DOI:10.12441/spyswjs.20241113002 [文章编号] 1673-1689(2025)09-0091-09

超声波-乳酸菌联合处理对发芽过程中稻谷营养品质及体外模拟消化特性的影响

朱庆松 任 双 陈亚蓝 朱 静* 焦双颖

(信阳农林学院食品科学与工程学院,河南 信阳 464399)

摘要:【目的】研究发芽稻谷的营养品质,开发其药用价值。【方法】采用超声波处理‘水晶3号’‘直优151’‘春优167’‘9优418’‘宁香粳9号’共5种稻谷后,以乳酸菌及发酵液替代水作为培养液进行稻谷发芽,考察超声波-乳酸菌联合处理对发芽过程中稻谷的总淀粉、直链淀粉、抗性淀粉和可溶性蛋白质水平的影响,通过傅里叶变换红外光谱和扫描电子显微镜观察其结构变化,通过体外模拟消化试验测定其估计血糖生成指数(estimated glycemic index,eGI)。【结果】5种稻谷在处理96 h后均达到微发芽状态,芽长1.403~1.847 cm。5种稻谷的总淀粉、直链淀粉和抗性淀粉的质量分数均随着发芽时间的延长呈下降趋势。‘直优151’和‘宁香粳9号’发芽96 h后,其可溶性蛋白质质量浓度显著低于发芽前,其他品种稻谷的可溶性蛋白质质量分数与发芽前相比无显著差异。傅里叶变换红外光谱结果显示,5种稻谷发芽前后5个时间段的红外光谱整体趋势相同,不同发芽时间段的稻谷在3 500 cm^{-1}处的吸收峰强度差别较大,且随着发芽时间的延长,吸收峰强度逐渐减弱。扫描电子显微镜结果显示,随着发芽时间的延长,稻谷表面由平整光滑逐渐变成凹凸不平。体外模拟消化试验结果显示,发芽96 h的5种稻谷的eGI均低于55,属于低血糖生成指数(glycemic index,GI)食物。【结论】发芽稻谷可有效替代精米以解决其高GI的问题,且发芽后的稻谷籽粒变得松软,有助于后续产品的开发和利用。

关键词:稻谷;发芽;淀粉;可溶性蛋白质;血糖生成指数

Effects of Combined Ultrasonication and Lactic Acid Bacteria Treatment on Nutritional Quality and *in Vitro* Simulated Digestibility Characteristics of Rice during the Germination Process

ZHU Qingsong REN Shuang CHEN Yalan ZHU Jing JIAO Shuangying*

(School of Food Science and Engineering, Xingyang Agriculture and Forestry University, Xinyang 464399, China)

Abstract: [**Objective**] This study explores the nutritional quality of germinated rice, aiming to develop its medicinal value. [**Method**] Five varieties of rice (‘Shuijing 3’ ‘Zhiyou 151’ ‘Chunyou 167’ ‘9 You 418’, and ‘Ningxiangjing 9’) were treated with ultrasonic waves, and then lactic acid bacteria and fermentation liquid were used instead of water as the culture medium for rice germination. The effects of combined ultrasonication and lactic acid bacteria treatment on the levels of total starch, amylose, resistant starch, and soluble protein of rice during the germination process were investigated. The structural changes were analyzed by Fourier transform infrared spectroscopy and scanning electron microscopy, and the estimated glycemic index (eGI) was measured by *in vitro* simulated digestion experiment. [**Result**] The five varieties of rice reached a micro-germination state after 96 h of treatment, with the bud lengths ranging from 1.403 cm to 1.847 cm. The mass fractions of total starch, amylose, and

基金项目:河南省重点研发专项项目(231111312800);河南省重点研发与推广专项(科技攻关)项目(242102110090);河南省高等学校重点科研项目(26B550012)。

通信作者:朱 静(1983—),女,博士,教授,硕士研究生导师,主要从事食品生物技术研究。E-mail:250665021@qq.com

收稿日期:2024-11-13 **修回日期:**2025-01-05

resistant starch of five varieties of rice all showed a downward trend with the extension of germination time. After 96 h of germination, the mass concentrations of soluble protein of 'Zhiyou 151' and 'Ningxiangjing 9' were significantly lower than those before germination, while the mass concentrations of soluble protein of other varieties of rice showed no significant difference compared with those before germination. The Fourier transform infrared spectroscopy results showed that the infrared spectra of the five varieties of rice presented the same overall trend in five stages before and after germination. The absorption peak intensity at 3 500 cm^{-1} of rice among different germination stages varied greatly and gradually decreased with the extension of germination time. The scanning electron microscopy results showed that with the extension of germination time, the smooth surface of rice gradually became rough and uneven. The results of the *in vitro* simulated digestion experiment showed that the eGI of five varieties of rice germinated for 96 h were all lower than 55, indicating that germinated rice was low-glycemic index (GI) food. [**Conclusion**] Germinated rice can effectively replace polished rice to address its high-GI concerns, and the germinated rice grains become softer, which is beneficial for the development and utilization of subsequent products.

Keywords: rice; germination; starch; soluble protein; glycemic index

稻谷是重要的粮食作物，由质量分数为16%~21%的颖（稻壳）和79%~84%的颖果（糙米）构成，而糙米本身的组织结构特性影响了其加工特性与保藏性[1]。因此，采用一些新型技术（如发芽技术[2]、发酵技术[3]等）来改善糙米食品的应用具有广阔的市场。

稻谷发芽过程中，其营养物质的组成和含量、组织结构特性等均会发生显著变化。例如，部分淀粉会被分解成还原糖等小分子物质，蛋白质会被分解为游离氨基酸等小分子物质[4]；维生素C、维生素B_1和维生素B_6等微量元素和功能性成分也会增加[5]；水稻中的*L*-谷氨酸会被谷氨酸脱羧酶转化为*γ*-氨基丁酸[6-7]；稻谷表皮会出现变软的现象，使其消化率和生物利用率提高[8-9]，但不同品种间物质含量以及组织结构有显著差异[10]。

稻谷发芽过程中常见的种子预处理方法有化学药剂法、物理法和生物防治法。超声波处理是一种可改变植物种子生理性状的物理法，它能影响植物种子的萌发及幼苗的生长发育[11]，提高稻谷的抗逆性[12]并增加其香气[13]。此外，超声波会影响糙米淀粉的结构特征与理化性质[14]，以及发芽糙米的营养价值和感官特性[15]。乳酸菌处理作为一种生物防治手段，能够促进种子的萌发、生长，提高种子发芽率、活性成分含量及抗氧化活性[16-18]，朱静等[19]研究发现植物乳植杆菌LS-41可促进植物种子发芽，提高功能性成分的含量。已有研究表明，将物理法与生物防治法联合作用的意义重大，不但可以提高种子发芽率，且操作简便、无污染[20]。因此，将超声波与乳酸菌联合作用于稻谷发芽，旨在结合两者的优势，克服单一技术的不足，开发一种安全易控、绿色高效的新型发芽工艺。

该研究选取信阳农林学院农学院选育的5种稻谷，利用超声波-乳酸菌联合处理的方式作用于稻谷发芽，比较稻谷发芽前后基本营养物质水平和微观结构变化，并对比体外模拟消化过程中eGI的变化，以期为稻谷的进一步开发利用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

'水晶三号''宁香粳9号''春优167''9优418''直优151'：前4种均为粳稻，第5种为籼稻，均由信阳农林学院农学院提供。

NaOH、KOH、无水乙醇、无水乙酸钠、冰醋酸、无水硫酸铜、碘化钾、盐酸、苯酚、亚硫酸氢钠、酒石酸钾钠、3,5-二硝基水杨酸、溴化钾：分析纯，郑州派尼化学试剂厂；淀粉葡萄糖苷酶酶液（3 300 U/mL）、猪胰腺*α*-淀粉酶（4 000 U/g）、胰酶（4 000 U/g）：上海源叶生物科技有限公司；胃蛋白酶（10 000 U/g）：广州赛国生物科技有限公司；葡萄糖测定试剂盒（葡萄糖氧化酶法）：北京兰杰柯科技有限公司。

1.2 仪器设备

破碎机：RS-FS553型，合肥荣事达电子电器集团有限公司；电子天平：WT-H50001型，永康市五鑫衡器有限公司；超声波清洗机：UC-5240L型，深圳市佳源达科技有限公司；紫外-可见分光光度计：A390型，翱艺仪器（上海）有限公司；傅里叶变换红外光谱仪：Nicolet iS5型，美国赛默飞世尔科技公司；真空冷冻干燥机：BILON-6000Y型，上海

比朗仪器制造有限公司；扫描电子显微镜：CXS-5TAH-119401型，北京天耀科技有限公司；离心机：TDL-40B型，上海安亭科学仪器厂。

1.3　方法

1.3.1　乳酸菌菌种的活化

将于-80 ℃保藏的植物乳植杆菌LS-41取出，用接种环挑取1环菌种，在固体MRS培养基上划线，30 ℃培养48 h，重复2~3次，挑选单菌落，在斜面培养基上进行划线，30 ℃培养48 h，4 ℃保藏。

从斜面培养基上挑取1环菌种，接种于5 mL MRS培养基中，30 ℃静置培养24 h，获得种子液，按体积分数10%接种于100 mL的MRS培养基中，30 ℃培养48 h备用。

1.3.2　超声波-乳酸菌联合处理稻谷

分别称取‘水晶3号’‘直优151’‘宁香粳9号’‘春优167’‘9优418’稻谷200 g，用去离子水清洗，以除去杂质和悬浮的瘪粒，加入体积分数1%次氯酸钠溶液500 mL消毒30 min，再用无菌水清洗3次，用纱布包裹，悬挂于超声波清洗器的水槽中间，超声（40 kHz、100 W、30 ℃）处理16 min后，将水稻捞出平铺在无菌不锈钢托盘底部（底部铺无菌纱布）。将活化的植物乳植杆菌LS-41培养液与无菌水按体积比1∶4混合得到菌种混合液，将pH调整为6.5，取100 mL菌种混合液倒入该不锈钢托盘中，使纱布充分湿润，于30 ℃避光培养96 h，每天观察水稻发芽情况，每隔24 h收集1次水稻，并再补充菌种混合液100 mL，共收集4次，45 ℃烘干12 h，然后制成米粉，于4 ℃保藏备用。空白组将菌种混合液换成无菌水，不经超声波处理，其他步骤一致。

1.3.3　总淀粉质量分数的测定

总淀粉质量分数的测定参照刘甜[21]的方法并稍加修改。准确称取（50.0±0.5）mg米粉于50 mL离心管中，加入5 mL体积分数85%的乙醇溶液，50 ℃水浴1 h，于4 000 r/min离心，弃上清液，以去除表面的葡萄糖和糊精。分别加入2 mL蒸馏水和2 mL 4 mol/L的KOH溶液，振荡30 min。然后加入16 mL乙酸钠缓冲液（1.2 mol/L、pH 3.8），将pH调至4.7。最后加入160 μL淀粉葡萄糖苷酶酶液（3 300 U/mL），60 ℃水浴1 h，用葡萄糖测定试剂盒测定葡萄糖质量浓度，根据葡萄糖质量浓度按式（1）计算总淀粉质量分数。

$$Y=\frac{c\times V\times N}{m\times 1\times 10^{6}}\times 0.9\times 100\% \quad (1)$$

式中：

Y——总淀粉质量分数，%；

c——试剂盒测定时所取样品质量浓度，μg/mL；

V——样品提取液总体积，mL；

N——样品提取液稀释倍数，未稀释即为1；

m——样品质量，g；

0.9——葡萄糖换算为淀粉的系数。

1.3.4　直链淀粉质量分数的测定

直链淀粉质量分数的测定参照薛慧[22]的方法并稍加修改。按照表1制备系列标准混合溶液。分别取2.5 mL系列标准混合溶液及20 mL蒸馏水、0.5 mL的1 mol/L醋酸溶液、1 mL碘试剂于50 mL容量瓶中，用蒸馏水定容，振荡，放置20 min以显色。在波长620 nm处测定吸光度，以直链淀粉质量分数为横坐标、吸光度为纵坐标绘制标准曲线。得到回归方程y=112.76x-26.739，R^2=0.999 9，表明直链淀粉质量分数与吸光度呈现良好的线性关系。

将上述测定方法中的系列标准混合溶液换成样品溶液即可测定样品溶液的吸光度，再按照标准曲线换算出样品的直链淀粉质量分数。

表1　系列标准混合溶液的配制

Table 1　Preparation of serial standard mixed solutions

直链淀粉质量分数/%	标准混合溶液的组成	
	直链淀粉标准溶液体积/mL	支链淀粉标准溶液体积/mL
0	0	5.0
8	0.4	4.6
16	0.8	4.2
24	1.2	3.8
32	1.6	3.4
40	2.0	3.0

1.3.5　抗性淀粉质量分数的测定

抗性淀粉质量分数的测定参照刘甜[21]的方法并稍加修改。称取（100±1）mg米粉至15 mL螺旋盖试管中，加500 μL的ddH_2O，混匀，煮沸20 min，50 ℃保温10 min。冷却至室温后用玻璃棒搅拌均匀，加200 μL质量分数10%的胃蛋白酶酶液，37 ℃消化1 h，加入4 mL马来酸钠溶液（0.1 mol/L、pH 6.0），接着用4 mL质量分数1%的α-淀粉酶酶液酶解16 h。将酶解产物于4 000 r/min离心10 min，弃上清液，用5 mL体积分数50%的乙醇溶液洗涤沉淀2次，加入1 mL的ddH_2O重悬样品，再加入1 mL的KOH溶液（4 mol/L），振荡20 min。

然后加入 8 mL 乙酸钠缓冲液（1.2 mol/L，pH 3.8）和 160 μL 淀粉葡萄糖苷酶酶液（3 300 U/mL），60 ℃水解 1 h，期间倒置振荡几次。4 000 r/min 离心 10 min，取 50 μL 上清液，加入 1.5 mL 葡萄糖测定试剂测定葡萄糖质量浓度，根据葡萄糖质量浓度按式（2）计算抗性淀粉质量分数 。

$$Z=\frac{C_0\times V_0\times \eta}{M_0\times 1\times 10^6}\times 0.9\times 100\% \quad (2)$$

式中：

Z——抗性淀粉质量分数，%；

C_0——试剂盒测定时所取样品质量浓度，μg/mL；

V_0——样品提取液总体积，mL；

η——样品提取液稀释倍数，未稀释即为 1；

M_0——样品质量，g；

0.9——葡萄糖换算为抗性淀粉的系数。

1.3.6 可溶性蛋白质质量浓度的测定

参考张永芳等[23]的研究，采用考马斯亮蓝 G-250 比色法测定可溶性蛋白质质量浓度。

1）标准曲线的制作：取 11 支具塞试管，按表 2 加入不同体积的 100 μg/mL 蛋白质标准溶液（牛血清蛋白）和蒸馏水，混合均匀，制成系列蛋白质标准混合溶液。各取 0.1 mL 系列蛋白质标准混合溶液，加入 5 mL 考马斯亮蓝，摇匀并放置约 2 min 后，测定 595 nm 处的吸光度。以蛋白质质量浓度为横坐标、吸光度为纵坐标绘制标准曲线。得到回归方程 y=0.004x＋0.057，R^2=0.993 1，表明可溶性蛋白质质量浓度与吸光度呈现良好的线性关系。

2）可溶性蛋白质质量浓度的测定：称取 2.0 g 米粉，加入 5 mL 体积分数 10% 的醋酸，在研钵中研碎，用蒸馏水洗涤后移入 100 mL 容量瓶，用蒸馏水定容，过滤到烧杯中，取 0.1 mL 滤液，加入 5 mL 考马斯亮蓝，摇匀并放置约 2 min，于 595 nm 处测定吸光度。将吸光度代入标准曲线的回归方程，得出对应的可溶性蛋白质质量浓度。

表 2 不同质量浓度蛋白质标准混合溶液所需添加的试剂

Table 2 Reagents required for protein standard mixed solutions of different mass concentrations

管号	蛋白质质量浓度/（μg/mL）	蛋白质标准溶液体积/mL	蒸馏水体积/mL
1	0	0.0	1.0
2	10	0.1	0.9
3	20	0.2	0.8
4	30	0.3	0.7
5	40	0.4	0.6
6	50	0.5	0.5
7	60	0.6	0.4
8	70	0.7	0.3
9	80	0.8	0.2
10	90	0.9	0.1
11	100	1.0	0.0

1.3.7 傅里叶变换红外光谱分析

参照师英春等[24]的方法，将米粉与 KBr 粉末按质量比 1∶100 混合，用压片机压制成 1 mm 的薄片，将薄片置于傅里叶变换红外光谱仪上进行测定，波数范围为 4 000~500 cm^{-1}。

1.3.8 扫描电子显微镜观察

参照孙健[25]的方法，将原稻谷与发芽 24、48、72、96 h 的稻谷掰成两半后冷冻干燥，用扫描电子显微镜观察其结构变化。

1.3.9 体外模拟消化试验与 eGI 测定

参照崔亚楠等[26]和王俊楠[27]的方法并稍加修改，称取 500 mg 米粉于测定管中，加入 1 mL 含猪胰淀粉酶（100 U/mL）的人体唾液，反应 15~20 s，用 HCl 溶液调节 pH 至 6.8，加入 5 mL 胃蛋白酶酶液（100 U/mL），用 HCl 溶液调节 pH 至 2.0，将其置于恒温（37 ℃）磁力搅拌器上孵育 30 min，用 0.2 mol/L 的 NaOH 溶液中和 pH，使 pH 达到 7.0，随后加入 5 mL 胰酶酶液（200 U/mL），继续在恒温（37 ℃）磁力搅拌器上孵育，分别在 20、30、60、90、120、180 min 时取 1 mL 水解液，立即沸水浴灭活，用 DNS 法测定葡萄糖质量浓度，并计算相应碳水化合物的水解率，以葡萄糖标准品为参照物，计算样品的 eGI。

以水解时间为横坐标、碳水化合物水解率为纵坐标绘制体外模拟消化水解曲线，利用 Origin 软件计算各个样品和葡萄糖标准品在 0~180 min 的水解曲线与横坐标之间的面积（$A_{样品}$、$A_{标准品}$），根据式（3）计算氢化指数，再根据式（4）计算 eGI。

$$H=\frac{A_{样品}}{A_{标准品}}\times 100\% \quad (3)$$

式中：

H——氢化指数，%；

$A_{样品}$——5 种稻谷样品水解曲线与横坐标之间的面积；

$A_{标准品}$——葡萄糖标准品水解曲线与横坐标之间的面积。

$$G=0.862\times H+8.198\ 1 \quad (4)$$

式中：

G——eGI；

H——氢化指数，%。

2　结果与讨论

2.1　超声波-乳酸菌联合处理对稻谷发芽的影响

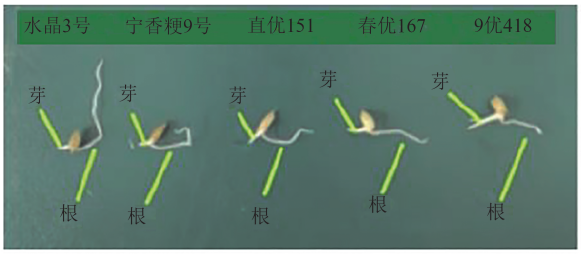
如图1所示，5种稻谷在处理96 h后均达到微发芽状态，芽长1.403~1.847 cm，处理组的稻谷芽长显著大于空白组，因为超声波[11]和乳酸菌[16]预处理能够促进植物种子的发芽与生长。

2.2　5种稻谷总淀粉、直链淀粉、抗性淀粉质量分数的测定结果

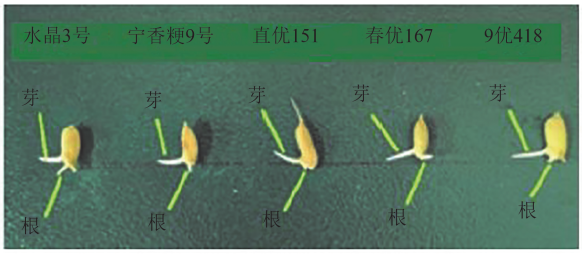
由图2可知，5种稻谷的总淀粉、直链淀粉和抗性淀粉的质量分数均随着发芽时间的延长呈下降趋势，且均在发芽24~72 h时下降明显。这可能是因为稻谷发芽过程中淀粉酶被激活，稻谷内的淀粉（储藏物质）等大分子物质被部分分解为还原糖等物质以供生长，从而降低稻谷中淀粉的质量分数[28]。

2.3　5种稻谷可溶性蛋白质质量浓度的测定结果

由图3可知，5种稻谷的可溶性蛋白质质量浓度均随着发芽时间的延长呈先降低后升高再降低的趋势。相比于稻谷发芽前，‘直优151’和‘宁香粳9号’稻谷发芽96 h后的可溶性蛋白质质量浓度显著降低，而‘水晶3号’‘春优167’和‘9优418’稻谷发芽96 h后的可溶性蛋白质质量浓度无显著性变化。可溶性蛋白质质量浓度在稻谷发芽过程中的降低可能是因为发芽时可溶性蛋白质被分解，用于促进物质代谢[28]；而可溶性蛋白质质量浓度出现增长的趋势可能是由于特定氨基酸（如赖氨酸、色氨酸）水平升高所致[29]。



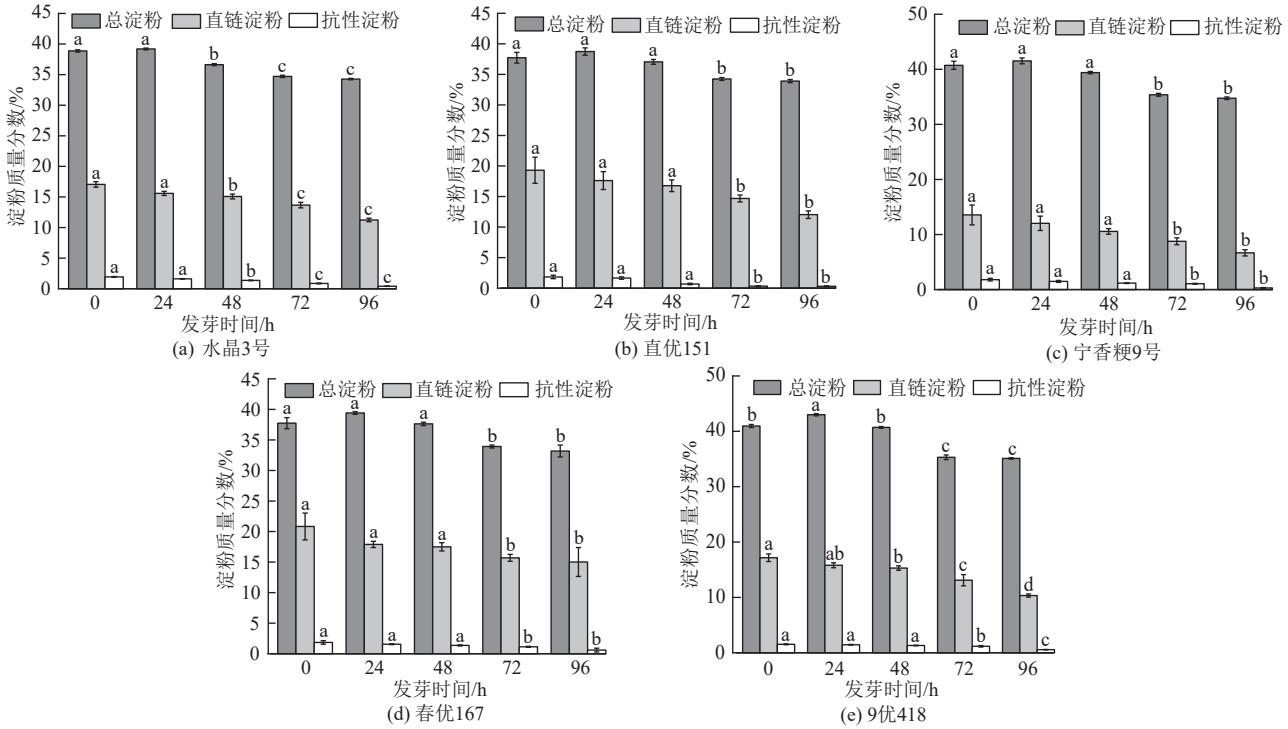
(a) 空白组



(b) 处理组

图1　发芽稻谷的形态图

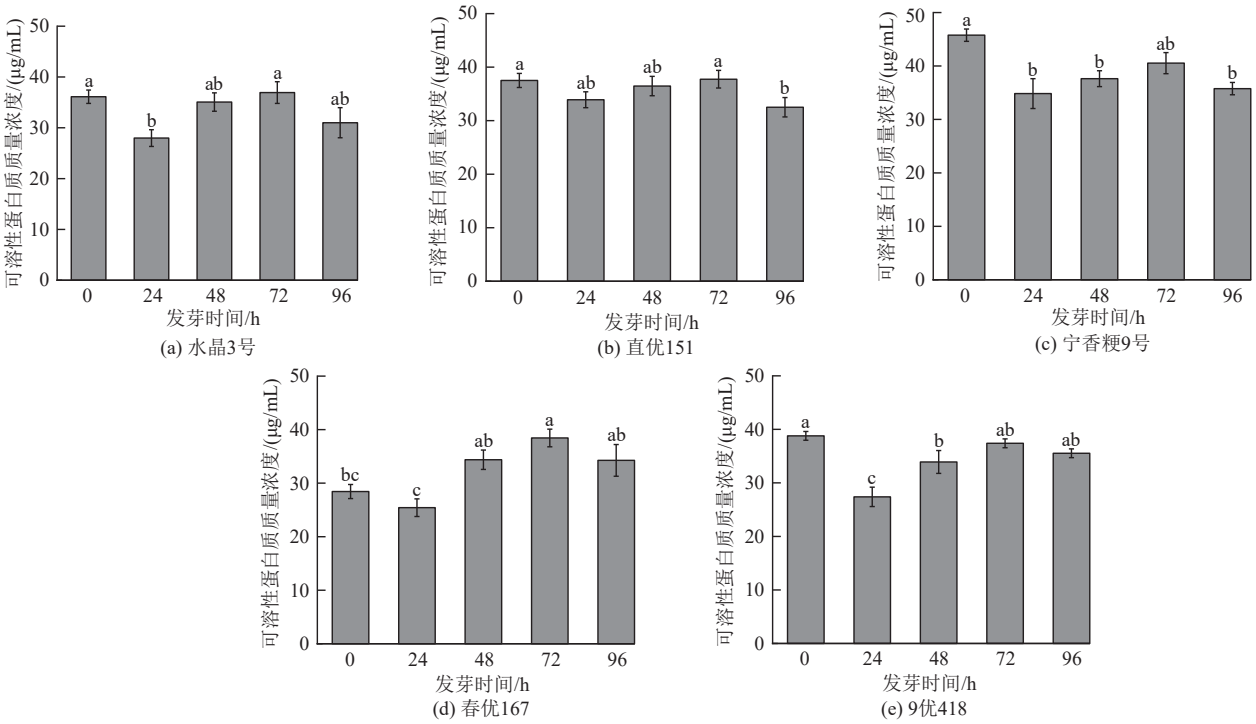
Fig. 1　Morphological diagrams of germinated rice



图中小写字母代表不同发芽时间稻谷的淀粉质量分数差异显著（P<0.05）。

图2　发芽时间对5种稻谷的淀粉质量分数的影响

Fig. 2　Effects of germination time on starch mass fractions of five varieties of rice



图中小写字母代表不同发芽时间稻谷的可溶性蛋白质质量浓度差异显著（$P<0.05$）。

图 3　5 种稻谷发芽过程中可溶性蛋白质质量浓度的变化

Fig. 3　Changes in soluble protein mass concentration of five varieties of rice during germination

2.4　傅里叶变换红外光谱分析结果

5 种稻谷不同发芽时间的红外光谱图见图 4。5 种稻谷发芽前后 5 个时间段的红外光谱整体趋势相同，主要特征吸收峰位置无明显变化，说明发芽过程中 5 种稻谷的变化是一致的。4 000~3 000 cm^{-1} 是表征蛋白质及淀粉物质中 O—H 键振动的主要波数区间[30]，3 500 cm^{-1} 处为 O—H 键的振动吸收峰。结果表明，不同发芽时间的稻谷在

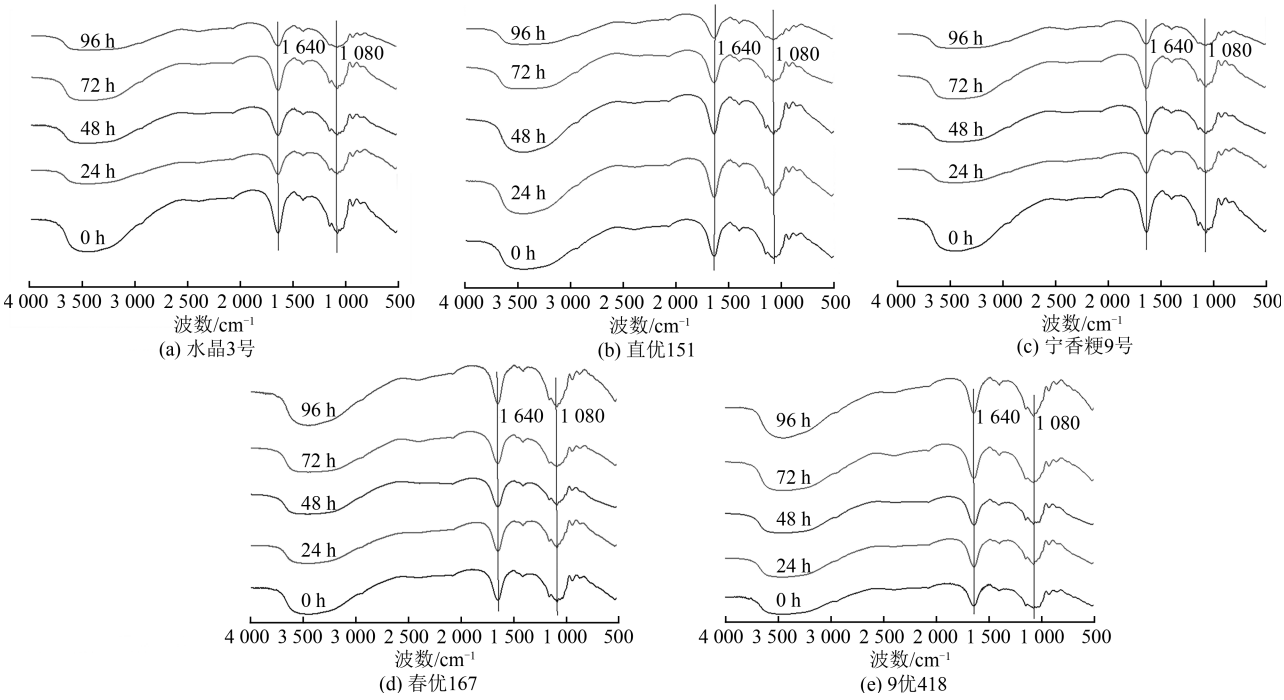


图 4　不同发芽时间的 5 种稻谷的红外光谱图

Fig. 4　Infrared spectrograms of five varieties of rice at different time points of germination

3 500cm^{-1}处的吸收峰强度差别较大，且随着发芽时间的延长，该吸收峰强度逐渐减弱，说明5种稻谷的淀粉质量分数逐渐降低，与2.2小节中的总淀粉质量分数的变化趋势对应。

2.5　稻谷发芽过程中的扫描电子显微镜结果

由图5可知，随着发芽时间的推移，稻谷表面颗粒由少变多，整体由平整光滑变成凹凸不平。这可能是因为稻谷在发芽期间吸水膨胀，同时营养物质发生了一系列的生物化学变化。发芽后的稻谷表皮变软，结构相对疏松，通透性变强，促使更多的淀粉从内部渗透至表面[6]。

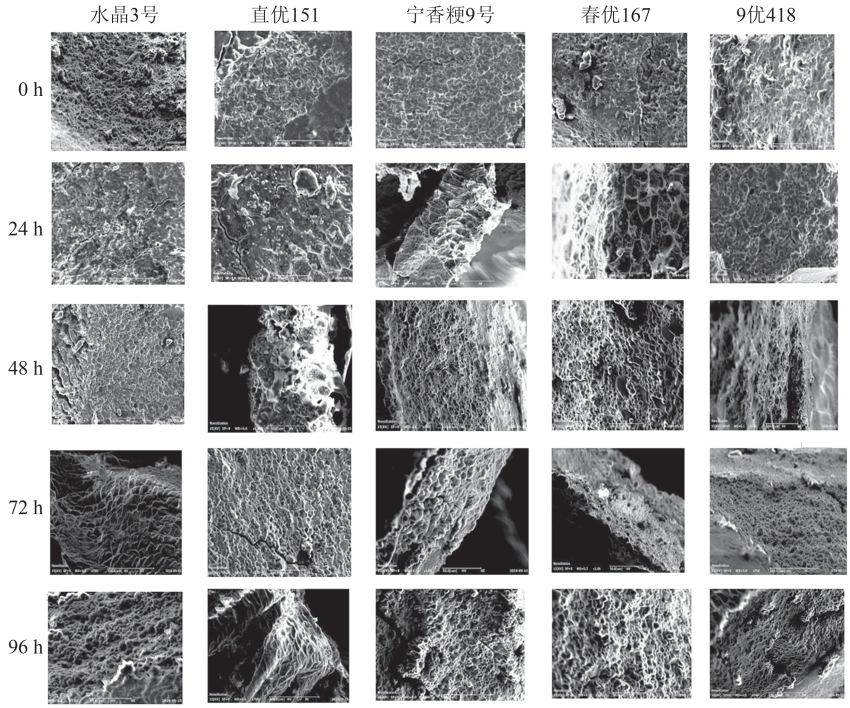


图5　5种稻谷发芽过程中的扫描电子显微镜图

Fig. 5 Scanning electron microscopy images of five varieties of rice during germination

2.6　体外模拟消化试验与eGI测定结果

对5种水稻的原稻谷和发芽96 h的稻谷进行体外模拟消化试验，并测定其eGI。如图6和表3所示，与原稻谷相比，5种发芽96 h稻谷的碳水化合物水解率与eGI均下降。其中，‘水晶3号’的碳水化合物水解率最大值由53.67%下降至47.47%，eGI由59.41下降至54.34；‘直优151’的碳水化合物水解率最大值由45.35%下降至40.86%，eGI由50.73下降至48.43；‘宁香粳9号’的碳水化合物水解率最大值由54.04%下降至46.32%，eGI由61.33下降至54.98；‘春优167’的碳水化合物水解率最大值由50.21%下降至44.31%，eGI由57.74下降至54.20；‘9优418’的碳水化合物水解率最大值由48.73%下降至41.93%，eGI由60.48下降至54.61。发芽96 h的稻谷的eGI均低于55，因此发芽稻谷属于低GI食物。

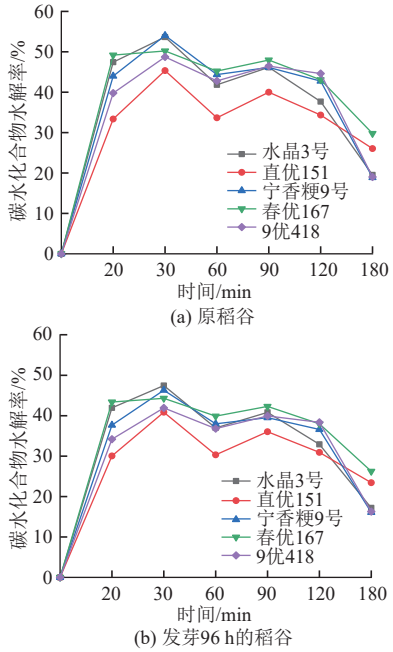


图6　发芽96 h前后的5种稻谷的体外模拟消化试验结果

Fig. 6　*In vitro* simulated digestion experiment results of five varieties of rice before and after 96 h germination

表 3　发芽 96 h 前后的 5 种稻谷的 eGI

Table 3　eGI of five varieties of rice before and after 96 h germination

样品	eGI	
	原稻谷	发芽 96 h 的稻谷
水晶 3 号	59.41	54.34
直优 151	50.73	48.43
宁香粳 9 号	61.33	54.98
春优 167	57.74	54.20
9 优 418	60.48	54.61

3　结论

采用超声波处理‘水晶 3 号’‘直优 151’‘春优 167’‘9 优 418’‘宁香粳 9 号’共 5 种稻谷，然后采用超声波-乳酸菌联合处理稻谷。结果表明，在处理 96 h 后，5 种稻谷均达到微发芽状态，芽长 1.403~1.847 cm，超声波-乳酸菌联合处理组的稻谷芽长显著大于空白组。5 种稻谷的总淀粉、直链淀粉和抗性淀粉的质量分数均随着发芽时间的延长呈下降趋势；‘直优 151’和‘宁香粳 9 号’的可溶性蛋白质质量浓度显著低于原稻谷，其他 3 种稻谷的蛋白质质量浓度相较于原稻谷无显著差异。5 种稻谷发芽前后 5 个时间段的红外光谱整体趋势相同，说明发芽过程中 5 种稻谷的变化是一致的。不同发芽时间的稻谷在 3 500 cm^{-1} 处的吸收峰强度差别较大，且随着发芽时间的延长，吸收峰强度逐渐减弱，说明 5 种稻谷的淀粉质量分数逐渐降低。扫描电子显微镜结果表明，随着发芽时间的推移，稻谷表面的颗粒由少变多，整体由平整光滑变成凹凸不平。体外模拟消化试验结果表明，原稻谷的碳水化合物水解率整体大于发芽 96 h 的稻谷，且发芽 96 h 的稻谷的 eGI 均低于 55，属于低 GI 食物。

综上所述，发芽稻谷可有效替代精米以解决其高 GI 的问题，发芽后的稻谷籽粒变得松软，有利于后续产品的开发和利用，且对于加强功能性稻谷的研究及促进其在我国市场的工业化生产和市场推广具有重要意义。

参考文献

[1] 贾红玲. 全稻芽发酵饮料的研制[D]. 长沙：中南林业科技大学，2018.

[2] 刘淼淼，孙倩倩，张波，等. 浸泡与发芽对蒸谷米镉含量的影响[J]. 中国食品学报，2024，24(7)：261-268.
LIU M M，SUN Q Q，ZHANG B，et al. Effect of soaking and germination on cadmium content in parboiled rice[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology，2024，24(7)：261-268.(in Chinese)

[3] SITU W，SONG X L，LUO S C，et al. Digestibility and structures of vinasse starches with different types of raw rice and fermented leaven[J]. Food Chemistry，2019，294：96-103.

[4] 李雨佳，何余堂，周欣欣，等. 发芽糙米的营养特性及其在食品工业中的应用进展[J]. 食品安全质量检测学报，2025，16(9)：56-64.
LI Y J，HE Y T，ZHOU X X，et al. Nutrition characteristics of germinated brown rice and its application progress in the food industry[J]. Journal of Food Safety & Quality，2025，16(9)：56-64.(in Chinese)

[5] 刘松，王少希，梁海泉，等. 发芽糙米营养特征及深加工工艺[J]. 现代农业科技，2023(1)：181-184.
LIU S，WANG S X，LIANG H Q，et al. Nutritional characteristics and deep processing technology of germinated brown rice[J]. XianDai NongYe KeJi，2023(1)：181-184.(in Chinese)

[6] 王斌. 稻谷发芽富集γ-氨基丁酸及大米加工技术研究[D]. 武汉：华中农业大学，2018.

[7] 施裕松. 发芽稻米富集γ-氨基丁酸技术与代餐粉开发[D]. 南京：南京农业大学，2019.

[8] 吕俊丽，王国泽，游新勇. 发芽谷物研究进展[J]. 粮食与油脂，2014，27(2)：5-7.
LÜ J L，WANG G Z，YOU X Y. Research progress of germinated grain[J]. Cereals & Oils，2014，27(2)：5-7.(in Chinese)

[9] 刘松，梁海泉. 一种高血糖人群食用的速食营养代餐粉及其制备方法：CN112515104A[P]. 2021-03-19.

[10] 吴晓娟，从竞远，吴伟，等. 糙米发芽前后营养成分的变化及其对发芽糙米糊化特性的影响[J]. 食品科学，2017，38(18)：67-72.
WU X J，CONG J Y，WU W，et al. Nutritional changes of brown rice during germination and their effects on pasting properties of germinated brown rice[J]. Food Science，2017，38(18)：67-72.(in Chinese)

[11] 郝树芹，唐欣，刘素慧. 超声波处理对豇豆种子发芽和幼苗生长的影响[J]. 山东农业工程学院学报，2022，39(9)：29-34.
HAO S Q，TANG X，LIU S H. Effects of ultrasonic treatment on cowpea seed germination and seedling growth[J]. The Journal of Shandong Agriculture and Engineering University，2022，39(9)：29-34.(in Chinese)

[12] MO Z，LIU Q，XIE W，et al. Ultrasonic seed treatment and Cu application modulate photosynthesis，grain quality，and Cu concentrations in aromatic rice[J]. Photosynthetica，2020，58(3)：682-691.

[13] 刘琪，唐湘如，潘圣刚，等. 超声波处理种子和基肥施锌对香稻产量、糙米香气的影响[J]. 西南农业学报，2014，27(4)：1551-1555.
LIU Q，TANG X R，PAN S G，et al. Effects of ultrasonic seeds and base zinc application on aroma，grain yield and quality of aromatic rice[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences，2014，27(4)：1551-1555.(in Chinese)

[14] 张广琛，孙雪，许新月，等. 超声波协同发芽处理对糙米淀粉结构和理化性质的影响[J]. 中国食品学报，2024，24(9)：268-276.
ZHANG G C，SUN X，XU X Y，et al. Effects of ultrasonication and germination synergistic treatment on the structure and physicochemical properties of brown rice starch[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology，2024，24(9)：268-276.(in Chinese)

[15] 朱创，杨丽，肖登荣，等. 超声波辅助处理对发芽糙米营养及食用品质的影响[J]. 食品工业科技，2021，42(24)：48-54.
ZHU C，YANG L，XIAO D R，et al. Effects of ultrasonic-assisted treatment on nutrition and edible quality of germinated brown rice[J]. Science and Technology of Food Industry，2021，42(24)：48-54.(in Chinese)

[16] 王小杰，陈其欣，张华，等. 不同乳酸菌菌株对小麦种子发芽及幼苗生理生化特性的影响[J]. 上海农业学报，2021，37(2)：20-24.
WANG X J，CHEN Q X，ZHANG H，et al. Effects of different lactic acid bacteria strains on germination of wheat seeds and physiological and biochemical characteristics of wheat seedlings[J]. Acta Agriculturae Shanghai，2021，37(2)：20-24.(in Chinese)

[17] 韩璐. 发芽糙米加工过程中活性物质变化及抗氧化活性的研究[D]. 锦州：渤海大学，2018.

[18] 杨闯，邢志超，李境艺，等. 不同发酵条件对糙米酵素中植酸酶和GABA的影响[J]. 食品工业，2021，42(10)：19-24.
YANG C，XING Z C，LI J Y，et al. Effect of different fermentation conditions on phytase and GABA in brown rice enzymes[J]. The Food Industry，2021，42(10)：19-24.(in Chinese)

[19] 朱静，陈顺心，刘秋员，等. 超声波-乳酸菌处理对水稻发芽过程中功能活性成分的影响[J]. 粮食与油脂，2025，38(7)：40-50.
ZHU J，CHEN S X，LIU Q Y，et al. Effects of ultrasound-*Lactobacillus* treatment on functional active components in germination process of rice[J]. Cereals & Oils，2025，38(7)：40-50.(in Chinese)

[20] 柳喜强. 种子处理技术对作物生长的影响研究[J]. 种子科技，2024，42(13)：88-90.
LIU X Q. Effect of seed treatment technology on crop growth[J]. Seed Science & Technology，2024，42(13)：88-90.(in Chinese)

[21] 刘甜. 发芽红曲菌发酵对高抗性淀粉水稻功能营养品质的影响[D]. 杭州：浙江大学，2022.

[22] 薛慧. 木薯抗性淀粉的制备与性质研究[D]. 郑州：河南工业大学，2013.

[23] 张永芳，原媛. 微波萃取-考马斯亮蓝法提取大豆蛋白的工艺研究[J]. 食品工业，2018，39(9)：44-48.
ZHANG Y F，YUAN Y. Study on the extraction process of soybean protein extraction microwave assisted Kaumas Bradford method[J]. The Food Industry，2018，39(9)：44-48.(in Chinese)

[24] 师英春，廖森泰，杨琼，等. 桑叶多酚、多糖及其复配物的体外模拟消化特性、降糖降脂和促益生菌增殖活性研究[J]. 食品安全质量检测学报，2023，14(8)：128-137.
SHI Y C，LIAO S T，YANG Q，et al. Study on simulated digestive characteristics *in vitro* ，hypoglycemic/hypolipidemic and probiotic proliferation activities of polyphenols，polysaccharides from mulberry leaves and their compounds[J]. Journal of Food Safety and Quality，2023，14(8)：128-137.(in Chinese)

[25] 孙健. 膳食纤维对稻米品质和消化特性的影响及高膳食纤维突变体的基因定位[D]. 杭州：浙江大学，2016.

[26] 崔亚楠，张晖，王立，等. 加工方式对谷物和豆类估计血糖生成指数的影响[J]. 食品与机械，2017，33(9)：1-4.
CUI Y N，ZHANG H，WANG L，et al. The effects of different processing methods on expected glycemic index of cereals and legumes[J]. Food & Machinery，2017，33(9)：1-4.(in Chinese)

[27] 王俊楠. 黄精品质改善及低GI代餐粉开发技术研究[D]. 阿拉尔：塔里木大学，2023.

[28] 武伟超，桑若杰，刘磊，等. 发芽、发酵对谷物营养和功能活性成分的影响及其应用研究进展[J]. 食品工业科技，2023，44(7)：411-418.
WU W C，SANG R J，LIU L，et al. Research progress on the effects of germination and fermentation on the nutritional and functional active ingredients of cereals and their applications[J]. Science and Technology of Food Industry，2023，44(7)：411-418.(in Chinese)

[29] 郭婕，李季平. 黄豆萌发过程中营养物质的动态变化研究[J]. 周口师范学院学报，2018，35(2)：89-91.
GUO J，LI J P. Dynamic change of nutrient in the germination process of soybean[J]. Journal of Zhoukou Normal University，2018，35(2)：89-91.(in Chinese)

[30] 金文玲. 水稻种子近红外吸收光谱分析及检测研究[D]. 长春：中国科学院长春光学精密机械与物理研究所，2020.

（责任编辑：闫林红）