

DOI: 10.13652/j.spjx.1003.5788.2022.90180

基于主成分分析的 21 种粳性黄米品质评价

Quality evaluation of 21 kinds of non-waxy proso millet based on principal component analysis

赵 宁^{1,2} 解 菲^{1,2} 梁鸡保³ 冯佰利⁴ 杜双奎^{1,2}ZHAO Ning^{1,2} XIE Fei^{1,2} LIANG Ji-bao³ FENG Bai-li⁴ DU Shuang-kui^{1,2}

(1. 西北农林科技大学食品科学与工程学院, 陕西 咸阳 712100; 2. 粮油功能化加工陕西省

高校工程研究中心, 陕西 咸阳 712100; 3. 神木市农业技术推广中心, 陕西 榆林 719000;

4. 西北农林科技大学农学院, 陕西 咸阳 712100)

(1. College of Food Science and Engineering, Northwest A & F University, Xianyang, Shaanxi 712100, China;

2. Engineering Research Center of Grain and Oil Functionalized Processing in Universities of Shaanxi Province,

Xianyang, Shaanxi 712100, China; 3. Agro-Technical Promotion Center, Yulin, Shaanxi 719000, China;

4. College of Agronomy, Northwest A & F University, Xianyang, Shaanxi 712100, China)

摘要:目的: 对不同粳性黄米品种的品质进行评价。方法: 以 21 个粳性黄米品种为试验材料, 测定其营养成分、糊化特性、蒸煮特性及质构特性, 分析品质差异及指标相关性, 运用主成分分析进行综合评价。结果: 质构特性、粗脂肪含量、回生值、破损值、最终黏度在品种间差异较大, 起糊温度和淀粉含量的变异系数较小, 是较为稳定的指标。主成分分析结果显示前 3 个主成分反映了原变量 72.04% 的信息, 筛选出最终黏度、回生值、硬度和黏附性为关键指标, 根据综合得分评价出粳性黄米品种的综合品质优劣。结论: 陇糜 10 号、内糜 9 号、陇糜 8 号、榆糜 3 号、宁糜 13 号的综合品质最优, 最终黏度、回生值、硬度和黏附性可作为粳性黄米品质的代表性指标, 用于指导黄米品种筛选。

关键词: 粳性黄米; 品质特性; 主成分分析

Abstract: **Objective:** This study aimed to evaluate the quality of different non-waxy proso millet varieties. **Methods:** 21 non-waxy proso millet varieties were selected as experimental materials, and their nutritional composition, pasting characteristics, cooking characteristics and texture characteristics were measured. The quality difference and index correlations between different non-waxy proso millet varieties were analyzed and compared. Principal component analysis was used to evaluate their quality.

基金项目: 陕西省重点研发计划项目 (编号: 2021NY-155); 榆林市科技计划项目 (编号: 2018-20)

作者简介: 赵宁, 女, 西北农林科技大学在读硕士研究生。

通信作者: 杜双奎 (1972—), 男, 西北农林科技大学教授, 博士。

E-mail: dushuangkui@nwfau.edu.cn

收稿日期: 2021-12-26 **改回日期:** 2022-03-27

Results: The texture characteristics, crude fat content, setback, breakdown and final viscosity had great differences among the tested varieties, and the variation coefficient of pasting temperature and starch content was small, which were relatively stable indexes. The results of principal component analysis showed that the first three principal components reflected 72.04% of the information of the original variable. The final viscosity, setback, hardness and gumminess were selected as the key indexes. The comprehensive quality of non-waxy proso millet varieties was evaluated according to the comprehensive score. **Conclusion:** Longmi 10, Neimi 9, Longmi 8, Yumi 3 and Ningmi 13 had the best comprehensive quality. The final viscosity, setback, hardness and gumminess could be used as representative indexes of quality of non-waxy proso millet to guide the selection of proso millet varieties.

Keywords: non-waxy proso millet; quality characteristics; principal component analysis

糜子 (*Panicum miliaceum* L.), 禾本科黍属, 是起源于中国的古老农作物, 耐旱、耐贫瘠、生育期短, 过去常被用于救灾备荒、复种增收及调节农业种植结构^[1]。在中国, 糜子作为一种特色的经济粮食作物, 广泛种植于山西、陕西、河北等地, 品种繁多, 但目前许多糜子产区种植规模以小农户为主, 经济较为落后, 对糜子市场空间和经济效益的关注有限^[2]。此外, 糜子不含面筋蛋白, 在产品加工中不易成型, 因此在面食食品加工中应用不广泛^[3]。

糜子脱壳、碾米得到产品为黄米, 其蛋白含量达 12.2%, 含有 18 种氨基酸, 其中人体 8 种必需氨基酸的含量均高于小麦、大米和玉米, 且构成比例较为均衡, 易被

人体吸收和利用^[4]。黄米中含有丰富的矿质元素,含量高于大米、小麦和玉米^[5]。淀粉所占比例最多,约为 70%^[6],与小麦、大米接近。依据直链淀粉含量高低,黄米可分为粳性黄米和糯性黄米两种,粳性黄米直链淀粉含量在 21.87%~23.58%,糯性黄米直链淀粉含量在 3.7% 以下^[7]。粳性黄米直链淀粉含量与小米接近,但口感差异较大^[8]。国内外关于粳性黄米的研究主要集中在抗逆品种栽培^[9]、粳糯黄米品质比较^[7]、蛋白质^[10]、淀粉^[11]等方面,对粳性黄米品质差异的研究较少,且仅限于少量的种植资源。在中国,粳性黄米多年来一直以黄米饭、黄米馒头、煎饼等传统家庭加工产品形式呈现,缺乏工业化主打产品^[12],这与其品质评价及研究不系统有关。

目前,黄米品质评价指标较多,但所选品种较少,不具有代表性,且粳性黄米品质的多指标综合评价尚未涉及,缺乏实践指导意义,影响了优质粳性黄米品种的筛选及加工。主成分分析法(principal component analysis, PCA)是将多个变量经线性变换为少数几个有代表性的变量,来反映不同物质之间差异的一种多元统计分析方法^[13]。利用 PCA 可减少指标,简化评价过程,适用于多指标的综合评价,近年来已被广泛用于农产品品质差异的研究。周显青等^[14]对 59 个籼稻品种的基本理化指标及加工成米饭后的感官指标进行测定,利用 PCA 建立了籼米的食味品质评价模型,并用感官评价法验证了其适用性。韦露露等^[15]测定了 15 种小米的主要营养、功能成分及理化特性,利用 PCA 对其品质进行了评价,经评价模型得到了综合品质较优的小米品种。研究拟对 21 个粳性黄米品种的营养成分、糊化特性、蒸煮特性及质构特性 15 个品质指标进行测定,采用 PCA 对其进行品质评价并筛选,确定出影响粳性黄米品质的关键指标,为粳性黄米品种的筛选及黄米产品的加工提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

粳性黄米:陇糜 5 号、陇糜 7 号、陇糜 8 号、陇糜 9 号、陇糜 10 号、陇糜 11 号、宁糜 9 号、宁糜 10 号、宁糜 13 号、宁糜 14 号、宁糜 16 号、宁糜 17 号、固糜 21 号、伊糜 5 号、内糜 3 号、内糜 5 号、内糜 6 号、内糜 9 号、赤糜 2 号、榆糜 2 号、榆糜 3 号,陕西神木县农技推广中心。用高速粉碎机粉碎 30 s,全部过 60 目筛,备用。

1.2 主要仪器设备

高速万能粉碎机:FW-100 型,天津泰斯特仪器有限公司;

电热恒温鼓风干燥箱:DHG-9146A 型,上海精宏实验设备有限公司;

低速离心机:KDC-40 型,科大创新股份有限公司中佳分公司;

全自动凯氏定氮仪:KJELTEC 2300 型,瑞典 FOSS

公司;

快速黏度分析仪:RVA-Tec Master 型,瑞典 Perten 公司;

物性测定仪:TA.XT PLUS/50 型,英国 STA-BLEMICVO 公司。

1.3 试验方法

1.3.1 营养成分测定

(1) 粗蛋白含量:按 GB 5009.5—2016 执行。

(2) 淀粉含量:按 GB/T 5009.9—2016 执行。

(3) 粗脂肪含量:按 GB 5009.6—2016 执行。

(4) 直链淀粉含量:参照 Yang 等^[6]的方法。

1.3.2 糊化特性测定 称取 3 g 样品与 25 mL 蒸馏水在铝罐中混合均匀,将样品以 12 °C/min 的速度从 50 °C 升高到 95 °C,保持 2.5 min,再以 12 °C/min 的速度冷却到 50 °C,保持 2 min。起始 10 s 转速设定为 960 r/min,之后匀速 160 r/min。

1.3.3 蒸煮特性测定 参照 Yang 等^[6]的方法略有改动。称取 2.0 g 黄米,测得其初始体积后,加 30 mL 蒸馏水在 100 °C 蒸煮 30 min,冷却至室温。将米汤转移至离心管中,定容至 40 mL,3 800 r/min 离心 5 min,取 10 mL 上清于烘干的铝盒中,105 °C 干燥至恒重,测得米汤干物质重量。将蒸煮后的黄米沥干水分,测其重量,利用排水法测得黄米蒸煮后的体积,计算黄米的加热吸水率、体积膨胀率和溶出率。

$$a = \frac{m_3 - m_1}{m_1} \times 100\%, \quad (1)$$

$$v = \frac{V_2 - V_1}{V_1} \times 100\%, \quad (2)$$

$$d = \frac{m_2}{m_1} \times 100\%, \quad (3)$$

式中:

a ——加热吸水率, %;

v ——体积膨胀率, %;

d ——溶出率, %;

m_1 ——黄米初始质量, g;

m_2 ——米汤固形物质量, g;

m_3 ——蒸煮后黄米质量, g;

V_1 ——黄米初始体积, mL;

V_2 ——蒸煮后黄米体积, mL。

1.3.4 质构特性的测定 根据 T/YCXH 1—2016《黄米蒸煮食用品质感官评价方法》制备黄米饭。将装有黄米饭的铝盒置于载物台上,测定其 TPA 特性。参数设定为:选用 P36/R 探头,测试前、中、后速度分别为 1, 1, 2 mm/s,压缩距离 5 mm。

1.4 数据分析

所有数据均为 3 次重复试验的平均值,采用 SPSS 18.0 对数据进行统计分析,采用 Origin 2021 软件进行图

形绘制。

2 结果与分析

2.1 品质特性

对 21 个粳性黄米品种的营养成分、糊化特性、蒸煮特性及质构特性进行分析,结果见表 1。从营养成分来看,粳性黄米的粗蛋白、淀粉、粗脂肪、直链淀粉含量分别在 10.67%~13.63%,69.08%~83.57%,2.50%~5.40%,17.48%~21.86%,粗脂肪的变异系数最大。伊糜 5 号粗蛋白和粗脂肪含量较高,内糜 9 号淀粉含量较高。由糊化特征值可以看出,粳性黄米的起糊温度、峰值黏度、最终黏度、破损值、回生值分别在 77.40~88.80℃、1.01~1.46 Pa·s、2.19~3.72 Pa·s、0.34~0.65 Pa·s、1.58~2.85 Pa·s,回生值差异最大。内糜 5 号的回生值最低,表明其抗老化程度强,冷糊稳定性较好;赤糜 2 号的峰值黏度和破损值最低,起糊温度最高,表明其不易糊化,热糊稳定性及抗剪切能力较强^[16]。从蒸煮特性分析,粳性黄米的加热吸水率、体积膨胀率、溶出率分别在 527.86%~745.00%,545.00%~745.00%,2.95%~4.05%。吸水率的差异与其含有的亲水物质如淀粉、蛋白质、纤维组成与性质不同有关,也与米粒的结构特性有关^[17]。米饭的 TPA 特性主要受淀粉的溶胀、蛋白质含量及细胞壁抗压强度的影响,可用于反映米饭的食用品质^[18]。黄米米饭的硬度、黏附性、咀嚼性分别在 5.76~13.81 N、286.46~893.52、247.07~777.48。内糜 5 号的硬度、黏附性、咀嚼性高于其他品种,宁糜 16 号的硬度、黏附性最低。刘厚清等^[19]研究发现,在 TPA 指标中,最能

直接反映米饭品质的参数是硬度和黏附性,其中硬度、黏附性适中的大米食用品质更好。

由离散程度可以看出,参试品种的品质指标差异较大。其中质构特性、粗脂肪含量、回生值、破损值、最终黏度的变异系数均大于 10%,品种间差异较大,起糊温度和淀粉含量的变异系数较小,是较为稳定的指标。

2.2 相关性分析

如表 2 所示,蛋白质含量与粗脂肪含量($r=0.535^*$)、起糊温度($r=0.561^{**}$)呈显著或极显著正相关,与峰值黏度($r=-0.488^*$)、破损值($r=-0.596^{**}$)、溶出率($r=-0.552^{**}$)呈显著或极显著负相关。丁毅等^[20]研究表明高蛋白质含量的稻米米粒结构致密,淀粉粒之间空隙小,影响淀粉的吸水和膨胀,导致糊化温度升高,与试验结果一致。Kolawole 等^[21]研究认为糊化行为是淀粉与非淀粉相互作用的结果。淀粉含量与直链淀粉含量、体积膨胀率和溶出率显著正相关。体积膨胀率主要受支链淀粉分子的大小、结构影响^[22]。直链淀粉含量与最终黏度、回生值、溶出率显著正相关,与周小理等^[23]报道的荞麦品种直链淀粉含量与最终黏度、回生值呈正相关一致,这是由于直链淀粉含量高的淀粉糊在冷却过程中直链淀粉间容易发生重排,使凝胶强度变大,最终黏度和回生值随之增大。加热吸水率与体积膨胀率极显著正相关,与杜春微等^[24]的研究结果一致。黄米米饭硬度、黏附性、咀嚼性三者之间存在高度的正相关性。粳性黄米各指标间存在不同程度的相关性,信息出现重叠现象,因此需利用主成分分析将数据降维。

表 1 粳性黄米的品质性状差异

Table 1 Differences in quality traits of non-waxy proso millet

品质特性	指标	单位	最小值	最大值	标准差	变异系数/%
营养成分	粗蛋白	%	10.67	13.63	0.63	5.24
	淀粉	%	69.08	83.57	3.70	4.91
	粗脂肪	%	2.50	5.40	0.70	18.71
	直链淀粉	%	17.48	21.86	1.12	5.66
糊化特性	起糊温度	℃	77.40	88.80	4.04	4.78
	峰值黏度	Pa·s	1.01	1.46	0.11	8.47
	最终黏度	Pa·s	2.19	3.72	0.39	13.05
	破损值	Pa·s	0.34	0.65	0.08	14.49
	回生值	Pa·s	1.58	2.85	0.35	15.71
蒸煮特性	加热吸水率	%	527.86	745.00	36.98	6.14
	体积膨胀率	%	545.00	745.00	59.51	9.19
	溶出率	%	2.95	4.05	0.33	9.52
质构特性	硬度	N	5.76	13.81	2.01	21.83
	黏附性		286.46	893.52	136.63	24.52
	咀嚼性		247.07	777.48	120.31	27.18

表 2 黄米品质指标间的相关性[†]

Table 2 Correlation among quality indexes of non-waxy proso millet

指标	蛋白质	淀粉	粗脂肪	直链淀粉	起糊温度	峰值黏度	最终黏度	破损值
蛋白质	1.000							
淀粉	-0.360	1.000						
粗脂肪	0.535 *	-0.120	1.000					
直链淀粉	-0.313	0.547 *	-0.184	1.000				
起糊温度	0.561 * *	-0.345	0.246	0.401	1.000			
峰值黏度	-0.488 *	0.053	-0.234	0.089	-0.060	1.000		
最终黏度	0.249	-0.339	0.288	0.548 *	0.751 * *	0.304	1.000	
破损值	-0.596 * *	0.234	-0.359	-0.247	-0.354	0.892 * *	-0.097	1.000
回生值	0.297	-0.341	0.313	0.526 *	0.775 * *	0.225	0.995 * *	-0.164
加热吸水率	-0.401	0.416	-0.161	0.221	-0.024	0.502 *	-0.024	0.527 *
体积膨胀率	-0.344	0.526 *	-0.364	0.323	-0.142	0.441 *	-0.255	0.575 * *
溶出率	-0.552 * *	0.455 *	-0.455 *	0.451 *	-0.426	0.141	-0.401	0.260
硬度	-0.034	0.324	-0.042	0.211	-0.116	-0.401	-0.354	-0.296
黏附性	-0.078	0.295	-0.099	0.219	-0.076	-0.386	-0.323	-0.286
咀嚼性	-0.207	0.205	-0.181	0.212	-0.284	-0.395	-0.450 *	-0.230

指标	回生值	加热吸水率	体积膨胀率	溶出率	硬度	黏附性	咀嚼性
蛋白质							
淀粉							
粗脂肪							
直链淀粉							
起糊温度							
峰值黏度							
最终黏度							
破损值							
回生值	1.000						
加热吸水率	-0.066	1.000					
体积膨胀率	-0.294	0.854 * *	1.000				
溶出率	-0.431	0.302	0.318	1.000			
硬度	-0.335	0.000	0.084	0.400	1.000		
黏附性	-0.303	-0.083	0.012	0.410	0.964 * *	1.000	
咀嚼性	-0.429	-0.150	-0.075	0.488 *	0.858 * *	0.910 * *	1.000

[†] * 显著相关($P<0.05$), * * 极显著相关($P<0.01$)。

2.3 主成分分析

对 15 个指标进行主成分分析,结果见表 3。前 3 个主成分累计方差贡献率达到 72.04%,解释了绝大部分原始信息。3 个主成分载荷矩阵见表 4。由表 3、表 4 可知,PC1 (34.95%)主要表征样品的营养成分、峰值黏度、破损值和蒸煮特性;PC2(25.46%)主要表征样品的直链淀粉含量、起糊温度、最终黏度和回生值;PC3(11.63%)主要表征样品的质构特性。粳性黄米各品质指标的共同度在 0.312~0.934,其中最终黏度、回生值、硬度和黏附性的共同度高,均在 0.900 以上,是评价粳性黄米品质的关键指标。

根据主成分分析结果,计算粳性黄米的前 3 个主成分得分(F_1 、 F_2 、 F_3)和综合得分(F),得分越高说明其综合品质越好,结果如表 5 所示,综合得分排名前 5 的品种

表 3 主成分总方差解释

Table 3 Total variance explanation of principal component			
主成分	特征值	方差贡献率/%	累计方差贡献率/%
1	5.242	34.95	34.95
2	3.819	25.46	60.41
3	1.745	11.63	72.04

表 4 3 个主成分的载荷矩阵
Table 4 Load matrices of three principal components

指标	主成分载荷矩阵			共同度
	1	2	3	
蛋白	-0.644	0.422	-0.013	0.593
淀粉	0.517	-0.274	0.381	0.488
粗脂肪	-0.431	0.353	-0.038	0.312
直链淀粉	0.348	-0.515	0.226	0.437
起糊温度	-0.141	0.894	0.019	0.819
峰值黏度	0.761	0.130	-0.454	0.802
最终黏度	0.005	0.912	-0.264	0.901
破损值	0.789	-0.234	-0.379	0.821

指标	主成分载荷矩阵			共同度
	1	2	3	
回生值	-0.056	0.921	-0.236	0.907
加热吸水率	0.845	0.100	0.026	0.725
体积膨胀率	0.826	-0.102	0.079	0.699
溶出率	0.483	-0.404	0.455	0.604
硬度	-0.017	-0.100	0.956	0.924
黏附性	-0.034	-0.094	0.961	0.934
咀嚼性	-0.088	-0.299	0.862	0.840

表 5 粳性黄米品种的主成分得分
Table 5 Principal component scores of non-waxy proso millet varieties

品种	F_1	F_2	F_3	综合得分 F	排名
陇糜 5 号	-1.27	-2.02	-0.52	-1.41	21
陇糜 7 号	0.45	0.50	0.44	0.47	6
陇糜 8 号	0.98	0.48	0.33	0.70	3
陇糜 9 号	1.07	-0.72	-0.52	0.18	11
陇糜 10 号	0.98	0.70	0.46	0.80	1
陇糜 11 号	0.52	-0.83	-0.33	-0.09	14
宁糜 9 号	0.57	0.39	-1.23	0.22	10
宁糜 10 号	0.86	-0.94	1.40	0.31	8
宁糜 13 号	0.07	1.57	-0.22	0.55	5
宁糜 14 号	1.05	-0.52	-0.18	0.30	9
宁糜 16 号	-0.03	-1.14	-1.99	-0.74	19

品种	F_1	F_2	F_3	综合得分 F	排名
宁糜 17 号	-0.27	-0.95	-1.45	-0.70	17
固糜 21 号	0.67	0.33	-0.13	0.42	7
伊糜 5 号	-1.17	1.25	0.58	-0.03	12
内糜 3 号	-1.61	0.38	-0.43	-0.72	18
内糜 5 号	-0.93	-1.48	2.09	-0.64	16
内糜 6 号	-0.59	1.05	-0.82	-0.05	13
内糜 9 号	1.19	-0.28	1.47	0.71	2
赤糜 2 号	-2.17	0.46	0.39	-0.83	20
榆糜 2 号	-0.80	0.26	1.08	-0.12	15
榆糜 3 号	0.42	1.52	-0.40	0.68	4

是陇糜 10 号、内糜 9 号、陇糜 8 号、榆糜 3 号、宁糜 13 号，表现出较好的综合品质；得分较低的 3 个品种分别是陇糜 5 号、赤糜 2 号、宁糜 16 号，综合品质相对较差。对 21 个粳性黄米品种得分进行作图，可以直观地反映出不同品种在各主成分上的分布情况(图 1)。可以看出，不同粳性黄米品种离散程度大，差异主要体现在 PC1 和 PC2

上。综合得分较高的品种主要集中在 PC1 和 PC2 的正向区域，表明其营养成分、糊化特性和蒸煮特性较好。

3 结论

试验对 21 个粳性黄米品种的营养成分、糊化特性、蒸煮特性及质构特性共 15 项品质指标进行了分析，粳性黄米各品质指标间呈不同程度的差异，变异系数范围为 4.78%~27.18%，其中质构特性、粗脂肪含量、回生值、破损值、最终黏度的变异系数均大于 10%，品种间差异较大，起糊温度和淀粉含量的变异系数较小。主成分分析提取出 3 个主成分，累积方差贡献率达 72.04%，主成分 1 主要表征营养成分、峰值黏度、破损值和蒸煮特性，主成分 2 主要综合了直链淀粉含量、起糊温度、最终黏度和回生值等信息，主成分 3 反映了质构特性。影响粳性黄米品质的关键指标为最终黏度、回生值、硬度和黏附性，其共同度均在 0.900 以上。综合得分较高的品种为陇糜 10 号、内糜 9 号、陇糜 8 号、榆糜 3 号、宁糜 13 号，得分较低为陇糜 5 号、赤糜 2 号、宁糜 16 号。

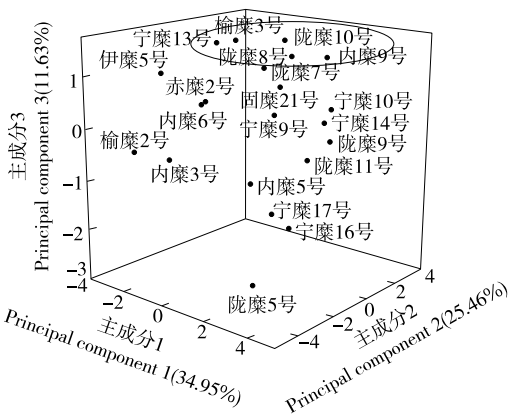


图 1 粳性黄米品种 PCA 分布图
Figure 1 PCA distribution diagram of non-waxy proso millet varieties

参考文献

[1] 杨清华, 邱军, 李海, 等. 糜子育成品种农艺、产量及品质性状

- 综合鉴定与评价[J]. 中国农业科学, 2017, 50(23): 4 530-4 547.
- YANG Q H, QIU J, LI H, et al. Comprehensive evaluation of agro-economic, yield and quality traits of broomcorn millet (*Panicum miliaceum* L.) cultivars[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2017, 50(23): 4 530-4 547.
- [2] 董孔军, 刘天鹏, 何继红, 等. 黄土高原半干旱区不同覆膜方式对土壤水热环境及糜子耗水特性的影响[J]. 中国农业科学, 2018, 51(12): 2 274-2 287.
- DONG K J, LIU T P, HE J H, et al. Effects of different film mulching-patterns on soil thermal-moisture and broomcorn millet water consumption characteristics in semiarid region on northwest loess plateau[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2018, 51(12): 2 274-2 287.
- [3] 申瑞玲, 马玉玲, 杜文娟, 等. 糜子的营养生理功能特性及产品开发现状[J]. 粮食与油脂, 2017, 30(1): 9-12.
- SHEN R L, MA Y L, DU W J, et al. Nutrition and physiological functional properties and food processing of proso millet[J]. Cereals & Oils, 2017, 30(1): 9-12.
- [4] KALINOVA J, MOUDRY J. Content and quality of protein in proso millet (*Panicum miliaceum* L.) varieties[J]. Plant Foods for Human Nutrition, 2006, 61: 45-49.
- [5] 姚亚平, 田呈瑞, 张国权. 糜子淀粉理化性质的分析[J]. 中国粮油学报, 2009, 24(9): 45-52.
- YAO Y P, TIAN C R, ZHANG G Q. Analysis on physicochemical properties of proso starch[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2009, 24(9): 45-52.
- [6] YANG Q H, ZHANG P P, QU Y, et al. Comparison of physicochemical properties and cooking edibility of waxy and non-waxy proso millet (*Panicum miliaceum* L.) [J]. Food Chemistry, 2018, 257: 271-278.
- [7] 王颖. 糜子品质特性与淀粉理化性质研究[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2012: 3.
- WANG Y. Study on character and starch physical-chemical properties of proso millet [D]. Xianyang: Northwest A & F University, 2012: 3.
- [8] 王颖, 晁桂梅, 杨秋歌, 等. 稷性糜子淀粉与小米淀粉理化性质的比较[J]. 福建农林大学学报(自然科学版), 2014, 43(5): 523-529.
- WANG Y, CHAO G M, YANG Q G, et al. Comparison of physicochemical properties of starches from japonica proso millet and millet[J]. Journal of Fujian Agriculture and Forestry University (Natural Science Edition), 2014, 43(5): 523-529.
- [9] ZHANG Y Y, GAO X L, LI J, et al. Comparative analysis of proso millet (*Panicum miliaceum* L.) leaf transcriptomes for insight into drought tolerance mechanisms[J]. BMC Plant Biology, 2019, 19(4): 443-448.
- [10] VERENA W, SABINE S B, DANIELA K, et al. Amino acid profiles and compositions of different cultivars of *Panicum miliaceum* L.[J]. Chromatographia, 2020, 83: 829-837.
- [11] KEHU L, TONGZE Z, SHWETHA N, et al. Diversity analysis of starch physicochemical properties in 95proso millet (*Panicum miliaceum* L.) accessions[J]. Food Chemistry, 2020, 324: 126863.
- [12] 李翠, 赵伟洁, 张大爱, 等. 水分胁迫对糜子物质生产及光合特性的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2014, 42(1): 89-95.
- LI C, ZHAO W J, ZHANG D A, et al. Effect of water stress on matter production and photosynthesis characteristics of broomcorn millet (*Panicum miliaceum* L.)[J]. Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition), 2014, 42(1): 89-95.
- [13] 王馨雨, 王蓉蓉, 王婷, 等. 不同品种百合内外鳞片游离氨基酸组成的主成分分析及聚类分析[J]. 食品科学, 2020, 41(12): 211-220.
- WANG X Y, WANG R R, WANG T, et al. Principal component analysis and cluster analysis for evaluating the free amino acid composition of inner and outer lily bulb scales from different cultivars[J]. Food Science, 2020, 41(12): 211-220.
- [14] 周显青, 孟欢, 熊宁, 等. 基于主成分与聚类分析的籼米食味品质综合评价[J]. 粮食与油脂, 2016, 29(6): 52-56.
- ZHOU X Q, MENG H, XIONG N, et al. Analysis of eating quality evaluation of rice based on principal components and cluster[J]. Cereals & Oils, 2016, 29(6): 52-56.
- [15] 韦露露, 秦礼康, 文安燕, 等. 基于主成分分析的不同品种小米品质评价[J]. 食品工业科技, 2019, 40(9): 49-56.
- WEI L L, QIN L K, WEN A Y, et al. Quality evaluation of different varieties millet based on principal components analysis[J]. Science and Technology of Food Industry, 2019, 40(9): 49-56.
- [16] BASHIR K, SWER T L, PRAKASH K S, et al. Physico-chemical and functional properties of gamma irradiated whole wheat flour and starch [J]. LWT-Food Science and Technology, 2017, 76: 131-139.
- [17] 刘利, 熊宁, 许卫国, 等. 普通晚籼稻和优质晚籼稻在不同储藏条件下碘蓝值的变化[J]. 粮食科技与经济, 2015, 40(2): 33-35, 42.
- LIU L, XIONG N, XU W G, et al. Research on the influence of the blue value of ordinary late indica rice and high quality late indica rice in different storage conditions[J]. Grain Science and Technology and Economy, 2015, 40(2): 33-35, 42.
- [18] MASATSUGU T, YUKIHARU O. Visualization of the coated layer at the surface of rice grain cooked with varying amounts of cooking water[J]. Journal of Cereal Science, 2012, 56(2): 404-409.
- [19] 刘厚清, 景梦瑶, 周涛. 白米的加工精度对食味及经济性的影响[J]. 粮食加工, 2018, 43(5): 41-46.
- LIU H Q, JING M Y, ZHOU T. The effect of the processing precision of white rice on the taste and economy[J]. Grain Processing, 2018, 43(5): 41-46.
- [20] 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.
- DING Y, HUA Z T, WANG F, et al. Effect of protein content on cooking and eating quality of japonica rice[J]. Food Science, 2012, 33(23): 42-46.

- Science and Technology of Food Industry. (2022-01-17) [2022-03-23]. <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2021100012>.
- [8] LIN D Q, ZHANG L T, LI R J, et al. Effect of plant protein mixtures on the microstructure and rheological properties of myofibrillar protein gel derived from red sea bream (*Pagrosomus major*) [J]. Food Hydrocolloids, 2019, 96: 537-545.
- [9] PAN S, WU S. Effect of chitoooligosaccharides on the denaturation of weever myofibrillar protein during frozen storage [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2014, 65(5): 549-552.
- [10] URBONAITE V, DE JONGH H H J, VAN DER LINDEN E, et al. Water holding of soy protein gels is set by coarseness, modulated by calcium binding, rather than gel stiffness [J]. Food Hydrocolloids, 2015, 46: 103-111.
- [11] BYLER D M, SUSI H. Examination of the secondary structure of proteins by deconvolved FTIR spectra[J]. Biopolymers, 1986, 25(3): 469-487.
- [12] 赵泽润, 邢通, 赵雪, 等. 大豆分离蛋白添加量对低盐木质化鸡肉糜凝胶特性的影响[J]. 食品科学, 2022, 43(6): 49-56.
- ZHAO Z R, XING T, ZHAO X, et al. Effects of soy protein isolate content on the gelation properties of low-salt wooden chicken breast meat paste[J]. Food Science, 2022, 43(6): 49-56.
- [13] 孙泽坤, 谢云飞, 于航, 等. 魔芋胶与卡拉胶复配优化驴头骨肉冻凝胶特性[J]. 食品与发酵工业, 2022, 48(1): 146-152.
- SUN Z K, XIE Y F, YU H, et al. Optimization of meat jelly properties from donkey skull by konjac gum / carrageenan mixtures[J]. Food and Fermentation Industries, 2022, 48(1): 146-152.
- [14] NIU H L, XIA X F, WANG C, et al. Thermal stability and gel quality of myofibrillar protein as affected by soy protein isolates subjected to an acidic pH and mild heating[J]. Food Chemistry, 2017, 242: 188-195.
- [15] LI J G, CHEN Y H, DONG X P, et al. Effect of chickpea (*Cicer arietinum* L.) protein isolate on the heat-induced gelation properties of pork myofibrillar protein[J]. Journal Science of Food and Agriculture, 2020, 101(5): 2 108-2 116.
- [16] 张钰嘉, 万杨卓群, 石尚轩, 等. 磷酸盐-大豆分离蛋白联合处理对草鱼肌原纤维蛋白凝胶化的影响[J]. 肉类研究, 2022, 36(2): 21-26.
- ZHANG Y J, WAN Y Z Q, SHI S X, et al. Effects of combined treatment of phosphates and soybean protein isolate on the gelation properties of myofibrillar proteins from grass carp[J]. Meat Research, 2022, 36(2): 21-26.
- [17] 张立彦, 胡嘉颖, 王仕钰. 食盐添加量对微波加热鸡胸肉糜凝胶品质的影响[J]. 现代食品科技, 2016, 32(3): 183-188.
- ZHANG L Y, HU J Y, WANG S Y. Effects of the amount of added salt on gel properties of microwave-heated chicken breast mince[J]. Modern Food Science and Technology, 2016, 32(3): 183-188.
- [18] 张蒙琪. 鸡蛋蛋白与大豆分离蛋白间相互作用及其凝胶特性的研究[D]. 无锡: 江南大学, 2021: 26-38.
- ZHANG M Q. The research of interaction between hen egg proteins and soybean protein isolate and its gelation properties[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2021: 26-38.
- [19] 胡爱军, 于辉, 郑婕, 等. 木薯淀粉对泥鳅肌原纤维蛋白凝胶特性的影响[J]. 天津科技大学学报, 2020, 35(4): 21-30.
- HU A J, YU H, ZHENG J, et al. Effect of cassava starch on gel properties of loach myofibrillar protein[J]. Journal of Tianjin University of Science & Technology, 2020, 35(4): 21-30.
- [20] 叶贝贝. 白鲢鱼/金线鱼混合肌原纤维蛋白及肌球蛋白热聚集的作用机制[D]. 锦州: 渤海大学, 2019: 22-23.
- YE B B. Mechanism of thermal aggregation of mixed myofibrillar protein and myosin from *Hypophthalmichthys molitrix* and *Nemipterus virgatus*[D]. Jinzhou: Bohai University, 2021: 22-23.
- [21] 张倩. 大豆蛋白/多糖复合凝胶缓释体系构建与表征[D]. 无锡: 江南大学, 2021: 35-36.
- ZHANG Q. Preparation and characterization of soybean protein/polysaccharide composite gels slow-release system [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2021: 35-36.
- [22] 汤嘉惠. κ -卡拉胶/ K^+ 凝胶体系对鱼糜性质和结构的影响[D]. 上海: 上海海洋大学, 2020: 31-32.
- TANG J H. Effects of κ -carrageenan/ K^+ gel system on the properties and structure of surimi[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2020: 31-32.
- [23] 梁辉红, 卢涵, 张香美. 蛋白二、三级结构对鱼糜凝胶质构和持水力的影响及其测定方法研究进展[J]. 东北农业大学学报, 2021, 52(10): 87-96.
- LIANG Y H, LU H, ZHANG X M. Research progress on the effects of protein secondary and tertiary structures on texture and water-holding capacity of surimi gel and protein structure determination methods[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2021, 52(10): 87-96.

(上接第 27 页)

- [21] KOLAWOLE O F, AKINPELU S C. Physical, functional, pasting and thermal properties of flours and starches of six Nigerian rice cultivars[J]. Food Hydrocolloid, 2015, 44: 478-490.
- [22] 李湘, 郭东权, 陈云堂, 等. 电子束辐照对大米营养和蒸煮品质的影响[J]. 农业工程学报, 2012, 28(15): 251-257.
- LI X, GUO D Q, CHEN Y T, et al. Effect of electron beam irradiation on nutritive and cooking qualities of rice[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(15): 251-257.
- [23] 周小理, 肖文艳, 周一鸣. 不同品种荞麦糊化特性与直链淀粉含量关系的研究[J]. 食品科学, 2008, 29(11): 37-40.
- ZHOU X L, XIAO W Y, ZHOU Y M. Study on relationship between pasting properties and amylose content of different buckwheat varieties[J]. Food Science, 2008, 29(11): 37-40.
- [24] 杜春微, 高梦晗, 刘庆, 等. 黄米品质特性研究[J]. 食品工业, 2018, 39(2): 83-87.
- DU C W, GAO M H, LIU Q, et al. Quality characteristics of proso millet[J]. The Food Industry, 2018, 39(2): 83-87.