

我国佛手瓜的基础和应用研究进展

范爱丽^{1,2}, 黄若琪³, 黄凤婵¹

(1. 广西壮族自治区农业科学院蔬菜研究所 南宁 530007; 2. 广西果蔬产业技术创新中心 南宁 530007; 3. 广西壮族自治区农业科学院 南宁 530007)

摘要: 佛手瓜富含多种营养成分和生理活性物质, 已成为助力乡村振兴的致富瓜, 但是我国佛手瓜引进和研究起步较晚, 有的研究领域目前几乎处于空白, 严重影响了佛手瓜产业可持续发展。笔者对佛手瓜起源、种质资源分类、品种选育、生理生化和分子生物学等基础研究及贮藏、保鲜和加工等应用研究进行全面归纳总结。针对当前佛手瓜育种、基础和应用研究的重点突出问题, 提出了离体诱变育种、分子生物技术与传统育种相结合选育新品种, 果实形态建成、种子胎萌及活性物质代谢机制调控等基础研究, 功能性食品开发和精深加工技术将是佛手瓜未来研究的主要方向。本文旨在为佛手瓜基础研究和应用研究提供参考, 以促进佛手瓜产业健康可持续发展。

关键词: 佛手瓜; 基础研究; 应用研究

中图分类号: S642.9

文献标志码: A

文章编号: 1673-2871(2025)09-001-08

Research progress of basic and applied of *Sechium edule* in China

FAN Aili^{1,2}, HUANG Ruoqi³, HUANG Fengchan¹

(1. Vegetable Research Institute, Guangxi Academy of Agricultural Sciences, Nanning 530007, Guangxi, China; 2. Guangxi Fruit and Vegetable Industry Technology Innovation Center, Nanning 530007, Guangxi, China; 3. Guangxi Academy of Agricultural Sciences, Nanning 530007, Guangxi, China)

Abstract: Chayote (*Sechium edule*) has become a rich cucurbits to help rural revitalization now, However, the introduction and research of chayote started late in China, and some research fields are almost blank at present, which seriously affects the sustainable development of chayote. Therefore, the origin, germplasm resources and variety breeding of chayote; basic research on growth and development, physiological active substances, *in vitro* reproduction and genes; the application research of storage, preservation and processing and so on were summarized. In view of the key problems in the current basic and applied research of chayote, the authors proposed the main direction of future research, which is the combination of *in vitro* mutagenesis breeding, molecular biotechnology and traditional breeding will product breed new varieties, basic research on fruit morphogenesis, seed vivipary and active substances metabolism mechanism, applied research on the development of functional food and deep processing. It is expected to lay the foundation for further research on the new variety breeding, physiological and molecular basic research, functional health product development and deep processing application of chayote, and finally promote the healthy and sustainable development of chayote.

Key words: *Sechium edule*; Basic research; Applied research

佛手瓜 (*Sechium edule*) 属葫芦科佛手瓜属, 为多年生宿根蔓性藤本植物。因瓜形似“佛手”而得名(图 1-A^[1]), 又名合掌瓜、拳头瓜、福寿瓜、万年瓜、瓦瓜等。佛手瓜的嫩梢(又称龙须菜, 图 1-B)、果实及根富含多种生理活性物质且均可食用, 尤其叶和果既可菜用, 又可观赏。佛手瓜已在我国南北方多个省份广泛种植, 如山东^[2]、河南^[3]、福建^[4], 尤其在广西^[5]、云南^[6]和贵州^[7]等地高山种植生长良好, 果实和龙须菜品质优且产量高, 一般 667 m² 产量 5000~

6000 kg, 年均收入超过万元, 目前已成为带动各地经济发展和农民致富的重要产业。

笔者在生产中发现, 佛手瓜和龙须菜最大优点是整个生育期少有病虫害, 几乎不喷农药, 且种植成本低, 营养丰富, 商品价值高, 深受市场欢迎。然而, 佛手瓜新品种选育和加工应用等远远不能满足多样化的市场需求, 严重影响了产业发展。由于我国引进和研究佛手瓜起步较晚, 尤其在基础研究等方面十分薄弱, 有的研究领域几乎处于空白。因

收稿日期: 2024-12-12; 修回日期: 2025-03-12

基金项目: 广西重点研发计划项目(桂科 AB16380039); 广西农业科学院科技发展基金项目(桂农科 2024YP137)

通信作者: 范爱丽, 女, 副研究员, 主要从事瓜类蔬菜育种与生物技术研究。E-mail: fanaili@gxaas.net



图1 佛手瓜果实(A)和龙须菜(B)

Fig. 1 Chayote fruits (A) and chayote vines (B)

此,笔者对佛手瓜起源、分类、育种、生理生化、分子生物学基础及贮藏保鲜和加工应用等研究进行全面归纳总结,并对未来主要研究方向进行展望,以期对佛手瓜育种、基础研究和加工应用等奠定基础,以促进佛手瓜产业健康可持续发展。

1 起源、种质资源分类及育种

追溯佛手瓜起源并收集种质资源进行分类是新品种选育的基础。1986年文献报道,佛手瓜原产墨西哥、中美洲和西印度群岛,在南美洲、非洲北部及北美洲的美国亚热带地区均有分布^[8]。时隔23年,研究者从历史标本数据中系统分析佛手瓜的起源和传播路径得出,1816年佛手瓜标本最先出现在南美洲的巴西,19世纪50年代出现在欧洲,19世纪末传入亚洲,20世纪初期传入非洲,20世纪30年代初开始传入中国(从云南、辽宁向广西、湖北等地扩散),20世纪80年代传入大洋洲,呈现从南美洲起源并向东传播的路径^[9],该推论与我国最早报道的起源基本一致。

叶淑静等^[10]早在1995年就对我国11个省份的佛手瓜资源进行了调查,依据果皮颜色和果面有无刚刺将佛手瓜分为4大类,包括绿皮无刺、绿皮有刺、白皮无刺和白皮有刺,其中生产中常用的类型是绿皮无刺。

吴光明等^[11]通过系选法选出YX-1、YX-2、YX-3和YX-4等4个株系,经2a(年)三重复品比试验,2008年选育出福佑佛手瓜新品种,2012年通过福建省农作物品种审定委员会认定(编号:闽认菜2012011),这是当前报道中唯一的佛手瓜新品种。此外,首次报道 *Stagonosporopsis caricae* 病原菌在我国贵州引起佛手瓜焰苞叶斑病,为佛手瓜抗病育种奠定了基础^[12]。

从以上仅有的文献可以看出,佛手瓜种质资源相对匮乏且应用不足,育种相比黄瓜等瓜类蔬菜极其落后。因此,借助现代生物技术工具,如辐射诱变、分子育种和基因编辑,且与传统育种相结合选育多样的佛手瓜新品种是当前的迫切需求。

2 基础研究

2.1 生理生化相关研究

研究佛手瓜的生理生化特性可以揭示物质代谢、能量转换和光合作用等生命本质,为佛手瓜绿色生产奠定理论依据,也可为开发保健食品奠定营养基础。

2.1.1 器官生长发育 佛手瓜的嫩叶、嫩茎、果实及块根均可食用,前人已经开展了叶、果实和块根等的生理生化方面的研究。SPAD值代替叶绿素含量已成为植物光合作用的重要考量,佛手瓜叶片光谱反射率呈现典型绿色植物的光谱特征。利用绿峰位置和红边位置为自变量,SPAD值为因变量构建的回归模型比单一红边位置构建的预测模型精度要高,决定系数 r^2 达到0.825,以该模型预测的SPAD值与实测值决定系数 r^2 也达到0.885,该方法对预测绿皮佛手瓜叶片SPAD值也行之有效,为佛手瓜叶片叶绿素含量的准确估算及实现高光谱技术监测绿色植被叶绿素含量变化提供了理论参考^[13]。

研究发现,川南地区绿皮无刺佛手瓜果实生长呈单S型曲线。呼吸强度随果实发育呈下降趋势,至成熟期时出现呼吸高峰;维生素C、叶绿素与氨基酸含量在果实发育早期较高,随果实发育下降至较低水平,而纤维素含量和硬度的变化趋势则相反。综合评价果实充分生长状况、氨基酸含量、果实呼吸代谢水平、果实品质和耐贮性,得出花后10d为

佛手瓜果最佳采收期,研究结果为果实采收提供了依据^[14]。

佛手瓜 Tuershao 块根播种后 0~30 d 为膨大前期,30~90 d 为快速膨大期,90~120 d 为成熟期,淀粉含量随着块根的发育逐渐升高;主成分分析表明,淀粉含量、蔗糖合成酶(SUS)活性、转化酶(VIN)活性以及 Ca、Fe 和 Se 含量是影响块根发育的主要因素;其中 SUS 和 VIN 是影响块根膨大的关键酶,在块根快速膨大期这两个酶活性达到最高且变化趋势一致,揭示了佛手瓜丰富淀粉的积累是由于块根次生韧皮部和次生木质部形成的特殊花瓣状膨大薄壁细胞结构造成的,研究结果为块根发育研究奠定了理论基础^[15]。

2.1.2 果实成分分析 佛手瓜果营养丰富,前人开展了有关果实成分定量定性分析方面的工作。嫩瓜作为蔬菜清爽可口,其中水分含量直接影响果实脆度和食用口感,果肉中水分含量(w,后同)可达 92.3%^[16],与菜瓜、苦瓜等同科瓜果类果肉中的水分含量相近^[17]。钙含量是黄瓜、冬瓜、西葫芦的 2 倍以上^[18]。锌含量可达 25%,是黄瓜的 10 倍^[19]。佛手瓜每 100 g 样品中硒含量在 30.58~53.01 μg ,这是多种蔬菜不能比拟的^[20]。另外,每 100 g 新鲜佛手瓜含葡萄糖 2.62 g、果糖 0.48 g、粗蛋白 0.87 g、粗脂肪 0.12 g、粗纤维 1.41 g 及多种维生素、氨基酸和矿物质;必需氨基酸含量占总氨基酸含量的 37.36%,且赖氨酸、组氨酸含量较高,矿物质中 K、Ca、Zn 和 Fe 等元素含量较高^[21]。值得注意的是,佛手瓜果肉中组氨酸含量可达 0.23 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$,远远高于一般果蔬中组氨酸含量^[17]。此外,佛手瓜具有“两低一高(热量低、钠低、钾高)”的特点,其中 100 g 佛手瓜才产生 113 J 的热能,K 含量为 76 $\text{mg}\cdot 100\text{g}^{-1}$;Na 含量仅为 10.0 $\text{mg}\cdot 100\text{g}^{-1}$,这种高钾低钠的特点有利于降血压,丰富的 Ca、Mg、Mn、Fe、Zn 等矿质元素对儿童智力开发、生长发育和防治贫血等具有积极作用^[22]。

由以上结果可知,佛手瓜营养全面丰富,食用价值高,尤其低钠、高钾、富硒更利于消费者的健康,是一种值得大力推广的绿色保健瓜类蔬菜。

2.1.3 生理活性成分检测 佛手瓜营养丰富,尤其富含黄酮类、多糖和酚类等生理活性物质。江屯青皮佛手瓜嫩梢中的脂质、黄酮类、生物碱及核苷酸类等物质含量高,特别是溶血磷脂酰乙醇胺、日当药黄素、腺嘌呤核苷三磷酸和阿魏酰亚精胺等含量更高^[23]。经测定,佛手瓜中含有 6 种齐墩果烷型皂

苷,其中小果和嫩果总含量分别为 5.175 $\text{mg}\cdot 100\text{g}^{-1}$ 和 4.811 $\text{mg}\cdot 100\text{g}^{-1}$ ^[24]。研究者从佛手瓜中提取了 2 种细胞壁多糖,其中 CP-1 为半乳聚糖,CP-2 为阴离子杂多糖,由半乳糖醛酸、半乳糖、阿拉伯糖、鼠李糖、葡萄糖、葡萄糖醛酸、甘露糖和木糖组成^[25],研究结果为佛手瓜细胞壁多糖作为新型材料奠定了基础。研究表明,佛手瓜 3 个不同贮藏期果实中含有 57 种黄酮类化合物^[26]。此外,研究者还对白皮佛手瓜、绿皮佛手瓜和龙须菜的活性成分进行了测定,其中总黄酮、总酚、多糖、原花青素、 β -胡萝卜素、叶绿素 a、叶绿素 b 含量顺序依次为龙须菜>绿皮佛手瓜>白皮佛手瓜;维生素 E 含量排序为龙须菜>白皮佛手瓜>绿皮佛手瓜;维生素 A 和维生素 C 含量为绿皮佛手瓜>白皮佛手瓜>龙须菜;综合评价营养价值得出,龙须菜>绿皮佛手瓜>白皮佛手瓜^[27]。由此可见,佛手瓜富含多种生理活性物质,且营养成分与食用部位和品种类型有一定相关性。研究结果将为佛手瓜功能物质开发和营养保健研究奠定基础。

2.2 分子生物学相关研究

随着现代生物技术的快速发展,近年来佛手瓜在组织培养和相关分子机制等方面的研究也取得一定进展,为揭示佛手瓜生长发育机制及分子育种奠定了基础。

2.2.1 离体再生 佛手瓜不同外植体、不同培养目的需要不同的培养基。以带 1~2 个腋芽的嫩梢长约 2.5 cm 的茎段为外植体,通过不同激素组合筛选获得再生植株^[28]。以离体带腋芽的单茎节为外植体,优选到快速繁殖培养基,再通过生根培养获得再生苗^[29]。而以茎段为外植体筛选到腋芽诱导培养基,进而获得再生植株^[30]。此外,以下胚轴为外植体通过激素组合得到愈伤组织培养基,生根移栽获得幼苗^[31]。由此可见,茎段是佛手瓜离体培养主要的外植体类型,真叶和子叶离体培养的成苗还未见报道。

在 MS 培养基上添加 6-BA、IAA、GA、IBA 和 LH(黄体生成素)等激素及其组合筛选到佛手瓜再生芽培养基为 $\text{MS}+0.1\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}\text{IAA}$,丛生芽培养基为 $1.5\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}\text{6-BA}+0.1\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}\text{IAA}+200\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}\text{LH}$,丛生芽成苗培养基为 $\text{MS}+1.0\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}\text{6-BA}+1.0\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}\text{IBA}$,生根培养基为 $1/2\text{MS}+0.1\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}\text{IAA}+$ 活性炭^[28]。单茎节在 $\text{MS}+0.5\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}\text{IAA}$ 继代增殖培养基中形成丛生芽,丛生芽在 $\text{MS}+1.0\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}\text{6-BA}+0.1\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}\text{IAA}+0.1\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}\text{GA}$ 快速繁殖,在

1/2MS+0.80~0.95 mg·L⁻¹IBA 上生根并获得再生苗^[29]。

另有报道,利用茎段培养建立了佛手瓜快速繁殖体系,筛选到腋芽诱导培养基为 MS+1.0 mg·L⁻¹6-BA+1.0 g·L⁻¹AC(促性腺激素)+0.1 mg·L⁻¹NAA 或 0.1 mg·L⁻¹IAA,增殖培养基为 MS+1.0 mg·L⁻¹6-BA+0.1 mg·L⁻¹NAA,生根培养基为 1/2 MS+0.2 mg·L⁻¹NAA^[30]。

研究者还筛选出佛手瓜下胚轴培养和植株再生体系,其愈伤组织诱导培养基为 MS+1.0 mg·L⁻¹BA+0.1 mg·L⁻¹IAA+200 mg·L⁻¹LH,不定芽分化培养基为 MS+0.5 mg·L⁻¹BA+0.5 mg·L⁻¹IAA,顶芽和带腋芽茎段的生根培养基分别为 MS+1.0 mg·L⁻¹IAA 和 1/2MS+0.3 mg·L⁻¹IAA;生根的再生植株移栽到灭菌培养土中,幼苗成活率达 75%^[31]。

盐分通过抑制植物细胞的有丝分裂影响佛手瓜的生长及腋芽的萌动,研究者在前组培的基础上筛选到佛手瓜组培苗,该组培苗在无菌环境和砂基质营养钵中生存的最高盐质量浓度临界点分别为 3.0 g·L⁻¹ 和 2.0 g·L⁻¹^[32]。进一步研究发现,佛手瓜对盐渍环境的适应能力是通过增加体内脯氨酸含量调节渗透势、减少水分损失及降低细胞质膜透性实现的^[33]。

由以上研究结果可看出,佛手瓜离体培养常用的生长调节剂主要有细胞分裂素 6-BA 和 BA,生长素 IAA、IBA 和 NAA,内分泌激素 LH 和 AC,通过这些激素的组合筛选到不同的佛手瓜诱芽和生根培养基,最终获得再生植株。研究结果为种质资源保存、突变体筛选和生物技术育种奠定了基础。

2.2.2 基因组 高质量参考基因组是精准鉴评种质资源、挖掘重要农艺性状相关基因及建立分子设计育种体系的重要前提。北京市农林科学院左进华研究员和英国诺丁汉大学 Donald Grierson 教授团队经三代测序技术结合 Illumina 测序和 Hi-C 技术,在国际上首次发布高质量的佛手瓜基因组,该基因组大小为 606.42 Mb。97.04%的测序序列被锚定在 14 对染色体上,其中包含 473 个 contigs 和 103 个 scaffolds 且 N50 长度分别为 8.40 Mb 和 46.56 Mb,重复序列为 65.94%,含有 28 237 个蛋白编码基因;通过与其他物种基因家族比较,发现佛手瓜与蛇瓜的进化关系最为密切,并可能于 2700 万~4500 万年前由共同祖先分化而来,同时研究发现,佛手瓜在(2500±400)万年间发生过一次全基因组复制事件,是葫芦科内的第三次全基

因组复制事件,为佛手瓜的基因进化研究提供了理论依据^[1]。

王维泽等^[34]报道了贵州惠水白皮和绿皮佛手瓜均为 2 倍体,包含 28 条染色体。白皮和绿皮核型类型分别为 1B 和 1C 型,公式均为 2n=2x=28。白皮和绿皮的不对称系数分别为 52.07%和 52.38%。白皮和绿皮基因组通过流式细胞术测定大小分别为(0.73±0.02)和(0.70±0.02)Gb,为佛手瓜的基因组研究奠定了基础。

由此可见,基因组测序提升了葫芦科作物的基因组学、系统进化和分子生物学研究水平,也将为葫芦科植物的遗传进化、果实生长发育调控机制及分子育种等研究奠定基础。基因组测序为佛手瓜遗传育种和基因发掘提供重要信息,但是目前佛手瓜基因组信息的应用极少。若充分利用佛手瓜基因组信息,在分子水平上对其改造设计,可从传统育种快速引入分子育种的新阶段,大幅度提高育种效率,短时间内可获得佛手瓜新品种。

2.2.3 基因挖掘 借助现代组学和分子生物学技术手段开展基因克隆并进行功能验证等,有助于快速揭示调控生命活动的分子机制。转录因子可通过激活或抑制目标基因的转录水平,影响植物生长发育的过程,是影响植物茎、叶、种子、果实等发育的重要调控因子之一。佛手瓜中转录因子基因 *SeTTG1* 调控植物表皮毛发育,研究表明,佛手瓜 *SeTTG1* 与葫芦科植物 *TTG1* 蛋白同源性较高,其中有刺和无刺的 *SeTTG1* 的 ORF 框长度均为 1026 bp,编码 341 个氨基酸;也均含 4 个 WD40 基序。无刺和有刺佛手瓜的 *SeTTG1* 核苷酸序列 5 个位点存在差异,氨基酸 3 个位点存在差异。有刺佛手瓜 *SeTTG1* 在茎和瓜中的表达量分别显著和极显著高于无刺瓜,而在根和叶中的表达量无显著差异^[35]。转录因子 bHLH 和 MYB 在植物生长发育过程中也有重要的调控作用。研究表明,转录因子 bHLH 和 MYB 在佛手瓜果实发育的 3 个阶段发生了显著变化^[1]。研究者也发现,R2R3-MYB 转录因子 FSG0057100 为类黄酮合成的关键调控基因;添加外源苯丙氨酸提高了果实中类黄酮总含量,促进了部分类黄酮合成相关基因的表达^[26]。MADS 转录因子能够调控植物的生长发育,抵御非生物胁迫且参与激素响应等,在佛手瓜中鉴定出 MADS 转录因子 70 个,其中 I 型 14 个,II 型 56 个,主要分布 11 号和 13 号染色体上。进一步分析表明,6 个基因 *SeMADS06*、*SeMADS13*、*SeMADS26*、*SeMADS28*、

SeMADS36 和 *SeMADS37* 可能与佛手瓜块根的发
育有关;12 个 *SeMADS* 基因可能在佛手瓜雄花中特
异性表达,其中 *SeMADS03* 和 *SeMADS52* 可能参与
雄花成熟的调控,*SeMADS21* 可能是佛手瓜雌花发
育的关键基因^[15]。

通过对佛手瓜果实 3 个不同生长发育期的转
录组和代谢组进行系统分析,在果实生长发育前期
鉴定出 385 个差异基因,在果实生长发育后期鉴定
出 1033 个差异基因;这些差异基因与果实生长发
育过程中的植物激素、质地、风味、类黄酮生物合
成有关^[1]。

佛手瓜皂苷、木脂素和黄酮等生理活性物质具
有保健药用价值,因此其相关基因的研究一直为大
家所关注。鲨烯合酶(squalene synthase, *SQS*)是三
萜类化合物合成的关键调控酶。前人克隆了佛手
瓜 *SQS* 基因并预测分析了该酶的分子结构,为研究
佛手瓜齐墩果酸型皂苷生物合成奠定了基础^[36]。进
一步研究发现,佛手瓜中有 6 种齐墩果酸型皂苷,
克隆了 β -香树素合成酶(β -AS)基因并对其进行了
表达分析^[24]。木脂素是植物中天然存在的保健药用
成分,研究发现,佛手瓜中含有 2 种木脂素成分,并
克隆了木脂素合成关键酶基因 *SePLR*,为佛手瓜营
养物质的开发利用和种质创新提供了参考^[37]。

研究表明,在佛手瓜绿皮(SG)和白皮(SW)中
共筛选鉴定出 277 个差异积累代谢物(DAMs)和
739 个差异表达基因(DEGs),其中苯丙氨酸解氨酶
(PAL)和查尔酮合成酶(CHS)基因在 SG 和 SW 品
种中的差异表达可能造成 SG 总黄酮含量较低,但
比 SW 有更高的黄酮亚类多样性^[38]。有研究证实,
添加外源苯丙氨酸提高了果实中类黄酮总含量,也
促进了部分类黄酮合成相关基因的表达^[26]。

3 贮藏保鲜及加工应用

3.1 贮藏保鲜

佛手瓜以鲜食为主,集中上市往往导致效益降
低,贮藏保鲜可有效延长佛手瓜的货架期,在淡季
销售可明显提高经济效益。

影响佛手瓜果实贮藏保鲜的外界因素主要有
温度、湿度和气体环境等。研究表明,2~5 °C为佛手
瓜贮藏最适温度,高于 10 °C易发芽或霉烂;低
于-2.5 °C会烂瓜并发生冻害^[39]。另有研究人员
认为,5 °C为佛手瓜最适贮藏温度,结合使用果蔬塑料
保鲜袋或 0.03 mm 的 PE 膜包装,效果会更好^[40]。
而朱瑛等^[41]研究认为,佛手瓜在-1~1 °C和 3~5 °C下

因低温对其细胞伤害造成呼吸强度骤然升高,组织
很快腐烂而失去食用价值;而 8~10 °C和常温(14~
18 °C)的佛手瓜呼吸强度变化相对稳定,由此推断,
8~10 °C或常温可能是佛手瓜贮藏的适宜温度。李
玉等^[42]在 9~10 °C、湿度 90%~95%的贮藏条件下,采
用 5% O₂+5% CO₂+90% N₂(体积分数)进行保鲜贮
藏,可延长佛手瓜保存期,在此期间果实硬度和维
生素 C 含量均保持稳定,而过氧化物酶(POD)活
性受到抑制,可保持采后品质。在进一步控制外
界环境的基础上,经水杨酸(SA)和 1-甲基环丙烯
(1-MCP)等保鲜剂处理显著降低佛手瓜呼吸速
率,延缓果实成熟衰老,有效延长保鲜期和贮藏
期,在 9~10 °C和 85%~95%湿度条件下预冷 24 h,
1 mol·L⁻¹ SA 可有效抑制失重和增加纤维素含
量;5 mmol·L⁻¹ SA 可有效保持果实氨基酸、维
生素 C 和叶绿素含量;10 mmol·L⁻¹ SA 可有效抑
制类黄酮和总酚等活性物质含量下降^[43]。

关于佛手瓜块根的贮藏研究结果表明,10 °C和
15 °C温度下能够较好地保持块根品质,减缓淀
粉-糖转化速率和抗氧化性变化,因此在生产中可
将该温度作为佛手瓜块根贮藏的参考温度^[44]。

3.2 加工

将佛手瓜制成营养丰富的加工品,不仅避免了
贮藏过程中发生的腐烂、胎萌、冷害等问题,也提
高了佛手瓜的经济效益。

饮料已成为中国食品行业中发展最快的商品
之一,尤其健康型饮料的占比不断攀升。佛手瓜可
以作为基本原料加工成各种饮料。以佛手瓜和大
豆为原料,先将大豆制成豆乳,再与佛手瓜汁混合,
采用添加量为 0.3%、复合比为 3:2 的稳定剂
CMC-Na-黄原胶,可得到具有浓厚豆香和清爽佛手
瓜风味的豆奶饮料^[45]。以佛手瓜汁和原料乳为主
要原料,6%白砂糖添加量,10%佛手瓜添加量,0.2%接
菌量,发酵 8 h,得到具有佛手瓜独特清香的酸甜适
中的酸奶^[46]。选八成熟以下佛手瓜为原材料,最佳
原料配方为添加 0.05%柠檬酸、0.2%食盐和 2%蔗
糖;最佳工艺是添加 0.05%葡萄糖酸锌、1.5%复合异
抗坏血酸并护色处理 20 min,再添加 0.05%果胶酶、
0.3%复合明胶进行澄清处理,最后添加 0.2%
CMC-Na 和 0.01%复合黄原胶进行稳定处理,该盐
味原汁饮料呈现淡绿色,口感细腻,具有佛手瓜特
有的清香味,也具有一定的保健功能^[47]。以佛手瓜
和红枣为材料,研究出佛手瓜汁与红枣汁配比 1:1,
添加蔗糖 6%、柠檬酸 0.14%及果胶 0.15%为该复合

饮料的最适配方,该复合饮料既有佛手瓜的清香,又有红枣的甜香,酸甜可口,是一款营养丰富的天然饮品^[48]。以佛手瓜和酒为原料,接种 0.1%酵母,先将菌种固定化,再用 2%硫酸铝溶液进行置换固定化,在 15 °C 下发酵,可得到纯度高、色泽风味均良好的佛手瓜酒^[49]。佛手瓜加工成豆奶、酸奶和酒不仅丰富了市场,也为消费者提供了健康营养。

佛手瓜也被加工制成各类果脯。以佛手瓜为主原料采用混合糖渍蜜化和串味引色新工艺,首次生产出具有天然水果色、香、味的佛手瓜果脯、果酱、果冻、果汁、果丹皮和水晶软糖等系列产品^[50]。采用真空渗糖生产工艺,在真空条件下,渗糖含量为 70%,温度为 90 °C,时间为 2.5 h,真空度为 0.07 MPa,可制得颜色透亮、甜度适中的佛手瓜果脯^[51]。

佛手瓜也被研制成一些发酵产品。选择产香能力较强的植物乳杆菌、短乳杆菌和副干酪乳杆菌作为佛手瓜发酵的核心乳酸菌菌株,在佛手瓜的植物乳杆菌发酵中检测到的挥发性化合物数量最多,其次是短乳杆菌和副干酪乳杆菌^[52]。不同的乳酸菌菌株产生了醛类、酯类和醇类独特的气味活性化合物及氨基酸和二肽味觉活性化合物。转录组分析表明,苯丙氨酸、氨基酸代谢分解和合成代谢途径及脂肪酸生物合成途径是参与乳酸菌发酵风味形成的主要生物合成途径,揭示了乳酸菌发酵泡菜中核心风味化合物的可能生物合成途径^[52]。以佛手瓜 300 g、食盐 30 g、酱油 30 g、砂糖 20 g、味精 1 g、大蒜粉 0.5 g、料酒 2 g 为原料,将 300 g 瓜块烫漂 3 min 后,用 30 g 食盐腌制 2~3 d,分别以 0.1% CaCl₂、0.2% Na₂SO₃ 对瓜块进行 8 h 硬化和硫处理,在 65~85 °C 烘至七八成干,添加酱油和适当辅料,酱制 18 h,可得到口感佳、酱香浓、营养丰富的佛手瓜酱菜^[53]。另有研究发现,佛手瓜在自然发酵 90 d 过程中,酸菜中酚类物质组成和抗氧化活性物质发生变化,其中酚类物质中,黄酮苷元(即木犀草素、芹菜素、香叶木素和异鼠李素)含量在发酵过程中显著提高;总酚含量、总黄酮含量和抗氧化活性在 56~90 d 发酵后期的腌制佛手瓜中检测到最高值;腌制佛手瓜还能通过减少活性氧的产生和促进先天抗氧化防御系统功能来保护 HepG-2 细胞免受 H₂O₂ 引起的氧化损伤。相关性分析表明,8 种酚类化合物与胞外和胞内抗氧化活性的增强高度相关^[54]。由此可见,发酵是提高腌制佛手瓜抗氧化能力,进而提高其功能营养价值的有效途径。

对佛手瓜在其他加工方面的应用也开展了研

究,在比较佛手瓜块根生全粉和小麦粉基本组成成分差异的基础上,分析佛手瓜块根生全粉对小麦粉的基本理化性质、糊化特性和流变学特性的影响后得出,佛手瓜块根生全粉显著改变了小麦粉的加工特性^[55]。研究表明,添加佛手瓜块茎淀粉可提高薄膜的耐水性,降低水蒸气透过率,通过细胞毒性试验证明该复合膜安全无毒,且具有最低的挥发性盐基氮和最佳的感官特性,可显著延长牛肉的货架期^[56]。佛手瓜果胶(CP)和酪蛋白酸钠(CAS)在水溶液中的复凝聚行为表明,pH 和 CAS-CP 混合比例对相行为的影响与苹果果胶相当^[57]。

4 展望

4.1 育种研究

现代分子育种技术明显加快育种进程并提高育种效率。佛手瓜因资源缺乏、自然变异低和传统育种年限长而导致遗传育种效率低,当前仅有一个新品种福佑的文献报道^[11],专门食用嫩梢的龙须菜新品种尚未见报道。由于佛手瓜仅仅有 1 粒种子且极易发生胎萌^[58],极大地限制了育种和种子繁育。然而单纯依靠自然突变筛选佛手瓜优良种质和提高育种效率相当困难。在佛手瓜研究中应借助诱变育种技术大幅度扩大变异谱库,提高变异频率和育种效率。如离体培养高钾、低钠、多糖、高黄酮和酚类等突变体;再结合 EMS 诱变、⁶⁰Co- γ 射线辐照、太空育种等创造抗病和抗逆性强的突变体。此外,采用高效的单倍体和双单倍体育种技术,借助转基因和 CRISPR/Cas9 基因编辑技术^[59],对佛手瓜材料进行改良创新,以得到更多的新种质突变体和新品种。进一步利用突变体构建高密度分子连锁图谱,开展分子标记聚合育种和分子设计育种,以提高育种效率,选育出优质、高抗、广适的佛手瓜新品种。

4.2 基础研究

生理和分子基础研究是解决应用层面关键核心问题的前提。佛手瓜虽然完成了基因组测序^[11],但是基因组深入分析与广泛利用严重不足。该瓜特有的佛手瓜形、果皮颜色、刺瘤、单果大小、果肉厚度及颜色、种子胎萌等重要农艺性状及其调控机制,生理活性物质合成代谢及调控网络等基础研究几乎处于空白。借助生理生化、分子标记、泛基因组、转录组、代谢组、蛋白组及表观遗传等现代分子生物技术手段对果实性状、活性物质、种子胎萌、抗性等进行分子标记开发、遗传定位、基因挖掘、调控

网络解析等研究,尤其要加大具有重要育种价值的相关基因挖掘和调控网络解析,为深入开展佛手瓜生产应用奠定理论基础。

4.3 加工应用研究

佛手瓜富含粗纤维、氨基酸、矿物质、多糖、黄酮类及酚类等营养物质,但是市场上销售的佛手瓜产品大多是饮品类、果脯和腌制品等初级农产品,这些简单加工的产品尚未充分开发利用佛手瓜多糖、酚类、黄酮类等功能性活性物质。因此,从原料出发提高佛手瓜加工品的质量,增加佛手瓜保健食品种类,如发酵面包和低温烘焙膳食饼干等以适应市场需求。同时引进创新先进加工技术,优化精深加工工艺,全面提升加工品的品位和竞争力,延伸产业链条,增加产品附加值,开发更多功能性产品,将可能成为未来保健品加工的方向。

佛手瓜在乡村振兴和农民增收等方面具有重要地位。尽管佛手瓜研究取得了一点成绩,但是仍需加大育种、基础研究和应用研究方面的力度。此外,呼吁政府和研究者投入更多的物力和财力,选育出丰产优质的佛手瓜新品种,以满足市场的多样化需求。

参考文献

- [1] FU A Z, WANG Q, MU J L, MA L L, et al. Combined genomic, transcriptomic, and metabolomic analyses provide insights into chayote (*Sechium edule*) evolution and fruit development[J]. Horticulture Research, 2021, 8(1): 35.
- [2] 高芹. 山东临朐佛手瓜露地套袋高产栽培技术[J]. 中国蔬菜, 2024(1), 136-138.
- [3] 吴西利, 张淑莉, 徐涛. 豫北地区龙须菜塑料大棚高效栽培技术[J]. 河南农业, 2023(28): 17-18.
- [4] 江晓佟. 福建省佛手瓜栽培技术要点[J]. 漳州职业技术学院学报, 2022, 24(1): 94-98.
- [5] 齐秀玲, 刘文君, 李刚, 等. 不同育苗处理对佛手瓜发芽及幼苗生长的影响[J]. 中国果菜, 2022, 42(7): 70-74.
- [6] 刘申喜, 舒兴香. 昆明市东川区龙须菜产业发展的思考[J]. 上海农业科技, 2022(1): 10-11.
- [7] 李裕荣, 文林宏, 陈之林, 等. 贵州佛手瓜无公害栽培技术[J]. 农技服务, 2020, 37(2): 30-33.
- [8] 佚名. 佛手瓜[J]. 沈勤, 译. 蔬菜, 1986(5): 3-6.
- [9] 黄蓉, 王亚楠, 庄会富. 基于历史标本数据和文献计量分析佛手瓜的起源传播及其国内研究现状[J]. 西部林业科学, 2023, 52(2): 33-39.
- [10] 叶淑静, 杨寅桂, 罗来水, 等. 中国佛手瓜资源调查初报[J]. 江西农业大学学报, 1995, 17(4): 471-476.
- [11] 吴光明, 谢特立, 詹昌埜. 佛手瓜新品种福佑的选育[J]. 亚热带农业研究, 2014, 10(1): 12-15.
- [12] ZHANG J, YANG R, JIANG S L, et al. First report of *Stagonospora caricae* causing chayote leaf spot in Guizhou province, China[J]. Plant Disease, 2022, 107(7): 2228.
- [13] 舒田, 黎瑞君, 陈智虎, 等. 佛手瓜叶片光谱特征与 SPAD 值估算模型研究[J]. 江苏农业科学, 2023, 51(9): 222-227.
- [14] 李玉, 秦文, 杜小琴, 等. 佛手瓜果实发育过程中的品质变化[J]. 食品与机械, 2015, 31(5): 181-185.
- [15] CHENG S B, LIU Y H, SU L H, et al. Physiological, anatomical and quality indexes of root tuber formation and development in chayote (*Sechium edule*) [J]. BMC Plant Biology, 2023, 23(1): 413.
- [16] 李玉. 基于多变量分析的不同保鲜方法对采后佛手瓜品质变化的影响[D]. 四川雅安: 四川农业大学, 2016.
- [17] 杜先锋. 佛手瓜营养成分的分析研究[J]. 食品科技, 2002(2): 72-73.
- [18] 莫凤珊, 陈杰, 李尚德. 佛手瓜微量元素含量的测定[J]. 广东微量元素科学, 2005, 12(9): 67-68.
- [19] 王有信, 裴玉卓. 佛手瓜在北方的发展前景与效益[J]. 北方园艺, 1995(1): 21.
- [20] 张春晓. 佛手瓜的营养价值及高产栽培技术[J]. 中国果菜, 2010(2): 40-41.
- [21] 张奇志, 邓欢英, 林丹琼, 等. 佛手瓜果实的营养保健成分研究[J]. 中国食物与营养, 2007(7): 45-47.
- [22] 丁利君, 任乃林, 童一平, 等. 潮州佛手瓜营养成分的分析及其加工研究[J]. 食品工业科技, 2006(1): 140-141.
- [23] 史绍琪, 陈金甜, 林毓娥, 等. 白皮和江屯青皮佛手瓜嫩梢的代谢组比较分析[J]. 广东农业科学, 2023, 50(2): 42-48.
- [24] 谭国飞, 罗庆, 李裕荣, 等. 佛手瓜 β -香树素合成酶基因表达及齐墩果烷型皂苷的分析[J]. 植物生理学报, 2021, 57(6): 1363-1370.
- [25] KE J X, ZHANG Y H, WANG X, et al. Structural characterization of cell-wall polysaccharides purified from chayote (*Sechium edule*) fruit[J]. Food Chemistry-X, 2023, 19: 100797.
- [26] PU Y T, WANG C, JIANG Y W, et al. Metabolic profiling and transcriptome analysis provide insights into the accumulation of flavonoids in chayote fruit during storage[J]. Frontiers in Nutrition, 2023, 10: 1029745.
- [27] 练冬梅, 姚运法, 赖正锋, 等. 佛手瓜和龙须菜主要功能成分及抗氧化活性分析[J]. 农产品加工, 2021(15): 53-55.
- [28] 毕可华, 赵建萍. 佛手瓜的组织培养和植株再生[J]. 植物生理学通讯, 1990(4): 53.
- [29] 林纬, 黎起秦, 卢继英, 等. 佛手瓜离体繁殖的研究[J]. 广西农业科学, 2002(6): 301-302.
- [30] 王兰兰, 李裕荣, 陈之林, 等. 佛手瓜茎段组培快繁技术研究[J]. 中国瓜菜, 2023, 36(9): 30-35.
- [31] 王小素, 李步勋, 王广东. 佛手瓜下胚轴离体培养及再生植株[J]. 西北农业大学学报, 1997, 25(1): 90-94.
- [32] 赵建萍, 谢虎. 佛手瓜耐盐性的研究[J]. 中国蔬菜, 1995(2): 19-21.
- [33] 柏新付, 赵建萍, 宋永军. 佛手瓜幼苗对盐渍环境的反应[J]. 烟台师范学院学报(自然科学版), 1995, 11(1): 57-60.
- [34] 王维泽, 刘炼, 赵宁, 等. 2 个佛手瓜品种核型分析及基因组大小测定[J]. 种子, 2024, 43(3): 123-128.

- [35] 谭国飞,吴小玉,罗庆,等.瓜表皮有刺毛和无刺毛佛手瓜转录因子 *SeTTG1* 的分离及表达分析[J].上海农业学报,2022,38(2):10-16.
- [36] 苏何玲,肖雅伦,谭燕莲,等.佛手瓜鲨烯合酶基因克隆及酶分子结构分析[J].安徽农业科学,2016,44(32):142-146.
- [37] 赵倩,谭国飞,钟秀来,等.佛手瓜 *SePLR* 基因克隆和生物学分析[J].贵州农业科学,2022,50(8):78-86.
- [38] DU Z H, QU F, ZHANG C J, et al. Multi-omics analyses unravel metabolic and transcriptional differences in tender shoots from two *Sechium edule* varieties[J]. Current Issues in Molecular Biology, 2023, 45(11), 9060-9075.
- [39] 王言和.佛手瓜贮藏保鲜方法[J].上海蔬菜,2011(4):73.
- [40] 闽嗣潘,李德荣,杨寅桂,等.佛手瓜果耐贮性初步研究[J].江西农业大学学报,1997,19(3):129-131.
- [41] 朱瑛,刘兴华,袁德保,等.温度对佛手瓜贮藏中呼吸强度及保护酶的影响[J].西北农业学报,2007,16(2):183-186.
- [42] 李玉,张铭容,董红敏,等.1-MCP对佛手瓜低温贮藏品质影响的主成分分析和综合评价[J].食品与发酵工业,2015,41(11):204-209.
- [43] 李玉,郭元照,杜小琴,等.水杨酸对佛手瓜果实低温贮藏期间品质影响的多变量分析[J].食品与发酵工业,2016,42(2):213-218.
- [44] 邵大龙,郭鑫,秦艳梅,等.不同贮藏温度对根用佛手瓜块根淀粉糖转化与抗氧化性的影响[J].应用与环境生物学报,2024,30(6):1027-1213.
- [45] 张国治,刘艳,宋玲.佛手瓜豆奶饮料生产技术[J].郑州轻工业学院学报,1998,13(2):65-67.
- [46] 石彬,李咏富,何扬波,等.佛手瓜凝固型酸奶制作工艺优化[J].食品安全质量检测学报,2019,10(2):344-350.
- [47] 黄丽,刘旭光,林丹琼.佛手瓜盐味功能性饮料制作工艺及澄清稳定性研究[J].农产品加工,2023(4):32-36.
- [48] 陈江萍.佛手瓜红枣复合饮料的研制[J].特种经济动植物,2023,26(1):28-32.
- [49] 许晓春,林朝朋,朱建华.固定化细胞发酵佛手瓜干型酒的研究[J].酿酒科技,2007(11):81-83.
- [50] 董学畅,戴云.佛手瓜及其果脯系列食品的开发研究[J].云南民族学院学报(自然科学版),1994,3(1):42-45.
- [51] 徐莉珍,吴婷婷,扬启财,等.佛手瓜果脯真空渗糖加工工艺研究[J].农产品加工(学刊),2009(3):138-141.
- [52] ZHANG S Y, SHANG Z X, LIU Z J, et al. Flavor production in fermented chayote inoculated with lactic acid bacteria strains: Genomics and metabolomics based analysis[J]. Food Research International, 2023, 163: 112224.
- [53] 黄丽,杨君,林丹琼,等.酱制佛手瓜加工技术研究[J].中国调味品,2011,36(7):69-73.
- [54] SHANG Z X, LI M Q, ZHANG W W, et al. Analysis of phenolic compounds in pickled chayote and their effects on antioxidant activities and cell protection[J]. Food Research International, 2022, 157: 111325.
- [55] 胡婷婷,吴运锋,王宇轩,等.佛手瓜块根生全粉添加量对小麦粉加工特性的影响[J].食品科学技术学报,2023,41(4):168-178.
- [56] WU H J, WANG J, LI T, et al. Effects of cinnamon essential oil-loaded Pickering emulsion on the structure, properties and application of chayote tuber starch-based composite films[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 240: 124444.
- [57] KE J X, CHANG Y, NIE C Y, et al. Formation mechanism of complex coacervation of chayote (*Sechium edule*) pectin-sodium caseinate in aqueous solution[J]. Food Hydrocolloids, 2023, 143: 108902.
- [58] 朱瑛.佛手瓜采后生理及种子休眠特性研究[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2007.
- [59] 江睿,周胜军,朱育强,等.瓜类作物 CRISPR/Cas9 基因编辑技术应用研究进展.园艺学报,2024,51(7),1683-1694.