

粳米分层淀粉的理化性质

Physicochemical properties of layered starch of japonica rice

张楚佳¹ 贾健辉^{1,2} 高 嫚¹ 刘 颖¹ 窦博鑫¹ 张 娜¹

ZHANG Chu-jia¹ JIA Jian-hui^{1,2} GAO Man¹ LIU Ying¹ DOU Bo-xin¹ ZHANG Na¹

(1. 哈尔滨商业大学食品工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150028;

2. 牡丹江师范学院生命科学与技术学院, 黑龙江 牡丹江 157011)

(1. College of Food Engineering, Harbin University of Commerce, Harbin, Heilongjiang 150028, China;

2. College of Life Science and Technology, Mudanjiang Normal University,

Mudanjiang, Heilongjiang 157011, China)

摘要:目的:提高粳米淀粉的高值化利用和粳米分层淀粉的综合应用。方法:分别采用碱法和酶法提取粳米淀粉,对离心后 3 层淀粉的基础成分、溶解度、膨润力和糊化特性等理化指标进行分析,并采用扫描电镜、红外光谱分析其结构特性。结果:碱法和酶法提取的各层淀粉的淀粉含量为 91%~99%,其中中层淀粉的相对比例最高,碱法和酶法提取的中层淀粉的淀粉含量高于上层和下层,而上层和下层淀粉的蛋白质含量和直链淀粉含量均高于中层淀粉的。碱法和酶法提取的各层淀粉的溶解度和膨润力均随温度的上升而增加,且碱法和酶法提取的上层和下层淀粉的热稳定性优于中层淀粉的。扫描电镜结果显示碱法和酶法提取的各层淀粉颗粒均较为完整,酶法提取的各层淀粉颗粒分布相对稀疏;红外光谱图中,碱法和酶法提取的各层淀粉具有相似的主要特征吸收峰,中层淀粉的短程有序性高于上层和下层淀粉。结论:可进一步开发利用粳米上层和下层淀粉,提高粳米资源的综合利用。

关键词: 粳米; 淀粉; 碱法; 酶法; 理化性质

Abstract: Objective: This study aimed to improve the high-value utilization of japonica starch and the comprehensive application of japonica layered starch. **Methods:** Japonica starch was extracted by alkaline and enzymatic methods, and the physicochemical

indexes such as basic composition, solubility, swelling power and pasting characteristics of the 3 layers of starch after centrifugation were analyzed, and the structural characteristics were studied by scanning electron microscopy and infrared spectroscopy. **Results:** The contents of the three starch layers extracted by alkali and enzymatic methods ranged from 91% to 99%, with the highest relative proportion of the middle layer starch. The amylose content of the middle layer starch extracted by alkali and enzymatic methods was higher than that of the upper and lower layers, while the protein content and straight chain amylose content of the upper and lower layers starch were higher than that of the middle layer. The solubility and bulking power of all layers of starch extracted by alkali and enzymatic methods increased with the increase of temperature, and the thermal stability of the upper and lower layers of starch extracted by alkali and enzymatic methods was better than that of the middle layer of starch. The results of scanning electron microscopy showed that the starch granules of all layers extracted by alkaline and enzymatic methods were more complete, and the distribution of starch granules of all layers extracted by the enzymatic method was relatively sparse. In the infrared spectra, the main characteristic absorption peaks of all layers extracted by alkaline and enzymatic methods were similar, and the short-range orderliness of the middle layer was higher than that of the upper and lower layers of starch. **Conclusion:** The upper and lower starch layers of japonica rice can be further exploited to improve the comprehensive utilization of japonica rice resources.

Keywords: japonica rice; starch; alkaline method; enzymatic method; physical and chemical properties

基金项目: 黑龙江省“百千万”工程科技重大专项(编号: 2021ZX12B07); 国家自然科学基金面上项目(编号: 32072258); 国家重点研发计划(编号: 2021YFD2100902-3)

作者简介: 张楚佳,女,哈尔滨商业大学在读硕士研究生。

通信作者: 窦博鑫(1987—),女,哈尔滨商业大学高级工程师,博士。E-mail: 394831971@qq.com

张娜(1979—),女,哈尔滨商业大学教授,博士。

E-mail: foodzhangna@163.com

收稿日期: 2022-07-26 **改回日期:** 2022-11-19

淀粉是粳米的主要组成成分,主要存在于粳米的胚乳中,占其干物质的 80% 以上^[1]。粳米淀粉具有颗粒小、组织细腻、易消化等特点,被广泛应用于食品领域^[2]。提

取粳米淀粉常用的方法主要有碱法和酶法。碱法提取淀粉是利用碱液破坏蛋白质结构间的次级键,增加蛋白质表面的介电常数,使得部分极性基团发生解离,增加了蛋白质的水溶性,从而促进蛋白质和淀粉分离^[3]。酶法提取淀粉则是利用蛋白酶的作用,将大米淀粉外层的蛋白质水解,使得淀粉与蛋白质的结合变得疏松,从而将淀粉与蛋白质分离^[4]。采用碱法、酶法提取大米淀粉时,经离心分离,将淀粉分成上、中、下 3 层,中层主要为纯度较高的淀粉,上、下两层颜色偏黄,淀粉纯度相对较低,为了得到高纯度的大米淀粉,上、下两层常被舍弃,造成优质米淀粉及米蛋白资源的浪费。易翠平等^[5]分离纯化上、下层淀粉,并对其性质进行了研究。刘娜等^[6]为了获得高纯度、高得率的大米淀粉,以碱法提取淀粉为基础,将大米淀粉的一次提取与上、下两层淀粉的再提纯进行了结合。

目前关于粳米淀粉的提取方法已有较多研究,而提取、离心过程中出现的各层淀粉,关于其性质、结构的研究却鲜有报道。研究拟以粳米为原料,分别对碱法提取和酶法提取所得的 3 层淀粉进行基础成分、性质、微观结构上的分析比较,以期为粳米淀粉的高值化利用和粳米分层淀粉的综合应用提供依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

1.1.1 材料与试剂

粳米:稻花香,黑龙江省五常金禾米业有限责任公司;
中性蛋白酶:60 000 U/g,北京市奥博星生物技术有限责任公司;

乙酸、氢氧化钠、无水乙醇、氢氧化钾:分析纯,天津市光复科技发展有限公司。

1.1.2 主要仪器设备

电子天平:JA2003 型,上海浦春计量仪器有限公司;
全自动凯氏定氮仪:K-375 型,上海沃珑仪器有限公司;

水浴恒温振荡器:SHA-B 型,常州市国立试验设备研究所;

高速离心机:TG16 型,上海卢湘仪离心机仪器有限公司;

快速黏度分析仪:Tec-Master 型,瑞典 Perten 仪器有限公司;

场发射扫描电镜:蔡司 SIGMA-500 型,苏州沃弗本精密仪器有限公司;

傅里叶变换近红外光谱仪:PerkinElmer Spectrum Two 型,美国珀金埃尔默公司。

1.2 方法

1.2.1 粳米淀粉的提取

(1) 碱法提取粳米淀粉:参考盛志佳^[7]的方法并改

动。称取过 100 目筛的粳米粉,按固液比 1:4 (g/mL) 添加质量浓度为 0.3% 的 NaOH 溶液,搅拌 3 h,3 000 r/min 离心 15 min,弃去上清液,用去离子水清洗沉淀物,直至上清液 pH≤7。将沉淀物与无水乙醇按固液比 1:3 (g/mL) 混合,搅拌 2 h,弃去上清液,重复上述水洗步骤,离心后的沉淀物分为 3 层,将 3 层淀粉进行分离、干燥、粉碎、过 100 目筛后密封保存。碱法提取所得的上、中、下 3 层淀粉分别命名为碱法上层淀粉(A-US)、碱法中层淀粉(A-MS)和碱法下层淀粉(A-LS)。

(2) 酶法提取粳米淀粉:参考李莹等^[8]的方法并改动。称取过 100 目筛的粳米粉,按固液比 1:4 (g/mL) 添加质量浓度为 0.5% 的中性蛋白酶溶液,50 ℃水浴 3 h,3 000 r/min 离心 15 min,弃去上清液,用去离子水清洗沉淀物,直至上清液 pH≤7。将沉淀物与无水乙醇按固液比 1:3 (g/mL) 混合,搅拌 2 h,加入 1 mol/L 的 NaOH 溶液进行灭酶处理,重复上述水洗步骤,离心后的沉淀物分为 3 层,将 3 层淀粉进行分离、干燥、粉碎、过筛后密封保存。酶法提取所得的上、中、下 3 层淀粉分别命名为酶法上层淀粉(E-US)、酶法中层淀粉(E-MS)和酶法下层淀粉(E-LS)。

1.2.2 粳米各层淀粉的相对比例 按式(1)进行计算。

$$R = \frac{m_1}{m_2} \times 100\%, \quad (1)$$

式中:

R——各层淀粉的相对比例,%;

m_1 ——每 100 g 粳米提取的各层淀粉质量,g;

m_2 ——每 100 g 粳米中淀粉的质量,g。

1.2.3 粳米各层淀粉的基础成分测定

(1) 水分含量:按 GB 5009.3—2016 执行。

(2) 脂肪含量:按 GB 5009.6—2016 执行。

(3) 蛋白质含量:按 GB 5009.5—2016 执行。

(4) 淀粉含量:按 GB 5009.9—2016 执行。

(5) 直链淀粉含量:按 GB/T 15683—2008 执行。

1.2.4 溶解度和膨润力测定 称取一定量干燥后的样品,制成质量分数为 2% 的淀粉乳,分别于 55,60,65,70,75,80,85,90 ℃水浴 30 min,7 500 r/min 离心 10 min,上清液于 105 ℃烘干至恒重,并分别按式(1)、式(2)计算溶解度和膨润力。

$$S = \frac{A}{W} \times 100\%, \quad (2)$$

$$B = \frac{P}{W \times (1-S)}, \quad (3)$$

式中:

S——溶解度,%;

A——被溶解的淀粉质量,g;

W——干燥后的淀粉质量,g;

B——膨润力,g/g;

P——离心后沉淀物的质量, g。

1.2.5 糊化特性测定 采用快速黏度分析仪进行糊化特性的测定。根据 RVA 自带软件进行水分校正, 配制质量分数为 14%(以干基计)的淀粉乳。样品先于 50 ℃ 预热 1 min, 以 12 ℃/min 的速率升温至 95 ℃, 保持 2 min, 以 12 ℃/min 的速率冷却至 50 ℃ 并保持 2 min。采用 TCW 配套软件分析, 获得主要参数包括峰值黏度、谷值黏度、终值黏度、衰减值和回生值。

1.2.6 颗粒形貌观察 样品干燥后将其粘附在双面导电胶上进行喷金处理, 电压为 15 kV, 放大倍数为 3 000 倍, 用扫描电镜进行观察、拍照。

1.2.7 傅里叶变换红外光谱测定 将干燥后的样品和溴化钾以质量比 1 : 50 进行混合研磨, 压片后进行傅里叶变换红外光谱测定。扫描范围为 4 000~400 cm⁻¹, 分辨率为 4 cm⁻¹。

1.3 数据统计与分析

所有试验均重复 3 次, 结果以平均值±标准偏差表示。使用 Origin 2018 和 Excel 软件制图, 使用 SPSS 25 进行数据统计分析。

2 结果与分析

2.1 粳米各层淀粉的相对比例

由表 1 可知, A-MS 和 E-MS 的淀粉相对比例最高, A-LS 和 E-LS 的淀粉相对比例最低, 说明碱法和酶法提取的中层淀粉相对比例最高。但 A-US 和 A-LS、E-US 和 E-LS 相加后的淀粉相对比例为 40% 左右, 且其淀粉含量 ≥90%, 表明酶法和碱法提取得到的上、下层淀粉, 可用于粳米淀粉的开发利用, 且有利于粳米资源的高值化应用^[9]。

2.2 粳米各层淀粉的基础成分分析

由表 2 可知, A-MS 和 E-MS 中的淀粉含量最高, 蛋白质和脂肪含量较低, 且 A-MS 和 E-MS 中的蛋白质、淀粉和脂肪含量均无显著性差异, 说明碱法和酶法均能获得较高纯度的粳米淀粉。A-MS 的淀粉含量高于 A-US 和 A-LS 的, A-US 和 A-LS 之间差异不显著; E-MS 的淀粉含量最高, E-US 和 E-LS 之间差异不显著。碱法提取

表 1 碱法和酶法提取的粳米各层淀粉的相对比例[†]

Table 1 Yield of each starch layer of japonica rice extracted by alkaline and enzymatic methods

提取方法	%		
	上层	中层	下层
碱法	20.68±0.12	60.07±0.18	18.83±0.09
酶法	20.57±0.14	59.83±0.21	19.46±0.13

[†] 各层淀粉的相对比例均以干基计。

的 3 层粳米淀粉中, A-US 的蛋白质含量最高, A-MS 的最低; 酶法提取的 3 层粳米淀粉中, E-US 的蛋白质含量最高, E-MS 的最低。大米蛋白中的清蛋白水溶性较好, 其他蛋白水溶性较差, 采用不同方法提取时, 蛋白质包裹淀粉颗粒的结构被破坏, 大米中的清蛋白溶出, 离心后与其他被水解的蛋白质留存于水相中。其他不溶于水的蛋白根据沉降系数不同而保留在上、下两层中^[10], 使得上、下两层中的蛋白质含量偏高, 其中上层淀粉中的蛋白质含量高于下层淀粉的。碱法和酶法提取的上、下两层的直链淀粉含量均高于中层的, 上、下两层的支直比高于中层的。两种方法提取的粳米各层淀粉的脂肪含量无显著性差异, 说明淀粉提取过程中除脂效果较好。

2.3 溶解度和膨润力分析

由图 1 可知, 当温度为 60~90 ℃ 时, 粳米各层淀粉的溶解度和膨润力均随温度的升高呈上升的趋势。这是由于温度升高导致淀粉分子内的化学键断裂, 从紧密排列变为疏松状态, 吸水量和分子流动性迅速增加, 促进了颗粒破裂后的淀粉分子在水中的分散^[11]。E-MS 的溶解度和膨润力大于 A-MS 的, 可能是因为淀粉经中性蛋白酶酶解后, 淀粉颗粒间的间隙变大, 水分子更容易进入到淀粉颗粒之间^[12]。碱法提取的 3 层粳米淀粉中, A-MS 的溶解度最大, 膨润力最低; 酶法提取的 3 层粳米淀粉中, E-MS 的溶解度最高, 膨润力最低。碱法和酶法提取的下层淀粉的溶解度最低, 膨润力最高, 是由于下层淀粉中直链淀粉含量较多, 直链淀粉含量越高的淀粉, 其颗粒内部结构紧凑, 淀粉难以从内部逸出, 与 Zhong 等^[13]的研究结果一致。

表 2 碱法和酶法提取的粳米各层淀粉的基础成分[†]

Table 2 Basal composition of each starch layer of japonica rice extracted by alkaline and enzymatic methods

样品	淀粉含量/%	蛋白质含量/%	直链淀粉含量/%	支直比	脂肪含量/%
A-US	91.89±0.62 ^c	6.92±0.04 ^b	16.13±0.09 ^c	4.69±0.17 ^d	0.56±0.03
A-MS	98.06±0.23 ^a	0.81±0.03 ^e	11.26±0.38 ^d	7.73±0.08 ^b	0.42±0.02
A-LS	92.68±0.69 ^b	5.06±0.04 ^d	19.71±0.53 ^a	3.78±0.09 ^f	0.64±0.02
E-US	91.57±0.27 ^{cd}	7.51±0.14 ^a	11.35±0.39 ^d	5.49±0.11 ^c	0.53±0.04
E-MS	97.83±0.44 ^a	0.83±0.03 ^e	8.77±0.24 ^e	10.10±0.07 ^a	0.44±0.05
E-LS	92.54±0.63 ^b	5.27±0.05 ^c	16.98±0.13 ^b	4.14±0.06 ^e	0.67±0.04

[†] 各指标均以干基计; 同列字母不同表示差异显著 ($P<0.05$)。

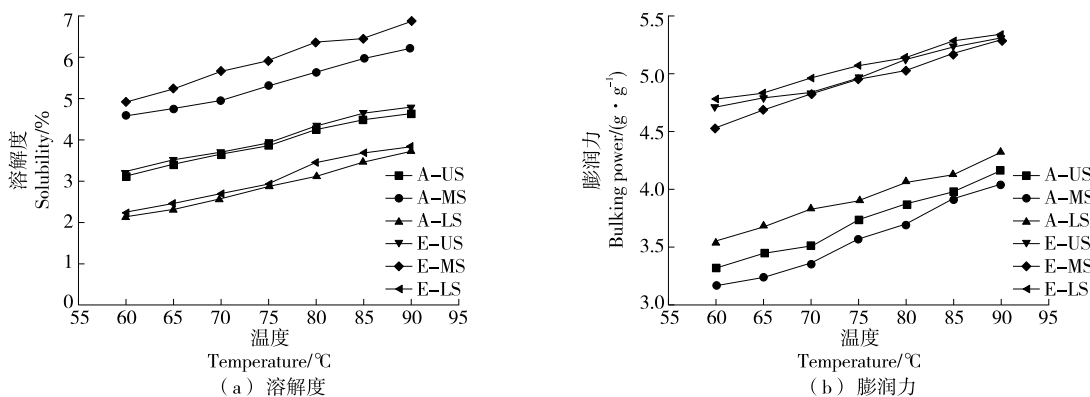


图1 不同温度下碱法和酶法提取的粳米各层淀粉的溶解度和膨润力

Figure 1 Solubility and swelling power of various layers of starch of japonica rice extracted by alkaline and enzymatic methods at different temperatures

2.4 糊化特性分析

淀粉糊化特性受多因素影响,主要取决于淀粉颗粒大小、支直比以及淀粉颗粒在加热过程中产生的剪切力等因素,此外,淀粉与蛋白质以及脂肪形成的二元或三元复合物,也会影响淀粉的糊化性质^[14]。由表3可知,A-MS的峰值黏度、衰减值和回生值高于E-MS的,A-MS的峰值黏度高于酶法的,可能是由于碱性条件下淀粉的结构发生了改变,淀粉颗粒更易吸水,直链淀粉从淀粉颗粒中逸出并在糊化过程中形成了糊状物^[15]。衰减表示峰值黏度与谷值黏度的差值,其数值越小热糊稳定性越好^[16];回生值表示最终黏度与谷值黏度的差值,其数值代表淀粉回生的程度及冷却形成凝胶的强弱^[17]。碱法和酶法提取的中层淀粉的峰值黏度、衰减值和回生值均高于上、下层淀粉的,说明中层淀粉的热稳定性较低,在加热吸水过程中,淀粉颗粒易破损、易吸水糊化、易老化。碱法提取的3层粳米淀粉中,A-US的衰减值和回生值最低;酶法提取的3层粳米淀粉中,E-US的衰减值和回生值最低,说明上层淀粉结合水的能力较低,糊化冷却后形成凝胶的能力也有所降低,热稳定性较好,不易回生。

2.5 微观结构分析

由图2所知,大多数淀粉颗粒的平均粒径为4.8~

6.7 μm 。与E-MS相比,A-MS的结构均一旦致密,其颗粒大体呈平滑的多边形和球形。与A-MS相比,A-US中少数淀粉有裂纹和凹陷,有蛋白质附着在淀粉上;A-LS颗粒形态为较规整的多边形,结构紧密,大部分淀粉颗粒表面平滑。与E-MS相比,E-US的淀粉颗粒分布较稀疏、大小不均匀且有大颗粒存在,可能是蛋白质与淀粉相结合;E-LS颗粒分布较均匀,结构紧密。

2.6 短程有序结构分析

由图3可知,碱法和酶法提取各层淀粉具有相似的主要特征吸收峰。3 200~3 550 cm^{-1} 处有一个较宽的吸收峰,对应分子内和分子间结合的一OH的振动拉伸,该峰与淀粉分子的一OH伸缩振动有关^[18]。2 840~3 000 cm^{-1} 处有一个较弱的峰,对应C—H的不对称伸缩振动峰^[19]。1 000~1 300 cm^{-1} 处出现的吸收带是淀粉中的典型特征带,两种方法提取的各层粳米淀粉吸收峰的强度不同,可能是由淀粉结晶结构有序排列的变化引起的^[20]。1 081, 1 158 cm^{-1} 处的吸收峰分别对应C—O—C和C—C的伸缩振动^[21]。在红外光谱中,1 047 cm^{-1} 处的吸收峰代表淀粉结晶区的结构特征,1 022 cm^{-1} 处的吸收峰代表淀粉无定形区的结构特征^[22]。在淀粉研究中,常用1 047, 1 022 cm^{-1} 的强度比

表3 碱法和酶法提取的粳米各层淀粉的糊化特性[†]

样品	峰值黏度	谷值黏度	衰减值	最终黏度	回生值
A-US	2 435.33±76.95 ^b	1 004.33±39.61 ^e	1 461.00±45.07 ^a	2 369.67±71.81 ^c	1 365.33±41.40 ^c
A-MS	2 836.00±84.25 ^a	1 207.00±42.93 ^d	1 629.00±54.57 ^a	2 774.33±64.73 ^b	1 567.33±54.19 ^a
A-LS	2 493.33±85.45 ^b	1 028.33±36.35 ^e	1 465.00±51.04 ^a	2 474.00±60.02 ^c	1 452.33±37.43 ^{ab}
E-US	1 786.00±14.73 ^d	1 550.67±13.28 ^c	235.33±13.65 ^c	1 972.33±14.01 ^d	421.67±17.64 ^f
E-MS	2 449.67±25.32 ^b	1 939.67±46.70 ^a	510.00±22.00 ^b	2 977.00±78.42 ^a	1 037.33±32.33 ^d
E-LS	2 124.00±73.87 ^c	1 694.67±45.29 ^b	429.33±18.88 ^{bc}	2 502.33±69.66 ^c	807.67±16.17 ^e

[†] 同列字母不同表示差异显著($P<0.05$)。

值表示淀粉的短程有序性,其比值越大,短程有序性越高^[23]。碱法和酶法所提取的中层淀粉的短程有序度相比其他两层高,说明中层淀粉晶体排列更有序,结构更趋稳定。

3 结论

以粳米为原料,分别采用碱法和酶法提取粳米淀粉,经离心后从上到下可分为3层,中层淀粉的相对比例最

高为60%,蛋白质和直链淀粉含量最低,上层和下层淀粉的淀粉含量稍低于中层淀粉,但蛋白质和直链淀粉含量均高于中层淀粉。碱法和酶法提取的各层淀粉的溶解度和膨润力均随温度的上升而增加,其中中层淀粉的溶解度最高、膨润力最低,下层淀粉的溶解度最低、膨润力最高。碱法和酶法提取的中层淀粉的热稳定性较差,在加热吸水过程中,淀粉颗粒易破损、易吸水糊化、易老化,而上层和下层淀粉的热稳定性较好,不易回生。碱法和酶法提取的中层淀粉颗粒多呈表面光滑的多边形和球形,上层淀粉颗粒大小不均匀,下层淀粉结构较紧密,分布较均匀,形状较规整。酶法提取的各层淀粉颗粒分布相对稀疏。在红外光谱图中,碱法和酶法提取各层淀粉具有相似的主要特征吸收峰,且中层淀粉的短程有序性较高。综上,粳米上层和下层淀粉可进一步开发利用,提高大米资源的综合利用。后续可针对所得的各层淀粉分子结构特性进行研究,进一步深入了解粳米各层淀粉分子结构特性的差异。

参考文献

- [1] AMAGLIANI L, O'REGAN J, KELLY A L, et al. Chemistry, structure, functionality and applications of rice starch[J]. *Journal of Cereal Science*, 2016, 70: 291-300.
- [2] 鄒银强, 王尧, 陈江平, 等. 高能球磨对大米淀粉物化特性和结构的影响[J]. *食品科学*, 2020, 41(13): 89-95.
- [3] 李明. 大米淀粉的制备方法及物理化学特性研究[D]. 无锡: 江南大学, 2008: 24-25.
- [4] 马申嫣, 范大明, 王丽云, 等. 大米淀粉制备工艺对其糊化特性和粒度分布的影响[J]. *食品与生物技术学报*, 2012, 31(11): 1 173-1 179.
- [5] 易翠平, 姚惠源. 高纯度大米蛋白和淀粉的分离提取[J]. *食品与机械*, 2004, 20(6): 18-21.
- [6] 刘娜, 邵艳华, 裴丽娟, 等. 高纯度大米淀粉制备工艺研究[J]. *精细与专用化学品*, 2010, 18(12): 13-17.
- [7] 盛志佳. 大米淀粉提取及大米多孔淀粉的制备及特性研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2010: 7-19.

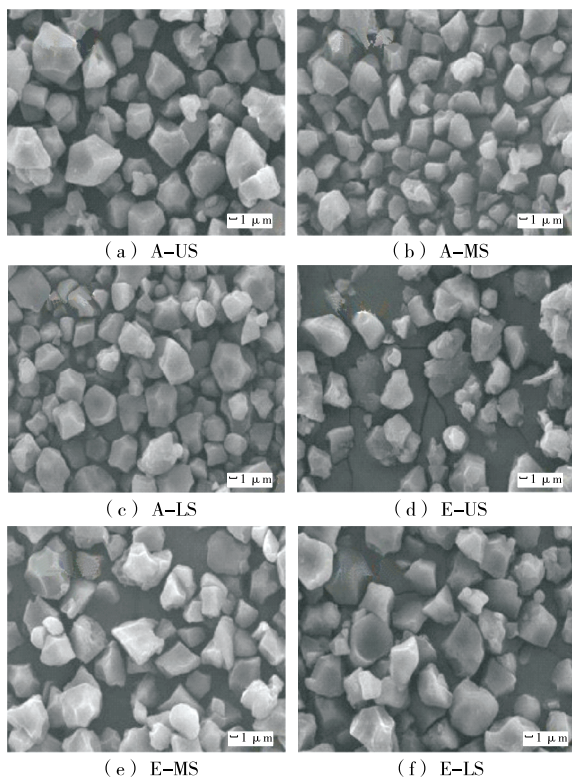


图2 碱法和酶法提取的粳米各层淀粉的扫描电镜图

Figure 2 Scanning electron micrographs of various layers of starch from japonica rice extracted by alkaline and enzymatic methods

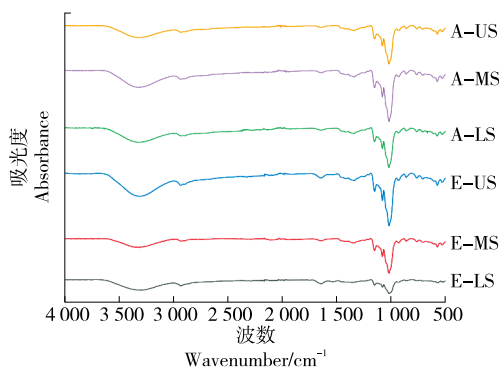


图3 碱法和酶法提取的粳米各层淀粉的红外光谱图

Figure 3 Infrared spectra of various layers of starch from japonica rice extracted by alkaline and enzymatic methods

- SHENG Z J. Extraction of rice starch and preparation and characterization of rice porous starch [D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2010: 7-19.
- [8] 李莹, 王泽南, 邓伟, 等. 酶法、酸法制备碎米多孔淀粉工艺研究及其比较[J]. 食品科学, 2010, 31(22): 64-68.
- LI Y, WANG Z N, DENG W, et al. Study on the preparation of porous starch of broken rice by enzymatic and acid methods and its comparison[J]. Food Science, 2010, 31(22): 64-68.
- [9] 李玥, 牟伯中, 罗昌荣, 等. 不同分离方法对大米淀粉理化性质的影响[J]. 安徽农业科学, 2011, 39(25): 15 796-15 798, 15 827.
- LI Y, MOU B Z, LUO C R, et al. Effect of different separation methods on the physicochemical properties of rice starch[J]. Anhui Agricultural Science, 2011, 39(25): 15 796-15 798, 15 827.
- [10] 张美, 李庆, 李一林, 等. 米渣营养成分测定及其蛋白质提取工艺优化[J]. 食品科学技术学报, 2015, 33(6): 65-71.
- ZHANG M, LI Q, LI Y L, et al. Determination of nutrient composition of rice pomace and optimization of its protein extraction process[J]. Journal of Food Science and Technology, 2015, 33(6): 65-71.
- [11] ZAVAREZE E, STORCK C R, CASTRO L, et al. Effect of heat-moisture treatment on rice starch of varying amylose content[J]. Food Chemistry, 2010, 121(2): 358-365.
- [12] 芦鑫, 张晖, 姚惠源. 不同提取方法对粳米淀粉结构的影响[J]. 食品科学, 2008, 29(1): 102-106.
- LU X, ZHANG H, YAO H. Effect of different extraction methods on the structure of japonica rice starch[J]. Food Science, 2008, 29(1): 102-106.
- [13] ZHONG Y Y, QU J Z, LI Z H, et al. Rice starch multi-level structure and functional relationships[J]. Carbohydrate Polymers, 2022, 275(1): 118777.
- [14] QI X G, CHENG L L, LI X J, et al. Effect of cooking methods on solubility and nutrition quality of brown rice powder[J]. Food Chemistry, 2018, 274: 444-451.
- [15] BALET S, GUELPA A, FOX G, et al. Rapid visco analyser (RVA) as a tool for measuring starch-related physicochemical properties in cereals: A review[J]. Food Analytical Methods, 2019, 12(10): 2 344-2 360.
- [16] 马晓丽, 常婧瑶, 殷永超, 等. 乙醇-热处理制备冷水溶胀小麦淀粉及其结构和功能特性的研究[J]. 食品工业科技, 2022, 43(6): 18-24.
- MA X L, CHANG J Y, YIN Y C, et al. Preparation of cold water-swollen wheat starch by ethanol-heat treatment and its structural and functional properties [J]. Food Industry Science and Technology, 2022, 43(6): 18-24.
- [17] 孙宇, 徐文, 余平, 等. 加工精度对大米理化特性、糊化特性以及食用品质的影响[J]. 粮食与油脂, 2021, 34(8): 29-33.
- SUN Y, XU W, YU P, et al. Effects of processing accuracy on physical and chemical properties, pasting characteristics and eating quality of rice[J]. Grain and Oil, 2021, 34(8): 29-33.
- [18] GOVINDARAJU I, ZHUO G Y, CHAKRABORTY I, et al. Investigation of structural and physico-chemical properties of rice starch with varied amylose content: A combined microscopy, spectroscopy, and thermal study [J]. Food Hydrocolloids, 2022, 122: 107093.
- [19] FREI M, SIDDHURAJU P, BECKER K. Studies on the in vitro starch digestibility and the glycemic index of six different indigenous rice cultivars from the Philippines[J]. Food Chemistry, 2003, 83(3): 395-402.
- [20] FAN D M, MA W R, WANG L Y, et al. Determination of structural changes in microwaved rice starch using Fourier transform infrared and Raman spectroscopy[J]. Starch-Starke, 2012, 64(8): 598-606.
- [21] 周海宇, 任瑞林, 包亚莉, 等. 高静压酯化木薯淀粉结构及其理化性质的研究[J]. 现代食品科技, 2016(2): 107-112.
- ZHOU H Y, REN R L, BAO Y L, et al. Study on the structure of high hydrostatic pressure esterified tapioca starch and its physicochemical properties [J]. Modern Food Science and Technology, 2016(2): 107-112.
- [22] 李蟠莹, 戴涛涛, 陈军, 等. 原花青素对大米淀粉老化性质的影响[J]. 食品工业科技, 2018, 39(18): 6-11.
- LI B Y, DAI T T, CHEN J, et al. Effect of proanthocyanidins on the aging properties of rice starch[J]. Food Industry Science and Technology, 2018, 39(18): 6-11.
- [23] 李江涛, 周巧, 林亲录, 等. 不同糊化度籼米淀粉的结构及理化性质研究[J]. 中国粮油学报, 2022, 37(4): 76-82.
- LI J T, ZHOU Q, LIN Q L, et al. Structural and physicochemical properties of indica rice starch with different pasting degrees[J]. Chinese Journal of Cereals and Oils, 2022, 37(4): 76-82.

(上接第 16 页)

- [14] 徐坤华, 赵巧灵, 廖明涛, 等. 金枪鱼质构特性与感官评价相关性研究[J]. 中国食品学报, 2014, 14(12): 190-197.
- XU K H, ZHAO Q L, LIAO M T, et al. Research of relationship between texture and sensory evaluation of tuna[J]. Chinese Journal of Food, 2014, 14(12): 190-197.
- [15] 李雪琴, 张芳芳, 党献民, 等. SPASS 主成分分析法在速冻水饺皮质构品质评价中的应用[J]. 农业机械, 2012(36): 67-69.
- LI X Q, ZHANG F F, DANG X M, et al. Application of SPASS

principal component analysis in the evaluation of cortical composition quality of quick-frozen dumplings [J]. Agricultural Machinery, 2012(36): 67-69.

[16] 何新益, 汪姣, 任小青, 等. 花色馒头的制备及质构特性主成分分析[J]. 中国粮油学报, 2011, 26(7): 108-112.

HE X Y, WANG J, REN X Q, et al. Preparation and principal component analysis of texture profile properties of colorful steamed bread[J]. Chinese Journal of Cereals and Oils, 2011, 26(7): 108-112.