



食品科学

Food Science

ISSN 1002-6630, CN 11-2206/TS

《食品科学》网络首发论文

题目： 糜子直链淀粉、蛋白质含量对其外观品质及食味品质的影响
作者： 李冬梅, 王洪露, 龚瑶, 曹梓微, 李佳雨, 冯佰利
网络首发日期： 2022-06-14
引用格式： 李冬梅, 王洪露, 龚瑶, 曹梓微, 李佳雨, 冯佰利. 糜子直链淀粉、蛋白质含量对其外观品质及食味品质的影响[J/OL]. 食品科学.
<https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2206.TS.20220613.1556.161.html>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

糜子直链淀粉、蛋白质含量对其外观品质及食味品质的影响

李冬梅, 王洪露, 龚 瑶, 曹梓微, 李佳雨, 冯佰利, *

西北农林科技大学农学院旱区逆境生物学国家重点实验室

摘 要: 本研究以 4 个直链淀粉、蛋白质含量存在显著差异的糜子品种为试验材料, 研究了直链淀粉、蛋白质含量对糜子外观及食味品质的影响。试验结果表明: 与低直链淀粉品种相比较, 高直链淀粉糜子品种, 全粉糊化黏度、糊化时间、糊化温度, 糜子饭吸水率、体积膨胀率、硬度较高, 而糊化热焓值较低; 蛋白质含量越高, 全粉糊化黏度, 糜子饭吸水率、体积膨胀率越小, 糊化温度、糜子饭硬度越大。直链淀粉、蛋白质含量较高的糜子品种, 蒸煮性差、能耗高、蒸煮时间长。因此, 在糜子品质育种中, 适当降低直链淀粉和蛋白质含量可以改善糜子的适口性。

关键词: 糜子; 直链淀粉; 蛋白质; 外观品质; 食味品质

Effects of amylose and protein content on appearance and eating quality of proso millet

LI Dongmei, WANG Honglu, GONG Yao, CAO Ziwei, LI Jiayu, FENG Baili, *

College of Agronomy, Northwest A&F University/State Key laboratory of Crop Stress Biology for Arid Areas

Abstract: In this study, four proso millet varieties with significant differences in amylose and protein content were used as experimental materials to study the effects of amylose and protein content on the appearance and eating quality of proso millet. The results showed that the viscosity, gelatinization time, gelatinization temperature of proso millet powder, water absorption rate, volume expansion rate and hardness of proso millet rice with high amylose content were significantly higher than those with low amylose content, while the gelatinization heat enthalpy was lower than those with low amylose content. The higher protein content of proso millet is, the lower paste viscosity, of proso millet powder and volume expansion rate of proso millet rice, and the higher the hardness of proso millet rice will be. Proso millet with high amylose and protein contents has poor cooking ability, high energy consumption and long cooking time. In conclusion, amylose and protein contents should be appropriately reduced in quality breeding of proso millet. This study can provide theoretical reference and basis for the quality improvement of proso millet.

Keywords: proso millet; amylose; protein; appearance quality; eating quality

中图分类号: S516

文献标志码: A

DOI:10.7506/spkx1002-6630-20220406-063

糜子耐旱、耐瘠、生育期变幅大^[1], 是干旱和半干旱地区重要的粮食作物和经济作物。近年来, 人们对糜子的需求逐渐由产量向品质转变, 解析糜子品质特性, 培育适口性好, 品质优良的优质专用品种是糜子品种改良的方向^[2]。糜子淀粉和蛋白质不仅是糜子营养品质的重要构成因素, 其含量也直接影响食味品质^[3]。糜子淀粉是多糖的一种, 含量在 70%左右, 分为直链淀粉和支链淀粉^[4]。罗志祥^[5]研究表明, 不论粳稻或籼稻, 直链淀粉含量与硬度、咀嚼性和弹性呈极显著正相关, 而与黏度呈极显著负相关。杨清华^[6]研究表明, 粳性糜子粉糊化特性指标均显著高于糯性糜子, 粳性糜子饭吸水率、体积膨胀率、米汤固形物含量、米汤碘蓝值均高于糯性糜子。蛋白质作为糜子中第二大类贮藏物质, 含量一般在 13.6%~17.9%。其含量的高低与糜子的蒸煮食味品质有着密切联系, 特别是对某些缺乏直链淀粉的糯性糜子尤为明显^[7]。石吕^[8]以 3 个常规籼稻品种和 3 个常规粳稻品种为供试材料研究

作者简介: 李冬梅 (1998-) (ORCID:0000-0002-6900-5761), 女, 在读硕士研究生, 研究方向为糜子品质改良。E-mail:dml@nwfau.edu.cn; 冯佰利 (1966-) (ORCID: 0000-0002-8213-7478), 男, 教授, 博士, 研究方向为作物高产生态生理技术及小杂粮栽培、育种研究。E-mail: fengbaili@nwsuaf.edu.cn。

基金: 陕西省小杂粮产业技术体系项目(NYKJ-2021-YL(XN)40); 国家谷子高粱产业技术体系(CARS-06-A26); 国家自然科学基金 (31371529);

表明，蛋白质含量与崩解值以及峰值黏度分别呈现出显著的负相关关系，并且与消减值之间呈现出极显著的正相关关系。Zhu Lijia^[9]等研究也发现，大米蛋白质含量不同是导致米粉与其对应的淀粉糊化特性差异的主要原因之一。Zhou Zhongkai 等^[10]研究发现米粉经蛋白酶处理后，其峰值黏度和最终黏度发生了显著变化。然而，目前大多研究关注直链淀粉、蛋白质对大宗作物的影响，对糜子品质影响的研究报道较少。因此，本研究选择直链淀粉和蛋白质含量存在显著差异的 4 个糜子品种，探究直链淀粉、蛋白质含量对糜子外观及食味品质的影响，旨在为糜子品质育种改良、深加工以及品质评定提供有力的理论基础，以期为我国糜子产业的可持续、健康、绿色发展提供数据理论和参考^[11]。

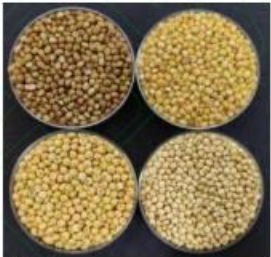
1 材料与方法

1.1 材料与试剂

供试材料为 4 个直链淀粉、蛋白质含量存在显著差异，生育期基本一致的糜子品种（如表 1，图 1），由西北农林科技大学小宗粮豆研究中心杂提供。东乡朵麻糜、黑糜子直链淀粉含量高，属于粳性品种。蚂蚱眼、小红黍直链淀粉含量低属于糯性品种。东乡朵麻糜、蚂蚱眼蛋白质含量高，而黑糜子、小红黍蛋白质含量相对较低。各品种间存在显著差异。

表 1 糜子营养组分含量
Table 1 Nutrient components of proso millet

类型	品种	直链淀粉含量%	蛋白质含量%	脂肪含量%
粳性	东乡朵麻糜	15.57±0.14a	14.46±0.43a	3.41±0.17a
	黑糜子	16.92±0.39a	10.23±0.19b	3.19±0.13a
糯性	蚂蚱眼	2.61±0.16b	15.11±0.40a	3.44±0.25a
	小红黍	2.48±0.08b	10.41±0.42b	3.36±0.15a



注：表中同一列中不同字母表示达到显著性差异（ $P<0.05$ ），下同。

图 1 东乡朵麻糜 黑糜子 蚂蚱眼 小红黍

Figure 1 Dongxiangduomamei Heimeizi Mazhayan Xiaohongshu

直链淀粉试剂盒，北京索莱宝科技有限公司；五水合硫酸铜 硫酸钾 浓硫酸 石油醚 乙醇百里酚蓝 氢氧化钾，均为市场所购，所有化学试剂均为国产分析纯。

1.2 仪器与设备

KjeltecTM 8400 全自动凯氏定氮仪，瑞典 FOSS 公司；自动考种仪，杭州万深检测科技有限公司；Ci7600 色度仪，爱丽丝（上海）色彩科技有限公司；S-3400N 扫描电子显微镜，日本日立公司；S3500 激光粒度仪，美国麦奇克公司；RVA-4500 快速粘度仪，瑞典波通公司；TA Q2000 差示扫描量热仪，美国 TA 仪器公司；DHR-1 旋转流变仪（美国 Waters 公司）；TMS-pilot 质构仪，美国 FTC 公司。

1.3 试验方法

1.3.1 样品制备

将糜子收获后晒干，实验室放置一段时间平衡水分，后使用砻谷机脱壳，将脱壳籽粒磨粉，过 100 目筛，置于 4℃冰箱备用。

1.3.2 营养品质的测定

直链淀粉含量用索莱宝公司直链淀粉试剂盒测定。

蛋白质含量采用凯氏定氮法，用全自动凯氏定氮仪进行测定^[12]。

脂肪含量采用索氏抽提法^[13]测定。

1.3.3 籽粒外观品质的测定

1.3.3.1 籽粒长、宽、长宽比测定

使用自动考种仪测定脱壳后籽粒长、宽和长宽比。

1.3.3.2 籽粒千粒重的测定

使用自动数粒机数 1000 粒脱壳后糜子籽粒，每个样品重复 5 次，使用分析天平称取千粒重。

1.3.3.3 粒色测定

使用色度仪测定脱壳后糜子籽粒的颜色，颜色特性分别使用 L^* 、 a^* 和 b^* 表示。 L^* 代表亮度； a^* 代表红色 (+) 和绿色 (-)； b^* 代表黄色 (+) 和蓝色 (-)。总色差使用公式 (1) 计算：

$$\Delta E = \sqrt{\Delta L^{*2} + \Delta a^{*2} + \Delta b^{*2}} \quad (1)$$

1.3.4 颗粒形态观察

采用电子显微镜进行观察，取少量样品均匀地洒在双面胶上并固定于载物台，真空条件下用离子溅射镀膜仪将其喷金，于真空干燥器中干燥保存。电镜加速电压为 5.0kV，放大倍数为 2000 倍。

1.3.5 颗粒大小分析

使用激光衍射粒度分析仪测量粒度大小，具体操作如下：在烧杯中放入 1L 蒸馏水，向水中缓慢加入糜子粉，直至糜子粉量达到一起要求，点击仪器进行分析。

1.3.6 糜子粉吸水率、吸油率的测定

1.3.6.1 吸水率

准确称取 0.5g 样品于 10mL 离心管中，加入 5mL 蒸馏水，混合均匀后，4000r/min 离心 15min 倒去上清液，称取重量，吸水率用公式 (2) 计算。

$$\text{吸水率} = \frac{m_2 - m_1}{m} \times 100\% \quad (2)$$

式中： m_2 为离心后总质量/g； m_1 为离心前样品与离心管总质量/g； m 为样品质量/g

1.3.6.2 吸油率：

准确称取 0.5g 样品于 10mL 离心管中，加入 5mL 食用油，混合均匀后，4000r/min 离心倒去上清液，称取重量，吸油率用公式 (3) 计算。

$$\text{吸油率} = \frac{m_2 - m_1}{m} \times 100\% \quad (3)$$

式中： m_2 为离心后总质量/g； m_1 为离心前样品与离心管总质量/g； m 为样品质量/g

1.3.7 糜子粉糊化特性的测定

称取含水量为 14% 的样品 3.0g，加入 25.0mL 蒸馏水混合均匀，放于 RVA 仪。程序设置：50℃ 保持 1min，用 3.45min 将温度从 50℃ 加热到 95℃，在 95℃ 下保持 2.4min，使用 3.45min 将温度降至 50℃，最后在 50℃ 保持 1min。

1.3.8 糜子全粉胶稠度的测定

称取 0.1g 样品放入试管，加入 95% 乙醇百里酚蓝溶液 0.2ml，使样品充分分散而不沉淀结块，然后加 0.2mol/L 的 KOH 溶液 2.0mL，并轻轻摇动试管，把试管放入沸水浴锅中，用保鲜膜封口，加热 8min。结束后，放在试管架冷却 10min，再放入冰水浴内 20min，取出。水平放置试管，静置 1h。观察米胶长度。

1.3.9 糜子粉热特性的测定

称取 3mg 样品放置于坩埚中，并加入 6mg 水，以空坩埚为对照，密封平衡，室温下过夜，从 30~110℃ 以 10℃/min 用差示扫描量热仪加热速率扫描。

1.3.10 糜子粉流变特性的测定

称取样品 0.4g，加蒸馏水 6.0mL，搅拌均匀后放于 100℃ 水浴锅中加热糊化 10min。取 2mL 糊化后样品置于流变仪测试平台，测定选用 40mm 锥形版夹具，设置间隙为 0.1mm，设置 flow 模式，对样品进行频率扫描，扫描范围为 1~100s⁻¹，温度为 95℃，并在周围抹甲基硅油，防止水分挥发。

1.3.11 蒸煮特性的测定

称取 2.0g 糜子米，蒸馏水冲洗后加 30mL 蒸馏水蒸煮 30min，取出后放置 30min。

(1) 使用 pH 计测定米汤 pH。

(2) 将米汤定容至 45mL 并转移至离心管中，4000r/min 离心 5min，取离心后米汤 10mL 放置于烘干的铝盒中，105℃烘箱中烘至恒重，使用分析天平称量，获取米汤干物质重量。

(4) 以蒸馏水为对照，660nm 处测定米汤透光率。

(5) 将米饭放在纱布中 0.5h 以去除米汤，然后称取重量为米饭重，利用排水法测定体积为米饭体积。计算出米饭吸水率及米饭体积膨胀比，计算公式分别为 (4)、(5) 如下。

米饭吸水率= $\frac{\text{米饭重量}-\text{黄米重量}}{\text{黄米重量}} \times 100\%$ (4)

米饭膨胀体积比= $\frac{\text{米饭体积}-\text{黄米体积}}{\text{黄米重量}} \times 100\%$ (5)

1.3.12 糜子饭质构特性测定

在中部米饭层，挑选 3 粒完整的米饭，3 粒米饭辐射状摆放于质构仪的载物平板上进行质构测定。使用配有 5.0kg 称重传感器的质构仪对糜子饭质构进行分析。采用 P/36 平底柱形探头，测试前速率为 1.00mm/s，测试速率为 0.50mm/s、返回速率 1.00mm/s、压缩程度为 70.0%，两次压缩间停留时间为 5s，触发值为 5.0g，每个样品重复 10 次。

1.4 数据分析

使用 SPSS 进行方差分析和多重比较，origin 制图。

2 结果与分析

2.1 糜子直链淀粉、蛋白质含量对脱壳后籽粒外观品质的影响

籽粒的外观品质包括颜色、大小、粒重等，不仅影响消费者对谷物的喜爱程度，还会影响蒸煮品质^[14]。籽粒的粒长、粒宽、长宽比和千粒重对谷物的外观和产量具有重要的作用，颜色对消费者接受度有很大的影响^[15]。由表 2 知，直链淀粉含量高的糜子品种籽粒亮度值、色差分别为 54.80-65.28、58.09-71.62，而直链淀粉含量低的品种籽粒亮度值、色差分别为 71.84-72.20、76.97-78.49。直链淀粉含量低的糜子品种亮度值、色差显著高于直链淀粉含量高的品种，这说明直链淀粉含量存在显著差异其籽粒颜色也存在肉眼可见的差异。这可能是直链淀粉的存在会影响籽粒透光性^[3]。蛋白质含量高的糜子品种与蛋白质含量低的品种外观品质没有显著差异。

表 2 直链淀粉、蛋白质含量对脱壳后糜子籽粒外观品质的影响

Table 2 Effects of amylose and protein content on grain appearance quality of proso millet

品种	亮度值	红绿值	黄蓝值	色差	粒长/(mm)	粒宽/(mm)	长/宽	千粒重/(g)
东乡朵麻糜	54.80±0.23c	5.93±0.29b	18.35±0.68c	58.09±0.24c	3.03±0.03a	2.48±0.02b	1.23±0.00a	6.37±0.17b
黑糜子	65.28±0.75b	6.75±0.45a	28.66±1.34b	71.62±1.13b	2.91±0.02b	2.48±0.01b	1.18±0.01b	6.34±0.12b
蚂蚱眼	71.84±0.53a	6.50±0.57ab	31.69±0.79a	78.49±0.68a	3.05±0.01a	2.74±0.03a	1.12±0.01d	7.88±0.01a
小红黍	72.20±0.30a	5.06±0.11c	27.10±0.89b	76.97±1.12a	2.61±0.02c	2.31±0.03c	1.14±0.01c	5.10±0.35c

2.2 直链淀粉、蛋白质含量对糜子全粉颗粒形态的影响

图 2 为营养组成不同的各糜子品种的扫描电镜图。通过放大 2000 倍可清楚观察到，糜子淀粉颗粒饱满呈现近球形或规则的多边形结构，轮廓清晰且表面附着蛋白质基质。但大小存在存在差异。这可能是由于遗传背景、环境因素不同导致的。直链淀粉、蛋白质含量不同的糜子品种颗粒形态没有显著差异。

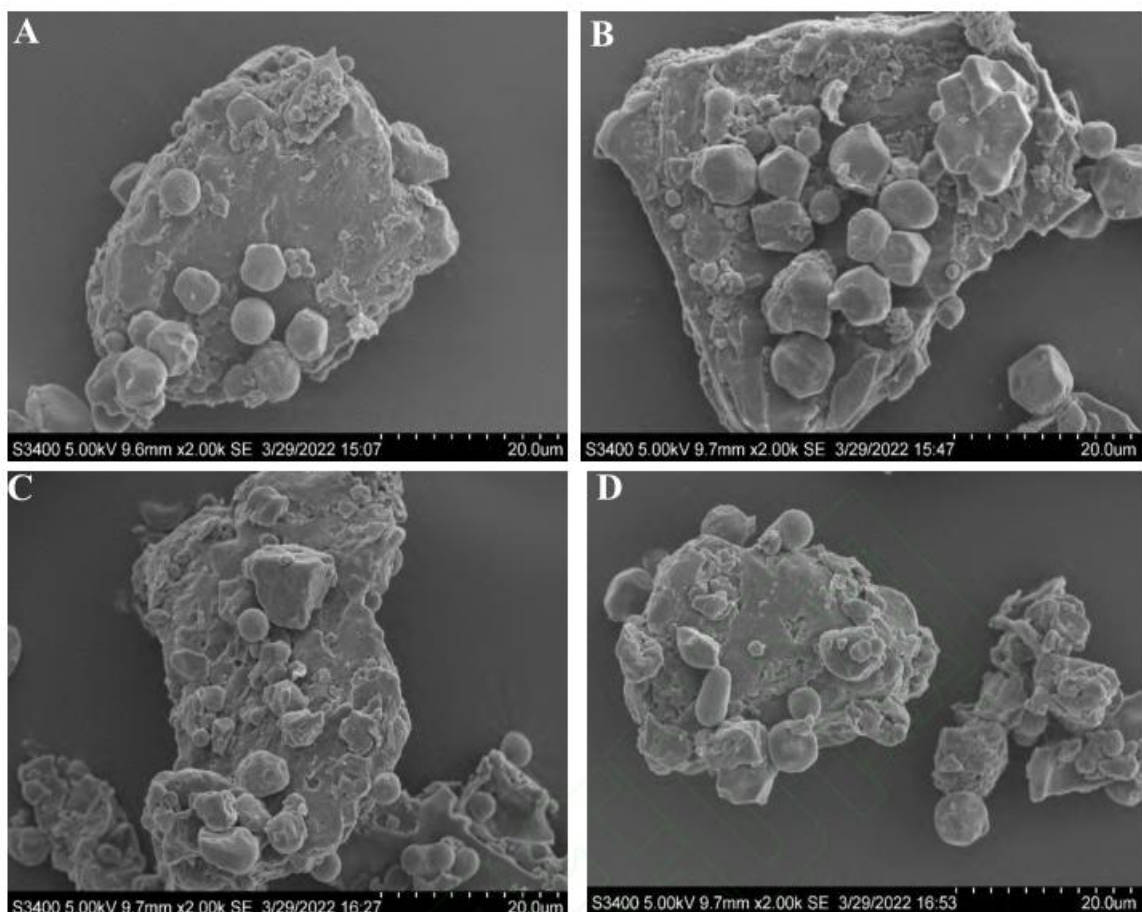


图 2 直链淀粉、蛋白质含量对糜子全粉颗粒形态的影响

Figure 2 Effects of amylose and protein content on morphology of proso millet whole powder

注：A 东乡朵麻糜；B 黑糜子；C 蚂蚱眼；D 小红黍。

Note: A Dong xiang duo ma mei; B Hei mei zi; C Ma zhayan; D Xiao hong shu

2.3 直链淀粉、蛋白质含量对糜子全粉粒度分布的影响

由表 3 知，直链淀粉含量高的与直链淀粉含量低的糜子全粉粒径没有显著的差异；蛋白质含量高的糜子品种，全粉颗粒尺寸显著大于蛋白质含量低的糜子品种。蛋白质含量高，蛋白质在淀粉中填充的更加致密，导致籽粒硬度较大，影响其吸水。图 3 为糜子全粉颗粒体积分布图，糜子全粉颗粒均主要呈现单峰分布，峰值对应的粒度值较大。

表 3 直链淀粉、蛋白质含量对糜子粒度分布的影响

Table3 Effects of amylose and protein contenton granule size distribution of proso millet

品种	D[4,3]	D[3,2]	d(0.1)	d(0.5)	d(0.9)
东乡朵麻糜	82.54±0.19c	19.47±0.12a	11.94±0.08b	72.88±0.53b	163.85±0.36c
黑糜子	78.37±0.40d	18.64±0.09b	10.98±0.14c	69.28,±0.68c	155.11±0.17d
蚂蚱眼	91.37±0.49a	19.11±0.41ab	12.61±0.15a	77.65±0.34a	192.06±0.61a
小红黍	85.45±0.33b	14.27±0.40c	7.54±0.25d	61.90±0.69d	189.21±0.40b

注：D[4,3]表示体积平均粒径；D[3,2]表示表面积平均粒径；d(0.1)、d(0.5)、d(0.9)分别表示从最小粒径开始累加起，直至累加到样品总体的 10%、50%和 90%时的临界粒径值。

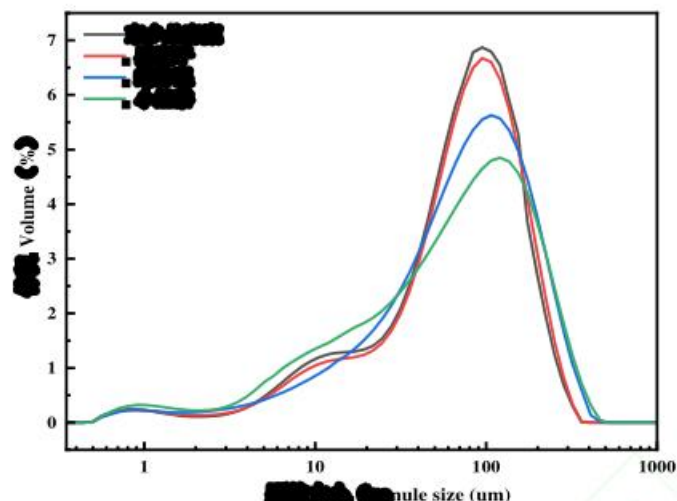


图 3 直链淀粉、蛋白质含量对糜子全粉颗粒体积分布的影响

Fig.3 Effects of amylose and protein content on volume distribution of proso millet whole flour

2.4 糜子直链淀粉、蛋白质含量对全粉吸水率、吸油率的影响

蒸煮前糜子吸水率对食味品质鉴定有重要意义，吸水不充足，淀粉就得不到充分糊化和膨胀，最终导致糜子饭偏硬。吸油性可以改善口感和风味，在食品加工及食品品质方面有着至关重要的作用^[16]。

由图 4 知，直链淀粉含量高的糜子品种，全粉吸水率、吸油率均显著低于低直链淀粉品种；蛋白质含量相对较高的糜子品种较蛋白含量低的品种具有较低的吸水率，较高的吸油率。这可能是因为直链淀粉为紧密封闭的螺旋线形结构，这种结构有利于形成较强的分子内氢键，不利于水分子接近，从而降低了吸水率^[17]。蛋白质二硫键的交联作用使蛋白质在淀粉周围形成网状结构，使米粒结构更加紧密^[18]，阻止水分子进入能力强，吸水量减少^[19]。同时，蛋白质分子结构疏松，疏水基团暴露，导致结合更多数量的油，促使持油力增强^[20]。

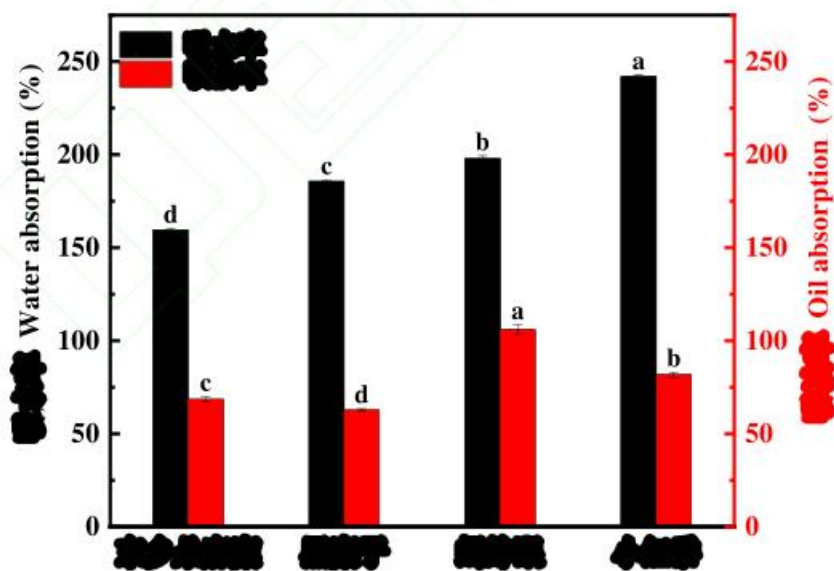


图 4 直链淀粉、蛋白质含量对糜子全粉吸水率和吸油率的影响

Figure 4 Effects of amylose and protein on water absorption and oil absorption of proso millet powder

注：图中不同字母表示达到显著性差异 ($p < 0.05$)，下同。

2.5 糜子直链淀粉、蛋白质含量对糊化特性的影响

2.5.1 糜子直链淀粉含量对粉糊化特性的影响

由表 4 知，直链淀粉含量高的糜子品种全粉谷值黏度、终值黏度、回生值、糊化时间、糊化温度均显著高于直链淀粉含量低的糜子品种。表明直链淀粉含量越高，糜子全粉越难糊化，糊化需要更高

温度。研究表明，直链淀粉分子间结合力比支链淀粉分子间结合力强^[21]，因此随着直链淀粉含量的提高，淀粉变得越难糊化，糊化温度也相应升高。

2.5.2 糜子蛋白质含量对糊化特性的影响

由表 4 知，蛋白质含量高的糜子品种全粉峰值黏度、谷值粘度、破损值、终值黏度、回生值均显著低于蛋白质含量低的糜子品种，而糊化时间、糊化温度显著高于蛋白质含量低的品种。这些结果在一定程度上与前人研究发现，蛋白质含量与峰值黏度、终值黏度、谷值黏度、破损值、回生值呈显著或者极显著负相关一致^[22-23]。蛋白质含量越高，其在淀粉中填充越多且越紧密，改变了淀粉吸水性，且蛋白质与淀粉竞争吸水，最终使得淀粉不能充分膨胀，糊化程度降低^[24]。Fitzgerald^[25]研究表明，在糊状形成过程中蛋白质形成的“变性蛋白凝胶基质”为淀粉颗粒提供机械支持，抑制其最大膨胀，加强其完整性，限制其滤出和破裂，降低糊化程度。

表 4 直链淀粉、蛋白质含量对糜子全粉糊化特性的影响

Table 4 Effects of amylose and protein on the gelatinization characteristics of proso millet powder

品种	峰值黏度/(cP)	谷值黏度/(cP)	破损值/(cP)	终值黏度/(cP)	回生值/(cP)	糊化时间/(min)	糊化温度/(℃)
东乡朵麻糜	759±3.67c	560±2.08b	199±1.44d	1599±4.61b	1039±0.87b	5.57±0.02a	91.30±0.09a
黑糜子	1208±3.00a	804±2.55a	404±0.85b	1853±5.21a	1049±3.00a	5.27±0.00b	81.13±0.17b
蚂蚱眼	750±2.57c	397±0.811d	353±1.86c	521.53±2.73d	124±1.35d	4.07±0.00c	78.75±0.18c
小红黍	917±7.97b	450±0.87c	467±2.76a	594.87±3.11c	144±0.87c	3.90±0.02d	77.12±0.11d

2.6 糜子直链淀粉、蛋白质含量对全粉胶稠度的影响

胶稠度是淀粉胶体的流体特性，显示淀粉米胶冷却后的延展性，即柔软性。由图 5 知，直链淀粉含量低的糜子品种稠度显著大于直链淀粉含量高的品种。胶稠度是直链淀粉和支链淀粉两类分子综合作用的结果。一般低直链淀粉的品种胶稠度较长，冷却后淀粉的流动性好，即胶稠度值大。蛋白质含量低的糜子品种胶稠度显著大于蛋白质含量高的品种。蛋白质含量较高的糜子品种，蛋白质与淀粉紧密结合，影响淀粉的吸水膨胀，从而导致胶稠度变短。

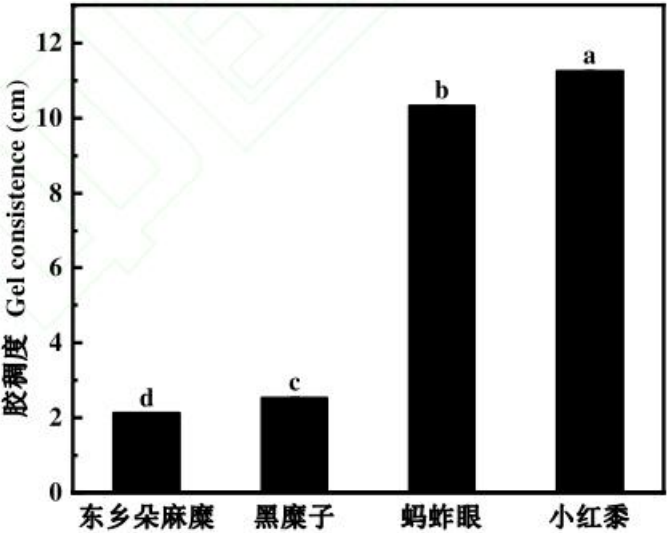


图 5 直链淀粉、蛋白质含量对糜子全粉胶稠度的影响

Figure 5 Effects of amylose and protein on the gel consistence of proso millet powder

2.7 直链淀粉、蛋白质含量对糜子全粉热特性的影响

2.7.1 直链淀粉含量对糜子全粉热特性的影响

由表 5 知，直链淀粉含量高的糜子品种起始温度、峰值温度、终点温度和热焓值均高于直链淀粉含量低的糜子品种。可能是：支链淀粉具有较高的持水能力，使得体系内自由水含量减少，影响淀粉

的膨胀，抑制了淀粉的糊化，因此支链淀粉含量高的糜子品种会呈现更高的温度范围，且相邻支链淀粉双螺旋链具有较强的相互作用力^[26]。因此，与直链淀粉含量高的糜子品种相比直链淀粉含量低的糜子品种具有更高的糊化温度和更高的热焓值。

2.7.2 蛋白质含量对糜子全粉热特性的影响

由表 5 知，与蛋白含量低的糜子品种相比，蛋白质含量高的品种具有更高的起始温度、峰值温度、终点温度，较低的糊化焓值。表明，蛋白质含量越高，全粉越难糊化。这可能是由于蛋白质与淀粉形成复合物，阻止水分的进入^[27]，于是需要更多的初始能量来破坏这一结合体，表现为糊化起始温度和峰值温度升高，一旦淀粉-蛋白结合体遭到破坏，淀粉颗粒很容易发生凝胶，直接表现为糊化焓值下降^[19]。

表 5 直链淀粉、蛋白质含量对糜子全粉热力学特性的影响

Table 5 Effects of amylose and protein contents on thermodynamic characteristics of proso millet powder

类型	品种	起始温度/(℃)	峰值温度/(℃)	终点温度/(℃)	热焓值/(J/g)
粳性	东乡朵麻糜	68.48±0.24c	73.84±0.54c	83.53±0.25c	6.05±0.05d
	黑糜子	66.78±0.60d	71.67±0.40d	80.40±0.20d	7.69±0.10c
糯性	蚂蚱眼	73.41±0.12a	78.48±0.17a	92.86±0.31a	9.65±0.21b
	小红黍	71.58±0.41b	75.19±0.17b	91.16±0.10b	11.10±0.64a

2.8 直链淀粉、蛋白质含量对糜子全粉流变学特性的影响

2.8.1 直链淀粉、蛋白质含量对糜子全粉静态流变学特性的影响

各糜子品种剪切黏度随剪切速率变化关系如图 6。直链淀粉含量较高的糜子品种剪切黏度在剪切速率 0-90 (1/s) 快速下降，直链淀粉含量较低的糜子品种剪切黏度在剪切速率 0-50 (1/s) 快速下降，且最后都趋于稳定，表明糜子粉是剪切变稀体系。糜子粉在剪切力作用下，破坏了淀粉和淀粉，淀粉和蛋白之间互相连接形成的网状结构，使淀粉和蛋白被水分子包围，水的黏度低，故糜子粉黏度快速下降^[28]。当剪切速率达到某一数值时，分子的定向排列基本完成，黏度就会趋于稳定^[29]。相同剪切速率，直链淀粉含量高的糜子品种具有更高的剪切黏度。这可能是，糜子粉糊化中，直链淀粉形成的凝胶网状结构使样品具有弹性，支链淀粉不能形成凝胶使样品保持一定的流动性^[30]。在直链淀粉含量较高的粳性糜子品种中，蛋白质含量高的品种，剪切粘度小，蛋白质含量对直链淀粉含量低的糯性糜子品种剪切黏度影响不大。这可能与蛋白质与直链淀粉和支链淀粉相互作用不同有关。

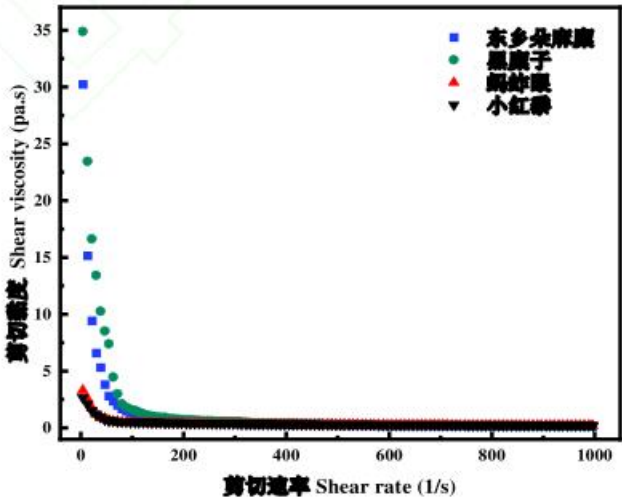


图 6 直链淀粉、蛋白质含量对糜子全粉静态流变的影响

Figure 6 Effects of amylose and protein contents on static rheological properties of proso millet powder

2.8.2 直链淀粉、蛋白质含量对糜子粉动态流变学特性的影响

储能模量 G' 代表样品的刚度和弹性, G' 值越大表明弹性越大^[31]。损耗模量 G'' 代表样品黏度和流动, G'' 值越大表明黏性越大^[32]。

糜子粉储能模量 (G') 随着角频率的变化如图 7(a) 所示, 糜子粉 G' 在角频率 0-200 rad/s 缓慢增加; 随后随着角频率的增加, 快速增加。直链淀粉含量高的糜子品种储能模量明显大于直链淀粉含量低的糜子。可能是由于直链淀粉含量越高, 氢键含量越多, 氢键的增多促使全粉弹性增大^[33]。较蛋白含量高的糜子品种, 蛋白含量低的品种具有较高的储能模量。

糜子粉损耗模量 (G'') 随着角频率的变化如图 7(b) 所示, 糜子粉损耗模量值在低角频率 0-300rad/s 缓慢增加, 300-450rad/s 快速增加, 高角频率 450-700rad/s 快速下降。低直链淀粉糜子品种损耗模量值显著高于高直链淀粉糜子品种。这可能是脂肪颗粒可以和螺旋状直链淀粉分子结合生成复合物, 抑制淀粉颗粒的膨胀和溶解, 导致直链淀粉含量高的糜子品种黏度下降。较两个蛋白含量低的糜子品种而言, 蛋白含量高的品种在角频率 400rad/s 损耗模量出现了明显下降。蛋白质含量高的糯性糜子损耗模量值高于蛋白质含量低的糯性糜子, 而蛋白含量高的粳性糜子损耗模量值低于蛋白含量低的粳性糜子。

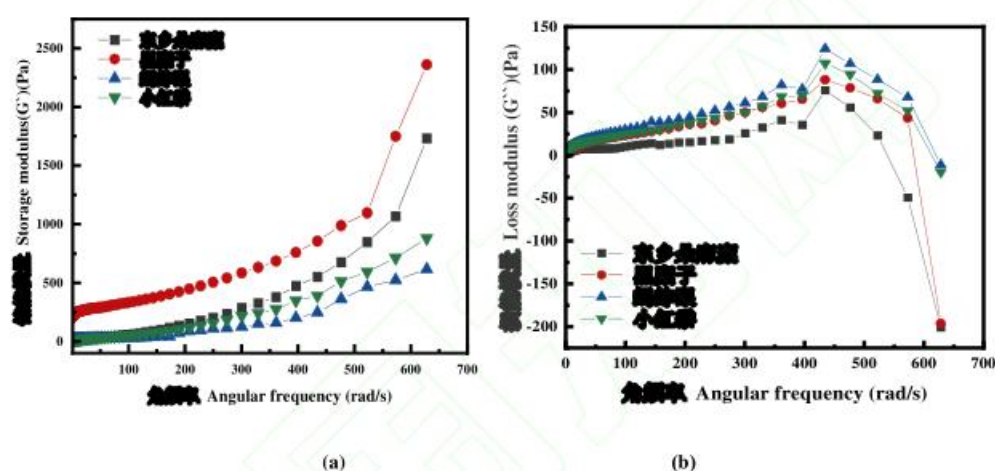


图 7 直链淀粉、蛋白质含量对糜子全粉储能模量和损耗模量的影响

Figure 7 Effects of amylose and protein content on storage modulus and loss modulus of proso millet powder

2.9 直链淀粉、蛋白质含量对糜子蒸煮特性的影响

2.9.1 直链淀粉含量对糜子蒸煮特性的影响

由表 6 知, 粳性糜子饭吸水率, 体积膨胀率, 米汤固形物含量, 碘蓝值均显著高于糯性糜子, 而米汤透光率显著低于糯性糜子。这可能是: 粳性糜子直链淀粉含量高, 在蒸煮过程中, 比糯性糜子有更多的直链淀粉溶入米汤中, 因此粳性糜子米汤碘蓝值显著高于糯性糜子。直链淀粉导致籽粒内部结构紧密均一, 内部大分子物质及进入内部的水分被牢牢地锁住^[34], 从而导致粳性糜子饭吸水率和体积膨胀率增大。与糯性糜子品种相比, 粳性糜子品种米粒更容易破裂, 可溶性固形物易进入外部环境, 导致溶入米汤中的固形物增多, 所以粳性糜子米汤干物质重显著高于糯性糜子。

2.9.2 蛋白质含量对糜子蒸煮特性的影响

由表 6 知, 蛋白含量高的品种糜子饭吸水率、体积膨胀率, 米汤 pH 值显著低于蛋白质含量低的品种。在米饭蒸煮过程中, 糜子蛋白质基质形成网状结构加固已膨胀的淀粉, 限制其膨胀、破裂, 阻止直链淀粉和固体内容物外渗^[22]。因此, 蛋白质含量高的品种, 糜子饭体积膨胀率、米汤干物质质量、碘蓝值低于蛋白含量低的品种。

表 6 直链淀粉、蛋白质含量对糜子蒸煮特性的影响

Table 6 Effects of amylose and protein content on cooking characteristics of proso millet

类型	品种	PH 值	碘蓝值	透光率/(%)	米汤干物质/(mg/g)	吸水率/(%)	体积膨胀率/(%)
粳性	东乡朵麻糜	6.41±0.03b	0.135±0.02a	84.07±0.60b	9.52±0.66a	247.59±20.45b	111.36±2.92b
	黑糜子	6.52±0.02a	0.147±0.02a	79.33±1.69c	10.42±0.88a	316.19±26.95a	151.34±3.08a
糯性	蚂蚱眼	6.27±0.01d	0.001±0.00b	94.00±0.10a	3.63±0.38b	102.07±13.43d	64.78±9.89d
	小红黍	6.46±0.02c	0.003±0.00b	92.53±0.35a	6.67±3.50b	145.82±20.97c	91.32±5.81c

2.10 直链淀粉、蛋白质含量对糜子饭质构特性的影响

2.10.1 直链淀粉含量对糜子饭质构特性的影响

由表 7 知, 粳性品种糜子饭硬度更大, 更耐咀嚼, 而蒸煮后的糯性品种糜子饭黏附性和内聚力更大。即直链淀粉含量越高, 糜子饭硬度越大、黏附性越小, 这与王晓琳研究一致^[35]。在蒸煮过程中, 直链淀粉含量高的品种会游离出更多的淀粉并附着在米饭表面形成一层薄膜导致硬度增加^[36]。

2.10.2 蛋白质含量对糜子饭质构特性的影响

由表 7 知, 蛋白质含量高的品种, 糜子饭硬度大, 粘着性小, 耐咀嚼。蛋白质含量高的品种, 含二硫键越多, 加热时越容易形成蛋白质高聚体以及与淀粉形成的网络结构, 降低了淀粉的水和效果, 进而使吸水量减少, 溶解度降低, 最终导致米饭较硬口感较差^[37]。

表 7 直链淀粉、蛋白质含量对糜子质构特性的影响

Table 7 Effects of amylose and protein content on texture characteristics of proso millet

类型	品种	硬度/(g)	黏附性/(g/m)	内聚力	咀嚼性
粳性	东乡朵麻糜	789.16±28.33a	-4.24±0.35a	0.16±0.01c	141.59±4.05a
	黑糜子	661.40±22.71b	-2.86±0.57b	0.19±0.02b	125.50±1.15b
糯性	蚂蚱眼	557.14±35.44d	-1.45±0.13c	0.30±0.01a	87.3.58±1.79c
	小红黍	455.14±28.00c	-2.09±0.19c	0.29±0.02a	79.71±1.40d

3. 结论

直链淀粉含量显著影响糜子籽粒亮度值、色差, 蛋白质含量对糜子外观品质影响不大。直链淀粉含量高的糜子品种, 全粉呈现低吸水率、吸油率, 胶稠度, 高糊化黏度、糊化温度, 糊化时间, 糜子饭呈现高吸水率、体积膨胀率、硬度; 蛋白质含量高的糜子品种, 全粉呈现低吸水率、糊化黏度、糊化焓值, 高吸油率, 起始温度、峰值温度; 糜子饭呈现低吸水率、体积膨胀率, 高硬度。

综上所述高直链淀粉、蛋白质含量显著影响糜子的食味品质, 直链淀粉、蛋白质含量高的糜子品种蒸煮性差、能耗高、蒸煮时间长, 所以在糜子品质育种工作中, 一定范围内降低直链淀粉与蛋白质含量, 是提高糜子食味品质的关键。

参考文献

- [1] ZHANG Yuyu, GAO Xiaoli, Li Ji, et al. Comparative analysis of proso millet (*Panicum miliaceum* L.) leaf transcriptomes for insight into drought tolerance mechanisms[J]. BMC Plant Biology, 2019, 19(1):1-4. DOI:10.1186/s12870-019-2001-x.
- [2] Piat B, Ogrodowska D, Zadernowski R, Nutrient Content of Puffed Proso Millet (*Panicum miliaceum* L.) and Amaranth (*Amaranthus cruentus* L.) Grains[J]. Czech Journal of Food Sciences, 2016, 34(4): 362-369. DOI:10.17221/405/2015-CJFS.
- [3] 杨清华. 粳糯糜子品种品质评价与蒸煮食味品质特性研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2020: 4-11
- [4] Spb A, Aoa B, Sbd C, et al. Proso-millet starch: Properties, functionality, and applications[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2021, 190(1): 960-968.DOI:10.1016/j.ijbiomac.2021.09.064.
- [5] 罗志祥, 苏泽胜, 施伏芝, 等. 米饭质地与直链淀粉含量及食味品质的关系[J]. 中国农学通报, 2002, 18(6): 4-6. DOI 10.3969/j.issn.1000-6850.2002.06.007

- [6] 杨清华, 高小丽, 王鹏科, 等. 粳糯糜子籽粒外观及蒸煮食用品质的差异分析[C]//中国作物学会, 江苏 中国 2018 中国作物学会学术年会论文摘要集. 2018: 5-6.
- [7] 柴岩. 糜子(黄米)的营养和生产概况[J]. 粮食加工, 2009, 34(4): 2-4. DOI:10.3969/j.issn.1007-6395.2009.04.028 1.
- [8] 石吕, 张新月, 孙惠艳, 等. 不同类型水稻品种稻米蛋白质含量与蒸煮食味品质的关系及后期氮肥的效应[J]. 中国水稻科学, 2019, 33(6): 541-552. DOI:10.16819/j.1001-7216.2019.9022.
- [9] ZHU Lijia, LIU Qiaoquan, SANG Yijun, et al. Underlying reasons for waxy rice flours having different pasting properties [J]. Food Chemistry, 2010, 120(1): 94-100. DOI:10.1016/j.foodchem.2009.09.076.
- [10] ZHOU Zhongkai, ROBARDS K, HELLIWELL S, et al. Effect of rice storage on pasting properties of rice flour[J]. Food Research International, 2003, 36(6):625-634. DOI:10.1016/S0963-9969(03)00013-9.
- [11] QU Yang, GAO XiaoLi, FENG Baili et al. Industrial Situation and Development Strategies of Proso Millet in China[C]// International symposium on broomcorn millet. Yangling China. 2012.0.
- [12] 史玮, 孙莹, 徐振斌. 凯氏定氮法测定粮食蛋白质含量方法研究[J]. 粮食科技与经济, 2013, 38(5): 31-32. DOI: 10.3969/j.issn.1007-1458.2013.05.010
- [13] 魏红, 钟红舰, 汪红. 索氏抽提法测定粗脂肪含量的改进 [J]. 中国油脂, 2004, 29(6):3-5. DOI:10.3321/j.issn:1003-7969.2004.06.016
- [14] ZHANG Changquan, Chen Shengjie, Ren Xinyu, et al. Molecular Structure and Physicochemical Properties of Starches from Rice with Different Amylose Contents Resulting from Modification of OsGBSSI Activity[J]. Journal of Agricultural & Food Chemistry, 2017, 65(10): 2222-2232. DOI:10.1021/acs.jafc.6b05448.
- [15] 李忍, 姜鹏, 戴凌燕, 等. 微波处理对高粱理化性质及蛋白质结构特性的影响研究[J]. 食品工业科技, 2021, 42(23): 27-33. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2021010203.
- [16] MANINDER K, KAWALJITS S, NARPINDER S. Comparative study of the functional, thermal and passing properties of flours from different field pea (*pisum sativum* L) and pigeon pea (*Cajanus cajan* L) cultivars[J]. Food Chemistry, 2007, 104(1): 259-267. DOI:10.1016/j.foodchem.2006.11.037.
- [17] 余瑞鑫. 水分迁移变化对米质食品品质的影响[D]. 浙江: 浙江工商大学, 2010: 19-21.
- [18] 谢黎虹, 陈能, 段彬伍. 稻米中蛋白质对淀粉 RVA 特征谱的影响 [J]. 中国水稻科学, 2006, 20(5): 524-528. DOI:10.3321/j.issn:1001-7216.2006.05.012.
- [19] 余世锋, 杨秀春, Menager Lucile, 等. 直链淀粉、蛋白质及脂类对大米粉热特性的影响[J]. 食品与发酵工业, 2009, 35(4): 38-42. DOI: CNKI:SUN:SPFX.0.2009-04-013
- [20] Iawa B, Dss A, Aaw C, et al. Physico-chemical and functional properties of flours from Indian kidney bean (*Phaseolus vulgaris* L.) cultivars[J]. LWT - Food Science and Technology, 2013, 53(1): 278-284. DOI:10.1016/j.lwt.2013.02.006
- [21] 陈旭. 高直链玉米淀粉的形态和糊化行为研究[D]. 安徽农业大学, 2018:5-15
- [22] 钱春荣, 冯延江, 杨静, 等. 水稻籽粒蛋白质含量选择对杂种早代蒸煮食味品质的影响[J]. 中国水稻科学, 2007, 21(3): 323-326. DOI:10.3321/j.issn:1001-7216.2007.03.019
- [23] 吴长明, 孙传清, 付秀林, 等. 稻米品质性状与产量性状及籼粳分化度的相互关系研究[J]. 作物学报, 2003, 29(6): 822-828. DOI:10.3321/j.issn:0496-3490.2003.06.005.
- [24] 丁毅, 华泽田, 王芳, 等. 粳稻蛋白质与蒸煮食味品质的关系 [J]. 食品科学, 2012, 33(23): 42-46. DOI:CNKI:SUN:SPKX.0.2012-23-012.
- [25] Fitzgerald M A, Martin M, Ward R M et al. Viscosity of rice flour: archeological and biological study [J]. Journal of agricultural and food chemistry, 2003, 51(8): 2295-2299. DOI:10.1021/jf020574i.
- [26] 韦冷云. 菊糖对小麦淀粉理化性质及体外消化的影响[D]. 合肥市: 安徽农业大学, 2015: 17-22.
- [27] 王鹏跃. 稻米蛋白质及组成对其蒸煮食味品质影响的研究[D]. 浙江: 浙江工商大学, 2016:48-51.
- [28] 程东, 洪雁, 庞艳生, 等. 交联和羟丙基改性对蜡质玉米淀粉糊化和流变性质的影响[J]. 食品与发酵工业, 2016, 42(3):6-9. DOI: 10.13995/j.cnki.11-1802/ts.201603004.
- [29] 柴春祥, Sundaram Gunasekaran. 黄原胶对马铃薯淀粉糊流变特性的影响 [J]. 食品工业科技, 2007,

28(8):4-9DOI:10.3969/j.issn.1002-0306.2007.08.032

- [30] Eliasson A. C, Finstad H, Ljunger G. A Study of Starch - Lipid Interactions for Some Native and Modified Maize Starches[J]. *Starch - Stärke*, 1988, 40(3):95-100. DOI:10.1002/star.19880400304.
- [31] SUN Jingxin, WU Zhen, XU Xinglian, et al. Effect of peanut protein isolate on functional properties of chicken salt-soluble proteins from breast and thigh muscles during heat-induced gelation[J]. *Meat Science*, 2012, 91(1):88-92. DOI:10.1016/j.meatsci.2011.12.010
- [32] 刘敏, 赵欣, 阚建全, 等. 黄原胶对莲藕淀粉糊化性质及流变与质构特性的影响[J]. *食品科学*, 2018, 39(6): 6-10. DOI: 10.7506/spkx1002-6630-201806008
- [33] 叶晓汀. 淀粉颗粒结合蛋白对大米淀粉理化性质的影响[D]. 上海: 上海交通大学, 2018:42-46
- [34] Min Jekang, In Y B, Hyeon G L. Rice noodle enriched with okara: Cooking property, texture, and in vitro starch digestibility[J]. *Food Bioscience*, 2018, 22: 178-183. DOI:10.1016/j.fbio.2018.02.008.
- [35] 王晓琳. 黄米品质特性及稠酒酿造研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2014:19—20.
- [36] LI Hongyan, Wen Yangyang, Wang Jing, et al. The molecular structures of leached starch during rice cooking are controlled by thermodynamic effects, rather than kinetic effects[J]. *Food Hydrocolloids*, 2017, 73(10): 295-299. DOI:10.1016/j.foodhyd.2017.07.015.
- [37] 陈能, 谢黎虹, 段彬伍. 稻米中含二硫键蛋白对其米饭质地的影响[J]. *作物学报*, 2007, 33(1):167-170. DOI:10.3321/j.issn:0496-3490.2007.01.029.