

优质稻品种硒镉富集特性研究初报

康敏¹, 邓建红², 龚建华^{1*}, 黄涛¹, 毛莎莎¹, 赵正洪³, 邓雅文¹

¹株洲市农业科学研究所, 湖南 株洲

²株洲香之优农业科技发展有限责任公司, 湖南 株洲

³湖南省水稻研究所, 湖南 长沙

收稿日期: 2022年6月8日; 录用日期: 2022年7月6日; 发布日期: 2022年7月19日

摘要

为筛选适合株洲市种植的优质、富硒、低镉的优质稻品种, 引进15个优质稻品种进行随机区组试验, 在灌浆初期施用生物纳米硒肥1次, 硒肥用量(以Se计) 1.25 g/667m², 测定精米镉、总硒、有机硒含量。结果表明: 1) 在重度镉污染土壤条件下(1.17 mg/kg), 15个优质稻品种对镉的吸收积累能力存在一定的差异, 但未达到显著水平(P = 0.05); 其中, 精米镉含量最低的是拾两优1817, 说明该品种具有低镉积累特性。与不施硒肥相比, 施用硒肥品种的精米镉含量平均降低3.05%, 降镉效果不明显。2) 15个优质稻品种籽粒硒富集能力存在极显著差异(P = 0.01), 精米硒含量品种间变幅在18.3~121.6 μg/100g, 平均为67.5 μg/100g, 说明通过施用含量硒叶面肥, 完全可以在低硒或缺硒区生产出高含量的富硒大米。其中: 玉针香、泰丰优农39、泰优农39、巴斯马蒂等品种的硒富集能力较强, 在富硒大米生产中具有较好的优势。3) 15个优质稻品种精米的有机硒占比(%)有极显著差异(P = 0.01), 品种间变幅在76%~100%, 平均为92%, 其中: 香优52、悦两优美香新占、美香占2号、农香42的有机硒占比达到99%, 说明这些品种的硒生物转化率高。4) 以精米总硒含量或富硒效率(权重系数0.4)和有机硒占比(权重系数0.6)为指标进行灰色关联度分析表明, 15个优质稻品种中, 富硒综合性状优良的常规稻品种是玉针香和巴斯马蒂、三系杂交稻品种是泰优农39、两系杂交稻品种是泰丰优农39和又香优浓39。玉针香和巴斯马蒂为1等优质米, 香味浓郁, 食味好; 且垩白粒率和垩白度低, 透明度1级, 外观品质高; 667 m²产量400 kg左右, 又符合当地气候生产条件对品种的特征要求, 在高档富硒香米开发中具有良好的推广应用前景。

关键词

优质稻, 富硒, 低镉, 有机硒占比

Initial Study on Selenium and Cadmium Enrichment Characteristics of High Quality Rice Varieties

Min Kang¹, Jianhong Deng², Jianhua Gong^{1*}, Tao Huang¹, Shasha Mao¹, Zhenghong Zhao³,

*通讯作者。

Yawen Deng¹

¹Zhuzhou Institute of Agricultural Sciences, Zhuzhou Hunan

²Zhuzhou Xiangzhiyou Agricultural Technology Development Co., Ltd., Zhuzhou Hunan

³Hunan Rice Research Institute, Changsha Hunan

Received: Jun. 8th, 2022; accepted: Jul. 6th, 2022; published: Jul. 19th, 2022

Abstract

In order to select high-quality rice varieties with high quality, low cadmium and rich selenium suitable for planting in Zhuzhou, 15 high-quality rice varieties were introduced to carry out a randomized block test. At the early stage of grain filling, biological nano selenium fertilizer was applied once, and the amount of selenium fertilizer (calculated as Se) was 1.25 g/667m². The contents of cadmium, total selenium and organic selenium in milled rice were determined. The results showed that: 1) under the condition of heavy cadmium pollution (1.17 mg/kg), there was a certain difference in the ability of cadmium absorption and accumulation among 15 high-quality rice varieties, but it did not reach a significant level ($p = 0.05$); Among them, the lowest cadmium content in milled rice is shiliangyou 1817, which indicates that this variety has the characteristics of low cadmium accumulation. Compared with no selenium fertilizer, the content of cadmium in milled rice with selenium fertilizer decreased by an average of 3.05%, and the effect of reducing cadmium was not obvious. 2) There was a very significant difference in grain selenium enrichment among 15 high-quality rice varieties ($p = 0.01$), and the selenium content in milled rice varied from 18.3 to 121.6 $\mu\text{G}/100\text{g}$, average 67.5 $\mu\text{G}/100\text{g}$, indicating that high selenium rich rice can be produced in low selenium or selenium deficient areas by applying selenium rich leaf fertilizer. Among them, Yu-zhen-xiang, Tai-feng-you-nong 39, Tai-you-nong 39, Basmati and other varieties have strong selenium enrichment ability, and have good advantages in the production of selenium rich rice. 3) The percentage of organic selenium in milled rice of 15 high-quality rice varieties was significantly different ($p = 0.01$), with a range of 76%~100% among varieties, with an average of 92%. Among them, the percentage of organic selenium in Xiang-you 52, Yue-liang-mei-mei-xiang-xin, Mei-xiang-zhan 2 and Nong-xiang 42 reached 99%, indicating that these varieties had a high selenium biological conversion rate. 4) Taking the total selenium content or selenium enrichment efficiency of milled rice (weight coefficient 0.4) and the proportion of organic selenium (weight coefficient 0.6) as indicators, the grey correlation analysis showed that among the 15 high-quality rice varieties, the conventional rice varieties with excellent selenium rich comprehensive characters were Yu-zhen-xiang and Basmati, the three-line hybrid rice variety was Tai-you-nong 39, and the two-line hybrid rice varieties were Tai-feng-you-nong 39 and You-xiang you-nong 39. Jade needle fragrance and basmati are first-class high-quality rice, with rich flavor and good taste; the chalky grain rate and chalkiness degree were low, the transparency was grade 1, and the appearance quality was high; the output of 667 m² is about 400 kg, which also meets the requirements of local climatic production conditions for varieties. It has a good prospect of popularization and application in the development of high-grade selenium rich fragrant rice.

Keywords

High Quality Rice, Selenium Enrichment, Low Cadmium, Proportion of Organic Selenium

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

镉是联合国环境规划署确定的首位食品污染物,人类在食用镉超标大米后会造造成呼吸道以及肝、肾脏功能的衰竭和病变,甚至引发癌症[1] [2]。水稻是主要粮食作物,其吸收积累镉能力较强,但不同基因型之间存在显著差异[3]。同时, 稻米镉含量与土壤 pH 值呈显著的负相关[4] [5] [6] [7], 与土壤有效态镉含量呈显著的正相关[7]。为此, 生产上采用了选育和推广镉低积累品种、降低土壤 pH 值和有效态镉含量等措施, 以确保稻米镉含量达标。

硒是人和动物必需的微量营养元素, 对人体具有抗癌作用[8] [9], 缺硒可诱发的人体 40 余种疾病, 如克山病、癌症等[10] [11]。Se 也是植物生长的必需微量元素, 适宜浓度的硒可提高生物体的抗氧化酶活性、降低过氧化损伤, 促进植物生长发育、提高抗逆境能力[12] [13] [14]。硒还对镉、铅、汞等重金属元素具有拮抗作用, 可缓解重金属对人体和植物的毒害[15] [16]。我国是世界上缺硒最严重的国家之一, 且缺硒多在以谷类为主食的居民中发生[17] [18], 因而开发富硒大米成为硒营养健康的主要方向。研究表明, 水稻生长期间施用硒肥, 可降低大米中 Cd、Pb、Cr 等重金属的含量[13], 显著提高大米中硒的含量[19], 这为贫硒区开发富硒功能大米提供了理论基础。

株洲市属水稻主产区, 是全国第一个过吨粮的地级市。株洲国民经济和社会发展第十四个五年规划和 2035 年远景目标纲要、以及近两年的株洲市 1 号文件要求: “实施优质粮食工程, 推进种业和种植技术创新, 扩大优质稻种植面积, 发展功能性水稻。”但株洲土壤贫硒, 发展富硒功能水稻需要通过外源补硒方式, 株洲香之优农业科技发展与株洲市农业科学研究所合作研发的水稻富硒专利技术(ZL 2020 1 0289106.3), 不仅实现了中国科学院赵其国院士提出的从“富含”到“定向含有”的跨越, 有效解决了外源补硒条件下富硒水稻生产中硒含量不稳定、有机硒占比不高的技术难题, 而且可同时实现大米锌营养叠加, 进一步提升了营养品质, 为缺硒区高品质富硒大米生产提供了重要的科技支撑。但不同优质稻品种在外源补硒条件下的硒富集差异与硒品质差异鲜有报道。另一方面, 株洲部分土壤存在轻中度镉污染, 且优质稻生产中品种多、乱、杂现象突出。尽管不同水稻品种之间镉富集能力存在显著差异, 但不同优质稻品种的差异很少有专项的研究报道。为此, 开展优质稻品种硒镉富集特性研究, 筛选出适宜株洲推广应用的优质、低镉、富集硒能力强且生物转化率高的优质稻品种, 对引导企业、种粮大户发展高档优质稻, 打造株洲优质稻米品牌, 推进株洲粮食产业提质增效具有重要意义。

2. 材料与方方法

2.1. 试验材料

水稻品种: 参试品种共 15 个, 其中: 三系杂交优质稻品种 2 个, 两系杂交优质稻品种 8 个, 常规优质稻品种 5 个。本试验以 1 等优质米品种为主(详见表 1)。

含硒叶面肥: “生物纳米硒肥”由武汉华硒生物科技有限公司提供, 硒含量(以 Se 计) 5 g/L。

2.2. 试验设计

试验地点: 株洲市农业科学研究所科研基地(芦淞区燎原村)。土壤镉含量 1.17 mg/kg。

试验方法: 每小区面积 15.36 m², 株行距 20 cm × 20 cm, 小区间距 50 cm。随机区组设计, 三次重复。在镉积累比较中, 设置独立对照(不施硒肥), 品种为改良型巴斯马蒂, 独立对照不参与随机排列。于 2021 年 6 月 18 日播种, 7 月 18 日插秧。在灌浆初期施用生物纳米硒肥 1 次, 硒肥用量(以 Se 计) 1.25 g/667m², 按每 667 m² 兑水 30 kg 人工喷雾。因参试品种的生育期不同, 分别于 9 月 9 日、9 月 14 日、9 月 18 日喷施含硒叶面肥(详见表 2)。肥水管理、病虫害防治等同大田生产。

Table 1. Information of experimental high quality rice varieties**表 1.** 参试优质稻品种及米质情况表

品种编号	品种名称	选育单位	品种类型	米质等级
P1	香优 52	湖南省水稻所	常规稻	1 级
P2	泰丰优农 39 (泰丰 A/制 24)	湖南省水稻所	两系杂交稻	//
P3	214A/制 24	湖南省水稻所	两系杂交稻	//
P4	又香优浓 39 (又香 A/制 25)	湖南省水稻所	两系杂交稻	//
P5	巴斯马蒂	株洲香之优农业科技公司	常规稻	1 级
P6	耘两优玖 48	湖南金色农丰种业有限公司	两系杂交稻	1 级
P7	玉针香	湖南省水稻所	常规稻	1 级
P8	悦两优美香新占	湖南百分农业科技有限公司	两系杂交稻	1 级
P9	美香占 2 号	广东省农科院	常规稻	1 级
P10	农香 42	湖南省水稻所	常规稻	1 级
P11	泰优农 39	湖南金色农丰种业有限公司	三系杂交稻	1 级
P12	明泰优丝苗	福建农乐种业	两系杂交稻	2 级
P13	野香优莉丝	江西天稻粮安种业有限公司	三系杂交稻	2 级
P14	拾两优 1817	株洲市农科所	两系杂交稻	1 级
P15	荔香优丝苗	福建农乐种业	常规稻	2 级

Table 2. Application timetable of selenium containing leaf fertilizer**表 2.** 含硒叶面肥施用时间表

品种编号	施硒肥时间		
	第 1 次	第 2 次	第 3 次
P1		9 月 14 日	
P2	9 月 9 日		
P3	9 月 9 日		
P4	9 月 9 日		
P5	9 月 9 日		
P6	9 月 9 日		
P7	9 月 9 日		
P8			9 月 18 日
P9		9 月 14 日	
P10		9 月 14 日	
P11	9 月 9 日		
P12		9 月 14 日	
P13	9 月 9 日		
P14	9 月 9 日		
P15		9 月 14 日	

2.3. 考察指标

品种镉富集能力：田间取稻谷样，检测精米镉含量。

品种硒富集能力：田间取稻谷样，检测精米总硒含量。

品种硒生物转化率：田间取稻谷样，检测精米有机硒含量并计算有机硒占比(%)。

2.4. 检测方法

土壤 Cd 含量按 GB/T17141-1997 方法检测，检测仪器为原子吸收分光光度计，设备型号为安捷伦 240DUO。精米 Cd 含量按 GB5009.15-2014 方法检测；精米总 Se 含量按 GB5009.93-2017 第一法检测；精米有机 Se 含量按 DBS42/002-2021 方法检测；检测仪器均为原子荧光形态分析仪，设备型号为 PF32。

2.5. 数据处理方法

试验数据采用 Excel 2003 进行数据整理和统计分析，采用 Excel 的 TDIST 函数进行随机区组试验的多重比较(LSD)。采用灰色关联度分析方法综合评价品种的富硒性状。

3. 结果与分析

3.1. 优质稻品种籽粒镉积累差异比较

由表 3 可知，参试品种中精米镉含量较高的品种有巴斯马蒂(P5)、荔香优丝苗(P15)、农香 42 (P10)、悦两优美香新占(P8)、214A/制 24 (P3)，较低的品种有拾两优 1817 (P14)、明泰优丝苗(P12)，但不同品种之间精米镉含量的差异无统计学意义($P = 0.05$)。精米镉含量最低的是拾两优 1817 (P14)，说明该品种具有低镉积累特性，可能在轻中度污染区种植具有一定的优势。精米镉含量最高的是巴斯马蒂(P5)，说明该品种在生产中应采取严格的降镉措施。在土壤重度镉污染条件下(1.17 mg/kg)，与不施硒肥相比(独立对照)，施用硒肥品种的精米镉含量平均降低 3.05%。

Table 3. Test results of cadmium content in milled rice (mg/kg)

表 3. 精米镉含量检测结果表(mg/kg)

品种编号	I	II	III	平均
P1	0.80	1.30	1.50	1.20
P2	0.47	1.40	1.40	1.09
P3	0.70	1.50	1.90	1.37
P4	0.39	1.70	1.70	1.26
P5	0.63	1.80	1.90	1.44
P6	0.80	1.20	1.90	1.30
P7	0.93	1.40	1.40	1.24
P8	1.20	1.30	1.60	1.37
P9	1.10	1.20	1.40	1.23
P10	0.89	1.60	1.70	1.40
P11	1.10	1.20	0.88	1.06
P12	0.84	1.00	1.10	0.98
P13	1.20	0.72	1.30	1.07

Continued

P14	1.00	0.84	1.00	0.95
P15	1.20	1.40	1.70	1.43
平均	0.88	1.30	1.49	1.23
CK	1.27	0.83	1.70	1.27

3.2. 优质稻品种籽粒硒富集差异比较

由表4可知,在含硒叶面肥用量 1.25 g/亩(以 Se 计)条件下,参试品种精米硒含量平均为 67.5 $\mu\text{g}/100\text{g}$,达到高富硒水平,说明缺硒区通过施用硒肥可以实现富硒水稻生产。方差分析表明,不同优质稻品种精米总硒含量存在极显著差异($P = 0.01$),说明不同品种对硒元素的吸收、转运与籽粒积累能力明显不同。其中:籽粒富硒效率高的品种有玉针香(P7)、泰丰优农 39 (P2)、泰优农 39 (P11)、巴斯马蒂(P5),较低的品种是香优 52 (P1)、悦两优美香新占(P8)、美香占 2 号(P9)、农香 42 (P10)、荔香优丝苗(P15)。进一步的多重比较表明,玉针香(A7)极显著高于香优 52 (A1)、悦两优美香新占(A8)、农香 42 (A10)、美香占 2 号(A9)、荔香优丝苗(A15)、明泰优丝苗(A12)、拾两优 1817 (A14)、耘两优玖 48 (A6)、野香优莉丝(A13);泰优农 39 (A11)和泰丰优农 39 (A2)均极显著高于香优 52 (A1)、悦两优美香新占(A8)、农香 42 (A10)、美香占 2 号(A9)、荔香优丝苗(A15)、明泰优丝苗(A12)、拾两优 1817 (A14)、耘两优玖 48 (A6);巴斯马蒂(A5)、214A/制 24 (A3)和又香优浓 39 (A4)均极显著高于香优 52 (A1)、悦两优美香新占(A8)、农香 42 (A10)、美香占 2 号(A9)、荔香优丝苗(A15)、明泰优丝苗(A12);耘两优玖 48 (A6)和拾两优 1817 (A14)均极显著高于香优 52 (A1)、悦两优美香新占(A8)、农香 42 (A10)、美香占 2 号(A9)、荔香优丝苗(A15)。显然,在富硒优质稻生产中,应优先选择硒富集能力强且综合性状较好的品种,如玉针香、巴斯马蒂等。泰丰优农 39、214A/制 24 和又香优浓 39 为两系优质稻苗头品种,具有较好的富硒品种开发潜力。

Table 4. Test results and analysis of total selenium content in milled rice ($\mu\text{g}/100\text{g}$)表 4. 精米总硒含量检测结果与分析表($\mu\text{g}/100\text{g}$)

品种编号	I	II	III	平均	较 CK $\pm\%$	富硒效率 ($\mu\text{g}/\text{g} \cdot 667\text{m}^2$)
P1	21.6	15.5	17.8	18.3	108.7	0.146
P2	108.9	107.4	106.5	107.6	1127.4	0.861
P3	139.6	68.0	85.7	97.8	1015.2	0.782
P4	117.0	88.7	68.7	91.5	943.3	0.732
P5	91.2	122.2	95.0	102.8	1072.6	0.822
P6	77.3	70.4	63.5	70.4	463.5	0.563
P7	90.5	115.1	159.3	121.6	1287.5	0.973
P8	15.9	28.0	19.6	21.2	141.4	0.169
P9	19.0	19.7	32.7	23.8	171.5	0.190
P10	15.4	20.0	30.3	21.9	149.8	0.175
P11	135.3	86.1	95.4	105.6	1104.6	0.845
P12	42.5	70.1	56.3	56.3	358.2	0.450
P13	55.5	72.2	104.8	77.5	784.0	0.620

Continued

P14	22.8	91.9	95.3	70.0	698.5	0.560
P15	26.7	27.2	23.0	25.6	192.4	0.205
平均	65.3	66.8	70.3	67.5	669.5	0.540

*富硒效率：是指每 667 m² 水稻补硒(以 Se 计) 1 g 时，每 100 g 精米的硒含量(μg)。

3.3. 优质稻品种籽粒硒生物转化率差异比较

研究表明，在含硒叶面肥用量 1.25 g/亩(以 Se 计)条件下，不同优质稻品种对硒元素的生物转化率存在较大差异(生物转化率是指植物通过根茎叶吸收硒元素并生物转化为硒蛋白、硒肽等有机形态的比例，水稻硒生物转化率 = (籽粒有机硒 + 茎有机硒 + 叶有机硒 + 根有机硒)/环境硒量)。对水稻籽粒而言，通常以有机硒含量占总硒含量的百分比即有机硒占比(%)来表示。由表 5 可知，施用含硒叶面肥的 15 个水稻品种的平均有机硒占比为 92%，达到富有机硒标准(DBS42002-2021)，其中：香优 52 (P1)、悦两优美香新占(P8)、美香占 2 号(P9)、农香 42 (P10)的有机硒占比达到 99%，说明其生物转化率很高，生产的富硒大米硒品质优良；有机硒占比低于 90%的品种 6 个，其中最低的品种是耘两优玖 48 (P6)、拾两优 1817 (P14)和玉针香(P7)，这类品种在富硒水稻生产中应研究和推广提高硒生物转化率的有效措施，如株洲香之优农业科技发展有限责任公司与株洲市农业科学研究所合作研发的硒高生物转化技术，多年多点生产的巴斯马蒂富硒香米的有机硒占比达到 99%以上，较本试验巴斯马蒂提高了十个百分点。由于有机硒占比是硒品质评价的关键指标，因此籽粒硒生物转化率高的优质稻品种在高档富硒米开发中具有较大优势。

Table 5. Results of percentage (%) of organic selenium in milled rice

表 5. 精米有机硒占比(%)结果表

品种编号	I	II	III	平均
P1	100	100	98	99.33
P2	85	89	92	88.67
P3	98	85	89	90.67
P4	91	91	98	93.33
P5	98	84	85	89.00
P6	85	86	80	83.67
P7	82	85	87	84.67
P8	96	100	100	98.67
P9	97	100	100	99.00
P10	100	100	97	99.00
P11	89	82	88	86.33
P12	88	89	100	92.33
P13	95	93	90	92.67
P14	76	88	90	84.67
P15	99	100	94	97.67
平均	91.93	91.47	92.53	91.98

方差分析表明, 精米有机硒占比(%)品种间存在极显著差异($P = 0.01$)。进一步的多重比较表明, 香优 52 (P1)、悦两优美香新占(P8)、美香占 2 号(P9)、农香 42 (P10)均极显著高于耘两优玖 48 (P6)、拾两优 1817 (P14)、玉针香(P7)、泰优农 39 (P11)、泰丰优农 39 (P2)、巴斯马蒂(P5)、214A/制 24 (P3); 荔香优丝苗(P15)极显著高于耘两优玖 48 (P6)、拾两优 1817 (P14)、玉针香(P7)、泰优农 39 (P11)、泰丰优农 39 (P2)、巴斯马蒂(P5); 又香优浓 39 (P4)、野香优莉丝(P13)、明泰优丝苗(P12)均极显著高于耘两优玖 48 (P6)、拾两优 1817 (P14)、玉针香(P7)。

4. 结论与讨论

4.1. 结论

1) 本研究表明, 在土壤重度镉污染条件下(1.17 mg/kg), 不同优质稻品种的精米镉含量存在一定的差异, 但未达到显著水平。其中, 精米镉含量最低的是拾两优 1817 (P14), 该品种米质 1 等, 抗稻瘟病, 在轻度镉污染区与稻瘟病区种植具有较大的优势。鉴于株洲农田土壤镉污染以轻中度污染为主, 因此, 不同优质稻品种在轻度或中度污染水平下的镉富集差异有待进一步研究。

2) 施用含硒叶面肥可降低精米镉含量。含硒叶面肥的降镉效应与施用的稻田土壤条件关系密切, 在低硒中低度镉污染的稻田中施用, 能显著降低水稻精米中的镉含量; 但在富硒高镉污染的稻田施用并无降镉效果[20]。本试验因土壤镉含量高(1.17 mg/kg), 与不施硒肥的对照相比, 施用硒肥品种的精米镉含量平均降低 3.05%, 降镉效果不明显, 与黄太庆等[20]的研究结果一致。

3) 本研究表明, 不同优质稻品种的硒富集能力和生物转化率均存在极显著差异, 说明富硒优质稻品种选育具有可行性。但二者存在显著负相关($r = -0.8159, P = 0.05$), 目前相关基因及位点尚不清楚, 这意味着选育出硒富集效率高、有机硒占比也高的富硒优良品种存在较大的难度。根据富硒效率和有机硒占比两项指标, 我们可以将参试品种分为三类, 一类: 硒富集效率高但有机硒占比低。品种有玉针香(P7)泰丰优农 39 (P2)、泰优农 39 (P11)、巴斯马蒂(P5)、又香优浓 39 (P4)和 214A/制 24 (P3), 这类品种生产富硒大米时的硒肥用量相对较少, 但需采用提高硒生物转化率的技术措施, 才能开发出高硒品质的富硒米产品。二类: 硒富集效率低但有机硒占比高。品种有香优 52 (P1)、悦两优美香新占(P8)、美香占 2 号(P9)、农香 42 (P10)和荔香优丝苗(P15), 这类品种生产的富硒大米硒品质高, 但较一类品种需提高硒肥用量。其中, 香优 52、农香 42、美香占 2 号为常规优质稻品种, 米质 1 级, 是富硒品种选育的良好资源。三类: 硒富集效率中等, 且有机硒占比低或中等。品种有耘两优玖 48 (P6)、拾两优 1817 (P14)、明泰优丝苗(P12)、野香优莉丝(P13), 这类品种不宜做高品质富硒优质米开发。

4.2. 讨论

1) 品种富硒特性的综合评价方法。筛选富硒优良品种是富硒功能大米生产的重要基础, 为综合评价品种的富硒特性, 我们以精米总硒含量或富硒效率(权重系数 0.4)、有机硒占比(权重系数 0.6)为指标进行灰色关联度分析(表 6), 结果表明: 富硒性状最好的常规稻品种是玉针香和巴斯马蒂、三系杂交稻品种是泰优农 39、两系杂交稻品种是泰丰优农 39 和又香优浓 39。玉针香(排序第 1)和巴斯马蒂(排序第 4)为 1 等优质米, 香味浓郁, 食味好; 且垩白粒率和垩白度低, 透明度 1 级, 外观品质高; 亩产量 400 kg 左右, 是高档富硒优质米开发的首选品种。泰优农 39 (排序第 6)为 1 等优质米, 稻瘟病抗性较强(综合抗性指数 3.8), 产量高($500 \text{ kg}/667\text{m}^2$ 左右), 整精米率高(55.4%), 在高效富硒优质米开发中具有较好的前景。泰丰优农 39 (排序第 2)、又香优浓 39 (排序第 3)、214A/制 24 (排序第 5)为湖南省水稻研究所选育的两系杂交稻苗头品种, 具有良好的硒富集特性。

Table 6. Grey correlation analysis of selenium rich characters of high quality rice varieties
表 6. 优质稻品种富硒性状灰色关联度分析表

品种编号	总硒含量($\mu\text{g}/100\text{g}$)	有机硒占比(%)	加权关联度	排序
P1	18.3	99.3	0.7333	9
P2	107.6	88.7	0.7941	2
P3	97.77	90.7	0.7720	5
P4	91.47	93.3	0.7778	3
P5	102.8	89.0	0.7754	4
P6	70.4	83.7	0.6388	15
P7	121.63	84.7	0.8457	1
P8	21.17	98.7	0.7274	11
P9	23.8	99.0	0.734	8
P10	21.9	99.0	0.7323	10
P11	105.6	86.3	0.7639	6
P12	56.3	92.3	0.6912	13
P13	77.5	92.7	0.7345	7
P14	70	84.7	0.6458	14
P15	25.63	97.7	0.7180	12

2) 富硒品种选育的目标性状。由于硒酸钠、亚硒酸钠等无机硒有较大的毒副作用，而有机硒无毒无害且吸收利用率高[21]，因此，提高精米有机硒含量或籽粒硒生物转化率是今后富硒功能水稻品种选育的主要目标性状。另一方面，需要提高水稻品种对硒的吸收、转动能力，即富硒效率，这对富硒区提高大米硒含量而言十分重要。目前，富硒品种选育主要集中在提高富硒效率方面，而对硒生物转化率性状研究尚未得到足够的重视。

3) 富硒大米标准亟待规范。有机硒占比是富硒大米等农产品硒品质评价的关键指标。有机硒占比越高，说明硒品质越好。目前，只有湖北省制订了富有机硒农产品地方标准，有机硒占比 $\geq 80\%$ 即为富有机硒农产品。但从我们的实践来看，湖北省制订的富有机硒指标偏低，且没有出台国家标准。对于富硒大米的硒含量标准，地方标准与国家标准相差很大，管理比较混乱。在 2008 年《富硒稻谷》国家标准(GB/T22499-2008)中，规定“加工成符合 GB1354 规定的三级大米中的硒含量在 0.04~0.30 mg/kg 之间的稻谷为富硒稻谷”，但根据《食品安全国家标准 预包装食品营养标签通则》(GB28050-2011)，富硒稻米最低硒含量标准为 ≥ 0.15 mg/kg，且《食品安全国家标准 食品中污染物限量》(GB2762-2012)取消了对硒的限量规定，意味着硒已被认定为“非食品中的污染物”。但 GB/T22499-2008 至今并未进行修订，以至几乎所有的技术论文至今仍是依据该标准为依据，客观上阻碍了水稻富硒技术的发展。湖南、陕西、湖北等省对富硒稻米的硒含量规定也差异很大，三省富硒大米的硒含量分别规定为 0.150~1.000 mg/kg (T/HNFX001-2017)、 >0.100 mg/kg (DB61/T556-2012)、0.20~0.500 mg/kg (DBS42/002-2021)。由此可见，正是由于富硒稻米标准制订的不统一，在很大程度上导致人们对富硒稻米和补硒的认识出现严重偏差，富硒稻米的技术研发、富硒产品开发者 and 消费者都无所适从。

4) 大力发展富有机硒优质大米的市场前景。中国是世界上缺硒最严重的国家之一，低硒地区占全国总面积的 72%，部分地区属于严重缺硒区[22]，约 7 亿人硒摄入量长期严重不足[23]。因此，研究和应用

外源补硒技术, 提高农产品尤其是主粮的硒含量, 对低硒或严重缺硒地区而言显得尤为重要。研究表明, 植物可将环境中的无机硒(Se (IV)和 Se (VI))转化易于被人体吸收的 SeMet、SeCys 等有机硒并参与植物蛋白的构成[24]。有机硒是大米中硒形态的主要存在形式(约为 78.4%~89.1%) [25] [26], 无论自然高硒土壤或通过外源施硒均可提高水稻籽粒中有机硒的含量及比例[25] [27], 这为低硒或缺硒区富硒水稻开发奠定了理论基础。我国约三分之二的人口以大米为主食, 因此大力发展高品质富有机硒优质大米具有广阔的市场需求。株洲香之优农业科技发展与株洲市农业科学研究所创新研发的稻米有机硒“定向含有”技术, 可精准定制大米硒含量, 以满足不同人群的补硒需要, 如 2019 年开发的亚健康型富硒香米(品种为巴斯马蒂, 下同), 硒含量定制为 45 $\mu\text{g}/100\text{g}$, 实际 2 个生产基地精米硒含量平均 43 $\mu\text{g}/100\text{g}$ (变幅为 41 $\mu\text{g}/100\text{g}$ ~45 $\mu\text{g}/100\text{g}$); 2020 年开发的健康型富硒香米, 硒含量定制为 30 $\mu\text{g}/100\text{g}$, 实际 3 个生产基地精米硒含量平均 31 $\mu\text{g}/100\text{g}$ (变幅为 30 $\mu\text{g}/100\text{g}$ ~32 $\mu\text{g}/100\text{g}$); 2021 年开发的康复型富硒香米, 硒含量定制为 65 $\mu\text{g}/100\text{g}$, 实际 4 个生产基地精米硒含量平均 66.5 $\mu\text{g}/100\text{g}$ (变幅为 61 $\mu\text{g}/100\text{g}$ ~72 $\mu\text{g}/100\text{g}$); 且有机硒占比大幅提高到 99.5%, 大米硒品质居国内领先水平。该关键核心技术突破与应用, 成功解决了富硒水稻生产中硒含量不稳定、有机硒占比不高的技术瓶颈, 为高品质富有机硒优质米开发提供了重要的科技支撑, 对实现全民科学补硒、定量补硒具有重要的现实意义。

基金项目

湖南省科技特派员服务乡村振兴专项(2021NK4137), 株洲市农业科学研究所科技攻关项目(2021-5)。

参考文献

- [1] El-Shora, H.E. and Ali, A.S. (2011) Changes in Activities of Nitrogen Metabolism Enzymes in Cadmium Stressed Marrow Seedlings. *Asian Journal of Plant Sciences*, **10**, 117-124. <https://doi.org/10.3923/ajps.2011.117.124>
- [2] 喻华, 冯文强, 秦鱼生, 等. 镉胁迫对不同基因型水稻生长和镉吸收的影响[J]. 西南农业学报, 2013, 26(3): 878-883.
- [3] 宗良纲, 徐晓炎. 水稻对土壤中镉的吸收及其调控措施[J]. 生态学杂志, 2004, 23(3): 120-123.
- [4] 邓波儿, 刘同仇, 郑文娟. 黄棕壤性水稻土镉临界浓度的研究[J]. 华中农业大学学报, 1991, 10(4): 374-377.
- [5] 朱亮, 邵孝侯. 耕作层中重金属 Cd 形态分布规律及植物有效性研究[J]. 河海大学学报, 1997, 25(3): 50-56.
- [6] 陈涛, 吴燕玉, 张学询, 等. 张士灌区镉土改良和水稻镉污染防治研究[J]. 环境科学, 1980, 1(5): 7-11.
- [7] 曹仁林, 贾晓葵, 张建顺. 镉污染水稻土防治研究[J]. 天津农林科技, 1999(6): 12-17.
- [8] Lenz, M. and Lens, P.N.L. (2009) The Essential Toxin: The Changing Perception of Selenium in Environmental Sciences. *Sciences of the Total Environment*, **407**, 3620-3633. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2008.07.056>
- [9] Gavin, E. and Helmut, S. (2001) The Biochemistry of Selenium and the Glutathione System. *Environmental Toxicology and Pharmacology*, **10**, 153-158. [https://doi.org/10.1016/S1382-6689\(01\)00078-3](https://doi.org/10.1016/S1382-6689(01)00078-3)
- [10] Combs, G.F. (2001) Selenium in Global Food Systems. *British Journal of Nutrition*, **85**, 517-547. <https://doi.org/10.1079/BJN2000280>
- [11] Rayman, M.P. (2000) The Importance of Selenium to Human Health. *The Lancet*, **356**, 233-241. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(00\)02490-9](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(00)02490-9)
- [12] 张艳嫣, 陈丹, 谭艳玲, 等. 外源硒对低温胁迫下铁皮石斛幼苗的缓解效应及其抗氧化生理特征变化[J]. 西北植物学报, 2013, 33(4): 747-754.
- [13] Hu, Q.H., Yang, F.M., Pan, G.X., et al. (2001) Effect of Selenium on the Quality and Selenium Levels in Soybean. *Chinese Journal of Oil Crop Science*, **23**, 42-44.
- [14] Birringer, M., Pilawa, S. and Flohe, I. (2002) Trends in Selenium Biochemistry. *Natural Product Reports*, **19**, 693-718. <https://doi.org/10.1039/B205802M>
- [15] 谭周磁, 陈嘉勤, 薛海霞. 硒(Se)对降低水稻重金属 Pb, Cd, Cr 污染的研究[J]. 湖南师范大学自然科学学报, 2000, 23(3): 80-83.
- [16] 张海英, 韩涛, 田磊, 等. 草莓叶面施硒对其重金属镉和铅积累的影响[J]. 园艺学报, 2011, 38(3): 409-416.

-
- [17] 崔剑波. 生态环境中的生命元素硒与健康的研究生态学进展[J]. 生态学报, 2010, 6(4): 243-251.
- [18] 廖自基. 微量元素的环境化学及生物效应[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1992: 102-106.
- [19] 池忠志, 杨洋, 杨福明, 姜心禄, 郑家国. 生产富硒稻谷的硒肥施用技术研究[J]. 西南农业学报, 2011, 24(6): 2289-2292.
- [20] 黄太庆, 江泽普, 黄雁飞, 廖青, 邢颖, 梁潘霞. 不同配方含硒叶面肥对水稻富硒降镉的影响[J]. 南方农业学报, 2017, 48(7): 1185-1189.
- [21] 阳静, 龚建华, 欧立军, 邓建红, 杨永红, 邓雅文, 粟文俊. COVID 防治与硒营养关系研究与探讨[J]. 农业科学, 2020, 10(5): 263-272.
- [22] Wang, Z. and Gao, Y. (2001) Biogeochemical Cycling of Selenium in Chinese Environments. *Applied Geochemistry*, **16**, 1345-1351. [https://doi.org/10.1016/S0883-2927\(01\)00046-4](https://doi.org/10.1016/S0883-2927(01)00046-4)
- [23] 湖南省农业厅科教处与老科协. 硒与人体健康知识[M]. 武汉: 湖北省农业厅, 2007.
- [24] 王宗爽, 段小丽, 刘平, 等. 环境健康风险评估中我国居民暴露参数探讨[J]. 环境科学研究, 2009, 22(10): 1164-1170.
- [25] Premarathna, L., Mclaughlin, M.J., Kirby, J.K., *et al.* (2012) Selenate-Enriched Urea Granules Are Highly Effective Fertilizer for Selenium Biofortification of Paddy Rice Grain. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, **60**, 6037-6044. <https://doi.org/10.1021/jf3005788>
- [26] 崔朝解, 周琴, 胡小琪, 等. 中国居民谷类及薯类消费现状分析[J]. 中国食物与营养, 2008(3): 33-36.
- [27] 唐华俊, 李暂敏. 基于中国居民平衡膳食模式的人均粮食需求量研究[J]. 中国农业科学, 2012, 45(11): 2315-2327.