

不同樱桃番茄品种果实发育过程中类胡萝卜素的變化規律

闫见敏, 曹克梅, 李云洲, 张万萍, 耿广东, 须文* (贵州大学农学院, 贵州贵阳 550025)

摘要 分析不同樱桃番茄品种果实发育期类胡萝卜素的變化規律, 探讨果肉外观颜色差异形成的原因, 为选育不同果实颜色的樱桃番茄新品种提供参考。以成熟果色分别为红色、粉色、黄色、紫色和绿色的“状元红”“粉丽娜”“皇冠”“黑珍珠”和“碧玺”5个樱桃番茄品种为试材, 测定其绿熟期、转色期、成熟期的叶绿素、番茄红素、胡萝卜素等色素的含量。结果表明, 5个樱桃番茄品种在果实成熟过程中叶绿素含量呈逐渐降低趋势, 完熟期含量最低; 番茄红素含量呈逐渐增高趋势, 其中, “状元红”完熟期番茄红素的含量最高, 达0.092 mg/g; “黑珍珠”随着果实的成熟, 叶绿素、胡萝卜素和番茄红素的含量呈增高趋势, 其叶绿素、胡萝卜素含量明显高于“状元红”和“粉丽娜”; “皇冠”果实成熟过程中胡萝卜素的含量均低于其他几个品种; “皇冠”和“碧玺”果实成熟过程中几乎不含番茄红素。

关键词 樱桃番茄; 果实发育; 类胡萝卜素; 果实颜色; 色素含量

中图分类号 S641.2 文献标识码 A

文章编号 0517-6611(2021)04-0046-04

doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2021.04.012



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

Law of Changes of Carotenoid Content in Different Cultivars of Cherry Tomato during Fruit Development

YAN Jian-min, CAO Ke-mei, LI Yun-zhou et al (College of Agriculture, Guizhou University, Guiyang, Guizhou 550025)

Abstract The change regularity of carotenoid contents of cherry tomato fruits with different colors during the development was studied, and the relationship between cherry tomato fruit color and carotenoid change was analyzed, providing a reference for breeding new varieties including more lycopene. Five cherry tomato varieties were used as test materials which maturity fruit color was red, pink, yellow, purple and green, respectively, and the content of chlorophyll, lycopene, carotene and other pigments during fruit development was measured. The result showed that the content of chlorophyll decreased gradually and the content of lycopene increased in five cherry tomato varieties during the ripening process, among which Zhuangyuanhong that the content of lycopene was the highest 0.092 mg/g in the mature stage. The contents of chlorophyll, carotene and lycopene in Heizhenzhu increased with the ripening of the fruit, and the contents of chlorophyll and carotene were significantly higher in Heizhenzhu than that of Zhuangyuanhong and Fenlina. The content of carotene of Huangguan was lower than that of other varieties during the ripening process; Huangguan and Bixi almost did not contain lycopene during the ripening process of fruit.

Key words Cherry tomato; Fruit development; Carotenoid; Fruit color; Pigment content

类胡萝卜素普遍存在于不同颜色的花卉、水果、蔬菜中, 其含量和组成不仅决定果实外观色泽和商品性, 同时还具有抗癌、降血压、提高免疫力、抗氧化、延缓衰老等保健功效^[1-5], 各国育种工作者越来越重视作物品种中类胡萝卜素含量的选择。樱桃番茄果色有红色、粉色、黄色、橙色、棕色、紫色、黑色、绿色等颜色, 富含多种类胡萝卜素, 近年来番茄红素在食品加工、医药保健、美容养颜等领域得到广泛应用。目前, 番茄红素市场逐渐扩大, 急需大量富含番茄红素的品种。类胡萝卜素广泛存在于植物叶绿体和有色体膜上, 由8个异戊二烯单位首尾相连形成, 是一类重要的天然色素的总称, 除八氢番茄红素、六氢番茄红素等少数类胡萝卜素呈无色外, 绝大多数类胡萝卜素呈现一定颜色, 如黄色、橙色和红色。在枇杷^[6]、枸杞^[7]、宫内伊予柑^[8]、万寿菊^[9]、番茄^[10]、辣椒^[11]、杏^[12]、桃^[13]、芒果^[14]和柑橘^[15]等不同作物上研究表明, 果实内不同类胡萝卜素含量的变化引起果实外观呈色存在一定的差异, 影响果实营养品质与商品特性。王蕾等^[16]对6个不同成熟果色的番茄品种采用HPLC外标法在果实发育期进行类胡萝卜素含量变化分析, 结果表明, 番茄果实发育过程中, 不同成熟果色的番茄果实中番茄红素、叶

黄素、 β -胡萝卜素含量有所不同。李京等^[17]研究发现在室温、避光、通风等不同环境条件下, 采后番茄的果实中总类胡萝卜素的含量在转色期后迅速增加; 其中, 番茄红素的比例也随之增加。吕鑫等^[18]以不同成熟果色的4个番茄品种为试材在果实发育期对果实不同部位的番茄红素含量进行测定, 结果发现红果品种中番茄红素含量最高, 绿果品种中最低; 胎座中番茄红素合成最早。吴浪等^[19]研究发现, 番茄果实表面颜色易受番茄果实不同部位影响, 其中, 果肉色对果实表面颜色的影响最大, 依次是果皮色、胎座胶状物质颜色。

虽然国内外关于番茄果实色泽与类胡萝卜素含量变化有不少报道, 但大部分集中在普通番茄上, 且研究方法主要是HPLC。对于樱桃番茄不同成熟期类胡萝卜素含量变化规律缺乏研究, 因此, 为了提高番茄红素品种选育效率, 有必要采用操作简单、快速、实用的有机溶剂提取法筛选富含番茄红素的品种资源。笔者以5种不同成熟果色的樱桃番茄为试验材料, 研究其果实发育过程中类胡萝卜素含量和果实色泽变化的相关性, 为筛选富含番茄红素的樱桃番茄新品种提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 试验材料 材料为成熟果色分别呈红色、粉色、黄色、紫色和绿色的“状元红”“粉丽娜”“皇冠”“黑珍珠”和“碧玺”5个樱桃番茄品种, 均购自山东省寿光市瑞航农业科技有限公司。

1.2 试验设计 于2017年4月13日分别将5个樱桃番茄品种的种子直接播入装有湿润育苗基质的72孔黑色塑料育

基金项目 国家自然科学基金项目(31960604); 贵州大学人才引进科研项目(贵大人基合字[2014]18号); 贵州省生物学国内一流学科建设学科开放基金(GNYL[2017]009FX4KT43)。

作者简介 闫见敏(1983—), 女, 河北邯郸人, 副教授, 博士, 从事蔬菜育种与生物技术研究。*通信作者, 教授, 博士, 从事蔬菜作物生长发育调控研究。

收稿日期 2020-07-08

苗盘穴孔内,每孔播 2 粒,塑料大棚内育苗。当幼苗具 5~6 片真叶时,从塑料大棚移栽到露地,按株行距 55 cm×45 cm 进行定值,常规田间管理。待果实定型后,分别采取不同品种

绿熟期、转色期、完熟期 3 个时期的果实(图 1),用有机溶剂法提取类胡萝卜素。3 次重复,每重复用 5 个果实。

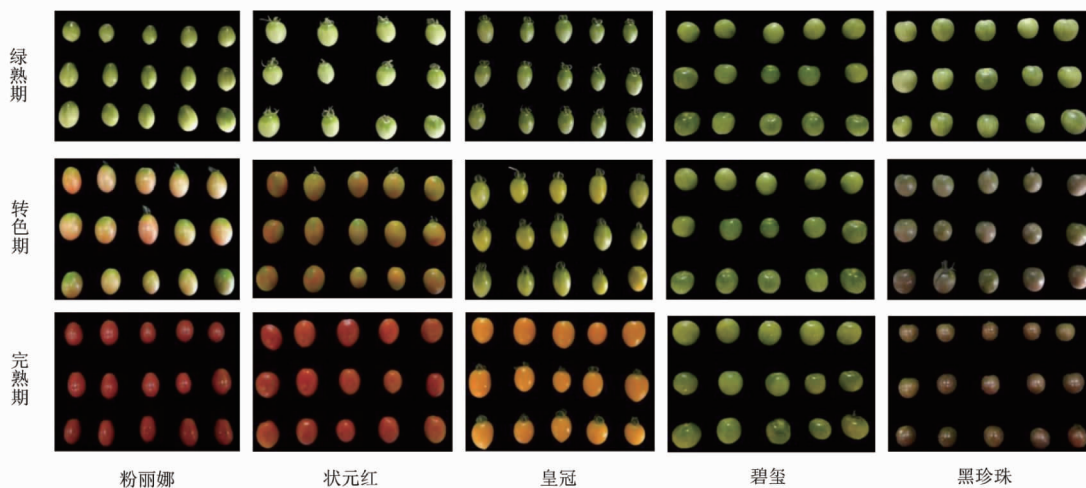


图 1 不同樱桃番茄品种的取材时期

Fig.1 Material collection period of different cherry tomato varieties

1.3 测定项目与方法

1.3.1 类胡萝卜素的提取与测定。将 3 次重复的果实混合,切碎,随机取 5~10 g 混合样品于研钵中,加 7~8 mL 丙酮和 5~6 mL 己烷,研磨成匀浆状。匀浆倒入耐酸性过滤性漏斗中,将漏斗装在抽滤瓶上抽滤,漏斗上残渣用少量丙酮和己烷反复洗涤抽滤,直至残渣呈白色为止。滤液倒入分液漏斗中,静置后分为 2 层,弃下相。上层用 20 mL 90% 甲醇洗涤约 1 min,静置、澄清分层后弃去下相,反复 2~3 次,用滤纸将分液漏斗嘴吸干,将溶液定容至 50 mL。487.5 及 502.0 nm 波长处测定并记录其光密度值,测 3 次,取其平均值。

计算公式:

总胡萝卜素 ($\mu\text{g/g}$) = $D_{487.5} \times \text{稀释倍数} \times 106 / (181 \times \text{比色杯厚度} \times \text{样品重})$

番茄红素 = $(D_{502} \times 181 / 487.5 - 42 / 237) \times 100\%$

1.3.2 叶绿素的提取与测定。叶绿素的测定参考阮美颖等^[20]的测定方法,稍作改动。称取 0.2 g 样品于研钵中,加入少量 95% 乙醇,碳酸钙、石英砂研磨,过滤至棕色容量瓶中定容至 25 mL,分光光度计测定 665、649 nm 波长并记录其光

密度值。

计算公式:

$$C_a = 12.72A_{665} - 2.59A_{649}$$

$$C_b = 22.88A_{649} - 4.67A_{665}$$

$$C_t = C_a + C_b$$

式中, C_a 为叶绿素 a 浓度, C_b 为叶绿素 b 浓度, C_t 为总叶绿素浓度; A_{665} 为波长 665 nm 处的吸光值; A_{649} 为波长 649 nm 处的吸光值。

1.4 数据分析 利用 Microsoft Office Excel 2010 整理数据,用 SPSS 软件绘制成图。

2 结果与分析

2.1 不同樱桃番茄品种果实发育过程中叶绿素含量的变化 5 个不同樱桃番茄品种果实发育过程中叶绿素 a、叶绿素 b、总叶绿素的含量均呈逐渐下降趋势,到完熟期其含量降至最低(图 2)。其中,紫色品种“黑珍珠”果实发育过程中的叶绿素含量均比其他 4 个品种高。完熟期的紫色品种“黑珍珠”叶绿素含量略高于绿色品种“碧玺”,显著高于红色品种“状元红”、粉色品种“粉丽娜”和黄色品种“皇冠”,可能说明

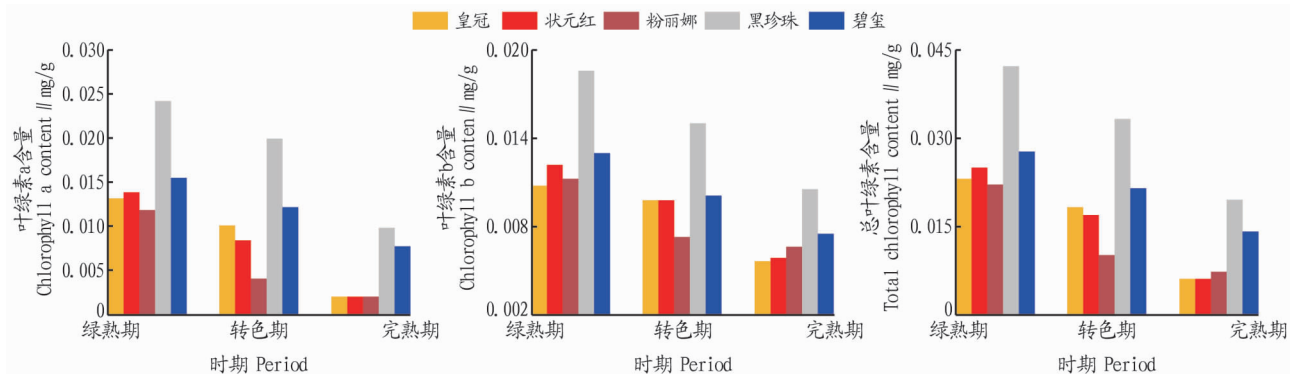


图 2 不同樱桃番茄品种果实发育期叶绿素含量的变化

Fig.2 Changes of chlorophyll content in different cherry tomato cultivars during fruit development

紫色番茄呈紫色与自身含较高叶绿素有关,这也可能是呈紫色的原因之一。绿色品种“碧玺”在果实成熟过程中叶绿素 a、叶绿素 b、总叶绿素的含量变化趋势相同,与成熟期成反比关系,即随着果实成熟其含量降低,其在各时期的叶绿素含量均高于“状元红”“粉丽娜”和“皇冠”。完熟期“状元红”“粉丽娜”和“皇冠”这 3 个品种的叶绿素 a、叶绿素 b、总叶绿素的含量趋于零。

2.2 不同樱桃番茄品种果实发育过程中胡萝卜素含量的变化 樱桃番茄果实成熟期胡萝卜素含量的变化趋势与叶绿素含量的变化趋势正好相反,即随着果实的成熟 5 个樱桃番茄品种的胡萝卜素含量呈逐渐增加趋势(图 3),其中,紫色品种“黑珍珠”的胡萝卜素含量在各时期均显著高于其他 4 个品种,完熟期达到最高为 0.014 mg/g;绿色品种“碧玺”完熟期的胡萝卜素含量超过“状元红”“粉丽娜”和“皇冠”;黄色品种“皇冠”在 3 个成熟时期的胡萝卜素含量均低于其他 4 个品种,推测可能是黄色品种“皇冠”随着果实成熟其叶黄质和 α -胡萝卜素含量急剧下降直至消失^[8],导致其胡萝卜素含量也随着降低。

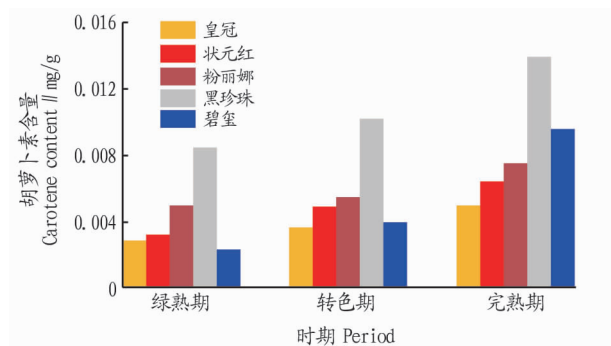


图3 不同樱桃番茄品种果实发育期胡萝卜素含量的变化

Fig.3 Changes of carotene content in different cherry tomato cultivars during fruit development

2.3 不同樱桃番茄品种果实发育过程中番茄红素含量的变化 由图 4 可知,5 个樱桃番茄品种在绿熟期基本不含番茄红素。红色品种“状元红”、粉色品种“粉丽娜”和紫色品种“黑珍珠”的番茄红素含量均随着果实的成熟呈上升趋势,且上升幅度很大,到完熟期“状元红”的含量达到最高,为 0.092 mg/g,其次是“粉丽娜”,然后是“黑珍珠”。说明这 3 个品种的呈色也受到了番茄红素含量的影响。黄色品种“皇冠”和绿色品种“碧玺”这 2 个品种在果实发育过程中几乎不含番茄红素。

3 结论与讨论

类胡萝卜素广泛存在于自然界中,主要包括胡萝卜素(碳氢化合物)和叶黄素(胡萝卜素的氧化衍生物)两大类,具有明显的抗氧化作用,是人类和动物必不可少的营养物质。除八氢番茄红素、六氢番茄红素等少数类胡萝卜素呈无色外,绝大多数类胡萝卜素均呈一定的颜色,如番茄红素呈红色,叶黄素呈黄色, α -胡萝卜素和 β -胡萝卜素呈橙色^[21]。研究发现,多数植物花、果的颜色与类胡萝卜素的种类及其含量的积累有关,不同色素含量的变化导致品种间存在颜色

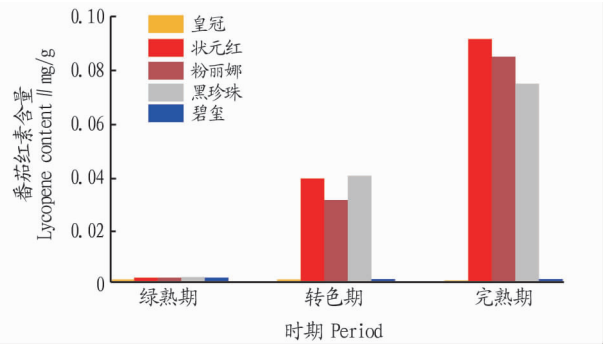


图4 不同樱桃番茄品种果实发育期番茄红素含量的变化

Fig.4 Changes of lycopene content in different cherry tomato cultivars during fruit development

差异^[22]。

番茄的果实颜色是果皮颜色和果肉颜色的相互叠加。其中樱桃番茄以其精致小巧、娇艳的外形、独特可口的食味而深受消费者的青睐,已逐渐被市场认可为一种新型水果,其果实颜色是重要的商品性状,因此对樱桃番茄果实色泽的研究引起科研工作者的极大重视。该研究以 5 个不同成熟果色的樱桃番茄品种为试材,测定其绿熟期、转色期、成熟期的叶绿素、番茄红素、胡萝卜素等色素的含量。结果表明,不同品种的樱桃番茄果实外观颜色变化与其积累的类胡萝卜素含量有关,主要是由于叶绿素含量下降和类胡萝卜素含量升高所致,这与曲瑞芳等^[23]的研究结果相一致。5 个樱桃番茄品种在果实成熟过程中叶绿素含量呈逐渐降低趋势,到完熟期含量降到最低;番茄红素含量呈逐渐增高趋势。完熟期红色品种“状元红”、粉色品种“粉丽娜”和黄色品种“皇冠”这 3 个樱桃番茄品种的叶绿素 a、叶绿素 b、总叶绿素的含量趋于零。“状元红”“粉丽娜”和“黑珍珠”这 3 个樱桃番茄的番茄红素含量均随着果实成熟而大幅度增加,这与常培培等^[24]的研究结果一致,即红、粉、紫色品种富含番茄红素。“皇冠”和“碧玺”的番茄红素完熟期含量基本趋于零。因此,推测类胡萝卜素含量的差异是造成该试验中 5 个樱桃番茄品种呈不同果色的主要原因。紫色番茄“黑珍珠”在整个果实成熟过程中其叶绿素含量和胡萝卜素含量均明显高于其他 4 个品种。该研究还发现,黄果番茄“皇冠”的胡萝卜素含量在各时期均比其他 4 个品种的含量低,这可能与黄色番茄含有 *r* 基因有关,因为 *r* 基因的存在可大大降低胡萝卜素的合成,且抑制了番茄红素的生成。

目前,关于番茄果色形成的分子水平研究也越来越受到重视。番茄的染色体上含有较多与类胡萝卜素含量有关并控制花和果实着色的基因位点。研究发现,番茄进入转色期后,控制八氢番茄红素合成酶的基因 *Psy-1* 和控制八氢番茄红素脱氢酶的基因 *Pds* 非常活跃,其 mRNA 水平显著增加^[17,25]。与此同时,番茄红素环化酶基因 *Ley-b* 和 *Ley-e* 的 mRNA 水平急剧下降,并很快消失^[26-27]。这些基因表达水平的差异意味着番茄红素的积累与果实发育成熟过程中的基因转录调控有关。Yan 等^[28]揭示了 Aft-SIMYBATV 调控紫色番茄形成的分子机制。Yang 等^[29]利用 CRISPR/Cas9 基

因编辑技术对红果番茄杂交种“京番 501”“京番 501”和“京番 602”定向快速创制了粉果番茄杂交种,并能保持原始红果材料的优异农业性状。该研究仅重点研究了樱桃番茄类胡萝卜素的 变化规律,关于其类胡萝卜素组分、代谢、分子机制,以及如何快速高效地定向培养不同成熟果色的樱桃番茄还有待进一步研究。

参考文献

- [1] 徐昌杰,张上隆.柑橘类胡萝卜素合成关键基因研究进展[J].园艺学报,2002,29(S1):619-623.
- [2] HUGHES D A.Dietary carotenoids and human immune function[J].Nutrition,2001,17(10):823-827.
- [3] FRASER P D, BRAMLEY P M.The biosynthesis and nutritional uses of carotenoids[J].Progress in lipid research,2004,43:228-265.
- [4] DI MASCO P, KAISER S, SIES H.Lycopene as the most efficient biological carotenoid singlet oxygen quencher[J].Archives of biochemistry and biophysics,1989,274(2):532-538.
- [5] MCGHIE T K, AINGE G D.Color in fruit of the genus *Actinidia*: Carotenoid and chlorophyll compositions[J].Journal of agricultural and food chemistry,2002,50(1):117-121.
- [6] 熊作明,周春华,陶俊.不同类型枇杷果实着色期间果肉类胡萝卜素含量的变化[J].中国农业科学,2007,40(12):2910-2914.
- [7] 李赫,陈敏,马文平,等.不同成熟期枸杞中类胡萝卜素含量的变化规律[J].中国农业科学,2006,39(3):599-605.
- [8] 王伟杰,徐建国,徐昌杰.宫内伊予柑果实发育期间色泽和色素的变化[J].园艺学报,2006,33(3):461-465.
- [9] MOEHS C P, TIAN L, OSTERYOUNG K W, et al.Analysis of carotenoid biosynthetic gene expression during marigold petal development[J].Plant molecular biology,2001,45(3):281-293.
- [10] FRASER P D, TRUESDALE M R, BIRD C R, et al.Carotenoid biosynthesis during tomato fruit development(evidence for tissue-specific gene expression)[J].Plant physiology,1994,105(1):405-413.
- [11] RÖMER S, HUGUENEY P, BOUVIER F, et al.Expression of the genes encoding the early carotenoid biosynthetic enzymes in *Capsicum annuum* [J].Biochemical and biophysical research communications,1993,196(3):1414-1421.
- [12] RUIZ D, EGEA J, TOMÁS-BARBERÁN F A, et al.Carotenoids from new apricot (*Prunus armeniaca* L.) varieties and their relationship with flesh and skin color[J].Journal of agricultural and food chemistry,2005,53(16):6368-6374.
- [13] GIL M I, TOMÁS-BARBERÁN F A, HESS-PIERCE B, et al.Antioxidant capacities, phenolic compounds, carotenoids, and vitamin C contents of nectarine, peach, and plum cultivars from California[J].Journal of agricul-

tural and food chemistry,2002,50(17):4976-4982.

- [14] CHEN J P, TAI C Y, CHEN B H.Effects of different drying treatments on the stability of carotenoids in Taiwanese mango (*Mangifera indica* L.) [J]. Food chemistry,2007,100(3):1005-1010.
- [15] IKOMA Y, KOMATSU A, KITA M, et al.Expression of a phytoene synthase gene and characteristic carotenoid accumulation during citrus fruit development[J].Physiologia plantarum,2001,111(2):232-238.
- [16] 王蕾,岳英,鲁晓燕,等.不同色泽番茄品种类胡萝卜素含量的 HPLC 分析[J].石河子大学学报(自然科学版),2011,29(4):442-447.
- [17] 李京,惠伯棣,裴凌鹏.番茄果实成熟过程中类胡萝卜素含量的变化[J].中国食品学报,2006,6(2):122-125.
- [18] 吕鑫,侯丽霞,张晓明,等.番茄果实成熟过程中番茄红素含量的变化[J].中国蔬菜,2009(6):21-24.
- [19] 吴浪,刘婧仪,梁燕.番茄绿果与红果颜色性状遗传的研究[J].园艺学报,2016,43(4):674-682.
- [20] 阮美颖,叶青静,周国治,等.不同颜色樱桃番茄果实成熟过程中色素的变化[J].浙江农业科学,2013(5):526-528.
- [21] BARTLEY G E, SCOLNIK P A.Plant carotenoids; Pigments for photoprotection, visual attraction, and human health [J].The plant cell,1995,7(7):1027-1038.
- [22] SAPIR M, OREN-SHAMIR M, OVADIA R, et al.Molecular aspects of *Anthocyanin* fruit tomato in relation to *high pigment-1* [J].Journal of heredity,2008,99(3):292-303.
- [23] 曲瑞芳,梁燕,巩振辉,等.番茄不同品种间番茄红素含量变化规律的研究[J].西北农业学报,2006,15(3):121-123.
- [24] 常培培,梁燕,张静,等.5 种不同果色樱桃番茄品种果实挥发性物质及品质特性分析[J].食品科学,2014,35(22):215-221.
- [25] CORONA V, ARACRI B, KOSTURKOVA G, et al.Regulation of a carotenoid biosynthesis gene promoter during plant development [J].The plant journal,1996,9(4):505-512.
- [26] PECKER I, GUBBAY R, CUNNINGHAM F X JR, et al.Cloning and characterization of the cDNA for lycopene β -cyclase from tomato reveals a decrease in its expression during tomato ripening [J].Plant molecular biology,1996,30:806-819.
- [27] RONEN G, COHEN M, ZAMIR D, et al.Regulation of carotenoid biosynthesis during tomato fruit development: Expression of the gene for lycopene epsilon-cyclase is down-regulated during ripening and is elevated in the mutant *Delta* [J].The plant journal,1999,17(4):341-351.
- [28] YAN S S, CHEN N, HUANG Z J, et al.*Anthocyanin* fruit encodes an R2R3-MYB transcription factor, SIAN2-like, activating the transcription of *SlMYBATV* to fine-tune anthocyanin content in tomato fruit [J].New phytologist,2020,225(5):2048-2063.
- [29] YANG T X, DENG L, ZHAO W, et al.Rapid breeding of pink-fruited tomato hybrids using the CRISPR/Cas9 system [J].Journal of genetics and genomics,2019,46(10):505-508.

(上接第 36 页)

- [29] 王玉梅,杨广,赵春容,等.不同播种量对直播杂交稻产量及干物质生产的影响[J].杂交水稻,2017,32(3):66-69,78.
- [30] 赵强基,郑建初,卞新民,等.中国南方稻区玉米-稻种植模式的建立和实践[J].江苏农业学报,1997,13(4):215-219.
- [31] LIU Y E, XIE R Z, HOU P, et al.Phenological responses of maize to chan-

ges in environment when grown at different latitudes in China [J].Field crops research,2013,144:192-199.

- [32] 周宝元.黄淮海两熟制资源季节间优化配置及季节内高效利用技术体系研究[D].北京:中国农业大学,2015.
- [33] 孙丹平.稻田水旱复种轮作对作物生长、资源利用及土壤生态环境的影响[D].南昌:江西农业大学,2016.