

徐宸宇,曹立新,唐启正,等. 马家柚遗传来源鉴定与适宜授粉品种筛选[J]. 华中农业大学学报, 2022, 41(2): 124-135.
DOI: 10.13300/j.cnki.hnlkxb.2022.02.015

马家柚遗传来源鉴定与适宜授粉品种筛选

徐宸宇,曹立新,唐启正,吴巨勋,伊华林

园艺植物生物学教育部重点实验室/华中农业大学园艺林学学院,武汉 430070

摘要 为探究马家柚及原产地周边主要柚类株系遗传关系和来源并筛选出适宜授粉株系,利用 SSR 分子标记技术对江西省广丰县及周边地区共 46 份柚资源进行遗传关系鉴定,并对不同杂交授粉组合的马家柚进行连续 2 a 的果实品质相关指标分析。结果表明:马家柚在长期实生繁殖与人工选择过程中发生了明显变异,极有可能由广丰及周边地区的本地土柚经长期自然与人为的双向选择衍变而来;不同杂交授粉组合中以土柚 4 号对马家柚果实品质提升效果最佳,为目前马家柚较为适宜的授粉父本株系。

关键词 马家柚; 遗传鉴定; SSR 分子标记; 杂交授粉; 果实品质

中图分类号 S666.901 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2022)02-0124-12

马家柚 [*Citrus grandis* (L.) Osbeck cv 'Majia pomelo'] 是研究人员于 1991 年对江西省柚类资源普查时发现的地方性特色柚类品种,因其汁多瓢红、细嫩爽口、清香四溢、经济价值高以及适宜 II 型糖尿病患者食用等优点而被广泛栽种于广丰及其周边地区居民的房前屋后,其母树现位于广丰县大南镇^[1]。但目前对于马家柚遗传起源以及原产地周边区域的柚类资源和主要柚类株系间的亲缘关系尚不明晰,刘勇^[2]在对全国 122 份柚类资源进行亲缘关系分析时仅得出马家柚与广丰周边地区的信木柚共同归属于其他杂种柚类品种群的结论,马家柚遗传背景研究的不足已明显制约了马家柚优良品种的发掘与产业化的进一步发展。经长期调查发现,马家柚在形态与品质上与周边地区的本地土柚存在一定的相似性,研究人员推测马家柚与地方土柚的遗传关系接近或直接经土柚变异而来。由于自然和人为的双重选择会导致实生繁育马家柚产生大量变异株系,这些变异个体间往往差异明显,同时因生产中苗木混杂进而导致栽培株系间品质不一致^[3]。

前人就马家柚提质增产开展了大量研究,单一栽培模式下的马家柚有籽无籽性状不稳定,无籽果

实风味较淡且容易产生粒化现象。目前主栽马家柚品系还存在着果皮过厚,平均厚度可达 30~35 mm; 果形不统一,多为梨形或高扁圆形;果皮油胞大小与排布不均,果皮光滑度不一致;果实品质差异较大等问题^[4]。现针对于马家柚品质改良的最佳方式是通过杂交授粉使单一品系栽种的无籽马家柚产生一定数量的种籽,杂交授粉作为直接影响主要粮食、经济林木、果蔬及园艺观赏植物的产量及品质性状的重要栽培措施,对作物改良、提质增产和经济效益的提升发挥着至关重要的作用^[5-7]。育种人员通过对不同亲本杂交后代性状观察分析,筛选出高产稳产、抗病抗除草剂、根系发达、抗旱耐盐碱、营养物质含量高、耐贮运、品质优异等针对多样化育种目标的优势品种^[8-10]。例如杂交授粉后产生的大量种籽可通过影响果实结构稳定性和内源激素调节果实渗透物质含量共同起到保护中心柱的作用,降低柚果实内裂率^[11-12]。在花粉直感作用下,以优质品种为父本可有效实现待授粉品种改良,提升果实外观及内在风味品质、增强品种市场竞争力^[13-15],这在多个物种中已得到了广泛应用^[16-18]。研究表明有籽马家柚果皮光滑且风味较无籽马家柚更为浓郁,同时马家柚种

收稿日期: 2021-12-22

基金项目:国家重点研发计划项目(2019YFD1001400);国家现代农业(柑橘)产业技术体系(CARS-26);云南省科技厅重大科技专项(202102AE090054;202102AE090020)

徐宸宇, E-mail: 798636860@qq.com

通信作者: 伊华林, E-mail: yihualin@mail.hzau.edu.cn

籽数量与父本密切相关。以枳壳为父本与马家柚进行授粉时平均每果种籽数仅为20余粒,而以沙田柚、江坝柚和龙回早柚为父本时的平均每果种籽数高达200余粒。同时以不同父本杂交授粉后的马家柚在坐果率、果皮厚度、果皮色泽、果形、可滴定酸、可溶性固形物和维生素C等综合品质上差异显著^[19]。随着杂交组合的增多,不同杂交父本授粉马家柚的农艺性状差异得以体现,但对于杂交父本的选择多为随机选择。此外,对马家柚原产地周边主要柚类资源搜集和梳理工作的滞后进一步阻碍了本土柑橘资源的开发与利用。

基于此,本研究通过对广丰县和周边地区以及其他省份收集的46份柚资源的遗传关系分析,探明马家柚起源及其不同株系亲缘关系,并以此为依据选择马家柚近缘系和远缘系作为授粉亲本与主栽马

家柚株系进行授粉试验,探究遗传关系不同株系授粉对马家柚品质影响,旨在为马家柚优质高效栽培提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料

1) 遗传分析材料。46份柚(*Citrus grandis* Osbeck)资源样品分别取自江西省新余市、上饶市广丰县及周边区县、湖北省宜昌市、湖南省郴州市以及华中农业大学柑橘资源圃(表1),全部土柚和马家柚母树为实生繁殖,均来自江西广丰,其他材料为嫁接繁育。选取柚类样品叶型完整、无病虫害的幼嫩叶片,用自封袋封存后带回实验室进行清水冲洗并吸干水分,随后立即提取叶片DNA或置于-80℃超低温冰箱保存备用。

表1 46份柚资源名称及来源

Table 1 Name and source of the 46 pomelo varieties

编号 Code	名称 Germplasm name	来源 Source
N1	土柚1号 Native pomelo No.1	广丰县大南镇三排村 Sanpai Village, Danan Town, Guangfeng Country
N2	土柚2号 Native pomelo No.2	广丰县洋口镇 Yangkou Town, Guangfeng Country
N3	土柚3号 Native pomelo No.3	广丰县湖丰镇回树村 Huishu Village, Hufeng Town, Guangfeng Country
N4	土柚4号 Native pomelo No.4	广丰县毛村镇下坞村 Xiawu Village, Maocun Town, Guangfeng Country
N5	土柚5号 Native pomelo No.5	广丰县桐畈镇毛溪新村 Maoxi New Village, Tongfan Town, Guangfeng Country
N6	土柚6号 Native pomelo No.6	广丰县毛村镇杨坞村 Yangwu Village, Maocun Town, Guangfeng Country
N7	土柚7号 Native pomelo No.7	广丰县大南镇马家村 Majia Village, Danan Town, Guangfeng Country
N8	土柚8号 Native pomelo No.8	广丰县排山镇老街村 Old Street Village, Paishan Town, Guangfeng Country
N9	土柚9号 Native pomelo No.9	广丰县吴村镇胜利村 Victory Village, Wucun Town, Guangfeng Country
N10	土柚10号 Native pomelo No.10	广丰县大南镇三排村 Sanpai Village, Danan Town, Guangfeng Country
N11	土柚11号 Native pomelo No.11	广丰县吴村镇胜利村 Victory Village, Wucun Town, Guangfeng Country
N12	土柚12号 Native pomelo No.12	广丰县桐畈镇马家柚基地 Majia pomelo Base, Tongfan Town, Guangfeng County
N13	土柚13号 Native pomelo No.13	广丰县排山镇马家柚基地 Majia pomelo Base, Paishan Town, Guangfeng County
N14	土柚14号 Native pomelo No.14	广丰县排山镇梅树底 Meishudi, Paishan Town, Guangfeng County
N15	土柚15号 Native pomelo No.15	广丰县毛村镇杨坞村 Yangwu Village, Maocun Town, Guangfeng County
N16	土柚16号 Native pomelo No.16	广丰县湖丰镇马家柚基地 Majia pomelo Base, Hufeng Town, Guangfeng County
N17	土柚17号 Native pomelo No.17	广丰县湖丰镇马家柚基地 Majia pomelo Base, Hufeng Town, Guangfeng County
N18	土柚18号 Native pomelo No.18	广丰县吴村镇胜利村 Victory Village, Wucun Town, Guangfeng Country
N19	土柚19号 Native pomelo No.19	广丰县洋口镇马家柚基地 Majia pomelo Base, Yangkou Town, Guangfeng Country
N20	土柚20号 Native pomelo No.20	广丰县桐畈镇十字路 Cross road, Tongfan Town, Guangfeng County
N21	土柚21号 Native pomelo No.21	广丰县洋口镇马家柚基地 Majia pomelo Base, Yangkou Town, Guangfeng Country
N22	土柚22号 Native pomelo No.22	广丰县排山镇排山村 Paishan Village, Paishan Town, Guangfeng Country
N23	土柚23号 Native pomelo No.23	广丰县排山镇马家柚基地 Majia pomelo Base, Paishan Town, Guangfeng County
N24	土柚24号 Native pomelo No.24	广丰县排山镇梅树底 Meishudi, Paishan Town, Guangfeng County
N25	土柚25号 Native pomelo No.25	广丰县湖丰镇尖山屋 Jianshan House, Hufeng Town, Guangfeng County
MJSsT	马家柚母树 Majia pomelo scionseed tree	广丰县大南镇马家村 Majia Village, Danan Town, Guangfeng County
MJ1	马家柚1号 Majia pomelo No.1	广丰县湖丰镇马家柚基地 Majia pomelo Base, Hufeng Town, Guangfeng County

续表 1 Continued Table 1

编号 Code	名称 Germplasm name	来源 Source
MJ-2	马家柚 2号 Majia pomelo No.2	广丰县湖丰镇马家柚基地 Majia pomelo Base, Hufeng Town, Guangfeng County
MJ-3	马家柚 3号 Majia pomelo No.3	广丰县排山镇马家柚基地 Majia pomelo Base, Paishan Town, Guangfeng County
MJ-4	马家柚 4号 Majia pomelo No.4	广丰县湖丰镇马家柚基地 Majia pomelo Base, Hufeng Town, Guangfeng County
MJ-5	马家柚 5号 Majia pomelo No.5	广丰县湖丰镇马家柚基地 Majia pomelo Base, Hufeng Town, Guangfeng County
XM	信木柚 Xinmu pomelo	江西信木农业有限公司基地 Jiangxi Xinmu Agricultural Co Ltd Base
JB	金标柚 Jinbiao pomelo	江西金标实业集团有限公司 Jiangxi Jinbiao Industrial Group Co Ltd
XY1	新余柚 1号 Xinyu pomelo No. 1	江西省新余市 Xinyu City, Jiangxi Province
XY2	新余柚 2号 Xinyu pomelo No. 2	江西省新余市 Xinyu City, Jiangxi Province
CG	鸡尾葡萄柚 Cocktail Grapefruit	华中农业大学 Huazhong Agricultural University
GX	琯溪蜜柚 Guanxi Honey pomelo	华中农业大学 Huazhong Agricultural University
ST	沙田柚 Shatinyu Hort	华中农业大学 Huazhong Agricultural University
G	胡柚 Grapefruit	华中农业大学 Huazhong Agricultural University
HNR	华农红柚 Huanong Red pomelo	华中农业大学 Huazhong Agricultural University
GXR	琯溪红柚 Guanxi Red pomelo	华中农业大学 Huazhong Agricultural University
PH	凤凰柚 Phoenix pomelo	华中农业大学 Huazhong Agricultural University
HB	HB柚 HB pomelo	华中农业大学 Huazhong Agricultural University
Chd	强德勒柚 Chandler pomelo	华中农业大学 Huazhong Agricultural University
ZGH	资丘琯溪蜜柚 Ziqiu Guanxi honey pomelo	湖北省宜昌市长阳资丘 Changyang Ziqiu, Yichang City, Hubei Province
NLM	南强雷公柑一号 Nanqiang Leigong Mandarin No.1	湖南省郴州市临武县 Linwu County, Binzhou City, Hunan Province

2)授粉材料与方法。杂交授粉试验中母本为江西省广丰县湖丰镇马家柚基地中经嫁接繁育的10年生马家柚成年结果树(马家柚1号),树势强健且无明显病虫害。父本分别选择周边区县的土柚1号~土柚4号(简称为N1、N2、N3、N4)和华中农业大学柑橘资源圃中的HB柚(简称为HB)与鸡尾葡萄柚(简称为JW)。于盛花期前选取同一株母本树上的健壮花序,对即将开放的花朵进行人工去雄并对上述花粉分别进行杂交授粉处理,对授粉花朵数与杂交组合统计后进行挂牌并疏除其余未授粉花朵。每单株作为1个生物学重复,共3株树,对照组为每株树上的自然传粉果实。

1.2 DNA提取与质量检测

参考程运江等^[20]的方法,并略做简化。CTAB法微量提取46份柚类资源DNA。

1.3 SSR分子标记分析

1)SSR引物的筛选。应用柑橘相关研究中的SSR分子标记引物并结合刘勇^[2]在柚类资源多样性中的遗传多态信息指数,最终筛选出带型清晰的12对SSR引物。所有引物均由上海生工生物技术有限公司(上海合成部)合成,引物序列见表2。

2)DNA扩增体系为20 μL 。Taq DNA polymerase (5 U/ μL) 0.2 μL ,正反引物(10 $\mu\text{mol/L}$)各0.3 μL 、dNTPs (2.5 ng/ μL) 1.6 μL 、DNA模板(25

表2 本研究中筛选得到的12对SSR引物

Table 2 12 pairs of primers selected in the study for SSR

位点代号 Locus code	引物序列 Primer sequence(5'-3')
CS2	F:GAAAGCGATTGCTGAAAAGG R:CAAACGAAACAAGCCCTAAAA
CAC15	F:TAAATCTCCACTCTGCAAAAGC R:GATAGGAAGCGTCGTAGACCC
TAA1	F:GACAACATCAACAACAGCAAGAGC R:AAGAAGAAGAGCCCCATTAGC
TAA15	F:GAAAGGGTTACTTGACCAGGC R:CTTCCCAGCTGCACAAGC
TAA41	F:AGGTCTACATTGGCATTGTC R:ACATGCAGTGCTATAATGAATG
CMS7	F:CAGGATGCTTGTGGTGATG R:ACAGTGGATACAAACATGCTGC
CMS21	F:TAGGCCAAATCTTATTCATGCC R:TCAGGGTCATAAGGAATGGC
CMS24	F:TTATTGTCCCAATTGTGAGC R:TCCAGATTGAGGGGAAAAAG
CMS30	F:AACACCCCTTGAGGGAG R:GCTGTTACACACACAACCC
CMS39	F:CTCAGCTCTGTCTCTCCTCC R:CTGGAGCAGGGTGACCTATC
CMS47	F:GGATCCTCCACCATCTCGTA R:TTCTTCTCCATGCCGACTT
SPCC9	F:TGGAGAAGGTTCTTTTCAAGC R:CGAACCCCTCGGTACGATTAA

ng/ μ L) 2.6 μ L、 $10\times$ 反应缓冲液、ddH₂O 13.0 μ L。PCR扩增程序:94 $^{\circ}$ C预变性 5 min;94 $^{\circ}$ C变性 45 s,55 $^{\circ}$ C退火 1 min,72 $^{\circ}$ C延伸 1 min,32个循环;72 $^{\circ}$ C延伸 10 min。全部反应均在ABI Veriti 梯度PCR仪上进行。

1.4 果实综合品质评价

1)果实外观品质。取大小一致的5个果实测定单果质量、纵横径、果皮厚度和单果种籽数。分别用电子天平和游标卡尺测量单个果实的质量、纵横径和果皮厚度;记录5个果实种籽总数量并求其均值;果形指数为纵径/横径^[21]。

2)果实内在品质。测定5个果实的可食率、出汁率和维生素C含量;可溶性固形物(soluble solids, TSS)使用便携式折光仪对5个果实的混合果汁平行测定3次并取其均值;可滴定酸(titratable acids, TA)使用全自动电位滴定仪测定^[22-23]。

3)果肉可溶性糖及有机酸含量测定。果实糖酸提取参照许让伟等^[24]的方法。GC检测条件:HP5色谱柱(5% Phenylmethyl polysiloxane, 30 m \times 25 μ m i.d \times 0.1 μ m),分流/不分流进样口温度 270 $^{\circ}$ C,检测器温度 300 $^{\circ}$ C。气体流速:高纯N₂作载气,流量为 45 mL/min;H₂的流量为 40 mL/min;空气流量为 450 mL/min;柱头压为 0.827 MPa,进样量 1 μ L,分流比 30:1,分流流速为 60.1 mL/min。升温程序:初温 130 $^{\circ}$ C,以 8 $^{\circ}$ C/min 升至 152 $^{\circ}$ C,12 $^{\circ}$ C/min 升至

176 $^{\circ}$ C,16 $^{\circ}$ C/min 升至 198 $^{\circ}$ C,以 20 $^{\circ}$ C/min 升至 238 $^{\circ}$ C,24 $^{\circ}$ C/min 升至 280 $^{\circ}$ C,在 280 $^{\circ}$ C 保留 4 min,最高温度不超过 325 $^{\circ}$ C。

1.5 数据统计分析

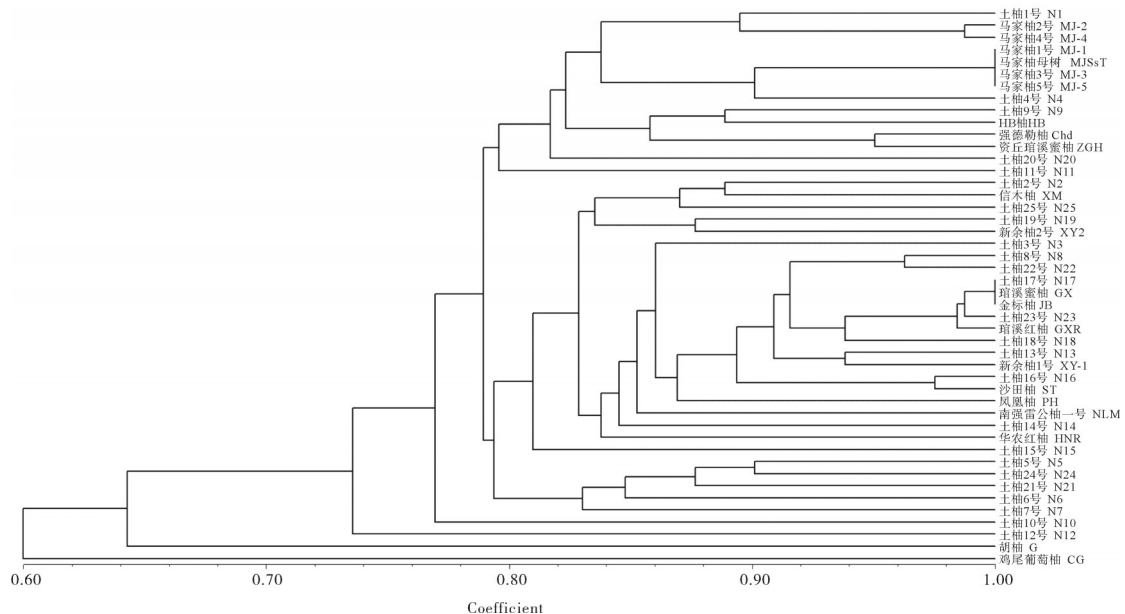
参考 Zhen 等^[25]的方法以每个样品在不同位点上扩增条带的有无进行赋值,有条带赋值为 1,无条带则赋值为 0,构建“01”数据矩阵。通过 NT-SYS2.10e 软件进行柚资源样品的聚类分析,两两样品间的遗传差异按照 Qualitative data 中的简单匹配系数计算,通过 Zhen 等^[25]中 UPGMA 对所得的遗传相似性系数矩阵进行聚类分析,Graphics 绘制树状图。品质评价结果使用 Excel 软件进行数据统计处理,SPSS 软件进行差异显著性分析,Prism 软件作图。

2 结果与分析

2.1 马家柚亲缘关系分析

根据 12 组 SSR 引物对 46 份柚类资源扩增的条带构建每个样品特有的指纹图谱,聚类分析后最终绘制出 46 份柚类资源的 SSR 分子标记聚类树状图。聚类结果分析如下。

当遗传相似系数为 0.643 时,全部 46 份柚类资源样品被分为 3 大类。第 I 组为马家柚、HB 柚、琯溪蜜柚等柚类在内的多品种群,共计 44 个柚资源。第 II 组为胡柚,第 III 组则为鸡尾葡萄柚。



图中柚资源名称及来源见表 1。Pomelo resources name and sources were showed in Table 1.

图 1 马家柚亲缘关系 SSR 标记聚类树状图

Fig.1 Tree diagram of genetic relationship of Majia pomelo using SSR markers clustering

当遗传相似系数为0.815时分为8个亚组,第Ⅰ亚组为马家柚母树、马家柚1~5号、土柚1号、土柚4号、土柚9号、土柚20号、HB柚、强德勒柚、资丘瑄溪蜜柚等14个品种,主要为马家柚品种群;第Ⅱ亚组为土柚11号;第Ⅲ亚组为瑄溪蜜柚、信木柚、沙田柚、新余柚1号、华农红柚、凤凰柚、土柚2号、土柚3号、土柚13号、土柚19号等23个品种,主要为独立柚类与部分土柚品种群;第Ⅳ亚组为土柚5号、土柚21号等5个品种,为土柚品种群;第Ⅴ亚组为土柚10号;第Ⅵ亚组为土柚12号;第Ⅶ亚组为胡柚;第Ⅷ亚组为鸡尾葡萄柚。由聚类树状图可得出:(1)马家柚1号、马家柚3号、马家柚5号和马家柚母树相似系数为1,推测为同一实生品系。(2)相似系数为0.901时,土柚4号与马家柚母树聚为一类;土柚1号与马家柚2号、马家柚4号在相似系数为0.895时聚为一类;土柚9号、HB柚在相似系数为0.827时和马家柚母树聚为一类;土柚2号与信木柚在相似系数为0.889时聚为一类;土柚3号在相似系数为0.839时才与马家柚聚为同一类。(3)胡柚(相似系数0.630)、鸡尾葡萄柚(相似系数0.617)与马家柚亲缘关系较远。

上述结果表明:土柚4号与马家柚母树亲缘关系十分相近;马家柚2号、马家柚4号相较于马家柚母树存在一定程度的变异;土柚1号与马家柚2号、马家柚4号亲缘关系较近;马家柚并非由HB柚、强德勒柚、沙田柚、信木柚和瑄溪蜜柚等任何一个品种变异而来;鸡尾葡萄柚、胡柚与马家柚均为独立品种。推测最早的实生马家柚极可能经广丰及周边地区土柚变异而来。

2.2 部分有食用价值的柚资源品质分析

对广丰及周边地区果实品质性状表现较好、并具有一定食用价值的部分资源和华中农业大学柑橘资源圃内对照组的柚类品种(表3中14~18号)共18份柚类资源的常规品质测定结果表明:马家柚周边柚种质资源类型呈高度多样化,在品质相关性状(表3)如单果质量(472.2~1482.7g)、果皮厚(0.92~3.45cm)、种籽数(0~158.7个)、可滴定酸含量(0.53%~2.48%)、 V_C (37.1~90.5mg/100g)、出汁率(14.7%~40.5%)等方面均存在着明显差异。当地柚资源调查结果反映出广丰及周边马家柚产区的柚类资源丰富,同时也发现了一些优良的土柚品种,如风味浓郁、高维生素C含量的土柚4号;对照组品种中HB柚风味足、种籽少,也可作为适宜授粉候选品种。

2.3 马家柚适宜授粉资源初选

1)6个杂交授粉父本对马家柚果实外观品质影响。综合评估46份柚类资源中部分品质性状及花粉收集便利性,最终选择以品质性状优良的土柚4号和HB柚;马家柚近缘系品种土柚1号、土柚2号、土柚3号以及远缘系品种鸡尾葡萄柚(CG)为父本与主栽马家柚进行杂交授粉,授粉果实的外观品质分析结果(表4)显示:6个杂交授粉组合果实种籽数较CK的无籽果实相比均极显著增加,其中土柚系(N1、N2、N3、N4)为父本时使果实平均种籽数增加至200余粒;HB为父本时果实种籽数较少,平均为135.56粒;CG授粉果实种籽数最少。对单果质量的提升以HB最为显著,N2、N1次之。果皮厚度方面,除CG外的其余杂交组合较CK均显著降低马家柚的果皮厚度。在果形指数上,杂交授粉处理较CK均无显著差异。

2)6个杂交授粉父本对马家柚果实内在品质影响。6个杂交授粉处理果实可食率与自然授粉果实(CK)相比均无显著性差异;HB为父本时可显著提升授粉马家柚出汁率;可溶性固形物(TSS)含量方面,CG后代果实TSS含量为16.90%,较CK果实TSS含量有显著性提升,其余杂交父本则无明显差异;4个土柚系(N1、N2、N3、N4)和HB为父本时授粉果实与CK相比均显著降低了果实可滴定酸(TA)含量,而CG杂交后代果实则表现为TA含量的显著升高;土柚系杂交父本较CK相比均显著提升了授粉果实固酸比,有效改善了果实风味,其中以CG为父本时显著降低了果实固酸比,使果实风味明显变淡;6个杂交授粉父本中以N3对果实 V_C 含量提升效果最佳,除HB外的其余杂交父本与CK相比均显著提升了果实VC含量(表5)。

3)杂交授粉果实可溶性糖含量分析。对构成马家柚糖酸风味的主要组分的测定结果(图2)显示,马家柚果肉可溶性总糖含量变化趋势总体上与可溶糖各组间保持一致,土柚系(N1、N2、N3、N4)杂交父本和CG对可溶性糖组分中的果糖、葡萄糖和蔗糖含量提升效果显著;6个杂交父本授粉均显著提升了马家柚果实总糖含量,其中N1、CG、N3和N4可溶性总糖含量与CK相比,增幅分别可达102.7%、99.6%、82.6%和78.2%。

4)杂交授粉果实有机酸含量分析。柠檬酸为构成马家柚果实有机酸的主要组分,由图3可知:不同杂交授粉马家柚的总有机酸含量与柠檬酸含量变化趋势保持一致。与CK相比,4个土柚系(N1、N2、

表 3 18 个优良柚资源常规品质分析
Table 3 Analysis of conventional quality of 18 excellent pomelo resource

序号 Number	样名 Germplasm name	单果质 量/g Single fruit weight	纵径/cm Fruit height	横径/cm Fruit diameter	果形指数 Fruit shape index	果皮厚/cm Peel thickness	可食 率/% Edible rate	出汁 率/% Juice rate	种籽数 No.of seeds per fruit	可溶性固 形物/% TSS	可滴定酸 含量/% TA	维生素 C/(mg/ 100 g) V _C	果皮 H Peel colour H	果汁 H Juice co- lour H
1	土柚 4 号 Native pomelo No.4	714.4	13.12	12.69	1.034	1.88	34.0	19.3	158.7	8.8	1.89	90.5	1.56	1.15
2	土柚 6 号 Native pomelo No.6	602.3	13.77	12.30	1.120	2.06	41.4	16.3	110.7	9.3	2.48	57.6	1.55	1.42
3	土柚 9 号 Native pomelo No.9	472.2	10.63	10.48	1.014	1.45	46.4	21.6	111.3	8.5	1.56	49.2	1.56	2.18
4	土柚 12 号 Native pomelo No.12	1 367.0	18.90	17.20	1.099	3.45	33.8	20.2	123.0	9.7	1.98	65.0	1.73	2.35
5	土柚 14 号 Native pomelo No.14	1 250.4	15.56	15.69	0.990	2.15	37.9	22.3	125.0	8.0	1.42	61.7	1.55	1.70
6	土柚 17 号 Native pomelo No.17	1 081.1	13.85	14.13	0.980	0.92	60.1	40.5	62.0	11.5	1.21	37.1	1.61	2.79
7	土柚 18 号 Native pomelo No.18	5 66.8	10.98	12.19	0.902	1.75	47.6	22.6	157.0	8.0	2.47	70.2	1.90	1.90
8	土柚 22 号 Native pomelo No.22	8 25.4	13.62	13.56	1.006	2.28	27.7	14.7	157.0	9.5	1.77	68.9	1.49	1.74
9	土柚 25 号 Native pomelo No.25	1 436.8	14.39	15.54	0.926	1.55	47.5	33.6	136.7	8.7	1.53	57.0	1.73	2.20
10	金标柚 Jinbiao pomelo	1 482.7	16.63	15.70	1.060	2.00	64.5	38.7	0.0	9.5	1.07	39.5	1.63	0.42
11	马家柚 3 号 Mājia pomelo No.3	1 322.8	19.91	18.54	1.074	2.89	45.5	32.4	0.0	9.2	0.70	60.3	1.58	0.78
12	马家柚 4 号 Mājia pomelo No.4	1 296.2	15.96	16.22	0.984	2.16	49.9	33.7	121.0	10.0	0.92	75.0	1.57	1.59
13	马家柚 5 号 Mājia pomelo No.5	1 226.5	16.05	16.15	0.994	1.98	53.1	33.8	146.0	8.5	0.53	77.1	1.94	0.85
14	HB 柚 HB pomelo	806.7	11.31	12.22	0.930	1.37	52.7	35.2	46.0	10.5	1.26	57.1	1.67	1.67
15	沙田柚 Shatinyu Hort	1 114.8	16.37	15.07	1.088	1.70	46.5	33.5	167.3	13.0	0.42	101.0	1.64	2.74
16	凤凰柚 Phoenix pomelo	945.0	12.86	13.58	0.948	1.55	51.6	33.6	146.0	10.0	1.05	44.7	1.55	2.38
17	华农红柚 Huamong Red pomelo	1 165.1	14.58	14.40	1.014	2.17	47.1	30.8	190.0	8.0	1.51	63.1	1.61	0.51
18	强特勒柚 Chandler pomelo	840.0	13.00	13.15	0.989	1.37	51.6	41.1	70.5	12.6	0.93	74.3	1.65	1.08

表4 6个杂交父本授粉果实及对照果实外观品质分析

Table 4 Analysis on exterior quality of pollinated fruits of six hybrid male parents and the control

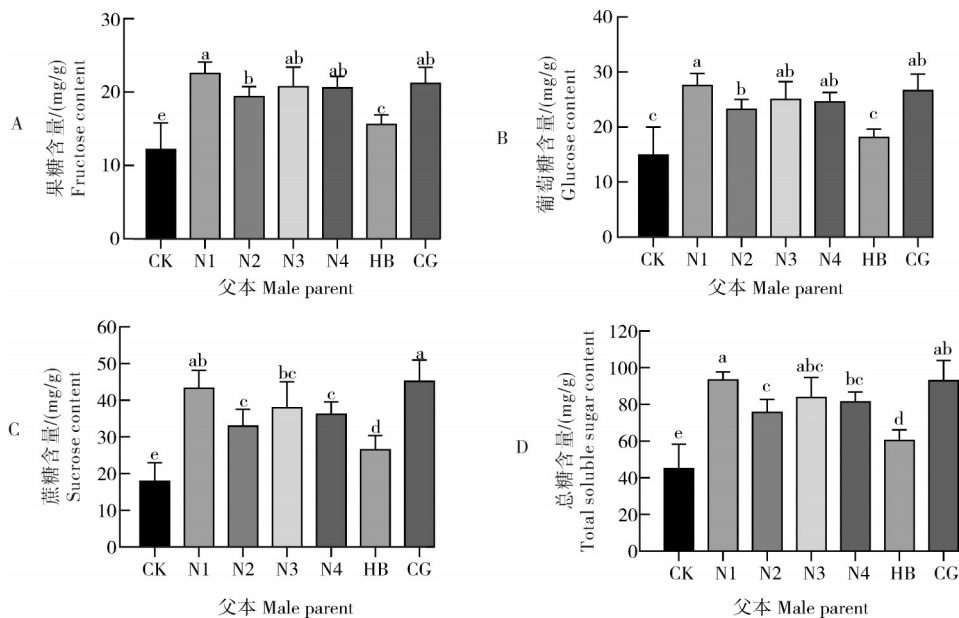
父本 Male parent	单果质量/g Single fruit weight	果形指数 Fruit shape index	果皮厚/mm Peel thickness	种籽数 Seeds number
CK	1 013.76±42.47c	1.026±0.019a	22.38±0.55a	0±0D
N1	1 121.54±17.69b	1.035±0.013a	19.91±0.68b	217.11±8.85A
N2	1 163.84±36.54ab	1.066±0.021a	18.70±0.43b	184.89±13.82A
N3	1 125.19±36.47b	1.046±0.022a	19.81±0.67b	199±7.26A
N4	1 083.06±27.40bc	1.056±0.023a	18.62±0.80b	214.89±4.92A
HB	1 252.93±42.07a	1.014±0.009a	18.47±0.31b	135.56±22.86B
CG	1 096.94±34.72bc	1.037±0.016a	23.40±0.86a	67.89±8.61C

注:同列不同小写字母或大写字母分别表示差异显著($P<0.05$)或极显著($P<0.01$), $n=9$ 。下同。Note: Different lowercase letters or uppercase in the same column indicate significant ($P<0.05$) or extremely significant ($P<0.01$) of the difference, $n=9$. The same as below.

表5 6个杂交父本授粉果实及对照果实内在品质分析

Table 5 Analysis on inner quality of pollinated fruits of six hybrid male parents and the control

父本 Male parent	可食率/% Edible rate	出汁率/% Juice rate	可溶性固形物/% Soluble solid content	可滴定酸/% Titrable acidity	固酸比 Solid-acid ratio	V _c /(mg/100 g) Vitamin C
CK	45.24±1.12ab	51.01±1.29b	15.04±0.53b	0.74±0.04b	20.75±1.34b	82.89±3.80c
N1	43.89±1.42ab	49.73±0.96b	15.76±0.10bc	0.57±0.01c	27.80±0.70a	94.22±0.65b
N2	47.07±1.15a	47.71±3.73b	14.48±0.13de	0.53±0.02c	27.92±1.07a	92.59±0.50b
N3	46.78±1.72a	47.66±1.05b	15.88±0.19b	0.55±0.03c	29.66±1.70a	100.93±1.10a
N4	42.08±1.22b	52.75±0.79ab	15.28±0.10bc	0.54±0.03c	29.03±1.53a	89.12±1.27b
HB	46.03±1.14ab	56.28±1.27a	13.94±0.21e	0.61±0.01c	22.78±0.50b	77.55±1.52d
CG	45.24±1.48ab	50.30±0.87b	16.90±0.14a	1.12±0.08a	15.94±1.40c	92.06±1.50b



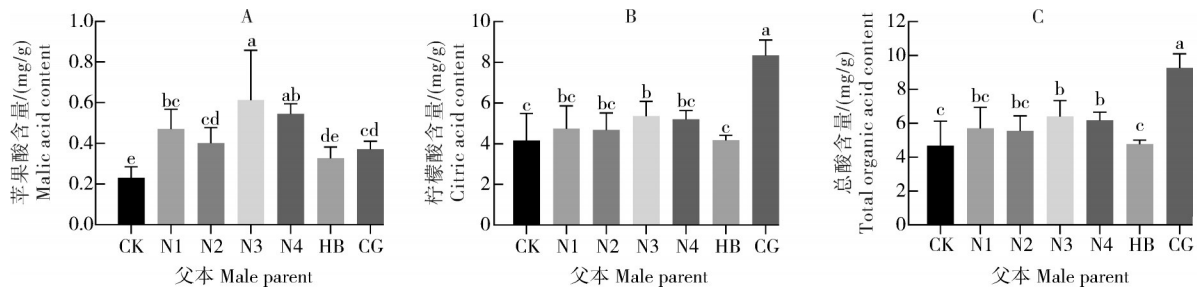
A: 果糖; B: 葡萄糖; C: 蔗糖; D: 总糖。A: Fructose; B: Glucose; C: Sucrose; D: Total soluble sugar.

图2 6个杂交父本授粉果实及对照果实可溶性糖含量分析

Fig.2 Analysis of soluble sugar content in pollinated fruits of six hybrid male parents and the control

N3、N4)父本均在一定程度上增加了果肉中的有机酸含量,其中以N3的提升幅度最大,N4次之;CG显著提升了马家柚果肉中柠檬酸与总酸含量,总有机酸含量增幅高达98.4%;HB则与CK无明显变化。

综合而言,马家柚果实外观品质中以HB综合表现最佳,N1、N2、N3次之;CG为父本授粉后果实存在果皮较厚与果实重量较轻的缺点。内在品质中以土柚系(N1、N2、N3、N4)综合表现较好,其中以N3



A: 苹果酸; B: 柠檬酸; C: 总酸。A: Malic acid; B: Citric acid; C: Total organic acids.

图3 6个杂交父本授粉果实及对照果实有机酸含量分析

Fig.3 Analysis on organic acid content in pollinated fruits of six hybrid male parents and the control

在固酸比和V_C含量上表现最佳;HB和CG的固酸比较低导致果实风味较淡以及果实V_C含量偏低;CG为父本授粉后的果实可滴定酸含量较CK显著增加则会导致果实风味偏酸。糖酸风味方面以糖酸比为主要评价指标,其中N1、N4的综合表现最佳,N2和N3次之;HB为父本授粉后果实糖酸风味偏淡,CG授粉后果实酸含量较高,口感偏酸。综合马家柚各项品质评价指标,以N1、N4为父本与主栽马家柚杂交授粉果实综合品质明显优于其他组合,可作为候

选杂交组合进行父本复选。

2.4 马家柚适宜授粉父本复选

1)杂交父本N1、N4对马家柚外观品质影响。第2年以授粉综合品质更为优良的2个杂交父本N1、N4进行重复试验,连续2a的品质测定结果(表6)表明:N1、N4对于马家柚外观品质中单果质量的提升以及种籽数的增加表现稳定,同时N1、N4连续2a均一定程度降低了马家柚果皮厚度,其中N4对马家柚果皮厚度降低效果为两者中最佳。

表6 杂交父本N1、N4授粉果实及对照果实外观品质分析

Table 6 Analysis on exterior quality of pollinated fruits of hybrid male parents N1, N4 and the control

年份 Year	父本 Male parent	单果质量/g Single fruit weight	果形指数 Fruit shape index	果皮厚/mm Peel thickness	种籽数 Seed number
2019	CK	1 013.76±42.47c	1.026±0.019a	22.38±0.55cd	0±0C
	N1	1 121.54±17.69bc	1.035±0.013a	19.91±0.68d	217.11±8.85A
	N4	1 083.06±27.40bc	1.056±0.023a	18.62±0.80d	214.89±4.92A
2020	CK	1 233.56±71.61b	1.051±0.021a	33.46±2.26a	0±0C
	N1	1 820.80±55.60a	1.047±0.021a	27.90±1.45b	178.22±12.74B
	N4	1 668.04±80.91a	1.029±0.023a	24.41±1.91bc	167.22±10.16B

2)杂交父本N1、N4对马家柚内在品质影响。连续2a的杂交授粉处理果实内在品质结果表明(表7):N1、N4较CK相比在TSS含量上均无显著变

化,但均有效降低了果实TA含量,同时N1、N4在固酸比方面均有明显提升,有效改善了果实风味。N1、N4连续2a均显著增加了果实V_C含量。

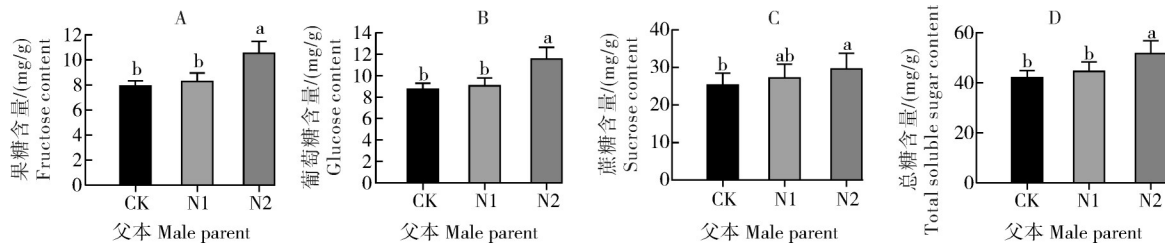
表7 杂交父本N1、N4授粉果实及对照果实内在品质分析

Table 7 Analysis on inner quality of pollinated fruits of hybrid male parents N1, N4 and the control

年份 Year	父本 Male parent	可食率/% Edible rate	出汁率/% Juice rate	TSS/% Soluble solid content	TA/% Titrable acidity	固酸比 Solid-acid ratio	V _C /(mg/100 g) Vitamin C
2019	CK	45.24±1.12bc	51.01±1.29c	15.04±0.53a	0.74±0.04a	20.75±1.34b	82.89±3.80b
	N1	43.89±1.42c	49.73±0.96c	15.76±0.10a	0.57±0.01b	27.80±0.70a	94.22±0.65a
	N4	42.08±1.22c	52.75±0.79bc	15.28±0.10a	0.54±0.03b	29.03±1.53a	89.12±1.27a
2020	CK	41.73±2.40c	63.05±1.03a	11.98±0.10b	0.60±0.02b	20.21±0.64b	51.28±1.62e
	N1	49.86±1.09ab	56.69±1.63b	11.64±0.12b	0.54±0.01b	21.75±0.66b	58.58±1.20d
	N4	51.72±3.35a	53.75±2.31bc	12.11±0.16b	0.53±0.02b	23.12±0.63b	66.71±1.54c

3)杂交果实可溶性糖含量。由图4可知,杂交授粉后马家柚果实可溶性总糖与果糖、葡萄糖和蔗糖

含量保持相对一致,其中N4显著提升了果实可溶性糖各组分含量,分别在果糖、葡萄糖、蔗糖和总糖含



A: 果糖; B: 葡萄糖; C: 蔗糖; D: 总糖。A: Fructose; B: Glucose; C: Sucrose; D: Total soluble sugar.

图4 杂交父本N1、N4授粉果实及对照果实可溶性糖含量分析

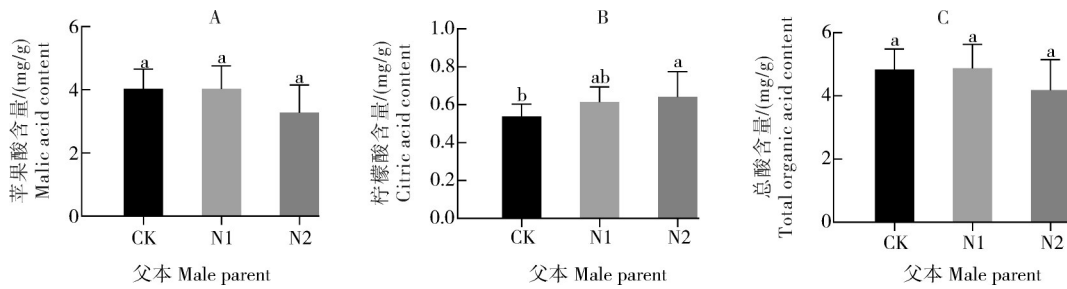
Fig.4 Analysis of soluble sugar content of pollinated fruits of hybrid male parents N1, N4 and the control

量上较CK增长了32.9%、32.0%、16.7%和23.0%，N1较CK则无显著性差异。

在柠檬酸及总酸含量较CK相比有一定程度的降低，N1在有机酸各组分含量上较CK均无显著性差异(图5)。

4) 杂交果实有机酸含量。有机酸含量方面，N4

异(图5)。



A: 苹果酸; B: 柠檬酸; C: 总酸。A: Malic acid; B: Citric acid; C: Total organic acids.

图5 杂交父本N1、N4授粉果实及对照果实有机酸含量分析

Fig.5 Analysis on organic acid content of pollinated fruits of hybrid male parents N1, N4 and the control

马家柚适宜授粉父本的复选结果表明:果实外观品质相关指标中,2个候选父本授粉果实品质含量差异在不同年份间基本保持一致。但与2019年相比,N1、N4在果实质量上的增幅高达62.3%和54.0%,果实体积的明显膨大进而导致了果皮明显增厚;单果种籽数总体较上年相比有所减少,但N1、N4间并无显著差异。果实内在品质方面,N1、N4的可食率和出汁率连续2a的测定结果并无明显差异。N1、N4授粉果实的TSS含量均较CK无显著性差异,但两者均显著降低了果实TA含量;糖酸风味方面,N4对马家柚的增糖降酸效果显著,有效提升了果实风味。

综合连续2a对不同杂交父本授粉的马家柚果实各类品质评价指标可以得出:在生产中优先选择与主栽品种亲缘关系较近,同时对于当地适应性强的本地土柚作为授粉材料时,可有效改善果实综合品质,进而实现主栽品种的提质增产目标。本研究中,以土柚4号为父本与主栽马家柚(马家柚1号)进行杂交后果实品质提升效果最佳,可进行大规模推广应用。

3 讨论

前人研究表明世界上柚类大体可分为内陆性和海洋性两类,其中内陆性柚为较原始的类群,由于内陆不同于海洋性柚类存在地理位置上的明显割裂而阻断不同柚品种间的基因交换,因此,内陆性柚类具有更高的遗传多样性^[26]。以我国为例,研究人员将秦岭淮河及长江中下游平原以南划分为内陆性柚类区域,涉及的产区有四川、湖南、湖北、江西、广西以及云贵地区。海洋性柚类所在区域为我国沿海地区,包括浙江、福建、广东、海南以及台湾地区^[27]。广丰马家柚所在的江西省作为典型的内陆性地区,在漫长的自然实生繁育和人为选育的共同影响下形成了丰富的品种性状多样性,柚类所具有的单胚性状也进一步促进了遗传上高度杂合的可能。在人为因素的作用下,不同省/自治区间柚类资源的广泛交换也加剧了地方柚类品种遗传背景的复杂性。本研究中的聚类结果表明,马家柚母树与HB柚(相似系数0.827)、琯溪蜜柚(相似系数0.815)、信木柚(相似系数0.790)、沙田柚(相似系数0.778)、鸡尾葡萄柚(相似系数0.617)等品种有一定的遗传相似度但并非由其中任何一个品种变异而来。马家柚母树与马家柚

2号、马家柚4号、土柚1号和土柚4号亲缘关系极近,同时本研究搜集到的土柚材料大都与信木柚、琯溪蜜柚、HB柚等独立柚类品种聚为一类。以上结论表明广丰周边的本地土柚遗传变异幅度较大,同时我们了解到,广丰县为发展当地柚产业曾于1990年先后引进了一批外来柚类品种。据此推测,当年引进的外来柚类可能为上述品种中的一种或几种,而马家柚极有可能为本地土柚在长期实生繁育过程中因人为干预导致的区域性柚类种质资源丰富度上升进而逐渐演变为如今的主栽品系。对于马家柚起源背景的最终确定还有待通过形态学、孢粉学和基因组学等多角度进行更为全面的比对判断^[28-30]。

马家柚果实相关性状的花粉直感效应受到遗传基因的影响。46份柚类资源的遗传关系研究表明,与主栽马家柚亲缘关系相近的部分土柚作为广丰及周边乡县的原始柚类类群,对当地环境适应性以及抗逆性较强同时具有一定的食用价值,适宜作为授粉材料加以开发利用。这种利用果实不同亲缘关系的授粉品种进行主栽品系品质改良已得到证明。如,采用与蜜梨亲缘关系较远的砂梨等品种授粉可提升单果质量和可溶性固形物含量,以亲缘关系较近的白梨等品种为父本时则可有效保持蜜梨果形^[31]。因单一栽培下的马家柚果实品质差异较大,通过连续2a的杂交授粉试验筛选出的土柚4号可有效改善马家柚主栽品系的果皮过厚、可食率较低以及风味偏淡等品质缺陷,同一产区不同个体以及不同产区间果实差异进一步缩小,品种性状趋于稳定^[32]。

授粉后果实种籽数的大幅度提升往往易受到消费者诟病。但本研究注意到因异源花粉导致马家柚由无籽增加至100多颗种籽后,其果实可食率反而有一定的增加。可食率的增加推测是由于种籽的出现造成果实内源激素含量变化,进而促进了膨大期果肉组织的发育,使白皮层受到汁胞的持续膨胀压缩最终导致了果皮厚度的降低。此外,因马家柚种籽紧密分布在果实中心柱周围^[33-34],种籽易于直接剥离,同样也避免了食用便利性的下降。然而,适宜作为授粉材料的本地土柚的花期与主栽马家柚品系相隔1周左右,如遇花期不良气候则会造成传粉效果不佳,进而影响当年产量。同时我们注意到,因风味苦涩、果面粗糙、油胞组织大而突出以及果实酸含量偏高而不直接用于栽培售卖的粗皮马家柚在部分果园中被做为主栽马家柚的授粉树进行利用,粗皮马家

柚与主栽马家柚品系花期一致并可使其产生一定数量的种籽^[35]。考虑到消费者感官评价的主导性,如何实现在进一步减少杂交授粉后的马家柚种籽数量的情况下同时使得果实风味不断提升这一育种目标就显得尤为关键。杂交亲本和授粉方式的不同可直接影响果实种籽数量,其中可溶性淀粉介质花粉辅助授粉和人工摇粉较自然授粉可显著提高烟草种籽产量和单果粒数^[36]。生产中,粗皮马家柚周围的主栽马家柚因距离的远近导致授粉效果差异进而直接影响果实种籽数量和种籽性状,如种籽的空瘪和败育等。但目前鲜有授粉方式和授粉树配置情况如何影响杂交果实种籽数的相关研究,后期我们还将通过对比粗皮马家柚和土柚2种杂交父本授粉后的马家柚品质差异并结合开展授粉树配置相关研究以及液体辅助授粉、虫媒传粉等多种形式以进一步确定马家柚最佳授粉亲本和适宜的杂交授粉方式。

参考文献 References

- [1] 高华清,韩蒙蒙,胡子君.上饶市“广丰马家柚”发展现状、问题及对策[J].现代园艺,2019(1):40-41.GAO H Q, HAN M M, HU Z J. Development status, problems and countermeasures of “Guangfeng Majia pomelo” in Shangrao City [J]. Contemporary horticulture, 2019(1): 40-41 (in Chinese).
- [2] 刘勇.柚类资源分子系统学及其核心种质构建研究[D].武汉:华中农业大学,2005.LIU Y. Molecular phylogenetic analysis and core collection construction using SSR and AFLP markers in pummelo [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2005 (in Chinese with English abstract).
- [3] 谢婧蕻,杨莉,旦世浩,等.套袋对马家柚果实外观及内在品质的影响[J].核农学报,2021,35(1):229-237.XIE J H, YANG L, DAN S H, et al. Effect of bagging on fruit appearance and inner quality of Majia pomelo [J]. Journal of nuclear agricultural sciences, 2021, 35(1): 229-237 (in Chinese with English abstract).
- [4] 杨莉,张涓涓,刘德春,等.马家柚粗果皮形成过程的解剖学观察[J].经济林研究,2017,35(3):152-155,173.YANG L, ZHANG J J, LIU D C, et al. Anatomically observation on forming process of rough fruits in *Citrus grandis* [J]. Nonwood forest research, 2017, 35(3): 152-155, 173 (in Chinese with English abstract).
- [5] DUNG C, WALLACE H, BAI S, et al. Cross-pollination affects fruit colour, acidity, firmness and shelf life of self-compatible strawberry [J/OL]. PLoS One, 2021, 16: e0256964 [2021-12-22]. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0256964>.
- [6] GOLZARI M, HASSANI D, RAHEMI M, et al. Xenia and metaxenia in persian walnut (*Juglans regia* L.) [J]. Journal of Nuts, 2016, 7(2): 101-108.
- [7] HERBERT S W, WALTON D A, WALLACE H M. Pollen-parent affects fruit, nut and kernel development of *Macadamia* [J]. Scientia horticulturae, 2019, 244: 406-412.

- [8] ELLIS A M, MYERS S S, RICKETTS T H. Do pollinators contribute to nutritional health? [J/OL]. PLoS One, 2015, 10(1): e114805 [2021-12-22]. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0114805>.
- [9] GHARAGHANI A, GHASEMI SOLOKLUI A A, ORAGUZZIE N, et al. Pollen source influences fruit quality, aril properties, and seed characteristics in pomegranate [J]. International journal of fruit science, 2017, 17(3): 333-348.
- [10] ZHANG X H, YUAN D Y, ZOU F, et al. A study on the xenia effect in *Castanea henryi* [J]. Horticultural plant journal, 2016, 2(6): 301-308.
- [11] 陈秋夏, 郑坚, 张旭乐, 等. 永嘉早香柚果实裂瓣规律与授粉调控 [J]. 果树学报, 2007, 24(1): 68-71. CHEN Q X, ZHENG J, ZHANG X L, et al. Study on the effect of hand pollination on juice sac cracking of Yongjia Zaoxiangyou pomelo cultivar [J]. Journal of fruit science, 2007, 24(1): 68-71 (in Chinese with English abstract).
- [12] 倪海枝, 陈方永, 林绍生, 等. 不同花粉授粉对玉环柚品质及裂果的影响 [J]. 中国南方果树, 2013, 42(6): 34-35, 37. NI H Z, CHEN F Y, LIN S S, et al. Effects of different pollen pollination on quality and fruit cracking of Yuhuan pomelo [J]. South China fruits, 2013, 42(6): 34-35, 37 (in Chinese).
- [13] TABER S K, OLMSTEAD J W. Impact of cross- and self-pollination on fruit set, fruit size, seed number, and harvest timing among 13 southern highbush blueberry cultivars [J]. HortTechnology, 2016, 26(2): 213-219.
- [14] WANG H B, WANG C Z, CHENG L L, et al. Effect of metaxenia on volatile compounds in bagged apple fruit of fuji [J]. Agricultural science & technology, 2017, 18(4): 583-587, 610.
- [15] 王琦, 高慧颖, 郑亚凤, 等. 利用茂谷橘橙异花授粉提高福橘果实品质 [J]. 福建农业学报, 2015, 30(7): 662-666. WANG Q, GAO H Y, ZHENG Y F, et al. Effect of cross-pollination with murcott on fruit quality of fuji oranges [J]. Fujian journal of agricultural sciences, 2015, 30(7): 662-666 (in Chinese with English abstract).
- [16] FIGUEIREDO D D, BATISTA R A, ROSZAK P J, et al. Auxin production couples endosperm development to fertilization [J/OL]. Nature plants, 2015, 1: 15184 [2021-12-22]. <https://doi.org/10.1038/nplants.2015.184>.
- [17] SABIR A. Xenia and metaxenia in grapes: differences in berry and seed characteristics of maternal grape cv. Narince' (*Vitis vinifera* L.) as influenced by different pollen sources [J]. Plant biology, 2015, 17(2): 567-573.
- [18] SAPIR G, BARAS Z, AZMON G, et al. Synergistic effects between bumblebees and honey bees in apple orchards increase cross pollination, seed number and fruit size [J]. Scientia horticulturae, 2017, 219: 107-117.
- [19] 靳瑞霞. 马家柚不同授粉组合果实品质研究 [D]. 武汉: 华中农业大学, 2013. JIN R X. Study effect of different pollination combination on fruit quality of Majia pomelo [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2013 (in Chinese with English abstract).
- [20] 程运江, 伊华林, 庞晓明, 等. 几种木本果树 DNA 的有效提取 [J]. 华中农业大学学报, 2001, 20(5): 481-483. CHENG Y J, YI H L, PANG X M, et al. An efficient method for genomic DNA extraction from woody fruit plants [J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2001, 20(5): 481-483 (in Chinese with English abstract).
- [21] 姜启航. 套袋对柚果实类胡萝卜素代谢和品质的影响 [D]. 武汉: 华中农业大学, 2019. JIANG Q H. Studies on the effects of bagging on carotenoid biogenesis and quality of pummelo fruits [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2019 (in Chinese with English abstract).
- [22] 范素杰. 汁用甜橙品种品质的综合分析 [D]. 武汉: 华中农业大学, 2010. FAN S J. Comprehensive analysis of quality of orange juice processing cultivars [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2010 (in Chinese with English abstract).
- [23] 张伟清, 林媚, 徐程楠, 等. 柑橘可溶性固形物和总酸含量测定方法比较 [J]. 浙江农业科学, 2019, 60(11): 2094-2095, 2099. ZHANG W Q, LIN Mei, XU C N, et al. Determination methods comparison of soluble solids content and total acid content in Citrus [J]. Journal of Zhejiang agricultural sciences, 2019, 60(11): 2094-2095, 2099 (in Chinese).
- [24] 许让伟, 程运江. 柑橘果实糖酸含量测定 [J/OL]. Bio-Protocol 101, 2018: 1010211 [2021-12-22]. <https://bio-protocol.org/bio101/e1010211>. DOI: 10.21769/BioProtoc.1010211. XU R W, CHEN Y J. Determination of sugar and organic acid contents in citrus fruits [J/OL]. Bio-Protocol 101, 2018: 1010211 [2021-12-22]. <https://bio-protocol.org/bio101/e1010211>. DOI: 10.21769/BioProtoc.1010211.
- [25] ZHEN Y Q, LI Z Z, HUANG H W, et al. Molecular characterization of kiwifruit (*Actinidia*) cultivars and selections using SSR markers [J]. Journal of the American society for horticultural science, 2004, 129(3): 374-382.
- [26] TANAKA T. Botanical-geographic orientation of citrus fruits with reference to their historical background [J]. Engei gakkai zasshi, 1959, 28(4): 291-296.
- [27] 何天富. 中国柚类栽培 [M]. 北京: 中国农业出版社, 1999. HE T F. Chinese pomelo cultivation [M]. Beijing: Chinese Agriculture Press, 1999 (in Chinese).
- [28] 孔维政, 章翼, 易自力, 等. 基于花粉形态与叶片形态的金柑属种质资源亲缘关系分析 [J]. 分子植物育种, 2020, 18(12): 4083-4096. KONG W Z, ZHANG Y, YI Z L, et al. Genetic relationship analysis of *Fortunella germplasm* resources based on pollen and leaf morphology [J]. Molecular plant breeding, 2020, 18(12): 4083-4096 (in Chinese with English abstract).
- [29] 王晨宇. 基于形态、孢粉学和 SSR 标记的玉兰亚属分类研究 [D]. 北京: 北京林业大学, 2018. WANG C Y. The studies on taxonomy of subgenus Yulania based on morphology, palynology and SSR markers [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2018 (in Chinese with English abstract).
- [30] WU G A, TEROL J, IBANEZ V, et al. Genomics of the origin and evolution of Citrus [J]. Nature. 2018, 554: 311-316.
- [31] 冉辛拓, 贺丽敏, 田少强, 等. 蜜梨与授粉品种亲缘关系及其花粉直感的通径分析 [J]. 河北农业科学, 2006, 10(2): 7-10. RAN X T, HE L M, TIAN S Q, et al. Path analysis on genetic relationship and metaxenia effects in pears [J]. Journal of Hebei agricultural sciences, 2006, 10(2): 7-10 (in Chinese with English abstract).
- [32] 洪俊彦, 黄仁, 黄春颖, 等. 植物花粉直感的研究进展及展望 [J]. 植物生理学报, 2020, 56(2): 151-162. HONG J Y, HUANG R, HUANG C Y, et al. Research progress and prospects of xenia [J]. Plant physiology journal, 2020, 56(2): 151-162 (in Chinese with

- English abstract).
- [33] 刘冬峰,林绍生,陈巍,等.异花授粉对柚果实代谢产物的影响及其与内裂的关系[J].核农学报,2021,35(2):271-279.LIU D F,LIN S S,CHEN W, et al.Effect of cross-pollination on metabolites and its relationship with fruit inner-cracking in pomelo[J].Journal of nuclear agricultural sciences, 2021, 35(2): 271-279(in Chinese with English abstract).
- [34] 郑元勋,彭良志,胡强安,等.授粉对脆香甜柚裂果及果实品质的影响[J].中国南方果树,2014,43(2):46-48.ZHENG Y X, PENG L Z,HU Q A, et al.Effects of pollination on fruit cracking and fruit quality of fragile sweet pomelo [J].South China fruits, 2014,43(2):46-48(in Chinese).
- [35] 张涓涓.马家柚及其变异品系果实生长发育特性差异研究[D].南昌:江西农业大学,2016.ZHANG J J.Differences in fruit biological characteristics of Majia pomelo and two variant strains [D].Nanchang: Jiangxi Agricultural University, 2016(in Chinese with English abstract).
- [36] 张俊杰,李宗平,徐世平,等.不同辅助授粉方式对烟草种籽产量和质量的影响[J].湖北农业科学,2020,59(3):95-96,101.ZHANG J J, LI Z P, XU S P, et al.Effects of different supplementary pollination methods on seed yield quality of tobacco[J].Hubei agricultural sciences, 2020, 59(3): 95-96, 101(in Chinese with English abstract).

Identification of Majia pomelo germplasm and screening of varieties with suitable pollination

XU Chenyu, CAO Lixin, TANG Qizheng, WU Juxun, YI Hualin

Key Laboratory of Horticultural Plant Biology, Ministry of Education/

College of Horticultural and Forestry Sciences, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China

Abstract A total of 46 pomelo resources in Guangfeng County and its surrounding areas of Jiangxi Province were identified by SSR molecular marker technique to explore the genetic relationship and origin of Majia pomelo and its main pomelo lines around its origin, and to screen varieties with suitable pollination. The fruit quality-related indexes of Majia pomelo with different cross-pollination combinations were analyzed for two consecutive years. The results showed that Majia pomelo had obvious variation during the long-term seed reproduction and artificial selection. It is most likely derived from the local pomelo in Guangfeng and its surrounding areas through long-term natural and artificial selection. Among the different cross-pollination combinations, native pomelo No. 4 has the best effect on improving the fruit quality of Majia pomelo, which is the most suitable male parent for pollination at present.

Keywords Majia pomelo; genetic identification; SSR molecular markers; cross pollination; fruit quality

(责任编辑:张志钰)