

椰枣育种研究进展与未来方向

张敬宇^{1,2}, 李蕊³, 胡伟¹, 刘亚慧^{1,2}, 杨慰农⁴, 张宁^{1*}

1. 中国热带农业科学院椰子研究所/国家热带棕榈种质资源圃/椰枣资源鉴定评价与种苗繁育国际联合研究中心, 海南文昌 571300; 2. 中国热带农业科学院三亚研究院, 海南三亚 572025; 3. 云南农业大学热带作物学院, 云南普洱 665000; 4. 云南新兴绿化工程有限公司, 云南昆明 650031

摘要: 椰枣 (*Phoenix dactylifera*) 是干旱半干旱地区的关键经济作物, 兼具固沙保水的生态功能、深加工驱动的经济价值及深厚宗教文化意义。本文综述其遗传育种研究进展: 种质资源领域, 沙特费萨尔国王大学 (King Faisal University)、伊朗国家植物基因库 (National Plant Gene Bank of Iran)、中国热带农业科学院等机构建立核心种质库, 结合智能灌溉、冷冻贮藏等技术保存资源, SSR、SNP 等分子标记技术揭示品种间遗传差异; 育种方法上, 传统选择与杂交育种奠定基础, 高通量测序、体细胞胚胎发生、CRISPR/Cas9 等现代生物技术加速精准育种进程; 现存核心挑战包括雌雄异株导致早期性别难鉴别、完整生长周期超 10 a、基因组高度杂合且分子研究滞后。未来育种需聚焦培育抗高温、干旱、盐碱等非生物胁迫的品种, 防控红棕象甲、镰刀菌枯萎病、叶斑病等病虫害, 优化果实产量与品质, 同时需深化遗传机制研究、突破基因编辑技术瓶颈, 并加强国际种质资源交流与合作, 助力全球椰枣产业可持续发展。

关键词: 椰枣; 育种; 种质资源; 遗传多样性

中图分类号: S667.9 文献标志码: A

Research Progress and Future Directions of Date Palm Breeding

ZHANG Jingyu¹, LI Rui³, HU Wei¹, LIU Yahui^{1,2}, YANG Weinong⁴, ZHANG Ning^{1*}

1. Coconut Research Institute, Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences / National Tropical Palm Germplasm Reserve / International Joint Research Center for Date Palm Resource Identification and Evaluation and Seedling Propagation, Wenchang, Hainan 571300, China; 2. Sanya Research Institute, Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences, Sanya, Hainan 572025, China; 3. College of Tropical Crops, Yunnan Agricultural University, Pu'er, Yunnan 665000, China; 4. Yunnan Xinxing Greening Engineering Co., Ltd., Kunming, Yunnan 650031, China

Abstract: Date palm (*Phoenix dactylifera*) is a key economic crop in arid and semi-arid regions, which possesses ecological functions of sand fixation and water conservation, economic value driven by deep processing, as well as profound religious and cultural significance. This paper reviews the research progress in its genetic breeding from the following aspects. In germplasm resources, core germplasm banks have been established by institutions such as King Faisal University of Saudi Arabia, the National Plant Gene Bank of Iran, and the Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences. The institutions preserve germplasm resources by combining technologies like smart irrigation and cryopreservation, while molecular marker technologies including SSR and SNP have been applied to reveal genetic differences among date palm varieties. In breeding methods, traditional selection and hybrid breeding have laid the foundation for date palm breeding. Modern biotechnologies such as high-throughput sequencing, somatic embryogenesis, and CRISPR/Cas9 have accelerated the process of precision breeding. The current core challenges in date palm breeding include difficulty in early sex identification due to dioecy, a complete growth cycle exceeding 10 years, highly heterozygous genome, and lagging molecular research. Future breeding efforts should focus on developing varieties resis-

收稿日期 2025-10-15; 接受日期 2025-11-09

基金项目 云南省重大科技专项计划-干热河谷椰枣引种试验研究 (No. 202202AE090025); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项 (No. 1630012025304); 中国热带农业科学院国家热带农业科学中心科技创新团队 (No. CATASCXTD202525)。

作者简介 张敬宇 (1995—), 男, 博士研究生, 研究方向: 椰枣遗传育种。*通信作者 (Corresponding author): 张宁 (ZHANG Ning), E-mail: xining0607catas@163.com。

tant to abiotic stresses such as hot temperature, drought and salinity-alkalinity, preventing and controlling pests and diseases including red palm weevil, *Fusarium* spp., and leaf spot disease, and optimizing fruit yield and quality. Meanwhile, it is necessary to deepen research on genetic mechanisms, break through bottlenecks in gene editing technology, and strengthen international exchange and cooperation of germplasm resources, to promote the sustainable development of the global date palm industry.

Keywords: date palm; breeding; germplasm resources; genetic diversity

DOI: 10.3969/j.issn.1000-2561.2026.02.011

椰枣 (*Phoenix dactylifera*) 又名海枣、枣椰子、波斯枣等, 隶属于棕榈目 (Arecales) 棕榈科 (Arecaceae), 原产于北非, 目前广泛种植于北非、西南亚, 以及阿拉伯半岛直至波斯湾地区。椰枣具有扇形叶片和直立树干, 在炎热干旱的地区形成了绿洲的特色植被。联合国粮农组织 (FAO) 统计结果显示, 2023 年全球椰枣年产量超过 982 万 t^[1]。椰枣产业生产区域集中, 全球前五大生产国占全球产量约 70% (表 1), 其中埃及和沙特阿拉伯年产量超过 160 万 t。沙特阿拉伯是全球椰枣生产大国, 拥有 300 多个椰枣品种, 出口覆盖 111 个国家, 2022 年出口额约 3.4 亿美元^[2]。伊拉克作为传统椰枣大国, 历史上年产量曾占全球 40%, 最高达 70 万 t, 出口占其总出口额的三分之一^[3]。埃及作为最大生产国^[4], 其亩产量和总产量均处于世界领先地位, 2023 年产量达 186.7 万 t (表 1)。椰枣具有显著的生态适应性, 由于椰枣发达的根系、特殊的纤维结构和密度^[5], 使其在干旱环境中既能高效吸收水分, 又能抵抗风沙侵蚀, 因此可以广泛种植于中东和北非的干旱与半干旱地区, 对产区国家经济贡献显著, 涵盖农业、就业与国际贸易。椰枣的出口具有直接经济贡献, 同时相关产业也提供了广泛的就业岗位^[2, 6-7]。椰枣具有丰富的深加工产业链, 例如椰枣酸奶、果酱等产品的开发进一步提升了附加值^[8], 相关的加工副产品, 例如椰枣纤维可加工为生物复合材料^[9], 椰枣核提取物用于化妆品的抗氧化成分^[10]。

椰枣在宗教、历史与社会生活中具有深远影响。伊斯兰教中, 椰枣被称为“沙漠面包”, 先知穆罕默德将其喻为“阿拉伯人的姑母”, 斋月期间为传统开斋食品^[11]。埃及法老墓壁画中的椰枣图案, 印证了其数千年的种植历史^[12]。摩洛哥举办椰枣节, 庆祝丰收与文化遗产^[13]。中国唐代长沙窑瓷器上的椰枣纹, 反映了古代丝绸之路的文化交流^[14]。椰枣树具有固沙保水的作用, 对维系绿洲生态平衡意义重大, 被称为“阿拉伯民族之树”。

表 1 2023 年椰枣主产国产量和种植面积

(数据来源于联合国粮农组织^[1])

Tab. 1 Date palm yield and planting area of main producing countries in 2023 (Data from the Food and Agriculture Organization of the United Nations^[1])

国家 Country	产量 Yield/t	种植面积 Planting area/hm ²
埃及	1 867 064.0	72 395
沙特阿拉伯	1 642 993.0	157 444
阿尔及利亚	1 324 767.0	179 150
伊朗	1 024 117.0	122 151
伊拉克	635 947.1	275 986
巴基斯坦	503 787.3	109 078
其他国家	2 823 950.0	393 419

在贝杜因游牧文化中, 椰枣、骆驼与沙漠构成生存三要素^[11]。

椰枣作为干旱半干旱地区的标志性特色经济作物, 其育种研究对保障全球粮食安全、推进荒漠生态修复及驱动区域产业升级具有多维度、关键性战略意义。从生态适应性角度看, 椰枣所固有的耐旱、耐盐碱生物学特性, 使其成为维系荒漠生态系统结构与功能稳定的核心物种; 而定向育种技术的应用, 进一步强化了其对极端生境的环境适配能力, 为脆弱生态区的植被重建提供了物种支撑。在粮食安全维度, 通过对椰枣关键经济性状展开系统深入的解析, 能够挖掘并确立更多高产、稳性能的育种指标, 这为极端气候背景下全球粮食供给体系的稳定性提供了关键物种保障^[15]。与此同时, 分子育种技术的突破与应用, 为极端环境适配型椰枣品种的高效培育提供了技术路径, 尤其在椰枣品质改良与产量提升的协同优化维度, 有望突破其产量与品质间固有的权衡效应这一核心瓶颈, 为品种改良提供新的解决方案^[16]。从产业赋能层面来看, 当前经育种优化的椰枣原料已支撑 12 大类深加工产品体系的构建, 产品覆盖范围从食品领域的糖浆、果粉等基础加工品, 延伸至化妆品级多酚提取物及生物基材料等高附加值产品, 形成了多元化的产业发展格局^[10, 17-18]。

1 椰枣种质资源保护与利用

1.1 全球种质库现状

椰枣树不仅是沙特阿拉伯重要的经济作物,也是文化和生态系统的核心组成部分。沙特阿拉伯费萨尔国王大学(King Faisal University)的枣棕榈种质库隶属于该校的棕榈研究卓越中心(The Center of Research Excellence in Date Palm),于1986—1989年期间收集了来自世界各地的18个品种、281株组培椰枣苗,其成立背景与沙特阿拉伯作为全球椰枣树主要产区的地位密切相关^[19-20]。该种质库团队开发了基于土壤湿度传感器和叶片温度监测的智能灌溉系统,显著减少水资源消耗,同时维持光合作用效率和果实产量。新型地下灌溉系统在干旱条件下可提高水生产力15%以上,结合云平台技术,实现灌溉数据的实时监测与远程控制,为无土栽培和精准农业提供技术支持^[19]。自动化传感器驱动的催熟装置结合了超声波预处理技术,缩短果实成熟周期并提高品质一致性。该系统通过精确控制温度和相对湿度,减少果实腐烂率,延长货架期^[20]。通过形态学参数,如果实大小、叶型和分子标记(如SSR、SNP)的分析,构建了多个本地品种的遗传图谱,筛选出抗旱性强的种质资源^[21]。与巴基斯坦、尼日利亚等国的研究机构合作,开展种质资源交换和表型数据库建设,推动全球椰枣树遗传资源的系统分类与保护。

伊朗国家植物基因库(National Plant Gene Bank of Iran, NPGBI)是伊朗植物遗传资源保护与利用的核心机构,该基因库的前身是1977年在卡拉杰种子和植物改良研究所(Seed and Plant Improvement Institute, SPII)设立的植物遗传资源单元(Plant Genetic Resources Unit, PGRU),1983年在PGRU基础上整合资源并新增投资正式成立,现隶属于伊朗农业部下属的农业研究、推广与教育组织。椰枣作为伊朗干旱半干旱地区的标志性经济作物与生态适应性物种,其资源保存是NPGBI田间基因库的重要组成部分。根据NPGBI资源清单,该基因库通过田间定植方式保存椰枣活体植株102份,所有植株均定植于专门规划的田间基因库站点,采用分区管理模式,定期开展生长监测、物候记录及病虫害防控,以确保遗传资源的完整性与活力。此类椰枣资源主要来源于伊朗本土不同生态区的地方品种与野生近缘种,

涵盖了果实大小、糖分含量、抗干旱及耐盐性等多维度遗传变异,为椰枣品种改良提供了关键的遗传材料基础^[22]。NPGBI对椰枣资源的保存与管理,不仅是对伊朗农业遗产的保护,更对该国应对干旱、土壤盐渍化等环境挑战具有战略意义。通过田间保存的椰枣资源,可为SPII等机构的育种项目提供抗逆性基因供体,助力培育适应气候变化的高产优质品种;同时,该资源库也为区域椰枣遗传资源交流与共享提供了平台,契合伊朗作为西亚重要农业生物多样性热点地区的角色定位,为全球干旱区椰枣产业的可持续发展贡献了遗传资源保障^[23-24]。

椰枣起源可追溯至约6000年前的美索不达米亚地区,而现今伊拉克作为该起源地的核心区域,拥有丰富的椰枣遗传资源与悠久的栽培历史^[25]。据记载,伊拉克曾是全球最大的椰枣生产国,拥有约600个椰枣品种,且一度保有世界面积最大的椰枣林^[26],但受海湾战争、两伊战争及后续国际制裁的影响,大量椰枣林被毁,南部沼泽排水工程进一步导致野生及半栽培椰枣植株死亡,显著加剧了椰枣资源的丢失^[25]。为缓解这一问题,伊拉克通过国际合作开展资源安全备份,例如2003年伊拉克Abu Ghraib国家基因库受损后,关键品种通过与国际干旱地区农业研究中心合作,转移至叙利亚阿勒颇的基因库进行备份,部分资源后续进一步存入斯瓦尔巴全球种子库,降低了资源彻底流失的风险^[27-28]。

中国热带农业科学院椰子研究所(以下简称“椰子所”)国家热带棕榈种质资源圃收集保存了国内外椰枣种质资源171份,其中36份优良母本资源。建有椰枣隔离检疫圃1个,共建“中国—阿拉伯联合酋长国椰枣友谊林”。相关的研究发现,海南椰枣在果实性状如单果质量、糖酸组分及营养元素含量上与原生境品种存在显著差异,需通过品种改良提升本地适应性^[29]。海南高温多雨的气候导致椰枣叶斑病高发,2020—2021年椰子所团队在资源圃内首次发现由新拟盘多毛孢属引起的叶斑病,发病率达80%。通过病原分离、分子鉴定及科赫法则验证,明确其致病机制,为后续抗病育种和化学防治提供依据^[30]。通过与埃及合作,学习其椰枣离体快繁技术,优化培养基配方,提高种苗繁殖效率^[31]。通过研究发现,椰枣花粉在-20℃或-80℃下贮藏40d仍能保持较高萌发率,为人工授粉技术推广奠定基础^[32]。

1.2 遗传多样性分析

椰枣树的遗传多样性研究广泛采用分子标记技术。基于叶绿体 DNA 条形码 psbK~psbI 间隔区的分析显示, 30 个阿联酋椰枣树品种间的核苷酸距离范围为 0.001~0.009, 部分品种存在显著遗传差异^[33]。此类数据揭示了品种间的遗传分化程度, 为群体结构分析提供量化依据。在未来的研究中可以通过 CRISPR/Cas9 技术定向编辑椰枣树基因组, 改善遗传背景和多样性, 例如通过替换突变或调控代谢途径^[34]。椰枣树的遗传结构与地理分布和生态适应性密切相关。例如, 沙特阿拉伯的 Ajwa 和 AJWA-TUL-MADINAH 品种在盐胁迫下产量差异显著, 提示其遗传背景可能影响抗逆性^[33]。类似地, 红棕榈象甲 (*Rhynchophorus ferrugineus*) 对不同品种的侵染率差异显著, 在 Nabret Sultan 侵染率高达 30%, 而在品种 Un Kobar 中侵染率仅有 5%, 表明遗传抗性基因的存在^[35]。现代技术如卷积神经网络 (CNN) 已用于图像分类, 例如 DPXception 模型通过叶片形态精准区分 Barhi、Sukkari、Ikhlas 和 Saqi 4 种椰枣树, 表明 4 种椰枣树的表型具有一定的差异^[36]。

1.3 目前主要的椰枣品种及特点

在全球范围内, 椰枣作为一种具有重要经济和文化价值的果实, 其品种繁多。然而, 由于不同国家的语言文化差异, 以及椰枣种植历史的悠久与广泛传播, 导致不同椰枣的命名在各个国家略有不同。以“奥巴马椰枣”为例, 在埃及, 水果商为推销斋月传统食品椰枣, 将口味最甜的椰枣命名为“奥巴马”, 还有更美味的“超级奥巴马”椰枣; 而像“小布什”“利伯曼”等则被用来指代口味较差的椰枣。这种命名方式虽带有一定趣味性, 但并非基于科学分类, 使得椰枣品种名称在国际间缺乏统一规范。同时, 判断椰枣树品种的有效且准确手段较为匮乏。椰枣种苗定植后一般需要生长 5~8 a 才能开花结果, 在育苗及种植管理过程中需投入大量人力、物力和财力。传统上, 人们往往只能依靠椰枣果实成熟后的外观、口感等特征来辨别品种, 但这些特征易受生长环境、栽培管理方式等因素影响而产生变化。例如, 在不同土壤肥力、灌溉条件下生长的同一椰枣品种, 其果实大小、甜度、色泽可能会有所不同, 这就导致各品种的特点以及区别相对模糊, 给椰枣品种的准确识别和研究带来了挑战。

总体而言, 依据食用特性, 椰枣可分为干食、

半干食和鲜食三大类。干食类椰枣水分含量较低, 质地较硬, 便于长时间储存和运输, 适合制作成干货零食, 或是磨粉用于烘焙食品中增加风味; 半干食类椰枣水分与糖分含量适中, 口感软糯, 既可以直接食用, 也常用于制作甜品馅料; 鲜食类椰枣则以其多汁、清甜、果肉鲜嫩的特点, 成为人们日常生食的首选, 不过相对储存期较短。表 2 整理了一些常见椰枣品种的特点。

2 椰枣育种方法

2.1 椰枣育种的传统方法

椰枣树作为干旱地区的重要经济作物, 其传统育种方法主要包括选择育种与杂交育种, 这些方法在历史上推动了品种改良与适应性提升。早期种植者通过观察果实大小、含糖量、抗逆性等表型特征筛选优良单株, 例如中东地区对 Medjool 等优质品种的长期定向选择^[55]。同时也可以根据环境差异如盐碱地、干旱区条件筛选适应性强的品种, 例如突尼斯山麓绿洲系统中, 不同地区椰枣树的种植密度与恢复率反映了对微环境的选择优化^[56]。椰枣树雌雄异株的特性促使早期农民通过控制授粉实现种间杂交, 传统方法包括采集雄株花粉并手动涂抹雌花, 以提高坐果率。现代研究显示, 组织培养来源的椰枣树在授粉后评级指数显著高于常规分枝植株^[12, 57]。全球已鉴定数千个椰枣树品种, 有研究通过 psbK-psbI 序列分子标记探究椰枣的遗传多样性, 结果显示品种间存在一定遗传变异, 系统发育树表明品种分为 2 个主要聚类, 椰枣树经历了快速扩张和近期种群增长^[58]。巴基斯坦农户根据灌溉水源 (管井、运河等) 选择不同品种, 小型农户更倾向于耐旱型^[59]。在突尼斯绿洲系统中, 椰枣树与传统农业 (如无花果轮作) 结合, 维持土壤肥力并提高系统稳定性^[60]。

2.2 椰枣育种的现代生物技术

通过高通量测序技术开发的 SSR (simple sequence repeats) 标记可在椰枣苗期快速鉴定雄性植株, 显著提升经济效率^[61]。通过比较雌雄株或抗病和感病株的转录组, 可挖掘性别决定基因或抗病相关基因^[62]。体细胞胚胎发生是椰枣微繁殖的核心技术, 其效率受外植体类型、激素配比及糖源类型的显著影响。临时浸没式生物反应器可提高胚胎发生同步性和幼苗存活率^[63]。通过逆转座子间扩增多态性 (IRAP) 标记验证, 体细胞胚胎再生植株的遗传稳定性较高, 表型回溯显示

田间适应性良好。该技术已成功用于沙特阿拉伯、伊朗等主产区的品种保存与快速繁殖，结合冷冻保存技术可实现种质资源长期储存^[64-65]。椰枣基因组数据的完善为设计靶向基因（如性别决定基因或抗病基因）提供了基础。目前需突破的技术瓶颈包括高效转化体系的建立及脱靶效应的控制。靶向编辑抗枯萎病相关基因提升抗病性，或者调控糖代谢或果实硬度相关基因^[62, 66]。

表 2 部分椰枣品种特点
Tab. 2 Characteristics of some date palm varieties

品种名 Variety name	特点 Characteristics	文献 Literatures
Ajwa	种子呈胖圆形，单粒重量大，幼苗生长迅速，适应力强，水分糖分含量较高，膳食纤维含量、矿物质和维生素含量高	[37-39]
Amari	果实柔软、甜、中等大小，可干食	[40]
Barhi	果实脆甜、颜色鲜艳，适合鲜食，软果，形状宽卵形至圆形，果皮中等厚度，光滑透明，甜美可口，成熟期鲜食	[40-41]
Barhee	树干直径较粗，叶面积大，生长势强，产量高，总可溶性固体含量高	[42-43]
Deglet Noor	产量高，成熟阶段含多种酚类化合物，抗氧化活性显著，形状长圆卵形，果皮中等厚度，果实半干，坚实，味道独特	[40, 44-45]
Fard	在盐胁迫下发芽率低，半干，果实甜而辛辣，形状为厚圆柱形，果皮中等厚度	[40, 46]
Halawy	果实柔软、甜，产量高，半透明，长圆形，顶端圆，皮薄	[40, 43]
Hayani	萌芽存活率高，根系发育良好，果实质地柔软，甜度适中，果实呈长方形	[40, 47]
Kabkab	柔软、细长、未成熟的果实可以在煮熟和干燥后食用	[40]
Khadrawi	果实柔软，入口即化，椭圆形至卵形，果皮中等厚度	[40]
Khalas	发芽率高，幼苗活力强，果实糖分以葡萄糖和果糖为主，蔗糖含量低，风味清甜，形状长椭圆形，皮薄，产量高	[40, 43, 48-50]
Khasab	椭圆形，果皮坚韧，果肉厚实，树矮小	[40, 43]
Khenzi	再生能力强，易感叶斑病	[30, 51]
Majhool	果肉占比高，密度和球形度优异，适合加工，果实柔软、大而甜，外观诱人，可鲜食或干食，树干高	[40, 43, 52]
Lulu	柔软甜美，长椭圆形，果实厚实，果肉纤维少	[40]
Mazafati	肉质柔软，圆柱形，味道鲜美	[40]
Nabt Saif	单果鲜质量、果长和果宽较大，糖酸组分多样	[29]
Nagal	抽穗早，果实较长，总可溶性固形物较少	[43]
Piarom	半干且肉质，细长的形状，昂贵，受欢迎	[40]
Rabbi	半干肉质，细长形状	[40]
Shishi	果实密度较低，但总可溶性固体含量较高	[53]
Zahidi	干型、半干型、长圆卵形，皮厚，果实紧实、不甜、口感顺滑	[40]
Zamli	能耐受一定降雨，成熟季节较晚	[54]

3 椰枣育种现存挑战

椰枣是干旱及半干旱地区的重要经济作物，在西亚、北非等地种植历史悠久，对当地经济与文化意义重大。但是，其育种研究困难重重。椰枣多年生且雌雄异株，早期外观差异不明显，增加了成本和管理难度；个体遗传差异显著，杂交时亲本选配复杂，授粉环节变数大，且分子育种基础研究滞后；病虫害威胁日益严重，抗性育种因遗传背景复杂和互作机制研究不足而进展缓

慢；全球生态环境变化下，现有品种环境适应性渐显不足，培育新品种需深入了解抗逆机制并结合多种技术开展大量试验筛选。

3.1 雌雄异株

椰枣为雌雄异株植物，雌株的产果能力直接关联经济效益，而雄株仅用于授粉，早期不能有效筛选雌株幼苗会导致种植效率低下。但其性别分化需经过 5~8 a 的营养生长阶段才能通过开花表现判断，早期无法通过形态特征区分雌雄。这

种滞后性导致传统育种中需保留大量幼苗以等待性别分化造成资源浪费,同时苗圃需长期养护无经济价值的雄株增加生产成本^[61]。传统育种依赖人工授粉,需保留一定比例的雄株(通常雌雄比例约为 10:1),但雄株花粉活力受贮藏条件限制。例如,研究表明椰枣花粉在常温下仅能维持 10~30 d 的有效萌发率,而低温(-20℃或-80℃)贮藏虽可延长活力,但仍需频繁更新花粉库。此外,雌雄植株空间布局不当易导致授粉不均,影响果实产量和品质^[32]。有早期的文献报道通过染色体染色的方法处理分生组织识别椰枣性别^[67],或者对椰枣的同工酶活性进行检测,结果表明过氧化物酶、酸性磷酸酶和谷氨酸草酰乙酸酶活性在雌雄之间具有很大的差异,因此提出可以通过检测酶的活性水平鉴定性别类型^[68],但是由于方法较为复杂且鉴定结果不稳定导致应用价值较小。目前有较多的研究通过性别标记的方法鉴定椰枣性别,例如 RAPD、ISSR 和 SSR 等^[69-73],但是效果一般。通过雌雄椰枣的基因组比对,椰枣的性别决定区可能位于 12 号染色体中,但是性别决定的机制目前尚不明确^[74]。

3.2 生长周期长

椰枣作为一种在干旱与半干旱地区极具价值的经济作物,其生长发育进程极为缓慢。从种子萌发出幼芽开始,历经漫长的营养生长阶段,直至首次开花、结果并迎来种子成熟,这一完整世代的完成通常需要 5 a 以上的时间。椰枣种子发芽后,需精心培育 2~3 a 才会进入相对快速的成长期。在椰枣的生长初期,幼苗生长速率极为迟缓,往往需要数年时间才能扎根稳固并建立起基本的生长架构。在自然条件下,整个成长期可能持续 5~6 a 之久,之后才有可能进入开花结果的生殖阶段。

传统的椰枣杂交育种方式更是困难重重。由于椰枣的遗传特性复杂,为培育出具有优良性状的新品种,科研人员往往需要开展多代选育工作。每一代选育过程中,都需要对大量植株进行细致观察与筛选,而这一过程由于椰枣漫长的生长周期而变得极为耗时。单次完整的品种改良周期,从杂交授粉操作开始,到成功选育出性状稳定、符合预期的新品种,极有可能长达数十年。以备受市场青睐的帝王椰枣为例,其果实口感绝佳、甜度适宜、果实饱满,然而为使这些优质性状得以稳定遗传,研究人员不得不经历多代的耐心观

察与选育。在每一代的培育过程中,都需等待植株成长至开花结果阶段,才能对果实品质、产量等关键性状进行评估,以判断是否朝着预期方向发展,这一过程漫长且充满不确定性,难以快速响应瞬息万变的市场需求^[75]。

此外,椰枣较长的生命周期使得表型数据的积累异常缓慢。在传统育种工作中,科研人员主要依赖椰枣的形态特征,比如果实大小、糖酸含量、果实色泽、植株形态等,来判断品种特性及筛选优良单株。但这些特征的准确评估往往需要多年的持续观测,例如,椰枣果实的糖酸含量会随着植株生长年限、环境变化等因素逐年波动,只有经过多年的数据收集与分析,才能获取较为稳定、可靠的数值,从而为品种选育提供有效参考。更为棘手的是,在椰枣的苗期阶段,其形态特征与未来成株后的表现关联度较低,难以通过苗期特征精准预测成株后的优良性状,这就导致在早期进行适应性筛选时效率极为低下。育种人员可能需要耗费大量时间与资源培育众多幼苗,直至其成长至开花结果阶段,才能淘汰不符合要求的植株,这无疑极大地延缓了椰枣品种选育的整体进程,限制了新品种的推出速度与质量提升^[29,76]。

3.3 基因组复杂性与分子研究滞后

椰枣基因组高度杂合,传统育种中基因重组难以定向控制。例如,软质与干质品种的遗传分离表明,单一性状改良可能伴随其他性状的不可控变化。代谢组学研究显示,果实成熟阶段的成分动态变化受多基因调控,传统方法难以精准调控^[76]。北非椰枣品种的基因组中约 18% 的序列来自近缘种 *Phoenix theophrasti*,表明历史上的杂交事件促进了遗传多样性,群体遗传学分析揭示了中东与北非椰枣群体的分化,可能与古代贸易路线和栽培扩散相关^[77-78]。与椰子、油棕相比,椰枣树的基因家族扩张较少,但在离子转运如 Na^+/H^+ 逆向转运蛋白和抗逆相关基因上表现出特异性^[79]。但是目前关于椰枣的基因功能和代谢调控的研究不深入,且遗传转化手段不成熟,阻碍了椰枣精准育种的发展。

4 椰枣育种的方向

4.1 椰枣应对非生物胁迫的能力

随着椰枣种植产业不断扩大,对椰枣育种提出了更高的要求,来应对气候变化、病虫害的挑战以及满足市场需求。多项研究表明,气候变化

对农业生产具有显著影响,包括温度升高、降水量变化、CO₂ 浓度增加等生态因子对农作物产量、生长发育、病虫害以及农业水资源等方面的影响^[80-81]。在应对气候变化方面,农业技术选择包括选育抗逆性强的新品种以增强农作物抵御自然灾害的能力^[82]。中国南方干热河谷及西北地区作为椰枣的主要候选种植区域,其气候变化特征(如温度升高、降水量减少)可能对椰枣的生长产生不利影响^[83]。气候条件不同的地区产出具有不同特征的椰枣果实,包括大小、颜色、形状、味道、质量等。因此,针对椰枣育种,未来可能需要开发更耐高温、抗旱或适应气候变化的新品种。

温度对椰枣树和果实有较大的影响,研究表明,由于气候变化的原因椰枣果实成熟时间被显著推迟,而且有一些果实无法在树上自然成熟^[84],同时椰枣花序的坐果率一定程度上也受温度的影响^[85-86],因此探究椰枣对温度变化的响应机制有助于椰枣产业应对气候变化的挑战。在阿尔及利亚对2个椰枣种植园的温度和椰枣花序成熟时间进行了观测,结果表明温度是椰枣生长的限制因素之一,对椰枣果实的质量和产量有直接影响^[87]。目前有部分的研究关注了温度因素与椰枣之间的关系,例如有研究探讨了不同温度及温差组合对椰枣种子发芽和相关生理指标的影响,发现适宜的温度范围对椰枣种子发芽和胚乳可溶性蛋白含量有显著影响^[88]。通过聚乙二醇(PEG)胁迫处理探究不同椰枣品种在干旱胁迫下的生理指标变化,结果显示不同品种对干旱的耐受能力存在差异^[89]。在印度塔尔沙漠等极端干旱区域,借助优化叶片光合效率与果束发育的遗传协同性,在年降水量不足200 mm的条件下仍保持60 kg/株以上的产量水平^[16]。有研究探讨了不同盐胁迫环境对椰枣种子发芽情况和生长特性的影响,以及DA-6对盐胁迫的缓解作用^[46]。这些研究提供了椰枣在不同环境条件下的生理和生长特性,为理解气候变化对椰枣育种的影响提供了间接参考。通过探究椰枣对环境胁迫的耐受机制可以扩大椰枣的可栽培区域,例如若能有效提升椰枣的耐盐能力,将产生多重深远影响:一方面,可充分挖掘大量闲置盐碱地的潜力,将其转化为具备生产能力的耕地,显著提高盐碱地的利用效率;另一方面,为农业发展开拓新的方向,带动椰枣种植、加工、销售等相关产业的协同发展,推动农业经济向多元化、可持续方向迈进,对保障粮食安全

和推动农业领域的创新变革具有不可忽视的重要意义。但是目前椰枣对环境适应的机制尚不明确,关键位点也不清晰。

4.2 椰枣病虫害抗性

椰枣的病虫害对椰枣产业具有较强的影响,例如红棕象甲是一种高危性检疫害虫,对椰枣的种植业造成严重威胁^[90]。其成虫在树干内产卵,孵化出的幼虫蛀食树干内部,导致树干中空折断而亡,严重影响椰枣的生长和产量^[91]。为了避免红棕象甲对椰枣的侵害,早期防治措施是关键^[92]。中国热科院椰子所专家曾赴阿联酋开展椰枣病虫害的调查和防治工作,针对红棕象甲制定了详细的防治方案,并建立了试验防控基地,以助力当地椰枣产业的发展^[93]。除了红棕象甲之外,椰枣树常见虫害还包括椰枣单蛱盾蚧(*Fiorinia phoenicis*)、椰枣蚧(*Parlatoria blanchardi*)、旧世界枣蚜(*Oligonychus afrasiaticus*)、烟草粉虱(*Ectomyelois ceratoniae*)等^[94-98]。目前针对虫害主要依靠人为干预防治,但也有少部分文献发现红棕象甲对不同的椰枣品种的侵害能力有差异,一些栽培品种由于钙含量较高、组织较硬因此抑制了红棕象甲的生长和发育^[94],或者由于脯氨酸水平和抗氧化能力较高降低了红棕象甲感染^[99],同时角质层、表皮和皮下组织较厚的椰枣品种对于虫害的抵抗能力可能更强^[100],这些研究表明不同椰枣品种对虫害的耐受能力不同。椰枣叶斑病是影响椰枣生长的重要病害之一^[101-102]。研究发现,椰枣的病害发生情况与环境条件密切相关,例如海南省的高温多雨气候容易引发病害暴发,严重影响椰枣的正常生长^[30, 103]。镰刀菌(*Fusarium oxysporum*)在热带地区高密度分布,与椰枣树种植区重叠度高,需加强抗病品种研发^[104]。摩洛哥国家农业研究所历经40 a选育的Najda品种,通过天然抗性种质杂交与多代筛选,既保持了优质果实特性,又对镰刀菌表现出稳定抗性,在病区种植5 a未出现减产现象,相较感病品种减少100%的产量损失^[105]。分子生物学技术加速了抗性与产量性状的协同改良,研究人员通过RAPD标记鉴定出与抗性基因紧密连锁的分子片段,使抗性选育周期从传统的10 a以上缩短至3~5 a,同时通过标记辅助选择确保抗性品种的果束质量维持在15 kg以上的高产水平^[106]。

4.3 椰枣的经济性状

椰枣作为重要的经济作物,其市场需求直接

影响育种方向。传统育种通过种质资源评估与杂交选育,实现了产量关键性状的定向优化,有研究表明叶长与果束质量呈极显著正相关,证实光合面积对产量的决定性作用,长叶特性的品种相较短叶品种产量提升约 62%^[15]。分子标记技术的应用加速了高产性状的精准选择。突尼斯学者利用 ISSR 标记对 26 个栽培品种的遗传多样性分析显示,遗传距离与果实一致性显著相关,明确了产量相关性状的遗传调控规律,为定向选育提供了分子依据^[107]。椰枣果实的品质主要由风味、颜色、水分、糖分百分比、外形(是否有伤疤)等因素共同决定^[108],果实成熟阶段的气候变化和农业生产方式对椰枣的产量和果实品质都有明显的影响^[109]。椰枣的热量较高,且富含糖、膳食纤维、矿物质、维生素、脂肪和蛋白质等成分^[110-111],某些椰枣品种的膳食纤维含量较高,因此更受人们欢迎^[112-114]。巴基斯坦和我国海南椰枣品种在果实性状、糖酸组分及营养元素含量上的差异,表明不同地区市场对椰枣品质的需求差异显著,这促使育种者根据市场需求进行品种改良^[29]。在苏丹,椰枣产业通过实施严格的质量控制和认证体系来满足市场需求,确保椰枣产品的质量和安全性,从而提高市场竞争力。市场需求还推动了椰枣育种向可持续发展和多样化产品方向发展。例如,通过推广有机耕作和减少农药使用等可持续实践,提高椰枣的市场吸引力^[115]。基因组学技术的应用使得椰枣育种更加高效。例如,基于高通量测序技术开发的雄性特异分子标记,有助于早期鉴定椰枣性别,从而优化育种流程并提高经济效益^[61]。

5 展望

面对椰枣雌雄异株、生长周期长、基因组杂合度高及分子研究基础薄弱等核心挑战,未来研究需以“精准改良、技术突破、协同发展”为核心,系统推进育种体系革新。研究重心应聚焦于区域特异性育种与前沿技术体系创新 2 个核心维度,并致力于构建高效的全球协同研发网络,以支撑全球椰枣产业的可持续转型。

在育种目标维度,应实现从广谱改良到精准定向的关键转变。需紧密结合主产区生态特征与产业需求:针对极端干旱区开发高水分利用效率基因资源,培育年降水量不足 200 mm 环境下的稳产品种;针对高温高湿区解析耐热与抗叶斑病

协同机制,创制双抗型种质;针对盐碱区则融合耐盐基因与抗寒转录因子,实现盐胁迫与冬季低温的双重适应性突破。同时,亟需整合分子标记辅助选择与基因编辑技术,实现红棕象甲、镰刀菌枯萎病、叶斑病等关键病虫害的多基因抗性聚合,并建立抗性与高产性状的协同优化机制。经济性状改良需对接市场细分需求,通过调控糖代谢通路延长鲜食品种货架期,开发高固形物、高果胶含量的加工专用品种,并筛选富含生物活性成分的功能型基因资源。

技术突破层面,关键在于构建精准高效的现代生物育种技术体系。需加速开发基于性别决定区的稳定分子标记,突破苗期性别早期鉴定瓶颈;优化 CRISPR 遗传转化系统,显著提升抗逆与品质基因的编辑效率;整合染色体水平基因组组装、多组学联用技术,深度解析抗逆与品质性状的遗传调控网络。同步推进体细胞胚胎发生技术升级,通过冷冻保存技术建立优质种质规模化繁育平台。尤其要推动智能技术在育种全流程的应用,依托无人机高光谱遥感与深度学习算法构建田间表型智能监测系统,开发融合全球环境数据的基因型-表型预测模型,实现育种效率的提升。

最终,研究效能提升有赖于全球协同机制的完善与转化通道的畅通。必须深化国际种质资源与核心技术的跨境共享,依托覆盖主产区的联合育种网络,推动抗逆与优质基因资源的高效流转。重点强化实验室成果向田间产业的转化链条,将分子育种工具快速转化为实用品种,并配套开发区域适应性栽培技术体系与产品加工标准。通过制定全球统一的品种鉴定与抗性评价体系,消除技术壁垒,最终形成“基础研究-技术开发-产业应用”的全链条创新生态系统,为应对气候变化、保障旱区粮食安全及盐碱地资源开发提供科技支撑。

参考文献

- [1] Food and Agriculture Organization of the United Nations. Crops and livestock products [DB/OL]. (2025-06-11) [2025-09-01]. <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL>.
- [2] 清浅. 沙特阿拉伯: 年产椰枣超 160 万吨[J]. 中国果业信息, 2023, 40(8): 45.
QING Q. Saudi Arabia: the annual date palm production exceeds 1.6 million tons[J]. China Fruit News, 2023, 40(8): 45. (in Chinese)

- [3] 张瑞森. 椰枣絮语[J]. 国际经济合作, 1986(1): 57.
ZHANG R S. Whispers of date palm[J]. Journal of International Economic Cooperation, 1986(1): 57. (in Chinese)
- [4] 梁容. 埃及: 椰枣出口增长[J]. 中国果业信息, 2018, 35(4): 38.
LIANG R. Egypt: the growth of date palm exports[J]. China Fruit News, 2018, 35(4): 38. (in Chinese)
- [5] MENADI S, HADIDANE Y, BENZERARA M, SAIDANI M, KHORAMI M, BELOUETTAR R, SLIMANI F, GOUIDER N, REHAB-BEKKOUCHE S. Optimizing polymer-stabilized raw earth composites with plant fibers reinforcement for historic building rehabilitation[J]. Buildings, 2023, 13(11): 2681.
- [6] AL-SHAHIB W, MARSHALL R J. The fruit of the date palm: its possible use as the best food for the future?[J]. International Journal of Food Science and Nutrition, 2003, 54(4): 247-259.
- [7] CÔTE M. Des oasis aux zones de mise en valeur: l'étonnant renouveau de l'agriculture saharienne[J]. Méditerranée, 2002, 99(3): 5-14.
- [8] 黄高明. 椰枣保健酸奶的研制[J]. 农产品加工, 2017(24): 4-6.
HUANG G M. Study on production of functional yoghurt with date palm fruit[J]. Farm Products Processing, 2017(24): 4-6. (in Chinese)
- [9] 椰枣纤维生物质制造复合材料[J]. 绿色包装, 2019(2): 34.
Manufacturing composites from date palm fiber biomass[J]. Green Packaging, 2019(2): 34. (in Chinese)
- [10] 曾昕. 椰枣的营养学作用及其在化妆品中的应用现状[J]. 中国药业, 2022, 31(20): 125-128.
ZENG X. Nutritional function of dates and its application in cosmetics[J]. China Pharmaceuticals, 2022, 31(20): 125-128. (in Chinese)
- [11] 木白. 椰枣与伊斯兰教[J]. 中国穆斯林, 1993(1): 19-22.
MU B. Date palm and Islam[J]. China Muslim, 1993(1): 19-22. (in Chinese)
- [12] 周萍. 闲话椰枣[J]. 阿拉伯世界, 1986(4): 148-152.
ZHOU P. Casual talk about date palm[J]. Arab World Studies, 1986(4): 148-152. (in Chinese)
- [13] 摩洛哥椰枣年创收 20 亿迪拉姆[J]. 世界热带农业信息, 2019(12): 38.
The date palm industry in Morocco generates an annual revenue of 2 billion moroccan dirhams[J]. World Tropical Agriculture Information, 2019(12): 38. (in Chinese)
- [14] 孙兵. 纹饰制造与文化交流: 长沙窑叶状椰枣纹研究[J]. 湖北美术学院学报, 2022(3): 51-58.
SUN B. Ornamentation and cultural exchange: a study of leaf-like date palm patterns in changsha kilns[J]. Hubei Institute of Fine Arts Journal, 2022(3): 51-58. (in Chinese)
- [15] MEENA R, CHAUDHARY M K, GURJAR P S, RANE J, SINGH A K, YADAV L P, KUMAWAT K L, SINGH D, CHAUDHARY B R, JATAV M K, SINGH R S, SIDDIQUI M H, ALAMRI S, KHAN S. Morphological diversity assessment in date palm (*Phoenix dactylifera* L.) germplasms grown under hot arid region of India[J]. BMC Plant Biology, 2025, 25(1): 1159.
- [16] GHDAYER AL KAABI N A, KANDHAN K, HAYAT F, MATAR AL BLOOSHI S A, SHETEIWY M S, ALYAFEI M. Shaping the future of date palm (*Phoenix dactylifera*) through new genetic improvement strategies[J]. Functional Plant Biology, 2025, 52: FP25021.
- [17] MORTAZAVI S M H, ARZANI K, BARZEGAR M. Analysis of sugars and organic acids contents of date palm (*Phoenix dactylifera* L.) 'Barhee' during fruit development[C]. Leuven, Belgium: International Society for Horticultural Science (ISHS), 2010.
- [18] SALEEM H, SAUD A, ZAIDI S J. Sustainable preparation of graphene quantum dots from leaves of date palm tree[J]. ACS Omega, 2023, 8(31): 28098-28108.
- [19] MOHAMMED M, SALLAM A, MUNIR M, ALI-DINAR H. Effects of deficit irrigation scheduling on water use, gas exchange, yield, and fruit quality of date palm[J]. Agronomy, 2021, 11(11): 2256.
- [20] MOHAMMED M, ALQAHTANI N K. Design and validation of automated sensor-based artificial ripening system combined with ultrasound pretreatment for date fruits[J]. Agronomy, 2022, 12(11): 2805.
- [21] AHMAD R, ALI H M, LISEK A, MOSA W F A, ERCISLI S, ANJUM M A. Correlation among some phenological and biochemical traits in date palm (*Phoenix dactylifera* L.) germplasm[J]. Frontiers in Plant Science, 2023, 14: 1118069.
- [22] TAEB M. Islamic Republic of Iran: country report to the FAO international technical conference on plant genetic resource[R]. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Leipzig, Germany, 1996.
- [23] PROSPERITY P I D U. Fourth national report to the convention on biological diversity[R]. Deputy of Natural Environment, Department of Environment, Tehran, 2010.
- [24] MOHAMMADIAN H. The fifth national report to the convention on biological diversity[R]. Deputy of Natural Environment, Department of Environment, Tehran, 2015.
- [25] JOHNSON D, AL-KHAYRI J, JAIN S. Seedling date palms (*Phoenix dactylifera* L.) as genetic resources[J]. Emirates Journal of Food and Agriculture, 2013, 25(11): 809-830.
- [26] HAMZA R S, AL-HASHIMI A G. Effect of different drying methods on some mineral elements, amino acids and fatty

- acids of the fruits of some Iraqi palm cultivars[J]. Biodiversity Journal of Biological Diversity, 2023, 24(1): 359-369.
- [27] CLARKE T. Seed bank raises hope of Iraqi crop comeback[J]. Nature, 2003, 424(6946): 242.
- [28] WESTENG O T, JEPPSON S, GUARINO L. Global ex-situ crop diversity conservation and the Svalbard Global Seed Vault: assessing the current status[J]. PLoS One, 2013, 8(5): e64146.
- [29] 李东霞, 徐中亮, 符海泉, 李静, 张宁. 不同椰枣种质资源果实糖酸组分和营养元素含量分析[J]. 西南农业学报, 2020, 33(7): 1566-1572.
- LI D X, XU Z L, FU H Q, LI J, ZHANG N. Analysis of sugar, acid components and nutrient elements in different date palm germplasm[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2020, 33(7): 1566-1572. (in Chinese)
- [30] 王义, 王富有, 张宁, 符海泉, 李东霞, 徐中亮. 椰枣拟盘多毛孢叶斑病原的分离与鉴定[C]//中国植物病理学会 2021 年学术年会. 贵阳: 中国植物病理学会, 2021.
- WANG Y, WANG F Y, ZHANG N, FU H Q, LI D X, XU Z L. Isolation and identification of the pathogen of pestalotiopsis leaf spot disease of date palm[C]//Asian Conference On Plant Pathology 2021. Guiyang: Chinese Society for Plant Pathology, 2021. (in Chinese)
- [31] 中国热带农业科学院椰子研究所与埃及农业研发机构订合作协议[J]. 世界热带农业信息, 2019(10): 6.
- Coconut Research Institute of Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences has signed a cooperation agreement with agricultural research and development institutions in Egypt[J]. World Tropical Agriculture Information, 2019(10): 6. (in Chinese)
- [32] 符海泉, 张宁, 王义, 李东霞, ABDELAALA W B, 徐中亮. 椰枣花粉离体萌发及花粉贮藏方法分析[J]. 分子植物育种, 2022, 20(12): 4085-4093.
- FU H Q, ZHANG N, WANG Y, LI D X, ABDELAALA W B, XU Z L. *In vitro* pollen germination and pollen storage methods of *Phoenix dactylifera* L.[J]. Molecular Plant Breeding, 2022, 20(12): 4085-4093. (in Chinese)
- [33] HAMMAMI Z, MAHMOUDI H, AL JANAHI A, SINGH R K. Evaluation of date palm fruits quality under different irrigation water salinity levels compared to the fruit available in the market[J]. Frontiers in Sustainable Food Systems, 2024, 7: 1322350.
- [34] SATTAR M N, IQBAL Z, TAHIR M N, SHAHID M S, KHURSHID M, AL-KHATEEB A A, AL-KHATEEB S A. CRISPR/Cas9: a practical approach in date palm genome editing[J]. Frontiers in Plant Science, 2017, 8: 1469.
- [35] ABDEL-BAKY N F, MOTAWEI M I, AL-NUJIBAN A A S, ALDEGHAIRI M A, AL-SHURAYM L A M, ALHARBI M T M, ALSOHIM A S, REHAN M. Detection of adaptive genetic diversity and chemical composition in date palm cultivars and their implications in controlling red palm weevil, *Rhynchophorus ferrugineus* Oliver[J]. Brazilian Journal of Biology, 2023, 83: e270940.
- [36] SAFRAN M, ALRAJHI W, ALFARHOOD S. DPXception: a lightweight CNN for image-based date palm species classification[J]. Frontiers in Plant Science, 2024, 14: 1281724.
- [37] 杜保国. 不同品种椰枣种子形态及其发芽和幼苗生长特征[J]. 绵阳师范学院学报, 2018, 37(5): 61-67.
- DU B G. Seed size, germination and seedling growth of different varieties of *Phoenix dactylifera*[J]. Journal of Mianyang Teachers' College, 2018, 37(5): 61-67. (in Chinese)
- [38] KHALID S, AHMAD A, MASUD T, ASAD M J, SANDHU M. Nutritional assessment of ajwa date flesh and pits in comparison to local varieties[J]. Journal of Animal & Plant Sciences, 2016, 26(4): 1072-1080.
- [39] KHALID S, KHALID N, KHAN R S, AHMED H, AHMAD A. A review on chemistry and pharmacology of Ajwa date fruit and pit[J]. Trends in Food Science & Technology, 2017, 63: 60-69.
- [40] ŚWIĄDER K, BIAŁEK K, HOSOGU I. Varieties of date palm fruits (*Phoenix dactylifera* L.), their characteristics and cultivation[J]. Postępy Techniki Przetwórstwa Spożywczego, 2020(1): 173-179.
- [41] ATIA A, ABDELKARIM D, YOUNIS M, ALHAMDAN A. Effects of pre-storage dipping in calcium chloride and salicylic acid on the quality attributes of stored Khalal Barhi dates[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2020, 13(3): 206-212.
- [42] SAEED H H M, AHMED N S, SALEM E H. Assessment of some soft date palm cultivars grown under the conditions of aswan governorate[J]. Assiut Journal of Agricultural Sciences, 2021, 52(5): 130-141.
- [43] PUNDIR JPS, PORWAL R. Performance of different date palm cultivars under hyper arid supplementary irrigated western plains of Rajasthan (India)[C]//Proceedings of the Proceedings of the First International Conference on Date Palms, Al-Ain: UAE University, 1998: 329-336.
- [44] SAYAH F B, BABAHANNI S, ZIOUCHE S E B, BOUTOUIL A, DJELFAOUI Z. Analysis of date's market functioning (*Phoenix dactylifera* L), in Ouargla, South-Est of Algeria: challenges and constraints[J]. Al-Qadisiyah Journal for Agriculture Sciences, 2022, 12(1): 173-183.
- [45] HONG Y J, TOMAS-BARBERAN FA, KADER A A, MITCHELL A E. The flavonoid glycosides and procyanidin composition of Deglet Noor dates (*Phoenix dactylifera*)[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2006, 54(6): 2245-2251.

- 2405-2411.
- [46] 李东霞, 徐中亮, 符海泉, 张宁. NaCl 对椰枣种子发芽的胁迫以及 DA-6 对盐胁迫的缓解作用[J]. 中国南方果树, 2020, 49(1): 42-46.
- LI D X, XU Z L, FU H Q, ZHANG N. The stress of nacl on the germination of date palm seeds and the mitigating effect of DA-6 on salt stress[J]. South China Fruits, 2020, 49(1): 42-46. (in Chinese)
- [47] BAKR E I, HASEEB G M M, EL-KOSARY S E, BAKIR M A M. Using date palm suckers as material for vegetative propagation by growth regulators injection[J]. Egyptian Journal of Agricultural Sciences, 2010, 61(1): 63-78.
- [48] AL-AYEDH H. Evaluation of date palm cultivars for rearing the red date palm weevil, *Rhynchophorus ferrugineus* (Coleoptera: Curculionidae)[J]. Florida Entomologist, 2008, 91(3): 353-358.
- [49] FALEIRO J R, EL-SHAFIE H A F, AJLAN A M, SALLAM A A. Screening date palm cultivars for resistance to red palm weevil, *Rhynchophorus ferrugineus* (Coleoptera: Curculionidae)[J]. Florida Entomologist, 2014, 97(4): 1529-1536.
- [50] HAZZOURI K M, GROS-BALTHAZARD M, FLOWERS J M, COPETTI D, LEMANSOUR A, LEBRUN M, MASM-OUDI K, FERRAND S, DHAR M I, FRESQUEZ Z A. Genome-wide association mapping of date palm fruit traits[J]. Nature Communications, 2019, 10(1): 4680.
- [51] ESHRAGHI P, 田郎. 2 个伊朗椰枣品种的体细胞胚胎发生[J]. 世界热带农业信息, 2011(2): 25-26.
- ESHRAGHI P, TIAN L. Somatic embryogenesis of two iranian date palm varieties[J]. World Tropical Agriculture Information, 2011(2): 25-26. (in Chinese)
- [52] BAROYI S A H M, YUSOF Y A, GHAZALI N S M, AL-AWAADH A M, KADOTA K, MUSTAFA S, ABU SAAD H, SHAH N N A K, FIKRY M. Determination of physicochemical, textural, and sensory properties of date-based sports energy gel[J]. Gels, 2023, 9(6): 487.
- [53] RAMBABU K, BHARATH G, HAI A, BANAT F, HASAN S W, TAHER H, MOHD ZAID H F. Nutritional quality and physico-chemical characteristics of selected date fruit varieties of the United Arab Emirates[J]. Processes, 2020, 8(3): 256.
- [54] BASHIR M A, IKHLAQ M, NOREEN A, IQBAL J, NAQVI S A H, SUHAIL M, ALTAF F, SHABIR K, KHADIJA F, KIRAN S. Impact of climate zones on exotic date palm germplasm[J]. Agricultural Sciences Journal, 2024, 6(3): 22-39.
- [55] KHALLOUKI F, RICARTE I, BREUER A, OWEN R W. Characterization of phenolic compounds in mature Moroccan Medjool date palm fruits (*Phoenix dactylifera*) by HPLC-DAD-ESI-MS[J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2018, 70: 63-71.
- [56] SANTORO A, VENTURI M, BEN MAACHIA S, BENYAHIA F, CORRIERI F, PIRAS F, AGNOLETTI M. Agroforestry heritage systems as agrobiodiversity hotspots. The case of the mountain oases of Tunisia[J]. Sustainability, 2020, 12(10): 4054.
- [57] ALI-DINAR H, MOHAMMED M, MUNIR M. Effects of pollination interventions, plant age and source on hormonal patterns and fruit set of date palm (*Phoenix dactylifera* L.)[J]. Horticulturae, 2021, 7(11): 427.
- [58] ENAN M R, AHMED A. Cultivar-level phylogeny using chloroplast DNA barcode psbK-psbI spacers for identification of Emirati date palm (*Phoenix dactylifera* L.) varieties[J]. Genetics and Molecular Research, 2016, 15(3): 15038470.
- [59] FATIMA G, KHAN I A, BUERKERT A. Socio-economic characterisation of date palm (*Phoenix dactylifera* L.) growers and date value chains in Pakistan[J]. SpringerPlus, 2016, 5: 1-13.
- [60] ISLAM K K, SAIFULLAH M, HYAKUMURA K. Does traditional agroforestry a sustainable production system in Bangladesh? An analysis of socioeconomic and ecological perspectives[J]. Conservation, 2021, 1(1): 21-35.
- [61] 时春雨, JATT T, 贾博爽, 司雯雯, 李晓月, 梁雨, 徐明真, 李书粉, 高武军, 邓传良. 基于高通量测序技术的椰枣雄性特异分子标记的开发[J]. 分子植物育种, 2020, 18(21): 7115-7119.
- SHI C Y, JATT T, JIA B X, SI W W, LI X Y, LIANG Y, XU M Z, LI S F, GAO W J, DENG C L. Development of male specific molecular marker for date palms based on high-throughput sequencing technology[J]. Molecular Plant Breeding, 2020, 18(21): 7115-7119. (in Chinese)
- [62] CHALUVADI S R, YOUNG P, THOMPSON K, BAHRI B A, GAJERA B, NARAYANAN S, KRUEGER R, BENNETZEN J L. Phoenix phylogeny, and analysis of genetic variation in a diverse collection of date palm (*Phoenix dactylifera*) and related species[J]. Plant Diversity, 2019, 41(5): 330-339.
- [63] SAPTARI R T, SINTA M M, RIYADI I. Propagasi *in vitro* tanaman kurma (*Phoenix dactylifera* L.) pada bioreaktor dengan perendaman sesaat[J]. Menara Perkebunan, 2020, 88(2): 2020.
- [64] SOLANGI N, JATOI M A, ABUL-SOAD A A, MIRANI A A, SOLANGI M A, MARKHAND G S. Factors influencing somatic embryogenesis and plantlet regeneration of date palm using immature floral buds[J]. Sarhad Journal of Agriculture, 2023, 39(2): 323-331.
- [65] AL-KHAYRI J M, NAIK P M. Date palm micropropagation:

- advances and applications[J]. *Ciência e Agrotecnologia*, 2017, 41: 347-358.
- [66] HAMZA H, VILLA S, TORRE S, MARCHESINI A, BEN-ABDERRAHIM M A, REJILI M, SEBASTIANI F. Whole mitochondrial and chloroplast genome sequencing of Tunisian date palm cultivars: diversity and evolutionary relationships[J]. *BMC Genomics*, 2023, 24(1): 772.
- [67] SILJAK-YAKOVLEV S, CERBAH M, SARR A, BENMALEK S, BOUNAGA N, COBA DE LA PENA T, BROWN S C. Chromosomal sex determination and heterochromatin structure in date palm[J]. *Sexual Plant Reproduction*, 1996, 9: 127-132.
- [68] BEKHEET S A, TAHA H S, HANAFY M S, SOLLIMAN M E. Morphogenesis of sexual embryos of date palm cultured *in vitro* and early identification of sex type[J]. *The Journal of Applied Sciences Research*, 2008, 4(4): 345-352.
- [69] YOUNIS R A A, ISMAIL O M, SOLIMAN S S. Identification of sex-specific DNA markers for date palm (*Phoenix dactylifera* L.) using RAPD and ISSR techniques[J]. *Research Journal of Agriculture and Biological Sciences*, 2008, 4(4): 278-284.
- [70] ELMEER K, MATTAT I. Marker-assisted sex differentiation in date palm using simple sequence repeats[J]. *3 Biotech*, 2012, 2(3): 241-247.
- [71] MOHAMED A A M, SAMI A S. Novel set of sex specific PCR-based markers reveals new hypothesis of sex differentiation in date palm[J]. *Journal of Plant Sciences*, 2015, 3(3): 150-161.
- [72] MARYAM, JASKANI M J, AWAN F S, AHMAD S, KHAN I A. Development of molecular method for sex identification in date palm (*Phoenix dactylifera* L.) plantlets using novel sex-linked microsatellite markers[J]. *3 Biotech*, 2016, 6: 1-7.
- [73] DHAWAN C, KHARAB P, SHARMA R, UPPAL S, AGGARWAL R K. Development of male-specific SCAR marker in date palm (*Phoenix dactylifera* L.)[J]. *Tree Genetics & Genomes*, 2013, 9: 1143-1150.
- [74] MATHEW L S, SPANNAGL M, AL-MALKI A, GEORGE B, TORRES M F, AL-DOUS E K, AL-AZWANI E K, HUSSEIN E, MATHEW S, MAYER K F X. A first genetic map of date palm (*Phoenix dactylifera*) reveals long-range genome structure conservation in the palms[J]. *BMC Genomics*, 2014, 15: 1-10.
- [75] 范仲先. 帝王椰枣栽培技术[J]. *新农村*, 2014(10): 23-24.
FAN Z X. Cultivation techniques of the Medjool date[J]. *New Countryside*, 2014(10): 23-24. (in Chinese)
- [76] DIBOUN I, MATHEW S, AL-RAYYASHI M, ELRAYESS M, TORRES M, HALAMA A, MERET M, MOHNEY R P, KAROLY E D, MALEK J, SUHRE K. Metabolomics of dates (*Phoenix dactylifera*) reveals a highly dynamic ripening process accounting for major variation in fruit composition[J]. *BMC Plant Biology*, 2015, 15: 291.
- [77] FLOWERS J M, HAZZOURI K M, GROS-BALTHAZARD M, MO Z, KOUTROUMPA K, PERRAKIS A, FERRAND S, KHIERALLAH H S M, FULLER D Q, ABERLENC F. Cross-species hybridization and the origin of North African date palms[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2019, 116(5): 1651-1658.
- [78] YOUNISKUNJU S, MOHAMOUD Y A, MATHEW L S, MAYER K F X, SUHRE K, MALEK J A. Genome - wide association of dry (Tamar) date palm fruit color[J]. *The Plant Genome*, 2023, 16(4): e20373.
- [79] 杨耀东, 肖勇, 许鹏威, BAUDOUIN L, 范海阔, 吴翼, 李静, 彭明. 海南高种椰子全基因组测序与分析[C]//2017 年全国热带作物学术年会. 贵阳: 中国热带作物学会, 2017.
YANG Y D, XIAO Y, XU P W, BAUDOUIN L, FAN H K, WU Y, LI J, PENG M. Whole genome sequencing and analysis of the tall coconut variety in hainan[C]//National Academic Annual Conference on Tropical Crop. Guiyang: Chinese Society for Tropical Crops, 2017. (in Chinese)
- [80] 郭佳, 张宝林, 高聚林, 彭健, 罗瑞林. 气候变化对中国农业气候资源及农业生产影响的研究进展[J]. *北方农业学报*, 2019, 47(1): 105-113.
GUO J, ZHANG B L, GAO J L, PENG J, LUO R L. Advances on the impacts of climate change on agro-climatic resources and agricultural production in China[J]. *Journal of Northern Agriculture*, 2019, 47(1): 105-113. (in Chinese)
- [81] 肖国举, 张强, 王静. 全球气候变化对农业生态系统的影响研究进展[J]. *应用生态学报*, 2007(8): 1877-1885.
XIAO G J, ZHANG Q, WANG J. Impact of global climate change on agro-ecosystem: a review[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007(8): 1877-1885. (in Chinese)
- [82] 杨春雷. 气候变化对我国农业生产的影响与应对措施[J]. *农业开发与装备*, 2025(3): 160-162.
YANG C L. The impact of climate change on agricultural production in china and the countermeasures[J]. *Agricultural Development & Equipments*, 2025(3): 160-162. (in Chinese)
- [83] 张强, 邓振镛, 赵映东, 乔娟. 全球气候变化对我国西北地区农业的影响[J]. *生态学报*, 2008(3): 1210-8.
ZHANG Q, DENG Z Y, ZHANG Y D, QIAO J. The impacts of global climatic change on the agriculture in northwest China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008(3): 1210-1218. (in Chinese)
- [84] MOHAMMED M, SALLAM A, ALQAHTANI N, MUNIR M. The combined effects of precision-controlled temperature and relative humidity on artificial ripening and quality of

- date fruit[J]. *Foods*, 2021, 10(11): 2636.
- [85] SALOMÓN-TORRES R, ORTIZ-URIBE N, VILLA-ANGULO R, VILLA-ANGULO C, NORZAGARAY-PLASENCIA S, GARCIA-VERDUGO C. Effect of pollenizers on production and fruit characteristics of date palm (*Phoenix dactylifera* L.) cultivar Medjool in Mexico[J]. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 2017, 41: 338-347.
- [86] KADRI K, ELSAFY M, MAKHLOUF S, AWAD M A. Effect of pollination time, the hour of daytime, pollen storage temperature and duration on pollen viability, germinability, and fruit set of date palm (*Phoenix dactylifera* L.) cv “Deglet Nour”[J]. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 2022, 29(2): 1085-1091.
- [87] FACI M, BENZIOUCHE S E. Contribution to monitoring the influence of air temperature on some phenological stages of the date palm (cultivar ‘Deglet Nour’) in Biskra[J]. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 2021, 20(4): 248-256.
- [88] 李东霞, 黄丽云, 徐中亮, 符海泉, 张宁. 温度对椰枣种子发芽和生理特征的影响[J]. *南方农业学报*, 2019, 50(8): 1764-1770.
- LI D X, HUANG L Y, XU Z L, FU H Q, ZHANG N. Effects of different temperatures on germination and physiological characteristics of date palm seed[J]. *Journal of Southern Agriculture*, 2019, 50(8): 1764-1770. (in Chinese)
- [89] 张宁, 徐中亮, 符海泉, ABDELAAL W B, 李东霞, 王义, 王富有. PEG 胁迫对不同椰枣品种耐旱生理的影响[J]. *热带作物学报*, 2021, 42(8): 2283-2288.
- ZHANG N, XU Z L, FU H Q, ABDELAAL W B, LI D X, WANG Y, WANG F Y. Physiological effects of peg stress on drought tolerance of different date palm[J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2021, 42(8): 2283-2288. (in Chinese)
- [90] AHMAD I. Integrated pest management of *Rhynchophorus ferrugineus* Olivier: an efficient approach to reduce infestation in date palm trees[J]. *Pakistan Journal of Zoology*, 2021, 54: 927-936.
- [91] NAVEED H, ANDOH V, ISLAM W, CHEN L, CHEN K. Sustainable pest management in date palm ecosystems: unveiling the ecological dynamics of red palm weevil (Coleoptera: Curculionidae) infestations[J]. *Insects*, 2023, 14(11): 859.
- [92] 童彤. 以色列: 红棕象甲危及椰枣产业[J]. *中国果业信息*, 2016, 33(1): 35.
- TONG T. Israel: the red palm weevil endangers the date palm industry[J]. *China Fruit News*, 2016, 33(1): 35. (in Chinese)
- [93] 中国热科院椰子所专家赴阿联酋开展国际合作项目助力当地椰枣产业发展[J]. *世界热带农业信息*, 2018(10): 3-4.
- Experts from the Coconut Research Institute of the Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences went to the United Arab Emirates to carry out an international cooperation project[J]. *World Tropical Agriculture Information*, 2018(10): 3-4. (in Chinese)
- [94] AL-BAGSHI M, AL-SHAGAG A, AL-SAROJ S, AL-BATHER S, AL-SHAWAF A M, AL-DANDAN A M, AL-SUL-EIMAN Y, AL-ABDALLAH E, ABDALLAH A B. Oviposition preference of red palm weevil, *Rhynchophorus ferrugineus* (Olivier) (Coleoptera: Curculionidae) to date palm cultivars[J]. *Pest Management in Horticultural Ecosystems*, 2013, 19(1): 108-112.
- [95] HALDHAR S M, MURALIDHARAN C M, SINGH D. Pests and their management in date palm[M]. Singapore: Springer Nature Singapore, 2022.
- [96] ALSHEHRI H. A preliminary study on the main insect pests associated with a date palm *Phoenix dactylifera* in the western part of Saudi Arabia[J]. *Journal of King Abdulaziz University: Meteorology, Environment and Arid Land Agriculture*, 2022, 31(1): 13-17.
- [97] EL-SHAFEI W, DIAB Y. Biological control of three main-insect pests of date palm fruits using *Trichogramma evanescens* (West.) parasitoid in date palm farms in the Dakhla region, New Valley Governorate, Egypt[J]. *Egyptian International Journal of Palms*, 2025, 5: 1-15.
- [98] ABDEL-SAMAD S, ADEL H, ABBAS M. A new strategy for controlling three devastating pests attacking date palm plantations in el bahariya and siwa oases, egypt through using a special group of natural enemies[J]. *Egyptian Journal of Agricultural Research*, 2019, 97: 365-382.
- [99] MANZOOR M, YANG L, WU S, EL-SHAFIE H, HAIDER M S, AHMAD J N. Feeding preference of *Rhynchophorus ferrugineus* (Olivier) (Coleoptera: Curculionidae) on different date palm cultivars and host biochemical responses to its infestation[J]. *Bulletin of Entomological Research*, 2022, 112(4): 494-501.
- [100] EL-SHAFEI WKM, ATTIA S A. Ecological and toxicological studies on date palm scale *Fiorinia phoenicis* Balachowsky (Hemiptera-Diaspididae) infesting three date palm cultivars with reference to anatomical and chemical analysis of palm cultivars leaflets at Giza Governorate, Egypt[J]. *Academic Journal of Entomology*, 2023, 16(2): 70-83.
- [101] ARAFAT K H, HASSAN M H, HUSSEIN E A. Detection, disease severity and chlorophyll prediction of date palm leaf spot fungal diseases[J]. *New Valley Journal of Agricultural Science*, 2021, 1(2): 98-110.
- [102] RABAAOUI A, DALL’ASTA C, RIGHETTI L, SUSCA A, LOGRIECO A F, NAMS I, GDOURA R, WERBROUCK

- S P O, MORETTI A, MASIELLO M. Phylogeny and mycotoxin profile of pathogenic fusarium species isolated from sudden decline syndrome and leaf wilt symptoms on date palms (*Phoenix dactylifera*) in Tunisia[J]. *Toxins*, 2021, 13(7): 463.
- [103] 王义, 张宁, 高兆银, 胡美姣, 洪小雨, 李敏, 符海泉, 李东霞, 徐中亮. 椰枣叶斑病的病原鉴定[J]. *植物病理学报*, 2023, 53(4): 717-720.
- WANG Y, ZHANG N, GAO Z Y, HU M J, HONG X Y, LI M, FU H Q, LI D X, XU Z L. Identification of the pathogen causing leaf spot disease of date palm[J]. *Acta Phytopathologica Sinica*, 2023, 53(4): 717-720. (in Chinese)
- [104] SHABANI F, KUMAR L. Risk levels of invasive *Fusarium oxysporum* f. sp. in areas suitable for date palm (*Phoenix dactylifera*) cultivation under various climate change projections[J]. *PLoS One*, 2013, 8(12): e83404.
- [105] EL MODAFAR C. Mechanisms of date palm resistance to Bayoud disease: current state of knowledge and research prospects[J]. *Physiological and Molecular Plant Pathology*, 2010, 74(5): 287-294.
- [106] FAQIR N, MUHAMMAD A, HYDER M Z. Diversity assessment and cultivar identification in date palm through molecular markers-a review[J]. *Turkish Journal of Agriculture-Food Science and Technology*, 2017, 5(12): 1516-1523.
- [107] HAMZA H, BENABDERRAHIM M A, ELBEKKAY M. Investigation of genetic variation in Tunisian date palm (*Phoenix dactylifera* L.) cultivars using ISSR marker systems and their relation with fruit characteristics[J]. *Turkish Journal of Biology*, 2012, 36: 449-458.
- [108] AL-ALAWI R A, AL-MASHIQRI J H, AL-NADABI J S M, AL-SHIHI B I, BAQI Y. Date palm tree (*Phoenix dactylifera* L.): natural products and therapeutic options[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2017, 8: 845.
- [109] ALHARBI K L, RAMAN J, SHIN H J. Date fruit and seed in nutricosmetics[J]. *Cosmetics*, 2021, 8(3): 59.
- [110] TANG Z X, SHI L E, ALEID S M. Date fruit: chemical composition, nutritional and medicinal values, products[J]. *The Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2013, 93(10): 2351-2361.
- [111] AHMED J, ALJASASS F, SIDDIQ M. Date fruit composition and nutrition[M]. Chichester: John Wiley & Sons, 2014: 261-284.
- [112] ELLEUCH M, BESBES S, ROISEUX O, BLECKER C, DEROANNE C, DRIRA N E, ATTIA H. Date flesh: chemical composition and characteristics of the dietary fibre[J]. *Food Chemistry*, 2008, 111(3): 676-682.
- [113] MRABET A, RODRIGUEZ-ARCOS R, GUILLÉN-BEJARANO R, CHAIRA N, FERCHICHI A, JIMÉNEZ-ARAUJO A. Dietary fiber from Tunisian common date cultivars (*Phoenix dactylifera* L.): chemical composition, functional properties, and antioxidant capacity[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2012, 60(14): 3658-3664.
- [114] MRABET A, HAMMADI H, RODRIGUEZ-GUTIÉRREZ G, JIMÉNEZ-ARAUJO A, SINDIC M. Date palm fruits as a potential source of functional dietary fiber: a review[J]. *Food Science and Technology Research*, 2019, 25(1): 1-10.
- [115] KHAIRI M M A. Date palm status and perspective in Sudan [M]. Dordrecht: Springer Netherlands, 2015: 169-191.