

# 掺入外源淀粉的魔芋豆腐体外消化和发酵性能研究

## External digestion and fermentation characteristics of konjac tofu adding exogenous starches

雷雯 钟耕 张东霞 黄思雨

LEI Wen ZHONG Geng ZHANG Dong-xia HUANG Si-yu

(西南大学食品科学学院, 重庆 400715)

(College of Food Science, Southwest University, Chongqing 400715, China)

**摘要:**通过体外模拟口腔、胃、小肠消化,探讨掺入淀粉的魔芋豆腐体外消化性能,并将消化后的剩余部分作为小鼠盲肠内容物体外发酵底物,研究其在盲肠中的发酵性能。结果表明,纯魔芋豆腐在口腔、胃、小肠中均不被消化,掺入魔芋豆腐中的淀粉从口腔开始被水解,在胃部不被水解,进入小肠后20 min内即可完成大部分水解,但与纯淀粉相比,掺入魔芋豆腐中的淀粉的快消化淀粉含量减少,总水解率无显著变化,说明脱乙酰基魔芋葡甘聚糖可延缓淀粉消化,但不能阻止淀粉消化。体外模拟盲肠发酵过程中,掺入淀粉的魔芋豆腐降低pH值的能力高于纯魔芋豆腐,但前者生成的短链脂肪酸及发酵24 h后乳酸菌含量少于后者。综上表明,食用掺入淀粉的魔芋豆腐相较纯魔芋豆腐会快速升高血糖和降低魔芋豆腐的肠道益生作用。

**关键词:**魔芋豆腐;淀粉;体外消化;体外发酵;短链脂肪酸

**Abstract:** In this article, the external digestion of konjac tofu mixed with starch was studied by simulating oral, gastric and small intestine digestion, and the remaining part of the digestion was used as a substrate for in vitro fermentation of mouse cecum, and its fermentation performance in the cecum was studied. The results showed that pure konjac tofu was not digested in the mouth, stomach and small intestine, and the konjac tofu mixed with starch could be partially hydrolyzed in the mouth and not hydrolyzed in the stomach, most of the hydrolysis can be completed within 20 min. But compared with pure starch, the rapidly di-

gestible starch of the starch incorporated into konjac tofu was reduced, the total hydrolysis rate did not change significantly. It shows that deacetylated konjac glucomannan can delay starch digestion, but can't prevent starch digestion. In the process of cecal fermentation, the ability of konjac tofu with starch to decrease pH is higher than that of pure konjac tofu, but the short chain fatty acid and lactic acid bacteria content produced by fermentation for 24 h by the former are less than the latter. It is indicated that eating konjac tofu with starch will rapidly raise blood sugar and reduce the intestinal probiotic effect of konjac tofu.

**Keywords:** konjac tofu; starch; in vitro digestion; in vitro fermentation; short chain fatty acid

魔芋豆腐是魔芋葡甘聚糖(konjac glucomannan, KGM)在碱性条件下加热时脱除乙酰基形成的热不可逆凝胶。研究表明,脱乙酰基使KGM分子间的氢键连接增强,螺旋结构消失<sup>[1-2]</sup>,降低了聚合物固有的水溶性<sup>[3]</sup>,使KGM持水性变差,极易发生脱水收缩现象<sup>[4]</sup>,使魔芋豆腐在常温下软塌无弹性,影响商品性。此外,高纯度KGM制作的魔芋豆腐加热时口感偏硬。因此,为改善魔芋豆腐外观和食用品质,制作魔芋豆腐时常添加淀粉。孙健等<sup>[5]</sup>通过将羟丙基淀粉添加到魔芋精粉中制作魔芋豆腐,改善了魔芋豆腐的硬度和析水率。

KMG在上消化道中不被消化,但在大肠中会被肠道菌群酵解<sup>[6-7]</sup>。目前大量研究集中于KGM的抗肥胖和控制血糖<sup>[8]</sup>、降胆固醇<sup>[9]</sup>、降血脂<sup>[10]</sup>、抗炎活性<sup>[11]</sup>、改善结肠生态、缓解便秘<sup>[12-13]</sup>、抗醇解酒<sup>[14]</sup>等功能作用。而关于魔芋豆腐的研究大都集中于魔芋豆腐的凝固条件、魔芋粉与其他原料(黄原胶<sup>[15]</sup>、卡拉胶<sup>[5]</sup>、淀粉<sup>[6]</sup>等)复配改善魔芋的硬度与持水性、碱促进KGM凝胶的机理<sup>[4,16]</sup>

**基金项目:**重庆市发改委优质粮食工程项目(编号:1812001721)

**作者简介:**雷雯,女,西南大学在读硕士研究生。

**通信作者:**钟耕(1964—),男,西南大学教授,博士(后)。

E-mail: 980360686@qq.com

**收稿日期:**2019-11-15

等。现有许多生产商为改善魔芋豆腐品质向魔芋豆腐中添加淀粉,但添加淀粉后对魔芋豆腐的健康价值是否有影响尚无相关研究。

试验拟对纯魔芋豆腐、掺入芭蕉芋淀粉和玉米淀粉的魔芋豆腐进行体外模拟消化和小鼠盲肠体外模拟发酵,以芭蕉芋淀粉和玉米淀粉为对照,探讨掺入淀粉对魔芋豆腐消化性能和盲肠发酵性能的影响,为魔芋制品的健康消费提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与仪器

#### 1.1.1 材料与试剂

纯化花魔芋精粉:KGM 含量 74.81%(干基计),黏度 41 400 mP·s,未检出含淀粉,四川森态源食品有限公司;

玉米淀粉:河北省玉峰实业集团有限公司;

芭蕉芋淀粉:贵州省兴义市余江芭蕉芋淀粉厂;

小鼠:雄性 SPF 级成年 KM 小鼠,许可证号 SCXK(湘)2016-0002,湖南斯莱克景达实验动物有限公司;

Ca(OH)<sub>2</sub>、HCl、NaOH、NaCl、葡萄糖:分析纯,成都市科龙化工试剂厂;

胃蛋白酶(3 000~3 500 U/g)、糖化酶(10 万 U/g):北京索莱宝科技有限公司;

MRS 培养基:北京奥博星生物技术有限责任公司;

猪胰酶:10 万 U/g,美国 Sigma 公司。

#### 1.1.2 仪器与设备

酸度计:PB-10 型,赛多利斯科学仪器(北京)有限公司;

真空冷冻干燥机:SY-10 型,北京松源华兴科技发展有限公司;

紫外—可见分光光度计:759 型,上海菁华科技仪器有限公司;

气相色谱仪:GC-2010 型,日本岛津公司。

### 1.2 试验方法

1.2.1 样品制备 参照孙健等<sup>[5]</sup>的方法,修改如下:称取一定量魔芋粉与淀粉置于 250 mL 烧杯中,加入蒸馏水将总质量补为 100 g。沸水浴中糊化 20 min,糊化过程中不断搅拌。糊化后补偿糊化过程中散失的水分,于 70 ℃水浴溶胀 20 min,加入一定量质量分数 10% 的 Ca(OH)<sub>2</sub>悬浊液搅拌均匀,静置 30 min,在蒸锅中蒸 30 min 即制成魔芋豆腐。真空冷冻干燥、粉碎、过 100 目筛置于干燥器中备用。

#### 1.2.2 体外模拟消化

(1) 体外模拟口腔消化:根据 Ruth 等<sup>[17]</sup>的方法测定人体唾液及唾液中淀粉酶的活性。体外模拟口腔消化试验根据陈春<sup>[18]</sup>的方法,修改如下:将各样品配置成

2 mg/mL 的水溶液,向 A1~A5 试管中依次加入 2 mL 唾液和样品溶液,向 B1~B5 试管中依次加入 2 mL 样品溶液和蒸馏水,向 C 试管中加入 2 mL 唾液和蒸馏水。将上述试管置于 37 ℃水浴锅内孵育 5 min,沸水浴中灭酶 5 min。用 DNS 法测定各管中还原糖含量,并按式(1)计算淀粉水解率。

$$H_{\text{口腔}} = \frac{(G_A - G_B - G_C) \times 0.9}{m_{\text{淀}}} \times 100\%, \quad (1)$$

式中:

$H_{\text{口腔}}$ ——模拟口腔消化时淀粉水解率,%;

$G_A$ ——反应后 A 管还原糖含量,g;

$G_B$ ——反应后 B 管还原糖含量,g;

$G_C$ ——反应后 C 管还原糖含量,g;

$m_{\text{淀}}$ ——样品中淀粉质量,g。

(2) 体外模拟胃、肠道消化:根据 Román 等<sup>[19]</sup>的方法略做修改。取 1.00 g 样品于 25 mL 磷酸盐缓冲液(pH 6.8)中分散,37 ℃预保温 10 min,用 2 mL HCl 溶液(1 mol/L)将消化液 pH 调至 2.0,然后加入 0.75 mL 胃蛋白酶溶液(2 mg/mL,含 9 g/L NaCl),孵育 30 min。用 2 mL NaOH 溶液(1 mol/L)将 pH 调至 6.8,加入 5 mL 猪胰酶溶液(50 mg/mL),37 ℃温育 4 h,分别于模拟胃消化 0,30 min,模拟小肠消化 0,20,40,60,90,120,150,180,240 min 时取 200 μL 消化液加至含 1 mL 无水乙醇的离心管中以停止酶促反应,将样品在 4 ℃下以 10 000 r/min 离心 5 min。沉淀物用 400 μL 75%乙醇洗涤 1 次,合并上清液。取 300 μL 上清液用 1 600 μL 乙酸钠缓冲液(0.1 mol/L pH 4.5)稀释,加入 100 μL 糖化酶溶液(25 mg/mL),50 ℃孵育 30 min。取出后用 DNS 法测定还原糖含量,按式(2)~(4)分别计算模拟胃、小肠淀粉水解率及样品中抗性淀粉含量。

$$H_{\text{胃}} = \frac{(G_{\text{胃}} - G_0) \times 0.9}{m_{\text{淀}}} \times 100\%, \quad (2)$$

$$H_{\text{小肠}} = \frac{\Delta G \times 0.9}{m_{\text{淀}}} \times 100\%, \quad (3)$$

$$RS = \left[ 1 - \frac{(G_{120} - G_0) \times 0.9}{m_{\text{淀}}} \right] \times 100\%, \quad (4)$$

式中:

$H_{\text{胃}}$ ——模拟胃消化时淀粉水解率,%;

$G_{\text{胃}}$ ——模拟胃消化 30 min 时还原糖含量,g;

$G_0$ ——模拟胃消化 0 min 时还原糖含量,g;

$m_{\text{淀}}$ ——样品中淀粉质量,g;

$H_{\text{小肠}}$ ——模拟小肠消化时淀粉水解率,%;

$\Delta G$ ——取样点与模拟小肠消化 0 min 时还原糖含量变化,g;

$RS$ ——抗性淀粉含量,%;

$G_{120}$ ——模拟小肠消化 120 min 时还原糖含量,g。

1.2.3 小鼠盲肠内容物体外厌氧发酵 将 1.2.2 中模拟

小肠消化 4 h 后的消化液置于孔径为 3 500 Da 截留分子尺寸的透析袋中,4 ℃下用去离子水透析。透析后,通过 DNS 法测定透析袋中还原糖含量确保去除所有还原糖,并将保留物冷冻干燥<sup>[20]</sup>。

根据秦清娟等<sup>[7]</sup>的方法制备盲肠内容物稀释液,根据文献<sup>[21]</sup>的方法配制发酵培养基。向发酵培养基中分别加入质量分数 1% 的消化后冻干样品作为碳源,阳性对照组加入质量分数 1% 的葡萄糖,阴性对照组不加任何碳源。再加入体积分数 10% 的盲肠内容物稀释液,混合均匀,通入氮气排除发酵罐中空气,密封。以上操作均在无菌台进行,每组样品设置 5 瓶,于 37 ℃厌氧发酵箱中分别培养 0,4,8,12,24 h,向瓶中加入 100 μL 质量分数 1% 的硫酸铜溶液终止发酵<sup>[8]</sup>。

1.2.4 发酵液 pH 的测定 在加入硫酸铜溶液前用酸度计直接测定发酵液的 pH 值<sup>[22]</sup>。

1.2.5 发酵液中短链脂肪酸(SCFA)含量测定 将发酵液 5 000 r/min 离心 20 min,取 0.5 mL 上清液,分别加入 50%乙醇 0.5 mL,浓盐酸 3 μL,涡旋振荡 3 min,40 W 超声处理 20 min,再 5 000 r/min 离心 20 min,取上清液过 0.25 μL 滤膜,经气相色谱测定 SCFA 含量<sup>[23]</sup>。以乙酸、丙酸、丁酸标准品绘制标准曲线。气相色谱柱:DB-FFAP 柱(30 m×0.53 mm×0.50 μm);升温程序:柱温 80 ℃,保持 0.5 min,以 5 ℃/min 升温至 180 ℃,保持 1 min,以 20 ℃/min 升温至 200 ℃,保持 1 min;压力 60.1 kPa;进样量 1 μL;尾吹流量 30.0 mL/min,氢气流量 40.0 mL/min,空气流量 400.0 mL/min<sup>[24]</sup>。

1.2.6 发酵液中乳酸菌数量测定 按 GB 4789.35—2016 执行。

1.2.7 数据分析 采用 SPSS 20.0 软件对试验数据进行统计学分析, $P<0.05$  表示有显著差异。采用 Origin lab 2017 软件作图。

2 结果与分析

2.1 魔芋豆腐配方优化

前期试验发现,魔芋豆腐中掺入淀粉可改善魔芋豆腐的软硬度,但不同淀粉理化性质差异较大,要达到同等品质的魔芋豆腐,不同种类淀粉的添加量不同。以魔芋豆腐的硬度和持水性为指标,通过正交试验优化得到纯魔芋豆腐、芭蕉芋淀粉魔芋豆腐、玉米淀粉魔芋豆腐的配方,如表 1 所示。

表 1 魔芋豆腐配方

Table 1 Konjac tofu formula %

| 类别        | 魔芋粉 | 淀粉   | Ca(OH) <sub>2</sub> |
|-----------|-----|------|---------------------|
| 纯魔芋豆腐     | 2.0 | 0.00 | 0.06                |
| 芭蕉芋淀粉魔芋豆腐 | 1.7 | 0.85 | 0.06                |
| 玉米淀粉魔芋豆腐  | 1.4 | 4.20 | 0.06                |

由表 2 可知,芭蕉芋魔芋豆腐和玉米魔芋豆腐的持水性显著高于纯魔芋豆腐,且 25 ℃时,芭蕉芋魔芋豆腐和玉米魔芋豆腐硬度显著大于纯魔芋豆腐,改善了常温时魔芋豆腐的外观。人进食魔芋豆腐的温度在 45 ℃左右,此时芭蕉芋魔芋豆腐和玉米魔芋豆腐的硬度显著低于纯魔芋豆腐,改善了纯魔芋豆腐加热后食用口感偏硬的问题。

表 2 魔芋豆腐的持水性 with 硬度<sup>†</sup>

Table 2 Water holding capacity and hardness of konjac tofu

| 类别        | 持水性/%                   | 硬度/g                      |                             |
|-----------|-------------------------|---------------------------|-----------------------------|
|           |                         | 25 ℃                      | 45 ℃                        |
| 纯魔芋豆腐     | 92.42±1.08 <sup>b</sup> | 451.27±42.30 <sup>b</sup> | 1 535.52±75.18 <sup>a</sup> |
| 芭蕉芋淀粉魔芋豆腐 | 97.16±0.83 <sup>a</sup> | 577.33±27.50 <sup>a</sup> | 958.46±33.29 <sup>b</sup>   |
| 玉米淀粉魔芋豆腐  | 98.28±0.66 <sup>a</sup> | 639.47±36.92 <sup>a</sup> | 968.31±85.25 <sup>b</sup>   |

† 小写字母不同表示有显著性差异( $P<0.05$ )。

2.2 纯魔芋豆腐在体外模拟消化时的还原糖生成量

体外模拟口腔、胃、小肠消化过程中,纯魔芋豆腐组均无还原糖产生,表明脱乙酰基魔芋葡甘聚糖(D-KGM)不会在口腔、胃、小肠中被水解生成还原糖,淀粉魔芋豆腐中生成的还原糖均来自掺入的淀粉。

2.3 体外模拟口腔和胃消化时的淀粉水解率

碳水化合物消化过程中,人体口腔主要有两个作用:①通过咀嚼将食物转化为小颗粒;②通过分泌 α-淀粉酶将多糖大分子分解成小分子<sup>[15]</sup>。试验中样品均通过粉碎、过 100 目筛,分子颗粒大小相同,因此主要模拟唾液 α-淀粉酶对多糖的水解作用。试验测得收集的唾液中 α-淀粉酶活力为(82±5) D/mL,与 Ruth 等<sup>[17]</sup>的结果相吻合。

由表 3 可知,纯芭蕉芋淀粉和纯玉米淀粉在口腔中的水解率无显著差异,而对应的淀粉魔芋豆腐中淀粉的

表 3 体外模拟口腔和胃消化时的淀粉水解率<sup>†</sup>

Table 3 Hydrolysis rate of starch during simulating oral and gastric digestion in vitro

| 纯魔芋豆腐                    | 纯芭蕉芋淀粉                  | 芭蕉芋魔芋豆腐                 | 纯玉米淀粉                   | 玉米魔芋豆腐                  |
|--------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| 0.038±0.066 <sup>d</sup> | 58.67±1.81 <sup>a</sup> | 50.46±2.34 <sup>c</sup> | 57.68±1.18 <sup>a</sup> | 54.28±1.37 <sup>b</sup> |

† 小写字母不同表示有显著性差异( $P<0.05$ )。

水解率显著降低,说明 D-KGM 可以阻碍淀粉在口腔中消化。消化过程中,胃部不分泌分解糖类相关的水解酶,但胃中的强酸环境能使多糖糖苷键断裂、相对分子质量降低<sup>[25]</sup>。体外模拟胃消化过程中,各魔芋豆腐组均无还原糖产生。

## 2.4 体外模拟小肠消化时的淀粉水解率

由图 1 可知,淀粉水解率均先快速上升后缓慢上升再趋于稳定。大部分水解在 0~20 min 内完成,为快消化淀粉,能使血糖快速升高<sup>[26]</sup>。纯玉米淀粉的水解率高于纯芭蕉芋淀粉,是由于淀粉品种差异。与纯淀粉相比,对应的淀粉魔芋豆腐的淀粉水解率均降低,但 0~20 min 的降低效果显著(图 2),而最终水解程度差异不显著,说明 D-KGM 在肠道消化中可以延缓掺入淀粉的消化性能,但不能阻止淀粉消化。研究<sup>[27]</sup>表明 KGM 会使食物黏度增加而降低消化程度,试验中 D-KGM 黏度远低于 KGM,淀粉水解程度并未降低,但由于 D-KGM 与淀粉共混,一定程度地阻碍了淀粉与酶的接触,延缓了淀粉的水解。经 120 min 消化后,未被水解的淀粉为抗性淀粉,纯芭蕉芋淀粉、芭蕉芋魔芋豆腐、纯玉米淀粉、玉米魔芋豆腐中抗性淀粉占总淀粉的比例分别为 $(22.36 \pm 1.11)\%$ , $(23.57 \pm 2.85)\%$ , $(17.41 \pm 1.78)\%$ , $(19.47 \pm 1.68)\%$ ,与未被水解的 D-KGM 一起进入大肠中被微生物酵解。

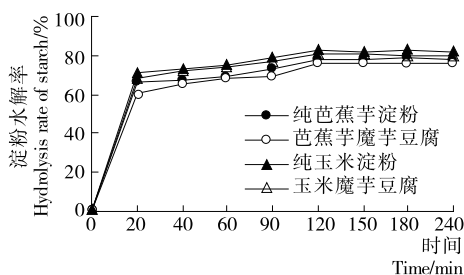


图 1 体外模拟小肠消化时淀粉水解率随消化时间的变化

Figure 1 The hydrolysis rate of starch changes with digestion time during simulating small intestine digestion in vitro

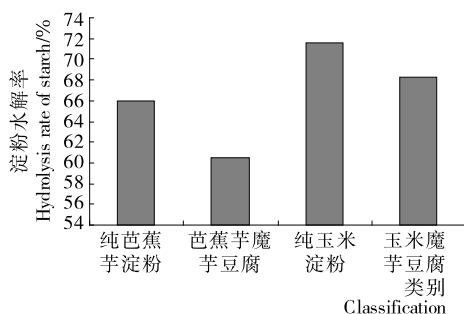


图 2 体外模拟小肠消化 20 min 时的淀粉水解率

Figure 2 The hydrolysis rate of starch when simulating small intestine digestion for 20 min in vitro

## 2.5 酵解过程中 pH 的变化

由图 3 可知,小鼠盲肠体外发酵过程中,空白组 pH 值无显著变化,其他各组 pH 值呈下降趋势,且 0~4 h 下降最快。纯芭蕉芋淀粉和纯玉米淀粉组在 8 h 后 pH 值不再下降,玉米魔芋豆腐组在 12 h 后 pH 值不再下降,纯魔芋豆腐、芭蕉芋魔芋豆腐和葡萄糖组在发酵 24 h 内 pH 值持续下降,但随着发酵时间的延长, pH 值下降速度持续减缓。整个过程中,葡萄糖组 pH 值下降得最快最多,葡萄糖最易被肠道微生物利用,其次为纯芭蕉芋淀粉组和纯玉米淀粉组,纯魔芋豆腐组下降得最慢最少。综上可知,发酵过程中,玉米和芭蕉芋抗性淀粉组降低发酵液 pH 值能力高于 D-KGM,前者降低 pH 值的持续时间短,而后者能持续缓慢降低 pH 值,掺入淀粉的魔芋豆腐组趋势介于二者之间。

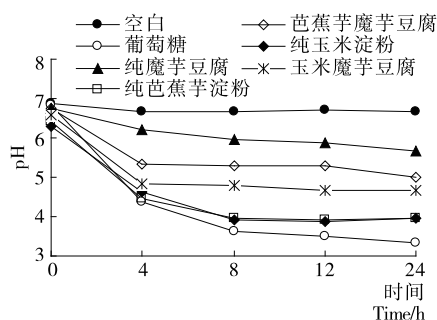


图 3 发酵液中 pH 值随发酵时间的变化

Figure 3 The pH of the fermentation broth changes with the fermentation time

## 2.6 酵解过程中 SCFA 含量的变化

在 SCFA 中,乙酸是人体肠道内细菌发酵多糖最主要的产物<sup>[28]</sup>。由表 4 可知,随着发酵时间的延长,发酵液中乙酸产量均显著增加,且大于空白组和葡萄糖组。发酵 0~4 h,纯魔芋豆腐组产乙酸较少,但随着发酵时间的增加,纯魔芋豆腐组产乙酸速率不断增加,发酵 24 h 时,乙酸产量远远高于其他组。发酵 24 h 时,各含淀粉魔芋豆腐组产乙酸量显著( $P < 0.05$ )高于不含魔芋粉的纯淀粉组,说明 D-KGM 被微生物利用,产生乙酸的能力显著大于抗性淀粉。随着发酵时间的增加,丙酸产量逐渐增加,发酵 0~8 h 时,纯魔芋豆腐组和芭蕉芋魔芋豆腐组产丙酸速率极为缓慢,发酵 8 h 后产丙酸速率增加。发酵 24 h 时,纯魔芋豆腐组丙酸产量显著高于其他组,芭蕉芋魔芋豆腐组丙酸产量显著高于纯芭蕉芋淀粉组,说明 D-KGM 被微生物利用,产生丙酸的能力显著大于抗性淀粉。随着发酵时间的增加,样品组丁酸产量增加且高于葡萄糖组。发酵 24 h 时,纯淀粉组产丁酸量显著高于纯魔芋豆腐组,但掺入淀粉的魔芋豆腐组产丁酸量均低于纯淀粉组和纯魔芋豆腐组,说明淀粉和魔芋粉复配形成的凝胶被微生物利用,生产丁酸的能力低于淀粉和魔芋



表 4 不同发酵时间各种短链脂肪酸生成量<sup>†</sup>

Table 4 The yield of various short chain fatty acid at different fermentation times mmol/L

| 样品      | 乙酸                        |                           |                            |                            | 丙酸                        |                           |                           |                           |
|---------|---------------------------|---------------------------|----------------------------|----------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
|         | 4 h                       | 8 h                       | 12 h                       | 24 h                       | 4 h                       | 8 h                       | 12 h                      | 24 h                      |
| 空白      | 0.543±0.042 <sup>bE</sup> | 0.325±0.014 <sup>cE</sup> | 3.203±0.283 <sup>aE</sup>  | 3.262±0.162 <sup>aF</sup>  | NP                        | NP                        | NP                        | NP                        |
| 葡萄糖     | 1.612±0.081 <sup>dD</sup> | 3.371±0.257 <sup>cD</sup> | 4.183±0.331 <sup>bD</sup>  | 6.316±0.562 <sup>aE</sup>  | NP                        | 0.004±0.001 <sup>cD</sup> | 0.015±0.001 <sup>bE</sup> | 0.060±0.005 <sup>aD</sup> |
| 纯魔芋豆腐   | 1.691±0.063 <sup>dD</sup> | 5.533±0.332 <sup>cB</sup> | 9.246±0.532 <sup>bAB</sup> | 25.374±1.441 <sup>aA</sup> | NP                        | 0.017±0.001 <sup>cC</sup> | 0.402±0.032 <sup>bA</sup> | 3.598±0.209 <sup>aA</sup> |
| 纯芭蕉芋淀粉  | 2.861±0.122 <sup>dC</sup> | 4.294±0.282 <sup>cC</sup> | 6.916±0.272 <sup>bC</sup>  | 8.391±0.412 <sup>aD</sup>  | 0.006±0.001 <sup>dB</sup> | 0.006±0.005 <sup>bA</sup> | 0.040±0.003 <sup>cC</sup> | 0.073±0.006 <sup>aC</sup> |
| 芭蕉芋魔芋豆腐 | 3.800±0.194 <sup>dB</sup> | 5.148±0.270 <sup>cB</sup> | 10.372±0.846 <sup>bA</sup> | 19.373±1.769 <sup>aB</sup> | NP                        | NP                        | 0.048±0.003 <sup>bB</sup> | 0.791±0.058 <sup>aB</sup> |
| 纯玉米淀粉   | 2.751±0.151 <sup>dC</sup> | 5.303±0.456 <sup>cB</sup> | 6.663±0.362 <sup>bC</sup>  | 8.391±0.683 <sup>aD</sup>  | 0.023±0.001 <sup>bA</sup> | 0.022±0.001 <sup>bB</sup> | 0.015±0.001 <sup>cE</sup> | 0.035±0.006 <sup>aE</sup> |
| 玉米魔芋豆腐  | 4.582±0.122 <sup>dA</sup> | 5.831±0.354 <sup>cA</sup> | 8.268±0.612 <sup>bB</sup>  | 10.510±0.913 <sup>aC</sup> | 0.005±0.000 <sup>cB</sup> | NP                        | 0.027±0.001 <sup>bD</sup> | 0.033±0.003 <sup>aE</sup> |

| 样品      | 丁酸                        |                           |                           |                           |
|---------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
|         | 4 h                       | 8 h                       | 12 h                      | 24 h                      |
| 空白      | NP                        | NP                        | NP                        | NP                        |
| 葡萄糖     | 0.030±0.002 <sup>aC</sup> | 0.030±0.001 <sup>aC</sup> | 0.018±0.001 <sup>bD</sup> | 0.018±0.001 <sup>bE</sup> |
| 纯魔芋豆腐   | 0.074±0.003 <sup>dA</sup> | 0.094±0.009 <sup>cA</sup> | 0.138±0.013 <sup>bA</sup> | 0.157±0.003 <sup>aC</sup> |
| 纯芭蕉芋淀粉  | 0.067±0.002 <sup>cA</sup> | 0.114±0.013 <sup>bA</sup> | 0.198±0.017 <sup>aA</sup> | 0.239±0.018 <sup>aA</sup> |
| 芭蕉芋魔芋豆腐 | 0.005±0.001 <sup>cD</sup> | 0.012±0.001 <sup>cD</sup> | 0.026±0.002 <sup>bD</sup> | 0.149±0.014 <sup>aC</sup> |
| 纯玉米淀粉   | 0.054±0.004 <sup>cB</sup> | 0.065±0.005 <sup>bB</sup> | 0.158±0.007 <sup>aB</sup> | 0.186±0.016 <sup>aB</sup> |
| 玉米魔芋豆腐  | NP                        | 0.013±0.001 <sup>cD</sup> | 0.036±0.002 <sup>bC</sup> | 0.061±0.005 <sup>aD</sup> |

<sup>†</sup> NP 表示未生成;同行小写字母不同表示有显著差异(P<0.05),同列大写字母不同表示有显著性差异(P<0.05)。

粉各自产丁酸的能力。各样品组总短链脂肪酸生成量均大于阴性对照组和阳性对照组。发酵 24 h 时,纯魔芋豆腐组总短链脂肪酸生成量最多,纯芭蕉芋淀粉组和纯玉米淀粉组生成量最少,且二者无显著差异(P>0.05)。玉米魔芋豆腐掺入淀粉量远高于芭蕉芋魔芋豆腐,而前者生成总酸量显著低于后者,说明 D-KGM 发酵产短链脂肪酸的能力显著大于抗性淀粉,与 2.5 中 pH 值的变化曲线不相符,可能是因为葡萄糖和抗性淀粉发酵的主要产物是长链脂肪酸或其他有机物<sup>[29]</sup>。

综上,纯淀粉组短链脂肪酸的生成主要在发酵 0~12 h,纯魔芋豆腐组主要在 12~24 h,纯魔芋豆腐组产乙酸和丙酸能力高于纯淀粉组,产丁酸能力反之,与 Zhao 等<sup>[30-31]</sup>对 KGM 和抗性淀粉的研究结果一致。掺入淀粉

的魔芋豆腐组产乙酸和丙酸能力介于纯魔芋粉和纯淀粉之间,产丁酸能力低于二者,而芭蕉芋魔芋豆腐产短链脂肪酸能力显著高于玉米魔芋豆腐。

2.7 酵解后乳酸菌含量的变化

由表 5 可知,各试验组乳酸菌含量显著增加,其中纯魔芋豆腐组的含量最高,纯淀粉组的含量最少,淀粉魔芋豆腐组介于二者之间,且均高于葡萄糖组。多数乳酸菌不能利用淀粉,由于其不能产生水解淀粉的酶,但仍有研究<sup>[29,32]</sup>发现抗性淀粉会促进肠道乳酸菌的增长,可能是因为肠道菌群是复杂的体系,存在许多协同作用,其他细菌降解抗性淀粉产生的物质足以支持乳酸菌的生长<sup>[33]</sup>。试验结果证明 D-KGM、芭蕉芋抗性淀粉、玉米抗性淀粉都能促进乳酸菌的生长,但抗性淀粉的益生作用低于

表 5 发酵 24 h 后发酵液中乳酸菌含量<sup>†</sup>

Table 5 Lactic acid bacteria content in fermentation broth after fermentation for 24 h lg(CFU/mL)

| 空白                     | 葡萄糖                    | 纯魔芋豆腐                  | 纯芭蕉芋淀粉                 | 芭蕉芋魔芋豆腐                 | 纯玉米淀粉                  | 玉米魔芋豆腐                 |
|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|-------------------------|------------------------|------------------------|
| 5.65±0.07 <sup>f</sup> | 7.16±0.02 <sup>e</sup> | 7.82±0.01 <sup>a</sup> | 7.57±0.02 <sup>c</sup> | 7.74±0.03 <sup>ab</sup> | 7.39±0.01 <sup>d</sup> | 7.68±0.01 <sup>b</sup> |

<sup>†</sup> 小写字母不同表示有显著性差异(P<0.05)。

D-KGM,与2.6中生成短链脂肪酸的规律相同。

### 3 结论

研究表明,纯魔芋豆腐在上消化道中不被消化,掺入魔芋豆腐中的淀粉会被快速消化,但与纯淀粉相比,掺入魔芋豆腐中的淀粉在体外模拟口腔和小肠消化的0~20 min内水解率显著降低,但小肠消化结束后水解率无显著变化,说明D-KGM在短时间内可以阻碍淀粉消化,但不能阻止淀粉最终消化;体外模拟小鼠盲肠发酵结果显示魔芋豆腐中掺入淀粉后肠道益生作用会减弱;为改善魔芋豆腐食用品质和商品性而加入淀粉后其健康价值降低,但在魔芋豆腐达到相同食用品质和持水性时,芭蕉芋淀粉添加量远低于玉米淀粉。因此,向魔芋豆腐中添加芭蕉芋淀粉能在提高魔芋豆腐品质的同时尽可能少地降低其健康价值。后续可对掺入淀粉后魔芋豆腐微观结构变化进行深入研究,为淀粉在魔芋豆腐中的应用提供理论依据;研发一种简便地鉴别魔芋豆腐中淀粉掺入量和掺入淀粉种类的方法,为消费者自主选择是否购买掺入淀粉的魔芋豆腐提供保障。

### 参考文献

- [1] GONG Jing-ni, WANG Lin, WU Jia-yu, et al. The rheological and physicochemical properties of a novel thermosensitive hydrogel based on konjac glucomannan/gum tragacanth [J]. LWT-Food Science and Technology, 2018, 100(2): 271-277.
- [2] LI Mei-ying, FENG Guan-ping, WANG Hong, et al. Deacetylated konjac glucomannan is less effective in reducing dietary-induced hyperlipidemia and hepatic steatosis in C57BL/6 mice[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2017, 65(8): 1 556-1 565.
- [3] WILLIAMS M A K, FOSTER T J, MARTIN D R, et al. A molecular description of the gelation mechanism of konjac mannan[J]. Biomacromolecules, 2000, 1(3): 440-450.
- [4] LUO Xue-gang, HE Pan, LIN Xiao-yan. The mechanism of sodium hydroxide solution promoting the gelation of konjac glucomannan[J]. Food Hydrocolloids, 2013, 30(1): 92-99.
- [5] 孙健, 雷小涛, 徐焱春, 等. 羟丙基变性淀粉在魔芋豆腐中的应用研究[J]. 安徽农学通报, 2016, 22(11): 126-127.
- [6] CHIU Yu-ting, STEWART M. Comparison of konjac glucomannan digestibility and fermentability with other dietary fibers in vitro[J]. Journal of Medicinal Food, 2012, 15(2): 120-125.
- [7] 秦清娟, 徐小青, 张媛, 等. 魔芋葡甘低聚糖毒理学及肠道益生性评价[J]. 食品科学, 2014, 35(21): 244-248.
- [8] KEITHLEY J, SWANSON B. Glucomannan and obesity: A critical review[J]. Alternative Therapies in Health & Medicine, 2005, 11(6): 30-34.
- [9] GALLAHER D D, GALLAHER C M, MAHRT G J, et al. A glucomannan and chitosan fibre supplement decreases plasma cholesterol and increases cholesterol excretion in overweight normocholesterolemic humans[J]. Journal of the American College of Nutrition, 2002, 21(5): 428-433.
- [10] ZHANG Mao-yu, HUANG Cheng-yu, WANG Xu, et al. The effect of foods containing refined konjac meal on human lipid metabolism [J]. Biomedical and Environmental Sciences, 1990, 3(1): 99-105.
- [11] ONISHI N, KAWAMOTO S, UEDA K, et al. Dietary pulverized konjac glucomannan prevents the development of allergic rhinitis-like Symptoms and IgE response in mice[J]. Bioscience, Biotechnology and Biochemistry, 2007, 71(10): 2 551-2 556.
- [12] CHEN Hsiao-ling, CHENG Han-chun, LIU Yann-jiu, et al. Konjac acts as a natural laxative by increasing stool bulk and improving colonic ecology in healthy adults[J]. Nutrition, 2006, 22(11/12): 1 112-1 119.
- [13] CHEN Hsiao-ling, CHENG Han-chun, WU Wen-tze, et al. Supplementation of konjac glucomannan into a low-fiber chinese diet promoted bowel movement and improved colonic ecology in constipated adults: A placebo-controlled, diet-controlled trial[J]. Journal of the American College of Nutrition, 2008, 27(1): 102-108.
- [14] 郑连姬, 邓利玲, 罗嘉妮, 等. 魔芋葡甘聚糖抗醉解酒作用机理研究[J]. 食品与机械, 2017, 33(5): 156-161.
- [15] 丁保森, 徐焱春, 熊洪录, 等. 以黄原胶为改良剂的复配胶魔芋豆腐的制备[J]. 食品科技, 2014, 39(1): 75-79.
- [16] ZHOU Yun, JIANG Run-sheng, PERKINS W S, et al. Morphology evolution and gelation mechanism of alkali induced konjac glucomannan hydrogel[J]. Food Chemistry, 2018, 269(12): 80-88.
- [17] RUTH S M V, ROOZEN J P. Influence of mastication and saliva on aroma release in a model mouth system[J]. Food Chemistry, 2000, 71(3): 339-345.
- [18] 陈春. 桑葚多糖的结构鉴定、活性评价及其体外消化降解[D]. 广州: 华南理工大学, 2018: 84-85.
- [19] ROMÁN L, MARTÍNEZ M M, ROSELL C M, et al. Changes in physicochemical properties and, in vitro, starch digestion of native and extruded maize flours subjected to branching enzyme and maltogenic  $\alpha$ -amylase treatment[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2017, 101(8): 326-333.
- [20] FRANCIS A, SUTTIPUN K. In vitro starch digestion and colonic fermentation of thai jasmine rice[J]. Starch-Stärke, 2018, 70(10): 1-9.
- [21] 杭州海路医疗科技有限公司. 一种肠道微生物体外模拟培养方法: 中国, 201711069219.7[P]. 2018-06-05.
- [22] 郭媛, 王洪善, 周康. 魔芋甘露寡糖对植物乳杆菌和粪肠球菌共培养时发酵行为的影响[J]. 中国野生植物资源, 2017, 36(2): 13-16.
- [23] 赵晓亚, 王跃飞, 杨帆, 等. 气相色谱法快速分析人唾液中7种短链脂肪酸[J]. 分析化学, 2016, 44(7): 1 009-1 014.
- [24] 令博, 蔡昱杰, 吴洪斌, 等. 改性葡萄皮渣膳食纤维体外发酵特性研究[J]. 食品科学, 2011, 32(19): 147-151.

(下转第49页)

### 3 结论

试验构建了适用于单流程连续逆流提取器的稳态浓度分布数值模型,该模型同时考虑了扩散传质、对流传质以及界面传质3种效应对连续逆流提取黄芪多糖过程的贡献,并作了量化的数学关系构建。在模型的数值求解过程中,采用具有二阶误差的中心差分公式,转化为矩阵形式,借由计算机软件 Matlab R2016a 编程执行计算得到预测浓度分布。此外,使用单元化连续逆流提取的试验数据验证了该模型,结果表明,在单因素的变化范围内,模型预测分布和实际提取样本浓度的相对误差均控制在15%以内,表明该模型可成功用于描述提取过程的传输现象,具有应用价值,并且是连续逆流提取达到稳态条件下的适用预测工具。

在描述多种生物原料及复配提取溶剂的提取过程时,需要充分表征两相内部和固液两相边界处的传质条件,即模型中的关键参数接口 $T_L$ 与 $T_s$ , $D_x$ 与 $D_y$ 以及 $P$ 与 $R$ ,分别代表两相体积总传质系数、两相扩散系数以及两相佩克莱数(用于表示扩散传质和对流传质的相对强度)。而影响这些参数变化的因素多种多样,而且没有统一的理论指导,因此并不适合放入数值模型中一并计算,而是以待定参数的形式暂时补全模型。后续可进行单独或独立的研究,以便将提取条件和溶质的表现扩散性相关联,使扩散返混模型足够灵活,满足大多数工业和研究建模需求。

### 参考文献

- [1] 方杰,李庆忠,吴东新.连续逆流萃取设备流场的仿真分析[J].轻工机械,2016,34(3):69-73.
- [2] SIMEONOV E, SEIKOVA I, PENTCHEV I, et al. Scale-up of the solid-liquid extraction using characteristic function technique [J]. Industrial and Engineering Chemistry Research, 2004, 43(16): 4 903-4 907.
- [3] VELOSO G O, KRIOUKOV V G, VIELMO H A. Mathematical modeling of vegetable oil extraction in a counter-current crossed flow horizontal extractor[J]. Journal of Food Engineering, 2005, 66(4): 477-486.
- [4] RONALD W R. Handbook of separation process technology[M]. New York: John Wiley and Sons Inc, 1987: 51.
- [5] OSTERBERG N O, SORESEN T S. Apple juice extraction in a counter-current diffuser[J]. International Journal of Food Science and Technology, 2010, 16(4): 379-402.
- [6] DAVIDOV-PARDO G, MCCLEMENTS D J. Resveratrol encapsulation: Designing delivery systems to overcome solubility, stability and bioavailability issues[J]. Trends in Food Science and Technology, 2014, 38(2): 88-103.
- [7] GUNASEKARAN S, FISHER R J, CASIMIR D J. Predicting soluble solids extraction from fruits in a reversing single screw counter current diffusion extractor[J]. Journal of Food Science, 2010, 54(5): 1 261-1 265.
- [8] SIMEONOV E, SEIKOVA I, PENTCHEV I, et al. Modeling of a screw solid-liquid extractor through concentration evolution experiments [J]. Industrial and Engineering Chemistry Research, 2003, 42(7): 1 433-1 438.
- [9] RITTIRUT W, THONGURAI C, SIRIPATANA C. Mathematical simulation of solid-liquid diffusion in continuous countercurrent extraction process, Part II: Modeling verification and its application [J]. International Journal of Chemical Reactor Engineering, 2010, 8(1): A133.
- [10] 谢红旗,季可可,何英杰,等.模拟连续逆流提取黄柏中小檗碱工艺研究[J].天然产物研究与开发,2017,29(11): 1 959-1 965.
- [11] 陈赞,田景奎.一种中药动态连续逆流提取的实验室模拟方法[J].亚太传统医药,2006(1): 60-64.
- [12] 俞东宁.不同抗性淀粉理化特性及其体外发酵的研究[D].杭州:浙江工商大学,2018: 48-54.
- [13] ZHAO Xing-huai, GENG Qian. Acid production and conversion of konjac glucomannan during in vitro colonic fermentation affected by exogenous microorganisms and tea polyphenols[J]. International Journal of Food Sciences and Nutrition, 2016, 67(3): 274-282.
- [14] ZHU Cui-lan, ZHAO Xing-huai. In vitro fermentation of a retrograded maize starch by healthy adult fecal extract and impacts of exogenous microorganisms on three acids production[J]. Starch-Stärke, 2013, 65(3/4): 330-337.
- [15] 庞秋芳,彭喜春,欧仕益,等.直肠菌群对两种抗性淀粉的体外发酵研究[J].食品工业科技,2011,32(4): 148-151.
- [16] 谢涛,祝红,李晓文,等.土豆抗性淀粉的体外消化与发酵[J].粮食与食品工业,2017,24(5): 39-44.
- [17] 胡婕伦.大粒车前子多糖体内外消化与酵解特征体系构建及其促进肠道健康的作用[D].南昌:南昌大学,2014: 26-32.
- [18] NAKO V, GJORE J, VASILEVA M, et al. The influence of different sweeteners on in vitro starch digestion in biscuits with wheat flour and whole barley flour [J]. Scientific Study & Research. Chemistry & Chemical Engineering, Biotechnology, Food Industry, 2019, 20(1): 53-62.
- [19] TOMOKO S, ITARU S, HIROSHI O. In vitro starch digestibility and in vivo glucose response of gelatinized potato starch in the presence of non-starch polysaccharides [J]. Starch-Stärke, 2015, 67(5/6): 415-423.
- [20] 李想.婴幼儿社区获得性肺炎使用抗生素后肠道菌群代谢改变的探讨[D].苏州:苏州大学,2018: 14.

(上接第29页)