

杨盛茹, 张秋双, 温许康, 等. 小麦淀粉-脂质复合物的制备及其理化特性[J]. 江苏农业学报, 2024, 40(12): 2377-2386.  
doi:10.3969/j.issn.1000-4440.2024.12.021

## 小麦淀粉-脂质复合物的制备及其理化特性

杨盛茹<sup>1</sup>, 张秋双<sup>2</sup>, 温许康<sup>1</sup>, 肖文慧<sup>1</sup>, 吴凯歌<sup>1</sup>, 邹建<sup>1</sup>, 牛雯菲<sup>1</sup>, 张镡月<sup>1</sup>,  
段俊<sup>1</sup>, 侯银臣<sup>1</sup>

(1.河南牧业经济学院食品与生物工程学院, 河南 郑州 450046; 2.河南省兽药饲料监察所, 河南 郑州 450001)

**摘要:** 本研究以复合率为指标, 探索小麦淀粉-脂质复合物制备的最佳工艺, 并对小麦淀粉-脂质复合物的结构、消化特性和溶解度、膨胀率、冻融性等理化特性进行了分析。结果表明, 最适于与小麦淀粉复合的脂质为月桂酸。最佳复合条件为, 复合时间 66 min, 温度 75 ℃, 脂质添加量 5%, 小麦淀粉与蒸馏水的质量体积比(料液比) 1:10, 该条件下小麦淀粉-月桂酸复合物的复合率为 88.74%。小麦淀粉-月桂酸复合物快速消化淀粉(RDS)含量显著低于小麦淀粉( $P<0.05$ ), 慢消化淀粉(SDS)含量和抗性淀粉(RS)含量显著高于小麦淀粉( $P<0.05$ )。在复合时间为 66 min 时, 小麦淀粉-月桂酸复合物中抗性淀粉和慢消化淀粉含量最高, 快速消化淀粉含量最低。小麦淀粉-月桂酸复合物溶解性和膨胀率显著低于小麦淀粉( $P<0.05$ ), 在复合时间为 66 min 时, 小麦淀粉-月桂酸复合物溶解性和膨胀率最低。表明该工艺条件下制备得到的小麦淀粉-月桂酸复合物的晶体结构相对致密, 冻融稳定性较高。

**关键词:** 小麦淀粉; 小麦淀粉-脂质复合物; 理化特性

**中图分类号:** S512.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2024)12-2377-10

## Preparation and physicochemical properties of the wheat starch-lipid complex

YANG Shengru<sup>1</sup>, ZHANG Qiushuang<sup>2</sup>, WEN Xukang<sup>1</sup>, XIAO Wenhui<sup>1</sup>, WU Kaige<sup>1</sup>, ZOU Jian<sup>1</sup>,  
NIU Wenfei<sup>1</sup>, ZHANG Puyue<sup>1</sup>, DUAN Jun<sup>1</sup>, HOU Yinchen<sup>1</sup>

(1. College of Food and Bioengineering, Henan University of Animal Husbandry and Economy, Zhengzhou 450046, China; 2. Henan Province Institute of Veterinary Drug and Feed Control, Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** In this study, the optimum technology for preparation of the wheat starch-lipid complex was explored with the complex rate as the index, and the structure, digestibility, solubility, swelling rate and freeze-thaw property of the wheat starch-lipid complex were analyzed. The results showed that lauric acid was the most suitable lipid to compound with wheat starch. The optimum compound conditions were compound time 66 min, temperature 75 ℃, lipid content 5%, mass/volume ratio of wheat starch to distilled water 1:10. Under these conditions, the complex rate of the wheat starch-lauric

acid complex was 88.74%. The content of rapidly digestible starch (RDS) of the wheat starch-lauric acid complex was significantly lower than that of wheat starch ( $P<0.05$ ), while the contents of slowly digestible starch (SDS) and resistant starch (RS) were significantly higher than those of wheat starch ( $P<0.05$ ). The content of RS and SDS was the highest, and the content of rapidly digestible starch was the lowest in the complex of wheat starch-lauric acid at 66 min. The solubility and swelling

收稿日期: 2024-01-29

基金项目: 河南省科技攻关项目(232102111060); 中国工程科技发展  
战略河南研究院 2023 年战略咨询研究项目  
(2023HENYB01); 河南牧业经济学院食品科学与工程重点  
学科项目(XJXK202203)

作者简介: 杨盛茹(1988-), 女, 河南商丘人, 博士研究生, 讲师, 主要  
研究方向为天然活性产物。(E-mail) 81692@hnuah.edu.  
cn

通讯作者: 侯银臣, (E-mail) 80891@hnuah.edu.cn

rate of the wheat starch-lauric acid complex were significantly lower than those of wheat starch ( $P<0.05$ ). The solubility and swelling rate of the wheat starch-lauric acid complex were the lowest at 66 min. The results showed that the crystal structure of the prepared wheat starch-lauric acid complex was relatively compact, and its freeze-thaw stability was high.

**Key words:** wheat starch; wheat starch-lipid complex; physicochemical properties

小麦是世界上最重要的谷类作物<sup>[1]</sup>,小麦制品提供的能量占全球人口能量摄入的 20%<sup>[2]</sup>。淀粉是人体主要能量来源<sup>[3]</sup>,小麦胚乳的主要成分就是淀粉,小麦胚乳的营养成分对食品质量和人类健康有重要影响。淀粉在口腔或肠胃内被消化<sup>[4]</sup>,最终水解成葡萄糖,导致胰岛素和血糖水平升高<sup>[5]</sup>。糖尿病和肥胖症人数逐年增加<sup>[6]</sup>,淀粉类食物会引发血糖升高,因此糖尿病患者对淀粉类食物的摄入量受到严格控制<sup>[7-8]</sup>,此外碳水化合物摄入过多也会影响人体健康<sup>[9]</sup>。因此,开发一种能降低淀粉消化率的方法具有重要意义<sup>[10]</sup>。

淀粉可分为慢消化淀粉(SDS)、快速消化淀粉(RDS)和抗性淀粉(RS)<sup>[11]</sup>。RDS 在小肠中被快速吸收利用,导致血糖快速上升;SDS 在小肠中被缓慢消化,血糖上升缓慢;RS 在大肠中被微生物发酵为短链的脂肪酸,不会被分解成葡萄糖。SDS 和 RS 都能够降低血糖指数<sup>[12]</sup>。RDS 含量较低,SDS 和 RS 含量较高的淀粉类食物对糖尿病患者健康有益<sup>[13-14]</sup>。RS 包括 RS1、RS2、RS3、RS4、RS5 5 种亚型,每种亚型具有不同的营养特性<sup>[15-16]</sup>。RS5 由淀粉与脂质复合而成,与纯淀粉相比,RS5 在肠道中消化速率较慢<sup>[17-18]</sup>。淀粉-脂质复合物对预防慢性疾病具有积极作用,因此受到广泛关注<sup>[19]</sup>。淀粉-脂质复合物理化性质受诸多因素影响,如直链淀粉的聚合度<sup>[20]</sup>、脂质类型<sup>[21]</sup>、制备方法和复合条件<sup>[22]</sup>。申瑞玲等<sup>[23]</sup>以藜麦淀粉为原料,探索出制备藜麦淀粉-硬脂酸复合物的最佳制备方法为脂质与淀粉比例 1:12(质量比),温度 60℃,添加 14 mL 0.1 mol/L HCl,复合时间 30 min。刘静娜等<sup>[24]</sup>用玉米淀粉作为原料,确定了高压均质制备脂质复合物的最佳工艺为高压均质压力 100 MPa,脂质添加量 0.5%,高压均质 3 次,95℃糊化处理。Lu 等<sup>[25]</sup>用 2 种方法制备了淀粉-脂质复合物,结果表明先对淀粉进行预糊化,再加入脂肪酸更有利于小麦淀粉-脂质复合物的形成。此外,脂质的类型、脂质配体的碳链长度也会影响淀粉-脂质复合物的结构和功能<sup>[26]</sup>。因此本研究拟以小麦淀粉为淀粉原料,在小麦淀粉

溶液中分别添加硬脂酸、棕榈酸、油酸、月桂酸 4 种脂肪酸,制备小麦淀粉-脂质复合物,并进一步比较 4 种小麦淀粉-脂质复合物复合率、形态结构、消化特性、溶解度和膨胀率、冻融性等,以期为制备小麦抗性淀粉提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与试剂

小麦淀粉(食品级),郑州市恋味实业有限公司产品; $\alpha$ -淀粉酶(10 000 U/g),上海源叶生物科技有限公司产品;糖化酶(生物试剂,  $1\times 10^5$  U/g),上海源叶生物科技有限公司产品;硬脂酸、棕榈酸、油酸(分析纯),天津市天力化学试剂有限公司产品;月桂酸(分析纯),天津市大茂化学试剂厂产品。其他所用试剂均是分析纯。

### 1.2 仪器与设备

TDZ4-WS 离心机,上海卢湘仪离心机仪器有限公司产品;BlurStar B 紫外可见分光光度计,北京莱伯泰科仪器股份有限公司产品;HH-6 数显恒温水浴锅,方科仪器(常州)有限公司产品;DF-101S 型磁力搅拌器,巩义市予华仪器有限责任公司产品;IR-Tracer-100 型傅里叶红外光谱分析仪,日本岛津公司产品。

### 1.3 试验方法

**1.3.1 小麦淀粉-脂质复合物的制备** 参照常丰丹<sup>[27]</sup>的方法制备小麦淀粉-脂质复合物并稍加改进。首先称取 2.00 g 小麦淀粉与蒸馏水混合,配制成淀粉悬浮液,45℃恒温水浴振荡 30 min,使淀粉膨胀,加入溶于无水乙醇中的脂肪酸(10%,  $m/v$ ),恒温水浴振荡。然后将复合溶液 3 500 g 离心 15 min,并用 50%乙醇洗涤沉淀物。重复上述操作数次直到上清液澄清,将沉淀物置于烘箱中,40℃干燥,研磨,并过 100 目网筛。

**1.3.2 小麦淀粉-脂质复合物复合率的测定** 复合率的测定参考 Chao 等<sup>[28]</sup>方法并稍作调整。具体操作为称取 0.4 g 复合物样品放入 50 mL 离心管,加蒸馏水至 5 mL,在沸水浴中加热 10 min,冷却后加

入 25 mL 蒸馏水并振荡 2 min, 3 000 r/min 离心 15 min, 取上清液 500  $\mu$ L, 与 15 mL 蒸馏水、2 mL 碘液 (1.3%  $I_2$  和 2.0% KI) 充分混合, 于 620 nm 处测吸光度值。

$$CI = \frac{A_{\text{小麦淀粉}} - A_{\text{小麦淀粉-脂质复合物}}}{A_{\text{小麦淀粉}}} \times 100\% \quad (1)$$

式中,  $CI$  为复合率;  $A$  为吸光度。

**1.3.3 小麦淀粉-脂质复合物的脂质筛选** 根据方法 1.3.1 小麦淀粉脂质复合物制备的方法, 分别选择硬脂酸、棕榈酸、油酸和月桂酸与小麦淀粉复合, 复合后测定小麦淀粉-脂质复合物的复合率, 筛选出最佳的脂质。

**1.3.4 小麦淀粉-脂质复合工艺优化**

**1.3.4.1 单因素试验** 按照方法 1.3.1 小麦淀粉-脂质复合物制备方法制备小麦淀粉-脂质复合物, 根据方法 1.3.2 小麦淀粉-脂质复合物复合率进行单因素试验, 分别探究制备小麦淀粉-脂质复合物的脂肪酸添加量、复合温度、时间、料液比。单因素试验设置如表 1 所示。

表 1 小麦淀粉-脂质复合物单因素试验

Table 1 Single factor test of the wheat starch-lipid complex

水平	因素			
	脂质添加量 (%)	复合温度 (°C)	复合时间 (min)	料液比 (g : mL)
1	1	55	30	1 : 5
2	3	65	60	1 : 10
3	5	75	90	1 : 20
4	7	85	120	1 : 30
5	9	95	150	1 : 40

**1.3.4.2 响应面优化试验** 综合单因素试验结果, 选取添加量、复合温度、复合时间作为因素, 三因素三水平试验设置如表 2 所示。

表 2 响应面试验因素水平

Table 2 Factors and levels in response surface test

水平	因素		
	脂质添加量 (%)	复合温度 (°C)	复合时间 (min)
-1	3	65	30
0	5	75	60
1	7	85	90

## 1.4 复合物的红外光谱分析

将样品与 KBr 按照 1 : 100 (质量比) 混合, 研磨后压成透明薄片, 用 4 000  $\text{cm}^{-1}$  ~ 500  $\text{cm}^{-1}$  光谱扫描, 分辨率为 4  $\text{cm}^{-1}$  [29]。

## 1.5 复合物的理化性质测定

**1.5.1 葡萄糖标准曲线的绘制** 分别取 0 mL、0.2 mL、0.4 mL、0.8 mL、1.0 mL、1.2 mL 葡萄糖标准溶液注入具塞刻度试管 (10 mL), 补充去离子水至 2.0 mL, 加入 4.00 mL 3,5-二硝基水杨酸试剂 (表 3)。沸水浴 5 min 后立即降至室温后定容, 配制的葡萄糖标准溶液分别为 0 mg/mL、0.02 mg/mL、0.04 mg/mL、0.08 mg/mL、0.10 mg/mL、0.12 mg/mL。于 540 nm 处测定吸光值。绘制的标准曲线为:  $Y = 5.75976x - 0.09082$ ,  $R^2 = 0.99878$ 。

表 3 葡萄糖标准曲线

Table 3 Glucose standard curve

序号	葡萄糖标准溶液 (mL)	去离子水 (mL)	3,5-二硝基水杨酸 (mL)
0	0	2.00	4.00
1	0.02	1.80	4.00
2	0.04	1.60	4.00
3	0.08	1.20	4.00
4	0.10	1.00	4.00
5	0.12	0.08	4.00

**1.5.2 体外消化的测定** 取 100 mg 样品, 加入 15 mL 醋酸盐缓冲溶液 (pH 5.2, 0.2 mol/L), 沸水浴 30 min, 冷却后加入  $\alpha$ -淀粉酶 (290 U/mL) 和糖化酶 (15 U/mL) 混合液 10 mL, 37 °C 振荡 120 min, 分别在水解 20 min、120 min 时取 1 mL 酶解液, 加入 4 mL 无水乙醇, 4 000 r/min 离心 20 min, 取上清液 1 mL, 加去离子水至 2 mL, 加入 4 mL DNS 试剂, 沸水浴 5 min 后定容至 10 mL。在波长 540 nm 处分别测定水解 20 min、120 min 酶解液的吸光值, 对照标准曲线, 按照以下公式计算出快速消化淀粉含量 (RDS)、慢消化淀粉含量 (SDS) 和抗性淀粉含量 (RS) [30]。

$$RDS = \frac{G_{20} \times 0.9}{TS} \times 100\% \quad (2)$$

$$SDS = \frac{(G_{120} - G_{20}) \times 0.9}{TS} \times 100\% \quad (3)$$

$$RS = \frac{TS - (G_{120} + G_{20})}{TS} \times 100\% \quad (4)$$

式中,  $G_{20}$  为淀粉酶水解 20 min 产生的葡萄糖量 (mg);  $G_{120}$  为淀粉酶水解 120 min 产生的葡萄糖量 (mg);  $TS$  为样品中总淀粉量 (mg)。

### 1.5.3 淀粉-脂质复合物溶解度和膨胀率的测定

称取 0.5 g 样品加入 25 mL 蒸馏水。在 50 ℃、60 ℃、70 ℃、80 ℃、90 ℃ 的条件下振荡 30 min, 然后冷却至 25 ℃, 3 000 r/min 离心 15 min, 取上清液, 于 105 ℃ 干燥 120 min<sup>[31]</sup>。

$$\text{溶解度} = C/M \times 100\% \quad (5)$$

$$\text{膨胀度} = W/M \times 100\% \quad (6)$$

式中,  $C$  是干燥上清液后残余淀粉量, 单位 g;  $M$  是样品量, 单位 g;  $W$  为沉淀量, 单位 g。

1.5.4 淀粉-脂质复合物冻融稳定性的测定 取样品 1 g, 加入 16 mL 去离子水, 置于水浴锅中沸水浴 30 min 后, 置于 10 mL 预先称重的离心管中, 放入 -20 ℃ 冰箱中冷冻 24 h, 在 30 ℃ 水浴锅中解冻 4 h, 将离心管在 1 500 g 下离心 15 min, 弃上清液。冻融循环重复 3 次, 计算析水率。

$$\text{析水率} = \frac{W}{M} \times 100\% \quad (7)$$

式中,  $W$  为析出水分的重量, 单位 g;  $M$  为总样品重量, 单位 g。

## 1.6 试验数据处理

试验数据用 3 次试验平均值 ± 标准差表示, 用 SPSS 软件分析处理试验数据,  $P < 0.05$  表示差异显著。

## 2 结果与分析

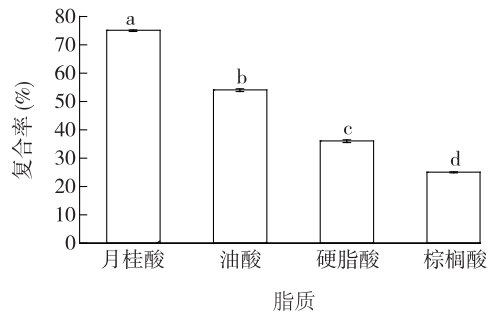
### 2.1 脂质的筛选

硬脂酸、棕榈酸、油酸和月桂酸的碳链长度不相同, 因此复合率也不相同。由图 1 可知, 在相同复合条件下 (复合温度 75 ℃, 复合时间 30 min, 料液比 1 : 10, 脂质添加量 5%), 月桂酸的复合率显著高于油酸、硬脂酸、棕榈酸 ( $P < 0.05$ ), 月桂酸的复合率为 74.9%。复合率与脂质的碳链长度呈负相关, 脂质的碳链越长, 空间位阻也会增大, 脂质难以进入长碳链淀粉颗粒的内部, 与淀粉颗粒结合。相反, 脂质的碳链越短, 则脂质受到的空间位阻就越小, 越容易与淀粉颗粒结合<sup>[32]</sup>, 月桂酸的碳链较短, 仅有 12 个碳原子。

### 2.2 单因素试验结果

#### 2.2.1 月桂酸添加量对复合率的影响

分别添加

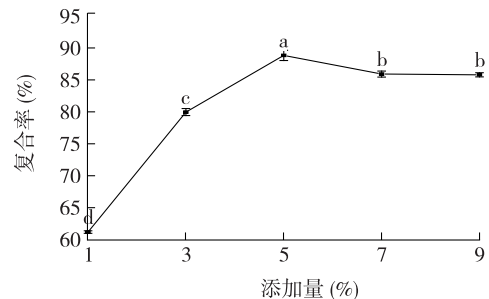


图柱上不同小写字母表示差异显著 ( $P < 0.05$ )。

图 1 不同脂质对复合率的影响

Fig.1 Effects of different lipids on the complex rate

1%、3%、5%、7%、9% 月桂酸, 由图 2 可知, 当月桂酸添加量为 1%~5%, 复合率随着脂质添加量的增加而升高, 当月桂酸添加量为 5%, 复合率达到最大值, 为 87.8%。当月桂酸添加量为 5%~9%, 复合率随着脂质添加量的增加逐渐下降并趋于稳定。这是因为随着脂质添加量的增加, 淀粉颗粒与脂质结合度会越来越大, 随着脂质添加量的进一步增多, 多余的脂质分子难以进入淀粉颗粒的内部, 因此复合率趋于稳定。



折线上不同小写字母表示差异显著 ( $P < 0.05$ )。

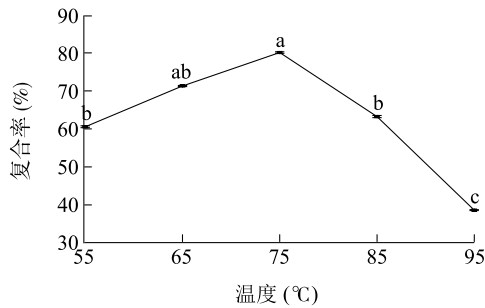
图 2 月桂酸添加量对复合率影响

Fig.2 Effects of addition amount of lauric acid on the complex rate

2.2.2 复合温度对复合率的影响 由图 3 可知, 当复合温度为 55~75 ℃, 随着温度的升高, 复合率不断升高, 复合温度为 75 ℃ 时, 复合率最高, 为 80%。当复合温度为 75~95 ℃, 随着复合温度的升高复合率下降。这是因为温度过高会导致乙醇挥发, 淀粉-脂质复合物的双螺旋结构被破坏, 复合物结构内部的疏水基团外露, 脂肪酸脱落, 复合率降低。因此, 随着温度的升高, 复合率总体呈先上升后下降的趋势<sup>[33]</sup>。

2.2.3 复合时间对复合率的影响 由图 4 可知, 当复



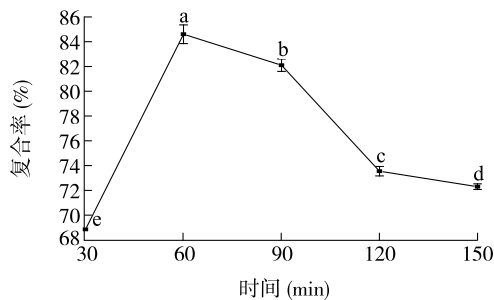


折线上不同小写字母表示差异显著( $P<0.05$ )。

图3 温度对复合率的影响

Fig.3 Effects of temperature on the complex rate

合时间为30~60 min,复合率随着复合时间的延长而升高。复合时间为60 min时,复合率最大,为84.6%。当复合时间为60~150 min,复合率随着复合时间的延长而下降。这是因为随着复合时间的延长,小麦淀粉与月桂酸接触更加充分,复合率升高。但是当复合时间过长,月桂酸倾向于自聚,不与小麦淀粉形成复合物,从而导致复合率降低。



折线上不同小写字母表示差异显著( $P<0.05$ )。

图4 复合时间对复合率的影响

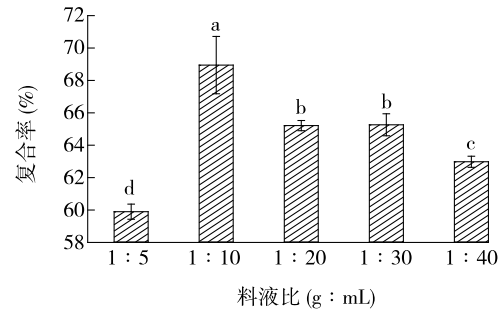
Fig.4 Effects of complex time on the complex rate

**2.2.4 料液比对复合率的影响** 料液比为小麦淀粉与蒸馏水的质量体积比。由图5可知,料液比为1:10时复合效果较好,复合率显著高于料液比为1:5、1:20、1:30、1:40时。经过显著性分析,选择脂质添加量、复合温度、复合时间3个因素进行优化。

### 2.3 响应面试验结果

根据 Box-Behnken 中心组合设计原理,响应面试验结果如表4所示。

对线性模型、两因子交互作用模型、二阶效应模型进行方差分析。如表5所示,二阶效应模型显著( $P<0.01$ ),失拟项不显著( $P>0.05$ ),因此选择二阶效应模型。



图柱上不同小写字母表示差异显著( $P<0.05$ )。

图5 料液比对复合率的影响

Fig.5 Effects of solid-liquid ratio on the complex rate

表4 响应面试验设计及结果

Table 4 Experimental design and results of response surface test

编号	因素			复合率 (%)
	$X_1$ (%)	$X_2$ (°C)	$X_3$ (min)	
1	7	85	60	82.30±0.10
2	5	75	60	87.90±0.06
3	5	75	60	87.50±0.30
4	5	75	60	88.30±0.04
5	3	65	60	80.60±0.40
6	3	75	90	80.70±0.06
7	7	65	60	81.30±0.06
8	5	75	60	88.90±0.27
9	5	65	90	77.94±0.45
10	7	75	30	77.90±0.55
11	7	75	90	83.50±0.07
12	5	75	60	89.50±0.58
13	5	85	90	83.47±0.67
14	3	75	30	77.53±0.45
15	5	65	30	78.15±0.39
16	3	85	60	80.98±0.08
17	5	85	30	77.43±0.02

$X_1$ :脂质添加量; $X_2$ :复合温度; $X_3$ :复合时间。

利用 DesignExpert8.0.6.1 软件对表4中的试验数据进行二次多项回归拟合分析,得到回归模型 $Y = -153.550 00 + 7.216 88X_1 + 5.564 87X_2 + 0.970 75X_3 + 7.750 00 \times 10^3 X_1 X_2 + 0.030 38X_1 X_3 + 0.015 63X_2 X_3 - 0.808 12X_1^2 - 0.038 93X_2^2 - 0.052 80X_3^2$ 。方差分析结果如表6所示,该模型 $F=43.93$ , $P<0.000 1$ ,表明该方程可以在任何变量值的组合下进行预测。该模型中 $X_3$ 为极显著影响因素( $P<0.01$ ),通过 $F$ 检验,三因素对

复合率的影响由大到小依次为 $X_3 > X_2 > X_1$ 。失拟项为 1.432 7,  $P=0.357 7$ , 表明失拟项不显著, 试验误差较小, 因此该模型能对小麦淀粉-脂质复合率进行有效的预测和分析。

表 5 不同模型分析结果

Table 5 Analysis results of different models

模型	模型 $P$ 值	失拟项 $P$ 值	$R^2$
线性模型	0.647 4	0.001 1	-0.088 7
两因子交互作用模型	0.928 6	0.000 6	-0.355 2
二阶效应模型	<0.000 1	0.357 7	0.960 2

表 6 方差分析结果

Table 6 Results of variance analysis

方差来源	平方和	自由度	均方	$F$ 值	$P$ 值
回归模型	296.263 5	9	32.918 2	43.937 9	<0.000 1
$X_1$	3.367 0	1	3.367 0	4.494 2	0.071 7
$X_2$	4.789 0	1	4.789 5	6.392 9	0.039 3
$X_3$	26.645 0	1	26.645 0	35.564 8	0.000 6
$X_1X_2$	0.096 1	1	0.096 1	0.128 3	0.730 8
$X_1X_3$	1.476 2	1	1.476 2	1.970 4	0.203 2
$X_2X_3$	9.765 0	1	9.765 6	13.034 8	0.008 6
$X_1^2$	43.996 0	1	43.996 0	58.724 3	0.000 1
$X_2^2$	63.796 0	1	63.796 0	85.152 6	<0.000 1
$X_3^2$	117.382 7	1	117.382 7	156.678 2	<0.000 1
残差	5.244 4	7	0.749 2		
失拟项	2.716 4	3	0.905 4	1.432 7	0.357 7
净误差	2.528 0	4	0.632 0		
总误差	301.507 9	16			

回归模型  $Y = -153.550 00 + 7.216 88X_1 + 5.564 87X_2 + 0.970 75X_3 + 7.750 00 \times 10^3 X_1X_2 + 0.030 38X_1X_3 + 0.015 63X_2X_3 - 0.808 12X_1^2 - 0.038 93X_2^2 - 0.052 80X_3^2$ 。  $X_1$ : 脂质添加量;  $X_2$ : 复合温度;  $X_3$ : 复合时间。

对试验数据进行预测分析, 如图 6 所示, 数据点无规则分布, 说明此组数据可以准确反映试验的真实性。如图 7 所示, 数据点几乎分布在一条直线上, 残差基本符合正态分布。

图 8 为复合时间 60 min, 脂质添加量和复合温度的 3D 响应面模型。当脂质添加量为 3%~5%, 复合率随脂质添加量的增加而增大, 当脂质添加量超过 5%, 复合率随脂质添加量的增加而减小。这是因为当脂质添加量较少时, 淀粉颗粒能够与脂质充分结合, 复合率随着脂质添加量的增加而增大, 但当脂质添加过多, 多余的脂质无法进入淀粉颗粒内部,

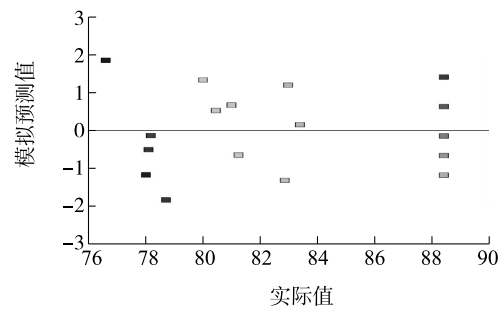


图 6 残差分析

Fig.6 Residual analysis

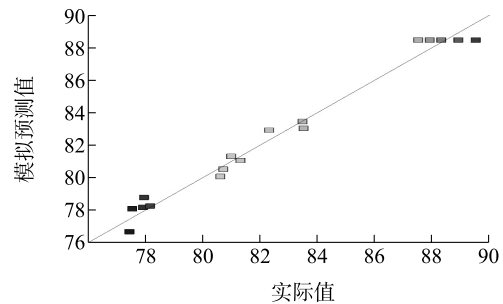


图 7 正态分布

Fig.7 Normal distribution

从而导致复合率下降。复合温度为 65~75 ℃, 复合率随着复合温度上升而增大, 当复合温度高于 75 ℃, 复合率随着复合温度上升而减小。这是因为当温度过高时, 淀粉-脂质复合物的双螺旋结构会被破坏, 结构内部的疏水基团外露, 脂肪酸脱落, 导致复合率降低。

图 9 为脂质添加量与复合时间的 3D 响应面模型。复合时间为 30~60 min, 脂质添加量为 3%~5%, 复合率随着复合时间的延长和脂质添加量的增加而增大。但复合温度过高或者脂质添加量过多, 复合率下降。这是因为月桂酸发生自聚, 小麦淀粉与月桂酸的结合率会降低。

图 10 为复合温度与复合时间的 3D 响应面模型。提高温度或增加时间会提高复合率, 但当温度超过 75 ℃ 时, 复合率下降。由图 10 可知, 小麦淀粉-月桂酸最佳制备条件为, 月桂酸添加量 5%, 复合时间 66 min, 复合温度 75 ℃。随后进行验证试验, 以评估模型的准确性。在该最佳条件下, 小麦淀粉-脂质复合物的复合率的预测值为 88.698 1%, 实际值为 88.74%。预测值与实测值高度吻合, 表明该模型适用于预测小麦淀粉-脂质复合物最佳制备条件。

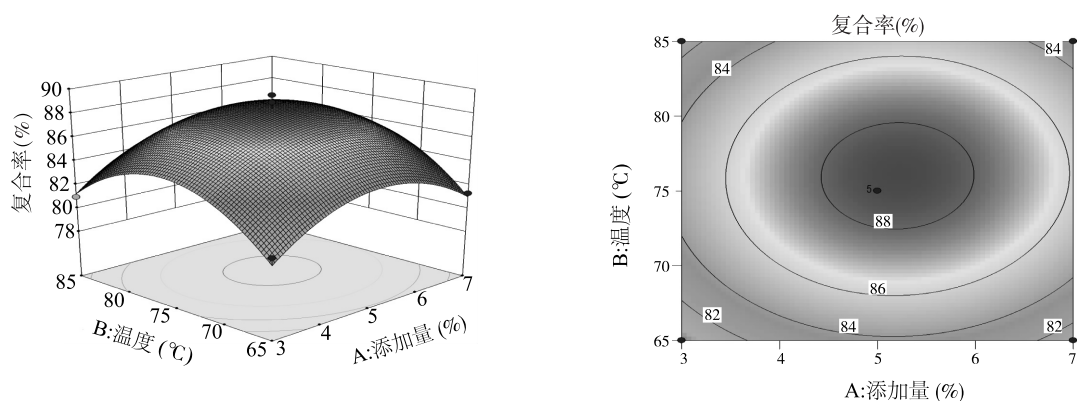


图8 脂质添加量和复合温度的3D响应面模型

Fig.8 The 3D response surface model of lipid addition amount and complex temperature

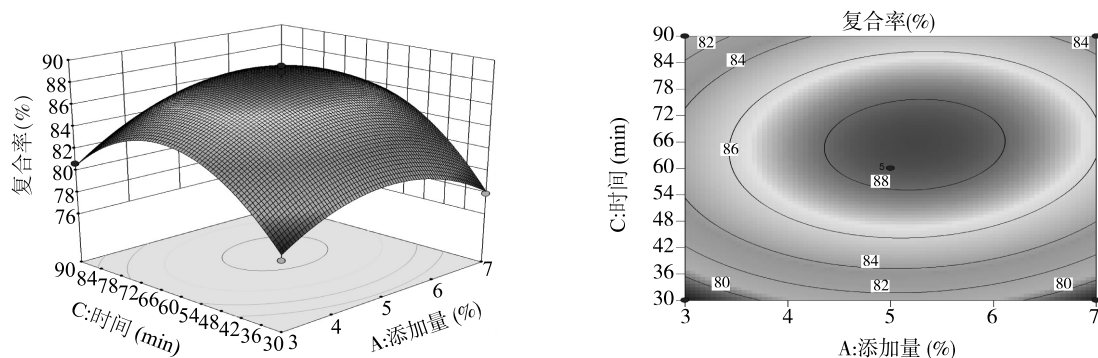


图9 脂质添加量与复合时间的3D响应面模型

Fig.9 The 3D response surface model of lipid addition amount and complex time

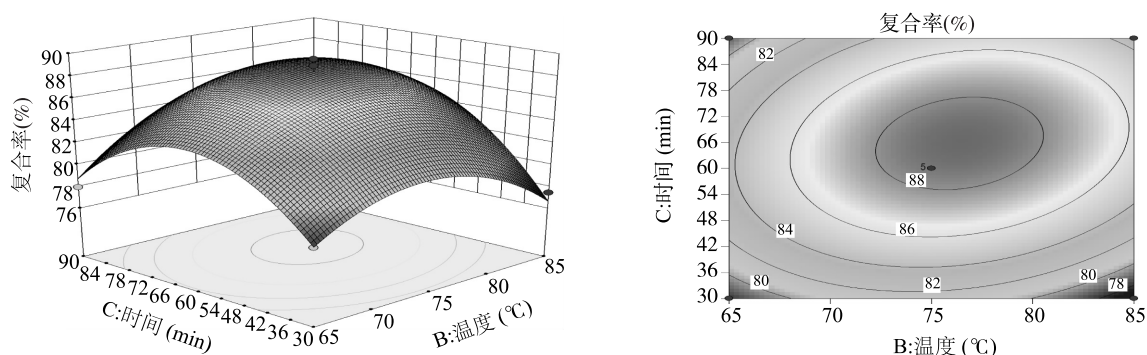


图10 复合时间与复合温度的3D响应面模型

Fig.10 The 3D response surface model of complex time and complex temperature

## 2.4 淀粉-脂质复合物的傅里叶红外分析结果

红外光谱常见的吸收区域主要包括  $\text{-OH}$   $3\,700\sim 3\,200\text{ cm}^{-1}$ 、 $\text{C-H}$   $3\,100\sim 2\,800\text{ cm}^{-1}$ 、 $\text{C=O}$   $2\,000\sim 1\,500\text{ cm}^{-1}$ 、伯醇羟基  $\text{C-O}$  伸缩振动  $1\,200\sim 1\,100\text{ cm}^{-1}$ 。由图 11 可知,复合物在  $2\,850\text{ cm}^{-1}$  和

$1\,710\text{ cm}^{-1}$  处出现了 2 个较强的吸收峰,这是由于脂肪酸中亚甲基的不对称伸缩和脂肪酸中羰基的伸缩振动<sup>[34]</sup>,证明了复合物的形成。

## 2.5 小麦淀粉-脂质复合物对淀粉性质的影响

2.5.1 消化特性 由图 12 可知,小麦淀粉-月桂酸

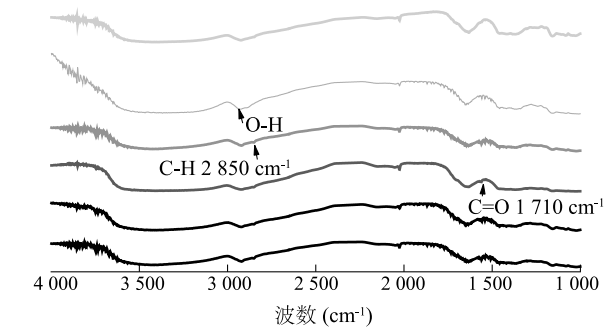
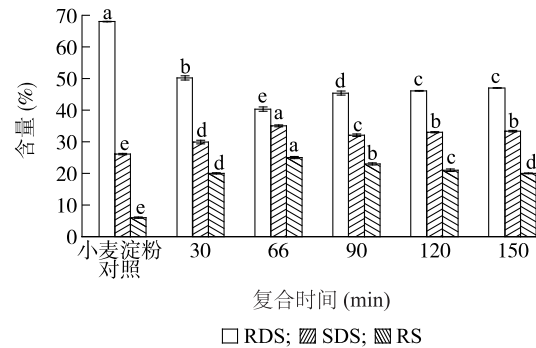


图 11 红外分析

Fig.11 Infrared analysis

复合物快速消化淀粉(RDS)含量显著低于小麦淀粉( $P<0.05$ ),慢消化淀粉(SDS)含量和抗性淀粉(RS)含量升高显著高于小麦淀粉( $P<0.05$ ),表明小麦淀粉-月桂酸复合物的淀粉难以被消化。当复合时间为0~66 min,随着复合时间的延长,抗性淀粉含量逐渐升高,在复合时间为66 min时抗性淀粉含量达到最高,为25%,当复合时间超过66 min,抗性淀粉的含量呈下降趋势。当复合时间为0~66 min,随着复合时间的延长,快速消化淀粉含量逐渐下降,在复合时间为66 min时,快速消化淀粉含量最低,为40.34%。当复合时间为0~66 min,随着复合时间的延长,慢消化淀粉含量逐渐升高,在复合时间为66 min时慢消化淀粉含量达到最高,为35.03%,当复合时间超过66 min时,慢消化淀粉的含量呈下降趋势。可知在复合时间为66 min时,小麦淀粉-月桂酸复合物的抗消化能力最佳。

**2.5.2 膨胀率和溶解度** 由图13可知,与小麦淀粉相比,小麦淀粉-月桂酸复合物的溶解度和膨胀率显著降低( $P<0.05$ )。与小麦淀粉相比,复合时间为30 min、66 min、90 min、120 min、150 min的小麦淀粉-月桂酸复合物的溶解度分别显著降低了0.80个百分点、3.03个百分点、1.97个百分点、1.59个百分点、1.49个百分点( $P<0.05$ )。与小麦淀粉相比,复合时间为30 min、66 min、90 min、120 min、150 min的小麦淀粉-月桂酸复合物的膨胀率分别显著降低了0.99个百分点、2.65个百分点、2.25个百分点、1.02个百分点、0.80个百分点( $P<0.05$ )。产生这种现象的原因是复合物的外表皮被脂质分子包裹,淀粉难以接触水分子,淀粉分子与水分子的相互作用

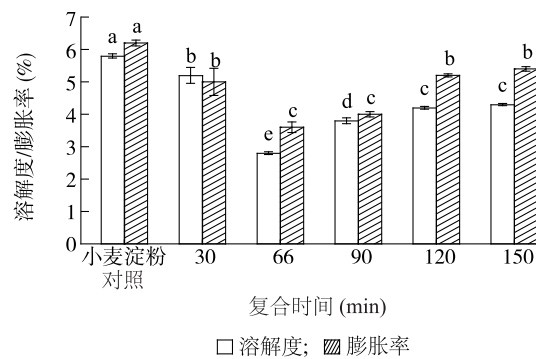


RDS:快速消化淀粉;SDS:慢消化淀粉;RS:抗性淀粉。相同指标图柱上不同小写字母表示差异显著( $P<0.05$ )。

图 12 体外消化特性分析

Fig.12 Analysis of *in vitro* digestion characteristics

用减弱。另外淀粉的熟化程度也会影响小麦淀粉-月桂酸复合物的溶解度和膨胀率。



相同指标图柱上不同小写字母表示差异显著( $P<0.05$ )。

图 13 溶解度与膨胀率

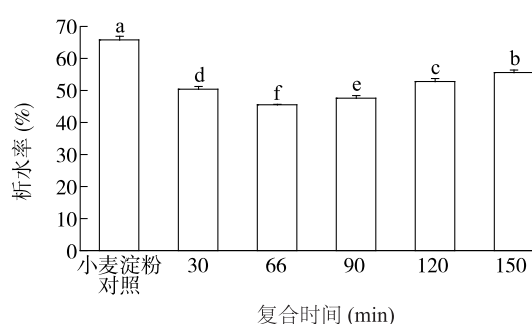
Fig.13 Solubility and swelling rate

**2.5.3 冻融稳定性** 由图14可知,与小麦淀粉相比,小麦淀粉-月桂酸复合物冻融稳定性显著提高( $P<0.05$ )。淀粉的析水率越低,冻融稳定性越好。小麦淀粉的析水率为65%,复合温度66 min的小麦淀粉-月桂酸复合物的析水率最低,为45%。产生这种现象的原因是小麦淀粉-月桂酸复合物的晶体结构相对致密,冻融稳定性较好。

### 3 结论

将小麦淀粉分别与棕榈酸、硬脂酸、月桂酸、油酸等脂质复合,通过水浴加热,制备出小麦淀粉-脂质复合物。复合率最高的脂质为月桂酸,复合率为74.9%。对脂肪酸添加量、复合时间、温度和液料比4个因素进行优化,得到最佳复合时间为66 min,最





图柱上不同小写字母表示差异显著 ( $P < 0.05$ )。

图 14 冻融稳定性分析

Fig.14 Analysis of freeze-thaw stability

佳复合温度为 75 ℃,最佳脂质的添加量为 5%,最佳料液比为 1:10(小麦淀粉和蒸馏水的质量体积比),此时复合率为 88.74%。通过傅里叶红外分析,C-H、C=O 处出现了 2 个较强的吸收峰,这 2 个峰为脂肪酸中亚甲基的不对称伸缩和脂肪酸中羰基的伸缩振动,能够证明复合物的形成。对小麦淀粉-月桂酸复合物的消化特性进行分析,发现小麦淀粉-月桂酸复合物快速消化淀粉(RDS)含量显著低于小麦淀粉( $P < 0.05$ ),慢消化淀粉(SDS)含量和抗性淀粉(RS)含量显著高于小麦淀粉( $P < 0.05$ )。在复合时间为 66 min 时,小麦淀粉-月桂酸复合物中抗性淀粉和慢消化淀粉含量最高,快速消化淀粉含量最低。小麦淀粉-月桂酸复合物溶解性和膨胀率显著低于小麦淀粉( $P < 0.05$ ),在复合时间为 66 min 时,小麦淀粉-月桂酸复合物溶解性和膨胀率最低。小麦淀粉-月桂酸复合物晶体结构相对致密,复合物的冻融稳定性较高。

## 参考文献:

- [1] LIU X C, QIAO L, KONG Y X, et al. Characterization of the starch molecular structure of wheat varying in the content of resistant starch[J]. Food Chemistry, 2024, 21:101103.
- [2] BRADAUSKIENE V, VAICIULYTE-FUNK L, MARTINAITIENE D, et al. Wheat consumption and prevalence of celiac disease: correlation from a multilevel analysis[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2023, 63(1):18-32.
- [3] WANG Q F, LI L M, ZHENG X L. Recent advances in heat-moisture modified cereal starch: Structure, functionality and its applications in starchy food systems[J]. Food Chemistry, 2021, 344:128700.
- [4] 李旭,王弘,王鼎,等.不同直链淀粉含量小麦淀粉理化性质与消化特性研究[J].麦类作物学报,2023,43(4):470-476.
- [5] CAI L M, SHI Y C. Structure and digestibility of crystalline short-chain amylose from debranched waxy wheat, waxy maize, and waxy potato starches[J]. Carbohydrate Polymers, 2010, 79(4):1117-1123.
- [6] CHU T T H, NGUYEN H T, PHU T H, et al. Effect of acetylated wheat starch on metabolic indices in high-fat diet-induced obese and hyperglycemic mice[J]. Journal of Food and Nutrition Research, 2022, 10(4):293-298.
- [7] BLÜHER M. Obesity: global epidemiology and pathogenesis[J]. Nature Review Endocrinology, 2019, 15(5):288-298.
- [8] KANG X M, GAO W, WANG B, et al. Effects of proteins on the structure, physicochemical properties, and *in vitro* digestibility of wheat starch-lauric acid complexes under various cooking methods[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2021, 182:1112-1119.
- [9] JEONG G A, LEE C J, MANSUR A R. Preparation, physicochemical properties, and *in vivo* digestibility of thermostable resistant starch from malic acid-treated wheat starch[J]. Food Research International, 2022, 162:112159.
- [10] KANG X M, SUI J, QIU H W, et al. Effects of wheat protein on the formation and structural properties of starch-lipid complexes in real noodles incorporated with fatty acids of varying chain lengths[J]. LWT-Food Science and Technology, 2021, 144:111271.
- [11] ENGLYST H N, KINGMAN S M, CUMMINGS J H. Classification and measurement of nutritionally important starch fractions[J]. European Journal of Clinical Nutrition, 1992, 46:S33-S50.
- [12] RAZA H, LIANG Q F, AMEER K, et al. Dual-frequency power ultrasound effects on the complexing index, physicochemical properties, and digestion mechanism of arrowhead starch-lipid complexes[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2022, 84:105978.
- [13] CHEN X, HE X W, FU X, et al. Complexation of rice starch/flour and maize oil through heat moisture treatment: structural, *in vitro* digestion and physicochemical properties[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2017, 98:557-564.
- [14] LÓPEZ-BARÓN N, GU Y, VASANTHAN T, et al. Plant proteins mitigate *in vitro* wheat starch digestibility[J]. Food Hydrocolloids, 2017, 69:19-27.
- [15] ZHENG B, WANG T T, WANG H W, et al. Studies on nutritional intervention of rice starch-oleic acid complex (resistant starch type V) in rats fed by high-fat diet[J]. Carbohydrate Polymers, 2020, 246:116637.
- [16] NOOR N, GANI A, JHAN F, et al. Resistant starch type 2 from lotus stem: ultrasonic effect on physical and nutraceutical properties[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2021, 76:105655.
- [17] HUR S J, LEE S J, LEE S Y, et al. Effect of emulsifiers on microstructural changes and digestion of lipids in instant noodle during *in vitro* human digestion[J]. LWT-Food Science and Technology, 2015, 60(1):630-636.
- [18] QIN R B, WANG J, CHAO C, et al. RS5 produced more butyric

- acid through regulating the microbial community of human gut microbiota[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2021, 69(10):3209-3218.
- [19] CHEN C H, SONG L, SUN B W, et al. Effects of starch-lipid complexes on quality and starch digestibility of wheat noodles[J]. *Starch*, 2024, 10:2300155.
- [20] CAI J J, CHAO C, NIU B, et al. Effects of debranching on the formation of maize starch-lauric acid- $\beta$ -lactoglobulin complexes[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2021, 69(32):9086-9093.
- [21] LI Q, DONG Y Y, GAO Y, et al. Functional properties and structural characteristics of starch-fatty acid complexes prepared at high temperature[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2021(32):69.
- [22] WANG S J, CHAO C, CAI J J, et al. Starch-lipid and starch-lipid-protein complexes;a comprehensive review[J]. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2020(6):1056-1079.
- [23] 申瑞玲,张亚蕊,景新俊,等. 藜麦淀粉-硬脂酸复合物的制备及性质研究[J]. *河南农业科学*, 2018(2):135-139.
- [24] 刘静娜,张少飞. 高压均质制备玉米淀粉-脂质复合物及其性质研究[J]. *食品工业*, 2018, 39(9):40-43.
- [25] LU X X, SHI C, ZHU J Y, et al. Structure of starch-fatty acid complexes produced via hydrothermal treatment[J]. *Food Hydrocolloids*, 2019, 88:58-67.
- [26] DING Y Y, CHENG J J, LIN Q Y, et al. Effects of endogenous proteins and lipids on structural, thermal, rheological, and pasting properties and digestibility of adlay seed (*Coix lacryma-jobi* L.) starch[J]. *Food Hydrocolloids*, 2021, 111:106254.
- [27] 常丰丹. 颗粒态淀粉脂质复合物的制备、理化性质及其形成机理研究[D]. 广州:华南理工大学, 2015.
- [28] CHAO C, YU J L, WANG S, et al. Mechanisms underlying the formation of complexes between maize starch and lipids[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2018, 66:272-278.
- [29] 康雪敏. 淀粉-脂质复合物的构建及对面制品的影响[D]. 济南:齐鲁工业大学, 2020.
- [30] 赵德厚,郝 帅,朱智杰,等. 大豆蛋白肽-玉米淀粉复合物的制备及其性质研究[J]. *安徽农业大学学报*, 2021, 48(6):989-996.
- [31] 刘 娜. 苦荞淀粉-槲皮素复合物制备与特性研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2019.
- [32] 陈 迪. 糯米淀粉复合物的制备及性质研究[D]. 郑州:河南农业大学, 2013.
- [33] 张书艳,朱 杰,李 琳,等. 淀粉链/支比和脂肪酸链长对淀粉-脂肪酸复合物结晶结构的影响[J]. *中国粮油学报*, 2018, 33(6):27-32.
- [34] 陈 晴. 籼米淀粉-脂肪酸复合物的形成及消化特性研究[D]. 杭州:浙江工商大学, 2022.

(责任编辑:成纾寒)