

DOI: 10.16861/j.cnki.zggc.2024.0626

西瓜种质资源番茄红素含量鉴定与评价

刘秀云¹, 曹碧婷², 岳钉伊¹, 顾卫红²

(1. 上海农林职业技术学院 上海 201699; 2. 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)

摘要: 为了挖掘高番茄红素含量兼具优异农艺性状的西瓜种质, 对设施栽培的 21 份西瓜种质资源的农艺性状进行鉴定和评价, 并采用超高效液相色谱法检测其番茄红素含量。农艺性状的鉴定和评价结果显示, 21 份西瓜种质资源的果实发育期在 27.00~42.00 d, 单果质量在 1.71~8.53 kg, 边部可溶性固形物含量(w)在 7.00%~10.20%, 中心可溶性固形物含量在 10.00%~14.80%。21 份西瓜种质资源的鲜质量番茄红素检测结果显示, 番茄红素含量范围在 46.53~95.78 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, 变异系数达 17.84%。其中, 有 3 份种质资源的番茄红素含量 $>80\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, 属极高番茄红素含量西瓜种质; 有 7 份种质的番茄红素含量在 70.13~78.57 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, 属高番茄红素含量西瓜种质。并且, 西瓜果肉颜色与番茄红素、八氢番茄红素及 γ -胡萝卜素的含量呈极显著正相关。颜色可作为鉴定筛选高番茄红素含量西瓜种质的核心农艺性状, 小果型西瓜种质 W1-11 和大果型西瓜种质 All-Sweet Scarlet 果实发育期分别为 27 d 和 42 d, 可作为高番茄红素含量的优质高产西瓜新品种选育的直接或间接亲本。

关键词: 西瓜; 番茄红素; 种质资源; 鉴定; 评价

中图分类号: S651

文献标志码: A

文章编号: 1673-2871(2025)02-025-07

Identification and evaluation of lycopene content in watermelon germplasm resources

LIU Xiuyun¹, CAO Biting², YUE Dingyi¹, GU Weihong²

(1. Shanghai Vocational College of Agriculture and Forestry, Shanghai 201699, China; 2. Horticultural Research Institute, Shanghai Academy of Agricultural Sciences/Shanghai Key Lab of Protected Horticultural Technology, Shanghai 201403, China)

Abstract: In order to explore watermelon germplasm with high lycopene content and excellent agronomic traits, the agronomic traits of 21 watermelon germplasm resources under facility cultivation were identified and evaluated, and the lycopene content was detected by ultra performance liquid chromatography. The results of identification and evaluation of agronomic traits showed that the development period of the 21 watermelon germplasm resources ranged from 27 to 42 days, with single fruit mass ranging from 1.71 to 8.53 kg. The soluble solid content at the edge of the fruit ranged from 7.00% to 10.20%, while the soluble solid at the center ranged from 10.00% to 14.80%. The lycopene content in fresh weight ranged from 46.53 to 95.78 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, with a coefficient of variation of 17.84%. Among these, lycopene content of three germplasm resources were greater than 80 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, categorized as watermelon germplasm with extremely high lycopene content, and seven germplasms ranged from 70.13 to 78.57 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, categorized as watermelon germplasm with high lycopene content. The study also found that the flesh color of watermelon was significantly positively correlated with the content of lycopene, phytoene and γ -carotene. Therefore, flesh color can be used as a core agronomic trait for the identifying and selecting watermelon germplasm with high lycopene content. The small fruit watermelon germplasm W1-11 and the large fruit watermelon germplasm All-Sweet Scarlet, with fruit development periods of 27 days and 42 days, respectively, can be used as direct or indirect parents for breeding high-quality, high-yield and disease-resistant watermelon varieties with high lycopene content.

Key words: Watermelon; Lycopene; Germplasm; Identification; Evaluation

收稿日期: 2024-10-10; 修回日期: 2024-12-11

基金项目: 上海市科技兴农项目(2021-02-08-00-12-F00754); 上海市科技创新行动计划项目(20392000100)

作者简介: 刘秀云, 女, 副教授, 研究方向为园艺植物种质资源评价利用与栽培技术。E-mail: shseed@126.com

通信作者: 顾卫红, 女, 研究员, 研究方向为西瓜种质资源鉴定评价与创新利用。E-mail: guwh518@163.com

西瓜是我国重要的经济作物,年栽培面积达2000万hm²以上,其规模和产量均居世界第一^[1]。有研究认为,西瓜是一种新型功能性保健食品,其特异功效成分主要是西瓜果肉中的番茄红素^[2]。番茄红素作为类胡萝卜素的一种,具有消除人体自由基、抗老化、保护皮肤等功效^[3-5]。因此,选育高番茄红素含量的优质高产西瓜新品种将显著提升西瓜产品的附加值^[6]。研究表明,一般成熟红瓢西瓜果肉组织中的番茄红素积累量比新鲜采收的红番茄高出60%^[7],且西瓜果肉中的番茄红素可被人体直接吸收,无需加热或加工,其利用效率比新鲜采收的番茄高出40%^[8]。不同西瓜品种果肉中的番茄红素含量差异较大,红瓢西瓜品种番茄红素积累最多,粉红瓢西瓜品种中番茄红素的含量低于红瓢,黄瓢和白瓢西瓜品种中几乎检测不到番茄红素,而橙瓢西瓜品种中番茄红素的积累与其种类有关^[9]。此外,西瓜果肉中番茄红素含量受基因型、倍性、施肥、采收时间、贮藏温度等多种因素的影响^[10-14]。笔

者采用高效液相色谱法,检测了21份红瓢西瓜种质资源果肉中的番茄红素含量,并对各西瓜种质资源的大田主要农艺性状进行了鉴定分析,旨在从中筛选出一批高番茄红素含量兼具优质高产性状的优异西瓜种质,为西瓜种质创新及新品种选育提供核心种质材料。

1 材料与方法

1.1 材料

供试的21份西瓜种质资源均由上海市农业科学院园艺研究所西瓜育种团队提供。其中,6份为育成的纯合新品系,5份为引进的常规品种,10份为育成推广的杂交品种。各种质资源的名称、来源及类型见表1。

1.2 大田种植方法及主要农艺性状鉴定

试验于2023年2月20日至6月27日在上海农林职业技术学院种质资源圃进行,设施为6m跨度钢架大棚。采用温床基质穴盘育苗,育苗基质为

表1 21份西瓜种质资源的来源及类型

Table 1 Sources and types of 21 watermelon germplasm resources

编号 Number	种质名称 Germplasm name	来源 Source	类型 Type	瓢色 Flesh color	编号 Number	种质名称 Germplasm name	来源 Source	类型 Type	瓢色 Flesh color
1	W1-11	中国上海 Shanghai, China	新品系 New strain	大红 Bright red	12	红玲 Hongling	中国台湾 Taiwan, China	杂交品种 Hybrid variety	鲜红 Cherry red
2	W1-9	中国上海 Shanghai, China	新品系 New strain	大红 Bright red	13	秀玲 Xiuling	中国台湾 Taiwan, China	杂交品种 Hybrid variety	大红 Bright red
3	WK2-1	中国上海 Shanghai, China	新品系 New strain	大红 Bright red	14	黑美人 Heimeiren	中国台湾 Taiwan, China	杂交品种 Hybrid variety	大红 Bright red
4	W16-1-7	中国上海 Shanghai, China	新品系 New strain	大红 Bright red	15	圣女红3号 Shengnühong 3	中国上海 Shanghai, China	杂交品种 Hybrid variety	大红 Bright red
5	AW24-11-6	中国上海 Shanghai, China	新品系 New strain	大红 Bright red	16	全美2K Quanmei 2K	日本 Japan	杂交品种 Hybrid variety	大红 Bright red
6	AW11-3-4	中国上海 Shanghai, China	新品系 New strain	大红 Bright red	17	怡珍 Yizhen	中国台湾 Taiwan, China	杂交品种 Hybrid variety	鲜红 Cherry red
7	All-Sweet Scarlet	美国 America	常规品种 Conventional variety	大红 Bright red	18	元帅 Yuanshuai	中国台湾 Taiwan, China	杂交品种 Hybrid variety	大红 Bright red
8	All Sweet	美国 America	常规品种 Conventional variety	大红 Bright red	19	甘美4K Ganmei 4K	日本 Japan	杂交品种 Hybrid variety	鲜红 Cherry red
9	Lovrin	法国 France	常规品种 Conventional variety	鲜红 Cherry red	20	强者711 Qiangzhe 711	瑞士 Switzerland	杂交品种 Hybrid variety	鲜红 Cherry red
10	富研 Fuyan	日本 Japan	常规品种 Conventional variety	鲜红 Cherry red	21	美都 Meidu	中国浙江 Zhejiang, China	杂交品种 Hybrid variety	鲜红 Cherry red
11	旭大和 Xudahe	日本 Japan	常规品种 Conventional variety	鲜红 Cherry red					

$V_{\text{草炭土}}:V_{\text{水稻土}}:V_{\text{精制有机肥}}=3:2:1$ 的混合基质,育苗穴盘为 50 孔,孔径为 5 cm,孔深为 5 cm。幼苗出土后,在第 3 片真叶长出时及时移栽于大棚。瓜苗定植大棚前,大田施用 $150 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 狮马牌(N、P、K 质量比为 15:15:15)复合肥及 $15 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的有机肥,一次性耕翻入土做底肥,果实膨大期再分 2 次滴施三元复合肥 $300 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。大田种植采用随机区组设计,3 次重复,每重复定植 20 株,小区面积 17.5 m^2 。统一采用三膜覆盖爬地栽培模式,单行定植,株距 33 cm,行距 250 cm。采用主蔓摘心双蔓整枝留果方式,果实成熟期每小区调查 10 株,共计 3 个小区,考察各西瓜种质资源的果实发育期、单瓜质量、可溶性固形物含量以及口感品质等主要农艺性状。采用日本 ATAGO 爱拓糖度计(PAL-1)测定果实的中心和边部可溶性固形物含量。

1.3 测定方法

1.3.1 样品采集 根据各西瓜种质资源的生育期特性及授粉坐果期,于果实成熟期分批采收各西瓜种质的成熟果实,每份西瓜种质选取 3 个成熟期一致的果实。西瓜果实横切,先目测果肉颜色,随后采集各果实的中心果肉,装入 50 mL 的离心管,放入液氮中速冻,于 $-80 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 冰箱保存备用。

1.3.2 番茄红素检测 所有样品先粗提取,采用超高效液相色谱(ultra performance liquid chromatography, UPLC)(ExionLC™ AD, <https://sciex.com.cn/>)和串联质谱(tandem mass spectrometry, MS/MS)检测各西瓜样品的类胡萝卜素组成及含量^[15-18]。每份样品做 3 次重复检测。类胡萝卜素含量的检测是在基于标准品构建的自建数据库中比对进行物质定性分析,统计所有目标物的色谱峰面积积分,并根据类胡萝卜素标准品测定的标准曲线进行定量分析(以鲜质量计)。

1.4 数据统计与分析

采用 Excel 2019 软件对所有数据进行整理统计。采用 SPASS 27 对数据进行相关性分析。相关性分析采用双变量,用皮尔逊相关系数进行相关性分析,显著性检验采用双尾法。

2 结果与分析

2.1 各西瓜种质资源的主要农艺性状表现

21 份西瓜种质资源的主要农艺性状鉴定结果见表 2。鉴定结果显示,包含 W1-11、W1-9、W2K-1、圣女红 3 号和全美 2K 的 5 份西瓜种质果实发育期在 27~29 d,单果质量 1.71~2.09 kg,边部

可溶性固形物含量(w,后同)为 9.30%~10.20%,中心可溶性固形物含量为 13.20%~14.80%,瓢色为鲜红至大红,属于特早熟、高糖、红瓢、小果型西瓜优异种质。红玲、秀玲、黑美人、W16-1-7 以及 Lovrin 这 5 份西瓜种质果实发育期均为 30 d,单果质量 2.37~4.37 kg,边部可溶性固形物含量为 8.80%~9.50%,中心可溶性固形物含量为 12.70%~13.40%,瓢色为鲜红至大红,属早熟、高糖、优质、中小果型西瓜优异种质。富研、旭大和、甘美 4K、怡珍和元帅这 5 份西瓜种质果实发育期为 31~32 d,单果质量 3.86~4.72 kg,边部可溶性固形物含量为 8.30%~9.00%,中心可溶性固形物含量为 12.50%~13.10%,瓢色为鲜红至大红,肉质细嫩至致密,属于早中熟、红瓢、中果型西瓜优异种质。强者 711 和美都的果实发育期为 34 d,单果质量 4.87~4.93 kg,果肉鲜红,边部可溶性固形物含量为 8.0%以上,中心可溶性固形物含量为 12.5%以上,属中熟、红瓢、中大果型西瓜优异种质。AW24-11-6、BW11-3-4、All-Sweet Scarlet 和 All Sweet 这 4 份西瓜种质果实发育期为 37~42 d,单果质量 7.31~8.53 kg,果肉大红,边部可溶性固形物含量为 7.0%以上,中心可溶性固形物含量为 10.0%以上,属晚熟、大红瓢、大果型西瓜优异种质。

对各西瓜种质资源的主要农艺性状进行差异比较分析,结果显示 21 份西瓜种质资源的果实发育期在 27.00~42.00 d,变异系数为 12.54%;单果质量为 1.71~8.53 kg,变异系数为 51.64%;边部可溶性固形物含量为 7.00%~10.20%,变异系数为 8.92%;中心可溶性固形物含量为 10.00%~14.80%,变异系数为 7.12%(表 3)。边部可溶性固形物含量、中心可溶性固形物含量、果实发育期和单瓜质量的变异系数均大于 5%,表明供试的 21 份西瓜种质资源的主要农艺性状表现差异较大,遗传背景丰富。

2.2 21 份西瓜种质资源果肉中类胡萝卜素组成及含量分析

对 21 份西瓜种质资源果肉中类胡萝卜素类物质进行检测分析发现,可从中检测到 69 种类胡萝卜素,其中有 16 种类胡萝卜素在每份西瓜种质果肉中均能够检测到,包括了番茄红素、八氢番茄红素、 α -胡萝卜素、 β -胡萝卜素、 γ -胡萝卜素、叶黄素、月桂酸酯、叶黄素肉豆蔻酸酯、叶黄素二肉豆蔻酸酯、玉米黄质、紫黄质、 β -隐黄质、8'- β -阿朴胡萝卜素醛、 α -隐黄质、海胆烯酮、叶黄素二月桂酸酯等。其中,含量相对较高的类胡萝卜素主要有番茄红素、八氢番茄红

表2 21份西瓜种质资源的主要农艺性状鉴定结果

Table 2 Identification results of main agronomic traits of 21 watermelon germplasm resources

种质名称 Germplasm name	果实发育期 Fruit development period/d	单果质量 Fruit mass/kg	瓤色 Flesh color	w(边部可溶性固形物) Edge soluble solids content/%	w(中心可溶性固形物) Central soluble solids content/%	口感品质 Taste quality
W1-11	27.00±0.86	2.09±0.24	大红 Bright red	10.20±0.14	14.80±0.08	松脆 Crunchy
W1-9	28.00±1.02	1.83±0.13	大红 Bright red	9.80±0.06	13.80±0.05	致密 Densification
W2K-1	29.00±0.79	1.71±0.11	大红 Bright red	9.60±0.09	13.70±0.20	细嫩 Soft
圣女红3号 Shengnühong 3	29.00±0.95	1.85±0.15	大红 Bright red	9.30±0.08	13.20±0.08	松脆 Crunchy
全美2K Quanmei 2K	29.00±0.64	1.81±0.13	鲜红 Cherry red	9.50±0.12	13.40±0.20	松脆 Crunchy
红玲 Hongling	30.00±0.79	2.37±0.10	鲜红 Cherry red	9.00±0.15	13.30±0.04	致密 Densification
秀玲 Xiuling	30.00±0.69	2.53±0.08	大红 Bright red	9.00±0.10	12.90±0.04	致密 Densification
黑美人 Heimeiren	30.00±0.74	2.71±0.09	大红 Bright red	9.50±0.09	13.40±0.05	致密 Densification
W16-1-7	30.00±0.74	4.13±0.18	大红 Bright red	8.80±0.07	13.10±0.05	松脆 Crunchy
Lovrin	30.00±0.79	4.37±0.09	鲜红 Cherry red	9.00±0.12	12.70±0.06	松脆 Crunchy
富研 Fuyan	31.00±0.74	4.43±0.09	鲜红 Cherry red	8.80±0.09	12.80±0.06	致密 Densification
旭大和 Xudahe	31.00±0.53	4.08±0.13	鲜红 Cherry red	8.50±0.08	12.60±0.03	细嫩 Soft
甘美4K Ganmei 4K	31.00±0.83	3.86±0.07	鲜红 Cherry red	9.00±0.10	13.10±0.12	致密 Densification
怡珍 Yizhen	32.00±0.64	4.27±0.14	大红 Bright red	8.80±0.06	13.00±0.07	细嫩 Soft
元帅 Yuanshuai	32.00±0.79	4.72±0.06	鲜红 Cherry red	8.30±0.05	12.50±0.06	松脆 Crunchy
强者711 Qiangzhe 711	34.00±0.83	4.93±0.11	鲜红 Cherry red	8.10±0.12	12.50±0.06	松脆 Crunchy
美都 Meidu	34.00±0.69	4.87±0.08	鲜红 Cherry red	8.30±0.07	12.70±0.04	松脆 Crunchy
AW24-11-6	38.00±0.83	7.92±0.12	大红 Bright red	8.00±0.09	13.00±0.08	松脆 Crunchy
BW11-3-4	37.00±0.45	7.31±0.12	大红 Bright red	8.00±0.09	12.70±0.06	致密 Densification
All-Sweet Scarlet	42.00±0.91	8.53±0.08	大红 Bright red	7.50±0.10	11.50±0.06	松脆 Crunchy
All Sweet	40.00±0.83	8.03±0.10	大红 Bright red	7.00±0.12	10.00±0.12	脆硬 Hard bark

表3 21份西瓜种质资源的主要农艺性状差异比较分析

Table 3 Comparative analysis of differences in main agronomic traits among 21 watermelon germplasm resources

性状 Trait	最大值 Max	最小值 Min	均值 Average	标准差 Standard deviation	变异系数 Variation coefficient/%
果实发育期 Fruit development period/d	42.00	27.00	32.10	4.02	12.54
单果质量 Fruit mass/kg	8.53	1.71	4.21	2.17	51.64
w(边部可溶性固形物) Edge soluble solids content/%	10.20	7.00	8.76	0.78	8.92
w(中心可溶性固形物) Central soluble solids content/%	14.80	10.00	12.89	0.92	7.12

素、 α -胡萝卜素、 β -胡萝卜素、 γ -胡萝卜素和叶黄素。

21份西瓜种质资源果肉中的主要类胡萝卜素含量见表4。由表4可知,西瓜果肉中的番茄红素为其类胡萝卜素物质的主要组分,且不同种质间的番茄红素含量差异较大。21份西瓜种质资源果肉中的番茄红素含量范围在46.53~95.78 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$,变异系数达17.84%,其中,W1-11的番茄红素含量为最高,达95.78 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$,比番茄红素含量最低的美都

(46.53 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)高出2.06倍。

W1-11、W1-9和All-Sweet Scarlet这3份种质果肉中的番茄红素含量均大于80.00 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$,属极高番茄红素含量西瓜优异种质。W2K-1、W16-1-7、黑美人、AW24-11-6、BW11-3-4、All-Sweet和圣女红3号这7份种质的番茄红素含量在70.36~78.57 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$,属高番茄红素含量西瓜优异种质,其余西瓜种质的番茄红素含量在46.53~69.67 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$,属中间含量型

表4 21份西瓜种质资源的类胡萝卜素含量检测结果

Table 4 Fresh mass content detection results of carotenoids in 21 watermelon germplasm resources

种质名称 Germplasm name	w(类胡萝卜素)Carotenoids content/($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)					
	番茄红素 Lycopene	八氢番茄红素 Phytoene	α -胡萝卜素 α -carotene	β -胡萝卜素 β -carotene	γ -胡萝卜素 γ -carotene	叶黄素 Xanthophyll
W1-11	95.78±0.95	5.48±0.24	0.03±0.01	1.81±0.06	0.63±0.05	0.40±0.02
W1-9	83.13±0.14	2.69±0.14	0.05±0.01	0.79±0.06	0.41±0.03	0.33±0.04
All-Sweet Scarlet	83.02±0.91	2.13±0.16	0.01±0.00	0.82±0.07	0.45±0.04	0.27±0.02
W2K-1	78.57±0.24	6.44±0.60	0.00±0.01	0.91±0.20	0.54±0.07	0.18±0.03
W16-1-7	76.99±1.17	2.44±0.06	0.01±0.00	0.54±0.04	0.35±0.03	0.17±0.02
黑美人 Heimeiren	74.72±1.01	3.96±0.12	0.02±0.00	0.74±0.07	0.39±0.03	0.33±0.04
AW24-11-6	72.73±0.85	3.04±0.21	0.01±0.00	0.53±0.04	0.35±0.04	0.31±0.02
BW11-3-4	72.68±0.68	1.17±0.14	0.01±0.00	0.61±0.03	0.31±0.04	0.28±0.03
All-Sweet	70.37±0.29	2.48±0.12	0.02±0.00	0.75±0.08	0.33±0.03	0.14±0.04
圣女红 3号 Shengnühong 3	70.36±1.52	2.97±0.25	0.01±0.00	0.64±0.05	0.33±0.04	0.28±0.03
秀玲 Xiuling	69.67±0.29	2.41±0.05	0.00±0.00	0.66±0.08	0.36±0.06	0.22±0.01
怡珍 Yizhen	65.95±2.22	2.13±0.18	0.02±0.00	1.07±0.07	0.34±0.07	0.15±0.01
Lovrin	63.10±0.91	1.40±0.05	0.02±0.00	0.69±0.10	0.25±0.05	0.14±0.02
富研 Fuyan	62.09±0.31	1.08±0.14	0.01±0.00	1.03±0.08	0.29±0.03	0.15±0.01
旭大和 Xudahe	60.58±0.09	2.07±0.09	0.01±0.00	1.69±0.09	0.34±0.03	0.11±0.03
甘美 4K Ganmei 4K	57.15±1.23	1.45±0.21	0.02±0.00	1.06±0.06	0.28±0.05	0.23±0.01
红玲 Hongling	55.99±2.08	0.87±0.10	0.02±0.00	0.89±0.03	0.24±0.02	0.38±0.05
全美 2K Quaanmei 2k	55.96±1.21	1.08±0.23	0.01±0.00	0.29±0.03	0.20±0.02	0.07±0.00
元帅 Yuanshuai	54.13±0.61	0.55±0.12	0.02±0.00	0.47±0.08	0.21±0.04	0.09±0.00
强者 711 Qiangzhe 711	53.13±0.43	1.49±0.13	0.02±0.00	1.41±0.04	0.26±0.01	0.10±0.01
美都 Meidu	46.53±1.14	1.42±0.04	0.01±0.00	0.60±0.02	0.19±0.03	0.09±0.01
最大值 Max	95.78	6.44	0.05	1.81	0.63	0.40
最小值 Min	46.53	0.55	0.00	0.29	0.19	0.06
均值 Average	67.74	2.32	0.02	0.86	0.34	0.21
标准差 Standard deviation	12.08	1.48	0.01	0.39	0.11	0.10
变异系数 Variation coefficient/%	17.84	63.66	51.85	44.98	31.94	48.42

西瓜种质。

由表4可知,各西瓜种质资源果肉中的八氢番茄红素含量范围在 $0.55\sim 6.44\ \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$,变异系数达63.66%,各种质间的含量差异极大。其中,八氢番茄红素含量最高的是W2K-1,为 $6.44\ \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$;其次是W1-11,含量为 $5.48\ \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$;八氢番茄红素含量最低的是元帅,为 $0.55\ \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$,W2K-1的八氢番茄红素含量是元帅的11.7倍。

从21份西瓜种质资源果肉中还检测到 α -胡萝卜素、 β -胡萝卜素、 γ -胡萝卜素和叶黄素等,其中以 β -胡萝卜素为主(表4),各西瓜品种果肉中的 β -胡萝卜素含量比 γ -胡萝卜素含量高出50%左右,而 α -胡萝卜素含量均极微。21份西瓜种质资源果肉中的 β -胡萝卜素含量范围在 $0.29\sim 1.81\ \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$,变异系数为44.98%。含量最高的是W1-11,达 $1.81\ \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$,含量最低的是全美2K,为 $0.29\ \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 。其中,W1-11果肉中的 β -胡萝卜素含量比全美2K高出6.24倍。

2.3 西瓜种质资源主要农艺性状与类胡萝卜素含量的相关性分析

根据表2中各西瓜种质资源的主要农艺性状表现,将果肉大红色用2表示,果肉鲜红色用1表示,对各种质的主要农艺性状及其类胡萝卜素含量进行相关性分析,得到表5。由表5可知,21份西瓜种质资源的主要农艺性状中,果肉瓢色与番茄红素、八氢番茄红素和 γ -胡萝卜素含量等呈极显著正相关,与叶黄素含量呈显著正相关。相关性分析结果表明,西瓜果肉的瓢色深浅与类胡萝卜素含量高低密切相关。

由表5可知,西瓜果肉的中心可溶性固形物含量与八氢番茄红素、 γ -胡萝卜素和叶黄素含量也呈显著或极显著正相关。因西瓜果肉中的八氢番茄红素、 γ -胡萝卜素和叶黄素等含量均极微,且水肥管理技术对西瓜果肉的可溶性固形物含量影响极大,因此,可溶性固形物含量可作为鉴定筛选高番茄红素西瓜品种的辅助农艺性状指标。

表5 21份西瓜种质资源的主要农艺性状与类胡萝卜素含量的相关性分析

Table 5 Correlation analysis between main agronomic traits and carotenoid content of 21 watermelon germplasm resources

指标 Index	果实发育期 Fruit development period	单果质量 Fruit mass	瓤色 Flesh color	边部可溶性固形物含量 Edge soluble solids content	中心可溶性固形物含量 Central soluble solids content	番茄红素含量 Lycopene content	八氢番茄红素含量 Phytoene content	α -胡萝卜素含量 α -carotene content	β -胡萝卜素含量 β -carotene content	γ -胡萝卜素含量 γ -carotene content	叶黄素含量 Xanthophyll content
果实发育期 Fruit development period	1	0.95**	0.17	-0.88**	-0.60**	-0.03	-0.25	-0.34	-0.19	-0.12	-0.10
单果质量 Fruit mass	0.95**	1	0.11	-0.89**	-0.60**	-0.02	-0.31	-0.34	-0.14	-0.15	-0.14
瓤色 Flesh color	0.17	0.11	1	0.11	0.25	0.82**	0.63**	0.13	-0.10	0.70**	0.52*
边部可溶性固形物含量 Edge soluble solids content	0.88**	-0.89*	0.11	1	0.77**	0.37	0.50*	0.47*	0.19	0.44*	0.38
中心可溶性固形物含量 Central soluble solids content	0.60**	-0.60*	0.25	0.77**	1	0.41	0.50*	0.36	0.17	0.45*	0.56**
番茄红素含量 Lycopene content	0.03	-0.02	0.82**	0.37	0.41	1	0.72**	0.35	0.19	0.90**	0.64**
八氢番茄红素含量 Phytoene content	0.25	-0.31	0.63**	0.50*	0.50*	0.72**	1	0.38	0.31	0.88**	0.41
α -胡萝卜素含量 α -carotene content	0.34	-0.34	0.13	0.47*	0.36	0.35	0.38	1	0.27	0.39	0.31
β -胡萝卜素含量 β -carotene content	0.19	-0.14	-0.10	0.19	0.17	0.19	0.31	0.27	1	0.46*	0.15
γ -胡萝卜素含量 γ -carotene content	0.12	-0.15	0.70**	0.44*	0.45*	0.90**	0.88**	0.39	0.46*	1	0.55**
叶黄素含量 Xanthophyll content	0.10	-0.14	0.52*	0.38	0.56**	0.64**	0.41	0.31	0.15	0.55**	1

注:*表示在 0.05 水平显著相关,**表示在 0.01 水平极显著相关。

Note: * represents significant correlation at 0.05 level, ** represents extremely significant correlation at 0.01 level.

3 讨论与结论

西瓜的品质主要由外观(果型和果皮特征)、瓤色、口感品质和营养功能品质构成^[19]。类胡萝卜素是一类呈黄色、橙红色或红色的多烯类物质,目前已发现的类胡萝卜素有 700 余种,类胡萝卜素根据化学结构的不同可以分为两类,一类是胡萝卜素(只含碳、氢两种元素,不含氧元素),另一类是叶黄素(有羟基、酮基、羧基、甲氧基等含氧官能团,如叶黄素和虾青素)^[20]。成熟西瓜组织内,番茄红素含量约占类胡萝卜素含量的 95%,是西瓜果肉呈现红色特征的主要色素来源,更是反映西瓜营养功能品质的关键功效成分之一^[21],培育高番茄红素的西瓜品种对丰富市场西瓜品种和市民健康均有实际意义。种质资源是西瓜育种的“芯片”,筛选合适的种质作为育种亲本材料,是育种家培育新品种的重要步骤。

目前,国内外有关西瓜番茄红素的研究主要集

中于不同西瓜种质资源果肉中番茄红素含量的检测分析,有关高番茄红素含量兼具优质高产农艺性状西瓜优异种质的挖掘鉴定方面的研究报道较少。袁平丽等^[9]分析了 221 份不同瓤色西瓜种质资源的番茄红素含量,发现红瓤及粉红瓤西瓜种质的番茄红素含量范围在 10.03~91.99 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$,平均含量为 35.23 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$,并从中筛选出 6 份极高番茄红素含量和 9 份高番茄红素含量的西瓜种质资源。Perkins-veazie 等^[13]检测了 50 份不同红瓤西瓜种质资源果肉中的番茄红素含量,其范围在 30~100 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 。在本研究中,不同类型红瓤西瓜种质果肉中番茄红素含量范围在 46.53~95.78 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$,变异系数达 17.84%。同时,在研究时发现一些番茄红素含量高的西瓜种质存在口感品质差或产量低、抗病抗逆性差等缺陷,不能直接利用,有待通过杂交、回交和自交选育手段,改良应用于优质、高产、抗病、抗逆西瓜新种质的选育中。

国内外在西瓜果实番茄红素的积累合成规律及含量鉴定相关基因等方面开展了较多研究,袁平丽等^[9]和 Perkins-veazie 等^[13]的研究表明,番茄红素主要在红瓢品种中积累,本研究的结果与其一致。21份西瓜种质资源的主要农艺性状及其类胡萝卜素含量的相关性分析结果显示,西瓜果肉瓢色与番茄红素含量呈正相关,瓢色差异是造成西瓜种质番茄红素含量不同的主要原因,西瓜果肉瓢色可作为鉴定筛选高番茄红素含量西瓜种质的主要农艺性状,即瓢色越深(即红色越深),果肉中番茄红素类胡萝卜素含量越高。豆峻岭^[8]分析红瓢、黄瓢无籽西瓜果实不同发育时期番茄红素的积累差异及合成关键酶基因的表达差异后认为,授粉后 25 d 可能是西瓜番茄红素积累的关键时期,其中 *LCYb* 基因在番茄红素合成中可能起关键作用。王超楠等^[22]利用构建的遗传连锁图谱对西瓜果肉中番茄红素含量及其瓢色性状进行 QTL 定位分析,在 4 号染色体上获得了 WII04E07-37 和 WII04E07-40 两个与西瓜果肉红色性状相关的 CAPS 标记。Bang 等^[23]利用构建的西瓜番茄红素含量和与其果实性状的 F_2 群体遗传图谱,检测到 37 个与西瓜番茄红素含量相关 SSR 标记及 107 个 CAPSs 标记,可辅助用于西瓜番茄红素含量的鉴定。笔者选出 3 份极高番茄红素含量和 7 份高番茄红素含量的西瓜品种,可通过选配亲本,培育更高番茄红素含量的优良西瓜品种。

在本研究的 21 份西瓜种质中,小果型西瓜种质 W1-11 的番茄红素含量高达 $95.78 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$,且表现特早熟(果实发育期 ≤ 27 d)、优质(肉质细嫩松脆)、高糖(边部可溶性固形物和中心可溶性固形物含量分别达 10.2%和 14.8%),是开展番茄红素合成及其遗传积累规律研究的优异种质。大果型西瓜种质 All-Sweet Scarlet 则表现抗枯萎病兼抗蔓枯病,兼具高糖、大果型结果中未见等优异农艺性状,这些优异种质可作为高番茄红素含量兼具不同生育期和不同果型性状的优质高产西瓜新品种选育的直接或间接亲本。

参考文献

- SEBLANI R, KEINATH A P, MUNKVOLD G. Gummy stem blight: One disease, three pathogens[J]. *Molecular Plant Pathology*, 2023, 24(8): 825-837.
- GERSTER H. The potential role of lycopene for human health[J]. *Journal of the American College of Nutrition*, 1997, 16(2): 109-126.
- OSHIMA S, OJIMA F, SAKAMOTO H, et al. Supplementation with carotenoid inhibits singlet oxygen-mediated oxidation of human plasma low-density lipoprotein[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 1996, 44(8): 2306-2309.
- CLINTON S K. Lycopene: Chemistry, biology, and implications for human health and disease[J]. *Nutrition Reviews*, 1998, 56(2): 35-51.
- AGARWAL S, RAO A V. Tomato lycopene and its role in human health and chronic diseases[J]. *Canadian Medical Association Journal*, 2000, 163(6): 739-744.
- 刘文革, 阎志红, 赵胜杰, 等. 高番茄红素含量西瓜新品种绿野无籽的选育[J]. *中国瓜菜*, 2012, 25(1): 23-26.
- HOLDEN J M, ELDRIDGE A L, BEECHER G R, et al. Carotenoid content of U.S. foods: An update of the database[J]. *Journal of Food Composition and Analysis*, 1999, 12(3): 169-196.
- 豆峻岭. 多倍体西瓜番茄红素合成关键酶基因表达及相关内源激素研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2014.
- 袁平丽, 李智, 赵胜杰, 等. 西瓜种质资源番茄红素含量评价[J]. *江苏农业科学*, 2018, 46(7): 115-120.
- YOO K S, BANG H, LEE E J, et al. Variation of carotenoid, sugar, and ascorbic acid concentrations in watermelon genotypes and genetic analysis[J]. *Horticulture Environment and Biotechnology*, 2012, 53(6): 552-560.
- 袁平丽, 刘文革, 路绪强, 等. 不同倍性西瓜果实发育过程中番茄红素含量动态[J]. *果树学报*, 2012, 29(5): 890-894.
- 何楠, 赵胜杰, 刘文革, 等. 施用钾肥对西瓜番茄红素的影响研究[J]. *长江蔬菜*, 2008, 20(7): 21-22.
- PERKINS-VEAZIE P, COLLINS J K, PAIR S D, et al. Lycopene content differs among red-fleshed watermelon cultivars[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2001, 81(10): 983-987.
- PERKINS-VEAZIE P, COLLINS J K. Carotenoid content of intact watermelons after storage[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2006, 54(16): 5868-5874.
- AMORIN-CARRILHO K T, CEPEDA A, FENTE C, et al. Review of methods for analysis of carotenoids[J]. *Trends in Analytical Chemistry*, 2014, 56: 49-73.
- INBARAJ B S, LU H, HUNG C F, et al. Determination of carotenoids and their esters in fruits of *Lycium barbarum* Linnaeus by HPLC-DAD-APCI-MS[J]. *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis*, 2008, 47(4/5): 812-818.
- RODRIGUES D B, MARIUTTI L R B, MERCADANTE A Z. Two-step cleanup procedure for the identification of carotenoid esters by liquid chromatography-atmospheric pressure chemical ionization-tandem mass spectrometry[J]. *Journal of Chromatography A*, 2016, 1457: 116-124.
- RIVERA S M, CHRISTOU P, CANELA-GARAYOA R. Identification of carotenoids using mass spectrometry[J]. *Mass Spectrometry Reviews*, 2014, 33(5): 353-372.
- 郭绍贵. 西瓜果实品质进化的转录组和基因组比较研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2018.
- NISAR N, LI L, LU S, et al. Carotenoid metabolism in plants[J]. *Molecular Plant*, 2015, 8(1): 68-82.
- 万学闯, 刘文革, 阎志红, 等. 西瓜果实发育过程中番茄红素、瓜氨酸和维生素 C 等功能物质含量的变化[J]. *中国农业科学*, 2011, 44(13): 2738-2747.
- 王超楠, 刘识, 高鹏, 等. 西瓜果肉番茄红素含量及果实相关性状 QTL 分析[J]. *中国瓜菜*, 2019, 32(8): 223-224.
- BANG H, YI G, KIM S, et al. Watermelon lycopene β -cyclase: promoter characterization leads to the development of a PCR marker for allelic selection[J]. *Euphytica*, 2014, 200(3): 363-378.