

椰枣种质资源收集保存、鉴定评价与创新利用研究进展

付 玉^{1,2}, 付博文³, 郝 鑫^{1,2}, 胡 伟^{1,2}, 刘亚慧^{1,2}, 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/中国热带农业科学院椰子研究所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 571339; 2. 中国热带农业科学院三亚研究院热带作物生物育种全国重点实验室, 海南三亚 572025; 3. 云南农业大学热带作物学院, 云南普洱 665000

摘 要: 椰枣 (*Phoenix dactylifera*) 具有丰富的营养价值, 是阿拉伯国家和地区的主要粮食作物, 开发利用潜力巨大。椰枣遗传资源对于椰枣产业创新和竞争力提升至关重要, 近年来受到科研界广泛关注。尽管相关研究已经取得了阶段性进展, 但整体仍处于发展初期。当前, 椰枣面临气候变化、品种退化、遗传多样性丧失和病虫害威胁等风险挑战, 亟需加快椰枣种质资源的保存、鉴定评价和创新利用等方面的深入研究, 以突破产量、抗逆性与品质协同提升的瓶颈。本文系统综述了椰枣种质资源研究现状, 涵盖资源收集保存技术、鉴定评价体系和创新利用策略等核心领域, 同时深入剖析当前研究瓶颈和挑战, 并提出针对性解决方案与未来发展方向。本研究旨在为椰枣种质资源的高效开发和创新利用提供理论支撑和战略方向, 助力农业生产效能提升与资源管理优化。

关键词: 椰枣; 种质资源; 收集; 保存; 鉴定; 评价; 创新利用

中图分类号: S326 文献标志码: A

Research Progress on Collection, Preservation, Identification, Evaluation and Innovative Utilization of Date Palm Germplasm Resources

FU Yu^{1,2}, FU Bowen³, HAO Xin^{1,2}, HU Wei^{1,2}, LIU Yahui^{1,2}, ZHANG Ning^{1*}

1. National Tropical Palm Germplasm Reserve, Coconut Research Institute, Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences / International Joint Research Center for Date Palm Resource Evaluation and Cultivar Propagation, Coconut Research Institute, Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences, Wenchang, Hainan 571339, China; 2. National Key Laboratory for Tropical Crop Breeding, 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

Abstract: Date palm (*Phoenix dactylifera*), a nutrient-rich crop of significant economic importance, serves as a staple food in many Arab countries and regions, offering considerable potential for further development and utilization. Its genetic resources play a crucial role in driving innovation and enhancing the competitiveness of the date palm industry, garnering increasing attention from the scientific community in recent years. While phased research progress has been achieved, overall studies remain in an exploratory stage. Currently, the global date palm industry faces severe challenges, including climate change, cultivar deterioration, loss of genetic diversity, and threats from pest and disease. Therefore, there is an urgent need to accelerate in-depth research on the preservation, identification, evaluation and innovative utilization of date palm germplasm resources to overcome bottlenecks in achieving simultaneous improvements in yield, stress resistance and quality. This paper systematically reviewed the current status of date palm germplasm resources, encompassing core areas such as resource collection and conservation technologies, identification and evaluation systems, and strategies for innovative utilization. It further examined existing bottlenecks and challenges, proposed targeted solutions, and outlined future directions for development. This study aims to provide theoretical support and strategic

收稿日期 2025-10-13; 接受日期 2025-12-09

基金项目 云南省重大科技专项计划 (No. 202202AE090104); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项 (No. 1630012025313)。

作者简介 付 玉 (1992—), 女, 博士研究生, 研究方向: 种质资源与遗传育种。*通信作者 (Corresponding author): 张 宁 (ZHANG Ning), E-mail: xining0607catas@163.com。

guidance for the efficient development and innovative utilization of date palm germplasm resources, thereby enhancing agricultural productivity and optimizing resource management.

Keywords: date palm (*Phoenix dactylifera* L.); germplasm resources; collection; preservation; identification; evaluation; innovative utilization

DOI: 10.3969/j.issn.1000-2561.2026.03.008

椰枣 (*Phoenix dactylifera* L.) 属棕榈科 (Arecaceae) 刺葵属 (*Phoenix*) 单子叶二倍体植物, 染色体数为 $2n=36$ ^[1]。椰枣起源于中东美索不达米亚及北非地区, 现广泛分布于中东 (伊拉克、沙特阿拉伯、阿联酋、阿曼等)、北非 (埃及、摩洛哥等) 及南亚地区, 主产区气候为热带和亚热带沙漠气候。人类对椰枣的驯化历史悠久, 作为地球上现存最古老的四大果树之一, 其栽培历史可追溯至 5000 a 前^[2]。椰枣果实营养丰富, 富含糖分、膳食纤维及钾、镁等矿物质, 被誉为“沙漠面包”, 具有极高营养与经济价值^[3], 在中东地区亩产售价达到 4000 美元左右, 目前椰枣已成为中东和北非等国家和地区的重要粮食作物^[4-5]。椰枣具有抗氧化和抗诱变活性, 在抗炎、抗衰、抗氧化、抗糖尿病、保肝、抗癌、改善肠道健康和促消化等方面均有巨大的应用潜力^[6-10]。椰枣在特定的宗教和文化中占有至高无上的地位, 其不但被称作“圣树”, 还被加纳和苏丹定为国树, 甚至在沙特阿拉伯的国徽和货币上也均印有椰枣^[11]。丰富的健康价值和独特的文化象征使椰枣成为了全球 18 亿穆斯林人斋戒月的理想选择。此外, 椰枣具有耐高温、耐盐碱和耐干旱等优良抗逆特性, 能够在极端环境下存活和生长, 是研究环境适应性和荒漠地区生态修复的理想材料^[12-15]。由此可见, 椰枣是全球农业领域的宝贵植物资源, 其背后承载着保障区域粮食安全、文化传承、营养价值、经济价值和生态价值等多重意义。然而, 当前全球椰枣产业面临品种退化、病虫害威胁、遗传多样性丧失及气候变化挑战等严峻问题, 亟需加速种质资源的收集保护, 深入开展基因组学辅助育种与创新性状评价等研究, 以突破产量、抗逆性与品质协同提升的瓶颈。本文将从椰枣起源驯化、种质资源分布、育种技术演进等方面进行系统梳理与总结, 旨在为我国乃至全球的椰枣产业可持续发展服务, 促进种业创新、资源安全与产业竞争力的全面提升。

种质资源涵盖了生物全部遗传信息, 决定了生物的遗传特性, 是遗传育种的基础材料^[16]。种质资

源研究对椰枣产业可持续发展、耐逆性育种、遗传多样性保护具有重要意义。全球多个椰枣主产国和国际研究机构已经开展了椰枣种质资源的收集、保存与研究, 但这些工作依然面临着种质资源多样性衰减、产量不稳定、技术瓶颈以及国际合作深度不足等严峻挑战。椰枣种质资源研究起步较晚, 目前还缺乏系统梳理和总结。本文综述了国内外椰枣种质资源的收集保存、鉴定评价及创新利用等方面的研究进展, 为椰枣种质资源保护、开发利用和新品种培育等提供参考数据和技术支撑, 对于促进产业健康可持续发展具有重要意义。

1 椰枣种质资源的收集与保存

椰枣具有丰富的遗传多样性, 加以收集与保护有助于确保这些遗传资源的存续利用, 避免流失。椰枣主产地区凭借悠久的种植历史与特殊干旱气候, 形成了丰富的遗传多样性资源, 带动了庞大的椰枣产业。为保护椰枣遗传多样性并推动其可持续利用, 多个国家及国际组织已经着手种质资源收集与保护工作, 全球范围内已收集并保存了多种椰枣种质资源。椰枣基因型具有广泛遗传多样性, 根据联合国粮农组织 (FAO) 数据库统计, 目前全球已有包括英国皇家植物园 (Royal Botanic Gardens) 和美国农业部农业研究服务局国家种质资源库 (The National Germplasm Resources Laboratory of the Agricultural Research Service of the United States Department of Agriculture) 在内的多个基因库保存了椰枣种质资源, 现有 595 份椰枣材料保存于阿富汗、古巴、西班牙、英国、印度、约旦、利比亚、巴基斯坦、苏丹、特立尼达和多巴哥、突尼斯、美国、南非的基因库, 还有 1104 份椰枣亲缘种材料 (同属) 存于各国基因库, 可供育种之用。苏丹约有 400 个品种和品系^[17], 巴基斯坦约有 150 个品种^[18]。伊拉克作为全球最大椰枣生产国, 其产量占据全球总产量的 3/4 以上, 美索不达米亚平原的椰枣林更是成为地区生态与文化的象征^[19]。在摩洛哥, 椰枣树

约占全球椰枣数量的 4.5%，其椰枣种植面积在全球排名第七，椰枣树数量排名第十一，椰枣产量排名第十二^[20]。这些宝贵的遗传资源都是杂交育种和遗传改良的重要来源，非常有必要对其进行充分调查、收集、保存和探究。

种质资源遗传多样性保护是农业领域关注的热点问题，椰枣种质资源的保护关系到该产业的生产发展和粮食安全。椰枣遗传资源的就地保护和异地保护是维持遗传多样性的重要手段，前者可以保护椰枣遗传物质并加速生物多样性的发展过程，使椰枣遗传资源能够在自然环境中得到维护，例如阿曼通过阿夫拉贾渠灌溉将椰枣就地保存，形成阿曼的“椰枣绿洲遗产”；异地椰枣种质资源圃保存在中国^[21]、巴基斯坦^[22]、印度^[23]、突尼斯^[24]、沙特阿拉伯^[25-26]和伊拉克^[27]等不同国家，保存的椰枣资源有完整的记录且易于管理和识别，通过对种质资源圃中的不同资源品种进行评价和比较，可为椰枣的引种试种提供参考依据。然而，病虫害侵袭和自然环境逆境是制约这种保存方式的重要因素，因此需采用原地保存和异地保存相结合的方式维护椰枣遗传多样性。此外，椰枣种质资源还可以用组织培养、体外冷藏、低温保存等综合保护体系，其中组织培养可使椰枣实现离体保存，不受椰枣生长季节限制，具有安全、节省空间、便于运输等优点，但对操作人员的技术要求较高。BEKHEET^[28]发现有 70% 椰枣茎尖分生组织在 5℃ 储存 12 个月后仍保持健康，愈伤组织培养物在储存 12 个月后仍完全存活；在利用空气脱水法进行椰枣胚性培养物的超低温保存中，以 1 mol/L 蔗糖作为渗透剂，并将椰枣胚性培养物经空气干燥处理 20 min 和 0℃ 下玻璃化溶液处理 60 min，获得最优存活率和成苗转化率。使用蔗糖作为渗透剂，并用脱落酸作为生长抑制剂，可实现在 15℃ 下保存椰枣茎尖和愈伤组织长达 12 个月，存活率可达 91.85%^[29]。ALANSI 等^[30]成功建立 Sagai 品种椰枣胚性组织的高效超低温保存方案，其中包埋玻璃化法效果最佳，处理后存活率和生长率分别高达 86.7% 和 46.7%，恢复再生率均超过 30.0%，满足建立种质超低温库的要求。随着植物生物技术的飞速发展，椰枣遗传资源传统保护方法得到了新的补充。DNA 保存就是一项新发展起来的技术，该方法应用范围广且能够长期保存遗传信息，便于后续筛选目标基因。全基因组关联分析和标记辅助育种等分子工具的

应用，推进了椰枣分子育种的发展，赋予椰枣种质资源更多新的价值。椰枣种质资源存在多种保存技术，由于每种保存方法各有优劣，为确保椰枣遗传多样性的最佳效率和可持续利用，需采用互补性保存策略，如综合使用基因库建设和分子标记辅助保存，共同构建起全球椰枣遗传资源的现代化保存网络。

中国热带农业科学院椰子研究所自 2015 年起与阿联酋建立合作，共同开展椰枣病虫害防治与创新利用联合研究，于 2019 年正式启动椰枣资源引进工作，建立国家热带棕榈种质资源圃椰枣分圃，累计隔离保存引进椰枣资源 170 余份、优良母本品种 20 多种，引种成活率达 92.87%。在海南、云南、四川等地系统开展了包括物候期、生长性状、果实品质及抗逆性在内的生产适应性综合评价，证实椰枣在干热河谷等地区具备良好的生产潜力^[21]；同时，在离体保存及脱毒种源技术攻克方面，成功构建了椰枣组培快繁技术体系，有效解决了繁殖系数低、成本高、周期长等核心难题，为我国椰枣种质资源的长期安全保存与产业化利用奠定了坚实的基础。

2 椰枣种质资源的鉴定与评价

椰枣种质资源的鉴定与评价是其遗传资源保护与利用的核心环节。椰枣种质资源评价体系是一个多维度、多层次的综合性评估框架，是推动其遗传改良和产业可持续发展的重要基础，旨在筛选优质种质、挖掘功能基因、全面衡量椰枣遗传资源的价值与应用潜力，并为育种创新提供科学依据。目前，全球的研究主要围绕植物学与农艺性状、抗逆性、遗传基因挖掘以及功能物质代谢等维度展开，旨在为品种选育和产业发展提供科学依据。

2.1 椰枣植物学与农艺性状鉴定评价

植物学与农艺性状是椰枣种质资源评价最基础且直接的依据。植物学鉴定主要是针对椰枣的各种形态特征进行观察和比较，通过对叶片形态、花序特征以及果实颜色、形状和大小等的观察与记录进行椰枣种质资源鉴定。例如，可以通过开花特征、花序形态和花粉质量等一系列形态学特征综合量化突尼斯椰枣发育为雄性植株的潜力^[31]。此外，还可以通过比较不同品种椰枣种子的形态特征及其与发芽特征和生长能力的关系，为椰枣引种栽培提供参考^[32]。通过观察椰枣种子发芽和生

理特征指标的变化,筛选出适合椰枣种子发芽的光培养温度范围为 22~36 ℃,暗培养温度范围 22~38 ℃,为椰枣种子发芽和种苗繁育提供理论依据^[33]。农艺性状鉴定包括生长速度、产量等,可用于评估椰枣种质资源在农业生产中应用价值的重要性。例如,经放线菌接种剂处理后,通过农艺性状鉴定发现椰枣的果实产量以及糖分和矿物质等有益化学物质的积累明显提高,为椰枣的种植优化提供参考^[34]。此外,还可以利用染色质染色观察样本的染色体形态特征,通过细胞结构观察、细胞减数分裂分析、细胞亚型鉴定以及核型分析等角度对椰枣性别进行鉴定^[35]。基于染色质染色的细胞学方法首次给通过根分生组织的简单分析进行椰枣雌雄鉴定提供了可能^[36]。上述基于表型的评价方法具有直观、操作简便和经济成本低的特点,被广泛应用于椰枣种质资源评价鉴定工作。但是,形态特征易受外界环境因素的干扰,运用单一形态特征进行种质资源的鉴定具有一定的局限性,因此常需要结合生长速度、单株产量等关键农艺指标进行综合评判,以更准确地评估种质在农业生产中的直接应用潜力。

2.2 椰枣抗性相关鉴定评价

椰枣种质资源的抗逆性研究对于衡量其在恶劣环境下的适应能力至关重要,包括抗旱性、抗盐碱性、抗病虫害等方面。椰枣的耐旱、耐盐碱、耐高温等特性使其在干旱和盐碱地区更具有价值优势。抗逆性评价不仅有助于筛选出适应性强的品种,还能为椰枣的育种和栽培提供科学依据,更对干旱和半干旱地区农业可持续发展具有战略意义。通过探讨不同品种椰枣种子和幼苗在聚乙二醇胁迫下的生长指标、生理指标特征^[37-38],鉴定了不同椰枣品种的耐旱性差异,筛选出耐旱 Khadrawy 品种以及与椰枣干旱相关的基因(*LHCB*、*FMO* 和 *MIB* 等)和代谢途径(乙二醛酸和二羧酸代谢)^[39]。椰枣的耐盐碱性可以通过生理生化指标测定^[40]以及离子稳态(Na^+/K^+ 比)^[41]和渗透调节物质(脯氨酸、甜菜碱)的定量分析进行评价^[42]。通过比较阿联酋 12 个不同椰枣品种的耐盐性,结果发现盐浓度增加会导致椰枣相对生长率、生物量、叶片数量以及钾、镁和钙含量显著降低,其中 Lulu、Fard、Khnaizi、Nabtati Safi 和 Razez 品种因表现出更高的相对生长率和生物量而具有更强的耐盐性,这项研究为培育耐盐椰枣新品种和提高盐碱地的综合利用率提供理论基础^[43]。

通过田间接种试验与分子检测,可分析种质对椰枣红棕象甲、镰孢菌等主要病虫害的抗性基因表达特征及防御酶活性变化。研究发现,Hillawi 品种最受红棕象甲青睐,且虫害和病害分别导致酶类抗氧化剂含量增加和过氧化物酶等酶活性增强,这说明椰枣在受到病虫害侵害时抗氧化分子机制发挥了重要作用^[44-45]。此外,还可以通过接种病原菌观察发病症状,并结合内生真菌拮抗作用对椰枣进行抗病性分析,研究人员发现摩洛哥蓝菊(*Carthamus caeruleus* L.)精油及其提取物能控制椰枣树的巴尤德病(Bayoud disease);椰枣中的放线菌可作为微生物拮抗菌来防控椰枣树猝倒综合征;与椰枣根部共生的内生真菌还能作为椰枣的生物防治剂和生物肥料来源,这些研究成果为椰枣树抗病机制的研究和完善病害防控措施提供了不同的方向和思路^[46-48]。椰枣种质资源的抗逆性评价是其种质资源研究的重要内容,通过综合运用多种评价方法和指标,可全面了解不同种质资源的抗逆性表现,为耐逆品种选育、种植布局优化及生态脆弱区植被恢复提供科学依据,以提升椰枣产业的生态韧性。

2.3 遗传基因挖掘与精准鉴定

椰枣作为多年生雌雄异株植物,雌株可以结果能产生经济价值,椰枣性别鉴定对于种苗繁育、控制育苗成本、品种优化以及果实生产具有重要意义^[49]。椰枣生长缓慢,运用传统植物学方法鉴定椰枣性别需等待植株生长到繁殖阶段(5~10 a),再通过观察其是否结果来辨别雌雄,这种方法耗时较长,且成本较高,不利于椰枣种苗的快速繁育和推广^[50]。国际上已有关于沙特阿拉伯椰枣品种叶绿体基因组完整序列的相关报道^[51],现代分子生物学方法可通过椰枣的生物学特性(DNA 序列)开发分子标记进行性别鉴定,实现在早期育苗阶段即可筛选出雄性种苗,避免多年后发现不结果时再剔除成年雄株而造成的资源浪费和成本增加。简单重复序列(simple sequence repeat, SSR)标记应用最为广泛,例如时春雨等^[52]通过 PCR 技术筛选出引物对 DP_SSR_9,其能在椰枣雄性植株中扩增出稳定的 522 bp 特异性条带,为椰枣雌雄鉴别提供了新的分子标记。通过使用 18 种 SSR 标记分析 295 份来自毛里塔尼亚、巴基斯坦等的椰枣的遗传多样性水平和群体遗传结构,发现椰枣的基因型被分为东部和西部 2 个不同的基因型^[53-54]。AHMED 等^[55]在利用 10 个

SSR 标记分析椰枣遗传多样性和群体结构中发现, MpdCIR085 和 MpdCIR093 位点显示出更高的观测和期望杂合度值、最多的等位基因数量以及最高的多态信息含量值。SALEH 等^[56]还利用 SSR 标记来评估从沙特阿拉伯椰枣病树中分离出的镰孢菌菌株的遗传变异情况, 11 个 SSR 标记从镰孢菌株中共扩增出 57 个可评分等位基因, 且大多数菌株被归为一个进化支, 置信度值为 95%。除了 SSR, 其他方法也在椰枣性别鉴定和遗传多样性分析方面提供了多元化的解决方案。PROMKAEW 等^[57]将随机扩增多态性 DNA 标记 (random amplified polymorphic DNA, RAPD) OPW-18 成功转化为序列特征化扩增区域 (sequence characterized amplified regions, SCAR) 标记 mspW18, 从而利用该标记在雄性椰枣中稳定扩增出 1 条 283 bp 的特异性条带, 在 KL1 和 Barhi 品种中准确率达 100%, 实现了对雌雄株的精准判别。ATIA 等^[58]基于细胞学标记, 通过荧光原位杂交 (fluorescence in situ hybridization, FISH) 技术, 在椰枣染色体上定位 45S 和 5S rDNA 标记区分椰枣性别。研究人员还发现了 2 个简单序列间重复序列 (ISSR) 标记, 其中 IS_A02 仅在雌性椰枣中能产生特有的 390 bp 的条带, 而引物 IS_A71 仅在雄性植株中产生一条 380 bp 的条带, 这些标记有助于椰枣的早期性别鉴定^[59]。此外, 微卫星 DNA 定向扩增 (directed amplification of mini-satellite region DNA, DAMD)、保守 DNA 序列多态性 (conserved DNA-derived polymorphism, CDDP) 和内含子靶向扩增多态性 (intron-targeted amplified polymorphism, ITAP) 等方法也被应用于椰枣遗传图谱构建, 并发现了与性别相关的特异性扩增区域 (CDDP-4/6-1 和 ITAP-8/1), 进一步丰富了性别鉴定的分子工具集^[18, 60-61]。在品种与亲缘关系鉴定方面, 采用随机扩增多态性 DNA (random amplified polymorphic DNA, RAPD) 技术, 使用 9 个引物对 6 种椰枣进行品种鉴定, 这些引物平均每个产生 7.2 条多态性条带, 可识别不同椰枣品种, 总体多态性水平为 49.0%, 这 6 个品种间的遗传相似性范围在 76.3%~93.5%之间^[62]。利用扩增片段长度多态性 (amplified fragment length polymorphism, AFLP) 和 ISSR 标记鉴定沙特阿拉伯 10 个椰枣品种并分析其亲缘关系, 发现 AFLP 和 ISSR 标记的多态性水平分别为 63%~84%和 20%~100%, 品种特异性标记个数分别为 208 个

和 33 个, 其中 RAB 和 AJWA 品种分别含有最多的 AFLP 和 ISSR 特异性标记, 而且同一性别的品种间表现出更高的遗传相似性^[63-64]。Al-QURAINY 等^[65]利用一种针对 cDNA 启动子的标记 (start codon targeted polymorphism, SCoT) 发现, 在不同浓度的 NaCl 条件下, 处理和未处理的椰枣的基因表达存在差异, 例如经盐处理的植株中出现了 1200、950、800、780、300 bp 的特异性扩增条带, 而对照组中这些条带均缺失。其中 950 bp 条带在 50、100 mmol/L 浓度下出现, 但在 150 mmol/L 浓度下消失; 这些结果表明, 不同浓度的 NaCl 胁迫通过影响特定基因的表达模式, 进而改变椰枣生长、生物量及抗氧化系统响应。分子生物学技术可直接比较物种间遗传差异, 且不受环境干扰, 具有高效、准确和自动化的优势, 为提高椰枣农业生产效率和优化营养价值提供科学依据。这一技术体系的应用, 标志着椰枣产业从经验依赖向分子精准育种的跨越式发展 (表 1)。

2.4 重要功能物质与代谢相关鉴定评价

椰枣果实富含多种功能物质, 对其品质与代谢物的鉴定评价直接关系到品种的商业价值与开发方向。对椰枣果实系统的理化分析有助于基于营养价值与健康效益筛选出优质品种^[66]。椰枣的品质性状主要取决于其果实的化学成分, 包括糖酸组成与含量、维生素、氨基酸、矿物质等, 这些成分共同决定了椰枣的甜度、风味、口感和营养价值。基于 17 个摩洛哥椰枣品种的理化分析数据显示, 椰枣富含糖分 (51.80%~87.98%) 和蛋白质 (1.09%~2.80%), 脂质 (0.16%~0.39%) 含量较低, 主要矿物质是钾 (1055.26~1604.10 mg/100 g)。此外, 还含有高浓度的苹果酸 (69.48~495.58 mg/100 g)、草酸 (18.47~233.35 mg/100 g) 和酒石酸 (115.70~484.168 mg/100 g)^[67]。这些结果表明, 椰枣营养丰富, 是人类营养和健康益处的极佳来源。中国热带农业科学院椰子研究所已完成对 32 份椰枣优异种质的系统评价, 内容涵盖果实色素 (类胡萝卜素、花色苷)、香气成分 (醇、醛、萜烯、酮、酯)、风味 (糖、酸、单宁)、营养成分 (氨基酸、脂肪酸、粗蛋白、维生素 C、可溶性固形物)。初步分析表明, 所测样本多为苹果酸优势型果实, 且以亲水氨基酸为主要特征, 这些评价为后续的功能基因挖掘和遗传改良提供了明确的靶标性状。不同椰枣品种中含有的功能物质含量有所不同, 椰枣中的糖分主要为果糖与葡萄糖,

表 1 椰枣种质资源鉴定的分子生物学方法
Tab. 1 Molecular biological methods for identification of germplasm resources of date palm

分子生物学方法 Molecular biology method	鉴定目标及参考文献 Identification target and references
微型卫星 DNA 定向扩增 (DAMD) 标记	遗传多样性分析 ^[18]
简单重复序列 (SSR) 标记	性别鉴定 ^[52] ，品种鉴定 ^[53] ，群体遗传结构分析 ^[54] ，遗传多样性分析 ^[55] ，致病菌株遗传变异分析 ^[56]
序列特征化扩增区 (SCAR) 标记	性别鉴定 ^[57]
原位杂交 FISH 技术	性别鉴定 ^[58]
保守 DNA 序列多态性 (CDDP) 标记	性别鉴定及遗传多样性分析 ^[60-61]
内含子靶向扩增多态性 (ITAP) 标记	性别鉴定及遗传多样性分析 ^[60-61]
随机扩增多态性 DNA (RAPD) 标记	性别鉴定 ^[53] 及品种鉴定 ^[62]
扩增片段长度多态性 (AFLP) 标记	品种鉴定 ^[63]
简单序列间重复序列 (ISSR) 标记	性别鉴定 ^[59] 及品种间亲缘关系鉴定 ^[63-64]
cDNA 启动密码子靶向 (SCoT) 标记	盐胁迫下椰枣基因表达差异分析 ^[65]

但是也有少数品种，如 Sukkari Al Qassim 和 Deglet Noor 中，蔗糖则是主要糖分，而且在这些含有蔗糖的品种中，果糖含量高于葡萄糖^[68]。椰枣中的葡萄糖和果糖从 Kimri（发育期）阶段经过 Khalal（松脆期）和 Rutab（成熟期）阶段到 Tamr（晒干期）阶段迅速增加；相反，水分、脂质和蛋白质含量下降。在 Tamr 阶段，总糖可能占鲜质量的 50%以上，这些数值以及低含水量有助于收获后抵抗真菌侵染^[69]。在阿联酋常见的 11 种不同椰枣品种中，Sukari 的总糖含量最高（13.21 g/100 g），而 Rothana 的总糖含量最低（7.96 g/100 g）。总酚含量在 Barhi 和 Rothana 中为 76.74~122.20 mg/100 g，而抗氧化活性在 Sukari 中最高（105.99 μg/g），在 Khalas 中最低（90.81 μg/g）^[70]。椰枣种子具有丰富的膳食纤维，且在阿联酋的众多椰枣品种中，Fard 品种的膳食纤维含量尤为突出^[71]。有研究对澳大利亚种植的椰枣种子中的酚类成分进行分析，以评估其抗氧化潜力，鉴定出与抗氧化相关的关键酚类代谢物^[72]。KHALIL 等^[73]还发现椰枣香气的主要成分是脂质衍生的挥发物和苯丙烷类衍生物，2,3-丁二醇、己醛、己醇和肉桂醛对不同椰枣品种的酚类贡献最大，其中 Siwi 和 Sheshi 品种表现出最独特的香气（富含辛酸乙酯和癸酸乙酯）。研究发现，椰枣籽油中的脂肪酸主要为油酸（48.67%）、月桂酸（17.26%）、硬脂酸（10.74%）、棕榈酸（9.88%）和亚麻酸（8.13%），且椰枣籽油表现出较高的热稳定性和氧化稳定性^[74]。在椰枣花粉方面，纯的椰枣花粉表现出更强的体外抗氧化活性，而与其

花药混合研磨的椰枣花粉具有更高的酶抑制和抗糖尿病活性^[75]。

3 椰枣种质资源创新与利用

椰枣种质资源丰富多样，筛选优异种质是椰枣品种选育优化的重要手段，对提高椰枣产量和产值具有重要意义。基于全球椰枣种质资源的鉴定评价，育种创新已催生出一系列具有优异特性的品种。通过对沙特阿拉伯、摩洛哥、阿联酋不同椰枣品种的营养成分和理化特性分析，鉴定出具有优异抗氧化活性的椰枣品种^[76-78]。为了应对极端干旱的气候条件对椰枣产业所带来的严峻挑战，MEENA 等^[79]评估了印度干旱条件下 37 个椰枣种质的形态多样性，筛选出单株产量高且光合效率强的优异耐旱高产品种 Medjool，还发现了 Gizej 与 Sakaloti 遗传相似性高达 87%，是理想杂交亲本，这些成果为培育适应恶劣环境的高产品种提供了科学依据。中国热带农业科学院椰子研究所还进行了椰枣引种与适应性评价分析，筛选出云南元江干热河谷等适宜种植椰枣的区域，为椰枣资源的高效利用和广泛种植提供依据^[21]。通过对云南元江引种栽培的 32 株椰枣果实性状进行多样性分析，筛选出群体中的优良单株，其鲜果可食率高达 94.9%^[80]。分子标记的运用有利于椰枣种质资源的精准鉴定和育种效率的提升，例如利用微卫星等技术分析椰枣的遗传多样性，为育种提供理论参考^[81]。随着椰枣基因组数据的发布^[82]，运用多组学技术的整合可筛选出椰枣抗逆性及代谢物形成相关候选基因，加速椰枣种质资源的进一

步深入挖掘,为高效育种奠定理论基础^[83-86]。此外,组织培养和遗传转化体系的不断优化和完善,也为椰枣重要基因的功能解析和生物育种提供技术支撑。

在椰枣的加工利用方面,当前的创新主要围绕着开发高附加值产品和提升加工技术展开,旨在更充分地利用椰枣资源并满足现代健康消费需求。椰枣可谓浑身是宝,其叶子可作席子和燃料,枝条可用于编织筐和椅子,树干可建造农舍^[87],椰枣核还能用作动物饲料^[88-89]和榨油^[90],椰枣果实及其提取物还可用于制作化妆品^[91]、能量棒^[92]、果酱^[93]、面包^[94]和发酵饮品^[95]等,具有优良抗逆性的椰枣还可在生态环境保护方面发挥重要作用。最近,一项创新性研究将未成熟的椰枣加工成枣泥,用于替代太妃糖中高达 50% 的精制糖,不仅实现了“减糖”,还使粗纤维含量从 1.34% 提升至 4.15%,并丰富了钾、钙等矿物质的含量,显著提升了产品的营养价值^[96]。这些开发和突破为椰枣产业的高值化发展和品种改良提供重要支撑。

4 现存挑战与研究展望

4.1 存在的问题

椰枣作为干旱地区的“生命之树”,其种质资源兼具遗传多样性、生态适应性与经济多功能性。尽管椰枣遗传资源的挖掘、评价和利用已经取得了一定的成绩,但目前依然存在一些问题和困难。

4.1.1 种质资源收集保存与多样性危机 椰枣的优势在于其耐旱、耐盐碱等优良抗性,对修复干旱、盐碱化土地具有生态价值,同时其高营养价值与加工潜力使其在食品、医药、美容领域应用广泛。然而,全球开展椰枣种质资源研究的国家比较少,资源收集工作仍面临品种单一、遗传背景不清、资源分布不均、收集难度大等挑战。传统品种因商业化种植被替代,造成了椰枣种质资源的遗传多样性衰减和遗传资源的流失,特别是许多地方品种和野生近缘种可能携带抗病、抗逆等优异基因,但面临着被忽视甚至丢失的风险。目前国内收集的椰枣种质资源数量相对较少,与全球其他主要生产国相比还有一定差距。此外,种质资源的保存和管理技术相对落后,保存技术局限性和保存成本高等问题不利于椰枣种质资源的长期保存。

4.1.2 鉴定评价方法适用性不强 目前椰枣鉴定评价工作主要集中在品质性状方面,对抗寒、抗病虫、抗寒、农艺性状等还缺乏系统的鉴定和评价。鉴定指标不够全面、评价体系不够完善,大部分分子标记通常仅适用于个别品种,能够广泛适用于大多数椰枣品种的分子标记仍有待进一步开发,这些问题严重制约了对椰枣种质资源的精准鉴定和科学评价。此外,现有的国际合作多局限于种质交换和短期互访,在数据共享、联合育种、技术标准统一等方面的深度融合仍显不足。这需要打造一个更加开放、高效的全球椰枣创新协作网络。

4.1.3 资源创新利用不深入 椰枣种质资源的创新利用在多个领域仍面临诸多挑战。首先,国内椰枣种植受限于气候适应性、种植技术与管理模式,目前仅在海南、云南、广西等热区有零星种植,大规模商业化生产尚未实现。从技术角度看,椰枣无性繁殖技术虽在实验室取得突破,但成本较高,推广难度较大,木本植物遗传转化效率低等技术瓶颈仍有待突破,这限制了椰枣品种的改良与创新。其次,在利用方面,尽管椰枣耐旱、耐盐碱的特性使其在干旱地区具有种植优势,但其对特定环境条件依赖性较强,难以在气候多变的地区稳定种植。而且椰枣种植技术复杂,包括土壤管理、灌溉和施肥等,需要精细操作以维持高产,这增加了种植成本和难度。尽管启动了基因组计划,但如何将基因组数据大规模、高效地应用于育种实践,培育高产、抗逆、优质的新品种,仍是亟待突破的瓶颈。在食品加工领域,椰枣虽可作为天然甜味剂用于多种食品中,但其高糖分和特定口感限制了其在更广泛食品中的应用。同时,椰枣加工产品的市场认知度较低,消费者对其健康益处的了解不足,也限制了其市场潜力。此外,椰枣在医药和保健品领域的应用研究尚不充分,药用成分的提取和功效验证工作有待加强。产品的标准化和质量控制体系尚不完善,影响了其在医药领域的广泛应用。在生态保护方面,椰枣在特定干旱地区的种植有助于防风固沙、改善生态环境,但其对其他生态系统的适应性研究较少。政策支持与市场开发也是椰枣种质资源创新利用面临的挑战,尽管一些国家鼓励椰枣种植和加工利用,但整体政策支持力度不足,缺乏针对种质资源创新利用的具体政策和资金支持。在市场开发方面,椰枣产品的市场定位和推广策

略仍有待优化和完善。

4.2 未来研究方向和重点任务

4.2.1 加强全球合作与交流 共建全球椰枣种质资源信息共享和沟通协作平台, 加强椰枣种质资源研究方面的国际间的合作与交流, 强化多品种发掘和探索, 共同有计划、有目标地开展资源收集、保存、保护和利用及相关技术研究工作, 以促进资源的合理利用以及提高种质资源的保存效率和质量, 建立统一的资源评价标准、推动数据共享与联合攻关。构建动态异地保护与原地保护相结合的系统, 是维护椰枣遗传多样性以及应对气候变化和非生物挑战的迫切需求。

4.2.2 完善鉴定评价技术体系 进一步完善椰枣种质资源鉴定与评价技术体系, 综合运用基因编辑、分子育种、人工智能与遥感技术, 建立表型和基因型数据库, 提高鉴定评价的准确性和可靠性。同时, 应深入探究椰枣生物学特性和抗逆机制, 开发适应资源多样性和复杂性的新型评价模型。通过推广和应用先进鉴定技术, 提高资源评价效率, 为椰枣产业提质增效和生物多样性维护做出贡献。

4.2.3 推动种质资源的创新利用 面对全球气候变化, 椰枣种质资源利用应以耐盐、抗旱品种选育及种质创新为核心, 综合运用表型筛选、遗传改良、分子标记辅助选择、基因编辑和杂交育种等技术手段。研究需兼顾遗传多样性保护与现代育种技术创新, 加强离体培养保存、新品种选育等工作, 依托基因组学推动分子设计育种, 并通过多组学整合与全球协作提升资源高效利用, 同时强化对野生近缘种和地方品种的抢救性收集保存。此外, 应拓展椰枣资源在功能性食品、生态修复等领域的应用, 推进副产品高值化开发, 增强市场竞争力。还需系统研究椰枣种植的生态效应, 制定科学种植规划和管理策略, 促进椰枣绿洲生态系统可持续发展。

参考文献

- [1] BARROW S C. A monograph of *Phoenix* L. (Palmae: Coryphoideae)[J]. Kew Bull, 1998, 53(1): 531-575.
- [2] ZOHARY D, SPIEGEL-ROY P. Beginnings of fruit growing in the old world[J]. Science, 1975, 187(4174): 319-327.
- [3] 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 Sciences and Nutrition, 2003, 54(4): 247-259.
- [4] FLOWERS J M, HAZZOURI K M, GROS-BALTHAZARD M, MO Z, KOUTROUMPA K, PERRAKIS A, FERRND S, KHIERALLAH H S M, FULLER D Q, ABERLENC F, FOURNARAKI C, PURUGGANAN M D. Cross-species hybridization and the origin of North African date palms[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2019, 116(5): 1651-1658.
- [5] AL-KARMADI A, OKOH A I. An overview of date (*Phoenix dactylifera*) fruits as an important global food resource[J]. Foods, 2024, 13(7): 1024.
- [6] CHAKROUN M, MORJEN M, MABROUK H B, MEJDOUB H, SRAIRI-ABID N, MARRAKCHI N, JEBALI J, KHEMAKHEM B. Anticancer properties of different varieties of date palm (*Phoenix dactylifera* L.) leaf extracts in human tumor cells: a comparative study[J]. Plant Foods for Human Nutrition, 2024, 79(2): 518-525.
- [7] MAHOMOODALLY M F, KHADAROO S K, HOSENALLY M, ZENGIN G, REBEZOV M, ALI SHARIATI M, KHALID A, ABDALLA A N, ALGARNI A S, SIMAL-GANDARA J. Nutritional, medicinal and functional properties of different parts of the date palm and its fruit (*Phoenix dactylifera* L.): a systematic review[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2024, 64(22): 7748-7803.
- [8] ALQAHTANI N K, MOHAMED H A, MOAWAD M E, YOUNIS N S, MOHAMED M E. The hepatoprotective effect of two date palm fruit cultivars' extracts: green optimization of the extraction process[J]. Foods, 2023, 12(6): 1229-1245.
- [9] YASIN B R, EL-FAWAL H A, MOUSA S A. Date (*Phoenix dactylifera*) polyphenolics and other bioactive compounds: a traditional islamic remedy's potential in prevention of cell damage, cancer therapeutics and beyond[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2015, 16(12): 30075.
- [10] YOUNAS A, NAQVI S A, KHAN M R, SHABBIR M A, JATOI M A, ANWAR F, INAM-UR-RAHEEM M, SAARI N, AADIL R M. Functional food and nutra-pharmaceutical perspectives of date (*Phoenix dactylifera* L.) fruit[J]. Journal of Food Biochemistry, 2020, 44(9): e13332.
- [11] 朱立才. 椰枣与阿拉伯文化[J]. 阿拉伯世界, 2004, 1(2): 48-49.
- [12] ZHU L C. Date palm and Arab culture[J]. Arab World, 2004, 1(2): 48-49. (in Chinese)
- [12] CHERIF H, MARASCO R, ROLLI E, FERJANI R, FUSI M, SOUSSI A, MAPELLI F, BLILOU I, BORIN S, BOUDABOUS A, CHERIF A, DAFFONCHIO D, OUZARI H. Oasis desert farming selects environment-specific date palm root endophytic communities and cultivable bacteria

- that promote resistance to drought[J]. Environmental Microbiology Reports, 2015, 7(4): 668-678.
- [13] GHIRARDO A, NOSENKO T, KREUZWIESER J, WINKLER J B, KRUSE J, ALBERT A, MERL-PHAM J, LUX T, ACHE P, ZIMMER I, ALFARRAJ S, MAYER K F X, HEDRICH R, RENNENBERG H, SCHNITZLER J P. Protein expression plasticity contributes to heat and drought tolerance of date palm[J]. Oecologia, 2021, 197(4): 903-919.
- [14] AHMAD M, ABDUL AZIZ M, SABEEM M, KUTTY M S, SIVASANKARAN S K, BRINI F, XIAO T T, BLILOU I, MASMOUDI K. Date palm transcriptome analysis provides new insights on changes in response to high salt stress of colonized roots with the endophytic fungus *Piriformospora indica*[J]. Frontiers in Plant Science, 2024, 15(1): 1400215.
- [15] CHAO C T, KRUEGER R R. The date palm (*Phoenix dactylifera* L.): overview of biology, uses, and cultivation[J]. HortScience, 2007, 42(1): 1077-1082.
- [16] UPADHYAYA H D G C L L, BUHARIWALLA H K, CROUCH J H. Efficient use of crop germplasm resources: identifying useful germplasm for crop improvement through core and mini-core collections and molecular marker approaches[J]. Plant Genetic Resources: Characterization & Utilization, 2006, 4(1): 25-35.
- [17] ELSHIBLI S, KORPELAINE H. Microsatellite markers reveal high genetic diversity in date palm (*Phoenix dactylifera* L.) germplasm from Sudan[J]. Genetica, 2008, 134(1): 251-260.
- [18] NADEEM M Q T M, UGULU I, RIAZ M N, UL AIN Q, KHAN Z I, AHMAD K, ASHFAQ A, BASHIR H, DOGAN Y. Mineral, vitamin and phenolic contents and sugar profiles of some prominent date palm (*Phoenix dactylifera*) varieties of Pakistan[J]. Pakistan Journal of Botany, 2019, 51(1): 171-178.
- [19] 郁兴志. 伊拉克与椰枣林[J]. 世界知识, 1983(23): 19-23.
YU X Z. Iraq and date palm forest[J]. World Knowledge, 1983(23): 19-23. (in Chinese)
- [20] IBRAHIMI M, BRHADDA N, ZIRI R, FOKAR M, IRAQI D, GABOUN F, LABHILILI M, HABACH A, MEZIANI R, ELFADILE J, ABDELWAHD R, DIRIA G. Analysis of genetic diversity and population structure of Moroccan date palm (*Phoenix dactylifera* L.) using SSR and DAMD molecular markers[J]. Journal of Genetic Engineering and Biotechnology, 2023, 21(1): 66-80.
- [21] 符海泉, 王富有, 徐中亮, 李东霞, 杨蔚农, 杨耀东. 云南干热河谷地区椰枣种质资源调查研究[J]. 林业调查规划, 2017, 42(6): 44-47.
FU H Q, WANG F Y, XU Z L, LI D X, YANG W N, YANG Y D. Investigation on germplasm resources of *Phoenix dactylifera* in dry and hot valley of Yunnan[J]. Forest Inventory and Planning, 2017, 42(6): 44-47. (in Chinese)
- [22] MARKHAND G S, ABUL-SOAH A A, MIRBAHAR A A, KANAHR N A. Fruit characterization of Pakistani dates[J]. Pakistan Journal of Botany, 2010, 42(1): 3715-3722.
- [23] PAREEK S. Date palm status and perspective in India [M]//Date palm genetic resources and utilization, Vol. 2. Asia and Europe. Dordrecht, the Netherlands: Springer, 2015: 441-485.
- [24] HAMZA H, JEMNI M, BENABDERRAHIM M A, MRABET A, TOUIL S, OTHMANI A, SALAH M B. Date palm status and perspective in Tunisia[M]//Date palm genetic resources and utilization, Vol. 1. Africa and the Americas. Dordrecht, the Netherlands: Springer, 2015: 193-221.
- [25] AL-GHAMDI A S. Date palm (*Phoenix dactylifera* L.) germplasm bank in King Faisal University, Saudi Arabia.: survival and adaptability of tissue cultured plantlets[J]. Acta Horticulturae, 2001, 459(560): 241-244.
- [26] ALEID S M, AL-KHAYR J M, AL-BAHRAN A M. Date palm status and perspective in Saudi Arabia[M]//Date palm genetic resources and utilization, Vol. 2. Asia and Europe. Dordrecht, the Netherlands: Springer, 2015: 125-168.
- [27] KHIERALLAH H S, BADER S M, IBRAHIM K M, AL-JBOORY I J. Date palm status and perspective in Iraq[M]//Date palm genetic resources and utilization, Vol. 2. Asia and Europe. Dordrecht, the Netherlands: Springer, 2015: 97-152.
- [28] BEKHEET S A. *In vitro* conservation of date palm tissue cultures[J]. Methods in Molecular Biology, 2017, 1638(1): 15-24.
- [29] EL-DAWAYATI M M. *In vitro* conservation of date palm shoot-tip explants and callus cultures under minimal growth conditions[J]. Methods in Molecular Biology (Clifton, N. J.), 2017, 1638(1): 49-59.
- [30] ALANSI S, AL-QURAINY F, NADEEM M, KHAN S, TARROUM M, ALSHAMERI A, GAAFAR A R Z. Cryo-preservation: a tool to conserve date palm in Saudi Arabi[J]. Saudi Journal of Biological Sciences, 2019, 26(7): 1896-1902.
- [31] HACHEF A, BOURGUIBA H, CHERIF E, IVORRA S, TERRAL J F, ZEHDIAZOUZI S. Agro-morphological traits assessment of Tunisian male date palms (*Phoenix dactylifera* L.) for preservation and sustainable utilization of local germplasm[J]. Saudi Journal of Biological Sciences, 2023, 30(3): 103574.
- [32] 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, 5(37): 61-68.
DU B G. Seed size, germination and seedling growth of dif-

- ferent varieties of *Phoenix dactylifera*[J]. Journal of Mianyang Teachers' College, 2018, 5(37): 61-68. (in Chinese)
- [33] 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)
- [34] ABDELGAWAD H, SALEH A M, JAOUNI S A, SELIM S, HASSAN M O, WADAAN M A M, SHUIKAN A M, MOHAMED H S, HOZZEIN W N. Utilization of actinobacteria to enhance the production and quality of date palm (*Phoenix dactylifera* L.) fruits in a semi-arid environment[J]. Science of the Total Environment, 2019, 665(5): 690-697.
- [35] SILJAK-YAKOVLEV S C 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]. Sex Plant Reprod, 1996, 9(3): 127-132.
- [36] SILJAK Y S, CERBAH M, SARR A, BENMALEK S, BOUNAGA N, COBA DE LA P T, BROWN S C. Chromosomal sex determination and heterochromatin structure in date palm[J]. Sexual Plant Reproduction, 1996, 9(3): 127-132.
- [37] 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)
- [38] IQBAL Z, MUNIR M. Multifaceted natural drought response mechanisms in three elite date palm cultivars uncovered by expressed sequence tags analysis[J]. Scientific Reports, 2024, 14(1): 23186.
- [39] ALHAJHOJ M R, MUNIR M, SUDHAKAR B, ALI-DINAR H M, IQBAL Z. Common and novel metabolic pathways related ESTs were upregulated in three date palm cultivars to ameliorate drought stress[J]. Scientific Reports, 2022, 12(1): 15027.
- [40] BENACEUR I, MEZIANI R, EL FADILE J, HOINKIS J, KURZ E F, HELLRIEGEL U, JAITI F. Salt stress induces contrasting physiological and biochemical effects on four elite date palm cultivars (*Phoenix dactylifera* L.) from Southeast Morocco[J]. Plants (Basel), 2024, 13(2): 186-201.
- [41] ALKHATEEB S A, ALKHATEEB A A, SOLLIMAN MEL D. In vitro response of date palm (*Phoenix dactylifera* L.) to K/Na ratio under saline conditions[J]. Biological Research, 2015, 48(1): 63-78.
- [42] MIMOUN A, REY H, JOURDAN C, BANAMAR H, YAKOUBI F, BABOU F, BENNACEUR M. Moderate salinity stimulates root plasticity and growth parameters of date palm seedlings (*Phoenix dactylifera* L.)[J]. Rhizosphere, 2024, 30(1): 100876.
- [43] ALHAMMADI M S, EDWARD G P. Effect of salinity on growth of twelve cultivars of the united arab emirates date palm[J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2009, 40(15/16): 2372-2388.
- [44] MANZOOR M, YANG L, WU S Y, EI-SHAFIE H, HAIDER M S, AHMAD J N. Feeding preference of *Rhynchophorus ferrugineus* (Oliver) (Coleoptera: Curculionidae) on different date palm cultivars and host biochemical responses to its infestation[J]. Bulletin of Entomological Research, 2022, 112(4): 494-501.
- [45] BAAZIZ M. The activity and preliminary characterization of peroxidases in leaves of cultivars of date palm, *Phoenix dactylifera* L.[J]. The New Phytologist, 1989, 111(3): 403-411.
- [46] ETTAKIFI H, ABBASSI K, MAOUNI S, ERBIAI E H, RAHMOUNI A, LEGSSYER M, SAIDI R, LAMRANI Z, ESTEVES DA SILVA J C, PINTO E, MAOUNI A. Chemical characterization and antifungal activity of blue tansy (*Tanacetum annuum*) essential oil and crude extracts against *Fusarium oxysporum* F. sp. albedinis, an agent causing bayoud disease of date palm[J]. Antibiotics (Basel), 2023, 12(9): 1451-1466.
- [47] ALBLOOSHI A A, PURAYIL G P, SAEED E E, RAMADAN G A, TARIQ S, ALTAEE A S, EI-TARABILY K A, ABUQAMAR S F. Biocontrol potential of endophytic actinobacteria against fusarium solani, the causal agent of sudden decline syndrome on date palm in the UAE[J]. Journal of Fungi (Basel), 2021, 8(1): 8-23.
- [48] MOHAMED F M, KRIMI Z, MACIÁ-VICENTE J G, ERRAHMANI M B, LOPEZ-LLORCA L V. Endophytic fungi associated with roots of date palm (*Phoenix dactylifera*) in coastal dunes[J]. Revista Iberoamericana de Micología, 2017, 34(2): 116-120.
- [49] 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.
- [50] AL-AMERI A A, AL-QURAINY F, GAAFAR A R Z, KHAN S, NADEEM M. Molecular identification of sex in *Phoenix dactylifera* using inter simple sequence repeat markers[J]. BioMed Research International, 2016, 6(7):

- 4530846.
- [51] YANG M, ZHANG X W, LIU G M, YIN Y X, CHEN K F, YUN Q Z, ZHAO D J, AL-MSSALLEM I S, YU J. The complete chloroplast genome sequence of date palm (*Phoenix dactylifera* L.)[J]. PLoS One, 2010, 5(9): e12762.
- [52] 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 S, 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 markers of date palm based on high-throughput sequencing technology[J]. Molecular Plant Breeding, 2020, 18(21): 7115-7119. (in Chinese)
- [53] ZHAO Y, WILLIAMS R, PRAKASH C S, HE G. Identification and characterization of gene-based SSR markers in date palm (*Phoenix dactylifera* L.)[J]. BMC Plant Biology, 2012, 12(11): 237-245.
- [54] ZEHDİ-AZOUZI S, CHERIF E, MOUSSOUNI S, GROS-BALTHAZARD M, ABBAS NAQVI S, LUDEÑA B, CASTILLO K, CHABRILLANGE N, BOUGUEDOURA N, BENNACEUR M, SI-DEHBI F, ABDOULKADER S, DAHER A, TERRAL J F, SANTONI S, BALLARDINI M, MERCURI A, BEN SALAH M, KADRI K, OTHMANI A, LITTARDI C, SALHI-HANNACHI A, PINTAUD J C, ABERLENC-BERTOSSI F. Genetic structure of the date palm (*Phoenix dactylifera*) in the Old World reveals a strong differentiation between eastern and western populations[J]. Annals of Botany, 2015, 116(1): 101-112.
- [55] AHMED W, FEYISSA T, TESFAYE K, FARRAKH S. Genetic diversity and population structure of date palms (*Phoenix dactylifera* L.) in Ethiopia using microsatellite markers[J]. Journal, Genetic Engineering & Biotechnology, 2021, 19(1): 64-78.
- [56] SALEH A A, SHARAFADDIN A H, EL KOMY M H, IBRAHIM Y E, HAMAD Y K. Molecular and physiological characterization of *Fusarium* strains associated with different diseases in date palm[J]. PLoS One, 2021, 16(7): e0254170.
- [57] PROMKAEW N, UMPUNJUN P, CHUENBOONNGARM N, VIBOONJUN U. Development of a molecular marker for sex identification in Thai commercial date palm (*Phoenix dactylifera* L.)[J]. Plant Biotechnol (Tokyo), 2024, 41(1): 45-51.
- [58] ATIA M A M, ADAWY S S, EL-ITRIBY H A. Date palm sex differentiation based on fluorescence *in situ* hybridization (FISH)[J]. Methods in Molecular Biology (Clifton, N. J.), 2017, 1638(5): 245-256.
- [59] AL-AMERI A, ABDULHAFED A, AL-QURAINY F, GAAFAR A Z. Molecular identification of sex in phoenix dactylifera using inter simple sequence repeat markers[J]. BioMed Research International, 2016, 1(6): 1-15.
- [60] ATIA M A M, SAKR M M, MOKHTAR M M, ADAWY S S. Development of sex-specific PCR-based markers in date palm[J]. Methods in Molecular Biology (Clifton, N. J.), 2017, 1638(1): 227-244.
- [61] ATIA M A M, SAKR M M, ADAWY S S. Assessing date palm genetic diversity using different molecular markers[J]. Methods in Molecular Biology (Clifton, N. J.), 2017, 1638(1): 125-142.
- [62] AL-KHALIFAH N S, SHANAVASKHAN A E. Molecular identification of date palm cultivars using random amplified polymorphic DNA (RAPD) markers[J]. Methods in Molecular Biology (Clifton, N. J.), 2017, 1638(1): 185-196.
- [63] SABIR J S, ABO-ABA S, BAFEEL S, ZARI T A, EDRIS S, SHOKRY A M, ATEF A, GADALLA N O, RAMADAN A M, AL-KORDY M A, EL-DOMYATI F M, JANSEN R K, BAHIELDIN A. Characterization of ten date palm (*Phoenix dactylifera* L.) cultivars from Saudi Arabia using AFLP and ISSR markers[J]. Comptes Rendus Biologies, 2014, 337(1): 6-18.
- [64] HAIDER N. Determining phylogenetic relationships among date palm cultivars using random amplified polymorphic DNA (RAPD) and inter-simple sequence repeat (ISSR) markers[J]. Methods in Molecular Biology (Clifton, N. J.), 2017, 1638(1): 153-172.
- [65] AL-QURAINY F, KHAN S, NADEEM M, TARROUM M, GAAFAR A Z. Antioxidant system response and cDNA-SSCoT marker profiling in *Phoenix dactylifera* L. plant under salinity stress[J]. International Journal of Genomics, 2017, 6(1): 1537538.
- [66] HAIDER M S, KHAN I A, JASKANI M, NAQVI S A, MATEEN S, SHAHZAD U, ABBAS H. Pomological and biochemical profiling of date fruits (*Phoenix dactylifera* L.) during different fruit maturation phases[J]. Pakistan Journal of Botany, 2018, 50(1): 1069-1076.
- [67] ALAHYANE A, HARRAK H, ELATERI I, AYOUB J, AIT-OUBAHOU A, BENICHOUE M, ABDERRAZIK M E. Evaluation of some nutritional quality criteria of seventeen Moroccan dates varieties and clones, fruits of date palm (*Phoenix dactylifera* L.)[J]. Brazilian Journal of Biology, 2021, 82(6): 236471.
- [68] ZHANG C R, ALDOSARI S A, VIDYASAGAR P S P V, SHUKLA P, NAIR M G. Health-benefits of date fruits produced in Saudi Arabia based on *in vitro* antioxidant, anti-inflammatory and human tumor cell proliferation inhibitory assays[J]. Journal of the Saudi Society of Agricultural Sci-

- ences, 2015, 9(4): 1-8.
- [69] AHMED I A, AHMED A W K. Chemical composition of date varieties as influenced by the stage of ripening[J]. Food Chemistry, 1995, 54(1): 305-309.
- [70] AL-ASMARI F, NIRMAL N, CHALIHA M, WILLIANMS D, MEREDDY R, SHELAT K, SULTANBAWA Y. Physico-chemical characteristics and fungal profile of four Saudi fresh date (*Phoenix dactylifera* L.) cultivars[J]. Food Chemistry, 2016, 221(4): 644-649.
- [71] HABIB H M, IBRAHIM W H. Nutritional quality evaluation of eighteen date pit varieties[J]. International Journal of Food Sciences and Nutrition, 2009, 1(1): 99-111.
- [72] SHI L H, LIU Z Y, GONZALEZ VIEJO C, AHMADI F, DUNSHEA F R, SULERIA H A R. Comparison of phenolic composition in Australian-grown date fruit (*Phoenix dactylifera* L.) seeds from different varieties and ripening stages[J]. Food Research International, 2024, 181(4): 114096.
- [73] KHALIL M N A, FEKRY M I, FARAG M A. Metabolome based volatiles profiling in 13 date palm fruit varieties from Egypt via SPME GC-MS and chemometrics[J]. Food Chemistry, 2017, 217(2): 171-181.
- [74] NEHDI I A, SBIHI H M, TAN C P, RASHID U, AL-RESAYES S I. Chemical composition of date palm (*Phoenix dactylifera* L.) seed oil from six Saudi Arabian cultivars[J]. Journal of Food Science, 2018, 83(3): 624-630.
- [75] SALHI S, CHENTOUF M, HARRAK H, RAHIM A, ÇAKIR C, ÇAM D, ÖZTÜRK M, HAMIDALLAH N, CABARAUX J F, AMIRI B E. Assessment of physico-chemical parameters, bioactive compounds, biological activities, and nutritional value of the most two commercialized pollen types of date palm (*Phoenix dactylifera* L.) in Morocco[J]. Food Science Technology International, 2024, 30(8): 788-798.
- [76] HAMAD I, ABDELGAWAD H, AL JAOUNI S, ZINTA G, ASARD H, HASSAN S, HEGAB M, HAGAGY N, SELIM S. Metabolic analysis of various date palm fruit (*Phoenix dactylifera* L.) cultivars from Saudi Arabia to assess their nutritional quality[J]. Molecules, 2015, 20(8): 13620.
- [77] OUAMNINA A, ALAHYANE A, ELATERI I, BOUTAKNIT A, ABDERRAZIK M. Relationship between phenolic compounds and antioxidant activity of some moroccan date palm fruit varieties (*Phoenix dactylifera* L.): a two-year study[J]. Plants (Basel), 2024, 13(8): 1119-1135.
- [78] RAMBABU K, BHARATH G, HAI A, BANAT F, HASAN S W, TAHER H, ZAID H F M. Nutritional quality and physico-chemical characteristics of selected date fruit varieties of the United Arab Emirates[J]. Processes, 2020, 8(3): 256-268.
- [79] 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): 1159-1174.
- [80] 丁兵, 李莲芳, 王慷林, 王文俊, 杨力颖, 武程鹏. 云南元江引种椰枣种实多样性研究[J]. 西北林学院学报, 2025, 40(4): 56-64.
- DING B, LI L F, WANG K L, WANG W J, YANG L Y, WU C P. Study on the diversity of coconut seed varieties introduced to Yuanjiang, Yunnan province[J]. Journal of Northwest Forestry College, 2025, 40(4): 56-64.
- [81] KHOULASSA S, KHURSHID H, FOKAR M, ELIDDRISSY H, OUTEHA Y, EIFADIL J, ESSARIOUI A, BENLYAS M, MENTAG R, ELMOUALIJ B. Genetic diversity of Moroccan date palm revealed by microsatellite markers[J]. Genetics and Molecular Biology, 2023, 46(2): e20220021.
- [82] AL-MSSALLEM I S, HU S N, ZHANG X W, LIN Q, LIU W F, TAN J, YU X G, LIU J C, PAN L L, ZHANG T W, YIN Y X, XIN C Q, WU H, ZHANG G Y, BA ABDULLAH M M, HUANG D W, FANG Y J, ALNAKHLI Y O, JIA S G, YIN A, ALHUZIMI E M, ALSAIHATI B A, AL-OWAYYED S A, ZHAO D J, ZHANG S, AL-OTAIBI N A, SUN G Y, MAJRASHI M A, LI F S, TALA, WANG J X, YUN Q Z, ALNASSAR N A, WANG L, YANG M, AL-JELAIFY R F, LIU K, GAO S H, CHEN K F, ALKHALDI S R, LIU G M, ZHANG M, GUO H Y, YU J. Genome sequence of the date palm *Phoenix dactylifera* L.[J]. Nature Communications, 2013, 4(1): 2274-2289.
- [83] YAISH M W, SUNKAR R, ZHENG Y, JI B, AL-YAHYAI R, FAROOQ S A. A genome-wide identification of the miRNAome in response to salinity stress in date palm (*Phoenix dactylifera* L.)[J]. Frontiers in Plant Science, 2015, 6(5): 946-962.
- [84] JANA G A, AL KHARUSI L, SUNKAR R, AL-YAHAI R, YAISH M W. Metabolomic analysis of date palm seedlings exposed to salinity and silicon treatments[J]. Plant Signaling & Behavior, 2019, 14(11): 1663112.
- [85] EL RABEY H A, AL-MALKI A L, ABULNAJA K O. Proteome analysis of date palm (*Phoenix dactylifera* L.) under severe drought and salt stress[J]. International Journal of Genomics, 2016, 1(1): 1-8.
- [86] V PATANKAR H, M ASSAHA D V, AL-YAHYAI R, SUNKAR R, YAISH M. Identification of reference genes for quantitative real-time PCR in date palm (*Phoenix dactylifera*

- L.) subjected to drought and salinity[J]. PLoS One, 2016, 11(11): e0166216.
- [87] 海龙. 椰枣与阿拉伯人的生活[J]. 中小企业管理与科技 (下旬刊), 2009, 1(2): 94-102.
- HAI L. Date palm and Arab life[J]. Small and Medium-sized Enterprise Management and Technology (Next Issue), 2009, 1(2): 94-102. (in Chinese)
- [88] EL-FAR A H, AHMED H A, SHAHEEN H M. Dietary supplementation of *Phoenix dactylifera* seeds enhances performance, immune response, and antioxidant status in broilers[J]. Oxidative Medicine and Cellular Longevity, 2016, 1(1): 5454963.
- [89] GUARDIOLA F A, PORCINO C, CERZUELA R, CUESTA A, FAGGIO C, ESTEBAN M A. Impact of date palm fruits extracts and probiotic enriched diet on antioxidant status, innate immune response and immune-related gene expression of European seabass (*Dicentrarchus labrax*)[J]. Fish & Shellfish Immunology, 2016, 52(5): 298-308.
- [90] NEHDI I A, MOKBLI S, SBIHI H, TAN C P, AL-RESAYES S I. *Chamaerops humilis* L. var. *argentea* André date palm seed oil: a potential dietetic plant product[J]. Journal of Food Science, 2014, 79(4): 534-539.
- [91] 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 effects of date palm and its application in cosmetics[J]. Chinese Pharmaceutical Industry, 2022, 31(20): 125-128. (in Chinese)
- [92] BARAKAT H, ALFHEEAID H A. Date palm fruit (*Phoenix dactylifera*) and its promising potential in developing functional energy bars: review of chemical, nutritional, functional, and sensory attributes[J]. Nutrients, 2023, 15(9): 2134-2149.
- [93] EL-SHARNOUBY G A, ALEID S M, AL-OTAIBI M M. Utilization of enzymes in the production of liquid sugar from dates[J]. African Journal of Biochemistry Research, 2009, 3(3): 41-47.
- [94] NWANEKEZI E C, EKWEMPU C C, AGBUGBA R U. Effect of substitution of sucrose with date palm (*Phoenix dactylifera*) fruit on quality of bread[J]. Food Processing and Technology, 2015, 6(9): 1-7.
- [95] CANTADORI E, BRUGNOLI M, CENTOLA M, UFFREDI E, COLONELLO A, GULLO M. Date fruits as raw material for vinegar and non-alcoholic fermented beverages[J]. Foods, 2022, 11(13): 1972-1987.
- [96] ATTRI N, KAUR S, AGGARWAL P, KAUR N, KUMAR A, BAJAJ K. Immature dates as a sustainable sugar substitute in functional confection: effects on product characteristics and shelf stability[J]. Journal of the Science of Food Agriculture, 2025, 105(15): 8773-8786.