

# 籼米淀粉基脂肪替代品的理化及质构特性

刘忠义, 乔丽娟, 陈婷, 欧晓宇, 王瑄, 吴海

(湘潭大学化工学院, 湖南湘潭 411105)

**摘要:** 以籼米淀粉为原料通过酶法制备籼米淀粉基脂肪替代品, 通过改变酶解时间(4、6、10、14 min)分别制得DE值(葡萄糖值)为2.07~5.07的产品。用FTIR、XRD、SEM对制得的脂肪替代品结构特性进行了表征, 同时对其糊化特性、质构性质进行了研究。由FT-IR图谱可知, 脂肪替代品在3390 cm<sup>-1</sup>、2928 cm<sup>-1</sup>、1157 cm<sup>-1</sup>、1021 cm<sup>-1</sup>、1080 cm<sup>-1</sup>、929 cm<sup>-1</sup>、859 cm<sup>-1</sup>及763 cm<sup>-1</sup>处出现了特征峰, 表明其具有吡喃葡萄糖结构。XRD表明, 脂肪替代品在18°仍有较强衍射, 保留了原淀粉的部分A型特征峰。SEM表明, 脂肪替代品呈现出海绵状的碎石结构, 为凝胶形成时截留水分提供大量的空间。相对于原淀粉, 脂肪替代品的峰值粘度、低谷粘度、崩解值、回升值及糊化温度均显著降低, 表明脂肪替代品的抗老化性显著增加。随DE值的增加脂肪替代品的糊化特征值逐渐减小。质构特性值说明, DE值为2~4左右的脂肪替代品更适合应用到食品工业中。

**关键词:** 籼米淀粉; 脂肪替代品; 理化特点; 质构特性

文章编号: 1673-9078(2016)6-130-135

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2016.6.021

## Main Physicochemical and Textural Properties of Indica Rice Starch-based Fat Substitutes

LIU Zhong-yi, QIAO Li-juan, CHEN Ting, OU Xiao-yu, WANG Dang, WU Hai

(College of Chemical Engineering, Xiangtan University, Xiangtan 411105, China)

**Abstract:** Indica rice starch was used as the raw material to prepare indica rice starch-based fat substitutes by an enzymatic method, and products with DE (dextrose equivalent) values of 2.07, 2.96, 3.93, and 5.07 were obtained, upon different enzymolysis times of 4, 6, 10, and 14 min, respectively. The structural characteristics of these starch-based fat substitutes were characterized by Fourier transform infrared (FTIR), X-ray diffraction (XRD), and scanning electron microscopy (SEM). As can be seen from the FTIR spectra, the characteristic bands of the fat substitutes were found at 3390 cm<sup>-1</sup>, 2928 cm<sup>-1</sup>, 1157 cm<sup>-1</sup>, 1021 cm<sup>-1</sup>, 1080 cm<sup>-1</sup>, 929 cm<sup>-1</sup>, 859 cm<sup>-1</sup>, and 763 cm<sup>-1</sup>, indicating a glucopyranose structure. XRD results showed a strong diffraction peak at 18°, and part of the typical type-A pattern of indica rice starch was retained in the fat substitutes. The SEM pattern suggested that the fat substitutes displayed a cavernous gravel-shaped structure, which provides plenty of space for retaining moisture during gel formation. Compared with native starch, the fat substitutes showed significantly lower values of peak viscosity, trough viscosity, breakdown, setback, and gelatinization temperature, indicating a significantly improved aging resistance of the fat substitutes. With increasing DE value, the values for the pasting characteristics of the fat substitutes were gradually decreased. Textural data indicated that the fat substitutes with a DE value of 2-4 are most suitable for application in the food industry.

**Key words:** indica rice starch; fat substitute; physicochemical characteristics; textural properties

随着人们的生活质量不断提高, 脂肪的过多摄入可能危及人类健康, 如肥胖、脂肪肝、高血脂、高血压等等。然而低脂及无脂食品由于缺乏脂肪带来的滑腻感和粘稠度<sup>[1]</sup>, 常常不受人们喜爱。为满足消费者的需求, 脂肪替代品应运而生。淀粉价格低廉、来源广泛<sup>[2]</sup>, 以其为基质的脂肪模拟物因可改善水相结构

收稿日期: 2015-08-04

基金项目: 国家农转资金项目(2013D2002007); 粮食发酵深加工工艺与技术(江南大学)国家工程实验室科技项目(KH02010)

作者简介: 乔丽娟(1989-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 食品加工

通讯作者: 刘忠义(1964-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 食品加工

和易于消化等特点深受人们的喜爱。目前, 生产脂肪替代品多采用玉米、马铃薯淀粉为主<sup>[3]</sup>。与玉米、马铃薯淀粉相比, 籼米淀粉具有粒径小、分子量分布较均匀、易消化和过敏性低等特点<sup>[4]</sup>, 故可能更适合作为原料生产脂肪替代品。

以籼米淀粉为基质制备脂肪替代品可通过酶解制备低DE值(葡萄糖值)麦芽糊精、酸解淀粉及酯化淀粉三种途径。其中酶法水解专一、产物较均匀等特点使得其被广泛应用。低DE值的麦芽糊精之所以能够模拟脂肪是因为与水结合拥有大部分的聚合链来抑制溶解, 形成柔软的、可伸展的、热可逆的凝胶。麦

芽糊精中聚合度大于 6 的短链及支链淀粉外侧的线性部分均可以与直链淀粉分子相互作用形成微小晶体, 足够长的直链淀粉分子能穿过多个微小晶体, 形成多个网络节点, 达到一定浓度时形成凝胶网状结构<sup>[5]</sup>。凝胶网将大量的水截留在其中, 使之具有流动性, 且易于涂抹, 表现为类似脂肪的假塑性, 在口腔中产生和脂肪一样的润滑感和粘稠度。

能否形成凝胶是低 DE 值麦芽糊精作为脂肪替代品的关键, 对麦芽糊精 SEM 的研究已有许多报道<sup>[6]</sup>, 但将其与水结合形成凝胶的形貌尚未见到。糊化特性可从直链淀粉的比例来衡量物质的抗老化性能, 质构特性是凝胶重要的物化性质, 而对不同 DE 值的脂肪替代品的质构特性的报道比较少。本文将籼米淀粉进行酶解反应, 对所得的脂肪替代品的红外谱图、晶体结构及形貌进行了研究, 同时对其糊化特性及质构性质进行了分析, 旨在为脂肪替代品应用于食品中提供依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与仪器

籼米淀粉, 一级品, 由云南普洱永吉生物技术有限责任公司提供。

耐高温  $\alpha$  淀粉酶, 食品级, 苏柯汉(潍坊)生物工程有限公司。

盐酸、氢氧化钠、酒石酸钠钾、3,5-二硝基水杨酸、苯酚、无水亚硫酸钠均为分析纯。

巩义市市华仪器有限责任公司 DF-101S 集热式恒温加热磁力搅拌器; 上海尤尼柯仪器有限公司 WFZ UV-2802SH 型紫外可见分光光度; 日本岛津公司 FT-IR 8400 型红外光谱仪(溴化钾压片法, 扫描范围为  $400\text{ cm}^{-1}\sim 4000\text{ cm}^{-1}$ ); 日本岛津公司 XRD-7000 型 X-射线衍射仪(测试管压为 40 kV, 电流为 20 mA); 日本电子公司 JSM-5900 型扫描电镜(测试电压为 30 kV); 澳大利亚 Newportscientific 公司 RVA-4 型快速黏度分析仪; 英国马尔文公司 TA.XTPlus 型质构仪。

### 1.2 籼米淀粉基脂肪替代品的制备及水解度 (DE) 的测定

参照文献<sup>[7,8]</sup>稍作改进。将 15 g 籼米淀粉与 150 mL 蒸馏水充分混合, 配成浓度为 100 g/L 的淀粉浆液。用 1 mol/L 的盐酸调节 pH 6.00~6.50。将淀粉乳在 95 °C 水浴下搅拌 30 min, 使其充分糊化。继续搅拌加入 5000 U/mL 的耐高温  $\alpha$  淀粉酶 18  $\mu\text{L}$  (酶添加量

6 U/g), 酶解一定时间 (4、6、10、14 min) 后立即加入 5 mL、1 mol/L 盐酸灭酶 (pH<2.0), 继续快速搅拌 3~5 s, 立即流水冷却至室温。调节溶液 pH 至 6.50 左右, 抽滤取滤液, 在 50 °C 恒温鼓风干燥箱中干燥 10~15 h, 粉碎过 120 目筛, 即得到产品。参照文献<sup>[7]</sup>利用 3,5-二硝基水杨酸比色法测定产品的葡萄糖值, 测得产物的 DE 值分别为 2.07、2.96、3.93 及 5.07。

### 1.3 脂肪替代品的结构特性表征

FT-IR 的测定参见文献<sup>[9]</sup>; XRD 的测定参见文献<sup>[10]</sup>; SEM 的测定参见文献<sup>[11]</sup>。

### 1.4 脂肪替代品的糊化特性

糊化特性参见文献<sup>[12]</sup>。

### 1.5 脂肪替代品的质构分析

质构分析参见文献<sup>[13]</sup>。

### 1.6 数据分析

采用统计软件 SPSS 16.0 对数据进行处理并以平均值 $\pm$ 标准差表示; 采用 Origin 7.5 软件作图。

## 2 结果与分析

### 2.1 红外图谱分析

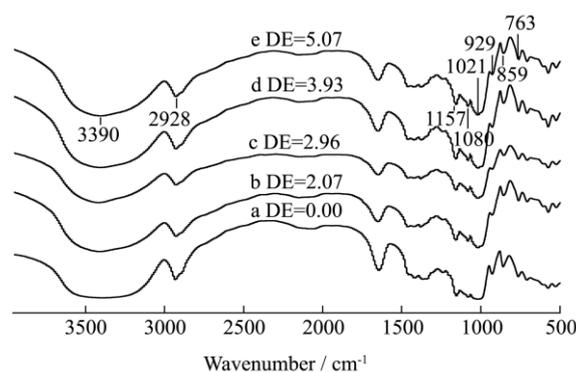


图1 籼米淀粉与脂肪替代品的 FT-IR 图谱

Fig.1 Infrared spectra of native starch, and fat substitutes

注: a 为原淀粉, b 为 DE=2.07 的脂肪替代品, c 为 DE=2.96 的脂肪替代品, d 为 DE=3.93 的脂肪替代品, e 为 DE=5.07 的脂肪替代品。

如图 1 所示, 籼米淀粉 (图 1a) 与 DE 值为 2.07~5.07 的脂肪替代品 (图 1b-e) 红外谱图基本一致。不同 DE 值的脂肪替代品 (图 1b-e) 都表现出如下特征: 在  $3390\text{ cm}^{-1}$  处形成强宽峰, 为分子内-OH 的对称伸缩振动吸收峰;  $2928\text{ cm}^{-1}$  处形成的尖峰是由于环内- $\text{CH}_2$ -的非对称伸缩振动引起的;  $1157\text{ cm}^{-1}$  处为 C-O-C

非对称伸缩振动吸收峰；1021  $\text{cm}^{-1}$ 、1080  $\text{cm}^{-1}$  分别为与伯、仲醇羟基相连的 C-O(H) 振动吸收峰；929  $\text{cm}^{-1}$ 、859  $\text{cm}^{-1}$ 、763  $\text{cm}^{-1}$  分别为 D-吡喃葡萄糖的 1 型、2 $\alpha$  型、3 型吸收带。上述红外光谱与麦芽糊精的相关研究结果一致<sup>[9]</sup>，表明脂肪替代品具有吡喃葡萄糖结构。

## 2.2 晶体结构分析

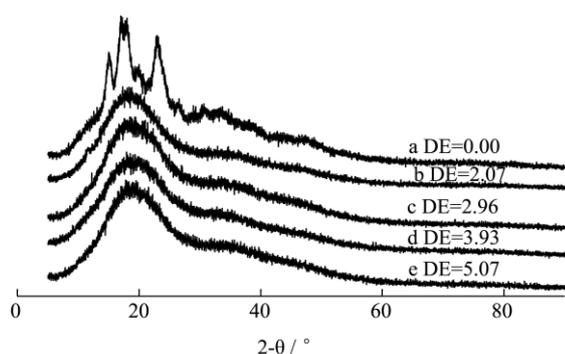


图 2 粳米淀粉与脂肪替代品的 X 射线衍射图

Fig.2 X-Ray diffraction spectra of native starch and fat substitutes

注：a 为原淀粉，b 为 DE=2.07 的脂肪替代品，c 为 DE=2.96 的脂肪替代品，d 为 DE=3.93 的脂肪替代品，e 为 DE=5.07 的脂肪替代品。

图 2 为粳米淀粉（图 2a）与 DE 值为 2.07~5.07 的脂肪替代品（图 2b-e）的 XRD 图谱。粳米淀粉分别在 15°、18°、20° 及 23° 有较强衍射峰，是典型的 A 型晶体<sup>[10]</sup>。不同 DE 值的脂肪替代品（图 2b-e）晶体结构基本相同。与原淀粉相比，DE 值为 2.07~5.07 的脂肪替代品都表现出如下特征：强峰减弱了，且部分峰发生了融合，但仍在 18° 有较强衍射，保留了部分 A 型特征峰，主要由支链分子组成的结晶区残留下来。说明水解反应主要发生在无定型区，试验结果印证了马铃薯淀粉<sup>[14]</sup>、玉米淀粉<sup>[15]</sup>及燕麦糊精<sup>[11]</sup>为基质的脂肪替代品的相关研究结果。根据 Chrystel Lorete<sup>[5]</sup>对于凝胶形成的研究，残留下来的支链分子中的线性链与无定形区中的直链分子共同作用聚集形成凝胶结晶域，有利于弱凝胶的形成。

## 2.3 形貌观察

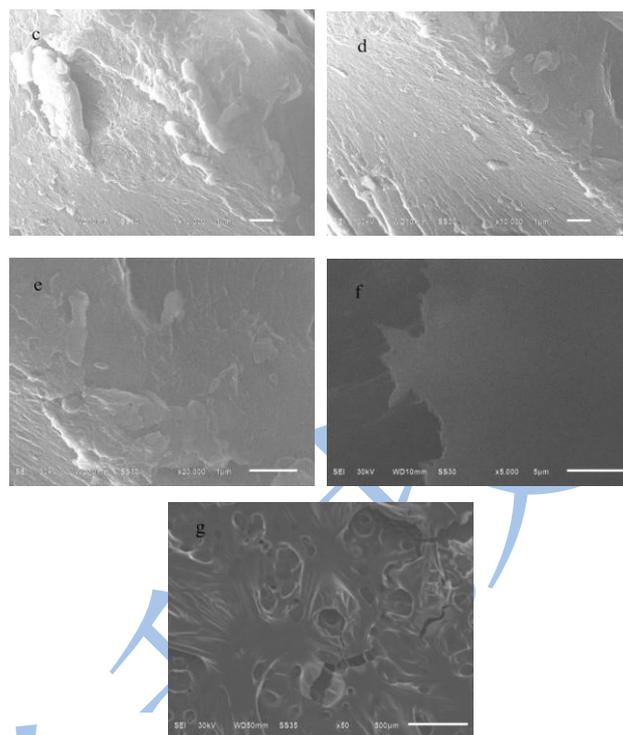
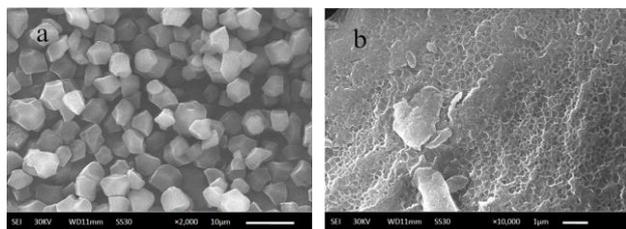


图 3 粳米淀粉与脂肪替代品的 SEM 图

Fig.3 Scanning electron microscope images of native starch and fat substitute

注：a 为原淀粉， $\times 2000$ ；b 为 DE=2.07 的脂肪替代品， $\times 10000$ ；c 为 DE=2.96 的脂肪替代品， $\times 10000$ ；d 为 DE=3.93 的脂肪替代品， $\times 10000$ ；e 为 DE=5.07 的脂肪替代品， $\times 10000$ ；f 为粳米淀粉糊化凝胶 SEM， $\times 5000$ ；g 为脂肪替代品与水结合 SEM，DE=2.07， $\times 50$ 。

图 3a 为原淀粉在放大 2000 倍下的 SEM 图，可以看出粳米淀粉颗粒小，粒径约为 5  $\mu\text{m}$ ，且为多角形，表面虽有轻微破损，但光滑完整。图 3b-e 为脂肪替代品(b, DE=2.07; c, DE=2.96; d, DE=3.93; e, DE=5.07)放大 10000 倍的 SEM 图，从图中可看到明显的孔洞，表面呈现一定程度的缺陷、裂痕、损伤现象，形成多孔类似海绵状结构<sup>[11]</sup>（图 3b~e），这种海绵状结构为凝胶形成时截留水分子提供了大量空间，使得所形成的凝胶质地柔软，具有较好的流动性。随着 DE 值的增加，孔洞逐渐增大，密度减小，持水能力会减弱，说明低水解度的脂肪替代品更有利于模拟脂肪多汁的口感。图 3b-e 为干燥糊化淀粉胶体被粉碎后的形态。Sakina Khatoun<sup>[6]</sup>等通过酶解经喷雾干燥得到的脂肪替代品呈大小相近颗粒状，这可能是由于干燥方式不同造成的。图 3f 为粳米淀粉糊化凝胶的 SEM 图，由图可知，糊化后的粳米淀粉只能形成二维平面结构，流动性差，不具有模拟脂肪的特性。图 3g 为 DE 值为 2.07 的脂肪替代品与水结合的 SEM 图，从图中可以

看出已形成三维网状结构,左侧可看到水分子层流动的迹象,说明所形成的凝胶质地柔软,流动性好,类似脂肪层。

### 2.4 糊化特性

图4为籼米淀粉(图4a)及DE值为2.07~5.07的脂肪替代品(图4b)的RVA曲线。从图4b中可知脂肪替代品已没有原淀粉典型的RVA谱。由图4得到DE值为2.07~5.07的脂肪替代品的糊化特性数据如表1所示,不同DE值的脂肪替代品的粘度、崩解值、回升值及糊化温度等糊化特性较原淀粉都有显著降低,与程小续关于大米淀粉糊精的研究结果相一致<sup>[12]</sup>。籼米淀粉中直链淀粉含量高,难糊化、易回生。脂肪替代品在制备过程中无定型区遭到破坏,直链淀粉含量低,糊化温度、回生值都较原淀粉有显著降低,表明脂肪替代品的抗老化性有所提高。高分子物质的特征粘度与其平均相对分子质量、分子尺寸、分子链在溶液中的形态等因素有关,而崩解值与峰值粘度呈极显著正相关,随着DE值的增加,相对分子质量减小,特征黏度减小,崩解值降低。DE值为2.07~3.93的脂肪替代品峰值粘度及崩解值相差不大,且都明显高于DE值为5.07的脂肪替代品(表1),表明DE值为2~4之间的样品相对分子质量适中,抗老化能力强,与水结合拥有大部分的聚合链来抑制溶解和促进凝胶,形成

介于沉淀与溶液之间的凝胶网状结构,这是其作为脂肪替代品的关键。

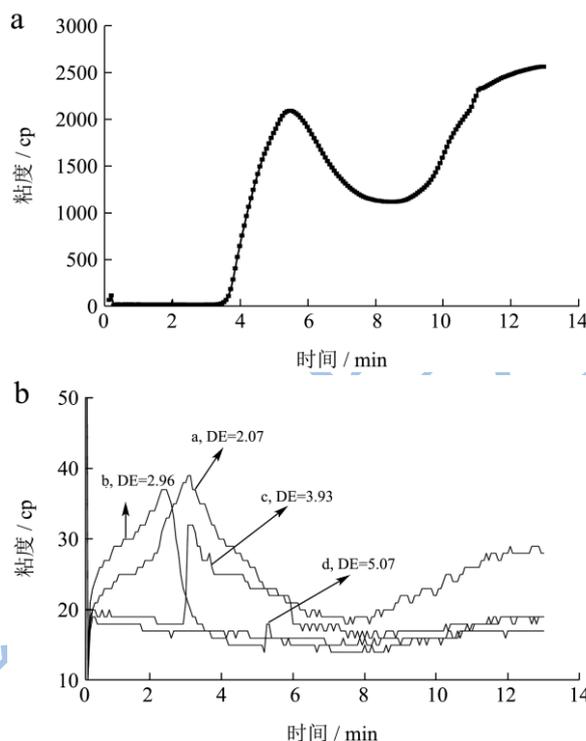


图4 籼米淀粉与脂肪替代品的RVA图

Fig.4 Representative viscosity profiles (RVA) of native starch and fat substitutes

注: a为原淀粉, b为不同DE值的脂肪替代品。

表1 原淀粉与脂肪替代品的糊化特性

Table 1 Pasting properties of native starch and fat substitutes

样品/DE	峰值黏度/cP	低谷黏度/cP	崩解值/cP	回升值/cP	糊化温度/°C
0.00	2095.48±0.49 <sup>e</sup>	1119.26±0.28 <sup>e</sup>	976.36±0.43 <sup>e</sup>	1449.34±0.39 <sup>e</sup>	80.90±0.06 <sup>e</sup>
2.07±0.16	39.46±0.40 <sup>d</sup>	18.47±0.41 <sup>d</sup>	23.38±0.34 <sup>d</sup>	10.29±0.36 <sup>d</sup>	56.35±0.04 <sup>d</sup>
2.96±0.04	37.14±0.12 <sup>c</sup>	14.43±0.49 <sup>e</sup>	21.28±0.33 <sup>c</sup>	5.26±0.24 <sup>c</sup>	50.60±0.03 <sup>e</sup>
3.93±0.03	32.38±0.35 <sup>b</sup>	16.41±0.44 <sup>b</sup>	16.41±0.39 <sup>b</sup>	3.38±0.49 <sup>b</sup>	50.40±0.04 <sup>b</sup>
5.07±0.16	18.12±0.12 <sup>a</sup>	15.23±0.25 <sup>a</sup>	3.18±0.21 <sup>a</sup>	2.17±0.25 <sup>a</sup>	50.30±0.04 <sup>a</sup>

注: 同列字母不同, 表示差异显著 ( $p < 0.05$ )。

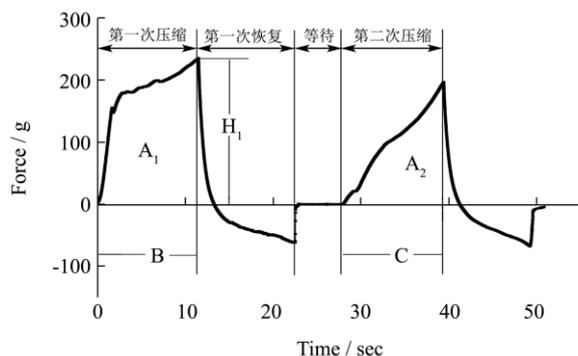


图5 籼米淀粉基脂肪替代品 (DE=2.96) 全质构分析图

Fig.5 Textural properties of indica rice starch-based fat substitute (DE=2.96)

### 2.5 质构分析

以籼米淀粉为基质的脂肪替代品质构分析图(图5)与李玉美<sup>[16]</sup>所研究的以乳清蛋白为基质的脂肪替代品相一致。根据全质构分析图得到籼米淀粉、不同DE值脂肪替代品及李玉美所测定的氢化棕榈油及奶油的全质构数据如表2所示。籼米淀粉的硬度、胶黏性、咀嚼性较大,所形成的凝胶较强。随着DE值的增加,脂肪替代品的凝胶性逐渐减弱。这可能是由于DE值的增大,淀粉分子中更多的糖苷键被切割断裂,生成的凝胶网束缚水分子的能力减弱,凝胶性质减弱。DE值为2.07的脂肪替代品的硬度、胶黏性、咀嚼性、

弹性及凝聚性分别为 295.71 g、149.93、149.78、0.99、0.51 与奶油质构（如表 2）接近。DE 值为 3.93 的脂肪替代品的硬度、胶黏性、咀嚼性、弹性及凝聚性分别为 158.84 g、80.72、80.64、0.99、0.51 与氢化棕榈油质构（如表 2）接近。DE 值为 2.07~3.93 的样品与

郝新蕾<sup>[17]</sup>以马铃薯淀粉为原料所制得的 DE 值为 5.1 的脂肪替代品硬度相近，这表明不同来源淀粉的结构和特性有差别，其作为脂肪替代品的合适水解度是有差别的。综上所述，DE 值为 2~4 的籼米淀粉基脂肪替代品的质构与脂肪接近，更适合替代脂肪。

表 2 原淀粉、脂肪替代品及氢化棕榈油、奶油质构分析

Table 2 Textural properties of fat substitutes, hydrogenated palm oil, and cream

DE	硬度/g	胶黏性	咀嚼性	弹性	凝聚性
0.00	794.50±0.24 <sup>e</sup>	186.71±0.27 <sup>e</sup>	186.52±0.33 <sup>e</sup>	0.99±0.02 <sup>a</sup>	0.24±0.01 <sup>a</sup>
2.07±0.16	295.71±0.12 <sup>d</sup>	149.93±0.22 <sup>d</sup>	149.78±0.17 <sup>d</sup>	0.99±0.01 <sup>a</sup>	0.51±0.02 <sup>b</sup>
2.96±0.04	235.58±0.13 <sup>c</sup>	135.56±0.16 <sup>c</sup>	135.43±0.14 <sup>c</sup>	0.99±0.01 <sup>a</sup>	0.58±0.02 <sup>c</sup>
3.93±0.03	158.84±0.13 <sup>b</sup>	80.72±0.12 <sup>b</sup>	80.64±0.09 <sup>b</sup>	0.99±0.01 <sup>a</sup>	0.51±0.03 <sup>b</sup>
5.07±0.16	133.47±0.14 <sup>a</sup>	62.81±0.12 <sup>a</sup>	62.75±0.09 <sup>a</sup>	0.99±0.01 <sup>a</sup>	0.47±0.03 <sup>b</sup>
氢化棕榈油 <sup>[16]</sup>	145	97.15	96.18	0.99	0.67
奶油 <sup>[16]</sup>	287.50	143.75	142.31	0.99	0.50

注：同列字母不同，表示差异显著（ $p < 0.05$ ）。

### 3 结论

3.1 在料液浓度为 100 g/L，反应温度为 95 °C，pH 6.5，酶添加量为 6 U/g 的条件下，通过改变酶解时间（4、6、10、14 min）制得 DE 值分别为 2.07、2.96、3.93 及 5.07 的籼米淀粉基脂肪替代品。通过对脂肪替代品的结构特性、糊化特性及质构特性研究得到如下结论：

3.2 红外光谱分析可知，脂肪替代品在 3390  $\text{cm}^{-1}$ 、2928  $\text{cm}^{-1}$ 、1157  $\text{cm}^{-1}$ 、1021  $\text{cm}^{-1}$ 、1080  $\text{cm}^{-1}$ 、929  $\text{cm}^{-1}$ 、859  $\text{cm}^{-1}$  及 763  $\text{cm}^{-1}$  处出现了特征峰，表明其具有吡喃葡萄糖结构；原淀粉和脂肪替代品的 XRD 图谱分析可知，籼米淀粉在 15°、18°、20° 及 23° 处有较强衍射峰，属 A 型晶体结构，脂肪替代品仅在 18° 有较强衍射，保留了部分 A 型特征峰，结晶性残留下来，有利于凝胶的形成；SEM 照片表明：脂肪替代品形成多孔类似海绵状结构，为凝胶形成截留水分子提供大量空间；脂肪替代品的峰值粘度、低谷粘度、崩解值、回升值及糊化温度都较原淀粉有显著降低，说明脂肪替代品的抗老化能力增强，不易凝沉，与水结合可形成介于沉淀与溶液之间的凝胶网状结构；质构数据表明，DE 值为 2.07 的脂肪替代品的硬度（295.71 g）、胶黏性（149.93）、咀嚼性（149.78）、弹性（0.99）及凝聚性（0.51）与奶油质构（287.50 g、143.75、142.31、0.99、0.50）接近。DE 值为 3.93 的脂肪替代品的硬度（158.84 g）、胶黏性（80.72）、咀嚼性（80.64）、弹性（0.99）及凝聚性（0.51）与氢化棕榈油质构（145 g、97.15、96.18、0.99、0.67）接近。综上所述，DE 值为 2~4 的样品更适合作为脂肪替代品。

### 参考文献

- [1] Martínez-Cervera S, Salvador A, Sanz T. Cellulose ether emulsions as fat replacers in muffins: Rheological, thermal and textural properties [J]. LWT-Food Science and Technology, 2015, 63: 1083-1090
- [2] GANORKAR P, KULKAMNI A. Studies on preparation and functional properties of carboxymethyl starch from sorghum [J]. International Food Research Journal, 2013, 20(5): 2205-2210
- [3] 张斌,罗发兴,罗志刚.马铃薯淀粉基脂肪模拟物的工艺研究[J].现代食品科技,2009,24(6):629-632  
ZHANG Bin, LUO Fa-xing, LUO Zhi-gang. Preparation of potato starch based fat mimics [J]. Modern Food Science and Technology, 2009, (6): 629-632
- [4] Yuling Yang, Yuan You, Xiaobei Peng, et al. Effect of rice-based fat substitute on gelation of myofibrillar proteins [J]. Journal of Food and Nutrition Research, 2015, 3(3): 152-156
- [5] Chrystel Loreta, Vincent Meuniera, William J Frith, et al. Rheological characterisation of the gelation behaviour of maltodextrin aqueous solutions [J]. Carbohydrate Polymers, 2004, 57(2): 153-163
- [6] Khatoun S, Sreerama Y N, Raghavendra D, et al. Properties of enzyme modified corn, rice and tapioca starches [J]. Food research international, 2009, 42(10): 1426-1433
- [7] Geovana Rocha Plácido Moore, Luciana Rodrigues do Cantoe Edna Regina Amante. Cassava and corn starch in maltodextrin production [J]. Quim Nova Vol, 2005, 28(4): 596-600

- [8] Ying Ma, Chung-uang Cai, Jing Wang, et al. Enzymatic hydrolysis of corn starch for producing fat mimetics [J]. Journal of Food Engineering, 2006, 73: 297-303
- [9] 伍秀英,罗发兴,黄强,等.辛烯基琥珀酸糊精酯的制备及其乳化性的研究[J].现代食品科技,2012,28(9):1157-1160  
WU Xiu-ying, LUO Fa-xing, HANG Qiang, et al. Preparation and emulsification property of octenyl succinic dextrin ester [J]. Modern Food Science and Technology, 2012, 28(9): 1157-1160
- [10] Tawil G, Viksø-Nielsen A, Rolland-Sabaté A, et al. Hydrolysis of concentrated raw starch: A new very efficient  $\alpha$ -amylase from *Anoxybacillus flavothermus* [J]. Carbohydrate Polymers, 2012, 87(1): 46-52
- [11] 董吉林,罗双群,申瑞玲.燕麦糊精脂肪替代品的分离纯化及结构特性研究[J].中国粮油学报,2011,26(7):31-34  
DONG Ji-ling, LUO Shuang-qun, SHEN Rui-ling. Study on purification and properties on oat dextrin of fat substitute [J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2011, 26(7): 31-34
- [12] 程小续.以大米淀粉为基质的低DE值麦芽糊精的研究[D].长沙:中南林业科技大学,2010  
CHENG Xiao-xu. Research on preparation of low DE maltodextrins from rice starch [D]. Changsha: Central South University of Forestry & Technology, 2010
- [13] MANFIL P H, ANHE A C, TELIS V R. Texture and microstructure of gelatin/corn starch-based gummy confections [J]. Food Biophysics, 2012, 7(3): 236-243
- [14] 杨铭铎,于亚莉,高峰.脂肪代用品的研究 I—不同淀粉酶水解马铃薯淀粉制备低 DE 值麦芽糊精研究[J].食品科学,2005,26(5):149-155  
YANG Ming-duo, YU Ya-li, GAO Feng. Studies on the fat replacer I—study on hydrolysis of different enzymes to produce the maltodrier of low DE value from potato flour [J]. Food Science, 2005, 26(5): 149-155
- [15] 郝晓敏,王遂.酶法制备玉米淀粉糊精的性质研究[J].食品工业,2008,28(6):15-17  
HAO Xiao-min, WANG Sui. Study on enzymatic hydrolysis to starch micro-granulate maltodextrin [J]. Food Industry, 2008, 28(6): 15-17
- [16] 李玉美.以乳清蛋白为基质的脂肪替代品的研究[D].无锡:江南大学,2006  
LI Yu-mei. Research on preparation of whey protein based fat replacer [D]. Wuxi: Jiangnan university, 2006
- [17] 郝新蕾,张连富.低DE值麦芽糊精凝胶特性研究[J].中国粮油学报,2010,25(3):29-33  
HAO Xin-lei, ZHANG Lian-fu. Gelatin properties of low-DE maltodextrin [J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2010, 25(3): 29-33