

# 非热物理场辅助酶法制备烘焙用淀粉基脂肪模拟物的理化特性比较

季蕾蕾<sup>1</sup>, 木泰华<sup>2\*</sup>, 马梦梅<sup>2\*</sup>

(1. 新疆农业大学食品科学与药学学院, 新疆乌鲁木齐 830052)

(2. 中国农业科学院农产品加工研究所, 农业农村部农产品加工综合性重点实验室, 北京 100193)

**摘要:** 利用高静水压 (300 MPa, 10 min) 和能量聚集型超声波 (300 W, 10 min) 分别对 5 种淀粉 (甘薯淀粉、马铃薯淀粉、玉米淀粉、豌豆淀粉、高直链玉米淀粉) 进行预处理, 进而采用耐高温 $\alpha$ -淀粉酶控制降解法 (95 °C, 15 min) 制备淀粉基脂肪模拟物, 并对其理化特性。与天然淀粉相比, 改性均可提高 5 种淀粉的持水持油能力、低温溶解膨胀能力 (25 °C 和 50 °C)。在所有淀粉基脂肪模拟物样品中, 能量聚集型超声波联合酶解制备的甘薯淀粉基脂肪模拟物 (EGUSPS) 具有最高的持水性 (560.39%)、乳化稳定性 ( $276.4 \times 10^{-2}$ ) 以及较好的持油性 (183.35%)、溶解度 (41.89%, 25 °C; 42.53%, 50 °C; 50.66%, 75 °C)、膨胀势 (11.21%, 25 °C; 11.7%, 50 °C; 15.29%, 75 °C) 和乳化活性指数 (17.01 m<sup>2</sup>/g)。此外, EGUSPS 具有良好的热稳定性, 热分解温度为 262.5 °C, 与天然淀粉比可降低 6.30% 的热分解前质量损失。结果表明, EGUSPS 相较于其他来源的淀粉基脂肪模拟物具备替代烘焙食品用脂肪的最佳潜力。

**关键词:** 高静水压; 能量聚集型超声波; 改性淀粉; 理化特性; 脂肪替代物

文章编号: 1673-9078(2022)12-195-203

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2022.12.0145

## Comparison of the Physicochemical Properties of Starch-based Fat Mimetics for Baking Prepared Using a Non-thermophysical Field-Assisted Enzymatic Method

Ji Leilei<sup>1</sup>, Mu Taihua<sup>2\*</sup>, Ma Mengmei<sup>2\*</sup>

(1. College of Food Science and Pharmacy, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China)

(2. Institute of Food Science and Technology, Chinese Academy of Agricultural Sciences; Key Laboratory of Agro-Products processing, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100193, China)

**Abstract:** Five types of plant-derived starch (sweet potato, potato, corn, pea, and high-amylose corn starch) were pretreated under high hydrostatic pressure (300 MPa, 10 min) and energy-gathered ultrasound (300 W, 10 min). Next, starch-based fat mimetics were prepared through controlled degradation of thermostable  $\alpha$ -amylase via hydrolysis (95 °C, 15 min), and their physicochemical properties were compared. Compared with natural starches, the five modified starches showed improved water- and oil-holding capacity as well as solubility and expansion capacity at low temperatures (25 °C and 50 °C). Among all starch-based fat mimetics, the sweet potato starch-based fat mimetics prepared using energy-gathered ultrasound combined with enzymatic hydrolysis (EGUSPS) showed the highest water holding capacity (560.39%) and

引文格式:

季蕾蕾, 木泰华, 马梦梅. 非热物理场辅助酶法制备烘焙用淀粉基脂肪模拟物的理化特性比较[J]. 现代食品科技, 2022, 38(12): 195-203

Ji Leilei, Mu Taihua, Ma Mengmei. Comparison of the physicochemical properties of starch-based fat mimetics for baking prepared using a non-thermophysical field-assisted enzymatic method [J]. Modern Food Science and Technology, 2022, 38(12): 195-203

收稿日期: 2022-02-14

基金项目: 财政部和农业农村部: 国家现代农业产业技术体系 (CARS-10); 国家重点研发计划-政府间国际科技创新合作重点专项 (2016YFE0133600)

作者简介: 季蕾蕾 (1988-), 男, 硕士, 助理研究员, 研究方向: 食品加工与安全, E-mail: jileilei1020@163.com

通讯作者: 木泰华 (1964-), 男, 博士, 研究员, 研究方向: 食品化学与营养, E-mail: mutaihua@126.com; 共同通讯作者: 马梦梅 (1988-), 女, 博士, 助理研究员, 研究方向: 食品化学与营养, E-mail: meimei881020@163.com

emulsifying stability ( $276.4 \times 10^{-2}$ ) as well as better oil-holding capacity (183.35%), solubility (41.89% at 25 °C; 42.53% at 50 °C; and 50.66% at 75 °C), swelling power (11.21% at 25 °C; 11.7% at 50 °C; and 15.29% at 75 °C), and emulsifying activity index (17.01 m<sup>2</sup>/g). In addition, EGUSPS showed good thermal stability. The thermal disintegration temperature was 262.5 °C, which could reduce the mass loss before thermal disintegration by 6.30% compared with that of natural starch. These results indicate that EGUSPS has the best potential to replace fat in baked foods compared with starch-based fat mimetics from other sources.

**Key words:** high hydrostatic pressure; energy-gathered ultrasound; modified starch; physicochemical properties; fat mimetic

脂肪是人体三大供能物质之一,在相同条件下脂肪产生的热量是蛋白质及碳水化合物的2~3倍<sup>[1]</sup>。脂肪也是食品的重要组成部分,具有传热介质、润滑口感、丰富风味等作用<sup>[2,3]</sup>。中国居民膳食脂肪参考摄入量为20%~30%,从1992年至2012年,中国居民膳食能量来源中脂肪供能比从22.0%上升至32.9%<sup>[4]</sup>。然而,高膳食脂肪的摄入量和肥胖症、糖尿病、心血管疾病和癌症等密切相关,因此,研发低脂产品对保障人类健康及国计民生至关重要<sup>[5-7]</sup>。其中,烘焙食品作为深受大众喜爱的休闲食品,在制作过程中会添加大量油脂来阻碍蛋白质和其它成分形成连续固体网络,赋予产品柔软酥松的质地<sup>[8-10]</sup>。若直接降低脂肪含量,可能导致产品的外观、风味、口感和质地等发生劣变<sup>[11-13]</sup>。因此,寻找适用于烘焙食品的脂肪替代品是研发低脂产品的关键。

脂肪替代物(Fat Replacers)指基于脂质的脂肪替代品,而脂肪模拟物(Fat Mimetic)通常指基于蛋白质(Protein-based)或碳水化合物(Carbohydrate-based)的脂肪替代品<sup>[14]</sup>。已有研究显示,碳水化合物、蛋白质和酯化脂肪酸具有替代食品用脂肪的能力<sup>[15-18]</sup>。其中,淀粉因来源丰富、成本低等优点逐渐引起学者的关注。然而,天然淀粉因亲水亲油能力不足、常温下易沉淀、糊化温度较高、热稳定性不足等缺点限制了其在烘焙食品中的应用<sup>[19-21]</sup>。所以,亟需探索适合的方法来改变淀粉的理化特性并最终改变其功能,从而用于特定的食品系统<sup>[22-25]</sup>。

酶法改性是公认的一种绿色、安全、无外来化学物质引入的改性方法。然而,酶制剂价格高、酶解效率受多种因素制约,影响了酶法改性在食品工业的应用。高静水压(High Hydrostatic Pressure, HHP)和能量聚集型超声波(Energy Gathering Ultrasonic, EGU)技术是常用的非热处理技术,具有能耗低、操作简单、安全、高效等特点。已有研究表明,高静水压和超声波处理可使淀粉颗粒粒径增加、表面孔隙变大、有小碎片脱落等<sup>[26-29]</sup>,这些颗粒结构改变可以增加酶与底物接触位点、提高酶解效率,但目前尚未见非热物理场处理联合酶法制备不同原料淀粉来源的烘焙食品用脂肪模拟物在理化特性上的比较研究。

因此,本研究采用HHP和EGU技术分别处理甘薯淀粉(SPS)、马铃薯淀粉(PS)、玉米淀粉(CS)、豌豆淀粉(PEAS)、高直链玉米淀粉(AMCS),再联合耐高温 $\alpha$ -淀粉酶对淀粉改性,通过对比不同来源淀粉基脂肪模拟物的亲水亲油能力、溶解膨胀能力、乳化特性、热稳定性,考察在焙烤食品脂肪模拟物上的应用潜力,以期淀粉基脂肪模拟物在高温烘焙食品中的应用提供思路和数据支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 原料

甘薯淀粉(直链淀粉含量 $25.19\% \pm 3.62\%$ , dw)、马铃薯淀粉(直链淀粉含量 $23.16\% \pm 0.56\%$ , dw)、玉米淀粉(直链淀粉含量 $25.07\% \pm 1.72\%$ , dw)、豌豆淀粉(直链淀粉含量 $31.06\% \pm 0.51\%$ , dw),河北古松农副产品有限公司;高直链玉米淀粉(直链淀粉含量 $70.96\% \pm 1.50\%$ , dw),北京祥玉生物科技有限公司;耐高温 $\alpha$ -淀粉酶(A8751, 40 000 U/g),北京索莱宝科技有限公司;盐酸(AR)、氢氧化钠(AR)、十二烷基磺酸钠(AR),国药集团化学试剂有限公司。

### 1.2 主要仪器设备

L2-600/10高静水压设备,天津华泰森淼生物工程技术股份有限公司;JY92-II N能量聚集型超声波细胞破碎仪,宁波新芝生物科技股份有限公司;DSHZ-300A恒温水浴摇床,苏州培英实验设备有限公司;SD-Basic喷雾干燥机,英国LabPlant公司;DK-98-II恒温水浴锅,天津市泰斯特仪器有限公司;I25均质机,上海依肯机械设备有限公司;Bettersize 2000激光粒度分析仪,丹东百特仪器有限公司;UV2800S紫外分光光度计,上海舜宇恒平科学仪器有限公司;Pyris Diamond TG/DTA热重分析仪,美国Perkin Elmer公司;

### 1.3 试验方法

#### 1.3.1 淀粉基脂肪模拟物制备

将不同来源淀粉与去离子水混合,配置成5% (m/m)匀浆液,室温下分别利用高静水压(300 MPa,

10 min) 和超声波 (300 W, 10 min) 处理, 使用 1 mol/L 盐酸溶液调节 pH 值至 6.5, 于 95 °C 恒温水浴震荡锅糊化, 待淀粉糊化完全加入耐高温 $\alpha$ -淀粉酶 (8 U/g, 以淀粉干基计) 酶解 15 min, 调节 pH 值 $\leq$ 2.0 灭酶 10 min, 迅速流水冷却至室温后, 使用 1 mol/L 氢氧化钠溶液调节 pH 值至 7.0, 喷雾干燥 (入口温度 190 °C、出口温度 90 °C) 制得样品备用。

### 1.3.2 持水性

参照刘羽萌等<sup>[30]</sup>的方法并稍作修改, 将 0.5 g 样品与 10 g 去离子水充分混匀 10 min, 于 4 000 r/min 离心 20 min。按下式计算持水性。

$$G = \frac{M_1 - M_2}{M_3} \times 100\% \quad (1)$$

式中:

$G$ ——持水性, %;

$M_1$ ——添加的去离子水质量, g;

$M_2$ ——离去水的质量, g;

$M_3$ ——取样质量, g。

### 1.3.3 持油性

参照刘羽萌等<sup>[30]</sup>的方法并稍作修改, 将 0.5 g 样品与 10 g 玉米油充分混匀 10 min, 然后于 4 000 r/min 离心 20 min。按下式计算持油性。

$$H = \frac{M_1 - M_2}{M_3} \times 100\% \quad (2)$$

式中:

$H$ ——持油性, %;

$M_1$ ——添加的油质量, g;

$M_2$ ——离去油的质量, g;

$M_3$ ——取样质量, g。

### 1.3.4 溶解度和膨胀势

参照 Schoch 等<sup>[31]</sup>的方法并稍作修改, 将 0.1 g 样品与 10 g 去离子水混匀, 在 25、50、75 °C 分别水浴 30 min, 冷却, 样品在 4 000 r/min 离心 20 min, 收集上清液并于 105 °C 干燥, 上清液干燥后的质量用于计算溶解度, 沉淀物质量和溶解度用于计算膨胀势, 计算公式如下:

$$J = \frac{m_1}{m_0} \times 100\% \quad (3)$$

$$K = \frac{m_1}{m_0 \times (100 - J)} \times 100\% \quad (4)$$

式中:

$J$ ——溶解度, %;

$m_0$ ——样品质量, g;

$m_1$ ——干燥后上清液质量, g;

$m_2$ ——沉淀物质量, g;

$K$ ——膨胀势, %。

### 1.3.5 乳液制备

取适量样品, 室温下经涡旋振荡器混匀 1 min, 与离子水配置成 6% ( $m/m$ ) 悬浮液, 加入油水体积比为 0.5 的玉米油, 继续涡旋振荡 1 min 混匀, 后用高速剪切均质 2 min (19 000 r/min, 每次 1 min, 间隔 30 s, 分两次进行), 以对应的原淀粉为对照。

### 1.3.6 乳化活性指数 (EAI) 和乳化稳定性 (ES)

样品乳化性能测定参照 Tang 等<sup>[32]</sup>的方法, 新鲜制备的淀粉乳液于 0 min 和 10 min 分别取底层乳液 100  $\mu$ L 加入 10 mL 0.1% 的十二烷基磺酸钠 (SDS) 溶液, 振荡搅拌均匀, 以 0.1% SDS 溶液为空白, 于 500 nm 波长处测定其吸光度 ( $A_{500}$ )。计算乳化活性指数 (EAI) 和乳化稳定性 (ES) 的公式如下所示:

$$EAI = \frac{2.303 \times 2 \times A_{500} \times N}{C \times (1 - \theta) \times L} \quad (5)$$

$$ES = \frac{EAI_{\max}}{(EAI_{\max} - EAI_{\min}) \times 100} \quad (6)$$

式中:

$EAI$ ——单位质量淀粉的乳化表面积,  $m^2/g$ ;

$N$ ——稀释倍数;

$C$ ——样品溶解液中样品质量浓度, g/mL;

$\theta$ ——油相所占的分数;

$L$ ——比色皿的光径,  $10^{-1}$  m;

$EAI_{\max}$ ——乳液 0 min 时的 EAI 值;

$EAI_{\min}$ ——乳液静置 10 min 的 EAI 值。

### 1.3.7 乳液粒径

取制备好的淀粉乳液底层物 1 mL 于激光粒度仪样品池, 设定介质遮光率 1.333, 待遮光率稳定后测定乳液中粒径  $D_{50}$ 、体积平均粒径  $D_{4,3}$ 、面积平均粒径  $D_{3,2}$ 。

### 1.3.8 热重分析 (TGA)

通过热重分析 (TGA) 评估改性淀粉的热稳定性。在室温下, 将 5~10 mg 样品准确称重到热重分析仪中。热重分析仪的测量条件为 40 mL/min, 升温速率为 10 k/min, 温度范围为 30~500 °C。

### 1.3.9 统计分析

所有试验均重复测定三次, 实验结果以平均值 $\pm$ 标准差表示。利用 SPSS 软件对结果进行方差分析,  $p < 0.05$  时认为差异显著, 利用 Excel 2010 及 Origin 2021 软件作图。

## 2 结果与分析

### 2.1 持水能力

持水性表示羟基与淀粉分子链由共价结合所产生的结合水量的大小<sup>[33]</sup>。如图 1 所示, 5 种天然淀粉的

持水性为 75.59%~125.04%，经改性后持水性为 254.97%~560.39%，表明高静水压和超声波前处理辅助酶法改性显著增强了天然淀粉的亲水性能。天然淀粉由于分子羟基间氢键的作用，分子内直链和支链淀粉相互结合缠绕，形成较大的颗粒，颗粒表面坚实致密且不利于水分子结合，所以持水能力较低<sup>[30]</sup>。而高静水压和超声波前处理均能引起淀粉颗粒孔隙变大、表面粗糙且有小碎片脱落<sup>[27-29]</sup>，这些改变可使改性后淀粉的三维网络结构增强，进而提高持水性能。另外，酶解使大分子的淀粉链断裂成更小的分子链，低分子量淀粉组分增加，导致更多可接近的羟基与水分子形成氢键，提高了持水性能<sup>[34]</sup>。同时，不同非热前处理方式以及不同淀粉来源，导致脂肪模拟物的持水性能增加程度有显著性差异，其中，高静水压前处理辅助酶法可显著增强马铃薯淀粉、豌豆淀粉的持水性能，超声波前处理辅助酶法更有利于甘薯淀粉、玉米淀粉、高直链玉米淀粉持水性能的增强。在所有的淀粉基脂肪模拟物样品中，超声波辅助酶法制备的甘薯淀粉基脂肪模拟物具有最高的持水性能（560.39%），高于章丽琳等<sup>[33]</sup>采用压热结合酶解制备的质体比 10%马铃薯抗性淀粉在 40℃~70℃时持水性（约 510%），以及刘羽萌<sup>[30]</sup>采用酶法制备的质量分数 30%马铃薯改性淀粉脂肪模拟物的持水性（约 250%）。

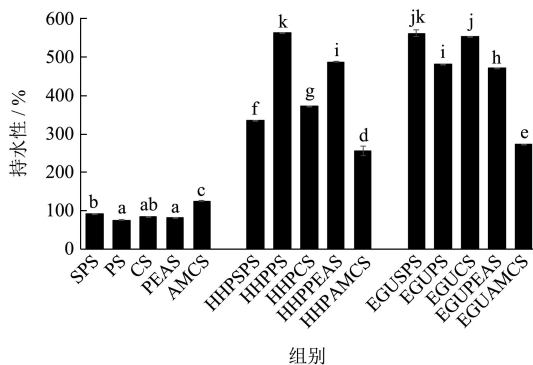


图 1 天然淀粉及淀粉基脂肪模拟物的持水性

Fig.1 Water holding capacity of natural starch and starch-based fat mimetic

注：柱上标字母不同表示差异显著 ( $p < 0.05$ )，图 2 同。

SPS 甘薯淀粉，PS 马铃薯淀粉，CS 玉米淀粉，PEAS 豌豆淀粉，AMCS 高直链玉米淀粉，HHP 高静水压前处理，EGU 能量聚集型超声波前处理，下图及表同。

## 2.2 持油能力

如图 2 所示，5 种天然淀粉的持油性为 124.67%~147.87%；与原淀粉相比，高静水压和超声波前处理辅助酶法改性显著提高了甘薯淀粉、马铃薯淀粉、玉米淀粉、豌豆淀粉样品的亲油能力（173.25%~201.62%），

而高直链玉米淀粉持油性变化不显著，这是由于高直链淀粉含量导致高温不易糊化、不易被 $\alpha$ -淀粉酶酶解所致，与于轩<sup>[35]</sup>研究直链淀粉含量对 $\alpha$ -淀粉酶酶解效率的影响结果一致。其中，高静水压前处理辅助酶法对马铃薯淀粉持油能力的提高有更加积极的影响，超声波前处理辅助酶法则对甘薯淀粉、玉米淀粉有更加积极的影响。在所有改性淀粉样品中，超声波辅助酶法制备的豌豆淀粉基脂肪模拟物显示出最高的持油性能（201.62%），其次为超声波辅助酶法制备的甘薯淀粉基脂肪模拟物（183.35%），该结果与刘羽萌<sup>[30]</sup>采用酶法制备的质量分数 10%马铃薯改性淀粉脂肪模拟物的持油性（约 220%）相当。

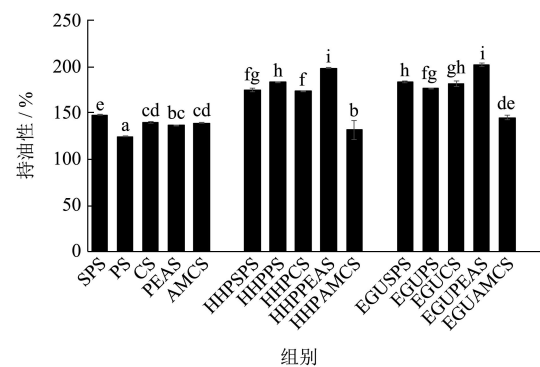


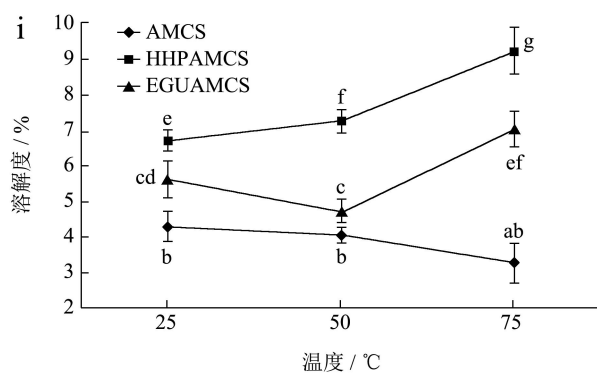
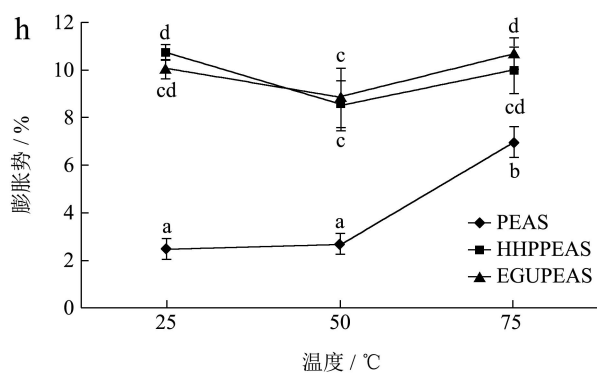
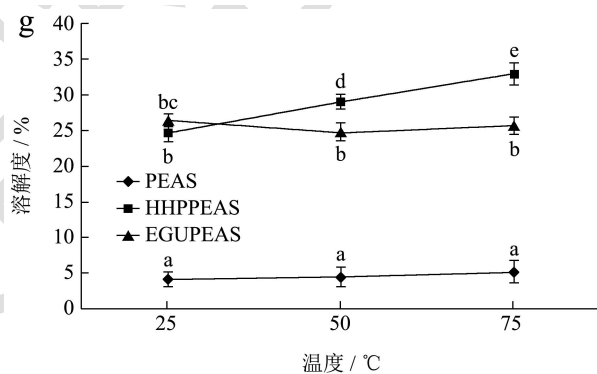
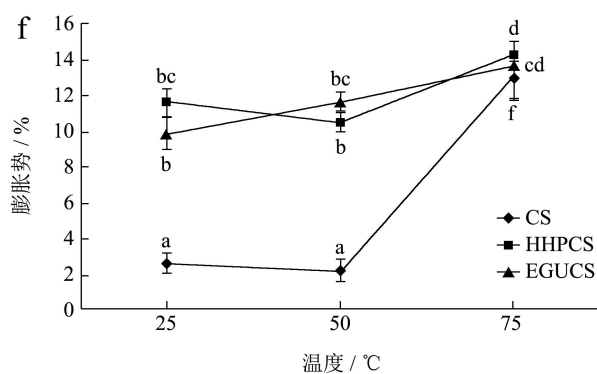
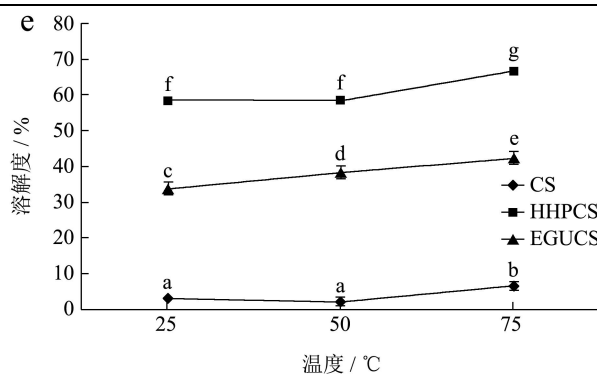
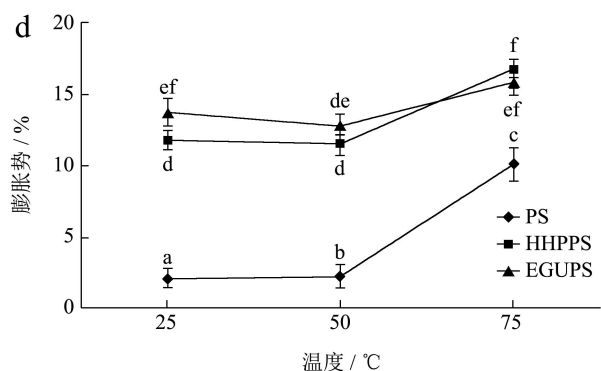
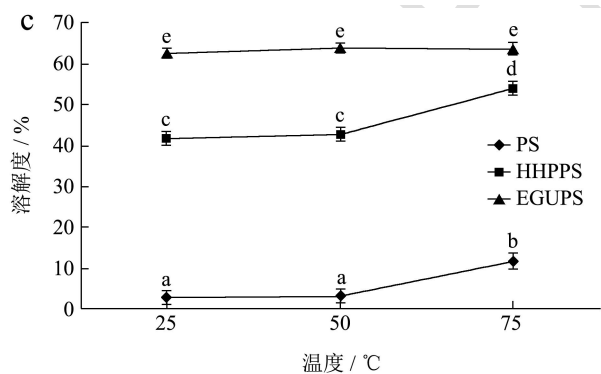
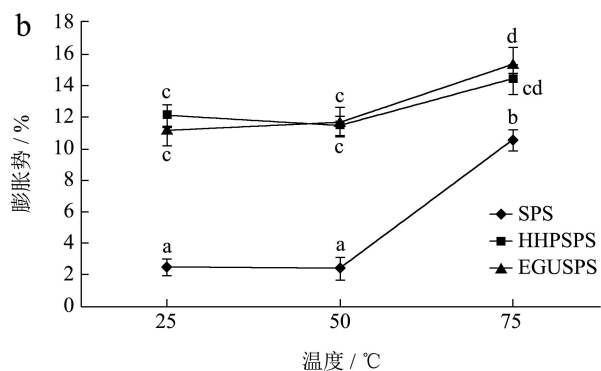
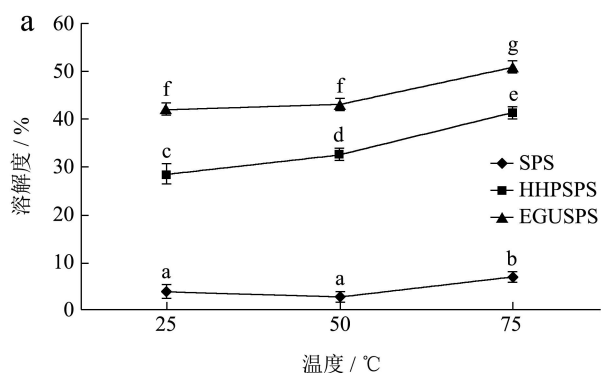
图 2 天然淀粉及淀粉基脂肪模拟物的持油性

Fig.2 Oil-holding capacity of natural starch and starch-based fat mimetic

## 2.3 溶解膨胀能力

淀粉的溶解度和膨胀势可反映淀粉分子与水分子之间相互作用的大小，溶解度是指淀粉颗粒在一定温度溶液中的溶解百分数，膨胀势代表淀粉颗粒在一定温度下吸水溶胀的能力，与温度、颗粒内部结合力大小、直链淀粉含量等有关<sup>[36,37]</sup>。如图 3 所示，3a~3e 和 3f~3j 分别为溶解度和膨胀势变化曲线。5 种天然淀粉的溶解度为 2.11%~11.29%、膨胀势为 2.08%~12.96%，与天然淀粉相比，高静水压和超声波前处理辅助酶法制备淀粉基脂肪模拟物的溶解度（4.74%~65.91%）和膨胀势（4.39%~16.73%）显著提高，并且在低温下（25、50℃）即表现出较高的溶解膨胀能力，这可能是由于 HHP、EGU 处理和淀粉酶水解均能促使淀粉颗粒形成多孔结构<sup>[26-29]</sup>，且酶水解可使无定形区域的直链淀粉浸出、淀粉链解聚以及在直链淀粉上引入新的分支点，分支点的增加可导致改性淀粉样品的溶解度增加，颗粒更易发生溶胀<sup>[38-40]</sup>；在所有样品中，超声波辅助酶法制备的马铃薯淀粉基脂肪模拟物表现出最高的溶解度（62.84%，25℃；63.66%，50℃；63.71%，75℃）和膨胀势

(13.69%, 25 °C; 12.69%, 50 °C; 15.94%, 75 °C), 这可能跟马铃薯淀粉相对较低的直链淀粉含量有关; 除高直链玉米淀粉外, 所有样品的溶解膨胀能力均高于章丽琳等<sup>[33]</sup>采用压热结合酶解制备的马铃薯抗性淀粉在 80 °C 的溶解度 (约 2%) 和膨胀势 (约 8%), 以及郭泽斌等<sup>[37]</sup>利用 500 MPa 高静水压处理 50 min 的莲子淀粉在 75 °C 时的溶解度 (约 7%) 和膨胀势 (约 8%)。



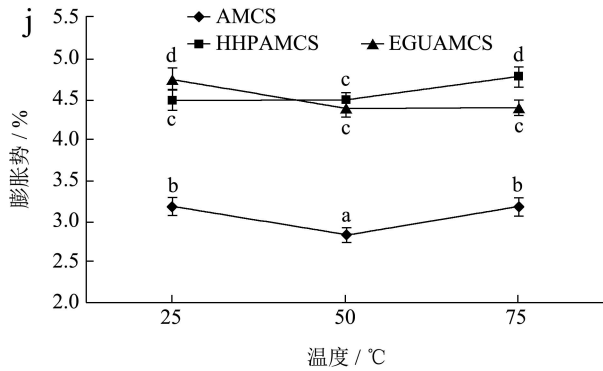


图3 天然淀粉及淀粉基脂肪模拟物的溶解膨胀能力

Fig.3 Solubility and swelling power of natural starch and starch-based fat mimetic

注：折线上标字母不同表示差异显著 ( $p < 0.05$ )。

### 2.4 乳化特性

乳化活性指数 (EAI) 是指单位质量的物质能够稳定油水界面的面积, 乳化稳定性 (ES) 是指物质维持油水混合不分离的乳化特性对外界条件的抗应变能力<sup>[32]</sup>。从表 1 可以看出, 天然淀粉乳化稳定性最低 ( $4.73 \times 10^{-2} \sim 8.16 \times 10^{-2}$ ), 导致天然淀粉制备的新鲜乳液出现分层现象 (图 4)。经高静水压和超声波辅助酶法制备的淀粉基脂肪模拟物乳液与天然淀粉乳液相比, 其乳化活性指数变化程度不大, 但乳化稳定性均显著升高 ( $13.72 \times 10^{-2} \sim 276.40 \times 10^{-2}$ ); 高静水压前处理辅助酶法有利于甘薯淀粉、豌豆淀粉的乳化活性指数

增强, 超声波前处理辅助酶法有利于甘薯淀粉、马铃薯淀粉、豌豆淀粉的乳化活性指数增强, 在所有样品中, 超声波辅助酶法制备的甘薯淀粉基脂肪模拟物显示出最高的乳化稳定性 ( $276.40 \times 10^{-2}$ ), 高于李达鸿<sup>[41]</sup>利用质体比 0.1% OSA 变性淀粉制备乳液的乳化稳定性 ( $17.60 \times 10^{-2} \sim 38.20 \times 10^{-2}$ )。

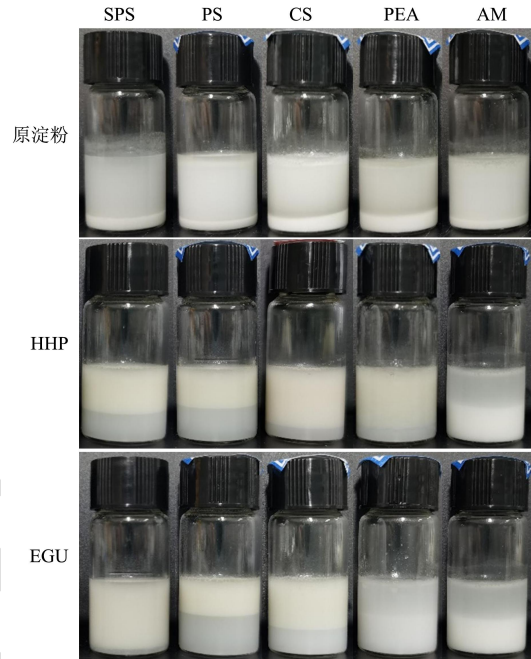


图4 常温下制备的新鲜样品乳液 (静置 2 h)

Fig.4 Fresh sample emulsion prepared at room temperature (stand for 2 h)

表 1 天然淀粉及淀粉基脂肪模拟物的乳液乳化活性指数 (EAI)、乳化稳定性 (ES)、乳液粒径

Table 1 Emulsifying activity index (EAI), emulsion stability (ES) and particle size of natural starch and starch-based fat mimetic

样品名	EAI/(m <sup>2</sup> /g)	ES/( $\times 10^{-2}$ )	$D_{50}/\mu\text{m}$	$D_{4.3}/\mu\text{m}$	$D_{3.2}/\mu\text{m}$
SPS	15.77±0.48 <sup>bc</sup>	4.73±0.55 <sup>a</sup>	17.99±0.68 <sup>ab</sup>	55.94±8.87 <sup>c</sup>	7.89±0.32 <sup>abc</sup>
PS	15.81±0.05 <sup>bc</sup>	7.72±0.14 <sup>a</sup>	47.80±4.22 <sup>d</sup>	71.87±4.35 <sup>d</sup>	7.57±0.21 <sup>abc</sup>
CS	16.90±0.12 <sup>c</sup>	8.16±0.13 <sup>a</sup>	26.59±17.33 <sup>bc</sup>	31.53±1.33 <sup>b</sup>	6.12±0.04 <sup>ab</sup>
PEAS	15.75±0.01 <sup>b<sup>c</sup></sup>	8.08±0.44 <sup>a</sup>	31.59±2.59 <sup>c</sup>	69.91±15.08 <sup>cd</sup>	9.20±0.61 <sup>abc</sup>
AMCS	20.74±0.02 <sup>f</sup>	6.58±0.10 <sup>a</sup>	8.56±0.09 <sup>a</sup>	13.07±3.46 <sup>a</sup>	4.26±0.05 <sup>a</sup>
HHPSPS	16.65±0.16 <sup>e</sup>	167.35±5.71 <sup>g</sup>	106.47±0.96 <sup>g</sup>	110.33±0.76 <sup>f</sup>	39.33±1.62 <sup>ef</sup>
HHPPS	14.44±0.06 <sup>a</sup>	74.22±16.06 <sup>cd</sup>	102.90±0.80 <sup>g</sup>	103.40±1.14 <sup>ef</sup>	28.06±0.17 <sup>de</sup>
HHPCS	15.66±0.07 <sup>b</sup>	86.78±7.78 <sup>de</sup>	170.10±17.48 <sup>i</sup>	192.07±23.83 <sup>h</sup>	106.69±37.42 <sup>g</sup>
HHPPEA	16.11±0.11 <sup>cd</sup>	129.00±1.67 <sup>f</sup>	118.73±11.31 <sup>h</sup>	125.23±9.30 <sup>g</sup>	24.92±0.72 <sup>cde</sup>
HHPAMCS	16.98±0.02 <sup>e</sup>	13.72±0.02 <sup>a</sup>	10.03±0.04 <sup>a</sup>	15.07±0.88 <sup>a</sup>	5.87±0.02 <sup>ab</sup>
EGUSPS	17.01±0.09 <sup>e</sup>	276.40±9.47 <sup>h</sup>	87.97±1.29 <sup>f</sup>	104.37±2.15 <sup>ef</sup>	29.10±0.23 <sup>def</sup>
EGUPS	15.89±0.21 <sup>bcd</sup>	71.35±9.63 <sup>c</sup>	90.08±0.95 <sup>f</sup>	91.50±0.90 <sup>e</sup>	45.85±0.53 <sup>f</sup>
EGUCS	16.20±0.02 <sup>d</sup>	91.79±4.52 <sup>e</sup>	70.77±0.74 <sup>e</sup>	71.11±1.07 <sup>d</sup>	24.43±2.07 <sup>bcd</sup>
EGUPEAS	15.86±0.04 <sup>bcd</sup>	68.75±1.99 <sup>c</sup>	29.11±1.69 <sup>bc</sup>	75.43±8.98 <sup>d</sup>	12.47±5.40 <sup>abcd</sup>
EGUAMCS	15.68±0.05 <sup>b</sup>	55.28±0.93 <sup>b</sup>	10.53±0.21 <sup>a</sup>	18.84±5.54 <sup>ab</sup>	6.32±0.15 <sup>abc</sup>

注：同列右肩字母不同表示差异显著 ( $p < 0.05$ ), 表 2 同。

乳液粒径在乳液稳定性和感官特性中起着至关重要的作用,相同原料制备的乳液其乳液粒径越小相对稳定性越强,且更细小的乳液粒径会带来更加细腻的口感<sup>[42]</sup>。如表1数据所示,天然淀粉乳液以及高静水压/超声波辅助酶法制备的高直链玉米淀粉基脂肪模拟物乳液测定结果相对于其他样品乳液表现出更小的中粒径( $D_{50}$ , 8.56  $\mu\text{m}$ ~31.59  $\mu\text{m}$ )、体积平均粒径( $D_{4,3}$ , 13.07  $\mu\text{m}$ ~71.87  $\mu\text{m}$ )和表面积平均粒径( $D_{3,2}$ , 4.26  $\mu\text{m}$ ~9.20  $\mu\text{m}$ ),但是结合图4可知,新鲜制备的天然淀粉乳液以及高静水压/超声波辅助酶法制备的高直链玉米淀粉基脂肪模拟物乳液静置2 h后出现分层,原料淀粉沉淀于底部,故上述粒径测定结果主要为淀粉颗粒的大小,并非乳液滴尺寸,这种现象与天然淀粉和制备的高直链玉米淀粉基脂肪模拟物样品相对较差的亲水亲油能力有关。在所有能形成较稳定乳液的样品中,超声波前处理辅助酶法制备的淀粉基脂肪模拟物乳液相较于高静水压前处理辅助酶法制备的淀粉基脂肪模拟物乳液,拥有更小的乳液粒径( $D_{50}$ , 29.11  $\mu\text{m}$ ~90.08  $\mu\text{m}$ ;  $D_{4,3}$ , 71.11  $\mu\text{m}$ ~104.37  $\mu\text{m}$ ;  $D_{3,2}$ , 12.47  $\mu\text{m}$ ~29.10  $\mu\text{m}$ )。

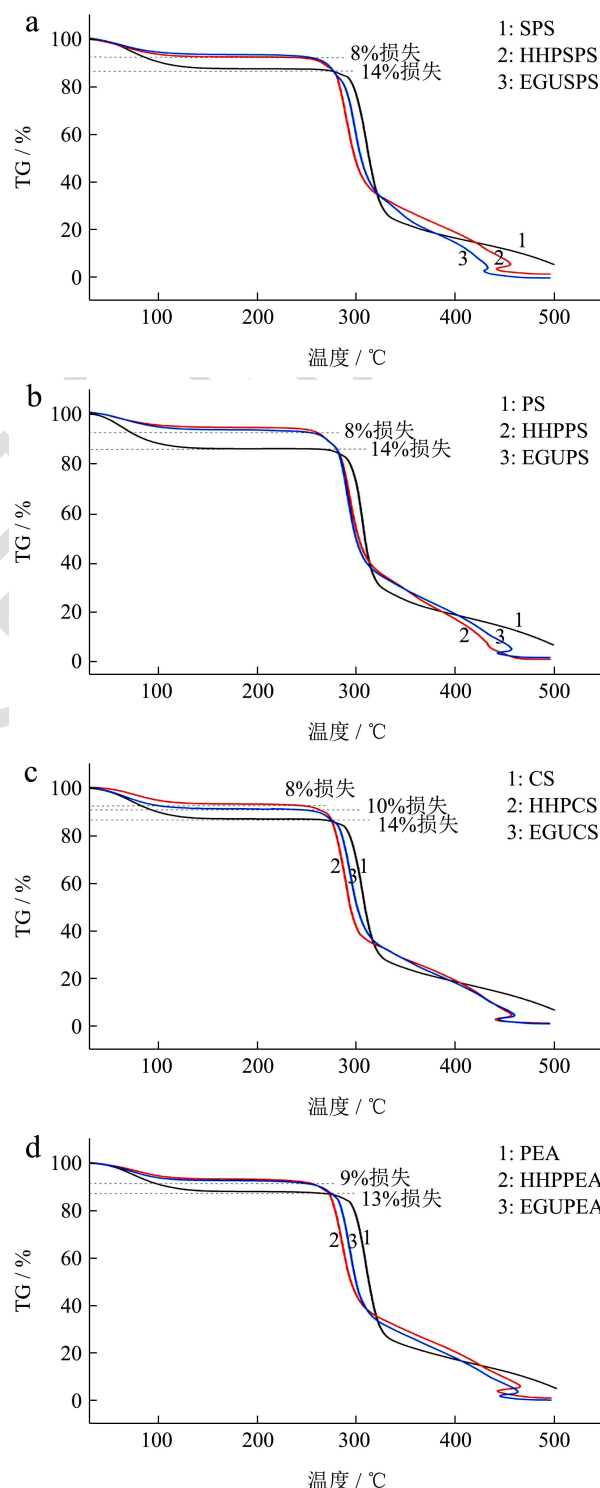
## 2.5 热稳定性分析

淀粉及其衍生物的热降解在食品加工中是一个普遍现象,尤其是焙烤和油炸,在加工过程中,淀粉会发生一定量的降解,因此,考察淀粉及其衍生物的热降解和热稳定性对于食品的热加工、淀粉及衍生物的生产与性能评估、热处理与能源转化都有着重要的工业应用意义<sup>[43]</sup>。另外,研究淀粉的热降解和热稳定性对于完善淀粉的相变基础理论,深入理解淀粉的改性化学有着重要的理论意义,对于焙烤食品而言,良好的热稳定性是前提,在减少焙烤过程中水分损失、油脂氧化的同时还能防止焙烤食品表面老化变硬,使焙烤食品拥有更好的食用品质<sup>[44,45]</sup>。

从图5热重分析结果可以看出,天然淀粉在热降解前的重量损失约13%~14%,损失比例因天然淀粉的来源不同而存在差异。经高静水压和超声波辅助酶法制备的淀粉基脂肪模拟物在发生热降解前的质量损失显著降低。其中,与天然淀粉相比,高静水压和超声波辅助酶法制备的淀粉基脂肪模拟物减少了4.05%~6.30%的质量损失。表2中的数据 displays,高静水压辅助酶法改性更加有益于玉米淀粉、豌豆淀粉、高直链玉米淀粉在热降解前的质量保持,超声波辅助酶法改性更加有益于甘薯淀粉、马铃薯淀粉在热降解前的质量保持,在所有改性淀粉样品中,超声波辅助酶法制备的甘薯淀粉基脂肪模拟物热降解前的质量

损失最小(9.05%)。

此外,如表2所示,天然淀粉热降解温度为267.00~282.50  $^{\circ}\text{C}$ ,淀粉基脂肪模拟物的热降解温度(253.50~262.50  $^{\circ}\text{C}$ )均有不同程度的降低,然而不同烘焙工艺要求焙烤温度范围为150~240  $^{\circ}\text{C}$ <sup>[46]</sup>,低于淀粉基脂肪模拟物热降解温度,因此,高静水压和超声波辅助酶法制备的淀粉基脂肪模拟物热降解温度的降低并不会引起烘焙品质产生劣变。



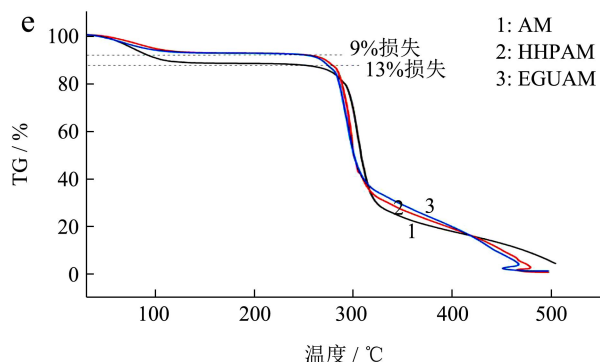


图5 天然淀粉及淀粉基脂肪模拟物 TGA 曲线

Fig.5 TGA curve of natural starch and starch-based fat mimetic

表2 原淀粉及淀粉基脂肪模拟物的热稳定性

Table 2 Thermal stability of natural starch and starch-based fat mimetic

样品名	热分解温度/°C	热分解前重量损失/%
SPS	282.50±10.61 <sup>b</sup>	15.35±1.34 <sup>b</sup>
PS	275.00±9.90 <sup>ab</sup>	15.20±1.27 <sup>b</sup>
CS	277.00±7.07 <sup>ab</sup>	14.65±0.35 <sup>b</sup>
PEAS	278.50±13.44 <sup>ab</sup>	14.20±1.56 <sup>b</sup>
AMCS	267.00±21.21 <sup>ab</sup>	14.80±1.98 <sup>b</sup>
HHPSPS	262.50±7.78 <sup>ab</sup>	9.35±1.34 <sup>a</sup>
HHPPS	259.50±9.19 <sup>ab</sup>	9.75±0.91 <sup>a</sup>
HHPCS	257.50±9.19 <sup>ab</sup>	9.40±1.41 <sup>a</sup>
HHPPEA	259.50±4.95 <sup>ab</sup>	9.60±0.57 <sup>a</sup>
HHPAMCS	261.00±9.90 <sup>ab</sup>	9.75±0.64 <sup>a</sup>
EGUSPS	262.50±7.78 <sup>ab</sup>	9.05±1.48 <sup>a</sup>
EGUPS	259.50±9.19 <sup>ab</sup>	9.15±0.35 <sup>a</sup>
EGUCS	256.00±11.31 <sup>ab</sup>	10.60±0.42 <sup>a</sup>
EGUPEAS	253.50±13.44 <sup>a</sup>	9.75±0.78 <sup>a</sup>
EGUAMCS	261.00±9.90 <sup>ab</sup>	10.35±1.48 <sup>a</sup>

### 3 结论

通过应用 2 种不同的非热前处理方式辅助酶法制备了 10 种淀粉基脂肪模拟物,与天然淀粉相比,淀粉基脂肪模拟物的持水性、持油性、乳化活性、乳化稳定性均显著提高,即非热前处理辅助酶法可以显著提高天然淀粉的亲水亲油性能,特别是增加了淀粉在低温下(25 °C、50 °C)的溶解膨胀能力。另外,淀粉基脂肪模拟物减少了淀粉热降解前质量损失,具有赋予焙烤食品稳定体系的能力。在所有淀粉基脂肪模拟物样品中因超声波辅助酶法制备的甘薯淀粉基脂肪模拟物具有最高的持水性、乳化稳定性、最小的热降解前重量损失以及较好的持油性、溶解度、膨胀势、乳化活性、乳液粒径而具有模拟焙烤食品用脂肪的最佳能力。但是淀粉基脂肪模拟物的最佳生产工艺、表征与

理化性能的相关性以及烘焙食品实际生产上的替代率有待进一步研究。

### 参考文献

- [1] 王竹,向雪松,李晓琴,等.北京餐馆就餐者膳食营养消费调查[J].卫生研究,2015,44(2):232-236,241
- [2] 阚健全.食品科学[M].北京:中国农业大学出版社,2005
- [3] 刘志泉.食品营养学[M].北京:中国轻工业出版社,2006
- [4] 琚腊红,于冬梅,房红芸,等.1992-2012 年中国居民膳食能量、蛋白质、脂肪的食物来源构成及变化趋势[J].卫生研究,2018,47(5):689-694,704
- [5] Wu J H Y, Micha R, Mozaffarian D. Dietary fats and cardiometabolic disease: mechanisms and effects on risk factors and outcomes [J]. Nature Reviews Cardiology, 2019, 16(Suppl. 2)
- [6] Lee I, Lee S, Lee N, et al. Reduced-fat mayonnaise formulated with gelatinized rice starch and xanthan gum [J]. Cereal Chemistry, 2013, 90(1): 29-34
- [7] Kleef E V, Trijp J, J J G C Van Den Borne, et al. Successful development of satiety enhancing food products: towards a multidisciplinary agenda of research challenges [J]. Crit Rev Food Sci Nutr, 2012, 52(7): 611-628
- [8] 姚舒婷,智慧,沈欣怡,等.脂肪替代品在烘焙行业中的研究进展[J].食品与发酵工业,2020,46(6):285-291
- [9] Pareyt B, Delcour J A. The role of wheat flour constituents, sugar, and fat in low moisture cereal based products: A review on sugar-snap cookies [J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2008, 48(9): 824-839
- [10] Pareyt B, Talhaoui F, Kerckhofs G, et al. The role of sugar and fat in sugar-snap cookies: Structural and textural properties [J]. Journal of Food Engineering, 2009, 90(3): 400-408
- [11] Malone M E, Appelqvist I, Norton I T. Oral behaviour of food hydrocolloids and emulsions. Part 1. Lubrication and deposition considerations [J]. Food Hydrocolloids, 2003, 17(6): 763-773
- [12] Heydari A, Razavi S. Evaluating high pressure-treated corn and waxy corn starches as novel fat replacers in model low-fat O/W emulsions: A physical and rheological study [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2021
- [13] Aken G, Vingerhoeds M H, Wijk R A D. Textural perception of liquid emulsions: Role of oil content, oil viscosity and emulsion viscosity [J]. Food Hydrocolloids, 2011, 25(4): 789-796
- [14] Peng X, Yao Y. Carbohydrates as fat replacers [J]. Annual Review of Food Science & Technology, 2017, 8(1): 331
- [15] Teklehaimanot W H, Duodu K G, Emmambux M N. Maize and teff starches modified with stearic acid as potential fat replacer in low calorie mayonnaise - type emulsions [J]. Starch - Stärke,



- 2013, 65: 773-781
- [16] Fj A, Smar A, Ama B. Cornstarch nanocrystals as a potential fat replacer in reduced fat O/W emulsions: A rheological and physical study – Science Direct [J]. Food Hydrocolloids, 2019, 90: 172-181
- [17] Chanamai R, McClements D J. Dependence of creaming and rheology of monodisperse oil-in-water emulsions on droplet size and concentration [J]. Colloids & Surfaces A Physicochemical & Engineering Aspects, 2000, 172(1): 79-86
- [18] Hadnadev T D, Hadnadev M, Pojic M, et al. Functionality of OSA starch stabilized emulsions as fat replacers in cookies [J]. Journal of Food Engineering, 2015, 167(DEC.PT.B): 133-138
- [19] Heydari A, Razavi S M A, Irani M. Dilute solution properties of two hairless canary seed starches compared with wheat starch in a binary solvent: influence of temperature, mono- and divalent cations [J]. Starch - Strke, 2018: 1700174
- [20] Park J J, Olawuyi I F, Lee W Y. Characteristics of low-fat mayonnaise using different modified arrowroot starches as fat replacer [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 153: 215-223
- [21] Wijk R, Prinz J F. The role of friction in perceived oral texture [J]. Food Quality and Preference, 2005, 16(2): 121-129
- [22] Singh J, Kaur L, McCarthy O J. Factors influencing the physico-chemical, morphological, thermal and rheological properties of some chemically modified starches for food applications - A review [J]. Food Hydrocolloids, 2007, 21(1): 1-22
- [23] Thaiudom S, Khantarat K. Stability and rheological properties of fat-reduced mayonnaises by using sodium octenyl succinate starch as fat replacer [J]. Procedia Food Ence, 2011, 1(1): 315-321
- [24] Chung C, Degner B, McClements D J. Designing reduced-fat food emulsions: Locust bean gum-fat droplet interactions [J]. Food Hydrocolloids, 2013, 32(2): 263-270
- [25] Roman L, Martinez M M, Gomez M. Assessing of the potential of extruded flour paste as fat replacer in O/W emulsion: A rheological and microstructural study [J]. Food Research International, 2015, 74(aug.): 72-79
- [26] 赵仲凯.超高压和热处理对甘薯抗性淀粉生成的影响[D].乌鲁木齐:新疆农业大学,2015
- [27] Kim S, Yang S Y, Chun H H, et al. High hydrostatic pressure processing for the preparation of buckwheat and tapioca starch films [J]. Food Hydrocolloids, 2018, 81(AUG.):n71-76
- [28] Wang H W, Xu K, Ma Y, et al. Impact of ultrasonication on the aggregation structure and physicochemical characteristics of sweet potato starch [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2020, 63(C)
- [29] Zang Y J, Chen L L, Yu K X, et al. Mechanochemical effect of ultrasound on sweet potato starch and its influence mechanism on the quality of octenyl succinic anhydride modified starch [J]. Food Science and Technology International, 2019, 26(3): 254-264
- [30] 刘羽萌.酶解法马铃薯淀粉脂肪模拟物的制备、性质及应用研究[D].哈尔滨:哈尔滨商业大学,2018
- [31] Schoch T J. Structure of the starch granule. I. Swelling and solubility patterns of various starches [J]. Cereal Chemistry, 1959
- [32] Tang C H, Yang X Q, Chen Z, et al. Physicochemical and structural characteristics of sodium caseinate biopolymers induced by microbial transglutaminase [J]. Journal of Food Biochemistry, 2005, 29(4): 402-421
- [33] 章丽琳,曾希珂,张喻,等.马铃薯抗性淀粉理化性质的研究 [J].中国酿造,2016,7:117-122
- [34] Sweedman M C, Tizzotti M J, Schafer C, et al. Structure and physicochemical properties of octenyl succinic anhydride modified starches: A review [J]. Carbohydr Polym, 2013, 92(1): 905-920
- [35] 于轩.不同来源淀粉的分子结构对其酶解性能影响的研究 [D].无锡:江南大学,2013
- [36] 熊小青,车瑞彬,李利民,等.氯化钠对5种不同植物来源淀粉糊特性的影响[J].粮食与油脂,2020,2:50-55
- [37] 郭泽斌,曾绍校,郑宝东.超高压处理对莲子淀粉理化特性的影响[J].中国食品学报,2014,14(11):118-123
- [38] Xie Y, Li M N, Chen H Q, et al. Effects of the combination of repeated heat-moisture treatment and compound enzymes hydrolysis on the structural and physicochemical properties of porous wheat starch [J]. Food Chemistry, 2019, 274(FEB.15): 351-359
- [39] Dhital S, Warren F J, Zhang B, et al. Amylase binding to starch granules under hydrolysing and non-hydrolysing conditions [J]. Carbohydrate Polymers, 2014, 113: 97-107
- [40] Li G, Tao H, Cui B, et al. The effects of sequential enzyme modifications on structural and physicochemical properties of sweet potato starch granules [J]. Food Chemistry, 2019, 277(2)
- [41] 李达鸿.以 OSA 变性淀粉为乳化剂的番茄红素纳米乳液的构建及其特性研究[D].广州:华南农业大学,2017
- [42] McClements D J. Reduced-fat foods: The complex science of developing diet-based strategies for tackling overweight and obesity [J]. Advances in Nutrition, 2015, 6(3): 338S-352S
- [43] 刘兴训.淀粉及淀粉基材料的热降解性能研究[D].广州:华南理工大学,2011
- [44] 鲁尔菲娜·威勒米娜·安东尼娅·蒂尔考,彼得·吕克勒·布瓦尔达.具有热稳定性的高支链成分淀粉:中国,CN1310586A [P]
- [45] 王瑜.黄油热稳定性及其在烘焙食品中应用的研究[D].哈尔滨:东北农业大学,2020
- [46] T/AHFIA 022-2019,曲奇饼干生产技术规程[S]