

富硒与普通稻米理化性质和蒸煮食味品质分析

许锐^{1,2}, 李书艺^{1*}, 梅新², 祝振洲¹, 周雷^{1,2}, 施建斌², 蔡沙², 熊添², 蔡芳², 隋勇^{2*}

(1. 武汉轻工大学硒科学与工程现代产业学院, 国家富硒农产品加工技术研发专业中心, 湖北省绿色富硒农产品精深加工工程技术研究中心, 湖北武汉 430023) (2. 湖北省农业科学院农产品加工与核农技术研究所, 湖北武汉 430064)

摘要: 富硒大米是人体日常重要的补硒来源, 为了探究富硒处理对大米理化性质和蒸煮食味品质的影响, 该研究以四个品种的籼稻 (巨两优 60、野香优航 1573、虾稻一号、华夏香丝) 和两个品种的粳稻 (南粳 5055、南粳 9108) 为实验原料, 分析比较富硒组和对照组大米的基本理化特性和蒸煮食味品质。结果显示: 硒促进了大米蛋白质的积累, 与普通大米相比, 富硒大米蛋白质含量增加了 3 wt%~16 wt%; 硒对大米糊化特性、质构特性、热学性质和蒸煮品质没有显著影响; 硒显著降低了米饭的食味品质 ($P<0.05$)。相关性分析结果显示硒与蛋白质和灰分的相关系数为 0.54 和 0.46, 与大米米饭硬度的相关系数为 0.48, 与米汤 pH 之间的相关系数为 -0.55, 与其他理化指标间几乎不存在相关关系; 硒与米饭外观、口感和食味值之间呈负相关关系, 相关系数分别为 -0.62、-0.73、-0.79。与普通大米相比, 富硒大米提升了总硒、蛋白质和无机物质的含量, 提升了大米的营养品质, 但却降低了其食味品质。该研究为富硒大米品质研究和深加工提供了理论参考。

关键词: 大米; 硒; 理化性质; 蒸煮品质; 食味品质

文章编号: 1673-9078(2024)01-112-120

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2024.1.0102

Analysis of the Physicochemical Properties, Cooking and Eating Quality of Selenium-enriched Rice and Ordinary Rice

XU Rui^{1,2}, LI Shuyi^{1*}, MEI Xin², ZHU Zhenzhou¹, ZHOU Lei^{1,2}, SHI Jianbin², CAI Sha², XIONG Tian², CAI Fang², SUI Yong^{2*}

(1.School of Modern Industry for Selenium Science and Engineering, Wuhan Polytechnic University, National R&D Center for Se-rich Agricultural Products Processing Technology/ Hubei Engineering Technology Research Center for Deep Processing of Green Se-rich Agricultural Products, Wuhan 430023, China) (2.Hubei Academy of Agricultural Science, Institute for Farm Products Processing and Nuclear-Agricultural Technology, Wuhan 430064, China)

Abstract: Selenium-enriched rice is an important source of selenium supplement for humans in daily life. Four indica rice varieties (Juliangyou 60, Yexiangyouhang 1573, Xiadao No.1, and Huaxiaxiangsi) and two japonica rice varieties

引文格式:

许锐,李书艺,梅新,等.富硒与普通稻米理化性质和蒸煮食味品质分析[J].现代食品科技,2024,40(1):112-120.

XU Rui, LI Shuyi, MEI Xin, et al. Analysis of the physicochemical properties, cooking and eating quality of selenium-enriched rice and ordinary rice [J]. Modern Food Science and Technology, 2024, 40(1): 112-120.

收稿日期: 2023-02-03

基金项目: 武汉市知识创新专项 (2022020801020344); 湖北省揭榜制粮食科技项目 (2021KJCX-06)

作者简介: 许锐 (1998-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 粮食加工, E-mail: syxurui510@163.com

通讯作者: 李书艺 (1987-), 女, 博士, 副教授, 研究方向: 功能食品与天然产物化学, E-mail: lishuyisz@sina.com; 共同通讯作者: 隋勇 (1987-), 男, 博士, 助理研究员, 研究方向: 粮食加工, E-mail: suiyong0429@foxmail.com

(Nanjing 5055 and Nanjing 9108) were selected as experimental materials to explore the effects of selenium enrichment on their physicochemical properties, and cooking and eating quality. Selenium enrichment promoted protein accumulation in rice ~3 wt% ~16 wt%, compared with ordinary rice. Selenium had no significant effect on the gelatinization, texture, thermal properties and cooking quality of rice, but significantly reduced eating quality ($P < 0.05$). Correlation analysis showed that the correlation coefficients of selenium content with protein, ash, rice hardness, and the pH of rice soup were 0.54 and 0.46, 0.48, and -0.55, respectively. There was no correlation with other physicochemical indices. There was a negative correlation between selenium content and rice appearance, mouthfeel, and taste values; the correlation coefficients were -0.62, -0.73 and -0.79, respectively. Compared with ordinary rice, selenium-enriched rice had higher contents of total selenium, protein, and inorganic substances, which enhanced its nutritional quality, but its eating quality was reduced. This study can serve as a reference for research concerning the quality and processing of selenium-enriched rice.

Key words: rice; selenium; physicochemical properties; cooking quality; eating quality

硒 (Selenium, Se) 是最早由瑞典科学家 Berzelius 在 1817 年发现的一种非金属元素^[1]。在 20 世纪 40 年代以前, 硒被普遍认为是一种会威胁人类健康的有毒物质。1957 年, 才有研究证实硒是动物机体必需的微量元素; 1973 年, 世界卫生组织 (WHO) 正式宣布硒是动物机体及人类必需的微量元素^[2]。随着人类对硒的深入研究, 硒在生理机能和医药保健应用方面的研究也愈加多元化^[3,4]。硒具有显著的抗氧化作用, 能够清除体内的自由基和细胞膜脂质的过氧化物, 其抗氧化作用约为维生素 E 和维生素 C 的 300~500 倍, 研究证实硒元素具有提高人体免疫力、抗衰老、抗癌、延长寿命的功能^[5]。

人体中的硒元素主要通过日常膳食从食物中获得, 而植物是增加膳食中硒含量的主要硒源, 食用富硒农产品是当下最直接有效而又经济安全的补硒方法^[6]。中国是水稻种植大国, 一半以上人口都以大米作为主食, 因此富硒大米可作为人体日常重要的硒摄入源。中国约一半地区土壤属于缺硒状态, 同时由于水稻品种和种植环境的差异, 生产的大米中硒含量非常低, 难以满足人们日常所需的硒摄入量^[7]。中国营养学会建议成年人每天适宜的硒摄入量为 60~250 μg , 安全摄入量为 400 μg , 而我国平均每人每日对硒的摄入量还不足 40 μg ^[8]。有大量研究证实, 叶面施加硒肥可以提高大米中硒的含量, 是改善人体硒营养需求的主要方法和最有效途径^[9,10]。Huang 等^[11]的研究证明为水稻施加硒肥可以有效提高水稻的单位面积产量, 王茂辉等^[12]也发现喷施硒肥能够增加植株分蘖, 提高有效分蘖数、结实数及产量, 但是水稻吸收硒元素后是否会对大米

的理化性质和蒸煮食味品质产生影响还鲜有研究。

因此, 本实验以不同品种的富硒大米和普通大米为原料, 通过对其主要营养成分、热学性质、质构特性、蒸煮品质以及食味品质进行研究, 探究硒含量与大米的营养品质和蒸煮食味品质的相关性, 分析比较富硒大米与普通大米的理化性质和蒸煮食味品质的差异, 以期为大米的食用品质和营养品质的评价与改善以及富硒农产品的开发提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 原料与试剂

4 个品种的籼稻: 巨两优 60 (JR)、野香优航 1573 (YX)、虾稻 1 号 (XD)、华夏香丝 (HX); 2 个品种的粳稻: 南粳 5055 (N.5)、南粳 9108 (N.9)。所有品种的水稻都在湖北省武穴市花桥镇下彭村种植, 均于 2021 年 5 月 30 日播种, 2021 年 10 月 6 日收割, 由湖北省农业科学院农业经济技术研究所提供。每个品种的稻谷分为富硒和对照两组, 富硒组的水稻在灌浆初期对叶面喷洒硒浓度为 5 000 mg/L 的硒肥, 每亩用量 300 mL。

氢氧化钠、盐酸、硫酸、无水乙醇、无水乙醚、石油醚、五水合硫酸铜等, 以上试剂均为分析纯, 购自国药集团化学试剂有限公司。

1.2 主要仪器设备

SXJMJ-858 型精米机, 浙江台州华晨粮油机械有限公司; K9840 型自动凯氏定氮仪, 济南海能仪器有限公司; 7900 型电感耦合等离子体质谱仪, 美国 Agilent 公司; TA XT plus 质构仪, 英国 Stable

Micro Systems 公司；DSC 200 差示扫描量热仪，德国 NETZSCH 公司；STA1B 米饭食味计，日本佐竹公司；722N 型可见分光光度计，上海仪电分析仪器公司；Super 4 型快速粘度分析仪，澳大利亚 Newport Scientific 仪器公司。

1.3 实验方法

1.3.1 稻谷的碾磨加工

原料稻谷除杂处理后使用砻谷机脱去稻壳，得到的糙米使用碾米机碾磨，碾减率约为 12%，得到的精米以备后续测试。

1.3.2 基本理化指标的测定

总淀粉含量的测定参照 GB 5009.9-2016《食品中淀粉的测定》；直链淀粉含量的测定参照 GB/T 15683-2008《大米直链淀粉的含量测定》；总硒含量的测定使用电感耦合等离子体质谱法；蛋白含量测定参照 GB 5009.5-2016《食品安全国家标准食品中蛋白质的测定》（凯氏定氮法）；脂质含量的测定参照 GB 5009.6-2016《食品中脂肪的测定》；水分含量的测定参照 GB 5009.3-2016《食品中水分的测定》；灰分含量的测定参照 GB 5009.4-2016《食品中灰分的测定》；胶稠度的测定参照 GB/T 22294-2008《粮油检验 大米胶稠度的测定》。

1.3.3 糊化特性分析

将 1.3.1 中获得的大米样品磨粉，过 60 目筛，使用快速粘度分析仪（Rapid Visco Analyser, RVA）内置程序依据样品的实际水分含量计算所需测量样品质量，准确称取样品置于 RVA 配套的小铝盒中，加入 25 mL 蒸馏水，用转子快速搅拌均匀，放入 RVA 快速粘度分析仪中进行糊化特性分析。仪器参数设定如表 1 所示。

表 1 RVA 快速粘度分析仪设定参数

Table 1 RVA gelatinization parameters of rice starch

时间	功能类型	设定值
00:00:00	温度	50 °C
00:00:00	转速	960 r/min
00:00:10	转速	160 r/min
00:01:00	温度	50 °C
00:04:45	温度	95 °C
00:07:15	温度	95 °C
00:11:00	温度	50 °C
00:13:00	终止	

1.3.4 质构特性分析

根据 GB/T 15682-2008《粮油检验 稻谷、大米蒸煮食用品质感官评价方法》蒸制小份米饭，冷却至室温后，每次取 3 粒米，平行放置于质构仪测试台上，测定不同品种大米米饭的质构特性，每份样品重复测试 8 次。测定条件为：使用 P/36R 探头，测前速度 1.0 mm/s，测试速度 0.5 mm/s，测后速度 1.0 mm/s，压缩比 75%，触发力 5.0 g。

1.3.5 蒸煮品质分析

参照王肇慈等^[13]的方法并进行适当修改，来测定大米蒸煮过程中的米汤 pH、米汤固形物含量、米汤碘蓝值，以及大米蒸煮成米饭后的米粒吸水率、膨胀体积。

1.3.6 食味品质分析

米饭食味计开机预热 30 min，使用仪器附带的黑白基准板进行校正后等待测试。称取 8 g 米饭放入成型圈，轻轻按压使米饭都在成型圈内，将成型圈置于整形器中，按压整形器手柄至极限位置，保持 10 s 后，反转成型圈继续压制 10 s，米饭整型完成；将成型的米饭试样放入米饭食味计的测定槽进行检测，每个米饭样品进行正反两次测定，以上操作作为一个重复，每个大米品种的米饭样品做 3 个重复^[14]。最后在米饭食味计所连接的计算机上导出样品米饭的外观、口感等食味数据。

1.3.7 数据分析

数据统计与整理采用 Excel 2021 统计软件进行，使用 IBM SPSS Statistics 26 数据分析软件对数据进行方差分析、相关性分析，选取 LSD 检验进行方差分析，在 $P < 0.05$ 检验水平上对数据进行统计学分析，结果数据以均值 ± 标准差表示。

2 结果与分析

2.1 稻米营养品质分析

如表 2 所示，不同品种大米以及同一品种间富硒与普通大米的淀粉、直链淀粉、蛋白质、脂质等含量都存在一定的差异。几种受试大米样品都达到了国家富硒大米的标准，淀粉含量都在 76 wt%~80 wt% 之间，直链淀粉含量在 11 wt%~15 wt% 之间，同品种间富硒大米与普通大米未表现出显著差异 ($P > 0.05$)。对于大米粗脂肪，结果显示华夏香丝和南粳 9108 对照组的粗脂肪含量超过了 1 wt%，其他大米样品的粗脂肪含量均小于 1 wt%，富硒大米与普通大米

之间没有显著的差异 ($P>0.05$)。胶稠度是影响大米蒸煮品质、米饭软硬、口感的重要因素,是评价优质大米的重要指标之一^[15]。由表 2 可知同种品种间大米的胶稠度存在显著性差异 ($P<0.05$),其中巨两优 60、野香优航 1573、虾稻一号、南粳 5055 和南粳 9108 富硒处理组的胶稠度显著低于对照组,而华夏香丝却表现出相反的结果。从表 2 的数据可以看出,同品种间富硒大米的蛋白质含量略高于普通大米,其中野香优航 1573 和华夏香丝的富硒大米表现出了显著性差异 ($P<0.05$)。周遗品^[16]的研

究表明,硒沿着硫的吸收和代谢途径取代了硫元素并与蛋白质中的半胱氨酸和蛋氨酸结合,形成了硒代氨基酸化合物,进一步被转运至水稻籽粒中以硒蛋白的形式贮存在蛋白质中,从而造成蛋白质含量存在显著性差异。冯明菊等^[17]的研究也发现在灌浆期对水稻叶面喷洒硒肥,有利于大米蛋白质的积累,本研究的结果与上述文献结果一致。对于大米的灰分,富硒处理使得大米的灰分含量高于普通大米,这是因为灌浆期对水稻叶面喷洒的硒肥,一部分被水稻籽粒以无机硒的形式储存在体内^[18]。

表 2 富硒大米与普通大米营养品质分析

Table 2 Analysis of physicochemical indexes of selenium-enriched rice and ordinary rice

水稻品种		淀粉 /wt%	直链淀粉 /wt%	总硒 / (mg/kg)	蛋白质 /wt%	粗脂肪 /wt%	水分 /wt%	灰分 /wt%	胶稠度 /mm
JR	T	78.15 ± 0.91	13.60 ± 0.53	0.90 ± 0.04**	7.10 ± 0.07	0.99 ± 0.01*	13.55 ± 0.50	0.48 ± 0.06	71.00 ± 7.00*
	CK	77.52 ± 0.87	14.93 ± 0.45	0.05 ± 0.01	6.56 ± 0.19	0.58 ± 0.02	13.19 ± 0.54	0.36 ± 0.10	84.00 ± 7.00
YX	T	79.81 ± 1.24	12.70 ± 0.10	0.84 ± 0.05**	7.24 ± 0.65**	0.86 ± 0.02	12.91 ± 0.46	0.45 ± 0.05	76.00 ± 5.00*
	CK	79.11 ± 1.75	13.60 ± 0.10	0.08 ± 0.02	6.22 ± 0.31	0.90 ± 0.04	13.28 ± 0.53	0.44 ± 0.07	86.00 ± 7.00
XD	T	76.94 ± 1.17	13.41 ± 0.19	0.46 ± 0.01**	7.18 ± 0.46	0.86 ± 0.03	13.56 ± 0.13	0.51 ± 0.04	75.00 ± 4.00
	CK	77.16 ± 0.35	13.10 ± 0.18	0.02 ± 0.01	6.97 ± 0.36	0.82 ± 0.03	13.47 ± 0.21	0.49 ± 0.06	79.00 ± 3.00
HX	T	77.06 ± 1.06	14.09 ± 0.13	0.32 ± 0.04**	6.98 ± 0.03*	0.91 ± 0.10	13.81 ± 0.09	0.47 ± 0.02	74.00 ± 7.00*
	CK	77.01 ± 1.87	13.27 ± 0.12	0.02 ± 0.03	6.38 ± 0.27	1.01 ± 0.01	13.50 ± 0.01	0.45 ± 0.15	63.00 ± 2.00
N.5	T	76.86 ± 1.48	11.34 ± 0.22	0.41 ± 0.02**	7.56 ± 0.10	0.88 ± 0.01	14.28 ± 0.44	0.50 ± 0.01*	70.00 ± 3.00*
	CK	77.45 ± 0.49	12.12 ± 0.16	0.02 ± 0.01	6.99 ± 0.17	0.84 ± 0.07	13.14 ± 0.46	0.41 ± 0.02	82.00 ± 2.00
N.9	T	77.54 ± 1.19	12.46 ± 0.12	0.46 ± 0.02**	7.48 ± 0.02	0.97 ± 0.02	13.07 ± 0.85	0.52 ± 0.03	70.00 ± 7.00**
	CK	77.85 ± 0.54	12.89 ± 0.16	0.03 ± 0.01	7.15 ± 0.65	1.13 ± 0.08	12.77 ± 0.53	0.43 ± 0.01	94.00 ± 3.00

注: T 表示灌浆期水稻叶面喷洒硒肥处理, CK 表示对照, * 表示同一品种中, 与对照相比在 0.05 水平上差异显著; ** 表示同一品种中, 与对照相比在 0.01 水平上差异显著, 下同。

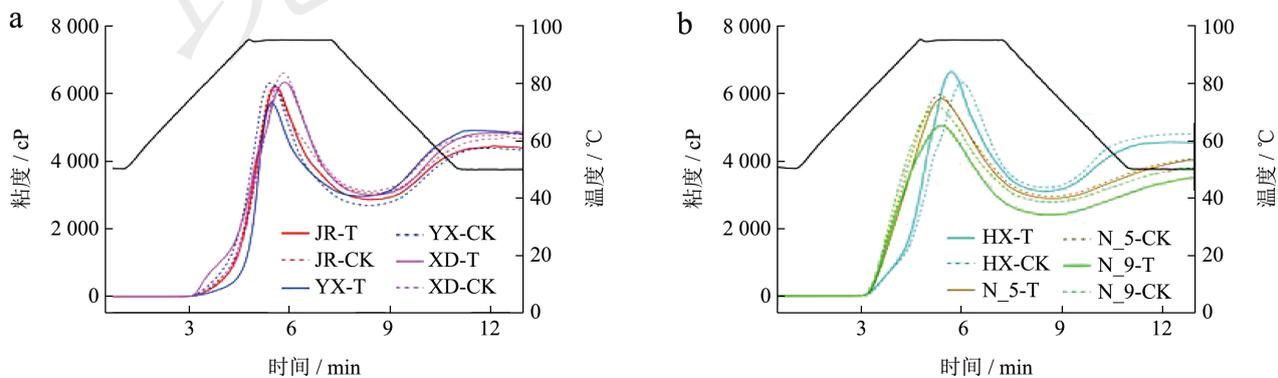


图 1 富硒大米 (a) 与普通大米 (b) 的 RVA 图谱

Fig.1 RVA spectra of selenium-enriched rice (a) and ordinary rice(b)

2.2 稻米糊化特性分析

大米经过 RVA 测试得到的糊化曲线如图 1 所示,所有大米样品的粘度都呈现有规律的上升、下降再上升的趋势,为典型的 RVA 谱。通过糊化曲线可以看出,

同品种的富硒大米和普通大米在糊化和回生时,粘度变化趋势一致。由曲线可得到峰值粘度、谷值粘度、崩解值、最终粘度、回生值、峰值时间和糊化温度,其中崩解值是峰值粘度和谷值粘度的差值,体现糊化

的差异, 回生值是最终粘度和谷值粘度的差值, 体现短期老化回生的差异^[19,20]。不同品种大米的糊化参数如表 3 所示, 在两个品种的粳型大米中, 富硒大米的回生值高于普通大米, 而峰值粘度、谷值粘度、崩解值、最终粘度都低于普通大米, 但这几项参数在四个粳型大米品种中同品种间结果各异, 未表现出显著性差异 ($P>0.05$)。至于峰值时间, 所有品种富硒大米的峰值时间都高于普通大米, 其中华夏香丝富硒与普通大米之间存在显著性差异 ($P<0.05$)。

2.3 稻米质构特性分析

质构特性是大米食味品质评价的重要指标之一。在相同蒸煮条件下, 不同品种的富硒大米与普通大米的质构特性如表 4 所示。由表 4 可知, 富

硒大米米饭的硬度都高于普通大米, 其中巨两优 60、虾稻一号和南粳 5055 品种间的差异较为显著 ($P<0.05$), 另外两个粳型大米米饭的硬度略低于其他粳型大米米饭的硬度, 这可能归因于两个粳型大米的直链淀粉含量低于其他粳型大米^[21]。对于回复性, 巨两优 60 和华夏香丝富硒大米高于普通大米, 所有品种大米的此项参数都比较接近, 品种内差异并不显著 ($P>0.05$)。另外富硒处理降低了所有粳型大米的凝聚性和弹性, 但两个粳型品种的凝聚性和弹性有所提升, 并且粳型大米的凝聚性总体高于粳型大米。同时富硒处理还提升了巨两优 60 和虾稻一号胶黏性和咀嚼性, 但其他品种富硒大米的胶黏性和咀嚼性却低于同品种普通大米。

表 3 富硒与普通大米糊化特性分析

Table 3 Analysis of gelatinization characteristics of selenium-enriched rice and ordinary rice

水稻品种		峰值粘度/cP	谷值粘度/cP	崩解值/cP	最终粘度/cP	回生值/cP	峰值时间/min
JR	T	6 258.50 ± 61.75	2 874.00 ± 38.26**	3 384.50 ± 23.34	4 406.00 ± 47.36**	1 532.00 ± 53.00*	5.56 ± 0.05
	CK	6 202.00 ± 53.63	3 060.00 ± 29.39	3 142.00 ± 31.45	4 696.50 ± 41.72	1 636.50 ± 11.20	5.54 ± 0.07
YX	T	5 732.00 ± 43.84**	2 945.50 ± 36.36**	2 786.50 ± 37.48**	4 797.00 ± 33.94**	1 851.50 ± 40.31**	5.47 ± 0.01
	CK	6 320.50 ± 125.16	2 679.50 ± 37.48	3 641.00 ± 87.68	4 324.50 ± 21.92	1 645.00 ± 59.40	5.44 ± 0.05
XD	T	6 383.00 ± 97.58**	2 988.00 ± 124.45	3 395.00 ± 35.34	4 844.50 ± 113.84	1 856.50 ± 10.61**	5.87 ± 0.01
	CK	6 697.50 ± 96.87	3 104.50 ± 14.85	3 593.00 ± 72.42	4 775.50 ± 33.23	1 671.00 ± 18.38	5.80 ± 0.10
HX	T	6 635.50 ± 105.36**	3 093.50 ± 60.10	3 542.00 ± 135.45**	4 535.50 ± 48.79*	1 442.00 ± 11.31**	6.07 ± 0.09*
	CK	6 352.50 ± 122.33	3 198.00 ± 14.41	3 154.50 ± 120.92	4 789.50 ± 69.19	1 591.50 ± 17.78	5.73 ± 0.01
N.5	T	5 873.50 ± 99.70	2 877.00 ± 113.14	2 996.50 ± 13.44	4 019.00 ± 130.11	1 142.00 ± 16.97	5.43 ± 0.14
	CK	5 970.50 ± 85.56	2 942.00 ± 24.04	3 028.50 ± 61.52	4 058.50 ± 28.19	1 116.50 ± 33.23	5.37 ± 0.05
N.9	T	5 088.50 ± 78.49**	2 396.50 ± 27.01**	2 692.00 ± 57.34*	3 499.50 ± 33.54**	1 103.00 ± 44.24**	5.40 ± 0.01
	CK	5 649.00 ± 90.51	2 773.50 ± 86.97	2 875.50 ± 36.54	3 790.50 ± 78.49	1 017.00 ± 18.49	5.27 ± 0.09

表 4 富硒大米与普通大米质构特性分析

Table 4 Analysis of texture characteristics of selenium-enriched rice and ordinary rice

品种		硬度	回复性	凝聚性	弹性	胶黏性	咀嚼性
JR	T	1 561.65 ± 51.75*	19.745 ± 0.92	0.43 ± 0.01	76.31 ± 5.37*	702.44 ± 13.93*	528.60 ± 8.28
	CK	1 365.66 ± 44.67	17.83 ± 1.52	0.45 ± 0.02	83.60 ± 1.41	536.27 ± 21.39	518.99 ± 12.17
YX	T	1 383.55 ± 27.38	21.36 ± 2.52	0.47 ± 0.03	76.28 ± 5.10*	657.19 ± 15.39*	470.75 ± 18.25*
	CK	1 341.56 ± 61.94	22.42 ± 0.84	0.48 ± 0.01	78.54 ± 5.71	700.64 ± 13.85	531.39 ± 10.04
XD	T	1 930.53 ± 60.36*	18.78 ± 1.61	0.43 ± 0.03*	77.65 ± 4.60*	751.82 ± 19.39*	586.23 ± 8.00*
	CK	1 394.14 ± 43.85	20.08 ± 0.56	0.47 ± 0.00	83.84 ± 2.16	628.54 ± 13.42	533.79 ± 17.69
HX	T	1 602.59 ± 42.73*	19.32 ± 1.09	0.43 ± 0.01	73.09 ± 1.56*	623.70 ± 15.38	481.25 ± 11.11*
	CK	1 157.07 ± 22.72	17.35 ± 0.94	0.45 ± 0.01	79.61 ± 2.12	636.72 ± 24.64	562.88 ± 7.39
N.5	T	1 316.42 ± 42.86*	20.30 ± 2.30*	0.52 ± 0.04	87.01 ± 1.97*	636.76 ± 18.19*	654.69 ± 17.44*
	CK	1 023.14 ± 61.16	23.20 ± 2.15	0.51 ± 0.02	79.33 ± 9.26	780.04 ± 16.50	786.26 ± 8.55
N.9	T	1 239.03 ± 44.86	20.61 ± 0.79	0.50 ± 0.01	83.51 ± 1.30*	474.61 ± 16.30*	395.65 ± 8.06
	CK	1 118.94 ± 38.99	20.81 ± 0.97	0.48 ± 0.01	74.18 ± 6.53	546.51 ± 8.75	410.89 ± 12.47

2.4 稻米热力学性质分析

富硒大米与普通大米的热力学性质的变化可以利用 DSC 法进行测定, 并通过相应的热力学参数加以表征。如图 2 所示, 富硒和普通大米热流曲线的峰型和峰数量并没有发生变化, 说明富硒处理不会影响大米糊化时对热量的吸收。通过对热流曲线进行分析, 可以得到几项主要的热力学参数: 起始糊化温度 (T_0)、峰值糊化温度 (T_p)、终点糊化温度 (T_c) 和糊化焓 (ΔH)。不同品种的富硒与普通大米的热力学参数如表 5 所示。从表 5 中可以看出, 几个品种大米的起始糊化温度、峰值糊化温度和终点糊化温度都比较接近, 富硒处理提高了巨两优 60 和南粳 9108 的起始糊化温度, 其他品种大米的起始糊化温度都有所降低; 对于峰值糊化温度和终点糊化温度这两项参数, 六种大米表现出了相同的趋势, 表现为巨两优 60、野香优航 1573 和南粳 9108 富硒大米的这两项参数高于普通大米, 其他三个品种则结果相反。同时, 富硒处理还降低了巨两优 60、野香优航 1573 和南粳 9108 这三个品种大米的糊化焓。大米的热学性质主要由大米中淀粉的理化特性决定, 同品种富硒大米与普通大米在热学性

质上产生的差异, 可能是由于淀粉与硒之间的相互作用, 改变了淀粉的分子结构而引起^[22]。

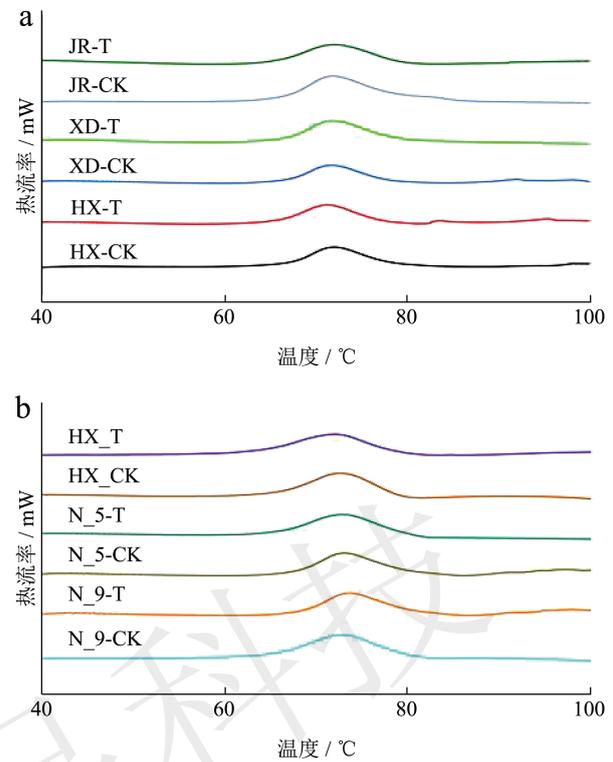


图 2 富硒大米 (a) 与普通大米 (b) 的热流曲线
Fig.2 DSC spectra of selenium-enriched rice and ordinary rice

表 5 富硒大米与普通大米热学性质分析

Table 5 Analysis of thermal properties of selenium-enriched rice and ordinary rice

稻米品种		$T_0/^\circ\text{C}$	$T_p/^\circ\text{C}$	$T_c/^\circ\text{C}$	$\Delta H/(\text{J/g})$
JR	T	$66.80 \pm 0.20^*$	72.10 ± 0.30	78.10 ± 0.10	1.92 ± 0.12
	CK	66.10 ± 0.30	71.70 ± 0.30	77.40 ± 0.50	2.22 ± 0.31
YX	T	$66.50 \pm 0.20^*$	71.60 ± 0.10	$78.00 \pm 0.30^{**}$	1.90 ± 0.53
	CK	67.00 ± 0.20	71.50 ± 0.30	76.80 ± 0.60	1.97 ± 0.22
XD	T	67.00 ± 0.30	$71.40 \pm 0.30^*$	76.90 ± 0.40	$1.84 \pm 0.21^*$
	CK	66.90 ± 0.10	72.00 ± 0.10	77.60 ± 0.20	1.77 ± 0.08
HX	T	$67.20 \pm 0.30^*$	$71.80 \pm 0.20^*$	77.30 ± 0.50	$1.92 \pm 0.27^*$
	CK	67.70 ± 0.50	72.30 ± 0.20	77.60 ± 0.40	1.80 ± 0.18
N.5	T	66.20 ± 0.20	72.70 ± 0.20	$78.00 \pm 0.30^*$	$2.25 \pm 0.38^*$
	CK	66.50 ± 0.30	72.90 ± 0.50	79.10 ± 0.40	1.56 ± 0.24
N.9	T	$67.50 \pm 0.10^*$	73.40 ± 0.20	$79.70 \pm 0.30^*$	2.13 ± 0.43
	CK	67.00 ± 0.20	73.00 ± 0.10	79.60 ± 0.30	2.27 ± 0.22

2.5 稻米蒸煮品质分析

从表 6 中可以看出, 所有品种大米的吸水率均在 200%~300% 之间, 膨胀体积差异较大, 其中巨两优 60 普通大米的膨胀体积最小, 约为生米的 2.5 倍, 而南粳 5055 富硒大米的膨胀体积最高, 几乎

接近 5.5 倍。几种大米之间, 米汤干物质含量差异较大, 除野香优航 1573 外, 其他几个品种的富硒大米的米汤干物质含量普遍低于对应品种普通大米, 其中以巨两优 60、虾稻一号和南粳 9108 的差异最为显著 ($P < 0.05$)。米汤 pH 值方面, 粳型大

米的米汤 pH 值较高, 另外富硒大米米汤的 pH 值都低于普通大米, 巨两优 60 和虾稻一号两个品种富硒和普通大米米汤 pH 差异较为显著 ($P < 0.05$)。米汤的碘蓝值是用于反映大米中可溶性淀粉含量, 与其直链淀粉含量有显著的相关性^[23]。表 6 中, 从整体上看, 所有品种的富硒与普通大米碘蓝值差异显著, 与米汤干物质含量的结果相似, 野香优航 1573 的富硒大米碘蓝值高于普通大米, 而其他品种的大米却出现了相反的结果。

2.6 稻米食味品质分析

米饭食味仪根据神经模糊原理, 利用近红外微光透射方式建立大米的理化指标含量(直链淀粉、蛋白质、水分等)与食味的关系, 并与所附带

的标准米比较得出食味值, 食味值越高米饭食味越好^[24]。几种不同品种的富硒大米和普通大米的食味品质测定结果如表 7 所示。对于米饭的口感, 富硒大米与普通大米没有显著性差异, 但是富硒处理轻微降低了所有品种米饭的外观品质。口感方面, 富硒处理使巨两优 60、野香优航 1573、虾稻一号和南粳 5055 四个品种的米饭显著低于对照组的普通大米米饭, 总体上来看, 富硒大米的口感普遍低于普通大米。另外, 富硒处理提高了所有粳型大米米饭的弹性, 而两个粳型大米米饭的弹性却有所降低, 这与质构分析的结果一致。值得注意的是, 富硒处理显著降低了米饭的食味值 ($P < 0.01$), 这可能是因为富硒对米饭外观、口感和弹性综合作用的结果。

表 6 富硒大米与普通大米蒸煮品质分析

Table 6 Analysis of cooking quality of selenium-enriched rice and ordinary rice

品种		吸水率	膨胀体积	米汤干物质	米汤 pH 值	碘蓝值
JR	T	222.67 ± 0.95	363.26 ± 3.25**	24.27 ± 1.30**	6.78 ± 0.23*	0.174 ± 0.01**
	CK	219.47 ± 2.61	247.64 ± 2.47	44.73 ± 1.17	7.69 ± 0.12	0.329 ± 0.02
YX	T	254.56 ± 1.95**	468.23 ± 2.36	85.80 ± 1.71**	7.51 ± 0.36	0.417 ± 0.01*
	CK	240.84 ± 3.48	479.32 ± 1.23	57.73 ± 1.86	7.62 ± 0.25	0.322 ± 0.02
XD	T	242.97 ± 2.30**	389.23 ± 3.56*	55.53 ± 2.00**	7.24 ± 0.11*	0.236 ± 0.03*
	CK	255.10 ± 1.96	421.59 ± 4.68	82.47 ± 3.97	7.49 ± 0.26	0.365 ± 0.02
HX	T	240.60 ± 3.40**	367.15 ± 1.09*	41.87 ± 3.51*	7.24 ± 0.45	0.248 ± 0.01*
	CK	234.13 ± 3.93	312.77 ± 3.12	47.40 ± 5.11	7.29 ± 0.36	0.432 ± 0.04
N.5	T	237.91 ± 1.19**	532.48 ± 4.32*	59.60 ± 7.41	7.52 ± 0.51	0.108 ± 0.03*
	CK	247.24 ± 1.19	465.86 ± 2.56	63.53 ± 2.10	7.63 ± 0.22	0.122 ± 0.01
N.9	T	243.20 ± 1.80**	373.42 ± 3.71*	74.40 ± 1.51**	7.77 ± 0.14	0.135 ± 0.01*
	CK	232.78 ± 2.27	314.16 ± 1.88	92.60 ± 0.72	7.80 ± 0.29	0.168 ± 0.02

表 7 富硒大米与普通大米食味品质分析

Table 7 Analysis of eating quality of selenium-enriched rice and ordinary rice

品种		外观	口感	弹性	食味值
JR	T	5.67 ± 0.21*	4.77 ± 0.65*	0.86 ± 0.07	61.67 ± 1.53**
	CK	7.10 ± 0.01	6.10 ± 0.69	0.87 ± 0.03	73.33 ± 0.58
YX	T	5.53 ± 0.06	4.73 ± 0.06*	0.85 ± 0.01	60.67 ± 0.58**
	CK	6.50 ± 0.26	5.57 ± 0.29	0.89 ± 0.10	69.00 ± 1.73
XD	T	5.57 ± 0.06	5.37 ± 0.06*	0.91 ± 0.02	63.67 ± 0.58**
	CK	6.30 ± 0.10	5.93 ± 0.12	0.95 ± 0.03	66.67 ± 0.58
HX	T	7.07 ± 0.06	6.50 ± 0.01	0.89 ± 0.05	72.00 ± 0.01**
	CK	7.30 ± 0.01	6.90 ± 0.01	0.93 ± 0.05	75.00 ± 0.01
N.5	T	5.27 ± 0.06	5.37 ± 0.06*	0.91 ± 0.01*	62.67 ± 0.58**
	CK	6.50 ± 0.10	6.40 ± 0.10	0.86 ± 0.01	69.67 ± 0.58
N.9	T	5.63 ± 0.06	5.07 ± 0.06	0.99 ± 0.01*	68.33 ± 0.58**
	CK	5.73 ± 0.06	5.27 ± 0.06	0.92 ± 0.01	70.33 ± 1.15

表 8 硒与大米理化性质和蒸煮食味品质的相关性

Table 8 Correlation between selenium and physicochemical properties and cooking flavor quality of rice

营养品质		糊化特性		质构特性		热学性质		蒸煮品质		食味品质	
指标	相关系数	指标	相关系数	指标	相关系数	指标	相关系数	指标	相关系数	指标	相关系数
淀粉	0.39	峰值粘度	-0.23	硬度	0.48	T_0	-0.11	吸水率	0.14	外观	-0.62*
直链淀粉	-0.13	谷值粘度	-0.22	回复性	0.02	T_p	-0.16	膨胀体积	0.23	口感	-0.73*
蛋白质	0.54	崩解值	-0.22	凝聚性	-0.24	T_c	0.01	米汤干物质	-0.20	弹性	-0.28
粗脂肪	0.13	最终粘度	0.06	弹性	-0.21	ΔH	0.05	米汤 pH	-0.55	食味值	-0.79*
灰分	0.46	回生值	0.25	胶黏性	0.13			碘蓝值	-0.13		
胶稠度	0.22	峰值时间	0.02	咀嚼性	-0.21						

注: *表示相关性显著 ($P < 0.05$)。

2.7 相关性分析

硒与大米理化性质和蒸煮食味品质的相关性如表 8 所示, 硒与米饭的外观、口感和食味值呈显著负相关 ($P < 0.05$), 相关系数分别达到了 -0.62、-0.73、-0.79。值得注意的是, 大米蛋白质含量和灰分含量与硒含量间的相关系数较高, 分别达到 0.54 和 0.46, 这说明硒有利于大米蛋白质的积累, 被大米吸收利用的硒一部分以无机硒的形式储存在大米籽粒中, 这与冯明菊等^[17]的结果一致。硒含量与大米糊化特性、质构特性、热力学特性和蒸煮品质的相关性整体不显著 ($P > 0.05$), 但大米硒的富集与大米的总淀粉含量和米饭硬度呈现较强的正相关, 相关系数分别为 0.39 和 0.48; 与米汤 pH 呈现较强的负相关, 相关系数为 -0.55。综上所述, 硒对大米的营养品质有积极贡献, 促进了大米蛋白质和无机物质的积累, 但会对大米的综合食味品质产生不利影响。

3 结论

本研究以巨两优 60、野香优航 1573、虾稻一号、华夏香丝、南粳 5055 和南粳 9108 为原料, 比较了富硒大米和普通大米的营养品质、基本理化性质和蒸煮食味品质间的差异, 以及硒与大米基本理化性质和蒸煮食味品质的相关性。实验结果表明富硒处理有利于大米蛋白质和灰分的积累, 但会降低大米的外观品质和口感, 并显著降低大米的食味品质 ($P < 0.01$), 而对米饭的质构特性、热学性质以及蒸煮品质的影响在受试品种中暂未显示出规律性特征。相关性分析结果表明, 硒与大米蛋白质和灰分含量之间的相关系数为 0.54 和 0.46, 与米饭的外观、口感和食味值之间呈显著负相关 ($P < 0.05$)。

总之, 富硒处理提升了大米的营养品质, 但是总体的食味品质却不及普通大米。然而硒对大米食味品质的影响机制尚不清楚, 还需深入探究硒与大米淀粉、蛋白质等营养组分的相互作用, 剖析富硒大米与普通大米品质产生差异的内在原因。富硒大米作为人类理想的日常膳食硒补充来源, 拥有广阔的发展前景, 本研究为富硒米的加工和产品开发以及大米食味品质的改善提供了理论参考。

参考文献

- [1] 龙泽东. 硒在天然富硒区恩施与石台土壤-作物-人体系统中的分布特征和健康效应研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2020.
- [2] GU Y G, QIU Y, WEI X, et al. Characterization of selenium-containing polysaccharides isolated from selenium-enriched tea and its bioactivities [J]. Food Chemistry, 2020, 316: 126371.
- [3] HAN M Q, LIU K L. Selenium and selenoproteins: their function and development of selenium-rich foods [J]. International Journal of Food Science & Technology, 2022, 57(11): 7026-7037.
- [4] CHEN N, ZHAO C H, ZHANG T H. Selenium transformation and selenium-rich foods [J]. Food Bioscience, 2021, 40: 100875.
- [5] 钱蓉蓉, 俞磊. 食品原料硒强化与富硒功能食品研究[J]. 美食研究, 2022, 39(4): 94-98.
- [6] WS/T 578.3-2017, 中国居民膳食营养素参考摄入量 第3部分: 微量元素[S].
- [7] 沈方科, 王亚萍, 赵雪梅, 等. 叶面喷施硒对水稻籽粒中硒含量及形态的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2022, 6: 144-150.
- [8] 刘为, 尹金晶, 吴慕慈, 等. 富硒农产品中硒代氨基酸形态及其在不同蛋白组分中的分布[J]. 食品与机械, 2022, 38(6): 45-51, 190.
- [9] HU Z Y, CHENG Y X, SUZUKI N, et al. Speciation of

- selenium in brown rice fertilized with selenite and effects of selenium fertilization on rice proteins [J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2018, 19(11): 3494.
- [10] YUAN Z Q, LONG W X, LIANG T, et al. Effect of foliar spraying of organic and inorganic selenium fertilizers during different growth stages on selenium accumulation and speciation in rice [J]. *Plant Soil*, 2023, 486: 87-101.
- [11] HUANG W, XU Q G, WU N. Effects of selenium-enriched rape returning amount on available selenium content in paddy soil and selenium accumulation in rice [J]. *International Journal of Analytical Chemistry*, 2022, 245: 3101069.
- [12] 王茂辉,李珂清,萧洪东,等.喷施不同硒肥对水稻生长及硒富集的影响[J].*南方农业*,2022,16(13):82-85.
- [13] 王肇慈,周瑞芳.粮油食品分析[M].北京:中国轻工业出版社,1984.
- [14] 陆建忠,张亚静,沈超群.米饭食味计与人工评鉴稻米食味品质比较试验[J].*安徽农学通报*,2020,26(16):57-59.
- [15] 余波,杨军,胡庆峰,等.江苏省粳稻淀粉合成相关基因等位变异检测及其对稻米理化指标的影响[J].*江苏农业科学*,2022,50(18):87-91.
- [16] 周遗品.硒对水稻蛋白质和氨基酸含量影响的初步研究[J].*石河子农学院学报*,1995,3:18-22.
- [17] 冯明菊,熊华,王晓雅,等.富硒糙米蛋白理化特性及抗氧化活性的研究[J].*食品工业科技*,2020,41(15):34-42.
- [18] DAI Z H, IMTIAZ M, RIZWAN M, et al. Dynamics of Selenium uptake, speciation, and antioxidant response in rice at different panicle initiation stages [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 691(15): 827-834.
- [19] SHI S J, WANG E T, LI C X, et al. Use of protein content, amylose content, and RVA par-ameters to evaluate the taste quality of rice [J]. *Frontiers in Nutrition*, 2022, 8: 758547.
- [20] 李枝芳,姚轶俊,张磊,等.不同品种大米组分含量与米饭加工品质特性的关系[J].*食品科学*,2020,41(23):35-41.
- [21] DENG F, YANG F, LI Q P, et al. Differences in starch structural and physicochemical properties and texture characteristics of cooked rice between the main crop and ratoon rice[J]. *Food Hydrocolloids*, 2021, 116: 106643.
- [22] 杨锴.海藻酸钠对大米淀粉物性及米发糕品质影响研究[D].无锡:江南大学,2022
- [23] DUAN D L, TU Z C, WANG H, et al. Physicochemical and rheological properties of modified rice amylose by dynamic high-pressure microfluidization [J]. *International Journal of Food Properties*, 2017, 20(4): 1178283.
- [24] 李苏红,李缓,董墨思,等.大米食味品质仪器分析与感官评价的相关性[J].*粮食与油脂*,2018,31(12):31-34.