

新中国果树科学研究70年——柑橘

郭文武,叶俊丽,邓秀新*

(华中农业大学柑橘研究所·园艺植物生物学教育部重点实验室·园艺林学学院,武汉 430070)

摘要:新中国成立70年来,我国柑橘科学研究在人才培养、硬件平台、全产业链基础理论创新与技术研发等方面均取得了重要进展,有力支撑了我国柑橘产业的健康快速和可持续发展。笔者全面梳理了我国柑橘科学研究发展历程及取得的主要成绩,总结了近10年我国柑橘在种质资源与遗传改良、栽培模式创新与品质提升、病虫害防控、采后技术与加工、省力化机械研发与应用、产业经济等方面的研究进展,并提出了未来的重点发展方向。

关键词:柑橘;新中国;70年;科学研究;回顾;展望

中图分类号:S666

文献标志码:A

文章编号:1009-9980(2019)10-1264-09

Fruit scientific research in New China in the past 70 years: *Citrus*

GUO Wenwu, YE Junli, DENG Xiuxin*

(Institute of Citrus Science/Key Laboratory of Horticultural Plant Biology of Ministry of Education/College of Horticulture & Forestry Sciences, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, Hubei, China)

Abstract: China citrus research has achieved great progress in its talent cultivation, hardware support, basic research and technology innovation covering the whole citrus industry chains since the founding of the People's Republic of China in 1949. The achievement has promoted the rapid, healthy and sustainable development of Chinese citrus industry. This review summarizes the development history and main achievements of citrus research in the past 70 years. The recent progress in citrus germplasm evaluation and genetic improvement, cultivation technology, prevention and control of diseases and insect pests, fruit storage and processing, mechanized production and industrial economics are also reviewed. The key directions for future citrus research are previewed.

Key words: *Citrus*; New China; 70 years; Scientific research; Review; Prospect

柑橘是世界第一大类水果,也是我国南方栽培面积最广、经济地位最重要的果树。新中国成立以来,尤其是改革开放40年来,我国柑橘产业迅速发展,栽培面积从1978年的17.8万hm²发展到2017年的268.88万hm²,增长了约15倍,总产量从1978年的38.3万t发展到2017年的3853.32万t,增长了近100倍^[1]。根据《中国农业统计资料》数据,我国柑橘面积和产量自2007年超过巴西以来,一直稳居世界首位。

柑橘产业发展丰富了果品市场,在乡村振兴和精准扶贫方面发挥着重要作用。柑橘育种成绩喜人,市场品种丰富多样;品种布局合理,鲜果供应期明显拉开,基本实现周年供应;果实品质大幅提升,

消费者满意度持续提高;柑橘产业整体竞争力明显增强,经济效益稳中有升,农民种植积极性高涨。柑橘产业已成为我国农村经济社会发展,尤其是南方山区、库区和老区农民脱贫致富的支柱产业。

柑橘产业大发展与科技进步密不可分。新中国成立70年来,我国柑橘研究取得了长足进步,研究领域已覆盖柑橘全产业链,涉及种质资源、遗传育种、栽培生理、病虫害防控、采后技术与加工、果园机械化以及产业经济等研究方向,成果丰硕,推动了柑橘科技进步和产业发展。笔者总结了新中国成立70年来我国柑橘科学研究的发展历程、主要成绩以及各研究方向的主要进展,并提出了未来的重点研究领域。

收稿日期:2019-08-20 接受日期:2019-09-27

基金项目:国家自然科学基金创新研究群体项目(31521092);国家现代农业(柑橘)产业技术体系项目(CARS-26)

作者简介:郭文武,男,博士,教授,主要从事柑橘细胞工程与遗传改良研究。Tel: 027-87281543, E-mail: guoww@mail.hzau.edu.cn

*通信作者 Author for correspondence. Tel: 027-87281712, E-mail: xxdeng@mail.hzau.edu.cn

1 我国柑橘研究发展历程

我国柑橘科学研究伴随着果树学科发展而逐步壮大。20世纪20年代末,吴耕民、孙云蔚、曲泽洲、章文才等果树学者陆续回国,把国外的果树学理论和技术引入中国,与国内同事一起,推动了中国早期果树学研究发展,开辟了果树遗传育种、果树生理学、果树营养学等现代果树研究领域,在果树学人才培养中发挥了重要作用^[1]。1934年,被誉为“中国柑橘之父”的章文才先生在《中国园艺学会会刊》发表了国内第一篇用乙烯处理柑橘使其提前着色成熟的学术论文。在此期间,他还编著了《实用柑橘栽培学》,由商务印书馆出版;之后,与同事一起开展柑橘选种工作,选育出少核优良鹅蛋柑品系(后来命名为‘锦橙’)和优良无核红橘品系,并在江津真武场和成都华西坝建立两处母本园,育苗繁殖以推广良种。这是我国最早进行的柑橘选种成果。此后,中国柑橘研究逐渐步入正轨。纵观新中国成立70年来我国柑橘研究的发展历程,大致可分为以下几个阶段。

1.1 起步发展阶段(1949—1978年)

新中国成立后到1978年的30年,是柑橘研究起步发展阶段。这一时期,柑橘种植普遍实行生产队或生产大队集中统一管理的生产模式,柑橘面积增长缓慢,产量长期在低水平徘徊。同时受计划经济的影响,人口多,物质极度短缺,农产品供给远远满足不了需求,柑橘果品不愁销。在此大背景下,当时的柑橘研究主要集中在引种、地方良种挖掘、柑橘资源普查收集保存、柑橘黄龙病调研试验以及柑橘贮藏保鲜研究等方面,对其他方向的研究较少。

引种、良种挖掘和资源普查是该阶段的研究重点。50年代,从日本引种的温州蜜柑在南方各省市区成功种植。50—60年代,发掘了一批地方良种,如‘沙田柚’‘南丰蜜橘’‘锦橙’‘桃叶橙’‘本地早橘’‘冰糖橙’‘大红甜橙’等,加快了柑橘良种化进程,形成了中国柑橘品种的基本结构。60—70年代,老一辈科学家曾勉、贺善文、叶荫民等组织调查小组,历时多年,较全面地普查了中国柑橘种质资源,并收集保存于国家柑橘资源圃。期间,发现了道县野橘、崇义野橘、莽山野橘、莽山野柑、红河大翼橙、云南富民常绿枳等野生资源。70年代以后,选育种工作全面推进,选育出温州蜜柑系列品种,如‘国庆1号’‘国庆4号’;甜橙有‘奉节72-1’‘罗脐35’等^[2]。

黄龙病调研和果实贮藏保鲜研究稍有涉及。随着广东、广西、福建等柑橘产区相继出现黄龙病,有关大学(学院)和农业科研院所从病害命名、病原及发生规律、防治措施等方面展开了调研和研讨。1957年,柑橘黄龙病被列入国内植物检疫对象,并明确提出了划定无黄龙病母本树保护区、建立无病苗圃的防治规划。柑橘贮藏保鲜试验始于上世纪60年代,主要开展了窖藏试验和中草药防腐保鲜试验,并在产区建立起简易通风贮藏库。

1.2 稳步发展阶段(1978—2007年)

1978年至2007年的30年,我国柑橘研究稳步发展,以组织培养、细胞工程、基因工程、分子标记为代表的生物技术开始在柑橘研究中应用。

生物技术研究是这一时期的主要特色。华中农业大学、中国农业科学院柑桔研究所以及广西桂林柑桔研究所等单位较早开展了柑橘脱毒技术研究,建立起组织培养和嫁接相结合的茎尖微芽嫁接技术,培育无病毒柑橘原种,并在国家和地方财政的支持下,建立了柑橘无病毒良种繁育体系。同时,上世纪80年代,我国开始柑橘原生质体再生与融合研究,建立了完整的柑橘细胞工程技术体系;1987年获得我国第一例柑橘原生质体再生植株,而后通过细胞融合创造出一批体细胞杂种。幼胚离体挽救培养技术成功用于柑橘有性杂交群体创制,提高了杂交育种效率,获得了多个杂交组合的子代。我国还建立了以愈伤组织、上胚轴等为外植体的柑橘遗传转化技术。

柑橘引选种工作有序开展。1984年,由章文才、赵学源等组成的柑橘考察团赴美交流,引进12个脐橙品种;筛选出‘朋娜脐橙’、‘纽荷尔脐橙’以及‘奈维林娜脐橙’。1998年,农业部实施柑橘品种引种与示范重大项目(简称“948”项目),持续近10年,引进了近百个当时世界各国的优良品种;筛选出的品种有‘福本脐橙’‘不知火杂柑’‘天草’等。与此同时,20世纪90年代以来,中国以每年平均选育2~3个品种的速度为产业提供良种,自主选育的品种包括‘琯溪蜜柚’(红肉、三红系列品种)‘沙糖橘’‘崑丰脐橙’‘早红脐橙’‘赣南早脐橙’‘金煌杂柑’‘无籽红橘’等^[3]。

柑橘资源收集评价稳步推进。上世纪90年代以来,在全国范围内持续开展柑橘野生、半野生以及农家优异资源收集评价,并利用RAPD、AFLP、

RFLP、SSR等分子标记分析其遗传进化关系,弄清了一些特异资源的来源。

国家还加大了对柑橘产业的宏观指导。一是支持成立了行业学会,中国柑桔学会1993年成立。此后,我国柑橘业界交流日趋活跃,通过每年举办中国柑桔学会学术年会,促进了学术交流和产学研协同发展。二是编制柑橘优势区域规划并不断完善。新世纪初,农业部组织柑橘方面的专家先后编制了三峡库区柑橘产业规划以及全国柑橘优势区域规划,即以我国柑橘生态和生产区划为基础,根据资源禀赋、市场区位、生产规模、产业基础等情况,按照“稳定面积、调整结构”和“相对集中连片”原则,将我国柑橘生产划分为长江上中游柑橘带、赣南-湘南-桂北柑橘带、浙南-闽西-粤东柑橘带和鄂西-湘西柑橘带以及一批特色生产基地,促进了柑橘种植向优势区域集中。

1.3 快速发展阶段(2007年至今)

2007年至今的10余年间,我国柑橘研究步入快车道。2007年底,柑橘产业技术体系作为首批国家现代农业产业技术体系建设试点优先启动,成为我国柑橘研究与国际前沿接轨、与产业无缝对接的重要里程碑。20余名岗位科学家分别负责从品种资源到产业经济学6个不同领域,涉及常规育种、生物技术、病虫害、栽培生理与营养、采后处理与加工、省力化机械、产业经济等研究方向,基本覆盖了柑橘全产业链。柑橘产业技术体系的建立为我国柑橘研究提供了一支稳定的支撑队伍,经费保障有力,研究的问题来自生产实践,在全面提升我国柑橘基础研究水平的同时,也为解决产业实际问题、助推产业高质量发展提供了有力的科技支撑。第11届国际柑橘学大会2008年10月在武汉成功召开以来,我国柑橘研究国际交流与合作日趋活跃,国际影响力日益增强。

柑橘研究从重视产量转向重视果实品质、功能性成分、抗性、果树特有性状等方面^[4]。具体包括果实糖酸、色泽、苦涩味等重要品质性状形成机制,以满足消费者对高品质的需求;从关注产品的初生代谢产物(糖、酸、淀粉等)向关注产品的次生代谢物转变,包括类胡萝卜素、类黄酮和香豆素等,旨在提升果品的营养品质;关注抗性品质研究,特别是抗病性,通过解析柑橘对各种逆境的响应机制,克隆关键基因和进行抗性改良;关注柑橘特有的发育性状,如

短童期、不育性与果实无核、无融合生殖/珠心胚等性状形成机制与调控。

组学技术,尤其是基因组学等大数据、重要园艺性状功能基因发掘等,成为柑橘研究的前沿。我国逐步建立了较完善的基因组、代谢组、生化分析及基因功能研究平台,为柑橘基础理论研究冲击国际前沿提供了重要平台支撑。随着前期创建的杂交群体陆续开花结果,并基于收集的多个自然群体,正向遗传学、BSA-seq、GWAS等以前主要在模式作物上使用的手段开始用于柑橘重要农艺性状关键基因发掘研究。我国柑橘基础研究水平全面提升,在柑橘基因组、果实品质形成机制、基础数据库建设、优异种质创制等方面已形成优势和特色,步入国际同类研究的领先行列。同时,科学研究与技术推广有序进行,技术研发和品种选育全面推进,选育的新品种占世界选育品种的一半;研发推广的无病毒苗木生产技术、甜橙留树保鲜技术、温州蜜柑覆膜增糖和交替结果、黑点病防控、果园运输机械、绿色采后保鲜等系列技术广泛用于产业,提升了柑橘产业整体水平和效益。鲜果供应期明显延长,从7月底到翌年6月,技术上基本实现鲜果周年上市,正朝着周年均衡上市方向迈进。

2 我国柑橘研究取得的主要成绩

新中国成立70年来,尤其是改革开放以来,我国柑橘研究在人才培养、基础研究、科技成果转化等方面成绩显著,有力支撑了我国柑橘产业高质量发展。

2.1 人才培养体系日趋完善,国家重视对柑橘研究的支持

2.1.1 柑橘研究队伍不断壮大,一批高层次人才涌现 1987年底,新中国培养的第一位果树学博士(现被称为“柑橘院士”)的邓秀新在华中农业大学毕业,其博士课题是柑橘原生质体培养再生研究。之后,随着我国果树学博士点逐年增加,从事柑橘研究、教学和生产的研究生持续增长。据不完全统计,目前全国从事柑橘研究的人员近800人,其中,副教授及博士以上的人员有300余人。柑橘研究领域目前有院士1人,国家杰出青年科学基金获得者3人次,教育部长江学者特聘教授3人次;国家万人计划领军人才、全国农业科研杰出人才、四青人才(优秀青年基金、青年长江学者、青年千人、青年拔尖)等人

才计划获得者10余人次。华中农业大学柑橘种质资源研究与遗传改良团队入选国家自然科学基金创新研究群体,并连续3次获资助。

2.1.2 柑橘平台建设和国家资助稳中向好 1960年,农业部批准成立中国农业科学院柑桔研究所(重庆);此后,浙江省柑桔研究所、广西柑桔研究所(现名广西特色作物研究院)等省级柑橘专业研究机构相继成立。我国南方有关大学、省级园艺/果树研究所也设有专门从事柑橘研究的机构;华中农业大学1956年开始柑橘研究,1980年成立柑橘研究室,1992年由农业部批准成立华中农业大学柑橘研究所。中国柑桔(现名中国南方果树)、浙江柑桔等传播柑橘科学技术的学术刊物也相继设立。2000年以来,国家农业部先后投资建设了国家柑橘育种中心、国家柑橘改良中心和分中心、国家果树脱毒中心等一批研究设施和为产业服务的机构,重新投资建

设了柑橘资源圃,在重庆新建了国家柑橘工程技术中心。2008年,农业部和财政部建立了现代农业(柑橘)产业技术体系,每年投入近3000万元用于支持柑橘研究与技术试验示范。同时,国家973、863、科技支撑、重点专项等计划也将柑橘相关内容纳入资助范围。柑橘研究获国家自然科学基金资助的项目数和经费额稳中有升。以面上项目为例,近10年柑橘相关资助项目和资助金额呈平稳增长态势(图1)。过去10年,国家自然科学基金对柑橘研究较大力度的资助包括杰出青年基金2项、重点项目6项、重点国际合作项目3项。各类项目每年共计约30个项目获资助,获资助经费约1500万元/年。根据项目资助单位和资助金额分析,2009—2018年全国有77家单位获资助,柑橘基础研究力量主要集中在华中农业大学、西南大学(中国农业科学院柑桔研究所)、湖南农业大学等高等院校和科研院所。

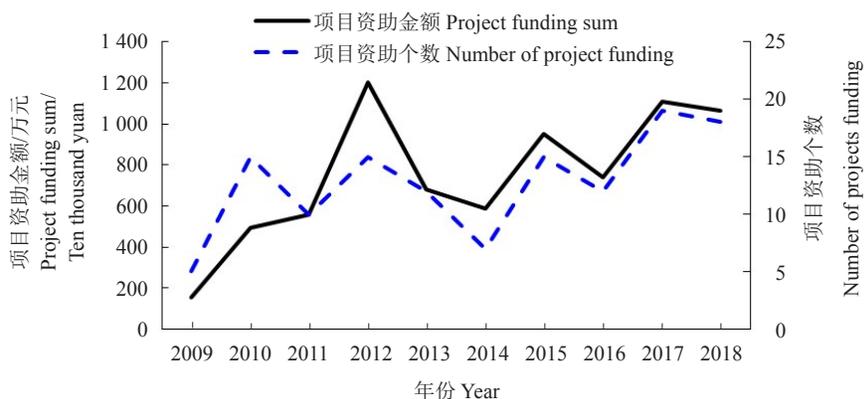


图1 国家自然科学基金柑橘相关面上项目资助情况

Fig. 1 Funding of *Citrus*-related general projects of the National Natural Science Foundation of China

2.2 基础研究水平稳步提升,部分领域迈入国际领先行列

基础研究发展迅速。近10年来,我国柑橘研究水平快速提升,与世界先进水平的差距明显缩小,我国柑橘基础研究进入国际主流。根据美国信息情报所数据库的最新统计,2009年以来,我国发表柑橘相关SCI论文数逐年增加,2017和2018年分别达到212篇和221篇(图2);华中农业大学和西南大学(中国农业科学院柑桔研究所)活跃度(论文数)分别位居世界第3位和第7位,跻身世界前10强;研究水平(影响因子和被引用情况)逐年提升,IF>5.0论文占同期国际柑橘研究该层次论文数约60%,国内发表论文他引次数超过100次的论文占国际同类型论文的17.5%(7/40),他引次数超过200次的论文占国际

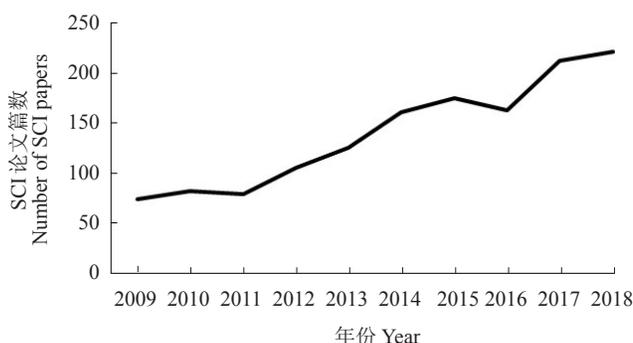


图2 我国发表的柑橘相关SCI论文情况

Fig. 2 *Citrus*-related SCI papers published by Chinese researchers

同类型论文的33.3%(2/6)。特别是近5年,我国柑橘研究活跃度大幅提升,以邓秀新为作者的收录论文数位居国际柑橘研究学者的首位,另有4名国内

学者进入国际前 10 位。

我国柑橘研究在基因组学、资源发掘利用和种质创新等领域已进入世界领先行列。全世界已报道的 8 例柑橘及其近缘种基因组, 7 例由我国研究人员自主完成。历时多年发掘到的类似一年生作物的模式材料——单胚山金柑, 是国际唯一报道的单胚且播种当年开花结果的柑橘资源。培育出的雄性不育和果实无核新品种——‘华柚 2 号’, 是国际首例通过细胞融合直接培育的柑橘新品种。我国柑橘研究的国际关注度和国际竞争力显著提升; 近 5 年, 我国学者在高水平杂志发表的论文数大幅增加, 比例达到全世界柑橘研究的一半以上。

2.3 研究立项坚持问题导向, 成果转化应用速度加快

柑橘应用研究的选题多年来紧密围绕生产实际, 从开始的资源收集、推广良种, 到后来的专业化生产、普及嫁接修剪技术; 从计划密植到适度稀植; 苗木由裸根苗到容器大苗; 以及柑橘覆膜增糖、覆膜晚采、留树保鲜、减肥减药等提质增效系列技术研发等。尤其是柑橘产业技术体系建立以来, 柑橘主产区的 26 个综合试验站与岗位科学家岗站对接, 使得柑橘研究选题更接地气, 针对柑橘生产存在的实际问题开展技术试验和示范, 取得的研究成果直接用于生产实践。

根据中国知网数据, 近 10 年来, 我国申请柑橘相关专利 3 000 余件, 专利数量逐年递增(图 3); 制定柑橘相关行业标准 30 余项; 审认定柑橘品种 30 余个, 获植物新品种权 8 项、软件著作权 16 项。部分专利已在企业转化应用, 部分新品种在品种结构调整中发挥着重要作用, 转化应用速度逐年加快。迄今, 柑橘研究获国家科技进步二等奖 4 项, 省部级科技奖每年 2~4 项, 研究成果产生的经济、社会和生态效

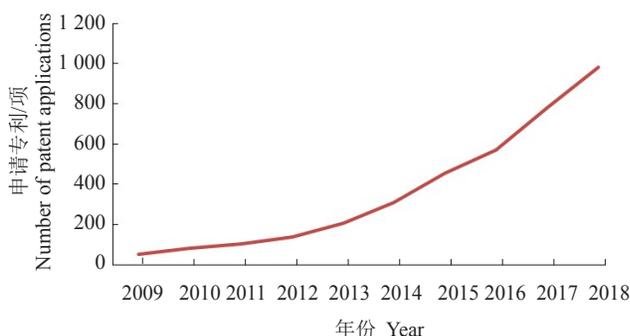


图 3 2009—2018 年柑橘相关专利申请情况

Fig. 3 Citrus-related patent applications during 2009 to 2018

益显著。

3 近 10 年各研究方向主要进展

3.1 种质资源发掘评价与遗传改良研究, 有力支撑了我国柑橘种业发展

柑橘类植物种质资源调查、收集及评价方面, 全国范围内系统开展地方良种、农家种、野生/半野生资源调查与收集, 近 10 年共收集 1 600 余份资源, 其中枸橼 56 份、宜昌橙 231 份、柚类 274 份、野生橘 2 份、山金柑 1 000 份及酸橙 72 份。基于分子标记并结合全基因组序列信息等手段, 明确了我国西南地区是枸橼及柚的起源地之一; 武陵山区和中西部的大巴山区是宜昌橙起源中心; 南方南岭-武夷山脉是野生橘和山金柑起源中心; 湖南和江西为主体的橘柚栽培地为酸橙主要起源地^[5]。开展山金柑资源调查过程中, 发掘到极其稀有的单胚山金柑资源, 有望成为木本果树从种子到种子类似一年生作物的模式实验材料。利用连续多代自交获得单株纯合度最高达 99.6% 的植株, 对 S3 代单株‘S3y-45’全基因组从头测序和组装, 获得了 373 Mb 山金柑参考基因组(基因组覆盖率约 96%)。还构建了山金柑遗传转化和 CRISPR-Cas9 基因编辑体系, 将获得表型稳定 T1 代的时间缩短至 15 个月, 加快了柑橘乃至整个木本果树功能基因组研究步伐^[6]。

柑橘基因组序列图谱构建及分子育种方面, 以花药培养自主创制的甜橙双单倍体为试材, 完成了国际首例和目前国际上最完整的甜橙全基因组序列图谱, 也是我国自主完成的首个果树作物基因组序列图谱^[7]; 建成的甜橙基因组网站(<http://citrus.hzau.edu.cn>), 为全球学者开放使用, 网站建立至今访问量已达 200 万余人次。枸橼、宜昌橙、柚、莽山野柑、山金柑、枳等基因组序列图谱, 近年也已完成。针对柑橘类植物特有的珠心多胚现象, 综合采用比较基因组、遗传学和转录组等方法解析了柑橘多胚形成的分子基础, 锁定了关键基因 *CitRWP*, 这是柑橘领域第一个通过正向遗传学锁定的基因, 为精确利用“多胚性”分子设计辅助育种提供了基因资源, 对砧木育种具有重要价值^[8]。开发的标记已被中国、澳大利亚等国内外同行用于砧木早期选择。利用基因组序列图谱及重测序数据, 揭示了野生橘和栽培橘的驯化历史, 建立起世界最全的柑橘 DNA 指纹数据库, 含 489 份柑橘 DNA 指纹, 并研发在线 DNA 鉴定

软件 Citrus ID(已获软件著作权),可确定材料类型,解析遗传组分,分析其可能的亲本来源,为解决同名异物、异名同物以及品种鉴定提供了基础支撑。

柑橘细胞工程与种质创新方面,通过细胞融合创制了50余例异源四倍体体细胞杂种,珠心实生苗发掘获得了40余例同源四倍体(双二倍体);倍性杂交结合幼胚挽救培养技术,创制了50余个杂交组合2000余个株系的三倍体后代,并筛选出一批三倍体无核优系^[9]。探索出一条改良有核柑橘品种的新路径,即通过细胞融合转移温州蜜柑的雄性不育胞质,改良有核品种,培育无核胞质品种新品种,使培育无核新品种的时间由常规育种实现雄性不育胞质转移至少20年缩短至1~2年。按照该思路已创制10余例胞质杂种;田间反馈信息表明,温州蜜柑雄性不育胞质转移至距其亲缘关系较远的有核品种(柚类品种等)易实现雄性不育,反之(甜橙类、宽皮柑橘类等距温州蜜柑亲缘关系较近的有核品种)则不易实现,该现象为进一步创制雄性不育和果实无核的胞质杂种提供了融合亲本选配的重要参考;胞质杂种新品种‘华柚2号’表现雄性不育、果实无核,解决了其叶肉亲本‘华柚1号’种籽多的问题,其他性状没有改变,这是国际首例通过细胞融合直接培育的柑橘新品种,已获农业部植物新品种权^[9-10]。

新品种选育方面,10余年来,筛选出‘大分’温州蜜柑、‘少核默科特’‘伦晚脐橙’;培育出‘资阳香橙’(砧木)‘早红脐橙’‘金秋砂糖橘’‘粤丰早橘’‘赣脐橙5号’‘大雅柑’等新品种33个,其中部分品种在我国柑橘产业发挥了重要作用。‘资阳香橙’耐碱性、抗逆性和抗病性强,嫁接柠檬不易发生脚腐病和流胶病,已成为新兴砧木。同时发掘了一批特色突出的种质资源,如4月份成熟、果皮呈棕色的晚熟品种‘宗橙’等。目前,柑橘品种结构得以优化,成熟期更加细分,由过去早:中:晚为1:8:1变为极早熟:早熟:早中熟:中熟:中晚熟:晚熟为0.5:0.5:1.5:3:2.5:2,良种率超过85%。我国柑橘基本达到周年鲜果供应,并形成了广西南宁杂柑产区、桂林砂糖橘产区、长江上中游大型晚熟优质产区。

柑橘苗木繁育技术研发方面,设施(温网室大棚)育苗技术得以改进和大规模推广;育苗基质配方不断改进,基质开始专业化生产;改进育苗容器,多孔容器成为发展趋势;从砧木种子和无病接穗生产、育苗过程的诸多环节到产业应用的大苗栽植等方面

均有技术突破,育苗周期可缩短至约12个月出圃,降低成本30%~40%;从营养土配制、装袋到圃内移动运输等生产环节,育苗省力化机械逐步应用;研发可用于种苗身份识别和质量安全溯源的RF射频技术,并获发明专利和实用新型专利授权。由于黄龙病危害的倒逼,设施隔离生产和无病毒容器育苗观念逐渐深入人心,全国柑橘产区无病毒苗圃数由2008年的不足50个上升至目前220余个。全国柑橘产区目前每年需苗量在1亿株以上,无病毒容器苗生产量已由2008年的约5%上升至2018年的30%。

3.2 生理基础研究,促进了柑橘栽培模式创新和品质提升

柑橘产区土壤基础数据与配方施肥方面,分析了柑橘主产区3000多个代表性果园的叶片和土壤样品,基于柑橘叶片营养诊断和土壤分析,研发了不同土壤状况、主要柑橘种类的专用肥、多元复合肥等配方肥产品。针对柑橘缺素黄化症状开展研究,研发推广了高效的矫治技术及其专用配方肥。

柑橘黄龙病疫区栽培模式创新方面,针对黄龙病疫区创新栽培模式,在传统的“三板斧”(栽植无病毒苗、控制木虱和清除病树)基础上,研发“生态建园、无病大苗定植、清除病树并及时更新、全园快速灭杀木虱和矮密早丰栽培”五措并举防控黄龙病技术,形成“黄龙病疫区永春芦柑种植新模式”;与此同时,在广东、广西分别探索控制黄龙病的综合防控措施。广西通过制定地方法规,强化了黄龙病防控机制。所有这些措施均为解决黄龙病危害做出了重要而积极的贡献,取得了较好的效果。

柑橘提质增效实用技术方面,建立柑橘果实品质基础数据库,在柑橘色泽^[11-12]、风味^[13]、抗逆^[14]等理论研究与调控技术方面渐成体系。发明了促进早熟脐橙果面转红的生物促色技术;研发推广的覆膜增糖技术、缩冠改造技术、温州蜜柑隔年交替结果技术,作为主推技术在全国柑橘相关主产区示范推广效果显著。

晚熟柑橘栽培方面,与晚熟柑橘配套的冬季防落果和防枯水,以及普通中晚熟柑橘留树保鲜等关键栽培技术均获得重要突破,使越冬晚熟柑橘成为近10年来柑橘产业效益最好、供给侧改革成果最显著的柑橘种类。

省力化栽培新模式方面,以密改稀、宽行密株、

起垄栽培、水肥一体化、机械作业、山地果园轨道运输等为主要内容,研发的新模式和新技术在柑橘产区应用比例逐年增加。

3.3 病虫害综合防控技术研发,保障了柑橘绿色安全生产

病害防控方面,针对威胁我国柑橘产业的主要病害开展系统研究。明确了柑橘褐斑病、黑点病(砂皮病)等的病原、分布、传播途径、流行规律,筛选出最佳防治药剂并制定防控方案。弄清了严重威胁柠檬产业的新发疫情黄脉病的发生传播以及流行规律,并研制出黄脉病应用胶体金检测试纸^[15]。完成了绿霉菌和褐斑菌的基因组序列及基因敲除和回补操作体系,并深入研究了病菌抗药和致病机制。发现柑橘多种新病毒,明确了黄金柚黄化、黄果柑黄化等部分新病害的病因,并建立其防控措施。构建了柑橘良种无病毒三级繁育体系并在产业中应用。针对黄龙病这一严重威胁柑橘产业的病害,完成了其传播媒介柑橘木虱(亚洲种)线粒体全基因组测序及其基因型、木虱种群流行病学分析,首次观察到甜橙中黄龙病菌前噬菌体颗粒,推测我国有 2 个病原起源中心;明确了柑橘木虱在我国发生与潜在适生分布区及其成灾规律,发现传媒新种柚喀木虱;提出了屏山雷波阻截带等有效防控方案。在疫区试验“三板斧”+ 防风林模式和“三板斧”+ 集中化学杀梢模式,取得了良好的示范效果。

虫害防控方面,主要针对实蝇、虫螨、蓟马等主要虫害开展系统研究。掌握了我国柑橘害虫、害螨发生危害与防治现状,以及主要虫、螨成灾规律及抗药性机制,并基于 3S 和信息技术建立了柑橘害虫信息与专家系统及其实时网站;建立了实蝇 RNAi、CRISPR/Cas9 技术体系,探索基于 RNAi 的实蝇 SIT 技术,发现柑橘大实蝇性信息素,并构建柑橘实蝇监测与综合防治技术体系;系统调查柑橘木虱、粉虱病原微生物资源,并建立高毒力菌株发酵工艺和剂型化技术,为微生物农药开发奠定了基础;初步建立了利用 RNAi 与病毒的联合效应控制害螨的新模式,以及江源钝绥螨、抗药性捕食螨的规模化繁育和应用技术体系;明确了虫源性果面伤害成因及其主要害虫-蓟马的发生规律并研发建立其综合防控技术体系;集成建立了以减药增效为目的、与不同生态区域相匹配的柑橘害虫绿色防控技术模式。

3.4 采后保鲜与加工技术研发,有效延伸了柑橘产

业链

柑橘采后保鲜方面,围绕我国柑橘采后商品化处理水平低、果实腐烂率高等问题,首次构建起柑橘采后品质变化的调控网络^[16],提出“维持果肉有机酸,减缓水分转运,提高果面蜡质保水性能,减缓水分散失”的柑橘保鲜策略;开发出适合我国宽皮柑橘主栽品种的专用果蜡产品,可使果实货架期延长 15~20 d;筛选出比通用保鲜剂 2,4-D 可能更安全高效的替代物——氯氟吡氧乙酸;发明了通过采前加速果面叶绿素降解实现油斑病有效防控的技术,使早红脐橙的油斑病发生率下降近 50%。与企业合作,研发出热保鲜和预分选等预处理技术,使柑橘采后处理的杀菌剂用量减少近 40%。制定了《柑橘商品化处理技术规程》和《柑橘贮藏》行业标准。

柑橘果汁和罐头加工方面,制定了回填果粒、汁胞以及带肉果汁调配与过滤、均质、脱气、罐装密封及调配用水等关键控制点的加工标准及加工关键技术;提升和改善了宽皮柑橘汁分层、风味寡淡的现象,优化了宽皮柑橘复配果汁配方;自主研发了柑橘汁高压脉冲杀菌设备。针对产业急需解决的劳动力缺乏、产品单一等问题,研究开发柑橘自动剥皮、分瓣,喷码缺陷、封口缺陷检测,无线中心温度检测、送罐平台信息传送系统等系列装备,减少柑橘剥皮、检测等工序人工投入 70%;研发了柑橘软包装全果饮品生产技术,柑橘软包装空罐成型技术等;解决了罐头生产过程中出现的橘片糊化、石灰柑等共性问题。

柑橘皮渣深加工和综合利用方面,构建了柑橘天然成分绿色提取和利用技术,开发了柑橘囊胞、果酒、果醋、馅料、果皮全粉、混浊剂等产品,建立了果胶、橙皮苷、圆柚酮、膳食纤维、番茄红素及其他类胡萝卜素等成分提取工艺,研发了柑橘香料、松油醇、日化用品等产品,其中部分产品进入了工业化生产。

柑橘果品质量安全方面,针对果品农药残留等问题,明确了我国柑橘质量安全水平状况和风险隐患;研发出柑橘农药残留和真菌毒素等检测新方法;探明了 10 余种高毒高残留农药或替代农药的果实残留降解规律;制定了《柑橘良好农业规范》等行业标准。

3.5 果园省力化机械研发与应用,促进了柑橘产业节本增效

针对我国柑橘生产机械化的实际问题,系统研发山地果园机械,在山地果园运输机、喷雾机、水肥

一体化滴灌系统、果枝修剪机、开沟机、轻筒型挖穴机等装备和果园运输机的综合利用技术方面取得了重要进展。重点研发了适用于不同地形和动力条件的山地果园轨道、索道、履带和轮式运送装备,以解决山地水果生产存在物品运送劳动强度大、效率低等问题。这些装备能适应复杂的地形环境,既能运送肥料和果实,也能搭载喷雾机和果枝修剪机等作业,还能用于山地林果园等其它山地作物的运输作业,满足种植密集的山地茶果园物品运送需求,具有占地小、适用坡度大、遥控操作方便、安全性高、成本较低等特点。双轨、索道等运输装备经鉴定达到国际领先水平。部分机型已许可企业生产并列入地方农机补贴目录,实现了产业化;在广东、湖北等14个省份推广应用山地果园轨道运送装备180余套,配合使用轨道运送装备的吊装装置和单履带动力运输车,实现山地果园的纵向和横向运输全覆盖,配套喷雾机、修剪机、挖穴施肥机、果枝粉碎机等机具并示范应用,社会和生态效益显著。

3.6 产业经济研究,助力我国柑橘产业优化布局 and 高质量发展

我国柑橘产业经济研究,主要围绕柑橘产业的前产、产中和产后三个领域的经济问题进行。基于实地调研,运用数据统计、计量经济、数理经济模型和典型案例等分析方法,开展柑橘新品种、新技术和新模式的技术经济分析,以及柑橘生产与技术经济、市场流通与消费、对外贸易与国际贸易、信息化与标准化管理、产业宏观发展与政策等研究,建立了较完整的柑橘产业经济及政策研究体系和经济信息服务体系,丰富了柑橘经济及管理的研究内涵。在柑橘产业规划编制与政策咨询方面,积极为国家和地方编制柑橘产业发展规划以及提供决策咨询指导,有力地推动了我国柑橘产业优化布局高质量发展。

4 研究展望

新中国成立70年来,我国柑橘研究在人才队伍、硬件平台、基础理论与技术研发推广等方面均成绩显著,我国柑橘研究已步入世界第一方阵。新时代我国柑橘研究在以下方面有待加强。

4.1 培育突破性新品种

我国规模化栽培的柑橘品种80余个,约一半引自国外,我国自主选育的品种,特别是突破性的品种还不多,尤其是通过杂交选育的突破性品种还较

少^[17]。这与我国柑橘杂交育种起步较晚以及时断时续有关。未来需要加大杂交育种、芽变选种等新品种培育力度,继续坚持细胞工程育种,积极发展基因组辅助育种,同时对已有的优系进行综合评价,培育出抗性强、品质优、耐贮运以及适于机械化、省力化栽培的新品种,确保果品优质绿色安全。还需针对不同人群和不同用途的需求,培育多样化、个性化的品种;培育加工型品种,为橙汁加工提供品种保障。

4.2 黄龙病研究仍需攻坚克难

黄龙病防控形势依然严峻,黄龙病研究目前还存在病原菌纯培养尚未攻克、木虱高效监测预警技术体系尚不完善、木虱防控药剂研发及综合治理技术仍然比较匮乏、病原-媒介昆虫-寄主互作机制研发相对滞后等技术瓶颈,严重制约了黄龙病高效综合治理技术研发。要继续加大基础研究投入,同时要科技和政府联合发力,高度重视病害普查、监测和联防联控。

4.3 减肥减药技术研发势在必行

我国柑橘园肥力状况堪忧,多数柑橘园目前还存在盲目施肥致使树体营养失衡、氮钾过量和缺素黄化现象普遍、土壤酸化、地力下降、果实品质变差、环境污染严重等突出问题。针对各地柑橘园开展营养诊断与配方施肥,加快柑橘矫正施肥技术及专用肥的研发力度,建立化肥农药减施增效综合技术体系,确保我国柑橘产业绿色高质量发展。

4.4 加强产业问题研究与消费者的沟通

果实感官评价是了解消费者对选育的新品种评价好坏的必须环节。与新西兰、美国等国家相比,感官评价在我国柑橘等果树研究中的应用刚刚起步。目前华中农业大学已建立感官评价实验室,感官评价科学与柑橘研究深度融合,将研究与产业、市场接轨,使我国柑橘产品实现科学和定向地满足消费者需求,支撑产业发展。

4.5 柑橘基础研究有待持续深入

柑橘重要农艺性状和特殊生物学性状的形成功能基因的安全高效转化平台构建及基因编辑技术,特异资源性状遗传解析及基因发掘,嵌合体形成和体细胞互作机制,砧穗互作的生物学基础及作用机制,省力化栽培的生物学基础,果实品质形成与保持的调

控机制, 抗逆基因功能解析与利用, 功能性和过敏性成分的遗传基础及关键基因功能解析等方面。基因组辅助育种、基因组定向编辑技术、分子设计性状改良、智慧生产等前沿技术, 有望成为重要手段用于柑橘品种改良和高效生产, 为柑橘产业发展带来革命性的变化。

致谢: 本文成稿过程中, 全国柑橘有关同行, 特别是现代农业(柑橘)产业技术体系有关岗位科学家提供了资料支持, 在此表示衷心的感谢!

参考文献 References:

- [1] 祁春节. 柑橘产业经济与发展研究[M]. 北京: 中国农业出版社, 2017.
QI Chunjie. Researches on economy and development of citrus industry[M]. Beijing: China Agricultural Press, 2017.
- [2] 邓秀新, 束怀瑞, 郝玉金, 徐强, 韩明玉, 张绍铃, 段常青, 姜全, 易干军, 陈厚彬. 果树学科百年发展回顾[J]. 农学学报, 2018, 8(1): 24-34.
DENG Xiuxin, SHU Huairui, HAO Yujin, XU Qiang, HAN Mingyu, ZHANG Shaoling, DUAN Changqing, JIANG Quan, YI Ganjun, CHEN Houbin. Review on the centennial development of pomology in China[J]. Journal of Agriculture, 2018, 8(1): 24-34.
- [3] 邓秀新. 世界柑橘品种改良的进展[J]. 园艺学报, 2006, 32(6): 1140-1145.
DENG Xiuxin. Advances in worldwide citrus breeding[J]. Acta Horticulturae Sinica, 2006, 32(6): 1140-1145.
- [4] 陈学森, 郭文武, 徐娟, 丛佩华, 王力荣, 刘崇怀, 李秀根, 吴树敬, 姚玉新, 陈晓流. 主要果树果实品质遗传改良与提升实践[J]. 中国农业科学, 2015, 48(17): 3524-3540.
CHEN Xuesen, GUO Wenwu, XU Juan, CONG Peihua, WANG Lirong, LIU Chonghuai, LI Xiugen, WU Shujing, YAO Yuxin, CHEN Xiaoliu. Genetic improvement and promotion of fruit quality of main fruit trees[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2015, 48(17): 3524-3540.
- [5] YANG X M, LI H, YU H W, CAI L J, XU Q, DENG X X. Molecular phylogeography and population evolution analysis of *Citrus ichangensis* (Rutaceae)[J]. Tree Genetics & Genomes, 2017, 13(1): 29.
- [6] ZHU C Q, ZHENG X J, HUANG Y, YE J L, CHEN P, ZHANG C L, ZHAO F, XIE Z Z, ZHANG S Q, WANG N, LI H, WANG L, TANG X M, CHAI L J, XU Q, DENG X X. Genome sequencing and CRISPR/Cas9 gene editing of an early flowering mini citrus (*Fortunellahindsii*) [J]. Plant Biotechnology Journal, 2019, doi: 10.1111/pbi.13132.
- [7] XU Q, CHEN L L, RUAN X A, CHEN D J, ZHU A D, CHEN C L, BERTRAND D, JIAO W B, HAO B H, LYON M P, CHEN J J, GAO S, XING F, LAN H, CHANG J W, GE X H, LEI Y, HONG Q, MIAO Y, WANG L, ..., RUAN Y J. The draft genome of sweet orange (*Citrus sinensis*) [J]. Nature Genetics, 2013, 45(1): 45-66.
- [8] WANG X, XU Y T, ZHANG S Q, CAO L, HUANG Y, CHENG J F, WU G Z, TIAN S L, CHEN C L, LIU Y, YU H W, YANG X M, LAN H, WANG N, WANG L, XU J D, JIANG X L, XIE Z Z, TIAN M L, LARKIN R M, CHEN L L, MA B G, RUAN Y J, DENG X X, XU Q. Genomic analyses of primitive, wild and cultivated citrus provide insights into asexual reproduction [J]. Nature Genetics, 2017, 49(5): 765-774.
- [9] GUO W W, XIE K D, WU X M, XIE Z Z, XU Q, DENG X X. Ploidy manipulation via cell engineering for citrus improvement facilitated by application of molecular markers [J]. Acta Horticulturae, 2018, 1203: 105-109.
- [10] GUO W W, XIAO S X, DENG X X. Somatic cybrid production via protoplast fusion for citrus improvement [J]. Scientia Horticulturae, 2013, 163: 20-26.
- [11] ZHENG X J, ZHU K J, SUN Q, ZHANG W Y, WANG X, CAO H B, TAN M L, XIE Z Z, ZENG Y L, YE J L, CHAI L J, XU Q, PAN Z Y, XIAO S Y, FRASER P D, DENG X X. Natural Variation in CCD4 promoter underpins species-specific evolution of red coloration in citrus peel [J]. Molecular Plant, 2019, 12: 1294-1307.
- [12] YIN X R, XIE X L, XIA X J, YU J Q, FERGUSON I B, GIOVANNONI J J, CHEN K S. Involvement of an ethylene response factor in chlorophyll degradation during citrus fruit de-greening [J]. Plant Journal, 2016, 86: 403-412.
- [13] CHEN J J, YUAN Z Y, ZHANG H P, LI W Y, SHI M Y, PENG Z X, LI M Y, TIAN J, DENG X X, CHENG Y J, DENG C H, XIE Z Z, ZENG J W, YAO J L, XU J. Cit1, 2RhaT and two novel CitdGlcTs participate in flavor-related flavonoid metabolism during citrus fruit development [J]. Journal of Experimental Botany, 2019, 70(10): 2759-2771.
- [14] HUANG X S, WANG W, ZHANG Q, LIU J H. A basic Helix-Loop-Helix transcription factor *PttrbHLH* of *Poncirus trifoliata* confers cold tolerance and modulates POD-mediated scavenging of H₂O₂ [J]. Plant Physiology, 2013, 162: 1178-1194.
- [15] BIN Y, LI Z A, WU J X, WANG X F, ZHOU Y, LI T S, YANG F Y, ZHOU C Y, SONG Z. Development of an immunochromatographic strip test for rapid detection of citrus yellow vein clearing virus [J]. Archives of Virology, 2018, 163: 349-357.
- [16] DING Y D, CHANG J W, MA Q L, CHEN L L, LIU S Z, JIN S, HAN J W, XU R W, ZHU A D, GUO J, LUO Y, XU J, XU Q, ZENG Y L, DENG X X, CHENG Y J. Network analysis of postharvest senescence process in citrus fruits revealed by transcriptomic and metabolomic profiling [J]. Plant Physiology, 2015, 168: 357-376.
- [17] 邓秀新, 王力荣, 李绍华, 张绍铃, 张志宏, 丛佩华, 易干军, 陈学森, 陈厚彬, 钟彩虹. 果树育种 40 年回顾与展望 [J]. 果树学报, 2019, 36(4): 514-520.
DENG Xiuxin, WANG Lirong, LI Shaohua, ZHANG Shaoling, ZHANG Zhihong, CONG Peihua, YI Ganjun, CHEN Xuesen, CHEN Houbin, ZHONG Caihong. Retrospection and prospect of fruit breeding for last four decades in China [J]. Journal of Fruit Science, 2019, 36(4): 514-520.