

RS₃型籼米抗性淀粉制备方法对其结构 和理化性质的影响

Effect of preparation method on physical and chemical properties of
indica rice resistant starch of type RS₃

欧阳梦云¹ 王 燕¹ 赵传文²

OU-YANG Meng-yun¹ WANG Yan¹ ZHAO Chuan-wen²

(1. 湖南农业大学食品科技学院, 湖南 长沙 410128; 2. 长沙凯雪粮油食品有限公司, 湖南 长沙 410008)

(1. College of Food Science and Technology, Hunan Agricultural University, Changsha, Hunan 410128, China;

2. Changsha Kaixue Grain and Oil Food Co., Ltd., Changsha, Hunan 410008, China)

摘要:以微波预糊化籼米淀粉为原料,研究超声间歇式辅助双酶法和晶种诱导—双酶法对 RS₃ 型籼米抗性淀粉结构和理化性质的影响。结果表明,原料淀粉呈多面体结构,表面边界棱角分明,颗粒晶型为 A 型,结晶度仅为 8.9%;而超声间歇式辅助双酶法和晶种诱导—双酶法所得 RS₃ 型籼米抗性淀粉,表面变得粗糙,凹凸不平,出现“蜂窝”状结构,其溶解度、膨胀度及持水力均降低,颗粒晶型表现为致密且稳定的 B 型或 B+V 型结构,结晶度最高可达 20.10%,且在 RS₃ 形成过程中无新官能团产生,淀粉的化学结构未发生改变。两种制备工艺在酶添加顺序上,先添加普鲁兰酶后添加异淀粉酶可较优地促进淀粉晶体形成有序结构。

关键词:RS₃ 型籼米;抗性淀粉;X-射线衍射;红外光谱

Abstract: The indica starch pregelatinized by microwave as raw material, the effect of ultrasonic auxiliary-dual enzyme method and seed induced-dual enzyme method on the structure and physicochemical properties of indica rice resistant starch of type RS₃ were researched in this study. The results showed that the structure of the raw starch was polyhedron, the edge of the surface was distinct, the crystal form was type A, and the crystallinity was only 8.9%. While the structure of RS₃ were made by ultrasonic auxiliary-dual enzyme method and seed induced-dual enzyme method became rough and uneven, the solubility, swelling degree and water holding capacity were decreased, the crystal forms were dense and stable type B or type B+V, and the highest crystallinity was 20.10%. There was no new functional group was formed during the formation process of RS₃ and their chemical structure has not changed. The enzyme addition se-

quence showed that pullulanase was added before isoamylase better to promote starch crystal formation of ordered structure.

Keywords: indica rice resistant starch of type RS₃; X-ray diffraction; infrared spectroscopy

RS₃型抗性淀粉又称为回生或重结晶淀粉,这类淀粉即使经加热处理,也难以被淀粉酶类消化,RS₃除具有抗性淀粉独特的生理功能外,还具有晶体粒度细小、风味良好、颜色白皙、溶解度低等特点,可很好地替代膳食纤维,作为一种良好的食品功能因子运用于保健食品的研制和开发^[1-3]。RS₃主要由回生重结晶的直链淀粉组成,因此淀粉中直链淀粉含量高低直接影响 RS₃ 产率。目前国内外以 RS₃ 作为食品功能因子的研究还处于基础阶段,研发的产品主要有主食制品^[4-5]、烘焙食品^[6-7]、饮料及发酵制品^[8-9]、膨化食品^[10-11]等。RS₃ 制备工艺上的创新及产率的提高日益成为食品科学家和营养学家研究的热点之一。籼米因其粗糙的口感、易碎、较差的加工品质和易陈化等劣势,商品价值极低。研究^[12]表明,籼米淀粉中直链淀粉含量远高于粳米和糯米,是极好的生产抗性淀粉原料,而自然条件下籼米淀粉中仅含抗性淀粉 1.0%~2.1%。欧阳梦云等^[13]对超声间歇辅助异淀粉酶和普鲁兰酶分步脱支制备 RS₃ 型籼米抗性淀粉的工艺进行了优化,此方法避免了目前研究中使用液化酶导致直链淀粉损失且产生大量糊精影响 RS₃ 生成等负面影响,但尚未对试验所得 RS₃ 的理化性质做出分析。晶种诱导技术是指在分子重结晶前期晶核将要形成时加入少量晶种,通过有效降低溶液过饱和度,缩短析晶时间,提高产率^[14]。马铃薯含有丰富的直链淀粉,可作为制备 RS₃ 晶种的原料。晶种诱导技术目前广泛应用于分子筛领域^[15-17],自 2013 年起已有少部分文献以该方法制备抗性淀粉^[18-19],而以晶种诱导复合

作者简介:欧阳梦云,女,湖南农业大学在读硕士研究生。

通信作者:王燕(1968—),女,湖南农业大学教授,博士。

E-mail:693675748@qq.com

收稿日期:2017—05—09

异淀粉酶、普鲁兰酶的分步脱支酶解过程制备 RS₃ 型糯米抗性淀粉的研究还未见报道。

本研究以微波预糊化糯米淀粉为原料,拟采用超声间歇式辅助双酶法和品种诱导—双酶法制备 RS₃ 型糯米抗性淀粉,并对试验所得 RS₃ 的溶解度、膨胀度和持水力,及扫描电镜、X-射线衍射、傅里叶红外光谱结果进行分析,探究超声间歇式辅助双酶法和品种诱导—双酶法促进糯米淀粉回生的原因。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

糯米碎米:购自湖南邵阳;
马铃薯淀粉:市售;
异淀粉酶:50 000 U/g,天津拓程生物科技有限公司;
普鲁兰酶:1 000 ASPU/mL,江苏锐阳生物科技有限公司;
葡萄糖淀粉酶:≥100 Units/mg,上海瑞永生物科技有限公司;
耐高温 α-淀粉酶:≥4 000 U/g,上海瑞永生物科技有限公司;
胃蛋白酶:≥1 200 U/g,国药集团化学试剂有限公司;
其他试剂均为化学纯国药集团化学试剂有限公司。

1.2 仪器与设备

恒温水浴锅:B-260 型,上海亚荣生化仪器厂;
美的微波炉:EG23B-DC(F) 型,广东美的微波炉制造有限公司;
数控超声波清洗器:KQ-100DE 型,昆山市超声仪器有限公司;
电热恒温鼓风干燥箱:DHG-9240A 型,上海飞越实验仪器有限公司;
紫外分光光度计:UV-2450 型,日本岛津公司;
傅里叶红外光谱仪:VECTOR33 型,德国 Bruker 公司;
射线衍射仪:D/MAX-3AX 型,日本理学公司;
扫描电子显微镜:JSM-6360LV 型,日本电子公司。

1.3 方法

1.3.1 微波预糊化糯米淀粉的制备 参考文献[13,20]制备微波预糊化糯米淀粉 Mic-PS。

1.3.2 RS₃ 型糯米抗性淀粉的超声间歇式辅助双酶法制备
以微波预糊化糯米淀粉为原料,利用超声波间歇式辅助异淀粉酶和普鲁兰酶的分步脱支酶解制备 RS₃ 型糯米抗性淀粉,具体步骤参照文献[21]。RS₃ 型糯米抗性淀粉的超声间歇式辅助双酶法制备工艺中异淀粉酶和普鲁兰酶的添加顺序与试样名称见表 1。

表 1 双酶添加顺序与试样名称	
Table 1	Double enzyme adding order and sample name
试样名称	顺序
U-IP-RS ₃	先异淀粉酶后普鲁兰酶
U-PI-RS ₃	先普鲁兰酶后异淀粉酶

1.3.3 RS₃ 型糯米抗性淀粉的品种诱导—双酶法制备 称取 10 g 马铃薯全粉,用蒸馏水配制淀粉质量分数为 10% 的马铃薯淀粉乳,85 ℃ 水浴条件下预糊化 30 min,直至淀粉乳呈透明凝胶状后再于 120 ℃ 高压条件下处理 30 min,冷却后置于 4 ℃ 冰箱中冷藏 24 h。参考 Goni 法^[22]对淀粉乳纯化处理后制得 RS₃ 型马铃薯抗性淀粉湿晶种。

称取适量微波预糊化糯米淀粉,用 pH 为 5.0 的磷酸盐缓冲溶液配制淀粉质量分数为 10% 的淀粉乳,85 ℃ 恒温水浴条件下处理 30 min,降温至 50 ℃,恒温条件下添加异淀粉酶 8 U/g,异淀粉酶酶解 4 h,85 ℃ 恒温水浴条件下灭酶 10 min,冷却,用 0.1 mol/L HCl 调 pH 至 4.5,60 ℃ 恒温水浴条件下添加普鲁兰酶 8 U/g,普鲁兰酶酶解 3.5 h,85 ℃ 恒温水浴条件下灭酶 10 min,冷却至 40 ℃,添加湿晶种 5%,混匀后将淀粉乳迅速置于 4 ℃ 冰箱回生 24 h。RS₃ 型糯米抗性淀粉的纯化参考 Goni 法^[22],70 ℃ 烘箱中烘干 8 h,备用。RS₃ 型糯米抗性淀粉的品种诱导—双酶法制备工艺中异淀粉酶和普鲁兰酶的添加顺序与试样名称见表 2。

表 2 双酶添加顺序与试样名称	
Table 2	Double enzyme adding order and sample name
试样名称	顺序
S-IP-RS ₃	先异淀粉酶后普鲁兰酶
S-PI-RS ₃	先普鲁兰酶后异淀粉酶

1.3.4 颗粒形态 利用扫描电镜分析 Mic-PS、U-PI-RS₃、U-IP-RS₃、S-PI-RS₃ 和 S-IP-RS₃ 颗粒形态^[23]。

1.3.5 溶解度、膨胀度及持水力的测定 Mic-PS、U-PI-RS₃、U-IP-RS₃、S-PI-RS₃ 和 S-IP-RS₃ 的溶解度、膨胀度和持水力测定参考文献[24~26]。

1.3.6 X-射线衍射 利用 X-射线衍射分析 Mic-PS、U-PI-RS₃、U-IP-RS₃、S-PI-RS₃ 和 S-IP-RS₃ 晶体形态。衍射条件:特征射线 CuKα,石墨单色器,管电压 40 kV,管电流 30 mA,扫描范围 2θ 为 470°,扫描速度 10/min^[27]。试样的结晶度为微晶区面积与微晶区和亚微晶区面积和的比值^[28-29]。

1.3.7 傅里叶红外光谱 利用傅里叶红外光谱分析 Mic-PS、U-PI-RS₃、U-IP-RS₃、S-PI-RS₃ 和 S-IP-RS₃ 分子基团变化^[30]。

2 结果与分析

2.1 RS₃ 型糯米抗性淀粉颗粒形态分析

由图 1 可知,微波预糊化糯米淀粉 Mic-PS 呈多面体状,周围边界清晰,棱角分明,表面有些许爆裂微孔和酥松絮状物。其原因可能是水分子在微波高频电场的作用下反复快速取向转动,摩擦加剧生热,导致淀粉分子在高温下爆裂。这些酥松微孔增大了脱支酶与底物的接触面积。U-IP-RS₃、U-PI-RS₃、S-IP-RS₃ 和 S-PI-RS₃ 都失去原有淀粉颗粒形貌,无明显边界,表面变得透明光亮,都呈现明显的“蜂窝”状结构,S-IP-RS₃ 出现了深陷沟壑,依稀还可以看见片层样结构,U-PI-RS₃ 表面变得凹凸不平,塌陷结构非常明显。分析原因可能是超声波的空穴作用使淀粉分子内产生局部高温,淀粉

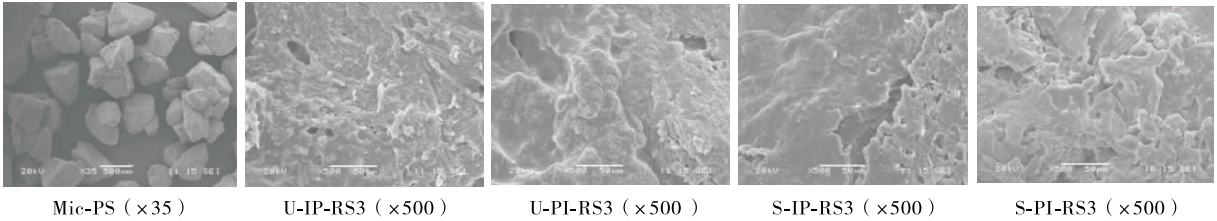


图 1 原料淀粉与 RS₃ 的电镜扫描照片

Figure 1 Scanning electron microscope photos of raw starch and indica RS₃

颗粒吸水膨胀,超声停止后,取出物料,淀粉瞬间遇冷而形成分子内外压差,颗粒表面形成塌陷。淀粉分子充分发生水合作用凝胶化后,异淀粉酶和普鲁兰酶都专一性破坏支链淀粉的 α -1,6 糖苷键,生成大量链长不等的直链淀粉,在冷藏过程中,呈无序态的直链淀粉通过氢键重新相互缔合形成稳定的双螺旋结构,品种诱导工艺因体系中添加的少量 RS₃ 品种而降低了溶液过饱和度,直链淀粉不仅可相互缔合形成致密微晶束,还可使直链淀粉在较低的过饱和度时以外加品种为籽晶包覆长晶。RS₃ 晶体的网状结构致密而坚硬,具有较强的抗酶解能力。

2.2 制备方法对 RS₃ 型籼米抗性淀粉溶解度、膨胀度、持水力的影响

游离直链淀粉易溶于水,是影响淀粉溶解度的主要原因。淀粉悬浮液在加热过程中,其颗粒微晶束结构发生改变呈多孔片层状,内部直链淀粉从膨胀的淀粉颗粒小孔中游离出来而被溶解,水分子也会渗入小孔进入颗粒内部,使淀粉分子发生水合作用形成一种共聚胶状物,促使体积膨胀,直链淀粉和支链淀粉的极性分子与水分子发生缔合,表现出一定的持水能力。淀粉的膨胀程度也由淀粉中支链淀粉含量决定,可反映出淀粉晶体结构的强弱以及淀粉颗粒的紧密性。淀粉的膨胀度与持水力呈正相关。由表 3 可知,Mic-PS 的溶解度、膨胀度及持水力均较高。分析原因可能是 Mic-PS 表面产生的大量爆裂微孔为分子内直链淀粉的溶出提供了良好的“通道”,此时试样中支链淀粉含量也较高,所以溶解度和膨胀度都较高,持水力也维持在较高水平,也可说明 Mic-PS 的晶体结构很弱,颗粒松散,结构易改变。与 Mic-PS 相比,U-IP-RS₃、U-PI-RS₃、S-IP-RS₃ 及 S-PI-RS₃ 溶解度、膨胀度及持水力都出现了很大程度的下降,两种制备工艺条件淀粉经异淀粉酶和普鲁兰酶分步脱支处理后,直链淀粉含量大幅度增加而水溶解程度降低,是因为直链淀粉在冷藏过程

中通过氢键相互缔合成致密的双螺旋结构,最后形成难以复水的高聚结晶体,在加热过程中也不被分解。说明两种制备工艺均能形成结构致密,稳定性较好的 RS₃ 晶体,特别是 S-IP-RS₃,其表现出的低溶解度和膨胀度,非常适宜作为饮料的食品功能添加因子,可提高不透明度和悬浮度。

2.3 X-射线衍射分析

淀粉晶体颗粒是一种含有非结晶区和结晶区的多晶聚合物,对其进行一定角度内的 X-射线衍射有衍射峰出现,根据其特征峰出现位置可判断各种淀粉的结晶晶型,分为 A、B、C、V 四类,一般经过糊化后的淀粉含有 V 型结晶。相对结晶度可表示为淀粉颗粒中的微结晶区面积比上亚微结晶区面积与微结晶区面积之和,根据 30° 以内的衍射峰值可计算颗粒的相对结晶度,结果见表 4。

由图 2、3 可知,微波预糊化淀粉 Mic-PS 在 15°,17°,19°,23° 处有强衍射峰,13° 处有较微弱衍射峰,说明 Mic-PS 的结晶结构为 A 型。与 Mic-PS 相比,U-IP-RS₃ 在 15°,17° 处无明显衍射峰,在 22°,24° 处出现较弱衍射峰,表现为弱 B 型结构,说明超声辅助先异淀粉酶后普鲁兰酶的脱支酶解工艺使籼米淀粉的结晶区遭受破坏,低温凝沉重结晶效果不理想;而 U-PI-RS₃、S-IP-RS₃ 及 S-PI-RS₃ 均在 15°,17°,22°,24° 处出现明显衍射峰,在 13°,20° 处也出现了较明显衍射峰,表现为 B+V 型结构,且品种诱导辅助先异淀粉酶后普鲁兰酶的脱支酶解工艺制得的 S-IP-RS₃ 表现出特征衍射峰最为强烈,其 B+V 型结晶结构最为稳定。表现出 V 型结构除因淀粉糊化导致,还可能是脱支酶对籼米支链淀粉的脱支处理生成了较多的直链淀粉,其与原料中未脱除干净的脂质作用形成复合物,这种复合物表现出较强稳定性。

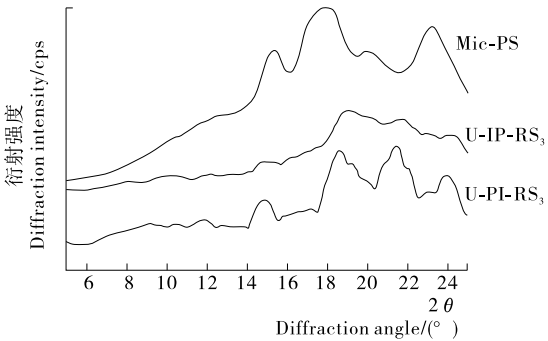


图 2 原料淀粉与超声辅助双酶法制得 RS₃ 的 X-射线衍射图

Figure 2 X-ray diffraction pattern of raw starch and indica RS₃ prepared by ultrasonic auxiliary-dual enzyme method

表 3 原料淀粉与 RS ₃ 的溶解度、膨胀度及持水力			
Table 3 Solubility, swelling power and water holding capacity of raw starch and indica RS ₃			
样品	溶解度	膨胀度	持水力
Mic-PS	7.86	33.03	687
U-IP-RS ₃	3.80	12.83	452
U-PI-RS ₃	3.10	12.18	395
S-IP-RS ₃	2.13	11.45	284
S-PI-RS ₃	2.82	11.58	346

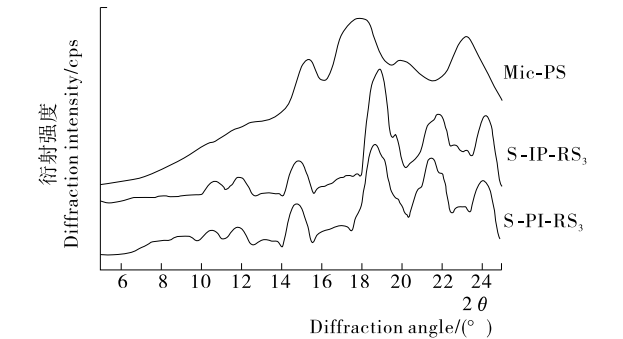


图3 原料淀粉与晶种诱导-双酶法制得RS₃的X-射线衍射图
Figure 3 X-ray diffraction pattern of raw starch and indica RS₃ prepared by seed induced-dual enzyme method

表4 原料淀粉与RS₃的相对结晶度与晶型结构
Table 4 Relative crystallinity and crystal structure of raw starch and indica RS₃

样品	相对结晶度/%	晶型结构
Mic-PS	8.96	A
U-IP-RS ₃	15.82	B
U-PI-RS ₃	17.81	B+V
S-IP-RS ₃	18.69	B+V
S-PI-RS ₃	20.10	B+V

2.4 红外光谱分析

由图4可知,Mic-PS、U-IP-RS₃、U-PI-RS₃、S-IP-RS₃和S-PI-RS₃的红外光谱基本轮廓相似,说明两种制备RS₃型糯米抗性淀粉的工艺过程中没有新官能团产生,其化学结构未发生改变。图谱在基团频率区(4 000~1 350 cm⁻¹)和指纹区(1 350~400 cm⁻¹)产生的较小差异属于物理变化。3 740 cm⁻¹归属为淀粉—OH的伸缩振动;3 404 cm⁻¹处出现的宽而强的吸收峰为羟基的伸缩振动;1 478 cm⁻¹为—CH₂的弯曲振动峰;1 182 cm⁻¹附近的峰为淀粉中C—O和C—C的伸缩振动,属于淀粉规则线团结构,可表示为淀粉结晶区的结构特征;1 020 cm⁻¹为氢键的变化吸收峰;950 cm⁻¹为吡喃环的非对称伸缩振动。与Mic-PS相比,U-PI-RS₃、S-IP-RS₃和S-PI-RS₃都出现了非常明显的—OH伸缩振动峰,其原因可能是异淀粉酶和普鲁兰酶对支链淀粉的脱支作用,使体系中直链淀粉含量增加,促使更多—OH

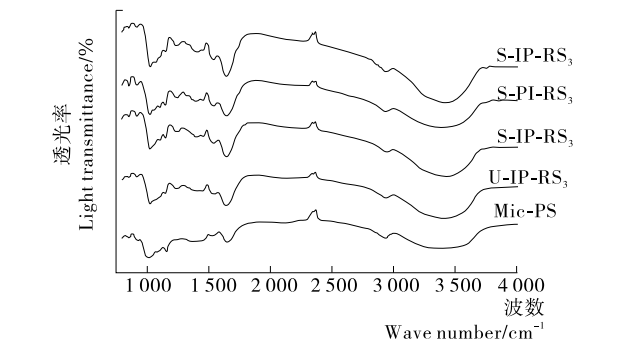


图4 原料淀粉与RS₃的红外光谱图
Figure 4 FTIR of raw starch and indica RS₃

生成。U-PI-RS₃、U-IP-RS₃、S-PI-RS₃和S-IP-RS₃在1 478 cm⁻¹附近的—CH₂弯曲振动都增强,说明淀粉经超声辅助双酶法和晶种诱导-双酶法处理后,产生了更多碳不饱和和键。4种RS₃在1 182 cm⁻¹处的吸收峰均增强,说明两种工艺的处理均使淀粉晶体排列更为有序,5种淀粉在1 182 cm⁻¹处的吸收峰强弱为S-PI-RS₃>U-PI-RS₃>S-IP-RS₃>U-IP-RS₃>Mic-PS,说明先添加普鲁兰酶后添加异淀粉酶可较优地促进淀粉晶体形成有序结构。

3 结论

(1)微波预糊化糯米淀粉有明显的边界,呈多面体状;而RS₃糯米抗性淀粉失去原有淀粉形貌,表面呈现“蜂窝”状、沟壑及片层样结构,晶体结构致密且坚硬。

(2)超声间歇式辅助双酶法和晶种诱导-双酶法制得RS₃的溶解度、膨胀度和持水力均低于微波预糊化糯米淀粉,表明两种制备工艺都能制得稳定性好,结构致密,不易被淀粉酶类水解的RS₃晶体。

(3)微波预糊化糯米淀粉为A型结构,结晶度仅为8.96%;晶种诱导-双酶法制得RS₃均表现为B+V型结构;超声间歇式辅助双酶法,当酶添加顺序为先异淀粉酶后普鲁兰酶时,所得RS₃表现为B型结构,当酶添加顺序为先普鲁兰酶有异淀粉酶时,所得RS₃呈现出B+V型结构。说明晶种诱导-双酶法较超声间歇式辅助双酶法更能有效促进糯米淀粉回生,试验所得RS₃的结晶度最高可达20.10%。

(4)微波预糊化糯米淀粉与超声间歇式辅助双酶法和晶种诱导-双酶法制得RS₃的红外光谱图基本轮廓相似,说明两种制备工艺均未改变糯米淀粉的化学结构。根据两种制备工艺所得RS₃在淀粉结晶区(1 182 cm⁻¹)附近的吸收峰强弱,表明在酶添加顺序上,以先添加普鲁兰酶后添加异淀粉酶可较优地促进RS₃生成。

参考文献

[1] GIUBERTI G, GALLO A, MASOERO F, et al. Factors affecting starch utilization in large animal food production system: A review[J]. Starch-Starke, 2014, 66(1/2): 72-90.
[2] 别同玉, 许加生, 别同德. 抗性淀粉卫生保健功能及膳食应用研究进展[J]. 现代预防医学, 2011, 38(23): 4 845-4 847.
[3] GHODKE S K, ANANTHANARAYAN L. Health benefits of resistant starch[J]. Agro Food Industry Hi Tech, 2008, 19(1): 37-39.
[4] ARAVIND N, SISSONS M, FELLOWS C M, et al. Optimisation of resistant starch II and III levels in durum wheat pasta to reduce in vitro digestibility while maintaining processing and sensory characteristics[J]. Food Chemistry, 2013, 136(2): 1 100-1 109.
[5] 郑宝东, 王琦, 郑亚凤, 等. 抗性淀粉的生物学功效及在食品加工中的应用[J]. 食品科学技术学报, 2015, 33(5): 1-7.
[6] 李明娟, 张雅媛, 游向荣, 等. 青香蕉饼干感官品质评价及其消化性能[J]. 食品科学, 2015, 36(21): 68-73.
[7] SÁYAGOAYERDI S G, TOVAR J, BLANCASBENÍTEZ F J, et al. Resistant starch in common starchy foods as an alternative to increase dietary fibre intake [J]. Journal of Food & Nutrition

Research, 2011, 50(1): 1-12.

[8] 曾泽生, 朱波, 邓姗. 高抗性淀粉苦荞乳饮料制备工艺研究[J]. 食品与发酵科技, 2016, 52(4): 7-11.

[9] 刘莎莎, 李保国, 郭雯丽, 等. 高抗性淀粉米乳饮料的稳定性研究[J]. 食品与机械, 2013, 38(6): 229-231.

[10] 杨麒. 小麦 RS₃型抗性淀粉的制备及其功能性性质的研究[D]. 西安: 陕西科技大学, 2016: 55-62.

[11] LILJEBERG E H. Resistant starch content in a selection of starchy foods on the Swedish market[J]. European Journal of Clinical Nutrition, 2002, 56(6): 500-505.

[12] HU Pei-song, ZHAO Hai-jun, DUAN Zhi-ying, et al. Starch digestibility and the estimated glycemic score of different types of rice differing in amylose contents [J]. Journal of Cereal Science, 2004, 40(3): 231-237.

[13] 欧阳梦云, 王燕, 赵传文. 超声辅助双酶法制备 RS₃型籼米抗性淀粉工艺参数优化[J]. 食品工业科技, 2016, 37(23): 176-182.

[14] 张纲, 王静康, 熊晖. 沉淀结晶过程中的添加品种技术[J]. 化学世界, 2002, 43(6): 326-328.

[15] 薛腾, 刘华萍, 王一萌, 等. 以氨水做碱源胶态品种导向法合成小晶粒 TS-1 分子筛[J]. 催化学报, 2015, 36(11): 1 928-1 935.

[16] 张海燕, 杨承广, 孟祥举, 等. 无有机模板条件下品种导向合成微孔分子筛晶体材料[J]. 化学学报, 2012, 70(23): 2 387-2 392.

[17] 陈艳红, 李春义, 杨朝合. 晶种法合成 ZSM-5 分子筛规律的研究[J]. 石油炼制与化工, 2013, 44(11): 24-28.

[18] LIAN Xi-jun, LIU Li-zeng, GUO Jun-jie, et al. Screening of seeds prepared from retrograded potato starch to increase retrogradation rate of maize starch[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2013, 60(6): 181-185.

[19] 孟宪昉, 刘立增, 郭俊杰, 等. 草酸侵蚀马铃薯回生淀粉制备品种促进玉米淀粉回生的研究[J]. 食品工业科技, 2016(3): 131-148.

[20] 吴仲, 刘晓玲, 王刚, 等. 压热-酶法制备泽泻抗性淀粉的工艺[J]. 食品研究与开发, 2010, 31(2): 19-23.

[21] 吴红引, 王泽南, 张效荣, 等. 微波辅助酶法制备碎米抗性淀粉的工艺研究[J]. 食品科学, 2010, 31(18): 203-205.

[22] 雷俊华, 郑琳, 武俊超, 等. 湿热处理制备豌豆抗性淀粉及其性质的研究[J]. 食品工业科技, 2013, 34(20): 149-152.

[23] 唐雪娟, 刘丽斌, 黄继红, 等. 压热法结合反复冻融制备小麦抗性淀粉及其理化性质研究[J]. 现代食品科技, 2013(3): 519-522.

[24] 李斌, 范丽. 香沙芋抗性淀粉的制备及其物理性质的研究[J]. 食品工业, 2015(11): 78-82.

[25] 张燕鹏, 庄坤, 丁文平, 等. 豌豆淀粉与马铃薯淀粉、玉米淀粉理化性质比较[J]. 食品工业科技, 2016, 37(4): 183-186.

[26] 章丽琳, 曾希珂, 张喻, 等. 马铃薯抗性淀粉理化性质的研究[J]. 中国酿造, 2016, 35(7): 117-122.

[27] 陈翠兰, 张本山, 陈福泉. 淀粉结晶度计算的新方法[J]. 食品科学, 2011, 32(9): 68-71.

[28] MANFUL J T, GRIMM C C, GAYIN J, et al. Effect of Variable Parboiling on Crystallinity of Rice Samples [J]. Cereal Chemistry, 2008, 85(1): 92-95.

[29] 陈云超, 刘倩芬, 黄赣辉. 抗性淀粉的体外消化及结构变化的研究[J]. 食品工业科技, 2013, 34(15): 115-118.

[30] 余世锋, 郑喜群. 大米 RS₃型抗性淀粉的影响因素及形成机制的研究进展[J]. 食品工业科技, 2012, 33(8): 431-435.

(上接第 13 页)

[5] 杨明华, 太周伟, 俞政全, 等. 膳食纤维改性技术研究进展[J]. 食品研究与开发, 2016, 37(10): 207-210.

[6] 杨远通, 钟海雁, 潘曼, 等. 超微粉碎对猕猴桃渣膳食纤维功能性质的影响[J]. 食品与机械, 2011, 27(1): 11-14, 18.

[7] 王文侠, 张慧君, 宋春丽, 等. 纤维素酶法制备高活性大豆膳食纤维工艺的研究[J]. 食品与机械, 2010, 26(2): 118-122.

[8] 张晶, 丁芳, 邹晴晴, 等. 高压均质对大米蛋白功能特性及物化特性的影响[J]. 食品与机械, 2016, 32(6): 9-12.

[9] 黄素雅, 何亚雯, 钱炳俊, 等. 高静压和高压均质对豆渣水不溶性膳食纤维改性及其功能的影响[J]. 食品科学, 2015, 36(15): 81-85.

[10] 陶姝颖, 郭晓晖, 令博, 等. 改性葡萄皮渣膳食纤维的理化性质和结构[J]. 食品科学, 2012, 33(15): 171-177.

[11] 张根生, 葛英亮, 聂志强, 等. 马铃薯渣不溶性膳食纤维超微粉碎改性工艺优化[J]. 食品与机械, 2015, 31(6): 186-189.

[12] KOLOKASSIDOU K, SZYMCAK M, WOLF M, et al. Hydrophilic olive cake extracts: Characterization by physicochemical properties and Cu (II) complexation [J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, 164(2/3): 442-447.

[13] 丁莎莎, 黄立新, 张彩虹, 等. 油橄榄果渣水不溶性膳食纤维结构表征及体外吸附性能研究[J]. 食品工业科技, 2017, 38(3): 108-112.

[14] 马晓娟, 黄六莲, 陈礼辉, 等. 纤维素结晶度的测定方法[J]. 造纸科学与技术, 2012, 31(2): 75-78.

[15] 丁莎莎, 黄立新, 张彩虹, 等. 油橄榄果渣膳食纤维碱法提取工艺优化及其理化性质研究[J]. 林产化学与工业, 2017, 37(1): 116-122.

[16] 徐灵芝, 黄亮, 李璐, 等. 雷竹笋渣及其膳食纤维的物化特性分析[J]. 中国酿造, 2016, 35(4): 122-126.

[17] 胡小军, 梁洁贞, 曾玉带. 水浮莲膳食纤维对 Pb²⁺、Cd²⁺、Cr²⁺ 吸附作用的研究[J]. 食品工业科技, 2007, 28(11): 103-105.

[18] PARK K H, LEE K Y, LEE H G. Chemical composition and physicochemical properties of barley dietary fiber by chemical modification[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2016, 60(6): 360-365.

[19] 涂宗财, 段邓乐, 王辉, 等. 豆渣膳食纤维的结构表征及其抗氧化性研究[J]. 中国粮油学报, 2016(6): 22-26.

[20] 张剑韵, 包立军, 梁进, 等. 桑叶多糖的分离及红外光谱和气相色谱分析[J]. 桑叶科学, 2007, 33(4): 549-552.

[21] 马光路, 吕建波, 曹青. 玉米秸秆中木质素、半纤维素和纤维素的组分分离研究[J]. 中国农业科技导报, 2015, 17(6): 70-79.

[22] 申瑞玲, 王英. 膳食纤维的改性及其对功能特性的影响[J]. 农产品加工, 2009(3): 17-20.