

稻米适碾技术综述：演进机制及未来趋势

王元开, 鹿保鑫*, 张天姝, 隋蕊伊

(黑龙江八一农垦大学食品学院, 黑龙江大庆 163319)

摘要: 稻米碾磨是衔接稻谷资源利用、商品米品质和居民膳食营养的重要加工环节。适度碾磨(适碾)的核心是在满足国家标准与市场接受度的前提下, 协同控制糠层去除、碎米形成、营养保留、储藏稳定性及加工能耗。本文在对适度碾磨、加工精度与碾磨度(degree of milling, DOM)等概念解析的基础上, 分析了稻米碾磨装备与工艺调控技术的发展, 分析糠层剥离、胚乳损伤、非均匀碾磨和碎米形成机制, 对加工精度对食味品质、营养健康价值、食品安全风险及储藏品质的影响进行了总结, 并对机器视觉、近红外/高光谱、人工智能与闭环控制在适碾加工中的应用进展进行了归纳。聚焦适碾米产业化中存在的标准评价单一、消费者接受度不足、在线检测与过程调控脱节等问题, 提出完善“机理-工艺-品质”协同评价体系、推进装备柔性化与数字化控制、强化真实消费场景验证等发展方向, 以期对稻米加工减损增效和健康化产品开发提供技术参考。

关键词: 适度碾磨; 稻米加工; 营养保留; 适度加工; 智能控制

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2027.7.0361

Review of Moderate Rice Milling Technology: Evolutionary Mechanisms and Future Trends

WANG Yuankai, LU Baoxin*, ZHANG Tianshu, SUI Ruiyi

(College of Food Science, Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing 163319)

Abstract: Rice milling is a critical processing operation that links the utilization of paddy resources with the quality of commercial rice and the nutritional value of the human diet. The central objective of moderate milling is to coordinately regulate bran layer removal, kernel breakage, nutrient retention, storage stability, and processing energy consumption while meeting national standards and ensuring market acceptability. Based on a clarification of the concepts of moderate milling, milling precision, and degree of milling (DOM), this review examines advances in rice-milling equipment and process-control technologies. The mechanisms underlying bran layer removal, endosperm damage, non-uniform milling, and broken-rice formation are systematically discussed. The effects of milling precision on eating quality, nutritional and health value, food safety risks, and storage quality are also summarized. In addition, recent progress in the application of machine vision, near-infrared spectroscopy, hyperspectral imaging, artificial intelligence, and closed-loop control to moderate rice milling is reviewed. Focusing on the major challenges associated with the industrial application of moderately milled rice, including the limited scope of current evaluation standards, insufficient consumer acceptance, and the disconnection between online detection and process regulation, this review proposes several future directions. These include establishing an integrated “mechanism–process–quality” evaluation framework, promoting flexible milling equipment and digital process control, and strengthening product validation under real-world consumption scenarios. This review is expected to provide a technical reference for reducing grain loss, improving processing efficiency, and developing healthier rice products.

Key words: moderate rice milling; rice processing; degree of milling; nutrient retention; intelligent control

稻米是全球重要的粮食作物之一, 也是我国居民膳食结构中的主要谷物来源, 在保障粮食安全、稳定居民膳食供给和支撑稻米加工产业发展中具有重要作用。2025 年我国粮食总产量达到 71 488 万吨, 其中稻谷产量为 4 180.8 亿斤^[1,2]。随着粮食安全战略由增产保供向产后减损、提质增效和营养健康协同发展转变, 稻米加工过程中的损失控制、品质保持与营养保留已成为产业高质量发展的重要方向。碾米作为稻谷加工为商品米的关键环节,

收稿日期: 2026-03-10; 修回日期: 2026-07-19; 接受日期: 2026-07-20

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFD2100902)

作者简介: 王元开(1999-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 粮食油脂及植物蛋白工程, E-mail: 89551395@qq.com

通讯作者: 鹿保鑫(1972-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 粮食油脂及植物蛋白工程, E-mail: lubaoxin72@126.com

不仅影响大米外观、食味和商品价值，也直接关系整精米率、碎米率、加工能耗及营养组分保留水平，是实现稻米加工减损增效的重要技术环节^[3-7]。

传统稻米加工长期受到消费端对白度和外观品质需求的影响，生产过程中常通过提高碾磨强度或增加抛光程度改善商品米品质。然而，过度碾磨会导致糠层和胚过度去除，加剧胚乳损伤，提高碎米率和加工能耗，并造成B族维生素、矿物质、膳食纤维、多酚及 γ -氨基丁酸等营养功能成分损失^[6,8-11]。相比之下，糙米、胚芽米、适碾米及部分留皮稻米产品具有较好的营养保留优势，但仍存在蒸煮适口性、外观接受度和储藏稳定性不足等问题^[12,13]。因此，稻米加工的关键并非单纯追求更高白度或最低碾磨程度，而是在外观品质、食用品质、营养价值、加工效率和消费需求之间实现合理平衡。

在此背景下，适度碾磨（Degree of milling, DOM）逐渐成为稻米加工领域的重要研究方向。适度碾磨旨在通过合理控制糠层去除程度，在改善食用品质的同时最大限度保留营养成分，并降低碎米产生和加工损耗。碾磨程度的确定受到稻米品种、原粮品质、加工装备及目标产品类型等多因素影响，因此需要由传统经验调节向定量评价和精准控制转变。我国GB/T 1354-2018《大米》将加工精度作为大米质量评价的重要指标，GB/T 5502-2018《粮油检验大米加工精度检验》也为米胚残留、皮层残留程度等指标检测提供了技术依据^[14,15]。目前，国际研究中通常采用碾磨质量损失率、白度变化、加工精度、留皮度、灰分和脂质含量变化等指标评价DOM水平^[6,8,16-18]。然而，由于不同研究在品种特性、含水率、设备类型、加工参数及评价指标方面存在差异，适宜DOM的界定仍缺乏统一标准，限制了研究结果的比较与产业应用。

近年来，稻米适度碾磨研究已由传统的加工精度和外观品质评价，逐步拓展至碾磨机理、碎米形成机制、营养保持、储藏稳定性以及智能化调控等方向（表1）。研究表明，稻米碾磨过程受到品种特性、含水率、糠层结构、裂纹状态、设备参数及加工环境等多因素共同影响^[4,5,19-22]。在碾白过程中，米粒受到碰撞、摩擦、剪切和挤压等复杂作用，局部应力集中和微裂纹扩展是导致碎米形成的重要原因^[20,21,23]。随着机器视觉、近红外光谱、高光谱成像、过程传感、离散元模拟和人工智能技术的发展，稻米加工过程逐渐向在线检测、精准调控和智能化生产方向发展，为适度碾磨技术优化提供了新的技术支撑^[18,24-28]。

尽管适度碾磨技术取得了一定进展，但仍面临评价体系不完善、加工参数与品质指标协同调控不足以及产业应用标准化程度不高等问题。目前，现有评价指标主要关注白度、加工精度和整精米率，对食味品质、营养保留、储藏稳定性及安全性的综合评价仍显不足；不同品种和消费需求下适宜DOM存在差异，难以采用统一加工模式。此外，工业生产中在线检测与工艺调控仍需进一步融合，以提高碾磨过程的精准控制能力。

基于此，本文围绕稻米适度碾磨技术的作用机理、品质调控及产业应用开展综述。系统总结稻米碾磨技术与装备的发展过程，分析糠层剥离、颗粒受力、非均匀碾磨及碎米形成机制；归纳不同DOM对稻米加工品质、食味品质、营养价值、储藏稳定性和安全性的影响；进一步探讨智能检测、数字化建模和闭环控制技术在适度碾磨中的应用，并从评价标准完善、产品开发和健康导向加工等方面展望未来发展趋势，以期对稻米适度碾磨技术优化及产业化应用提供理论参考。

表1 近年稻米适度碾磨研究的主要方向及代表性文献

Table 1 Main research directions and representative references on moderate rice milling

研究方向	主要内容	参考文献
适碾加工品质	比较不同 DOM 下整米率、留胚率、白度、米饭质构、味值和感官	[8,12,16,29-32]
	接受度变化，确定品种适宜加工窗口	
节粮降耗与设备调控	从多道碾白、加湿/调质、低温升、分级、摩擦/砂辊组合等方面降低碎米率、胚乳损失和能耗	[17,19,30,33-35]
碾磨机理与碎米形成	利用破碎力学、显微观察、DEM 模拟和颗粒取向分析解释非均匀碾磨、应力集中和裂纹扩展机制	[20-23,26,36]
营养、健康与安全	评估 DOM 对生素、矿物质、膳食纤维、淀粉消化性和米糠活性成分的影响，同时关注皮层污染物富集	[9-11,37-41]
智能检测	综述机器视觉、近红外/高光谱、AI 模型和过程控制在留皮度、白度、碎米率、温升和品质预测中的应用	[18,24,25,27,28]

1 适度碾磨技术与作用机理

1.1 碾磨装备与工艺调控技术

现代稻米加工流程通常包括原粮清理、砻谷脱壳、谷糙分离、糙米分级、多道碾白、抛光整理、白米分级、色选及包装等环节(图1)。与传统单机一次性碾白相比,现代流程的关键进步在于将皮层去除分解为多个可监测、可调节的单元操作,从而降低单次机械应力峰值,提高加工均匀性^[6,17,19]。在适碾加工中,真正发挥决定作用的是碾白段的装备构型与参数匹配,包括砂辊碾米、铁辊/摩擦碾米、砂铁组合、多道适碾、抛光整理以及与分级循环、调质加湿和低温升工艺的协同。

砂辊碾米以磨削作用为主,去皮效率较高,适用于糙米表层初步去除,但若单道去除量过大易产生表面划伤和碎米;铁辊或摩擦碾米依赖米粒间及米粒与机件间的摩擦挤压,能够改善表面光洁度,但对水分、流量和背压较敏感;多道碾白则通过少量多次的负荷分配降低局部应力,适合实现DOM渐进控制^[17,19]。加湿/调质技术可改变糠层和胚乳界面的力学差异,使皮层更易剥离并降低粉尘和温升,但需防止过湿导致黏附、结块或储藏风险^[33,34]。低温升碾米、合理通风和料流均衡有助于减少热积累和淀粉热损伤^[35]。由此可见,适度碾磨并不是单一设备替代,而是由分段去皮、分级循环、低温控制和在线反馈共同构成的系统性技术组合。

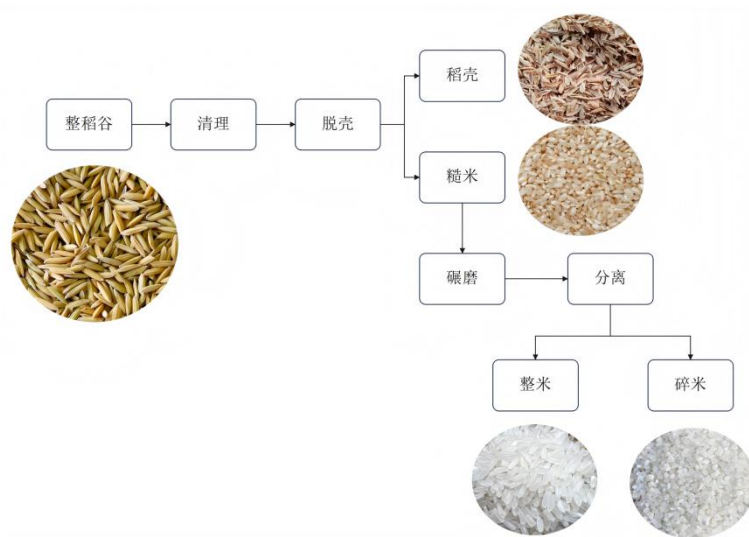


图1 整粒稻谷碾磨示意图

Fig.1 Schematic diagram of whole grain rice milling

1.2 糠层剥离与碎米形成机制

近年来,随着传感技术、自动控制技术及数据分析能力的发展与提升,稻米碾磨技术正由传统的串联系统逐步迈向具有实时反馈能力的闭环控制系统。在线白度检测、碎米率监测、温升监测及含水率监测等技术,已逐渐成为高端碾米生产线的重要组成部分。研究视角也随之发生变化:过去被视为经验性问题的碾磨不均匀现象,正在逐步转化为可计算、可表征、可调控的科学问题。通过将米粒在碾磨腔体内的运动行为、受力分布和表面去糠过程纳入分析框架,学界开始从结构设计、过程参数匹配和物料流动调控等层面解释加工差异形成的原因,这为进一步降低碎米率、提高加工均匀性及实现适度碾磨提供了重要理论基础。

稻米碾磨的物理本质,是在复杂接触环境中实现皮层/糠层剥离和籽粒表面整形。糙米由外向内依次包含果皮、种皮、糊粉层、胚和胚乳等结构(图2),糠层富含脂质、蛋白质、矿物质和多酚,胚乳主要由淀粉和蛋白质基质构成。碾磨时,米粒与磨辊、筛筒、凸肋之间发生摩擦、挤压、剪切和冲击,米粒之间也发生高频碰撞。有效去皮需要足够的表面剪切和磨削作用,但胚乳具有脆性,且籽粒内部常存在腹白、胚部弱区、干燥裂纹和加工前微裂纹。当局部应力超过胚乳材料承载阈值时,微裂纹会沿弱界面扩展,形成碎米^[20-22]。

碎米形成是原粮特性、含水率、温升、设备结构和工艺参数共同作用的结果。粒型细长、腹白高、玻璃质程

度低或微裂纹多的稻米更易在碾磨中破碎；含水率过低会增加脆性，过高则可能导致去皮效率下降和黏附；温升会改变表层力学性质并诱发局部应力不均。工艺层面，过高背压、过长停留时间、进料不稳定、通风不足和筛筒/辊型不匹配均会加重碎米风险。因此，适度碾磨的关键不是单纯降低压力，而是在作用强度、作用时间、颗粒流动、温湿状态之间建立协同窗口。

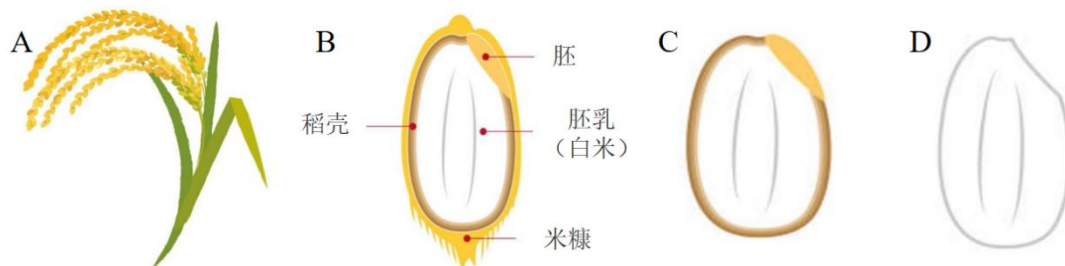


图2 稻米在不同加工阶段的形态与结构特征

Fig.2 Morphological and structural characteristics of rice at different processing stages

注：(A) 水稻、(B) 稻谷结构、(C) 保留米糠层和胚的糙米、(D) 精加工稻米。

1.3 非均匀碾磨与颗粒动力学研究进展

非均匀碾磨是适碾工艺难以稳定复制的重要原因。以离散元法 (DEM) 为代表的颗粒动力学模拟，为揭示磨室内米粒运动轨迹、停留时间、接触力链和局部受力分布提供了新手段。研究表明，筛筒棱边数、凸肋构型、辊筒转速、磨室几何和物料充满度会显著影响米粒取向与流动状态，导致部分区域去皮过度而另一些区域形成碾磨盲区^[23,26,36]。在摩擦碾白条件下，米粒可能出现优先取向和局部聚集，使糠层去除具有空间选择性。这解释了为什么提高碾磨压力或延长时间虽然能提高平均白度，却常伴随局部胚乳损伤和碎米率升高。目前机理研究仍存在从实验室到工业场景迁移不足的问题。小试碾磨得到的受力-破碎关系，难以直接覆盖工业高通量、多颗粒和高粉尘环境；DOM、表层组分空间分布、食味品质和淀粉消化特性之间的耦合模型尚不完善。未来应将 DEM 模拟、力学试验、显微结构表征和在线检测数据联合起来，建立可用于工艺窗口设定的机制指标，如单位去皮量能耗、局部温升、颗粒接触力分布、留皮均匀性和碎米生成概率等。

2 研磨加工精度对品质、营养安全与储藏稳定性的影响

2.1 对食味品质与消费接受度的影响

随着 DOM 提高，糠层和胚的去除更加充分，成品米白度、表面平整度和外观均匀性通常提高；同时，表层脂质、纤维和蛋白质基质的变化会影响吸水特性、淀粉糊化行为、黏弹性及米饭质构^[12,29,42,43]。多数研究表明，在一定 DOM 范围内，适度碾磨可改善蒸煮外观、降低糙米粗糙感，并保持较高出米率；但 DOM 过高时，产品虽具有更高白度，却可能造成风味物质和营养组分损失，降低米饭风味层次，并增加碎米产生^[8,13,16,30-32,44]。因此，食味品质并非随碾磨程度增加而持续提升，而是在外观品质、口感特性和营养保留之间存在最佳平衡。对于丝苗米、粳米和籼米等不同品种，由于粒型、糠层厚度、胚部结构和淀粉性质存在差异，其最优 DOM 并不一致，需要结合品种特性和目标消费需求进行调控^[44,45]。食味品质评价仍是适碾研究的薄弱环节，现有研究多采用白度、硬度、黏性、味值仪评分或小规模感官评价，而对消费者长期接受行为关注不足。由于传统消费习惯中白度和透明度常被视为大米品质的重要表征，部分消费者对留皮程度较高、颜色略深的适碾米仍存在认知障碍。同时，随着健康消费理念的发展，部分消费者更加关注营养保留、膳食纤维和功能健康价值。因此，适碾米推广需兼顾不同消费群体需求，建立结合感官品质、营养价值和消费偏好的综合评价体系，并针对普通主食、健康型产品及团餐等不同应用场景进行产品定位。

2.2 对营养与健康价值的影响

糠层和胚是稻米中 B 族维生素、矿物质、膳食纤维、多酚、谷维素和植物甾醇等营养及活性成分的主要富集部位，因此其含量通常随 DOM 提高而降低^[9-11,38,39,46]。碾磨不仅影响营养组分总量，还可能改变其存在形式、释

放特性和生物利用效率。例如，维生素 B1 的含量及化学形态会受到皮层去除程度影响，矿物质分布和氨基酸组成也会因胚和糠层损失而发生变化^[11,39]。不同 DOM 水平下稻米主要营养组分变化及潜在健康作用见表 2。从营养评价角度看，适碾米的价值不仅取决于单一营养素含量，还应综合考虑加工损失、烹调过程变化、消化释放特性及实际膳食摄入水平^[47]。已有流行病学研究表明，全谷物摄入与多种慢性疾病风险降低存在一定关联^[40]。适碾米虽然不等同于严格意义上的全谷物，但其保留部分皮层和胚，可提高膳食纤维及微量营养素密度，与健康主食发展方向具有一定一致性^[13]。需要指出的是，目前关于适碾米健康价值的研究仍主要基于营养成分分析、体外消化实验和短期品质评价，针对长期摄入效果及真实消费场景的干预研究仍较有限^[32,37]。因此，适度碾磨更适合作为提高稻米营养保留水平和优化膳食结构的技术路径，而不应直接外推为具有确定健康效应的单一加工措施。

表 2 不同 DOM 水平对稻米主要营养与活性成分的影响

Table 2 Effects of different DOM levels on major nutrients and active components in rice

营养/活性成分	主要分布部位	随 DOM 增加的变化趋势	潜在营养价值
膳食纤维	果皮、种皮、糊粉层	显著降低	增加饱腹感，促进肠道健康，调节膳食结构
维生素 B 族（B1、B2、B6 等）	糠层、胚	明显降低	参与能量代谢和神经功能维持
矿物质（Mg、Fe、Zn 等）	糊粉层、胚	随皮层去除而减少	参与机体矿物质平衡及生理代谢
γ-氨基丁酸（GABA）	胚及糠层	降低	具有神经调节等潜在生理作用
多酚类物质	种皮、糠层	降低	具有抗氧化活性

2.3 米糠保留的食品安全风险与控制

米糠层虽然富集膳食纤维、维生素、矿物质和多种活性成分，但同时也是部分污染物积累的重要区域。由于稻米对环境中的砷、镉等元素具有一定吸收能力，且这些元素可在糠层和胚部位富集，因此适度保留皮层在提高营养密度的同时，也可能增加部分风险因子的暴露概率^[41]。已有研究表明，相较于精白米，糙米和保留较多皮层的稻米通常具有更高的无机砷含量，主要原因在于砷易与米糠层中的矿物质和有机组分结合。同时，不同产地、水稻品种及土壤环境会导致稻米中镉、铅等重金属含量存在明显差异。此外，农药残留也可能因其在谷粒表层的吸附特性而在糠层中相对富集，部分研究发现稻米样品中可检出多种农药残留，但其风险水平与残留种类、浓度及膳食暴露量密切相关。因此，适碾米不能简单以留皮越多越好为加工目标，而应在营养保留和食品安全之间建立动态平衡。首先，应加强原粮安全控制，优先选择产地环境稳定、重金属和农药残留风险较低的稻谷用于适碾加工。其次，在加工前强化清理、去石、磁选、色选及霉变粒剔除等措施，降低外源污染风险。同时，应将砷、镉、铅等重金属以及农药残留、真菌毒素纳入适碾米原粮验收和产品质量评价体系。对于米糠副产物，则需通过灭酶稳定化、低温储藏或热处理等方式抑制脂质氧化和微生物繁殖，提高其利用安全性^[48]。

2.4 对储藏品质的影响

加工精度与储藏稳定性之间存在典型的权衡关系。糠层和胚中富集了较多脂质、酶类及其他活性成分，这些组分在储藏过程中更易发生氧化和水解反应，引起哈败味形成、色泽劣变及风味品质下降^[13,38,48,49]。因此，相较于糙米和适碾米，精白米通常具有更好的储藏稳定性和更长的货架期。相反，适碾米和糙米虽然在营养组成上更具优势，但由于保留了更多脂质和活性酶系，在储藏过程中更容易发生脂质氧化与品质劣变，从而对温湿度控制、包装阻隔性能及供应链管理提出更高要求。

基于上述机制，目前行业中针对适碾米、适碾米及糙米储藏稳定性不足的问题，采用低温储藏、惰性气体保护、高阻隔包装以及糙米或米糠稳定化处理等技术路径，以减缓氧化劣变并延长货架期。然而，从现有研究来看，储藏品质评价体系尚缺乏统一标准。不同研究可能采用过氧化值、酸价、挥发性醛类含量或感官评分等不同终点指标，且储藏环境条件、包装材料及观察周期设置差异较大，这导致不同研究结果之间难以直接比较，使得适碾产品能否实现规模化推广在证据层面仍存在一定不确定性。适度加工的推广不应仅关注加工阶段本身，还必须与储藏技术、包装方式及流通供应链条件协同优化，否则其营养优势可能被更快的品质劣变所抵消^[13,38,48,49]。

3 智能检测与过程控制技术

3.1 在线检测指标与关键装备

适度碾磨由实验研究向工业化应用转变的关键,在于建立以 DOM、留皮度、白度、整精米率、碎米率、温升、含水率和能耗等指标为核心的在线检测与过程调控体系。传统碾米生产主要依靠操作经验设定加工参数,并通过人工抽检评价加工效果,难以及时响应原粮品质波动和设备状态变化,容易造成批次间加工精度不稳定。近年来,随着机器视觉、近红外光谱和过程传感技术的发展,稻米加工品质的快速、无损检测逐渐成为研究热点。

在碾磨程度检测方面,机器视觉技术可通过米粒颜色、表面纹理和形态特征变化,实现加工精度和留皮程度的快速评价。已有研究利用图像分析方法建立了稻米碾磨程度评价模型,通过提取米粒表面颜色参数和纹理信息,实现了不同碾磨水平的自动识别^[50,51]。此外,图像分析技术也被用于整精米率和碎米率评价,可减少传统人工检测的主观误差,提高加工过程质量监测效率^[52]。在营养和品质指标检测方面,近红外光谱(NIR)因具有快速、无损和适用于在线分析等特点,被广泛应用于稻米加工品质评价。例如,Chen 等^[52]利用傅里叶变换近红外光谱技术预测精米等级和表面脂质含量,证明了 NIR 技术在碾磨品质快速评价中的应用潜力^[53]。在线检测的价值不仅在于提高检测频率,更重要的是为工艺动态调控提供反馈依据^[54]。适度碾磨过程实际上是多个目标变量之间的协同优化过程,需要在白度提升、营养保留、碎米控制和能耗降低之间实现平衡。当检测系统发现白度不足但碎米率和温升处于较低水平时,可适当提高碾磨强度;而当温升升高或碎米率快速增加时,则需要及时调整进料量、碾白压力和设备运行参数。近年来,人工智能和机器学习方法逐渐用于稻米品质预测与加工过程优化,通过融合图像、光谱和工艺参数,实现加工状态识别和品质预测,为智能碾米提供了新的技术路径^[25,27,28,55]。

然而,目前多数在线检测技术仍主要集中于单一品质指标评价,检测结果与实际工艺控制之间尚未形成高度集成的闭环系统。未来应进一步加强 DOM 实时表征、过程参数调节和品质反馈之间的关联建模,实现由检测加工结果向预测并控制加工过程的转变,从而提高适度碾磨技术的稳定性和工业适用性。

3.2 机器视觉、近红外与高光谱应用

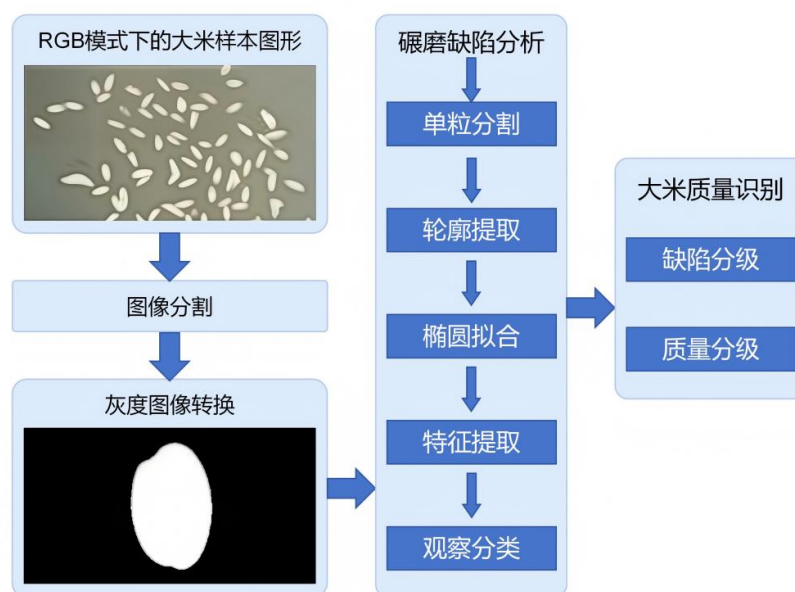


图3 大米质量评估的计算机视觉工作流程图

Fig.3 Computer Vision Workflow Diagram for Rice Quality Assessment

近年来,机器视觉、近红外光谱和高光谱成像等技术在稻米品质评价中的应用日益广泛(图3)。机器视觉可用于外观品质分析、粒型识别、碎米检测、缺陷粒筛查和分级评价;近红外和高光谱技术能够提供更丰富的化学与结构信息,为水分、蛋白质、脂质、表层残留糠层以及局部品质差异的快速识别提供可能^[18,24,27,28]。相较于传统离线检测方法,这些技术具有非破坏性、高通量和适于在线部署等优势。

对于适度加工而言,这类技术的价值在于能够将“加工精度”从单一结果变量扩展为一组可被实时观测和联合表征的过程信号。例如,综合色泽、表层反射光谱、粒面纹理和形态参数等信息,均可在一定程度上反映糠层去

除程度和碾磨均匀性,从而为 DOM 的实时估计提供支撑^[18,50,56]。未来,随着多源数据融合方法的发展,单一传感器难以覆盖的品质维度有望通过复合感知系统得到更准确描述。

3.3 人工智能驱动的品质评价与过程优化

人工智能技术正在推动稻米加工由经验驱动向数据驱动和模型驱动转型^[25]。机器学习和深度学习方法能够从图像、光谱及过程传感数据中提取高维特征,建立原粮属性、加工参数与成品品质之间的非线性映射关系,从而实现稻米品种识别、外观品质评价、缺陷检测和加工品质预测^[28,55,56]。近年来,基于机器视觉和深度学习的稻米品质评价方法快速发展,通过卷积神经网络(CNN)等模型自动提取米粒颜色、形态、纹理和缺陷特征,提高了传统人工评价的效率和一致性^[27,55]。针对适度碾磨过程中的 DOM 评价,人工智能方法为加工精度的快速预测提供了新的技术途径。已有研究基于米粒图像采集平台,提取米粒颜色、纹理和形态特征,结合机器学习模型建立糠层残留程度与 DOM 之间的预测关系,实现了不同碾磨程度的自动识别与预测^[56]。此外,近红外光谱结合机器学习算法也被用于预测精米表面脂质含量和颜色参数,为 DOM 快速评价和在线检测提供了理论基础^[18]。AI 在适碾加工中的作用应由质量检测扩展至过程预测与智能调控。通过构建包含品种特性、原粮状态、设备参数和品质指标的数据库,机器学习模型可用于预测加工结果,并辅助优化碾磨压力、流量、转速及目标 DOM 等关键参数。已有研究表明,人工神经网络等模型能够有效预测稻米蒸煮食味品质,其预测性能优于传统统计方法,说明 AI 在复杂品质形成机制解析和加工参数优化方面具有应用潜力^[57]。未来,适碾加工的智能化发展方向并非针对所有原粮设定统一 DOM,而是在标准约束基础上,根据品种特性、产品定位和消费需求实现差异化加工方案。通过融合机器视觉、光谱检测、过程传感和智能算法,有望建立检测-预测-调控的闭环加工体系,提高稻米加工过程稳定性和资源利用效率。

3.4 应用瓶颈与发展趋势

尽管智能检测与过程控制技术发展迅速,但其在稻米适度加工中的大规模应用仍面临若干挑战。不同研究和不同装备平台之间的数据标准、采样条件和标注体系尚不统一,导致模型泛化能力有限。实验室环境下建立的识别模型和预测模型,在工业高粉尘、高振动和高通量场景中的稳定性仍需验证。现有研究更多聚焦外观质量和分类识别,而对营养保留、储藏稳定性及消费接受度等终点变量的在线预测仍较薄弱。

因此,未来的发展重点不应仅限于提升单项识别精度,而应着眼于构建“感知-分析-决策-反馈”一体化的智能碾米系统。只有在设备结构、在线检测、过程建模和目标优化之间实现协同,适度加工才能真正从实验研究走向工业实践。

4 标准完善、产品开发与未来研究方向

4.1 标准与评价体系完善

标准与评价体系是适碾技术产业化的基础。现有标准已提供加工精度和产品等级的基本框架,但还难以充分解释适碾米的营养、食味和减损价值。建议在现行标准基础上逐步完善以下内容:一是建立适碾产品的多指标评价体系,在加工精度之外增加留皮均匀性、胚残留率、关键营养保留率、碎米率、温升和能耗等指标;二是建立分类型标准或推荐性技术规范,区分普通商品米、营养型适碾米、团餐用米和功能主食原料;三是完善标签标识,将适碾米的 DOM、留皮度、营养特征和推荐储藏条件向消费者透明呈现;四是建立适碾米货架期和安全风险控制要求,避免因皮层保留导致储藏和安全隐患。

4.2 产品开发与消费转化

在产品开发方面,适碾米不宜只作为低白度米或粗加工米推广,而应以营养密度、适口性、可持续加工和节粮降耗为价值核心。企业可围绕儿童与老年营养主食、低 GI/高膳食纤维主食、团餐健康米饭、地方优质品种适碾产品等方向开展差异化开发。同时,应通过烹调方法优化改善适碾米口感,如浸泡、压力烹饪、预糊化处理或与精白米复配等方式,提高消费者接受度。面向市场转化,还应开展真实消费场景下的感官测试和复购意愿评价,避免仅凭实验室理化指标判断产品前景。

4.3 未来研究方向

未来稻米适度碾磨技术的发展,需要从单一工艺参数优化向多因素协同调控和精准加工方向推进,重点解决以下几个方面的问题:应加强 DOM 与稻米品质形成机制之间的定量关系研究。目前,不同品种、原粮状态和加工装备条件下适宜 DOM 仍缺乏统一评价标准,导致不同研究结果之间可比性不足。未来需要结合稻米组织结构、糠层剥离行为、淀粉性质、营养组分迁移以及加工损伤特征,建立跨品种、跨设备和跨尺度的 DOM-结构变化-品质响应-营养保留模型,明确不同目标产品对应的合理碾磨区间,实现由经验调节向理论指导转变;应深入解析碾磨过程中的动态损伤机制。当前对碎米形成的研究多集中于结果评价,而对碾白过程中局部应力分布、微裂纹萌生扩展、温升积累以及非均匀碾磨行为的定量描述仍不足。未来可结合离散元模拟、有限元分析、高速成像和多场耦合分析等技术,揭示机械作用与米粒损伤之间的内在关系,为降低碎米率、提高整精米率和优化设备结构提供理论依据;应完善适碾米综合品质评价体系。现有评价指标主要关注白度、加工精度、整精米率和食味品质,而对营养保留、食品安全、储藏稳定性以及消费者接受度的综合评价仍不充分。未来应建立融合理化指标、感官评价、营养功能评价和消费行为分析的多维评价体系,并开展真实消费场景下的长期跟踪研究,明确适碾米在不同人群和不同应用场景中的价值定位;应推动智能化加工装备与闭环控制技术的发展。虽然机器视觉、光谱检测、人工智能和数字化建模技术已为适碾加工提供了技术基础,但目前在线检测与工艺调节之间仍存在一定脱节。未来应构建融合原粮信息、设备状态、在线检测数据和品质预测模型的智能控制系统,实现对辊速、压力、流量、循环比例及目标 DOM 的动态调整,使适碾加工由检测结果评价向过程预测与主动控制转变。

适碾技术的产业化推广还需要加强标准体系建设和产品应用研究。应进一步明确适碾米的产品定义、加工精度评价方法和质量分级标准,推动适碾米与健康主食、营养强化食品及多元化消费需求相结合。通过基础理论突破、智能装备升级和产业标准完善,最终实现稻米加工由传统经验型生产向数据支撑的精准加工模式转变。

5 结论

稻米适度碾磨是稻米加工减损增效和健康化发展的重要技术路径。现有研究表明,提高 DOM 通常能够改善外观白度和一定范围内的食味表现,但会带来营养密度下降、碎米率增加、能耗上升和副产物增多等代价;适碾米通过保留部分皮层和胚,可提高膳食纤维、B 族维生素、矿物质和生物活性成分的保留水平,但也对食品安全、储藏稳定性和消费者接受度提出更高要求。从技术角度看,适碾不是简单轻碾,而是以国家标准为底线,以品种适宜性和消费需求为导向,以多道碾白、分级循环、调质加湿、低温升控制、在线检测和智能反馈为支撑的多目标优化过程。未来应将加工精度从单一外观指标拓展为包含 DOM、留皮均匀性、碎米率、能耗、温升、营养保留、安全风险、储藏稳定性和食味接受度的综合指标体系。只有在标准-装备-机理-品质-营养-消费之间实现数据贯通和协同优化,稻米适度碾磨才能真正从理念和试验研究走向可复制、可推广的产业实践。

参考文献

- [1] 国家统计局. 国家统计局关于 2025 年粮食产量数据的公告 [EB/OL].(2025-12-12)[2026-05-21]. https://www.gov.cn/lianbo/bumen/202512/content_7051020.htm.
- [2] 国家统计局农村司. 国家统计局农村司司长魏锋华解读粮食生产情况 [EB/OL].(2025-12-12)[2026-05-21]. https://www.gov.cn/lianbo/bumen/202512/content_7051020.htm.
- [3] GB/T 1354-2018 大米[S].
- [4] GB/T 5502-2018 粮油检验 大米加工精度检验[S].
- [5] JIA L, ZHANG J, QIAO G H. Scale and environmental impacts of food loss and waste in China: a material flow analysis [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2023, 20(1): 460.
- [6] REID J D, SIEBENMORGEN T J, MAUROMOUSTAKOS A. Factors affecting the slope of head rice yield versus degree of milling [J]. Cereal Chemistry, 1998, 75(5): 738-741.
- [7] SIEBENMORGEN T J, BAUTISTA R C, COUNCE P A. Relationship between rice sample milling conditions and milling quality [J]. Transactions of the ASAE, 2006, 49(6): 1869-1877.
- [8] CHAMPAGNE E T. Rice: Chemistry and Technology [M]. 3rd ed. St. Paul: AACC International, 2004.

- [9] INTERNATIONAL RICE RESEARCH INSTITUTE. Milling and processing: milling yields [EB/OL]. (2024). <https://www.knowledgebank.irri.org/step-by-step-production/postharvest/milling/producing-good-quality-milled-rice/milling-yields>.
- [10] LIU Y, ZHENG X, CHEN X, et al. Effects of degree of milling on bran layer structure, physicochemical properties and cooking quality of brown rice [J]. Food Chemistry, 2024, 430: 137116.
- [11] QI W, XIE Y, ZHAO H, et al. The impact of milling degrees on rice quality using simultaneous rheology and FTIR techniques [J]. Food Chemistry, 2025: 145772.
- [12] ZHANG Y, LI F, PAN S, et al. Milling degree affects the fermentation properties of rice and gut microbiota [J]. Food Science and Human Wellness, 2024, 13(3): 1578-1588.
- [13] 史莉君,刘洁,黄清,等.适碾精度下丝苗米加工品质的研究[J].河南工业大学学报(自然科学版),2023,44(6):59-66.
- [14] 张洁,夏龙照,刘洁,等.圆粒晚粳稻的适度碾米工艺节粮降耗分析[J].河南工业大学学报(自然科学版),2024,45(5):9-16.
- [15] KABIR M H, ISLAM M N, WAZED M A, et al. Optimization of milling degree for maximizing nutrient retention and yield in milled rice: a study on six common Bangladeshi rice cultivars [J]. Applied Food Research, 2024, 4: 100587.
- [16] ZHAO S S, SHI J B, CAI S, et al. Effects of milling degree on nutritional, sensory, gelatinization and taste quality of different rice varieties [J]. LWT, 2024, 186: 115244.
- [17] TUNCEL N Y, ANDAC A E, KAYA H P, et al. The impact of milling degree on physicochemical, nutritional, rheological, textural properties, and in vitro digestibility of rice: from brown rice to white rice [J]. Food Chemistry, 2025, 464(Pt 2): 141795.
- [18] MANZOOR A, PANDEY V K, DAR A H, et al. Rice bran: nutritional, phytochemical, and pharmacological profile and its contribution to human health promotion [J]. Food Chemistry Advances, 2023, 2: 100296.
- [19] DAS P P, GUL M Z, WEBER A M, et al. Rice bran extraction and stabilization methods for nutrient and phytochemical biofortification, nutraceutical development, and dietary supplementation [J]. Nutrition Reviews, 2025, 83(4): 692-712.
- [20] AZNAN A, GONZALEZ VIEJO C, PANG A, et al. Review of technology advances to assess rice quality traits and consumer perception [J]. Food Research International, 2023, 172: 113105.
- [21] ILO B, BADJONA A, SINGH Y, et al. Artificial intelligence in rice quality and milling: technologies, applications, and future prospects [J]. Processes, 2025, 13(11): 3731.
- [22] SIEBENMORGEN T J, GRIGG B C, LANNING S B. Milled rice quality assessment [J]. Cereal Chemistry, 2013, 90(2): 123-132.
- [23] HE X, SIEBENMORGEN T J, MEULLENET J F. Impact of physicochemical properties on duration and head rice yield during abrasive and friction milling of rice [J]. Transactions of the ASABE, 2015, 58(4): 1027-1035.
- [24] 金增辉.“加湿碾米”在国产装备中生产应用实践[J].粮食加工,2023,48(6):27-32.
- [25] ZHANG Y, CHEN X, LI Y, et al. Effects of humidification on bran layer mechanics and microstructure of brown rice: mechanism and optimization [J]. Food Chemistry, 2023, 405: 134812.
- [26] 周显青,张玉荣,褚洪强,等.糙米机械破碎力学特性试验与分析[J].农业工程学报,2012,28(18):255-262.
- [27] BAUTISTA R C, SIEBENMORGEN T J. Understanding pre- and post-milling crack formation in rice grain [J]. Transactions of the ASABE, 2004, 47(2): 521-528.
- [28] LIU J, WU Y, CHEN H, et al. Effect of the degree of milling on the microstructure and composition of japonica rice [J]. Grain & Oil Science and Technology, 2022, 5(4): 194-203.
- [29] ZHANG Y, HAN Q, XUN C, et al. Discrete element method investigation of the milling characteristic in a rice mill [J]. Mechanical Sciences, 2022, 13: 15-22.
- [30] ZENG Y, JIA F G, XIAO Y, et al. Modelling of grain breakage in a vertical rice mill based on DEM simulation combining particle replacement model [J]. Biosystems Engineering, 2022, 215: 32-48.
- [31] FEI J M, FENG W Y, SHEN S H, et al. Non-uniform milling caused by preferential orientation of rice grains in friction rice mills [J]. Biosystems Engineering, 2023, 235: 15-30.
- [32] ZHAO S, SHI J, CAI S, et al. Impact of rice variety, cooking equipment and pretreatment method on the quality of lightly milled rice [J]. Food Chemistry, 2024, 451: 139271.
- [33] WANG Z, ZHANG M, LIU G, et al. Effect of the degree of milling on the physicochemical properties, pasting properties and in vitro digestibility of Simiao rice [J]. Grain & Oil Science and Technology, 2021, 4(2): 45-53.

- [34] 刘洁,夏龙照,黄清,等.适度加工的丝苗米食用品质分析与评价[J].河南工业大学学报(自然科学版),2023,44(5):33-40.
- [35] FU T T, ZHANG Y, CAO H W, et al. The effects of milling on the chemical forms, bioavailability, and in vivo distribution of vitamin B1 in rice [J]. Food Bioscience, 2024, 62: 105376.
- [36] LAMBERTS L, DE BIE E, VANDEPUTTE G E, et al. Effect of milling on colour and nutritional properties of rice [J]. Food Chemistry, 2007, 100(4): 1496-1503.
- [37] LIU K L, ZHENG J B, CHEN F S. Relationships between degree of milling and loss of vitamin B, minerals, and change in amino acid composition of brown rice [J]. LWT-Food Science and Technology, 2017, 82: 429-436.
- [38] AUNE D, KEUM N, GIOVANNUCCI E, et al. Whole grain consumption and risk of cardiovascular disease, cancer, and all-cause and cause-specific mortality: systematic review and dose-response meta-analysis of prospective studies [J]. BMJ, 2016, 353: i2716.
- [39] NUNTA R, KHEMACHEEWAKUL J, TECHAPUN C, et al. Kinetics of phosphate ions and phytase activity production for lactic acid-producing bacteria utilizing milling and whitening stages rice bran as biopolymer substrates [J]. Biomolecules, 2023, 13(12): 1898.
- [40] 张尚兴,向明,谢召兰.稻米低温升加工工艺研究[J].农产品加工,2019,52(2):35-36,40.
- [41] 张津睿,翟爱华.碾米技术在大米储藏与加工中的应用研究进展[J].现代食品,2022,28(4):46-48.
- [42] HE Y F, FAN B J, SUN L, et al. Rapid appearance quality of rice based on machine vision and convolutional neural network research on automatic detection system [J]. Frontiers in Plant Science, 2023, 14: 1190591.
- [43] ZHOU Z, ROBARDS K, HELLIWELL S, et al. Composition and functional properties of rice [J]. International Journal of Food Science & Technology, 2002, 37(8): 849-868.
- [44] SALEH A S M, WANG P, WANG N, et al. Brown rice versus white rice: nutritional quality, potential health benefits, development of food products, and preservation technologies [J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2019, 18(4): 1070-1096.
- [45] MONKS J L F, VANIER N L, CASARIL J, et al. Effects of milling on proximate composition, folic acid, fatty acids and technological properties of rice [J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2013, 30(2): 73-79.
- [46] CHEN X H, CHEN F M, SUN S, et al. Effect of polishing on lead and cadmium bioavailability in rice and its health implications [J]. Foods, 2022, 11(17): 2718.
- [47] YILMAZ TUNCEL N. Stabilization of rice bran: a review [J]. Foods, 2023, 12(9): 1924.
- [48] SALEH M I, MEULLENET J F, SIEBENMORGEN T J. Development and validation of prediction models for rice surface lipid content and color parameters using near-infrared spectroscopy: a basis for predicting rice degree of milling [J]. Cereal Chemistry, 2008, 85(6): 787-791.
- [49] YADAV B K, JINDAL V K. Monitoring milling quality of rice by image analysis [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2001, 33(1): 19-33.
- [50] GUPTA A, ARORA G, SIDHU J S. Development of image analysis system for quality evaluation of rice grains [J]. Journal of Food Engineering, 2011, 104(3): 356-362.
- [51] VITHU P, MOSES J A. Machine vision system for food grain quality evaluation: A review [J]. Trends in Food Science & Technology, 2016, 56: 13-20.
- [52] CHEN K J, CHEN Y R, WANG J, et al. Prediction of milled rice grades using Fourier transform near-infrared spectroscopy [J]. Journal of Cereal Science, 2010, 52(3): 378-383.
- [53] SRIKHAM W, NOOMHORM A. Milling quality assessment of Khao Dok Mali 105 milled rice by near infrared reflectance spectroscopy technique [J]. Journal of Food Science and Technology, 2015, 52: 3500-3507.
- [54] TANG Z, LIU C, ZHANG Y, et al. Nondestructive detection of rice milling quality using hyperspectral imaging combined with machine learning and deep learning [J]. Foods, 2025, 14(10): 1706.
- [55] CARNEIRO L O, CORADI P C, RODRIGUES D M, et al. Characterizing and predicting the quality of milled rice grains using machine learning models [J]. AgriEngineering, 2023, 5(3): 1196-1215.
- [56] YANG L, XU Z L, XIAO X, et al. Predictive modeling of rice milling degree for three typical Chinese rice varieties using interpretative machine learning methods [J]. Journal of Food Science, 2024, 89(10): 6553-6574.
- [57] DENG F, LU H, YUAN Y, et al. Accurate prediction of the eating and cooking quality of rice using artificial neural networks and the texture properties of cooked rice [J]. Food Chemistry, 2023, 407: 135176.