

喷雾干燥协同酶法制备抗性藕粉的影响

谏迪¹, 肖朝耿^{1*}, 徐玲峰², 卢文静¹, 叶沁¹, 张岑¹

¹浙江省农业科学院食品科学研究所 杭州 310021

²浙江农林大学食品与健康学院 杭州 311300

摘要 为了研究喷雾干燥协同酶法制备抗性藕粉理化性质的影响,以藕粉为原料,分别采用高压冷却循环、喷雾干燥协同耐高温 α -淀粉酶和普鲁兰酶制备抗性藕粉,测定抗性藕粉得率、质构、复水性、微观结构、红外光谱特征,并与传统烘干法的改性效果作比较。结果表明:喷雾干燥协同普鲁兰酶制备的抗性藕粉得率最高,为5.3%,显著高于其它处理组($P < 0.05$),其次为喷雾干燥协同 α -淀粉酶制备的抗性藕粉得率(4.6%),高压冷却循环法的抗性藕粉得率(2.7%)最低。喷雾干燥协同改性处理可以降低藕粉的硬度、弹性、胶着性和内聚性。扫描电镜显示:酶解烘干法制备的抗性藕粉微粒表面粗犷,裂纹明显,颗粒较大,而喷雾干燥协同制备的抗性藕粉颗粒均匀细腻,表面光滑。与原藕粉相比,喷雾干燥协同制备可引起抗性藕粉3500~3200 cm^{-1} 范围的特征吸收峰变窄和990 cm^{-1} 特征吸收峰偏移,增加无定形区,减少支链并降低黏度,使藕粉具备较好的抗性。

关键词 藕粉; 抗性淀粉; 耐高温 α -淀粉酶; 普鲁兰酶; 喷雾干燥

文章编号 1009-7848(2023)04-0274-09 DOI: 10.16429/j.1009-7848.2023.04.026

藕粉是睡莲科植物莲 (*Nelumbo nucifera* Gaertn.)的肥厚根茎加工制成的淀粉类食品,营养丰富,具有益血、调中、开胃之功效,是老少皆宜的佳品^[1],然而,藕粉中淀粉热量高、消化快,而且容易引起腹胀,因此不适合肥胖人士和胃肠道功能不健全者^[2]。抗性淀粉(RS)是一种无法被快速消化的淀粉,其制备方法主要包括物理改性、酶法改性和化学改性^[3]。物理改性不产生有毒、有害物质,对加工人员没有危害,如压热处理、高静水压糊化和湿热处理等,然而,它们能引起淀粉颗粒崩解,晶体结构被破坏^[4]。Tovar等^[5]在研究水蒸气对抗性淀粉形成的影响时,发现压热处理导致淀粉颗粒完全被破坏,易形成可互相缠绕的氢键。生物酶法改性是通过酶的催化水解或转苷作用来改变淀粉分子的结构和链长^[6],具有安全性高等特点,常被应用于食品加工领域^[7]。目前大多数的酶法改性是在淀粉糊化过程中加入普鲁兰酶和 α -淀粉酶,如康怀彬等^[8]采用普鲁兰酶和压热协同处理对玉米淀粉进行改性,结果发现当普鲁兰酶添加量为10 U/g,作用时间为9 h时,抗性淀粉得率较高。

干燥方式对RS特性的影响较大,而采用喷雾干燥制备的RS样品流动性好,粒度均匀,可有效避免传统热风干燥导致的非酶褐变,同时,因速度快,操作连续性强,喷雾干燥被广泛应用于食品加工业^[9]。刘云飞^[10]在改良挤压大米淀粉时发现,喷雾干燥后的样品在热力学性质和质构等方面表现较好。喷雾干燥处理淀粉时通过瞬时高温完成干燥,制备的淀粉粉末细腻、粒径小、颗粒呈球状,且中心部位存在中央腔。中央腔通过通道与淀粉颗粒的外表面连接起来使聚合度更高,不易酶解,这种形状还能提高样品的流动性,改善抗性淀粉的品质^[11]。近年来,关于RS的研究越来越多,而通过喷雾干燥协同酶法制备抗性藕粉的研究寥寥无几^[12]。综合考虑干燥对改性后淀粉的微观结构、聚集度和口感的影响,以及生产的连续性等成本因素,喷雾干燥技术相比热风干燥淀粉具有更加明显的优势。

本文以藕粉为原料,通过喷雾干燥协同普鲁兰酶和耐高温 α -淀粉酶制备抗性藕粉,测定RS得率、质构、复水性、微观结构、红外光谱特征等指标,研究喷雾干燥协同酶法制备抗性藕粉的改性效果。

收稿日期: 2022-04-27

基金项目: 浙江省重点研发计划项目(2019C02069)

第一作者: 谏迪,男,博士,助理研究员

通信作者: 肖朝耿 E-mail: xiaochaogengxiao@163.com

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

藕粉,杭州采芝斋食品有限公司提供。普鲁兰酶(2 000 U/g)、淀粉葡萄糖苷酶(100 000 U/mL)和耐高温 α -淀粉酶(12 000 U/g),上海麦克林生化科技有限公司。其它试剂均为国产分析纯级。

1.2 主要仪器与设备

VERTEX70 红外光谱仪, Bruker 公司; Rapid TA 质构仪, 上海腾拔仪器科技有限公司; Hitachi TM3000 扫描电镜, 苏州赛恩斯仪器有限公司; UV-1800 紫外-可见分光光度计, 上海精密仪器仪表有限公司; ALB-224 电子天平, Sartorius (北京) 有限公司; FE20 pH 计, 梅特勒托利多仪器(上海)有限公司; DK-8D 数显恒温水浴锅, 江苏金怡仪器科技有限公司; 07-02-00492 型喷雾干燥机, LabPlant 公司; DZF-6050 型真空干燥箱, 上海一恒科学仪器有限公司; GJJ-0.1/25 均质机, 上海诺尼轻工机械有限公司; 5424R 冷冻离心机, 德国 Eppendorf 公司。

1.3 试验方法

1.3.1 抗性淀粉制备

1) 高压冷却循环法 根据文献[13]的方法并稍作改变。称取 20 g 藕粉, 加入 980 mL 蒸馏水, 即得质量分数为 2% 的藕粉液。用牛皮纸封口后置于高压灭菌锅中 121 °C 处理 20 min, 冷却后重复上述操作 3 次。冷却至室温后于 4 °C 老化 24 h, 60 °C 烘干。

2) 耐高温 α -淀粉酶烘干法 根据文献[14]的方法并稍作改变。称量 20 g 藕粉配成 2% 的藕粉水溶液, 于 85 °C 水浴糊化 30 min, 按 30 U/g 添加耐高温 α -淀粉酶, 80 °C 水浴酶解 35 min, 调节 pH 值至 3.0, 100 °C 灭酶 10 min, 调至 pH 7.0, 样品经 4 °C 处理 24 h 后于 60 °C 烘干。

3) 普鲁兰酶烘干法 根据文献[15]的方法并稍作改变。称取 20 g 藕粉, 用蒸馏水调制 2% 的藕粉液, 用磷酸缓冲液调节 pH 值至 6.4, 121 °C 处理 20 min, 冷却至室温后调节 pH 值至 4.3, 添加 10 U/g 普鲁兰酶液后置于 60 °C 水浴振荡 12 h, 酶解结束后 100 °C 灭酶 10 min, 冷却至室温, 于 4 °C 老化处理 24 h, 60 °C 烘干。

4) 喷雾干燥协同法 将酶法制备的样品均

质后通过喷雾干燥机喷雾干燥得到抗性藕粉。进口温度 160 °C, 出口温度 70 °C, 流速设置 7 L/h^[16]。

1.3.2 RS 得率测定 采用 Goni 等^[17]改进方法测定 RS 得率。称取不同方法制备的抗性藕粉各 2 g, 置于 150 mL 三角瓶中, 添加 HCl-KCl 缓冲溶液 (pH 2.0~4.0) 15 mL, 加入 0.1 mL 胃蛋白酶【1g/(100 mL)】, 60 °C 水浴振荡 1 h, 取出, 冷却至室温, 调整 pH 值至 5.4, 加入 2 mL 1% 耐高温 α -淀粉酶, 90 °C 水浴振荡 1.5 h。样品重新冷却至室温, 调整 pH 值为 4.1~4.3, 加入 1 mL 0.01% 葡萄糖淀粉酶, 40 °C 水浴振荡 12 h。加入 4 倍体积的无水乙醇终止反应, 4 000 r/min 离心 20 min, 弃上清液, 沉淀用 80% 乙醇洗 3 遍。用 12 mL 2 mol/L KOH 溶解沉淀 (RS), 调整 pH 值至 4.1~4.3, 加入 1 mL 0.01% 葡萄糖淀粉酶, 40 °C 水解 45 min 后沸水浴加热 5 min, 4 000 r/min 离心 20 min, 收集上清液, 用 10 mL 蒸馏水洗涤沉淀 2 次, 合并上清液, 定容 100 mL。取该上清液 1 mL, 根据标准曲线计算 RS 得率^[18]。

$$RS(\%) = \frac{0.9 \times C \times V}{M} \times 100 \quad (1)$$

式中, RS——抗性淀粉得率(%); M——样品的干质量(mg); 0.9——葡萄糖与脱水葡萄糖之间的换算系数; C——葡萄糖含量(mg); V——离心后上清液定容后的体积(100 mL)。

1.3.3 质构分析 称取改性后的藕粉 2 g, 加入 10 mL 蒸馏水, 95 °C 水浴磁力搅拌糊化 15 min, 20 °C 放置 3 h 后测定凝胶质构。采用“Return to Start”模式, 选用 P/0.5s 探头, 设定测量前速 0.5 mm/s, 测试速率 1 mm/s, 测量后速率 10 mm/s, 形变 65%, 停留时间 2 s, 触发力 5 g, 采集数据点为 200 pps, 每个样品重复 6 次, 结果用平均数表示^[19]。

1.3.4 复水性测定 根据文献[20]的方法并稍作改变。不同样品各称取 2.0 g (M_1), 加入 20 mL 蒸馏水混匀, 在 90 °C 水浴中振荡 30 min, 冷却至室温, 4 000 r/min 离心 15 min, 弃上清液, 称取沉淀的质量 (M_2)。

$$WAI(g/g) = \frac{M_2}{M_1} \quad (2)$$

式中, WAI——复水比; M_1 ——称取样品的质量(g); M_2 ——离心后沉淀的质量(g)。

1.3.5 红外光谱分析 将待测的样品和溴化钾置于烘箱内,100℃干燥至恒重,放入干燥器中保存。称取2mg淀粉样品,在红外灯的照射下,置于研钵中研磨5~10min,加入150mg溴化钾干燥粉末,充分混合后继续研磨2~5min。将研磨后的混合物粉末用硫酸纸灌入压模器中压片,取出薄片,放入样品架上,置于傅里叶变换红外光谱仪内进行扫描分析。光谱采集范围 $4000\sim 400\text{ cm}^{-1}$,扫描次数为16次,分辨率为 4 cm^{-1} [21]。

1.3.6 电镜分析 用电子扫描显微镜专用的双面胶固定改性好的少量样品于扫描载物圆盘上,置于样品前处理器内进行喷金处理。安装好样品后调节载物台移动旋钮和观察倍数聚焦旋钮,观察记录RS颗粒形貌特征[22]。

1.3.7 数据统计 试验结果用SPSS 18.0软件分析,采用One-way ANOVA进行组间差异显著性分析。

2 结果与分析

2.1 不同抗性藕粉外观及得率

由图1可知,不同改性处理藕粉的色泽发生明显的变化,其中高压冷却循环处理的藕粉褐变严重,色泽暗黄,限制了其在食品中的应用。普鲁兰酶和耐高温 α -淀粉酶酶解后烘干的藕粉质感相对细腻,色泽偏黄。而经过喷雾干燥协同酶法处理的藕粉偏白,且外观表现出粘结现象,可能是喷雾干燥在极短时间内完成脱水过程,极大减少了抗性淀粉溶液在干燥过程中色泽的变化[23]。

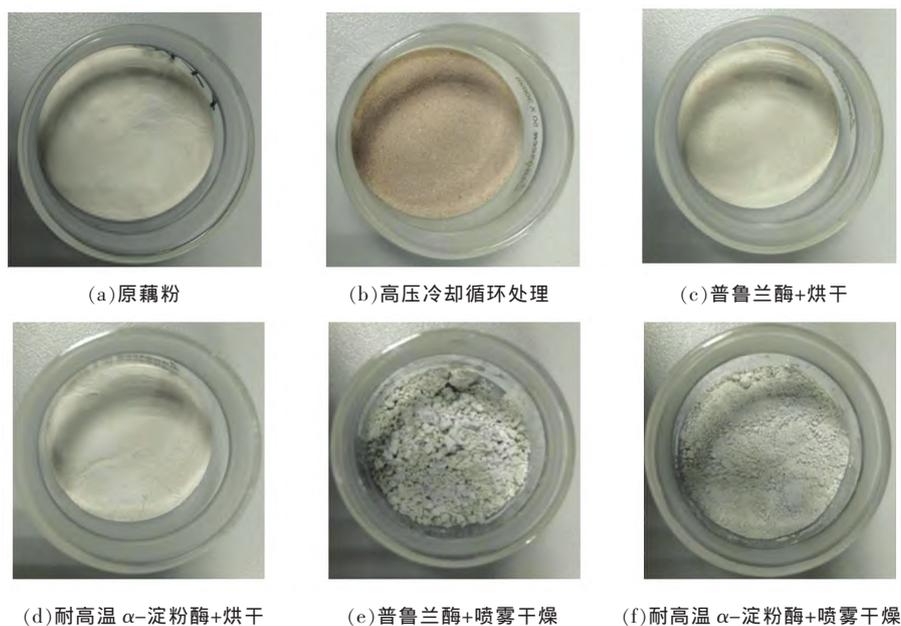


图1 不同方法制备的抗性藕粉形态

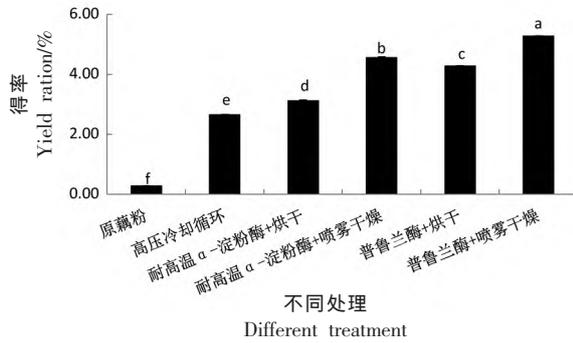
Fig.1 Morphology of resistant starch from lotus root starch by different preparation methods

由图2可知,喷雾干燥协同普鲁兰酶制备的抗性藕粉中RS得率最高(5.3%),显著高于喷雾干燥协同耐高温 α -淀粉酶法制备的RS得率($P < 0.05$)。干燥方式相同时,普鲁兰酶的RS得率均高于耐高温 α -淀粉酶的,可能是因为普鲁兰酶脱去支链,直链增多,产生更多的紧密双螺旋结构,而耐高温 α -淀粉酶切断分子链,使黏度增大,不利于直链淀粉分子相互接近形成晶体[24]。同时藕粉颗粒变小,外表面变得更粗糙,从而使酶和底物易

结合,导致藕粉消化性升高[25]。改性酶相同时,喷雾干燥协同制备的藕粉RS得率显著高于烘干藕粉,这可能是老化时形成的紧密双螺旋结构在瞬时干燥过程中来不及断裂,从而促进抗性淀粉得率的提高[26]。此外,干燥完成后形成中空凹陷结构,与藕粉颗粒外表面紧密贴合,从而增加抗性[11]。

2.2 质构

由表1可知,与原藕粉相比,改性处理后藕粉的硬度、弹性、胶着性、内聚性均显著降低($P < 0.05$)。



注:不同字母表示具有显著性差异, $P < 0.05$ 。

图 2 不同方法制备的抗性藕粉 RS 得率

Fig.2 RS yield of resistant starch from lotus root powder by different preparation methods

高压冷却循环处理导致藕粉硬度和黏度降低,可能与淀粉颗粒刚性结构破坏有关^[10]。耐高温 α -淀粉酶处理的藕粉无法形成凝胶,可能是酶作用于

α -1,4 糖苷键,导致藕粉直链淀粉含量过少,从而无法进行质构分析^[27]。支链淀粉的重结晶是后期凝胶硬度增大的主要因素,经普鲁兰酶脱支处理后淀粉支链减少,因此经普鲁兰酶处理后藕粉凝胶出现硬度降低等质构特征的改变^[28],而喷雾干燥的协同作用可进一步降低其凝胶硬度,因此喷雾干燥协同酶法制备的抗性藕粉与原藕粉相比具有较低的硬度和黏度。这与刘友锦^[20]报道的高抗性藕粉不易形成凝胶且更易搅拌的结论相似。此外,喷雾干燥协同普鲁兰酶制备抗性藕粉的内聚性显著低于原藕粉及酶法烘干的抗性藕粉 ($P < 0.05$)。据董贝贝^[29]的研究,内聚性指凝胶内部分子交联程度,反映凝胶抵抗外力的能力,且内聚性与直链淀粉含量呈负相关性,因此抗性藕粉中直链淀粉含量高导致其内聚性降低。

表 1 原藕粉和改性藕粉质构分析

Table 1 Texture analysis of original and modified lotus root powder

处理方式	硬度	弹性	胶着性	内聚性
原藕粉	67.90 ± 0.26 ^a	0.84 ± 0.01 ^a	56.43 ± 2.21 ^a	0.83 ± 0.02 ^a
高压冷却循环	24.30 ± 0.44 ^b	0.41 ± 0.05 ^b	10.55 ± 0.52 ^b	0.43 ± 0.02 ^b
α -淀粉酶+烘干	-	-	-	-
α -淀粉酶+喷雾	-	-	-	-
普鲁兰酶+烘干	23.30 ± 1.40 ^b	0.42 ± 0.02 ^b	9.96 ± 0.38 ^b	0.43 ± 0.03 ^b
普鲁兰酶+喷雾	13.40 ± 0.36 ^c	0.38 ± 0.02 ^{b,c}	5.60 ± 0.35 ^c	0.33 ± 0.02 ^c

注:肩标字母不同代表不同处理方式藕粉的质构参数存在显著性差异 ($P < 0.05$)。

2.3 对复水性影响

复水性也称吸水性,是羟基与淀粉分子链共价结合的水量多少,反映样品吸水后溶胀的能力。从表 2 可知,WAI 从大到小排序为原藕粉、高压冷却循环、普鲁兰酶烘干、喷雾干燥协同普鲁兰酶、耐高温 α -淀粉酶烘干、喷雾干燥协同 α -淀粉酶。原藕粉 WAI 显著高于抗性藕粉 ($P < 0.01$),可能是由于水浴复水温度 90 °C 高于其糊化温度,导致糊化时大量吸水溶胀。而抗性藕粉的糊化温度升高,吸水能力低于原藕粉。高压冷却循环处理后的藕粉短直链增多,导致链外侧的亲水羟基增多,因此吸水性高于酶法改性的藕粉^[30]。此外,吸水性的水大小也与微观形态相关,外表面多孔隙且粗糙的藕粉吸水性高。经耐高温 α -淀粉酶处理后样品的 WAI 显著低于其它组 ($P < 0.01$),可能是淀粉酶将

α -1,4 糖苷键, α -1,6 糖苷键切断,彻底变成可溶性糖,沉淀减少,因而持水性降低,而经普鲁兰酶脱去支链,直链淀粉增多,晶体致密性增高,因此吸水性低于高压冷却循环制备的抗性藕粉^[30]。

表 2 原藕粉和抗性藕粉复水性分析结果

Table 2 Rehydration analysis of original and modified lotus root powder

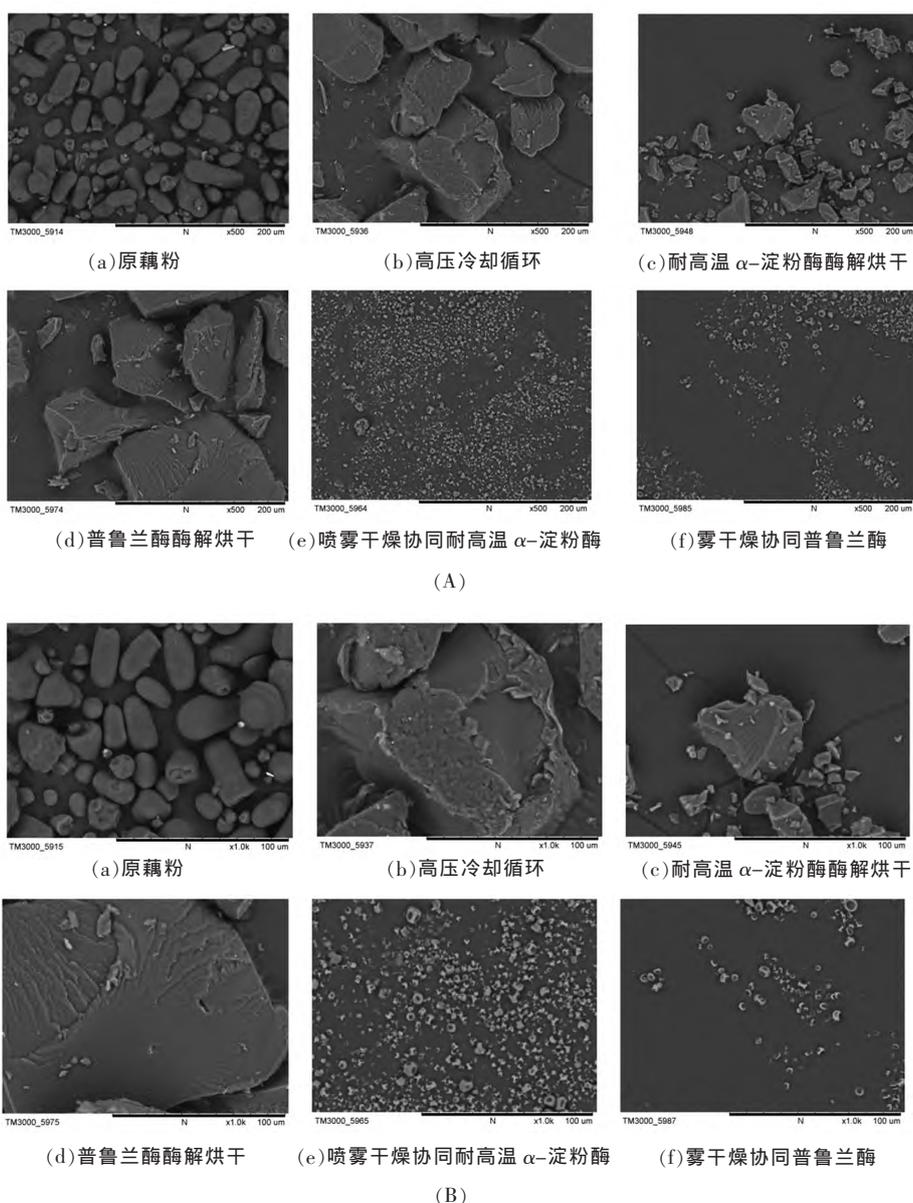
样品	WAI/g·g ⁻¹
原藕粉	7.25 ± 0.17 ^a
高压冷却循环	6.33 ± 0.19 ^b
耐高温 α -淀粉酶+烘干	0.24 ± 0.02 ^c
耐高温 α -淀粉酶+喷雾干燥	0.22 ± 0.02 ^e
普鲁兰酶+烘干	2.89 ± 0.17 ^c
普鲁兰酶+喷雾干燥	2.51 ± 0.21 ^{cd}

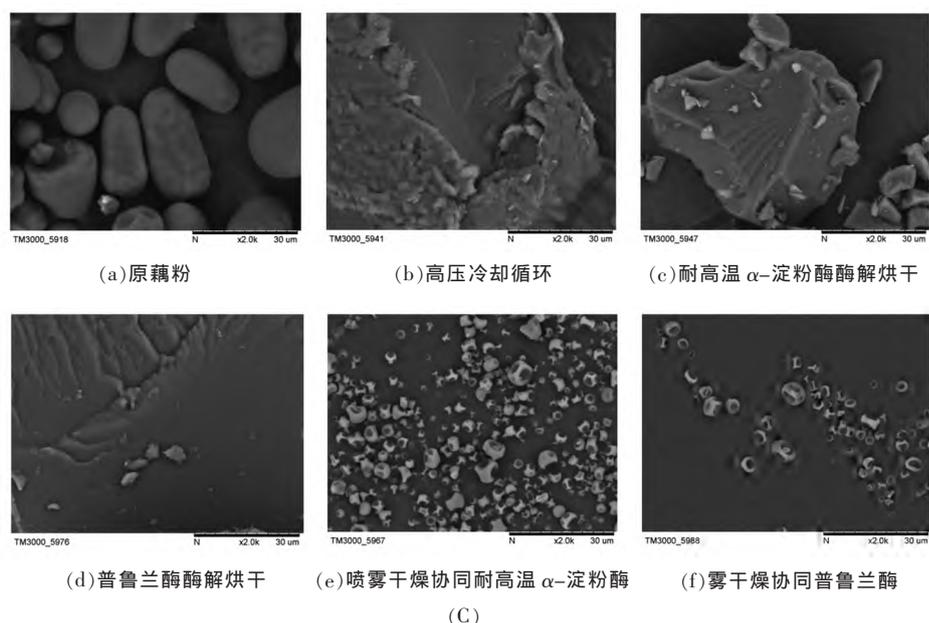
注:肩标字母不同代表不同处理方式藕粉的复水性存在显著性差异 ($P < 0.05$)。

2.4 微观形态分析

从图3可知,原藕粉颗粒大多呈椭圆棒状,表面光滑,没有明显的裂纹。高压冷却循环处理导致藕粉的颗粒表面粗糙,呈纤维状结构。高温、高压使藕粉内部分子链断裂,充分溶胀,而在冷却过程中,重新通过氢键和范德华力形成双螺旋结构,进一步折叠形成更加致密的晶粒结构。耐高温 α -淀粉酶酶解烘干藕粉的颗粒比高压冷却循环小,且大块颗粒上黏附许多小颗粒,虽较平滑但有裂纹。耐高温 α -淀粉酶为内切酶,作用于直链淀粉上 α -1,4糖苷键,导致直链长度变短,形成双螺旋结构,同时短直链连接支链,使支链淀粉的外侧支链

变长,易形成双螺旋结构^[31]。普鲁兰酶烘干法制备的藕粉微粒粗犷,裂纹明显,颗粒较大。传统烘干处理导致藕粉颗粒粗犷、体形较大,且在抗性藕粉颗粒表面形成裂纹。普鲁兰酶脱支后,原微粒结构彻底改变,淀粉微粒相互连结,导致体积增大,外表面变得粗糙、不规则^[32]。喷雾干燥协同处理可在抗性藕粉干燥过程中形成中空凹陷结构,使淀粉链外侧的亲水羟基减少,而亲水羟基数量与藕粉的复水性呈正相关^[33]。喷雾干燥协同酶法制备的藕粉颗粒的形貌相似,颗粒细小、均匀,表面光滑,内部有凹陷。





注: A、B、C 分别为放大 500, 1 000, 2 000 倍的扫描电镜图。

图 3 原藕粉和抗性藕粉的微观形态

Fig.3 Micromorphology of original and modified lotus root powder

2.5 官能团分析

由图 4 可知,藕粉及抗性藕粉的红外光谱在 $3\ 451, 2\ 930, 1\ 649, 1\ 022\ \text{cm}^{-1}$ 附近出现特征吸收峰,分别代表 O-H 伸缩吸收峰、饱和的 C-H 键振动吸收峰、醛基 C=O 的吸收峰以及吡喃糖环的 C-O 振动吸收峰。红外光谱结果表明,改性处理后藕粉的结构与原藕粉基本相似,没有生成新的基团或官能团,喷雾干燥协同酶法等对藕粉的改性主要是促进物理性状的变化^[22]。藕粉中 RS 的生成依赖于分子内部链的重组交联。不同改性方法导致藕粉中直链、支链的比例和主成分的密度发生变化,进而使特征峰强度存在差异。与原藕粉相比,除高压冷却循环外,其余改性方法制备的藕粉在 $3\ 500\sim 3\ 200\ \text{cm}^{-1}$ 范围的特征吸收峰变窄、变尖,表明分子内羟基基团发生复杂的伸缩振动,促进分子内羟基和自由羟基的形成,导致总羟基增多。而经高压冷却循环处理的藕粉直链羟基和支链外侧的羟基破坏严重,基团减少。除高压冷却循环外,其它改性藕粉在 $2\ 930\ \text{cm}^{-1}$ 处均存在特征吸收峰,表明高压冷却循环处理对 C-CH₂-C 骨架的影响大^[3]。与原藕粉相比,抗性藕粉在 $990\ \text{cm}^{-1}$ 处特征峰的偏移可能是因为酶法改性导致直链淀粉

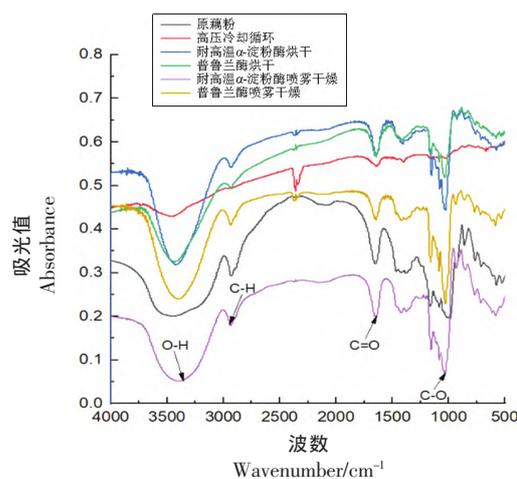


图 4 藕粉及抗性藕粉红外光谱扫描图

Fig.4 Infrared spectrum of lotus root powder and modified samples

增多,无定形区增加^[34]。此外,不同于高压冷却循环对藕粉结构的剧烈破坏,喷雾干燥协同酶法制备的抗性藕粉的红外光谱特征吸收峰类似,表明喷雾干燥协同酶法改性较传统高压冷却循环改性更加温和,且喷雾干燥对抗性藕粉的影响主要是通过改变其物理性状实现^[22,35]。

3 结论

通过喷雾干燥协同酶法制备的抗性藕粉得率显著高于传统酶解烘干法,且能有效避免传统高压冷却循环导致的褐变等问题。喷雾干燥协同普鲁兰酶法能减少支链,降低硬度和黏度,使藕粉具备较好的冲调性。喷雾干燥相比热风烘干可使淀粉颗粒更细小,外表面更光滑,同时特殊的中央腔结构可以降低淀粉酶的水解能力。喷雾干燥协同普鲁兰酶改性是一种高效的藕粉改性方法,本试验为抗性藕粉的可连续加工及高值化利用提供了理论参考。

参 考 文 献

- [1] YE H Y, ZHANG D W, LI Y, et al. Study on processing conditions for lotus root starch and red bean dumpling[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2020, 44(7): 1-10.
- [2] KHAN R A, RAJPUT M A, ASSAD T. Effect of Nelumbonucifera fruit on scopolamine induced memory deficits and motor coordination[J]. Metabolic Brain Disease, 2019, 34(1): 87-92.
- [3] 周新桥, 陈达刚, 郭洁, 等. 高抗性淀粉水稻研究现状与展望[J]. 核农学报, 2020, 34(3): 515-520.
ZHOU X Q, CHEN D G, GUO J, et al. Research progresses and prospects on high resistant starch in rice[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2020, 34(3): 515-520.
- [4] KAIMAL A M, MUJUMDAR A S, THORAT B N. Resistant starch from millets: Recent developments and applications in food industries[J]. Trends in Food Science & Technology, 2021, 111: 563-580.
- [5] TOVAR J, MELITO C. Steam-cooking and dry heating produce resistant starch in legumes[J]. J Agric Food Chem, 1996, 44(9): 2624-2645.
- [6] TEODORO S D, FIDEL P M, JOSÉAO, et al. Obtention and characterization of resistant starch from creole faba bean (*Vicia faba* L. creole) as a promising functional ingredient[J]. LWT, 2021, 145: 1-10.
- [7] ARP C G, CORREA M J, FERRERO C. Production and characterization of type III resistant starch from native wheat starch using thermal and enzymatic modifications[J]. Food and Bioprocess Technology, 2020, 13: 1181-1192.
- [8] 康怀彬, 尤晓颜, 肖天天, 等. 嗜冷普鲁兰酶制备玉米抗性淀粉工艺优化及其表征[J]. 食品科学, 2016, 37(16): 8-13.
KANG H B, YOU X Y, XIAO T T, et al. Optimization of preparation process for corn resistant starch with psychrophilic pullulanase and analysis of its properties[J]. Food Science, 2016, 37(16): 8-13.
- [9] 唐小闲, 汤泉, 段振华, 等. 不同干燥方式对莲藕淀粉品质特性的影响[J]. 食品工业科技, 2019, 40(6): 26-30.
TANG X X, TANG Q, DUAN Z H, et al. Effects of different drying methods on quality properties of lotus root starch[J]. Science and Technology of Food Industry, 2019, 40(6): 26-30.
- [10] 刘云飞. 改良挤压技术对大米淀粉结构和性质的影响及其在淀粉基食品中的应用[D]. 南昌: 南昌大学, 2019.
LIU Y F. Effect of improved extrusion cooking technology on structure and properties of rice starch and its application in starchy food[D]. Nanchang: Nanchang University, 2019.
- [11] 张丽娜, 苏琪, 杨高玲, 等. 喷雾干燥法制备中空偏钨酸铵球及中空结构形成机理[J]. 粉末冶金工业, 2017, 27(4): 12-16.
ZHANG L N, SU Q, YANG G L, et al. Preparation and formation mechanism of hollow ammonium metatungstate spheres by spray drying method[J]. Powder Metallurgy Industry, 2017, 27(4): 12-16.
- [12] ZHANG C, QIU M Y, WANG T, et al. Preparation, structure characterization, and specific gut microbiota properties related to anti-hyperlipidemic action of type 3 resistant starch from *Canna edulis*[J]. Food Chem, 2021, 351: 1-10.
- [13] 张倩, 肖华西, 杨帆, 等. 酶法及压热-酶法制备大米抗性淀粉的理化性质比较[J]. 中国粮油学报, 2019, 34(10): 23-28.
ZHANG Q, XIAO H X, YANG F, et al. Comparison on physicochemical properties of the rice resistant starch prepared by enzymatic method and autoclave-enzymatic method[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2019, 34(10): 23-28.
- [14] SHI J L, SUN Z H, SHI Y C. Improved *in vitro* assay of resistant starch in cross-linked phosphorylated starch[J]. Carbohydrate polymers, 2019, 210: 210-214.

- [15] TU D K, OU Y J, ZHENG Y X, et al. Effects of freeze-thaw treatment and pullulanase debranching on the structural properties and digestibility of lotus seed starch-glycerin monostearin complexes[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2021, 177: 447-454.
- [16] YUN P, DEVAHASTIN S, CHIEWCHAN N. *In vitro* glycemic index, physicochemical properties and sensory characteristics of white bread incorporated with resistant starch powder prepared by a novel spray-drying based method[J]. Journal of Food Engineering, 2021, 294: 110438.
- [17] GONI L, GARCIA-DIZ E, MANAS F, et al. Analysis of resistant starch: A method for foods and food products[J]. Food Chemistry, 1996, 56(4): 445-449.
- [18] 韩丽瑶, 李梁, 张博辉, 等. 压热法制备黑青稞抗性淀粉工艺及性质研究[J]. 食品研究与开发, 2020, 41(10): 115-121.
- HAN L Y, LI L, ZHANG B H, et al. Study on autoclaving preparation technology of Black Highland Barley resistance starch and its properties[J]. Food Research and Development, 2020, 41(10): 115-121.
- [19] 谢三都, 陈惠卿, 谢小伟, 等. 淮山药 RS3 抗性淀粉制备及其消化特性[J]. 农产品加工, 2020, 2020(7): 17-22
- XIE S D, CHEN H Q, XIE X W, et al. Preparation of RS3 resistant starch from Chinese Yam and its digestive characteristics[J]. Farm Products Processing, 2020, 2020(7): 17-22
- [20] 刘友锦. 高抗性淀粉速溶全藕粉加工工艺的研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2015.
- LIU Y J. Study on the processing technology of instant full lotus root powder high in resistant starch [D]. Fuzhou: Fujian agriculture and forestry university, 2015.
- [21] MACÊDO I Y L, MACHADO F B, RAMOS G S, et al. Starch adulteration in turmeric samples through multivariate analysis with infrared spectroscopy[J]. Food Chemistry, 2021, 340: 1-8.
- [22] 刘淑婷, 王颖, 王志辉, 等. 超声-微波协同酶法制备芸豆抗性淀粉工艺优化及结构分析[J]. 中国食品学报, 2020, 20(5): 187-195.
- LIU S T, WANG Y, WANG Z H, et al. Process optimization and structure analysis of Kidney Bean resistant starch by ultrasound-microwave synergistic enzymatic method[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2020, 20(5): 187-195.
- [23] TANG Y, YANG S, HE W, et al. Stabilization of Chinese gallnut (*Galla Chinensis*) tannins by spray-drying microencapsulation for natural hair coloring[J]. Fibers and Polymers, 2020, 21(6): 1283-1292.
- [24] 何丽君, 余远江, 谢承孟, 等. 鲜淮山抗性淀粉的研究[J]. 轻工科技, 2019, 35(2): 7-9.
- HE L J, YU Y J, XIE C M, et al. Research on resistant starch in fresh Huaishan Mountain[J]. Light Industry Science and Technology, 2019, 35(2): 7-9.
- [25] GU Z, CHEN B, TIAN Y. Highly branched corn starch: Preparation, encapsulation, and release of ascorbic acid[J]. Food Chemistry, 2021, 343: 1-9.
- [26] PHEAKDEY Y, SAKAMON D, NAPHAPORN C. *In vitro* glycemic index, physicochemical properties and sensory characteristics of white bread incorporated with resistant starch powder prepared by a novel spray-drying based method[J]. Journal of Food Engineering, 2021, 294: 1-8.
- [27] 王静, 毛慧佳, 李洪岩. 大米淀粉结构与质构品质的研究进展[J]. 中国食品学报, 2020, 20(1): 1-9.
- WANG J, MAO H J, LI H Y. Research progress of starch structure and rice texture [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2020, 20(1): 1-9
- [28] WEN X Y, ZHAO Y, REGENSTEIN J M, et al. Structural and functional properties of slowly digestible starch from chinese chestnut[J]. International Journal of Food Engineering, 2018, 14(3): 1-8.
- [29] 董贝贝. 八种淀粉糊化和流变特性及其与凝胶特性的关系[D]. 西安: 陕西科技大学, 2017.
- DONG B B. Pasting, rheological properties and the relationship with gel properties of eight kinds of starch[D]. Xi'an: Shaanxi University of Science and Technology, 2017.
- [30] HILAL D B, ZEYNEP T C, DILARA N E. Pullulanase treatments to increase resistant starch content of black chickpea (*Cicerarietinum* L.) starch and the effects on starch properties[J]. International journal of biological macromolecules, 2018, 111: 505-513.
- [31] 冯涛, 胡中山, 游雪燕, 等. 直链淀粉分子螺旋对风味化合物包埋的研究进展[J]. 食品科技, 2020,

- 45(2): 278–284.
- FENG T, HU Z S, YOU X Y, et al. Research progress on entrapment of flavor compounds by amylose molecular spiral[J]. Food Science and Technology, 2020, 45(2): 278–284.
- [32] 黄婷婷. 复合湿热处理对甘薯慢消化淀粉形成及结构性质的影响[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2016.
- HUANG T T. Effect of combined heat–moisture treatment on the formation, structure and properties of slowly digestible starch from sweet potato starch. [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2016.
- [33] PHEAKDEY Y, SAKAMON D, NAPHAPORN C. Physical properties, microstructure and digestion behavior of amylose–lipid powder complexes prepared using conventional and spray–drying based methods [J]. Food Bioscience, 2020, 37: 1–11.
- [34] 张仲柏, 牛黎莉, 汪月, 等. X-射线和红外光谱研究马铃薯蛋糕老化特性[J]. 食品与生物技术学报, 2019, 38(8): 119–125.
- ZHANG Z B, NIU L L, WANG Y, et al. X-Ray and FT–IR research on staling characteristics of potato cake[J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2019, 38(8): 119–125.
- [35] TAY J B J, CHUA X, ANG C, et al. Effects of spray–drying inlet temperature on the production of high–quality native rice starch[J]. Processes, 2021, 9(9): 1–16.

Effect of Spray Drying Synergistic Enzymatic Method on Preparation of Resistant Starch in Lotus Root Powder

Chen Di¹, Xiao Chaogeng^{1*}, Xu Lingfeng², Lu Wenjing¹, Ye Qin¹, Zhang Cen¹

¹Institute of Food Science, Zhejiang Academy of Agricultural Sciences, Hangzhou 310021

²College of Food and Health, Zhejiang A & F University, Hangzhou 311300)

Abstract The drying method has great influence on the physicochemical properties of resistant lotus root powder. In order to study the effect of spray drying synergistic enzymatic preparation on resistant lotus root powder, lotus root powder was used as raw material to prepare resistant lotus root by using pressure–heat cooling cycle, spray drying synergistic high temperature resistant α -amylase and pullulanase, respectively. The modification effects of different methods were compared by the yield, texture, rehydration, microstructure and infrared spectrum characteristics. The results showed that the yield of resistant lotus root powder prepared by spray drying synergistic pullulanase was 5.3%, which was significantly higher than other treatment groups ($P < 0.05$), while the yield by spray drying synergistic α -amylase was second highest (4.6%) and pressure–heat cooling cycle was the lowest (2.7%). Spray drying synergistic enzymatic could decrease the hardness, elasticity, adhesion and cohesion of lotus root powder. The particles prepared by enzymatic hydrolysis were rough, with obvious cracks and larger particles, while the particles prepared by spray drying synergistic enzymatic were uniform and delicate with smooth surface. Compared with the original lotus root powder, spray drying synergistic preparation could narrow the characteristic absorption peaks (3 500–3 200 cm^{-1}) and shift the peak (990 cm^{-1}). Therefore, spray drying synergistic enzymatic could increase the amorphous area, reduce the branching chains and reduce the viscosity, and make the lotus root powder have better resistance and flushing property.

Keywords lotus root powder; resistant starch; high temperature resistant alpha–amylase; pullulanase; spray drying