

孙怡, 胡益波, 叶俊丽, 等. 红橘×枳杂交子代遗传多样性分析[J]. 华中农业大学学报, 2023, 42(4): 150-157.  
DOI: 10.13300/j.cnki.hnlkxb.2023.04.017

## 红橘×枳杂交子代遗传多样性分析

孙怡<sup>1</sup>, 胡益波<sup>2</sup>, 叶俊丽<sup>1</sup>, 柴利军<sup>1</sup>, 邓秀新<sup>1</sup>, 谢宗周<sup>1</sup>

1. 果蔬园艺作物种质创新与利用全国重点实验室/华中农业大学园艺林学学院, 武汉 430070;
2. 广东省农业科学院德庆县柑橘研究所, 德庆 526600

**摘要** 为了筛选集双亲优异性状的优良砧木, 以柑橘主要砧木红橘(♀)×枳(♂)杂交F<sub>1</sub>代94个单株为试材, 连续2 a对其落叶期及花期进行观测, 并对结果率较高的37个单株的果实品质、种子单多胚性及萌发率等进行分析。结果显示: 94个单株物候期与双亲相近, 但单株间落叶期差异明显; 子代群体果形更偏向于父本遗传, 主要以卵圆形为主; 子代群体平均单果质量为58.63 g, 平均单果种子数为14粒, 平均千粒重为153.73 g; 果实可溶性固形物在10.7%~16.5%, 与母本无显著性差异, 可滴定酸含量在2.00%~5.56%, 显著高于母本; 果皮色泽主要有红色(偏向母本)和黄色(偏向父本)2种, 子代群体中β-隐黄质的含量显著高于双亲, 紫黄质、叶黄质和玉米黄质的含量介于双亲之间, 而β-胡萝卜素在亲本和杂交后代果皮中含量则较低, 其中紫黄质、叶黄质和β-胡萝卜素等物质含量呈现连续变化, 具有数量性状特征; 群体子代种子单胚与多胚类型接近1:3, 符合单基因控制模型。结果表明, 子代单株3号、6号及24号兼具多胚、单果种子数多及萌发率高等特性, 可作为候选优异砧木资源做进一步评价。

**关键词** 红橘; 枳; 杂交群体; 物候期; 果实品质; 类胡萝卜素

**中图分类号** S666 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2023)04-0150-08

柑橘(*Citrus*)属于芸香科(Rutaceae)柑橘亚科(Aurantioidease)植物, 是我国十分重要的经济果树树种之一。柑橘生产上主要采用嫁接繁殖, 通过选用优良砧木的方法, 不仅可以改善接穗品种的果实品质, 而且对提高接穗抗逆性、适应性等具有重要作用<sup>[1]</sup>。目前, 随着全球气候、环境的变化, 极端天气问题加剧, 柑橘种植也面临更多更复杂的生物胁迫(如病虫害等)与非生物胁迫(如干旱、高温、冷害等)问题。选用优良抗性砧木可在一定程度上降低上述问题对树体造成的伤害, 保证果实产量和品质。因此, 选育优良抗性砧木已经成为柑橘产业持续稳定发展的迫切需求<sup>[2]</sup>。

砧木育种相对于接穗品种改良难度更大、周期更长, 迄今仍没有相对完美的柑橘砧木类型<sup>[3]</sup>。枳(*Poncirus trifoliata* L.)是重要的柑橘砧木资源, 因其具有较强的抗寒性、抗旱性、抗病性以及与大多数柑橘栽培品种嫁接亲和而被广泛应用。枳对柑橘衰退

病、线虫病、根腐病具有较强抗性, 但是不抗裂皮病。笔者课题组前期以抗裂皮病的红橘为母本, 以枳为父本, 通过杂交授粉方式, 结合胚抢救技术构建红橘×枳杂交群体, 以期从杂交子代中筛选出既抗裂皮病又抗衰退病、线虫病、根腐病的理想砧木<sup>[4]</sup>。同时, 亲本枳与红橘在形态学、物候期及果实品质上存在较大差异。枳为三出复叶, 且具有显性遗传的特点, 可以利用枳三出复叶的遗传特点, 结合分子标记快速鉴定出红橘与枳的杂交后代<sup>[5]</sup>。枳是落叶性灌木或小乔木, 一般在冬季落叶, 而红橘为常绿小乔木, 落叶周期长, 看不出明显落叶。枳果实极酸难以食用, 而红橘酸甜可口、肉质细嫩、可食性好; 枳成熟果实果皮呈黄色, 而红橘成熟时果皮色泽鲜红。前期虽然已构建出红橘×枳杂交群体, 但对于群体子代物候期、果实品质性状及代谢物遗传规律研究较为欠缺, 尤其缺乏基于此群体开展候选优良砧木筛选等相关研究。

收稿日期: 2022-09-03

基金项目: 广东省重点研发项目(2022B0202070002); 国家自然科学基金项目(32122075, 32072523); 国家现代农业(柑橘)产业技术体系(CARS-26)

孙怡, E-mail: 1163343923@qq.com

通信作者: 谢宗周, E-mail: xiezz@webmail.hzau.edu.cn

基于此,本研究以红橘×枳的 $F_1$ 群体94个开花结果单株为研究材料,观测其物候期,同时以其中结果率较高的37个单株为研究对象,连续2a对其果实品质性状的多样性进行分析,旨在为后续开展柑橘相关性状的遗传变异规律研究及筛选集双亲综合性状的优良抗性砧木积累基础数据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

利用课题组创制的红橘×枳 $F_1$ 群体94份杂交子代单株(定植于华中农业大学柑橘资源圃)为试材,于2012年和2013年进行物候期观察,并选择连续2a结果率较高的37个单株进行果实性状和品质分析。

### 1.2 红橘×枳子代单株物候期及生物学性状的观测

对红橘×枳子代单株的物候期进行观测,具体指标参考农业行业标准NY/T 1486—2007《农作物种质资源鉴定技术规程(柑橘)》,物候期主要观测指标包括落叶期、萌芽期、盛花期以及果实成熟期。①落叶期:记录全树约有75%的叶片正常脱落或叶柄离层已形成的时期。②萌芽期:在春季,观察全树叶芽萌动情况,记录约有50%的新芽达到3mm的日期。③盛花期:观察全树花朵开放情况,记录约有50%的花朵开放的日期。④果实成熟期:观察果实成熟状态,记录75%的果实达到成熟的日期<sup>[7]</sup>。

### 1.3 红橘×枳子代单株果实常规品质测定

分别于2012年和2013年对其中连续2a结果率较高的37个单株进行常规品质测定,利用电子天平和游标卡尺测定单果质量和果实纵横径,利用手持式糖度计(SW32A)和柑橘酸度计(GMK-835F)测定可溶性固形物(TSS)和可滴定酸(TA)含量,每个单株随机选取10个果实进行分析测定。

### 1.4 红橘×枳子代单株单果种子数、种胚数、种子千粒重和种子萌发率的测定

每个单株随机选取10个果实并取种,统计单果种子数、种子胚数。将种子风干后,随机选取100粒称重,结果换算成种子千粒重,每份材料重复3次。每年12月份,种子用百菌清消毒后播种于穴盘,每份材料播种100粒,于翌年4月统计种子的萌发情况。

### 1.5 红橘×枳子代单株果实类胡萝卜素的提取及HPLC分析

果皮类胡萝卜素的提取和测定参照刘庆<sup>[6]</sup>的方法。色谱检测系统包括:高效液相色谱仪(Waters1525-2996-717,美国)、2996二级阵列检测器、

717自动进样器、Empower色谱管理软件和类胡萝卜素专用色谱柱(YMC C30,美国)。色谱分析流动相A相:乙腈:甲醇=3:1(体积比)(含0.01%BHT和0.05%TEA),B相:100%MTBE(含0.01%BHT)。流速为1 mL/min,进样体积20  $\mu$ L。

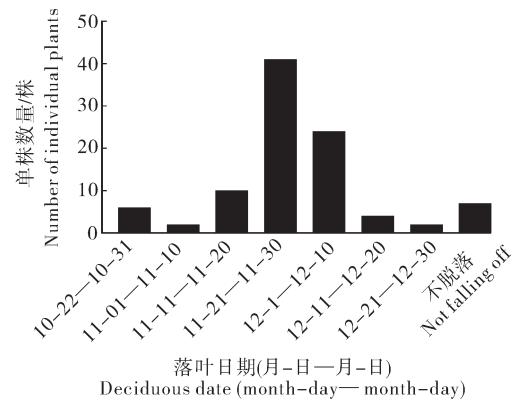
### 1.6 数据处理

用Excel 2019软件进行数据处理,SAS软件(SAS Institute INC,USA)进行差异显著性分析(分析采用 $t$ 检验)。

## 2 结果与分析

### 2.1 红橘×枳子代单株不同物候期及生物学性状

通过连续2a对亲本及其杂交子代的落叶期、萌芽期、盛花期与果实成熟期进行观察记录。结果显示,子代群体落叶从10月份开始,一直持续到次年的2月份,单株最早落叶(10月22日)与最晚落叶(12月29日)时间相差67d,具体落叶期详见图1。群体萌芽期从3月初至4月初,部分树体的芽顶是淡黄色的,如单株25号,部分树体的芽顶是淡红色的,如单株34号。群体盛花期从4月初至4月底。群体果实成熟期介于双亲之间,成熟最早的与枳成熟期相近,如单株11月初着色全部完成并开始脱落;最晚的与红橘转色成红色的时间相同,如单株果实在12月中旬成熟。



以单株最早落叶(10月22日)为基准,统计杂交亲本和杂交子代落叶日期。Based on the earliest leaf falling date (Oct. 22), the date of hybrid parents and offspring.

图1 杂交亲本和杂交子代落叶日期统计  
Fig.1 Statistics of deciduous date of hybrid parents and offspring

### 2.2 红橘×枳子代单株果实性状

连续2a对结果率较高的37个子代单株的果实性状进行分析,结果显示(表1):杂交子代单株平均单果质量为58.63g,77.8%的子代单株单果质量集

中于40~75 g,最大单果质量为101.1 g,最小单果质量为28.2 g。子代单株果实的果形主要偏向于父本,呈卵圆形,85.7%的子代单株果实的果形指数为0.90~1.00。杂交子代果实中平均种子数为14粒,子代单株种子的平均千粒重为153.73 g,种子千粒重最高为260.94 g,千粒重最低为83.10 g。

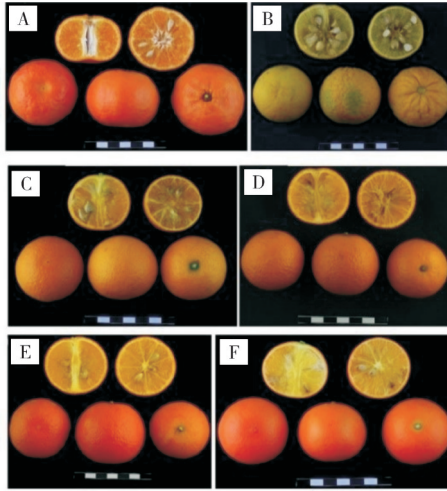
表1 红橘×枳F<sub>1</sub>群体杂交子代单株果实性状的比较Table 1 Comparison of fruit traits in F<sub>1</sub> hybrid progenies of Red tangerine × Trifoliolate orange

序号 No.	平均单果质量/g Mean fruit weight	纵径/cm Vertical diameter	横径/cm Horizontal diameter	果形指数 Fruit shape index	单果种子数 Seeds No. per fruit	种子胚数 Embryos No.	胚的类型(单胚/多胚) Embryos types (Monoembryony/ Polyembryony)	千粒重/g 1 000-grain weight	萌发率/% Germination rate
1	55.8	4.3~5.0	4.1~5.1	0.98	23	—	M	175.08	68.75
2	34.8	3.3~4.2	3.5~4.4	0.96	11	2.86	P	—	—
3	48.5	3.7~4.3	4.1~5.0	0.90	21	5.80	P	144.60	78.13
4	46.1	3.6~4.1	3.9~4.9	0.92	—	8.70	P	260.94	50.00
5	51.8	3.6~4.9	3.5~5.0	0.99	7	—	P	—	—
6	56.9	3.6~4.3	3.6~4.8	0.90	17	3.50	P	123.40	78.13
7	83.5	4.5~5.5	4.8~6.0	0.91	16	—	P	102.08	40.63
8	73.8	4.4~5.6	4.5~6.0	0.96	5	—	M	158.74	34.38
9	62.7	4.3~5.3	4.7~5.6	0.91	9	—	M	—	—
10	34.1	3.2~4.2	3.4~4.6	0.94	18	1.70	M	117.70	—
11	56.9	4.4~5.2	4.4~5.2	0.99	6	1.20	P	154.97	18.75
12	61.2	3.9~4.9	4.4~5.2	0.93	9	—	P	159.32	45.88
13	62.0	4.2~4.9	4.5~5.3	0.92	9	—	M	—	—
14	70.2	4.2~5.5	4.1~6.0	0.95	—	3.50	M	139.80	71.88
15	28.2	2.8~4.1	3.2~4.2	0.93	5	—	P	83.10	31.25
16	83.8	5.1~6.0	5.0~6.0	1.00	18	5.80	M	172.08	43.75
17	47.5	4.4~4.8	4.6~5.0	0.97	11	2.30	P	156.78	56.25
18	47.2	3.6~4.3	4.1~5.2	0.87	10	5.84	P	114.86	43.75
19	40.9	3.5~4.8	3.6~4.8	0.97	12	1.10	P	—	—
20	53.7	4.0~4.8	4.5~5.0	0.95	8	1.20	P	169.77	53.13
21	42.3	3.7~4.4	3.9~4.6	0.95	15	—	P	159.84	46.88
22	63.7	4.7~6.2	4.3~5.4	1.01	14	6.55	M	175.60	87.50
23	66.9	4.8~5.8	5.0~6.0	0.96	10	2.33	P	133.24	59.38
24	53.6	3.9~4.8	4.4~5.5	0.88	19	3.86	P	139.24	71.88
25	63.9	4.2~5.5	4.4~5.7	0.95	12	1.70	P	218.12	59.38
26	66.1	4.2~5.5	4.2~5.7	0.98	12	—	M	194.22	21.88
27	62.8	4.2~5.3	4.3~5.4	0.92	18	6.30	P	110.22	56.25
28	68.8	—	—	—	16	—	M	176.47	34.38
29	70.9	4.8~5.4	4.5~5.1	1.03	21	6.45	P	173.50	53.13
30	34.2	3.4~4.5	3.6~4.8	0.96	14	2.10	P	202.20	56.25
31	71.4	3.7~5.2	4.2~5.6	0.91	—	1.20	P	158.53	9.38
32	62.9	4.0~5.2	4.5~5.5	0.93	10	1.10	P	124.00	9.38
33	47.4	3.7~4.6	3.9~4.6	0.95	9	—	P	140.38	6.25
34	46.0	4.2~4.4	4.4~4.8	0.94	26	4.30	P	120.92	53.13
35	—	—	—	—	21	7.73	P	148.30	65.63
36	101.1	5.3~6.1	5.5~6.2	0.97	14	2.20	P	170.78	28.13
37	89.2	4.7~5.3	5.3~6.7	0.85	14	3.70	P	140.54	65.63

注 Note: M:单胚 Monoembryony; P:多胚 Polyembryony.

胚型分析结果显示:杂交子代单株的种子中同时具有单胚和多胚类型,单多胚比例接近1:3(分别为10、27株)。种子萌发率分析结果显示:杂交子代单株的平均种子萌发率为48.36%,22号单株种子萌发率最高,达到87.50%,33号单株种子萌发率最低,仅为6.25%。子代群体成熟果实的果皮主要呈

现2种颜色(图2),与红橘相似的红色(单株8号、12号),以及与枳相似的黄色(单株1号、5号)。



A: 红橘 Red tangerine; B: 枳 Trifoliate orange; C: 单株1号 Offspring No. 1; D: 单株5号 Offspring No. 5; E: 单株8号 Offspring No. 8; F: 单株12号 Offspring No. 12.

图2 杂交亲本及子代成熟果实颜色

Fig.2 The color of mature fruits of hybrid parents and their offspring

考虑到生产上使用的柑橘砧木须满足种子数量多、质量高以及多胚等特点,本研究综合分析发现,3号、6号以及24号单株兼具种子数量多(分别为21、17、19粒)、萌发率高(分别为78.13%、78.13%及71.88%)和多胚特性(图3),可作为优良砧木培育的候选资源。



从上到下依次为3号单株、6号单株及24号单株。果子五面图标尺为5 cm,单果种子图标尺为1 cm,种子多胚图标尺为1 000 μm。From top to bottom, they are offspring No. 3, No. 6 and No. 24. The scale bar in fruited five faced is 5 cm, the scale bar in single fruit seed is 1 cm, and the scale bar in seed polyembryony is 1 000 μm.

图3 候选优良砧木子代单株果实及种子表型

Fig.3 Phenotypes of single plant fruits and seeds of candidate rootstock progeny

### 2.3 红橘×枳子代单株果实的TSS、TA含量

父本枳果实内种子较多,无果肉,无法进行果实品质评价,因此只对杂交子代群体及其母本红橘果实的TSS、TA含量进行了比较分析。结果显示(表2),子代群体果实的TSS平均含量为13.3%,含量最

表2 杂交亲本及子代单株果实

可溶性固形物和可滴定酸含量的比较

Table 2 Comparison the contents of soluble solids and titratable acids in fruits of hybrid parents and their offspring %

单株编号 Tree No.	可溶性固形物 Total soluble solid	可滴定酸 Titratable acidity
红橘 Red tangerine	13.4±0.39bc	0.71±0.07g
枳 Trifoliate orange	—	—
1	16.5±1.61a	2.00±0.21f
2	16.3±0.80ab	2.30±0.40ef
3	16.1±1.35ab	3.95±0.48c
4	16.0±1.51ab	2.62±0.40ef
5	15.4±0.70ab	4.07±0.46c
6	14.8±2.83b	5.56±0.16a
7	14.4±2.03bc	2.72±0.28de
8	14.2±2.01bc	4.76±0.08b
9	13.9±0.23bc	2.52±0.42ef
10	13.8±0.73bc	4.00±0.24c
11	13.7±0.92bc	2.71±0.26e
12	13.6±2.87bc	2.20±0.31f
13	13.5±1.59bc	5.45±0.21a
14	13.4±0.39bc	2.69±0.18e
15	13.4±1.07bc	4.00±0.32c
16	13.4±1.33bc	3.82±0.70c
17	13.3±0.63 bc	3.19±0.13d
18	13.3±0.91bc	2.92±0.27de
19	13.2±0.78bc	5.32±0.42a
20	13.2±0.94c	2.88±0.30de
21	13.2±0.79c	2.65±0.28e
22	12.8±0.58cd	3.05±0.39de
23	12.8±1.09cd	2.67±0.39e
24	12.3±0.67cd	2.19±0.16f
25	12.3±1.33cd	3.19±0.13d
26	12.2±0.49cd	3.91±0.35c
27	12.0±0.48cd	2.90±0.25de
28	11.6±1.32cd	2.82±0.35de
29	11.6±1.19d	2.57±0.21ef
30	11.4±0.92d	2.71±0.13e
31	11.1±1.72d	3.22±0.29d
32	10.8±0.39d	2.71±0.13e
33	10.7±1.00d	3.22±0.29d

注:同列不同字母表示差异显著(P<0.05)。Note: Different letters in same column indicate significant difference (P<0.05).

高的达到16.5%，最低的为10.7%，基本达到人们可接受的食用范围。子代群体中TA平均含量为3.26%，最高的达到5.56%，最低为2.00%，超出人们可接受的食用范围。

## 2.4 红橘×枳子代单株果实类胡萝卜素组成与含量

对红橘、枳及其37个子代单株的果实果皮进行类胡萝卜素测定,结果显示(图4),子代单株果皮中紫黄质平均含量为42.98  $\mu\text{g/g}$ ,显著低于母本红橘果皮中的紫黄质含量(119.38  $\mu\text{g/g}$ ),父本枳果皮中紫黄质含量(22.11  $\mu\text{g/g}$ )相对母本及大部分子代单株较低,但仍显著高于其中6个子代单株(单株7号、11号、15号、18号、19号、31号)果皮中紫黄质含量。在这些子代单株中,15号单株果皮紫黄质含量最低,仅为2.80  $\mu\text{g/g}$ 。

杂交子代单株中果皮叶黄质平均含量为13.52  $\mu\text{g/g}$ ,其中8号单株果皮叶黄质含量最高,达到51.82  $\mu\text{g/g}$ ;1号、9号、24号、34号单株果皮叶黄质含量也均显著高于父本枳(23.83  $\mu\text{g/g}$ )。母本红橘果皮中叶黄质的含量为2.34  $\mu\text{g/g}$ ,仅为父本枳果皮中叶黄质含量的1/10。

杂交子代单株中果皮玉米黄质平均含量为42.52  $\mu\text{g/g}$ ,其中子代6号、8号及22号单株果皮玉米黄质含量较高,比其他子代单株果皮玉米黄质含量高10倍左右。母本红橘和父本枳果皮玉米黄质含量分别为25.63  $\mu\text{g/g}$ 和15.19  $\mu\text{g/g}$ ,其玉米黄质含量在所测子代群体数据中处于居中的位置。而单株1号、15号、18号、29号及35号的果皮中仅检测到了微量的玉米黄质。

杂交子代单株中果皮 $\beta$ -隐黄质平均含量为8.41  $\mu\text{g/g}$ ,果皮 $\beta$ -隐黄质含量最高的是34号单株,达到48.28  $\mu\text{g/g}$ ,在红橘、枳以及子代单株4号、8号及10号果皮中检测到了微量的 $\beta$ -隐黄质。

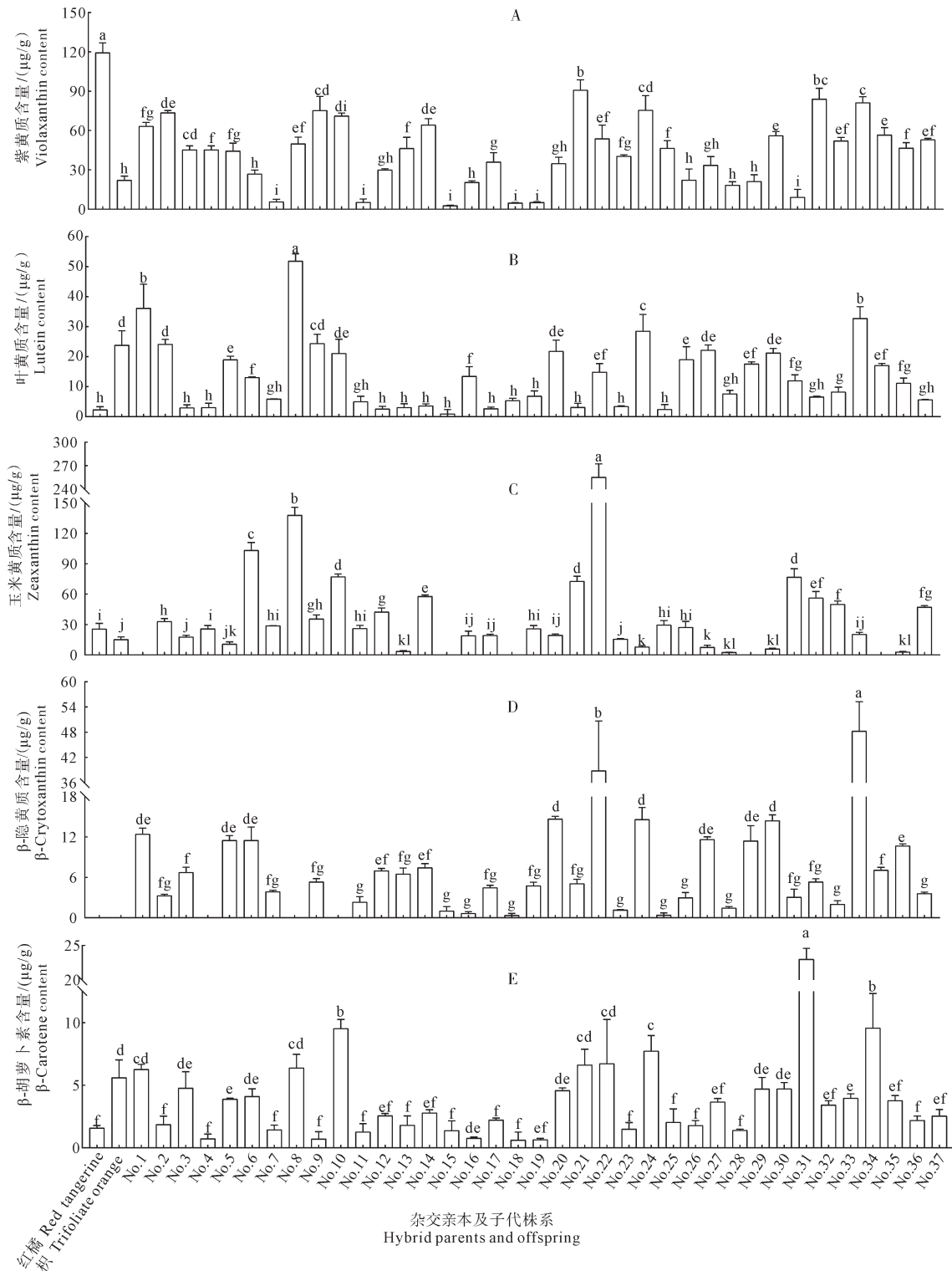
此外,杂交子代单株中果皮 $\beta$ -胡萝卜素平均含量为4.14  $\mu\text{g/g}$ ,31号单株果皮 $\beta$ -胡萝卜素含量最高为22.98  $\mu\text{g/g}$ ,16个单株果皮 $\beta$ -胡萝卜素含量显著高于母本红橘(1.58  $\mu\text{g/g}$ ),4个单株(单株10号、24号、31号、34号)果皮 $\beta$ -胡萝卜素含量显著高于枳(5.60  $\mu\text{g/g}$ )。

## 3 讨论

红橘是常绿果树,枳是落叶果树,以红橘和枳为亲本构建的杂交群体是研究柑橘属植物落叶性的重要材料<sup>[7]</sup>。本研究发现所获得的杂交子代中92.7%

单株是落叶的,只有7.3%单株在树体脱落20%~40%的叶片时,剩余叶片保持绿色不再脱落。刘升锐等<sup>[8]</sup>以克里曼丁橘和枳为亲本进行杂交,构建了F<sub>1</sub>分离群体,对后代落叶分离表型进行QTL定位分析,筛选到30个候选基因,为进一步获得落叶关联基因奠定了基础。后续可利用本研究群体针对落叶性状的遗传基础及调控机制做进一步探究。据观察,子代群体的花期比早实枳晚半个月,比红橘的花期早1个月;子代群体中少量单株果实的成熟期和枳成熟期接近,大部分单株果实的成熟期与红橘的果实成熟期相似。孙志红等<sup>[9]</sup>利用梨的9个品种及8个杂交组合研究亲本与其杂种后代物候期的相关遗传规律,也得到了类似的结果,认为不论是亲本还是杂种子代,萌芽期与开花期之间均呈显著的正相关;萌芽期与成熟期、开花期与成熟期之间均呈显著的负相关。曹珂等<sup>[10]</sup>利用关联分析研究发现,桃的单果质量与盛花期、展叶期、果实成熟期、果实发育期和落叶期存在遗传相关,分析得知这几个性状可能受到多基因多效性或者受连锁群内及连锁群间存在连锁或关联的基因调控。后续研究中可对红橘×枳杂交群体更多子代单株的果实性状进行进一步精细分析,将子代群体的物候期与果实性状进行关联分析,以获得更多规律性认识。

果实大小、果质量、果形、色泽、风味等果实品质性状多数为多基因控制的数量遗传<sup>[11]</sup>。本研究发现杂交群体果质量和果形的遗传偏向于亲本枳,F<sub>1</sub>群体中子代果实(94.59%)平均单果质量小于红橘的平均单果质量(89.2 g),果质量和形状与枳相似,表现为趋小遗传。前人在梨<sup>[12]</sup>和甜樱桃<sup>[13]</sup>上的研究也发现,杂交后代果实单果质量的平均值均低于亲本的亲中值,果实质量呈变小趋势。红橘×枳F<sub>1</sub>群体成熟果实的果皮主要呈现与红橘相似的红色以及与枳相似的黄色2种,因此该群体亦可作为研究果实色泽差异形成机制的宝贵材料。对亲本及杂交后代果实的果皮进行类胡萝卜素种类和含量的测定分析发现,紫黄质、叶黄质、玉米黄质、 $\beta$ -隐黄质和 $\beta$ -胡萝卜素含量均在F<sub>1</sub>群体子代中呈连续变化趋势,具有数量性状特征。汤雨晴<sup>[14]</sup>利用该杂交群体研究了果肉色泽的遗传规律,对亲本及其子代果肉中所检测到的类胡萝卜素及总类胡萝卜素含量进行正态检验,发现所有色素含量均为正态或偏正态分布,即每种色素的调控都受到多个基因的控制,属于数量性状。郑雄杰<sup>[15]</sup>进一步研究发现,该群体的亲本红橘及其



A: 紫黄质含量; B: 叶黄质含量; C: 玉米黄质含量; D: β-隐黄质含量; E: β-胡萝卜素含量。不同字母表示差异显著 ( $P < 0.05$ )。FW: 鲜质量。未在图中表示的即为检测到微量或未检测到。 A: Violaxanthin content; B: Lutein content; C: Zeaxanthin content; D: β-Cryptoxanthin content; E: β-Carotene content. Different letters indicate significant difference ( $P < 0.05$ ). FW: Fresh weight. What is not represented in the diagram is either a trace or not detected.

图4 红橘×枳  $F_1$  群体杂交子代单株果实果皮的类胡萝卜素组成与含量(FW)的比较

Fig.4 Comparison of carotenoid compositions and contents(FW)in fruit peels of Red tangerine × Trifoliolate orange  $F_1$  progenies

红皮子代特异积累红色物质 $\beta$ -柠乌素,并通过BSA-Seq等手段鉴定到了决定红皮性状的关键基因*CCD4b*。

优良的柑橘砧木不仅要有优良的抗逆性,还要有较强的繁殖能力<sup>[16]</sup>。与接穗品种需要无核或少核果实不同,砧木品种要求单果种子数量多、质量好、胚型为多胚以满足大规模培育健壮、一致性好的优质苗木的需要<sup>[17]</sup>。本研究优先选取种子质量好,萌发率高于70%,具有多胚性状的子代单株。在F<sub>1</sub>群体的多胚后代单株中,种子萌发率最高的依次为3号、6号以及24号,萌发率分别达到78.13%、78.13%及71.88%,其种子千粒重依次为144.60、123.40、139.24 g。这3个杂交单株综合表现为多胚且种子数较多、饱满、萌发率高,可用作新的优良砧木来提高嫁接繁殖率,同时亦可作为开展基础研究的材料,具有良好的推广与利用价值。

本研究利用红橘×枳杂交群体的94份子代单株,以种子多、多胚、萌发率高等条件筛选优良砧木,获得3号、6号和24号共3棵优良砧木候选单株,可作为优异砧木资源进一步评价。此外,群体物候期观测结果表明子代单株之间落叶期存在显著差异,可为未来研究柑橘落叶性提供可研究群体;群体子代果实中紫黄质、叶黄质和 $\beta$ -胡萝卜素等类胡萝卜素组分积累的遗传规律研究,可为辅助解析果实色泽品质性状的遗传与调控机制奠定基础。

## 参考文献 References

- [1] SNOUSSI H, DUVAL M F, GARCIA-LOR A, et al. Assessment of the genetic diversity of the Tunisian citrus rootstock germplasm[J]. BMC genetics, 2012, 13(1): 1-16.
- [2] 梁武军, 解凯东, 郭大勇, 等. 10个柑橘砧木类型同源四倍体的发掘与SSR鉴定[J]. 果树学报, 2014, 31(1): 1-6. LIANG W J, XIE K D, GUO D Y, et al. Spontaneous generation and SSR molecular characterization of autotetraploids in ten citrus rootstocks [J]. Journal of fruit science, 2014, 31(1): 1-6 (in Chinese with English abstract).
- [3] 邓秀新. 世界柑橘品种改良的进展[J]. 园艺学报, 2005, 32(6): 1140-1146. DENG X X. Advances in worldwide *Citrus* breeding[J]. Acta horticulturae sinica, 2005, 32(6): 1140-1146 (in Chinese with English abstract).
- [4] 杨华艳. 红橘×枳杂交群体的根腐病抗性鉴定及抗性基因初定位[D]. 武汉: 华中农业大学, 2020. YANG H Y. The studies on citrus root resistance identification and initial gene mapping of Trifoliata orange (*Poncirus trifoliata* [L.] Raf) and Red tangerine (*Citrus reticulata* Blanco) hybrids[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2020 (in Chinese with English abstract).
- [5] 谭美莲. 柑橘有性杂种群体的获得及分子遗传连锁框架图的构建[D]. 武汉: 华中农业大学, 2007. TAN M L. Creation of sexual hybrid populations and construction of molecular genetic linkage framework map in citrus[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2007 (in Chinese with English abstract).
- [6] 刘庆. ‘暗柳’甜橙红色突变体性状形成的分子机理研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2008. LIU Q. Molecular mechanism for the altered traits of the red flesh bud sport of ‘Anliu’ sweet orange[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2008 (in Chinese with English abstract).
- [7] 胡益波. 枳遗传多样性及其与红橘杂交后代遗传研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2015. HU Y B. Studies on the genetic diversity of Trifoliata orange (*Poncirus trifoliata* [L.] Raf) and genetics of its hybrids with Red tangerine (*Citrus reticulata* Blanco) [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2015 (in Chinese with English abstract).
- [8] 刘升锐. 柑橘高密度遗传连锁图谱的构建及落叶性状的QTL定位[D]. 武汉: 华中农业大学, 2016. LIU S R. High-density genetic linkage map construction and identification of QTLs controlling deciduous trait in citrus [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2016 (in Chinese with English abstract).
- [9] 孙志红, 董延年, 常宏伟, 等. 梨杂种后代与亲本物候期间相关遗传的研究[J]. 北方果树, 2002(6): 4-6. SUN Z H, DONG Y N, CHANG H W, et al. Studies on the correlated inheritance of phenophases between hybrids progenies and their parents of pear[J]. Northern fruits, 2002(6): 4-6 (in Chinese with English abstract).
- [10] 曹珂, 王力荣, 朱更瑞, 等. 桃单果重与6个物候期性状的遗传关联分析[J]. 中国农业科学, 2012, 45(2): 311-319. CAO K, WANG L R, ZHU G R, et al. Genetic association of fruit weight and six phenological traits in peach (*Prunus persica* L.) [J]. Scientia agricultura sinica, 2012, 45(2): 311-319 (in Chinese with English abstract).
- [11] 陈学森, 张晶, 刘大亮, 等. 新疆红肉苹果杂种一代的遗传变异及功能型苹果优株评价[J]. 中国农业科学, 2014, 47(11): 2193-2204. CHEN X S, ZHANG J, LIU D L, et al. Genetic variation of F<sub>1</sub> population between *Malus sieversii* f. *neidzwetzkyana* and apple varieties and evaluation on fruit characters of functional apple excellent strains[J]. Scientia agricultura sinica, 2014, 47(11): 2193-2204 (in Chinese with English abstract).
- [12] 白牡丹, 郝国伟, 张晓伟, 等. ‘玉露香梨’与‘黄冠’梨杂交后代果实性状遗传倾向的初步研究[J]. 中国果树, 2017(S1): 13-16, 23. BAI M D, HAO G W, ZHANG X W, et al. Primary research on genetic tendency of fruit characters in hybrid progenies between ‘Yuluxiangli’ and ‘Huangguan’ pear cultivars[J]. China fruits, 2017(S1): 13-16, 23 (in Chinese with English abstract).
- [13] 赵慧. 甜樱桃果实大小性状的遗传分析与QTL定位[D]. 沈

- 阳:沈阳农业大学,2018.ZHAO H.Inheritance and QTL mapping for fruit size in sweet cherry[D].Shenyang:Shenyang Agricultural University,2018 (in Chinese with English abstract).
- [14] 汤雨晴.柑橘果肉色泽的遗传研究及类胡萝卜素含量的QTL定位[D].武汉:华中农业大学,2018.TANG Y Q.The genetic studies of pulp color and mapping of QTL for carotenoids content in citrus [D].Wuhan:Huazhong Agricultural University,2018 (in Chinese with English abstract).
- [15] 郑雄杰.柑橘果皮红色性状形成的生化基础及遗传机制[D].武汉:华中农业大学,2018.ZHENG X J.The biochemical and genetic mechanism underlying red color trait of citrus peel [D].Wuhan:Huazhong Agricultural University,2018 (in Chinese with English abstract).
- [16] WU J X,CAO J Y,SU M,et al.Genome-wide comprehensive analysis of transcriptomes and small RNAs offers insights into the molecular mechanism of alkaline stress tolerance in a citrus rootstock[J/OL].Horticulture research,2019,6:33[2022-09-03].https://doi.org/10.1038/s41438-018-0116-0.
- [17] 朱世平,王福生,陈娇,等.柑橘不同类型砧木的种子和苗期性状[J].中国农业科学,2020,53(3):585-599.ZHU S P,WANG F S,CHEN J,et al.Seed traits and seedling performances of different types of citrus rootstock[J].Scientia agricultura sinica,2020,53(3):585-599 (in Chinese with English abstract).

## Genetic diversity analysis of hybrid progeny of Red tangerine × Trifoliate orange

SUN Yi<sup>1</sup>, HU Yibo<sup>2</sup>, YE Junli<sup>1</sup>, CHAI Lijun<sup>1</sup>, DENG Xiuxin<sup>1</sup>, XIE Zongzhou<sup>1</sup>

1.National Key Laboratory for Germplasm Innovation & Utilization of Horticultural Crops/  
College of Horticulture & Forestry Sciences, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China;  
2.Deqing Citrus Research Institute, Guangdong Academy of Agricultural Sciences, Deqing 526600, China

**Abstract** To screen the rootstock resources for superior traits of convergent parents, 94 individual plants of F<sub>1</sub> hybrid population with Red tangerine as the female parent and Trifoliate orange as the male parent were used as test materials to observe their defoliation period and flowering period for two consecutive years, and the fruit quality, seed embryo types and germination rate of 37 individual plants with high fruition rates were analyzed. The results showed that the phenology of 94 individual plants was similar to that of their parents, but there was a significant difference in the defoliation period between hybrid progenies. The fruit shape of the hybrid population was more inclined toward paternal inheritance, mainly oval in shape. The average fruit weight of the offspring populations was 58.63 g, average number of seeds was 14, and 1000-grain weight was 153.73 g. The soluble solid content was 10.7%–16.5%, which was not significantly different from that of the female parent, and the titratable acid content of fruit was 2.00%–5.56%, which was significantly higher than that of the female parent. The flavedo of the hybrid population mainly includes red peel (female parent preferred) and yellow peel (male parent preferred). The contents of β-cryptoxanthin were significantly higher than those of the parents, and the contents of violaxanthin lutein and zeaxanthin were between those of parents, while the contents of β-carotene in the peel of parents and hybrid offspring were relatively low. The contents of violaxanthin, lutein and β-carotene showed continuous changes, which showed quantitative characteristics. The ratio of monoembryoid to polyembryoid types in the hybrid progeny was close to 1:3, which indicated that the character was determined by a single gene. In summary, the results showed that the progeny No. 3, No. 6 and No. 24 had the characteristics of polyembryony, more seeds per fruit and a high germination rate, and could be used as excellent rootstock candidates for further evaluation.

**Keywords** Red tangerine; Trifoliate orange; hybrid population; phenological period; fruit quality; carotenoids

(责任编辑:葛晓霞)