

## 大米抗性辛烯基琥珀酸淀粉酯的制备及特性分析

杨雪, 王姝雯, 刘庆庆, 杨浩, 李文, 包清彬

### Preparation and Properties of Rice Resistant Octenyl Succinate Anhydrate (OSA) Starch

YANG Xue, WANG Shuwen, LIU Qingqing, YANG Hao, LI Wenyue, and BAO Qingbin

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2021090064>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 交联辛烯基琥珀酸大米淀粉酯的制备及其糊化性能

Preparation and pasting properties of cross-linked octenyl succinate rice starch

食品工业科技. 2017(24): 142-147

#### 湿热处理对大米淀粉流变特性的影响

Effect of Heat-moisture Treatment on Rheological Properties of Rice Starch

食品工业科技. 2021, 42(3): 48-52

#### 高价离子型辛烯基琥珀酸淀粉酯作为微胶囊壁材的研究

High-charged-ion-octenyl Succinic Anhydride Modified Starch as Microcapsule Shell Material

食品工业科技. 2019, 40(1): 47-50,57

#### 马铃薯抗性淀粉的微波-湿热制备工艺优化及结构表征

Optimization of Preparation Technology of Potato Resistant Starch by Microwave Heat-Moisture Treatment and Its Structure Characterization

食品工业科技. 2018, 39(15): 176-180,188

#### 浸泡处理对大米淀粉糊化特性及流变特性的影响

Effect of Soaking Treatment on the Gelation Properties of Rice Starch

食品工业科技. 2018, 39(18): 50-54,59

#### 不同分子量辛烯基琥珀酸蜡质玉米淀粉酯的制备及其性能

Preparation and Properties of Octenyl Succinic Anhydride Esterified Waxy Corn Starches with Different Molecular Weights

食品工业科技. 2019, 40(22): 44-48



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

杨雪, 王姝雯, 刘庆庆, 等. 大米抗性辛烯基琥珀酸淀粉酯的制备及特性分析 [J]. 食品工业科技, 2022, 43(11): 167-174. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2021090064

YANG Xue, WANG Shuwen, LIU Qingqing, et al. Preparation and Properties of Rice Resistant Octenyl Succinate Anhydrate (OSA) Starch[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(11): 167-174. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2021090064

· 工艺技术 ·

# 大米抗性辛烯基琥珀酸淀粉酯的制备及特性分析

杨雪, 王姝雯, 刘庆庆, 杨浩, 李汶玥, 包清彬\*  
(西华大学食品与生物工程学院, 四川成都 610039)

**摘要:**为探究抗性淀粉制备新途径, 提高大米特别是碎米资源的利用价值, 以大米淀粉为原料, 水相法制备大米辛烯基琥珀酸淀粉酯 (OSA 淀粉), 以取代度 DS 和反应效率 RE 为考察指标, 探讨反应温度、反应 pH、酸酐滴加时间和淀粉浆浓度对 DS 和 RE 的影响。对 OSA 淀粉进行湿热处理, 探究湿热处理时间对抗性淀粉含量和理化特性的影响, 并进行体外消化试验。结果表明: 制备 OSA 淀粉适合的工艺条件为反应温度 40 ℃、反应 pH 为 9.0、酸酐滴加时间为 4 h、淀粉乳浓度 30%, 此条件下得到的 OSA 淀粉 DS 为 1.3915, RE 为 78.2%。将此条件获得的 OSA 淀粉湿热处理 18 h, 抗性淀粉含量从 25.2% 增加至 42.2%。在模拟胃肠道中消化水解率为 58.8%。

**关键词:**大米淀粉, 辛烯基琥珀酸淀粉酯, 湿热处理, 抗性淀粉

中图分类号: TS236

文献标识码: B

文章编号: 1002-0306(2022)11-0167-08

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2021090064



本文网刊:

## Preparation and Properties of Rice Resistant Octenyl Succinate Anhydrate (OSA) Starch

YANG Xue, WANG Shuwen, LIU Qingqing, YANG Hao, LI Wenyue, BAO Qingbin\*

(College of Food and Bioengineering, Xihua University, Chengdu 610039, China)

**Abstract:** In order to explore new ways to prepare resistant starch and improve the utilization value of rice, especially broken rice resources, octenyl succinate anhydrate (OSA) starch was prepared by water-phase using rice starch as raw material. Taking the degree of substitution DS and reaction efficiency RE as the investigation indicators, the effects of the reaction temperature, reaction pH, octenyl succinate anhydride dropping time and starch concentration on DS and RE were studied. The OSA starch was subjected to wet heat treatment to explore the influence of the time of wet heat treatment on the content and physical and chemical properties of resistant starch, and to conduct an *in vitro* digestion test. The suitable process conditions were as follows: Reaction temperature was 40 ℃, reaction pH was 9.0, acid anhydride dripping time was 4 h, starch concentration was 30%, OSA starch DS=1.3915 and RE=78.2% obtained under these conditions. The OSA starch obtained under this condition was moist and heat treated for 18 h to prepare resistant starch octenyl succinate (resistant OSA starch), the resistant starch content increased from 25.2% to 42.2%, digestion experiments showed that the digestion and hydrolysis rate of resistant OSA starch in the simulated gastrointestinal tract was 58.8%.

**Key words:** rice starch; octenyl succinate anhydrate starch; heat and moisture treated; resistant starch

大米淀粉是从稻谷的胚乳中提取得到, 具有粒径小、致敏性低、质构柔滑等特点, 但天然大米淀粉由于其性能上的单一性, 存在剪应力低、溶解度低和

冻融稳定性差等缺陷<sup>[1-2]</sup>, 限制了其在食品工业中的应用。将大米淀粉进行酯化改性, 对拓展大米特别是碎米的加工用途有积极的意义。

收稿日期: 2021-09-06

基金项目: 四川省科技计划项目 (2019YFN0115)。

作者简介: 杨雪 (1997-), 女, 硕士研究生, 研究方向为粮食加工, E-mail: 2822744536@qq.com。

\* 通信作者: 包清彬 (1962-), 男, 硕士, 教授, 研究方向: 粮油工程, E-mail: 731674097@qq.com。

辛烯基琥珀酸淀粉酯(Octenyl succinate anhydrate starch, OSA 淀粉)是淀粉经辛烯基琥珀酸酐(Octenyl succinic anhydride, OSA)脂化改性而成的改性淀粉,具有优良的乳化性、流动性、稳定性并具有一定的抗消化性能,广泛用于乳化剂、增稠剂、微胶囊壁材等<sup>[3-4]</sup>。抗性淀粉(Resistant starch, RS)是一种兼具可溶性纤维与不可溶性膳食纤维特性的淀粉,其在人体小肠无法被消化,且相对普通膳食纤维具有更高的生理活性<sup>[5]</sup>,可通过物理、化学、生物等方法对淀粉改性或直接对食品原料进行改性提高 RS 含量,是目前食品加工领域的研究热点之一。但 RS 的制取率还普遍较低,市场上利用抗性淀粉开发的食品品种和数量也相对较少。优化 RS 的加工工艺并且提高 RS 在食品中的利用率是未来研究的重点。

本研究以大米淀粉为原料,制备大米 OSA 淀粉,再对其进行湿热处理,进一步提高其抗性淀粉含量,制备抗性辛烯基琥珀酸淀粉酯(抗性 OSA 淀粉),其兼备 OSA 淀粉和抗性淀粉的特性,按不同的需求,可将其用作增稠剂、乳化剂、可食用膜、微胶囊壁材和特殊包装物<sup>[6-7]</sup>等使用,有极大的应用前景。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与仪器

大米淀粉(粳米) 广州市海希生物科技有限公司;异丙醇 分析纯,天津市大茂化学试剂厂;氢氧化钠、无水乙醇、3、5-二硝基水杨酸 均为分析纯,成都科隆化学品公司;葡萄糖 分析纯,成都迪维乐化学品公司;辛烯基琥珀酸酐、胰  $\alpha$ -蛋白酶(300 U/mg)、淀粉葡萄糖苷酶(100 U/mg)、Tris-maleata 溶液、胃蛋白酶 西格玛奥德里奇贸易有限公司。

Vortex genius3、VORTEX 3 漩涡混匀器 艾卡仪器设备有限公司;HWCL-3 集热式恒温磁力搅拌器 长城科工贸易公司;UV2600 紫外可见分光光度计 上海舜宇恒平科学仪器有限公司;5424 高速离心机 德国艾本德仪器公司;TD-5M 低速离心机 四川蜀科仪器公司;TGA/DSC 3+同步热分析仪(TG-DSC) 梅特勒-托利多精密仪器公司;PHS-3C pH 计 成都世纪方舟有限公司;MCR302 流变仪 奥地利 Anton Paar 仪器公司;JA2003 千分之一分析天平 上海精密科技有限公司。

### 1.2 实验方法

1.2.1 OSA 淀粉的制备 采用水相法制备大米 OSA 淀粉,参考 JAIN 等<sup>[8]</sup>的方法并稍作修改,称取定量大米淀粉悬浮在蒸馏水中制成一定浓度(w/w)淀粉浆料,用 1 mol/L NaOH 溶液调浆液 pH。取质量为淀粉质量 3% 的 OSA,用异丙醇稀释 5 倍,缓慢加入到淀粉浆料,整个反应过程保持温度和 pH 稳定(用 1 mol/L NaOH 溶液调 pH)。反应结束后,用 1 mol/L HCl 将淀粉浆液的 pH 调至 6.0,将淀粉浆料离心(1500 g、10 min),下层淀粉蒸馏水洗涤 2 次,70%

乙醇洗涤 3 次,得到的 OSA 淀粉在 45 °C 烘箱中干燥,粉碎后过 200 目筛,收集于干燥器中保存。

1.2.2 单因素实验 以取代度(Degree of substitution, DS)为主要考评指标,反应效率(Reaction efficiency, RE)为参考考评指标,参考相关研究<sup>[3-4]</sup>,结合预实验结果,依次考察反应温度、反应 pH、酸酐滴加时间、淀粉浆液浓度对 DS 的影响。固定反应温度 40 °C、淀粉浆液浓度 35%(w/w)、反应 pH8.5、酸酐滴加时间 2 h 中三个因素水平值,对第四个因素进行单因素实验。实验因素条件为反应温度(30、35、40、45、50 °C),反应 pH(7.5、8.0、8.5、9.0、9.5),酸酐滴加时间(2、3、4、5、6 h),淀粉浆液浓度(20%、25%、30%、35%、40%)。

1.2.3 正交试验 在单因素实验结果的基础上,选取反应温度(A)、反应 pH(B)和酸酐滴加时间(C)三个因素,设计正交试验,因素水平见表 1。

表 1 正交试验因素与水平  
Table 1 Factors and level of orthogonal test

水平	因素		
	温度(°C)	pH	酸酐滴加时间(h)
1	35	8.0	2
2	40	8.5	3
3	45	9.0	4

1.2.4 酯化取代度 DS 与反应效率 RE 的测定 取代度反映了添加的 OSA 全部与淀粉反应生成 OSA 淀粉的情况,采用滴定法<sup>[9]</sup>测定,参照李天贵<sup>[10]</sup>的方法。称取 2.000 g(d.b.)大米 OSA 淀粉,分散于 150 mL 2.5 mol/L 的盐酸异丙醇溶液中,搅拌 30 min,加入 150 mL 90% 异丙醇水溶液继续搅拌 10 min。将淀粉液离心(2000 g、10 min),沉淀用 90% 异丙醇反复洗涤离心,直至洗出液无 Cl<sup>-</sup>被检出。将所得沉淀分散于 100 mL 去离子水中,沸水浴 20 min 至溶解。用酚酞作指示剂,迅速用 0.1 mol/L NaOH 溶液滴定至粉红色。取代度计算公式如下:

$$DS = \frac{0.162 \times (A \times M) / W}{1 - [0.209 \times (A \times M) / W]} \quad \text{式 (1)}$$

式中:0.162 是单个葡萄糖残基的摩尔质量(kg/mol);0.209 是 OSA 的摩尔质量(kg/mol);A 是 NaOH 标准溶液的滴定体积(mL);M 是 NaOH 标准溶液的浓度(mol/L);W 是淀粉干基的质量(g)。

反应效率的计算公式如下:

$$RE = \frac{\text{实际取代度}}{\text{理论取代度}} \times 100 \quad \text{式 (2)}$$

1.2.5 抗性 OSA 淀粉的制备 以湿热处理法<sup>[11]</sup>(Heat and moist treat, HMT)制备抗性淀粉,称取 OSA 淀粉 30.0 g(干基)于带盖铝盒中,用喷壶将蒸馏水喷洒到淀粉上,调整水分含量 30%,密封后在 120 °C 的条件下湿热处理 4、8、12、18、24 h,冷却后 45 °C 烘箱烘干、粉碎后过 120 目筛,得到抗性

OSA 淀粉样品,按处理时间将样品分别标记为 HMT4、HMT8、HMT12、HMT18、HMT24。

### 1.2.6 指标测定

1.2.6.1 抗性淀粉含量测定 RS 测定参考 GOÑI 等<sup>[12]</sup>的方法并稍作调整:准确称取淀粉样品 0.500 g,分散于 50 mL HCl-KCl 缓冲液,加入 2 mL 胃蛋白酶(3000 U/mg 的胃蛋白酶 10 g 溶解于 200 mL HCl-KCl 缓冲液(pH1.5)中),37 °C 下恒温振荡 60 min,用 0.1 mol/L Tris-maleata 溶液调节 pH 至 6.9,加入 10 mL 胰  $\alpha$ -淀粉酶溶液,37 °C 水浴振荡 42 h;取出离心(3000 $\times$ g, 10 min),沉淀用蒸馏水洗涤 3 次后,分散于 15 mL 4 mol/L 的 KOH 溶液中,室温振荡至沉淀充分溶解。然后用 2 mol/L 的 HCl 溶液调节 pH 至 4.5~4.8,加 10 mL 淀粉葡萄糖苷酶溶液,在 58 °C 下恒温水浴振荡 60 min 后冷却至室温,取出离心(3000 $\times$ g, 10 min),收集上清液;用蒸馏水洗涤沉淀 3 次,离心后收集合并上清液,定容至 500 mL。

参照 DNS 法<sup>[13-14]</sup>测定上述溶液中的还原糖含量:按照薛慧等<sup>[13]</sup>的方法以 540 nm 处的吸光度为纵坐标,葡萄糖浓度为横坐标制作葡萄糖标准曲线,其回归方程为: $y=13.719x-0.0174, R^2=0.9977$ 。取 1 mL 的上清液于 25 mL 的试管中,加入 1 mL 蒸馏水和 5 mL DNS<sup>[14]</sup>试剂,将各试管摇匀,在沸水浴中加热 5 min 后,用流水迅速冷却,再用蒸馏水定容至 25 mL 测量各溶液的吸光度,利用标准曲线计算出葡萄糖的含量。再根据以下公式计算抗性淀粉含量:

$$\text{抗性淀粉含量(RS, \%)} = M/W \times V \times 0.9 \times 100 \quad \text{式(3)}$$

式中: M 为葡萄糖含量(g/mL,由葡萄糖标准曲线求得); W 为分析样本的干质量=质量 $\times$ (100-含水量)/100 (g); V 为待测液的体积(mL)。

1.2.6.2 溶解性测定 将待测样品配制成质量浓度 1% 的悬浮液,置于 250 mL 带盖三角锥中,于 25 °C 恒温水浴振荡 60 min,将溶液离心(1500 $\times$ g, 15 min)。取上层清液在 105 °C 下烘干至恒重,称量得到已溶解的淀粉质量 A。溶解度按以下公式计算:

$$\text{SA(\%)} = \frac{A}{W} \times 100 \quad \text{式(4)}$$

式中, A 为上清液中溶出物质量(g); W 为样品干重(g)。

1.2.6.3 凝沉性测定 凝沉性测定参考尹沾合等<sup>[15]</sup>的方法,在带有回流搅拌装置的三口烧瓶中加入质量分数为 1% 的淀粉乳 95 °C 保温 30 min 水浴加热糊化,冷至室温得糊化液。取 25 mL 糊化液加入具塞刻度试管中室温静置,每经 24 h(1 d)记录具塞试管中上层清液体积数,该数即为凝沉性。

1.2.6.4 膨胀度测定 将待测样品配制成质量浓度 1% 的悬浮液,置于 250 mL 带盖三角锥中,置于 50~90 °C 的不同温度水浴锅恒温振荡 30 min,冷却后将溶液离心(1500 $\times$ g, 15 min)取上层清液在 105 °C 下烘干至恒重,称量记为 A,离心管内的湿淀粉质量记

为 P。按以下公式膨胀度:

$$\text{SP(\%)} = \frac{P}{W(1-SA/100)} \times 100 \quad \text{式(5)}$$

式中: W 为样品干重(g); P 为离心管中沉淀物质量(g)。

1.2.6.5 糊化特性测定 使用 MCR3 流变仪测定淀粉的糊化特性。称取 1.77 g 淀粉样品置于仪器配套的圆心筒系统中,加 16 mL 蒸馏水配置成淀粉浆料进行测定,使用圆心筒转子,前 10 s 转速 960 r/min,使淀粉分散。参数设定参考白婷等<sup>[16]</sup>的方法。

### 1.2.7 淀粉体外消化试验

1.2.7.1 模拟消化液的配制 人工模拟胃液的制备:用 4 mol/L 盐酸溶液调节 0.2%(w/v)NaCl 溶液的 pH 至 2.0,加入一定量的胃蛋白酶,调节浓度为 3 mg/mL。人工模拟肠液的制备:将复合胰酶和胆盐均匀分散于磷酸缓冲液(0.1 mol/L, NaH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>-Na<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub>, pH7.0)中,复合胰酶和胆盐浓度分别为 2 mg/mL 和 4.5 mg/mL,再添加淀粉葡萄糖苷酶(100 U/mg)使浓度为 400 U/mL,用 1 mol/L 的 NaOH 溶液调 pH 至 7.4。

1.2.7.2 淀粉的体外消化 两段式体外消化参考俞安珍<sup>[17]</sup>和 LOPEZ 等<sup>[18]</sup>的方法并稍作修改。准确称取 0.100 g 样品 13 份置于离心管中,编号 1~13,加入 2 mL 蒸馏水,于 95 °C 水浴振荡 30 min 后自然冷却。

胃段消化:样品用 0.2 mol/L HCl 溶液调节 pH 至 2.0。加入 2 mL 模拟胃液,混均后在 37 °C 下恒温水浴振荡 30 min。在 5、15、30 min 时依次取出 1~3 号管,加入 3 mL 95% 乙醇灭酶后,离心(4000 r/min, 15 min)后取上清液 1 mL,参照薛慧等<sup>[13]</sup>的方法测定还原糖含量,计算消化水解率。

小肠段消化:其余样品迅速加入适量的 0.01 mol/L NaOH 溶液将混合液 pH 调至 7.4 左右。加入 4 mL 模拟肠液,混匀后置于 37 °C 恒温水浴振荡 150 min。在消化过程中第 10、20、30、40、50、60、90、120、150 及 180 min 时依次取出 4~13 号管,加入 3 mL 95% 乙醇灭酶后,离心(4000 r/min, 15 min)后取上清液 1 mL,同上,计算消化水解率。

在小肠中 20 min 内被消化吸收的淀粉为快速消化淀粉(Rapidly digestible starch, RDS),20~120 min 内被消化吸收的淀粉为慢消化淀粉(Slowly digestible starch, SDS),120 min 内不能被小肠消化吸收的淀粉称为 RS。

## 1.3 数据处理

每组实验重复 3 次,数据表示为“平均值 $\pm$ 标准偏差”,采用 SPSS 22 对数据进行统计分析,采用最小显著差数法在显著性水平为  $P<0.05$  的条件下进行显著性检验,用 Origin2019 绘图。

## 2 结果与分析

### 2.1 酯化条件对 DS 和 RE 的影响

反应温度、反应 pH、酸酐滴加时间、淀粉浆液浓度对 DS 和 RE 的影响见图 1。

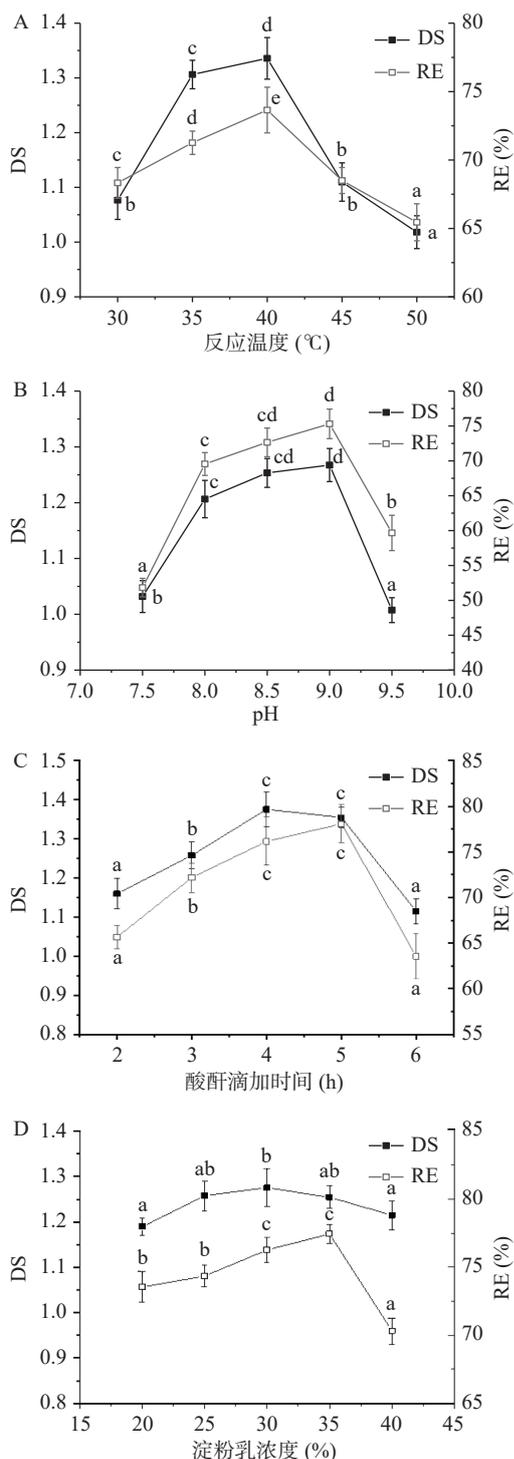


图1 酯化条件对取代度(DS)和反应效率(RE)的影响

Fig.1 Effect of esterification conditions on degree of substitution and reaction efficiency

注: 不同小写字母表示同一指标差异显著( $P < 0.05$ ); A、B、C、D分别表示温度、pH、酸酐滴加时间及淀粉浆液浓度对DS和RE的影响。

图 1A 为温度的影响, 当温度较低时, DS 和 RE 均随着温度升高显著增加( $P < 0.05$ ), 在 40 °C 达到最大, DS 为 1.3407, RE 为 73.5%。当温度超过 40 °C 时, DS 和 RE 降低。升高温度可促进体系中淀粉的溶解和膨胀以及 OSA 在体系中扩散, 与淀粉分子接触增加, 从而提高了酯化反应的效率<sup>[4]</sup>, 同时高温条件下, 淀粉发生糊化、酸酐水解加速并且与碱

试剂反应<sup>[4, 19]</sup>, 使得 OSA 淀粉的 DS 和 RE 降低。图 1B 为 pH 的影响, 当体系 pH9.0 时, OSA 淀粉的 DS 和 RE 最高, 分别为 1.2588 和 75.1%。酯化反应过程中, 淀粉分子的羟基需要在碱性条件下活化, 当 pH 较低接近中性时, 羟基活化不完全, pH 升高, DS 和 RE 相应升高。当 pH 达到 9.5 时, 酸酐先与碱发生反应, 与淀粉分子的接触进一步降低, 并且酯在碱性的条件下, 容易发生水解, 溶液碱性过强也会使部分淀粉糊化, 使淀粉浆液粘度上升降低 OSA 与淀粉分子接触<sup>[20-21]</sup>。图 1C 为酸酐滴加时间的影响, DS 和 RE 随着酸酐滴加时间的延长逐渐升高, DS 在滴加时间 4 h 达到最大值。酸酐开始滴入反应体系时, 可以充分和淀粉分子接触反应, 持续滴加酸酐可以促进反应正向进行; 反应到后期, 淀粉酯的水解反应也在同时进行, 导致 DS 下降。滴加时间为 5 h 时, 产品取代度开始下降。由于酸酐滴加完成后, 还会继续反应一段时间, 考虑到实验持续的时间, 因此正交因素水平以 3 h 为中心。由图 1D 可看出, DS 随淀粉浆液浓度先升高后降低, 淀粉浆液浓度在 25%~35% 时 DS 变化不显著( $P > 0.05$ ), DS 值在 1.19 至 1.27 之间小幅变化。RE 在浓度为 35% 时达到最大 77.1%, 当淀粉乳质量分数增加到一定程度, 反应体系中水分含量相对减少, 淀粉颗粒会出现收缩, 这不利于 OSA 进入到淀粉颗粒的无定形区<sup>[21]</sup>。故选择 30% 的淀粉乳浓度用于后续实验。

## 2.2 大米辛烯基琥珀酸制备工艺优化

在单因素实验结果的基础上, 淀粉乳浓度为 30%, 选取反应温度(A)、反应 pH(B)和酸酐滴加时间(C)三个因素, 设计  $L_9(3^4)$  正交优化试验, 正交试验结果见表 2。

表 2 正交试验结果  
Table 2 Results of orthogonal test

序号	A	B	C	DS
	反应温度	pH	酸酐滴加时间	
1	1	1	1	0.7543
2	1	2	2	1.1746
3	1	3	3	1.2656
4	2	1	2	1.3033
5	2	2	3	1.3803
6	2	3	1	1.3875
7	3	1	3	0.9652
8	3	2	1	1.0425
9	3	3	2	1.1588
$K_1$	3.1945	3.0228	3.2934	
$K_2$	4.0711	3.5974	3.6367	
$K_3$	3.1665	3.8028	3.6111	
$k_1$	1.0648	1.0076	1.0978	
$k_2$	1.3570	1.1991	1.2122	
$k_3$	0.4523	1.2676	1.2037	
R	0.6115	0.26	0.1144	

对表 2 结果进行极差分析可知, 三个因素对取代度 DS 影响大小的顺序为反应温度>反应 pH>酸

酞滴加时间。以取代度为指标确定酯化反应的最佳水平为  $A_2B_3C_2$ , 即反应温度  $40\text{ }^\circ\text{C}$ 、反应 pH9.0、酸酞滴加时间 3 h。由于此最优工艺组合并未出现在正交方案里, 因此需要按照此条件进行验证试验, 验证结果表明按照  $A_2B_3C_2$  工艺条件制得的 OSA 淀粉取代度 DS 为  $1.3915\pm 0.045$ , 平均反应效率 RE 为 78.2%, 高于正交实验结果的最大值 1.3875, 对应水平组合为  $A_2B_3C_1$ 。将此条件制备的 OSA 淀粉样品标记为 DS-1.39。

### 2.3 酯化及湿热处理后抗性淀粉含量的变化

大米淀粉(Rice starch)、OSA 淀粉(DS-1.39)及不同湿热处理时间抗性淀粉含量见图 2。

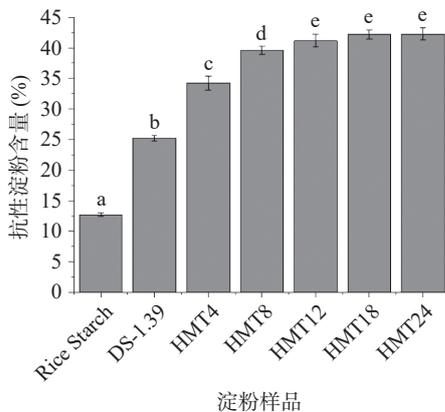


图 2 湿热时间对抗性淀粉含量的影响

Fig.2 Influence of heat-moisture treatment time on resistant starch content

注: 不同小写字母表示差异显著( $P<0.05$ ), 图 3 同。

原大米淀粉的抗性淀粉含量为 12.7%, 从图 2 中可以看出, 酯化反应获得的 OSA 淀粉其抗性淀粉含量增加到 25.2%, 这是因为淀粉酯化后引入 OSA 基团, 在  $\alpha$ -淀粉酶与葡萄糖单元的糖苷键之间形成空间位阻, 两者结合能力下降, 淀粉的可消化性下降, 使 OSA 淀粉抗性增加<sup>[22]</sup>, 这与 HEACOCK 等<sup>[23]</sup>提出的 OSA 酯化反应可以用来制备抗性淀粉的结论相似。

将含水量 30% 的 OSA 淀粉在  $120\text{ }^\circ\text{C}$  条件下湿热处理 4 h 后, 淀粉样品中的抗性淀粉含量显著升高至 34.2% ( $P<0.05$ ), 并且随着湿热时间的增加, 抗性淀粉的含量也逐步增加, 处理 18 h 后基本平缓, 达到 42.2%。这是因为在高水分和高热的共同作用下, 大米淀粉团粒内无定形区中淀粉链之间的相互作用发生改变<sup>[24]</sup>, 使淀粉直链淀粉含量增加。另一方面, 湿热处理使体系自由能变大, 淀粉分子链形成新的微晶和单螺旋结构, 增加淀粉分子的稳定性, 提高淀粉的抗酶解能力<sup>[5]</sup>。HUNG<sup>[25]</sup>对红米进行湿热处理, 发现红米 RS 含量同湿热处理的含水量与加热温度呈正相关。

### 2.4 酯化及湿热处理对淀粉溶解性和凝沉性的影响

大米淀粉、OSA 淀粉及不同湿热处理时间淀粉的溶解性和凝沉性见图 3。

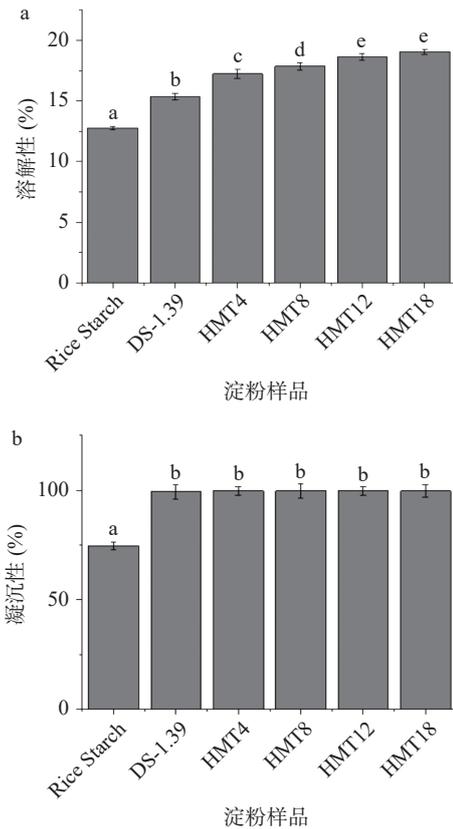


图 3 湿热处理时间对淀粉溶解性和凝沉性的影响

Fig.3 The effect of moisture heat treatment time on starch solubility and retrogradation

注: a: 淀粉的溶解性; b: 淀粉的凝沉性。

由图 3 可知, 与原大米淀粉相比, 酯化反应后, OSA 淀粉的溶解性和凝沉性都显著升高 ( $P<0.05$ ), 而湿热处理对 OSA 淀粉的凝沉性没有显著影响 ( $P>0.05$ )。由于酯化反应引入了亲水基团, 淀粉溶解性由 13% 升高到 17%。随着湿热处理时间增加, 溶解性进一步增加, 可能是湿热处理过程中, 淀粉的氢键结构遭到破坏, 分子链的自由度增大, 特别是非晶区的分子链, 而辛烯基琥珀酸淀粉酯的亲水基团多接枝于非晶区分子链上<sup>[24-26]</sup>, 从而使亲水基团伸展, 与水分子的结合增强。有研究表明, 酯化反应主要发生在淀粉非结晶区分子间聚集程度较低的位置, 溶解性的上升可能归因于非晶区直链淀粉的溶解<sup>[27]</sup>。

大米淀粉酯化后凝沉性从 74.6% 提高到 98.1%, 即 OSA 淀粉糊室温存放 24 h 后基本无水析出。酯化后, 大米淀粉分子接上的 OSA 基团具有较强的疏水性, 阻止了淀粉分子间氢键的形成, 促进淀粉分子间相互排斥<sup>[28]</sup>, 有效地阻碍了淀粉糊的凝沉现象。

### 2.5 酯化及湿热处理对淀粉膨胀度的影响

淀粉的膨胀度反映了淀粉的溶胀能力, 大米淀粉、OSA 淀粉及不同湿热处理时间抗性淀粉的膨胀度见表 3。

从表 3 可以看出, 大米淀粉酯化反应后, 膨胀度显著增加 ( $P<0.05$ )。这是由于酯化反应引入亲水基团, 弱化了淀粉分子之间的作用力, 使水分子更易穿

表3 湿热处理时间对淀粉膨胀度的影响  
Table 3 The influence of heat-moisture treatment time on starch swelling force

温度(°C)	膨胀度SP(%)					
	Rice Starch	DS-1.39	HMT4	HMT8	HMT12	HMT18
50	6.76±0.59 <sup>a</sup>	8.66±0.30 <sup>c</sup>	10.65±0.76 <sup>d</sup>	10.76±0.18 <sup>d</sup>	8.93±0.37 <sup>c</sup>	7.76±0.50 <sup>b</sup>
60	7.52±0.48 <sup>b</sup>	11.19±0.37 <sup>c</sup>	11.62±0.48 <sup>d</sup>	10.21±0.58 <sup>c</sup>	7.39±0.28 <sup>b</sup>	6.52±0.54 <sup>a</sup>
70	12.85±0.63 <sup>bc</sup>	17.24±0.45 <sup>d</sup>	15.16±0.53 <sup>c</sup>	12.53±0.47 <sup>b</sup>	11.74±0.66 <sup>a</sup>	10.88±0.36 <sup>a</sup>
80	15.23±0.87 <sup>c</sup>	19.45±0.56 <sup>d</sup>	18.56±0.34 <sup>d</sup>	14.10±0.41 <sup>b</sup>	13.26±0.34 <sup>ab</sup>	12.58±0.59 <sup>a</sup>
90	17.45±0.60 <sup>c</sup>	23.05±0.54 <sup>d</sup>	19.45±0.49 <sup>c</sup>	15.47±0.58 <sup>b</sup>	13.78±0.48 <sup>a</sup>	13.81±0.55 <sup>a</sup>

注: 同行不同小写字母表示差异显著(P<0.05)。

过被酯化的直链淀粉所在的非结晶区,从而渗透到颗粒内部,使淀粉颗粒发生膨胀<sup>[29-30]</sup>。而湿热处理后,膨胀度随着处理时间的增加逐渐降低,这可能是因为在高温高湿度的条件下,淀粉的支链淀粉发生断裂,形成较短的直链淀粉,淀粉内的分子链相互交织程度加大,键能增加,淀粉的双螺旋结构更加紧密,不利于淀粉糊化后从颗粒中溶出,从而降低了淀粉的膨胀度<sup>[31]</sup>。此外在湿热处理处理之后,淀粉中的脂质复合物增多,抑制淀粉颗粒的膨胀<sup>[31-32]</sup>。

2.6 酯化及湿热处理对淀粉糊化特性的影响

如表4所示,大米淀粉脂化处理及湿热处理后,糊化特性均出现较大改变。

与原大米淀粉相比,DS-1.39的峰值黏度和最终黏度显著增加(P<0.05),峰值黏度反映淀粉的持水性,最终黏度反映淀粉形成凝胶的强度,表明OSA淀粉持水性明显增加,凝胶强度增强<sup>[33]</sup>;崩解值和回升值上升表明OSA淀粉热稳定性降低,热糊的抗剪切力下降;OSA淀粉的糊化温度有所下降,可能是因为OSA基团接入后,部分淀粉分子因带有同种负电荷而相互排斥,结构变松散,水分子更易渗入,加热使颗粒裂解,在较低的温度下熔融糊化,且DS值越大,OSA基团越多,糊化温度越低<sup>[1]</sup>。宋晓燕等<sup>[34]</sup>发现不同取代度的糯玉米淀粉酯的糊化温度随着取代度的升高而降低。

OSA淀粉湿热处理4h后,峰值黏度、最终黏度和回升值显著升高(P<0.05),但随着湿热处理时间延长,其值又逐渐降低。研究表明,湿热处理后淀粉的糊化性质的变化不仅与淀粉分子链的结构有关,还与其聚集态结构的形态密切相关<sup>[34-35]</sup>。长时间湿热处理使OSA淀粉糊化温度升高,峰值黏度、最终黏度

以及崩解值下降,表明湿热处理后,淀粉糊的稳定性增强。

2.7 抗性OSA淀粉体外消化试验

大米淀粉、OSA淀粉及不同湿热处理时间的抗性OSA淀粉体外消化实验结果如图4所示。前30min为模拟胃液消化,30~180min为模拟肠液消化。从图中可以看出,大米淀粉在经过OSA酯化和后续湿热处理后,在胃肠道的消化总趋势基本相同,淀粉在胃中消化较低(前30min),进入肠道后消化水解率快速上升,在肠道120min后各样品的消化水解率趋于平衡。

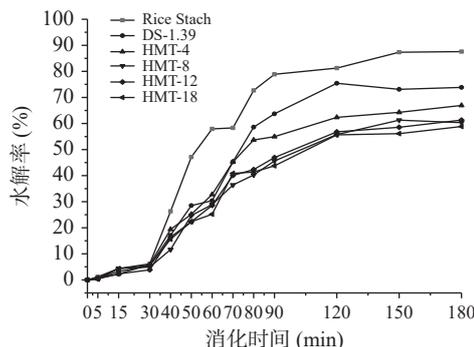


图4 淀粉样品在模拟胃肠液中的消化情况  
Fig.4 Digestion of starch samples in simulated gastrointestinal juice

通过样品的水解率计算得出各淀粉样品的RDS、SDS、RS含量如表5所示,原大米淀粉在胃肠道的最终水解率为87.57%,在模拟肠液中,前20min内水解的快消化淀粉含量为47.15%,120min后仍未消化的淀粉含量为18.76%,与测定的抗性淀粉含量12.7%相符。经过酯化后,DS-1.39的抗消化性显

表4 湿热处理对糊化特性的影响  
Table 4 The influence of heat-moisture treatment on gelatinization characteristics

淀粉样品	峰值黏度(Cp)	谷值黏度(Cp)	最终黏度(Cp)	崩解值(Cp)	回升值(Cp)	糊化温度(°C)
Rice Starch	2193.48±18.23 <sup>a</sup>	1820.89±23.27 <sup>a</sup>	2928.34±56.17 <sup>a</sup>	371.98±4.23 <sup>a</sup>	1107.56±10.34 <sup>c</sup>	80.45±3.32 <sup>a</sup>
DS-1.39	4529.24±32.12 <sup>de</sup>	1815.12±6.12 <sup>a</sup>	3383.42±34.08 <sup>c</sup>	2714.04±10.24 <sup>f</sup>	1568.08±10.23 <sup>c</sup>	75.29±5.21 <sup>ab</sup>
HMT4	4968.87±42.25 <sup>e</sup>	3215.21±12.23 <sup>e</sup>	5814.43±54.11 <sup>e</sup>	1755.17±13.12 <sup>c</sup>	2599.10±23.25 <sup>f</sup>	82.29±1.18 <sup>ab</sup>
HMT8	4495.23±23.11 <sup>d</sup>	2885.84±12.11 <sup>d</sup>	4020.07±34.26 <sup>d</sup>	1608.76±10.21 <sup>d</sup>	1134.45±15.24 <sup>d</sup>	83.14±2.20 <sup>b</sup>
HMT12	4261.26±56.15 <sup>c</sup>	2681.38±39.32 <sup>c</sup>	3352.18±96.26 <sup>c</sup>	1580.54±11.24 <sup>c</sup>	671.44±6.18 <sup>b</sup>	84.45±3.23 <sup>b</sup>
HMT18	3944.00±21.10 <sup>b</sup>	2417.45±21.18 <sup>b</sup>	3037.34±19.16 <sup>b</sup>	1527.46±9.18 <sup>b</sup>	620.10±6.16 <sup>a</sup>	85.91±6.22 <sup>b</sup>

注: 同列不同小写字母表示差异显著(P<0.05)。

著增强,OSA 淀粉的抗消化性来源于 OSA 基团的疏水性和空间位阻,减缓了  $\alpha$ -淀粉酶与淀粉分子的接触<sup>[19,36]</sup>,因此前期消化速率大大降低,随着淀粉的水解,淀粉的结构被破坏后消化速率逐渐加快,最终未消化的淀粉含量为 24.57%,所以酯化主要是降低了快消化淀粉的含量。

表 5 淀粉样品的 RDS、SDS、RS 含量  
Table 5 RDS, SDS, RS content of starch samples

淀粉样品	Rice Starch	DS-1.39	HMT18
RDS含量(%)	47.15±0.64 <sup>c</sup>	28.52±0.53 <sup>b</sup>	22.34±0.5 <sup>a</sup>
SDS含量(%)	34.09±0.25 <sup>b</sup>	46.91±0.3 <sup>c</sup>	33.3±0.32 <sup>a</sup>
RS含量(%)	18.76±0.44 <sup>a</sup>	24.57±0.36 <sup>b</sup>	44.36±0.52 <sup>c</sup>

注:同行不同小写字母表示有显著性差异( $P<0.05$ )。

OSA 淀粉经过湿热 18 h 后,在肠液前 20 min 的消化水解率从 28.52% 降低至 22.34%,证明湿热处理也可以减少部分快消化淀粉,而在模拟肠液中 120 min 之后,该样品消化水解率从 73.1% 降低到 56.11%,因此湿热处理减少的主要为慢消化淀粉<sup>[23]</sup>,湿热处理的 OSA 淀粉的最终消化率为 58.8%,可得到抗性淀粉为 41.2% 的 OSA 淀粉,与直接测定抗性淀粉的结果 42.2% 接近。抗性 OSA 淀粉的抗消化性提高使其在益生菌微胶囊包埋应用中具备了良好的抗消化稳定性<sup>[6,37]</sup>,还可以扩大其在保健食品上的应用途径。

### 3 结论

制备大米 OSA 淀粉的最佳工艺条件为温度 40 ℃、反应 pH 为 9.0、酸酐滴加时间为 4 h、淀粉乳浓度 30%。此工艺条件下制得的 OSA 淀粉的 DS 为 1.3915、RE 为 78.2%。对 OSA 淀粉进行湿热处理 18 h 后,OSA 淀粉的抗性淀粉含量从 25.2% 增加至 42.2%。

酯化后 OSA 淀粉的溶解性、凝沉性和膨胀度均显著优于原大米淀粉,抗性 OSA 淀粉溶解性进一步增加,膨胀度降低;糊化特性测试结果表明,OSA 淀粉经湿热处理后,糊化温度升高,峰值黏度、最终黏度,回升值随湿热处理时间的增加先升高后逐渐降低,但仍显著优于原大米淀粉。消化实验表明抗性 OSA 淀粉在胃肠道的消化水解率大幅下降,经过模拟胃肠液消化 180 min 后水解率为 58.8%。本研究采用 OSA 酯化和湿热处理相结合的方式对大米淀粉进行改性处理制备抗性 OSA 淀粉,淀粉的各种理化性质得到显著改善,对 OSA 淀粉和抗性淀粉的制备及利用提供了参考,也为大米加工利用提供了一种新思路。

### 参考文献

[1] 刘军平,黄素君,陈寅龙,等. 交联辛烯基琥珀酸大米淀粉酯的制备及其糊化性能[J]. 食品工业科技, 2017, 38(24): 142-147. [LIU J P, HUANG S J, CHEN Y L, et al. Preparation of cross-linked octenyl succinate rice starch ester and its gelatinization prop-

erties[J]. Science and Technology of Food Industry, 2017, 38(24): 142-147.]

[2] KELL Y, ALAN L. Chemistry, structure, functionality and applications of rice starch[J]. Journal of Cereal Science, 2016, 70: 291-300.

[3] 王德达,韩蕾,陈海华,等. 辛烯基琥珀酸短直链淀粉酯的制备及性能研究[J]. 食品科技, 2021, 46(5): 219-224. [WANG D D, HAN L, CHEN H H, et al. Preparation and properties of octenyl succinate short amylose ester[J]. Food Science and Technology, 2021, 46(5): 219-224.]

[4] 王海洋,刘洁,刘亚伟,等. 辛烯基琥珀酸淀粉酯的制备及其特性研究[J]. 食品科技, 2017, 42(12): 245-250. [WANG H Y, LIU J, LIU Y W, et al. Preparation and characteristics of octenyl succinate starch ester[J]. Food Science and Technology, 2017, 42(12): 245-250.]

[5] 龚永强,刘静,余振宇,等. 抗性、慢消化淀粉的制备及其控血糖机理的研究进展[J/OL]. 中国粮油学报: 1-16 [2021-09-20]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2864.TS.20210709.1605.004.html>.

[GONG Y Q, LIU J, YU Z Y, et al. Research progress on the preparation of resistant and slow digestion starch and its blood sugar control mechanism[J/OL]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association: 1-16 [2021-09-20]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2864.TS.20210709.1605.004.html>.]

[6] ASHWAR B, GANI A, GANI A, et al. Production of RS4 from rice starch and its utilization as an encapsulating agent for targeted delivery of probiotics[J]. Food Chemistry, 2018, 239(15): 287.

[7] ASHWAR B A, GANI A, SHAH A, et al. Preparation, health benefits and applications of resistant starch—a review[J]. Starch-Stärke, 2016, 68(3-4): 287-301.

[8] JAIN S, WINUPRASITH T, SUPHANTHARIKA M J F H. Design and synthesis of modified and resistant starch-based oil-in-water emulsions[J]. Food Hydrocolloids, 2019, 89(APR.): 153-162.

[9] 李真,宋晓燕,马凤莲. 大米辛烯基琥珀酸淀粉酯中取代基团的分布[J]. 中国食品学报, 2018, 18(11): 246-251. [LI Z, SONG X Y, MA F L. Distribution of substituted groups in octenylsuccinate starch[J]. Chinese Journal of Food Science, 2018, 18(11): 246-251.]

[10] 李天贵. 不同预处理对辛烯基琥珀酸淀粉酯制备及性质的影响[D]. 天津: 天津科技大学, 2018. [LI T G. Effects of different pretreatments on the preparation and properties of starch octenylsuccinate[D]. Tianjin: Tianjin University of Science and Technology, 2018.]

[11] 时超. 湿热处理协同疏水改性藜麦淀粉的制备及其在皮克林乳液中的应用[D]. 沈阳: 沈阳师范大学, 2019. [SHI C. Preparation of hydrophobic modified quinoa starch by moisture heat treatment and its application in pickering emulsion[D]. Shenyang: Shenyang Normal University, 2019.]

[12] GOÑI I, GARCÍA-DIZ L, MAÑAS E, et al. Analysis of resistant starch: A method for foods and food products[J]. Food Chemistry, 1996, 56(4): 445-449.

[13] 薛慧,张国治,吕飞杰,等. 抗性淀粉测定方法的研究[J]. 河南工业大学学报(自然科学版), 2012, 33(4): 57-60. [XUE H, ZHANG G Z, LYU F J, et al. Study on the determination method of resistant starch[J]. Journal of Henan University of Technology (Nat-

- ural Science Edition), 2012, 33(4): 57-60.]
- [14] 赵凯, 许鹏举, 谷广辉. 3,5-二硝基水杨酸比色法测定还原糖含量的研究[J]. *食品科学*, 2008(8): 534-536. [ZHAO K, XU P J, GU G Y. Colorimetric determination of reducing sugar content by 3, 5-dinitrosalicylic acid[J]. *Food Chemistry*, 2008(8): 534-536.]
- [15] 尹沾合, 覃雯, 谢新玲, 等. 辛烯基琥珀酸木薯淀粉酯的糊化特性及热稳定性[J]. *食品工业*, 2016, 37(1): 136-139. [YIN Z H, QIN W, XIE X L, et al. Gelatinization characteristics and thermal stability of octenyl succinate tapioca starch ester[J]. *Food Industry*, 2016, 37(1): 136-139.]
- [16] 白婷, 靳玉龙, 朱明霞, 等. 超声波处理对青稞淀粉理化特性的影响[J/OL]. *中国粮油学报*: 1-10 [2021-09-20]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2864.TS.20210603.1739.071.html>. [BAI T, JIN Y L, ZHU M X, et al. The effect of ultrasonic treatment on the physicochemical properties of highland barley starch[J/OL]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*: 1-10 [2021-09-20]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2864.TS.20210603.1739.071.html>.]
- [17] 俞安珍. RS3型芡实抗性淀粉的制备及其体外消化特性研究[D]. 杭州: 浙江工商大学, 2018. [YU A Z. Preparation of RS3 gorgon resistant starch and its *in vitro* digestion characteristics [D]. Hangzhou: Zhejiang Gongshang University, 2018.]
- [18] LOPEZ-SILVA M, BELLO-PEREZ L A, CASTILLO-RODRIGUEZ V M, et al. *In vitro* digestibility characteristics of octenyl succinic acid (OSA) modified starch with different amylose content[J]. *Food Chemistry*, 2020, 304(30): 125434.
- [19] 张金玲. 辛烯基琥珀酸山药淀粉酯的制备、性能及应用研究[D]. 天津: 天津科技大学, 2018. [ZHANG J L. Preparation, performance and application of octenyl succinate yam starch ester [D]. Tianjin: Tianjin University of Science and Technology, 2018.]
- [20] 苟林. 交联辛烯基琥珀酸碎米淀粉酯的制备及特性研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2012. [GOU L. Preparation and properties of cross-linked octenyl succinic acid broken rice starch ester[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2012.]
- [21] 惠斯特勒 R L, 贝密勒 J N, 帕斯卡尔 E F, 等. 淀粉的化学与工艺学[M]. 中国食品出版社, 1988. [WHISTLER R L, BAY-MILLER J N, PASCAL E F, et al. The chemistry and technology of starch[M]. China Food Press, 1988.]
- [22] AI Y, NELSON B, BIRT D F, et al. *In vitro* and *in vivo* digestion of octenyl succinic starch[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2013, 98(2): 1266-1271.
- [23] HEACOCK P M, HERTZLER S R, WOLF B. The glycemic, insulinemic, and breath hydrogen responses in humans to a food starch esterified by 1-octenyl succinic anhydride[J]. *Nutrition Research*, 2004, 24(8): 581-592.
- [24] 王晓培, 陈正行, 李娟, 等. 湿热处理对大米淀粉理化性质及其米线品质的影响[J]. *食品与机械*, 2017, 33(5): 182-187, 210. [WANG X P, CHEN Z X, LI J, et al. The effect of wet heat treatment on the physical and chemical properties of rice starch and the quality of rice noodles[J]. *Food and Machinery*, 2017, 33(5): 182-187, 210.]
- [25] HUNG P V, BINH V T, NHI P H Y, et al. Effect of heat-moisture treatment of unpolished red rice on its starch properties and *in vitro* and *in vivo* digestibility[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2020: 154.
- [26] ZHANG B, MEI J Q, CHEN B, et al. Digestibility, physico-chemical and structural properties of octenyl succinic anhydride-modified cassava starches with different degree of substitution[J]. *Food Chemistry*, 2017, 229(AUG.15): 136.
- [27] 林全全. 影响 OSA 淀粉乳液中  $\beta$ -胡萝卜素生物可给率的要素分析[D]. 无锡: 江南大学, 2018. [LIN Q Q. Analysis of factors affecting the bioavailability of  $\beta$ -carotene in OSA starch emulsion [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2018.]
- [28] 卞希良. 辛烯基琥珀酸糯米淀粉酯的制备及其性质研究[D]. 雅安: 四川农业大学, 2006. [BIAN X L. Preparation and properties of octenyl succinic glutinous rice starch ester [D]. Ya'an: Sichuan Agricultural University, 2006.]
- [29] 齐国源, 马旻, 刘茜, 等. 不同添加剂对蕨根淀粉凝沉性的影响[J]. *粮食加工*, 2011, 36(1): 34-36. [QI G Y, MA M, LIU Q, et al. Effects of different additives on coagulation of fern root starch[J]. *Grain Processing*, 2011, 36(1): 34-36.]
- [30] 章杰, 竹文礼, 石立芳, 等. 辛烯基琥珀酸淀粉钠的性质及应用[J]. *宁波工程学院学报*, 2020, 32(1): 12-18. [ZHANG J, ZHU W L, SHI L F, et al. The properties and applications of sodium octenyl succinate starch[J]. *Journal of Ningbo Institute of Technology*, 2020, 32(1): 12-18.]
- [31] 张杰. 黑米淀粉的理化性质及湿热处理研究[D]. 南宁: 广西大学, 2019. [ZHANG J. Study on the physicochemical properties and heat treatment of black rice starch [D]. Nanning: Guangxi University, 2019.]
- [32] ADEBOWALE K O, LAWAL O S J F H. Microstructure, physicochemical properties and retrogradation behaviour of *Mucuna pruriens* starch on heat moisture treatments[J]. *Food Hydrocolloids*, 2003, 17(3): 265-272.
- [33] 王日思, 万婕, 刘成梅, 等. 不同分子量大豆可溶性膳食纤维对大米淀粉糊化及流变性质的影响[J]. *食品工业科技*, 2016, 37(6): 124-127, 132. [WANG R S, WAN J, LIU C M, et al. Effects of soybean soluble dietary fiber with different molecular weights on the gelatinization and rheological properties of rice starch[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2016, 37(6): 124-127, 132.]
- [34] 宋晓燕, 阮晖, 许琼, 等. 糯玉米辛烯基琥珀酸淀粉酯的制备及其 RVA 谱特性分析[J]. *中国粮油学报*, 2006(1): 55-59. [SONG X Y, RUAN H, XU Q, et al. Preparation of waxy corn starch octenyl succinate and analysis of its RVA spectrum characteristics[J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2006(1): 55-59.]
- [35] 王宏伟, 丁江涛, 张艳艳, 等. 湿热处理对薏米淀粉聚集态结构及糊化特性的影响[J]. *食品科学*, 2020, 41(17): 120-126. [WANG H W, DING J T, ZHANG Y Y, et al. Effect of heat-moisture treatment on the aggregation structure and gelatinization characteristics of barley starch[J]. *Food Science*, 2020, 41(17): 120-126.]
- [36] HOOVER R. The impact of heat-moisture treatment on molecular structures and properties of starches isolated from different botanical sources[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2010, 50(9): 835-847.
- [37] HE J, JIE L, ZHANG G J B. Slowly digestible waxy maize starch prepared by octenyl succinic anhydride esterification and heat-moisture treatment: Glycemic response and mechanism[J]. *Biomacromolecules*, 2008, 9(1): 175-184.