DOI:10.12441/spyswjs.20240730001 [文章编号] 1673-1689(2025)11-0109-10

# α-淀粉酶添加量对婴幼儿米粉特性的影响

刘惠惠[1] 戴志勇[1*] 李梦怡[1] 彭 姣[1] 孟 醒[1] 廖卢艳[2] 张荣彬[3]

(1. 湖南英氏营养食品有限公司,湖南 长沙 410000; 2. 湖南农业大学食品科技学院,湖南 长沙 410128; 3. 中南林业科技大学食品科学与工程学院,湖南 长沙 410004)

**摘要:**【目的】探究α-淀粉酶添加量对婴幼儿米粉理化特性和品质特性的影响。【方法】制备不同α-淀粉酶添加量的婴幼儿米粉,测定婴幼儿米粉的基本成分、淀粉相对分子质量、糊化特性、水合特性、质构特性、体外消化特性及微观结构,并分析婴幼儿米粉的理化特性与品质特性之间的相关性。【结果】婴幼儿米粉中淀粉的重均分子量和数均分子量随着α-淀粉酶添加量的增加而降低。添加α-淀粉酶的婴幼儿米粉糊化特性曲线较平缓,未添加α-淀粉酶的婴幼儿米粉的糊化特性指标均显著高于添加酶的婴幼儿米粉($P$<0.05)。吸水性指数和膨润力随着α-淀粉酶添加量的增加而降低。α-淀粉酶添加量为1.8 U/L的婴幼儿米粉感官评分最高。质构特性指标随α-淀粉酶添加量的增加而降低。添加α-淀粉酶的婴幼儿米粉的淀粉颗粒小且多,米粉表面的孔洞更加密集。添加α-淀粉酶的婴幼儿米粉快消化淀粉质量分数增加,抗性淀粉质量分数降低。婴幼儿米粉的感官评分与谷值粘度呈显著负相关($P$<0.01),抗性淀粉的质量分数、硬度、浓稠度、内聚性和黏附性与其淀粉相对分子质量、吸水性指数以及糊化特性指标均呈显著正相关($P$<0.01),与水溶性指数呈显著负相关($P$<0.01)。【结论】添加α-淀粉酶可以显著改善婴幼儿米粉的特性,其中α-淀粉酶添加量为1.8 U/L的婴幼儿米粉的综合品质最佳。

**关键词:**婴幼儿米粉;α-淀粉酶;理化特性;品质特性;相关性分析

## Effects of α-Amylase Addition on the Characteristics of Infant Rice Flour

*LIU Huihui*[1] *DAI Zhiyong*[1*] *LI Mengyi*[1] *PENG Jiao*[1] *MENG Xing*[1]
*LIAO Luyan*[2] *ZHANG Rongbin*[3]

(1. Hunan Engnice of Nutrition Foods Co., Ltd., Changsha 410000, China; 2. School of Food Science and Technology, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China; 3. School of Food Science and Engineering, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, China)

**Abstract:** [**Objective**] This study aims to investigate the effects of α-amylase addition on the characteristics of infant rice flour. [**Method**] Infant rice flour samples with different α-amylase addition were prepared. The basic composition, relative molecular mass of starch, gelatinization properties, hydration properties, texture properties, *in vitro* digestion characteristics, and microstructure of infant rice flour were determined. Furthermore, the correlations between the physicochemical characteristics and quality characteristics of infant rice flour were analyzed. [**Result**] The weight-averaged molecular weight and the number-averaged molecular weight of starch in infant rice flour decreased with the increase in α-amylase addition. The gelatinization curve of infant rice flour with α-amylase addition was relatively gentle, and the gelatinization properties of infant rice flour without α-amylase addition were higher than those of infant rice flour supplemented with this enzyme ($P$<0.05). The water absorption index and swelling power decreased with the increase in α-amylase addition. Infant rice flour

**基金项目:**湖南省科技创新计划资助(2023ZJ1070)。
**通信作者:**戴志勇(1978—),男,本科,中级工程师,主要从事婴幼儿食品加工研究。E-mail:daizhiyong@engnice.com
**收稿日期:**2024-07-30 **修回日期:**2024-09-18

with α-amylase addition of 1.8 U/L had the highest sensory scores. The texture properties decreased with the increase in α-amylase addition. The infant rice flour with α-amylase addition showed small and numerous starch granules and denser pores on the surface. The mass fraction of ready digestible starch increased and that of resistant starch decreased in the infant rice flour with α-amylase addition. The sensory scores of infant rice flour were negatively correlated with the valley viscosity ($P$<0.01). The mass fraction of resistant starch, hardness, consistency, cohesion, and adhesion were positively correlated with the relative molecular mass of starch, water absorption index, and gelatinization properties ($P$<0.01), and they were negatively correlated with water solubility index ($P$<0.01). [**Conclusion**] The characteristics of infant rice flour are significantly improved by α-amylase addition, and the comprehensive quality of infant rice flour with the addition of 1.8 U/L is the best.

**Keywords:** infant rice flour; α-amylase; physicochemical characteristic; quality characteristic; correlation analysis

随着中国国民经济的增长和科技的进步，居民的消费水平在不断地改善，消费结构也在不断地优化，再加上二、三孩生育政策的推行，使得中国的婴幼儿辅食市场规模不断扩大，其中对婴幼儿米粉产品的消费需求最大[1]。6月龄以下婴幼儿的胃和肠道内淀粉水解酶少，消化和吸收淀粉的速度很慢，因此传统的婴幼儿米粉产品容易引起婴幼儿胀气、腹泻等消化不良现象[2]。有研究表明，大米中的直链淀粉、淀粉结构以及加工过程对大米的消化性有一定影响[3]，因此可以通过一定手段来改善婴幼儿米粉的品质[4]。

淀粉酶是一种具有高效性和特异性的酶类，目前在淀粉改性方面已经得到了广泛的应用[5]。适度酶解能够在一定程度上改善婴幼儿米粉的糊化特性与凝胶特性[6]。刘颖等[7]发现，通过调控酶解程度使大分子淀粉发生降解，形成由3~10个糖分子组成的低聚糖混合物，同时也使得部分难消化淀粉被分解，从而增强婴幼儿对米粉的消化与吸收能力，提高婴幼儿米粉的速溶性和适口性。胡居吾等[8]采用高温α-淀粉酶限制性酶解-喷雾干燥法生产婴幼儿米粉，改善了婴幼儿米粉冲调性差、不易消化等问题。虽然目前已经有很多关于淀粉酶酶解对婴幼儿米粉理化性质影响的研究，但有关婴幼儿米粉在酶解过程中发生变化的潜在机制，以及这些变化如何影响婴幼儿米粉性能的研究甚少。为了探究不同添加量的α-淀粉酶对婴幼儿米粉特性的影响，作者在婴幼儿米粉制作过程中添加不同量的α-淀粉酶，并以未添加酶的样品作为对照，研究α-淀粉酶添加量对婴幼儿米粉基本成分、淀粉相对分子质量、糊化特性、水合特性、质构特性、体外消化特性及微观结构的影响，并分析婴幼儿米粉的理化特性与品质特性之间的相关性，以期为α-淀粉酶在婴幼儿米粉生产中的应用提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与试剂

粳米：益海（佳木斯）粮油工业有限公司；α-淀粉酶（解淀粉芽孢杆菌，2 000 U/L）：南宁庞博生物工程有限公司；马铃薯直链淀粉标准品：美国Sigma公司；糯玉米支链淀粉标准品：梯希爱（上海）化成工业发展有限公司；盐酸、硫酸、石油醚、无水乙醇、氢氧化钠、氢氧化钾、乙酸铅、硫酸钠、五水硫酸铜、硼酸、甲基红、酚酞：分析纯，国药集团化学试剂有限公司；碘、碘化钾：分析纯，广东光华科技股份有限公司。

### 1.2 仪器与设备

电子分析天平：ESJ30-5A型，沈阳神宇龙腾天平有限公司；高效液相色谱仪：Ultimate3000型，美国赛默飞世尔科技公司；物性测试仪：TA.XT plusC型，英国Stable Micro Systems公司；快速粘度仪：Rapid-20型，上海保圣实业发展有限公司；高分辨场发射扫描电子显微镜：Zeiss Merlin Compact型，德国蔡司集团；紫外-可见分光光度计：Lambda 35型，美国Perkin Elmer公司。

### 1.3 试验方法

#### 1.3.1 婴幼儿米粉制备流程

大米→洗米→泡米→配料→磨浆→均质→酶解（添加α-淀粉酶，60~70 ℃酶解5 min）→滚筒干燥（135 ℃加热30 s）→成型→粉碎→婴幼儿米粉

#### 1.3.2 操作要点

1）大米按料液比1.5 g∶1.0 g的比例（按照洗米

前添加大米质量进行计算）加水进行磨浆和均质。

2）以均质完的米浆为基准，分别添加0、0.05%、0.07%、0.09%、0.11%的酶液，其对应的酶单位活力分别为0、1.0、1.4、1.8、2.2 U/L，均匀搅拌酶解5 min后进行滚筒干燥。

1.3.3　婴幼儿米粉基本成分测定

将样品粉碎后过100目筛，密封常温保存。总淀粉按GB 5009.9—2023《食品安全国家标准 食品中淀粉的测定》中的酸水解法进行测定；蛋白质按GB 5009.5—2025《食品安全国家标准 食品中蛋白质的测定》中的凯氏定氮法进行测定；脂肪按GB 5009.6—2016《食品安全国家标准 食品中脂肪的测定》中的酸水解法进行测定；还原糖按GB 5009.7—2016《食品安全国家标准 食品中还原糖的测定》中的直接滴定法进行测定。

1.3.4　淀粉相对分子质量测定

婴幼儿米粉中淀粉的提取参照Syahariza等[9]的方法。淀粉相对分子质量的测定参照郁映涛等[10]的方法，修改如下：称取5 mg淀粉样品，加5 mL双甲基亚砜（DMSO），80 ℃加热溶解3 h，以体积分数0.5% LiBr/DMSO溶液为流动相，流量0.3 mL/min。利用软件ASTRA6.1处理色谱数据。

1.3.5　糊化特性测定

按GB/T 24852—2010《大米及米粉糊化特性测定 快速粘度仪法》执行。

1.3.6　水合特性测定

参照刘惠惠[11]的方法。

1.3.7　婴幼儿米粉感官评定

参照刘芳宏等[12]和袁如英等[13]的方法并稍加修改。感官评价小组由13位专业人员组成。用110 mL 45 ℃温水冲调20 g米粉，评定人员根据婴幼儿米粉感官评分细则（见表1）对冲调前后米粉的色泽、组织状态、气味、滋味、细腻度、吞咽难易度、稀稠度和变稀程度8个指标进行评分，剔除评分误差较大的分数，计算平均值和标准差。

1.3.8　质构特性测定

参照孙鹏伟等[14]的方法并稍加改进，使用物性测试仪进行测试。取20 g样品于500 mL冲调碗中，以110 mL 40~50 ℃温开水冲调，静置30 s，搅拌1 min（搅拌速度100~120 r/min），将冲调好的样品倒入容器中使用反挤压装置搭配直径40 mm圆盘型探头（A/BE）对样品进行测试。物性测试仪参数设计：测前速度1.0 mm/s，测试速度2.0 mm/s，测后速度10.0 mm/s，测定距离20 mm，触发类型Auto-0.049 N。每个样品重复测定3次。

1.3.9　微观结构测定

参照Deng等[15]的方法并稍加改进。样品研磨，过100目筛。称取100 mg样品置于2 mL旋口管中，加入1 mL体积分数4%的十二烷基硫酸钠缓冲液（SDS-wash buffer），涡旋混匀，10 000 r/min离心1 min，弃上清，重复2次。加1 mL去离子水，涡旋混匀，10 000 r/min离心1 min，弃上清，重复5次。最终加入1 mL无水乙醇，涡旋混匀。用200 μL移液枪吸取制备好的样品悬浮液，滴在铜台的导电胶上，铺匀，于37 ℃下静置过夜。离子溅射仪喷金后用高分辨场发射扫描电子显微镜观察并拍照。

1.3.10　淀粉体外消化特性测定

1）葡萄糖标准曲线绘制：参照程冰等[16]的方法。以葡萄糖质量为横坐标，以吸光度为纵坐标，绘制标准曲线。得到的回归方程为$y$=0.400 6$x$−0.000 9，$R^2$=0.997 5。

2）体外消化特性测定：参照Englyst等[17]方法并稍加改进。样品粉碎，过100目筛备用。准确称取10 mg样品放入50 mL离心管中，加入8 mL pH 5.2的醋酸钠缓冲液，振荡均匀，然后置于沸水浴中加热20 min，取出冷却，放入37 ℃恒温水浴锅中平衡温度，然后向样品中加入1 mL 37 ℃的胃蛋白酶（2 500 U/mL）溶液，在37 ℃水浴振荡20 min（120 r/min），再加入1 mL 37 ℃混合酶液（α-淀粉酶170 U/mL和淀粉葡萄糖苷酶21 U/mL），在37 ℃水浴振荡150 min（120 r/min）。分别在0、20、120 min时取1 mL水解液，放入25 mL螺口刻度比色管中，加入4 mL浓度为0.4 mol/L的氢氧化钠溶液灭酶，再加入2 mL DNS试剂，沸水浴加热5 min，迅速冷却，蒸馏水定容至25 mL，540 nm处测定吸光度。同时取1 mL蒸馏水作为空白对照按上述试验步骤进行处理。根据上述葡萄糖标准曲线方程式算出样品上清液中的葡萄糖质量，并按式（1）~（3）计算样品中快消化淀粉（RDS）、慢消化淀粉（SDS）和抗性淀粉（RS）的质量分数。

$$R_{DS}=\frac{G_{20}-F_G}{T_S}\times 0.9\times 100\% \quad (1)$$

表 1 婴幼儿米粉感官评分细则

Table 1 Criteria for the sensory scoring of infant rice flour

| 评定项目 | 感官评价 | 分值 |
|---|---|---|
| 色泽（8 分） | 呈米黄色，色泽均匀、明亮 | 6~8 |
| | 呈米黄色，色泽不均匀，略有光泽 | 3~5 |
| | 米片、米糊颜色发暗，无光泽 | 0~2 |
| 组织状态（6 分） | 呈干燥、松散的均匀薄片状，无明显杂质黑点 | 5~6 |
| | 米片大小不均匀或有轻微结块，有少量杂质黑点 | 1~4 |
| | 呈细粉状或有明显结块，有大量杂质黑点 | 0 |
| 气味（12 分） | 有较浓郁米香味，无异味 | 8~12 |
| | 有较清淡米香味，无异味 | 4~7 |
| | 无米香味或有异味 | 0~3 |
| 滋味（12 分） | 有清甜味，无异味 | 8~12 |
| | 有较淡清甜味，略有异味 | 4~7 |
| | 无清甜味或有明显异味 | 0~3 |
| 细腻度（20 分） | 口感细腻丝滑，无团块，小白点<10 个 | 13~20 |
| | 口感略有颗粒感，小白点≥30 个或小团块 2~4 个 | 6~12 |
| | 口感粗糙，下咽时喉部有明显颗粒感，小白点≥30 个或小团块≥5 个 | 0~6 |
| 吞咽难易度（12 分） | 舌头搅拌及下咽较顺利 | 7~12 |
| | 舌头搅拌及下咽困难、粘牙/粘喉 | 0~6 |
| 稀稠度（15 分） | 用勺子划碗底 0.5 s 左右划痕消失，用勺子舀起倾倒后能连续流下 | 11~15 |
| | 偏稠（不能连续流下）或偏稀（划痕消失迅速） | 6~10 |
| | 太稠（1 s 以上划痕消失）或太稀（无划痕/水样流下） | 0~5 |
| 变稀程度（15 分） | 静置 15 min 后，与刚冲调时表观稠度差异不明显 | 11~15 |
| | 静置 15 min 后，与刚冲调时表观稠度存在差异 | 6~10 |
| | 静置 15 min 后，与刚冲调时表观稠度明显变稀 | 0~5 |

$$S_{DS}=\frac{G_{120}-G_{20}}{T_S}\times 0.9\times 100\% \quad (2)$$

$$R_S=\frac{T_S-R_{DS}-S_{DS}}{T_S}\times 100\% \quad (3)$$

式中：

$R_{DS}$——快消化淀粉的质量分数，%；

$S_{DS}$——慢消化淀粉的质量分数，%；

$R_S$——抗性淀粉的质量分数，%；

$G_{20}$——米粉 20 min 内产生的葡萄糖质量，mg；

$F_G$——水解前（0 min）米粉中葡萄糖质量，mg；

$G_{120}$——淀粉 120 min 内所产生的葡萄糖质量，mg；

$T_S$——米粉样品中总淀粉质量，mg。

### 1.4 数据处理

采用 SPSS Statistics 25.0 软件分析试验数据，使用 Origin 2021 软件绘图。

## 2 结果与讨论

### 2.1 α-淀粉酶添加量对婴幼儿米粉基本成分的影响

由表 2 可知，α-淀粉酶添加量对婴幼儿米粉总淀粉、蛋白质和脂肪的影响较小；α-淀粉酶添加量为 2.2 U/L 的婴幼儿米粉还原糖质量分数显著高于未添加 α-淀粉酶的婴幼儿米粉（$P<0.05$），这是由于 α-淀粉酶会使淀粉发生水解，随着 α-淀粉酶添加量的增加，水解程度会不断增大，产生更多的还原性物质，因而还原糖质量分数也相应增加。该结论与瞿佳丽[18]的相似。

### 2.2 α-淀粉酶添加量对淀粉相对分子质量的影响

由表 3 可知，相比未添加 α-淀粉酶的婴幼儿米粉，添加了 α-淀粉酶的婴幼儿米粉中淀粉的重均分子量（$M_w$）和数均分子量（$M_n$）均显著降低（$P<0.05$），但添加了酶的婴幼儿米粉之间无显著性差异，其中酶添加量为 2.2 U/L 的婴幼儿米粉中淀

粉的$M_w$和$M_n$最小。随α-淀粉酶添加量的增加，相对分子质量降低，可能是在酶的催化作用下，淀粉的晶体结构遭到破坏，导致其聚合度下降，支链淀粉中长链发生水解，进而生成了大量的小分子淀粉[19]。这与Keeratiburana等[20]的研究结果相似。α-淀粉酶添加量1.8 U/L的婴幼儿米粉的多分散指数（PDI）为2.54，其值最小，表明α-淀粉酶添加量为1.8 U/L时婴幼儿米粉淀粉的相对分子质量分布较为均匀。随α-淀粉酶添加量的增加，婴幼儿米粉淀粉的平均旋转半径（$R_Z$）逐渐降低，可能是受α-淀粉酶影响，长直链淀粉分子被酶解为短链片段，小分子增多，直链淀粉含量降低[21]。

表2　α-淀粉酶添加量对婴幼儿米粉基本成分的影响

Table 2　Effects of α-amylase addition on the basic ingredients of infant rice flour

| α-淀粉酶添加量/（U/L） | 总淀粉质量分数/（g/100g） | 蛋白质质量分数/（g/100g） | 脂肪质量分数/（g/100g） | 还原糖质量分数/（g/100g） |
|---|---|---|---|---|
| 0 | 75.50±0.60$^{a}$ | 7.52±0.33$^{b}$ | 1.67±0.42$^{a}$ | 0.35±0.01$^{a}$ |
| 1.0 | 76.47±0.60$^{ab}$ | 7.24±0.10$^{ab}$ | 1.80±0.17$^{a}$ | 0.36±0.02$^{a}$ |
| 1.4 | 77.77±0.85$^{b}$ | 7.08±0.25$^{a}$ | 1.70±0.17$^{a}$ | 0.36±0.05$^{a}$ |
| 1.8 | 77.60±1.60$^{ab}$ | 7.26±0.19$^{ab}$ | 1.40±0.26$^{a}$ | 0.40±0.08$^{a}$ |
| 2.2 | 76.57±1.55$^{ab}$ | 7.05±0.17$^{a}$ | 1.33±0.06$^{a}$ | 0.51±0.09$^{b}$ |

注：同列不同字母表示差异显著（$P<0.05$）。

表3　α-淀粉酶添加量对婴幼儿米粉中淀粉相对分子质量的影响

Table 3　Effects of α-amylase addition on the relative molecular mass of starch in infant rice flour

| α-淀粉酶添加量/（U/L） | $M_w$（×10$^7$） | $M_n$（×10$^7$） | PDI | $R_Z$/nm |
|---|---|---|---|---|
| 0 | 12.18±3.01$^{b}$ | 2.46±0.46$^{b}$ | 4.92±0.31$^{b}$ | 274.62±5.55$^{b}$ |
| 1.0 | 4.83±1.56$^{a}$ | 1.40±0.39$^{a}$ | 3.43±0.15$^{a}$ | 170.05±40.96$^{a}$ |
| 1.4 | 3.25±0.72$^{a}$ | 1.04±0.26$^{a}$ | 3.15±0.09$^{a}$ | 134.86±22.36$^{a}$ |
| 1.8 | 3.21±0.21$^{a}$ | 1.34±0.50$^{a}$ | 2.54±0.80$^{a}$ | 113.88±33.77$^{a}$ |
| 2.2 | 1.84±0.03$^{a}$ | 0.60±0.02$^{a}$ | 3.09±0.13$^{a}$ | 98.30±21.61$^{a}$ |

注：同列不同字母表示差异显著（$P<0.05$）。

### 2.3　α-淀粉酶添加量对婴幼儿米粉糊化特性的影响

由图1可知，未添加α-淀粉酶和添加α-淀粉酶的婴幼儿米粉的糊化特性曲线差异显著，随着糊化温度的变化，未添加α-淀粉酶的婴幼儿米粉粘度呈现出先升高后降低再缓慢升高的趋势，主要是因为随着糊化温度的不断升高，其淀粉颗粒在水中受热膨胀，使米粉粘度增大，当米粉粘度达到峰值粘度后，淀粉颗粒因过度吸水而破裂，导致米粉粘度逐渐降低，随后糊化温度降低，部分淀粉分子在氢键的作用下老化结晶，使得米粉粘度再次升高[22]；而添加α-淀粉酶的婴幼儿米粉糊化特性曲线变化较未添加α-淀粉酶的平缓，受糊化温度影响较小，这与戴晓慧等[23]的研究结果相似，因为在酶的作用下，大米淀粉分子被降解，导致淀粉分子链之间的作用力减弱，从而使其粘度降低。

由表4可知，随着α-淀粉酶添加量的增加，婴幼儿米粉的峰值粘度和最终粘度减少，Benavent-Gil等[24]研究表明，淀粉的孔径大小及水结合力与峰值粘度呈负相关，淀粉峰值粘度降低，说明酶解

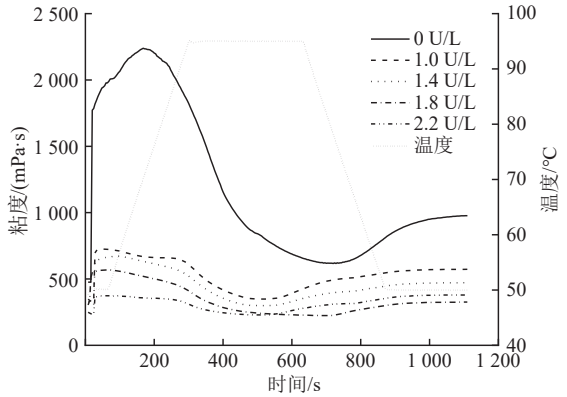



图1　α-淀粉酶添加量对婴幼儿米粉糊化特性曲线的影响

Fig. 1　Effects of α-amylase addition on the gelatinization characteristic curve of infant rice flour

使淀粉分子链长变短，形成疏松多孔的结构，利于水分的渗透，淀粉膨胀糊化能力增强，加速了直链淀粉的溶出。α-淀粉酶添加量为2.2 U/L的婴幼儿米粉的峰值粘度、衰减值、最终粘度以及回生值均显著低于其他添加量的婴幼儿米粉（$P<0.05$），其中衰减值能反映淀粉的抗剪切能力和热稳定性，衰减值越小，其抗剪切能力越强、热稳定性越好；回生值能反映淀粉的老化程度，回生值越高，淀粉越易老化[25]，且回生值与其相对分子质量呈负相关[26]，从表2~3的数据来看，这点与本研究的结论一致。未加α-淀粉酶的婴幼儿米粉的峰值粘度、谷值粘度、衰减值、最终粘度以及回生值显著高于添加了α-淀粉酶的婴幼儿米粉（$P<0.05$），说明一定添加量的α-淀粉酶能显著降低婴幼儿米粉的粘度并能提高其热稳定性和抗老化能力。

**表4 α-淀粉酶添加量对婴幼儿米粉糊化特性的影响**

Table 4 Effects of α-amylase addition on the gelatinization characteristics of infant rice flour

| α-淀粉酶添加量/(U/L) | 峰值粘度/(mPa·s) | 谷值粘度/(mPa·s) | 衰减值/(mPa·s) | 最终粘度/(mPa·s) | 回生值/(mPa·s) |
|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 2 192.5±108.2$^{c}$ | 711.0±132.9$^{c}$ | 1 481.5±24.7$^{b}$ | 993.0±22.6$^{d}$ | 282.0±110.3$^{b}$ |
| 1.0 | 631.3±80.3$^{b}$ | 368.7±19.2$^{b}$ | 262.7±98.7$^{a}$ | 488.3±22.1$^{c}$ | 119.7±36.3$^{ab}$ |
| 1.4 | 552.0±169.7$^{ab}$ | 274.0±33.9$^{ab}$ | 278.0±135.8$^{a}$ | 372.0±50.9$^{b}$ | 98.0±17.0$^{a}$ |
| 1.8 | 519.5±70.0$^{ab}$ | 230.0±9.9$^{a}$ | 289.5±79.9$^{a}$ | 331.0±7.1$^{ab}$ | 101.0±2.8$^{a}$ |
| 2.2 | 394.0±52.2$^{a}$ | 240.3±16.3$^{a}$ | 153.7±37.1$^{a}$ | 293.7±22.6$^{a}$ | 53.3±38.4$^{a}$ |

注：同列不同字母表示差异显著（$P<0.05$）。

### 2.4 α-淀粉酶添加量对婴幼儿米粉水合特性的影响

由图2可知，水溶性指数（WSI）与吸水性指数（WAI）呈负相关，与阮蕴莹等[27]的研究结果一致。淀粉酶将大米淀粉分解为小分子糖和糊精，减少了淀粉凝胶的形成，从而使得婴幼儿米粉亲水性减弱，吸水性和持水性降低，WAI和膨润力（SP）随着α-淀粉酶添加量的增加而降低；随着酶解产生的小分子糖和糊精等可溶性糖的增加，婴幼儿米粉在水中的分散性增强，使WSI升高。说明酶解能有效解决婴幼儿米粉的冲调溶解问题，使其在冲调搅拌过程中能快速分散且不易结块。

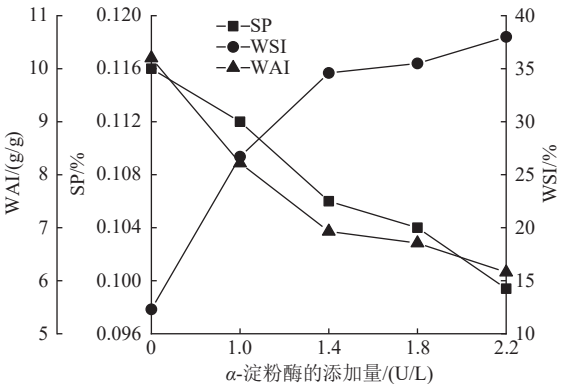



图2 α-淀粉酶添加量对婴幼儿米粉水合特性的影响

Fig. 2 Effects of α-amylase addition on the hydration properties of infant rice flour

### 2.5 α-淀粉酶添加量对婴幼儿米粉感官评分的影响

由表5可知，未添加α-淀粉酶的婴幼儿米粉感官评分显著低于添加了α-淀粉酶的婴幼儿米粉（$P<0.05$）；α-淀粉酶添加量为1.8 U/L时婴幼儿米粉感官评分最高，添加量为1.4 U/L的次之，感官评分并未与添加量呈现线性关系，故从感官层面来说，适度添加α-淀粉酶可以使得婴幼儿米粉的品

**表5 α-淀粉酶添加量对婴幼儿米粉感官评分的影响**

Table 5 Effects of α-amylase addition on the sensory scores of infant rice flour

| α-淀粉酶添加量/(U/L) | 总分 | 色泽 | 组织状态 | 气味 | 滋味 | 细腻度 | 吞咽难易度 | 稀稠度 | 变稀程度 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 61.1±6.9$^{a}$ | 5.9±1.3$^{a}$ | 4.5±0.7$^{a}$ | 9.3±1.6$^{a}$ | 7.5±2.1$^{a}$ | 10.8±5.5$^{a}$ | 5.6±2.6$^{a}$ | 6.0±1.7$^{a}$ | 11.5±3.5$^{a}$ |
| 1.0 | 71.6±5.4$^{b}$ | 6.1±1.4$^{a}$ | 5.1±0.9$^{ab}$ | 9.0±1.3$^{a}$ | 7.7±2.3$^{a}$ | 15.3±3.7$^{b}$ | 6.9±2.6$^{a}$ | 9.7±1.8$^{b}$ | 11.8±1.8$^{a}$ |
| 1.4 | 79.9±4.5$^{cd}$ | 6.5±1.1$^{a}$ | 5.5±0.7$^{b}$ | 9.2±2.1$^{a}$ | 9.0±1.9$^{ab}$ | 15.5±3.0$^{b}$ | 9.6±2.7$^{b}$ | 12.2±1.3$^{c}$ | 12.4±1.2$^{a}$ |
| 1.8 | 80.9±4.2$^{d}$ | 6.3±1.7$^{a}$ | 5.5±0.7$^{b}$ | 9.0±1.9$^{a}$ | 9.5±1.8$^{b}$ | 16.0±2.4$^{b}$ | 10.5±1.7$^{b}$ | 12.2±1.7$^{c}$ | 11.9±2.0$^{a}$ |
| 2.2 | 76.2±2.5$^{c}$ | 6.2±1.6$^{a}$ | 5.0±1.7$^{ab}$ | 8.5±2.2$^{a}$ | 9.0±2.3$^{ab}$ | 16.3±2.7$^{b}$ | 10.7±1.5$^{b}$ | 10.0±3.0$^{b}$ | 10.5±3.0$^{a}$ |
| 变异系数/% | 10.9 | 3.8 | 8.2 | 3.2 | 10.6 | 15.2 | 26.2 | 25.2 | 6.2 |

注：同列不同字母表示差异显著（$P<0.05$）。

质达到最佳。从变异系数来看，吞咽难易度、稀稠度和细腻度的变异系数较大，说明α-淀粉酶添加量对婴幼儿米粉的吞咽难易度、表观稠度和细腻度影响较大。而不同婴幼儿米粉之间的色泽、气味及变稀程度无显著差异，其中变稀程度通常与滚筒高温灭酶过程有关，若未完全灭酶则冲调后易变稀，说明α-淀粉酶添加量对婴幼儿米粉的色泽、香气及静置15 min后的表观稠度影响较小。

### 2.6　α-淀粉酶添加量对婴幼儿米粉质构特性的影响

由表6可知，婴幼儿米粉硬度、浓稠度、内聚性和黏附性的变异系数均较大，说明α-淀粉酶添加量对婴幼儿米粉的质构特性影响较大。未添加α-淀粉酶的婴幼儿米粉硬度、浓稠度、内聚性、黏附性和糊口性最高（$P<0.05$），α-淀粉酶添加量为2.2 U/L的婴幼儿米粉的硬度、浓稠度、内聚性和黏附性均显著低于其他婴幼儿米粉（$P<0.05$），随着α-淀粉酶添加量的增加，婴幼儿米粉的硬度、浓稠度、内聚性、黏附性和糊口性均降低，这与WAI和SP的变化相呼应，主要是因为在酶的作用下，婴幼儿米粉的吸水和持水能力减弱，可形成的淀粉凝胶减少，从而导致其质构特性发生显著变化。其中糊口性是内聚性与硬度的比值，反映样品在口中化开的难易程度，糊口性的变异系数最小，仅9.73%，说明α-淀粉酶对婴幼儿米粉糊口性的影响并不显著。

**表6　α-淀粉酶添加量对婴幼儿米粉质构特性的影响**

Table 6　Effects of α-amylase addition on the texture properties of infant rice flour

| α-淀粉酶添加量/（U/L） | 硬度/N | 浓稠度/（N·s） | 内聚性/N | 黏附性/（N·s） | 糊口性 |
|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 2.28±0.01$^{e}$ | 19.12±0.17$^{e}$ | 3.52±0.06$^{e}$ | 5.19±0.06$^{e}$ | 1.54±0.03$^{d}$ |
| 1.0 | 0.88±0.03$^{d}$ | 7.95±0.16$^{d}$ | 1.34±0.03$^{d}$ | 2.15±0.02$^{d}$ | 1.52±0.02$^{c}$ |
| 1.4 | 0.77±0.07$^{c}$ | 7.05±0.60$^{c}$ | 1.14±0.11$^{c}$ | 1.88±0.16$^{c}$ | 1.48±0.01$^{b}$ |
| 1.8 | 0.52±0.06$^{b}$ | 4.79±0.47$^{b}$ | 0.73±0.08$^{b}$ | 1.31±0.10$^{b}$ | 1.42±0.01$^{ab}$ |
| 2.2 | 0.25±0.02$^{a}$ | 2.29±0.23$^{a}$ | 0.30±0.04$^{a}$ | 0.63±0.06$^{a}$ | 1.20±0.04$^{a}$ |
| 变异系数/% | 83.80 | 78.46 | 88.84 | 78.59 | 9.73 |

注：同列不同字母表示差异显著（$P<0.05$）。

### 2.7　α-淀粉酶添加量对婴幼儿米粉微观结构的影响

添加不同量α-淀粉酶的婴幼儿米粉放大300倍和5 000倍的扫描电子显微镜结果如图3所示。在300倍的放大倍数下与未添加α-淀粉酶的婴幼儿米粉相比，添加了α-淀粉酶的婴幼儿米粉淀粉颗粒小且多，形状更加不规则，部分颗粒表面更加粗糙，这与阮蕴莹等[27]的研究结果相似，主要是因为α-淀粉酶在一定程度上破坏了淀粉的分子结构，直链淀粉和支链淀粉颗粒在被酶解后重新排列形成微晶束，使得淀粉颗粒碎片增加，表面粗糙度提高[28]。在5 000倍的放大倍数下，婴幼儿米粉颗粒表面分布着大小不一的孔洞，且α-淀粉酶添加量越大孔洞越密集，其疏松的孔隙结构，使得水分能够更好地渗入到米粉中，从而改善了婴儿米粉的冲调特性，这也是婴幼儿米粉的水溶性指数随α-淀粉酶添加量增大而升高的主要原因。

### 2.8　α-淀粉酶添加量对婴幼儿米粉体外消化特性的影响

由图4可知，与未添加α-淀粉酶的婴幼儿米粉相比，添加了α-淀粉酶的婴幼儿米粉RDS质量分数增加，RS质量分数降低，说明α-淀粉酶酶解可以改善婴幼儿米粉的消化特性，使其更容易被人体消化，与袁海娜等[29]的研究结果一致。这可能是由于在高温糊化的作用下，淀粉颗粒结构被严重破坏，使其易于被消化酶水解[30]。此外，淀粉酶可以通过与淀粉的糖苷键结合，使长链的淀粉大分子迅速分解为短链小分子，生成低相对分子质量的糊精，进而改善婴儿米粉的消化性能[31]。

### 2.9　婴幼儿米粉的理化特性与品质特性之间的相关性分析

由图5可知，婴幼儿米粉的理化特性和品质特性之间存在显著的相关性，其中婴幼儿米粉的感官

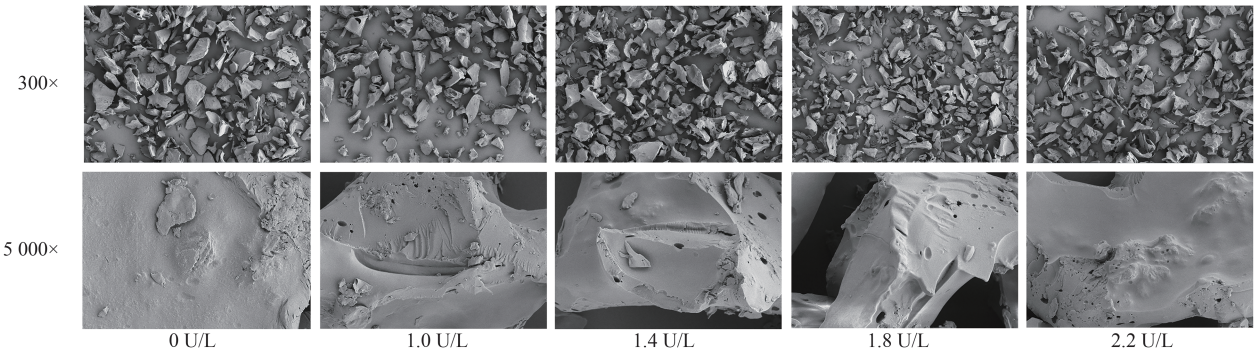



图 3　婴幼儿米粉的扫描电子显微镜图

Fig. 3　Scanning electron microscopy images of infant rice flour

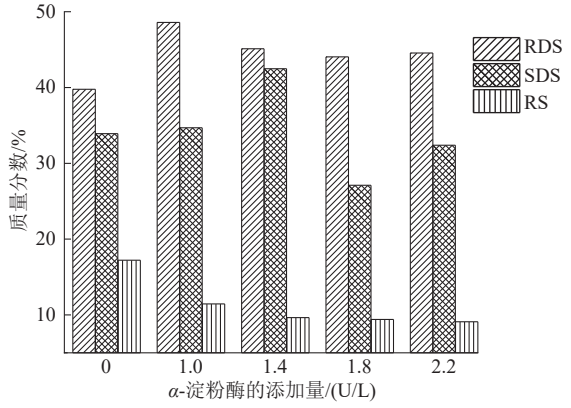



图 4　α-淀粉酶添加量对婴幼儿米粉体外消化特性的影响

Fig. 4　Effects of α-amylase addition on the *in vitro* digestion characteristics of infant rice flour

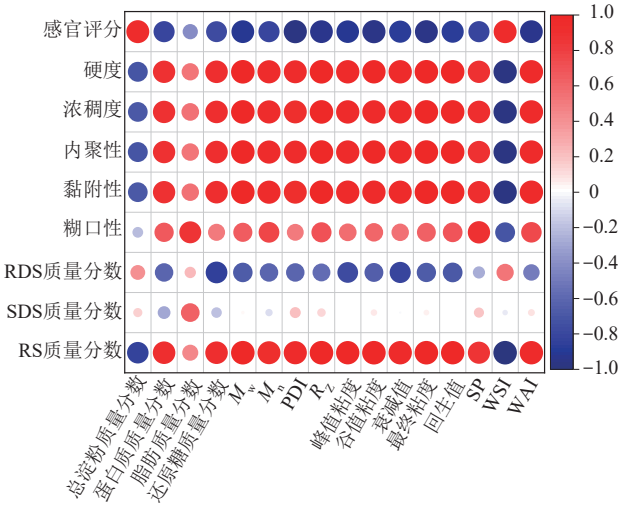



图 5　婴幼儿米粉理化特性与品质特性的相关性分析热图

Fig. 5　Heat map of the correlations between physicochemical characteristics and quality characteristics of infant rice flour

评分与谷值粘度呈显著负相关（$P<0.01$），说明谷值粘度是表征婴幼儿米粉感官品质的重要指标；体外消化特性指标中的RS质量分数以及质构指标中的硬度、浓稠度、内聚性和黏附性，与其淀粉相对分子质量、WAI以及糊化特性相关指标均呈显著正相关（$P<0.01$），与WSI呈显著负相关（$P<0.01$），说明WSI越大，婴幼儿米粉的RS质量分数越少，硬度、浓稠度、内聚性和黏附性越低。说明α-淀粉酶解处理会使婴幼儿米粉的食用品质、体外消化特性发生变化，也能在一定程度上改善其品质特性。

## 3　结论

理化特性方面，α-淀粉酶添加量对婴幼儿米粉的基本成分的影响并不显著；婴幼儿米粉中淀粉的相对分子质量随着α-淀粉酶添加量的增加而降低，其中α-淀粉酶添加量为1.8 U/L的婴幼儿米粉中淀粉的相对分子质量分布最为均匀；添加α-淀粉酶的婴幼儿米粉的糊化特性曲线随着糊化温度的变化较为平缓，婴幼儿米粉的峰值粘度和最终粘度随着α-淀粉酶添加量的增加而逐渐降低；随着α-淀粉酶添加量的增加，婴幼儿米粉的亲水性和持水力逐渐降低。在婴幼儿米粉品质特性方面，α-淀粉酶添加量为1.8 U/L的婴幼儿米粉感官评分最高，α-淀粉酶添加量对吞咽难易度、稀稠度和细腻度影响显著；α-淀粉酶添加量为2.2 U/L的婴幼儿米粉的硬度、浓稠度、内聚性和黏附性均显著低于其他样品（$P<0.05$），其硬度、浓稠度、内聚性、黏附性和糊口性随着α-淀粉酶添加量的不断增加而降低。与未添加淀粉酶的婴幼儿米粉相比，添加α-淀粉酶的婴幼儿米粉的淀粉颗粒小且多，形状更加不规则，米粉表面的孔洞更加密集。α-淀粉酶使得婴幼儿米粉中的快消化淀粉质量分数增加，抗性淀粉质量分数降低，可提高婴幼儿米粉的消化性能。婴幼儿米粉的感官评分与谷值粘

度呈显著负相关（$P<0.01$），抗性淀粉质量分数、硬度、浓稠度、内聚性和黏附性与其淀粉相对分子质量、吸水性指数和糊化特性相关指标均呈显著正相关（$P<0.01$），与水溶性指数呈显著负相关（$P<0.01$）。

## 参考文献


[1] 王俏，王骁音，Tino Landl，等. 全球婴幼儿辅助食品发展状况与趋势[J]. 中国妇幼健康研究，2021，32(12)：1836-1842.
WANG Q，WANG X Y，LANDL T，et al. The development status and trend of global complementary foods for infant and young children[J]. Chinese Journal of Woman and Child Health Research，2021，32(12)：1836-1842.(in Chinese)

[2] 刘昊，金忠兴，赵冰熔，等. 酶制剂在婴儿营养米粉生产中的应用研究[J]. 中国乳品工业，2005，33(4)：34-36.
LIU H，JIN Z X，ZHAO R B，et al. Studies on amylase application in infant cereal production[J]. China Dairy Industry，2005，33(4)：34-36.(in Chinese)

[3] 马文华，杨帆，钱晓洁，等. 淀粉-脂质复合物耐消化性的研究进展：影响因素和形成机制[J]. 食品工业科技，2025，46(9)：414-423.
MA W H，YANG F，QIAN X J，et al. Research progress on the digestibility resistance of starch-lipid complexes：the influence factor and formation mechanism[J]. Science and Technology of Food Industry，2025，46(9)：414-423.(in Chinese)

[4] 张云亮，王子妍，徐晨冉，等. 婴幼儿米粉加工技术及品质评价的研究进展[J]. 中国粮油学报，2021，36(2)：196-202.
ZHANG Y L，WANG Z Y，XU C R，et al. Research progress on processing technology and quality evaluation of infant rice flour[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association，2021，36(2)：196-202.(in Chinese)

[5] MINEKUS M，ALMINGER M，ALVITO P，et al. A standardised static *in vitro* digestion method suitable for food：an international consensus[J]. Food & Function，2014，5(6)：1113-1124.

[6] 石红. 谷基配方营养米粉酶法工艺关键技术及模拟消化分析[D]. 杭州：浙江工商大学，2017.

[7] 刘颖，王子妍，张煜，等. 不同酶解程度对留胚米粉理化性质及消化性的影响研究[J]. 中国食品添加剂，2024，35(1)：42-50.
LIU Y，WANG Z Y，ZHANG Y，et al. Effects of enzymatic hydrolysis on physicochemical properties and digestibility of embryos retained rice flour[J]. China Food Additives，2024，35(1)：42-50.(in Chinese)

[8] 胡居吾，吉雪，赵强，等. 限制性酶解与喷雾干燥制备婴幼儿米粉及其体外消化性和流变性研究[J]. 中国食品学报，2018，18(12)：118-128.
HU J W，JI X，ZHAO Q，et al. *In vitro* digestibility and rheological properties of infant rice powder produced by limited hydrolysis and spray drying[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology，2018，18(12)：118-128.(in Chinese)

[9] SYAHARIZA Z A，LI E P，HASJIM J. Extraction and dissolution of starch from rice and sorghum grains for accurate structural analysis[J]. Carbohydrate Polymers，2010，82(1)：14-20.

[10] 郁映涛，肖刘洋，杨晓凡等. 超声波结合酶解对玉米淀粉多层级结构及其吸附性能的影响[J]. 食品科学，2024，45(5)：174-183.
YU Y T，XIAO L Y，YANG X F，et al. Effect of ultrasonic treatment combined with enzymatic hydrolysis on the multilevel structure and adsorption properties of maize starch[J]. Food Science，2024，45(5)：174-183.(in Chinese)

[11] 刘惠惠. 高膳食纤维挤压方便米饭的研制[D]. 长沙：湖南农业大学，2022.

[12] 刘芳宏，谭书明，邓泽祥，等. 婴幼儿分段米粉辅料配方的研究[J]. 食品工业，2018，39(4)：49-53.
LIU F H，TAN S M，DENG Z X，et al. Study on auxiliary materials formula of subsection rice powder for the infant[J]. The Food Industry，2018，39(4)：49-53.(in Chinese)

[13] 袁如英，韩飞，黄荣和. 滚筒干燥结合酶法生产婴幼儿米粉的工艺研究[J]. 现代食品，2018，24(11)：187-189.
YUAN R Y，HAN F，HUANG R H. Study on the technology of producing infant rice powder by drum drying combined with enzymatic method[J]. Modern Food，2018，24(11)：187-189.(in Chinese)

[14] 孙鹏伟，刘娅妮，李然，等. 不同添加量的双孢蘑菇粉对酸奶流变学和质构特性的影响[J]. 食品工业科技，2024，45(9)：54-61.
SUN P W，LIU Y N，LI R，et al. Effects of different addition of *Agaricus bisporus* powders on rheological and textural properties of yogurt[J]. Science and Technology of Food Industry，2024，45(9)：54-61.(in Chinese)

[15] DENG F，LI Q P，CHEN H，et al. Relationship between chalkiness and the structural and thermal properties of rice starch after shading during grain-filling stage[J]. Carbohydrate Polymers，2021，252：117212.

[16] 程冰，张乐乐，安艳霞，等. 马铃薯抗性淀粉结构特征及体外消化特性的研究[J]. 食品安全质量检测学报，2021，12(17)：6975-6981.

CHENG B，ZHANG L L，AN Y X，et al. Researched on structural characteristics and *in vitro* digestibility of potato resistant starch[J]. Journal of Food Safety & Quality，2021，12(17)：6975-6981.(in Chinese)

[17] ENGLYST H N，KINGMAN S M，CUMMINGS J H. Classification and measurement of nutritionally important starch fractions[J]. European Journal of Clinical Nutrition，1992，46(Suppl 2)：S33-S50.

[18] 瞿佳丽. 加工过程中添加*α*-淀粉酶和风味蛋白酶对红小豆沙食用品质的影响[D]. 无锡：江南大学，2023.

[19] LI M，LI J X，ZHU C H. Effect of ultrasound pretreatment on enzymolysis and physicochemical properties of corn starch[J]. International Journal of Biological Macromolecules，2018，111：848-856.

[20] KEERATIBURANA T，HANSEN A R，SOONTARANON S，et al. Porous high amylose rice starch modified by amyloglucosidase and maltogenic *α*-amylase [J]. Carbohydrate Polymers，2020，230：115611.

[21] 谭瑶瑶，吴亨，古碧，等. 不同酶制备木薯抗性淀粉的性质比较[J]. 食品工业科技，2013，34(11)：88-91.
TAN Y Y，WU H，GU B，et al. Property comparison of cassava resistant starch prepared by different amylases [J]. Science and Technology of Food Industry，2013，34(11)：88-91.(in Chinese)

[22] CLAVER I P，ZHANG H H，LI Q，et al. Impact of the soak and the malt on the physicochemical properties of the sorghum starches[J]. International Journal of Molecular Sciences，2010，11(8)：3002-3015.

[23] 戴晓慧，张名位，马永轩等. 蒸汽酶解调质-挤压膨化工艺改善速食米粉冲调分散性和预消化性[J]. 现代食品科技，2020，36(10)：200-209，156.
DAI X H，ZHANG M Wi，MA Y X，et al. Extrusion pretreated by steam conditioning accompanying starch enzymolysis improved the dispersibility and predigestion of instant rice flour[J]. Modern Food Science and Technology，2020，36(10)：200-209，156.(in Chinese)

[24] BENAVENT-GIL Y，RODRIGO D，ROSELL C M. Thermal stabilization of probiotics by adsorption onto porous starches[J]. Carbohydrate Polymers，2018，197：558-564.

[25] 周显青，叶新悦，张玉荣，等. 粳糯稻谷贮藏期间糊化特性的变化[J]. 食品与发酵工业，2022，48(12)：60-67.
ZHOU X Q，YE X Y，ZHANG Y R，et al. Study on the changes of gelatinization characteristics of *japonica*-glutinous rice during storage[J]. Food and Fermentation Industries，2022，48(12)：60-67.(in Chinese)

[26] VAMADEVAN V，BERTOFT E. Impact of different structural types of amylopectin on retrogradation[J]. Food Hydrocolloids，2018，80：88-96.

[27] 阮蕴莹，邓媛元，张雁，等. 不同葡萄糖当量值预消化大米膨化粉的理化性质和结构特性[J]. 食品科学，2023，44(14)：29-36.
RUAN Y Y，DENG Y Y，ZHANG Y，et al. Physicochemical and structural properties of pre-digested puffed rice flours with different dextrose equivalent values[J]. Food Science，2023，44(14)：29-36.(in Chinese)

[28] 陈悦. 酶解和发酵处理对杂粮代餐粉品质特性及微观结构影响的研究[D]. 沈阳：沈阳师范大学，2022.

[29] 袁海娜，尤玉如，储小军，等. 生物技术应用于婴幼儿谷基配方米粉的工艺研究[J]. 中国食品学报，2009，9(6)：121-127.
YUAN H N，YOU Y R，CHU X J，et al. Studies on production technology of infant formula rice powder by biotechnology[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology，2009，9(6)：121-127.(in Chinese)

[30] 张冬媛，邓媛元，张名位，等. 发芽-挤压-淀粉酶协同处理对速食糙米粉品质特性的影响[J]. 中国农业科学，2015，48(4)：759-768.
ZHANG D Y，DENG Y Y，ZHANG M W，et al. Effect of germination-extrusion-amylase assisted processing on quality properties of brown rice powder[J]. Scientia Agricultura Sinica，2015，48(4)：759-768.(in Chinese)

[31] 马丽媛，狄冰倩，贺馨颖，等. 复合酶酶解对谷物杂粮粉体外消化率的影响[J]. 食品工业，2021，42(10)：123-127.
MA L Y，DI B Q，HE X Y，et al. The effect of compound enzyme enzymolysis on the digestibility of cereal and multigrain flour *in vitro*[J]. The Food Industry，2021，42(10)：123-127.(in Chinese)