

微波制备淀粉-油酸复合物及其消化特性的研究

崔峻¹, 陈玲¹, 李冰¹, 梁毅², 李琳^{1,3*}

(1. 华南理工大学, 食品科学与工程学院, 淀粉与植物蛋白深加工教育部工程研究中心, 广东省天然产物绿色加工与产品安全重点实验室, 广州 510641; 2. 广东中轻枫泰生化科技有限公司, 茂名 525427; 3. 东莞理工学院, 东莞 523808)

摘要: **目的** 微波制备淀粉-油酸复合物, 降低大米淀粉消化速率, 调控其消化特性。**方法** 在微波作用下, 将油酸引入淀粉体系使其与直链淀粉相互作用形成复合物, 分析比较复合物的短程有序度、结晶结构、晶粒大小、热稳定性与消化特性的关系。**结果** 相比于原淀粉, 油酸的引入提高了淀粉的抗消化性, 淀粉与油酸形成的复合物呈典型的 V 型结晶结构, 并显示出比原淀粉更好的热稳定性。淀粉油酸复合物的短程有序度、相对结晶度、晶粒尺寸与微波处理温度呈负相关, 且较低温度下制备的复合物具有更好的抗消化性。**结论** 淀粉和油酸复合后消化速率降低, 较低微波处理温度下制备的淀粉油酸复合物结晶结构更好, 因而赋予其更好的抗消化性。

关键词: 淀粉; 油酸; 微波; 淀粉油酸复合物; 结晶结构; 消化特性

Preparation of starch-oleic acid complexes under microwave irradiation and their digestion properties

CUI Jun¹, CHEN Lin¹, LI Bing¹, LIANG Yi², LI Lin^{1,3*}

(1. School of Food Science and Engineering, Ministry of Education Engineering Research Center of Starch & Protein Processing, Guangdong Province Key Laboratory for Green Processing of Natural Products and Product Safety, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China; 2. Guangdong Zhongqing Font Biochemical Science and Technology Co. Ltd., Maoming 525427, China; 3. Dongguan University of Technology, Dongguan 523808, China)

ABSTRACT: Objective To prepare starch-oleic acid complex by microwave, reduce rice starch digestion rate and regulate its digestive characteristics. **Methods** The oleic acid was introduced into the starch system to interact with amylose to form a complex. The digestion properties of starch-oleic acid complexes and their degree of short-orders, crystalline structures, crystallite sizes, thermal stabilities of the complexes were analyzed. **Results** Compared with native starch, the digestion resistance of starch was improved with introduction of oleic acid, and a typical “V-type” crystalline pattern as well as a better thermal stability was shown for the complexes. The degree of short-orders, relatively crystallinity and crystallite sizes of complexes were negatively correlated to the increased microwave temperature, and the complexes with better digestion resistance were prepared under lower microwave temperature. **Conclusion** After the combination of starch and oleic acid, the digestion rate decreases, and the starch oleic acid complex prepared at lower microwave temperature has a better crystalline structure, thus endowing it with better

基金项目: 国家自然科学基金-广东省联合基金项目(U1501214)、广东省“扬帆计划”引进创新创业团队项目(2014YT02S029)

Fund: Supported by NSFC-Guangdong Joint Foundation Key Project (U1501214) and Yangfan Innovative and Entrepreneurial Research Team Project (2014YT02S029)

***通讯作者:** 李琳, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为功能性碳水化合物。E-mail: felinli@scut.edu.cn

***Corresponding author:** LI Lin, Ph.D, Professor, Ministry of Education Engineering Research Center of Starch & Protein Processing, Guangdong Province Key Laboratory for Green Processing of Natural Products and Product Safety, School of Food Science and Engineering, South China University of Technology, Wushan Road, Tianhe District, Guangzhou 510640, China. E-mail: felinli@scut.edu.cn.

anti-digestibility.

KEY WORDS: starch; oleic acid; microwave; starch-oleic acid complex; crystalline structure; digestion properties

1 引言

大米已经成为全世界三分之二人口的主要膳食来源,大米贮存了大量的碳水化合物,可以维持机体的能量消耗^[1-3]。然而,对某些患病人群(尤其是肥胖症和糖尿病)来讲,膳食大米制品的升糖指数偏高,其过快的消化速率往往导致血糖水平高,极大影响机体健康^[4,5]。为降低淀粉的消化速率,前人通过物理或化学的改性对其结构进行了修饰,并取得了较显著的效果^[6,7]。研究还发现,直链淀粉和一些小分子、醇类或脂质形成具有左手单螺旋结构的复合物(V型淀粉)时,淀粉的消化速率会降低^[8-10]。油脂和淀粉是淀粉类食品的主要组分,它们的相互作用必然会对食品体系的物理化学特性产生多方面的影响,但目前关于上述结构改变和消化特性之间的关联规律研究还较少。

基于 Karkalas 等^[11]制备淀粉脂质类复合物时所采用的传统热传导方法,后续研究不断运用了新的技术和装备,如单螺杆挤出^[12]、高压均质^[13]、高静压处理^[14]等,所制得的复合物也具有不同的物理化学特性^[15]。微波辐射技术近几十年来在食品工业中的应用广泛,微波能直接作用于分子本身,是一种环境友好型的加热技术,采用微波加热具有使用方便、加热均匀、升温速率高等优点^[16],但目前有关微波对淀粉和脂质相互作用影响的研究仍较少。

本研究以大米淀粉和油酸作为研究对象,研究微波作用下温度(简称微波温度)对淀粉油酸复合物分子结构及结晶结构的影响,以期从加工条件上为淀粉营养消化特性的调控提供参考信息。

2 材料与方法

2.1 材料与试剂

大米淀粉(水分含量 13.5%,淀粉质量分数 95%/ds)(江西金农生物科技有限公司);猪胰酶(P7545)、糖化酶(A7095)(美国 Sigma 公司);油酸(Oleic acid)(≥纯度 98%,美国 Sigma 公司);葡萄糖测定试剂盒(GOPOD 方法)(Megazyme 公司);氢氧化钾、三水合醋酸钠、无水乙醇(上海国药集团化学试剂有限公司);浓盐酸、乙酸(分析纯,天津科密欧化学试剂有限公司)。

2.2 仪器与设备

Milestone Ethos one 型微波消解仪(意大利 Milestone 公司);MS-H-Pro 型磁力搅拌器(北京大龙兴创实验仪器有限公司);DSC8000 型差式扫描量热仪(美国 Perkin Elmer 公司);Tensor 37 型傅里叶红外光谱仪(德国 Bruker 公司);

X'Pert Pro 型 X 射线衍射仪(荷兰 PANalytical 公司);3-30KS 型高速冷冻离心机(德国 Sigma 公司);SHA-BA 型恒温水浴摇床(常州奥华仪器有限公司);DHG-9030 型恒温干燥箱(上海齐欣科学仪器有限公司);FW80 型高速粉碎机(天津泰斯特仪器有限公司);FE28 型 pH 计(瑞士 Mettler Toledo 公司)。

2.3 实验方法

2.3.1 淀粉油酸复合物的制备

称取淀粉 4 g 置于烧杯中,加入 100 mL 0.1 mol/L 的 KOH 溶液,90 °C 磁力搅拌溶解 20 min(溶液 1)。称取油酸 0.4 g 置于烧杯中,加入 120 mL 0.1 mol/L 的 KOH 溶液,90 °C 磁力搅拌溶解 20 min(溶液 2)。上述 2 种溶液冰水浴冷却至室温后,将溶液 1 加入溶液 2 中合并溶液,1200 r/min 磁力搅拌 2 min 混合均匀。将合并的溶液倒入微波消解罐,加盖密封,调整微波参数,分别在 50、60、70、80、90 °C 下处理 15 min(设定程序为:5 min 升温至预设温度,在该温度下保持 15 min,而后冷却 5 min)。微波反应完毕后取出样品后倒入烧杯,用冰水浴冷却至室温后,用 5 mol/L HCl 和 2 mol/L HCl 调整其 pH 值到 4.6 后得到白色浊液,8000 r/min 离心 15 min,弃去上清液,得到白色沉淀,加蒸馏水洗涤一次后继续加入 70%(1:1, V:V)乙醇溶液洗涤后离心去掉上清液,重复 2 次。离心完成后,小心取出离心管里的沉淀,放置在培养皿中烘箱内 40 °C 干燥 48 h 得淀粉油酸复合物,将干燥好的复合物粉碎,过 60 目筛备用,按照微波处理温度的不同将样品分别编号为:SO-50、SO-60、SO-70、SO-80、SO-90。同时,以未加油酸的一组样品作为对照,编号为 SN。

2.3.2 红外光谱测定

取少量样品置于红外光谱仪的 ATR 配件上,波数范围选择 4000 cm^{-1} 至 400 cm^{-1} ,在 4 cm^{-1} 的解析度下进行原淀粉及淀粉油酸复合物的红外吸收测定。同时将得到的红外图谱去卷积化处理,得到样品在波数为 1047 cm^{-1} 和 1022 cm^{-1} 的吸光度,以便研究样品颗粒的短程有序结构。

2.3.3 X-射线衍射测定

将样品水分干燥至 10% 后,取适当样品用 X 射线衍射仪研究其结晶度和晶型,仪器操作条件为,40 mA 和 40 kV,采用金属靶作为 X 射线源,衍射角 2θ 从 5° 到 35°,步长为 0.033°。计算相对结晶度(%)采用软件曲线法,用 JADE 5.0 打开 X-射线衍射波谱,选取 5° 至 30° 之间的图谱画背底直线并扣除背景。

$$\text{相对结晶度}(\%) = A_c / (A_c + A_a) \times 100\%$$

其中 A_c 代表软件给出结晶区的面积,而 A_a 则代表非结晶

区的面积。

晶粒尺寸(\bar{A})的计算则参照 Scherrer 公式:

$$\text{晶粒尺寸}(\bar{A}) \approx \lambda / (\text{FWHM} \times \cos\theta)$$

λ 为波长, 半最大值全宽度(full width at half maximum, FWHM)为半峰全宽。

2.3.4 淀粉油酸复合物热性能测定

称取适量淀粉或淀粉油酸复合物加蒸馏水配成 70% 的淀粉乳, 室温下密封保存过夜。精确称取 15.00 mg 淀粉乳放入样品盘, 加压密封, 室温下平衡 12 h 后放入样品池, 设定差示扫描量热仪以 4 °C/min 的速率从 30 °C 升温到 140 °C。根据所得数据计算相转变起始温度(onset temperature, T_o)、峰值温度(peak temperature, T_p)、终止温度(conclusion temperature, T_c), 以及相转变焓值(enthalpy, ΔH)。

2.3.5 淀粉油酸复合物中快消化淀粉、慢消化淀粉和抗性淀粉组分测定

参照 Englyst 等^[17]的方法并适当修改, 取 1 g(干重)样品置于 100 mL 锥形瓶中。分别加入 20 mL 醋酸钠缓冲液, 轻微涡旋分散, 置于恒温水浴振荡器中 37 °C 保温 2 min。

取 5 mL 混合酶解液(含 1140 U/mL 猪胰酶和 16 U/mL 糖化酶)加入上述锥形瓶并开始计时, 反应 20 min 后, 取 0.5 mL 反应液于空白离心管, 加入 20 mL 66% 的乙醇, 4000 r/min 离心 5 min。取 0.1 mL 离心上清液, 加 3 mL GOPOD 试剂, 避光水浴(45 °C)20 min 后, 于 510 nm 处测试吸光值(G_{20})。反应 120 min 后, 各取 0.5 mL 反应液, 加入 20 mL 66% 的乙醇, 4000 r/min 离心 5 min。取 0.1 mL 离

心上清液, 加 3 mL GOPOD 试剂, 避光水浴(45 °C)20 min, 于 510 nm 处测试吸光值(G_{120})。

快消化淀粉(rapidly digested starch, RDS)= $G_{20} \times 0.9 \times 100\%$

慢消化淀粉(slowly digested starch, SDS)=($G_{120} - G_{20}$) $\times 0.9 \times 100\%$

抗性淀粉(resistant starch, RS)= $100\% - (RDS + SDS)$

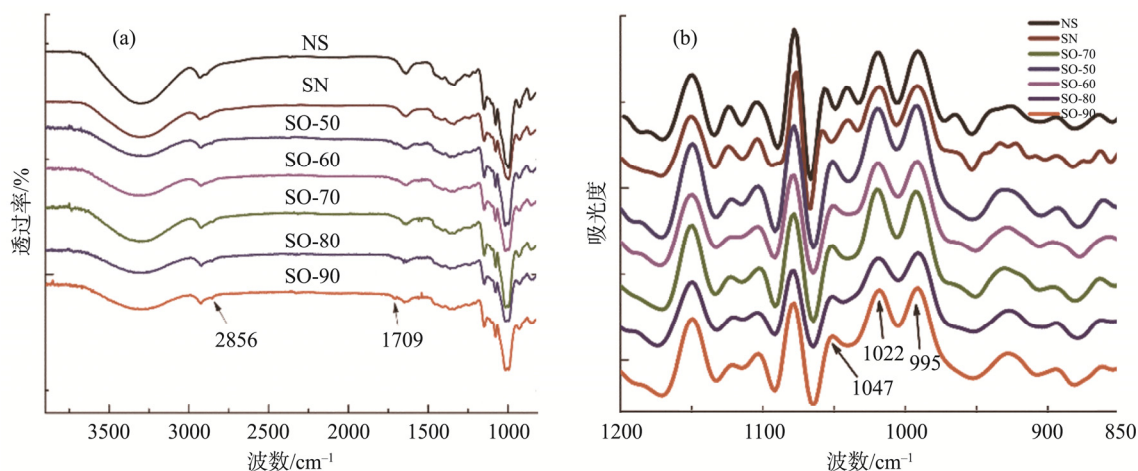
2.3.6 数据处理

实验数据用 SPSS 18.0 统计软件进行分析, 方差分析采用变异数分析(analysis of variance, ANOVA)分析, 并采用 Duncan 法进行差异显著性分析($P < 0.05$), 数据用平均值 \pm 标准偏差来表示。

3 结果与分析

3.1 红外光谱分析

通过图 1-a 可以发现, 不同微波温度下制备的淀粉油酸复合物与原淀粉的红外吸收图谱基本一致。NS 和 SN 中并没有出现脂肪酸的特征吸收峰, 而 5 种复合物都在波数为 2856 cm^{-1} 和 1709 cm^{-1} 附近出现了脂肪酸的特征吸收峰, 分别为亚甲基的对称伸缩振动和羧基团二聚体的振动吸收峰, 表明, 油酸在不同微波温度下均能与淀粉形成复合物。而在纯油酸中, 甲基和羧基的红外吸收波段分别为 2854 cm^{-1} 和 1708 cm^{-1} ^[18], 这可能是由于淀粉在与油酸复合过程的相互作用导致复合物中上述两个基团的吸收发生了红移。在 Ma 等^[19]的研究中也发现直链淀粉和抗坏血酸棕榈酸酯复合后, 脂肪酸的羰基特征峰也向高波数段轻微移动的情况。



注: NS: 原淀粉; SN: 未加油酸的对照样; SO: 淀粉油酸复合物; 50、60、70、80、90 代表不同的微波温度, 以下同。(b)中图谱从上至下依次为 NS、SN、SO-50、SO-60、SO-70、SO-80、SO-90。

a: 透过率 b: 吸光度。

图 1 淀粉油酸复合物的红外图谱

Fig.1 Fourier transform infrared spectra of starch-oleic acid complexes and native starch prepared under different microwave temperatures

前人研究表明,在波数 1047 cm^{-1} 和 1022 cm^{-1} 的吸光度可以用于分别评价淀粉短程有序结构程度和无定形含量,通过二者比值大小能判断淀粉颗粒表面分子排列的有序程度^[20]。图 1-b 表明,不同微波温度下制备的淀粉油酸复合物具有不同的短程结构特征。而将样品的红外吸收图谱进行傅里叶变换去卷积处理可以得到样品在 1047 cm^{-1} 和 1022 cm^{-1} 的吸收强度,如表 1 所示,SN 和淀粉油酸复合物的短程有序性明显低于原淀粉,这可能是由于微波处理过程中引发的热效应会破坏淀粉颗粒结晶结构。但淀粉油酸复合物的短程有序性又明显高于 SN,说明脂肪酸与淀粉相互作用能形成一类具有一定分子有序性的复合物。其中,在微波温度 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下制备的淀粉油酸复合物其有序程度较高,而随着微波温度的进一步提高,复合物的短程有序度呈逐渐降低的趋势。

表 1 原淀粉及淀粉油酸复合物短程有序程度及相对结晶度
Table 1 Short-range orders and relative crystallinity of native starch and starch-oleic acid complexes

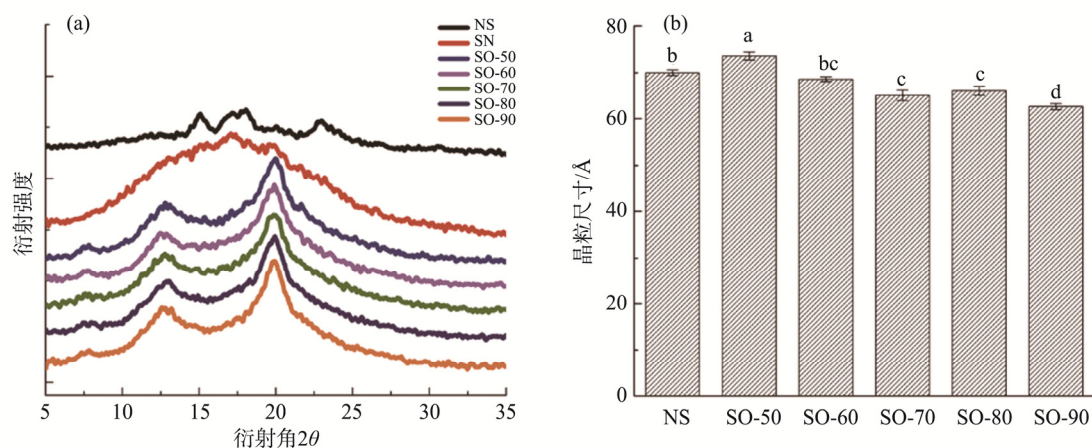
样品	$1047\text{ cm}^{-1}/1022\text{ cm}^{-1}$	相对结晶度/%
NS	0.613	35.80
SN	0.349	-
SO-50	0.483	31.80
SO-60	0.468	28.00
SO-70	0.430	24.30
SO-80	0.417	24.70
SO-90	0.391	21.90

3.2 淀粉油酸复合物晶型及结晶度分析

X-射线衍射结果显示,原淀粉在衍射角为 15.3° 、 17.1° 、 18.2° 、 23.5° 出现了 A 型淀粉的特征衍射峰(见图 2-a),5 种微波温度下制备的淀粉油酸复合物则分别在衍射角 7.5° 、 12.9° 、 19.8° 附近出现 V 型淀粉结晶的特征衍射峰^[21],而没有添加油酸的淀粉样品(SN)并无任何结晶衍射峰出现。说明,在微波作用下,油酸的引入在微波下与淀粉相互作用得到 V-型结晶结构的淀粉脂质复合物。此外,可以看到,复合物在衍射角 7.5° 的衍射强度与微波温度呈负相关,该趋势与表 1 中淀粉油酸复合物的相对结晶度相吻合,说明过高的微波温度并不利于更多 V 型结晶结构的形成。这一现象也反映在晶粒尺寸的变化上,图 2-b 显示,随着微波温度的提高,淀粉油酸复合物的晶粒大小也呈降低的趋势。微波辐射直接作用于分子本身,温度的提高会赋予反应体系更大的活化能,使分子间振动更加频繁,导致直链淀粉分子和油酸分子运动自由度更大^[22]。因此,这样激烈的反应状态并不利于两者在疏水作用驱动下进行复合,从而将减少油酸插入直链淀粉螺旋空腔形成 V 型淀粉的机会,并妨碍晶格堆积形成较大晶粒,进而导致结晶程度的降低。

3.3 淀粉油酸复合物的热性能

用差示扫描量热仪分析样品的热性能发现,没有添加油酸的 SN 并没有出现相转变峰,表现出无定形淀粉的特性。而油酸和淀粉复合后在高温段出现了较为明显的相转变峰(图 3),其相转变峰值温度范围在 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 附近,反应出较好的热稳定性,与前人研究一致^[23,24]。样品的热力学性能参数如表 2 所示,淀粉油酸复合物的相转变起始温度、峰值温



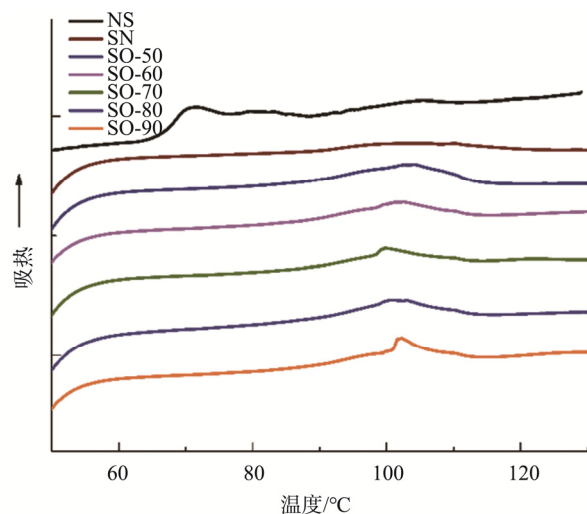
注: (a) 中图谱从上至下依次为 NS、SN、SO-50、SO-60、SO-70、SO-80、SO-90; a、b、c、d 不同字母代表不同的显著性, $P < 0.05$ 。

(a): 衍射强度; (b): 晶粒尺寸。

图 2 原淀粉及淀粉油酸复合物 X-射线衍射图谱及晶粒尺寸

Fig.2 X-ray diffraction patterns and crystalline size of starch-oleic acid complexes and native starch

度和终止温度较原淀粉均显著提高, 表明, 淀粉油酸复合物拥有更大的晶粒尺寸和更稳定的晶体结构。随着微波处理温度的升高, 淀粉油酸复合物的相转变峰值温度呈下降的趋势, 说明, 淀粉与油酸在较高的温度下相互作用倾向于形成结晶程度较差、结构较松散的复合物。同时, 微波温度 50 °C 下制备的复合物的相转变焓值要显著高于更高温度下制备的复合物, 这一结果也证实, 较低微波温度下得到的复合物的晶体结合程度更为紧密, 因而才需要更多的外部热能才能破坏晶格之间的分子作用力^[25]。



注: 图谱从上至下依次为 NS、SN、SO-50、SO-60、SO-70、SO-80、SO-90。

图 3 原淀粉及淀粉油酸复合物差示扫描量热曲线

Fig.3 Differential scanning curves of starch-oleic acid complexes and native starch

表 2 原淀粉及淀粉油酸复合物的热性能参数

Table 2 Thermal properties of starch-oleic acid complexes and native starch

样品	$T_o/^\circ\text{C}$	$T_p/^\circ\text{C}$	$T_c/^\circ\text{C}$	$\Delta H/(\text{J/g})$
NS	66.85±0.27 ^a	70.56±0.30 ^a	77.68±0.40 ^a	5.83±0.33 ^a
SN	-	-	-	-
SO-50	94.30±0.30 ^b	103.70±0.98 ^c	113.55±0.36 ^d	15.96±0.93 ^d
SO-60	95.13±0.20 ^b	101.46±0.53 ^{cd}	111.48±1.04 ^{cd}	11.63±1.09 ^c
SO-70	97.15±0.89 ^c	99.58±0.28 ^b	109.28±1.47 ^{bc}	7.47±0.30 ^b
SO-80	95.26±0.27 ^b	100.32±0.17 ^{bc}	111.05±1.53 ^{cd}	10.87±0.73 ^c
SO-90	100.48±0.08 ^d	102.02±0.23 ^d	106.81±0.50 ^b	6.06±0.56 ^b

注: T_o : 相转变起始温度; T_p : 峰值温度; T_c : 终止温度; ΔH : 相转变焓值; a、b、c、d 不同字母代表不同的显著性, $P < 0.05$ 。

3.4 淀粉油酸复合物的消化特性

根据淀粉在体内消化酶作用下转化为葡萄糖的速率, 前人研究将其分为快消化淀粉、慢消化淀粉和抗性淀粉^[17]。

如图 4 所示, 原淀粉在体外模拟消化过程中维持了较高的消化速率, 具有最高的快消化淀粉含量(达到 90%以上)。而添加油酸后, 淀粉的消化速率明显降低, 形成的复合物含有较多的慢消化淀粉和抗性淀粉组分, 显示出较好的慢消化和抗性性能, 与前人的研究一致^[26,27]。同时, 微波温度的降低会增加淀粉油酸复合中慢消化和抗性淀粉的含量。在淀粉的体外消化过程中, 淀粉与酶的接触是决定消化速率快慢的重要因素, 而油酸与直链淀粉在疏水作用下复合后形成的单螺旋 V-型淀粉可以从物理上屏蔽酶与淀粉的作用位点, 从而导致酶解速率的降低。此外, 采用较低的微波温度时, 淀粉和油酸在温和的反应体系下容易复合形成更多的 V 型淀粉, 有利于更稳定、更紧密晶型结构的形成, 从而使该复合物在酶解过程中抵抗酶的降解, 进而贡献出更多的慢消化淀粉和抗性淀粉组分^[28,29]。

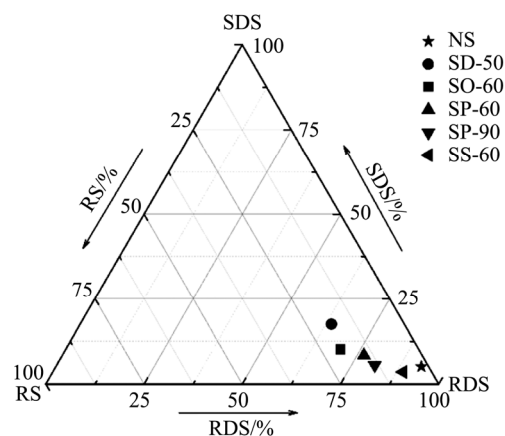


图 4 原淀粉及淀粉油酸复合物快消化淀粉、慢消化淀粉和抗性淀粉组分

Fig.4 RDS, SDS and RS contents of starch-oleic acid complexes and native starch

4 结 论

在微波作用下, 油酸与淀粉形成具有不同结构特征及消化特性的淀粉油酸复合物。微波温度的升高不会改变该复合物的红外吸收行为, 但能降低其短程有序程度。淀粉油酸复合物呈典型的 V 型淀粉结晶结构, 提高微波温度, 会降低复合物的相对结晶度和晶粒尺寸。淀粉油酸复合物相转变温度高于原淀粉, 表现出较好的热稳定性。添加油酸可显著提高淀粉的抗性, 在两者相互作用过程中, 较低的微波温度能赋予复合物更完整的结晶结构, 表现出较高的慢消化淀粉和抗性淀粉含量。因此, 在微波作用下, 引入的油酸可与淀粉作用形成新的复合结构并影响淀粉的消化速率, 达到调控淀粉营养功能特性的目的。

参考文献

[1] Amagliani L, O'Regan J, Kelly AL, et al. Chemistry, structure,

- functionality and applications of rice starch [J]. *J Cereal Sci*, 2016, 70: 291–300.
- [2] Sajilata MG, Singhal RS, Kulkarni PR. Resistant starch-A review [J]. *Compreh Rev Food Sci Food Saf*, 2006, 5(1): 1–17.
- [3] Zhang G, Hamaker BR. Slowly digestible starch: Concept, mechanism, and proposed extended glycemic index [J]. *Crit Rev Food Sci Nutr*, 2009, 49(10): 852–867.
- [4] Warren FJ, Butterworth PJ, Ellis PR. Studies of the effect of maltose on the direct binding of porcine pancreatic α -amylase to maize starch [J]. *Carbohydr Res*, 2012, 358: 67–71.
- [5] Lehmann U, Robin F. Slowly digestible starch-its structure and health implications: A review [J]. *Trends Food Sci Technol*, 2007, 18(7): 346–355.
- [6] Zhou D, Ma Z, Yin X, *et al.* Structural characteristics and physicochemical properties of field pea starch modified by physical, enzymatic, and acid treatments [J]. *Food Hydrocoll*, 2019, 93: 386–394.
- [7] Wang S, Luo H, Zhang J, *et al.* Alkali-induced changes in functional properties and *in vitro* digestibility of wheat starch: The role of surface proteins and lipids [J]. *J Agric Food Chem*, 2014, 62(16): 3636–3643.
- [8] Man JM, Cai JW, Xu B, *et al.* Spectrum analysis of crystalline structure of crop starches [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2012, 38(4): 691–698.
- [9] Nimz O, Gessler K, Isabel U, *et al.* Inclusion complexes of V-amylose with undecanoic acid and dodecanol at atomic resolution: X-ray structures with cycloamylose containing 26 D-glucoses (cyclohexacosaoose) as host [J]. *Carbohydr Res*, 2004, 339(8): 1427–1437.
- [10] Tan L, Kong L, Tan L. Starch-guest inclusion complexes: Formation, structure, and enzymatic digestion [J]. *Crit Rev Food Sci Nutr*, 2019, 0: 1–11.
- [11] Karkalas J, Raphaelides S. Quantitative aspects of amylose-lipid interactions [J]. *Carbohydr Res*, 1986, 157(C): 215–234.
- [12] Bhatnagar S, Hanna M. Amylose-lipid complex formation during single-screw extrusion of various corn starches [J]. *Cereal Chem*, 1994, 71: 582–587.
- [13] 孟爽. 高压均质法制备玉米淀粉-脂质复合物及其结构性质研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
- Meng S. Preparation of corn starch-lipid complex with high pressure homogenization and its structure and properties [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015.
- [14] Guo Z, Jia X, Miao S, *et al.* Structural and thermal properties of amylose-fatty acid complexes prepared via high hydrostatic pressure [J]. *Food Chem*, 2018, 264: 172–179.
- [15] 贾祥泽, 陈秉彦, 赵蓓蓓, 等. 直链淀粉-脂质复合物的形成及其结构性质研究进展[J]. *食品与发酵工业*, 2017, 43(3): 276–284.
- Jia XZ, Chen BY, Zhao BB, *et al.* Research advance in the formation and structural properties of amylose-lipid complex [J]. *Food Ferment Ind*, 2017, 43(3): 276–284.
- [16] 程新峰, 杭华, 肖子群. 微波辐射下淀粉的响应机制及研究现状[J]. *食品科学*, 2018, 39(13): 310–316.
- Cheng XF, Hang H, Xiao ZQ. Current status of research on the mechanism of action and effect of microwave irradiation on starch [J]. *Food Sci*, 2018, 39(13): 310–316.
- [17] Englyst HN, Kingman SM, Cummings JH. Classification and measurement of nutritionally important starch fractions [J]. *Eur J Clin Nutr*, 1992, 46: S33–50.
- [18] Sinclair RG, McKay AF, Myers GS, *et al.* The infrared absorption spectra of unsaturated fatty acids and esters [J]. *J Am Chem Soc*, 1952, 74(10): 2578–2585.
- [19] Ma UVL, Floros JD, Ziegler GR. Formation of inclusion complexes of starch with fatty acid esters of bioactive compounds [J]. *Carbohydr Polymers*, 2011, 83(4): 1869–1878.
- [20] Soest JGG, Hubertus T, De WD, *et al.* Short-range structure in (partially) crystalline potato starch determined with attenuated total reflectance Fourier-transform IR spectroscopy [J]. *Carbohydr Res*, 1995, 279(C): 201–214.
- [21] Wang S, Wang J, Yu J, *et al.* Effect of fatty acids on functional properties of normal wheat and waxy wheat starches: A structural basis [J]. *Food Chem*, 2016, 190: 285–292.
- [22] Fan D, Ma S, Wang L, *et al.* Effect of microwave heating on optical and thermal properties of rice starch [J]. *Starch-Strke*, 2012: 740–744.
- [23] Karkalas J, Ma S, Morrison WR, *et al.* Some factors determining the thermal properties of amylose inclusion complexes with fatty acids [J]. *Carbohydr Res*, 1995, 268(2): 233–247.
- [24] Marinopoulou A, Papastergiadis E, Raphaelides SN. An investigation into the structure, morphology and thermal properties of amylo maize starch-fatty acid complexes prepared at different temperatures [J]. *Food Res Int*, 2016, 90: 111–120.
- [25] Gunaratne A, Hoover R. Effect of heat-moisture treatment on the structure and physicochemical properties of tuber and root starches [J]. *Carbohydr Polymers*, 2002, 49(4): 425–437.
- [26] Arijaje EO, Wang YJ. Effects of chemical and enzymatic modifications on starch-linoleic acid complex formation [J]. *Food Chem*, 2017, 217: 9–17.
- [27] Kawai K, Takato S, Ueda M, *et al.* Effects of fatty acid and emulsifier on the complex formation and *in vitro* digestibility of gelatinized potato starch [J]. *Int J Food Properties*, 2017, 20(7): 1500–1510.
- [28] Gelders GG, Duyck JP, Goesaert H, *et al.* Enzyme and acid resistance of amylose-lipid complexes differing in amylose chain length, lipid and complexation temperature [J]. *Carbohydr Polymers*, 2005, 60(3): 379–389.
- [29] Marinopoulou A, Papastergiadis E, Raphaelides SN, *et al.* Morphological characteristics, oxidative stability and enzymic hydrolysis of amylose-fatty acid complexes [J]. *Carbohydr Polymers*, 2016, 141: 106–115.

(责任编辑: 王 欣)

作者简介

崔 峻, 硕士, 主要研究方向为功能性碳水化合物。

E-mail: cuijun09@hotmail.com

李 琳, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为功能性碳水化合物, 糖类物质及其药物制备与生物利用。

E-mail: felinli@scut.edu.cn