

苦瓜功能稻米的淀粉理化特性分析

Variations of physicochemical properties of starch in bitter melon function rice

阳永建^{1,2} 袁洁¹ 陶湘林² 何艳¹ 唐汉军^{1,2}

YANG Yong-jian^{1,2} YUAN Jie¹ TAO Xiang-lin² HE Yan¹ TANG Han-jun^{1,2}

(1. 湖南大学隆平分院, 湖南 长沙 410125; 2. 湖南省农业科学院农产品加工所, 湖南 长沙 410125)

(1. Longping Branch Graduate School, Hunan University, Changsha, Hunan 410125, China; 2. Agricultural Products Processing Institute, Hunan Academy of Agricultural Sciences, Changsha, Hunan 410125, China)

摘要:将导入苦瓜 DNA 籼稻新品种(D9)胚乳淀粉的颗粒形态、粒径分布、结晶结构、糊化、凝胶质构和分子组成等特性与受体进行了比较。结果表明,D9 淀粉 3 μm 以下的体积百分比明显增加,而 9 μm 以上的大颗粒体积百分比减少。D9 淀粉的分子有序化指标值分别为 0.67 和 1.66,明显高于受体的 0.60 和 1.18,但差示扫描量热分析起糊温度为 65.5 $^{\circ}\text{C}$,显著低于受体的 77.8 $^{\circ}\text{C}$ 。D9 淀粉的最高黏度、最低黏度、崩解值和终黏度分别为 2 683.0, 1 074.0, 1 609.0, 1 499.5 $\text{mPa} \cdot \text{s}$,均显著高于受体淀粉,而回生值(425.5 $\text{mPa} \cdot \text{s}$)低于受体的 463.5 $\text{mPa} \cdot \text{s}$ 。D9 淀粉的膨胀势和凝胶弹性值分别为 20.01 g/g 和 2.69 mm ,显著高于受体淀粉的,而直链淀粉质量分数、最大吸收波长和碘蓝值分别为 13.33%、561.0 nm 和 0.16,均显著低于受体淀粉的。导入苦瓜 DNA 引起了籼稻胚乳淀粉的粒径组成、分子组成和结构的显著变化。

关键词: 苦瓜功能稻; 淀粉; 理化特性; 分子组成

Abstract: The particle morphology, particle size distribution, crystal structure, gelatinization, gel texture and molecule properties of indica rice starch of importing bitter melon DNA (D9) were compared with its receptor. The results showed that the volume percentage of D9 starch $< 3 \mu\text{m}$ increased significantly, while the volume percentage of large granule $> 9 \mu\text{m}$ decreased. The molecular ordering index values of D9 starch were 0.67 and 1.66 respectively, which were significantly higher than those of receptor, 0.60 and 1.18; while the pasting temperature of differential scanning calorimetry was 65.5 $^{\circ}\text{C}$, which was significantly

lower than that of receptor 77.8 $^{\circ}\text{C}$. The highest viscosity, the minimum viscosity, disintegration value and final viscosity of D9 starch were 2 683.0, 1 074.0, 1 609.0, 1 499.5 $\text{mPa} \cdot \text{s}$, respectively, which were significantly higher than those of receptor starch. However, the retrogradation value (425.5 $\text{mPa} \cdot \text{s}$) less than 463.5 $\text{mPa} \cdot \text{s}$ of the receptor starch. The swelling power and gel elasticity of D9 starch were 20.01 g/g and 2.69 mm respectively, significantly higher than the receptor starch. However, the amylose content, the maximum absorption wavelength and the iodine blue value were 13.33%, 561.0 nm and 0.16 respectively, significantly lower than that of the receptor starch. Importing the bitter melon DNA into rice caused of rice endosperm starch was caused the significant variations in granule size composition, molecular composition and structure of the endosperm starch.

Keywords: bitter melon function rice; starch; physicochemical properties; molecular composition

随着健康产业的发展,普通食品功能化和功能食品主食化成为一个重要趋势^[1],作为重要主食的水稻育种战略也随时代的发展而变化,功能稻作为育种的一个重要方向,近年取得了丰硕的成果,如高直链淀粉^[2]、高 γ -氨基丁酸(GABA)^[3]、抗高血压^[4]、抗氧化^[5-6]、抗过敏^[7]、巨胚^[8]等水稻品种相继问世。课题组前期采用花粉管通道法将苦瓜 DNA 导入籼稻,获得农艺性稳定遗传的子代(2017 年农业部审定,品种名:早优 517),并证明苦瓜 DNA 片断成功整合进子代 DNA 中,且生理活性的主要目标物质皂苷等成分在胚乳中显著表达,但关于苦瓜 DNA 的导入对水稻品质的影响尚未明确,尤其是苦瓜 DNA 的导入对水稻淀粉精细结构的影响还需进一步研究。研究拟针对导入苦瓜基因的功能稻早优 517(D9),系统分析 D9 和受体(RT)胚乳淀粉的颗粒形态、粒径分布、

基金项目:湖南省重点领域研发计划(编号:2019NK2121);湖南省农业创新基金项目(编号:2020CX49)

作者简介:阳永建,女,湖南大学在读硕士研究生。

通信作者:唐汉军(1964—),男,湖南省农业科学院农产品加工所研究员,博士。E-mail: tanghanjun@yeah.net

收稿日期:2021-01-07

结晶结构、糊化、凝胶质构和分子组成等特性, 以期为中国功能稻的加工及应用提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

1.1.1 稻谷样品

苦瓜功能稻早优 517 成熟稻谷(试验编号 D9、2018 年、湖南)和受体成熟稻谷(试验编号 RT、2018 年、湖南): 湖南省水稻研究所何登骥研究员提供。稻谷样品种植在 4 片相连的水田, 总面积约 0.67 hm², 其中一片种植 RT, 其他 3 片田种植 D9。每片田的稻谷分别收获, 分别随机取稻谷样品约 10 kg。晒干至适当含水量后, 分别采用砻谷机去壳的糙米作为试验材料。

1.1.2 主要试剂

盐酸、硫酸: 优级纯, 国药集团化学试剂有限公司;

氢氧化钠、乙醇、正戊醇、乙醚、二甲基亚砜(DMSO)、碘化钾: 分析纯, 国药集团化学试剂有限公司。

1.1.3 主要仪器

扫描电子显微镜(SEM): S-4800 型, 日本 Hitachi 公司;
激光粒度分析仪: LS-POP(6) 型, 珠海欧美克仪器有限公司;

X 射线衍射仪: D8 Advance 型, 德国 Bruker 公司;

傅里叶红外光谱分析仪(FTIR): Nexus 470 型, 美国梅特勤公司;

差示扫描量热计(DSC): Q2000 型, 美国 TA 公司;

快速黏度分析仪(RVA): Super4 型, 澳大利亚 Newport Scientific 公司;

质构分析仪: CT3 型, 美国 Brookfield 公司;

砻谷机: FC2K-Y 型, 株式会社山本制作所。

1.2 试验方法

1.2.1 淀粉样品制备 稻米胚乳淀粉的样本制备采用实验室常用的碱—醇提取法^[9]。称取样品 200 g, 在 4 ℃ 水浸泡 24 h 后, 经磨浆过筛(120 目), 离心(5 000 × g, 5 min, 4 ℃)收集湿淀粉。加湿淀粉体积的 4 倍氢氧化钠溶液(0.1 mg/100 mL), 4 ℃ 下搅拌 2 h 以上, 离心(5 000 × g, 5 min, 4 ℃)收集湿淀粉, 此处理重复 3 次后用 0.1 mol/L 的 HCl 溶液调节 pH 值至中性。湿淀粉在 4 倍体积去离子水中充分分散, 加入正戊醇 100 mL, 激烈搅拌 2 h 以上, 然后静止 12 h 以上, 除去醇层, 重复此步骤至醇液层透明为止。过 400 目筛后, 离心(5 000 × g, 5 min, 4 ℃)收集湿淀粉。用 G4 砂芯过滤器充分抽滤, 依次加适量无水乙醇 3 次、乙醚 3 次进行洗涤, 充分抽干淀粉后, 于 40 ℃ 下挥发残余乙醚。作为颗粒淀粉样品在干燥器中保存备用。

取上述颗粒淀粉样品约 1 g, 加 10 mL DMSO, 待充分糊化后加入 95% 乙醇 50 mL, 搅匀后离心(5 000 × g,

10 min)收集淀粉。此步骤重复 2 次。然后在 G4 砂芯过滤器上抽滤收集淀粉, 并依次加入适量无水乙醇 3 次、乙醚 3 次进行洗涤, 充分抽干后, 于 40 ℃ 下挥发残余乙醚。作为高纯度脱脂淀粉样品在干燥器中保存备用。

1.2.2 SEM 观察 采用 Bhat 等^[10]的方法处理样本后, 采用扫描电子显微镜进行观察。

1.2.3 粒度分析 参照陶湘林等^[11]的方法, 采用激光粒度分析仪进行分析, 每个样品重复测定 3 次。

1.2.4 结晶结构分析 参照 Mir 等^[12]的方法, 采用粉末 X 射线衍射仪进行分析, 每个样品重复测定 3 次。

1.2.5 FTIR 分析 根据满建民等^[13]的方法, 采用傅里叶红外光谱分析仪进行分析, 每个样品重复测定 3 次。

1.2.6 DSC 分析 参照陶湘林等^[11]的方法, 采用差示扫描量热计进行分析, 每个样品重复测定 3 次。

1.2.7 RVA 分析 参照 Zhu 等^[14]的方法, 采用快速黏度分析仪分析, 每个样品重复测定 3 次。

1.2.8 膨胀势测定 根据 Tang 等^[9]的方法测定淀粉膨胀势, 每个样品重复测定 3 次。

1.2.9 凝胶质构分析 针对上述膨胀势测定用获得的淀粉凝胶, 采用质构分析仪进行质构分析, 选用直径 2 mm 圆柱形不锈钢探头 TA10, 采用 TPA 分析模式, 探头压缩速度为 0.5 mm/s, 压缩距离为 3 mm, 每个样品重复测定 10 次。

1.2.10 淀粉—碘溶液可见光谱分析 根据李林静等^[15]的方法测定, 并基于 680 nm 碘蓝值计算淀粉的表现直链淀粉含量, 每个样品重复测定 3 次。

1.3 数据统计分析

所有数据均采用 Excel 2010 和 Origin 2018 软件进行统计分析处理。

2 结果与分析

2.1 淀粉颗粒的形态与大小

D9 和 RT 淀粉颗粒形态与大小, 在 SEM 的观察中(图 1)未见明显的差异, 均是典型的水稻淀粉形态。两者的淀粉颗粒均为表面光滑的不规则多面体, 平均大小约为 5 μm。通过激光粒度仪分析, 淀粉颗粒的体积分布图谱几乎是重叠在一起(图 2), 对数据分析发现(表 1), D9 和 RT 的平均粒径均为 5.5 μm, 3~9 μm 的中颗粒体积百分比分别为 93.2% 和 92.3%, D9 和 RT 无显著差异。但 D9 和 RT 在 3 μm 以下小颗粒体积百分比分别为 2.7% 和 2.4%, 而 9 μm 以上的大颗粒体积百分比分别为 4.2% 和 5.3%, D9 和 RT 有显著差异。

说明苦瓜 DNA 的导入可一定程度地干预籼稻淀粉颗粒形态的相关基因表达, 导致淀粉颗粒的粒径组成发生变化。

2.2 淀粉颗粒的分子有序性

淀粉颗粒的广角 X 射线衍射图谱如图 3 所示, 主峰

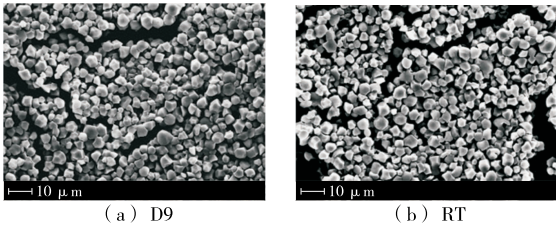


图 1 淀粉颗粒形态 SEM 观察

Figure 1 SEM observation of starch granule morphology

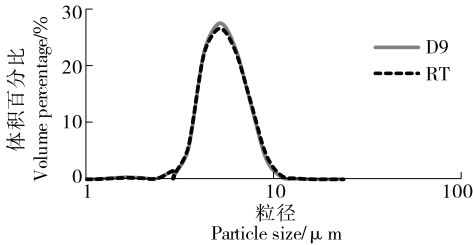


图 2 淀粉的粒度分布图谱

Figure 2 Particle size distribution map of starch

表 1 淀粉粒径的体积百分比[†]

Table 1 Volume percentage of starch particle size ($n=3$)

样品	<3 $\mu\text{m}/\%$	3~9 $\mu\text{m}/\%$	>9 $\mu\text{m}/\%$	平均粒径/ μm
D9	2.7 $\pm$ 0.3 ^a	93.2 $\pm$ 0.3 ^a	4.2 $\pm$ 0.4 ^a	5.5 $\pm$ 0.3 ^a
RT	2.4 $\pm$ 0.3 ^b	92.3 $\pm$ 0.4 ^a	5.3 $\pm$ 0.5 ^b	5.5 $\pm$ 0.4 ^a

[†] 同列字母不同表示显著差异($P<0.05$)。

的位置主要分布在 $13^{\circ}\sim 25^{\circ}$, 在 $16^{\circ}\sim 19^{\circ}$ 有特征偶极峰, 在 20° 左右观察到源于直链淀粉—脂肪的单螺旋结构形成的小峰, D9 和 RT 均属典型的谷物类 A 型结晶淀粉^[16]。淀粉的结晶区是由支链淀粉的双螺旋结构规则排列形成^[17], D9 淀粉的相对结晶度为 37.75%, RT 的相对结晶度为 36.14%, 统计上有显著差异(表 2)。

D9 与 RT 淀粉的傅里叶变换红外光谱如图 4 所示, 主要差异表现在 $1\ 050\sim 950\text{ cm}^{-1}$ 波数区间, 参照满建民等^[13]的方法, 测量波数 $1\ 045, 1\ 022, 995\text{ cm}^{-1}$ 各峰顶点至基线的高度(峰强度), 计算出 $1\ 045\text{ cm}^{-1}/1\ 022\text{ cm}^{-1}$ 和 $1\ 022\text{ cm}^{-1}/995\text{ cm}^{-1}$ 的峰强度比值(表 2), D9 淀粉分

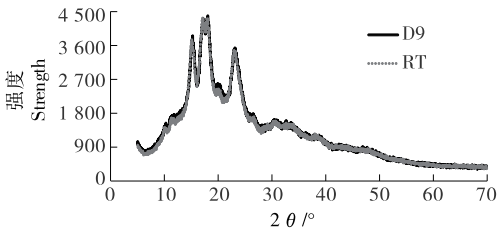


图 3 淀粉颗粒的广角 X 射线衍射图谱

Figure 3 Wide angle X-ray diffraction patterns of starch granules

表 2 淀粉颗粒的分子有序性[†]

Table 2 The molecular ordering of starch granules ($n=3$)

样品	相对结晶度/ $\%$	峰强度比值		
		$1\ 045\text{ cm}^{-1}/1\ 022\text{ cm}^{-1}$	$1\ 022\text{ cm}^{-1}/995\text{ cm}^{-1}$	
D9	37.75 ^a	0.67 ^a	1.66 ^a	
RT	36.14 ^b	0.60 ^b	1.18 ^b	

[†] 同列字母不同表示显著差异($P<0.05$)。

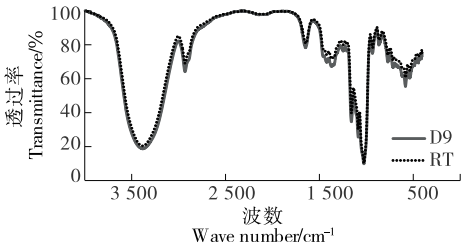


图 4 淀粉颗粒的 FTIR 图谱

Figure 4 The FTIR spectra of starch granules

别为 0.67 和 1.66, RT 淀粉分别为 0.60 和 1.18, D9 与 RT 之间均有显著差异, 表明 D9 淀粉颗粒的分子有序化程度更高^[13], 与相对结晶度的结果一致。

说明苦瓜 DNA 的导入不仅对籼米淀粉颗粒形态的基因表达有一定程度的干预, 同时对淀粉颗粒组织结构的形成机制产生实质影响。

2.3 淀粉颗粒的糊化特性

DSC 图谱显示(图 5), D9 和 RT 淀粉的结晶结构融解, 分子完全变为无序状态的温度区间存在显著性差异。RVA 图谱也表现了显著不同(图 6)。DSC 和 RVA 分析的数据列于表 3。DSC 分析的起糊温度、峰温度和终结温度, D9 分别为 $65.5, 71.3, 78.2^{\circ}\text{C}$, 糊化温度范围 12.7°C ; RT 分别为 $77.8, 81.8, 86.7^{\circ}\text{C}$, 糊化温度范围 9.8°C 。但 D9 的糊化焓值为 10.1 J/g , 显著高于 RT 的 8.5 J/g 。RVA 分析, D9 到达最高黏度的时间为 4.4 min , 比 RT 快 0.6 min , 获得的糊化温度分别为 $74.7, 82.4^{\circ}\text{C}$, 与 DSC 的分析结果一致。另外, D9 的最高黏度、最低黏度、崩解值和终黏度分别为 $2\ 683.0, 1\ 074.0, 1\ 609.0, 1\ 499.50\text{ mPa}\cdot\text{s}$, 显著高于 RT 的各指标值。但 D9 的回生值为 $425.5\text{ mPa}\cdot\text{s}$, 显著低于 RT 的 $463.5\text{ mPa}\cdot\text{s}$ 。从温度的视角, D9 淀粉较易糊化, 但较难老化。从分子秩序和糊化特性的所有指标值推断, D9 淀粉的支链分子含量较高, 分子量较大, 分支较多而链长较短^[14, 17-19], 虽然形成的结晶区相对较大, 但结晶结构强度较低, 致使热稳定性较差。同时可能与 D9 淀粉小颗粒相对较多, 大颗粒相对较少也有一定关系^[17, 19]。

从上述分子秩序和糊化特性的结果可推断, D9 稻米煮熟性较好且米饭老化较慢, 作为口粮用的加工品质等得到一定程度提升。

2.4 淀粉的凝胶特性

淀粉的凝胶特性如表 4 所示。D9 的膨胀势为 20.01 g/g, 显著高于 RT 的 18.62 g/g。D9 凝胶质指标硬度、黏性、弹性和咀嚼性等均高于 RT, 而内聚力和黏着性等均低于 RT。这些结果支持 D9 淀粉的支链分子含量较高, 分子量较大, 分支较多而链长较短的推断^[19]。但除弹性指标外, D9 和 RT 的各单项指标之间统计上无显著性差异, 可能是质构测量样品平行数量较少, 同时使用的测量探头直径太小, 获得的数据少而偏差值太大所致, 在今后的测量中应改进。

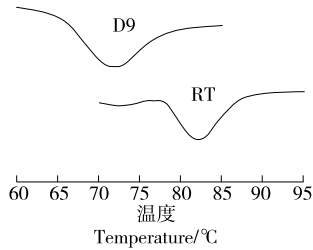


图 5 淀粉颗粒的 DSC 图谱

Figure 5 The DSC spectrum of starch granules

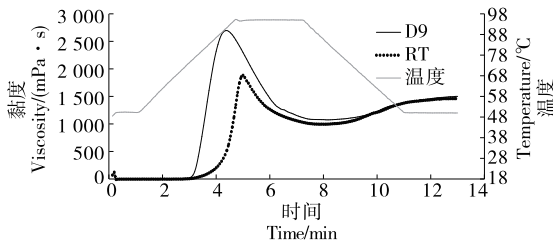


图 6 淀粉的 RVA 图谱

Figure 6 The RVA map of starches

表 3 淀粉颗粒的糊化特性[†]

Table 3 The gelatinization characteristics of starch granules (n=3)

指标	单位	D9	RT
DSC 起糊温度	°C	65.5±0.3 ^a	77.8±0.1 ^b
DSC 峰值温度	°C	71.3±0.2 ^a	81.8±0.0 ^b
DSC 终结温度	°C	78.2±0.7 ^a	87.6±0.6 ^b
DSC 温度范围	°C	12.7±0.0 ^a	9.8±0.0 ^b
DSC 糊化焓	J/g	10.1±0.8 ^a	8.5±0.6 ^b
RVA 最高黏度	mPa·s	2 683.0±18.4 ^a	1 892.0±11.3 ^b
RVA 最低黏度	mPa·s	1 074.0±0.0 ^a	997.0±2.8 ^b
RVA 崩解值	mPa·s	1 609.0±18.4 ^a	895.0±8.5 ^b
RVA 终黏度	mPa·s	1 499.5±0.7 ^a	1 460.5±2.1 ^b
RVA 回生值	mPa·s	425.5±0.7 ^a	463.5±0.7 ^b
RVA 最高黏度时间	min	4.4±0.0 ^a	5.0±0.0 ^b
RVA 糊化温度	°C	74.7±0.6 ^a	82.4±0.1 ^b

[†] 同行字母不同表示显著差异 (P<0.05)。

结果表明 D9 稻米因蒸煮熟化后的弹性增加, 与原受

2.5 淀粉的分子及组成特性

淀粉分子与碘分子可形成包含复合物, 使溶液呈蓝色。D9 和 RT 吸收光谱存在显著差异 (图 7), 在 550~800 nm 范围内 D9 的吸光度均低于 RT。如表 5 所示, 最大吸收波长 (λ_{max}), D9 为 561 nm, RT 为 581 nm。波长 680 nm 的蓝值 (BV_{680 nm}), D9 为 0.16, RT 为 0.20。基于 BV_{680 nm} 计算的表观直链淀粉质量分数, D9 为 13.33%, 显著低于 RT 的 16.47%。

这些结果表明, D9 不仅直链淀粉含量较低, 且支链分子的链长较短^[17,19]。苦瓜 DNA 的导入引起了受体的淀粉生物合成机制变化, D9 淀粉的品质提升主要是基于淀粉分子水平的变化。

表 4 淀粉的凝胶特性[†]

Table 4 The gel properties of starches

指标	单位	D9	RT
膨胀势 [*]	g/g	20.01±0.22 ^a	18.62±0.55 ^b
硬度	g	3.83±0.58 ^a	3.17±0.76 ^a
黏性	g	2.90±2.00 ^a	2.63±2.22 ^a
内聚力	g	0.73±0.46 ^a	0.75±0.48 ^a
弹性	mm	2.69±0.10 ^a	2.30±0.17 ^b
黏着性	mJ	0.04±0.03 ^a	0.05±0.02 ^a
咀嚼性	mJ	2.63±1.88 ^a	2.07±1.82 ^a

[†] 同行字母不同表示显著差异 (P<0.05); ^{*} 表示平行 3 次, 其他平行 10 次。

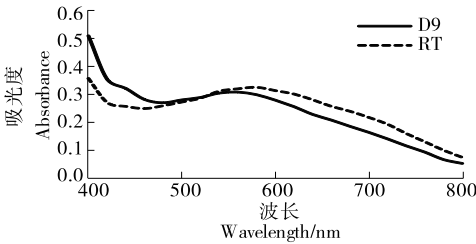


图 7 淀粉—碘溶液的可见光吸收图谱

Figure 7 The visible light absorption spectrum of starch iodine solution

表 5 淀粉的分子及组成特性[†]

Table 5 The molecular and compositional properties of starches (n=3)

样品	最大吸收 波长/nm	蓝值(680 nm)	表观直链淀粉 质量分数/%
D9	561.00±1.00 ^a	0.16±0.00 ^a	13.33±0.17 ^a
RT	581.00±1.00 ^b	0.20±0.00 ^b	16.47±0.29 ^b

[†] 同行字母不同表示显著差异 (P<0.05)。

3 结论

研究将导入苦瓜 DNA 水稻品种(早优 517)胚乳淀粉的颗粒形态、粒径分布、结晶结构、糊化、凝胶质构和分子组成等特性与受体进行了比较。早优 517 淀粉颗粒组织的分子秩序较高,表现了较大的最高黏度、最低黏度、崩解值、终黏度、膨胀势和凝胶弹性值,而热稳定性、凝胶回生值等指标较小。这些理化特性的差异,是源于较小的直链淀粉含量、最大吸收波长和碘蓝值等指标。导入苦瓜 DNA 引起了淀粉分子组成和结构的显著变化。推断:早优 517 作为口粮用米的场合,食味品质优于受体。

远缘植物 DNA 导入,可使籼稻获得植物生理活性成分的显著表达,同时对稻米淀粉的生物合成机制产生实质性改变,这些改变包含有利于食味品质改善的良性机制。但期望进一步打破各研究领域间的无形壁垒,健全多领域合作攻关机制,广泛共享育种科研人员掌握的育种资源,加快淀粉分子结构与理化性质之间的数量关系,以及淀粉生物合成机制的研究进展。

参考文献

- [1] 张辉, 王文月, 段玉清, 等. 我国功能食品创新发展趋势、重点及政策建议[J]. 食品工业科技, 2015, 36(8): 361-364.
- [2] ZHU Li-jia, GU Ming-hong, MENG Xiang-lun, et al. High-amylose rice improves indices of animal health in normal and diabetic rats[J]. Plant Biotechnology Journal, 2012, 10(3): 353-362.
- [3] 张祥喜, 袁林峰, 刘凯, 等. 富含 γ -氨基丁酸(GABA)的巨胚功能稻研究进展[J]. 江西农业学报, 2007, 19(1): 36-39, 47.
- [4] KANG M Y, SON J, CHUNG S I, et al. Functional rice cultivars-goami and nokwon may lower body weight and improve lipid metabolism in high fat-fed mice cultivars[J]. Journal of Crop Science and Biotechnology, 2014, 17(3): 111-116.
- [5] MIN B, GU Li-wei, MCCLUNG A M, et al. Free and bound total phenolic concentrations, antioxidant capacities, and profiles of proanthocyanidins and anthocyanins in whole grain rice (*Oryza sativa* L.) of different bran colours[J]. Food Chemistry, 2012, 133(3): 715-722.
- [6] SEO W D, KIM J Y, PARK D S, et al. Comparative analysis of physicochemical and antioxidative properties of new giant embryo mutant, YR23517Acp79, in rice (*Oryza sativa* L.)[J]. Journal of the Korean Society for Applied Biological Chemistry, 2011, 54(5): 700-709.
- [7] 刘仲华, 李来平, 曾海燕, 等. 国内外功能性稻米研究进展[J]. 广东微量元素科学, 2010, 17(12): 13-20.
- [8] 向敏, 黄鹤春. 功能性稻米研究进展[J]. 湖北农业科学, 2016, 55(12): 2 997-3 000.
- [9] TANG Han-jun, ANDO H, WATANABE K, et al. Some physicochemical properties of small-, medium- and large-granule starches in fractions of waxy barley grain[J]. Cereal Chemistry, 2000, 77(1): 27-31.
- [10] BHAT F M, RIAR C S. Effect of chemical composition, granule structure and crystalline form of pigmented rice starches on their functional characteristics[J]. Food Chemistry, 2019, 297: 124984.1-124984.7.
- [11] 陶湘林, 吴跃辉, 魏颖娟, 等. 原料生粉的物理性状对鲜湿切粉品质的影响[J]. 食品与机械, 2020, 36(5): 94-98.
- [12] MIR S A, BOSCO S J D. Cultivar difference in physicochemical properties of starches and flours from temperate rice of Indian Himalayas[J]. Food Chemistry, 2014, 157: 448-456.
- [13] 满建民, 蔡灿辉, 严秋香, 等. 红外光谱技术在淀粉粒有序结构分析中的应用[J]. 作物学报, 2012, 38(3): 505-513.
- [14] ZHU Da-wei, ZHANG Hong-cheng, GUO Bao-wei, et al. Physicochemical properties of indica-japonica hybrid rice starch from Chinese varieties[J]. Food Hydrocolloids, 2017(63): 356-363.
- [15] 李林静, 唐汉军, 李高阳, 等. 甘薯营养成分及淀粉理化特性研究[J]. 食品与机械, 2014, 30(4): 54-58.
- [16] ZHU Da-wei, WEI Hai-yan, GUO Bao-wei, et al. The effects of chilling stress after anthesis on the physicochemical properties of rice (*Oryza sativa* L.) starch[J]. Food Chemistry, 2017, 237: 936-941.
- [17] GUO Ke, LIN Ling-shang, FAN Xiao-xu, et al. Comparison of structural and functional properties of starches from five fruit kernels[J]. Food Chemistry, 2018, 257: 75-82.
- [18] TANG Han-jun, WATANABE K, MITSUNAGA T. Structure and functionality of large, medium and small granule starches in normal and waxy barley endosperms[J]. Carbohydrate Polymers, 2002, 49(2): 217-224.
- [19] TANG Han-jun, WATANABE K, MITSUNAGA T. Characterization of storage starches from quinoa, barley and adzuki seeds[J]. Carbohydrate Polymers, 2002, 49(1): 13-22.