

智能栽培与绿色防控协同下椰枣高效栽培研究进展

李芳芳^{1,2,3}, 郑建伟⁴, 郑明娟¹, 张 宁¹, 胡 伟¹, 符海泉^{1*}, 李 杰^{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 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. 襄阳职业技术学院农学院, 湖北襄阳 441050; 4. 云南农业大学热带作物学院, 云南普洱 665000

摘 要: 椰枣 (*Phoenix dactylifera* L.) 是具有 7000 多年栽培历史的世界上最古老果树, 因其优异的耐旱、耐高温和耐盐碱特性, 已成为干旱与半干旱地区极具价值的经济作物。随着农业科技进步与生态保护意识增强, 发展椰枣高效栽培技术在粮食安全、生态保护与区域经济效益提升等方面具有重要战略意义。本研究系统探讨智能栽培与绿色防控协同框架下椰枣优质高产栽培关键技术, 重点综述种植环境优化策略, 包括土壤适配、水分调控、光温优化; 系统总结土壤准备、种植密度、精准施肥、整形修剪、节水灌溉及间作模式等高产栽培核心技术; 探讨物联网、大数据、人工智能及无人机等智能技术在椰枣精准栽培中的应用现状与潜力; 分析分蘖繁殖、组织培养等繁殖技术的研究进展与优化方向; 提出以生物防治为核心的有害生物综合治理 (IPM) 策略。对椰枣从生态环境、栽培技术创新、产业融合及国际合作四大方向进行展望, 以期为椰枣产业的优质、高效与可持续发展提供科学依据与技术支撑。

关键词: 椰枣; 智能化; 绿色防控; 高效栽培

中图分类号: S667.9 文献标志码: A

Research Progress on Efficient Cultivation of Date Palms Through the Integration of Intelligent Cultivation and Green Control

LI Fangfang^{1,2,3}, ZHENG Jianwei⁴, ZHENG Mingjuan¹, ZHANG Ning¹, HU Wei¹, FU Haiquan^{1*}, LI Jie^{1*}

1. Coconut Research Institute, Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences / National Germplasm Repository of Tropical Palms / International Joint Research Center for Date Palm Germplasm Evaluation and Seedling Propagation, Wenchang, Hainan 571339, China; 2. Sanya Research Institute, Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences / State Key Laboratory of Tropical Crop Breeding, Sanya, Hainan 572025, China; 3. College of Agriculture, Xiangyang Polytechnic, Xiangyang, Hubei 441050, China; 4. College of Tropical Crops, Yunnan Agricultural University, Pu'er, Yunnan 665000, China

Abstract: *Phoenix dactylifera* L. (Date Palm), with a cultivation history of over 7000 years, ranks among the world's most ancient fruit trees. Renowned for its exceptional tolerance to drought, high temperatures, and salinity, it has become a highly valuable economic crop in arid regions. Advances in agricultural technology and growing awareness of ecological conservation underscore the strategic importance of developing efficient date palm cultivation technologies for food security, ecological protection, and enhanced regional economic benefits. This paper systematically explored the key technologies for high-quality and high-yield date palm cultivation under the synergistic framework of intelligent cultivation and green control. It comprehensively reviewed strategies for optimizing the growth environment, including soil adaptation, water regulation, and light & temperature management. Core high-yield cultivation techniques—such as soil preparation, planting density, precision fertilization, tree pruning, water-saving irrigation, and intercropping models—were systematically integrated and summarized. The application status and potential of intelligent technologies, including the Internet of Things (IoT), big data, artificial intelligence (AI), and unmanned aerial vehicles (UAVs), in precision date palm cultivation were discussed. Research progress

收稿日期 2025-10-13; 接受日期 2025-12-29

基金项目 海南省重点研发计划项目 (No. ZDYF2025SXLH010); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项 (No. 1630012025301); 云南省重大科技专项计划项目 (No. 202202AE090104)。

作者简介 李芳芳 (1993—), 女, 博士, 研究方向: 椰枣抗病育种。*通信作者 (Corresponding author): 李 杰 (LI Jie), E-mail: 13637614062@163.com; 符海泉 (FU Haiquan), E-mail: haiquan.fu@163.com。

and optimization directions for propagation techniques, notably offshoot propagation and tissue culture, were analyzed. Furthermore, an Integrated Pest Management (IPM) strategy centered on biological control was proposed as a green pest and disease control approach. The paper would provide prospects for the date palm industry from four key perspectives, ecological environment, cultivation technology innovation, industrial integration, and international cooperation, aiming to offer a solid scientific basis and technical support for the high-quality, efficient, and sustainable development of the date palm industry.

Keywords: date palm; intelligent cultivation; green control; efficient cultivation

DOI: 10.3969/j.issn.1000-2561.2026.03.013

椰枣 (*Phoenix dactylifera* L.) 属棕榈科刺葵属, 是一种栽培历史悠久的多年生经济果树, 不仅营养丰富, 还具有卓越的抗逆性, 包括耐旱、耐热和耐盐碱等特性。椰枣原产于北非和中东地区, 早在 7000 年前的阿拉伯新石器时代便已驯化, 是世界上最早实现人工栽培的木本作物之一^[1]。历史上, 椰枣的种植区域覆盖从摩洛哥至埃及的北非地带、整个阿拉伯半岛, 并向东延伸至伊拉克、伊朗及巴基斯坦等南亚国家^[2]。椰枣对温度的适应范围较广, 适宜在年平均气温 12.7~27.5 °C 的地区生长, 夏季可耐受 56 °C 的短期极端高温, 冬季也能耐受低于 0 °C 的低温。椰枣虽能在多种土壤类型中生长, 但在排水良好、土层深厚 (深度可达 2~3 m) 的沙质壤土中生长最佳, 有利于其深根系充分伸展并吸收深层土壤水分^[3-4]。椰枣果实富含糖类、维生素和矿物质, 营养全面, 加之对极端环境的强适应性, 使椰枣成为干旱与盐碱地区农业发展的重要作物。椰枣约在 1700 年前沿丝绸之路传入中国, 成为我国穆斯林群众的传统食品之一^[5-6]。近年来, 随着生态环境保护意识的增强和农业科技的发展, 椰枣在我国热带至亚热带地区的引种栽培日益受到重视。特别是在我国西南干热河谷地区, 如云南元江、元谋和保山等地, 该地区独特的气候条件为椰枣提供了理想的生长环境。椰枣的引种和推广, 不仅有助于优化区域农业产业结构, 也为生态修复提供新的途径。

然而, 目前在我国大面积推广椰枣种植仍面临栽培技术不成熟、产量与品质不稳定等问题。因此, 本研究系统总结我国椰枣生产现状, 并对关键栽培技术的研究进展进行梳理, 对实现椰枣优质高效栽培具有重要意义。本研究主要围绕椰枣在我国的生产概况与栽培技术研究展开综述, 以期为推动我国椰枣产业健康可持续发展提供科学依据和技术支撑。

1 我国椰枣的生产概况

椰枣在我国海南、广东、福建等亚热带至热

带区域呈零星分布, 主要表现为自然野生种群的散落生长以及人工引种栽培。特别是在海南文昌, 已建成占地 4.67 hm² 的椰枣隔离检疫圃和种质资源圃, 用于该作物的保护与研究。其适宜生境主要分布于热带沙漠气候和地中海气候区, 该地区土壤多具有一定的盐碱性, 椰枣具有显著的耐旱、耐高温和耐盐碱特性, 同时椰枣对强风具有显著的耐受性, 在大风条件下通常不会遭受结构性损伤^[7]。热带沙漠气候特征为年温差小、昼夜温差大、年降水量在 100 mm 以下至 400 mm 以上不等, 平均为 250 mm; 地中海气候则表现为冬季湿润、夏季干热的季节性降水模式。这 2 种气候均具备高温低湿的特点, 与椰枣的生理需求高度契合。在我国, 西南地区的干热河谷生态带, 尤其是云南元江、元谋和保山等地, 因该地区独特的“立体气候”特征, 已成为椰枣引种的理想区域。这些地区旱季与雨季分明, 降水分布模式与椰枣原产地气候条件极为相似^[8-9], 因而成为椰枣种植探索与发展的新兴热点。通过在这些区域开展引种试验, 不仅有助于扩大椰枣种植范围, 也为当地农业提供新的发展机遇, 同时在改善生态环境, 促进经济与环境协调发展方面具有积极意义。

2 关键栽培技术研究进展

2.1 种植条件的优化

2.1.1 土壤条件优化 椰枣树对土壤类型具有较强的适应性, 可在多种土壤中生长, 但其生长状况与土壤排水能力和肥力水平密切相关。理想的栽培土壤应具备良好的排水性和深厚的沙质结构, 有利于根系深扎并获取充足氧气^[10-11]。椰枣树表现出较强的耐盐碱能力, 能在含有 3% 可溶性盐的土壤中存活, 当含量超过 6% 时, 枣椰树就不会生长, 同时适宜在 pH 为 8.0~10.0、深度为 2~3 m 的沙壤土中生长^[3, 7]。此类土壤既能有效保持必要的水分, 又可避免因积水导致的根系腐烂, 为植株健康生长提供良好条件^[12]。良好的排水性能可

确保即使在降雨量或大量灌溉后土壤也不发生长时间积水,从而降低根系病害风险,促进椰枣树整体健康。此外,深厚的沙质土壤有利于根系扩展,增强植株对水分和养分的吸收能力,为实现高产优质生产提供支持。

2.1.2 水管理优化 作为一种典型的高耗水作物,椰枣树的生长和产量水平与水分供应密切相关。其叶子形态结构显著影响蒸腾速率,尤其在高温强辐射的气候条件下,每公顷椰枣年耗水量可达数千立方米^[13-14]。尽管椰枣树具有一定的耐旱性,但在生长期和果实发育阶段,充足水分供应对维持正常生理活动及促进果实发育至关重要。因此,需建立科学的灌溉与排水系统,以满足其水分需求的同时避免积水^[15-16]。良好的排水系统可防止根区积水,减少根系病害发生,促进植株健康。成龄椰枣树具有发达的深根系统,能够利用深层土壤水分,因而在干旱条件下仍可维持较长时间的生产力。因此,椰枣栽培中,除应确保灌溉水源充足外,还须重视排水系统的建设,以实现水分供需平衡,避免渍害。这种综合的水管理策略有助于提升椰枣树在少雨高蒸发地区的适应性和生产效率,从而不仅能兼顾椰枣树的健康成长,还能最大化产量潜力,实现经济效益与生态效益的双赢。

2.1.3 温度与光照管理 椰枣树的生长发育与温度密切相关。开花期温度在 17~22℃,果实成熟期需要 25℃以上的高温干燥的气候环境,以促进果实发育与糖分积累;冬季适度的低温有助于刺激花芽分化,为下一生长周期奠定基础^[4,17]。在热带至亚热带气候区,椰枣树通常表现出最佳生长状态。充足光照是其健康生长的重要条件,植株在全日照条件下生长最优,但也可适应轻度遮阴。光照强度与质量对椰枣树生长发育具有显著影响。成龄树每日需接受 8~10 h 直射光,这不仅有助于保证果实品质和产量,还能增强光合作用,促进同化物积累,同时有效减少病虫害发生,从而提升植株整体抗逆性和健康状况^[18]。

2.2 高产栽培技术集成与优化

2.2.1 土壤准备及种植密度 在种植椰枣前,土壤深耕与平整是基础,能够有效改善土壤结构和通气性,为根系生长发育创造良好环境。种植密度的确定需综合考虑土壤肥力、树冠大小、种植园类型及机械化作业需求等多方面因素。合理的株行距配置对椰枣树生长发育至关重要,直接影

响单位面积产量^[19]。间距设计需依据成年树高度、根系扩展范围、田间操作空间及光照需求等因素进行科学规划。在商业化种植中,常见株行距配置包括 10 m×10 m、9 m×9 m 或 10 m×8 m 等规格。在气候炎热干燥的地区,为提升土地利用效率,可适当缩小株距;而在湿度较高地区,尤其是在果实成熟期,宜采用较大间距,以增强园内通风透光条件,降低病害发生率,促进果实健康发育^[20]。此外,种植密度还应考虑品种特性与长期生长潜力,避免因早期密植导致后期树冠拥挤、光照竞争加剧等问题。

2.2.2 精准养分管理技术 椰枣树的养分管理需依据土壤理化性质及不同生育阶段的养分需求特性制定施肥策略。研究表明,每株椰枣树产出 50 kg 鲜果的养分需求约为氮(N) 45 kg、磷(P) 13.5 kg 和钾(K) 81 kg,其中相当部分可通过矿化水灌溉自然供给。苗圃阶段建议每月施肥 2 次,选用 N、P、K 含量分别为 5.5%、0.75%和 1.6%的有机液体肥料,按每升水添加 5 mL 产品的比例稀释后施用于根区。在种植密度为 121 株/hm²的椰枣园中,推荐按树龄实施差异化施肥方案:幼龄树(定植~树龄 4 a): 年施氮(N) 262 g/株、磷(P) 138 g/株、钾(K) 540 g/株;成龄树(树龄≥4 a): 年施氮(N) 525 g/株、磷(P) 138 g/株、钾(K) 540 g/株。值得注意的是,成龄树的氮素需求约为幼龄树的 2 倍,而磷、钾需求在不同树龄阶段保持相对稳定^[7]。传统栽培中常利用动物粪便与植物残体等有机物料作为肥料来源,以提高果实产量^[21]。这类物料能够缓慢释放养分,维持土壤湿度,改善土壤团粒结构,为椰枣树提供持续而稳定的营养供应^[22]。完整肥料应包含植物所需的大量元素和微量元素,以优化土壤物理性质,如提高孔隙度、增强通气性和水分渗透能力,并调节土壤容重^[23]。然而,化学肥料的过量或不合理施用会对土壤微生物群落及酶活性产生抑制,导致土壤板结和生态功能退化。为应对这一问题,目前已推广使用堆肥、菌根真菌复合体(MycENA16)及具固氮解磷能力的成团泛菌(*Pantoea agglomerans*)等生物肥料。研究表明,这些新型肥料在促进椰枣生长、提高抗逆性和改善果实品质方面效果显著^[24]。未来应进一步加强椰枣专用肥的配方研发与施肥制度的标准化,推动养分管理技术向精准化、绿色化方向发展。

2.2.3 修剪管理 椰枣树为单主干树种,在自然生长状态下所修剪较少,但科学合理的修剪可显著改善冠层通风透光性,减少病虫害,从而提高果实品质与单位面积产量^[25]。冬季(11—12月)为椰枣树休眠期,是整形修剪的最佳时期。此时树体生理活动较弱,剪口愈合较快,通过合理剪除病虫枝、弱枝和过密枝,可以有效促进来年新梢萌发与树势恢复。修剪时需清理枯叶,去除分蘖苗,优化树冠结构,提高光能利用效率。一般每年进行一次系统修剪即可。在生长期长、热量充足的种植区,可在果实采收后进行夏季修剪,主要清除残枝、病叶及果柄,减少病原菌和害虫的越冬基数。坐果后,可以去除约 1/3 的中央果穗,以减少非生产性养分消耗,促进养分向果实分配^[26]。此外,春季套袋前也可进行轻修剪,进一步调整树形,改善冠层微环境,为坐果和果实膨大创造有利条件^[27]。值得注意的是,修剪强度需根据树龄、树势及品种特性灵活调整,避免因过度修剪导致树体损伤或产量下降。

2.2.4 灌溉管理 椰枣树虽具有一定的耐旱性,但要实现高产优质,仍需充足灌溉,尤其在集约化种植区,需水量显著增加^[28]。定植后应立即进行灌溉,以缓解移栽胁迫。在种植园建成初期,需采用高频灌溉,确保幼树获得充足水分。灌溉频率应根据土壤类型调整:砂质土壤中,首个生长季夏季需每日灌溉;粘重土壤可每周 1 次;而多数土壤类型则需每 2~3 d 灌溉 1 次。定植后 6 周内,种植者应持续监测地表土壤湿度,确保表层土壤保持湿润,防止因失水收缩导致土壤与根颈分离,影响成活率^[7]。为提高水资源利用效率,滴灌、微喷灌等节水灌溉技术已在椰枣生产中广泛应用。此类技术不仅能够显著减少水分蒸发与深层渗漏损失,还可实现水肥一体化,提高水分利用效率^[13]。通过实时监测土壤墒情,结合作物不同生育阶段的需水规律,可制定精确的灌溉制度,合理调控灌水定额与灌溉周期,避免因盲目灌溉导致的水资源浪费或水分胁迫^[29]。椰枣树在花芽分化期、开花坐果期及果实膨大期对水分高度敏感,应确保适期适量灌溉;而在成熟期则需适当控水,以促进糖分积累和品质形成。此外,结合集成温室、遮阳网等设施栽培技术,可进一步优化根区水热条件,有效减轻高温、干热风等逆境胁迫的影响,从而提升果实产量与商品性。设施栽培还有助于抵御季节性干旱和暴雨等极端

天气,增强椰枣生产系统的稳定性和可持续性。未来,应研发更加智能化的灌溉决策系统,推动按需供水与精准调控,进一步提升水肥资源利用效率。

2.2.5 间作与轮作 在椰枣园行间套种豆科作物(如绿豆、豇豆、小扁豆等)是一种提升土壤肥力、增强系统抗逆性和增加经济收益的可持续种植制度。豆科作物可通过生物固氮作用将大气中的氮素转化为植物可利用形态,从而改善土壤氮素水平,减少化学氮肥用量。此外,间作作物还能覆盖地表,减少水土流失,抑制杂草,并可通过收获农产品为农户提供额外收益,显著提高土地当量比与种植综合效益。间作模式需因地制宜,充分考虑土壤类型、气候条件及椰枣树龄等因素。在雨养农业区,夏季可种植绿豆,冬季可选择豇豆或蚕豆,以实现全年土地覆盖和养分高效利用。合理的轮作间作不仅有助于维持土壤肥力、促进养分循环利用,还可改善农田微气候,增加系统生物多样性,缓解连作障碍^[30]。通过科学安排作物时空布局,能够在保证椰枣正常生长的前提下,实现资源高效利用、生态保护与经济效益的协同提升,推动椰枣种植制度向绿色、高效、可持续发展方向。

2.3 智能化管理

2.3.1 物联网与大数据技术 物联网传感器可实时监测土壤湿度、温度和光照强度等关键环境参数,为椰枣树精细化栽培管理提供数据支持。这些数据是制定灌溉制度、施肥方案及病虫害绿色防治策略的重要依据。同时,基于大数据分析技术,可融合历史气象资料、土壤信息和作物生长模型,实现对椰枣产量的早期预测与种植策略的动态优化^[31]。例如,利用机器学习算法能够依据环境因子与植株生长状态,对病虫害发生风险进行准确预警,从而实现早期干预,降低生产损失,提高管理效率^[32-33]。此外,物联网平台还可实现远程监控与智能决策,推动椰枣生产由传统经验型向数据驱动型转变,显著提升资源利用效率和系统可持续性。

2.3.2 人工智能与无人机技术 无人机技术,特别是搭载多光谱、高光谱及热红外传感器的遥感平台,已广泛应用于现代椰枣园管理中。它们可快速、大面积获取椰枣树的冠层结构、叶面积指数、叶绿素含量等关键生长指标。结合人工智能(AI)图像识别与深度学习算法,能够实现对病

虫害的早期诊断、营养缺乏判断及产量预估, 显著提高监测效率与准确性^[34]。AI 系统可自动识别生长异常区域, 生成病虫害分布图或肥力差异图谱, 为变量施药、精准施肥提供处方支持, 从而实现管理措施的定向调控。此外, 无人机还可用于监测植被水分胁迫指数、植株氮素水平等生理指标, 进一步提升椰枣园管理的精细化与智能化水平。未来, 随着无人机续航能力与传感器精度的不断提升, 以及 AI 模型解释性的增强, 该技术将在椰枣智慧农业系统中发挥更为核心的作用。

2.4 繁殖技术改进

2.4.1 分蘖苗繁殖 分蘖繁殖是椰枣传统的无性繁殖方式, 能完整保留母株的优良农艺性状, 如果实品质、抗逆性以及早果性等, 并可显著缩短幼树至结果期的年限, 对提升产业经济效益具有重要作用。然而, 该技术仍存在繁殖系数低、成苗周期长、受母株年龄和健康状况限制明显等问题。通常每株成年椰枣树每年仅可产生 3~5 个分蘖苗, 自然萌发率普遍低于 15%, 难以满足商业化种苗需求^[35]。为提高分蘖繁殖效率, 目前已提出多项改进措施。一方面, 利用辐射诱变改良椰枣性状^[36]。另一方面, 通过优化植株生长环境, 如改善土壤结构、增加灌溉频次与合理施肥, 以缩短缓苗期并提高移栽成活率。此外, 利用分子标记筛选高繁殖力基因型母株, 也是提升繁殖效率的有效途径^[37-38]。

2.4.2 组织培养技术 组织培养技术具有繁殖速度快、遗传性状稳定、不受季节限制等优势, 是实现椰枣优良品种大规模商业化种植的关键技术^[39]。近年来, 对椰枣不同组织器官再生潜能的研究取得突破性进展。叶片、顶端分生组织、茎尖、侧芽及根等外植体均可通过脱分化与再分化途径再生完整植株^[40-42]。其中体细胞胚胎发生途径因其增殖效率高、遗传一致性好, 已成为研究与应用的途径^[43-44]。然而, 椰枣组织培养技术仍面临外植体褐化、胚胎发生不同步、再生苗生根困难及移栽适应性差等瓶颈^[45-46]。为此, 通过优化消毒方式、调整植物生长调节剂配比、添加抗氧化剂等措施, 可显著改善培养效果, 提高成苗质量^[47-50]。当前, 随着多组学技术(如基因组学、转录组学、代谢组学)与人工智能算法的深入应用, 椰枣离体繁殖正逐步从经验优化转向模型驱动精准设计。通过构建培养过程大数据平台, 结合机器学习算法预测最佳培养条件, 有望实现

高通量、自动化、低成本的椰枣组培苗生产, 为产业可持续发展提供有力技术支撑^[51]。

2.5 病虫害防治技术

椰枣树在生长过程中易受多种病害和虫害影响, 其中绝大多数病害由真菌性病原引起^[52]。镰刀菌属(*Fusarium* spp.) 是危害椰枣树的重要病原真菌属之一, 特别是 *F. proliferatum* 菌株, 已在沙特阿拉伯多个椰枣品种中被鉴定为关键致病因子^[53]。虫害方面, 杜巴斯虫(Dubas bug) 幼虫通过吸食叶片汁液, 导致叶片黄化枯萎、果实早落, 严重影响树体营养与产量^[54]。近年来, 红棕象甲(*Rhynchophorus ferrugineus*) 是全球棕榈作物种植园中最具破坏性的入侵害虫之一, 其幼虫钻蛀树干, 常导致整株死亡^[55]。据统计, 全球范围内危害椰枣树的昆虫与螨类已达 112 种^[56]。因此, 建立高效、环保的综合治理体系尤为迫切。为应对上述病虫害, 目前已发展出多种防治策略。在生物防治方面, 利用拮抗微生物(如木霉、芽孢杆菌等) 抑制病原菌生长被视为一项绿色且可持续的管理途径^[57]。在虫害治理中, 基于物种特异性的现代综合害虫管理(IPM) 技术日益成熟, 如交配干扰技术、昆虫不育技术(SIT) 及释放携带显性致死基因的昆虫(RIDL) 等, 均显示出良好的应用潜力^[58]。在监测与诱捕方面, 分布式光纤声学传感技术(DAS) 与性信息素诱捕器的联用, 可实现对红棕象甲的早期诊断与高效诱杀, 显著提高治理精准度^[59-61]。化学防治仍是应对突发性、大规模病虫害的重要手段, 但其使用需建立在对病原和虫源准确识别的基础上。对于土传病害如尖孢镰刀菌, 可通过滴灌系统精准施用醚甲环唑、溴菌腈、托布津、甲基托布津及多菌灵等杀菌剂, 田间试验表明, 此类方式防效显著且对环境的影响相对可控^[62]。与此同时, 加强田间卫生管理是防治工作的基础, 需及时清除病虫残体、病果枯叶, 破坏其滋生环境。对受害较轻植株, 可采取修剪病梢、削除被害叶片等措施; 受害严重的植株则应整株伐除并进行碎木处理, 所有剪口和损伤部位需施用药剂处理, 以防止二次侵染。从长远来看, 选育与推广抗性品种是防治椰枣树病虫害最经济、环保的有效策略。研究表明, 培育抗病品种可能是应对巴尤德病(Bayoud disease) 等毁灭性病害的唯一可持续途径^[62-63]。目前已有研究报道成功选育出抗病且果实品质优良的椰枣新品种^[64], 为产业防控提供了新的种质资

源。将抗性品种与农业生态管理、在生物防治和精准化学防治相结合,构建多层次的绿色防控体系,将成为椰枣病虫害治理的重要发展方向,有助于推动椰枣产业向可持续、高质量目标迈进。

3 展望

3.1 生态环境展望

在全球气候变化加剧和人类活动持续影响自然环境的背景下,协调农业生产与生态保护已成为重要课题。在我国椰枣产业发展过程中,生态可持续性是不可忽视的核心维度之一。椰枣树凭借其优异的耐旱、耐盐碱及抗逆性,在极端环境下仍能保持良好生长态势,这一特性使其成为生态脆弱区农业开发与植被恢复的优选作物之一。在我国西南干热河谷等生态脆弱地区,推广椰枣种植不仅有助于优化农业结构、提高土地利用率,还能在一定程度上发挥固碳、保土、改良微气候等生态功能。未来应更加注重椰枣种植与区域生态安全之间的协同。在扩大种植规模过程中,需严格保护原生生态系统与生物多样性,防范单一作物连作可能引发的土地退化及生态风险。推广间作、轮作等生态种植模式,例如与豆科植物、耐阴草本植物等配套种植,有助于增强农业生态系统的稳定性与韧性,实现生产与生态效益的双重提升。

3.2 栽培技术创新

随着基因组学、转录组学、代谢组学等现代生物技术的快速发展,椰枣品种选育正朝着精准化、高效化方向发展。利用分子标记辅助选择(MAS)和基因编辑(如CRISPR/Cas9)等前沿技术,可精准调控与产量、品质及抗逆性相关的关键基因,加速培育适应不同生态区域的高产、优质、多抗椰枣新品种。在栽培管理方面,物联网、大数据与人工智能技术的深度融合将推动椰枣生产向智能化、精准化转型。通过布设土壤、气象及植株生理传感器网络,可实时获取椰枣生长状态及环境参数,结合作物模型与机器学习算法,实现灌溉、施肥和病虫害的智能决策与精准调控,显著提高水肥利用效率与管理水平。此外,应进一步加强现代繁殖技术的研发与应用。针对传统分蘖苗繁殖效率低、成苗慢等问题,可通过优化体细胞胚胎发生体系、改良培养条件、筛选优良基因型等措施,提升组培苗的出苗率与健壮度,为产业提供稳定、高效、优质的种苗来源,

支撑椰枣种植的规模化与标准化发展。

3.3 产业融合

椰枣产业的高质量发展需超越传统种植范畴,积极延伸产业链、提升价值链,推动一、二、三产业深度融合。在加工环节,应发展椰枣精深加工,开发满足市场需求的高附加值产品,如椰枣浓缩汁、功能性椰枣糖、发酵饮品及休闲食品等,提升产业竞争力与抗风险能力。在服务业方面,可充分挖掘椰枣文化的旅游和体验价值,结合乡村旅游、生态教育、健康养生等新兴业态,打造集种植、加工、观光、科普于一体的椰枣主题农文旅融合综合体,提升品牌影响力及产业收益。通过构建从种植到消费的完整产业链体系,实现产业价值最大化。

3.4 国际协作

椰枣作为一种起源于中东、在全球干旱地区广泛种植的作物,其产业发展离不开广泛的国际科技交流与合作。我国椰枣引种历史悠久,但规模化、产业化发展仍处于初级阶段,在种质资源、核心品种、栽培技术以及产业标准等方面与主产国存在显著差距。未来应积极构建“椰枣产业国际创新联盟”,重点从以下方面深化合作:在种质资源与联合育种领域,依托“一带一路”倡议,与北非、中东主产国建立种质资源交换机制,充分利用我国在基因组学与基因编辑等领域的技术优势,共同培育适应我国不同生态区的高产、优质、多抗椰枣新品种。在技术引进与创新领域,系统引进主产国成熟的栽培管理及产后加工技术体系,结合我国数字农业和智能装备发展基础,进行本土化创新,研发适合我国国情的智能化椰枣栽培模式。在标准制定与战略对接领域,积极参与国际标准制定,推动椰枣产业纳入国家农业合作重点领域,提升我国在国际椰枣产业治理中的话语权。在人才建设与平台搭建领域,通过设立专项基金和共建联合实验室等措施,加强国际人才交流及能力建设,打造高水平的国际协作研发平台。通过多层次、宽领域的国际协作,能够有效弥补我国椰枣产业发展的短板,快速提升产业核心竞争能力,使椰枣成为服务国家粮食安全、乡村振兴以及深化与“一带一路”沿线国家农业合作的亮点作物。

综上所述,我国椰枣产业虽面临技术成熟度不足、生态适配性不清、产业链不完善等挑战,但也蕴含巨大的发展潜力与研究空间。通过持续

强化关键栽培技术研发与集成, 推动品种创新与智能化管理, 促进产业融合与绿色转型, 加强国际协作与战略布局, 椰枣产业有望成为促进区域农业可持续发展、助力乡村振兴与生态文明建设的重要力量。未来研究应更加注重产学研深度融合, 推动科技成果有效转化, 构建完善的产业服务体系, 为我国椰枣产业优质、高效、生态发展提供系统支撑, 最终实现经济效益、社会效益与生态效益的有机统一。

参考文献

- [1] TENGBERG M. Beginnings and early history of date palm garden cultivation in the Middle East[J]. *Journal of Arid Environments*, 2012, 86: 139-147.
- [2] FLOWERS J M, HAZZOURI K M, GROS-BALTHAZARD M, MO Z Y, KOUTROUMPA K, PERRAKIS A, FERRAND 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.
- [3] ALOTAIBI K D, ALHARBI H A, YAISH M W, AHMED I, ALHARBI SA, ALOTAIBI F, KUZYAKOV Y. Date palm cultivation: a review of soil and environmental conditions and future challenges[J]. *Land Degradation & Development*, 2023, 34(9): 2431-2444.
- [4] KRUEGER R R. Date palm (*Phoenix dactylifera* L.) biology and utilization[M]//The date palm genome, Vol. 1: phylogeny, biodiversity and mapping. Cham: Springer International Publishing, 2021: 3-28.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] ZAID A. Date palm publication[M]//FAO plant production and protection paper series, No. 156. 2nd ed. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2024.
- [8] 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, 153.
- [9] 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]. *Forestry Inventory and Planning*, 2017, 42(6): 44-47, 153. (in Chinese)
- [9] BHANSALI R R. Date palm cultivation in the changing scenario of Indian arid zones: challenges and prospects[M]//Desert plants: biology and biotechnology. Berlin, Heidelberg: Springer, 2009: 423-459.
- [10] TRIPLER E, SHANI U, MUALEM Y, BEN-GAL A. Long-term growth, water consumption and yield of date palm as a function of salinity[J]. *Agricultural Water Management*, 2011, 99(1): 128-134.
- [11] HAJ-AMOR Z, TÓTH T, IBRAHIMI M K, BOURI S. Effects of excessive irrigation of date palm on soil salinization, shallow groundwater properties, and water use in a Saharan oasis[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2017, 76: 1-13.
- [12] SPERLING O, SHAPIRA O, TRIPLER E, SCHWARTZ A, LAZAROVITCH N. A model for computing date palm water requirements as affected by salinity[J]. *Irrigation Science*, 2014, 32: 341-350.
- [13] DHAOUADI L, BESSER H, KARBOUT N, AL-OMRAN A, WASSAR F, WAHBA M S, YAOHU K, HAMED Y. Irrigation water management for sustainable cultivation of date palm[J]. *Applied Water Science*, 2021, 11: 1-19.
- [14] RAO A S. Water requirements of young coconut palms in a humid tropical climate[J]. *Irrigation Science*, 1989, 10: 245-249.
- [15] HAJ-AMOR Z, RITZEMA H, HASHEMI H, BOURI S. Surface irrigation performance of date palms under water scarcity in arid irrigated lands[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2018, 11: 1-13.
- [16] CARR M K V. The water relations and irrigation requirements of the date palm (*Phoenix dactylifera* L.): a review[J]. *Experimental Agriculture*, 2013, 49(1): 91-113.
- [17] CHAO C C T, KRUEGER R R. The date palm (*Phoenix dactylifera* L.): overview of biology, uses, and cultivation[J]. *HortScience*, 2007, 42(5): 1077-1082.
- [18] ABUL-SOAD A A, MOHAMED N H, SALOMÓN-TORRES R, AL-KHAYRI J M. Cultivation of date palm for enhanced resilience to climate change[M]//Cultivation for climate change resilience, Vol. 2. Boca Raton: CRC Press, 2023: 138-169.
- [19] YUDIANTO A A. Pengaruh jarak tanam dan frekuensi pembumbunan terhadap pertumbuhan dan hasil tanaman garut (*Marantha arundinaceae* L.)(D). Malang: Brawijaya University, 2015.
- [20] LATIFIAN M, RAHNAMA A A, SHARIFNEZHAD H. Effects of planting pattern on major date palm pests and diseases injury severity[J]. *International Journal of Agriculture and Crop Sciences*, 2012, 4(19): 1443-1451.

- [21] KARBOUT N, MLIH R K, LATIFA D, BOL R, MOUSSA M, BRAHIM N, BOUSNINA H. Farm manure and bentonite clay amendments enhance the date palm morphology and yield[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2021, 14(9): 818.
- [22] MLIH R, BOL R, AMELUNG W, BRAHIM N. Soil organic matter amendments in date palm groves of the Middle Eastern and North African region: a mini-review[J]. *Journal of Arid Land*, 2016, 8: 77-92.
- [23] LEHMANN J, KLEBER M. The contentious nature of soil organic matter[J]. *Nature*, 2015, 528(7580): 60-68.
- [24] EL KINANY S, EL HILALI R, ACHBANI E H, HAGG- OUD A, BOUAMRI R. Enhancement of date palm growth throw the use of organic fertilizer and microbial agents[J]. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 2022, 22(2): 1468-1477.
- [25] ALIKHANI-KOUPAEI M, AGHDAM M S. Defining date palm leaf pruning line in bearing status by tracking physiological markers and expression of senescence-related genes[J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2021, 167: 550-560.
- [26] BASHIR M A, AHMAD M, ALTAF F, SHABIR K. Fruit quality and yield of date palm (*Phoenix dactylifera* L.) as affected by strand thinning[J]. *Journal of Animal and Plant Sciences*, 2014, 24: 951-954.
- [27] SOLIMAN S S, AL-OBEED R S, HARHASH M M. Effects of bunch thinning on yield and fruit quality of khalas date palm cultivar[J]. *World Journal of Agricultural Sciences*, 2011, 7: 42-46.
- [28] MONTAZAR A, KRUEGER R, CORWIN D, POURREZA A, LITTLE C, RIOS S, SNYDER R L. Determination of actual evapotranspiration and crop coefficients of California date palms using the residual of energy balance approach[J]. *Water*, 2020, 12(8): 2253.
- [29] ALNAIM M A, MOHAMED M S, MOHAMMED M, MUNIR M. Effects of automated irrigation systems and water regimes on soil properties, water productivity, yield and fruit quality of date palm[J]. *Agriculture*, 2022, 12(3): 343.
- [30] PEOPLES M B, BROCKWELL J, HERRIDGE D F, ROCHESTER I J, ALVES B J R, URQUIAGA S, BODDEY R M, DAKORA F D, BHATTARAI S, MASKEY S L, SAMPET C, RERKASEM B, KHAN D F, HAUGG- AARD-NIELSEN H, JENSEN E S. The contributions of nitrogen-fixing crop legumes to the productivity of agricultural systems[J]. *Symbiosis*, 2009, 48: 1-17.
- [31] MOHAMMED M, RIAD K, ALQAHTANI N. Efficient iot-based control for a smart subsurface irrigation system to enhance irrigation management of date palm[J]. *Sensors*, 2021, 21(12): 3942.
- [32] KARAR M E, ABDEL-ATY A H, ALGARNI F, HASSAN M F, ABDOL M A, REYAD O. Smart IoT-based system for detecting RPW larvae in date palms using mixed depthwise convolutional networks[J]. *Alexandria Engineering Journal*, 2022, 61(7): 5309-5319.
- [33] 刘瑞. 智能化技术在园林植物生长监测中的应用[J]. *安徽农学通报*, 2024, 30(22): 110-113.
- LIU R. Application of intelligent technology in growth monitoring of garden plants[J]. *Anhui Agricultural Science Bulletin*, 2024, 30(22): 110-113. (in Chinese)
- [34] MOHAMMED M, ALQAHTANI N K, MUNIR M, ELTAWIL M A. Applications of AI and IoT for advancing date palm cultivation in Saudi Arabia[M]//Internet of things-new insights. London: IntechOpen, 2023.
- [35] BITAR A D, ABU-QAOUH H A, ISAID H M. Studies on date palm propagation by offshoots[J]. *Palestinian Journal of Technology and Applied Sciences*, 2019, 2: 61-68.
- [36] JAIN S M. Radiation-induced mutations for date palm improvement[J]. *Date Palm Biotechnology*, 2011: 271-286.
- [37] AHMED H, BASRY M A, ZAKARIA H M, IBRAHIM S, RADWAN K. Genetic marker identification and functional genomics in date palm (*Phoenix dactylifera* L.) for economic trait improvement and resilience enhancement[J]. *International Journal of Agriculture and Biology*, 2025, 33(6): 1-8.
- [38] 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 Biotechnology*, 2024, 41(1): 45-51.
- [39] KORDROSTAMI M, MAFAKHERI M, AL-KHAYRI J M. Date palm (*Phoenix dactylifera* L.) genetic improvement via biotechnological approaches[J]. *Tree Genetics & Genomes*, 2022, 18(3): 26.
- [40] ABD EL BAR O H, EL DAWAYATI M M. Histological changes on regeneration *in vitro* culture of date palm (*Phoenix dactylifera*) leaf explants[J]. *Australian Journal of Crop Science*, 2014, 8(6): 848-855.
- [41] KHAN S, BI T B. Direct shoot regeneration system for date palm (*Phoenix dactylifera* L.) cv. Dhakki as a means of micropropagation[J]. *Pakistan Journal of Botany*, 2012, 44(6): 1965-1971.
- [42] MEZIANI R, MAZRI M A, ARHAZZAL M, BELKOURA I, ALEM C, JAITI F. Evaluation of *in vitro* shoot elongation and rooting of date palm, and determination of physiological characteristics of regenerated plantlets[J]. *Notulae Scientia Biologicae*, 2019, 11(1): 77-85.
- [43] HATTAB W. Application des vitrométhodes à l'étude de l'embryogénèse somatique à partir des organes végétatifs et floraux de pollinisateurs de palmier dattier (*Phoenix dactylifera* L.)[D]. Sfax: Université De Sfax, 2008.
- [44] AL-KHAYRI J M. Date palm *Phoenix dactylifera* L.[M]//Protocol for somatic embryogenesis in woody plants.

- Dordrecht: Springer Netherlands, 2005: 309-319.
- [45] ABOHATEM M, ZOUINE J, EL HADRAMI I. Low concentrations of BAP and high rate of subcultures improve the establishment and multiplication of somatic embryos in date palm suspension cultures by limiting oxidative browning associated with high levels of total phenols and peroxidase activities[J]. *Scientia Horticulturae*, 2011, 130(1): 344-348.
- [46] LIU C, FAN H, ZHANG J, WU J, ZHOU M, CAO F, TAO G, ZHOU X. Combating browning: mechanisms and management strategies in *in vitro* culture of economic woody plants[J]. *Forestry Research*, 2024, 4: e032.
- [47] 刘心语, 王义, 符海泉, 李东霞, 张宁, 徐中亮. 不同植物生长调节剂对椰枣玻璃化愈伤组织调控的影响[J]. *分子植物育种*, 2023, 21(22): 7466-7473.
- LIU X Y, WANG Y, FU H Q, LI D X, ZHANG N, XU Z L. Effects of different plant growth regulators on the regulation of vitrified callus in date palms[J]. *Molecular Plant Breeding*, 2023, 21(22): 7466-7473. (in Chinese)
- [48] 张宁, 张婷芊, 韩宇晶, 张馨月, 杨力颖, 符海泉, 胡伟. 激素调控对椰枣体胚发生的生理响应及体系优化[J]. *热带作物学报*, 2025, 46(2): 333-342.
- ZHANG N, ZHANG T Q, HAN Y J, ZHANG X Y, YANG L Y, FU H Q, HU W. Physiological responses and system optimization of hormone regulation to somatic embryogenesis of date palm[J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2025, 46(2): 333-342. (in Chinese)
- [49] 张宁, 王义, 刘心语, 符海泉, 李东霞, WALID BADAWEY ABDELAALA, 王富有, 徐中亮. 外植体的种类及消毒方式对椰枣胚性愈伤组织诱导的影响[J]. *分子植物育种*, 2022, 20(10): 3340-3346.
- ZHANG N, WANG Y, LIU X Y, FU H Q, LI D X, ABDELAALA W B, WANG F Y, XU Z L. Effects of explant types and disinfection methods on embryo callus induction of date palm[J]. *Molecular Plant Breeding*, 2022, 20(10): 3340-3346. (in Chinese)
- [50] NIMAVAT N, PARIKH P. Innovations in date palm (*Phoenix dactylifera* L.) micropropagation: detailed review of *in vitro* culture methods and plant growth regulator applications[J]. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture (PCTOC)*, 2024, 159(1): 6.
- [51] BHUIYAN M M R, RAHAMAN M M, AZIZ M M, ISLAM M R, DAS K. Predictive analytics in plant biotechnology: using data science to drive crop resilience and productivity[J]. *Journal of Environmental and Agricultural Studies*, 2023, 4(3): 77-83.
- [52] AL-SADI A M, AL-JABRI A H, AL-MAZROUI S S, AL-MAHMOOLI I H. Characterization and pathogenicity of fungi and oomycetes associated with root diseases of date palms in Oman[J]. *Crop Protection*, 2012, 37: 1-6.
- [53] 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.
- [54] KHAN A L, ASAF S, KHAN A, KHAN A, IMRAN M, AL-HARRASI A, LEE I J, AL-RAWAHI A. Transcriptomic analysis of Dubas bug (*Ommatissus lybicus* Bergevin) infestation to date palm[J]. *Scientific Reports*, 2020, 10(1): 11505.
- [55] AZIZ A T. Red palm weevil, *Rhynchophorus ferrugineus*, a significant threat to date palm tree, global invasions, consequences, and management techniques[J]. *Journal of Plant Diseases and Protection*, 2024, 131(1): 9-26.
- [56] EL-SHAFIE H A F. List of arthropod pests and their natural enemies identified worldwide on date palm, *Phoenix dactylifera* L.[J]. *Agriculture and Biology Journal of North America*, 2012, 3(12): 516-524.
- [57] EL HADRAMI A, ADAM LR, DAAYF F. Biocontrol treatments confer protection against *Verticillium dahliae* infection of potato by inducing antimicrobial metabolites[J]. *Molecular Plant-Microbe Interactions*, 2011, 24(3): 328-335.
- [58] WAKIL W, FALEIRO J R, MILLER T A, BEDFORD G O, KRUEGER R R. Date palm production and pest management challenges[J]. *Sustainable Pest Management in Date Palm: Current Status and Emerging Challenges*, 2015: 1-11.
- [59] ASHRY I, MAO Y, AL-FEHAID Y, AL-SHAWAF A, AL-BAGSHI M, AL-BRAHIM S, NG T K, OOI B S. Early detection of red palm weevil using distributed optical sensor[J]. *Scientific Reports*, 2020, 10(1): 3155.
- [60] AL-DOSARY N M N, AL-DOBAI S, FALEIRO J R. Review on the management of red palm weevil *Rhynchophorus ferrugineus* olivier in date palm *Phoenix dactylifera* L.[J]. *Emirates Journal of Food & Agriculture (EJFA)*, 2016, 28(1): 34-44.
- [61] FALEIRO J R. A review of the issues and management of the red palm weevil *Rhynchophorus ferrugineus* (Coleoptera: Rhynchophoridae) in coconut and date palm during the last one hundred years[J]. *International Journal of Tropical Insect Science*, 2006, 26(3): 135-154.
- [62] BENZOHRRA I E, MEGATELI M, BERDJA R. Bayoud disease of date palm in Algeria: history, epidemiology and integrated disease management[J]. *African Journal of Biotechnology*, 2015, 14(7): 542-550.
- [63] 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(5/6): 287-294.
- [64] BOUMEDJOUT H. Morocco markets Bayoud-resistant strains of date palm[J]. *Nature Middle East*, 2010, DOI:10.1038/nmiddleeast.2010.220.