

路 凯, 赵庆勇, 周丽慧, 等. 稻米蛋白质含量与食味品质的关系及其影响因素研究进展[J]. 江苏农业学报, 2020, 36(5): 1305-1311.
doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2020.05.030

稻米蛋白质含量与食味品质的关系及其影响因素研究进展

路 凯, 赵庆勇, 周丽慧, 赵春芳, 张亚东, 王才林

(江苏省农业科学院粮食作物研究所, 江苏 南京 210014)

摘要: 稻米蛋白质对米饭食味品质的形成具有重要作用, 而其含量受到环境和遗传因素共同调控。本文对稻米蛋白质的特点、含量、各组分与食味品质的关系和作用机理以及影响稻米蛋白质含量的遗传和环境因素等进行了总结, 以期对稻米蛋白质含量的深入研究和改良稻米食味品质提供参考。

关键词: 食味品质; 蛋白质; 稻米

中图分类号: S511.2⁺2

文献标识码: A

文章编号: 1000-4440(2020)05-1305-07

Research progress on the relationship between rice protein content and eating quality and the influence factors

LU Kai, ZHAO Qing-yong, ZHOU Li-hui, ZHAO Chun-fang, ZHANG Ya-dong, WANG Cai-lin

(Institute of Food Crops, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China)

Abstract: Rice protein plays an important role in the formation of eating quality of cooked rice and its content is regulated by genetic and environmental factors. This paper summarized the characteristics of rice protein, the relationship of rice protein content and its constituents to eating quality and their mechanisms. The effects of genetic and environmental factors on rice protein content were also summarized in this paper with the aim of providing reference for further research on rice protein content and improvement of eating quality of rice.

Key words: eating quality; protein; rice

水稻是中国主要的粮食作物之一。随着中国经济的发展和农业供给侧结构性改革的不断深入, 提高稻米品质对于稳定农业供需平衡和提高农业经济效益具有重要意义。稻米品质的评价指标主要包含食味、加工、营养及外观等方面的品质, 其中, 提高食味品质是改良稻米品质的最重要目标之一^[1]。稻米的

食味品质是指对米饭的硬度、黏度、适口性、外观、气味等的综合感官评价, 由于感官评价的主观性强且操作繁琐, 稻米的食味品质还可以通过测试直链淀粉含量、胶稠度、糊化温度等理化指标和 RVA 谱特征值等进行定量分析^[2]。稻米中可食用的部分为胚乳, 胚乳的主要成分有淀粉、蛋白质、脂类、氨基酸及其他无机物, 精米中蛋白质含量变异范围为 4.5%~14.3%^[3]。稻米淀粉包括直链淀粉和支链淀粉, 较多的研究者认为直链淀粉含量对淀粉的理化特性和米饭的食味品质起重要作用, 最近有研究者认为影响米饭质地和食味品质的是支链淀粉分支度^[4]。

稻米蛋白质是人类蛋白质的重要来源之一, 容易被消化吸收且氨基酸组成比较均衡, 其含量和组

收稿日期: 2020-03-10

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(31700229); 江苏省自然科学基金青年基金项目(BK20170594)

作者简介: 路 凯(1988-), 男, 山东济宁人, 博士, 副研究员, 主要从事稻米品质改良和水稻遗传育种。(Tel) 025-84390451; (E-mail) lukai@jaas.ac.cn

通讯作者: 王才林, (Tel) 025-84390317; (E-mail) clwang@jaas.ac.cn

成是衡量稻米营养品质的主要指标^[5]。已有研究表明,稻米蛋白质含量与米饭食味品质之间存在显著相关性^[6-7]。本文综述稻米蛋白质对食味品质的影响,同时对影响稻米蛋白质含量的遗传和环境因素进行总结,以期为稻米蛋白质含量的深入研究和改良稻米食味品质提供借鉴。

1 稻米蛋白质的分类、组成与分布

1.1 稻米蛋白质的分类

蛋白质是水稻种子的的重要组成部分,一般占糙米干质量的8%~11%^[8]。根据功能不同可将其分为储藏蛋白、结构蛋白及保护蛋白3大类。结构蛋白种类繁多但含量很少,维持种子中细胞的正常代谢;储藏蛋白含量约占总蛋白含量的一半左右,依据溶解性的不同又可以分为4类:谷蛋白、醇溶蛋白、白蛋白(也叫做清蛋白)和球蛋白^[9-10]。白蛋白为水溶性蛋白,占储藏蛋白的2%~5%;醇溶蛋白溶于70%~80%乙醇,占储藏蛋白的1%~5%;球蛋白为盐溶性蛋白,分子量较小,占储藏蛋白的2%~10%;谷蛋白为碱溶性或酸溶性蛋白,占储藏蛋白的75%~90%^[10]。谷蛋白在种子发育后期合成并大量积累,水稻中存在3种不同相对分子质量的谷蛋白, 5.7×10^4 的前体谷蛋白, $3.7\times 10^4\sim 3.9\times 10^4$ 的酸性亚基和 $2.0\times 10^4\sim 2.2\times 10^4$ 的碱性亚基,不同亚基通过二硫键相连^[11]。

1.2 稻米蛋白质的氨基酸组成

稻米营养品质是由蛋白质含量和蛋白质质量共同决定的,而蛋白质质量则由稻米中必需氨基酸含量决定,通常以赖氨酸含量来衡量^[12]。中国稻米赖氨酸含量一般介于0.11%和0.61%之间,且品种间差异较大^[13]。4种储藏蛋白中必需氨基酸含量各不相同。白蛋白中赖氨酸和苏氨酸含量最高,亮氨酸含量最低;谷蛋白富含赖氨酸、苏氨酸、异亮氨酸、亮氨酸;醇溶蛋白中赖氨酸、苏氨酸、甲硫氨酸等氨基酸含量较低;球蛋白富含精氨酸、赖氨酸和亮氨酸含量也较高^[14]。

1.3 稻米蛋白质的分布

蛋白质在种子各组织中的分布不同,其中种皮的蛋白含量较高,愈向胚乳深层蛋白质含量愈低^[15]。清蛋白和球蛋白储藏在稻米籽粒的果皮、糊粉层、胚等组织中,在出糙和碾精米时种皮、大部分糊粉层、部分胚、少量胚乳被去除,储藏其中的球蛋白和清蛋白也被去除^[15]。因此,精米中含有的储藏

蛋白多数是醇溶蛋白和谷蛋白,沉积在蛋白体(Protein body, PB)的特定细胞器中^[15]。蛋白体在胚乳细胞中以PB-I和PB-II 2种形式存在。蛋白体PB-I呈球形,结构稳定,直径0.5~2.0 μm ,其蛋白质含量占稻米蛋白质总量的20%~30%,由于其积累的醇溶蛋白不易被人体蛋白酶分解,难以消化;蛋白体PB-II结构不规则,直径约4.0 μm ,其蛋白质含量占稻米蛋白质总量的65%左右,主要积累谷蛋白和少量球蛋白,容易被消化吸收^[16]。蒋冬花等检测了300个世界各地不同的水稻品种,大部分醇溶蛋白含量介于0.2%至1.6%之间,表明不同品种中醇溶蛋白含量变异非常丰富,这也为改良稻米营养品质提供了极为丰富的资源^[17]。

2 稻米蛋白质对食味品质的影响

2.1 稻米蛋白质对淀粉理化指标的影响

对稻米食味品质进行评价的方法可以分为仪器法、理化指标法和感官法,其中直链淀粉含量、胶稠度、糊化温度等理化指标以及淀粉RVA谱特征值可以间接反映稻米的食味品质,在稻米品质评价和优质稻米育种过程中被广泛应用。

2.1.1 稻米蛋白质对直链淀粉含量的影响 直链淀粉含量是评价稻米品质的一个重要指标,被多数人认为是决定稻米食味品质的最主要因素^[2,18]。相关性分析结果表明稻米蛋白质含量与直链淀粉含量呈极显著负相关^[19]。Hori等对183份水稻种质的各项影响食味品质的指标进行测试,相关性分析结果表明稻米蛋白质含量与直链淀粉含量呈极显著负相关^[19]。钱春荣等认为蛋白质含量和直链淀粉含量间存在此消彼长的矛盾关系,蛋白质含量下降至一定程度后,直链淀粉含量升高,从而导致稻米食味品质变差^[20]。马兆惠等认为蛋白质含量与直链淀粉含量呈显著负相关,在直链淀粉总体偏低的基础上应该适当调低蛋白质含量^[21]。

2.1.2 稻米蛋白质对糊化温度的影响 糊化温度与稻米的蒸煮时间和加水量有关,对米粒的延展性、米饭外观和口感产生重要影响^[22-23]。较多的研究者认为高蛋白质含量米粒结构致密,淀粉粒之间的空隙小,影响蒸煮过程中淀粉粒的吸水及膨胀,导致糊化温度升高,米饭熟度降低^[22-24]。刘桃英等向米粉中添加不同梯度的大米蛋白质后发现米粉的润胀性和溶解性降低,糊化温度、峰值时间、回生值等增加,表明

大米蛋白质能与淀粉发生相互作用且能抑制淀粉的糊化和膨胀过程^[23]。王鹏跃等研究结果表明蛋白质总量及组分均对稻米的热力学特性产生影响,总蛋白含量越高,糊化所需热能越高,米粉越难以糊化,而其中能够较大影响到稻米自身热力学性质的是醇溶蛋白以及清蛋白^[22]。丁毅等利用扫描电镜和激光共聚焦扫描显微镜对直链淀粉(AC)含量相近而蛋白质含量不同的稻米蒸煮后进行观察,发现高蛋白质含量品种中包裹在淀粉粒周围的蛋白体多,因而推断由于蛋白质含量提高致使淀粉自身的水含量发生了降低,进而影响淀粉糊化和米饭食味^[24]。

2.1.3 稻米蛋白质对胶稠度的影响 胶稠度反映稻米蒸煮后的弹性、柔软性和冷却后米饭具备的口感,一般认为优质稻米的胶稠度值在 60 mm 至 70 mm 之间^[25]。稻米的胶稠度与其总蛋白质含量呈现极显著的负相关关系^[7,22]。Gu 等对长江流域主推品种的研究结果表明胶稠度随施氮量的增加而逐渐降低^[26]。Baxter 等发现向米粉中加入醇溶蛋白后米胶的硬度、黏度、黏胶性降低,说明醇溶蛋白影响了米粉的结构和糊化特性^[27]。陈莹莹等认为胶稠度和蛋白质含量受氮素的影响大于受品种本身的影响,而直链淀粉受氮素的影响小于受品种本身的影响,因此合理控制施肥量有助于控制胶稠度和蛋白质含量,而直链淀粉含量则主要通过选择适宜的品种来控制^[28]。

2.1.4 稻米蛋白质对 RVA 谱特征值的影响 RVA 谱通过模拟稻米的蒸煮过程反映米饭质地和口感,一般来讲优质的稻米最高黏度较高,最低黏度、最终黏度、消减值和峰值时间较低^[19,29]。研究结果表明,稻米蛋白质含量对 RVA 谱特征值产生明显影响,多数研究者认为蛋白质含量与崩解值以及峰值黏度分别呈现出明显的负相关关系,并且与消减值之间呈现出极显著的正相关关系^[7,30]。张欣等认为醇溶蛋白含量与峰值黏度和崩解值呈显著负相关关系,与消减值呈正相关关系,而消减值与谷蛋白含量之间呈负相关关系^[30]。吴洪恺等认为谷蛋白与醇溶蛋白含量比值(谷醇比)低的稻米蛋白质含量与崩解值和消减值存在负相关关系,而谷醇比高的稻米蛋白质含量与崩解值和消减值存在正相关关系^[31]。另有研究者在米粉中分别添加一定量的二硫苏糖醇(DTT)和蛋白酶,发现 RVA 的特征值下降,米饭变软变黏,推断蛋白质通过水合作用和二硫键形成的网络结构影响米饭的硬

度和黏度,Martin 等^[32]认为蛋白质水合后对米饭食味的影响发生在蒸煮前期,而谢黎虹等^[33]则认为发生在米饭蒸煮后期。

2.2 稻米蛋白质对米饭物理性质和食味值的影响

米饭的食味值是对其气味、外观、硬度、黏性、弹性等物理性质的综合感官评价,一般食味品质好的米饭外观有光泽、柔软有弹性^[22,34]。多数研究者认为米饭的食味品质与其蛋白质含量呈负相关关系,随着蛋白质含量的增加,米饭的硬度变大,黏度和弹性降低,色泽变差,食味品质变劣^[35-38]。张巧凤等利用食味仪和人工品评的方法对米饭的食味进行综合评价,相关性分析结果表明食味值与稻米蛋白质含量呈现出明显的负相关关系^[35]。Huang 等以优良食味粳稻南粳 9108 为材料测试氮肥对其食味值的影响,发现高氮处理使米饭的黏性和回生特性降低,进而降低了米饭的适口性^[36]。Saleh 等研究结果表明在米饭蒸煮过程中,蛋白质自身性质与结构发生变化是引发稻米组织发生变化的首要因素^[37]。Furukawa 等研究结果表明添加外源大米蛋白使米饭的食味品质降低,添加醇溶蛋白使米饭的硬度升高,黏性降低,添加谷蛋白使米饭的外观品质降低^[39]。石吕等^[7]研究结果表明,稻米食味值与球蛋白、谷蛋白以及醇溶蛋白含量呈现明显的负相关关系,而籼稻食味值与清蛋白含量呈极显著负相关关系,粳稻食味值与清蛋白含量的相关性不显著。张欣等则认为清蛋白含量与食味值呈显著正相关关系^[30]。王鹏跃等研究结果表明,相对于其他蛋白质而言,醇溶蛋白显著降低米饭的黏度,对食味品质产生较大负效应,并且与米饭弹性、米饭粒的完整性呈显著负相关关系^[22]。张春红等研究结果表明可溶性蛋白、清蛋白以及游离氨基酸含量都与米饭食味值呈负相关关系^[40]。张国民等认为醇溶蛋白影响稻米食味,而其他蛋白并不影响米饭的食味,游离氨基酸还能促进食味品质提升^[41]。另有研究结果表明高蛋白质含量不一定降低稻米的食味品质^[40,42-43]。向远鸿等认为不同品种中蛋白质含量与食味的关系不尽相同,优质稻米品种中蛋白质含量对食味品质具有正效应^[42]。张春红等^[40]、赵春芳等^[43]的研究结果表明半糯型优良食味稻米蛋白质含量较高,说明优质稻米中的蛋白质含量不一定低。因此,蛋白质含量及组成对米饭食味值的影响极其复杂。

3 影响稻米蛋白质含量的因素

稻米蛋白质含量是一种典型的数量性状,不同品种间蛋白质含量差异较大,具有较为丰富的遗传变异,而且容易受环境因素的影响^[44]。温度、光照、CO₂浓度等生态因子和栽培因素等环境因素均对稻米蛋白质含量产生影响。

3.1 遗传因素对稻米蛋白质含量的影响

稻米蛋白质含量是由多基因控制的数量性状,受到胚、胚乳以及母体植株基因的影响,且在遗传上存在显性效应和加性效应^[5]。显性效应即低蛋白质含量对高蛋白质含量呈部分显性,加性效应指种子以及母体的加性效应,并以母体自身的加性效应为主^[45]。目前,稻米蛋白质含量的遗传研究集中在稻米蛋白质含量的 QTL 定位、稻米蛋白质合成与转运相关基因的克隆等方面^[46-47]。

国内外研究者利用不同的遗传作图群体定位了多个调控稻米蛋白质含量的 QTL,这些 QTL 遍布于水稻的 12 条染色体^[1,48]。鉴定到的一部分 QTL 在不同研究结果中均能检测到^[49-51]。Tan 等^[50]利用重组自交系定位到 *Waxy* 基因所处区间存在调控蛋白质含量的主效基因,然而于永红等^[49]认为此区间内的主效基因并不是 *Waxy* 基因,可能是其他连锁基因,或者群体蛋白质含量的变化是由于直链淀粉含量变化引起的蛋白质相对含量的变化。*qPC-3*、*qPC-4* 以及 *qPC-10* 等也被不同的研究者定位到,其中 *qPC-3* 和 *qPC-4* 对其他性状没有不良影响,能够应用于改良稻米的营养品质^[48,51]。由于蛋白质含量的遗传比较复杂,而且众多环境因素能够对蛋白质含量产生较大影响,目前仅有 2 个调控蛋白质含量的基因被克隆,即 *OsAAP6* 和 *OsGluA2*^[47,52]。Peng 等通过珍汕 97/南洋占的 RIL 群体将一个主效 QTL (*qPC1*) 定位到 1 号染色体 6.7 kb 的区间内,发现此区间内的候选基因 *OsAAP6* 是一个氨基酸转运蛋白编码基因^[52]。*OsAAP6* 蛋白增强了一系列储藏蛋白合成基因的表达,同时促进了根部对氨基酸的转运以及吸收,最终导致蛋白体 PBs 增大及稻米蛋白质含量增加^[52]。Yang 等将梗稻 *Sasanishiki* 作为轮回亲本,以籼稻 *Habataki* 作为供体亲本,构建了相关染色体片段的置换系,定位到调控其蛋白质含量的一个 QTL (*qGPC-10*), *qGPC-10* 编码 A2 型谷蛋白前体 *OsGluA2*, *OsGluA2* 的缺失导致稻米总蛋白质及其各

组分含量均降低^[47]。

3.2 环境因素对稻米蛋白质含量的影响

3.2.1 温度 稻米蛋白质含量受灌浆期环境温度的影响。多数人认为灌浆期高温促进蛋白质含量的增加^[53]。曹云英等研究结果表明抽穗灌浆早期高温使稻米蛋白质含量增加,尤其促进难消化的醇溶蛋白含量增加^[54]。少部分研究者认为高温条件不利于蛋白质的形成^[55]。还有研究者认为不同亚种之间稻米蛋白质含量对温度的响应不同^[56-57]。孟亚利等研究结果表明籼稻和粳稻的蛋白质含量与温度呈正相关,而糯稻则呈负相关^[56]。Resurreccion 报道籼稻蛋白质含量与温度的关系呈抛物线型,而粳稻蛋白质含量与温度呈正相关^[57]。高继平等认为冠气温度差(水稻冠层温度与气温之差)影响植株的生理特性和稻米品质,与蛋白质含量呈明显的负相关关系^[58]。

3.2.2 光照 光照是影响水稻生长发育和稻米蛋白质含量的另一个重要因子。光照度对稻米蛋白质含量的影响仍然存在不同的结论。程方民等利用遮光试验证实灌浆期光照度越大,蛋白质含量越低^[59]。任万军等认为遮阴条件下植物光合作用下降,转移到籽粒中的碳水化合物减少,而转移至籽粒中的氮素增加,导致蛋白质含量增加^[60]。另外一种观点认为灌浆结实期光照度必须是适宜的,光照太强或者太弱都不利于稻米蛋白质的积累^[12,61]。Kazuo 研究结果表明灌浆后期光照度越大,稻米蛋白质含量越高,遮光降低了磷元素向籽粒的转运,从而影响了蛋白质的合成^[62]。

3.2.3 CO₂ CO₂是光合作用的反应底物,对于植物的生长发育、生长速度以及产量等起着重要作用。研究结果表明,大气中的 CO₂浓度对稻米品质也产生重要影响。景立权等通过多种模拟气候变化平台证明了高 CO₂浓度使稻米蛋白质含量下降^[63]。吴健等认为高 CO₂浓度条件下,水稻对碳素利用增多,造成了碳氮之间的平衡发生改变,作物对氮的需求增加,导致籽粒氨基酸组分和蛋白质含量降低^[64]。谢立勇等认为 CO₂浓度升高的同时会引起大气温度升高,随着 CO₂浓度升高,蛋白质含量先上升后下降,在 CO₂质量浓度为 500 mg/kg 时稻米蛋白质含量达到最大值^[65]。

3.2.4 肥料管理 稻米蛋白质含量受氮肥的影响极其显著,在一定范围内随着施氮量的增加,稻米蛋白含量逐渐升高^[66]。施用氮肥量相同条件下,施氮

后移,特别是在齐穗期或抽穗期施氮可以显著提高稻米蛋白质含量^[67-68]。施氮量的增加导致稻米蛋白质及其各组分含量升高,而蛋白质各组分所占比例变化很小^[69]。蛋白质含量对氮肥的敏感性因品种和遗传背景不同差异较大^[70]。此外,不同的氮、磷、钾肥料的比例对蛋白质含量产生明显影响,配合施用有机肥、锰肥、硅肥能提高稻米蛋白质含量^[71]。

3.2.5 栽培密度 稻米蛋白质含量与水稻移栽密度也存在一定的关系^[72]。第一种观点认为,蛋白质含量随种植密度的增大而升高^[73]。第二种观点正好与之相反,认为移栽密度增大导致植株从土壤中吸收的氮素减少,进而导致稻米碾磨品质变差,蛋白质含量降低,并且移栽密度低可使稻米全氮量增加^[74]。另有研究结果表明只有在适宜的移栽密度下才能保证营养成分的均衡吸收,保持较高的蛋白质含量^[75]。

3.2.6 水分管理 多数研究结果表明在相同施氮条件下,灌浆结实期干旱可促进稻米蛋白质含量增加^[76]。方宣钧等认为灌浆结实期湿润灌溉条件比水层处理条件下籽粒蛋白质含量高^[77]。郭晓红等认为抽穗前间歇控水处理能够提高蛋白质含量以及整精米率^[78]。王成媛等认为蜡熟期遭遇干旱导致胶稠度和蛋白质含量降低,而且影响稻米的食味品质^[79]。

4 展 望

在过去的水稻育种和栽培实践中,对稻米产量的考量相对较多,致使中国对于稻米品质的研究以及优质水稻品种的选育起步较晚。随着人民生活水平的提高及生活方式的转变,食味品质优的稻米受到消费者的青睐,优质水稻品种的培育已成为育种工作者的一个重点研究目标。大量研究结果证实米饭的食味品质受到蛋白质含量的影响,蛋白质含量过高导致米饭变硬,过低则导致营养品质变差,因此,选育蛋白质含量适中的水稻新品种对于保持米饭的营养品质和提高食味品质至关重要。

4.1 加强蛋白质含量的遗传机制研究

稻米蛋白质含量受多基因控制,遗传机理比较复杂,属于典型的数量性状。目前鉴定到上百个影响稻米籽粒蛋白质含量的 QTL,但仅有 2 个蛋白质含量调控基因被克隆到,新的调控稻米蛋白质含量的基因仍然有待进一步挖掘。此外,稻米储藏蛋白质的积累过程,包括蛋白质的合成、转运、修饰、储藏

及降解等过程中的分子机制仍需要进一步解析。随着现代分子生物学的发展,利用基因编辑大规模创制新的突变体材料成为可能,新的稻米蛋白质含量调控基因以及作用机理将得到阐释。

4.2 加强蛋白质影响食味品质的机制研究

稻米在蒸煮过程中发生一系列的物理化学变化,包括稻米颗粒吸水、淀粉糊化、胚乳细胞破碎后淀粉等浸出物溶于水、黏附层的形成等。研究结果表明蛋白质含量和组分对米饭食味品质产生重要影响,但是,是蛋白质本身对口感产生间接影响,还是在米饭蒸煮过程中通过影响米粒吸水、淀粉糊化膨胀、浸出物的种类及黏附层的厚度等产生直接影响,具体作用机制仍需要进一步探究。此外,稻米蛋白质含量及其组分与米饭气味强度和种类的关系还不清楚。总之,稻米蛋白质与食味品质关系的深入研究将为育种学家进行优良食味选择育种提供科学依据。

4.3 合理施用氮肥,培育氮高效利用品种

施用氮肥是促进水稻增产的最有力措施之一^[80-81],中国的氮肥施用量占全球的 40% 以上,但是氮肥利用率较低,大量氮肥流失造成了水体富营养化等一系列环境污染问题。稻米蛋白质含量容易受氮肥用量影响,由于氮肥施用过多,中国水稻品种的稻米蛋白质含量普遍升高,导致米饭食味品质变差。降低氮肥使用量,增施有机肥,避免蛋白质含量增高,提高米饭食味值。在育种上,培育氮高效利用品种,有利于在低氮条件下保持稻米的产量、营养品质和食味品质。同时,开展稻米籽粒蛋白质含量对氮肥不敏感的遗传材料的筛选和创制,对于中国施氮量偏高的形势下培育优良食味水稻品种具有重要意义。

参考文献:

- [1] 彭 波,孙艳芳,庞瑞华,等. 水稻种子蛋白质含量遗传研究进展[J]. 南方农业学报,2017,48(3):401-407.
- [2] 赵春芳,岳红亮,黄双杰,等. 南粳系列水稻品种的食味品质与稻米理化特性[J]. 中国农业科学,2019,52(5):909-920.
- [3] JULIAO B O. Physicochemical properties of starch and protein in relation to grain quality and nutritional value of rice[J]. T Rice Breeding,1972,5:389-405.
- [4] ZHANG C Q,CHEN S J,REN X Y,et al. Molecular structure and physicochemical properties of starches from rice with different amylose contents resulting from modification of *OsGBSSI* activity[J]. Journal of Agriculture and Food Chemistry,2017,65:2222-2232.
- [5] 田 爽,王晓萍. 水稻蛋白质的研究进展[J]. 哈尔滨师范大学自然科学学报,2014,30(5):92-95.

- [6] WAKAMATSU K, SASAKI O, UEZONO I, et al. Effect of the amount of nitrogen application on occurrence of white-back kernels during ripening of rice (*Oryza sativa*) under high-temperature conditions[J]. Japanese Journal of Crop Science, 2008, 77(4): 424-433.
- [7] 石 吕, 张新月, 孙惠艳, 等. 不同类型水稻品种稻米蛋白质含量与蒸煮食味品质的关系及后期氮肥的效应[J]. 中国水稻科学, 2019, 33(6): 541-552.
- [8] 张启莉, 谢黎虹, 李仕贵, 等. 稻米蛋白质与蒸煮食味品质的关系研究进展[J]. 中国稻米, 2012, 18(4): 1-6.
- [9] SHEWRY P R, HALFORD N G. Cereal seed storage proteins, structures, properties and role in grain utilization[J]. Journal of Experimental Botany, 2002, 53(370): 947-958.
- [10] 吴殿星, 舒小丽. 稻米蛋白质的研究与利用[M]. 北京: 中国农业出版社, 2008: 1-10.
- [11] WEN T N, LUTHE D S. Biochemical characterization of rice glutelin[J]. Plant Physiology, 1985, 78(1): 172-177.
- [12] 王康君, 葛立立, 范苗苗, 等. 稻米蛋白质含量及其影响因素的研究进展[J]. 作物杂志, 2011, (6): 1-5.
- [13] 应存山. 中国稻种资源的研究进展[J]. 中国水稻科学, 1992, 6(3): 142-144.
- [14] 刘向蕾, 刘 奕, 程方民. 稻米中四种蛋白质组分的研究进展[J]. 湖北农业科学, 2010, 49(10): 2567-2570.
- [15] TANAKA K, OHNISHI S, KISHIMOTO N. Structure, organization, and chromosomal location of the gene encoding a form of rice soluble starch synthase[J]. Plant Physiology, 1995, 108: 677-683.
- [16] COLLIER K, BARBER L, LOTT J N A. A study of indigestible protein fractions of rice (*Oryza sativa* L.) endosperm fed to mice (*Mus musculus*) and sheep (*Ovis montanus*): a qualitative and quantitative analysis[J]. Journal of Cereal Science, 1998, 27: 95-101.
- [17] 蒋冬花, 黄大年, 任不凡, 等. 水稻醇溶蛋白总含量的多态性[J]. 中国粮油学报, 2007, 22(1): 5-8.
- [18] BISELLI C, CAVALLUZZO D, PERRINI R, et al. Improvement of marker-based predictability of apparent amylose content in japonica rice through GBSSI allele mining[J]. Rice, 2014, 7(1): 1-18.
- [19] HORI K, SUZUKI K, IJIMA K, et al. Variation in cooking and eating quality traits in Japanese rice germplasm accessions[J]. Breeding Science, 2016, 66: 309-318.
- [20] 钱春荣, 冯延江, 杨 静, 等. 水稻籽粒蛋白质含量选择对杂种早代蒸煮食味品质的影响[J]. 中国水稻科学, 2007, 21(3): 323-326.
- [21] 马兆惠, 李 坤, 程海涛, 等. 表观直链淀粉和蛋白质双低型梗稻食味的关联性分析[J]. 沈阳农业大学学报, 2019, 50(1): 10-18.
- [22] 王鹏跃. 稻米蛋白质及组成对其蒸煮食味品质影响的研究[D]. 杭州: 浙江工商大学, 2016.
- [23] 刘桃英, 刘成梅, 付桂明, 等. 大米蛋白质对大米粉糊化性质的影响[J]. 食品工业科技, 2013, 34(2): 97-99, 103.
- [24] 丁 毅, 华泽田, 王 芳, 等. 梗稻蛋白质与蒸煮食味品质的关系[J]. 食品科学, 2012, 33(23): 42-46.
- [25] 王志东, 赖穗春, 李 宏, 等. 稻米食味品质评价方法的研究进展与展望[J]. 广东农业科学, 2011(13): 18-20.
- [26] GU J F, CHEN J, CHEN L, et al. Grain quality changes and responses to nitrogen fertilizer of japonica rice cultivars released in the Yangtze River Basin from the 1950s to 2000s[J]. The Crop Journal, 2015, 3: 285-297.
- [27] BAXTER G, BLANCHARD C, ZHAO J. Effects of prolamin on the textural and pasting properties of rice flour and starch[J]. Journal of Cereal Science, 2004, 40(3): 205-211.
- [28] 陈莹莹. 江苏早熟晚粳品种稻米品质对氮肥的响应及其类型[D]. 扬州: 扬州大学, 2012.
- [29] YAN C J, L X, ZHANG Y, et al. Performance and inheritance of rice starch RVA profile characteristics[J]. Rice Science, 2005, 12(1): 39-47.
- [30] 张 欣, 施利利, 丁得亮, 等. 稻米蛋白质相关性状与 RVA 特征谱及食味品质的关系[J]. 食品科技, 2014, 39(10): 188-191.
- [31] 吴洪恺, 刘世家, 江 玲, 等. 稻米蛋白质组分及总蛋白质含量与淀粉 RVA 谱特征值的关系[J]. 中国水稻科学, 2009, 23(4): 421-426.
- [32] MARTIN M, FITZGERALD M A. Proteins in rice grains influence cooking properties[J]. Journal of Cereal Science, 2002, 36(3): 285-294.
- [33] 谢黎虹, 罗 炬, 唐绍清, 等. 蛋白质影响水稻米饭食味品质的机理[J]. 中国水稻科学, 2013, 27(1): 91-96.
- [34] 李苏红, 宋媛媛, 董墨思, 等. 大米理化特性与食味品质的相关性分析[J]. 食品研究与开发, 2017, 38(23): 26-31.
- [35] 张巧凤, 吉健安, 张亚东, 等. 粳稻食味测定值与食味品尝综合值的相关性分析[J]. 江苏农业学报, 2007, 23(3): 161-165.
- [36] HUANG S J, ZHAO C F, ZHU Z, et al. Characterization of eating quality and starch properties of two *Wx* alleles japonica rice cultivars under different nitrogen treatments[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2020, 19(4): 2-12.
- [37] SALEH M I, MEULLENET J F. Effect of protein disruption using proteolytic treatment on cooked rice texture properties[J]. Journal of Texture Studies, 2007, 38(4): 423-437.
- [38] 吴长明, 孙传清, 陈 亮, 等. 稻米营养品质性状的 QTL 及其与食味品质的关系研究[J]. 吉林农业科学, 2002(4): 3-7.
- [39] FURUKAWA S, TANAKA K, MASUMURA T, et al. Influence of rice proteins on eating quality of cooked rice and on aroma and flavor of sake[J]. Cereal Chemistry, 2006, 83(4): 439-446.
- [40] 张春红, 李金州, 田孟祥, 等. 不同食味梗稻品种稻米蛋白质相关性状与食味的关系[J]. 江苏农业学报, 2010, 26(6): 1126-1132.
- [41] 张国民, 张玉华, 宋立泉, 等. 浅谈大米中的蛋白质对营养价值及食味品质的影响[J]. 黑龙江农业科学, 2001(3): 38-39, 55.
- [42] 向远鸿, 唐启源, 黄燕湘. 稻米品质性状相关性研究——I. 籼型黏稻食味与其他米质性状的关系[J]. 湖南农学院学报, 1990, 16(4): 325-330.
- [43] 赵春芳, 岳红亮, 田 铮, 等. 江苏和东北梗稻稻米理化特性及

- Wx 和 *OsSSIIa* 基因序列分析[J]. 作物学报, 2020, 46(6): 878-888.
- [44] CHEN Y, WANG M, OUWERKERK P B F. Molecular and environmental factors determining grain quality in rice[J]. Food and Energy Security, 2012, 1(2): 111-132.
- [45] 焦爱霞, 杨昌仁, 曹桂兰, 等. 水稻蛋白质含量的遗传研究进展[J]. 中国农业科学, 2008, 41(1): 1-8.
- [46] REN Y, WANG Y, LIU F, et al. GLUTELIN PRECURSOR ACCUMULATION3 encodes a regulator of post-golgi vesicular traffic essential for vacuolar protein sorting in rice endosperm[J]. The Plant Cell, 2014, 26(1): 410-425.
- [47] YANG Y H, GUO M, SUN S Y, et al. Natural variation of *OsGluA2* is involved in grain protein content regulation in rice[J]. Nature Communications, 2019, 10(1): 1949.
- [48] YU Y H, LI G, FAN Y Y, et al. Genetic relationship between grain yield and the contents of protein and fat in a recombinant inbred population of rice[J]. Journal of Cereal Science, 2009, 50(1): 121-125.
- [49] 于永红, 朱智伟, 樊叶杨, 等. 应用重组自交系群体检测控制水稻糙米粗蛋白和粗脂肪含量的 QTL[J]. 作物学报, 2006, 32(11): 1712-1716.
- [50] TAN Y F, SUN M, XING Y Z, et al. Mapping quantitative trait loci for milling quality, protein content and color characteristics of rice using a recombinant inbred line population derived from an elite rice hybrid[J]. Theoretical and Applied Genetics, 2001, 103(6/7): 1037-1045.
- [51] YOSHIDA S, Ikegami M, Kuze J, et al. QTL analysis for plant and grain characters of sake-brewing rice using a doubled haploid population[J]. Breeding Science, 2002, 52: 309-317.
- [52] PENG B, KONG H, LI Y, et al. *OsAAP6* functions as an important regulator of grain protein content and nutritional quality in rice[J]. Nature Communications, 2014, 5: 4847.
- [53] 蒙秀菲, 冯仕喜, 曾 涛, 等. 灌浆成熟期气温对稻米品质影响[J]. 山地农业生物学报, 2019, 38(4): 8-12.
- [54] 曹云英. 高温对水稻产量与品质的影响及其生理机制[D]. 扬州: 扬州大学, 2009.
- [55] 周广恰, 徐孟亮, 谭 周, 等. 温光对稻米蛋白质及氨基酸含量的影响[J]. 生态学报, 1997, 17(5): 537-542.
- [56] 孟亚利, 周治国. 结实期温度与稻米品质的关系[J]. 中国水稻科学, 1997, 11(1): 51-54.
- [57] RESURRECCION A P, HARA T, JULIANO B O, et al. Effect of temperature during ripening on grain quality of rice[J]. Soil Science and Plant Nutrition, 1977, 23(1): 109-112.
- [58] 高继平, 隋阳辉, 张文忠, 等. 水稻灌浆期冠层温度对植株生理性状及稻米品质的影响[J]. 中国水稻科学, 2015, 29(5): 501-510.
- [59] 程方民, 朱碧岩. 气象生态因子对稻米品质影响的研究进展[J]. 中国农业气象, 1998(5): 40-46.
- [60] 任万军, 杨文钰, 徐精文, 等. 弱光对水稻籽粒生长及品质的影响[J]. 作物学报, 2003, 29(5): 785-790.
- [61] 贺浩华, 彭小松, 刘宜柏. 环境条件对稻米品质的影响[J]. 江西农业学报, 1997, 9(4): 67-73.
- [62] KAZUO H. Studies on protein content in rice grain[J]. Proceedings of the Crop Science Society of Japan, 1971, 40: 190-196.
- [63] 景立权, 户少武, 穆海蓉, 等. 大气环境变化导致水稻品质总体变劣[J]. 中国农业科学, 2018, 51(13): 2462-2475.
- [64] 吴 健, 蒋跃林. CO₂ 浓度对水稻籽粒蛋白质及氨基酸含量的影响[J]. 安徽农学通报, 2008(11): 84-86.
- [65] 谢立勇, 马占云, 韩 雪, 等. CO₂ 浓度与温度增高对水稻品质的影响[J]. 东北农业大学学报, 2009, 40(3): 1-6.
- [66] 唐 健, 唐 闯, 郭保卫, 等. 氮肥施用量对机插优质晚稻产量和稻米品质的影响[J]. 作物学报, 2020, 46(1): 117-130.
- [67] 慕永红, 孙海燕, 孙建勇, 等. 不同施氮比例对水稻产量与品质的影响[J]. 黑龙江农业科学, 2000(3): 18-19, 11.
- [68] 阙金华, 张洪程, 戴其根, 等. 氮肥对稻米品质影响的研究进展[J]. 江苏农业科学, 2002(6): 14-16.
- [69] 张 欣, 施利利, 刘晓宇, 等. 不同施肥处理对水稻产量、食味品质及蛋白质组分的影响[J]. 中国农学通报, 2010, 26(4): 104-108.
- [70] 刘 建, 魏亚凤, 徐少安. 水稻生育中期氮肥施用与稻米蛋白质含量及淀粉黏滞性的关系[J]. 江苏农业学报, 2005, 21(2): 80-85.
- [71] 谢桂先, 荣湘民, 刘 强, 等. 肥料不同配比对水稻产量与蛋白质含量的影响[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2004, (5): 405-410.
- [72] 周婵婵, 陈海强, 王 术, 等. 氮肥运筹和移栽密度对水稻产量和品质形成的影响[J]. 中国稻米, 2019, 25(5): 42-46.
- [73] 张忠臣, 刘海英, 高红秀, 等. 施肥量和穴内插秧密度对寒地粳稻产量和品质性状的影响[J]. 作物杂志, 2012(3): 99-104.
- [74] 韩春雷, 侯守贵, 刘宪平, 等. 栽培技术对稻米品质的作用及其数量关系研究[J]. 辽宁农业科学, 1997(1): 18-21.
- [75] 王成媛, 王伯伦, 张文香, 等. 栽培密度对水稻产量及品质的影响[J]. 沈阳农业大学学报, 2004, 35(4): 318-322.
- [76] 郑传举, 李 松. 开花期水分胁迫对水稻生长及稻米品质的影响[J]. 中国稻米, 2017, 23(1): 43-45.
- [77] 方宣钧, 廉平湖, 倪 文. 水稻结实期的灌水方式对稻谷产量及其蛋白质组分的影响[J]. 农田水利与小水电, 1988(4): 15-17.
- [78] 郭晓红, 郑桂萍, 殷大伟, 等. 抽穗前水分供应对寒地水稻品质的影响[J]. 水土保持通报, 2012, 32(2): 40-46.
- [79] 王成媛, 王伯伦, 张文香, 等. 土壤水分胁迫对水稻产量和品质的影响[J]. 作物学报, 2006, 32(1): 131-137.
- [80] 张丽微, 仲维君, 姜玉伟, 等. 分蘖期氮水耦合对水稻产量和品质的影响[J]. 江苏农业科学, 2018, 46(7): 47-50.
- [81] 杨志长, 沈 涛, 胡宇倩, 等. 低氮密植对机插晚稻产量形成和光合特性的影响[J]. 南方农业学报, 2019, 50(3): 546-553.

(责任编辑: 张震林)