

不同富硒酵母对水稻硒吸收分配和品质的影响

张有利, 徐常健, 蒋志慧, 郭永霞*

(黑龙江八一农垦大学农学院, 国家杂粮工程技术研究中心, 黑龙江省作物-有害生物互作生物学及生态防控重点实验室, 黑龙江 大庆 163319)

摘要: 硒是维持动物和植物生物学功能的必需营养元素, 富硒肥料被广泛用于提升大米中硒水平的积累。针对硒元素缺乏导致水稻产量和品质降低的问题, 采用田间试验研究科学配比而成的含有富硒酵母和破壁型富硒酵母对寒地水稻生长性状、产量、硒含量、稻米品质的影响。分别采用 4 个水平的富硒酵母和破壁型富硒酵母材料在水稻扬花期和灌浆期对叶面喷施, 分别为富硒酵母 375 g/hm² (S1)、750 g/hm² (S2)、1125 g/hm² (S3)、1500 g/hm² (S4); 破壁型富硒酵母 375 g/hm² (B1)、750 g/hm² (B2)、1125 g/hm² (B3)、1500 g/hm² (B4) 以及一个对照组 (CK)。结果表明: 不同水平处理的水稻株高和有效穗数较 CK 组有增加趋势, 但无显著差异 ($P>0.05$)。与 CK 相比较, B4 组水稻千粒重、产量差异显著 ($P<0.05$), 产量达到 8172.0 kg/hm²; 破壁型富硒酵母对增产效果呈现剂量依赖的方式上升。破壁型富硒酵母组叶片硒含量显著增加, 硒含量 B1<B2<B3<B4, 且呈现剂量依赖式增加。S3 组叶片中硒含量显著增加 ($P<0.05$), S4 组叶片中硒含量极显著增加 ($P<0.01$)。水稻茎秆中硒含量 S3、S4、B2、B3、B4 组显著增加 ($P<0.05$)。水稻茎、叶对于富硒酵母的吸收规律呈现出叶片硒含量均高于茎秆的趋势。相对于富硒酵母, 破壁型富硒酵母能显著促进水稻叶片、茎秆对硒的吸收。S1 和 B1 处理精米中硒含量显著高于 CK ($P<0.05$), 其余组精米中硒含量极显著高于 CK ($P<0.01$), 且随着喷施浓度的升高, 各处理的硒含量呈现逐渐增加的趋势, 在破壁型富硒酵母施用剂量达到 1500 g/hm² 时, 硒含量达最大, 为 0.107 mg/kg, 与其他处理差异显著 ($P<0.01$)。喷施破壁型富硒酵母剂量为 1500 g/hm² 时可改善水稻垩白率, 提升糙米率, 对蛋白质、直链淀粉含量影响显著。综上所述, 叶面上施用富硒酵母和破壁型富硒酵母均可促进水稻对外源硒的吸收和累积, 且土壤施用剂量为 1500 g/hm² 的破壁型富硒酵母对水稻的生长、增产和硒的累积效果更好。

关键词: 富硒酵母; 水稻; 硒; 产量; 品质

硒是人体必不可少的微量元素, 然而中国大多数的地理区域存在硒缺乏的问题。硒的不均衡分布, 使部分地区土壤中缺硒, 同时也导致克山病等诸多疾病^[1-2]。为应对此类问题, 补充硒是对抗硒缺乏的有效举措, 植物被认为是增加膳食中硒含量的主要硒源, 水稻作为中国的主要食物来源, 富含硒的大米已被人们越来越多地纳入日常饮食中。硒的利用率和活性取决于其添加的浓度和形式^[3]。有机硒的添加成为高效、无毒的典型代表, 富硒酵母成为硒添加、补充剂的一种高效形式, 其具有无毒、高效、转化率高的特点。硒缺乏会引起动物免疫功能、生产性能、代谢功能以及抗应激能力降

低, 严重时导致动物死亡。研究表明, 硒添加不仅可以参与动物体内多种应激反应, 提升动物免疫力^[4], 同时可以保护植物, 在盐碱胁迫、重金属胁迫中均起到重要作用^[5-6]。试验表明, 土壤和叶面施硒均可增加植物可食部分的硒含量, 叶面喷施硒比在土壤上施用通常具有更高的生物利用率。所使用的肥料种类、喷洒方法、肥料中硒的种类均可影响植物中硒的富集^[7]。余侃等^[8]研究表明添加硒能够提高水稻产量, 提升水稻品质。稻米品质是水稻产业发展的核心问题, 与水稻产业可持续发展密切相关。蒸煮食味品质是评价水稻品质的关键条件。因此, 本文通过喷施科学配比的富硒酵母和破壁型富硒酵母, 提升酵母硒的利用率和植物硒含量, 评估水稻不同部位硒的生物利用率和对品质的影响, 并为外源硒肥用于缺硒水稻补硒的研究提供理论支撑。

1 材料与方法

1.1 试验概况

试验地位于黑龙江农垦集团总公司大兴农场分

收稿日期: 2020-04-01; 录用日期: 2020-04-30

基金项目: 黑龙江省应用技术与开发计划专项 (GA19B104); 黑龙江省农垦总局重点科研计划项目 (HKKYZD190204)。

作者简介: 张有利 (1976-), 男, 山东省安丘市人, 副教授, 硕士研究生, 主要从事水土保持与荒漠化防治、有机农业的教学与科研工作。E-mail: zhangyouli409@sina.com。

通讯作者: 郭永霞, E-mail: gyxia@163.com。

公司, 试验地土壤类型为草甸白浆土, 土壤硒含量 0.263 mg/kg, 碱解氮含量 161.4 mg/kg, 有效磷含量 29.8 mg/kg, 速效钾含量 131.3 mg/kg, 有机质含量 44.2 g/kg, 土壤 pH 6.3。

1.2 试验设计

试验用富硒酵母和破壁型富硒酵母配方由黑龙江八一农垦大学提供, 酵母硒是酵母菌处理亚硒酸钠转化而成的硒蛋白材料, 试验所用酵母硒的有机硒含量为 2100 mg/kg, 破壁酵母硒是用同样材料进行破壁处理, 颗粒更小, 硒含量相同。试验所用材料为酵母硒 50% 搭配悬浮剂、渗透剂等材料而成的一款专利酵母硒叶面肥。试验分为 8 个处理, 1 个对照, 共 9 个小区, 随机区组排列。分别为富硒酵母 375 g/hm² (S1)、富硒酵母 750 g/hm² (S2)、富硒酵母 1125 g/hm² (S3)、富硒酵母 1500 g/hm² (S4)、破壁型富硒酵母 375 g/hm² (B1)、破壁型富硒酵母 750 g/hm² (B2)、破壁型富硒酵母 1125 g/hm² (B3)、破壁型富硒酵母 1500 g/hm² (B4), 试验设不使用富硒酵母为对照组 (CK)。各小区面积均为 10 m × 6 m = 60 m²。在扬花期和灌浆期对水稻植株叶片均匀喷雾处理。有效成分 = 喷施量 × 50% × 2100 mg/kg。成熟期取样, 脱粒待测。

1.3 气象条件概述

喷施当天多云天气, 全天无降雨。2019 年有效积温 2686℃, 无霜期 141 d。6 ~ 7 月有利于水稻生长。8 月份出现长时间降雨、低温、寡照天, 此时期是水稻产量形成的关键时期, 温度低, 光照不足影响光合产物形成和运转, 导致水稻结实率和千粒重下降, 影响产量及品质。同时也影响水稻灌浆速度, 导致水稻成熟期拖后。

表 1 2019 年气象资料 (4 ~ 9 月份)

项目	旬别	时间					
		4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月
平均	上旬	2.6	11.1	18.0	21.7	22.5	19.7
气温 (℃)	中旬	8.0	16.2	15.9	23.0	19.9	13.4
	下旬	10.8	15.3	18.2	23.1	18.5	13.1
降水量 (mm)	上旬	2.5	12.0	4.0	5.5	69.4	40.1
	中旬	0.5	60.5	79.8	5.2	138.5	21.5
	下旬	1.5	64.1	32.9	62.5	69.7	4.8
日照	上旬	85.1	73.3	110.6	71.4	60.4	87.7
时数 (h)	中旬	100.5	72.6	47.8	91.5	27.6	88.4
	下旬	108.0	76.0	60.7	56.9	45.5	94.6

1.4 取样方式

田间取样连续数 10 穴, 计算产量平均数。取相邻的 1 穴, 进行产量构成因素调查。各处理取 3 点, 每点取 1 m³ 实脱。

1.5 原子荧光吸收法

使用原子荧光吸收法检测水稻茎、叶、精米中硒含量。对样品进行消解处理后, 使用硫脲将硒还原成四价, 硒化氢气体在氩气导入条件下激发产生原子荧光, 通过手机荧光强度计算硒浓度, 最终与标准作对比。

1.6 稻米的品质

相关指标采用 GB/T 17891-2017、GB 5009.9-2016、GB 1354-2018 方法测定。

1.7 数据处理

采用 Excel 2010 进行数据处理, 使用 SPSS 19.0 软件单因素方差分析对数据进行显著性分析, 采用 Graphpad 6 绘图。

2 结果与分析

2.1 不同酵母硒肥料对水稻生长性能的影响

2.1.1 不同处理株高和有效穗数、穗长的变化情况

由表 2 显示, 不同水平处理的水稻株高、有效穗数较对照组有增加趋势, 但无显著差异 ($P>0.05$); 穗长无显著变化。相同水平富硒酵母与破壁富硒酵母相比较, 株高、有效穗数和穗长无显著差异 ($P>0.05$)。

表 2 不同处理水稻株高、有效穗数和穗长调查结果

处理	株高 (cm)	有效穗数 (穗/穴)	穗长 (cm)
CK	104.6 ± 0.39ab	16.0 ± 0.28a	12.4 ± 0.10a
S1	104.1 ± 0.44ab	15.7 ± 0.35a	12.3 ± 0.02a
S2	104.3 ± 0.36ab	16.1 ± 0.31a	12.6 ± 0.09a
S3	103.8 ± 0.02b	16.1 ± 0.36a	12.5 ± 0.05a
S4	105.1 ± 0.58ab	15.5 ± 0.42a	12.5 ± 0.06a
B1	104.7 ± 0.35ab	15.8 ± 0.83a	12.1 ± 0.07a
B2	104.3 ± 0.58ab	15.1 ± 0.41a	12.6 ± 0.04a
B3	105.9 ± 0.42a	16.4 ± 0.22a	12.3 ± 0.06a
B4	105.3 ± 0.62ab	16.9 ± 0.47a	12.4 ± 0.08a

注: 同列数据后不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$), 相同字母或无字母表示差异不显著 ($P>0.05$)。下同。

2.1.2 不同处理农艺性状及产量构成

从表 3 中得出, 与对照组 (CK) 相比, 不同处理的富硒酵母和破壁型富硒酵母的穗粒数和

结实率无显著差异。当富硒酵母使用剂量为 1500 g/hm^2 (S4), 水稻千粒重差异显著 ($P<0.05$)。与 CK 组相比, B3、B4 千粒重差异显著, 即破壁型富硒酵母使用剂量 1125 、 1500 g/hm^2 , 千粒重差异显著 ($P<0.05$)。富硒酵母和破壁型富硒酵母均可以达到增产的效果。破壁型富硒酵母喷施剂量为 1500 g/hm^2 时 (B4), 产量达到 8172.0 kg/hm^2 。同时, 破壁型富硒酵母对增产效果呈现剂量依赖的方式上升。

表 3 不同处理水稻农艺性状和产量

处理	穗粒数 (粒/穗)	千粒重 (g)	结实率 (%)	实产 (kg/hm^2)
CK	$82.8 \pm 0.1ab$	$25.3 \pm 0.2b$	$90.7 \pm 0.2a$	$7885.5 \pm 2.9b$
S1	$82.7 \pm 0.2ab$	$25.1 \pm 0.3b$	$92.9 \pm 0.4a$	$7950.0 \pm 3.1b$
S2	$83.3 \pm 0.1ab$	$25.5 \pm 0.1ab$	$92.7 \pm 0.9a$	$8029.5 \pm 8.7ab$
S3	$83.5 \pm 0.09ab$	$25.6 \pm 0.2ab$	$91.5 \pm 0.2a$	$8098.5 \pm 6.5a$
S4	$84.3 \pm 0.1a$	$25.9 \pm 0.3a$	$92.6 \pm 0.3a$	$8055.0 \pm 5.4a$
B1	$82.3 \pm 0.08b$	$25.2 \pm 0.4b$	$92.5 \pm 0.6a$	$7975.5 \pm 5.2b$
B2	$84.5 \pm 0.06a$	$25.5 \pm 0.3ab$	$92.1 \pm 0.2a$	$8088.0 \pm 1.9a$
B3	$83.4 \pm 0.1ab$	$25.7 \pm 0.1a$	$91.9 \pm 0.2a$	$8157.0 \pm 3.6a$
B4	$83.4 \pm 0.05ab$	$25.8 \pm 0.1a$	$91.8 \pm 0.1a$	$8172.0 \pm 1.5a$

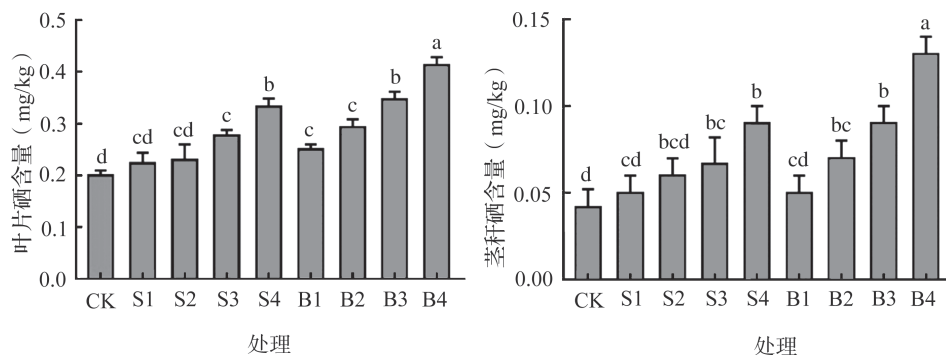


图 1 不同处理水稻叶片和茎秆中硒含量

注: 与对照组相比, * 表示差异显著 ($P<0.05$), ** 表示差异极显著 ($P<0.01$)。下同。

2.2.2 不同处理对水稻稻米中硒含量的影响

对水稻喷施不同浓度富硒酵母和破壁富硒酵母, 水稻精米硒含量高于 CK (图 2), 说明二者均可以在一定程度上提升水稻对硒的富集能力。较 CK 组相比, S1、B1 组精米中硒含量增加显著 ($P<0.05$), S2、S3、S4、B2、B3、B4 精米中硒含量增加极显著 ($P<0.01$)。喷施富硒酵母和破壁型富硒酵母的精米硒含量增加显著, 且随着喷施浓度的升高, 各处理的硒含量呈现逐渐增加的趋势, 其中精米硒含量表现为 $S2<S3<S4$, $B2<B3<B4$ 。在用量达到 1500 g/hm^2 时 (B4), 硒的含量最大 (0.107 mg/kg)。水稻喷施富

2.2 不同酵母硒肥料对水稻硒含量的影响

2.2.1 不同处理对水稻茎、叶中硒含量的影响

对水稻喷施不同浓度富硒酵母和破壁富硒酵母, 结果如图 1 所示。水稻叶片和茎秆中硒含量随着喷施富硒酵母或破壁型酵母的剂量增加呈现增加的趋势, 叶片和茎秆中硒含量的 4 个处理均高于 CK。水稻叶片中硒含量 (图 1) 表明: 与 CK 相比, S3 组叶片中硒含量显著增加 ($P<0.05$), S4 组叶片中硒含量极显著增加 ($P<0.01$)。破壁型富硒酵母组叶片硒含量显著增加, 硒含量 $B1<B2<B3<B4$, 呈现剂量依赖式增加。其中 B3、B4 组叶片含硒量极显著增加 ($P<0.01$)。水稻茎秆中硒含量 (图 1) 结果表明: 与 CK 相比, S3、S4 B2 茎秆硒含量显著增加 ($P<0.05$)。B3、B4 茎秆硒含量极显著增加 ($P<0.01$)。水稻茎、叶中整体的吸收规律呈现出叶片硒含量均高于茎秆的趋势。综合水稻茎、叶中硒含量的结果表明, 相对于富硒酵母, 破壁型富硒酵母能显著促进水稻叶片、茎秆对硒的吸收。

硒酵母和破壁型富硒酵母, 可以提升水稻精米的硒含量。

2.3 不同酵母硒肥料对水稻品质的影响

2.3.1 外观品质

由表 4 可知, 叶面喷施不同浓度的富硒酵母和破壁型富硒酵母后, 与 CK 相比, S3 和 S4 在垩白率上均降低了 1%, 但是 B2 的垩白率较 CK 上升了 1%, 其中 B4 的改善效果最为明显。叶面喷施不同浓度的富硒酵母和破壁型富硒酵母对稻米透明度无显著影响。

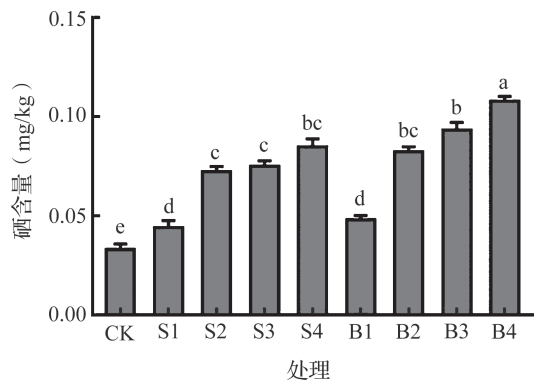


图 2 不同处理水稻精米中硒含量

表 4 不同处理对水稻外观品质和碾磨品质的影响

处理	外观品质		碾磨品质		
	垩白率 (%)	透明度 (级)	糙米率 (%)	精米率 (%)	整精米率 (%)
CK	7.0 ± 0.1ab	1	79.3 ± 0.2a	71.4 ± 0.10a	71.3 ± 0.7ab
S1	7.0 ± 0.1ab	1	79.2 ± 0.1a	71.1 ± 0.08a	69.9 ± 0.4b
S2	7.0 ± 0.1ab	1	79.5 ± 0.3a	71.2 ± 0.10a	70.8 ± 0.9ab
S3	6.0 ± 0.1b	1	79.9 ± 0.1a	71.0 ± 0.02a	70.8 ± 0.5ab
S4	6.0 ± 0.1b	1	79.3 ± 0.1a	71.7 ± 0.04a	70.9 ± 1.0ab
B1	7.0 ± 0.1ab	1	79.7 ± 0.3a	71.5 ± 0.08a	71.6 ± 0.6ab
B2	8.0 ± 0.1a	1	79.0 ± 0.1a	71.0 ± 0.11a	70.8 ± 1.0ab
B3	6.0 ± 0.1b	1	79.7 ± 0.2a	72.0 ± 0.04a	71.9 ± 0.6a
B4	5.6 ± 0.1b	1	80.0 ± 0.1a	71.7 ± 0.02a	71.5 ± 0.7ab

2.3.2 碾磨品质

酵母硒肥和破壁型富硒酵母对稻米碾磨品质的影响,如表 4 所示。不同处理间碾磨品质分析结果表明: S3 的糙米率为 79.9%,较常规对照高 0.6 个百分点; B4 的糙米率为 80.0%,较常规对照高 0.7 个百分点; B3 精米率 72.0%,较常规对照高 0.6 个百分点; B3 整精米率 71.9%,较常规对照高 0.6 个百分点;综合碾磨品质分析,喷施破壁型富硒酵母使用剂量为 1125 g/km² 时对水稻碾磨品质提升最佳。

2.3.3 蒸煮和营养品质

蛋白质是稻米的重要组成成分,对稻米蒸煮和营养品质有着不可忽视的作用。直链淀粉含量是衡量蒸煮品质的重要指标之一。因此,通过蛋白质和直链淀粉来评价富硒酵母和破壁型富硒酵母对稻米蒸煮和营养品质的影响。如表 5 所示,不同处理间分析结果表明:与 CK 组相比, B4 组蛋白质含量

显著升高。S4、B3、B4 组直链淀粉含量显著提高。水分是评价水稻种子活力的重要指标,同样是评估稻米活性的指标,结果显示水分含量无显著变化。

表 5 不同处理对稻米蒸煮和营养品质的影响 (%)

处理	蛋白质	直链淀粉	水分
CK	7.3 ± 0.1b	16.7 ± 0.1b	13.5 ± 0.2a
S1	7.5 ± 0.2ab	17.2 ± 0.3ab	13.4 ± 0.4a
S2	7.5 ± 0.1ab	17.3 ± 0.4ab	14.0 ± 0.6a
S3	7.4 ± 0.3b	17.9 ± 0.1a	13.2 ± 0.3a
S4	7.5 ± 0.1ab	17.9 ± 0.1a	13.5 ± 0.5a
B1	7.3 ± 0.2b	17.2 ± 0.4ab	14.2 ± 0.6a
B2	7.3 ± 0.2b	17.0 ± 0.5b	13.2 ± 0.4a
B3	7.5 ± 0.1ab	18.0 ± 0.1a	13.4 ± 0.3a
B4	7.6 ± 0.1a	17.9 ± 0.3a	13.3 ± 0.2a

3 讨论

水稻是世界一半以上人口的主要主食作物,水稻产量和品质是稻米生产的主要考虑因素。水稻品质由许多参数来评价,包括产量、生长性能、稻米品质、所含营养等。硒是动植物生长不可缺少的元素之一,其在维持内环境稳态和保持生理生化功能中起着关键作用^[9]。因此,全面评估水稻中硒的积累和分配对水稻产业至关重要。研究表明,通过对植物叶片使用含硒制剂,可以使营养直接且快速吸收并转运到植物的其他部位^[10]。富硒酵母是一种新兴的安全硒添加方式。试验表明,喷施破壁型富硒酵母的剂量为 1500 g/hm² 时可以显著提升水稻千粒重。叶面喷施酵母硒可提高水稻产量,随着硒用量的增加产量也不断增加,叶面喷施富硒酵母可在一定程度上提高水稻产量,这与郭天宇^[11]的试验结果相似。硒的添加在一定程度上对水稻产量的影响呈线性关系^[12],同样也有研究表明,硒的过度添加会遏制水稻的产量。本试验研究结果显示,喷施破壁型富硒酵母可以达到增产的效果,且水稻的增产随着破壁型富硒酵母使用剂量的增加而增加。破壁型富硒酵母增产效果好于富硒酵母,这可能与破壁这一工艺有着密切关系。酵母是一种常见用于饲料生产的单细胞蛋白原料,可以通过多种方式进行深加工从而提升产品性能,破壁是常见的加工方式之一^[13]。酵母破壁后细胞表面通透性增加,释放出游离氨基酸、可溶性蛋白、氨基酸态氮等物质,增加作物对其吸收的能力^[14]。因此,破

壁后酵母释放的物质可能是促进水稻产量增加的重要因素。众多研究表明,叶面施用硒可以显著提高作物(如水稻、小麦)中的硒含量^[15]。通过对水稻叶面喷施富硒酵母和破壁型富硒酵母,可以提高水稻叶片、茎秆、精米中硒含量,与 Roberto 等^[16]的研究结果相似。水稻茎、叶对于富硒酵母的吸收规律呈现出叶片硒含量均高于茎秆的趋势,余侃等^[8]的研究也得到相似的结果。两组试验中均为喷施剂量为 1500 g/hm² 时,水稻叶片和精米中硒含量最高,达到了 0.107 mg/kg。综合水稻茎、叶中硒含量,相对于富硒酵母,破壁型富硒酵母能显著促进水稻叶片、茎秆对硒的吸收,在一定程度上提升稻米对硒的富集能力。叶面喷施破壁型富硒酵母比富硒酵母更容易被植物吸收利用,可以更有效地提高水稻的产量,提高糙米的硒含量和改善稻米品质。垩白是评价水稻外观品质的重要指标,垩白谷物比正常谷物更软,在碾磨过程中容易碎裂,会影响水稻外观从而导致市场价值降低。直链淀粉含量是导致米饭变粘和变软的原因之一;同样,富硒水稻的蛋白质含量也会变化,从而影响稻米蒸煮过程的物理和化学特性。蛋白质含量通常受环境条件、基因型等多种因素控制。叶面喷施破壁型富硒酵母可以改善稻米蒸煮品质,提高直链淀粉含量,降低垩白率,同时也提高了稻米的蛋白质含量。精米蛋白质含量的提升会使米饭硬度变大,黏度降低,导致稻米蒸煮和食味品质下降。但也有研究表明,适量的蛋白质有利于蒸煮和食味品质的提升^[17]。因此,过高或过低的稻米蛋白质含量均会降低蒸煮和食味品质。有研究表明,稻米直链淀粉含量高的品种蛋白质含量低^[18],这与本次研究结果有差异,研究表明谷物中的蛋白质含量和直链淀粉含量因土壤类型、水分、土壤肥力等诸多因素而变化,而且影响制粉质量。可见,稻米蛋白质含量与直链淀粉含量存在着复杂的关系。

4 结论

不同水平的富硒酵母和破壁型富硒酵母能够提升水稻的产量以及提高水稻叶、茎、精米对硒的吸收和富集,且破壁型富硒酵母效果更好。

破壁型富硒酵母能够通过剂量依赖方式增加水稻叶、茎、精米中的硒含量,同时通过改变水稻中蛋白质、直链淀粉含量从而提升稻米蒸煮和营养品质。

叶面喷施破壁型富硒酵母剂量为 1500 g/hm² 时,可显著增加水稻产量,提升水稻叶片、茎、精米对硒的吸收和富集,并提升水稻蒸煮和营养品质。

参考文献:

- [1] 张勇胜,李仁兰,刘妍,等. 硒对人体健康作用的研究进展[J]. 内科, 2018, 13(4): 623-625, 662.
- [2] Hatfield D L, Tsuji P A, Carlson B A, et al. Selenium and selenocysteine: Roles in cancer, health, and development [J]. Trends in Biochemical Sciences, 2014, 39: 112-120.
- [3] 龚如雨. 大米中硒的赋存形态及其生物可利用度研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2018.
- [4] Wichtel J J, Craigie A L, Freeman D A, et al. Effect of selenium and iodine supplementation on growth rate and on thyroid and somatotrophic function in dairy calves at pasture [J]. Journal of Dairy Science, 1996, 79(10): 1865-1872.
- [5] 位晶. 外源硒对玉米根系形态和养分吸收的影响及在盐胁迫中作用[D]. 保定: 河北大学, 2019.
- [6] 秦晓明, 聂兆君, 刘红恩, 等. 施硒对冬小麦镉吸收、迁移及分配的影响[J]. 西北农业学报, 2019, 28(6): 898-905.
- [7] 耿丽平, 乔斌, 赵全利, 等. 土壤条件下外源硒对黄芩吸收和转运硒的影响[J]. 水土保持学报, 2018, 32(2): 372-376.
- [8] 余侃, 黄思思, 龙小玲, 等. 生物有机硒对稻米品质性状及硒吸收分配的影响[J]. 食品科技, 2019, 44(11): 168-174.
- [9] Zhang M, Tang S, Huang X, et al. Selenium uptake, dynamic changes in selenium content and its influence on photosynthesis and chlorophyll fluorescence in rice (*Oryza sativa* L.) [J]. Environmental and Experimental Botany, 2014, 107: 39-45.
- [10] Farooq M U, Tang Z, Zeng R, et al. Accumulation, mobilization, and transformation of selenium in rice grain provided with foliar sodium selenite [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2019, 99(6): 2892-2900.
- [11] 郭天宇. 叶面喷施不同硒肥对水稻含硒量、产量及品质的影响[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2016.
- [12] 李云, 林硕, 金磊, 等. 土壤硒水平和硒肥对水稻硒吸收利用的影响[J]. 安徽农业科学, 2018, 46(35): 135-136.
- [13] 周小辉, 陈毛清, 曹诗国, 等. 酵母破壁程度测定方法的研究[J]. 中国饲料, 2020(1): 115-118.
- [14] 尹敬博, 郜陆敏, 万丹, 等. 酵母水解物在母猪生产中的应用[J]. 中国饲料, 2018(23): 87-91.
- [15] Wang Y D, Wang X, Wong Y S, Generation of selenium-enriched rice with enhanced grain yield, selenium content and bioavailability through fertilisation with selenite [J]. Food Chemistry, 2013, 141(3): 2385-2393.
- [16] Roberto, D' Amato, Chiara M, et al. Selenium biofortification in rice (*Oryza sativa* L.) sprouting: Effects on Se yield and nutritional traits with focus on phenolic acid profile. [J]. Journal

- of Agricultural and Food Chemistry, 2018, 66 (16): 4082–4090.
- [17] 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.
- [18] Gealy D R, Bryant R J. Seed physicochemical characteristics of field-grown US weedy red rice (*Oryza sativa*) biotypes: Contrasts with commercial cultivars [J]. Journal of Cereal Science, 2009, 49 (2): 239–245.

Effects of different selenium-enriched yeast on the absorption and distribution of selenium and quality of rice

ZHANG You-li, XU Chang-jian, JIANG Zhi-hui, GUO Yong-xia* (College of Agriculture, Heilongjiang Bayi Agricultural University, National Coarse Cereals Engineering Research Center, Heilongjiang Provincial Key Laboratory of Crop-Pest Interaction Biology and Ecological Control, Heilongjiang Daqing 163319)

Abstract: Selenium is an essential nutrient for the biological function of animals and plants, and selenium-rich fertilizers are widely used to promote the accumulation of selenium in rice. In response to the low rice yield and quality caused by the lack of selenium, a field experiment was conducted to study the effects of selenium-enriched yeast and broken-wall selenium-enriched yeast on growth characters, yield, selenium content and rice quality in cold region. Selenium-enriched yeast and broken-wall selenium-enriched yeast materials were sprayed on the leaves of rice at flowering and filling stages at 4 levels; the selenium-enriched yeast was 375 g/hm² (S1), 750 g/hm² (S2), 1125 g/hm² (S3) and 1500 g/hm² (S4), respectively, the broken-wall selenium-enriched yeast was 375 g/hm² (B1), 750 g/hm² (B2), 1125 g/hm² (B3), 1500 g/hm² (B4), and there was a control group (CK). The results showed that the plant height and effective panicle number of rice treated at different levels had an increasing trend compared with CK group, but there was no significant difference ($P>0.05$). Compared with CK, the 1000-grain weight and yield of B4 group were significantly different ($P<0.05$), and the yield increased significantly to 8172.0 kg/hm². The selenium content in the leaves of the broken-wall se-enriched yeast group was significantly increased, and the selenium content B1<B2<B3<B4 was dose-dependent. The content of selenium in leaves of S3 group was significantly increased ($P<0.05$), and that of S4 group was extremely significantly increased ($P<0.01$). The selenium contents of rice stem S3, S4, B2, B3 and B4 increased significantly ($P<0.05$). The absorption of rice stems and leaves to selenium-enriched yeast showed a trend of higher selenium content in leaves than in stems. Compared with selenium-enriched yeast, selenium-enriched yeast with broken wall significantly promoted the absorption of selenium in rice leaves and stalks. The selenium content of milled rice in S1 and B1 treatment group was significantly higher than that of CK ($P<0.05$), and the selenium content of milled rice in other treatment groups was extremely significantly higher than that of CK ($P<0.01$), when the dosage of broken-wall selenium-enriched yeast reached 1500 g/hm², the content of selenium reached 0.107 mg/kg, which was significantly different from other treatments ($P<0.01$). Spraying broken-wall selenium-enriched yeast 1500 g/hm² improved rice chalkiness rate, increased brown rice rate, and significantly affected protein and amylose content. To sum up, application of selenium-enriched yeast and broken-wall selenium-enriched yeast can promote the absorption and accumulation of exogenous selenium in rice, the effect of applying 1500 g/hm² broken-wall selenium-enriched yeast on rice growth, yield increased and selenium accumulation was better.

Key words: selenium-enriched yeast; rice; selenium; yield; quality