

2022 届 硕 士 学 位 论 文

加酶挤压膨化处理对小米蛋白和膳食纤维  
的影响

二〇二二年六月

## 中文摘要

小米谷物含有多种营养成分，如蛋白质、膳食纤维、矿物质、维生素和含有酚类化合物等，对人们健康有益处。为了使小米即食食品广泛应用，需要新的加工和制备方法生产方便、口感、质地、颜色和货架稳定性的小米产品。本文以小米为原材料，通过加酶挤压膨化的加工方式对小米粉进行熟化处理，对比研究小米生粉、加酶小米粉、挤压小米粉及加酶挤压粉的营养成分和冲调性的变化。从小米生粉、加酶小米粉、挤压小米粉及加酶挤压粉分离提取出清蛋白、球蛋白、醇溶蛋白和谷蛋白，比较加酶挤压前后小米蛋白组分的结构和性质的变化。采用酶解法从小米生粉、加酶小米粉、挤压小米粉及加酶挤压粉提取膳食纤维，比较其性质及结构的变化。

1. 加酶挤压膨化小米粉在加工过程中蛋白含量无显著变化，脂肪、灰分、膳食纤维含量降低，加酶挤压膨化处理会降低小米粉的基本营养成分含量。加酶挤压膨化小米熟粉的水溶性指数显著提高，结块率和吸水性指数下降，冲调性得到极大改善。

2. 经过不同处理后，四种蛋白组分提取率大幅度下降；小米谷蛋白的持水性、持油性、起泡性均大于其他组分，小米醇溶蛋白的泡沫稳定性、乳化性高于其他组分；挤压处理使小米蛋白组分的持水性提高，起泡能力下降，加酶处理后，清蛋白、谷蛋白的泡沫稳定性显著下降，加酶挤压处理后，醇溶蛋白和谷蛋白的泡沫稳定性增强，醇溶蛋白的乳化性显著提高，各组分蛋白的乳化稳定性均比小米生粉各组分蛋白乳化稳定性好；小米各蛋白组分的分子质量分布广泛，条带较多；小米蛋白红外光谱相似，说明加酶挤压没有改变小米蛋白的主要官能团，但其含量或结合程度不同，导致某些吸收峰强度不同，挤压后四种蛋白组分的吸收强度下降，发生微弱蓝移现象，荧光光谱分析结果与之相对应；小米的谷氨酸的含量相对较高，赖氨酸、组氨酸、甘氨酸、精氨酸的含量相对较低。

3. 小米粉膳食纤维的持水性、持油性和溶解度均显著提高，挤压小米粉膳食纤维的胆固醇吸附能力、亚硝酸根离子吸附力最好。加酶挤压粉膳食纤维结构呈一定的片状、层状结构，颗粒表面的褶皱是无规则的，疏松多孔，表明结构疏松。小米膳食纤维红外光谱相似，说明加酶挤压没有改变小米膳食纤维的主要官能团，但其含量或结合程度不同，导致吸收峰强度不同。可为进一步开发利用小米膳食纤维资源提供参考。

**关键词：**小米；挤压膨化；高温 $\alpha$ -淀粉酶；蛋白质；膳食纤维

## ABSTRACT

Millet cereal contains a variety of nutrients, such as protein, dietary fiber, minerals, vitamins and phenolic compounds, which are good for people's health. In order to make millet ready-to-eat food widely used, new processing and preparation methods are needed to produce millet products with convenience, taste, texture, color and shelf stability. In this paper, millet was used as raw material, and the millet flour was treated by enzyme extrusion and paking, and the changes of nutritional composition and tonality of millet flour, enzyme extrusion and enzyme extrusion powder were comparatively studied. Albumin, globulin, gliadin and glutenin were isolated from millet raw meal, enzyme-added millet meal, extruded millet meal and enzyme-added extrusion powder. The changes of structure and properties of millet protein components before and after enzyme extrusion were compared. Dietary fiber was extracted from millet meal, enzyme-added millet meal, extruded millet meal and enzyme-added extrusion meal by enzyme-hydrolysis method, and its properties and structure were compared.

1. There was no significant change in protein content, fat, ash and dietary fiber content during the processing of extruded millet flour with enzyme, while the content of basic nutrients in extruded millet flour with enzyme was reduced. The water solubility index of millet cooked powder increased significantly, the agglomerate rate and water absorption index decreased, and the impact tonality was greatly improved.

2. After different treatments, the extraction rates of four protein components decreased significantly. The water holding capacity, oil holding capacity and foaming ability of millet gluten were higher than those of other components, while the foam stability and emulsification of millet gliadin were higher than those of other components. Extrusion processing the millet protein component of water, foaming ability to drop, after enzymatic treatment, albumin, glutelin foam stability decreased significantly, enzymatic extrusion processing, alcohol soluble protein and protein foam stability enhancement, emulsification of gliadin increased significantly, the emulsification stability of the protein components are better than millet flour protein emulsification stability of components. The molecular weight of each protein component of millet is widely distributed and there are many bands. The infrared spectra of millet protein were similar, indicating that the main functional groups of millet

protein were not changed by enzyme extrusion, but their contents or binding degrees were different, leading to different intensity of some absorption peaks. After extrusion, the absorption intensity of the four protein components decreased and a weak blue shift occurred, and the fluorescence spectrum analysis results were corresponding to them. Millet has a relatively high glutamic acid content, lysine, histidine, glycine, arginine content is relatively low.

3. The water holding capacity, oil holding capacity and solubility of millet flour dietary fiber were significantly improved, and the cholesterol adsorption capacity and nitrite ion adsorption capacity of extruded millet flour dietary fiber were the best. The structure of dietary fiber with enzyme extruded powder shows a certain flake and lamellar structure, and the folds on the particle surface are irregular, loose and porous, indicating that the structure is loose. Their spectra of millet dietary fiber were similar, indicating that the main functional groups of millet dietary fiber were not changed by enzyme extrusion, but their contents or binding degrees were different, resulting in different absorption peak intensities. It can provide reference for further development and utilization of millet dietary fiber resources.

**Key words:** Millet; Extrusion extrusion; High temperature  $\alpha$ -amylase; Protein; Dietary fiber

# 目 录

中文摘要 .....	I
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>III</b>
1 绪论 .....	1
1.1 谷子概述 .....	1
1.2 小米营养价值 .....	1
1.3 加工工艺对谷子营养品质的影响 .....	2
1.3.1 去皮 .....	2
1.3.2 发芽 .....	3
1.3.3 发酵与酶水解 .....	3
1.3.4 膨化 .....	4
1.3.5 浸泡和蒸煮 .....	4
1.4 研究的目的及意义 .....	5
1.4.1 研究目的 .....	5
1.4.2 研究意义 .....	5
1.5 研究内容 .....	5
2 加酶挤压膨化对小米粉冲调性的影响 .....	7
2.1 引言 .....	7
2.2 材料与仪器 .....	7
2.2.1 试验材料 .....	7
2.2.2 试验试剂 .....	7
2.2.3 试验仪器 .....	7
2.3 试验方法 .....	8
2.3.1 加酶挤压膨化处理工艺 .....	8
2.3.2 营养成分的测定 .....	8
2.3.3 冲调性的测定 .....	8
2.3.4 数据统计与分析 .....	9
2.4 结果分析 .....	9

2.4.1	加酶挤压膨化处理对小米粉营养成分的影响 .....	9
2.4.2	加酶挤压膨化处理对小米粉冲调性的影响 .....	10
2.5	小结 .....	11
3	加酶挤压膨化对小米蛋白的影响 .....	13
3.1	引言 .....	13
3.2	材料与仪器 .....	14
3.2.1	试验材料 .....	14
3.2.2	试验试剂 .....	14
3.2.3	试验仪器 .....	14
3.3	试验方法 .....	14
3.3.1	小米蛋白的提取 .....	14
3.3.2	蛋白持水性、持油性的测定 .....	15
3.3.3	蛋白起泡性及稳定性测定 .....	15
3.3.4	蛋白乳化活性及乳化稳定性 .....	15
3.3.5	小米蛋白组分 SDS-PAGE 电泳 .....	16
3.3.6	红外光谱测定 .....	16
3.3.7	紫外光谱测定 .....	16
3.3.8	荧光光谱测定 .....	16
3.3.9	氨基酸测定 .....	16
3.3.10	数据统计与分析 .....	16
3.4	结果与分析 .....	16
3.4.1	对小米蛋白组分含量的影响 .....	16
3.4.2	对小米蛋白持水性、持油性的影响 .....	17
3.4.3	对小米蛋白起泡性及泡沫稳定性的影响 .....	18
3.4.4	对小米蛋白乳化性及乳化稳定性的影响 .....	21
3.4.5	对小米蛋白组分亚基的分析 .....	23
3.4.6	对小米蛋白二级结构的影响 .....	24
3.4.7	对小米蛋白三级结构的影响 .....	27
3.4.8	小米蛋白的氨基酸构成 .....	30

3.5 小结 .....	31
4 加酶挤压膨化对小米膳食纤维的影响 .....	33
4.1 引言 .....	33
4.2 材料与仪器 .....	33
4.2.1 试验材料 .....	33
4.2.2 试验试剂 .....	33
4.2.3 试验仪器 .....	33
4.3 试验方法 .....	34
4.3.1 膳食纤维的提取 .....	34
4.3.2 小米膳食纤维持水性、持油性测定 .....	34
4.3.3 小米膳食纤维溶解度测定 .....	34
4.3.4 小米膳食纤维胆固醇吸附能力测定 .....	34
4.3.5 小米膳食纤维亚硝酸根离子吸附力测定 .....	35
4.3.6 小米膳食纤维红外光谱测定 .....	35
4.3.7 小米膳食纤维扫描电子显微镜测定 .....	35
4.3.8 数据统计与分析 .....	35
4.4 结果与分析 .....	36
4.4.1 小米膳食纤维持水性、持油性和溶解度的分析 .....	36
4.4.2 对小米膳食纤维吸附力的影响 .....	37
4.4.3 对小米膳食纤维红外光谱结构的影响 .....	38
4.4.4 对小米膳食纤维扫描电镜的影响 .....	39
4.6 小结 .....	39
5 结论 .....	41
参考文献 .....	43
读学位期间取得的研究成果 .....	52
致 谢 .....	53
个人简况及联系方式 .....	54
承 诺 书 .....	55
学位论文使用授权声明 .....	56

# Contents

<b>Chinese Abstract.....</b>	<b>I</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>III</b>
<b>1 Introduction .....</b>	<b>1</b>
1.1 Summary of millet.....	1
1.2 Nutritional value of millet .....	1
1.3 Effects of processing technology on nutritional quality of millet .....	2
1.3.1 Remove the peel .....	2
1.3.2 Burgeon .....	3
1.3.3 Fermentation and enzymatic hydrolysis.....	3
1.3.4 Extrusion.....	4
1.3.5 Soak and steam .....	4
1.4 The purpose and significance of the study .....	5
1.4.1 Purpose of research.....	5
1.4.2 Research significanc.....	5
1.5 Research contents .....	5
<b>2 Effect of extrusion with enzyme on tonality of millet flour .....</b>	<b>7</b>
2.1 Introduction .....	7
2.2 Materials and Instruments .....	7
2.2.1 Experimental material .....	7
2.2.2 Experiment reagent.....	7
2.2.3 Experimental apparatus .....	7
2.3 Experimental method.....	8
2.3.1 Extrusion and puffing process with enzyme .....	8
2.3.2 Determination of nutrients.....	8
2.3.3 Determination of impact tonality.....	8
2.3.4 Data statistics and analysis .....	9
2.4 Interpretation of result .....	9
2.4.1 Effects of extrusion treatment with enzyme on the nutritional	

composition of millet flour.....	9
2.4.2 Effect of extrusion treatment with enzyme on tonality of millet flour .....	10
2.5 Brief summary .....	11
<b>3 Effect of extrusion with enzyme on millet protein.....</b>	<b>13</b>
3.1 Introduction .....	13
3.2 Materials and Instruments .....	14
3.2.1 Experimental material .....	14
3.2.2 Experiment reagent.....	14
3.2.3 Experimental apparatus .....	14
3.3 Experimental method.....	14
3.3.1 Extraction of millet protein .....	14
3.3.2 Determination of water and oil holding capacity of protein.....	15
3.3.3 Determination of foaming ability and stability of protein.....	15
3.3.4 Emulsifying activity and stability of protein .....	15
3.3.5 SDS-PAGE electrophoresis of millet protein components.....	16
3.3.6 Infrared spectrometric determination .....	16
3.3.7 Ultraviolet spectrometric determination.....	16
3.3.8 Fluorescence spectrometry .....	16
3.3.9 Amino acid determination .....	16
3.3.10 Data statistics and analysis .....	16
3.4 Interpretation of result .....	16
3.4.1 Effects on the extraction rate of millet protein components.....	16
3.4.2 Effect on water and oil retention of millet protein .....	17
3.4.3 Effects on foaming ability and foam stability of millet protein .....	18
3.4.4 Effects on emulsification and stability of millet protein .....	21
3.4.5 Analysis of subunits of millet protein.....	23
3.4.6 Effects on secondary structure of Millet protein .....	24
3.4.7 Effects on tertiary structure of Millet protein.....	27
3.4.8 Amino acid composition of millet protein.....	30

3.5 Brief summary .....	31
<b>4 Effect of extrusion with enzyme on millet dietary Fiber.....</b>	<b>33</b>
4.1 Introduction .....	33
4.2 Materials and Instruments .....	33
4.2.1 Experimental material .....	33
4.2.2 Experiment reagent.....	33
4.2.3 Experimental apparatus .....	33
4.3 Experimental method.....	34
4.3.1 Extraction of dietary fiber .....	34
4.3.2 Determination of water and oil retention of millet dietary fiber .....	34
4.3.3 Determination of solubility of millet dietary fiber .....	34
4.3.4 Determination of cholesterol adsorption capacity of millet dietary fiber .....	34
4.3.5 Determination of nitrite ion adsorption capacity of millet dietary fiber .....	35
4.3.6 Determination of millet dietary fiber by infrared spectroscopy	35
4.3.7 Determination of millet dietary fiber by scanning electron microscopy .....	35
4.3.8 Data statistics and analysis .....	35
4.4 Interpretation of result .....	36
4.4.1 Analysis of water retention, oil retention and solubility of millet dietary fiber.....	36
4.4.2 Effect on adsorption capacity of millet dietary fiber.....	37
4.4.3 Influence on infrared spectral structure of millet dietary fiber.....	38
4.4.4 Effects on scanning electron microscopy of millet dietary fiber.....	39
4.6 Brief summary .....	39
<b>5 Conclusion .....</b>	<b>41</b>
<b>References .....</b>	<b>43</b>
<b>The research results obtained during the degree.....</b>	<b>52</b>

<b>Acknowledgement.....</b>	<b>53</b>
<b>Personal information and contact information .....</b>	<b>54</b>
<b>Letter of commitment.....</b>	<b>55</b>
<b>Statement of Authorization for the use of dissertation .....</b>	<b>56</b>

## 1 绪论

### 1.1 谷子概述

谷子属于禾本科植物，狗尾草属。中国种植谷子的历史悠久，是最早种植谷子的农业国家<sup>[1]</sup>。在世界许多地方，它被大量种植，是饮食的重要组成部分。小米的主要成分包括淀粉、蛋白质、脂肪、维生素和矿物质等营养物质。据报道，镁、锰、磷等矿物质的含量明显高于其他谷物矿物质。在中国北方地区，它被广泛用作孕妇和哺乳期妇女的营养粥或汤，并被应用于食疗<sup>[2]</sup>。在传统饮食中，谷子也是一种重要的谷物和营养食品，特别是对欧洲、亚洲和非洲大陆的人来说。小米由于其农业优势、健康益处和营养价值，而成为发展中国家良好的食物来源，健康益处有降低肿瘤发病率、降低血压、胆固醇吸收、预防心血管疾病和癌症；营养价值是提供人体健康所需的各种营养素和抗氧化剂<sup>[3]</sup>。

### 1.2 小米营养价值

小米是很好的营养来源，含有多种营养成分。据报道，小米的总碳水化合物含量在 72%~79.5%，大约 80%~85%的小米淀粉为支链淀粉，其余 15%~20%为直链淀粉<sup>[4]</sup>。非淀粉多糖占小米中总碳水化合物的 20%~30%，还原糖含量在 1.2%~1.8%，非还原糖含量为 0.03%<sup>[5]</sup>。

小米的第二主要成分是蛋白质。Singh<sup>[6]</sup>分析了 16 个小米品种，发现其范围在 4.88%~15.58%，平均值为 9.728%。Vadivoo 等<sup>[7]</sup>分析了 36 种小米基因型，报告其蛋白质含量在 6.7%~12.3%，平均值为 9.7%。小米中蛋白质主要贮存在胚和胚乳细胞中，属低过敏性蛋白，主要包括清蛋白、球蛋白、醇溶蛋白、谷蛋白和其他不溶性蛋白<sup>[8]</sup>。蛋白质的质量主要取决于其必需氨基酸。小米含有 44.7%的必需氨基酸，高于粮农组织参考蛋白质中 33.9%的必需氨基酸。与粮农组织对 2 至 5 岁儿童的氨基酸评分模式相比，赖氨酸是有限的，而所有其他氨基酸的评分都高于 1。色氨酸通常是谷物中第二缺乏的氨基酸。与水稻、小麦和高粱相比，苏氨酸也不缺乏。小米在必需氨基酸中的平衡相对较好，因为它含有更多的赖氨酸、鸟嘌呤和缬氨酸。清蛋白和球蛋白组分含有大量必需氨基酸，醇溶蛋白组分含有较高比例的谷氨酸、脯氨酸、缬氨酸、异亮氨酸、亮氨酸和苯丙氨酸，但精氨酸和甘氨酸含量较低。小米的异亮氨酸含量很高。

小米中的总膳食纤维（TDF）、不溶性膳食纤维（IDF）和可溶性膳食纤维（SDF）含量分别为 12%、11%、2%。谷子有降血糖的作用，这是由于富含高纤维。含有碳水化合物的高纤维饮食被缓慢消化和吸收，从而降低餐后血糖<sup>[9]</sup>。刘倍毓等<sup>[10]</sup>提取出小米麸皮的膳食纤维，对其进行分析，结果表明，小米麸皮中含有丰富的膳食纤维。

小米中的总脂质含量为 5.2%（游离脂质 2.2%；结合脂质 2.4%；结构脂质 0.6%），Sridhar 等<sup>[11]</sup>分析指出，非极性脂肪含量为 80%，糖脂含量为 6%，磷脂含量为 14%。小米虽然脂肪含量低，但多不饱和脂肪酸含量高。小米中的主要脂肪酸是油酸，其次是棕榈酸和亚油酸，它也含有少量亚麻酸，饱和脂肪酸占总脂肪酸的 25.6%，而不饱和脂肪酸占总脂肪酸的 74.4%。

谷子的矿物成分变化很大。生长地区普遍存在的遗传因素和环境条件影响粮食的矿物质含量。小米中的总灰分含量高于一般食用的谷物。研究发现，小米中的灰分含量接近 1.7%。Singh<sup>[8]</sup>表明，16 个小米品种的总灰分含量在 1.47%~2.58%，平均值为 2.11%。小米富含钙，小米的钙含量范围为 162~487 mg，平均值为 320.8 mg。小米中的铁含量范围为 3.3~14.8 mg。一般来说，小米富含维生素 B，每 100 克小米中含有 45 μg 胡萝卜素，小米中的维生素 A 含量为 6 倍视黄醇的量。

### 1.3 加工工艺对谷子营养品质的影响

为了改善营养特性、感官特性和便利性，有一些加工技术用于食品制造，几种传统的食品加工和制备方法也可用于提高植物性饮食中微量营养素的生物利用。这些包括热加工、机械加工、浸泡、发酵和萌动加工。这些程序旨在增加微量营养素的含量，减少抗营养素的含量，如植酸盐，或提高生物利用性的化合物的含量<sup>[12]</sup>。

#### 1.3.1 去皮

传统小米去皮方法有用手捣碎或使用机械装置，Hama<sup>[13]</sup>实验室中使用相同的谷粒批次进行的研磨去皮进行了比较，测定了去皮谷物的去皮特性和营养成分，结果表明，去皮对谷物成分有许多影响，但两种传统的去皮方法之间没有显著差异。去皮后的谷子蛋白质和脂肪含量没有变化，但它使粗纤维、膳食纤维、矿物质、总酚含量和抗氧化能力降低。因此，小米作为功能性食品的适用性降低，也有报道称，小米谷粒的去皮降低了总植酸、多酚和单宁的含量，并且提高了蛋白质消化率，但降低了小米的品质<sup>[14-16]</sup>。某些营养素（矿物质、纤维和抗氧化剂）和抗营养素（植酸盐、单宁）

的减少可能是因为它们主要位于谷物果皮和糊粉层的外层部分。因此，需要一种创新的去皮技术，与传统的去皮方法相比，能够在短时间内以商业规模将大量谷物去皮。

### 1.3.2 发芽

谷子经过发芽处理，自身内部的酶被激活发挥作用，多种生理代谢也随之变化，致使内部的营养成分富集<sup>[17]</sup>。小米胚芽膳食纤维，不会改变面团特性，也不会改变最终产品的质量，是很好的保健食品原料<sup>[18]</sup>。因此，胚芽通常可以提高食物的营养成分和消化率，并且可以作为一种基于食物的策略，最大限度地从食物谷物中提取铁和其他矿物质<sup>[19]</sup>。因此，小米的萌动发芽可作为一种技术，或与其他加工处理相结合，以制备富含营养的胚芽，可用于制备多种健康和营养食品，如婴儿配方奶粉、营养补充食品、复合面粉等。然而，有必要在工业规模上应用新型发芽剂，通过发芽条件控制系统进行强化，以提供易于处理且可供更多群体食用的优质胚芽产品，从而帮助促进小米的利用。

### 1.3.3 发酵与酶水解

由于发酵在食品保存中的重要性，它在非洲各地得到了广泛的应用，而现代食品保存方法仍然不常见。它有助于保存许多食品，提供多种口味，并显著改善原料的营养特性。发酵食品对人类食物的重要性也在全球范围内生产和消费<sup>[20]</sup>。小米及其食品的化学成分被发现通过发酵而改变。因此，在非洲和亚洲的发展中国家，小米被用来生产不同种类的传统发酵食品。发酵是降低粮食中抗营养素水平、提高蛋白质利用率、体外蛋白质消化率（IVPD）和营养价值的过程之一。研究表明，小米加工谷物的发酵显著降低了抗营养因子，同时显著改善了IVPD<sup>[21]</sup>。在一项研究中，酶解、脱盐和脱苦对脱脂谷子蛋白水解物功能特性的影响，所研究的功能特性表现出良好的品质，可用于低过敏性婴儿配方奶粉、运动营养和功能性食品<sup>[22-23]</sup>。据报道，酶处理也是一种与加工和产品开发相关的改良小米粉（FMF）面团属性的方法<sup>[24]</sup>。

发酵和酶水解是一种很有前途的技术，可以作为单一技术或与其他技术结合使用，以小米谷物为原料制备高营养价值的发酵食品。然而，这些技术在商业规模的小米食品制备中的应用是有限的，大多数应用是在家庭层面上进行的，用于制备一些传统食品或实验室规模的食物。因此，需要利用现代设备和优化条件，对这些方法进行工业应用，以在商业规模上制备高质量和安全的小米食品，例如发酵饮料和富含功能成分的小米部分，这些成分可用于治疗目的和大量人群的食品。

### 1.3.4 膨化

膨化是传统的食品加工方法之一，用于制备膨化谷物或豆类，以制备即食食品。膨化大米、高粱、玉米、大豆和其他豆类等方便零食，不仅在印度次大陆非常受欢迎，而且在全世界都很受欢迎<sup>[25-26]</sup>。这是一项成熟的工业技术，其特点是连续蒸煮、混合和成型加工，生产出高质量的直接膨胀材料<sup>[27]</sup>。挤压蒸煮是一种灵活、连续的过程，食品生物聚合物和成分通过水分、温度、压力和机械剪切进行混合、塑化、蒸煮和成型。谷物挤压蒸煮是食品和饲料行业中一个非常重要的过程，因为它涉及多种产品，如休闲食品、婴儿食品、早餐谷物和面食等<sup>[28]</sup>。挤出机通常将操作成本降至最低，并使生产过程合理化，将能量效率和多功能性结合起来。然而，食品混合物的流变特性和流体动力学特性使挤压烹饪成为一个非常复杂的过程。螺杆结构、搅拌桨、外筒和最终模具是双螺杆挤出机的典型部件。螺杆和搅拌桨在挤出过程中起着最重要的作用，因为它们在挤出机内运输、混合、切割和拉伸原料。据报道，谷物加工的传统方法膨化以及现代方法滚筒干燥和蒸煮可以成功地应用于谷子，以制备即食产品，从而提高其作为食品的利用率<sup>[29]</sup>。对去皮小米进行高温短时处理，以制备膨化小米，这是一种即食新一代产品。据研究，谷粒的粉碎程度和含水量是获得最大膨胀率谷子的关键因素。研究发现，制备膨胀率最高的产品的最佳条件是在粉碎前含水量约为40%，干燥时间为136~150 min<sup>[30]</sup>。然而，研究发现，膨化谷子的粗脂肪和粗纤维含量显著低于生谷子，而碳水化合物和能量值显著高于生谷子。这主要是因为谷粒外层脂肪和纤维含量较高，因此与位于内层的营养素相比，受加工影响<sup>[31]</sup>。因此，利用新技术优化膨化条件、膨化技术可以作为一种策略或与其它预处理相结合，以小米为原料生产即食小米，达到商业规模，从而促进小米的利用。

### 1.3.5 浸泡和蒸煮

谷物浸泡是一种流行的食品制备技术，用于减少植酸等抗营养化合物，以提高矿物质的生物利用度。Lestienne<sup>[32]</sup>研究了浸泡整粒种子、去皮种子和谷子粉后，植酸盐的降解和浸出、植酸酶活性以及铁和锌浓度，结果表明，浸泡前去皮和研磨有利于植酸盐和植酸酶在水介质中的浸出，从而促进植酸盐的降解。然而，用水浸泡面粉不会增加植酸降解。此外，谷子的简单加工（如去皮、浸泡和烹饪）导致多酚和植酸等抗营养物质的显著减少，并提高了铁和锌等矿物质的生物利用度以及蛋白质的体外消化率<sup>[33]</sup>。因此，小米的浸泡和蒸煮可以作为优化条件下的预处理，以降低小米中的抗

营养成分，提高营养物质的生物利用度和小米食品的营养质量。

## 1.4 研究的目及意义

### 1.4.1 研究目的

利用挤压膨化技术，原料在挤压过程中处于高压下，通过模头排出时突然下降到正常压力，由于压力急剧下降，原料被膨化成多孔结构，谷物蛋白质和淀粉等大分子物质的分解，有利于粉末快速吸收水分，溶解度、水溶性、堆积密度、沉降性等指标增强，结块率降低，提高冲调性，改善谷物的口感，强烈的物理效应会破坏粉末的晶体结构进入无定形态，会有效提高谷物的食用性，同时改变膳食纤维的性质，造成糖苷键、氢键断裂，部分大分子物质转化为小分子物质，从而提高了膳食纤维质量，对其加工技术具有良好的发展前景。

### 1.4.2 研究意义

谷物是世界上最重要的食物来源，在全世界人类的饮食中扮演着重要角色。由于小米对国家粮食安全和人民健康益处的重要贡献，小米现在受到越来越多的关注。目前，我国的小米加工现状还处在初加工，深加工产品极少，小米精加工行业需要进一步提升，随着人们对健康生活的追求，传统的小米加工利用方式已不能满足现代化快速发展的需要。为评估谷子谷物的营养价值和健康效益开展研究，讨论用于改善小米食用和营养特性的加工技术，为小米产业的发展提供了新途径。本研究通过加酶挤压膨化方式对小米进行熟化处理，提取蛋白及膳食纤维，比较性质和结构的变化，为开发小米功能食品的研究提供理论依据，解决小米深加工产品，进一步提升小米加工业的发展，因此，本课题具有一定的研究意义及实用价值。

## 1.5 研究内容

(1) 以小米为原材料，通过加入高温  $\alpha$ -淀粉酶、挤压膨化处理的方式对小米粉进行熟化处理，对比研究小米生粉、加酶小米粉、挤压小米粉及加酶挤压小米粉的营养成分，包括水分、蛋白质、膳食纤维、脂肪及灰分含量的变化，水溶性、吸水性、结块率、堆积密度等冲调性的变化。

(2) 采用 Osborne 法并稍作修改，分离提取清蛋白、球蛋白、醇溶蛋白和谷蛋

白。比较加酶挤压前后小米蛋白组分的性质变化， 并比较加酶挤压前后小米蛋白组分的结构变化， 包括蛋白的持水性、持油性、起泡性及泡沫稳定性、乳化性及乳化稳定性指标，通过 SDS-PAGE 电泳观察其亚基组成及分布，使用红外光谱观察蛋白二级结构的变化， 利用紫外光谱和荧光光谱观察蛋白质的三级结构的变化， 使用扫描电子显微镜观察蛋白组分的微观结构。

(3) 采用酶解法， 提取膳食纤维， 通过比较加酶挤压前后小米膳食纤维持水性、持油性、溶解度、胆固醇吸附力、亚硝酸盐吸附力及阳离子交换力的理化性质和扫描电镜、 X-射线及红外光谱的结构分析， 深入地了解小米膳食纤维结构与性质。

## 2 加酶挤压膨化对小米粉冲调性的影响

### 2.1 引言

小米含有丰富的蛋白质、淀粉、脂肪、低聚糖、矿物元素和植物化学素，膳食纤维、矿物质元素等含量约是普通谷物的三倍，是一种重要的食品或者食品配料<sup>[34]</sup>。淀粉类食品的挤出导致淀粉化，淀粉聚合物的晶体结构和分子碎片的部分或完全破坏，以及蛋白质变性，以及淀粉和脂质之间以及蛋白质和脂质之间复合物的形成<sup>[35]</sup>。由于挤出过程涉及热剪切和机械剪切，可以制造新的食品，如谷物零食，改性淀粉，预煮早餐谷物<sup>[36]</sup>，动物饲料，营养食品和饮料。小米的独特特性，如低过敏性和淡淡的味道，使其成为新食品开发非常理想的谷物<sup>[37]</sup>。本研究通过加酶挤压膨化处理小米粉，比较小米粉营养成分及冲调性，以为小米食品加工的研究提供依据。

### 2.2 材料与仪器

#### 2.2.1 试验材料

市售小米（由山西省晋中市丰谷源种植专业合作社提供）。

#### 2.2.2 试验试剂

高温  $\alpha$ -淀粉酶（酶活力 4000 U/g）、氢氧化钠、盐酸、浓硫酸、冰醋酸、石油醚、硼酸、碳酸钠等为国产分析纯，膳食纤维试剂盒。

#### 2.2.3 试验仪器

电子恒温水浴锅、雷磁 PH 计、电子天平、电热鼓风干燥机、箱式电阻炉、全自动凯氏定氮仪、消煮炉、膳食纤维测定仪、数显恒温振荡器、粉碎机、色度仪、双螺杆膨化机等。

## 2.3 试验方法

### 2.3.1 加酶挤压膨化处理工艺

小米粉碎过 60 目筛，量取高温  $\alpha$ -淀粉酶（750 U/g）溶解，与原料混匀后密封，100℃加热 30 min 酶解后流水冷却。酶解处理后的物料用双螺杆膨化机处理，参数如下，挤压机前中后段温度分别为 70℃、170℃、190℃，螺杆转速 30 Hz，喂料刚开始为 20 Hz，陆续出料后逐渐加快进料速度，待出料稳定后收集挤出样品，将样品干燥粉碎密封保存备用。在上述条件不变的情况下进行对照处理，实验分为 4 组：小米粉不加酶不挤压（小米生粉）、小米粉加酶不挤压（加酶小米粉）、小米粉挤压不加酶（挤压小米粉）、小米粉加酶挤压（加酶挤压粉）。

### 2.3.2 营养成分的测定

水分测定按照 GB5009.3-2016，蛋白质测定按照 GB5009.5-2016，脂肪测定按照 GB5009.5-2003，灰分测定按照 GB5009.3-2016，膳食纤维测定按照 GB-5009.88-2014。

### 2.3.3 冲调性的测定

#### 2.3.3.1 水溶性和吸水性测定

参照 Benhur 等<sup>[38]</sup>方法测定小米粉的吸水性指数（WAI）和水溶性指数（WSI）。称取样品 1.5 g，加入 20 mL 蒸馏水混匀，30℃水浴锅加热 30 min，每隔 5 min 振荡 30 s，4000×g 离心 12 min，分离上清液和沉淀物。计算公式如下。

$$WSI = \frac{\text{上清液残余干物质}}{\text{样品干质量}} \times 100\% \quad (2.1)$$

$$WAI = \frac{\text{沉淀物质量}}{\text{样品干质量}} \quad (2.2)$$

#### 2.3.3.2 结块率测定

称取 10 g 样品，加入 60℃的蒸馏水 150 mL，搅拌均匀后，静置 10 min，过 20 目筛，沥干后带筛网烘干至恒重。公式如下：

$$\text{结块率} = \frac{\text{结块物的质量}}{\text{样品干重}} \times 100\% \quad (2.3)$$

#### 2.3.3.3 色度测定

用色差仪记录加酶挤压处理前后小米粉的  $L^*$ ， $a^*$ ， $b^*$ 值。以小米生粉颜色  $L_0^*$ ，

$a_0^*$ ,  $b_0^*$ 为对照组。

色度和色差按以下公式计算:

$$\text{色度}=\sqrt{a^*+b^*} \quad (2.4)$$

$$\text{色差}=\sqrt{(L_0^*-L^*)^2+(a_0^*-a^*)^2+(b_0^*-b^*)^2} \quad (2.5)$$

#### 2.3.3.4 堆积密度

将样品慢慢加入 10 mL 量筒中, 直到刻度为 10 mL。然后将圆筒放置在平台上, 轻轻地在标记为 5 mL 处轻敲, 直到样品高度不再降低。记录样品的体积(V)和重量(W), 堆密度表示为 W/V (g/mL)。

#### 2.3.4 数据统计与分析

所有试验均进行 3 次重复, 使用 SPSS26 软件进行 Duncan 显著性分析,  $r<0.05$  表示差异显著, 相同字母表示相同处理差异不显著, 不同字母表示差异显著。

## 2.4 结果分析

### 2.4.1 加酶挤压膨化处理对小米粉营养成分的影响

表 2.1 小米粉主要化学成分含量(g/100g)

Table 2.1 Contents of main chemical components in millet flour (g/100g)

组别	蛋白质	脂肪	灰分	膳食纤维
小米生粉	10.04±0.06a	6.64±0.07a	2.31±0.05a	3.54±0.08a
加酶小米粉	9.46±0.16a	3.99±0.21b	1.31±0.07b	2.76±0.09b
挤压小米粉	9.41±0.51a	1.32±0.29c	0.92±0.09c	3.36±0.10a
加酶挤压粉	9.92±0.06a	1.74±0.20c	1.17±0.03b	2.26±0.11c

(注: 同列不同字母表示差异显著  $r<0.05$ )

小米粉营养成分见表 2.1。小米蛋白质含量在加酶挤压过程中无显著变化。加酶挤压处理使小米粉脂肪含量下降, 挤压及加酶挤压联合处理的脂肪含量降幅最大, 原因可能是脂肪与直链淀粉、蛋白质形成了复合物<sup>[39-40]</sup>。灰分含量下降, 因为在高温高压和高剪切力的作用下, 挥发性矿物质如碘、硒等少量损失。加酶生粉、加酶挤压粉膳食纤维含量减少, 主要是因为高温  $\alpha$ -淀粉酶可促进蛋白质和淀粉等大分子物质的分解, 从而使膳食纤维含量下降。加酶挤压膨化处理使基本营养成分的含量降低。

## 2.4.2 加酶挤压膨化处理对小米粉冲调性的影响

表 2.2 加酶挤压膨化处理对原料冲调性的影响

组别	WSI (%)	WAI (g/g)	结块率 (%)	堆积密度(g/mL)
小米生粉	3.50±0.32d	2.38±0.06a	43.67±1.08a	0.65±0.02a
加酶小米粉	24.46±1.67c	1.99±0.06b	27.76±2.06b	0.51±0.01c
挤压小米粉	52.74±5.62b	1.99±0.03b	8.19±0.97c	0.56±0.01b
加酶挤压粉	70.22±1.05a	1.87±0.09c	3.16±0.40d	0.57±0.01b

(注：同列不同字母表示差异显著  $P<0.05$ )

表 2.3 加酶挤压膨化处理对原料色度的影响

组别	L*	a*	b*	色度	色差
小米生粉	89.21±0.42a	-1.48±0.12d	24.56±2.04a	24.60	-
加酶小米粉	82.09±0.80bc	0.92±0.04b	24.91±1.03a	24.93	7.52
挤压小米粉	81.36±1.15c	0.64±0.02c	23.60±0.28a	23.61	8.19
加酶挤压粉	84.13±1.146b	1.23±0.07a	21.99±0.45a	22.02	6.30

(注：同列不同字母表示差异显著  $r<0.05$ )

小米粉冲调性见表 2.2。加酶小米粉、挤压小米粉、加酶挤压粉与小米生粉相比，水溶性指数分别提高了 5.99 倍、14.07 倍、19.07 倍 ( $r<0.05$ )；加酶小米粉、挤压小米粉、加酶挤压粉与小米生粉相比，吸水性指数分别降低了 16.39%、16.89%、21.43%；加酶小米粉、挤压小米粉、加酶挤压粉与小米生粉相比，结块率下降了 36.43%、81.25%、92.76% ( $r<0.05$ )。在高温  $\alpha$ -淀粉酶和挤压膨化共同作用下，部分高分子物质的结构键断裂变成低分子产物<sup>[41]</sup>，小分子可溶性物质增加，亲水性增强，水溶性指数升高，同时大分子结构被破坏，与水作用后吸水性能下降，表现为水溶性指数上升而吸水性指数下降，也使得加酶挤压粉的结块现象明显减少，从而结块率降低，小米粉的冲调效果越好。综合来看，加酶挤压膨化处理能显著提高小米粉的冲调性。

小米粉的颜色变化见表 2.3。加酶挤压粉 L\*值最大，亮度最高，b\*值最小，感官接受度最高。小米生粉、加酶小米粉、挤压小米粉、加酶挤压粉的色度分别为：24.60、24.93、23.61、22.02，挤压和加酶挤压处理，使色度变小，颜色变浅。以未经处理的小米生粉对照组，加酶小米粉、挤压小米粉、加酶挤压粉的色差值分别为：7.52、8.19、

6.30, 挤压后颜色变化最大, 加酶挤压处理变化最小。

## 2.5 小结

本研究通过加酶挤压技术对小米进行处理, 比较加酶挤压前后小米中营养成分和冲调性指标。通过水分、蛋白质、灰分、膳食纤维及脂肪含量观察挤压前后小米中营养成分的变化, 通过 WSI、WAI、结块率、堆积密度、色度指标变化判断冲调性。本研究主要结论如下:

加酶挤压膨化小米粉在加工过程中蛋白含量无显著变化, 脂肪、灰分、膳食纤维含量降低, 加酶挤压膨化处理会降低小米粉的基本营养成分含量。加酶挤压膨化小米熟粉的 WSI 显著提高, 结块率和 WAI 下降, 冲调性得到极大改善。从营养成分和冲调性角度来对小米粉进行研究, 提升了其品质, 为小米产业发展提供了新途径。

### 3 加酶挤压膨化对小米蛋白的影响

#### 3.1 引言

全球对植物蛋白的兴趣与日俱增，部分原因是动物蛋白成分的成本不断上升，消费者对瘦肉蛋白的偏好，因此，植物蛋白市场正在快速扩张，在这种趋势下，寻找非传统植物蛋白质来源，如小米、高粱、藜麦、大麻和水小扁豆，吸引了大量研究兴趣，以满足对蛋白质食品的巨大需求，预计到 2050 年蛋白质食品的需求将超过当前需求的三分之一<sup>[42]</sup>。Osborne 是第一个对植物蛋白表征类、命名的人，因此清蛋白(Albumins)、球蛋白(Globulins)、醇溶蛋白(Prolamins)和谷蛋白(Glutelins)被称为是“Osborne fractions”<sup>[43]</sup>。

谷子是一种重要的新兴植物蛋白质来源，因为它的种植季节短，具有抗旱和抗病的潜力，并且能够适应不同的土壤和气候条件<sup>[44]</sup>。小米被认为是世界上第六大谷物，消费量超过世界人口三分之一的比例<sup>[45]</sup>。从营养学角度来看，小米蛋白不含麸质，这是其用于无麸质产品的一个关键优点。此外，与小麦蛋白质相比，谷子蛋白质在某些必需氨基酸（亮氨酸、异亮氨酸、蛋氨酸）中更丰富，某些蛋白质含量更高，与小麦和其他一些谷物类似<sup>[46]</sup>。小米中储藏蛋白含量最多的是醇溶蛋白<sup>[47]</sup>，其具有治疗胃肠疾病的天然蛋白<sup>[48]</sup>，它具有低敏性且能治疗消化不良病人的效果<sup>[49-51]</sup>，科研工作者积极开发小米健康食品。然而，小米蛋白质或其蛋白质组分作为食品配料的应用受到限制，这可能是由于其理化、结构和功能特性方面的信息不足。对这些特性的了解有助于阐明前谷蛋白与食物系统中其他生物分子的相互作用。蛋白质的物理化学性质（如溶解性、表面疏水性和热变性温度）和功能性质（如乳化性、起泡性、水结合性和保水性）的知识在食品应用中非常重要，这些性质受结构的影响，构象和蛋白质的环境溶液条件（pH、离子溶液和温度）。目前有关小米蛋白的研究较少，研究者方法不同、样品不同，导致研究结果具有差异性<sup>[52-53]</sup>。本研究采用 Osborne 法并稍作修改，分离提取清蛋白、球蛋白、醇溶蛋白和谷蛋白，比较加酶挤压前后小米蛋白组分性质及结构的变化。

## 3.2 材料与仪器

### 3.2.1 试验材料

小米生粉、加酶小米粉、挤压小米粉、加酶挤压粉由第 2 章制备；市售大豆油。

### 3.2.2 试验试剂

PBS 缓冲液、SDS-PAGE 凝胶制备试剂盒、考马斯亮蓝 G250、5X 非还原型蛋白上样缓冲液、石油醚、氯化钠、乙醇、氢氧化钠、碳酸钠、硫酸铜、酒石酸钾钠、牛血清蛋白、福林酚试剂、Marker 等均为国产分析纯。

### 3.2.3 试验仪器

压力蒸汽灭菌锅、水浴锅、离心机、电子天平、高速粉碎机、MiniFlex600X 射线衍射仪、鼓风干燥机、冷冻干燥机、酶标仪、紫外分光光度计、荧光分光光度计、漩涡机、电泳仪等。

## 3.3 试验方法

### 3.3.1 小米蛋白的提取

将加酶挤压膨化后的小米粉脱脂粉碎过筛，采用 Osborne 法<sup>[54]</sup>并稍作修改分离提取清蛋白、球蛋白、醇溶蛋白和谷蛋白。

清蛋白使用水提法，取脱脂小米粉 10 g，100 mL 蒸馏水，浸提温度 45°C，浸提时间 1.5 h，水浴搅拌后离心，上清液旋转蒸发浓缩，冷冻干燥，为清蛋白。球蛋白使用盐提法，浓度为 3%的氯化钠溶液 80 mL，浸提时间 1.5 h 进行试验，水浴搅拌后离心取上清液，透析 24h，旋转蒸发浓缩，冷冻干燥，为球蛋白。醇溶蛋白使用乙醇溶液提取，加入浓度为 80%的乙醇溶液 80 mL，浸提时间 1.5 h，浸提温度 45°C进行试验，水浴搅拌后离心，取上清液，旋转蒸发浓缩，冷冻干燥，为醇溶蛋白。谷蛋白使用碱提法，加入浓度为 0.2%的氢氧化钠溶液 60 mL，浸提温度 50°C，浸提时间 2h进行试验，水浴搅拌后离心，上清液旋转蒸发浓缩，冷冻干燥，为谷蛋白。提取液中蛋白质浓度的测定，采用福林酚法，计算蛋白的含量。

### 3.3.2 蛋白持水性、持油性的测定

参照 Luo 等方法<sup>[55]</sup>稍作修改，称取小米蛋白 0.1 g，加入 10 mL 的蒸馏水（大豆油），静置 20 min 后于 4000×g 下离心 20 min，倒掉上清液后称重，计算公式如下所示：

$$\text{持水性（持油性）} = \frac{W_2 - W_1}{W_0} \quad (3.1)$$

式中：W<sub>0</sub> 表示小米蛋白样品的质量，g；W<sub>1</sub> 表示离心后小米蛋白样品的总质量，g；W<sub>2</sub> 表示离心管加离心后沉淀的总质量，g。

### 3.3.3 蛋白起泡性及稳定性测定

参照李迎秋等<sup>[56]</sup>的方法测定蛋白质起泡性能，配制 0.01 g/L 小米蛋白悬浮液，放置 15 mL 的螺口管中，用漩涡机搅打 2 次，每次 30 s，中间间隔数秒，迅速记录搅打后的总体积和泡沫体积。随后静置样品 20 min，记录泡沫体积。计算公式如公式如下所示。

$$\text{起泡性} = \frac{\text{泡沫体积}}{\text{液体起始体积}} \times 100\% \quad (3.2)$$

$$\text{泡沫稳定性} = \frac{\text{20min 后剩余泡沫体积}}{\text{泡沫起始体积}} \times 100\% \quad (3.3)$$

### 3.3.4 蛋白乳化活性及乳化稳定性

优化 Jiang 等<sup>[57]</sup>方法，称取小米 0.1 g 蛋白，溶于 10 mL 0.1 mol/L pH=7 的磷酸盐缓冲溶液中。将 1.5 mL 大豆油加入 4.5 mL 样品溶液中，均质 5 min，在均质结束后和静置 10 min 后立即从底部吸取 50 μL 的样品，用 5 mL 0.1% 的 SDS 溶液进行稀释，测定 500 nm 处吸光度值，分别记为 A<sub>0</sub> 和 A<sub>10</sub>。

乳化活性指数（Emulsification Activity Index，EAI）按如下公式计算：

$$\text{EAI} = \frac{2 \times 2.303 \times A_0 \times N}{\varphi \text{LC} \times 10000} \quad (3.4)$$

式中：EAI 为乳化活性指数 m<sup>2</sup>/g；N 为稀释倍数；φ 为体系中油相所占分数；C 为蛋白浓度 g/mL；L 为比色池光径 1 cm。

乳化稳定性（Emulsification Stability Index，ESI）按如下公式计算：

$$\text{ESI} = \frac{A_0 \times \Delta T}{A_0 \times A_{10}} \quad (3.5)$$

式中：ESI 为乳化稳定性指数 min；A<sub>0</sub> 为 0 min 时的吸光度值；ΔT 为测定乳化

性的两次时间间隔，本试验取 10 min； $A_{10}$  为 10 min 时的吸光度值。

### 3.3.5 小米蛋白组分 SDS-PAGE 电泳

参考 Laemmli<sup>[58]</sup>方法稍作修改，将样品溶于样品溶解液中，100℃煮沸 3~5 min，冷却待用。SDS-PAGE 凝胶制备试剂盒开始上样，依次加入 8  $\mu$ L 上样缓冲液，32  $\mu$ L 蛋白溶液，上样结束后，用 160 V 运行电泳仪，当试样带距边缘 1 cm 时停止电泳。取下胶体，切角标记，染色液浸泡，放置摇床脱色，直到蛋白质区带清晰。

### 3.3.6 红外光谱测定

使用 Thermo Scientific Nicolet iS50 红外光谱仪研究加酶挤压前后小米蛋白组分的二级结构。

### 3.3.7 紫外光谱测定

使用紫外分光光度计测定加酶挤压前后小米蛋白组分悬浮液的紫外光谱。

### 3.3.8 荧光光谱测定

参考 Huang 等<sup>[59]</sup>方法稍作修改，使用荧光分光光度计测量加酶挤压前后小米蛋白组分悬浮液的荧光光谱。

### 3.3.9 氨基酸测定

根据 GB/T5009.124-2003，采用氨基酸自动分析仪测定 16 种氨基酸的含量。

### 3.3.10 数据统计与分析

使用 SPSS26 软件进行 Duncan 显著性分析， $r < 0.05$  表示差异显著。使用 Origin2019 制图，相同字母表示相同处理差异不显著，不同字母表示差异显著。

## 3.4 结果与分析

### 3.4.1 对小米蛋白组分含量的影响

不同处理小米粉中各蛋白组分含量见表 3.1。清蛋白含量在 5.39%~16.83%，球蛋白含量在 1.48%~5.57%，醇溶蛋白含量在 20.42%~51.74%，谷蛋白含量在 11.53%~22.69%，赵学伟等<sup>[60]</sup>测定小米挤压后提取率的结果为：清蛋白在 1.2%~2.0%

之间, 球蛋白在 0.5%~0.9%之间, 醇溶蛋白 2.9%~9.5%之间, 谷蛋白 4.4%~7.0%之间。实验结果不同, 主要是因为 Osborne 法是常用的蛋白质分级分离方法, 是根据不同溶剂溶解不同蛋白组分而进行分离, 可能实验原料、提取温度、时间不同, 也可能是挤压条件不同, 蛋白组分之间的结合程度也有所不同<sup>[61]</sup>。经过不同处理后, 四种蛋白组分提取率均下降, 可能是由于在挤压过程中受到高温高压和高剪切力的作用, 蛋白质和淀粉之间发生化学反应, 使得蛋白组分和淀粉结合在一起, 需要提取的蛋白较难获得。

表 3.1 高温  $\alpha$ -淀粉酶协助挤压膨化处理对小米蛋白组分含量的影响 (%)

Table 3.1 Effect of high temperature  $\alpha$ -amylase assisted extrusion on protein content of millet (%)

组别	小米生粉	加酶小米粉	挤压小米粉	加酶挤压粉
清蛋白	16.83±0.54a	15.46±1.35a	5.39±0.45c	7.20±0.34b
球蛋白	5.57±0.32a	4.57±0.73b	1.48±0.10b	1.68±0.15b
醇溶蛋白	51.74±4.87a	49.84±2.84a	20.42±1.22b	26.00±1.00b
谷蛋白	19.37±0.26b	22.69±0.98a	12.27±0.48c	11.53±0.39c

(注: 同列不同字母表示差异显著  $P < 0.05$ )

### 3.4.2 对小米蛋白持水性、持油性的影响

加酶挤压处理前后小米各组分蛋白的持水性如图 3.1 所示。谷蛋白的持水能力高于其他蛋白质组分, 小米生粉、加酶小米粉、挤压小米粉和加酶挤压粉的谷蛋白的持水性分别为 4.53、4.16、7.76、7.48 g/g, 其次是醇溶蛋白, 球蛋白以及清蛋白。实验结果与管骁等<sup>[62]</sup>的研究结果相似。蛋白质的持水性和溶解度成反比<sup>[63]</sup>, 清蛋白、球蛋白的持水力较低可能是由于清蛋白和球蛋白的水分子间相互作用使其有较高的溶解度<sup>[64]</sup>。挤压处理使各个蛋白组分的持水性最好, 可能是因为挤压膨化处理后, 部分高分子物质的结构键断裂变成低分子产物, 小分子可溶性物质增加, 从而使持水性能力增强。

加酶挤压处理前后小米各组分蛋白的持油性如图 3.2 所示。谷蛋白的持油性均大于其他组分, 小米生粉、加酶小米粉、挤压小米粉和加酶挤压粉的谷蛋白的持油性分别为 15.97、15.58、19.21、19.92 g/g, 是因为谷蛋白的容积密度较小, 持油能力最好, 其次是球蛋白, 清蛋白和醇溶蛋白。研究表明物理截留作用对蛋白质的持油能力有最主要的贡献<sup>[65]</sup>。

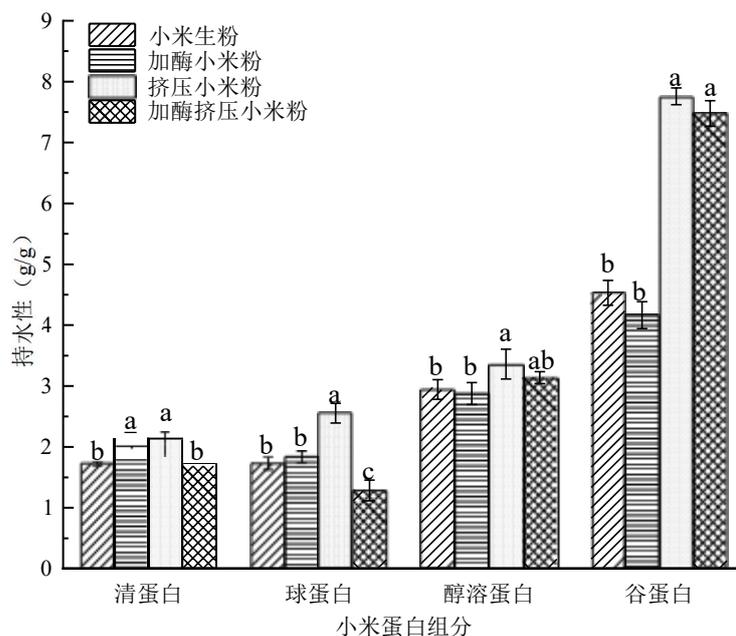


图 3.1 不同处理对小米粉中各组分蛋白的持水性

Fig. 3.1 Water holding capacity of protein components in rice flour under different treatments

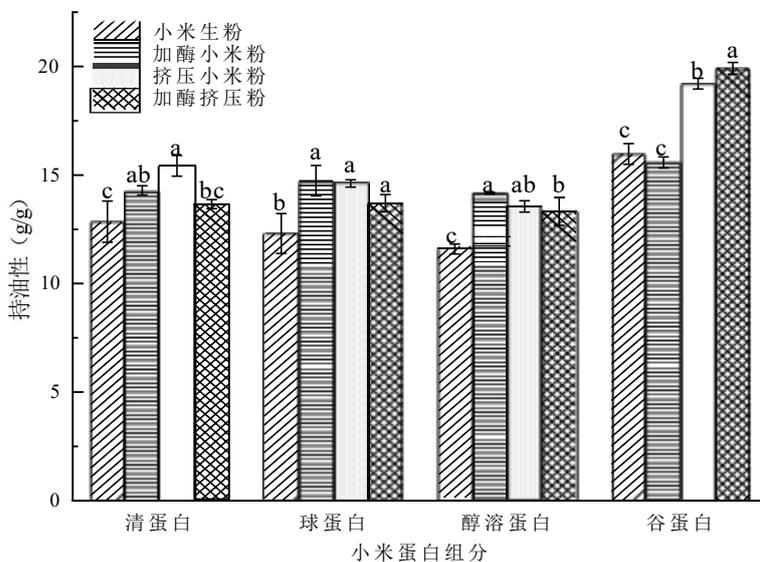


图 3.2 不同处理对小米粉中各组分蛋白的持油性

Fig. 3.2 Oil retention of protein components in millet flour under different treatments

### 3.4.3 对小米蛋白起泡性及泡沫稳定性的影响

起泡能力衡量蛋白质在连续液相或半固相中泡沫分散气泡的能力。通常，蛋白质

分子必须扩散到空气或水界面，展开、聚集并在气泡周围形成一层厚厚的粘弹性膜，与蛋白质溶液的疏水性、溶解度以及肽链有关，泡沫稳定性是指形成连续的厚的粘弹性和不透气的薄膜而捕获气泡，与蛋白流变学性质有关<sup>[66]</sup>，蛋白质的起泡性使食物具有良好的口感，是可溶性蛋白含量具有良好的稳定性的原因<sup>[67]</sup>。加酶挤压处理前后小米各组分蛋白的泡沫性及泡沫稳定性如图 3.3、3.4 所示。

小米蛋白各组分的起泡能力经加酶、挤压、加酶挤压处理后下降，清蛋白和球蛋白在挤压和加酶挤压处理后起泡性为 0，谷蛋白的起泡性最好，谷蛋白的起泡性分别为 124%、120%、57.33%、18.67%，加酶小米粉谷蛋白、加酶挤压粉谷蛋白较小米生粉谷蛋白起泡性下降了 53.77%、84.94%。挤压、加酶挤压处理起泡性下降的原因可能是因为高温高压高剪切力的作用，使蛋白质变性及不溶组分的结合，界面膜的初始稳定性降低，此外，热处理过程使蛋白样品结合的皂苷含量降低，从而使小米蛋白起泡性降低<sup>[68]</sup>，同时溶解度与起泡性有关<sup>[69]</sup>。谷蛋白的起泡性优于其他蛋白组分，主要是因为谷蛋白由碱液提取，蛋白在酸性和碱性条件下的起泡性较好。

小米醇溶蛋白的泡沫稳定性均高于其他蛋白组分，醇溶蛋白的泡沫稳定性分别为 87.49%、81.72%、88.33%、89.25%，加酶处理后，清蛋白、谷蛋白的泡沫稳定性显著下降，加酶挤压处理后，醇溶蛋白和谷蛋白的泡沫稳定性增强。醇溶蛋白泡沫稳定性较强，是因为醇溶蛋白具有较强的疏水性，泡沫稳定性与疏水性相关<sup>[70]</sup>。清蛋白、谷蛋白的泡沫稳定性显著下降，由于  $\alpha$ -淀粉酶酶解后蛋白质的黏度变小，气泡无法被液膜包裹住，使得泡沫稳定性变差。醇溶蛋白和谷蛋白的泡沫稳定性增强，主要是因为挤压过程中，蛋白质的结构受到过高的温度以及极大的压力的作用，变成更多的无规则卷曲结构，有利于形成稳定性结构，促使蛋白泡沫不易破坏<sup>[71]</sup>。

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/927064122061006101>