

新中国果树科学研究70年——荔枝

陈厚彬¹, 欧良喜², 李建国¹, 苏钻贤¹, 杨胜男¹, 吴振先¹, 胡卓炎¹

(¹华南农业大学, 广州 510642; ²广东省农业科学院果树研究所, 广州 510640)

摘要:荔枝是典型亚热带果树,我国有悠久的栽培历史,2018年荔枝面积为551 746 hm²,新中国成立70年以来增长了82.7倍,产量约3 028 100 t,增长了175.4倍,且产期从4月下旬到9月底共达5个月。几代科技人员为之作出了巨大努力。已建立国家(广州)荔枝果树种质资源圃,收集保存荔枝种质400多份,培育新品种38个,优异品种通过区域性试验得到推广应用。近十年来创制了杂交苗数十万株。1980年代研发了螺旋环剥控梢、促花和保果技术,初步克服了荔枝适龄树不开花结果问题;近年则在主要性状分子鉴定、成花与坐果生物学、土壤与植物营养、病虫害、贮藏保鲜、加工和机械化等方面均取得重要研究进展,尤其是明确提出了荔枝花芽分化“阶段性划分”和具假种皮果实发育“球皮对球胆效应”的假说,为花果发育调控提供了坚实的理论支撑,基本解决“成花难和坐果难”问题。已明确,荔枝果皮中大量存在的漆酶,是一种定位于液泡的酚氧化酶,可催化果皮中的表儿茶素与其低聚物花色苷等氧化聚合形成褐色产物,从而引起果皮褐变。荔枝被列入国家现代农业产业技术体系支持作物,目前有岗站专家29名,团队成员120多人,覆盖示范县55个,带动技术推广骨干165人。展望未来,要重点加快种业科技创新、优质丰产绿色高效生产技术创新和大数据与人工智能等新技术的研究与应用。

关键词:荔枝; 新中国; 70年; 科学研究; 回顾; 展望

中图分类号:S667.1

文献标志码:A

文章编号:1009-9980(2019)10-1399-15

Fruit scientific research in New China in the past 70 years: Litchi

CHEN Houbin¹, OU Liangxi², LI Jianguo¹, SU Zuanxian¹, YANG Shengnan¹, WU Zhenxian¹, HU Zhuoyan¹

(¹South China Agricultural University, Guangzhou 510642, Guangdong, China; ²Fruit Institute, Guangdong Academy of Agricultural Sciences, Guangzhou 510640, Guangdong, China)

Abstract: Litchi is a typical subtropical fruit tree. China has a long history of litchi cultivation, with planting area of 551 746 hm² in 2018, 82.7-fold times that of 70 years ago, and production of about 3 028 100 t, an increase of 175.4-fold times. The production season lasts for 5 months from late April to the end of September. Most of the litchi trees were planted from mid 1980s. More than 400 accessions have been collected and conserved in the National Litchi Germplasm Pool at Guangzhou. Thirty-eight new varieties have been selected and registered, and some of them have been widely expanded via regional trial planting. Hundred thousands of seedlings from cross breeding have been achieved. In order to increase flowering and fruit set the technique of spiral girdling on trunks and large branches during late fall and early spring was created, which has been very helpful to early bearing of the young litchi trees. As the coming of the new century, lots of critical research progresses in molecular identification of important characters, biology in shoot growth, flower induction and fruit-set, soil and plant nutrition, pests and disease management, post-harvest physiology, processing, and mechanization have been achieved. Specifically, the hypothesis of phasic changes in floral differentiation, and “the skin versus blader effect” in the arillate fruit development were proposed. The process of litchi flower differentiation is composed of four visible stages: hardening of autumnal shoots before the first cold front in the early winter, floral induction under low temperatures, floral evocation (emergence of floral primordia,

收稿日期:2019-08-10 接受日期:2019-09-15

基金项目:国家荔枝龙眼产业技术体系建设基金(CARS-32)

作者简介:陈厚彬,男,研究员,主要从事果树栽培与生理研究。Tel:13380055696, E-mail:hbchen@scau.edu.cn

that is, “white millet”) as temperatures ascending in the early spring, and floral development under mild temperatures. The relationship between arils and skin of lychee fruit was investigated, and then “skin growth before arils” of lychee fruit was expounded. Cell division in the peel was found to occur mainly before flowering, and the cell numbers determined the fruit size. Water and solutes fastly entering the fruit, when skins fully expanded, may cause fruit cracking. Stable flowering, good fruit-set and large fruit sizes are potentially achieved with application of the major key technologies. It has been made clear that a large amount of laccases in the peel, is a phenoloxase located in vacuoles, which catalyzed epicatechin-mediated anthocyanin degradation and caused browning of the litchi pericarp. Research progress in soil and plant nutrition, plant protection, post harvest physiology, processing and mechanization are also commented. Litchi has been one of the crops granted from the China Agriculture Research System (CARS) since 2008. The litchi CARS subsystem is composed of 29 research scientists and 120 group members, covering 55 counties and 165 technicians. Looking into the future, we should focus on the research of breeding strategy, technology innovation in high-quality, productive, and green and efficient production, more adoption of new technologies including big data and artificial intelligence in litchi crop.

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

荔枝是典型亚热带常绿果树,在我国有 2 000 多年的种植记载历史。主产于南、北纬 17°~23° 的两条狭长的生态气候带内,估计全球总面积约 75 万 hm^2 ,产量 300~400 万 t。中国是荔枝第一产业大国和科研大国。笔者总结了新中国成立 70 年来荔枝产业发展成就和标志性研究成果,并预测未来荔枝科技发展趋势,以更好地引导未来产业发展。

1 发展历程与成就

1.1 发展历程

历史上荔枝种植区域主要在长江上游、闽东沿海和岭南地区。新中国成立前最高荔枝产量是 1936 年的 9 万 t。日寇侵华期间荔枝树被大量砍伐,到 1952 年时荔枝产量仅 2.14 万 t。现广州黄埔、深圳南山、福建龙海等地被划为荔枝公园的荔枝树多为抗战前种植,树龄在八九十年以上。

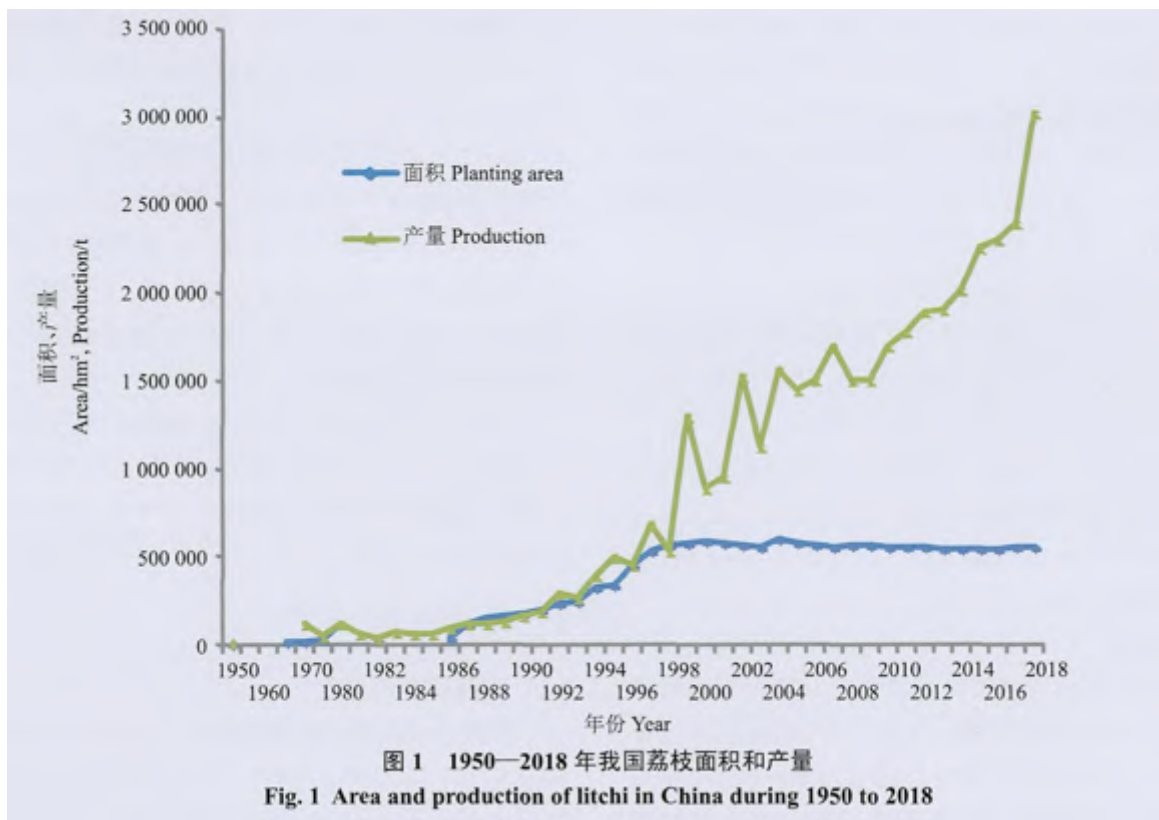
全国荔枝面积从 1952 年的 6 667 hm^2 扩展到 2018 年的 551 746 hm^2 ,增长了 82.7 倍,产量从 2.14 万 t 增加到 302.81 万 t,增长了 141.5 倍(图 1),2018 年全国荔枝园总产值 300 多亿元。荔枝产业发展大致可划分为三个阶段。

(1)1952—1980 年,为产业恢复阶段。新中国成立后在历史产区荔枝逐步扩大种植,主要是珠三角及周边地区,品种主要是‘三月红’‘黑叶’‘糯米糍’‘桂味’‘怀枝’等。期间在 1962—1965 年出现过种植高潮,可惜发展势头被中断。1980 年荔枝总面积达到 12.76 万 hm^2 ,总产量达到 11.68 万 t。

(2)1981—1998 年,为面积迅速扩张期。1980 年“十年绿化广东、消灭宜林荒山”政策出台,鉴于荔枝树良好的生态适应性、良好的商品性和国内外市场开发潜力、可规模开发的山坡地和产业链的高度关联性,各地高度重视荔枝产业发展,在苗圃建设、规范化种植、市场营销、产业链配套等方面给予了有力的支持。此段前期主要由各级政府推动示范,后期受良好效益的驱动农户多自发种植。广东东莞果农叶钦海在‘妃子笑’品种单株优选、扩繁及矮化密植栽培技术方面的创新,推动了 1988 年开始荔枝扩张到海南儋州、三亚、琼海和海口等地;1993—1996 年广西发展荔枝打造“山上玉林”和“山上钦州”。全国形成了一些具有特色的荔枝产区和具有区域特色的品种,特色产区如海南,珠三角、粤西、粤东,桂南、桂东南,闽南。区域特色品种如粤西、桂南、闽南‘黑叶’(乌叶),粤西‘白蜡’和‘白糖罂’,珠三角‘桂味’和‘糯米糍’,粤东、桂东南‘怀枝’(禾荔)等。

1982 年广东省荔枝科技协作组和全国荔枝科技协作组相继成立。协作组就荔枝幼树投产迟、产量低而不稳等开展科技协作攻关。1998 年全国荔枝面积达到 58.1 万 hm^2 ,产量约 53.5 万 t。

(3)1999 年至今,为优势区域逐步形成和产量效益提升阶段。1999 年全国荔枝总面积达到 58.13 万 hm^2 ,产量首次突破 100 万 t,达到 140 多万 t。因供给量突增和物流处理能力不足,荔枝价格大幅下降,对产业发展带来较大打击。初期荔枝总产量表现较明显的“大小年”现象,比较效益较低,荔枝园一



度出现弃管现象。2005年国家农业部启动公益性行业(农业)专项及国家现代农业(荔枝龙眼)产业技术体系建设,形成全国一盘棋、围绕产业链开展技术研发、试验示范和技术推广的团队和机制。2011年起荔枝产业逐步走出“十年低迷”。2014年始创荔枝电商销售模式,加上物流体系高度发达,荔枝鲜果得以在全国范围内普遍实现“次日达”,荔枝价格和效益连续稳定提升。

因城市化发展需求,沿海地区和城市近郊一些老荔枝树被开辟为荔枝公园,而其他地区通过高接换种,荔枝品种结构持续优化。直接效果是品种更加多样化,形成海南特早熟、粤西早中熟、粤中和桂南中晚熟、闽南晚熟优势区。近年长江上游地区和云南荔枝有较大发展,逐步形成特晚熟荔枝优势区和高原荔枝立体生产优势区。‘妃子笑’成为自南到北、自西到东种植区域最广、栽培技术最成熟的荔枝品种。

2010—2018年全国荔枝平均上市期126.5 d, 2018年自4月中旬至9月底达159 d。最高年份加工鲜果量约18万 t,部分缓解集中上市压力,荔枝销售价格逐年回升。

未来我国荔枝面积将长期保持相对稳定,一是经过精心管理的荔枝园大多有利可图,且随着单产提升和品质改善,效益明显提升;二是荔枝园大多位

于山坡地,并无其他经济效益更高的作物可以替代;三是荔枝树有利于环境绿化、美化、香化,建设美丽乡村。

1.2 研究队伍

荔枝原产中国,法国植物学家、探险家Sonnerat P M于1774—1781年间考察了中国广州等地,并在1782年给予了荔枝的植物学命名——*Litchi chinensis*。1920年代在Groff G W带领下,岭南大学邵尧年、郭华秀等对荔枝开展的一系列研究,标志着中国荔枝科学研究的兴起^[1-3]。

新中国成立后几代人为荔枝产业发展奠定了科技根基。改革开放初期,由李沛文、黄辉白等领衔的荔枝研究队伍不断扩大,倪耀源、钟扬伟及庄王壁、吕柳新等分别担任过广东省和全国荔枝科技协作组的负责人。福建农学院、华南农学院和广东省农业科学院都成立了若干课题组开展产业相关的研究,如种质资源组张展薇、傅玲娟、袁沛元等,栽培组庄王壁、吕柳新、庄伊美、倪耀源、钟扬伟、吴定尧等,植保组何等平、罗启浩等,贮藏保鲜组季作梁、苏美霞、林伟振、陈维信等。

依托华南农业大学建设的国家现代农业(荔枝龙眼)产业技术体系,设置了遗传改良、栽培与土肥、病虫草害防控、机械化、加工和产业经济6个研究室和11个综合试验站。第一代体系岗站专家袁沛元、

薛进军、庄丽娟、邓振权、袁韬、黄辛、覃群明等已退出岗位和站长角色。目前体系聘用了包括首席科学家在内的岗位科学家 18 人和试验站站长 11 人,带领团队成员 120 多人,覆盖示范县 55 个,带动技术推广骨干 165 人。国家财政部给予体系稳定的基本研发经费支持,使体系逐步成为我国荔枝科技创新中心、国际合作与交流中心和人才培养基地。

新中国成立以来已培养荔枝相关博士约 30 名、硕士约 230 名。其中体系成立以来,培养研究生 244 名,其中硕士研究生 217 名、博士研究生 27 名。毕业研究生中大约 1/4 进入与荔枝相关的高校、科研院所、推广部门和农业投入品部门工作。

最近十年来承担荔枝相关的国家基金 45 项,其中青年基金 7 项。

1.3 出版物

广东省和全国荔枝科技协作组及其成员编辑出版了大量荔枝学术和技术著作。如《荔枝生产技术问答》(广东省荔枝科技协作组编)1988—1997 年共印刷 14 次,总印数达 16.26 万册;《荔枝栽培》(倪耀源、吴素芬著)也经多次重印,印数达 2 万册。1982 年由吴定尧等牵头编辑的内部刊物《荔枝科技通讯》持续了 23 年共 87 期,介绍和交流国外研究成果,一些技术试验成果得以迅速总结和推广应用。体系研发中心通过编辑《荔枝龙眼科技通讯》60 期,起着即时交流技术信息的作用。

吴淑娴主编的《中国果树志荔枝卷》(1990),由傅玲娟、吴仁山和曾建华等主编的广东、广西、福建荔枝图谱,以及张展薇主编的《荔枝品种与栽培图说》(1997)陆续出版。一批中青年学者参编的 *Litchi and Longan, Botany, production and uses* (Menzel and Waite 主编, 2005) 和《荔枝学》(李建国主编, 2008)也相继问世。这些专著奠定了我国在世界荔枝学术和技术方面的扎实地位。

1.4 产业科技发展大事

1961 年国家科委支持开展全国荔枝种质资源调查工作,1988 年国家荔枝种质圃在广东省农业科学院建成。

1982 年 2 月广东省和全国荔枝科技协作组成立,并在每年组织学术年会。

2000 年 6 月在广州主办首届国际荔枝龙眼学术研讨会,时任广东省副省长到会致辞。之后于 2008 年在福州举办了第三届国际荔枝龙眼学术研讨会。

2008 年国家现代农业(荔枝)产业技术体系组建,后于 2011 年扩建为国家现代农业(荔枝龙眼)产业技术体系。

2017 年中国(国际)荔枝产业大会在广西玉林开始创办;2018 年中国(国际)荔枝产业大会在广州举行,时任广东省副省长亲临大会并讲话,之后开启了广东省荔枝产业高质量发展阶段,茂名国家荔枝现代农业产业园以及高州、从化、增城省级荔枝现代农业产业园开始建设。

2011 年和 2014 年,陈维信主持的“果菜采后处理及贮运保鲜工程技术与开发利用”和李建国主持的“荔枝高效生产关键技术创新与应用”分别荣获国家科技进步奖二等奖。

2 研究进展

2.1 资源保存与鉴定

我国为全球荔枝生产发展和品种培育贡献了大部分种质资源。西方传教士、植物学家、探险家和侨民把荔枝引种到了部分欧洲国家的海外殖民地^[4]。这些地区栽培的荔枝品种大多仍沿用汉语或粤语音名。在海南、云南仍存在野生荔枝林,在福建、广东、广西、四川、重庆等地一些千年荔枝树仍保存良好。

广东省农科院国家果树种质广州荔枝圃保存荔枝种质近 400 份,华南农业大学 150 份,中国热带农业科学院、广西农业科学院园艺所、海南省农业科学院、云南省农业科学院和泸州市农业科学研究院也保存有一些特色荔枝种质资源。《中国果树志 荔枝卷》系统描述了中国的野生荔枝和栽培荔枝的品种、株系、单株与类型共 222 个,其中野生单株 10 个,云南褐毛荔枝 4 个,栽培品种、株系与单株 208 个(广东 83 个、广西 50 个、福建 58 个、四川 5 个、海南 8 个、台湾 4 个),较详细地记载了其来源、分布、品种特征特性和评价等资料。制订了《植物新品种特异性一致性稳定性测试指南荔枝》,共采用了 54 个性状,其中重要性状 26 个,以果实龟裂片和裂片峰、果实大小、成熟期等为主要归类特征。同时,花粉粒特征、同工酶和分子标记(RAPD、ISSR、SCAR、EST-ISSR 等)都用于荔枝资源评价、鉴别、分类和亲缘关系等研究^[5-9]。

2.2 遗传育种

大规模种植的荔枝品种多是在资源普查期间的

优选单株扩繁而来。据调查,截至2018年底,种植面积达0.67万hm²以上的荔枝品种达12个,包括‘黑叶’‘妃子笑’‘怀枝’‘桂味’‘双肩玉荷包’‘鸡嘴荔’‘白蜡’‘糯米糍’‘白糖罂’‘三月红’‘大红袍’‘灵山香荔’;产量1万吨以上的品种达14个,包括‘黑叶’‘妃子笑’‘怀枝’‘桂味’‘白糖罂’‘白蜡’‘鸡嘴荔’‘糯米糍’‘双肩玉荷包’‘灵山香荔’‘三月红’‘进奉’‘大红袍’‘兰竹’。

近30年国内育成荔枝新品种38个,其中大陆地区35个,台湾地区3个。它们大多为中迟熟品种,已引种到各地进行区域性试种,其中‘仙进奉’‘井岗红糯’‘贵妃红’‘岭丰糯’等已扩大栽种,预计‘红绣球’‘观音绿’‘冰荔’‘北园绿’和‘马贵荔’在一些地区也具有较好的发展前景。

体系启动建设之后,广东省农业科学院、华南农业大学、中国热带农业科学院和广西农业科学院开展了大规模杂交育种工作,已培育数十万株杂种苗,并研发了真杂种鉴定技术,如利用SSR标记和In-Del标记引物鉴定F₁代真杂种,平均真杂种率可达71.9%^[10]。选出了一批有前途的杂交单株如9918等。

对砧穗组合的系统试验大大推动了荔枝高接换种进程。‘黑叶’与‘妃子笑’‘贵妃红’‘草莓荔’‘鸡嘴荔’等亲和,‘双肩玉荷包’与‘妃子笑’等亲和,而‘怀枝’(禾荔)具有广亲和性。

2.3 花芽分化

荔枝具有枝端成花特性。针对幼龄树投产迟问题,倪耀源等^[11]观察提出,晚秋和初冬不能出现新梢生长即“冬梢”,冬梢不成花与抑制成花的内源激素有关,而成熟枝梢CTK含量低^[12-13],使后续研究更多地放在碳素代谢上。吴定尧等^[14]主持研发了促进成花和改善坐果的螺旋环剥技术。研究发现,环切处理树3cm粗度大枝在花发端时淀粉浓度全树最高^[15];对枝干环切的部位高低、切口宽度和距离等的调整,成为“大小年”的重要调控技术手段。

荔枝要求低温诱导才能成花。澳洲人Menzel通过控温实验明确了部分早中熟荔枝品种的低温强度和持续时间要求(要求昼温20℃以下),在此基础上,华南农业大学的团队研究了‘糯米糍’和‘桂味’等晚熟品种成花诱导对低温的需求,即12月至次年1月中旬期间10℃以下低温时数约160h或持续60d以上,干旱可与低温协同促进荔枝成花诱导^[16-18]。但

荔枝芽只有在解除低温和胁迫之后才出现花的发端和分化。荔枝花穗原基中的雏形叶发育将引起叶片发育而侧生花穗退化即“冲梢”。外源ABA、H₂O₂和NO可减少花序小叶,增加腋生花序数量^[19-22]。

基于转录组学分析建立了低温、干旱和氧化胁迫等胁迫因子对荔枝开花的基因调控网络^[18, 23-25]。其中促进因子包括*LcLFY*、*SVP*、*FTI*和*API*,抑制因子有*FLC*^[25-29]。

黄辉白等^[30]明确地把荔枝花芽分化过程划分为秋梢发育、成花诱导、花发端、花穗与花分化阶段,指出每个阶段对温度、水分等生态条件和相应的调控要求,这对于指导荔枝成花的精准调控起到很好的作用。研创了一套以螺旋环剥和生长抑制剂为核心的枝梢调控技术,使‘妃子笑’‘桂味’等优质荔枝品种大幅度南移,技术应用超过总面积的90%,是“十二五”以来全国荔枝产量翻番的重要技术基础。

2.4 开花坐果、果实发育与成熟

荔枝花量大易导致“花而不实”,已研究报道荔枝开花坐果的生物学机制和疏花、疏蕾的理化调控技术^[31-33]。

荔枝是结构特殊的具假种皮果实,华南农业大学黄辉白教授领导的课题组开拓了具假种皮荔枝果实发育生理研究,提出了具假种皮荔枝果实发育的“球皮对球胆效应”理论和成熟过程可能存在“类转熟”现象^[34-35]。基于果皮发育对假种皮发育和果实大小具有决定性影响认识,李建国等^[36-37]明确提出荔枝果实的个体发育应划分两个时期(第I期和第II期),第II期又可划分为两个亚期(IIa和IIb)的新观点,认为果皮细胞数量而非细胞大小是形成大果的细胞学基础,还从温度、营养、激素和基因表达等角度揭示了果实大小形成机制^[38],指出荔枝生理性裂果是由于果皮延展性减弱的渐变和假种皮生长加快的骤变相叠加的结果,并提出了荔枝裂果发生的生态生理模式^[39]。王惠聪研究小组深入揭示了果实成熟过程中假种皮糖酸代谢和果皮色泽发育生理和分子机制,如首次将荔枝糖积累划分为三种类型,发现荔枝假种皮糖的组分与*SPS*和*AI*基因表达关系密切^[40-41];肯定了主要组份是苹果酸和酒石酸,认为*LcMYB5*和*LcPHI*质子泵基因可能与*LcHLH1*转录因子一起参与荔枝有机酸代谢的调控^[42];确定了荔枝果皮中的花色苷为花青素-3-芸香糖苷和花青素-3-葡萄糖苷,由*LcUFGT1*编码的UFGT酶在荔枝花

色素苷积累和着色中起决定性的作用^[43-44]。

福建农林大学吕柳新^[45]领导的课题组最早开展了荔枝胚胎发育领域的研究,认为荔枝不同品种胚胎发育大致可分为正常型、部分败育型和败育型三种类型,不同类型的差异可能是受多基因控制的可遗传的性状,揭示了幼果或胚珠中内源调节物质与荔枝胚胎发育的关系^[46]。最近,研究报道指出荔枝细胞壁酸性转化酶基因家族中的两个成员 *LcCWIN2* 和 *LcCWIN5* 是种子发育的关键基因,分别在控制种子大小和调控种胚发育过程起关键作用^[47]。

荔枝果实发育期间一般有 3~4 次生理落果高峰。我国研究人员主要从气象因子、栽培管理、矿质和碳素营养、内源激素、源库关系等方面探讨荔枝落果的原因^[11, 48-54]。李建国团队利用新一代超高通量测序技术,建立了与荔枝果实脱落相关的候选基因数据库,并据此初步提出了碳水化合物胁迫和乙烯利诱导荔枝落果的基因调控网络^[55-57],并对部分关键基因的功能和调控机制进行了较为深入的解析^[58-60]。

为了研究荔枝果皮色泽发育,胡桂兵课题组通过构建 cDNA 文库、高通量测序,分析叶绿素降解和类黄酮生物合成途径的关键酶基因,并对可能调控花色苷生物合成的转录因子进行挖掘^[61];发现 ABA 加速荔枝着色、CPPU 延缓荔枝果实着色,是通过上调或抑制 *LcUFGT* 基因表达,从而促进或延缓了荔枝果皮花色苷的积累^[62]。另发现荔枝花色苷生物合成途径中主要的结构基因和转录因子均可被光诱导,尤其 *LcDFR*、*LcF3'*、*LcUFGT* 和 *LcMYB1* 可能扮演更重要的角色^[63]。

在以上研究基础上,研制了促进子房细胞分裂、促进受精和坐果的营养配方和包含植物生长调节剂、光合作用促进剂、腐植质以及多种矿质元素的复合保果剂,建立了一套以施有机肥、补钙、均衡土壤水分供应、喷施保果防裂素为重点的综合防裂果技术。

2.5 营养与水分

荔枝树在南方各类土壤均有栽种。荔枝树营养需要量数据早期主要来自澳大利亚的研究,就 6 a (年)生‘大造’‘黑叶’等而言,矿质元素主要集中在叶片。花穗发育期叶片适宜的含量为: N 1.64%、P 0.18%、K 0.78%、Ca 0.96%、Mg 0.40%、Fe 105 mg·kg⁻¹、Mn 226 mg·kg⁻¹、Zn 22.4 mg·kg⁻¹、B 49.3 mg·kg⁻¹,成熟果实的 N、Mg、Fe、Zn 等浓度与叶片相近,但其 P、

K 浓度比叶片高 1.5~2 倍^[64]。‘糯米糍’为 N 1.41%、P 0.16%、K 0.77%^[11]。

有研究利用光谱仪数据建立叶色与荔枝叶片氮含量之间的关系,秋梢老熟期、花穗期及果实成熟期优化的光谱指数可预测叶片氮含量,但在花芽分化期则效果较差^[65]。发现荔枝在末次梢老熟至开花初期主要累积 Ca、Zn、B,果实膨大期累积的 N、K、Ca、Zn、S 基本来自树体吸收,而 P、Mn、B、Mo 则部分来自第一次和第二次秋梢的养分转移^[66]。用氮稳定同位素示踪技术研究表明,荔枝对(¹⁵NH₄)₂SO₄ 肥料的氮利用率显著高于 K¹⁵NO₃、CO(¹⁵NH₂)₂^[67]。在果实发育过程中,镁处理缓解了‘妃子笑’荔枝果皮“滞绿”问题^[68]。

荔枝虽然不像别的果树作物那样容易表现可见的叶片或果实缺素症状,但近年姚丽贤团队对全国荔枝园土壤取样分析发现,土壤酸化现象普遍,这势必对养分吸收和成花、坐果和品质发育带来影响(未发表结果)。根据营养诊断分析结果和荔枝树需肥、需水特点,确定了 3 个需肥和 4 个需水关键时期,制定了各阶段施肥量和比例的参考标准;研创了适合国情的灌溉施肥技术体系,截至 2018 年底,全国荔枝园安装灌溉设施 5.16 万 hm²,水肥一体化设施 1.5 万 hm²。平均每 666.7 m² 节约用水 10.97 t,每年可节水 1 092.61 万 t。

2.6 病虫害防控

蒂蛀虫、霜疫霉病和炭疽病是我国荔枝的主要病虫害。但近年也新发现一些颇具破坏力的病害和虫害,如荔枝白粉病^[69]、燧缘音狭长蠹(*Phonopate fimbriata* Lesne) 和黑双棘长蠹(*Sinoxylon conigerum* Gerstaecker)^[70]。

对霜疫霉病的有效防控,得益于对其发生规律与预测预报、药物防控效果及机制、以及生物防控与综合防控的研究和技术应用。采自全国的 162 份霜疫霉病害样本,分离鉴定得到 255 个病原真菌菌株,涉及 19 个种,其中 8 种首次在荔枝报道^[71]。研究表明,荔枝霜疫霉 *PIM90* 基因特异性调节有性孢子形成和无性孢子释放与休止^[72]。转录组分析预测有 490 个蛋白可能参与荔枝霜疫霉致病过程^[73]。植物源药剂和化学药剂对荔枝病害的防治是多个团队的研究重点。如紫檀芪、丁香酚、小檗碱、苦参碱、柠檬烯和桉树脑等^[74]。在离体条件下 10% 苯醚菌酯和 62.5% 霜霉威对荔枝霜疫霉菌丝的抑制效果最好,

其 EC_{50} 值分别为0.73和 $0.85 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ [75]。

各种气象因子中,温度和光照时间对荔枝蒂蛀虫的发育历期和种群动态变化都有较大影响[76-77]。荔枝蒂蛀虫幼虫分5个龄期,可危害荔枝的花、嫩梢、幼果以及成熟果实,偏好在成熟果实果皮产卵。研究发现,主要是寄主产生的挥发性物质如 α -姜烯及 β -没药烯等引诱荔枝蒂蛀虫产卵[78-79],并分离到一些关键组分如普通气味结合蛋白GOBP1和GOBP2,其氨基酸序列的N端都具有6个 α 螺旋结构,它们与荔枝果实特有挥发性化合物的结合能力不同[80-81]。主栽品种‘妃子笑’‘黑叶’‘糯米糍’和‘桂味’对荔枝蒂蛀虫都具有引诱活性,它们都含2-乙基-1-己醇、 α -姜黄烯、姜烯、 β -甜没药烯、 β -倍半水芹烯及 β -杜松烯等物质[82]。

研究发现荔枝蒂蛀虫对植物挥发油的触角电位反应大小顺序是:柠檬油>薄荷油>飞机草挥发油>松节油,驱避反应大小依次为薄荷油>飞机草挥发油>柠檬油>松节油。甲维盐对荔枝蒂蛀虫的产卵、存活率及交配率都有明显抑制作用[83],荔枝蒂蛀虫卵黄原蛋白基因在亚致死浓度下48 h后表达水平明显被抑制[84]。

光暗条件对荔枝蜡聚集行为无明显影响[85]。试验表明,5%高效氯氟氰菊酯微乳剂和20%呋虫胺可溶粒剂对荔枝蜡若虫的防治效果优于常用的25%啶虫脒乳油、90%敌百虫和 $200 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 丁硫克百威乳油[86]。非洲山毛豆等植物提取物对荔枝粗胫翠尺蛾具较好的产卵抑制作用[87]。检测表明氯氟氰菊酯、仲丁威、克百威、灭多威和甲维盐5种农药残留风险高[88],这些都值得我们在荔枝生产和监管中重点关注。

荔科技园高密度种植、贫瘠土地、氮磷钾肥不平衡施用、少施或不施有机肥、病害及盐害均可导致荔枝植物生理紊乱。制订了提高树体抵抗力,建隔离网和安装频振式杀虫灯,释放平腹小蜂和赤眼蜂等农业、物理与生物防控措施。应用“荔枝蒂蛀虫预测预报技术”,节约用药成本40%以上。

2.7 果园机械与机具

研制的荔枝树干环剥刀和疏花机具均已获得发明专利授权,分别用于控梢和控制花量。另外引入了气动修剪机、喷药机具和自动灌溉设施。前瞻性研究主要是采收机器人。

研究报道了荔枝果实间碰撞的特性[89]。采用双

目视觉系统和模拟扰动平台对荔枝果实采摘点的三维坐标进行定位试验,提出一种动态定位误差分析方法[90]。进行了自然环境扰动下荔枝动态簇的视觉定位研究,满足采摘机器人末端执行器的采摘要求[91]。设计了非机构环境下采摘点双目视觉快速定位系统,为串型果实采摘机器人的视觉定位提供了一种解决方案[92]。

在荔枝运输设备方面,利用CFD技术进行仿真试验,结果表明“差压式”厢体的内部流场更为均匀[93]。

研发和应用荔枝疏花机械,比人工疏花提高工效9倍以上。管道式施药压力控制系统具有操作简单、自适应能力强等特点,降低传统管道式施药的维护成本,减少施药环节总成本20%以上。研发新一代荔枝脱枝叶、去皮、去核、打浆自动生产线,加工能力每h处理10 t原料果,机械去皮的生产效率是人工去皮的7倍。

2.8 采后生理与保鲜贮运

重点研究了荔枝的贮藏性能、采后果皮褐变机制、果肉品质保持与劣变机制和冷链保鲜技术,使得在冷链条件下荔枝可运销到北美市场。华南农业大学和中国科学院华南植物园等是荔枝采后研究的主要机构。

引起荔枝果皮褐变的因素有很多,已经明确荔枝果皮中大量存在的漆酶,是一种可定位于液泡的酚氧化酶,可催化果皮中含量丰富的表儿茶素及其低聚物花色苷等氧化聚合形成褐色产物,从而引起果皮褐变[94-95]。维持果皮较低的pH值、高的总花色苷和总酚酸含量,有利于保持荔枝采后品质。4℃贮藏是抑制荔枝果皮酚类物质降解的有效方法[96]。

壳聚糖水杨酸盐(CTS-SA)涂膜剂、苹果多酚可维持花青素含量,有效降低‘桂味’荔枝果皮褐变和延缓果皮颜色变化[97-98]。甜菜碱和海藻糖复合菌系发酵产物、植物乳杆菌(*Lactobacillus plantarum*)复合保鲜剂、拮抗菌*Bacillus amyloliquefaciens* LY-1、茶籽精油、1,3,4-噻二唑-4-羰基己基酯可降低果实感病指数、降低褐变指数、提高商品率和延长荔枝果实货架期[99-103]。而 $0.4 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 褪黑素水溶液处理也能显著抑制果皮褐变[104]。

低温、低pH能抑制采后荔枝霜疫霉菌的生长,热水浸酸处理和低湿度能有效控制荔枝霜疫霉病和

青霉菌发生^[105]。壳聚糖制剂(Kadozan)、副干酪乳杆菌FX-6产抗菌肽粗提物、异甘草甙(isoliquiritin)能显著抑制荔枝霜疫霉菌生长^[106-108]。

外源ATP处理降低了贮藏期间果皮失水和细胞膜损伤,延缓荔枝果实采后衰老褐变^[109]。LcNAC1在果皮和果肉衰老过程中上调表达,且受LcNAC2转录因子正调控;MsrA和MsrB的下调表达加速LcCaM1氧化,增强转录因子LcNAC13和LcWRKY1的DNA结合能力,进一步激活或者抑制下游衰老相关基因的表达,因而可能参与荔枝果实的衰老进程^[110]。

研发集成采前防病结合采后保鲜与冷链物流保鲜技术,使保鲜期为30~35 d,常温货架期为2~3 d,扩大了荔枝出口和内销半径。研发了硫处理结合酸复色的荔枝冷处理护色保鲜技术,处理后果肉硫残留低,保鲜期为40~45 d,低温货架期5~7 d,目前我国出口欧美的荔枝大多采用该技术。研发了热处理无硫护色结合冰温保鲜贮运新技术,通过瞬时高温和酸处理来固定果皮颜色,在-1~-2℃冰温条件下荔枝贮运期为45~55 d,常温货架期2~3 d。

2.9 加工

在荔枝加工过程中,抑制酶褐变和非酶褐变是保持和调控荔枝产品色泽、风味和状态等的主要机制。自报道荔枝果皮存在多酚氧化酶(PPO)后^[111],研究者展开了果皮变褐与PPO活性关系的研究,提出了防止或延缓速冻荔枝果皮变褐的技术措施,结合浸渍或高压技术提升速冻荔枝的品质。明确了荔枝果肉、果汁的褐变和风味变化主要是其中丰富的氨基酸和还原糖发生Maillard反应以及抗坏血酸等物质氧化引起^[112-114];建立了荔枝果肉质构测定方法及其热降解模型^[115]。基于上述研究,提出了低温加工与保藏工艺,如冷冻干燥、热泵干燥和冷藏组合技术、超高压杀菌技术,以抑制Maillard反应,延缓荔枝加工产品的褐变、风味和质构降解^[116]。

荔枝果皮、核中各种次生代谢物质的提取工艺和功能鉴定等成为研究重点。日本科学家研究了荔枝寡聚酚(oligonol)的减脂功能,开发的产品已上市^[117]。国内则围绕果皮、果核、渣、花多酚的组分展开了大量研究。王惠聪等^[118]在荔枝中检测到丰富的白坚木皮醇,‘黑叶’荔枝的果皮和种子白坚木皮醇质量分数分别达到7.7、10.8和9.6 g·kg⁻¹。荔枝果皮提取液中寡聚原花青素(LPOPC)主要包括(-)-表

儿茶素、原花青素A1、A2和A型原花青素三聚体^[119]。从荔枝核分离出15种酚类化合物并鉴定了其清除DPPH自由基的能力^[120]。荔枝核的醇提取物(LCSP)可诱导直肠癌细胞在G2/M期凋亡、可抑制大鼠肝组织纤维化^[121-122]。荔枝花的丙酮提取物所含物质为(-)表儿茶素和原花色素A2,干重含量为5.52和11.12 mg·g⁻¹^[123]。荔枝核经过清洗、破碎、摇瓶发酵、离心分离、索式提取、减压蒸馏萃取,得到微生物油脂,与短链醇进行酸催化酯交换反应制备了生物柴油^[124]。研究发现荔枝的乙酸乙酯提取物(苯甲醇、二苯乙二醇、5-羟甲基糠醛)能刺激产生前列腺素E-2(PGE-2),表明荔枝中的小分子物质可使人体产生炎症^[125]。

研制了荔枝汁、荔枝酒、荔枝果醋、半干型荔枝干、冷冻干燥荔枝肉、荔枝果酱以及荔枝巧克力、荔枝果汁软糖、荔枝面包、荔枝咖啡伴侣等,加工企业集成了自动化加工技术与装备。2018年荔枝加工量达17万t,占总产量的5.6%,缓解了荔枝集中上市的压力。

3 科技发展趋势

3.1 加快培育品质优异、特早特晚熟、高抗性新品种

一是要收集与深度挖掘利用种质资源,进一步完善种质收集圃和核心种质圃,开展特早熟、特晚熟、焦核等重要经济性状的分子标记和基因鉴定研究,应用于育种新材料的早期鉴定以辅助育种,加强育种成效。二是以高品质、特早特晚熟、高抗性(耐高温、花芽分化对低温的低需求、易成花坐果、抗病虫、耐贮运等)为目标,研究芽变选种、杂交育种、诱变育种和分子育种技术。

3.2 探明“大小年”结果的形成机制和调控技术

包括全球气候变化下荔枝作物的生物学响应机制,“大小年”的碳素营养代谢特征,“大小年”当年的修剪、生长调控、促进成花坐果和品质发育的技术原理,树体与土壤营养需求原理,低纬度地区降低荔枝低温需求的技术,高纬度地区对特定品种的轮换结果技术。

3.3 加强机械机具研发和节本增效技术集成应用

机械机具的研发运用是资源节约型技术应用的前提。一是荔枝园开沟施肥、喷药、灌溉、修剪、环割(剥)、疏花、除草、采收、果实去梗、分级、去果皮去果

核机械及包装新设备等关键环节的适用机械机具研发、引进和选型;二是与农机具相适应的果园农艺条件研究和行距及树形改造;三是果园机械机具生产性技术服务平台建设与机制创新;四是果园农具管理与人力投入产出的技术经济分析;五是抓好农机具的示范带动。

3.4 加强绿色生产科技研发以提高产品品质和质量安全水平

建立以生态调控为核心的病虫害综合防治技术体系。一是深入研究病虫害发生成灾规律;二是病虫害预测预报技术,服务精准施药;三是完善病虫害灾害的农业、物理和生物防控技术;四是研制或筛选高效低毒和环境友好生物药剂与生长调节剂。

3.5 采后贮运保鲜、加工增值技术研发

要克服荔枝采后极易变色、变味和变质的缺点,增加加工品种类,充分利用副产物,提升产业链价值。包括继续深入揭示荔枝采后色、香、味变化相关的生理机制;研究适应不同物流模式、克服采后品质劣变的保鲜新技术、新材料和新工艺;果肉功能化与高附加值产品、加工副产物(果渣、果皮和果核)中多酚、多糖等功能成分的提取与功能表征。

3.6 产业大数据建设与AI应用

产业大数据和“智慧农业”要服务于安全、优质、丰产、高效的产业发展目标。一是产地环境生态大数据,即不同生态气候区的地理、气温、日照、降水、湿度等生态数据;二是生长发育大数据,包括枝梢生长、花芽分化、果实生长与品质发育,病害、虫害、气象灾害等;三是生产管理大数据,包括品种、种植、投入、生产工具、市场与营销(品种、时间、数量、价格)等大数据;四是建立环境生态、生产管理与生长发育信息的关联分析模型,对生长、产期和产量进行预测,指导制订生产管理技术和营销方案;五是人工智能在荔枝科研和生产管理中的应用。

参考文献 References:

- [1] 邵尧年. 二十年来荔枝生产丰凶与气候关系(一)[J]. 岭南农刊, 1936, 2(1): 1-34.
SHAO Yaonian. The relationship between litchi production abundance and climate in the past twenty years (I)[J]. Lingnan Agricultural Journal, 1936, 2(1): 1-34.
- [2] 邵尧年. 广州荔枝丰凶与气候问题(二)[J]. 岭南农刊, 1942, 3(1): 27-50.
SHAO Yaonian. Litchi abundance and climate problems in guangzhou (II)[J]. Lingnan Agricultural Journal, 1942, 3(1):

27-50.

- [3] GROFF G W. Some ecological factors involved in successful lychee culture[J]. Proceedings of the Florida State Horticultural Society, 1943, 56: 134-155.
- [4] 赵飞. 西方国家对荔枝的关注与引种(1570-1921)[J]. 中国农史, 2019(2): 26-36.
ZHAO Fei. From ignorance to successful introduction: Chinese lychee in western countries(1570-1921)[J]. Agricultural History of China, 2019(2): 26-36.
- [5] 刘冰浩, 朱建华, 潘丽梅, 彭宏祥. 广西野生荔枝博白种群生命表分析[J]. 果树学报, 2010, 27(3): 445-448.
LIU Binghao, ZHU Jianhua, PAN Limei, PENG Hongxiang. Analysis on life table of wild *Litchi chinensis* population in Bobai of Guangxi province[J]. Journal of Fruit Science, 2010, 27(3): 445-448.
- [6] 沈庆庆, 朱建华, 彭宏祥, 李冬波, 何新华, 丁峰, 张树伟. 桂西南早熟荔枝实生资源果实性状的模糊综合评价[J]. 西南农业学报, 2011, 24(4): 1419-1424.
SHEN Qingqing, ZHU Jianhua, PENG Hongxiang, LI Dongbo, HE Xinhua, DING Feng, ZHANG Shuwei. Fuzzy comprehensive evaluation of fruit characteristics in early mature seedling litchi resource of southwestern Guangxi[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2011, 24(4): 1419-1424.
- [7] CHENG J, LONG Y, MA K, WEI C, FU S, FU J. Development and significance of RAPD-SCAR markers for the identification of *Litchi chinensis* Sonn. by improved RAPD amplification and molecular cloning[J]. Electronic Journal of Biotechnology, 2015, 18(1): 35-39.
- [8] 向旭, 欧良喜, 陈厚彬, 孙清明, 陈洁珍, 蔡长河, 白丽军, 赵俊生. 中国96个荔枝种质资源的EST-SSR遗传多样性分析[J]. 基因组学与应用生物学, 2010, 29(6): 1082-1092.
XIANG Xu, OU Liangxi, CHEN Houbin, SUN Qingming, CHEN Jiezhen, CAI Changhe, BAI Lijun, ZHAO Junsheng. Est-ssr analysis of genetic diversity in 96 litchi (*Litchi chinensis* Sonn.) germplasm resources in China[J]. Genomics and Applied Biology, 2010, 29(6): 1082-1092.
- [9] 潘丽梅, 朱建华, 秦献泉, 彭宏祥, 黄凤珠, 卢美英. 广西龙荔遗传多样性ISSR分析[J]. 果树学报, 2011, 28(5): 814-819.
PAN Limei, ZHU Jianhua, QIN Xianquan, PENG Hongxiang, HUANG Fengzhu, LU Meiyong. Genetic diversity analysis of dimocarpus confinis in Guangxi by intersimple sequence repeats (ISSRs)[J]. Journal of Fruit Science, 2011, 28(5): 814-819.
- [10] 田婉莹, 孙进华, 李焕苓, 张蕾, 李松刚, 陈业渊, 王家保. 利用分子标记技术鉴定荔枝杂交后代的研究[J]. 分子植物育种, 2015, 13(5): 1045-1052.
TIAN Wanying, SUN Jinhua, LI Huanling, ZHANG Lei, LI Songgang, CHEN Yeyuan, WANG Jiabao. Identification of litchi (*Litchi chinensis* Sonn.) hybrids by molecular markers[J]. Molecular Plant Breeding, 2015, 13(5): 1045-1052.
- [11] 倪耀源, 吴素芬. 荔枝栽培[M]. 北京: 中国农业出版社, 1990.

- NI Yaoyuan, WU Sufen. Litchi cultivation[M]. Beijing: China Agricultural Press, 1990.
- [12] 李沛文, 季作梁, 梁立峰, 马建南. 荔枝大小年树营养芽及花芽分化与细胞分裂素的关系[J]. 华南农业大学学报, 1985, 6(3): 1-8.
- LI Peiwen, JI Zuoliang, LIANG Lifeng, MA Jiannan. The relationship between cytokinins and the differentiation of flower buds in on year and vegetative buds in off year trees of litchi (*Litchi chinensis* Sonn. cv. No mi chi)[J]. Journal of South China Agricultural University, 1985, 6(3): 1-8.
- [13] CHEN W S. Changes in cytokinins before and during early flower bud differentiation in lychee (*Litchi chinensis* Sonn.) [J]. Plant Physiology, 1991, 96(4): 1203-1206.
- [14] 周贤军, 吴定尧, 黄辉白, 赖军, 黄东光. 螺旋环剥对幼龄荔枝树生长结果的调控作用[J]. 园艺学报, 1996, 23(1): 13-18.
- ZHOU Xianjun, WU Dingyao, HUANG Huibai, LAI Jun, HUANG Dongguang. Manipulating growth and fruiting of young litchi trees by spiral girdling[J]. Acta Horticulturae Sinica, 1996, 23(1): 13-18.
- [15] 陈厚彬, 黄辉白, 刘宗莉. 荔枝树成花与碳水化合物器官分布的关系研究[J]. 园艺学报, 2004, 31(1): 1-6.
- CHEN Houbin, HUANG Huibai, LIU Zongli. Flower formation and patterns of carbohydrate distribution in litchi trees[J]. Acta Horticulturae Sinica, 2004, 31(1): 1-6.
- [16] CHEN H B, HUANG H B. Low temperature requirements for floral induction in lychee[J]. Acta Horticulturae, 2004, 665: 195-202.
- [17] 张哲玮, 赵政男, 陈右人, 郑正勇. 温度及干旱对荔枝开花的影响[J]. 中国园艺, 1997, 43(4): 322-329.
- ZHANG Zhewei, ZHAO Zhengnan, CHEN Youren, ZHENG Zhengyong. Effect of temperature and drought on litchi flowering[J]. Chinese Horticulture, 1997, 43(4): 322-329.
- [18] SHEN J Y, XIAO Q S, QIU H J, CHEN C, CHEN H. Integrative effect of drought and low temperature on litchi (*Litchi chinensis* Sonn.) floral initiation revealed by dynamic genome-wide transcriptome analysis[J]. Scientific Reports, 2016, 6: 32005.
- [19] CUI Z, ZHOU B, ZHANG Z, HU Z. Abscisic acid promotes flowering and enhances *LcAPI* expression in *Litchi chinensis* Sonn.[J]. South African Journal of Botany, 2013, 88: 76-79.
- [20] ZHOU B, LI N, ZHANG Z, HUANG X, CHEN H, HU Z, PANG X, LIU W, LU Y. Hydrogen peroxide and nitric oxide promote reproductive growth in *Litchi chinensis*[J]. Biologia Plantarum, 2012, 56(2): 321-329.
- [21] LIU W, CHEN H, LU X, RAHMAN J, ZHONG S, ZHOU B. Identification of nitric oxide responsive genes in the floral buds of *Litchi chinensis*[J]. Biologia Plantarum, 2015, 59(1): 115-122.
- [22] LU X, KIM H, ZHONG S, CHEN H, HU Z, ZHOU B. De novo-transcriptome assembly for rudimentary leaves in *Litchi chinensis* and identification of differentially expressed genes in response to reactive oxygen species[J]. BMC Genomics, 2014, 15(1): 805.
- [23] 李宁, 陈厚彬, 张昭其, 胡志群, 周碧燕. 荔枝 *LEAFY* 同源基因克隆及表达分析[J]. 华南农业大学学报, 2013, 34(1): 57-61.
- LI Ning, CHEN Houbin, ZHANG Zhaoqi, HU Zhiqun, ZHOU Biyan. Cloning and expression analysis of *LEAFY* homologue gene in litchi[J]. Journal of South China Agricultural University, 2013, 34(1): 57-61.
- [24] ZHANG H, WEI Y, SHEN J, LAI B, HUANG X, DING F, SU Z, CHEN H. Transcriptomic analysis of floral initiation in litchi (*Litchi chinensis* Sonn.) based on de novo RNA sequencing[J]. Plant Cell Reports, 2014, 33(10): 1723-1735.
- [25] LU X Y, LI J J, CHEN H B, HU J Q, LIU P X, ZHOU B Y. RNA-seq analysis of apical meristem reveals integrative regulatory network of ROS and chilling potentially related to flowering in *Litchi chinensis*[J]. Scientific Reports, 2017, 7(1): 2045-2322.
- [26] DING F, ZHANG S W, CHEN H B, PENG H X, LU J, HE X H, PAN J C. Functional analysis of a homologue of the *FLORICAULA/LEAFY* gene in litchi (*Litchi chinensis* Sonn.) revealing its significance in early flowering process[J]. Genes & Genomics, 2018, 40(12): 1259-1267.
- [27] HU J Q, HYE-Ji K, CHEN H B, ZHOU B Y. Litchi flowering is regulated by expression of short vegetative phase genes[J]. Journal of The American Society for Horticultural Science, 2018, 143(2): 101-109.
- [28] 丁峰, 彭宏祥, 何新华, 李冬波, 朱建华, 秦献泉, 李鸿莉, 罗聪, 曹辉庆. 荔枝 *FLOWERING LOCUST (FT)* 同源基因 cDNA 全长克隆及其表达[J]. 果树学报, 2012, 29(1): 75-80.
- DING Feng, PENG Hongxiang, HE Xinhua, LI Dongbo, ZHU Jianhua, QIN Xianquan, LI Hongli, LUO Cong, CAO Huiqing. Cloning and expression analysis of the *FLOWERING LOCUST (FT)* homologous gene cDNA from *Litchi chinensis*[J]. Journal of Fruit Science, 2012, 29(1): 75-80.
- [29] ZHANG H N, SHEN J Y, WEI Y Z, CHEN H B. Transcriptome profiling of litchi leaves in response to low temperature reveals candidate regulatory genes and key metabolic events during floral induction[J]. BMC Genomics, 2017, 18(1): 1471-2164.
- [30] 黄辉白, 陈厚彬. 以阶段观剖视荔枝的花芽分化[J]. 果树学报, 2003, 20(6): 487-492.
- HUANG Huibai, CHEN Houbin. A phasic approach towards the floral formation in *Litchi chinensis* Sonn.[J]. Journal of Fruit Science, 2003, 20(6): 487-492.
- [31] 王祥和, 胡福初, 范鸿雁, 华敏, 何凡. 不同花穗处理对妃子笑荔枝开花坐果的影响[J]. 西南农业学报, 2011, 24(1): 206-210.
- WANG Xianghe, HU Fuchu, FAN Hongyan, HUA Min, HE Fan. Effects of different treatments of flower panicles on blooming and fruit-setting of Feizixiao litchi[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2011, 24(1): 206-210.

- [32] CHEN P, ROAN S, LEE C, CHEN I. The effect of temperature during inflorescence development to flowering and inflorescence length on yield of 'Yu Her Pau' litchi[J]. *Scientia Horticulturae*, 2013, 159: 186-189.
- [33] 魏永赞,董晨,王弋,郑雪文,李伟才. 烯效唑对荔枝花期发育过程内源激素的影响. *热带作物学报*[J]. 2017, 38(7): 1188-1192.
WEI Yongzan, DONG Chen, WANG Yi, ZHENG Xuewen, LI Weicai. Effects of uniconazole on the endogenous phytohormone contents in the florescence period of litchi[J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2017, 38(7): 1188-1192.
- [34] HUANG H B, XU J K. The developmental patterns of fruits tissues and their correlative relationships in *Litchi chinensis* Sonn. [J]. *Scientia Horticulturae*, 1983, 19(3/4): 335-342.
- [35] HUANG H B, QIU Y X. Growth correlations and assimilate partitioning in the arillate fruit of *Litchi chinensis* Sonn.[J]. *Australian Journal of Plant Physiology*, 1987, 14(2): 181-188.
- [36] 李建国,黄旭明,黄辉白. 大果型和小果型荔枝品种果实发育的细胞学和生理学比较[J]. *果树学报*, 2002, 19(3): 158-162.
LI Jianguo, HUANG Xuming, HUANG Huibai. A cytological and physiological study of large-and small-sized litchi cultivars fruit[J]. *Journal of Fruit Science*, 2002, 19(3): 158-162.
- [37] 李建国,黄旭明,黄辉白. 荔枝果实发育时期的新划分[J]. *园艺学报*, 2003, 30(3): 307-310.
LI Jianguo, HUANG Xuming, HUANG Huibai. A revised division of the developmental stages in litchi fruit[J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2003, 30(3): 307-310.
- [38] LI J G, HUANG X M, HUANG H B, Dongliang Q, Mitra S K, Diczbalis Y. An overview of factors related to fruit size in *Litchi chinensis* Sonn.[J]. *Acta Horticulturae*, 2010, 863 (863): 477-482.
- [39] LI J G, HUANG H B, GAO F F, HUANG X M, WANG H C. An overview of litchi fruit cracking[J]. *Acta Horticulturae*, 2001, 558: 205-208.
- [40] WANG H C, HUANG H B, HUANG X M, HU Z Q. Sugar and acid compositions in the arils of *Litchi chinensis* Sonn.: cultivar differences and evidence for the absence of succinic acid[J]. *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, 2006, 81 (1): 57-62.
- [41] YANG Z Y, WANG T D, WANG H C, HUANG X M, QIN Y H, HU G B. Patterns of enzyme activities and gene expressions in sucrose metabolism in relation to sugar accumulation and composition in the aril of *Litchi chinensis* Sonn.[J]. *Journal of Plant Physiology*, 2013, 170(8): 731-740.
- [42] LAI B, DU L N, WANG D, HUANG X M, ZHAO J T, WANG H C, HU G B. Characterization of a novel litchi R2R3-MYB transcription factor that involves in anthocyanin biosynthesis and tissue acidification[J]. *BMC Plant Biology*, 2019, 19(1): 62.
- [43] WEI Y Z, HU F C, HU G B, LI X J, HUANG X M, WANG H C. Differential expression of anthocyanin biosynthetic genes in relation to anthocyanin accumulation in the pericarp of *Litchi chinensis* Sonn.[J]. *PLoS One*, 2011, 6: e19455.
- [44] LI X J, ZHANG J Q, WU Z C, LAI B, HUANG X M, QIN Y H, WANG H C, HU G B. Functional characterization of a glucosyltransferase gene, LcUGFT1, involved in the formation of cyanidin glucoside in the pericarp of *Litchi chinensis*[J]. *Physiologia Plantarum*, 2016, 156(2): 139-149.
- [45] 吕柳新,陈荣木,陈景录. 荔枝胚胎发育过程的观察[J]. *亚热带植物科学*, 1985, 14(1): 3-7.
LÜ Liuxin, CHEN Rongmu, CHEN Jinglu. Observation on embryonic development of litchi[J]. *Subtropical Plant Science*, 1985, 14(1): 3-7.
- [46] 叶明志,吕柳新. 荔枝幼果内源生长调节物的消长与胚胎发育的关系[J]. *福建农学院学报*, 1990(3): 268-272.
YE Mingzhi, LÜ Liuxin. Relationship between endogenous growth regulators and embryonic development of litchi young fruit[J]. *Journal of Fujian Agricultural University*, 1990(3): 268-272.
- [47] ZHANG J Q, WU Z C, HU F C, LIU L, HUANG X M, ZHAO J T, WANG H C. Abberant seed development in *Litchi chinensis* is associated with the impaired expression of cell wall invertase genes[J]. *Horticulture Research*, 2018, 5: 39.
- [48] 许鼎钟. 再论荔枝丰歉与气候的关系[J]. *福建果树*, 1982(1): 1-5.
XU Dingzhong. Re-discussion on the relationship between litchi abundance and apology and climate[J]. *Fujian Fruits*, 1982(1): 1-5.
- [49] 邱燕平,张展薇,王碧青,袁沛元,向旭. 糯米糍荔枝结果期叶、果营养消长及其与落果的关系[J]. *果树科学*, 1996, 13(增刊): 20-24.
QIU Yanping, ZHANG Zhanwei, WANG Biqing, YUAN Peiyuan, XIANG Xu. Nutritional changes of leaves and fruits in fruiting stage of "Nuomici" litchi and their relations to fruit dropping [J]. *Journal of Fruit Science*, 1996, 13(Suppl.): 20-24.
- [50] YUAN R C, HUANG H B. Litchi fruit abscission: its patterns, effect of shading and relation to endogenous abscisic acid[J]. *Scientia Horticulturae*, 1988, 36(33): 281-292.
- [51] 季作梁,梁立峰,柳建良,王钢涛. 荔枝果实发育期间内源激素含量动态[J]. *华南农业大学学报*, 1992, 13(3): 93-98.
JI Zuoliang, LIANG Lifeng, LIU Jianliang, WANG Gangtao. Studies on the changes of endogenous hormone contents in litchi (*Litchi chinensis* Sonn.) fruits during development[J]. *Journal of South China Agricultural University*, 1992, 13(3): 93-98.
- [52] 向旭,邱燕平,张展薇. 糯米糍荔枝果实内源激素与落果的关系[J]. *果树科学*, 1995, 12(2): 88-92.
XIANG Xu, QIU Yanping, ZHANG Zhanwei. Relationship between endogenous hormones and fruiting of 'Nuomici' litchi [J]. *Fruits Science*, 1995, 12(2): 88-92.
- [53] 李建国,刘顺枝,王泽槐. 荔枝果实发育过程中内源多胺含量的变化[J]. *植物生理学通讯*, 2004, 40(2): 153-156.

- LI Jianguo, LIU Shunzhi, WANG Zhehuai. Changes of endogenous polyamines in litchi fruit development[J]. *Plant Physiology Communications*, 2004, 40(2): 153-156.
- [54] 袁荣才, 黄辉白. 从调节源-库关系看环剥对荔枝幼树根梢生长与座果的调控[J]. *果树科学*, 1993, 10(4): 195-198.
- YUAN Rongcai, HUANG Huibai. The effect of ring peeling on root tip growth and fruit setting of litchi sapling was studied by regulating source-sink relationship[J]. *Fruits Science*, 1993, 10(4): 195-198.
- [55] LI C, WANG Y, HUANG X, LI J, WANG H, LI J. De novo assembly and characterization of fruit transcriptome in *Litchi chinensis* Sonn. and analysis of differentially regulated genes in fruit in response to shading[J]. *BMC Genomics*, 2013, 14(1): 552.
- [56] LI C, WANG Y, YING P, MA W, LI J. Genome-wide digital transcript analysis of putative fruitlet abscission related genes regulated by ethephon in litchi[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2015, 6: 502.
- [57] LI C, WANG Y, HUANG X, LI J, WANG H, LI J. An improved fruit transcriptome and the identification of the candidate genes involved in fruit abscission induced by carbohydrate stress in litchi[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2015, 6: 439.
- [58] YING P, LI C, LIU X, XIA R, ZHAO M, LI J. Identification and molecular characterization of an IDA-like gene from litchi, *LcIDL1*, whose ectopic expression promotes floral organ abscission in *Arabidopsis*[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 37135.
- [59] LI C Q, ZHAO M L, MA X S, WEN Z X, YING P Y, PENG M J, NING X P, XIA R, WU H, LI J G. Two cellulases involved in litchi fruit abscission are directly activated by an HD-Zip transcription factor LcHB2[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2019, 10.1093/jxb/erz276.
- [60] MA X S, LI C Q, HUANG X M. Involvement of HD ZIP I transcription factors LcHB2 and LcHB3 in fruitlet abscission by promoting transcription of genes related to the biosynthesis of ethylene and ABA in litchi[J]. *Tree Physiology*, 2019, 10.1093/treephys/tpz071.
- [61] LAI B, BING H, QIN Y H, ZHAO J T, WANG H C, HU G B. Transcriptomic analysis of *Litchi chinensis* pericarp during maturation with a focus on chlorophyll degradation and flavonoid biosynthesis[J]. *BMC Genomics*, 2015, 16(1): 225.
- [62] 魏永赞, 张红娜, 赖彪, 黄旭明, 胡桂兵, 王惠聪. 脱落酸和吡效隆对荔枝果皮着色的影响[J]. *果树学报*, 2014, 31(4): 653-659.
- WEI Yongzan, ZHANG Hongna, LAI Biao, HUANG Xuming, HU Guibing, WANG Huicong. Effect of abscisic acid and CP-PU on the coloration of lychee pericarp[J]. *Journal of Fruit Science*, 2014, 31(4): 653-659.
- [63] 魏永赞, 胡福初, 郑雪文, 石胜友, 董晨, 王弋, 李伟才. 光照对荔枝果实着色和花色苷生物合成影响的分子机制研究[J]. *园艺学报*, 2017, 44(7): 1363-1370.
- WEI Yongzan, HU Fuchu, ZHENG Xuewen, SHI Shengyou, DONG Chen, WANG Yi, LI Weicai. The molecular mechanism of the impacts of illumination on litchi fruit coloration and anthocyanin biosynthesis[J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2017, 44(7): 1363-1370.
- [64] MENZEL C M, HAYDON G F, SIMPSON D R. Mineral nutrient researches in bearing litchi trees[J]. *Journal of Horticultural Science*, 1992, 67(2): 149-160.
- [65] LI D, WANG C Y, LIU W, PENG Z P, HUANG S Y, HUANG J C, CHEN S S. Estimation of litchi (*Litchi chinensis* Sonn.) leaf nitrogen content at different growth stages using canopy reflectance spectra[J]. *European Journal of Agronomy*, 2016, 80: 182-194.
- [66] 姚丽贤, 周昌敏, 何兆桓, 李国良, 白翠华. 荔枝年度枝梢和花果发育养分需求特性[J]. *植物营养与肥料学报*, 2017, 23(4): 1128-1134.
- YAO Lixian, ZHOU Changmin, HE Zhaohuan, LI Guoliang, BAI Cuihua. Annual nutrient demand for the growth of autumn branch, spica and fruit in litchi[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2017, 23(4): 1128-1134.
- [67] 贾田, 张新明, 伏广农, 龙启成. 氮肥形态对荔枝植株氮素吸收分配特征的影响[J]. *耕作与栽培*, 2015(5): 7-10.
- JIA Tian, ZHANG Xinming, FU Guangnong, LONG Qicheng. Effects of nitrogen forms on absorption and distribution characteristics of litchi nitrogen[J]. *Tillage and Cultivation*, 2015(5): 7-10.
- [68] 周晓超, 苏阳, 张锐, 周开兵. 叶面喷布钾、钙和镁肥对妃子笑荔枝果皮着色的调节效果[J]. *西南农业学报*, 2015, 28(4): 1713-1718.
- ZHOU Xiaochao, SU Yang, ZHANG Rui, ZHOU Kaibing. Effects of K, Ca and Mg applied in foliar nutrients on pericarp's coloring of *Litchi chinensis* Sonn. cv. Feizixiao[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2015, 28(4): 1713-1718.
- [69] 张荣, 陈厚彬, 何平. 荔枝白粉病的发生与防治[J]. *果树学报*, 2010, 27(4): 641-644.
- ZHANG Rong, CHEN Houbin, HE Ping. Occurrence and control of litchi powdery mildew in Maoming region[J]. *Journal of Fruit Science*, 2010, 27(4): 641-644.
- [70] 陆永跃, 洗继东, 李云昌, 杨万清, 张小燕, 李春. 一种危害荔枝的新害虫——燧缘音狡长蠹[J]. *广东农业科学*, 2012, 39(12): 83-84.
- LU Yongyue, XIAN Jidong, LI Yunchang, YANG Wanqing, ZHANG Xiaoyan, LI Chun. A new pest, *Phonapate fimbrianta*, for litchi in China[J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2012, 39(12): 83-84.
- [71] 张新春, 高兆银, 肖茜, 彭元科, 王家保. 中国荔枝病原真菌分离和鉴定[J]. *广东农业科学*, 2014, 41(16): 81-84.
- ZHANG Xinchun, GAO Zhaoyin, XIAO Qian, PENG Yuanke, WANG Jiabao. Isolation and identification of pathogen fungi species of litchi in China[J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2014, 41(16): 81-84.

- [72] JIANG L Q, YE W W, SITU J J, CHEN Y B, YANG X Y, KONG G H, LIU Y Y, TINASHE R J, XI P G, WANG Y C. A Puf RNA-binding protein encoding gene *PIM90* regulates the sexual and asexual life stages of the litchi downy blight pathogen *Peronophythora litchii*[J]. Fungal Genetics and Biology, 2017, 98: 39-45.
- [73] SUN J H, GAO Z Y, ZHANG X C, ZOU X X, CAO L L, WANG J B. Transcriptome analysis of *Phytophthora litchii* reveals pathogenicity arsenals and confirms taxonomic status[J]. PLoS One, 2017, 12(6): 178245.
- [74] 曾令达, 张荣, 蔡韞, 柴素芬. 17种植物提取物对荔枝霜疫霉菌的抑制作用[J]. 广东农业科学, 2012, 39(12): 89-92.
- ZENG Lingda, ZHANG Rong, CAI Yun, CHAI Sufen. Inhibition of extracts from 17 kinds of plants on mycelia growth of *Peronophythora litchii*[J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2012, 39(12): 89-92.
- [75] 常红洋, 王荣波, 李本金, 陈妹樽, 翁启勇, 陈庆河. 防治荔枝霜疫霉菌病的药剂筛选及田间应用[J]. 农药, 2018, 57(2): 137-138.
- CHANG Hongyang, WANG Rongbo, LI Benjin, CHEN Shuzun, WENG Qiyong, CHEN Qinghe. Effective fungicides screening and field application for litchi downy blight[J]. Agrochemicals, 2018, 57(2): 137-138.
- [76] 董易之, 徐淑, 陈炳旭, 姚琼, 陈耿民. 荔枝蒂蛀虫幼虫龄数及各发育阶段在不同温度下的发育历期[J]. 昆虫学报, 2015, 58(10): 1108-1115.
- DONG Yizhi, XU Shu, CHEN Bingxu, YAO Qiong, CHEN Gengmin. Determination of larval instars and developmental duration of each stage at different temperatures of the litchi fruit borer, *Conopomorpha sinensis* (Lepidoptera: Gracillariidae)[J]. Acta Entomologica Sinica, 2015, 58(10): 1108-1115.
- [77] 徐海明, 董易之, 陈炳旭. 荔枝蒂蛀虫的发生与气象因子的关系初探[J]. 中国南方果树, 2018, 47(3): 84-86.
- XU Haiming, DONG Yizhi, CHEN Bingxu. Preliminary study on the relationship between the occurrence of borers and meteorological factors in litchi stem, *Conopomorpha sinensis* (Lepidoptera: Gracillariidae)[J]. South China Fruits, 2018, 47(3): 84-86.
- [78] 郭育晖, 叶慧娟, 谷文祥. 4种荔枝嫩梢挥发物的HS-SDME/AMDIS分析[J]. 广东农业科学, 2012(15): 112-115.
- GUO Yuhui, YE Huijuan, GU Wenxiang. Analysis of volatiles of sprouts in 4 varieties of litchi by HS-SDME/AMDIS[J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2012(15): 112-115.
- [79] 董易之, 姚琼, 陈炳旭, 徐淑, 徐海明. 荔枝蒂蛀虫的产卵选择性研究[J]. 果树学报, 2018, 35(2): 204-211.
- DONG Yizhi, YAO Qiong, CHEN Bingxu, XU Shu, XU Haiming. Study on the oviposition preference of the litchi fruit borer, *Conopomorpha sinensis* Bradley (Lepidoptera: Gracillariidae)[J]. Journal of Fruit Science, 2018, 35(2): 204-211.
- [80] YAO Q, SHU X, DONG Y Z, LU K, CHEN B X. Identification and characterisation of two general odourant-binding proteins from the litchi fruit borer, *Conopomorpha sinensis* Bradley[J]. Pest Management Science, 2016, 72(5): 877-887.
- [81] MENG X, HU J J, LI Y H, DAI J Q, GUO M F, OUYANG G C. The preference choices of *Conopomorpha sinensis* Bradley (Lepidoptera: Gracillariidae) for litchi based on its host surface characteristics and volatiles[J]. Scientific Reports, 2018, 8: 2045-2322.
- [82] 郭育晖, 叶慧娟, 方炜, 谷文祥. 不同品种荔枝对荔枝蒂蛀虫引诱活性成分的研究[J]. 天然产物研究与开发, 2013(9): 1218-1221.
- GUO Yuhui, YE Huijuan, FANG Wei, GU Wenxiang. Study on volatile constituents of 4 cultivars of litchi with different resistant ability to *Conopomorpha sinensis* Bradley[J]. Natural Product Research and Development, 2013(9): 1218-1221.
- [83] 王少山, 梁广文, 曾玲, 黄寿山. 荔枝蒂蛀虫对植物挥发油的触角电位和行为反应[J]. 石河子大学学报(自然科学版), 2010, 28(2): 158-161.
- WANG Shaoshan, LIANG Guangwen, ZENG Ling, HUANG Shoushan. Electroantennogram and behavioral responses of litchi fruit borer (*Conopomorpha sinensis* Bradley) to plant volatile oils[J]. Journal of Shihezi University (Natural Science Edition), 2010, 28(2): 158-161.
- [84] YAO Q, XU S, DONG Y Z, QUE Y L, QUAN L F, CHEN B X. Characterization of vitellogenin and vitellogenin receptor of *Conopomorpha sinensis* Bradley and their responses to sublethal concentrations of insecticide[J]. Frontiers in Physiology, 2018, 9: 1250.
- [85] 黎荣欣, 王玉洁, 高景林, 赵怡楠, 赵冬香. 触角和光暗对荔枝蜡蛾若虫聚集行为的影响[J]. 热带作物学报, 2013, 34(8): 1535-1538.
- LI Rongxin, WANG Yujie, GAO Jingli, ZHAO Yinan, ZHAO Dongxiang. Aggregation mechanism of *Tessaratomya papillosa* (Drury)[J]. Tropical Crop Journal, 2013, 34(8): 1535-1538.
- [86] 徐淑, 陈炳旭, 董易之. 几种杀虫剂对荔枝蜡蛾若虫的毒力及田间药效评价[J]. 环境昆虫学报, 2015, 37(2): 462-466.
- XU Shu, CHEN Bingxu, DONG Yizhi. The toxicity and control efficacy of different insecticides on *Tessaratomya papillosa* Drury [J]. Journal of Environmental Entomology, 2015, 37(2): 462-466.
- [87] 成家宁, 陈炳旭, 曾鑫年, 董易之, 陆恒, 徐淑. 14种植物乙醇提取物对荔枝粗胫翠尺蛾成虫产卵和幼虫取食的影响[J]. 果树学报, 2011, 28(2): 290-295.
- CHENG Jianing, CHEN Bingxu, ZENG Xinnian, DONG Yizhi, LU Heng, XU Shu. Effects of ethanol extracts from 14 plant species on oviposition and feeding behavior of *Thalassodes immisaria* Walker (Lepidoptera: Geometridae) [J]. Journal of Fruit Science, 2011, 28(2): 290-295.
- [88] 王运儒, 邓有展, 陈永森, 李乾坤, 吴静娜, 杨秀娟, 韦璐阳, 吴凤, 陆仲烟, 秦玉燕. 广西荔枝农药残留现状及膳食风险评估[J]. 南方农业学报, 2018, 49(9): 1804-1810.

- WANG Yunru, DENG Youzhan, CHEN Yongsan, LI Qiankun, WU Jingna, YANG Xiujuan, WEI Luyang, WU Feng, LU Zhongyan, QIN Yuyan. State and dietary intake risk assessment of pesticide residue in litchi in Guangxi[J]. Journal of Southern Agriculture, 2018, 49(9): 1804-1810.
- [89] WANG W, YANG Z, LU H, FU H. Mechanical damage caused by fruit-to-fruit impact of litchis[J]. IFAC- Papers On Line, 2018, 51(17): 532-535.
- [90] 叶敏, 邹湘军, 罗陆锋, 刘念, 莫宇达, 陈明猷, 王成琳. 荔枝采摘机器人双目视觉的动态定位误差分析[J]. 农业工程学报, 2016, 32(5): 50-56.
- YE Min, ZOU Xiangjun, LUO Lufeng, LIU Nian, MO Yuda, CHEN Mingyou, WANG Chengling. Error analysis of dynamic localization tests based on binocular stereo vision on litchi harvesting manipulator[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(5): 50-56.
- [91] XIONG J T, LIN R, LIU Z, HE Z L, TANG L Y, YANG Z G, ZOU X J. The recognition of litchi clusters and the calculation of picking point in a nocturnal natural environment[J]. Biosystems Engineering, 2018, 166: 44-57.
- [92] XIONG J T, HE Z L, LIN R, LIU Z, BU R B, YANG Z G, PENG H X, ZOU X J. Visual positioning technology of picking robots for dynamic litchi clusters with disturbance[J]. Computers & Electronics in Agriculture, 2018, 151: 226-237.
- [93] 郭嘉明, 吕恩利, 陆华忠, 杨松夏, 曾志雄. 冷藏运输箱体结构对流场影响的数值模拟[J]. 农业工程学报, 2012, 28(25): 74-80.
- GUO Jiaming, LÜ Enli, LU Huazhong, YANG Songxia, ZENG Zhixiong. Numerical simulation of effects of transport enclosure structure on flow field[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(25): 74-80.
- [94] FANG F, ZHANG Z Q, ZHANG X L, WU Z X, YIN H F, PANG X Q. Reduction in activity/gene expression of anthocyanin degradation enzymes in lychee pericarp is responsible for the color protection of the fruit by heat and acid treatment[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2013, 12(9): 1694-1702.
- [95] FANG F, ZHANG X L, LUO H H, ZHOU J J, GONG Y H, LI W J, SHI Z W, HE Q, WU Q, LI L, JIANG L L, CAI Z G, OREN S M, ZHANG Z Q, PANG X Q. An intracellular laccase is responsible for epicatechin-mediated anthocyanin degradation in litchi fruit pericarp[J]. Plant Physiology, 2015, 169(4): 2391-2408.
- [96] DENG M, DENG Y Y, DONG L H, MA Y X, LIU L, HUANG F, WEI Z C, ZHANG Y, ZHANG M W, ZHANG R F. Effect of storage conditions on phenolic profiles and antioxidant activity of litchi pericarp[J]. Molecules, 2018, 23(9): 2276.
- [97] 黄广君, 张金磊, 刘容, 凌海妹. 壳聚糖水杨酸盐的制备及其对荔枝保鲜的应用[J]. 食品科技, 2015, 40(8): 282-287.
- HUANG Guangjun, ZHANG Jinlei, LIU Rong, LING Haimei. Preparation of chitosan salicylate and its application on preservation of litchi store in normal temperature[J]. Food Science and Technology, 2015, 40(8): 282-287.
- [98] ZHANG Z K, DONALD J H, QU H X, YUN Z, WANG H, HUANG Z H, HUANG H, JIANG Y M. Enzymatic browning and antioxidant activities in harvested litchi fruit as influenced by apple polyphenols[J]. Food Chemistry, 2015, 171: 191-199.
- [99] 吴一品, 艾超, 严新, 林河通, 赵超. 一种微生物复合菌系发酵液对荔枝采后保鲜效果的研究[J]. 农业生物技术学报, 2017, 25(6): 930-938.
- WU Yijing, AI Chao, YAN Xin, LIN Hetong, ZHAO Chao. Effect of fermentation broth of microbial community on the preservation of harvested litchi (*Litchi chinensis*) fruit[J]. Journal of Agricultural Biotechnology, 2017, 25(6): 930-938.
- [100] XU C, HUI W F, LUO S, LUO H J, MA K, LI Y F. Effect of composite biological preservative containing *Lactobacillus plantarum* on postharvest litchi quality[J]. Food Science and Biotechnology, 2016, 25(6): 1639-1643.
- [101] WU Y J, LIN H T, LIN Y F, SHI J, XUE S, HUNG Y C, CHEN Y H, WANG H. Effects of biocontrol bacteria *Bacillus amyloliquefaciens* LY-1 culture broth on quality attributes and storability of harvested litchi fruit[J]. Postharvest Biology and Technology, 2017, 132: 81-87.
- [102] ZHANG Z K, HU M J, YUN Z, WANG J B, FENG G, GAO Z Y, SHI X Q, JIANG Y M. Effect of tea seed oil treatment on browning of litchi fruit in relation to energy status and metabolism[J]. Postharvest Biology and Technology, 2017, 132: 97-104.
- [103] LIU H, JING G, JIANG Y, LUO F, LI Z. The effect of carbamic acid, (1,2,3-thiadiazole-4-ylcarbonyl)-hexyl ester on *Peronophthora litchii* infection, quality and physiology of postharvest litchi fruits[J]. Chemistry Central Journal, 2017, 11(1): 1752-1753.
- [104] ZHANG Y Y, DONALD J H, HU M J, JIANG G X, GAO Z Y, XU X B, JIANG Y M, ZHANG Z K. Delay of postharvest browning in litchi fruit by melatonin via the enhancing of antioxidative processes and oxidation repair[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2018, 66(28): 7475-7484.
- [105] 黄雪梅, 庞学群, 张昭其. 不同采后因子对荔枝果实采后病害的影响[J]. 广东农业科学, 2013, 40(4): 74-76.
- HUANG Xuemei, PANG Xuequn, ZHANG Zhaoqi. Effect of postharvest factors on postharvest diseases of lychee (*Litchi chinensis*) fruits[J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2013, 40(4): 74-76.
- [106] JIANG X, LIN H, SHI J, NEETHIRAJAN S, LIN Y, CHEN Y, WANG H, LIN Y. Effects of a novel chitosan formulation treatment on quality attributes and storage behavior of harvested litchi fruit[J]. Food Chemistry, 2018, 252: 134-141.
- [107] 彭勃, 冯孔龙, 苗建银, 陈运娇, 陈飞龙, 曹庸. 副干酪乳杆菌 FX-6 产抗菌肽粗提物对荔枝贮藏品质的影响[J]. 食品科学, 2018, 39(7): 249-255.
- PENG Bo, FENG Konglong, MIAO Jianyin, CHEN Yunjiao,

- CHEN Feilong, CAO Yong. Effect of crude extract containing antimicrobial peptide produced by *Lactobacillus paracasei* subsp. *tolerans* FX-6 on the quality of litchi during storage[J]. Food Science, 2018, 39(7): 249-255.
- [108] LUO J J, LI Z B, WANG J J, WENG Q F, CHEN S H, HU M Y. Antifungal activity of isoliquiritin and its inhibitory effect against peronophythora litchi chen through a membrane damage mechanism[J]. Molecules, 2016, 21(2): 237.
- [109] 高兆银, 赵超, 胡美姣, 李敏, 李焕苓, 王果, 孙进华, 王家保. 能量供应对‘南岛无核’荔枝果实采后能量代谢及衰老的影响[J]. 热带作物学报, 2018, 39(2): 254-259.
- GAO Zhaoyin, ZHAO Chao, HU Meijiao, LI Min, LI Huanling, WANG Guo, SUN Jinhua, WANG Jiabao. Effects of energy supply on energy metabolism and postharvest senescence of ‘Nandaowuhe’ litchi fruit[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2018, 39(2): 254-259.
- [110] JIANG G X, YAN H L, WU F W, ZHANG D D, ZENG W, QU H X, CHEN F, TAN L, DUAN X W, JIANG Y M. Litchi fruit *LcNAC1* is a target of *LcMYC2* and regulator of fruit senescence through its interaction with *LcWRKY1*[J]. Plant and Cell Physiology, 2017, 58(6): 1075-1089.
- [111] 李明启, 严君灵. 荔枝果皮多酚氧化酶的研究[J]. 植物学报, 1963(4): 49-57.
- LI Mingqi, YAN Junling. Study on polyphenol oxidase in litchi peel[J]. Acta Botanica Sinica, 1963(4): 49-57.
- [112] 崔珊珊, 胡卓炎, 余恺, 李雅萍, 林文祥, 余小林. 不同产地妃子笑荔枝果汁的氨基酸组分[J]. 食品科学, 2011, 32(12): 269-273.
- CUI Shanshan, HU Zhuoyan, YU Kai, LI Yaping, LIN Wenxiang, YU Xiaolin. Amino acid composition of feizixiao litchi juice from different geographic origins[J]. Food Science, 2011, 32(12): 269-273.
- [113] 万鹏, 刘亮, 潘思轶, 徐玉娟. 热处理对荔枝果汁品质的影响[J]. 食品科学, 2010, 31(7): 22-27.
- WAN Peng, LIU Liang, PAN Siyi, XU Yujuan. Effect of thermal treatment on quality of litchi juice[J]. Food Science, 2010, 31(7): 22-27.
- [114] 吴敏, 胡卓炎. 贮藏过程中溶解氧对荔枝汁非酶褐变的影响[J]. 现代食品科技, 2017, 33(12): 145-154.
- WU Min, HU Zhuoyan. Effects of dissolved oxygen on non-enzymatic browning of litchi juice during the storage[J]. Modern Food Science and Technology, 2017, 33(12): 145-154.
- [115] YU K, WU Y Q, HU Z Y, CUI S S, YU X L. Modeling thermal degradation of litchi texture: Comparison of WeLL model and conventional methods[J]. Food Research International, 2011, 44(7): 1970-1976.
- [116] CHAIKHAM P, RATTANASENA P, PHUNCHAISRI C, SUDSANOR P. Quality changes of litchi (*Litchi chinensis* Sonn.) in syrup due to thermal and high pressure processes[J]. Lwt-Food Science and Technology, 2017, 75: 751-760.
- [117] OGASAWARA J K, KITADATE H, NISHIOKA H, FUJII T, SAKURAI T, KIZAKI T, IZAWA H, ISHIDA H O. Comparison of the effect of oligonol, a new lychee fruit-derived low molecular form of polyphenol, and epigallocatechin-3-gallate on lipolysis in rat primary adipocytes[J]. Phytotherapy Research, 2011, 25(3): 467-471.
- [118] 王惠聪, 吴子辰, 黄旭明, 胡桂兵, 陈厚彬. 无患子科植物荔枝和龙眼中白坚木皮醇的测定[J]. 华南农业大学学报, 2013, 34(3): 315-319.
- WANG Huicong, WU Zichen, HUANG Xuming, HU Guibing, CHEN Houbin. Determination of quebrachitol *Litchi chinensis* and *Dimocarpus longan* in Sapindaceae family[J]. Journal of South China Agricultural University, 2013, 34(3): 315-319.
- [119] LI S Y, YANG Y J, LI J S, ZHU Z Z, LORENZO J M, FRANCISCO B J. Increasing yield and antioxidative performance of litchi pericarp procyanidins in baked food by ultrasound-assisted extraction coupled with enzymatic treatment[J]. Molecules, 2018, 23(9): 2089.
- [120] DONG X Z, WANG Y H, HE X J. Phenolics from *Litchi chinensis* Sonn. and their potential antioxidant effects[J]. Asian Food Science Journal, 2018, 1(4): 1-8.
- [121] HSU C P, LIN C C, HUANG C C. Induction of apoptosis and cell cycle arrest in human colorectal carcinoma by litchi seed extract[J]. Journal of Biomedicine and Biotechnology, 2012, 7: 341-474.
- [122] 罗伟生, 欧士钰, 靳雅玲, 覃浩, 孙旭锐. 荔枝核总黄酮抗大鼠肝纤维化的作用及其对核转录因子- κ B p65 表达的影响[J]. 广东医学, 2012, 33(21): 3201-3204.
- LUO Weisheng, OU Shiyu, JIN Yaling, QIN Hao, SUN Xurui. Effects of total flavone from *Litchi chinensis* Sonn. on the expression of NF- κ B p65 and hepatic fibrosis in rats[J]. Guangdong Medical Journal, 2012, 33(21): 3201-3204.
- [123] YANG D J, CHANG Y Z, CHEN Y C, LIU S C, HSU C H, LIN J T. Antioxidant effect and active components of litchi (*Litchi chinensis* Sonn.) flower[J]. Food and Chemical Toxicology, 2012, 50(9): 3056-3061.
- [124] 熊何健, 庞杰, 林琳. 荔枝核中活性成分的提取及抗氧化活力研究[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2010, 32(3): 134-139.
- XIONG Hejian, PANG Jie, LIN Lin. Study on the preparation of active substances from litchi seed and their antioxidant activity[J]. Journal of Southwest University (Natural Science Edition), 2010, 32(3): 134-139.
- [125] ZHOU Y, WANG H, YANG R L, HUANG H, SUN Y M, SHEN Y D, LEI H T, GAO H. Effects of *Litchi chinensis* fruit isolates on prostaglandin E₂ and nitric oxide production in J774 murine macrophage cells[J]. BMC Complementary and Alternative Medicine, 2012, 12(1): 12.