

不同蒸汽爆破工艺制备的海水稻米的消化特性比较

干雨泽¹, 胡家睿¹, 汪曾玉¹, 邹炳均², 许心妍¹, 张召³, 陈成波², 徐学涛¹, 闫加磊^{1*}, 刘磊^{1*}

(1. 五邑大学药学与食品工程学院, 广东江门 529020) (2. 广东滨崎食品有限公司, 广东江门 529020)

(3. 广东芯选检验检测有限公司, 广东广州 510535)

摘要: 蒸汽爆破技术能破坏植物细胞结构, 释放生物活性成分, 是加工谷物休闲食品的重要方式之一。为探究蒸汽爆破对海水稻米消化特性的影响, 本研究以蒸煮海水稻米为对照, 采用蒸汽爆破工艺制备了不同蒸汽爆破条件的样品 (0.9-0、1.0-0、1.1-0、0.9-2、0.9-4), 采用体外酶解法测定了快消化淀粉、慢消化淀粉、抗性淀粉及预估血糖指数, 并采用 INFOGEST 标准体外消化模型测定了多酚、黄酮释放量及 FRAP、ORAC 抗氧化活性。结果表明: 与对照组相比, 蒸汽爆破处理组的快消化淀粉降低了 15.9%、抗性淀粉含量升高了 21.7%; 预估血糖指数随压力升高而降低, 0.9-4 组预估血糖指数降至 39.32 (比对照减少 22.00%)。在 INFOGEST 消化过程中, 1.1-0 组在肠消化 120 min 时的多酚、黄酮释放量分别较对照组增加 5.42 倍和 2.38 倍。抗氧化活性方面, 1.1-0 组 FRAP 值较对照组增加 3.08 倍, ORAC 值较对照组增加 2.93 倍。综上, 蒸汽爆破处理可有效改善海水稻米的淀粉消化特性、降低预估血糖指数, 并促进多酚、黄酮的消化释放及抗氧化活性提升, 为开发海水稻米营养方便食品提供理论参考。

关键词: 蒸汽爆破; 海水稻米; 预估血糖指数; 体外消化; 多酚

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2027.7.0717

Comparison of Digestive Properties of Sea Rice Prepared by Different Steam Explosion Processes

GAN Yuze¹, HU Jiarui¹, WANG Zengyu¹, ZOU Bingjun², XU Xinyan¹, ZHANG Zhao³, CHEN Chengbo², XU Xuetao¹, YAN Jialei^{1*}, LIU Lei^{1*}

(1.School of Pharmacy and Food Engineering, Wuyi University, Jiangmen 529020, China) (2.Guangdong Binqi Food Co. Ltd., Jiangmen 529020, China) (3.Guangdong Longseek Testing Co. Ltd., Guangzhou 510535, China)

Abstract: Steam explosion technology can disrupt plant cell structures and release bioactive components, making it an important method for processing grain-based snack foods. To investigate the effects of steam explosion on the digestive properties of sea rice, samples were prepared under different steam explosion conditions (0.9-0, 1.0-0, 1.1-0, 0.9-2, 0.9-4) using steam explosion technology, with cooked sea rice as the control. The contents of rapidly digestible starch, slowly digestible starch, resistant starch, and the estimated glycemic index were determined by an *in vitro* enzymatic method. The INFOGEST standard *in vitro* digestion model was employed to measure the release of polyphenols and flavonoids, as well as the ferric reducing antioxidant power and oxygen radical absorbance capacity antioxidant activities. The results showed that, compared with the control group, the rapidly digestible starch content decreased by 15.9% and the resistant starch content increased by 21.7% in the steam explosion treatment groups. The estimated glycemic index value decreased with increasing pressure, reaching the lowest value of 39.32 in the 0.9-4 group (22.00% lower than that of the control). During INFOGEST digestion, the polyphenol release of the 1.1-0 group at 120 min of intestinal digestion was 5.42 times higher than that of the control group, and the flavonoid release was 2.38 times higher. Regarding antioxidant activity, the ferric reducing antioxidant power value of the 1.1-0 group was 3.08 times higher than that of the control group, and the oxygen radical absorbance capacity value was 2.93 times higher. In conclusion, steam explosion treatment can effectively improve the starch digestibility, reduce the estimated glycemic index, promote the digestive release of polyphenols and flavonoids, and enhance the antioxidant activity of sea rice, providing a theoretical reference for the development of nutritious convenience foods from sea rice.

收稿日期: 2026-05-11; 修回日期: 2026-07-18; 接受日期: 2026-07-20

基金项目: 五邑大学教育教学研究与改革项目 (JX2025002); 广东省本科高校教学质量与教学改革工程建设项目 (GDJX2025002); 广东省普通高校重点领域专项 (2024ZDZX2007)

作者简介: 干雨泽 (2001-), 男, 硕士, 研究方向: 农产品加工, E-mail: cctvv1124477472@163.com

通讯作者: 刘磊 (1982-), 男, 博士, 研究员, 研究方向: 粮油加工, E-mail: liuleifood@163.com; 共同通讯作者: 闫加磊 (1989-), 男, 博士, 副教授, 研究方向: 天然产物化学, E-mail: yanjialei@wyu.edu.cn

Key words: steam explosion; sea rice; estimated glycemic index; *in vitro* digestion; polyphenol

海水稻是沿海滩涂和盐碱地开发利用的首选粮食作物,对于国家粮食安全具有不可替代的战略价值。与普通稻米相比,海水稻米富含膳食纤维、多酚、黄酮等多种生物活性成分,并含有较高的钠、镁、钙等矿物质^[1]。多酚类化合物具有良好的抗氧化、抗炎、降血糖等多种生理功能,能降低慢性疾病的发病风险^[2]。然而,海水稻米皮层结构致密,导致酚类物质难以充分释放。高含量的膳食纤维也导致海水稻米蒸煮时间长、口感粗糙,严重影响其作为主食的消费推广。

蒸汽爆破技术是一种高效且环保的物理加工方法,其基本原理是将物料置于密封的高压容器中,通过加热对物料进行高温高压处理,随后瞬间泄压使物料内部高压蒸汽瞬间释放并产生机械剪切力,从而使物料快速熟化^[3,4]。Wan 等^[5]指出该技术涉及热降解、机械撕裂等多种作用,能够断裂糖苷键和酯键,从而增加酚类物质中羧基和酚羟基的含量。在蒸汽爆破过程中,膨化压力和物料的水分含量是两个非常关键的工艺参数。膨化压力直接决定了泄压瞬间产生的机械剪切力的强弱,而水分含量则影响物料的热传导效率^[6]。Zhou 等^[7]研究蒸汽爆破改性薏米麸皮可溶性膳食纤维的体外消化特性时发现,与未处理样品相比,蒸汽爆破改性后的样品消化物中酚类化合物含量及抗氧化能力均显著增加。然而,该研究仅考察了单一压力下的改性效果,未涉及水分添加量对薏米麸皮多酚释放及消化特性的影响。袁茂翼等^[8]对苹果皮渣的研究也证实,蒸汽爆破预处理后,样品在体外消化过程中多酚、黄酮的释放量及抗氧化能力均得到不同程度改善。但该研究仅设置了不同的爆破压力,未对不同水分添加量条件下苹果皮渣多酚释放规律及消化特性进行探究。

INFOGEST 标准体外消化模型已被广泛应用于谷物消化特性的评价^[9],而目前关于蒸汽爆破处理如何影响海水稻米的淀粉消化特性及多酚在胃肠道的释放效果尚未见报道。因此,本文以蒸煮的海水稻米为对照,采用不同蒸汽爆破条件制备样品,采用 INFOGEST 标准体外消化模型,研究其在体外消化过程中淀粉消化特性与酚类物质释放的变化规律,为海水稻米的高值化加工利用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

海红 11 号(糙米,淀粉 53.6%、粗蛋白 8.16%、含水量 6.73%、膳食纤维 3.80%,储藏时间 3 个月),购自广东海稻红农业科技有限公司。

糖化酶($\geq 260 \text{ U} \cdot \text{mL}^{-1}$)、胃蛋白酶($\geq 400 \text{ U} \cdot \text{mg}^{-1}$)和胰酶($4 \times \text{USP}$),购自美国 Sigma 公司;猪胰 α -淀粉酶($50 \text{ U} \cdot \text{mg}^{-1}$),购自上海源叶生物科技有限公司;淀粉葡萄糖苷酶($10 \text{ 万 U} \cdot \text{mL}^{-1}$),购自上海麦克林生化科技股份有限公司;淀粉含量检测试剂盒,购自山海吉至生化科技有限公司;葡萄糖检测试剂盒,购自上海碧云天生物技术股份有限公司;偶氮二异丁脒盐酸盐(AAPH)、荧光素钠盐,购自美国 sigma 公司;Trolox、TPTZ,购自上海麦克林生化科技股份有限公司;DNS 试剂,购自飞净生物科技有限公司;其他化学试剂均为分析纯级。

喜鸣 380 mL 旋转式蒸汽爆破机,辛集市亿鑫荣商贸有限公司;SMF2002 粉碎机,浙江绍兴苏泊尔家居用品有限公司;Biotek Synergy Neo2 多功能酶标仪,美国 Agilent 公司;Hei-VAP Precision 旋转蒸发仪,德国 Heidolph 公司;TGL-16 高速冷冻离心机,四川蜀科仪器有限公司;BJH-W180P 智能电热水壶,广东天际电器股份有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 蒸汽爆破海水稻米的制备

根据预实验结果,确定正式实验的蒸汽爆破条件如下:膨化压力选取 0.9、1.0、1.1 MPa 三个梯度,水分添加量选取 0%、2%、4%三个水平,其中水分添加量组的膨化压力固定为 0.9 MPa。样品编号为“压力(MPa)-水分添加量(%)”,例如“0.9-2”表示在 0.9 MPa 下进行蒸汽爆破、水分添加量为 2%的海水稻米。

准确称取 80.0 g 海水稻米。分别按样品质量的 0%、2%、4%加入蒸馏水。样品经充分混匀后密封,在室温避光环境下静置 24 h,确保水分均匀渗透进入籽粒内部。

制备过程采用旋转式蒸汽爆破设备。压力梯度组在压力升至 0.9、1.0 及 1.1 MPa 时,迅速开启泄压阀,泄压

瞬间样品喷入接收装置,反应随即结束。根据预实验结果,水分添加量组的膨化压力统一设定为 0.9 MPa。

收集蒸汽爆破处理后的样品,自然冷却后移入干燥器内保存。部分样品利用粉碎机粉碎 60 s,并过 40 目筛。最后收集筛下粉末,将其存放在干燥器中备用,用于后续的分析与检测。

1.2.2 蒸煮海水稻米的制备

对照组(Control)为煮熟的海水稻米,其加工方式为:准确称取 50 g 海水稻米样品,将其置于智能电热水壶,按料水比 1:1.3(质量比)添加纯净水,执行煮饭程序 20 min,所得海水稻米饭样品用于 INFOGEST 体外消化模型。

将煮熟后的海水稻米样品在烘箱中 40 °C 烘干 24 h 并用打粉机打粉 60 s,并过 40 目筛。收集筛下粉末,将其存放在干燥器中备用,用于后续分析与检测。

1.2.3 淀粉消化特性的测定

参考 Raza^[10]的方法,并稍加改进。准确称取 0.2 g 样品与 50 mL 离心管中,加入 10 mL 醋酸缓冲液(0.2 mol L⁻¹, pH 值 5.2),随后加入 10 mL 混合酶液(糖化酶与猪胰 α -淀粉酶浓度分别为 100 U mL⁻¹和 290 U mL⁻¹)。将离心管置于 37 °C 水浴振荡器中,以 200 rpm 振荡反应。分别在反应 0、20、120 min 时取 1 mL 酶解液,立即于沸水浴中灭活 5 min,8 000 rpm 离心 10 min,后取上清液定容。采用 3,5-二硝基水杨酸法测样液的还原糖含量。

按下列公式计算快消化淀粉(Rapidly Digestible Starch, RDS)、慢消化淀粉(Slowly Digestible Starch, SDS)和抗性淀粉(Resistant Starch, RS)的含量(以占总淀粉的质量分数表示):

$$A_1 = \frac{(G_{20} - FG) \times 0.9}{TS} \times 100\% \quad (1)$$

$$A_2 = \frac{(G_{120} - G_{20}) \times 0.9}{TS} \times 100\% \quad (2)$$

$$A_3 = (1 - A_1 - A_2) \times 100\% \quad (3)$$

式中:

A_1 ——快消化淀粉含量(RDS), %;

A_2 ——慢消化淀粉含量(SDS), %;

A_3 ——抗性淀粉含量(RS), %;

G_{20} ——酶解 20 min 时酶解液中还原糖的含量, mg;

G_{120} ——酶解 120 min 时酶解液中还原糖的含量, mg;

FG ——未进行酶解样液中还原糖的含量, mg;

TS ——样品总淀粉含量, mg;

0.9——转换因子。

1.2.4 预估血糖生成指数的测定

参考 Goni 等^[11]和 Frei 等^[12]的方法,测定样品的预估血糖生成指数(estimated Glycemic Index, eGI)。准确称取 0.1 g 样品于 50 mL 离心管中,加入 15 mL 醋酸-醋酸钠缓冲液(0.2 mol L⁻¹, pH 值 5.2),于 37 °C 水浴振荡器中预热 10 min。随后加入 0.2 mL 混合酶液(α -淀粉酶 35 U mL⁻¹, 淀粉葡萄糖苷酶 26 U mL⁻¹),立即将转速调至 200 r min⁻¹启动反应,在 0 min、30 min、60 min、90 min、120 min、150 min、180 min 时分别吸取 0.1 mL 上清液,迅速加入 2 mL 无水乙醇中混匀灭活。采用 GOPOD 葡萄糖试剂盒在 505 nm 波长下测定葡萄糖含量,并换算为水解的淀粉含量。水解淀粉含量与样品总淀粉含量比值即为淀粉水解率,绘制体外水解曲线。采用以下方程对淀粉进行体外水解动力学非线性拟合。

$$C_t = C_{\infty}(1 - \exp(-k \times t)) \quad (4)$$

采用 Origin 软件拟合计算得出动力学常数 k ,按以下公式计算水解曲线下面积(AUC)。

$$AUC = C_{\infty}(t_f - t_0) - \left(\frac{C_{\infty}}{k}\right)(1 - \exp(-k(t_f - t_0))) \quad (5)$$

水解指数(HI)由以下公式计算得出:

$$HI = \frac{B_1}{B_2} \times 100\%$$

(6)

以白面包为标准物，得出水解指数（HI）与 eGI 之间存在高度相关性，由以下公式可预估血糖生成指数。

$$B_3 = 0.8198 + 0.862 \times HI$$

(7)

式中：

- C_t —— t 时间时的淀粉水解率，%；
- C_{∞} ——最终 180 min 时的淀粉水解率，%；
- k ——动力学常数；
- t ——水解时间，min；
- AUC——水解曲线面积；
- t_f ——最终水解时间（180 min）；
- t_0 ——最开始水解时间（0 min）；
- HI——淀粉水解指数；
- B_1 ——样品消化曲线下面积（0~180 min）；
- B_2 ——白面包消化曲线下面积（0~180 min）；
- B_3 ——预估血糖生成指数（eGI）。

1.2.5 模拟消化液的配置

模拟胃液（SGF）和模拟肠液（SIF）的配置参照 INFOGEST 标准体外消化模型进行。首先分别配置 SGF 和 SIF 母液：配置 SGF 时，取上述 0.5 mol L⁻¹ KCl 储备液 13.8 mL、0.5 mol L⁻¹ KH₂PO₄ 储备液 1.8 mL、1 mol L⁻¹ NaHCO₃ 储备液 25.0 mL、2 mol L⁻¹ NaCl 储备液 23.6 mL、0.15 mol L⁻¹ MgCl₂(6H₂O) 储备液 0.8 mL、0.5 mol L⁻¹ (NH₄)₂CO₃ 储备液 1.0 mL，混合后补加蒸馏水之总体积 1 L。配置 SIF 时，取 0.5 mol L⁻¹ KCl 储备液 13.6 mL、0.5 mol L⁻¹ KH₂PO₄ 储备液 1.6 mL、1 mol L⁻¹ NaHCO₃ 储备液 85.0 mL、2 mol L⁻¹ NaCl 储备液 19.2 mL、0.15 mol L⁻¹ MgCl₂(H₂O)₆ 储备液 2.2 mL，同样补加蒸馏水之总体积 1 L。在消化实验当天，向 100 mL SGF 和 100 mL SIF 中分别加入 0.10 mL 和 0.35 mL 浓度为 0.3 mol L⁻¹ 的 CaCl₂(H₂O)₂ 溶液。此外，SGF 还需用 6 mol L⁻¹ HCl 调节 pH 值至 1.5~2.0，以模拟胃液酸性环境。

1.2.6 模拟体外消化酚类物质释放的方法

基于 INFOGEST 标准体外消化模型^[9]进行少量修改，具体步骤如表 1 所示。

表 1 海水稻米体外消化流程

Table 1 in vitro digestion process of sea rice

过程	步骤
口腔消化	选取三名口腔健康的志愿者（23~25 岁）。使用清水刷牙后，口腔咀嚼 1.5 g 蒸汽爆破海水稻米，对照组采用 10 g 海水稻米饭（30 s 内咀嚼 25 次），用 20 mL 超纯水漱口，将食物残渣吐至 100 mL 蓝盖瓶中；立即加入 15 mL 预热（37 ℃）的 SGF 溶液，使口腔淀粉酶失活；取 2 mL 上清液于装有 2 mL 丙酮溶液的 5 mL 离心管中
胃消化	用 6 mol L ⁻¹ 盐酸调整消化模拟溶液 pH~2，加入 1 mL 胃蛋白酶溶液（4.5 mg/mL，m/V），37 ℃磁力搅拌持续孵育 1 h（180 rpm），加入 30 mL 预热（37 ℃）的 SIF 溶液，使胃蛋白酶失活；取 2 mL 上清液于装有 2 mL 丙酮溶液的 5 mL 离心管中
小肠消化	用 2 mol L ⁻¹ NaOH 调整消化模拟溶液 pH~7，取 200 μL 上清液于装有 800 μL 0.3 mol L ⁻¹ Na ₂ CO ₃ 溶液的 2 mL 离心管中，后加入 2 mL 猪胰酶 SIF 溶液（16.25 mg/mL，m/V）；注：使用前猪胰酶需在 6 000 rpm 离心 10 min，取上清液使用。整个消化过程在 37 ℃磁力搅拌器持续孵育 2 h（180 rpm）；分别在 60、120 min 取 2 mL 消化液至预先装有 2 mL 丙酮溶液的 5 mL 离心管中停止酶反应

1.2.7 消化液中酚类物质的萃取

参考 Liu 等^[13]的方法，将 1.2.6 中提取好的消化液使用乙酸乙酯萃取，每次加入 100 mL，此过程重复 5 次。合并 5 次收集到的乙酸乙酯相，使用旋转蒸发仪在 42 ℃条件下减压浓缩，使用 9 mL 甲醇复溶底部的干物质。所得溶液即为酚类物质提取液，将其密封并置于-20 ℃环境下避光保存备用。

1.2.8 模拟体外消化样品多酚释放量的测定

本实验参考 Adom 等^[14]的方法并略作修改,用于测定海水稻米样品中的多酚含量。向 5 mL 离心管中依次准确加入 0.5 mL 超纯水、0.125 mL 福林酚试剂以及 0.125 mL 制备好的多酚提取液。使用涡旋振荡器将体系充分混匀,并在室温下静置 6 min。随后,向管中加入 1.25 mL 质量分数为 7% 的 NaHCO_3 溶液,并使用超纯水定容至 3 mL。再次涡旋混匀后,将反应管置于室温环境下避光静置 1.5 h,使其充分显色。

测定吸光度:以甲醇作为空白对照体系,在 760 nm 波长下测定溶液的吸光度。使用没食子酸标准品绘制标准曲线。样品的多酚含量以每 100 g 干重所含的没食子酸当量来表示 (mg GAE/100g DW)。

1.2.9 模拟体外消化样品黄酮释放量的测定

本实验参考 Ti 等^[15]的方法并略作修改,用于测定海水稻米样品中的黄酮含量。精密移取 300 μL 制备好的多酚提取液至 5 mL 离心管中。依次准确加入 1.5 mL 超纯水和 90 μL 质量分数为 5% 的 NaNO_2 溶液(要求现配现用)。使用涡旋振荡器将体系充分混匀,并在室温下避光静置 6 min。随后,向管中加入 180 μL 质量分数为 10% 的 AlCl_3 溶液,再次涡旋混匀并避光静置 5 min。最后,加入 600 μL 浓度为 1 mol L^{-1} 的 NaOH 溶液,并使用超纯水准确定容至 3 mL,充分混匀后待测。

测量吸光度:反应结束后,以甲醇作为空白对照体系,在 510 nm 波长下测定溶液的吸光度。使用儿茶素标准品绘制标准曲线。样品的黄酮含量以每 100 g 干重中的儿茶素当量来表示 (mg CE/100g DW)。

1.2.10 模拟体外消化样品 FRAP 抗氧化能力的测定

本实验参考 Zhang 等^[16]的方法进行,并略作修改。准确吸取 30 μL 游离酚或结合酚提取液,加入 900 μL 预热的 FRAP 工作液,并用涡旋混合器混合,然后将混合液置于室温避光条件下静置 30 min。反应结束后,在 593 nm 波长处测定溶液的吸光度。以硫酸亚铁代替提取液制取标准曲线。样品的 FRAP 还原能力通过标准曲线计算得出,测定结果以每 100 g 干基物质中所含的二价铁离子当量表示 ($\mu\text{mol Fe}^{2+}$ /100g DW)。

1.2.11 模拟体外消化样品 ORAC 抗氧化能力的测定

取上述 1.2.6 中的多酚萃取液和 PBS 缓冲液(pH 值 7.4)作为空白对照以及不同浓度的 Trolox 标准品溶液(50、25、12.5、6.25 $\mu\text{mol L}^{-1}$),将每种溶液 20 μL 加入 96 孔板中,设置酶标仪程序设置为 37 $^{\circ}\text{C}$ 孵育 10 分钟,然后向每个孔中加入 200 μL 荧光素工作液,继续在 37 $^{\circ}\text{C}$ 孵育 20 分钟,最后,向每个孔中加入 20 μL AAPH(32.4 mg mL^{-1}) (对照孔中不加自由基)。将酶标仪设置为在恒温 37 $^{\circ}\text{C}$ 条件下,以 4.5 分钟为间隔测量每个孔的荧光强度,激发波长为 485 nm,发射波长为 538 nm,监测荧光素钠在自由基攻击下的衰退动力学曲线。通过 Net AUC (荧光衰退曲线下净面积)量化酚类提取液的自由基清除能力,以 Trolox 标准品(6.25、12.5、25.50 μmol) 的 NetAUC 建立标准曲线。将样品 NetAUC 代入回归方程,计算抗氧化能力指数,以干基每 100 g 样品中 Trolox 当量表示 ($\mu\text{mol TE}$ /100g DW)。以 17.5 μmol 没食子酸(GAE)为阳性对照,平行测定 3 次。

1.3 数据分析

所有实验一式三份进行,结果均以平均值 $\pm$ 标准差 (Means $\pm$ SD) 表示,使用 SPSS Statistics 27.0 进行分析数据,平均数之间的差异通过 ANOVA 分析, $P < 0.05$ 为显著性差异,采用 Excel 和 Origin2024 软件进行统计分析和图形制作。

2 结果与讨论

2.1 蒸汽爆破条件对海水稻米淀粉消化特性及预估血糖指数的影响

2.1.1 蒸汽爆破条件对海水稻米淀粉消化特性的影响

蒸汽爆破对海水稻米淀粉体外消化特性的影响如图 1 所示。

与对照组 (Control) 相比,蒸汽爆破处理组样品的 RDS 含量均有所下降,RS 含量则显著上升。随着膨化压力的升高,RDS 含量从对照组的 48.29% 降低至 1.1-0 样品的 40.63%,SDS 含量从对照组的 7.78% 降至 1.1-0 样品的 3.22%,RS 含量则从对照组的 43.93% 升高至 1.1-0 样品的 56.14%。蒸汽爆破处理后 RS 含量升高、RDS 含量降低,这可能与蒸汽爆破诱导的分子重排有关。Ma 等^[17]对高粱的研究也发现,蒸汽爆破处理显著增加了结合态酚类的释放,并促进了淀粉-多酚复合物的形成,这可能是 RS 含量升高的原因之一,也有可能是因为蒸汽爆破诱导的分子重组通过增强氢键促进紧密结构的形成,从而限制酶的可及性并增加 RS 含量^[18]。

随着水分添加量的增加，RDS 含量从 0.9-0 样品的 45.53%降低至 0.9-4 样品的 38.98%，SDS 含量从 0.9-0 样品的 2.97%提升至 0.9-4 样品的 9.52%，RS 含量则从 0.9-0 样品的 51.59%升高至 0.9-4 样品的 56.50%。这一结果表明，过量水分添加（0.9-4）会抑制淀粉颗粒的充分膨化，使 RS 含量升高并降低 RDS 含量。研究表明，其快慢消化淀粉的改变可能是在水、热和机械力的作用下结晶结构的改变，且高热使淀粉抗酶能力增加延长了人体淀粉酶作用时间，导致了 RDS 的减少^[19]。于美康^[20]对汽爆藜麦的研究发现，可能是由于部分支链结晶膨胀或断裂，为酶提供了良好的反应底物，因而更容易产生抗性淀粉。

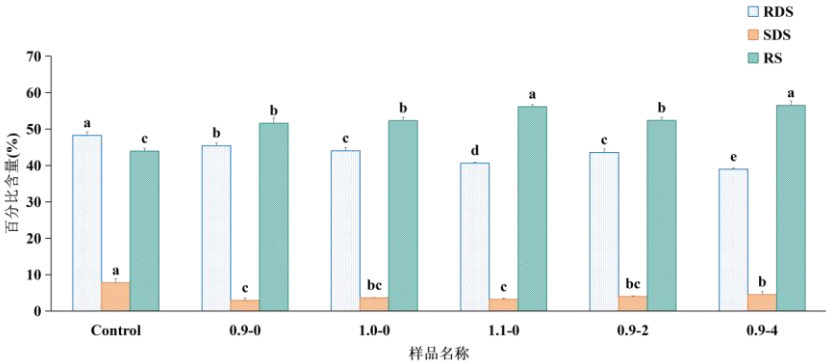


图 1 不同蒸汽爆破条件对海水稻米淀粉体外消化特性的影响

Fig.1 Effects of different steam explosion conditions on *in vitro* starch digestibility of sea rice

注：样品编号中的数字分别代表膨化压力（MPa）和水分添加量（%），如“0.9-2”表示水分添加量为 2%且在 0.9 MPa 下进行蒸汽爆破的海水稻米。图柱上标注字母不同时，表示差异达到显著性水平（ $P<0.05$ ），下同。

2.1.2 蒸汽爆破条件对海水稻米预估血糖生成指数的影响

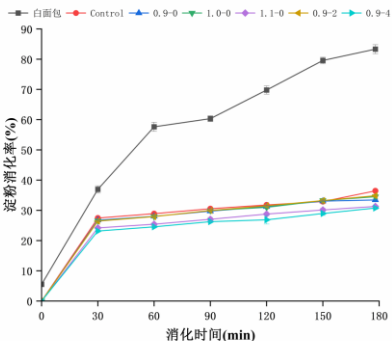


图 2 不同蒸汽爆破条件对海水稻米淀粉体外水解的影响

Fig.2 Effects of different steam explosion conditions on *in vitro* starch hydrolysis of sea rice

表 2 蒸汽爆破对海水稻米体外消化淀粉消化动力学参数和预估血糖生成指数的影响

Table 2 Effects of steam explosion on starch digestion kinetic parameters and estimated glycemic index of sea rice during *in vitro*

digestion conditions				
样品	$C_{\infty}/\%$	$k(\times 10^{-3})$	HI	eGI
白面包	83.29 ± 1.53^a	17.68 ± 0.12^{bc}	100 ^a	94.40 ^a
Control	36.44 ± 0.18^b	15.62 ± 0.16^e	48.96 ± 1.44^b	50.41 ± 1.24^b
0.9-0	33.43 ± 0.12^c	19.24 ± 0.84^a	40.07 ± 1.50^{cd}	42.73 ± 1.29^{cd}
1.0-0	34.50 ± 0.65^{bc}	17.16 ± 0.26^{cd}	40.98 ± 1.87^c	43.53 ± 1.61^c
1.1-0	31.31 ± 0.19^d	18.10 ± 0.12^{bc}	37.92 ± 0.66^d	40.88 ± 0.57^{de}
0.9-2	34.84 ± 0.38^{bc}	18.37 ± 0.49^{ab}	42.42 ± 0.96^c	44.76 ± 0.82^c
0.9-4	30.76 ± 0.41^d	16.66 ± 0.18^d	36.11 ± 1.09^e	39.32 ± 0.94^e

注：同列右肩不同的小写字母表示具有显著差异（ $P<0.05$ ）。

蒸汽爆破对海水稻米淀粉体外水解率和预估血糖生成指数的影响如图 2 所示。 C_{∞} 为消化 180 min 时淀粉水解率, k 为消化动力学常数, HI 为消化水解指数, eGI 为预估血糖生成指数。

随着膨化压力的升高, 海水稻米的淀粉水解率呈下降趋势, 而随着水分添加量的增多, 海水稻米的淀粉水解率呈先升高后下降的趋势。当膨化压力升高至 1.1 MPa 时, 同时间段的淀粉消化率上升幅度较大, 这可能与 2.1.1 中 RDS 和 RS 的占比有关。Ma 等^[17]的研究也发现, 经蒸汽爆破处理的高粱可使淀粉水解率显著降低。而在预实验中, 过高水分添加量 (0.9-4) 的增加使海水稻米的糊化程度下降, 进而导致其淀粉水解率在同时间下显著减少。

随着膨化压力的升高, 样品的 eGI 值呈现下降的趋势。1.1-0 组的 eGI 值为 40.88, 相比于对照组的 50.41 降低了, 较对照组降低了 18.91%。蒸汽爆破处理显著降低了 eGI 值。蒸汽爆破诱导的分子重组通过促进淀粉-多酚复合物的形成, 限制酶的可及性, 从而降低 eGI 值^[11]。水分添加量对海水稻米 eGI 值的影响同样显著。与 0.9-0 组相比, 0.9-2 组的 eGI 升至 44.76, 增加了 4.75%, 表明 2% 的适量水分添加有助于淀粉糊化, 进而提高消化率; 而 0.9-4 组的 eGI 值降至 39.32, 较 0.9-0 组降低了 7.98%。这可能是由于过量水分 (0.9-4) 导致膨化过程中瞬时压降降低, 淀粉未完全糊化, 形成了更为致密的结构, 从而限制了消化酶的水解作用^[21]。

2.2 蒸汽爆破条件对海水稻米体外消化酚类物质释放量的影响

2.2.1 蒸汽爆破条件对海水稻米体外消化多酚释放量的影响

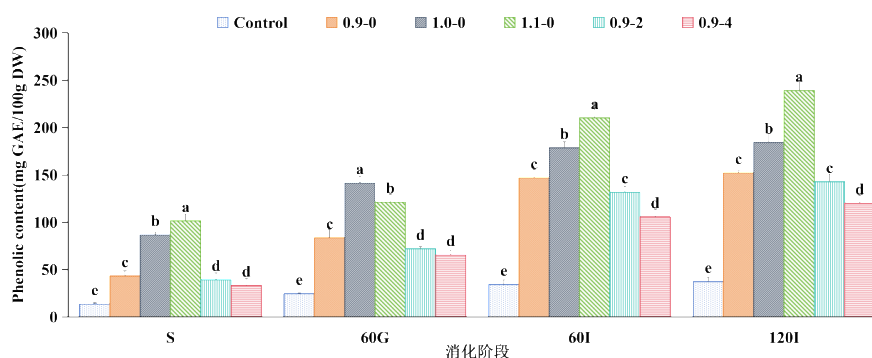


图 3 不同蒸汽爆破条件下海水稻米体外消化的多酚释放量

Fig.3 Polyphenol release of sea rice during *in vitro* digestion under different steam explosion

注: 图中“S”表示口腔消化阶段, “G”表示胃消化阶段, “I”表示小肠消化阶段, 数字表示消化时间 (min)。例如, “60G”代表胃消化 60 min 时的样品, 下同。

蒸汽爆破对海水稻米体外消化多酚释放量的影响如图 3 所示。总体上, 随着消化过程由口腔到小肠, 海水稻米样品的多酚释放量呈现逐步上升的趋势。已有文献报道, 蒸汽爆破可使亚麻籽粕游离酚释放量增加 125.81%^[22]。

对照组是煮熟的海水稻米, 口腔消化阶段多酚的释放量为 13.63 mg GAE/100g DW, 五种不同蒸汽爆破条件下处理的海水稻米口腔消化阶段多酚的释放量分别为 43.35、86.84、101.56、39.34、33.32 mg GAE/100g DW, 相比于对照组提升了 218.05%、537.12%、645.05%、188.63%、144.46%。蒸汽爆破处理组的多酚释放量均显著高于对照组, 其中膨化压力为 1.1-0 样品在口腔阶段表现出了最高的释放量。Wang 等^[21]研究发现, 蒸汽爆破能够有效破坏物料的细胞壁结构, 促使游离态酚类物质在消化初期迅速溶出。胃消化 60 min 后, 对照组多酚的释放量为 24.55 mg GAE/100 g DW, 五种不同蒸汽爆破处理的海水稻米多酚释放量分别为 83.70、141.56、121.41、72.01、65.51 mg GAE/100 g DW, 相比于对照组提升了 240.94%、476.62%、394.54%、193.32%、166.84%。在胃部酸性环境及胃蛋白酶的协同作用下, 部分酚类物质与其结合的蛋白质解离, 导致释放量相对口腔阶段显著增长。肠消化是多酚释放量最多的阶段, 肠消化 60 min 后, 对照组多酚的释放量为 34.23 mg GAE/100 g DW, 五种不同蒸汽爆破处理的海水稻米多酚释放量分别为 146.99、178.65、210.31、131.85、105.70 mg GAE/100 g DW, 相比于对照组分别提升了 329.40%、421.95%、514.52%、285.24%、208.82%; 肠消化 120 min 后, 多酚释放量少量增加, 对照组多酚的释放量为 37.29 mg GAE/100 g DW, 五种不同蒸汽爆破处理的海水稻米多酚释放量分别为 152.28、184.39、239.25、142.91、120.16 mg GAE/100 g DW, 相比于对照组分别增加了 308.46%、394.45%、541.61%、283.32%、222.24%。肠道的弱碱性环境和胰酶作用有利于被破坏的细胞壁中结合酚的进一步释放。唐宇等^[23]在研究蒸汽爆

破处理苦荞麸皮时发现,经蒸汽爆破工艺处理后的样品在胃肠消化阶段的多酚释放量显著提高。Zhu 等^[24]的研究也发现,蒸汽爆破显著提高了样品在模拟胃肠消化过程中多酚和黄酮的释放量。1.1-0 样品在肠消化 120 min 时的多酚释放量 (239.25 mg GAE/100 g DW) 超过了 1.0-0 样品 (184.39 mg GAE/100 g DW)。这一现象表明,在肠消化后期,高膨化压力下的细胞壁结构和淀粉基质反而释放出更多的酚类物质。Gao 等^[25]研究发现,在模拟消化过程中,结合态酚类可转化为游离态。有研究表明,蒸汽爆破处理显著提高了多酚在体外消化过程中的生物可及性^[26],原因是蒸汽爆破对样品的破坏程度过大导致其消化过程中蛋白质和碳水化合物更易变性,在一定程度上提高了其在胃肠道消化过程中酚类释放的速度^[27]。

水分添加量处理组的多酚释放量在各消化阶段均低于高压处理组。0.9-4 样品相比于 0.9-0 样品在肠 120 min 时多酚释放量减少了 21.09%。当水分添加量过高时 (0.9-4),膨化瞬间的瞬时压降低,减弱了剪切力对海水稻米细胞壁的破坏作用,从而限制了后续消化过程中酚类物质的释放^[28]。此外,4%的水分添加量导致汽爆时淀粉膨化不完全,结构更为致密,从而阻碍了消化酶的作用和多酚的释放^[6]。

2.2.2 蒸汽爆破条件对海水稻米体外消化黄酮释放量的影响

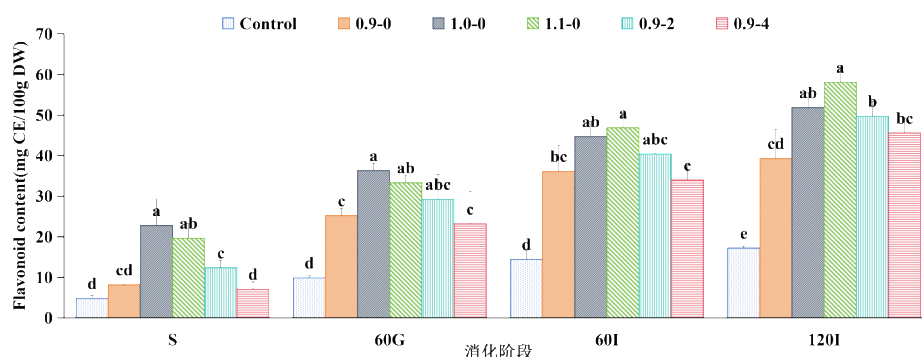


图4 不同蒸汽爆破条件下海水稻米体外消化的黄酮释放量

Fig.4 Flavonoid release of sea rice during *in vitro* digestion under different steam explosion conditions

蒸汽爆破对海水稻米体外消化黄酮释放量的影响如图4所示。随着消化过程从口腔向小肠推进,各样品的黄酮释放量呈现逐步上升的趋势。已有研究表明蒸汽爆破可使籽粒苋籽实的总黄酮含量提高 7.3 倍^[29]。

对照组是煮熟的海水稻米,口腔消化阶段黄酮的释放量为 4.80 mg CE/100 g DW,五种不同蒸汽爆破处理的海水稻米口腔消化阶段黄酮的释放量分别为 8.15、22.79、19.65、12.34、7.11 mg CE/100 g DW,比对照组提升了 69.79%、374.79%、309.38%、157.08%、48.13%。蒸汽爆破处理组的黄酮释放量均显著高于对照组。其中 1.0-0 样品在口腔消化阶段表现出最高释放量 (22.79 mg CE/100 g DW),与 1.1-0 样品之间无显著性差异。胃消化 60 min 后,对照组黄酮的释放量为 9.87 mg CE/100 g DW,五种不同蒸汽爆破处理的海水稻米黄酮释放量分别为 25.19、36.36、33.31、29.25、23.15 mg CE/100 g DW,比对照组提升了 155.22%、268.39%、237.49%、196.35%、134.55%。与口腔阶段相比,各处理组在酸性环境和胃蛋白酶的降解作用下释放量均有明显增加,但涨幅存在差异。1.0-0 样品在胃消化阶段仍保持最高水平 (36.36 mg CE/100 g DW),而 1.1-0 样品 (33.31 mg CE/100 g DW) 略低于 1.0-0 样品,但无显著性差异,说明适度的高压处理保证了黄酮在胃消化阶段的吸收。肠消化 60 min 后对照组黄酮的释放量为 14.45 mg CE/100 g DW,五种不同蒸汽爆破处理的海水稻米黄酮释放量分别为 36.13、44.73、46.88、40.43、33.98 mg CE/100 g DW,比对照组提升了 150.03%、209.55%、224.43%、179.79%、135.16%。蒸汽爆破对黄酮释放的促进作用可能还涉及黄酮类化合物的结构转化。研究表明,蒸汽爆破不仅能通过断裂糖苷键或酯键释放细胞壁中的结合态黄酮,还能促使部分黄酮糖苷发生脱糖基转化,生成苷元形式^[30]。肠消化 120 min 后对照组黄酮的释放量为 17.19 mg CE/100 g DW,五种不同蒸汽爆破处理的海水稻米黄酮释放量分别为 39.31、51.85、58.12、49.76、45.58 mg CE/100 g DW,比对照组提升了 128.68%、201.63%、238.10%、189.47%、165.15%。肠消化阶段黄酮释放量的大幅增加的原因与 2.2.1 中多酚的释放类似,可能是肠道的弱碱性环境和胰酶作用有利于被破坏的细胞壁中结合态黄酮的进一步释放。袁茂翼等^[8]的研究表明,进行蒸汽爆破处理后,体外消化过程中多酚和抗氧化能力均得到不同程度的改善,且随压力增大释放效果越明显。

0.9-2 样品的黄酮释放量在各阶段均高于 0.9-0 样品。在肠消化 120 min 时,0.9-2 样品相比于 0.9-0 样品的黄

酮释放量增加了 26.58%。而 0.9-4 样品的黄酮释放量在口腔、胃、肠消化 60 min 阶段均低于 0.9-0 样品, 在肠消化 120 min 时高于 0.9-0 样品, 但无显著性差异。过高的水分添加导致的瞬时压降低导致膨化时剪切力不足, 胚乳部位淀粉未完全膨化的致密结构可能会阻碍消化酶的渗透和扩散, 然而随着消化时间的延长, 这种致密结构最终被破坏, 使被包裹的黄酮得以释放^[31]。

2.3 蒸汽爆破条件对海水稻米体外消化抗氧化活性的影响

2.3.1 蒸汽爆破条件对海水稻米体外消化 FRAP 抗氧化活性的影响

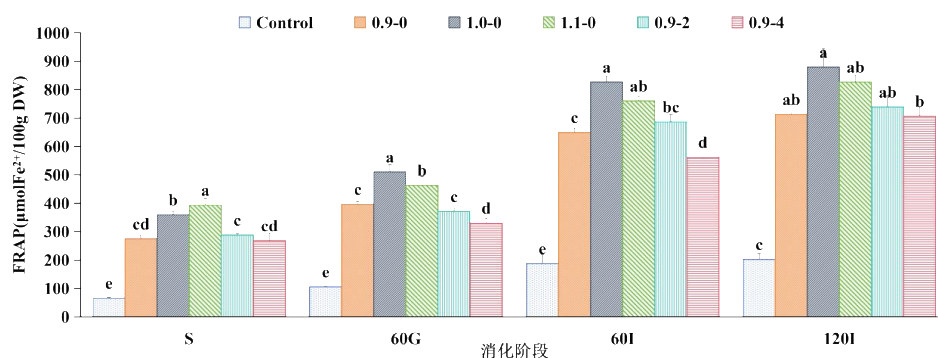


图 5 不同蒸汽爆破条件下海水稻米体外消化的 FRAP 抗氧化值

Fig.5 FRAP antioxidant values of sea rice during *in vitro* digestion under different steam explosion conditions

蒸汽爆破对海水稻米体外消化 FRAP 值的影响如图 5 所示。随着消化过程由口腔到小肠, 各样品的 FRAP 抗氧化值呈现逐步上升的趋势。

对照组是煮熟的海水稻米, 口腔消化阶段 FRAP 抗氧化值为 $66.70 \mu\text{mol Fe}^{2+}/100 \text{ g DW}$, 五种不同蒸汽爆破处理的海水稻米口腔消化阶段 FRAP 抗氧化值分别为 275.19、359.91、394.13、288.22、268.67 $\mu\text{mol Fe}^{2+}/100 \text{ g DW}$, 比对照组提升了 312.62%、439.64%、490.93%、332.17%、302.82%。蒸汽爆破处理组的 FRAP 抗氧化值均显著高于对照组, 其中 1.1-0 样品在口腔阶段表现出最高的 FRAP 抗氧化活性 ($394.13 \mu\text{mol Fe}^{2+}/100 \text{ g DW}$)。这表明蒸汽爆破产生的剪切力破坏了海水稻米膳食纤维的细胞壁, 使结合态酚类物质更易释放。Liu 等^[32]对菠萝皮膳食纤维的研究也发现, 蒸汽爆破处理可以破碎膳食纤维的块状结构, 增加其比表面积, 在相同条件下经过蒸汽爆破改性后的膳食纤维抗氧化活性更高。胃消化 60 min 后, 对照组 FRAP 抗氧化值为 $105.86 \mu\text{mol Fe}^{2+}/100 \text{ g DW}$, 五种不同蒸汽爆破处理的海水稻米 FRAP 抗氧化值分别为 397.11、511.07、463.59、371.79、330.64 $\mu\text{mol Fe}^{2+}/100 \text{ g DW}$, 比对照组提升了 275.17%、382.76%、337.97%、251.21%、212.35%。1.1-0 样品在胃阶段的 FRAP 值 ($463.59 \mu\text{mol Fe}^{2+}/100 \text{ g DW}$) 低于 1.0-0 样品 ($511.07 \mu\text{mol Fe}^{2+}/100 \text{ g DW}$), 这可能是由于过高的膨化压力导致已释放的部分酚类物质发生了二次热降解, 从而影响了其抗氧化活性。肠消化 60 min 后, 对照组 FRAP 抗氧化值为 $188.48 \mu\text{mol Fe}^{2+}/100 \text{ g DW}$, 五种不同蒸汽爆破处理的海水稻米 FRAP 抗氧化值分别为 649.90、827.54、760.50、686.76、562.75 $\mu\text{mol Fe}^{2+}/100 \text{ g DW}$, 比对照组提升了 244.79%、339.12%、303.56%、264.46%、198.63%; 肠消化 120 min 后, 对照组 FRAP 抗氧化值为 $202.80 \mu\text{mol Fe}^{2+}/100 \text{ g DW}$, 五种不同蒸汽爆破处理的海水稻米 FRAP 抗氧化值分别为 713.31、879.50、827.36、739.38、706.79 $\mu\text{mol Fe}^{2+}/100 \text{ g DW}$, 比对照组提升了 251.75%、333.70%、308.03%、264.65%、248.59%。虽然 1.1-0 样品的多酚释放量更高, 但其 FRAP 值却低于 1.0-0 样品, 这可能与黄酮类物质的贡献有关。Kadiri^[33]的研究指出, 酚类化合物的抗氧化活性不仅仅取决于其含量, 还与其分子结构和组成比例密切相关。

0.9-2 样品在各消化阶段的 FRAP 值均高于 0.9-4 样品, 这与多酚和黄酮的释放规律完全一致。这说明 2% 的水分添加相对更有利于海水稻米酚类物质的消化释放和抗氧化活性的保持, 而过高的水分添加则会产生抑制作用。

2.3.2 蒸汽爆破条件对海水稻米体外消化 ORAC 抗氧化活性的影响

蒸汽爆破对海水稻米体外消化 ORAC 含量的影响如图 6 所示。所有样品的 ORAC 值均随消化进程的而逐渐增加。ORAC 值的变化趋势与黄酮释放规律更为接近, 而与多酚释放趋势存在一定差异, 这可能与 ORAC 和 FRAP 两种抗氧化评价方法的机制差异有关。Platzer 等^[34]的研究指出, FRAP 测定的是电子转移能力, 而 ORAC 测定的

是氢原子转移能力,不同酚类化合物在这两种机制中的贡献可能存在差异。

对照组是煮熟的海水稻米,口腔消化阶段 ORAC 抗氧化值为 $32.96 \mu\text{mol TE}/100 \text{ g DW}$, 五种不同蒸汽爆破处理的海水稻米口腔消化阶段 ORAC 抗氧化值分别为 97.16、208.51、132.81、127.27、87.13 $\mu\text{mol TE}/100 \text{ g DW}$, 比对照组提升了 194.76%、532.69%、302.93%、286.22%、164.39%。蒸汽爆破处理组的 ORAC 值均显著高于对照组,其中 1.0-0 样品在口腔阶段表现出最高的 ORAC 值($208.51 \mu\text{mol TE}/100 \text{ g DW}$)。胃消化 60min 后,对照组 ORAC 抗氧化值为 $47.56 \mu\text{mol TE}/100 \text{ g DW}$, 五种不同蒸汽爆破处理的海水稻米 ORAC 抗氧化值分别为 157.21、216.64、182.63、179.95、137.71 $\mu\text{mol TE}/100 \text{ g DW}$, 比对照组提升了 230.60%、355.53%、284.02%、278.37%、189.55%。肠消化 60 min 后,对照组 ORAC 抗氧化值为 $122.28 \mu\text{mol TE}/100 \text{ g DW}$, 五种不同蒸汽爆破处理的海水稻米 ORAC 抗氧化值分别为 386.62、467.55、483.16、421.03、341.89 $\mu\text{mol TE}/100 \text{ g DW}$, 比对照组提升了 216.21%、282.39%、295.18%、244.32%、179.60%。肠消化 120 min 后,对照组 ORAC 抗氧化值为 $127.13 \mu\text{mol TE}/100 \text{ g DW}$, 五种不同蒸汽爆破处理的海水稻米 ORAC 抗氧化值分别为 415.72、482.88、499.77、441.28、387.95 $\mu\text{mol TE}/100 \text{ g DW}$, 比对照组提升了 227.01%、279.86%、293.19%、247.16%、205.12%。在肠消化 120 min 时,1.1-0 样品与 1.0-0 样品的 ORAC 值差异不显著,这一现象与 2.3.1 中的结论有所不同。随着消化进入肠消化后期,不同处理组样品中可释放的酚类物质可能逐渐趋于稳定,导致部分样品组之间抗氧化活性的差异缩小。袁婷兰等^[35]的研究发现,蒸汽爆破处理的杭白菊在胃、肠消化过程中表现出更高的多酚和黄酮含量及抗氧化活性。

0.9-2 样品在各消化阶段的 ORAC 值均高于 0.9-4 样品,这与多酚释放规律一致,说明 2%的水分添加相对更有利于氧自由基吸收能力的保持。适当水分的添加促使部分酚类化合物发生糖苷键断裂,分子结构可能更倾向于通过氢原子转移机制发挥抗氧化作用^[34]。Souza 等^[36]的研究指出,脂质、蛋白质,尤其是纤维等大分子物质会阻碍酚类物质在食糜中的释放或溶解。0.9-4 样品可能是因为过量水分添加导致细胞壁的致密结构未被破坏,阻碍了酚类的释放,进而降低了 ORAC 的抗氧化值。

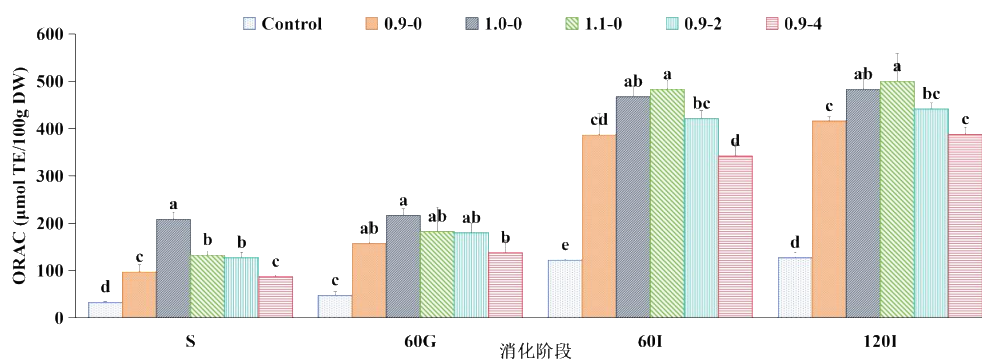


图6 不同蒸汽爆破条件下海水稻米体外消化的 ORAC 抗氧化值

Fig.6 ORAC antioxidant values of sea rice during *in vitro* digestion under different steam explosion conditions

3 结论

本研究采用 INFOGEST 标准体外消化模型,系统考察了不同蒸汽爆破条件对海水稻米淀粉消化特性、预估血糖指数以及酚类物质释放和抗氧化活性的影响。结果表明:与 Control 相比,蒸汽爆破处理组的 RDS 含量均下降,RS 含量均上升。其中 1.1-0 组的 RDS 含量相比 Control 下降 7.66%,RS 含量上升 12.21%,SDS 含量略有降低。随着膨化压力的升高,eGI 值相比 Control 组下降 18.91%;随着水分添加量的增加,eGI 值先升后降,0.9-4 组相比 Control 下降 22.00%。在体外消化过程中,蒸汽爆破处理显著促进了多酚和黄酮的释放。肠消化 120 min 时,1.1-0 样品的多酚释放量较 Control 增加 5.42 倍,黄酮释放量增加 2.38 倍,说明蒸汽爆破处理能显著促进海水稻米中多酚、黄酮的消化释放;0.9-2 样品的黄酮释放量较 0.9-0 增加 26.58%,说明适当的水分添加可促进海水稻米中黄酮的消化释放。在抗氧化活性方面,1.0-0 样品的 FRAP 值较 Control 增加 3.18 倍,1.1-0 样品的 ORAC 值较 Control 增加 2.93 倍。不同蒸汽爆破条件下释放的酚类物质组成不同,其对两种抗氧化机制的贡献存在差异。综上,蒸汽爆破处理可通过调控膨化压力与水分添加量,改善海水稻米的淀粉消化特性、降低预估血糖指数,促进多酚和黄酮的消化释放并增强抗氧化活性,为开发低升糖、高生物活性成分的海水稻米功能性食品提供理论依据。

参考文献

- [1] 何静盈,李海玲,皮彩玉,等.海水稻米糠饼干生产工艺优化及其品质特性分析[J].粮油食品科技,2022,30(4):111-119.
- [2] 刘贺,朱奕昊,刘亭亭,等.天然抗氧化剂及协同作用研究进展[J].聊城大学学报(自然科学版),2021,34(5):59-65.
- [3] 田晓红,谭斌,翟小童,等.蒸汽爆破技术在全谷物食品加工中的应用[J].中国粮油学报,2022,37(5):16-23.
- [4] 邓婉清,钟宇,邓云,等.蒸汽爆破在农产品副产物高值化利用中的应用[J].食品研究与开发,2024,45(12):189-196.
- [5] WAN F, FENG C, LUO K, et al. Effect of steam explosion on phenolics and antioxidant activity in plants: a review [J]. Trends in Food Science & Technology, 2022, 124: 13-24.
- [6] 王洁,曾志龙,王豪缘,等.蒸汽爆破对黑青稞营养成分释放及消化性的影响[J].食品工业科技,2025,46(8):222-230.
- [7] ZHOU S, TANG X, HEGYI F, et al. *In vitro* digestion and fermentation characteristics of soluble dietary fiber from adlay (coix lacryma-jobi L. var. ma-yuen staft) bran modified by steam explosion [J]. Food Research International, 2024, 192: 114747.
- [8] 袁茂翼,崔潇文,叶发银,等.蒸汽爆破预处理对苹果皮渣多酚组成、表面结构及抗氧化活性的影响[J].食品与发酵工业,2022,48(7):1-7.
- [9] BRODKORB A, EGGER L, ALMINGER M, et al. INFOGEST static *in vitro* simulation of gastrointestinal food digestion [J]. Nature Protocols, 2019, 14(4): 991-1014.
- [10] RAZA H, ZHOU Q, CHENG K W, et al. Synergistic impact of ultrasound-high pressure homogenization on the formation, structural properties, and slow digestion of the starch-phenolic acid complex [J]. Food Chemistry, 2024, 445: 138785.
- [11] GOÑI I, GARCIA-ALONSO A, SAURA-CALIXTO F. A starch hydrolysis procedure to estimate glycemic index [J]. Nutrition Research, 1997, 17(3): 427-437.
- [12] FREI M, SIDDHURAJU P, BECKER K. Studies on the *in vitro* starch digestibility and the glycemic index of six different indigenous rice cultivars from the Philippines [J]. Food Chemistry, 2003, 83(3): 395-402.
- [13] LIU L, GUO J, ZHANG R, et al. Effect of degree of milling on phenolic profiles and cellular antioxidant activity of whole brown rice [J]. Food Chemistry, 2015, 185: 318-325.
- [14] ADOM K K, SORRELLS M E, LIU R H. Phytochemicals and antioxidant activity of milled fractions of different wheat varieties [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2005, 53(6): 2297-2306.
- [15] TI H, LI Q, ZHANG R, 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.
- [16] ZHANG R, ZENG Q, DENG Y, et al. Phenolic profiles and antioxidant activity of litchi pulp of different cultivars cultivated in southern China [J]. Food Chemistry, 2013, 136(3-4): 1169-1176.
- [17] MA X, WANG H, ZHANG Y, et al. Impact of steam explosion on sorghum starch digestibility and physicochemical properties [J]. Food Research International, 2025, 221: 117220.
- [18] BARROS F, AWIKA J M, ROONEY L W. Interaction of tannins and other sorghum phenolic compounds with starch and effects on *in vitro* starch digestibility [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2012, 60(46): 11609-11617.
- [19] 曲美霖,冯瑜霞,胡俊君,等.不同压力蒸汽爆破处理对绿豆淀粉品质的影响[J].食品研究与开发,2024,45(13):32-38.
- [20] 于康美.藜麦汽爆处理及其加工适应性研究[D].天津:天津科技大学,2023.
- [21] WANG Q, YUAN T, ZHU X, et al. The phenolics, antioxidant activity and *in vitro* digestion of pomegranate (punica granatum L.) peels: an investigation of steam explosion pre-treatment [J]. Frontiers in Nutrition, 2023, 10: 1161970.
- [22] WU X, SONG M, QIU P, et al. Effect of steam explosion pretreatment on the composition and bioactive activities of tartary buckwheat bran phenolics [J]. Food & Function, 2018, 9(1): 87-95.
- [23] 唐宇,张小利,何晓琴,等.体外模拟胃肠消化过程中蒸汽爆破处理的苦荞麸皮的抗氧化及抗增殖活性[J].食品与发酵工业,2019,45(3):1-9.
- [24] ZHU X, YUAN T, LI X, et al. Valorization of chrysanthemum morifolium ramat. cv. "hangbaiju" stems for phenolic compounds production by steam explosion pretreatment [J]. Industrial Crops and Products, 2024, 213: 118410.
- [25] GAO Y, PING H, HE Z, et al. Characterization of the active components and bioaccessibility of phenolics in differently colored foxtail millets [J]. Food Chemistry, 2024, 452: 139355.

- [26] XIE Y, GONG T, LIU H, et al. *In vitro* and *In vivo* digestive fate and antioxidant activities of polyphenols from hullless barley: impact of various thermal processing methods and β -glucan [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2022, 70(25): 7683-7694.
- [27] 洪晴悦.不同热加工对青稞主要生物活性成分和体外消化与肠菌发酵特性的影响[D].重庆:西南大学 2021.
- [28] SHAO M, JUNEJO S A, ZHANG B, et al. Effects of explosion puffing on the native structural organization and oil adsorption properties of starch [J]. Carbohydrate Polymers, 2024, 324: 121518.
- [29] 方芳.蒸汽爆破预处理对籽粒苋籽实抗氧化能力的影响[J].食品工业科技,2018,39(15):21-25.
- [30] FAN X, SU Y, WU Y, et al. Comprehensive understanding of impacts of steam explosion on facilitated extraction and transformation of flavonoids from astragali radix [J]. Food Chemistry, 2025, 463(Pt3): 141410.
- [31] MARIOTTI M, ALAMPRESE C, PAGANI M A, et al. Effect of puffing on ultrastructure and physical characteristics of cereal grains and flours [J]. Journal of Cereal Science, 2006, 43(1): 47-56.
- [32] LIU M, JIANG Y, ZHANG L, et al. Effect of steam explosion modification and *in vitro* simulated digestion on antioxidant capacity of dietary fiber of pineapple peel [J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2019, 330(4): 42055.
- [33] KADIRI O. A review on the status of the phenolic compounds and antioxidant capacity of the flour: effects of cereal processing [J]. International Journal of Food Properties, 2017, 20(sup1): S798-S809.
- [34] PLATZER M, KIESE S, TYBUSSEK T, et al. Radical scavenging mechanisms of phenolic compounds: a quantitative structure-property relationship (QSPR) study [J]. Frontiers in Nutrition, 2022, 9: 882458.
- [35] 袁婷兰,叶挺,王廷宇,等.蒸汽爆破对抗白菊叶多酚及其抗氧化活性和体外消化性的影响[J].食品工业科技,2025,46(22):274-281.
- [36] SOUZA T L DE, SOUZA L B S E, SIMÕES I F, et al. Total and bioaccessible contents of phenolic bioactives in nutritious flours exposed to consumption in Salvador, Bahia, Brazil using *in vitro* gastrointestinal digestion (INFOGEST protocol) [J]. Food Chemistry, 2025, 482: 144151.