

槟榔芋淀粉与其球磨酯化淀粉理化性质比较

Comparison of physicochemical properties between areca taro starch and ball-milling esterification modified starches

刘灿灿^{1,2} 黄群¹ 孙潇鹏³ 宋洪波^{1,2}

LIU Can-can^{1,2} HUANG Qun¹ SUN Xiao-peng³ SONG Hong-bo^{1,2}

(1. 福建农林大学食品科学学院, 福建 福州 350002; 2. 福建省特种淀粉品质科学与加工技术重点实验室, 福建 福州 350002; 3. 福建农林大学机电工程学院, 福建 福州 350002)

(1. College of Food Science, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou, Fujian 350002, China; 2. Fujian Provincial Key Laboratory of Quality Science and Processing Technology in Special Starch, Fuzhou, Fujian 350002, China; 3. College of Mechanical and Electrical Engineering, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou, Fujian 350002, China)

摘要:以槟榔芋原淀粉为原料,采用球磨结合辛烯基琥珀酸(OSA)酯化方法制得复合改性淀粉,对其理化性质进行研究,并与原淀粉、酯化淀粉和球磨淀粉进行比较。结果表明:球磨淀粉的溶解度、膨润力和透明度均显著提高($P<0.05$),尤其是冷水溶解度,但其抗凝沉性、冻融稳定性和表观黏度却降低;酯化淀粉和复合改性淀粉的溶解度、膨润力、透明度、抗凝沉性、冻融稳定性和表观黏度均明显提高,由此可见槟榔芋原淀粉和球磨淀粉经OSA酯化改性后品质均得到明显改善,复合改性淀粉的表观黏度增加尤为明显,说明其具有更好的增稠性能。

关键词: 槟榔芋; 淀粉; 球磨; 辛烯基琥珀酸; 理化特性

Abstract: The compound modified starch was prepared from the areca taro native starch which was modified by ball-milling combined with octenyl succinic anhydride (OSA). The physicochemical properties of compound modified starch were studied and compared with the native starch, esterified starch and ball-milled starch. The results indicated that the solubility, swelling power and transparency of ball-milled starch were significantly improved ($P<0.05$), especially the cold-water solubility, but the anticoagulation, freeze-thaw stability and apparent viscosity were reduced. The solubility, swelling power, transparency, anticoagulation, freeze-thaw stability and apparent viscosity of esterified starch and compound modified starch were significantly improved. It can be seen that the quality of native starch

and ball-milled starch after esterification with OSA is significantly improved. Above all, the apparent viscosity of compound modified starch was significantly increased, which showed its better thickening properties.

Keywords: areca taro; starch; ball-milling; octenyl succinic anhydride; physicochemical properties

槟榔芋[*Colocasia esculenta* (L.) Schott]又称福鼎芋、荔浦芋,天南星科芋属魁芋类,主产于中国福建、广西等沿海地区,因其横断面呈白色带紫红色槟榔纹,故名“槟榔芋”^[1]。其鲜芋含水量较高,易腐烂,不利于贮藏,因此开展深加工利用尤为重要^[2]。

淀粉大量存在于植物的种子、根、块茎和果实中,作为增稠剂、黏合剂、薄膜、泡沫等,已被广泛应用于食品及其他工业领域^[3]。槟榔芋中淀粉含量颇高,约占总干物质的85%以上,但其开发利用程度远不及玉米淀粉、马铃薯淀粉等^[4]。由于原淀粉存在不溶于冷水、透明度差、糊黏度低等问题,限制其工业应用^[5]。为改善原淀粉应用性能,常采用物理、化学、酶法等手段进行改性^[6]。淀粉经OSA酯化改性后,具有两亲性,可作为乳化剂、增稠剂、脂肪替代品等,已被批准用于食品行业40多年^[7-8]。由于淀粉具有结构紧密的结晶区,酯化反应主要在颗粒表面进行,很难渗透到内部,限制了酯化反应的进行^[9]。球磨产生的机械力可使淀粉颗粒破碎,晶体结构遭到破坏,分子链断裂,导致更多的活性羟基暴露,促进其化学反应活性^[10]。目前鲜有研究采用球磨预处理后再进行OSA酯化复合改性的方法制备淀粉样品,且淀粉经改性后性质会发生显著改变,但现有理化性质的研究,其原料主要集中在玉米淀粉和马铃薯淀粉^[11]。

基金项目:国家自然科学基金项目(编号:31271913);福建农林大学科技创新专项基金(编号:CXZX2017290)

作者简介:刘灿灿,女,福建农林大学在读硕士研究生。

通信作者:宋洪波(1966—),男,福建农林大学教授,博士。

E-mail: sghgbode@163.com

收稿日期:2018-01-02

本课题组^[12]前期已通过扫描电镜、红外光谱仪、X-射线衍射仪等对复合改性槟榔芋淀粉的结构进行了测定,本试验拟对复合改性槟榔芋淀粉理化性质进行研究,并与其原淀粉、酯化淀粉和球磨淀粉进行比较,以期实现复合改性槟榔芋淀粉多样化和高值化利用。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

槟榔芋:购自福建福鼎市;
辛烯基琥珀酸酐:优级纯,美国 Sigma 公司;
其他试剂均为国产分析纯。

1.2 仪器与设备

行星球磨机:QM-3SP04 型,南京南大仪器有限公司;
紫外可见分光光度计:UV-1100 型,上海美谱达仪器有限公司;
高速台式冷冻离心机:TGL-16 型,四川蜀科仪器有限公司;
流变仪:MCR301 型,奥地利 Anton Paar 公司。

1.3 方法

1.3.1 原淀粉(NS)、酯化淀粉(ES)、球磨淀粉(BMS)、复合改性淀粉(CS)的制备 NS、ES、BMS 和 CS 均为实验室自制,具体制备方法参考文献[12],并对 2 种 OSA 酯化改性淀粉样品的取代度进行了测定,其中 ES 为 0.017 56,CS 为 0.019 94,由此可见经球磨预处理后再进行 OSA 酯化反应制备的 CS 样品取代度显著增加。

1.3.2 主要化学成分的测定

- (1) 水分:按 GB 5009.3—2016 执行。
- (2) 淀粉:按 GB 5009.9—2016 执行。
- (3) 蛋白质:按 GB 5009.5—2016 执行。
- (4) 脂肪:按 GB 5009.6—2016 执行。
- (5) 粗纤维:按 GB/T 5009.10—2003 执行。
- (6) 灰分:按 GB 5009.4—2016 执行。

1.3.3 溶解度(S)和膨润力(SP)的测定 称取一定量淀粉样品于离心管,配成 2 g/100 g 淀粉乳,混匀后,置于一定温度(30,40,50,60,70,80,90 ℃)水浴中加热 30 min,每隔 5 min 震荡 1 次,冷却至室温,离心(5 000 r/min,20 min),上清液于 105 ℃烘干至恒重^[13]。按式(1)、(2)计算溶解度和膨润力。

$$S = \frac{A}{W} \times 100\%, \tag{1}$$

$$SP = \frac{P}{W(1 - \frac{S}{100})}, \tag{2}$$

式中:
S——溶解度,%;

SP——膨润力,g/g;
A——上清液蒸干恒重后质量,g;
W——样品质量,g;
P——离心后沉淀物质量,g。

1.3.4 透明度的测定 参考文献[14]。

1.3.5 抗凝沉性的测定 参照张正茂等^[11]的方法,并稍作修改,将制好的淀粉糊移入 25 mL 具塞试管中静置,每隔 1 d 记录一次上清液体积。

1.3.6 冻融稳定性的测定 称取一定量淀粉样品,配成 3 g/100 g 淀粉乳,沸水浴搅拌 20 min,冷却至室温,称取 15 g 淀粉糊于 50 mL 离心管中,旋紧盖子,置于-18 ℃冰箱冷冻 24 h,于 30 ℃水浴中解冻 2 h,离心(6 500 r/min,20 min),弃去上清液,称取沉淀物质量^[15]。如此反复冻融 5 次,析水率按式(3)计算:

$$F = \frac{W_0 - W_1}{W_0} \times 100\%, \tag{3}$$

式中:
F——析水率,%;
W₀——糊的质量,g;
W₁——沉淀物的质量,g。

1.3.7 流变学特性 取适量 6 g/100 g 的淀粉糊于流变仪测试样品台上,选取直径 50 mm 的锥板磨具,启动流变仪,参数设置为:温度固定 25 ℃,剪切速率(γ)从 0~300 s⁻¹以指数增加^[16]。

1.3.8 统计分析 采用 Microsoft Excel 2003 和 DPS 7.05 对数据进行处理和显著性分析;采用 Origin 9.0 绘图。

2 结果与分析

2.1 主要化学成分

由表 1 可知,槟榔芋全粉中淀粉含量约占干基的 85.01%,由此可见槟榔芋中淀粉含量较高,是提取淀粉的优质原料;且实验室自制的槟榔芋原淀粉中杂质含量较少,淀粉纯度约为干基的 97.82%,由此可见采取的制备方法合理。

2.2 溶解度和膨润力

如表 2、3 所示,随着温度从 30 ℃升高到 90 ℃,NS、ES、BMS 和 CS 的溶解度和膨润力均逐渐增大,这是因为温度的升高,致使淀粉颗粒结晶区中被切断的氢键数目增多,颗粒内部结构变得松散,使得更多的水进入颗粒内部^[17]。在 70~90 ℃,NS、ES、BMS、CS 4 种淀粉的溶解度均大幅度增加,可能是由淀粉糊化造成的^[18]。

同一温度下,ES、BMS 和 CS 的溶解度和膨润力均明显高于 NS。原淀粉几乎不溶于冷水,这是因为淀粉分子内羟基间以氢键结合;另外,其颗粒具有紧密的晶体结构,水分子也难以进入颗粒内部^[19]。ES较NS的溶解度和膨润力增

表 1 槟榔芋全粉和原淀粉的主要化学成分

Table 1 The main chemical composition of areca taro powder and native starch (n=3) %

项目	水分	淀粉	蛋白质	脂肪	粗纤维	灰分
全粉	8.42±0.08	77.58±0.11	8.34±0.10	0.28±0.03	2.55±0.08	2.51±0.04
原淀粉	8.21±0.11	89.50±0.13	1.15±0.05	0.10±0.01	0.41±0.07	0.33±0.03

表 2 槟榔芋原淀粉和 3 种改性淀粉的溶解度[†]

Table 2 Solubility of native starch and three types of modified starch from areca taro ($n=3$)								%
样品	30 ℃	40 ℃	50 ℃	60 ℃	70 ℃	80 ℃	90 ℃	
NS	1.72±0.09 ^d	1.83±0.01 ^c	2.00±0.20 ^c	2.21±0.02 ^d	2.80±0.11 ^d	7.80±0.28 ^d	10.51±0.04 ^d	
ES	1.90±0.03 ^c	2.08±0.17 ^c	2.24±0.03 ^c	2.78±0.05 ^c	3.89±0.10 ^c	8.89±0.03 ^c	13.72±0.06 ^c	
BMS	17.35±0.01 ^a	18.80±0.13 ^a	19.59±0.07 ^a	22.01±0.07 ^a	24.73±0.18 ^a	33.59±0.18 ^a	44.79±0.17 ^a	
CS	5.12±0.03 ^b	5.75±0.01 ^b	6.25±0.14 ^b	7.25±0.14 ^b	8.73±0.13 ^b	14.43±0.09 ^b	17.88±0.31 ^b	

† 同列中不同字母表示差异显著($P<0.05$)。

表 3 槟榔芋原淀粉和 3 种改性淀粉的膨润力[†]

Table 3 Swelling power of native starch and three types of modified starch from areca taro ($n=3$)								g/g
样品	30 ℃	40 ℃	50 ℃	60 ℃	70 ℃	80 ℃	90 ℃	
NS	2.71±0.06 ^c	2.87±0.01 ^c	3.05±0.03 ^d	3.10±0.06 ^d	3.26±0.06 ^d	12.07±0.21 ^d	20.47±0.16 ^d	
ES	2.94±0.07 ^c	3.19±0.01 ^c	3.63±0.05 ^c	4.62±0.05 ^c	7.93±0.07 ^c	32.25±0.18 ^b	38.07±0.13 ^b	
BMS	8.14±0.13 ^b	8.58±0.20 ^b	9.39±0.11 ^b	11.77±0.09 ^b	15.16±0.20 ^b	22.26±0.12 ^c	26.01±0.09 ^c	
CS	14.81±0.17 ^a	16.70±0.18 ^a	22.04±0.01 ^a	30.11±0.21 ^a	36.04±0.09 ^a	39.08±0.15 ^a	39.54±0.22 ^a	

† 同列中不同字母表示差异显著($P<0.05$)。

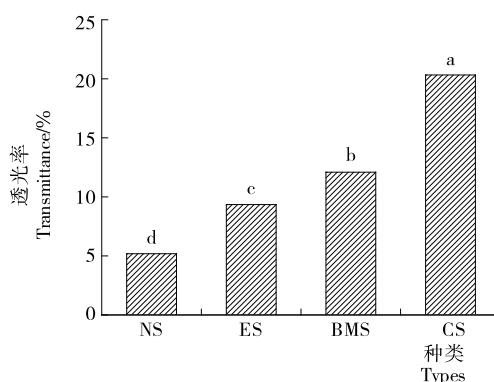
加,这是因为淀粉经 OSA 酯化反应后,亲水性羧酸基团的引入,使其与水分子亲和力增强^[11];另外,疏水性烯基长链的引入,致使淀粉分子间空间位阻效应增加,有序结构发生紊乱,紧密晶体结构变得松散,有助于其在低温下吸水膨胀^[6]。BMS 和 CS 的溶解度和膨润力均显著高于 NS($P<0.05$),尤其是冷水溶解度,这是因为淀粉经机械球磨后,颗粒破碎,内部晶体结构遭到严重破坏,从而允许更多的水进入颗粒内部^[20];另外,机械力使淀粉分子链断裂,亲水性羟基暴露,水分子易与羟基结合形成氢键所致^[21]。但 CS 较 NS 的溶解度增量远远低于 BMS,这是因为 BMS 自身的溶解度就很大,再对其进行 OSA 酯化反应,引入的疏水性烯基长链,使淀粉在水中溶解受阻^[22]。BMS 较 NS 的膨润力与溶解度相比,没有达到同等增幅,这是因为淀粉颗粒经机械球磨后受损严重,结晶区降解程度较高,限制了其保留水分的能力^[23]。

2.3 透明度

由图 1 可知,ES、BMS、CS 较 NS 的透明度均显著提高($P<0.05$),这是因为原淀粉具有结构紧密的结晶区,糊化过程中限制了其吸水膨胀,阻碍了光线的透过,因此透明度较小^[21],与膨润力的测定结果相符。ES 和 CS 的透明度均显著高于 NS($P<0.05$),这是因为淀粉经 OSA 酯化改性后,引入亲水性羧酸基团,使其与水分子的结合力增强,另外,引入的疏水性烯基长链分布于淀粉分子间,产生的空间位阻作用,导致淀粉颗粒中有序晶体结构发生紊乱,淀粉分子间不易重新排列和缔合,使其溶胀并高度分散在水中,因此透明度显著提高,且有研究^[24]表明,取代度越大,则透明度越高。BMS 的透明度显著高于 NS($P<0.05$),这是因为淀粉经机械球磨后,颗粒形貌和内部晶体结构均遭到严重破坏,分子链断裂,使得淀粉颗粒更易溶胀溶于水,有助于光线透过^[22]。CS 较 ES 的透明度提高可能是取代度增加和球磨处理双重作用的效果。

2.4 抗凝沉性

淀粉的凝沉性是指低浓度淀粉乳经糊化完全后,当温度降低时,淀粉糊分子运动减慢,其分子侧链趋于定向排列,相



不同字母表示差异显著($P<0.05$)

图 1 槟榔芋原淀粉和 3 种改性淀粉的透明度

Figure 1 Transparency of native starch and three types of modified starch from areca taro ($n=3$)

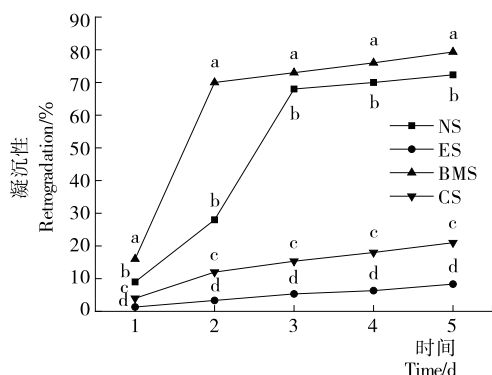
互靠拢,彼此间以氢键结合,形成结晶,导致溶解度降低,进而析出沉淀的现象,用上清液占总体积的百分比来表示。

由图 2 可知,ES 和 CS 的抗凝沉性均明显高于 NS,这是因为淀粉经 OSA 酯化改性后,疏水性烯基长链的引入,致使淀粉颗粒有序结构发生紊乱,淀粉分子不易定向排列,形成结晶;同时,亲水性羧酸基团的引入,也使得淀粉与水分子的结合力增强,进而导致淀粉分子更为均匀地分散在水中,明显改善淀粉糊的凝沉性^[25]。BMS 的抗凝沉性低于 NS,这是由于淀粉经机械球磨后,颗粒破碎,分子链断裂,致使支链淀粉含量减少,直链淀粉含量增加^[26]。CS 的抗凝沉性低于 ES,可能是球磨处理产生的机械力对淀粉颗粒内部晶体结构的破坏。

2.5 冻融稳定性

淀粉常被用作冷冻食品的增稠剂,在冷冻过程中,会加速淀粉的老化,析出水分,甚至形成海绵状结构,产生一些不利的影响。

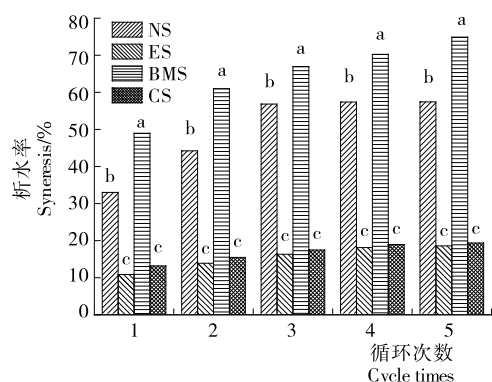
由图 3 可知,随着冻融次数的增加,NS、ES、BMS 和 CS 的析水率均增大并逐渐趋于平衡。ES 和 CS 的冻融稳定性均显著高于 NS($P<0.05$),这是因为 NS 经糊化完全后,在低



不同字母表示差异显著($P<0.05$)

图2 槟榔芋原淀粉和3种改性淀粉的抗凝沉性

Figure 2 Anticoagulation of native starch and three types of modified starch from areca taro ($n=3$)



不同字母表示差异显著($P<0.05$)

图3 槟榔芋原淀粉和3种改性淀粉的冻融稳定性

Figure 3 Freeze-thaw stability of native starch and three types of modified starch from areca taro ($n=3$)

温冷冻贮存过程中,淀粉分子易于定向排列,彼此间以氢键连接,形成结晶,使其结合的水被排挤出来;而淀粉经 OSA 酯化改性后,疏水性烯基长链的引入,致使淀粉分子有序结构发生紊乱,阻碍了淀粉分子重排^[27];另外,亲水性羧基团的引入,也增强了淀粉与水分子间的结合力;二者相互作用,使得淀粉的保水性明显提高。BMS 的冻融稳定性显著低于 NS($P<0.05$),这是因为淀粉经机械球磨后,颗粒破碎,支链淀粉侧链断裂,致使直链淀粉含量增加,淀粉糊更易发生老化^[28]。CS 的冻融稳定性略低于 ES,与上述抗凝沉性的测定结果一致。

2.6 流变特性

2.6.1 不同淀粉的流变曲线 如图4所示,同一剪切速率下,ES 和 CS 淀粉糊的剪切应力均明显高于 NS,且 CS 的值最大,而 BMS 的值却减小,是因为淀粉经 OSA 酯化改性后,亲水性羧基团的引入,使得淀粉与水分子的结合力增强,另外,疏水性烯基长链的引入,使得淀粉分子量增大,分子链间相互联结缠绕增加,导致淀粉分子运动性减弱,剪切应力增大;而淀粉经球磨预处理后再进行 OSA 酯化改性,取代度增加,酯化程度更高,故剪切应力更大^[11];相反,淀粉经机械球磨后,颗粒破碎,晶体结构遭到严重破坏,分子间作用力降低,淀粉糊流动阻力减弱,故剪切应力减小。

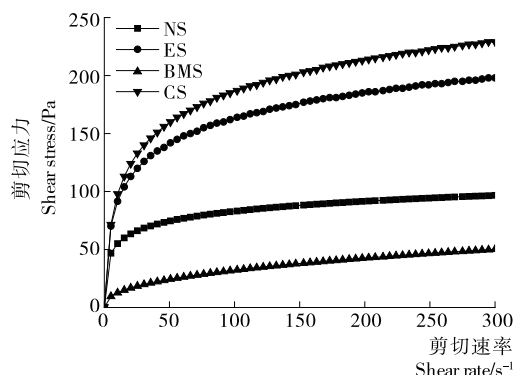


图4 槟榔芋原淀粉和3种改性淀粉的流变曲线

Figure 4 Rheological curve of native starch and three types of modified starch from areca taro ($n=3$)

2.6.2 表观黏度与剪切稀化 如图5所示,NS、ES、BMS 和 CS 淀粉糊的表观黏度均随剪切速率的增加而明显降低随后逐渐趋于平衡,表明存在剪切稀化现象。这是因为在静止或低剪切速率时,淀粉分子链间相互联结缠绕紧密,阻碍了淀粉糊流动,因此表观黏度较大;当剪切速率增大时,在剪切力的作用下,相互缠绕的淀粉分子链被强制拉直取向,淀粉糊流动阻力减弱,因此表观黏度降低;当剪切速率增大到一定程度后,淀粉分子未来得及取向,或已经充分完成取向,因此表观黏度不变^[20]。

在同一剪切速率下,ES 和 CS 的表观黏度均明显高于 NS,这是因为淀粉经 OSA 酯化改性后,引入的亲水性羧基团,致使淀粉与水分子的结合力增强,使其在糊化过程中更易肿胀;另外,引入的疏水性烯基长链,致使淀粉分子量增加,分子链间相互联结缠绕更加紧密,形成三维网络结构,导致淀粉糊流动性受阻,表观黏度增大^[12]。BMS 较 NS 的表观黏度降低,这是因为淀粉经机械球磨后,其内部晶体结构和氢键均遭到严重破坏,结构变得松散,使淀粉分子间亲和力和力降低;另外,球磨处理使得淀粉分子链断裂,分子量减小,淀粉分子链间相互缠绕减少,也导致淀粉糊流动性增强,表观黏度降低,呈现“高浓低黏”特性^[21]。CS 表观黏度最高,与剪切应力测定结果一致。因此槟榔芋原淀粉和球磨淀粉经 OSA 酯化改性后,均可起到显著增稠效果,且复合改性淀粉的增稠性能更好。

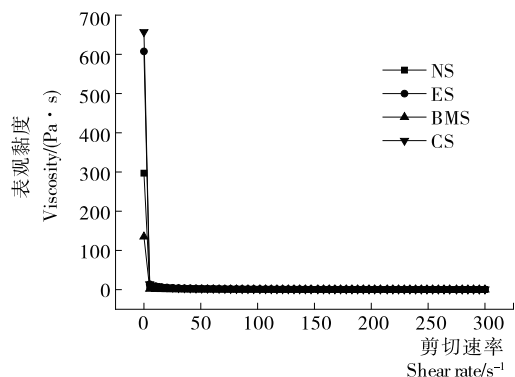


图5 槟榔芋原淀粉和3种改性淀粉糊的剪切稀化

Figure 5 Shear thinning of native starch and three types of modified starch paste from areca taro ($n=3$)

3 结论

与槟榔芋原淀粉相比,球磨淀粉的溶解度、膨润力、透明度均显著提高($P < 0.05$),尤其是冷水溶解度,但抗凝沉性、冻融稳定性和表观黏度却降低,虽限制其在低温、冷冻食品中应用,但此球磨改性方法为冷水可溶性淀粉的制备提供了参考。酯化淀粉和复合改性淀粉的溶解度、膨润力、透明度、抗凝沉性、冻融稳定性均明显提高,由此可见原淀粉和球磨淀粉经 OSA 酯化改性后品质均得到明显改善,扩大了产品应用范围;酯化淀粉和复合改性淀粉的表观黏度均明显增加,且复合改性淀粉增加尤为明显,说明球磨预处理增强了淀粉酯化反应活性,使淀粉具有更好的增稠性能,以实现其高值化利用。至于这 3 种改性淀粉在食品中的实际应用效果,有待进一步研究。

参考文献

- [1] 陈子意. 槟榔芋全粉挤压膨化特性的研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2015: 1-2.
- [2] ABOUBAKAR, NJINTANG Y N, SCHER J, et al. Physico-chemical, thermal properties and microstructure of six varieties of taro (*Colocasia esculenta*, L. Schott) flours and starches[J]. Journal of Food Engineering, 2008, 86(2): 294-305.
- [3] WANG Chan, HE Xiao-wei, HUANG Qiang, et al. Physico-chemical properties and application of micronized cornstarch in low fat cream[J]. Journal of Food Engineering, 2013, 116(4): 881-888.
- [4] ZHU Fan. Structure, properties, and applications of aroid starch[J]. Food Hydrocolloids, 2016, 52: 378-392.
- [5] 杜秀杰, 陈发河, 吴光斌. 槟榔芋淀粉物性研究[J]. 中国粮油学报, 2012, 27(7): 52-57.
- [6] SHARMA M, SINGH A K, YADAV D N, et al. Impact of octenyl succinylation on rheological, pasting, thermal and physicochemical properties of pearl millet (*Pennisetum typhoides*) starch[J]. LWT-Food Science and Technology, 2016, 73: 52-59.
- [7] ZHANG Zheng-mao, ZHAO Si-ming, XIONG Shan-bai. Physicochemical properties of indica rice starch modified by mechanical activation and octenyl succinic anhydride[J]. Starch-Stärke, 2016, 69(9/10): 1-8.
- [8] MARKU D, WAHLGREN M, RAYNER M, et al. Characterization of starch Pickering emulsions for potential applications in topical formulations[J]. International Journal of Pharmaceutics, 2012, 428(1/2): 1-7.
- [9] ZHANG Bao, MEI Ji-qiang, CHEN Bo, et al. Digestibility, physicochemical and structural properties of octenyl succinic anhydride-modified cassava starches with different degree of substitution[J]. Food Chemistry, 2017, 229: 136-141.
- [10] LI Nan-nan, NIU Meng, ZHANG Bin-jia, et al. Effects of concurrent ball milling and octenyl succinylation on structure and physicochemical properties of starch [J]. Carbohydrate Polymers, 2017, 155: 109-116.
- [11] 张正茂, 李纪亮. 机械活化-酯化复合改性淀粉的物化特性研究[J]. 食品研究与开发, 2016, 37(13): 5-9.
- [12] 刘灿灿, 李涛, 万成, 等. 球磨-辛烯基琥珀酸酯化槟榔芋淀粉的特性研究[J]. 食品工业科技, 2018, 39(10): 40-45.
- [13] TATTIYAKUL J, NAKSRIARPORN T, PRADIPASENA P. X-ray diffraction pattern and functional properties of dioscorea hispida, dennst starch hydrothermally modified at different temperatures[J]. Food & Bioprocess Technology, 2012, 5(3): 964-971.
- [14] WANG Chan, HE Xiao-wei, FU Xiong, et al. High-speed shear effect on properties and octenylsuccinic anhydride modification of corn starch[J]. Food Hydrocolloids, 2015, 44(4): 32-39.
- [15] SONG Xiao-yan, ZHU Wei, LI Zhen, et al. Characteristics and application of octenyl succinic anhydride modified waxy corn starch in sausage[J]. Starch-Stärke, 2010, 62(12): 629-636.
- [16] GUO Ze-bin, ZENG Shao-xiao, ZHANG Yi, et al. The effects of ultra-high pressure on the structural, rheological and retrogradation properties of lotus seed starch [J]. Food Hydrocolloids, 2015, 44: 285-291.
- [17] LI Wen-hao, CAO Fang, FAN Jing, et al. Physically modified common buckwheat starch and their physicochemical and structural properties[J]. Food Hydrocolloids, 2014, 40(10): 237-244.
- [18] LOUBES M A, TOLABA M P. Thermo-mechanical rice flour modification by planetary ball milling[J]. LWT-Food Science and Technology, 2014, 57(1): 320-328.
- [19] HE Sheng-hua, QIN Yi-bing, WALID E, et al. Effect of ball-milling on the physicochemical properties of maize starch[J]. Biotechnology Reports, 2014, 3: 54-59.
- [20] HUANG Zu-qiang, LU Jian-ping, LI Xuan-hai, et al. Effect of mechanical activation on physico-chemical properties and structure of cassava starch[J]. Carbohydrate Polymers, 2007, 68(1): 128-135.
- [21] 喻弘, 张正茂, 张秋亮, 等. 球磨处理对 3 种淀粉特性的影响[J]. 食品科学, 2011(7): 30-33.
- [22] HU Hua-yu, LIU Wan-dong, SHI Jian, et al. Structure and functional properties of octenyl succinic anhydride modified starch prepared by a non-conventional technology[J]. Starch-Stärke, 2016, 68(1/2): 151-159.
- [23] JAQUELINE M, ALVES F S, FRANCO C M L. Effect of ball milling on structural and physicochemical characteristics of cassava and Peruvian carrot starches[J]. Starch-Stärke, 2013, 65(3/4): 200-209.
- [24] KRÓLIKOWSKA K, FORTUNA T, PIETRZYK S, et al. Effect of modification of octenyl succinate starch with mineral elements on the stability and rheological properties of oil-in-water emulsions[J]. Food Hydrocolloids, 2017, 66: 118-127.
- [25] NILSSON L, BERGENSTÅHL B. Adsorption of hydrophobically modified anionic starch at oppositely charged oil/water interfaces[J]. J Colloid Interface Sci, 2007, 308(2): 508-513.
- [26] 逯蕾, 韩小贤, 李淑鑫, 等. 球磨处理对小麦淀粉理化性质的影响[J]. 粮食与油脂, 2014(11): 57-60.
- [27] SWEEDMAN M C, TIZZOTTI M J, SCHÄFER C, et al. Structure and physicochemical properties of octenyl succinic anhydride modified starches; A review[J]. Carbohydrate Polymers, 2013, 92(1): 905-920.
- [28] 侯蕾, 韩小贤, 郑学玲, 等. 机械球磨对绿豆淀粉糊性质的影响[J]. 食品与机械, 2014, 30(4): 46-49.