

唐美琼,李 刚,胡 营,等. 罗汉果分子生物学研究进展[J]. 江苏农业科学,2020,48(8):13-18.

doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2020.08.003

# 罗汉果分子生物学研究进展

唐美琼<sup>1</sup>, 李 刚<sup>1</sup>, 胡 营<sup>1</sup>, 覃 芳<sup>1</sup>, 闫志刚<sup>1</sup>, 韦荣昌<sup>1,2</sup>

(1. 广西药用植物园/广西药用资源保护与遗传改良重点实验室,广西南宁 530023; 2. 广西农业科学院经济作物研究所,广西南宁 530007)

**摘要:**罗汉果是广西著名的道地药材,也是我国特有的药食两用植物,具有重要的药用价值和开发前景。近年来,罗汉果分子生物学的研究涉及罗汉果种质资源鉴定、功能基因克隆、抗病性育种等方面,这些技术研究内容主要包括罗汉果性别鉴定、遗传多样性、转录组特征及功能基因克隆等。应用现代分子生物学技术已实现了罗汉果幼苗性别鉴定,全面揭示了其遗传多样性及品种间的亲缘关系;通过构建罗汉果转录组数据库,促进了对该植物的果实生长发育和代谢调控相关功能基因的研究;利用 RNAi 技术有望获得抗病毒的罗汉果转基因植株。今后可利用罗汉果基因组数据,深入挖掘基因资源,研究候选基因的功能,明确罗汉果果实生长发育过程中的基因调控网络,利用基因工程手段促进罗汉果种质资源开发及分子遗传育种发展。

**关键词:**罗汉果;分子标记;遗传差异;基因克隆;转基因

**中图分类号:**S567.901 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2020)08-0013-05

罗汉果(*Siraitia grosvenorii*)为葫芦科罗汉果属多年生藤本植物,是我国特有的药食两用植物,主要产于广西桂北地区<sup>[1]</sup>。罗汉果以果实入药,味甘,性凉,具有清热润肺、利咽开音、滑肠通便<sup>[2]</sup>和抗癌<sup>[3]</sup>等功效。罗汉果应用广泛,除用作饮片外,仅以罗汉果冠名的中成药就有几十种。近年来,随着罗汉果提取物市场需求的急剧增加,罗汉果成为产量增长最快的中药品种之一。

长期以来,人们对罗汉果的研究主要集中在地理分布<sup>[4]</sup>、主栽品种<sup>[5]</sup>、繁殖技术<sup>[6]</sup>、化学成分<sup>[7]</sup>、药理作用<sup>[8]</sup>和开发利用<sup>[9]</sup>等方面。近年来,国内外学者将分子生物学技术应用到罗汉果性别鉴定、遗传差异分析、功能基因克隆及抗病毒等研究中,取得了一些重要进展。本文就罗汉果分子生物学方面的最新研究进展进行综述,为开展罗汉果的分子育种提供参考。

## 1 罗汉果性别性状的遗传标记

罗汉果雌雄异株,须进行人工授粉才能结实,生产中需要大量的雌株,在未开花之前难以通过形态特征进行鉴别。DNA 分子标记技术以其快速、准确和可信度高等优点,广泛应用于雌雄异株植物早期性别分子鉴定研究。目前,用于罗汉果幼苗雌雄鉴别研究的 DNA 分子标记有 AFLP 和 RAPD 2 种。

陶莉等建立的 AFLP 标记技术,结合数量性状分析,可以快速经济地鉴别罗汉果幼苗雌雄株<sup>[10]</sup>。对 RAPD 标记的研究方面,韦弟等发现 S143 是 1 条与雄性连锁的分子标记<sup>[11]</sup>。黄夕洋获得 4 条可用于罗汉果栽培品种性别鉴定的引物(S60、S90、S100、S343、S357)<sup>[12]</sup>。黄姿梅通过对栽培品种青皮果的雌雄株进行 RAPD 标记,发现引物 S47 和 S103 能在雄集群 DNA 池和单株中扩增出雄特异性条带,引物 S43 则在栽培品种青皮、长滩、冬瓜和红毛的雌集群 DNA 池扩增出雌性特异性条带<sup>[13]</sup>。这些研究结果表明,分子标记技术可以对罗汉果幼苗进行雌雄鉴别。

## 2 罗汉果种质资源的遗传差异分析

DNA 分子标记技术不仅在罗汉果雌雄性别鉴定中发挥重要作用,而且在罗汉果种质资源遗传多样性、亲缘关系以及育种材料的遗传背景分析等研究方面也展示出广阔的应用前景。

收稿日期:2019-03-07

基金项目:国家自然科学基金(编号:81860678);广西自然科学基金(编号:2017GXNSFAA198232、2015GXNSFBA139149、2017GXNSFAA198280、2016GXNSFAA380174、2015GXNSFBA139134)。

作者简介:唐美琼(1984—),女,广西全州人,硕士,助理研究员,主要从事药用植物遗传育种研究。E-mail: tangmeiqiong2006@163.com。

通信作者:韦荣昌,博士,高级工程师,主要从事生药学研究。E-mail: wrc830612@163.com。

## 2.1 遗传多样性分析

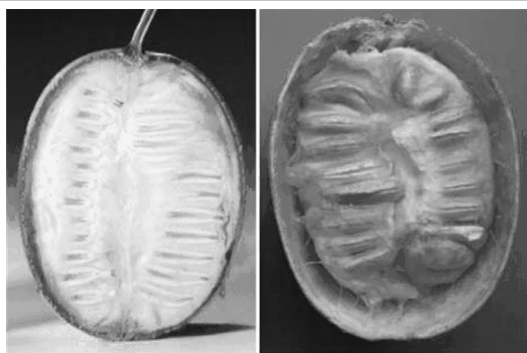
罗汉果在长期的人工栽培及自然选择过程中,形成了许多优良品种及丰富的野生类型。由于生产上长期采用无性繁殖方式,使栽培罗汉果的遗传结构变的脆弱,严重阻碍了罗汉果种质资源的合理利用。

已有大量的研究工作通过采用不同的分子标记研究罗汉果不同居群的遗传结构,并为种质资源保护策略的制定提供理论指导。彭云滔等利用 ISSR 标记法对来源地不同的罗汉果野生居群进行遗传多样性分析,发现不同居群间的遗传变异较大<sup>[14]</sup>。黄江等采用 RAPD 技术对罗汉果 10 个栽培品种和 5 份野生种质进行遗传分析和鉴定表明,圆果类栽培品种间亲缘关系较近,长果类栽培品种与野生种质的亲缘关系较近,长果类品种与圆果类品种间在亲缘关系上存在明显差异<sup>[15]</sup>。周俊亚等用 ISSR 和 RAPD 对罗汉果栽培品种进行分析发现,主要的栽培品种青皮果、红毛果和爆棚籽的遗传多样性很低,而茶山果和冬瓜汉具有较高的遗传多样性<sup>[16-17]</sup>。戴俊采用 ISSR 和 RAPD 对野生和栽培罗汉果进行遗传差异分析,结果均显示野生种质的遗传多样性高于栽培种质<sup>[18]</sup>。此外,李媛采用 15 个 RAPD 引物对 4 个野生罗汉果种群共 351 个样品分布格局及克隆结构进行研究,结果显示,野生罗汉果种群具有相对较高的克隆多样性<sup>[19]</sup>。这些研究结果表明,营养繁殖方法是造成栽培罗汉果遗传多样性低的主要原因,有必要扩大栽培罗汉果的遗传基础。

## 2.2 育种材料遗传背景分析

甜苷 V 是罗汉果主要活性成分和甜味成分,由于甜度高(为蔗糖甜度的 425 倍),热量低,口感好,从而成为理想的天然甜味剂<sup>[20-21]</sup>,是糖尿病人、肥胖病人理想的食糖代用品,具有极高的经济价值。研究显示,甜苷 V 仅仅存在于果肉和果皮中,罗汉果种子数量多,且不含甜苷 V<sup>[22]</sup>,使得罗汉果果实的利用率非常低,大大增加了提取难度和生产成本(图 1)。从分子水平上研究多倍体无籽罗汉果育种材料的遗传背景,可以克服无籽罗汉果新品系选育中杂交亲本选配和组配时的盲目性,提高育种效率。

付伟采用 SRAP 技术对罗汉果二倍体和四倍体的基因组水平进行遗传变异分析,结果表明罗汉果二倍体及四倍体株系之间基因组 DNA 的 SRAP 多



左图为幼果, 右图为成熟果

图1 罗汉果果实

态性较低,遗传差异较小<sup>[23]</sup>。韦荣昌等应用 ISSR 技术对多倍体无籽罗汉果及其亲本材料的遗传背景进行分析,结果表明, $F_1$  代从四倍体母本上继承的遗传物质更多,遗传上倾向母本,且  $F_1$  代与亲本之间的平均遗传相似性系数大于或小于亲本之间,随亲本的组合和相应的  $F_1$  代而定,聚类图和双变量主坐标表明罗汉果三倍体雌株和二倍体雄株遗传背景的复杂性较低,存在一定的丰富性,体现了“子似亲”的遗传现象<sup>[24-25]</sup>。该课题组采用 RAPD 技术得到同样的结果,建议尽快采取相应措施,进行罗汉果种质创新,以丰富无籽罗汉果亲本的遗传背景<sup>[26]</sup>。

此外,向巧彦等运用 ISSR 分子标记技术对空间诱导罗汉果 DNA 突变进行全基因组检测和聚类分析发现,太空环境可对罗汉果造成诱变效应,部分航天种质可能获得了有益突变,可为罗汉果新品种培育和杂交亲本选配提供科学依据<sup>[27]</sup>。

## 2.3 遗传图谱构建及农艺性状 QTL 定位

遗传图谱即遗传连锁图谱,指基因组中基因及专一的多态性标记之间相对位置的图谱。覃嘉明利用 1 个有 167 个株系的  $F_1$  代群体,根据 63 对引物组合扩增出的 131 个 SRAP 多态性数据,构建了首张罗汉果遗传框架图谱,其中 112 个 SRAP 标记分属于 23 个连锁群,覆盖罗汉果基因组总长度 725.6 cM,标记间平均图距 6.48 cM<sup>[28]</sup>。刘丽华利用 ISSR 和 SRAP 对以罗汉果野生红毛一号为母本、长滩果为父本杂交获得的 150 株  $F_1$  子代单株作图群体进行遗传学分析,得到 1 张包含 203 个标记的罗汉果遗传图谱,其中有 29 个 ISSR 标记、173 个 SRAP 标记和 1 个性别标记,包含 27 个连锁群,图谱总长度 1 474.1 cM,图谱覆盖率为 65.2%,连锁群长度在 19.5 ~ 152.6 cM 之间,平均长度 54.6 cM<sup>[29]</sup>。

运用软件 Windows QTL Cartographer V2.5 的复合区间作图法获得与农艺性状相关的 QTLs 位点 33 个。这些研究结果为罗汉果改良应用提供了有价值的科学依据。

### 3 罗汉果的功能基因研究

罗汉果分子生物学研究主要集中在分子标记应用、组织培养等方面。2011 年, Tang 等应用 Solexa 高通量测序技术对授粉后 3、50、70 d 的罗汉果果实进行转录组测序和表达谱分析, 开启了关于罗汉果功能基因的研究<sup>[30]</sup>。

#### 3.1 cDNA 文库构建和转录组分析

唐其等以罗汉果授粉后 50、70 d 果实为材料, 利用抑制消减杂交技术构建了罗汉果果实不同生育时期皂苷生物合成相关基因的差减 cDNA 文库, 对随机挑选的 641 个 cDNA 阳性克隆测序, 最终获得 622 条有效序列, 发现其中 421 个 ESTs 序列和能量代谢、次生代谢、转录因子、衰老及抗病性等蛋白有高度相似性<sup>[31]</sup>。通过对不同生长时期的罗汉果果实进行转录组测序, 罗汉果甜苷 V 生物合成途径中的基因、萜类和甾体 2 条代谢途径所有已知关键酶基因基本可以确定<sup>[30,32]</sup>。甜苷 V 合成有关的候选基因分属于角鲨烯环氧化酶、三萜类物质合成酶、环氧化物水解酶、细胞色素 P450 单加氧酶、UDP-糖基转移酶五大基因家族<sup>[33]</sup>。转录组测序也鉴定到了可能参与罗汉果甜苷合成调控和黄酮类化合物合成调控相关的转录因子<sup>[34]</sup>。赵欢采用转录组测序和表达谱分析对三倍体无籽罗汉果和二倍体罗汉果果实进行分析, 发现 329 个基因是二倍体果实所特有, 303 个基因是三倍体果实所特有, 并找出 1 个编码 T-细胞质雄性不育恢复因子的基因、2 个注释为 STP 合酶的基因以及 2 个参与雄性减数分裂的基因都显著下调, 推测这几个基因都可能与雄性不育有关, 该研究结果从分子水平上加深了对三倍体果实和种子形成的理解, 为无籽罗汉果育种研究提供了重要的基因资源<sup>[35]</sup>。

#### 3.2 功能基因克隆及鉴定

罗汉果的基因克隆主要涉及罗汉果甜苷 V 生物合成途径及罗汉果生长发育相关的生物过程。

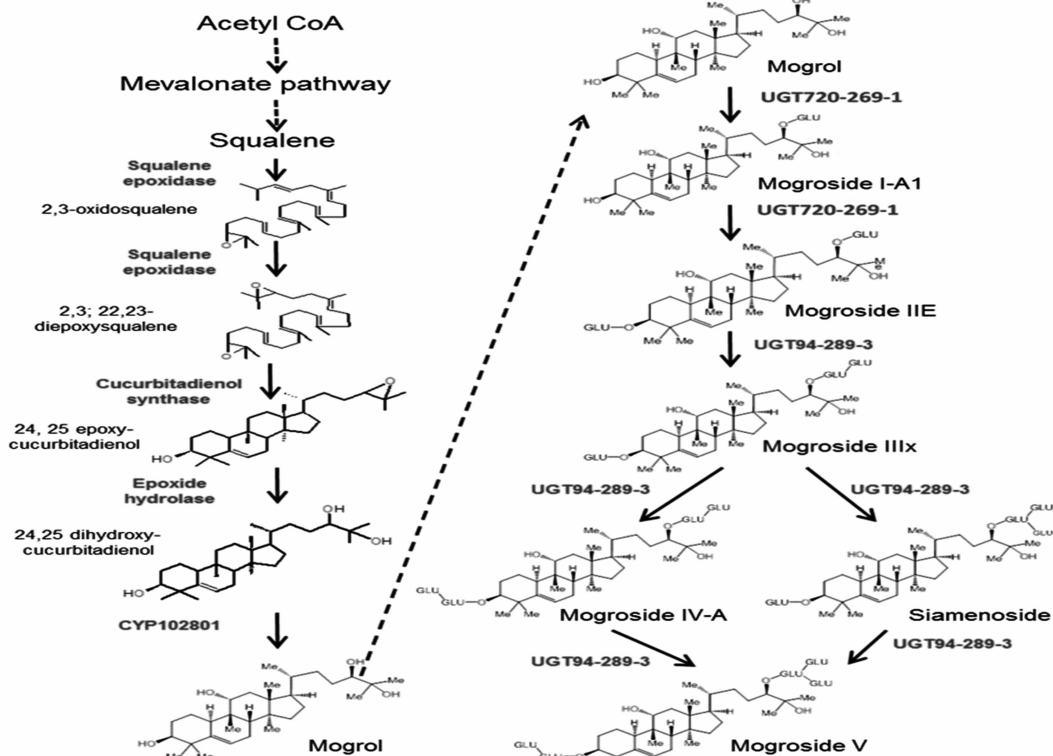
罗汉果甜苷 V 属于葫芦烷型四环三萜类物质, 而 3-羟基-3-甲基戊二酸单酰辅酶 A 还原酶 (HMGR) 位于甲羟戊酸 (MVA) 途径中, 是萜类化合物生物合成途径中的第 1 个限速酶, 是罗汉果甜苷

V 生物合成途径中的重要调控位点, *sgHMGR* 在罗汉果中的叶片、茎和果实中的表达差异明显, 在果实中与甜苷 V 合成积累变化规律相似<sup>[36-37]</sup>。角鲨烯合成关键酶角鲨烯合酶 (SQS)、葫芦二烯醇合酶 (CS)、环阿乔醇合酶 (CAS) 基因均已被克隆, 生物信息学信息、时空表达规律及亚细胞定位等已经开展研究<sup>[35]</sup>。以色列科学家研究发现, 甜苷 V 产生于细胞质中的 MVA 途径。来源于该途径的异戊二烯焦磷酸 (IPP) 与牻牛儿基焦磷酸 (GPP) 在法尼基焦磷酸合酶 (FPS) 的催化下形成法尼基焦磷酸 (FPP), FPP 在角鲨烯合酶 (SQS) 的作用下头尾结合成为角鲨烯, 角鲨烯环氧化酶 (SQE) 2 次作用将角鲨烯催化成 2,3;22,23-二环氧化角鲨烯, 经葫芦二烯醇合酶 (CS) 催化形成环氧葫芦二烯醇, 经环氧化物酶催化形成二羟基葫芦二烯醇, 接着在 CYP102801 的作用下形成罗汉果醇。罗汉果醇在 UGT720-269-1 的连续作用下逐步形成罗汉果苷 I-A1 和罗汉果苷 II E, 接着在 UGT94-289-3 的持续作用下又形成罗汉果苷 III x、罗汉果苷 IV-A 和赛门苷, 最终合成甜苷 V<sup>[33]</sup> (图 2)。

罗汉果雌雄异株, 在栽培中需要进行人工授粉才能正常结实, 严重制约了罗汉果种植业的发展, 选育单性结实雌性系或者可自花授粉的两性花品种, 是罗汉果生产中亟待解决的关键问题。生长素类物质调控植物生长发育和器官的形态发生, 目前, 已有关于罗汉果中与生长素合成与调控相关基因研究的报道。例如, 罗汉果中可能与生长素极性运输及果实起始发育迅速发生密切相关的 *sgNPY2* 基因的克隆与表达研究<sup>[38]</sup>; 参与罗汉果生长发育调节过程, 尤其与雌蕊和幼果的器官形态建成密切相关的生长素响应因子 *sgARF8* 的鉴定<sup>[39]</sup>; 直接参与植物生物素合成途径的关键基因 *sgTAR2* 的克隆与表达分析<sup>[40]</sup>。周琼等采用农杆菌介导法构建果实特异启动子 2A11 与生长素合成相关基因 *iaaM* 的嵌合基因 (*2A11-iaaM*) 过表达载体, 转罗汉果后得到 5 株在田间正常开花的阳性植株, 并表现单性结实<sup>[41]</sup>。乙烯合成酶 *sgACS1* 基因<sup>[42]</sup> 和 *sgACS3* 基因<sup>[43]</sup> 可能参与花芽的形成、雌蕊原基分化、蕾中雌蕊发育以及雌花形成。这些结果对研究生长素调控罗汉果发育和器官形态发生的分子机制具有重要意义。

### 4 罗汉果抗病毒研究

罗汉果病毒病一直是困扰罗汉果种植产业发



Acetyl CoA—乙酰辅酶 A; Mevalonate pathway—甲羟戊酸途径; Squalene—角鲨烯; Squalene epoxidase—角鲨烯环氧化酶; 2,3-oxidosqualene—2,3-氧化角鲨烯; 2,3;22,23-diepoxy-squalene—2,3;22,23-二环氧角鲨烯; Cucurbitadienol synthase—葫芦二烯醇合酶; 24,25-epoxycucurbitadienol—24,25-环氧葫芦二烯醇; Epoxide hydrolase—环氧化物酶; 24,25-epoxycucurbitadienol—24,25-二羟基葫芦二烯醇; CYP—细胞色素P450酶; Mogrol—罗汉果醇; UGT—葡萄糖基转移酶; Mogroside—罗汉果苷; Siamenoside—赛门苷

图2 罗汉果甜苷 V 生物合成途径

展的严重病害,近年来许多果园遭到严重感染,导致品质下降、产量降低,甚至绝收,但目前关于罗汉果抗病毒方面的研究报道较少。小西葫芦花叶病毒(ZYMV)是罗汉果花叶病的主要病原病毒,ZYMV 基因组全长 9592 nt<sup>[44]</sup>。谭秀梅将 ZYMV 的 Hc - pro、NIa、Nib、CP 和 3'UTR 区多个基因片段串联构成 RNAi 的目标序列,利用 RNAi 技术获得了 89 株转基因罗汉果植株,经侵染试验证明,转基因罗汉果具有一定的抗性<sup>[45]</sup>。此外,李文兰等从拟南芥中克隆得到 1 个系统获得性抗性调节基因 *NPRI*,转化罗汉果后进行烟草花叶病毒 TMV 的接种,从表型上可以看出转 *NPRI* 基因的罗汉果植株对病毒的抵抗力较强<sup>[46]</sup>。

## 5 展望

罗汉果是药食同源的传统中药,一直以来都受到广泛关注,利用分子标记开展罗汉果种质资源的遗传多样性分析、亲缘关系以及性别鉴定,取得了可喜的成绩,为其种质资源的合理利用与保护提供

重要参考,但分子标记辅助育种方面的研究没有得到更多地关注,后续须要继续加强分子标记研究,开发更多与优良农艺性状基因紧密连锁的分子标记,为通过分子手段培育出高产优质罗汉果新品种奠定基础。

新一代高通量测序技术的发展极大地促进了罗汉果功能基因方面的研究,罗汉果甜苷 V 生物合成通路相关的所有基因几乎都能找到。罗汉果全基因组测序已完成,标志着在改善罗汉果基因组方面取得重要研究进展。经过组装的基因组大小约为 469.5 Mb,结合转录组和表达谱分析,鉴定到 4 606 个基因在早期果实形成时相比于叶片上调表达,这些基因很可能就是潜在调控果实发育和着色的代谢通路上的基因<sup>[47]</sup>。

综合目前罗汉果分子生物学方面的研究成果来看,下一步应建立高效过表达转基因、基因沉默或 CRISPR/CAS9 基因编辑技术,深入开展候选基因功能研究,鉴定一批在生产上能够提高罗汉果甜苷 V 含量、调控罗汉果生长发育或者提高罗汉果抗病

性的关键基因,以备利用分子生物学技术为罗汉果的育种和产业化发展提供基因资源,同时为培育综合性状良好的罗汉果新品种提供参考。

## 参考文献:

- [1] Jin J S, Lee J H. Phytochemical and pharmacological aspects of *Siraitia grosvenorii*, *luo han kuo* [J]. *Oriental Pharmacy and Experimental Medicine*, 2012, 12(4): 233–239.
- [2] 国家药典委员会. 中华人民共和国药典:一部[M]. 北京:中国医药科技出版社, 2010:197.
- [3] Takasaki M, Konoshima T, Murata Y, et al. Anticarcinogenic activity of natural sweeteners, cucurbitane glycosides, from *Momordica grosvenori* [J]. *Cancer Letters*, 2003, 198(1): 37–42.
- [4] 周良才, 张碧玉, 覃 良, 等. 罗汉果品种资源调查研究和利用意见[J]. *广西植物*, 1981(3): 29–33.
- [5] 马小军, 莫长明, 白隆华, 等. 罗汉果新品种‘永青 1 号’[J]. *园艺学报*, 2008, 35(12): 1855.
- [6] 付长亮, 马小军, 白隆华, 等. 罗汉果脱毒苗的快速繁殖研究[J]. *中草药*, 2005, 36(8): 1225–1229.
- [7] 廖日权, 李 俊, 黄锡山, 等. 罗汉果化学成分的研究[J]. *西北植物学报*, 2008, 28(6): 1250–1254.
- [8] 符毓夏, 王 磊, 李典鹏. 罗汉果醇抗肿瘤活性及其作用机制研究[J]. *广西植物*, 2016, 36(11): 1369–1375.
- [9] 李文德, 简江波. 功能型甜味植物—罗汉果的开发与应用[J]. *中国食品添加剂*, 2007(6): 120–121, 105.
- [10] 陶 莉, 王跃进, 尤 敏, 等. AFLP 用于构建罗汉果 DNA 指纹图谱及其幼苗雌雄鉴别[J]. *武汉植物学研究*, 2005, 23(1): 77–80.
- [11] 韦 弟, 杨美纯, 陈廷速, 等. 罗汉果性别的 RAPD 标记研究[J]. *中药材*, 2005, 29(4): 311–313.
- [12] 黄夕洋. 罗汉果性别性状的遗传标记研究[D]. 桂林:广西师范大学, 2006.
- [13] 黄姿梅. 罗汉果性别的分子标记研究[D]. 桂林:广西师范大学, 2007.
- [14] 彭云滔, 唐绍清, 李柏林, 等. 野生罗汉果遗传多样性的 ISSR 分析[J]. *生物多样性*, 2005, 13(1): 36–42.
- [15] 黄 江, 蒋慧萍, 陈廷速, 等. 罗汉果不同种质亲缘关系的 RAPD 分析[J]. *福建果树*, 2006(1): 15–17.
- [16] 周俊亚, 唐绍清, 向悟生, 等. 栽培罗汉果遗传多样性的 ISSR 分析[J]. *广西植物*, 2005, 25(5): 431–436.
- [17] 周俊亚, 唐绍清. 栽培罗汉果遗传多样性的 RAPD 分析[J]. *分子植物育种*, 2006, 4(1): 71–78.
- [18] 戴 俊. 罗汉果种质资源的 DNA 指纹图谱研究[D]. 桂林:广西师范大学, 2010.
- [19] 李 媛. 野生罗汉果种群分布格局研究及克隆结构 RAPD 分析[D]. 桂林:广西师范大学, 2006.
- [20] Xia Y, Riverohuguet M E, Hughes B H, et al. Isolation of the sweet components from *Siraitia grosvenorii* [J]. *Food Chemistry*, 2008, 107(3): 1022–1028.
- [21] Zhang H Y, Yang H H, Zhang M, et al. Identification of flavonol and triterpene glycosides in *Luo – Han – Guo* extract using ultra – high performance liquid chromatography/quadrupole time – of – flight mass spectrometry [J]. *Journal of Food Composition and Analysis*, 2012, 25(2): 142–148.
- [22] 苏小建, 刘国雄, 聂 晓, 等. 罗汉果甜苷 V 在各部位的含量分布[J]. *食品科技*, 2007, 32(5): 76–78.
- [23] 付 伟. 罗汉果二倍体及四倍体遗传变异研究[D]. 北京:北京协和医学院, 2011.
- [24] 韦荣昌, 李 虹, 蒋建刚, 等. 多倍体无籽罗汉果及其亲本遗传背景的 ISSR 分析[J]. *园艺学报*, 2012, 39(2): 387–394.
- [25] 韦荣昌, 白隆华. 罗汉果三倍体雌株与二倍体雄株遗传背景的 ISSR 分析[J]. *中草药*, 2015, 46(6): 881–886.
- [26] 韦荣昌, 马小军, 闫志刚, 等. 罗汉果三倍体雌株与二倍体雄株遗传背景的 RAPD 分析[J]. *江苏农业科学*, 2015, 43(2): 241–243, 293.
- [27] 向巧彦, 黄夕洋, 李 虹, 等. 利用 ISSR 分子标记检测空间诱导罗汉果 DNA 突变[J]. *广西植物*, 2017, 37(5): 581–586, 598.
- [28] 覃嘉明. 罗汉果品种资源花粉质量研究及遗传框架图构建[D]. 南宁:广西大学, 2009.
- [29] 刘丽华. 罗汉果遗传图谱构建及农艺性状 QTL 定位[D]. 北京:北京协和医学院, 2010.
- [30] Tang Q, Ma X J, Mo C M, et al. An efficient approach to finding *Siraitia grosvenorii* triterpene biosynthetic genes by RNA – seq and digital gene expression analysis[J]. *BMC Genomics*, 2011, 12(1): 343.
- [31] 唐 其, 邱德有, 马小军, 等. 罗汉果果实不同发育时期 SSH 文库的构建[J]. *广西植物*, 2011, 31(3): 388–392.
- [32] 莫长明. 罗汉果苷代谢酶基因转录组研究及葡萄糖基转移酶基因克隆与表达[D]. 南宁:广西大学, 2015.
- [33] Itkin M, Davidovich – Rikanati R, Cohen S, et al. The biosynthetic pathway of the nonsugar, high – intensity sweetener mogroside V from *Siraitia grosvenorii* [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2016, 113(47): 7619–7628.
- [34] 张凯伦, 罗祖良, 郭玉华, 等. 不同生长时期罗汉果果实转录因子的转录组分析及酵母单杂交文库的构建[J]. *中国现代中药*, 2016, 18(3): 945–950.
- [35] 赵 欢. 三倍体罗汉果转录组表达谱分析及甜苷 V 生物合成中 4 个关键酶基因的功能研究[D]. 北京:北京协和医学院, 2014.
- [36] 郭茜茜, 马小军, 白隆华, 等. 罗汉果内参基因筛选和 3 – 羟基 – 3 – 甲基戊二酰辅酶 A 还原酶时空表达分析[J]. *中草药*, 2014, 45(15): 2224–2229.
- [37] 赵 欢, 莫长明, 唐 其, 等. 罗汉果 *SgHMGR* 基因的克隆、分析及原核表达[J]. *广西植物*, 2015, 35(6): 796–801.
- [38] 莫燕梅, 闵丹丹, 郑 珊, 等. 罗汉果 *SgNPY2* 基因的克隆及在单性结实幼果中的表达[J]. *分子植物育种*, 2016, 14(6): 1403–1409.
- [39] 郝庆林, 郑 珊, 李 刚, 等. 罗汉果生长素响应因子 *SgARF8* 基因的克隆及表达分析[J]. *分子植物育种*, 2018, 16(6): 1784–1791.
- [40] 郑 珊, 闵丹丹, 莫燕梅, 等. 罗汉果色氨酸转氨酶基因 *SgTAR2*

张欢,卢海凤,孟涛,等. 光合细菌在种植业上的应用研究进展[J]. 江苏农业科学,2020,48(8):18-28.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2020.08.004

# 光合细菌在种植业上的应用研究进展

张欢<sup>1</sup>, 卢海凤<sup>1</sup>, 孟涛<sup>2</sup>, 沈自泉<sup>3</sup>

(1. 中国农业大学水利与土木工程学院, 北京 100083; 2. 华盛江泉集团有限公司, 山东临沂 276000;

3. 山东富通农牧业产业发展有限公司, 山东临沂 276000)

**摘要:**光合细菌是一种优质的有机肥料,在提高谷类作物、果蔬及其他经济作物的产量,改善其品质,提高植物抗病毒能力等方面具有独特的功效。本文就光合细菌在不同作物上的应用效果研究近况进行了较全面的介绍,并为今后如何进一步研究光合细菌应用于种植业提供了新的思路。

**关键词:**光合细菌;作物栽培;应用;菌液

**中图分类号:** S144;S182 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2020)08-0018-11

光合细菌(photosynthetic bacteria, PSB)是一类广泛分布于海洋、湖泊、水田、污泥等环境中,可以光合作用且不产氧的特殊生理类群的原核生物的总称。光合细菌的生理特性多样,是集目前世界上所有代谢方式(包括光照自养、光照异养、化能自养、化能异养)为一体的微生物。其灵活多样的代谢方式使其具有较强的环境适应能力<sup>[1]</sup>。光合细菌生长快、菌体无毒性,且富含蛋白质、维生素及多种生理活性物质,具有极大的资源化潜力。人们对 PSB 在污水处理、畜禽和水产养殖、作物栽培及食品与医药开发中的应用均开展了广泛研究,取得不少成果。本文仅就近 10 年我国在种植业中应用光合细菌的研究进展作一简述,并将近 20 年的相关应用

对应整理成图表以供参考。

目前,根据 Bergey's 细菌学分类手册(《伯杰细菌鉴定手册》第 8 版)记载,光合细菌包括红螺菌科、着色菌科、绿硫细菌科、绿色丝状细菌科,共计有 19 属、49 种。近年来,以分子生物学指征为依据的分类学研究使光合细菌的分类地位发生了较大的改变,不断有关于新种和新属的报道。尽管上述 4 个科同属光合细菌,但它们的生理生态学特征存在着一定的差异。在种植业中主要利用的是红螺菌科,该科的细菌可利用各种有机物作为碳源和光合反应的氢供应体,进行光合异养生长,是兼性光养微生物,可同化脂肪酸、碳水化合物以及芳香族化合物等多种有机物。

## 1 光合细菌在谷类作物上的应用

光合细菌对水稻、玉米、小麦等谷类作物的影响除可以提高种子发芽率外,最重要是在于提高粮食作物的产量,提高率均达到 5% 以上,为解决我国粮食紧缺问题提供了新的思路(表 1)。

在水稻的应用中,王秋菊等研究发现,水稻种

的克隆及表达分析[J]. 广西植物,2017,37(3):365-372.

[41]周琼,胡珊珊,郝庆林,等. 用单性结实基因 *2A11-iaaM* 转化罗汉果的研究[J]. 广西植物,2018,38(12):1614-1625.

[42]曾娜霞,胡珊珊,周琼,等. 罗汉果乙烯合成酶 *SgACS1* 基因的克隆与表达分析[J]. 分子植物育种,2017,15(3):821-832.

[43]曾娜霞,胡珊珊,郝庆林,等. 罗汉果乙烯合成关键酶基因 *SgACS3* 的克隆及表达分析[J]. 农业生物技术学报,2018,26(5):784-792.

[44]甘晓静. 侵染罗汉果的小西葫芦黄化花叶病毒基因组全长序列

的测定及其结构分析[D]. 南宁:广西大学,2005.

[45]谭秀梅. 利用 RNAi 技术培育抗花叶病毒转基因罗汉果的研究[D]. 吉首:吉首大学,2015.

[46]李文兰,李景剑,李华英. 农杆菌介导系统获得性抗性调节基因 (*NPRI*) 转化罗汉果的研究[J]. 上海农业学报,2010,26(4):15-19.

[47]Xia M, Han X, He H, et al. Improved de novo genome assembly and analysis of the Chinese cucurbit *Siraitia grosvenorii*, also known as monk fruit or luo-han-guo[J]. Gigascience, 2018, 7(6):1-9.

收稿日期:2019-03-27

基金项目:国家自然科学基金(编号:51861125103);企业横向课题(编号:201805410910066)。

作者简介:张欢(1995—),女,山西晋中人,硕士,主要从事光合细菌污水处理在种植业方面的资源化利用。E-mail: zhanghuan@cau.edu.cn。

通信作者:卢海凤,博士,副教授,博士生导师,主要从事光合细菌污水资源化处理。E-mail: haifenglu@cau.edu.cn。