

乳酸菌发酵改善脱脂富硒米糠的抗氧化活性

张嘉妮¹, 张晓轩¹, 王大毛¹, 赵国华¹, 喻俊磊^{2,*}, 雷琳^{1,3,*}

(1.西南大学食品科学学院, 重庆 400715; 2.江西省检验检测认证总院食品检验检测研究院, 江西 南昌 330046;

3.广西农产资源化学与生物技术重点实验室, 广西 玉林 537000)

摘要: 富硒米糠是生产富硒精米过程中的主要副产品, 富含硒、膳食纤维及酚类化合物等活性物质, 但其高值化利用尚未充分开发。本研究利用4种乳酸菌(嗜酸乳杆菌、嗜热链球菌、植物乳杆菌、保加利亚乳杆菌)对脱脂富硒米糠进行发酵处理, 比较了发酵后富硒米糠理化指标、营养特性、微观结构、物化特性及抗氧化活性。结果表明, 乳酸菌发酵使脱脂富硒米糠非水溶性膳食纤维/水溶性膳食纤维增加20%~45%。发酵后富硒米糠总酚、总黄酮质量分数分别增加5%~6%、16%~31%, 且无机硒转化为SeCys₂的效力提高42%~49%。发酵使富硒米糠粒径变小, 颗粒表面疏松多孔, 水合特性、胆固醇吸附力和抗氧化活性增强。主成分分析综合得分排序为植物乳杆菌>保加利亚乳杆菌>嗜热链球菌>嗜酸乳杆菌, 其中植物乳杆菌体外抗氧化活性相对最强, 总酸、SeCys₂、总酚和总黄酮含量相对最高。本研究为促进富硒米糠的精深开发利用提供了一定的理论依据。

关键词: 富硒米糠; 乳酸菌; 硒代氨基酸; 可溶性膳食纤维; 抗氧化活性

Improvement of Antioxidant Activity of Defatted Selenium-Enriched Rice Bran by Lactic Acid Bacteria Fermentation

ZHANG Jian¹, ZHANG Xiaoxuan¹, WANG Damao¹, ZHAO Guohua¹, YU Junlei^{2,*}, LEI Lin^{1,3,*}

(1. College of Food Science, Southwest University, Chongqing 400715, China;

2. Food Inspection and Testing Research Institute of Jiangxi General Institute of Testing and Certification, Nanchang 330046, China;

3. Guangxi Key Lab of Agricultural Resources Chemistry and Biotechnology, Yulin 537000, China)

Abstract: Selenium-enriched rice bran is a major by-product in the production of selenium-enriched polished rice, which is rich in selenium, dietary fiber, and active substances such as phenolic compounds. However, the high-value utilization of selenium-enriched rice bran has not been fully explored. In this study, four strains of lactic acid bacteria (*Lactobacillus acidophilus*, *Streptococcus thermophilus*, *L. plantarum*, and *L. delbrueckii* subsp.) were used to ferment defatted selenium-enriched rice bran. The physicochemical properties, nutritional characteristics, microstructure, physicochemical properties and antioxidant activity of selenium-enriched rice bran were compared before and after fermentation. The results showed that lactic acid bacteria fermentation increased the insoluble dietary fiber/water-soluble dietary fiber ratio in selenium-enriched rice bran by 20%–45%, the contents of total phenols and total flavonoids by 5%–6% and 16%–31%, respectively, and the conversion efficiency of inorganic selenium to SeCys₂ by 42%–49%. Moreover, the fermentation reduced the particle size of selenium-enriched rice bran, made the surface more loose and porous, and enhanced the hydration properties, cholesterol adsorption capacity and antioxidant activity. The decreasing order of the comprehensive scores of fermented selenium-enriched rice bran in principal component analysis (PCA) was *L. plantarum* > *L. delbrueckii* subsp. > *S. thermophilus* >

收稿日期: 2023-04-16

基金项目: 重庆市自然科学基金面上项目 (cstc2021jcyj-msxmX1097);

广西农产资源化学与生物技术重点实验室开放基金资助项目 (2021KF06);

重庆市技术创新与应用发展项目-重点项目 (CSTB2022TIAD-KPX0092);

2022年重庆市“留创计划”重点项目(创新类); 国家自然科学基金面上项目 (32172158)

第一作者简介: 张嘉妮 (1997—) (ORCID: 0009-0003-7911-8182), 女, 硕士研究生, 研究方向为食品化学与营养学。

E-mail: 935051292@qq.com

*通信作者简介: 喻俊磊 (1986—) (ORCID: 0009-0006-2975-3331), 男, 高级工程师, 硕士, 研究方向为食品检验。

E-mail: 410231868@qq.com

雷琳 (1986—) (ORCID: 0000-0003-3304-6243), 女, 副教授, 博士, 研究方向为粮油食品加工与营养。

E-mail: leilinsky@swu.edu.cn

L. acidophilus. Among these samples, the sample fermented with *L. plantarum* exhibited the strongest antioxidant activity *in vitro*, as well as the highest contents of total acid, SeCys₂, total phenols and total flavonoids. This study provides a theoretical basis for the intensive development and utilization of selenium-enriched rice bran.

Keywords: selenium-rich rice bran; lactic acid bacteria; selenium amino acids; soluble dietary fiber; antioxidant activity

DOI:10.7506/spkx1002-6630-20230416-150

中图分类号: TS210.9

文献标志码: A

文章编号: 1002-6630 (2023) 24-0146-09

引文格式:

张嘉妮, 张晓轩, 王大毛, 等. 乳酸菌发酵改善脱脂富硒米糠的抗氧化活性[J]. 食品科学, 2023, 44(24): 146-154.

DOI:10.7506/spkx1002-6630-20230416-150. <http://www.spkx.net.cn>

ZHANG Jiani, ZHANG Xiaoxuan, WANG Damao, et al. Improvement of antioxidant activity of defatted selenium-enriched rice bran by lactic acid bacteria fermentation[J]. Food Science, 2023, 44(24): 146-154. (in Chinese with English abstract)

DOI:10.7506/spkx1002-6630-20230416-150. <http://www.spkx.net.cn>

米糠是稻米碾磨加工后, 形成精米的主要副产物之一, 含有较丰富的油脂、蛋白质、膳食纤维、矿物质、B族维生素、VE、谷维素及少量糖等。米糠占稻谷质量的6%, 但占稻谷营养的比例约60%^[1]。每年, 米糠产量在全球约52~70万 t, 在中国约11~15万 t, 其中90%用作动物饲料, 9%用于生产米糠油, 人类食物消费量仅占1%, 米糠资源尚未得到充分利用。目前, 通过外源添加开发膳食纤维强化食品, 以解决中国居民膳食纤维摄入不足的问题, 如高纤维面制品、奶制品、肉制品、饮料、糕点等, 是当前研究热点^[2]。然而, 富硒米糠水不溶性膳食纤维 (insoluble dietary fiber, IDF) 含量较高, 直接添加会造成食品口感粗糙、质地劣化等问题。富硒米糠硒含量在80~400 μg/kg, 兼具硒强化和补充膳食纤维的双重作用。我国富硒稻谷产区涉及恩施、开阳、宜春等10余个地区, 为富硒米糠精深加工提供了原料保障。如果能够采用合理改性方法同时提高米糠水溶性膳食纤维 (soluble dietary fiber, SDF) 和有机硒含量, 可为富硒米糠在食品中的添加提供新策略和技术支持。

乳酸菌发酵可提高原料营养价值、功能特性及感官品质, 因条件温和, 经济环保安全, 目前是谷物加工的一种重要方法, 在改善食品和成分的营养效果方面具有很大潜力^[3]。近年来, 利用乳酸菌发酵对农副产品的开发利用日益广泛, 集中于米糠、麸皮、豆渣等膳食纤维特性的研究, 但对富硒米糠有机硒和SDF转化、抗氧化性的研究较少。研究表明, 利用保加利亚乳杆菌和嗜热链球菌对麸皮进行联合发酵后, SDF的产量从4.2%提高到7.6%, 溶解度、持水和持油力、膨胀能力、亚硝酸盐、胆酸钠和胆固醇的吸附力等均得到提高^[4]。

目前, 国内米糠精深加工位居米糠油加工下游, 通行办法是挤压膨化处理新鲜米糠, 浸提稻米油, 再分级提取米糠蛋白、膳食纤维等其他功能性成分^[5]。因此, 本研究以挤压膨化富硒米糠为原料, 经脱脂处理后, 利用4种乳酸菌进行固态发酵, 比较发酵后理化指标、营养特

性、微观结构、物化特性差异, 并探讨其抗氧化活性变化。拟采用主成分分析法对多个指标进行综合考察, 筛选出提升抗氧化能力最强的乳酸菌株, 以为富硒米糠的精深加工与开发提供理论参考。

1 材料与amp;方法

1.1 材料与试剂

新鲜富硒米糠 湖北恩施博方商贸公司。
嗜酸乳杆菌 (*Lactobacillus acidophilus* 336636, *La*)、嗜热链球菌 (*Streptococcus thermophilus* 134430, *St*)、植物乳杆菌 (*L. plantarum* 336421, *Lp*)、保加利亚乳杆菌 (*L. delbrueckii* subsp. 187941, *Lb*) 北纳生物科技有限公司; MRS肉汤培养基 青岛海博生物技术有限公司; 甲基硒代半胱氨酸 (Selenomethylselenocysteine, SeMeCys)、硒代胱氨酸 (selenocysteine, SeCys₂)、硒代蛋氨酸 (selenomethionine, SeMet) (分析纯) 4-氯-3,5-二硝基三氟甲苯 (3,5-dinitro-4-chlorobenzotrifluoride, CNBF) 上海麦克林生化科技有限公司; Megazyme膳食纤维总量检测试剂盒爱尔兰Megazyme公司; 水溶性VE (Trolox) 标准品 (试剂级)、福林-酚、2,2'-联氮-双(3-乙基苯并噻唑啉-6-磺酸) (2,2'-azino-bis(3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid, ABTS) (分析纯) 北京索莱宝科技有限公司; 1,1-二苯基-2-三硝基苯胍 (1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl, DPPH) (分析纯) 东京化成工业株式会社; 氯化亚铁 (分析纯) 上海阿拉丁生化科技股份有限公司; 芦丁 (分析纯) 合肥博美生物科技有限公司; 蛋白酶K 上海源叶生物科技有限公司; 乙腈 (色谱纯) 北京百灵威科技有限公司; 胆固醇标品 (分析纯) 成都市科隆化学品有限公司; 所有分离用有机溶剂均为国产分析纯。

1.2 仪器与设备

AHT36双螺杆挤压机 山东真诺智能设备有限公司；BSC-150恒温恒湿培养箱 上海博讯实业有限公司医疗设备厂；SW-CJ-1FD超净工作台 苏州安泰空气技术有限公司；L6分光光度计 上海仪电分析仪器有限公司；LC-20A高效液相色谱仪（SPD-20A可变波长紫外检测器） 岛津企业管理（中国）有限公司；Pro扫描电子显微镜 荷兰Phenom World公司；Spectrum100红外光谱仪 美国Perkin-Elmer仪器有限公司；MS2000激光粒度仪 英国马尔文仪器有限公司；PHS-3E pH计 上海雷磁仪器厂；KDN812定氮仪 上海纤检有限公司；Scientz-10ND真空冷冻干燥机 宁波新芝生物科技股份有限公司；PF52原子荧光光度计 北京普析通用仪器有限责任公司；WX-7000HP微波消解仪 上海屹尧仪器科技发展有限公司。

1.3 方法

1.3.1 原料预处理

参考方芳等^[6]的方法略作修改。将富硒米糠原料含水量调至20%，采用AHT36双螺杆挤压机对其进行挤压膨化灭酶处理（螺杆转速150 r/min，挤压膨化温度130℃）。冷却后，将其粉碎过100目筛，称取100 g加入300 mL正己烷，在室温条件下磁力搅拌脱脂2 h，重复上述步骤2次后，过滤，在45℃烘箱中干燥24 h至水分含量为6%，-20℃贮藏备用。

1.3.2 乳酸菌活化及发酵工艺

参考刘磊等^[7]的方法略作修改。富硒米糠121℃灭菌15 min，冷却后，将4种保存菌株用MRS活化为乳酸菌悬液8 lg (CFU/mL)后分别接种，接种量6%，置于37℃恒温发酵48 h，-80℃冷冻12 h后真空冷冻干燥48 h，分别得到嗜酸乳杆菌发酵样品（*La*-ERB）、嗜热链球菌发酵样品（*St*-ERB）、植物乳杆菌发酵样品（*Lp*-ERB）和保加利亚乳杆菌发酵样品（*Lb*-ERB），未接种乳酸菌样品即为对照（CERB），-20℃贮藏备用。

1.3.3 理化指标测定

蛋白质测定依据GB 5009.5—2016《食品中蛋白质的测定》进行；还原糖测定依据3,5-二硝基水杨酸法进行，检测波长为540 nm（*D*-氨基葡萄糖标准曲线方程为 $y=1.3542x-0.0443$ ， $R^2=0.9930$ ）^[7]；总膳食纤维（total dietary fiber, TDF）、SDF、IDF采用Megazyme膳食纤维总量检测试剂盒测定：将1 g样品依次经过 α -淀粉酶、蛋白酶和淀粉葡萄糖苷酶消化后，过滤，乙醇和丙酮洗涤残渣后干燥，称质量得到TDF残渣；酶解液通过直接过滤、热水洗涤残渣，干燥后称质量，得到IDF残渣；TDF、IDF残渣扣除蛋白质、灰分和空白即得TDF、IDF含量；TDF和IDF含量差值即为SDF含量；pH值及总酸度的测定依据AACC(2000)02—52方法^[8]进行；活菌数

测定依据GB 4789.35—2016《食品微生物学检测 乳酸菌检验》进行。

1.3.4 硒含量的测定

总硒含量参照GB 5009.93—2017《食品中硒的测定》，无机硒含量参照DBS 42/010—2018《富硒食品中无机硒的测定方法》。取0.5 g样品加入8 mL浓硝酸，混匀，敞口在通风橱放置10 min后放入微波消解仪进行消解，程序如表1所示。消解结束后室温冷却，将消解液倒入玻璃消解管中加入5 mL盐酸溶液（6 mol/L），在恒温消解仪中继续加热至溶液清亮，待溶液冷却后，定容至10 mL，采用原子荧光光谱法测定。总硒和无机硒含量差值即为有机硒含量。

表1 微波消解程序设定
Table 1 Microwave digestion program settings

步骤	温度/℃	保温时间/min	压力/bar
1	80	2	10
2	120	2	20
3	150	2	30
4	160	2	40
5	180	30	40

1.3.5 硒代氨基酸的测定

参考张路梦^[9]的方法略作修改，采用柱前衍生-反相高效液相色谱法进行测定。

样品前处理：称取0.1 g样品，加入1 mL Tris-HCl缓冲液（pH 7.5，30 mmol/L），室温超声30 min后，加入1 mL蛋白酶K溶液（2.5 mg/mL溶于pH 7.5 Tris-HCl缓冲液），混匀后充氮气，58℃恒温振荡反应4 h，离心取上清液。

样品衍生化：取0.4 mL上清液，加入0.8 mL硼酸缓冲液（pH 9.0）和0.6 mL CNBF衍生剂（70 mmol/L溶于乙腈），封口，60℃水浴30 min后冷却至室温，用硼酸缓冲液定容至3 mL，振荡30 s，再静置10 min，过0.22 μ m有机滤膜，待测。分别取质量浓度为8、16、32、48、64、80 μ g/ μ L的SeMeCys、SeMet、SeCys₂标准溶液，按照上述方法衍生化。

色谱条件：色谱柱为Thermo Hypersil Gold C₁₈反向色谱柱（250 mm×4.6 mm，5 μ m）；流动相A为30 mmol/L乙酸-乙酸钠缓冲液（pH 4.9，含0.02%三乙胺）；流动相B为乙腈-水（1:1，*V/V*）；柱温：30℃；流速：0.7 mL/min；检测波长：240 nm；进样量：20 μ L。

梯度洗脱条件：0~5 min，84% A、16% B；5~10 min，84%~64% A、16%~36% B；10~20 min，64%~55% A、36%~45% B；20~30 min，55%~40% A、45%~60% B；30~35 min，40%~35% A、60%~65% B；35~50 min，35%~30% A、65%~70% B；50~55 min，

30%~16% A、70%~84% B; 55~60 min, 84% A、16% B。

硒代氨基酸相对转化效力通过式(1)计算:

$$\text{硒代氨基酸相对转化效力}/\% = \frac{\text{乳酸菌发酵后硒代氨基酸含量}}{\text{CERB发酵后硒代氨基酸含量}} \times 100 \quad (1)$$

1.3.6 总酚和总黄酮测定

参照张媛等^[10]的方法并略作修改。称取1 g样品, 加入80%的甲醇溶液30 mL, 室温下避光磁力搅拌2 h后, 6 000 r/min离心15 min, 收集上清液定容至50 mL, 4 °C避光贮藏待测。总酚含量采用福林-酚比色法测定, 总黄酮含量采用硝酸铝比色法测定^[11]。

1.3.7 粒径的测定

参照龚卫华等^[12]的方法, 采用激光粒度仪对样品进行测定, 粒径分布由 D_{10} 、 D_{50} 、 D_{90} 和跨度值Span表述。

1.3.8 傅里叶变换红外光谱(Fourier transform infrared spectroscopy, FTIR)测定

参照龚卫华等^[13]的方法, 将富硒米糠与溴化钾混合研磨后压片, 检测波数范围为600~4 500 cm^{-1} , 扫描次数32次, 分辨率4 cm^{-1} 。

1.3.9 扫描电镜(scanning electron microscope, SEM)观察

参照薛艾莲等^[14]的方法并作修改, 取适量样品固定在导电胶上, 喷金处理样品, 在加速电压10 kV下放大500倍和5 000倍进行图像采集。

1.3.10 水合特性和持水力测定

参考Huang Xin等^[15]的方法并作修改, 进行持水力、膨胀力、溶解性及持油力测定。

1.3.10.1 持水力测定

取0.2 g (m_1) 样品于10 mL离心管(质量为 m_2), 加入5 mL蒸馏水, 涡旋, 37 °C振荡1 h, 4 000 r/min离心20 min后, 弃掉上清液, 称离心管和吸水后米糠总质量(m_3), 持水力通过式(2)计算:

$$\text{持水力}/(\text{g/g}) = \frac{m_3 - m_2 - m_1}{m_1} \quad (2)$$

1.3.10.2 膨胀力测定

取0.2 g (m_1) 样品置于10 mL量筒, 记录体积 V_1 , 加入8 mL蒸馏水, 涡旋混匀, 室温下静置24 h, 记录体积 V_2 , 膨胀力通过式(3)计算:

$$\text{膨胀力}/(\text{mL/g}) = \frac{V_2 - V_1}{m_1} \quad (3)$$

1.3.10.3 溶解性测定

取约0.5 g (m_1) 样品置于离心管, 加入8 mL蒸馏水, 80 °C水浴振荡30 min, 4 000 r/min离心20 min后, 取上清液于质量恒定烧杯(质量为 m_2), 于105 °C烘干至质量恒定, 记录烧杯与米糠总质量(m_3), 根据式(4)计算:

$$\text{溶解性}/\% = \frac{m_3 - m_2}{m_1} \times 100 \quad (4)$$

1.3.10.4 持油力测定

取约0.2 g (m_1) 样品于10 mL离心管(质量为 m_2)中, 加入5 mL葵花籽油, 涡旋, 37 °C振荡1 h, 4 000 r/min离心20 min, 弃掉上清液, 称离心管和米糠总质量(m_3), 持油力通过式(5)计算:

$$\text{持油力}/(\text{g/g}) = \frac{m_3 - m_2 - m_1}{m_1} \quad (5)$$

1.3.11 胆固醇吸附力测定

胆固醇标准曲线绘制: 以胆固醇为标准品, 采用邻苯二甲醛法测定标准曲线, 标准曲线方程 $y=0.0031x+0.027$, $R^2=0.9960$ 。

胆固醇吸附力测定根据Nsor-Atindana等^[16]的方法并稍加修改。将约0.2 g富硒米糠(m_1)与10 mL胆固醇标准溶液(1 mg/mL)充分混匀(质量为 m_2), 37 °C下恒温振荡2 h后, 8 000 r/min离心10 min, 吸取400 μL 上清液于试管中, 加入1.5 mL邻苯二甲醛溶液(0.1 mg/mL), 和1 mL浓硫酸, 涡旋30 s, 室温下放置10 min, 于550 nm波长处测定吸光度, 结合胆固醇标准曲线计算上清液胆固醇含量 m_3 。胆固醇吸附力通过式(6)计算:

$$\text{胆固醇吸附能力}/(\text{mg/g}) = \frac{m_2 - m_3}{m_1} \quad (6)$$

1.3.12 抗氧化活性测定

分别吸取1.3.6节提取的上清液, 进行DPPH自由基清除活性^[17]、ABTS阳离子自由基清除活性^[18]和铁离子还原能力(ferric ion reducing antioxidant power, FARP)测定^[19]。

1.4 数据处理

实验数据以 $\bar{x} \pm s$ 表示($n=3$), 用GraphPad Prism 9中的单因素方差分析对数据进行Tukey检验, $P<0.05$ 表示差异显著。采用SPSS 27.0进行Pearson相关性分析; 对14个评价因子(pH值、总酸、还原糖、SDF、IDF、SeMcCys、SeMet、SeCys₂、无机硒、总酚、总黄酮、DPPH自由基、ABTS阳离子自由基、FRAP)进行标准化处理以消除指标单位、度量的差异, 再采用SPSS 27.0软件进行主成分分析。

2 结果与分析

2.1 乳酸菌发酵对富硒米糠理化特性和基本组分的影响

表2表明, 不同乳酸菌发酵对富硒米糠理化特性和基本组分的影响存在一定差异。4种乳酸菌均能在富硒米糠体系中生长。乳酸菌能利用米糠还原糖作为碳源产酸^[7]。经48 h发酵后, 与CERB相比, *St*、*Lp*具有更强的产酸能力, 发酵后总酸质量浓度分别增加190%、208%, 而*La*、

*Lb*发酵后总酸质量浓度分别增加124%、161%；*La*、*St*、*Lp*、*Lb*还原糖含量分别降低42%、50%、47%、48%。4种乳酸菌发酵的富硒米糠总蛋白含量无显著差异。

表2 不同乳酸菌发酵对脱脂富硒米糠理化指标、基本组分和功效成分的影响

Table 2 Effects of different strains on the physicochemical properties, proximate and biological components of defatted selenium-rich rice bran

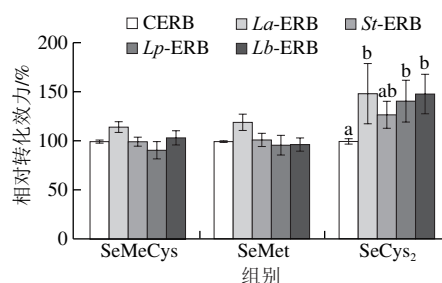
指标	CERB	<i>La</i> -ERB	<i>St</i> -ERB	<i>Lp</i> -ERB	<i>Lb</i> -ERB
活菌数 (lg (CFU/g))		8.61±0.06 ^c	9.37±0.04 ^d	9.47±0.05 ^b	9.37±0.02 ^b
pH	6.89±0.03 ^e	5.91±0.01 ^d	5.47±0.01 ^b	5.36±0.04 ^d	5.60±0.05 ^c
总酸/(mg/mL)	0.98±0.17 ^a	2.20±0.13 ^b	2.84±0.17 ^{cd}	3.02±0.08 ^d	2.56±0.12 ^{bc}
还原糖/(mg/g)	3.94±0.16 ^c	2.28±0.06 ^b	1.97±0.08 ^a	2.10±0.08 ^b	2.06±0.08 ^{ab}
总蛋白/%	13.99±0.25	13.41±0.25	13.98±0.26	13.57±1.08	14.11±0.26
TDF/%	31.56±0.23	31.21±0.31	32.02±0.41	32.14±0.49	31.03±0.61
SDF/%	8.39±0.23 ^a	9.98±0.31 ^b	12.39±0.41 ^c	11.04±0.49 ^b	7.83±0.61 ^a
IDF/%	23.16±0.94 ^{ab}	21.22±2.50 ^b	19.62±0.21 ^a	21.10±0.31 ^{ab}	23.19±0.79 ^b
SDF/TDF/%	26.61±0.74 ^d	32.00±1.01 ^b	38.71±1.28 ^c	34.36±1.52 ^d	25.26±1.97 ^e
有机硒/(mg/kg)	0.21±0.01 ^{ab}	0.19±0.01 ^a	0.24±0.02 ^b	0.21±0.02 ^{ab}	0.24±0.01 ^b
无机硒/(mg/kg)	0.10±0.01 ^c	0.05±0.01 ^a	0.06±0.02 ^{ab}	0.05±0.01 ^a	0.05±0.01 ^a
有机硒总硒/%	73.71±1.64	78.86±9.92	78.94±2.47	83.19±5.97	83.11±4.51
总酚/(mg/100g) (以没食子酸计)	353.84±6.94 ^a	370.51±7.14 ^{ab}	369.83±8.68 ^{ab}	375.95±5.14 ^{ab}	373.23±6.94 ^{ab}
总黄酮/(mg/100g) (以芦丁计)	111.06±5.72 ^a	128.30±6.71 ^{ab}	145.91±6.01 ^b	136.82±4.55 ^b	134.55±13.64 ^b

注：同一指标不同字母表示差异显著 ($P<0.05$)，下同。

2.2 乳酸菌发酵对功效成分的影响

如表2所示，不同乳酸菌发酵对脱脂富硒米糠功效成分的影响存在一定差异。发酵对富硒米糠TDF质量分数无显著影响，但*St*、*Lp*、*La*能显著促进IDF转化为SDF，IDF/SDF分别增加45% (*St*-ERB)、29% (*Lp*-ERB)、20% (*La*-ERB)。嗜热链球菌^[20]、植物乳杆菌^[21]、嗜酸乳杆菌^[22]在发酵时可能产生半纤维素酶、 β -葡萄糖苷酶等物质，有利于将IDF转化为SDF等。经乳酸菌发酵后，富硒米糠总酚、总黄酮含量分别增加5%~6%、16%~31%。本研究中*Lp*提升总酚的能力强于其他乳酸菌，在发酵过程中产生更多的酶分解糖苷键和酯键等，释放出更多的结合酚^[23]；而*La*发酵后总酚和总黄酮含量无显著差异 ($P>0.05$)，说明不同菌株发酵导致富硒米糠总酚和总黄酮含量的变化具有差异性^[24]。

如表2所示，脱脂富硒米糠主要含有机硒，占总硒质量分数73%以上。与对照组CERB相比，乳酸菌发酵能显著降低无机硒含量，有机硒/总硒增加7%~13%。乳酸菌通过代谢，能将无机硒转化为生物利用率更高、毒性更小的有机硒^[25]。脱脂富硒米糠有机硒主要含SeMet、SeCys₂和SeMeCys。与对照组CREB相比，经*La*、*Lp*、*Lb*发酵48 h后无机硒转化为SeCys₂的能力分别提高了49%、42%、49% (图1)。SeCys₂能够进一步被合成为硒蛋白，发挥抗氧化防御、调节甲状腺激素代谢等作用^[26]。



字母不同表示差异显著 ($P<0.05$)，图5同。

图1 不同乳酸菌发酵对SeMet、SeCys₂和SeMeCys相对转化效力的影响

Fig. 1 Effects of different strains on the relative conversion rates of SeMet, SeCys₂ and SeMeCys

2.3 乳酸菌发酵对脱脂富硒米糠粒径和结构的影响

2.3.1 粒径分析

不同乳酸菌发酵显著降低了富硒米糠粒径 (图2, $P<0.05$)。Lp-ERB组的 D_{10} 、 D_{50} 、 D_{90} 、Span最小。Span描述了粉体分布的宽度，粒径分布范围越窄，粉末均匀性越好。乳酸菌发酵产酸有助于降解大分子纤维素，减小粒径^[27]。富硒米糠粒径越小，比表面积越大，持水能力越强，口感越细腻，总酚、总黄酮含量的提取率越高 (表2)。

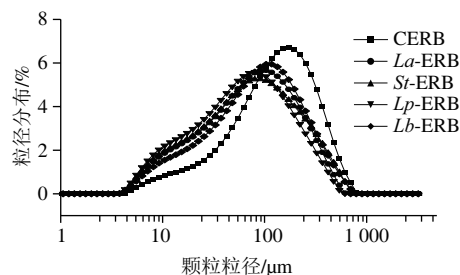


图2 不同乳酸菌发酵对粒径的影响

Fig. 2 Effects of different strains on particle size

2.3.2 FTIR分析

不同乳酸菌发酵后富硒米糠吸收峰无显著变化 (图3)。3 312 cm^{-1} 附近出现宽且圆滑的吸收峰，是纤维素和半纤维素O—H的伸缩振动形成。3 017 cm^{-1} 和2 851 cm^{-1} 附近的吸收峰是糖类—CH₂的伸缩振动形成。1 710 cm^{-1} 附近的吸收峰为脂类曲振动和蛋白质酰胺I带形成；1 531~1 152 cm^{-1} 附近的吸收峰为蛋白质和多糖的混合振动形成；1 021 cm^{-1} 附近的吸收峰主要是木质素、纤维素和半纤维素C—O—C和C—O的伸缩振动形成^[28]。乳酸菌发酵后，3 312 cm^{-1} 附近的吸收峰稍小于CERB组，表明乳酸菌发酵产生的酸或酶减弱了纤维素和半纤维素的分子间氢键相互作用力，但能力有限。

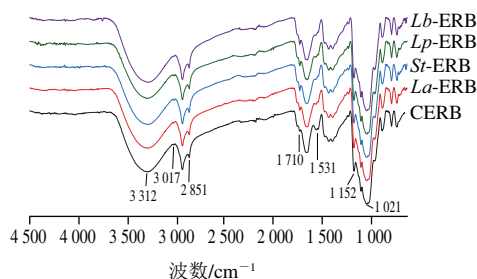
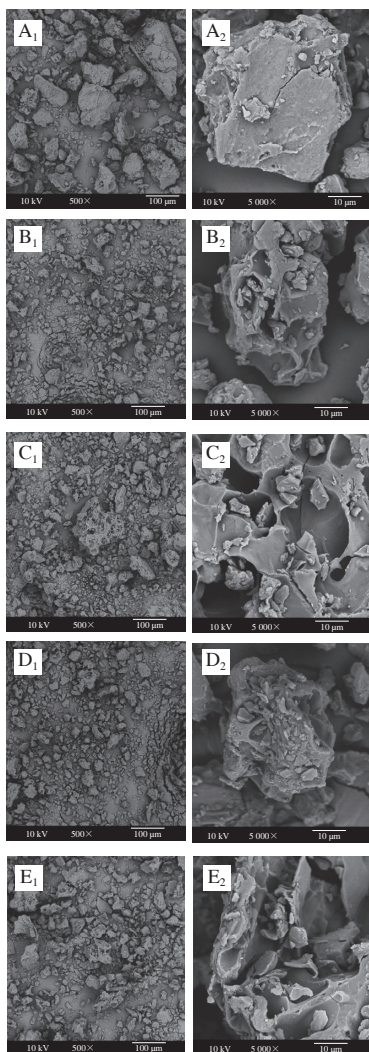


图3 不同乳酸菌发酵对FTIR的影响

Fig. 3 Effects of different strains on FTIR spectrum

2.3.3 微观结构观察

不同乳酸菌发酵后富硒米糠在500和5 000 倍数下的显微对比如图4所示。与CERB组相比, 乳酸菌发酵48 h后, 富硒米糠空间结构更疏松, 颗粒更小, 比表面积增加。松散的结构有助于提升脱脂富硒米糠的水化和吸附性能^[28]。



A~E. 分别表示CERB、La-ERB、St-ERB、Lp-ERB、Lb-ERB; 下标1、2.放大500、5 000 倍。

图4 不同乳酸菌发酵对微观结构的影响

Fig. 4 Effect of different strains on microstructure

2.4 乳酸菌发酵对物化特性的影响

如表3所示, 乳酸菌发酵48 h后, 富硒米糠持水力、胆固醇吸附力、溶解性得到显著提升 ($P < 0.05$), 膨胀力显著降低, 持油力无显著变化 ($P > 0.05$)。与CERB相比, La-ERB、St-ERB、Lp-ERB、Lb-ERB持水力和溶解性分别提升7%~20%和6%~18%, 这是因为乳酸菌发酵产生酸或酶减弱了纤维素和半纤维素分子间氢键相互作用力(图3), 而且富硒米糠结构更疏松(图4), 暴露出更多的极性基团, 与水形成更多的氢键或偶极子^[28]。对于糖脂代谢紊乱人群, 高胆固醇摄入会增加心血管疾病风险。与CERB相比, La-ERB、St-ERB、Lp-ERB、Lb-ERB胆固醇吸附力提升了3.2~7.6 倍, 这是因为乳酸菌发酵使富硒米糠结构变得疏松多孔(图4), 且SDF质量分数增加(表2)。相反, 与CREB相比, 乳酸菌发酵后富硒米糠膨胀力降低了3%~19%, 这可能是因为放置24 h后富硒米糠自身重量的挤压和颗粒物的沉降作用, 导致膨胀力减小。

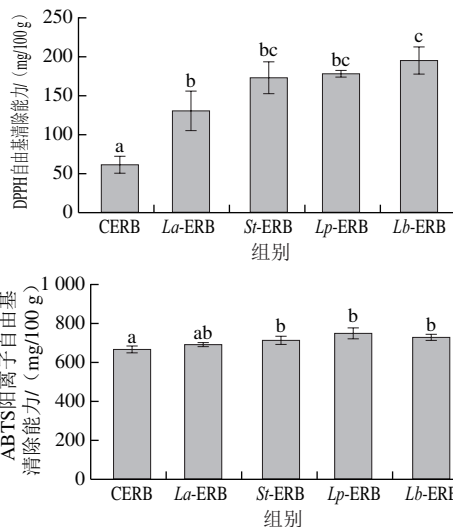
表3 不同乳酸菌发酵对物化特性的影响

Table 3 Effect of lactic acid bacteria fermentation on hydration properties

样品	持水力/(g/g)	溶解性/%	持油力/(g/g)	胆固醇吸附力/(mg/g)	膨胀力/(mL/g)
CERB	2.09 ± 0.02 ^a	22.46 ± 0.32 ^a	1.90 ± 0.11	1.28 ± 0.46 ^e	4.43 ± 0.18 ^c
La-ERB	2.23 ± 0.04 ^b	26.52 ± 0.63 ^c	1.96 ± 0.14	8.40 ± 1.53 ^{bc}	3.60 ± 0.23 ^a
St-ERB	2.47 ± 0.03 ^d	24.45 ± 0.63 ^b	2.05 ± 0.14	5.95 ± 1.20 ^b	4.30 ± 0.06 ^{bc}
Lp-ERB	2.50 ± 0.01 ^d	23.83 ± 0.50 ^b	1.95 ± 0.08	10.99 ± 0.22 ^c	3.91 ± 0.14 ^{ab}
Lb-ERB	2.38 ± 0.01 ^c	24.97 ± 0.20 ^{bc}	1.95 ± 0.14	5.34 ± 1.17 ^b	4.24 ± 0.21 ^{bc}

2.5 乳酸菌发酵对抗氧化能力的影响

如图5所示, 与CERB相比, La-ERB、St-ERB、Lp-ERB、Lb-ERB对DPPH自由基和ABTS阳离子自由基清除能力及总抗氧化能力分别提升113%~215%、4%~13%和8%~13%。这可能与乳酸菌发酵使富硒米糠变得疏松多孔, 被束缚的酚类和黄酮类物质更容易释放, 总酚和总黄酮含量升高有关^[10]。



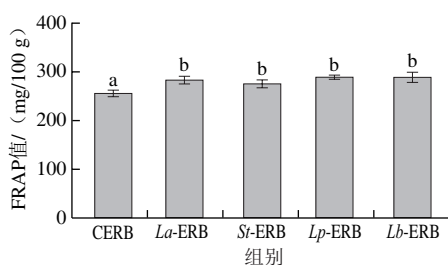


图5 乳酸菌发酵对体外抗氧化能力的影响

Fig. 5 Effects of different strains on antioxidant activity *in vitro*

2.6 乳酸菌发酵各指标与抗氧化活性的相关性及其主成分分析

2.6.1 各指标变化与抗氧化活性的相关性分析

如表4所示, DPPH自由基和ABTS阳离子自由基清除能力、FRAP值与pH值呈显著负相关 ($P < 0.05$), 但与总酚呈显著正相关 ($P < 0.05$); DPPH自由基和ABTS阳离子自由基清除能力与总酸呈显著正相关 ($P < 0.05$); DPPH自由基清除能力和FRAP与还原糖呈显著负相关 ($P < 0.05$); DPPH自由基清除能力和总黄酮呈显著正相关 ($P < 0.05$)。结果表明, 乳酸菌发酵富硒米糠产生的有机酸、总酚和总黄酮含量对抗氧化活性有显著影响^[29]。此外, FRAP值与SeCys₂呈显著正相关 ($P < 0.05$), 但与无机硒呈极显著负相关 ($P < 0.01$)。由图1可知, 乳酸菌发酵能显著促进脱脂富硒米糠无机硒转化为SeCys₂。SeCys₂是谷胱甘肽过氧化物酶 (glutathione peroxidase, GSH-Px) 的中心活性成分, GSH-Px是机体内广泛存在的一种自由基捕获酶, 具有清除自由基及其衍生物、减少脂质过氧化物形成、增强机体抗氧化损伤的能力。这可能是因为乳酸菌将富硒米糠中的无机硒为自身代谢所用从而促进GSH-Px的产生^[30], 进而提高了总抗氧化能力。

表4 乳酸菌发酵富硒米糠理化指标与抗氧化指标的相关性

Table 4 Correlation between physicochemical indexes and antioxidant activity in selenium-rich rice bran fermented by lactic acid bacteria

指标	DPPH自由基清除能力	ABTS阳离子自由基清除能力	FRAP值
pH值	-0.953*	-0.897*	-0.894*
总酸	0.936*	0.903*	0.871
还原糖	-0.932*	-0.788	-0.909*
SDF	0.315	0.335	0.201
IDF	-0.355	-0.301	-0.268
SeMeCys	-0.189	-0.488	0.026
SeMet	-0.326	-0.575	-0.108
SeCys ₂	0.775	0.671	0.956*
无机硒	-0.864	-0.772	-0.975**
总酚	0.919*	0.893*	0.982**
总黄酮	0.891*	0.746	0.718

注: *在 $P=0.05$ 水平显著相关; **在 $P=0.01$ 水平显著相关。

2.6.2 主成分分析

应用主成分分析法对上述指标分析, 以进一步探究

乳酸菌发酵富硒米糠理化指标与抗氧化活性的相关性, 得到主成分相关矩阵的特征值、贡献率 (表5) 及载荷矩阵 (表6)。3个主成分累积贡献率为98.224% (>80%), 综合了大多数样本信息 (表5)。

表5 主成分的特征值及贡献率

Table 5 Eigenvalues and contribution rates of principal components

成分	初始特征值			提取载荷平方和		
	总计	方差百分比/%	累计贡献率/%	总计	方差百分比/%	累计贡献率/%
1	9.474	67.673	67.673	9.474	67.673	67.673
2	2.404	17.174	84.847	2.404	17.174	84.847
3	1.873	13.377	98.224	1.873	13.377	98.224
4	0.249	1.776	100			
5	8.73×10^{-16}	6.24×10^{-15}	100			
6	3.70×10^{-16}	2.64×10^{-15}	100			
7	2.39×10^{-16}	1.70×10^{-15}	100			
8	9.72×10^{-17}	6.95×10^{-16}	100			
9	-3.69×10^{-17}	-2.64×10^{-16}	100			
10	-1.14×10^{-16}	-8.11×10^{-16}	100			
11	-2.02×10^{-16}	-1.44×10^{-15}	100			
12	-3.01×10^{-16}	-2.15×10^{-15}	100			
13	-4.92×10^{-16}	-3.51×10^{-15}	100			
14	-1.41×10^{-15}	-1.01×10^{-14}	100			

主成分1的特征值为9.474, 方差贡献率为67.673% (表5), 是最主要的成分, 主要综合了总酸、SeCys₂、总酚、总黄酮含量和DPPH自由基清除能力、ABTS阳离子自由基清除能力和FRAP值 (表6); 主成分2的特征值为2.404, 方差贡献率为17.174% (表5), 主要综合了SeMeCys和SeMet含量 (表6); 主成分3的特征值为1.873, 方差贡献率为13.377% (表5), 主要综合了IDF质量分数 (表6)。

表6 主成分分析载荷图

Table 6 Principal component analysis loading matrix

指标	成分		
	1	2	3
pH值	-0.996	0.070	0.031
总酸	0.990	-0.123	-0.067
还原糖	-0.979	-0.165	0.054
SDF	0.515	-0.255	-0.809
IDF	-0.559	0.069	0.823
SeMeCys	-0.137	0.981	-0.088
SeMet	-0.192	0.907	-0.373
SeCys ₂	0.828	0.474	0.275
无机硒	-0.936	-0.318	-0.114
总酚	0.977	0.099	0.146
总黄酮	0.919	-0.105	-0.267
DPPH自由基清除能力	0.947	-0.069	0.197
ABTS阳离子自由基清除能力	0.891	-0.335	0.279
FRAP值	0.926	0.195	0.298

由上述结果可知, 用3个主成分代替上述14个指标, 基于抗氧化活性和相关理化指标进行评价和优选。3个主成分分别定义为 Y_1 、 Y_2 、 Y_3 , 根据特征值及各成

分的主成分载荷, 得到各主成分的线性表达式, 分别如式(7)~(9)所示:

$$Y_1 = -0.324Z_1 + 0.322Z_2 - 0.318Z_3 + 0.167Z_4 - 0.182Z_5 - 0.045Z_6 - 0.062Z_7 + 0.269Z_8 - 0.304Z_9 + 0.317Z_{10} + 0.299Z_{11} + 0.308Z_{12} + 0.289Z_{13} + 0.301Z_{14} \quad (7)$$

$$Y_2 = 0.045Z_1 - 0.079Z_2 - 0.106Z_3 - 0.164Z_4 - 0.045Z_5 + 0.633Z_6 + 0.585Z_7 + 0.306Z_8 - 0.205Z_9 + 0.064Z_{10} + 0.068Z_{11} - 0.045Z_{12} - 0.216Z_{13} + 0.126Z_{14} \quad (8)$$

$$Y_3 = 0.023Z_1 - 0.049Z_2 + 0.039Z_3 - 0.591Z_4 + 0.601Z_5 - 0.064Z_6 - 0.273Z_7 + 0.201Z_8 - 0.083Z_9 + 0.107Z_{10} - 0.195Z_{11} + 0.144Z_{12} + 0.204Z_{13} + 0.218Z_{14} \quad (9)$$

式中: $Z_1 \sim Z_{11}$ 分别表示pH值、总酸、还原糖、SDF、IDF、SeMeCys、SeMet、SeCys₂、无机硒、总酚、总黄酮、DPPH自由基清除能力、ABTS阳离子自由基清除能力、FRAP值。将各主成分对应的方差贡献率作为权重, 得到综合评分计算式(10):

$$Y = 0.677Y_1 + 0.172Y_2 + 0.134Y_3 \quad (10)$$

主成分样品综合得分如表7所示。结合乳酸菌发酵富硒米糠营养成分含量和抗氧化活性的 Y_1 , 排名前三的依次为 Lp -ERB> St -ERB> Lb -ERB, 表明 Lp 发酵脱脂富硒米糠提升总酸、SeCys₂、总酚、总黄酮含量和DPPH自由基清除能力、ABTS阳离子自由基清除能力和FRAP值最高。 La -ERB在 Y_2 上得分最高, 表明 La 发酵脱脂富硒米糠促进无机硒转化为SeMeCys和SeMet的能力最强。 Lb -ERB在 Y_3 上得分最高, 表明 Lb 发酵脱脂富硒米糠促进IDF转化为SDF的能力最弱。综上, 乳酸菌发酵提升富硒米糠抗氧化活性的综合排序为 Lp -ERB> Lb -ERB> St -ERB> La -ERB。

表7 主成分样品综合得分及排名

Table 7 Comprehensive scores and ranking of principal components

样品	Y_1	Y_2	Y_3	Y	排名
CERB	-5.30	-0.73	0.10	-3.70	5
La -ERB	0.09	2.45	-0.54	0.41	4
St -ERB	1.53	-0.60	-1.84	0.68	3
Lp -ERB	2.40	-1.58	0.38	1.41	1
Lb -ERB	1.29	0.47	1.91	1.21	2

3 结论

本研究分析了4种乳酸菌发酵后米糠理化指标、营养特性、微观结构、物化特性及抗氧化活性的变化。结果表明, 4种乳酸菌均可利用米糠进行生长, 还原糖含量显著降低, 总酸质量浓度增加, 其中 Lp 产酸能力最强; St 发酵促进IDF转化为SDF能力最强; La 、 Lp 和 Lb 发酵显著促进无机硒转化为SeCys₂。乳酸菌发酵能使米糠变得疏松多孔, 有利于总酚、总黄酮的提取, 增加体外抗氧化活性。对乳酸菌发酵后米糠pH值、总酸、还原糖、SDF、IDF、SeMeCys、SeMet、SeCys₂、无机硒、总

酚、总黄酮、DPPH自由基清除能力、ABTS阳离子自由基清除能力、FRAP值等14项指标进行主成分分析, 综合评价显示, 4种乳酸菌的排序为 Lp > Lb > St > La 。 Lp 体外抗氧化活性相对最强, 总酸、SeCys₂、总酚和总黄酮含量相对最高。本研究结果为富硒米糠的精深加工与开发提供了理论参考。

参考文献:

- [1] 左英秀, 沈军. 稻米加工副产物米糠综合利用的研究[J]. 粮食与食品工业, 2020, 27(6): 11-14. DOI:10.3969/j.issn.1672-5026.2020.06.003.
- [2] SHARMA S K, BANSAL S, MANGAL M, et al. Utilization of food processing by-products as dietary, functional, and novel fiber: a review[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2016, 56(10): 1647-1661. DOI:10.1080/10408398.2013.794327.
- [3] CODA R, KATINA K, RIZZELLO C G. Bran bioprocessing for enhanced functional properties[J]. Current Opinion in Food Science, 2015, 1: 50-55. DOI:10.1016/j.cofs.2014.11.007.
- [4] LI Y X, NIU L, GUO Q Q, et al. Effects of fermentation with lactic bacteria on the structural characteristics and physicochemical and functional properties of soluble dietary fiber from proso millet bran[J]. LWT-Food Science and Technology, 2022, 154: 112609. DOI:10.1016/j.lwt.2021.112609.
- [5] 马宗会, 殷宝茹, 张海, 等. 食品级米糠的研究进展及前景展望[J]. 粮油食品科技, 2021, 29(5): 11-20. DOI:10.16210/j.cnki.1007-7561.2021.05.002.
- [6] 方芳, 何雨芯, 赵巨堂, 等. 挤压膨化处理对藜麦营养成分及体外酵解特性的影响[J]. 食品科学, 2023, 44(1): 98-106. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20220130-306.
- [7] 刘磊, 冉玉兵, 张名位, 等. 乳酸菌发酵对脱脂米糠营养成分的影响[J]. 中国食品学报, 2020, 20(1): 118-126. DOI:10.16429/j.1009-7848.2020.01.015.
- [8] Chemists A. Approved methods of the American Association of Cereal Chemists[D]. AACC, 1995.
- [9] 张路梦. 高效液相色谱法对富硒生物样品中硒的形态分析[D]. 武汉: 华中科技大学, 2017: 19-24.
- [10] 张媛, 宋倩, 梁叶星, 等. 超微粉碎对脱脂糯米米糠的抗氧化性和肠道益生性的影响[J]. 中国食品学报, 2016, 16(9): 53-59. DOI:10.16429/j.1009-7848.2016.09.008.
- [11] TI H H, LI Q, ZHANG R F, et al. Free and bound phenolic profiles and antioxidant activity of milled fractions of different indica rice varieties cultivated in southern China[J]. Food Chemistry, 2014, 159: 166-174. DOI:10.1016/j.foodchem.2014.03.029.4.
- [12] 龚卫华, 向卓亚, 叶发银, 等. 麻竹笋笋壳中木质素的理化特性[J]. 食品科学, 2017, 38(9): 59-65. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201709010.
- [13] 龚卫华, 马玥, 吕霞, 等. 葵花籽壳木质素的结构分析及抗氧化活性[J]. 食品科学, 2017, 38(7): 23-28. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201707005.
- [14] 薛艾莲, 李春翼, 王启明, 等. 超声处理对麦醇溶蛋白/芦丁相互作用及结构特性的影响[J]. 食品科学, 2022, 43(7): 45-51. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20210607-093.
- [15] HUANG X, LIANG K H, LIU Q, et al. Superfine grinding affects physicochemical, thermal and structural properties of *Moringa oleifera* leaf powders[J]. Industrial Crops and Products, 2020, 151: 112472. DOI:10.1016/j.indcrop.2020.112472.
- [16] NSOR-ATINDANA J, ZHONG F, JOSEPH M K, et al. *In vitro* hypoglycemic and cholesterol lowering effects of dietary fiber prepared

- from cocoa (*Theobroma cacao* L.) shells[J]. Food & Function, 2012, 3(10): 1044-1050. DOI:10.1039/C2FO30091E.
- [17] CHEUNG L M, CHEUNG P C K, OOI V E C. Antioxidant activity and total phenolics of edible mushroom extracts[J]. Food Chemistry, 2003, 81(2): 249-255. DOI:10.1016/S0308-8146(02)00419-3.
- [18] SOLARI-GODIÑO A, PÉREZ-JIMÉNEZ J, SAURA-CALIXTO F, et al. Anchovy mince (*Engraulis ringens*) enriched with polyphenol-rich grape pomace dietary fibre: *in vitro* polyphenols bioaccessibility, antioxidant and physico-chemical properties[J]. Food Research International, 2017, 102: 639-646. DOI:10.1016/j.foodres.2017.09.044.
- [19] ARDESTANI A, YAZDANPARAST R. Antioxidant and free radical scavenging potential of *Achillea santolina* extracts[J]. Food Chemistry, 2007, 104(1): 21-29. DOI:10.1016/j.foodchem.2006.10.066.
- [20] 陈丽莉. 微生物发酵和动态高压微射流对豆渣膳食纤维的改性研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2013: 14-19.
- [21] 张艳莉, 王颖, 王迪, 等. 复合菌系发酵改性对豆渣膳食纤维结构及物化特性的影响[J]. 中国粮油学报, 2021, 36(7): 138-145. DOI:10.3969/j.issn.1003-0174.2021.07.023.
- [22] 丁小娟, 孟满, 赵泽伟, 等. 发酵法制取刺梨果渣膳食纤维工艺优化及其特性分析[J]. 食品工业科技, 2018, 39(7): 97-103. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2018.07.019.
- [23] LANDETE J M, CURIEL J A, RODRIGUEZ H, et al. Aryl glycosidases from *Lactobacillus plantarum* increase antioxidant activity of phenolic compounds[J]. Journal of Functional Foods, 2014, 7: 322-329. DOI:10.1016/j.jff.2014.01.028.
- [24] 黄宁馨, 丁士勇, 刘睿, 等. 主成分分析法优选枸杞乳酸菌发酵饮品发酵剂[J]. 农业工程学报, 2021, 37(7): 286-292. DOI:10.11975/j.issn.1002-6819.2021.07.035.
- [25] 杨鹤. 五种乳酸菌富硒能力及条件的研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2015: 1-8.
- [26] PALOMO M, GUITIÉRREZ A M, PÉREZ-CONDE M C, et al. Se metallomics during lactic fermentation of Se-enriched yogurt[J]. Food Chemistry, 2014, 164: 371-379. DOI:10.1016/j.foodchem.2014.05.007.
- [27] 李伟伟, 曲俊雅, 周才琼, 等. 真菌及乳酸菌联合发酵对豆渣膳食纤维及理化特性的影响[J]. 食品与发酵工业, 2018, 44(11): 159-166. DOI:10.13995/j.cnki.11-1802/ts.017686.
- [28] 曾锐, 汪卓, 陈菁, 等. 乳酸菌发酵对海红米糠的结构和功能特性的影响[J]. 食品与发酵工业, 2023, 49(11): 119-124. DOI:10.13995/j.cnki.11-1802/ts.034761.
- [29] 易媛, 赵敏惠, 左勇, 等. 桑葚酵素发酵过程中活性物质与抗氧化能力的相关性研究[J]. 食品与发酵工业, 2022, 48(9): 117-122. DOI:10.13995/j.cnki.11-1802/ts.030134.
- [30] 何赛. 含硒乳酸菌亚硝酸盐还原性和抗氧化研究[D]. 武汉: 湖北工业大学, 2016: 44-45.