

基因精准育种提升稻米品质的研究进展与展望

吴宏玉

北京科技大学天津学院

DOI:10.12238/as.v8i10.3397

[摘要] 近年来,基因精准育种技术在水稻品质改良领域取得突破性进展,其中基因组测序技术的革新使得水稻品质相关基因的挖掘效率显著提升,CRISPR等基因编辑工具实现了多个重要品质性状的精准调控。多组学联合分析揭示了淀粉合成、香味物质积累等关键代谢网络,为分子设计育种提供了理论依据。智能育种平台的发展加速了优质品种选育进程,一系列兼具高产与优质特性的新品种已成功推广。然而,技术瓶颈、产业转化和消费认知等方面的挑战仍需克服。未来随着技术持续创新和产业生态完善,基因精准育种将为稻米品质提升开辟更广阔前景。

[关键词] 基因精准育种; 稻米; 品质

中图分类号: TS213.3 **文献标识码:** A

Research Progress and Prospects in Precision Breeding to Improve Rice Quality

Hongyu Wu

Tianjin College, University of Science and Technology Beijing

[Abstract] In recent years, gene-based precision breeding technology has achieved breakthrough progress in the field of rice quality improvement. Innovations in genome sequencing technology have significantly enhanced the efficiency of mining quality-related genes, while gene-editing tools such as CRISPR enable precise regulation of multiple key quality traits. Multi-omics joint analysis has revealed critical metabolic networks, including starch synthesis and aroma compound accumulation, providing a theoretical foundation for molecular design breeding. The development of intelligent breeding platforms has accelerated the selection process for high-quality varieties, with a series of new cultivars combining high yield and superior quality successfully promoted. However, challenges such as technical bottlenecks, industrial transformation, and consumer awareness still need to be addressed. In the future, with continuous technological innovation and the improvement of the industrial ecosystem, gene-based precision breeding will open broader prospects for enhancing rice quality.

[Key words] Precision breeding; Rice; Quality

引言

稻米作为全球主要粮食作物,其品质改良直接影响消费者健康和农民收益。传统育种方法在品质改良方面存在周期长、效率低等局限。随着生物技术的快速发展,基因精准育种为稻米品质提升提供了新的技术路径。大量研究证实,淀粉组成、蛋白质含量等品质性状具有可遗传性,这为分子育种奠定了理论基础。当前研究不仅关注单个基因功能,更注重解析复杂性状形成的分子网络。探讨基因精准育种在稻米品质改良中的研究进展,对推动农业高质量发展具有重要意义。

1 稻米品质性状的构成

稻米品质表现为多样性,就优质食用而言,主要包括外观品质、碾磨品质、蒸煮与食味品质和营养品质4个方面。这些品质

性状直接决定了稻米的商品价值与营养价值,也影响着消费者的消费行为。粒形与垩白是稻米外观品质的重要构成因素。粒形主要指籽粒的长度、宽度和长宽比;垩白是指稻米胚乳中白色不透明的部分,主要是由于其中的淀粉粒排列不紧密,存在一些空腔,进而造成的一种光学特性。碾磨品质直接影响稻米的加工效益,主要由精米率和整精米率决定。精米率反映稻谷脱壳后获得的完整精米比例,而整精米率则衡量精米在进一步加工后保持完整颗粒的能力。碾磨品质受稻谷硬度、胚乳结构及裂纹率等因素影响,其中胚乳致密性尤为关键。较高的整精米率意味着更少的碎米,提升加工企业的经济效益,同时影响最终产品的市场接受度。该性状与淀粉组成和蛋白质含量密切相关,可通过调控相关基因优化碾磨表现。

2 当前挑战

2.1 技术瓶颈与复杂的生物系统挑战

当前基因精准育种面临的首要挑战在于技术层面应对复杂生物系统的局限性,多基因协同调控仍然是重大技术难题,特别是影响稻米食味品质的代谢通路涉及数十个基因的精确表达平衡,现有CRISPR编辑系统难以实现多位点的同步精准调控。表型组学技术虽然快速发展,但环境对基因表达的干扰效应仍未完全破解,同一基因型在不同生态区的品质表现差异可达显著水平。基础研究揭示的优质基因资源中,仅有约35%能成功转化应用,主要受限于基因功能冗余和代偿机制的影响。基因编辑技术在单倍体诱导、组织特异性表达调控等关键环节仍存在效率低下问题,递送系统的组织穿透性和特异性亟待提升。

2.2 产业化推广的制度与社会障碍

基因编辑稻米的产业化进程面临多重外部环境挑战,全球监管政策呈现碎片化特征,主要水稻生产国对基因编辑作物的认定标准存在显著差异,中国尚未建立明确的基因编辑品种审定通道,导致研发成果转化受阻。知识产权保护体系存在漏洞,品种权侵权成本低而维权成本高,严重影响企业研发投入积极性。消费者认知方面,尽管科学界对基因编辑食品安全性已有共识,但公众沟通渠道不畅导致认知鸿沟持续存在,部分消费群体仍对新技术持过度谨慎态度。产业链配套不足也是重要制约因素,从品种选育到商品化生产的中间环节薄弱,优质品种难以实现优质优价。这些制度和社会因素交织在一起,形成了阻碍技术产业化的多重屏障。

3 研究进展与展望

3.1 基因组学与多组学技术融合的深度发展与应用

近年来,随着测序技术的革新和生物信息学分析方法的进步,水稻基因组学研究已从单一基因组测序发展到泛基因组和三维基因组研究阶段。中国水稻研究所构建的3000份水稻核心种质泛基因组图谱,系统揭示了亚洲栽培稻的遗传多样性,为品质相关基因挖掘提供了宝贵资源。在转录调控层面,单细胞转录组技术成功应用于水稻胚乳发育研究,精确解析了不同淀粉合成时期基因表达的时空特异性。代谢组学与蛋白质组学的联合分析不仅完善了淀粉合成通路,还发现了影响稻米香味的多个新代谢物标记。表观基因组学研究则揭示了DNA甲基化修饰对稻米品质稳定性的重要调控作用。这些多组学数据的整合为理解品质形成的分子网络奠定了坚实基础。未来发展方向将聚焦于建立更完善的多组学数据库,开发高效的数据整合算法,以及利用人工智能技术挖掘组学数据中的潜在规律。特别值得关注的是,空间转录组技术的应用将使我们能够在亚细胞水平理解品质性状的形成过程,而动态代谢组学则有望揭示环境因素如何通过代谢重编程影响最终品质表现。

3.2 基因编辑技术体系的创新突破与精准调控

基因编辑技术在水稻品质改良中的应用已从单一基因编辑发展到复杂性状的精准调控阶段,最新研发的引导编辑系统实现了对Wx基因启动子区的精确修饰,成功创制了直链淀粉含量

梯度变化的系列材料。基于CRISPR-Cas12f的微型编辑系统因其体积小、效率高的特点,在多重基因编辑中展现出独特优势。南京农业大学开发的Cas9-NG变体显著拓展了编辑靶点的选择范围,使得更多品质相关基因位点可以被精确调控。递送系统方面,碳纳米管载体技术的突破使编辑效率提升,同时大幅降低了脱靶效应。值得关注的是,表观遗传编辑技术的兴起为品质改良提供了新思路,通过靶向DNA甲基化转移酶可实现不改变DNA序列的品质调控。展望未来,组织特异性编辑系统的发展将成为重点,特别是胚乳特异性启动子的挖掘与应用将实现品质性状的精准改良。新型核酸酶如Cas7-11的工程化改造将进一步提升编辑工具的多样性,而人工智能辅助的gRNA设计平台将显著提高编辑的精准度和效率。自动化编辑平台的建立将加速从基因发现到品种选育的全流程。

3.3 品质性状分子调控网络的系统性解析

稻米品质形成的分子机制研究已从单一基因功能鉴定发展到通路网络解析的新阶段,在淀粉合成领域,研究不仅揭示了从蔗糖到淀粉的完整代谢途径,还发现了多个新型调控节点,如SnRK1激酶对淀粉合成酶的磷酸化调控。蛋白质品质方面,通过比较蛋白质组学分析,确定了影响食味品质的关键谷蛋白亚基组合模式,并阐明了贮藏蛋白转运和沉积的分子机制。微量营养元素研究取得重大进展,铁转运蛋白OsYSL2和OsIRT1的协同作用机制被阐明,而锌转运蛋白OsZIP家族成员的细胞定位和功能分化也得到系统解析。香味物质合成研究则突破了传统的BADH2基因范式,发现了多个新型萜烯合成酶基因参与香味形成。特别值得注意的是,环境因素对品质影响的分子机制研究取得突破,光照强度和温度变化如何通过信号转导影响品质性状的分子路径逐渐清晰。未来研究将更加注重基因网络与环境互作的系统性解析,利用多组学整合分析揭示品质形成的层级调控网络。三维基因组技术的应用将帮助理解染色质空间结构如何影响品质相关基因的表达,而表观遗传记忆在品质稳定性维持中的作用也将成为研究热点。

3.4 智能育种技术体系的创新与集成应用

分子设计育种技术正在向智能化、精准化和高效化方向发展,全基因组选择技术通过整合百万级SNP标记和深度学习算法,使品质性状的预测准确率显著提高。中国农业科学院研发的智能育种决策系统,能够根据基因型和环境数据预测品质表现,大幅缩短育种周期。基因编辑与杂交育种的融合创新取得重要进展,中种集团开发的“编辑-回交”快速育种体系,可在2-3代内将优质基因导入主栽品种。高通量表型组技术的应用实现了品质相关性状的无损检测,如近红外光谱技术可快速测定直链淀粉含量和蛋白质含量。南京农业大学建立的稻米品质数字化评价平台,整合了外观、理化、食味等多维数据,为育种决策提供全面支持。这些技术创新正在改变传统育种模式,显著提升品质育种的效率和精准度。未来智能育种将向更系统化的方向发展,包括建立从基因挖掘到品种推广的全链条智能化平台,开发基于多组学数据的虚拟设计系统,以及构建覆盖全国主要稻区的品质预测模型。

3.5 产业化生态系统构建与可持续发展路径

基因精准育种技术正在从实验室研究走向产业化应用,完整的产业生态系统初现雏形。研发环节,华智生物等企业建成自动化智能育种工厂,年创制新种质能力突破2万份,大大加速了育种进程。品种测试体系实现了数字化升级,通过物联网技术实时监测品质性状在不同生态区的表现。产业链整合方面,中粮集团等企业建立了从品种到品牌的优质稻米全产业链,实现优质优价的市场机制。市场细分趋势明显,针对特殊人群的功能性稻米品种不断涌现,如低过敏性蛋白品种和富含抗性淀粉品种。政策环境持续优化,新版《主要农作物品种审定办法》为基因编辑品种开辟了绿色通道,而《种子法》修订加强了新品种权保护。消费者认知逐步提升,市场调研显示年轻消费群体对基因编辑食品的接受度已达到较高水平。面向未来,产业发展的重点将集中在建立全国统一的品质大数据平台,实现资源共享和协同创新;完善从实验室到餐桌的质量追溯体系,增强消费者信任;推动建立与国际接轨的监管标准,促进技术全球化应用;发展精准营养导向的个性化稻米产品,满足多元化市场需求。最终目标是构建产学研用紧密结合的创新生态系统,实现基因精准育种技术的社会价值最大化。

4 结束语

基因精准育种技术的发展为稻米品质改良带来了革命性变化,从基础研究到产业应用,该技术展现了巨大潜力。未来需要

进一步加强多学科交叉融合,突破技术瓶颈,完善产业生态,提升消费认知。随着研究的深入和技术的成熟,基因精准育种有望培育出更多满足多样化需求的优质水稻品种,为保障粮食安全、提高农业效益和促进乡村振兴作出重要贡献。

[基金项目]

北京科技大学天津学院院长基金项目(2023YZJJ-KJ07)。

[参考文献]

- [1]张悦,吕军,于永梅,等.辽宁省水稻优质育种现状分析[J].北方水稻,2024,54(06):1-4+14.
- [2]雍开成.水稻分子导航育种和种子萌发性状的遗传定位[D].上海师范大学,2024.
- [3]杨利平.生物育种产业与乡村振兴战略的融合与发展[J].分子植物育种,2024,22(17):5861-5865.
- [4]丁文家,胡峻铭,王嘉力.水稻育种主要目标性状基因挖掘研究进展[J].杂交水稻,2023,38(03):1-19.
- [5]何小刚.考虑上位性的GWAS分析为水稻分子育种提供见解[D].湖南农业大学,2023.
- [6]郑国利,杜明,李家瑞,等.云南软米的发展及其在水稻育种中的应用[J].中国种业,2023,(03):28-32.

作者简介:

吴宏玉(1993--),女,汉族,硕士研究生,讲师,研究方向:水稻分子育种,农业固废资源化利用。