

茄子细胞工程技术应用研究进展

贾利^{1,2}, 马绍奎^{1,2}, 江海坤^{1,2}, 严从生^{1,2}, 王艳^{1,2}, 王明霞^{1,2},
葛治欢^{1,2}, 俞飞飞^{1,2}, 张其安^{1,2}, 董言香^{1,2}, 方凌^{1,2*}

(1. 安徽省农业科学院园艺研究所, 合肥 230031; 2. 园艺作物种质创制及生理生态安徽省重点实验室, 合肥 230031)

摘要: 茄子是世界上最重要的蔬菜作物之一, 传统育种技术可以改良茄子群体不良性状如植株倒伏、果实畸形、不耐储运、萼片和叶片带刺等, 但是耗时较长、效果不佳, 同时存在杂交障碍以及优异种质资源匮乏等问题。开展茄子细胞工程技术研究, 是切实解决茄子生产中的突出问题如抗性品种缺乏、病虫害严重的有效途径。国内外关于茄子细胞工程育种技术的研究集中在细胞学分析、组织培养和基因工程 3 个方面, 此外, 茄子重要性状相关基因的克隆、茄子种间和种内的遗传进化关系研究与应用、茄子雄配子的启动机理和高频率诱导机制、高效的茄子受体再生途径和稳定的遗传转化体系、茄子基因编辑技术等研究, 也是未来茄子细胞工程技术研究、种质创制和品种改良的突破口。

关键词: 茄子; 细胞工程; 育种

中图分类号: S641.103.6

文献标识码: A

文章编号: 1672-352X (2022)04-0565-09

Advances on cell engineering technology application in eggplant

JIA Li^{1,2}, MA Shaojun^{1,2}, JIANG Haikun^{1,2}, YAN Congsheng^{1,2}, WANG Yan^{1,2}, WANG Mingxia^{1,2},
GE Zhihuan^{1,2}, YU Feifei^{1,2}, ZHANG Qi'an^{1,2}, DONG Yanxiang^{1,2}, FANG Ling^{1,2}

(1. Institute of Horticulture Research, Anhui Academy of Agricultural Sciences, Hefei 230031;

2. Key Laboratory of Genetic Improvement and Ecophysiology of Horticultural Crop, Hefei 230031)

Abstract: Eggplant is one of the most important vegetable crops in the world. The traditional breeding technology can improve the adverse traits of eggplant population, such as plant lodging, fruit deformity, intolerance to storage and transportation, sepals and leaves with thorns, but it takes a long time and the effect is poor, moreover, there are some problems, such as hybridization obstacles and lack of superior heterogeneous resources. The research on eggplant cell engineering technology is an effective way to solve the prominent problems in eggplant production, such as lack of resistant varieties and serious diseases and insect pests. The research on cell engineering technology in eggplant at home and abroad focuses on cytological analysis, tissue culture and genetic engineering. In addition, the clone of genes related to important traits of eggplant, the research and application of inter-specific and intra-specific genetic evolution relationship of eggplant, the initiation mechanism and high-frequency induction mechanism of eggplant male gametes, efficient regeneration pathway of eggplant receptor, stable genetic transformation system and eggplant gene editing technology are the breakthrough of cell engineering technology research, germplasm creation and variety improvement in the future.

Key words: eggplant; cell engineering; breeding

茄子 (*Solanum melongena* L., $2n = 2x = 24$) 属茄科茄属, 是世界上常见的蔬菜作物之一, 广泛种植在热带和亚热带地区, 也逐渐成为各地区的主要经济作物。然而茄科作物的遗传基础变得日益狭窄, 导致新

收稿日期: 2021-12-01

基金项目: 国家自然科学基金 (31501760), 安徽省农业科学院青年英才经费 (QNYC-202121), 安徽省科技重大专项 (202203a06020030), 财政部和农业农村部: 国家现代农业产业技术体系 (CARS-23-G40) 和安徽省蔬菜产业技术体系专项经费 (皖农科函 (2021) 711 号) 共同资助。

作者简介: 贾利, 博士, 副研究员。E-mail: 495135425@qq.com

* 通信作者: 方凌, 研究员。E-mail: fl_vege@139.com

品种培育也日趋遭遇瓶颈,越来越难以满足生产和市场的需求以及环境的变化,同时各种非生物和生物胁迫也长期影响着茄子种植的经济效益^[1]。因此,培育优质、高产又具有综合抗性(抗病、抗虫和抗逆)的茄子新品种就成为解决问题的关键。传统育种技术可以改良茄子群体不良性状如植株倒伏、果实畸形、不耐储运、萼片和叶片带刺等,但是耗时较长且效果不佳,同时存在杂交障碍以及优异种质资源匮乏等问题;常见的化学试剂可以有效控制病害,但会产生食品安全、害虫抗性并造成环境污染等其他问题^[2]。随着分子生物学和现代生物技术的融合发展,细胞工程技术可以有效解决以上难题,为茄子的品种改良开辟了新途径。

本文从细胞学分析、组织培养和基因工程3个方面系统总结了国内外关于茄子细胞工程育种技术的研究进展,并对今后的研究方向进行了展望,以期为茄子作物的细胞工程育种技术研究、品种改良和种质创制等方面的研究提供一定的技术参考。

1 细胞学分析

1.1 染色体核型

核型反映了一个物种在其染色体水平的整体特征,其基本方法是基于染色体长度、臂比及核型不对称系数等信息进行^[3],可作为物种分类、亲缘关系阐明和品种鉴定的依据。在茄子杂交育种中,核型背景的研究可为亲本选配和新品种的选育提供可靠的细胞学依据。

目前,茄子的核型研究结果多属于常规的染色体核型分析,即源于体细胞染色体在普通光学显微镜下测定的表型特征。在研究刺天茄的染色体组型时,Krishnappa等^[4]在按照长度将其分为4类的基础上,又根据初级缢痕和次级缢痕及随体位置的差别划分为17类。按照上述分类,吴世斌等^[5]研究了来自西双版纳的4份野生茄子和2个栽培茄品种,发现各野生茄不同种间及同种群间的染色体组型差异较大,栽培茄间则较为相近,且认为具有随体的染色体在全组中的相对长度的位次变化似乎与相对长度有一定关系。

部分茄子野生种与栽培种之间不易区分,作为一个整体称为茄子复合体^[6]。Sakata等通过观察同工酶及叶绿体DNA谱带,对茄子发育进行了较为系统的研究,发现腥红色的茄子是由野生茄子演化而来的^[7]。按照詹园凤等的核型分析标准,研究发现部分野生茄与栽培茄子均为‘2A’型(核型较对称),属于较原始类型,表明它们之间有着密切的亲

缘关系和遗传上的同质性^[8]。此外,与野生茄相比,栽培茄的核型不对称性增强,不同品种的随体染色体分布位置存在差异^[9]。茄子亚属大多数植物都有1对随体染色体^[10-11],少数有2对和3对^[4,12],还有一些未发现随体染色体^[13]。詹园凤等^[14]通过对2个栽培茄品种‘屏东长茄’和‘紫奇’的核型进行分析,得出‘屏东长茄’的核型公式为 $2n = 22m + 2sm$ (2SAT),染色体相对长度组成为 $2n = 10M1$ (中短染色体)+ $14M2$ (中长染色体);‘紫奇’的核型公式为 $2n = 20m + 4sm$ (2SAT),染色体相对长度组成为 $2n = 14M1$ (中短染色体)+ $10M2$ (中长染色体);两个品种的染色体数目均为 $2n = 24$,核型均为‘2A’型。林珊珊^[15]研究发现‘益丰龙芽’、‘翡翠绿茄’与‘佛源秋茄’3个秋茄品种的染色体数目均为 $2n = 24$ 。

‘益丰龙芽’的核型公式为 $2n = 18m + 6sm$,为‘2A’型,染色体相对长度组成为 $2n = 2L$ (长染色体)+ $10M2+10M1+2S$ (短染色体);‘翡翠绿茄’核型公式为 $2n = 18m + 6sm$,为‘1A’型,染色体相对长度组成为 $2n = 2L+10M2 + 8M1 + 4S$;‘佛源秋茄’核型公式为 $2n = 20m + 4sm$,为‘1A’型,染色体相对长度组成为 $2n = 16M2 + 6M1 + 2S$ 。从前人的研究结果可以看出,不同茄子品种之间的核型公式和染色体相对长度组成均存在差异。由于在染色体的结构细节上,不同茄子品种之间表现出不同程度的差异,故而茄子品种外部形态表现出的差异,极有可能来自内部染色体的微小结构变化^[14]。

1.2 染色体原位杂交

随着染色体研究技术的创新,建立和发展了分子细胞遗传学,产生了基因组原位杂交(genomic in situ hybridization,简称GISH)和荧光原位杂交(fluorescence in situ hybridization,简称FISH),使得科研工作者可以在单细胞水平分辨染色体。在植物研究中,GISH多用于分辨种间杂种、异源多倍体和种间渐渗系中来自不同亲本基因组的染色体,并对染色体的组成和变异进行分析^[16]。FISH已主要用于以下几个方面:(1)特定DNA序列在染色体上的定位;(2)基因表达研究;(3)物种之间的亲缘关系和多倍体起源;(4)基因组结构及空间分布规律;(5)转基因的细胞学鉴定;(6)检测外源染色体片段及其渗入方式的探讨^[17]。

野生优异资源和不同品种基因组的重组利用已成为茄子种质创新的主要途径,而开展染色体工程育种已成为茄子抗病育种的主要突破口^[18],因而进行染色体细胞学研究对于茄子育种具有重要意义。为了将野生水茄的优良性状导入到栽培茄中,曹必

好等^[19]将二者进行人工杂交,并以野生水茄的基因组为探针,对远缘杂交一代进行 GISH 鉴定,发现较强杂交信号,表明杂种真实性。另外,为了提高马铃薯的抗病性,叶文宣^[20]将具有青枯病抗性的茄子与马铃薯普通栽培种进行体细胞融合,通过 GISH 清晰地鉴定出杂种染色体的来源后,又利用 FISH 研究了染色体的重排,表明在起源关系较远的体细胞杂交中,大部分亲本染色体可以独立存在,但也可以产生双亲重排染色体。

茄科蔬菜中马铃薯、番茄和茄子等几类主要物种的遗传进化关系一直是研究的热门,在此过程中,不断丰富着茄子的染色体细胞学信息。Lou 等^[21]利用比较 FISH 的方法将马铃薯 6 号染色体上的 13 个 BAC 克隆定位在 7 个茄科物种上,发现有 11 个可定位于茄子 6 号染色体上,一定程度上反应了马铃薯和茄子的同源关系。He 等^[22]利用 FISH 技术将内部端粒重复序列(interstitial telomeric repeats, 简称 ITRs)杂交在马铃薯、番茄以及茄子上,端粒探针信号在各个种染色体上的定位通过中期染色体核型排布来显示,发现该序列主要富集于染色体着丝粒区域,这些结果暗示 ITRs 可能与功能着丝粒有关。目前,还未彻底研究清楚茄科主要物种之间的染色体进化关系,可利用比较 FISH 作图来继续深入研究。

2 组织培养

2.1 外植体培养

20 世纪 60 年代,茄子再生体系的研究已有相关的报道。通过外植体器官体外培养获得再生植株是茄子离体再生研究的热点。基因型是影响植株再生最重要的因素,材料的基因型不同,再生能力亦有很大差异。Gleddie 等^[23]对 7 个茄子品种的体细胞胚进行培养,诱导频率介于 5.6%~26.2%。外植体部位对植株再生也有很大影响^[24],研究发现下胚轴易诱导出不定芽,而子叶和真叶更易诱导出体细胞胚^[25]。Magioli 等^[26]研究认为子叶和真叶再生频率最高,下胚轴次之。姜悬云等^[27]通过对 7 份茄子子叶和下胚轴进行离体培养,得出子叶的再生效果要优于下胚轴,其中徐州长茄与成都墨茄子叶的再生频率较高,分别是 93%和 73%,同时下胚轴形态学上端的再生能力要显著强于形态学下端。上述二者的研究结果说明子叶的再生频率高于下胚轴。而余波澜等^[28]对 4 个茄子品种进行组织培养,得出下胚轴比子叶易诱导出芽的结论,说明基因型和诱导部位均对再生频率有一定的影响。杨志晶^[29]以‘云茄 6 号’的子叶和下胚轴为外植体,结果并未诱导出不定

芽的分化,只有带芽的茎段才能分化出芽,不定芽分化率达到 86.11%。目前为止,研究人员已利用未成熟的种胚^[30-31]、下胚轴^[27, 31-34]、子叶^[27, 31, 34-37]、真叶^[32, 38-40]和根^[31, 41-43]等部位获得再生植株。

除了基因型和外植体部位,培养条件对茄子离体再生也有一定影响。MS 培养基常用于离体培养,研究人员发现基本培养基对茄子组织培养影响不大,关键影响因素是植物激素种类及其比例。不同外植体对激素的要求不同,常用的激素有 1-Naphthylacetic acid (NAA), Indole-3-acetic acid (IAA), 6-Benzylaminopurine (6-BA), Kinetin (KT), Trans-Zeatin (ZT), 2,4-Dichlorophenoxyacetic acid (2,4-D)等,其中生长素和细胞分裂素尤其重要。Rao 等^[40]利用 NAA 诱导产生胚状体并获得了茄子再生植株。赵福宽等^[44]研究发现添加 2,4-D 和 KT 的培养基对叶肉愈伤组织有很好的诱导作用。余波澜等^[28]在培养基中分别添加 IAA、ZT 和 6-BA 可诱导愈伤的再分化;ZT 对子叶和下胚轴的诱导率较低,不易形成再生植株;6-BA 可诱导芽分化,但高浓度反而会大大降低分化率。此外,因在传统育种中茄子植株在田间常受到各种病害、逆境等不利因素的影响,易导致整株死亡,无法保证在果实成熟时能采收到种子,而导致育种材料缺失。通过离体快繁技术、枝条扦插技术以及未成熟种子成苗技术可以有效解决上述问题,使优异种质资源得以保存。

2.2 花药和小孢子培养

20 世纪 70 年代,通过茄子花药离体培养获得单倍体植株就已经成功,且技术较为成熟。在茄子花药培养过程中,发现不同材料、材料的不同生理状态、不同培养条件和环境均会影响花药的培养效果^[45]。以七叶茄为试材,程继鸿等^[46]研究得出 1 000 lx 弱光胁迫下的茄子花药离体再生条件,并获得了植株。邹建^[47]通过 3 个茄子品种的花药愈伤组织诱导、增殖和分化培养,获得了单倍体植株。李亚荣^[48]对 10 个基因型的茄子花药进行培养,仅两份材料诱导出胚状体,同时发现 5~6 °C 的低温预处理对胚状体诱导有效,3%的蔗糖胚状体诱导率最高。刘独臣等^[49]以 10 份茄子 F₁ 为试材,对花药培养过程中各类条件进行摸索,建立了茄子花药培养诱导胚状体成苗体系。潘羽丰^[50]以 12 份茄子为试材,通过茄子花药培养,研究出一步诱导获得单倍体植株的方法。方岩岩^[51]探讨并得出适宜水茄和紫长茄杂种 F₁ 花药培养的因素,为创制 DH 系提供了参考依据。Rotino 等^[52]综合考虑了花药培养所有的技术因素,提出了一套详细的茄子花药培养程序,而且该程序在花药

培养的第一阶段进行了 35 °C 高温处理。王利英等^[53]研究发现,‘红地球’、‘红宝石’、‘黑秀’、‘园丰一号’、‘园丰二号’、‘园丰七号’、‘Y94-2014’、‘Y95-2014’和‘Y107-2014’9份白肉紫红圆茄的愈伤组织比较容易诱导产生单倍体,诱导率高达 69%,‘青丰一号’、‘绿罐 309’等 14 份绿茄和‘硕圆黑宝’、‘德润一号’等 12 份绿肉紫黑圆茄诱导率为 56%,‘长野黑美’、‘改良大龙茄’等 8 份紫萼长茄诱导率为 7%,‘布列塔’、‘CC15-2014’、‘CC17-2014’3 份绿萼长茄诱导率为 0。通过进一步优化茄子单倍体诱导体系,诱导率平均提高到 39%。霍秋月^[54]通过构建栽培茄与野生茄杂交 F₁ 代的花药培养体系,发现在获得的 10 份杂交种中,有 6 份杂种能诱导出愈伤组织,为构建茄子 DH(双单倍体)系以及将野生茄的抗性基因转入到栽培茄中奠定基础。目前花药培养一直没能广泛成功地用于茄子新品种选育,主要原因是因为茄子诱导单倍体成功率较低,另外通过花药培养获得再生植株的茄子基因型范围较窄,所以导致一些真正有价值的育种材料不能通过花药离体培养获得单倍体再生植株。加之花药整体生理结构较为复杂,没有足够的实验来证明再生植株的来源到底是由哪些部位发展而来。

相较于花药培养,小孢子培养可排除母体干扰性,但其出胚率较低,限制了实践上广泛的应用^[55]。此外,有研究发现小孢子体外培养诱导产生二倍体的同时,还有其他多倍体的产生,必须对后代进行倍性的鉴定选择。但小孢子培养是产生双单倍体强有力的生物技术,同时也有利于杂交种子的快速生产^[56-57]。研究认为茄科植物对小孢子培养相对敏感,但不同的茄科作物的反应相差很大,烟草小孢子培养发展相对完善,但茄果类蔬菜作物(甜辣椒、番茄、茄子)则很难诱导成苗。影响茄科小孢子培养因素有很多,包括基因型、供体植株生长环境、小孢子发育时期、培养技术以及培养基的成分等在内的诸多因素^[58]。

研究发现^[59]半乳糖可以诱使烟草花粉分裂,但若缺乏蔗糖,这些分裂的花粉则不能进一步发育分化,茄科农作物小孢子培养所需的蔗糖最适浓度约为 2%~4%。低浓度的生长素类物质可提高胚状体的诱导频率,而高浓度则易产生愈伤组织和使细胞倍性复杂化^[60]。研究认为,小孢子培养需要诸如高温、低温、营养饥饿、渗透等非生物应激来触发胚胎发生^[61]。茄子游离小孢子培养诱导成苗较困难,目前报道很少,仅有少数研究取得一些突破,如顾淑荣^[62]从普通栽培品种‘九叶茄’的花粉愈伤组织

上分化得到再生植株。Miyoshi^[63]研究发现茄子小孢子在无蔗糖培养基中 35 °C 处理 3 d 是愈伤组织诱导的先决条件。宋彦平等^[64]研究得出诱导愈伤组织发生的最佳时期是小孢子单核靠边期,对花药先 4 °C 后 36 °C 变温预处理,其小孢子膨大率比 25 °C 常温高出 6 倍多。张玉苗^[65]通过对不同茄子材料小孢子脱分化和影响因子进行了相关研究,得出了小孢子单核靠边期的花蕾取样标准以及基因型和单核期花药内源激素含量对小孢子脱分化和胚胎发生过程有显著影响的结果。Corral-Martínez 和 Seguí-Simarro^[66-67]从茄子小孢子培养中获得了愈伤组织,有 60% 的 DH 植株可以再生,他们在游离小孢子培养过程中以单独或者组合的方式加入了 6-BA、NAA、Abasic acid (ABA)、Polyethylene glycol(PEG)和阿拉伯半乳糖蛋白,结果阐明了这些外源物质对小孢子胚胎发生的调节作用,对提高茄子游离小孢子的培养效率有指导作用。朱朝辉等^[68]认为黑暗静止培养条件下,定时更换部分培养基有利于茄子小孢子愈伤组织诱导与生长,在 MS+ZT 1.5 mg·L⁻¹ + NAA 0.05 mg·L⁻¹ 培养基中小孢子愈伤组织分化率达到 57.78%。

相比较而言,小孢子培养无论是在技术发展还是适用范围以及遗传育种等方面均具有一定的优越性。小孢子离体培养具有较宽的基因型适用范围,其所产生的胚状体均来自小孢子,并且具有自然加倍成二倍体的特点。但由于在小孢子的诱导机制、启动机理、遗传因素等方面缺乏深入的研究以及游离小孢子发育同步性差、不易分化成苗等技术发展不成熟等诸多因素,也同样限制了其在茄子育种中发挥较大的作用。茄子小孢子发育同步性低,愈伤组织诱导率不高,今后需要对小孢子培养本身的发育机理、机制开展一些探究。

2.3 原生质体培养

植物原生质体是指利用特殊手段脱去植物组织细胞壁后剩余的由细胞膜包裹的细胞质以及细胞核等组成的物质,又称细胞原生质团,其保留了细胞一系列特性,细胞结构和生命活力得以保留。在一定特殊条件环境下,会启动细胞壁再生,进而可诱导细胞分裂分化形成新的细胞组织和器官,后经体系转化发育成完整植株。

原生质体是进行遗传操作的理想受体,通过该技术获得体细胞杂种,不仅可以克服杂交不亲和与杂种不育的问题,同时可以实现优良基因在种间转移。“细胞融合”技术是建立在原生质体培养的基础上发展成熟的一门重要学科,其利用细胞的全能性

使两个细胞的染色体发生融合的细胞再生细胞壁,进而分化发育形成新植株,经过选择后创制出新品种。目前,茄属植物已经通过叶肉^[69-73]、茎^[74]、子叶^[75]、叶柄^[76]等材料获得原生质体并培养出再生植株。茄子主要通过愈伤组织成苗^[77],连勇等^[78]利用原生质体电融合技术,经愈伤组织培养获得栽培六叶茄和两个近缘野生种的种间四倍体再生植株,为茄子抗病育种提供新材料。郭欢欢等^[79]通过对酶解液浓度、酶解时间以及电融合参数进行研究,建立了野生茄子蒜芥茄和水茄的原生质体融合技术体系。

原生质体培养技术的成熟发展是实现茄远缘物种之间的体细胞杂交、遗传物质的种间交换、改良物种遗传特性技术的基础,培育出新物种的几率大大提升。同时,该技术的成熟发展为推动茄品质改良和提高茄产量奠定了理论基础,大大开辟了茄子育种的新领域。

3 基因工程

3.1 抗性基因转移

在生产栽培中,茄子易受到病虫害和不良环境影响,造成产量和品质下降,因而培育优质高产且具有抗性的茄子品种具有重要意义。通过转基因技术可以将抗性基因转移到茄子中,为茄子选育抗虫、抗病和抗逆品种开辟新途径。茄子转基因主要以根和子叶作为外植体,采用农杆菌介导转化,目前国内外已公布了一些体系^[80-85]。

茄子抗性基因转化方面的报道有限,主要是目前还缺乏高效的茄子遗传转化体系,转化效率也远远低于同科属的番茄和马铃薯,因此多数研究集中在对抗性基因(抗虫、抗菌、抗除草剂、耐盐等)的初步验证,获得的阳性植株也较少。Arpaia等^[86]将 *cryIIIb* 基因成功转入茄子中,验证发现转基因植株可以有效控制马铃薯甲虫(CPB)的侵害;Jelenkovic^[87]和 Acciarri^[88]等分别将 *cryIIIa* 基因和 *cryIAb* 基因导入茄子,均得到了抗性植株;邹克琴等^[89]利用几丁质酶和抗菌肽 D 双价基因遗传转化茄子,获得 2 株抗菌植株;林栖凤等^[90]利用花粉管通道法将海滩耐盐红树的 DNA 导入茄子中,并筛选出了耐盐性的转化株;以茄子愈伤组织为材料,王风华等^[91]获得了具有抗除草剂基因(*bar*)的阳性植株;Prabhavathi等^[81]获得了对盐胁迫、低温胁迫和渗透胁迫的逆境耐受性显著增强的含 *mtlD* 基因茄转化株系。孟平红等^[92]构建了含冷诱导转录因子 *CBF3* 的植物表达载体,并获得 2 株耐冷植株。利用 pMAT21 载体, Darwish 等^[93]以子叶为外植体获

得了可以直接应用于育种的无抗性标记基因的转基因植株。张明华等^[94]将抗根结线虫 *Bt cry6A* 基因转入茄子,共获得 56 株 Kan 抗性植株,其中有 15 株为转基因植株,明显提高了对南方根结线虫的抗性。Papolu 等^[95]将 *OC-14D86* 基因转入茄子,其后代株系对南方根结线虫的抗性有明显增强。李想等^[96]通过农杆菌介导,将 *GUS* 基因导入茄,获得了 7 株 Hyg B 抗性植株,通过检测鉴定均为转基因植株,最高转化率为 10%,可作为转基因理想受体材料。胡鑫等^[97]以“三月茄”子叶作为外植体,通过筛选激素和抗生素配比,得出农杆菌介导的茄子遗传转化率达到 11.02%,下胚轴为外植体的转化率达到 4.38%。尚静^[98]以“卜丽卡”茄子的下胚轴为外植体将具有耐盐功能的转录因子进行遗传转化,结果表明有 22 株茄子为 *SmWRKY40* 阳性植株,对其功能初步鉴定发现 *SmWRKY40* 转录因子在茄子耐盐中具有正调控作用。*SmMsrA*、*SmWRKY40* 等基因的转基因植株的获得,可为茄子基因功能的研究与基因编辑奠定基础。

3.2 单性结实基因工程

单性结实是茄子的一个优良性状,成为新品种选育追求的重要目标之一。目前,对于茄子单性结实的研究,已从对单性结实性状的生理基础、遗传规律的调查分析逐渐转变为对单性结实分子机理的探究,如筛选与单性结实相关的关键基因,基因的克隆、表达模式分析和功能验证等,可为茄子新品种选育技术提供新的思路,有望实现新的突破^[99]。

目前获得途径主要有植物激素诱导、培育三倍体以及利用自然变异和基因工程手段,并取得了较好的进展,也选育出一些单性结实新品种。传统方法存在品种少和诱导条件不易等问题,相比之下,基因工程是最为有效的技术。Rotino 等^[100]采用转基因技术,将生长素合成基因导入茄子中,获得的株系单性结实坐果率为 100%,该方法已得到广泛利用^[101-102]。

目前,茄子基因组草图的完成意味着茄子分子遗传育种研究迎来新的开始,多个与茄子单性结实相关的功能基因被陆续克隆,人们对其生物学功能的挖掘也在不断深入。杜黎明等^[103]通过 RT-PCR 和 cDNA 末端快速扩增技术(rapid amplification of cDNA ends, RACE)从杭州红茄中获得了一个与生长素响应因子家族基因 *SmARF8*,其与拟南芥和番茄单性结实调控基因都具有较高的相似性。张伟伟等^[104]以 SSH 文库差异表达 EST 片段 Z732 为基础,通过 RACE 技术克隆了茄子生长素诱导基因

SmIAA19 全长, 基因表达分析表明该基因可能与茄子单性结实有关。张立慧^[105]克隆得到茄子中 *ARF6*、*ARF7*、*ARF8*、*GH3.6* 和 *IAA9* 共 5 个与单性结实相关的生长素类基因, 通过基因差异表达分析, 得出 3 个基因 *ARF6*、*ARF7* 和 *ARF8* 主要参与了 D-7-1 品系的花发育与坐果。

传统的生物技术培育的作物品种中已逐渐被通过基因转化技术诱导产生抗病、抗虫、高产等具有优良性状的新品种所取代。在今后的茄子育种工作中, 将逐步开展有关分子标记和功能基因定位、克隆和转化的研究, 通过分子标记辅助选择和 QTL 作图构建基因图谱, 在引进和收集茄种质资源的基础上鉴定其亲缘关系的远近, 有利于定向育种, 高效选育新品种。

综上所述, 目前国内外茄子细胞工程技术已取得了一系列的研究进展, 也证实了细胞学、组织培养和转基因等技术手段在茄子遗传育种应用中具有广泛的前景。

4 展望

茄子细胞工程技术中依然存在很多值得研究和解决的问题, 笔者总结出以下 3 个方面: (1) 细胞学分析方面: 茄子的核型分析相关研究较少; 栽培茄品种之间核型差异和外部形态差异二者之间的相关性和机理尚未明确; 茄子种间和种内的遗传进化关系研究与应用等需要进一步深入研究。(2) 组织培养方面: 为拓展茄子的遗传背景, 加快茄子新品种选育, 需加强原生质体融合、花药与小孢子培养技术等和常规育种技术相结合开展种质创新; 茄子雄配子的启动机理和高频率诱导机制。(3) 基因工程方面: 加强茄子野生近缘种抗病基因的深入挖掘; 挖掘茄子重要性状相关基因的克隆; 高效的茄子受体再生途径和稳定的遗传转化体系、茄子基因编辑技术。对细胞工程技术的深入研究和不断进步必将弥补常规育种的不足, 可有效促进茄子新品种的选育及相关品种改良的发展。

参考文献:

- [1] KAUR S, BAL S S, SINGH G, et al. Management of brinjal shoot and fruit borer, *Leucinodes orbonalis* guenee through net house cultivation[J]. *Acta Hort*, 2004(659): 345-350.
- [2] SIDHU M K, DHATT A S, SIDHU G S. Plant regeneration in eggplant (*Solanum melongena* L.): a review[J]. *Afr J Biotechnol*, 2014, 13(6): 714-722.
- [3] 李建军, 杨影丽, 范念斯, 等. 雪莲果染色体数目及核型分析[J]. 河南师范大学学报(自然科学版), 2011, 39(2): 131-134.
- [4] KRISHNAPPA D G, CHENNAVEERAIHAH M S. Cytotaxonomy of *Solanum indicum* complex[J]. *Cytologia*, 1975, 40(2): 323-331.
- [5] 吴世斌, 李正理. 几种野生茄和栽培茄染色体形态的初步研究[J]. 植物学报, 1985, 27(4): 361-369.
- [6] FUKUOKA H, YAMAGUCHI H, NUNOME T, et al. Accumulation, functional annotation, and comparative analysis of expressed sequence tags in eggplant (*Solanum melongena* L.), the third pole of the genus *Solanum* species after tomato and potato[J]. *Gene*, 2010, 450(1/2): 76-84.
- [7] SAKATA Y, NISHIO T, MATTHEWS P J. Chloroplast DNA analysis of eggplant (*Solanum melongena*) and related species for their taxonomic affinity[J]. *Euphytica*, 1991, 55(1): 21-26.
- [8] 詹园凤, 党选民, 曹振木, 等. 3 种野生茄和 1 个栽培茄的核型分析[J]. 热带作物学报, 2009, 30(4): 456-460.
- [9] 张赞平, 侯小改. 栽培茄的核型分析[J]. 河南农业大学学报, 1996, 30(3): 279-283.
- [10] ACOSTA M C, BERNARDELLO G, GUERRA M, et al. Karyotype analysis in several South American species of *Solanum* and *Lycianthes rantonnei*(Solanaceae)[J]. *Taxon*, 2005, 54(3): 713-723.
- [11] CHIARINI F, BERNARDELLO G. Karyotype studies in South American species of *Solanum* subgen. *Leptostemonum* (Solanaceae)[J]. *Plant Biol (Stuttg)*, 2006, 8(4): 486-493.
- [12] BERNARDELLO L M, HEISER C B, PIAZZANO M. Karyotypic studies in *Solanum* section *Lasiocarpa*(Solanaceae)[J]. *Am J Bot*, 1994, 81(1): 95-103.
- [13] TRIVEDI R N, SINHA A K. Karyomorphological studies in three populations of *Solanum surattense*, a weed[J]. *Cytologia*, 1986, 51(1): 157-161.
- [14] 詹园凤, 党选民, 曹振木, 等. 两个茄子品种的核型分析[J]. 植物遗传资源学报, 2009, 10(2): 283-285.
- [15] 林珊珊. 三种秋茄核型分析及种子萌发、苗期耐热研究[D]. 佛山: 佛山科学技术学院, 2019.
- [16] NEELAM K, RAWAT N, TIWARI V K, et al. Introgression of group 4 and 7 chromosomes of *Ae. Peregrina* in wheat enhances grain iron and zinc density[J]. *Mol Breed*, 2011, 28(4): 623-634.
- [17] 王玲, 宁顺斌, 宋运淳, 等. 荧光原位杂交技术的发展与应用[J]. 植物学报, 2000, 42(11): 1101-1107.
- [18] COLLONNIER C, FOCK I, KASHYAP V, et al. Applications of biotechnology in eggplant[J]. *Plant Cell Tissue Organ Cult*, 2001, 65(2): 91-107.
- [19] 曹必好, 雷建军, 王勇, 等. 栽培茄与野生茄种间杂交研究[J]. 园艺学报, 2009, 36(2): 209-214.
- [20] 叶文宣. 体细胞杂种的染色体组成鉴定和农艺性状调查[D]. 武汉: 华中农业大学, 2013.
- [21] LOU Q F, IOVENE M, SPOONER D M, et al. Evolution of chromosome 6 of *Solanum* species revealed by comparative fluorescence in situ hybridization mapping[J]. *Chromosoma*, 2010, 119(4): 435-442.
- [22] HE L, LIU J, TORRES G A, et al. Interstitial telomeric repeats are enriched in the centromeres of chromosomes in

- Solanum* species[J]. Chromosome Res, 2013, 21(1): 5-13.
- [23] GLEDDIE S, KELLER W, SETTERFIELD G. Somatic embryogenesis and plant regeneration from leaf explants and cell suspensions of *Solanum melongena* (eggplant)[J]. Can J Bot, 1983, 61(3): 656-666.
- [24] PRAKASH D P, DEEPALI B, RAMACHANDRA Y L, et al. Effect of age and size of hypocotyl explant on in vitro shoot regeneration in eggplant[J]. J Horticult Sci, 2012, 7: 203-205.
- [25] SHARMA P, RAJAM M V. Spatial and temporal changes in endogenous polyamine levels associated with somatic embryogenesis from different hypocotyl segments of eggplant (*Solanum melongena* L.)[J]. J Plant Physiol, 1995, 146(5/6): 658-664.
- [26] MAGIOLI C, ROCHA A P M, DE OLIVEIRA D E, et al. Efficient shoot organogenesis of eggplant (*Solanum melongena* L.) induced by thidiazuron[J]. Plant Cell Rep, 1998, 17(8): 661-663.
- [27] 姜悬云, 鲍生有, 刘军, 等. 茄子高效离体再生体系的优化建立[J]. 分子植物育种, 2018, 16(16): 5369-5375.
- [28] 余波澜, 张利明, 孙勇如, 等. 茄子子叶和下胚轴的组织培养和植株再生[J]. 植物生理学通讯, 2003, 39(4): 317-320.
- [29] 杨志晶. 茄子组织培养高效再生体系初探与 *WRKY* 基因的表达分析[D]. 昆明: 云南大学, 2020.
- [30] YAMADA T, NAKAGAWA H, SINOTO Y. Studies on the differentiation in cultured cells. I: Embryogenesis in three strains of *Solanum callus*[J]. Bot Mag Tokyo, 1967, 80: 68-74.
- [31] SWAMYNATHAN B, NADANAKUNJIDAM S, RAMAMOURTI A, et al. In-vitro plantlet regeneration through somatic embryogenesis in *Solanum melongena* (thengaithittu variety)[J]. Acad J Plant Sci, 2010, 3(2): 64-70.
- [32] ALICCHIO R, GROSSO E, BOSCHIERI E. Tissue cultures and plant regeneration from different explants in six cultivars of *Solanum melongena*[J]. Experientia, 1982, 38(4): 449-450.
- [33] SHARMA P, RAJAM M V. Genotype, explant and position effects on organogenesis and somatic embryogenesis in eggplant (*Solanum melongena* L.)[J]. J Exp Bot, 1995, 46(1): 135-141.
- [34] ZAYOVA E, NIKOVA V, ILIEVA K, ILIEVA K, et al. Callusogenesis of eggplant (*Solanum melongena* L.)[J]. Comptes rendus de l'Academie bulgare des Sciences, 2008, 61(11): 1485-1488.
- [35] FÁRI M, NAGY I, CSÁNYI M, et al. *Agrobacterium* mediated genetic transformation and plant regeneration via organogenesis and somatic embryogenesis from cotyledon leaves in eggplant (*Solanum melongena* L. cv. 'Kecskeméti lila')[J]. Plant Cell Rep, 1995, 15(1/2): 82-86.
- [36] TARRÉ E, MAGIOLI C, MARGIS-PINHEIRO M, et al. In vitro somatic embryogenesis and adventitious root initiation have a common origin in eggplant (*Solanum melongena* L.)[J]. Rev Bras Bot, 2004, 27(1): 79-84.
- [37] HUDA A K M N, BARI M A, RAHMAN M, et al. Somatic embryogenesis in two varieties of eggplant (*Solanum melongena* L.)[J]. Research J Bot, 2007, 2(4): 195-201.
- [38] MACCHIA F, SCARAMUZZI F, PORCELLI S. Organogenesis and propagation in vitro of F1 hybrid of *Solanum melongena* L. from vegetative segments[J]. Acta Horticult, 1983(131): 117-124.
- [39] GLEDDIE S C, KELLER W A, SETTERFIELD G. Somatic embryogenesis and plant regeneration from protoplasts of eggplant (*Solanum melongena* L.) [M]// Protoplasts 1983. Basel: Birkh\u00e4user Basel, 1983: 66-67.
- [40] RAO P V L, SINGH B. Plantlet regeneration from encapsulated somatic embryos of hybrid *Solanum melongena* L.[J]. Plant Cell Rep, 1991, 10(1): 7-11.
- [41] JAHAN M A A, SYED H. In vitro multiple shoot regeneration from different seedling explants of *Solanum indicum* Linn[J]. Bangladesh J Sci Ind Res, 1998, 33(1): 117-122.
- [42] FRANKLIN G, SHEEBA C J, LAKSHMI SITA G. Regeneration of eggplant (*Solanum melongena* L.) from root explants[J]. In Vitro Cell Dev Biol-Plant, 2004, 40(2): 188-191.
- [43] MIR K A, DHATT A S, SANDHU J S, GOSAL S S. Genotype, explant and culture medium effects on somatic embryogenesis in eggplant (*Solanum melongena* L.)[J]. Horticult Environ Biotechnol, 2008, 49: 182-187.
- [44] 赵福宽, 高遐虹, 程继鸿, 等. 激素与低温胁迫在茄子叶片组织培养中的效应[J]. 北京农学院学报, 2001, 16(2): 27-30.
- [45] KHATUN F, MEAH M B, NASIRUDDIN K M. Regeneration of eggplant through anther culture[J]. Pak J Biol Sci, 2005, 9(1): 48-53.
- [46] 程继鸿, 赵福宽, 高遐虹, 等. 弱光条件下茄子花药培养再生体系的建立[J]. 北京农学院学报, 2001, 16(2): 22-26.
- [47] 邹建. 茄子(*Solanum melongena* L.)花药离体培养及其形态发生机制的初步研究[D]. 重庆: 西南农业大学, 2004.
- [48] 李亚荣. 茄子(*Solanum melongena* L.)花药离体培养的研究[D]. 重庆: 西南大学, 2008.
- [49] 刘独臣, 房超, 李跃进, 等. 茄子花药培养诱导胚状体成苗[J]. 西南农业学报, 2008, 21(6): 1643-1646.
- [50] 潘羽丰. 茄子(*Solanum melongena* L.)花药培养诱导单倍体植株的研究[D]. 重庆: 西南大学, 2012.
- [51] 方岩岩. 水茄植株再生及其与紫长茄杂交 F1 代花药培养的研究[D]. 南宁: 广西大学, 2013.
- [52] ROTINO G L. Anther culture in eggplant (*Solanum melongena* L.)[J]. Methods Mol Biol, 2016, 1359: 453-466.
- [53] 王利英, 乔军, 石瑶, 等. 基因型对茄子小孢子培养诱导单倍体的影响[J]. 山西农业科学, 2016, 44(3): 284-287.
- [54] 霍秋月. 茄子种间杂交及其 F1 代花药培养[D]. 扬州: 扬州大学, 2017.
- [55] 金丹丹, 梁美霞, 谢立波, 等. 茄子组织培养与基因工程研究进展[J]. 分子植物育种, 2004, 2(6): 861-866.
- [56] DUNWELL J M. Haploids in flowering plants: origins and exploitation[J]. Plant Biotechnol J, 2010, 8(4): 377-424.

- [57] GERMANÀ M A. Gametic embryogenesis and haploid technology as valuable support to plant breeding[J]. Plant Cell Rep, 2011, 30(5): 839-857.
- [58] 范适, 刘志敏, 连勇. 茄子小孢子培养及其在育种中的应用[J]. 湖南生态科学学报, 2014, 1(4): 50-54.
- [59] KYO M, HARADA H. Studies on conditions for cell division and embryogenesis in isolated pollen culture of *Nicotiana rustica*[J]. Plant Physiol, 1985, 79(1): 90-94.
- [60] 董艳荣, 龚义勤. 茄果类蔬菜花药和花粉培养研究进展[J]. 长江蔬菜, 2001(5): 30-32.
- [61] SHARIATPANAH M E, BAL U, HEBERLE-BORS E, et al. Stresses applied for the re-programming of plant microspores towards in vitro embryogenesis[J]. Physiol Plant, 2006, 127(4): 519-534.
- [62] 顾淑荣. 茄子(*Solanum melongena* L.)花粉粒离体培养获得植株[J]. 植物学报, 1979, 21(1): 30-35, 102.
- [63] MIYOSHI K. Callus induction and plantlet formation through culture of isolated microspores of eggplant (*Solanum melongena* L.)[J]. Plant Cell Rep, 1996, 15(6): 391-395.
- [64] 宋彦平, 申书兴, 王彦华, 等. 茄子游离小孢子培养获得愈伤组织的研究[J]. 河北农业大学学报, 2007, 30(3): 32-35.
- [65] 张玉苗. 不同茄子材料小孢子脱分化及影响因子研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2011.
- [66] CORRAL-MARTÍNEZ P, SEGUÍ-SIMARRO J M. Efficient production of callus-derived doubled haploids through isolated microspore culture in eggplant (*Solanum melongena* L.)[J]. Euphytica, 2012, 187(1): 47-61.
- [67] CORRAL-MARTÍNEZ P, SEGUÍ-SIMARRO J M. Refining the method for eggplant microspore culture: effect of abscisic acid, epibrassinolide, polyethylene glycol, naphthaleneacetic acid, 6-benzylaminopurine and arabinogalactan proteins[J]. Euphytica, 2014, 195(3): 369-382.
- [68] 朱朝辉, 赵瑞丽, 曾小玲, 等. 茄子小孢子再生体系的优化[J]. 广东农业科学, 2020, 47(8): 15-21.
- [69] SAXENA P K, GILL R, RASHID A, et al. Plantlet formation from isolated protoplasts of *Solanum melongena* L.[J]. Protoplasma, 1981, 106(3/4): 355-359.
- [70] SAXENA P K, GILL R, RASHID A. Optimal conditions for plant regeneration from mesophyll protoplasts of eggplant (*Solanum melongena* L.)[J]. Sci Hortic, 1987, 31(3/4): 185-194.
- [71] KIM H H, SHIN U D. Plant regeneration from mesophyll protoplasts culture of *Solanum sisymbriifolium*[J]. J Plant Biotechnol, 2005, 7(3): 169-174.
- [72] ODA N, ISSHIKI S, SADOHARA T, et al. Establishment of protoplast culture of *Solanum sisymbriifolium*[J]. J Fac Agric Kyushu Univ, 2006, 51(1): 63-66.
- [73] BORGATO L, PISANI F, FURINI A. Plant regeneration from leaf protoplasts of *Solanum virginianum* L. (Solanaceae)[J]. Plant Cell Tiss Organ Cult, 2007, 88(3): 247-252.
- [74] GLEDDIE S, KELLER W A, SETTERFIELD G. Production and characterization of somatic hybrids between *Solanum melongena* L. and *S. sisymbriifolium* lam[J]. Theor Appl Genet, 1986, 71(4): 613-621.
- [75] 张兰英, 李耿光. 两种茄子子叶诱导胚状体和植株再生[J]. 植物生理学通讯, 1987, 23(4): 56.
- [76] RIZZA F, MENNELLA G, COLLONNIER C, et al. Androgenic dihaploids from somatic hybrids between *Solanum melongena* and *S. aethiopicum* group Gilo as a source of resistance to *Fusarium oxysporum* f. sp. melongenae[J]. Plant Cell Rep, 2002, 20(11): 1022-1032.
- [77] 许勇, 王福钧, 周长久. 粘毛茄子叶原生质体的培养及植株再生[J]. 植物生理学通讯, 1990, 26(4): 27-30.
- [78] 连勇, 刘富中, 冯东昕, 等. 应用原生质体融合技术获得茄子种间体细胞杂种[J]. 园艺学报, 2004, 31(1): 39-42.
- [79] 郭欢欢, 陈钰辉, 杨锦坤, 等. 野生茄子原生质体制备及电融合条件研究[J]. 中国蔬菜, 2019(7): 51-55.
- [80] 张兴国, 刘元清, 杨正安, 等. 茄子遗传转化体系的建立[J]. 西南农业大学学报, 2001, 23(3): 233-234.
- [81] PRABHAVATHI V, YADAV J, KUMAR P, et al. Abiotic stress tolerance in transgenic eggplant (*Solanum melongena* L.) by introduction of bacterial mannitol phosphodehydrogenase gene[J]. Mol Breed, 2002, 9(2): 137-147.
- [82] SINGH A K, VERMA S S, BANSAL K C. Plastid transformation in eggplant (*Solanum melongena* L.)[J]. Transgenic Res, 2010, 19(1): 113-119.
- [83] SUBRAMANYAM K, RAJESH M, JAGANATH B, et al. Assessment of factors influencing the *Agrobacterium*-mediated in planta seed transformation of brinjal (*Solanum melongena* L.)[J]. Appl Biochem Biotechnol, 2013, 171(2): 450-468.
- [84] 包崇来, 杜黎明, 胡天华, 等. 紫红线茄转基因体系优化及 *SmARF8* 基因 RNA 干扰表达载体的遗传转化[J]. 园艺学报, 2014, 41(6): 1105-1114.
- [85] 张国刚, 韩洪强, 蒋明敏, 等. 茄子再生体系研究[J]. 分子植物育种, 2014, 12(4): 810-816.
- [86] ARPAIA S, MENNELLA G, ONOFARO V, et al. Production of transgenic eggplant (*Solanum melongena* L.) resistant to Colorado potato beetle (*Leptinotarsa decemlineata* say)[J]. Theor Appl Genet, 1997, 95(3): 329-334.
- [87] JELENKOVIC G, BILLINGS S, CHEN Q, et al. Transformation of eggplant with synthetic cryIIIA gene produces a high level of resistance to the Colorado potato beetle[J]. Jashs, 1998, 123(1): 19-25.
- [88] ACCIARRI N, VITELLI G, ARPAIA S, et al. Transgenic resistance to the Colorado potato beetle in bt-expressing eggplant fields[J]. HortScience, 2000, 35(4): 722-725.
- [89] 邹克琴, 张银东, 王金宇, 等. 几丁质酶和抗菌肽 D 双价基因转化茄子的研究[J]. 热带作物学报, 2001, 22(2): 57-61.
- [90] 林栖凤, 邓用川, 黄薇, 等. 红树 DNA 导入茄子获得耐盐性后代的研究[J]. 生物工程进展, 2001, 21(5): 40-44.
- [91] 王凤华, 李光远, 陈双臣, 等. 农杆菌介导的茄子愈伤组织遗传转化研究[J]. 河南农业大学学报, 2009, 43(4): 389-392.
- [92] 孟平红, 万发香, 王永清, 等. 冷诱导转录因子 CBF3 转化茄子的初步研究[J]. 中国蔬菜, 2013(10): 36-43.
- [93] DARWISH N A, KHAN R S, NTUI V O, et al. Generation of selectable marker-free transgenic eggplant resistant to *Alternaria solani* using the R/RS site-specific recombination system[J]. Plant Cell Rep, 2014, 33(3): 411-421.

- [94] 张明华, 陈钰辉, 刘富中, 等. 农杆菌介导抗根结线虫 Bt cry6A 基因转化茄子的研究[J]. 核农学报, 2015, 29(4): 685-691.
- [95] PAPOLU P K, DUTTA T K, TYAGI N, et al. Expression of a cystatin transgene in eggplant provides resistance to root-knot nematode, *Meloidogyne incognita*[J]. Front Plant Sci, 2016, 7: 1122.
- [96] 李想, 张峻, 周露, 等. 农杆菌介导茄子叶转基因体系的建立[J]. 上海交通大学学报(农业科学版), 2018, 36(4): 1-6.
- [97] 胡鑫, 蓝宇涵, 陈思焱, 等. 农杆菌介导的三月茄遗传转化体系的优化研究[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2020, 42(9): 57-62.
- [98] 尚静. 茄子 SmWRKY40 转录因子耐盐功能的初步鉴定[D]. 上海: 上海海洋大学, 2021.
- [99] 陈霞, 张敏, 谈杰, 等. 茄子单性结实生理及遗传机制研究进展[J]. 湖北农业科学, 2018, 57(10): 5-8, 17.
- [100] ROTINO G L, PERRI E, ZOTTINI M, et al. Genetic engineering of parthenocarpic plants[J]. Nat Biotechnol, 1997, 15(13): 1398-1401.
- [101] MEZZETTI B, LANDI L, PANDOLFINI T, et al. The defH9-iaaM auxin-synthesizing gene increases plant fecundity and fruit production in strawberry and raspberry[J]. BMC Biotechnol, 2004, 4: 4.
- [102] ROTINO G L, ACCIARRI N, SABATINI E, et al. Open field trial of genetically modified parthenocarpic tomato: seedlessness and fruit quality[J]. BMC Biotechnol, 2005, 5: 32.
- [103] 杜黎明, 毛伟海, 包崇来, 等. 茄子生长素响应因子 *SmARF8* 的克隆与分析[J]. 中国农业科学, 2009, 42(7): 2434-2441.
- [104] 张伟伟, 刘富中, 张映, 等. 茄子生长素诱导基因 *SmlAA19* 的克隆和分析[J]. 园艺学报, 2014, 41(11): 2231-2240.
- [105] 张立慧. 茄子单性结实相关基因的克隆及表达分析[D]. 重庆: 西南大学, 2016.

安徽农业大学在胞外漆酶诱导腐殖化改善畜禽粪便堆肥终产物农艺质量研究方面取得重要进展

近日, 国际高水平期刊《环境科学与技术》(中科院一区, IF₂₀₂₁= 9.028) 刊发我校资源与环境学院与安徽大学资源与环境工程学院合作开展的题为“胞外漆酶诱导腐殖化在畜禽粪便堆肥中的应用研究”。该论文探索了胞外漆酶诱导腐殖化过程及维持酶活性和原位生产的优化策略, 揭示了胞外漆酶在畜禽粪便(LM)堆肥中消除有毒微污染物和封存营养物质的关键机制。研究结果有助于推进胞外酶在提高 LM 堆肥终产物农艺质量中的应用, 为基于酶促腐殖化反应规避污染风险、固定有机碳和保护农业生产等提供科学依据。

传统 LM 堆肥会导致大量的有机碳、氮被微生物代谢, 造成营养物质流失及 CO₂ 和 NH₃ 等温室气体释放。此外, 由于雌激素、抗生素和重金属等有毒微污染物的生物可利用率较低, 它们在 LM 堆肥中难以被微生物完全降解或转化, 可随粪肥还田进入农业生态系统, 并通过食物链传播危害动物和人群健康。胞外酶诱导腐殖化有望彻底消除 LM 中有毒微污染物, 并促进堆肥产品中腐殖化产物的生成, 进而提高堆肥终产物的农艺质量。但是, 国际学术界关于胞外漆酶诱导腐殖化在 LM 堆肥中应用的研究仍缺乏系统性报道。

针对传统 LM 堆肥造成的养分损失和有毒微污染物残留等环境问题, 本论文系统地提出利用胞外漆酶诱导腐殖化改善 LM 堆肥终产物的农艺质量。采用酶固定化技术、调节内/外源产漆酶微生物活性和丰度等, 均可促进 LM 堆肥中雌激素、抗生素和重金属等有毒微污染物的消除和转化, 以及腐殖质、类腐殖质和类生长素等腐殖化产物的生成, 进而提高堆肥产品的农艺质量。图片展示了胞外漆酶在 LM 堆肥中发挥氧化分解和自由基聚合的双功能机制。该机制有利于加速微污染物解毒、促进酚类和氨基酸等小分子底物腐殖化和再聚合。与传统 LM 堆肥相比, 胞外漆酶诱导 LM 堆肥产生更加稳定、有益、无害的腐殖化产物, 它们可作为土壤肥料/调节剂, 助益植物生长发育和农作物增产增收。然而, 其结构-功能与植物促生长的相关机制仍需仔细破译。

安徽农业大学为唯一通信单位, 我校孙凯副教授为通信作者, 司友斌教授为共同参与作者。该研究工作获得国家自然科学基金项目(41907314)和安徽省教育厅自然科学基金项目(KJ2021A0136 和 KJ2021A0083)的共同资助。