¹, ZHANG Hui¹, YANG Xuedong¹, ZHU Weimin^{1, 2}, ZHU Longying¹, ZHANG Yingying^{1, *}

¹ Horticultural Research Institute, Shanghai Academy of Agricultural Sciences, Shanghai Key laboratory of Protected Horticulture Technology, Shanghai 201403, China

² College of Fisheries and Life Science, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China

[#]Co-first authors

^{*}Corresponding author (renlife@163.com)

Abstract: Tomato is a favorable fruit and vegetable by consumers. Its nutrients include various amino acids, sugars, organic acids, lipids, lycopene and vitamin C. In the process of picking, storage and transportation of tomatoes, their quality will be affected by different environmental factors such as short-term high temperature environment. This article used nuclear magnetic resonance technology, high performance liquid chromatography technology and taste analysis system to study the effects of short-term postharvest high temperature treatment (1, 2 and 4 h) on tomato fruit quality and taste. The results showed that the content of most amino acids in tomato fruits decreased significantly after high temperature treatment for 1 hour; with the extension

收稿 2020-10-22 修定 2021-03-11

资助 上海市“科技创新行动计划”农业领域项目(19391903600)和上海市农业科学院农业科技创新支撑领域研究专项[农科创2017(B-06)]。

of high temperature treatment, the content of fructose, glucose, citric acid and vitamin C increased significantly; the content of sucrose, lycopene and lipids significantly reduced; the taste intensity of sweetness, umami and astringency increased. Short-term high temperature treatment will also affect the expression of genes related to quality of tomato fruit. Among them, the expression of *AGPL1* was significantly up-regulated at 4 h of treatment compared with 0 h. The expression of *LOX*, *Beta/old-gold (B/OG)*, *PSY1*, *Tangerine (T)* had a tendency to decrease as the treatment time increases. Therefore, after harvesting tomato fruits, we should weigh the increase or loss of the active substances, and use reasonable storage and transportation methods as soon as possible to reduce the impact of high temperature environment on the shelf life of tomato fruits.

Key words: tomato fruits; postharvest; short-term high temperature; quality; gene

番茄(*Solanum lycopersicum*)属于茄科番茄属, 俗称西红柿, 是深受消费者喜爱的果蔬之一, 其口感酸甜且含有丰富的营养物质, 如番茄红素和维生素C等。据世界粮农组织统计, 2017年番茄的总产量高达1.82亿吨(<http://www.fao.org/faostat>)。番茄果实的营养物质包括各种氨基酸、糖类、有机酸、脂类、番茄红素和维生素C等。其中, 液泡中积累的氨基酸会影响果实的发育, 且酸性代谢产物的积累会影响番茄果实风味和营养物质的形成(Snowden等2015)。在番茄果实发育过程中, 积累的淀粉会转化为葡萄糖和果糖。成熟果实的有机酸包括柠檬酸和苹果酸。番茄独特的风味是由果糖、柠檬酸和一些挥发性物质所决定的(Bennett等2012)。此外, 糖酸比也是影响番茄风味的重要因素之一(Klee和Giovannoni 2011)。番茄中的番茄红素是一种对人体有益的活性物质, 具有抗氧化作用, 在新鲜番茄果实中的番茄红素为全反式结构, 但番茄红素在高温、极端pH、光照等环境影响下, 很容易发生氧化和异构化(Shi和Le Maguer 2000)。

果蔬类产品的货架期是指储存的产品仍然适合食用的期限, 通常由水果的软化、皱缩和腐烂程度决定。番茄容易在采摘后受损, 有研究表明采后受损会影响作物的生产力, 甚至受损量可达收获量的一半(Thole等2020)。有研究发现果实在采摘后的储存过程中, 其糖类、有机酸、氨基酸等影响果实品质的重要组成成分会受到不同内外因素的影响(Yun等2012)。番茄属于喜温性植物, 其适应生长的最适温度为18~25℃, 但其不耐高温, 并对高温敏感。据2013年统计, 上海高温呈现天数多、强度强、日高温持续长等特点(顾宇丹2014), 栽培

番茄的日光温室温度又深受环境影响, 有研究发现夏季日光温室内的温度可达45℃以上(李宗耕等2018)。因此, 番茄果实在夏季采摘过程中, 难免遇到温室内短期高温环境的影响, 目前关于研究采后短期高温对番茄果实品质影响情况的报道还较少。本文将研究采后短时(1、2和4 h) 42℃高温环境对樱桃番茄果实营养物质、味觉强度和与品质相关基因的影响。通过核磁共振(nuclear magnetic resonance, NMR)技术测定其氨基酸、糖类、脂类、有机酸的含量; 利用高效液相色谱技术(high performance liquid chromatography, HPLC)测定其维生素C和番茄红素的含量; 利用SA-402B味觉分析系统, 测定其味觉强度值; 并分析与番茄品质相关基因的表达情况。综合以上实验, 通过分析采后短时高温对樱桃番茄果实品质的影响, 从而为番茄采后保鲜提供数据支持。

1 材料与方法

1.1 植物材料

供试材料为本课题组樱桃番茄(*Solanum lycopersicum*)材料C19-89, 种植于上海市农业科学院的庄行基地。

1.2 测定方法及指标

氨基酸、有机酸、糖类、脂类的测定方法利用NMR技术, 用Bruker公司Avance III 600MHz核磁共振波谱仪进行测定(Zhang等2011; Xiao等2009), 维生素C测定根据GB 5009.86-2016第一法液相色谱仪Waters 2690 检测(GB 5009.86-2016), 番茄红素根据NY/T 1651-2008液相色谱仪Agilent 1260检测(NY/T 1651-2008), 利用Waters e2695型液相色谱

谱仪进行测定。味觉值的测定利用日本Insent公司的SA402B味觉分析系统,与品质相关的基因表达来源于RNA-seq分析。

本文测定的物质如表1所示。

1.3 实验处理

将大小均匀的成熟期番茄果实,采摘后立即置于温度为42℃、湿度80%的培养箱内,每一处理时间段下取8个生物学重复。

NMR技术样品预处理:将样品在始终有液氮的研钵中研磨至粉末状后进行准确称量,称取约50 mg左右的植物样品加入到2 mL EP管中,并记录准确称量的重量。加入预冷的80%甲醇水溶液600 μL,涡旋混匀,冰上静置2 min后组织破碎仪20 Hz 90 s震荡混匀。冰浴超声15 min (30 s超声, 30 s静置为一个循环),4℃ 11 900×g离心10 min后取上清。以上操作重复3次后收集上清,将混合的上清液涡

旋混匀后,4℃ 11 900×g离心10 min后取上清。使用离心浓缩仪去除有机溶剂,之后冷冻干燥得到粉末样品后,再次准确称量粉末重量,放置于-80℃超低温冰箱保存待测。

测定维生素C样品预处理:取100 g左右样品加入等质量20 g·L⁻¹的偏磷酸溶液,利用均质机均质并混合均匀后,应立即测定维生素C (GB 5009.86-2016)。

番茄红素样品预处理:将样品利用四分法取样后放入食品加工机中捣碎成匀浆,将样品充分混匀,称取5 g,加入丙酮-石油醚混合液并搅拌后静置。使番茄红素充分溶解后,移入砂芯漏斗中真空抽滤,滤液收集于试管中,重复上述步骤直至将试样洗至无色后进行净化步骤,之后用于样品测定(NY/T 1651-2008.2008)。

味觉分析样品预处理:取100 g果实加200 mL

表1 本文测定的物质
Table 1 The substance measured in this paper

测定物质	名称	英文名称及缩写
氨基酸类	天门冬氨酸	Aspartates, Asp
	精氨酸	Arginine, Arg
	丙氨酸	Alanine, Ala
	谷氨酸	Glutamate, Glu
	γ-氨基丁酸酯	γ-Amino butyrate, GABA
	组氨酸	Histidine, His
	苯丙氨酸	Phenylalanine, Phe
	酪氨酸	Tyrosine, Tyr
	谷氨酰胺	Glutamine, Gln
	缬氨酸	Valine, Val
	异亮氨酸	Isoleucine, Ile
	亮氨酸	Leucine, Leu
	天冬酰胺	Asparagine, Asn
脂类	脂质(R-CH2)	Lipids (R-CH2)
	脂质(R-CH3)	Lipids (R-CH3)
糖类	蔗糖	Sucrose
	果糖	Fructose
	葡萄糖	Glucose
有机酸	苹果酸	Malate
	丙酮酸	Pyruvate
	柠檬酸	Citrate
其他营养物质	维生素C	Vitamin C
	番茄红素	Lycopene

纯净水榨汁后, 11 900×g离心5 min, 利用脱脂纱布进行过滤, 滤液用于上机待测。

RNA-seq样品预处理: 取每一处理时间段下的果实样品, 使用TRIzol试剂提取番茄果实样品中的RNA后并检测所得RNA的浓度和纯度, 使用Agilent 2100生物分析仪芯片实验室系统对RIN值进行分析, 将RNA样品储存在-80℃进行之后的实验。

1.4 统计分析

数据采用Excel进行整理, 利用SPSS软件计算平均值和标准误差, 并进行显著性分析。

2 实验结果

2.1 采后短期高温对樱桃番茄果实营养物质含量的影响

2.1.1 采后短期高温对氨基酸含量的影响

氨基酸是植物体内重要的组成部分, 对植物的生长发育和提高作物的产量及品质都有着重要的作用。番茄果实在采后短期高温的影响下, 氨基酸的含量随着处理时间的延长, 均发生了变化。由表2可以发现, 组氨酸(His)、苯丙氨酸(Phe)、酪氨

酸(Tyr)、谷氨酰胺(Gln)、缬氨酸(Val)、异亮氨酸(Ile)、亮氨酸(Leu)、天冬酰胺(Asn)与0 h相比, 在短期高温的影响下其含量具有1 h下降, 2 h升高, 4 h下降的趋势。其中, 酪氨酸(Tyr)的含量由0 h的32.5 μmol·g⁻¹降低到4 h的23.38 μmol·g⁻¹, 降低了约28%, 与0 h含量相比显著降低。处理1 h时缬氨酸(Val)、异亮氨酸(Ile)、亮氨酸(Leu)、苯丙氨酸(Phe)的含量与0 h相比显著降低, 但处理4 h其含量与0 h相比, 没有显著变化。除此之外, γ-氨基丁酸(GABA)的含量变化具有在处理的1 h (185.98 μmol·g⁻¹)、2 h (283.45 μmol·g⁻¹)升高, 随后在4 h (210.46 μmol·g⁻¹)下降的趋势; 并且在处理4 h其含量与0 h (172.45 μmol·g⁻¹)相比, 显著升高。与0 h相比, 天门冬氨酸(Asp)、精氨酸(Arg)、丙氨酸(Ala)、谷氨酸(Glu)的含量, 在处理1 h下降, 随后在处理2和4 h升高。其中, 丙氨酸(Ala)的含量在处理4 h与0 h相比, 含量由0 h的129.50 μmol·g⁻¹升高到183.91 μmol·g⁻¹, 升高约42%。天门冬氨酸(Asp)、精氨酸(Arg)、谷氨酸(Glu)的含量在处理4 h与0 h相比没有显著差异, 但在处理1 h, 其含量具有下降趋势, 并且谷氨酸(Glu)和精氨酸(Arg)含量与0 h相比显著降低。

表2 番茄果实在采后短期高温影响下的氨基酸含量
Table 2 Amino acid contents of tomato fruits under the influence of short-term high temperature treatment after harvest

氨基酸名称	μmol·g ⁻¹			
	高温处理0 h	高温处理1 h	高温处理2 h	高温处理4 h
组氨酸	19.13±2.64 ^{abAB}	15.92±1.12 ^{cC}	20.06±1.17 ^{aA}	17.65±0.88 ^{bBC}
苯丙氨酸	33.88±3.44 ^{bA}	26.60±2.92 ^{cB}	37.18±2.24 ^{aA}	34.18±1.55 ^{bA}
酪氨酸	32.50±6.86 ^{aAB}	27.96±2.30 ^{bBC}	34.26±1.85 ^{aA}	23.38±1.16 ^{cC}
γ-氨基丁酸酯	172.45±26.12 ^{cC}	185.98±17.79 ^{cBC}	283.45±13.94 ^{aA}	210.46±22.49 ^{bB}
天门冬氨酸	135.10±12.3 ^{abAB}	125.12±19.19 ^{bB}	137.67±2.80 ^{abAB}	143.45±6.19 ^{aA}
谷氨酰胺	439.65±48.12 ^{bB}	353.66±25.15 ^{cC}	534.89±25.69 ^{aA}	430.30±18.22 ^{bB}
精氨酸	85.38±9.56 ^{aA}	66.42±6.45 ^{bB}	81.19±5.04 ^{aA}	84.14±2.43 ^{aA}
丙氨酸	129.50±56.38 ^{bBC}	120.47±27.33 ^{bC}	170.59±18.34 ^{aAB}	183.91±12.85 ^{aA}
缬氨酸	20.65±3.01 ^{aA}	16.55±1.32 ^{bB}	22.51±0.62 ^{aA}	22.25±1.15 ^{aA}
异亮氨酸	20.05±3.02 ^{aA}	14.79±1.02 ^{bB}	20.28±0.84 ^{aA}	20.09±0.69 ^{aA}
亮氨酸	16.66±2.71 ^{aA}	12.88±0.95 ^{bB}	17.91±0.78 ^{aA}	17.51±0.58 ^{aA}
谷氨酸	325.60±19.07 ^{aA}	198.31±15.11 ^{cB}	302.38±22.90 ^{bA}	325.85±23.04 ^{aA}
天冬酰胺	121.02±11.80 ^{aA}	79.62±6.28 ^{cC}	110.83±5.29 ^{bAB}	107.19±5.02 ^{bB}

表中数据为含量的平均值±标准误; 同一行中不同列的大、小写字母分别表示极显著(P<0.01)和显著(P<0.05)水平。表3~7同此。

以上结果表明,番茄果实在采后短期高温的影响下,其氨基酸含量会发生变化,其中大部分氨基酸的含量在处理1 h与0 h相比具有显著降低的趋势,在处理4 h其含量与0 h相比,没有显著变化。由此可见,番茄果实在采后的短时间内,高温可能会影响其体内氨基酸的含量变化,并且不同种类氨基酸的变化趋势具有差异性。

2.1.2 采后短期高温对糖类含量的影响

糖是果实重要的组成部分,番茄果实中糖由葡萄糖、蔗糖、果糖组成。番茄果实在短期高温的影响下,糖类的含量随着处理时间的延长,均发生了变化。其中,果糖的含量逐渐升高。由表3得知,与0 h (747.75 $\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$)相比,在处理1 h (753.65 $\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$)、2 h (772.02 $\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$)、4 h (785.13 $\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$)其含量具有显著升高的趋势。蔗糖的含量在处理1 h (140.88 $\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$)与0 h (277.44 $\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$)相比显著降低。随后2 h (149.77 $\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$)、4 h (176.18 $\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$)含量具有升高的趋势,但处理4 h其含量与0 h相比显著降低。葡萄糖0 h的含量为15 450.47 $\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$,在处理1 h (14 361.63 $\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$)具有下降趋势,随后2 h (17 055.4 $\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$)升高,4 h (16 722.91 $\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$)下降的趋势,但处理4 h其含量与0 h相比显著升高。以上结果发现,番茄果实在采后短时高温的影响下,其糖类含量均会发生变化,并且随着处理时间的延长其含量与0 h含量相比,蔗糖的含

量显著降低,葡萄糖和果糖的含量显著升高。

2.1.3 采后短期高温对脂类含量的影响

从表4可知,番茄果实在采后短时高温的影响下,其脂类的含量随着处理时间的延长而发生变化。脂质R-CH2随着处理时间的延长,其含量具有下降的趋势,在处理4 h其含量由0 h的84.13 $\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$ 降低到68.52 $\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$,含量显著降低,降低了18%。脂质R-CH3的含量在处理2 h (17.68 $\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$)其含量与0 h (15.86 $\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$)相比,显著升高。处理4 h (15.53 $\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$)其含量与0 h (15.86 $\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$)相比,其含量并没有显著变化。以上结果发现,番茄果实在采后短时高温的影响下,其脂类的含量会发生变化,并且脂类的含量随着处理时间的延长,具有下降的趋势。

2.1.4 采后短期高温对有机酸含量的影响

番茄果实在采后短时高温的影响下,其有机酸含量随着处理时间的延长,均发生了变化。由表5可知,丙酮酸的含量在处理1 h (36.81 $\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$)与0 h (50.37 $\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$)相比,显著降低。在处理4 h (52.73 $\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$)与0 h (50.37 $\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$)相比含量没有显著变化。苹果酸的含量在处理1 h (208.09 $\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$)与0 h (243.73 $\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$)相比显著降低。柠檬酸的含量,具有随着处理时间延长而升高的趋势。在处理4 h (667.07 $\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$)其含量与0 h (541.94 $\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$)相比显著升高。

表3 番茄果实在采后短期高温影响下糖类的含量

Table 3 Sugar contents of tomato fruits under the influence of short-term high temperature treatment after harvest

糖类名称	$\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$			
	高温处理0 h	高温处理1 h	高温处理2 h	高温处理4 h
蔗糖	277.44±101.51 ^{aA}	140.88±38.99 ^{bB}	149.77±17.32 ^{bB}	176.18±19.72 ^{bB}
果糖	747.75±0 ^{dD}	753.65±3.21 ^{cC}	772.02±3.21 ^{bB}	785.13±3.21 ^{aA}
葡萄糖	15 450.47±1 697.88 ^{bAB}	14 361.63±1 248.57 ^{bB}	17 055.40±555.40 ^{aA}	16 722.91±1 008.50 ^{aA}

表4 番茄果实在采后短期高温的影响下脂类的含量

Table 4 Lipid contents of tomato fruits under the influence of short-term high temperature treatment after harvest

脂类名称	$\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$			
	高温处理0 h	高温处理1 h	高温处理2 h	高温处理4 h
脂质(R-CH2)	84.13±10.69 ^{aA}	71.11±8.89 ^{bB}	70.39±8.46 ^{bB}	68.52±6.89 ^{bB}
脂质(R-CH3)	15.86±1.59 ^{bA}	15.20±1.72 ^{bA}	17.68±1.91 ^{aA}	15.53±1.53 ^{bA}

表5 番茄果实在采后短期高温的影响下有机酸的含量
Table 5 Organic acid contents in tomato fruits under the influence of short-term high temperature treatment after harvest

有机酸名称	μmol·g ⁻¹			
	高温处理0 h	高温处理1 h	高温处理2 h	高温处理4 h
丙酮酸	50.37±4.31 ^{bB}	36.81±4.10 ^{cC}	56.78±2.56 ^{aA}	52.73±2.30 ^{bAB}
苹果酸	243.73±22.55 ^{bAB}	208.09±25.00 ^{cB}	279.35±38.44 ^{aA}	222.20±7.80 ^{bcB}
柠檬酸	541.94±117.85 ^{bB}	573.00±55.88 ^{bAB}	647.77±48.73 ^{aA}	667.07±25.45 ^{aA}

以上结果表明,番茄果实在采后短时高温的影响下,其有机酸的含量均随着处理时间的延长而发生变化。柠檬酸是影响番茄风味的重要物质,其含量随着采后高温处理时间的延长,具有升高的趋势。

2.1.5 采后短期高温对番茄红素和维生素C的影响

番茄红素是人类饮食中类胡萝卜素的重要来源,具有抗氧化作用。由于番茄红素的全反式结构稳定性较差,有研究发现热处理会导致番茄红素的降解。本次实验中,番茄果实在采后短时高温影响下,番茄红素的含量也发生了变化。由表6可知,随着处理时间的延长,其番茄红素含量降低,在采后4 h番茄红素含量由0 h的46.31 μg·g⁻¹降低到39.28 μg·g⁻¹,降低了约15%。维生素C含量在处理4 h与0 h相比,其含量由238.45 μg·g⁻¹升高到313.53

μg·g⁻¹,约升高了31%,并且具有极显著差异。以上结果发现,番茄果实在短期高温环境的影响下,维生素C的含量具有升高的趋势,番茄红素含量具有降低的趋势,因此采后番茄应尽可能进行合理的储存方式,以避免造成番茄红素过多的损失。

2.2 采后短期高温对樱桃番茄果实味觉强度值的影响

番茄果实在采后短期高温的影响下,其味觉强度值见表7。味觉强度的指标是以参比溶液的输出值作为对照,其中参比溶液是由氯化钾和酒石酸组成。其中,酸味的味觉强度值以-13作为无味点,低于-13表示没有该味道,反之则有。其余的味觉强度值以0作为无味点,低于0则表示没有该

表6 番茄果实在采后短期高温的影响下番茄红素和维生素C的含量
Table 6 Lycopene and Vitamin C contents of tomato fruits under the influence of short-term high temperature treatment after harvest

物质	μg·g ⁻¹			
	高温处理0 h	高温处理1 h	高温处理2 h	高温处理4 h
番茄红素	46.31±7.27 ^{aA}	41.94±3.11 ^{abA}	39.74±7.01 ^{abA}	39.28±5.24 ^{bA}
维生素C	238.45±13.34 ^{cC}	285.82±28.92 ^{bBC}	337.00±7.06 ^{aA}	313.53±3.42 ^{aAB}

表7 番茄果实在采后短期高温的影响下味觉强度值
Table 7 Tomato fruit taste intensity value under the influence of short-term high temperature treatment after harvest

高温处理时间/h	酸味	甜味	涩味	涩味回味	鲜味	丰富度
0	-4.56±0.10 ^{aA}	4.85±0.04 ^{dD}	0.76±0.04 ^{bB}	0.09±0.04 ^{abA}	5.03±0.16 ^{cB}	4.73±0.09 ^{aA}
1	-5.46±0.11 ^{bB}	5.27±0.03 ^{cC}	0.80±0.02 ^{bB}	0.07±0.04 ^{abA}	5.59±0.05 ^{bA}	4.85±0.04 ^{aA}
2	-6.46±0.18 ^{cC}	6.13±0.05 ^{bB}	0.77±0.03 ^{bB}	-0.01±0.04 ^{bA}	5.95±0.06 ^{aA}	4.88±0.10 ^{aA}
4	-6.30±0.24 ^{cC}	8.05±0.05 ^{aA}	1.22±0.05 ^{aA}	0.15±0.07 ^{aA}	5.88±0.13 ^{aA}	4.84±0.14 ^{aA}

味道,数值越大代表味觉强度值越大。本次测试中番茄果实的咸味、苦味和苦味回味的值低于无味点(0),故取酸味、甜味、涩味、涩味回味、鲜味、丰富度的味觉强度值作为评判番茄果实在短期高温影响下的有效味觉指标。由表7可见,采后短期高温对番茄果实的丰度不会造成影响,在处理的1、2、4 h与0 h相比其味觉度值没有显著变化。涩味在短期高温的影响下,在处理4 h与0 h相比其味觉强度显著增强。番茄果实鲜味的味觉值由0 h的5.03增强到5.88,具有显著增强的趋势。番茄果实酸味的味觉值由0 h的-4.56降低到-6.3,且呈现显著降低的趋势。随着处理时间的延长,甜味的味觉值强度具有升高的趋势,在处理4 h其味觉值由0 h的4.85上升到8.05,且呈现显著升高的趋势。以上结果可以发现,番茄果实在采后短期高温的影响下,其酸味、甜味、涩味、涩味回味、鲜味、丰富度的味觉强度值均会发生改变,但甜味、酸味和涩味的味觉变化较为显著。因此,采后短期高温促进了番茄果实甜味、涩味的味觉强度。

2.3 采后短期高温对樱桃番茄果实与品质相关基因表达的影响

与番茄果实品质相关的基因有: *Brix9-2-5*、*AGPL1*、*SUCR*、*ID11*、*PSY1(R)*、*Tangerine (T)*、*SINCED1*、*LOX*、*Beta/old-gold (B/OG)*。通过RNA-Seq分析出了与品质相关基因在短期高温影响下的表达情况(图1)。其中, *AGPL1*的表达随着高温处理时间的延长,基因的表达发生了变化,在处理4 h其表达与0 h相比,表达量显著上调。*SUCR*、*SINCED1*和*Beta/old-gold (B/OG)*的表达量同样随着高温处理时间的延长,表达量具有上调的趋势。*ID11*的表达量在高温处理2 h时表达量上调,随后在处理4 h表达量下调。*LOX*、*PSY1*、*Tangerine (T)*、*Brix9-2-5*的表达具有随着高温处理时间的延长,而下调的趋势。因此,短期高温同时会影响樱桃番茄果实与品质相关基因的表达。

3 讨论

番茄果实在采后涉及一系列的生理生化过程,可能会影响果实的硬度、颜色、口感等。因此,研究采后短期高温对樱桃番茄果实营养物质、味觉

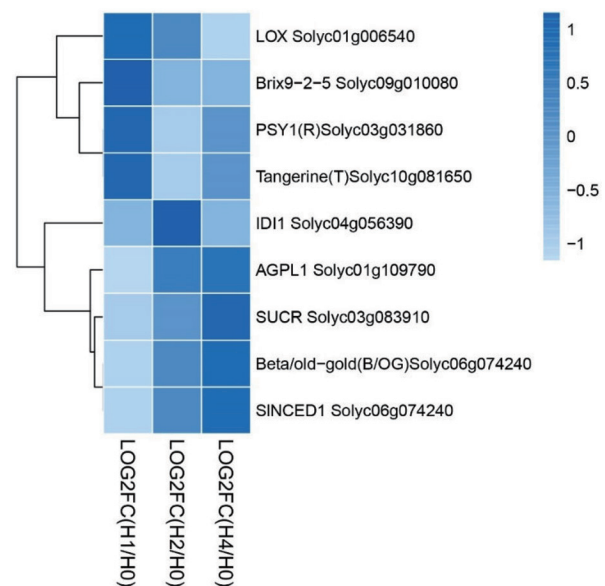


图1 短期高温对与番茄品质相关基因的影响

Fig. 1 Effects of short-term high temperature treatment on genes related to tomato quality

LOX: lipoxigenase; Brix9-2-5: LIN5; psy1: phytoene synthase1; T: Tangerine; AGPL1: ADP-glucose pyrophosphorylase; SUCR: sucrose accumulator; B/OG: Beta/old-gold.

强度和品质相关基因表达的影响,具有重要意义。可为番茄采后进行合理的贮运、保鲜过程提供数据支持。

本研究结果发现:在短期高温的影响下,大部分氨基酸的含量在处理1 h与0 h相比,含量显著降低,处理4 h时含量与0 h相比没有显著变化。目前已有研究表明,氨基酸通过参与植物体内的生理代谢过程、调节基因表达、调节相关酶活性等方式,以增强植物对非生物逆境胁迫的适应性(宋奇超等2012)。谷氨酸作为植物体中的损伤信号(Masatsugu等2018),本实验中也发现在短期高温的影响下,番茄果实中谷氨酸的含量在处理1 h其含量显著降低,推测其可能是番茄果实中的一种损伤信号。氨基酸分解代谢途径受多种机制调控,并与其他途径相互作用,影响其变化的机制也较为复杂(Hildebrandt等2015)。有研究表明,外源GABA处理可降低柑橘采后贮藏过程中柠檬酸和重要氨基酸的消耗,同时提高了柑橘贮藏性能,说明GABA对果实的耐储存能力起着一定的作用(Sheng等2017)。

番茄果实中也含有GABA, 其含量在开花期到果实成熟期间呈上升趋势, 在果实成熟后迅速下降(Takayama和Ezura 2015)。本文中采后短期高温对番茄果实内的GABA的含量也具有影响, 且处理4 h含量与0 h相比, 显著升高。推测可能是采后短时高温促进了果实后熟从而影响GABA含量的升高。有研究发现, 冷藏过程会影响番茄果实中蛋白质的分解、氨基酸的含量等, 在果实成熟过程中氨基酸的积累也是由蛋白质水解造成的, 这一过程可能会影响果实的品质(Re等2012)。番茄果实采后短时高温的影响下, 丙酮酸、苹果酸的含量在处理4 h与0 h相比, 没有显著变化。柠檬酸的含量, 具有随着处理时间的延长而升高的趋势。在4 h其含量与0 h相比, 显著升高。葡萄糖、果糖、蔗糖的含量均随着处理时间的延长而发生变化, 与0 h含量相比, 果糖和葡萄糖的含量显著升高, 蔗糖含量显著降低。果糖和柠檬酸会影响番茄的风味, 本实验中也发现果糖和柠檬酸的含量均随着处理时间的延长, 其含量显著升高, 由此推测采后短时高温可能会加速番茄果实的后熟过程。通过味觉系统分析也发现, 甜味的味觉强度随着处理时间的延长而增强, 这与果糖含量升高具有一致性。本实验结果也显示在短期高温的影响下, 维生素C在高温处理的4 h其含量与0 h相比, 显著升高。番茄果实中的番茄红素含量具有显著降低的趋势, 符合之前已有的研究发现热处理容易导致番茄红素的氧化和异构化, 从而导致番茄红素的降解(Shi和Le Maguer 2000), 说明高温可能会影响番茄红素的含量。

番茄的口感和品质受果实可溶性固形物含量的影响, 其中*AGPL1*是影响番茄可溶性固形物含量的基因, 其编码腺苷二磷酸葡萄糖焦磷酸化酶的大亚基, 通过延长葡萄糖焦磷酸化酶的活性而促进果实中可溶性固形物的含量(Petreikov等2006)。在此次实验中也发现处理4 h其表达与0 h相比, *AGPL1*表达量显著上调, 由此推测采后短时高温可能促进了番茄果实可溶性固形物含量的累积。*Brix9-2-5*编码质外体蔗糖转化酶会影响番茄果实的含糖量, 其中主要促进蔗糖水解为果糖和葡萄糖的过程(Fridman等2004)。本次实验中也发现, 随着高温处理时间的延长, 蔗糖含量显著降低, 而

葡萄糖和果糖含量增加。*SUCR*属于液泡型蔗糖转化酶, *SUCR*位点可以提高成熟果实中总糖含量的积累, 本研究中发现随着高温处理时间的延长, *SUCR*表达量显著上调。*Beta/old-gold (B/OG)*、*PSY1*、*Tangerine (T)*是与类胡萝卜素途径相关的基因, 其中*Beta/old-gold (B/OG)*属于番茄红素 β -环化酶, *Beta*与*old-gold*为等位基因, *Beta*编码番茄红素 β -环化酶, *old gold*功能缺失突变体因无法合成 β -胡萝卜素而使果肉呈深红色且同时影响番茄风味品质和控制番茄红素在成熟果实中的积累(Ronen等2000)。八氢番茄红素合成酶基因*PSY1*突变会影响全反式番茄红素的合成, 使得茄果肉为黄色, 同时会影响番茄的风味品质(Kang等2014)。*Tangerine (T)*编码番茄红素的异构酶*CRTISO*, 突变后影响原番茄红素的积累导致全反式番茄红素降低, 使番茄果肉成橘黄色, 同时会影响番茄的风味品质(Isaacson等2002)。*PSY1*、*Tangerine (T)*在本文研究中发现其表达具有下调的趋势与番茄红素含量的降低具有一致性。*LOX*亚型由于不同的调节在果实成熟过程中可能具有不同的功能, 如影响风味化合物的生物合成、果实挥发性物质的合成过程等。在番茄中*TomloxC*是一种关键的脂氧合酶, 参与脂肪酸衍生的C6短链风味化合物的产生, 并且在水果风味的产生中具有重要的作用(Chen等2004)。

本实验发现, 高温可能会加速番茄果实采后的后熟过程, 从而导致果糖、葡萄糖、柠檬酸和维生素C的含量显著升高; 蔗糖、脂类、番茄红素含量显著降低; 甜味、鲜味和涩味的味觉强度值增强, 并且会影响与番茄果实品质相关基因的表达。因此, 采后短期高温可能会影响番茄果实的品质, 为了避免造成其营养物质的损耗, 应尽可能采用合理的贮运方式, 尤其是需长时间运输或贮藏时, 则更需避免采后受到高温环境对其的影响, 应尽快采用合理的处理以延长其保鲜时间, 以避免高温环境造成番茄果实品质的降低。

参考文献(References)

- Bennett AB (2012). Taste: unraveling tomato flavor. *Curr Biol*, 22: 443–444
Chen G, Hackett R, Walker D, et al (2004). Identification of

- a specific isoform of tomato lipoxygenase (TomloxC) involved in the generation of fatty acid-derived flavor compounds. *Plant Physiol*, 136: 2641–2651
- Fridman E, Liu YS, Zamir D (2004). Zooming in on a quantitative trait for tomato yield using interspecific introgressions. *Science*, 305 (5691): 1786–1789
- Gu YD (2014). The characteristics of Shanghai summer high temperature in 2013 and its impact on the city. The 31st Annual Meeting of Chinese Atmospheric Society S2 Disaster Weather Monitoring, Analysis and Forecasting, 8 (in Chinese with English abstract) [顾宇丹(2014). 2013年上海夏季高温特点及其对城市影响第31届中国气象学会年会S2灾害天气监测、分析与预报, 8]
- Hildebrandt TM, Nesi AN, Araujo WL, et al (2015). Amino acid catabolism in plants. *Mol Plant*, 8: 1563–1579
- Isaacson T, Ronen G, Zamir D, et al (2002). Cloning of tangerine from tomato reveals a carotenoid isomerase essential for the production of beta-carotene and xanthophylls in plants. *Plant Cell*, 14: 333–342
- Klee HJ, Giovannoni JJ (2011). Genetics and control of tomato fruit ripening and quality attributes. *Annu Rev Genet*, 45: 41–59
- Kang B, Gu Q, Tian P, et al (2014). A chimeric transcript containing *Psy1* and a potential mRNA is associated with yellow flesh color in tomato accession PI 114490. *Planta*, 240: 1011–1021
- Li ZG, Yang QC, Zha LY, et al (2018). The root zone and interplant temperature characteristics of tomato soil ridge embedded substrate cultivation in the solar greenhouse in summer. *Shandong Agr Sci*, 50 (12): 41–44 (in Chinese with English abstract) [李宗耕, 杨其长, 查凌雁等(2018). 日光温室夏季番茄土垄内嵌式基质栽培根区及株间温度特征. *山东农业科学*, 50 (12): 41–44]
- Masatsugu T, Dirk S, Satoe S, et al (2018). Glutamate triggers long-distance, calcium-based plant defense signaling. *Science*, 361: 1112–1115
- Petreikov M, Shen S, Yeselson Y, et al (2006). Temporally extended gene expression of the ADP-Glc pyrophosphorylase large subunit (*AgpL1*) leads to increased enzyme activity in developing tomato fruit. *Planta*, 224: 1465–1479
- Re MD, Gonzalez C, Sdrigotti MA, et al (2012). Ripening tomato fruit after chilling storage alters protein turnover. *J Sci Food Agric*, 92: 1490–1496
- Ronen G, Carmel-Goren L, Zamir D, et al (2000). An alternative pathway to β -carotene formation in plant chromoplasts discovered by map-based cloning of *Beta* and *old-gold* color mutations in tomato. *Proc Natl Acad Sci USA*, 97: 11102–11107
- Sheng L, Shen D, Luo Y, et al (2017). Exogenous gamma-aminobutyric acid treatment affects citrate and amino acid accumulation to improve fruit quality and storage performance of postharvest citrus fruit. *Food Chem*, 216: 138–145
- Shi J, Le Maguer M (2000). Lycopene in tomatoes: chemical and physical properties affected by food processing. *Crit Rev Biotechnol*, 20: 293–334
- Snowden CJ, Thomas B, Baxter CJ, et al (2015). A tonoplast Glu/Asp/GABA exchanger that affects tomato fruit amino acid composition. *Plant J*, 81: 651–660
- Song QC, Cao FQ, Gong YY, et al (2012). Research progress on amino acid absorption and transport and biological functions of higher plants. *J Plant Nutr Fertilizer*, 18 (6): 1507–1517 (in Chinese with English abstract) [宋奇超, 曹凤秋, 巩元勇等(2012). 高等植物氨基酸吸收与转运及生物学功能的研究进展. *植物营养与肥料学报*, 18 (6): 1507–1517]
- Takayama M, Ezura H (2015). How and why does tomato accumulate a large amount of GABA in the fruit? *Front Plant Sci*, 6: 612
- Thole V, Vain P, Yang RY, et al (2020). Analysis of tomato post-harvest properties: fruit color, shelf life, and fungal susceptibility. *Curr Protoc Plant Biol*, 5: e20108
- Xiao C, Hao F, Qin X, et al (2009). An optimized buffer system for NMR-based urinary metabolomics with effective pH control, chemical shift consistency and dilution minimization. *Analyst*, 134: 916–925
- Yun Z, Jin S, Ding Y, et al (2012). Comparative transcriptomics and proteomics analysis of citrus fruit, to improve understanding of the effect of low temperature on maintaining fruit quality during lengthy post-harvest storage. *J Exp Bot*, 63: 2873–2893
- Zhang J, Zhang Y, Du Y, et al (2011). Dynamic metabolomic responses of tobacco (*Nicotiana tabacum*) plants to salt stress. *J Proteome Res*, 10: 1904–1914