

20 22 届 硕 士 学 位 论 文

小米营养粉工艺研究及工厂设计

二〇二二年六月

中 文 摘 要

小米营养价值丰富，配比合理，在我国是主要的谷物作物之一，目前人们对小米产品及功能特性的研究越来越多，本研究依据小米本身营养特性，开发一款小米营养粉，并进行工厂设计，旨在实现产品工业化的转化。本文通过对比不同的加工方式处理对小米粉糊化度等指标的影响，确定米粉的最适加工方式和参数，经单因素与响应面实验进行小米营养粉配方工艺优化，并对小米营养粉的基本成分、溶解性、淀粉体外消化特性以及抗氧化性进行研究，在此工艺条件下进行小米营养粉的工厂设计，旨为小米营养粉的开发与食品工厂设计的研究提供理论数据参考。具体研究结果如下：

1、米粉的加工工艺实验。对比蒸煮、炒制与挤压膨化三种不同加工方式对加工后的小米粉的糊化度、淀粉体外消化特性等的影响，结果表明挤压膨化加工后得到小米粉的糊化度、溶解度、快消化淀粉比例均高于蒸煮和炒制工艺，而慢消化淀粉比例低于蒸煮和炒制工艺，因此选择挤压膨化加工方式。然后通过研究水分含量、螺杆转速、挤压温度、进料速度四个单因素对挤压膨化小米粉糊化度的影响，确定较适的挤压参数为水分含量 10%、螺杆转速 26 Hz、挤压温度 170℃、进料速度 20 Hz。

2、营养米粉的配方实验。采用挤压膨化技术，通过单因素（木糖醇、西兰花粉、鸡胸肉粉、魔芋粉的添加量和冲调温度）与响应面优化实验，以感官评分为指标，得出最佳营养米粉配方为木糖醇添加量 20%、西兰花粉添加量 4%、鸡胸肉粉添加量 3%、魔芋粉添加量 2%，最适冲调温度 80℃。

3、营养米粉的特性分析。与挤压膨化原米粉相比成品配方营养米粉富含蛋白质、膳食纤维、锌、硒，脂肪含量低，溶解率高，沉淀率低，抗性淀粉含量高，对 DPPH 自由基、羟基自由基、ABTS+· 自由基的清除率以及总还原力随着样品浓度的升高不断增强，且成品米粉微生物指标符合国家标准。

4、营养米粉生产工厂设计。根据小米营养粉的工艺流程，从工厂厂区选址、设备选型、物料衡算、技术经济分析等方面，设计出年产 300 吨的小米营养粉的工厂设计。本工厂的厂址选择在山西榆社县，总投资为 1216.61 万元，投资回收期为 2.323 年。

关键词：小米；挤压膨化；配方；抗氧化；工厂设计

ABSTRACT

Millet nutritional value is rich, reasonable ratio, in our country is one of the main cereal crops, at present people are more and more people in millet products and functional characteristics of the study, this study according to millet itself nutritional characteristics, the development of a millet nutrition powder, and factory design, aimed at achieving product industrialization transformation. In this paper, by comparing the effects of different processing methods on the gelatinization degree and other indicators of millet flour, the most suitable processing methods and parameters of rice flour were determined. The basic ingredients, solubility, in vitro digestion characteristics and antioxidant properties of starch are studied. Under this process condition, the factory design of millet nutritional powder is carried out, which aims to provide theoretical data reference for the development of millet nutritional powder and the research on food factory design. The specific research results are as follows:

1. The processing technology experiment of millet flour. Comparing the effects of three different processing methods of cooking, frying and extrusion on the gelatinization degree of millet powder after processing, the in vitro digestion characteristics of starch, etc., the results show that the gelatinization degree, solubility and fast digestion starch ratio of millet powder obtained after extrusion processing are higher than that of cooking and frying, while the proportion of slow digestion starch is lower than that of cooking and frying, so the extrusion puffing processing method is selected. Then, by studying the influence of four single factors of moisture content, screw speed, extrusion temperature and feed speed on the gelatinization degree of extruded millet powder, the more appropriate extrusion parameters were 10% moisture content, screw speed 26 Hz, extrusion temperature 170 °C, and feeding speed 20 Hz.

2. Formula experiment of nutritional millet flour. Using extrusion extrusion technology, through the one-factor (xylitol, broccoli pollen, chicken breast powder, konjac powder, punching temperature) and response surface optimization test. Taking the sensory score as the index, the best formula is xylitol added at 20%, broccoli pollen added at 4%,

chicken breast powder added at 3%, konjac powder added at 2%, and the most suitable temperature is 80°C.

3 Characteristic analysis of nutritional millet flour. Compared with extruded raw rice flour, the finished formula nutritional rice flour is rich in protein, dietary fiber, zinc and selenium, with low fat content, high solubility rate, low precipitation rate, high content of resistant starch RS, the clearance of DPPH free radicals, hydroxyl radicals, total reducing force, ABTS+. free radicals continues to increase with the increase of sample concentration, and the microbial indicators of finished millet flour meet national standards.

4. Design of nutritious millet flour production plant. According to the process flow of millet nutrition powder, from the factory site selection, equipment selection, material balance, technical and economic analysis, etc.. Design a factory design for millet nutritional powder with an annual output of 300 tons. The factory site is Yushe County, Shanxi Province. The total investment of the factory is 12.1661 million, and the investment recovery period is 2.323 years.

Keywords: millet; extrusion; formula; antioxidant; factory design

目 录

| | |
|---------------------------------|-----------|
| 中文摘要 | I |
| ABSTRACT | II |
| 1 绪论 | 1 |
| 1.1 小米概述 | 1 |
| 1.1.1 小米简介 | 1 |
| 1.1.2 小米主要成分 | 1 |
| 1.1.3 小米保健功能 | 3 |
| 1.2 小米产品研究概述 | 3 |
| 1.2.1 小米产品研究现状 | 3 |
| 1.2.2 营养米粉研究现状 | 3 |
| 1.3 挤压膨化研究概述 | 3 |
| 1.3.1 挤压膨化原理 | 4 |
| 1.3.2 对成分的影响 | 4 |
| 1.4 米粉辅料概述 | 5 |
| 1.5 工厂设计 | 5 |
| 1.6 主要研究内容 | 5 |
| 2 小米粉加工方式的比较与优化 | 7 |
| 2.1 前言 | 7 |
| 2.2 材料与方法 | 7 |
| 2.2.1 材料 | 7 |
| 2.2.2 仪器与设备 | 7 |
| 2.2.3 实验方法 | 8 |
| 2.3 结果分析 | 9 |
| 2.3.1 不同加工方式对糊化度的影响 | 9 |
| 2.3.2 不同加工方式对 WSI、WAI 的影响 | 10 |
| 2.3.3 不同加工方式对淀粉体外消化特性的影响 | 10 |
| 2.3.4 挤压膨化工艺参数对小米粉糊化度的影响 | 11 |
| 2.4 小结 | 14 |

| | |
|------------------------------|----|
| 3 小米营养粉配方工艺优化 | 15 |
| 3.1 前言 | 15 |
| 3.2 材料与方法 | 15 |
| 3.2.1 材料 | 15 |
| 3.2.2 仪器与设备 | 15 |
| 3.2.3 实验方法 | 15 |
| 3.3 结果分析 | 17 |
| 3.3.1 不同工艺因素对米粉感官品质的影响 | 17 |
| 3.3.2 多元回归模型的建立与显著性分析 | 20 |
| 3.3.3 响应面因素交互作用分析 | 21 |
| 3.3.4 工艺优化与验证实验 | 23 |
| 4 营养米粉的特性分析 | 24 |
| 4.1 前言 | 24 |
| 4.2 材料与方法 | 24 |
| 4.2.1 材料 | 24 |
| 4.2.2 仪器与设备 | 24 |
| 4.2.3 实验方法 | 24 |
| 4.3 结果分析 | 26 |
| 4.3.1 小米营养粉基本成分 | 26 |
| 4.3.2 溶解性与淀粉体外消化特性分析 | 26 |
| 4.3.3 米粉抗氧化能力分析 | 27 |
| 4.3.4 米粉微生物指标分析 | 29 |
| 4.4 小结 | 30 |
| 5 工厂设计 | 31 |
| 5.1 前言 | 31 |
| 5.2 厂址选择 | 31 |
| 5.2.1 选址原则与要求 | 31 |
| 5.2.2 选址范围 | 31 |
| 5.3 厂区总平面设计 | 31 |
| 5.3.1 厂区总平面设计基本原则 | 32 |

| | |
|---------------------------|----|
| 5.3.2 厂区总平面设计 | 32 |
| 5.4 工艺设计 | 32 |
| 5.4.1 原料及产品的质量标准 | 32 |
| 5.4.2 产品方案设计 | 32 |
| 5.4.3 生产工艺流程设计及要点说明 | 32 |
| 5.4.4 原辅物料及包材衡算 | 33 |
| 5.4.5 设备选型 | 35 |
| 5.4.6 水、电估算 | 36 |
| 5.4.7 车间劳动力计算 | 38 |
| 5.5 车间布置与设计 | 39 |
| 5.5.1 车间布置原则 | 39 |
| 5.5.2 车间设计 | 39 |
| 5.6 辅助部门设计 | 39 |
| 5.7 水源与废水处理 | 40 |
| 5.8 经济核算 | 40 |
| 5.8.1 固定资产总投资分析 | 40 |
| 5.8.2 生产成本分析 | 41 |
| 5.8.3 固定投资折旧分析 | 42 |
| 5.8.4 现金流量表 | 44 |
| 5.8.5 投资利润率的计算 | 44 |
| 5.8.6 投资回收期的计算 | 44 |
| 5.8.7 盈亏平衡点的计算 | 44 |
| 5.9 小结 | 44 |
| 6 结论与创新点 | 45 |
| 6.1 结论 | 45 |
| 6.2 创新点 | 45 |
| 参考文献 | 46 |
| 攻读学位期间取得的研究成果 | 53 |
| 致谢 | 54 |
| 附录 | 55 |
| 个人简况及联系方式 | 61 |

| | |
|------------------|----|
| 承诺书 | 62 |
| 学位论文使用授权声明 | 63 |

Contents

| | |
|--|----|
| Chinese Abstract | I |
| Abstract | II |
| 1 Introduction | 1 |
| 1.1 Overview of millet..... | 1 |
| 1.1.1 Introduction of millet..... | 1 |
| 1.1.2 Main ingredients of millet | 1 |
| 1.1.3 Health function of millet | 3 |
| 1.2 Research overview of millet products | 3 |
| 1.2.1 Research status of millet products..... | 3 |
| 1.2.2 Research status of nutritious millet flour..... | 3 |
| 1.3 Overview of extrusion research..... | 3 |
| 1.3.1 Extrusion puffing principle..... | 4 |
| 1.3.2 Effects on ingredients | 4 |
| 1.4 Overview of rice flour accessories | 5 |
| 1.5 Factory design | 5 |
| 1.6 Main research content..... | 5 |
| 2 Comparison and optimization of millet flour processing methods | 7 |
| 2.1 Foreword..... | 7 |
| 2.2 Materials and Methods | 7 |
| 2.2.1 Materials | 7 |
| 2.2.2 Equipment..... | 7 |
| 2.2.3 Experiment method | 8 |
| 2.3 Result analysis | 9 |
| 2.3.1 Influence of different processing methods on gelatinization degree..... | 9 |
| 2.3.2 Influence of different processing methods on WSI and WAI..... | 10 |
| 2.3.3 The effect of different processing methods on the in vitro digestion characteristics of starch | 10 |
| 2.3.4 Effects of extrusion process parameters on the gelatinization degree of | |

| | |
|---|-----------|
| millet flour | 11 |
| 2.4 Conclusions | 14 |
| 3 Millet nutritional powder formula process optimization..... | 15 |
| 3.1 Foreword..... | 15 |
| 3.2 Materials and Methods | 15 |
| 3.2.1 Materials | 15 |
| 3.2.2 Equipment..... | 15 |
| 3.2.3 Experiment method | 15 |
| 3.3 Result analysis | 17 |
| 3.3.1 Effects of different technological factors on sensory quality of millet flour | 17 |
| 3.3.2 Establishment and significance analysis of multiple regression model | 20 |
| 3.3.3 Response surface factor interaction analysis | 21 |
| 3.3.4 Process optimization and validation tests..... | 23 |
| 4 Characteristic analysis of nutritious millet flour..... | 24 |
| 4.1 Foreword..... | 24 |
| 4.2 Materials and Methods | 24 |
| 4.2.1 Materials | 24 |
| 4.2.2 Equipment..... | 24 |
| 4.2.3 Experiment method | 24 |
| 4.3 Result analysis | 26 |
| 4.3.1 Basic ingredients of millet nutrition powder | 26 |
| 4.3.2 Analysis of solubility and in vitro digestion characteristics of starch | 26 |
| 4.3.3 Analysis of antioxidant ability of millet flour | 27 |
| 4.3.4 Microbial index analysis of millet flour | 29 |
| 4.4 Conclusions | 30 |
| 5 Factory design | 31 |
| 5.1 Foreword..... | 31 |
| 5.2 Site selection..... | 31 |
| 5.2.1 Site selection principles and requirements | 31 |
| 5.2.2 Address range | 31 |

| | |
|---|-----------|
| 5.3 Factory general graphic design..... | 31 |
| 5.3.1 The basic principles of general layout design of the factory area | 32 |
| 5.3.2 Factory general graphic design..... | 32 |
| 5.4 Process design | 32 |
| 5.4.1 Quality standards for raw materials and products | 32 |
| 5.4.2 Product design | 32 |
| 5.4.3 Production process design and key points..... | 32 |
| 5.4.4 Raw and auxiliary materials and packaging material accounting | 33 |
| 5.4.5 Equipment selection | 35 |
| 5.4.6 Water and electricity estimates | 36 |
| 5.4.7 Shop workforce calculations | 38 |
| 5.5 Workshop layout and design..... | 39 |
| 5.5.1 Workshop layout principle..... | 39 |
| 5.5.2 Workshop design | 39 |
| 5.6 Auxiliary department design..... | 39 |
| 5.7 Water and wastewater treatment..... | 40 |
| 5.8 Economic accounting | 40 |
| 5.8.1 Analysis of total investment in fixed assets..... | 40 |
| 5.8.2 Production cost analysis | 41 |
| 5.8.3 Fixed investment depreciation analysis..... | 42 |
| 5.8.4 Cash flow statement | 44 |
| 5.8.5 Calculation of ROI | 44 |
| 5.8.6 Calculation of payback period..... | 44 |
| 5.8.7 Calculation of break-even point | 44 |
| 5.9 Conclusions | 44 |
| 6 Conclusions and innovations | 45 |
| 6.1 Conclusions | 45 |
| 6.2 Innovation..... | 45 |
| Reference | 46 |
| Research achievements | 53 |
| Acknowledgment | 54 |

| | |
|--------------------------------------|-----------|
| Appendix | 55 |
| Personal profiles | 61 |
| Letter of commitment..... | 62 |
| Authorization statement | 63 |

1 绪论

1.1 小米概述

1.1.1 小米简介

小米，也可称为粟，由谷子去皮后所得，是药食两用的作物，也是古老的农作物之一，有很强的耐受性，尤其是对于病虫害和干旱，因此小米曾经在生活中作为主要的粮食。小米在我国黄河流域起源，种植史已有近八千年之久^[1]。目前，我国小米种植的地区主要在东北与华北地区，如内蒙、山西、山东、陕西、河北、河南等^[2]。小米营养丰富，配比均衡，含有多种营养物质，如蛋白质、维生素、矿物质等^[3]。

1.1.2 小米主要成分

1.1.2.1 淀粉

小米是常见的杂粮作物，其淀粉含量与玉米、大米和小麦相比，低于这几类农作物。在小米淀粉中以两类淀粉为主，分为直链与支链淀粉。研究表明，直链淀粉含量会对蒸煮后的小米品质产生影响，当其含量比例低时，易与水结合，使米饭黏性大、黏性高^[4]。Qi^[5]等通过比较八种小米的淀粉成分，研究发现当小米的直链淀粉在 6.8% -26.8%之间时，其抗性淀粉的含量较低。刘辉^[6]等研究发现小米稳定性与膨胀力较佳时，其直链淀粉含量为 27%。

1.1.2.2 蛋白质和氨基酸

在小米的组成成分中，蛋白质含量较高，它是一种复合蛋白，不易致过敏，消化率高，并且高于一般作物，如小麦等^[7]，所以适合大多数人食用。小米蛋白是优质蛋白，含有多种人体必需且无法合成的氨基酸，如色氨酸、蛋氨酸等，氨基酸配比合理，达到了全价蛋白的标准^[8]。

1.1.2.3 脂肪

小米脂肪含量低，不同品种、不同产地的小米脂肪含量不同。小米的脂肪酸类型可以分为三类，且具有不同的生理作用。李红等^[9]研究了小米油，发现其中含有的不饱和脂肪酸偏高。现代研究也发现，不饱和脂肪酸具有多种功能，如平衡脂蛋白、

预防心血管病^[10]等作用。

1.1.2.4 维生素和矿物质

维生素是人体所需的营养素，在人体内无法合成，需要通过食物去获得。在小米中含有多种维生素，如维生素 A、D、C、E、B₁₂ 等，且含有常见粮食作物中缺少的胡萝卜素^[11]。

矿物质在小米中含量丰富，如钙、铁、锌、硒等，并且小米中的硒是有机硒^[12]。马占玲^[13]等通过运用 ICP-AES 法，测定小米等几种作物的矿物质并进行比较，研究表明，小米中含有 K、Na、Mg、Ca、Zn 等元素，且高于大米中的含量。小米中含有优良铁，其含量丰富，对人体内的血红蛋白可起到一定的功能作用^[14]，所以小米具有一定的补血功效，可与其他物质搭配食用。

1.1.2.5 膳食纤维

膳食纤维可以促进胃肠道蠕动、消化吸收，有利于防止动脉硬化以及预防心血管等疾病的发生。小米中含有大量的膳食纤维，现有研究发现在小米麸皮中富含大量优质膳食纤维^[15]。张荣等^[16]研究发现小米中含有可溶性和不可溶性膳食纤维，可溶性膳食纤维更优且有一定的营养保健功能。范冬雪等^[17]研究认为，小米因含有膳食纤维，可以帮助人体消化，并且因为含有的粗纤维含量低，基本不会对肠道产生刺激。

1.1.2.6 小米多酚

与其他农作物相比，小米含有丰富的多酚类物质。其抗氧化能力较高，对 DPPH 自由基、羟基自由基等均有着较好的清除能力^[18]。汪洋^[19]研究微波法提取小米米糠多酚，发现其具有降血脂功能。目前科学研究表明，小米多酚能控制人体的肝癌和乳腺癌细胞的增值^[20]，并且小米多酚能抑制多种致病菌的生长^[21]。

1.1.2.7 小米黄色素

小米中的黄色素是一种天然的类胡萝卜素^[22]，也是一种天然色素，安全无毒且性质稳定，在生产中作为天然着色剂被使用。小米黄色素具有抗氧化性，对自由基可起到清除作用^[11]，存在一定的生理功能与保健作用，可溶于有机溶剂，不溶于水。张晨萍等^[23]研究提取小米黄色素的方法，发现微波法辅助提取法的提取率高且稳定性好。

1.1.3 小米保健功能

小米营养价值高，各类营养物质含量丰富，营养素配比合理，且营养参数优于普通谷物，易于消化和吸收，是一种药食两用的食品。自古以来就有着“药食同源”的说法，并且小米煮粥食用后可补虚损、开肠胃。现代营养学研究也表明，其具有抗氧化、降糖、降脂、降压、抗肿瘤、保护肝脏等多种保健功能^[24]。目前也有对小米谷糠油进行的科学研究，发现其具有一定的功能性，如降血脂和抗氧化等作用^[25]。

1.2 小米产品研究概述

1.2.1 小米产品研究现状

目前市场小米产品种类繁多，郭琪^[26]研究了冷冻干燥法制备即食小米粥和小米粥油；陈守超等^[27]研究了小杂粮酸奶松饼工艺；张丽萍等^[28]研究了小米乳酸菌发酵饮料的加工工艺；郑燕丹等^[29]研究制备出小米婴幼儿营养辅食食品；任建军等^[30]研究了方便小米饭的加工工艺，品质优良；杨利玲等^[31]研究了小米燕麦粗杂粮面包工艺；Rathi. A 等^[32]开发了脱色小米通心粉，感官品质升高；徐向波等^[33]研究了小米黄油曲奇饼干。

1.2.2 营养米粉研究现状

目前市场上对营养米粉的研究逐渐深入，但是大多采用大米为主要原料，且大多是针对婴幼儿辅食与营养强化。目前对小米营养米粉的研究有：司俊玲^[34]等采用喷雾干燥技术，添加助干剂、稳定剂、速溶剂，优化了小米速溶粉的工艺；吴立根^[35]等研制的小米营养粉等；李响等^[36]研究了小米绿豆速溶粉的工艺；王效金等^[37]研究了小米山药混合粉的工艺；马丽媛等^[38]研究多种酶水解含有杂粮小米粉，研制出了口感好、营养高的杂粮米粉。

1.3 挤压膨化研究概述

目前米粉的加工技术有超微粉碎技术，如王秋^[39]研究超微粉碎技术在复合杂粮营养粉上的应用；挤压膨化技术，如曹家宝^[40]通过挤压膨化技术对婴幼儿膨化米粉的工艺进行研究；喷雾干燥技术，如吴阳^[41]研究喷雾干燥技术对米粉冲调性的改善；滚筒干燥技术，如胡秀娟^[42]研究运用滚筒干燥技术制备发芽糙米速食粉；等等其他

技术。基于挤压膨化技术操作方便，流程简易，加工后的产品营养保存率高，冲调性好等优点，本课题选用挤压膨化技术。

1.3.1 挤压膨化原理

挤压膨化技术是目前食品加工中常见技术，是将搅拌、蒸煮、压缩、膨化、混合、成型融为一体^[43]，可以实现高度自动化、连续化生产。挤压膨化机的类型可分为三种，在于螺杆的不同，包括单螺杆、双螺杆和三螺杆。它的工作原理是物料在机筒内受到摩擦与剪切力等作用，在此作用下物料被细化。随着温度与压力的升高，在高温高压的作用下，物料发生糊化，在模孔处受到强挤压力，使物料迅速膨胀。物料在经过挤压膨化后，它的营养成分的保存率高^[44]，易于人体消化，食用方便。

1.3.2 对成分的影响

1.3.2.1 对原料淀粉的影响

淀粉是主要的碳水化合物之一，对于许多农作物而言是重要的组成成分。研究表明，挤压加工会影响淀粉结构，使其在挤压过程中会发生改变。挤压过程中，淀粉在高温高压作用下会发生降解，使得糊精和还原糖增加。袁嘉渝等^[45]通过研究挤压膨化和烘烤工艺处理谷物原料，生产代餐粉，发现经过挤压膨化加工后，淀粉的结构发生变化且结构疏松，优于烘烤代餐粉。

1.3.2.2 对原料蛋白质的影响

蛋白质是一种在高温下不稳定的化合物，当原料被挤压时，其中的蛋白质会遭到破坏，使其变性，导致结构发生改变，然后蛋白质在一定作用下，发生聚集，分子质量增加，从而降低了原料蛋白质的溶解性^[48]。秦毅^[46]研究挤压膨化技术生产饲料，发现其蛋白质含量增加，脂肪含量降低，蛋白质溶解度降低。

1.3.2.3 对原料脂肪的影响

挤压能使脂肪从原料中释放，稳定性增加，改善产品的质量及口感。邱婷婷等^[47]研究发现，将三种黑色谷物进行挤压膨化处理，由于挤压膨化过程中高温高压作用，原料糊化，降低了产物中淀粉、脂肪等含量，使产物贮藏稳定性增大，溶解性增大。但是挤压膨化会影响脂肪的营养价值^[48]，使其产生一定程度的降低。

1.3.2.4 对原料风味的影响

原料在挤压膨化作用下会产生挥发性风味物质，风味物质对食品而言，可赋予其不同的风味。如周洋等^[49]通过比较烘烤、蒸汽热处理、挤压膨化三种方式，发现藜麦在挤压膨化后苦味减弱，且对挥发性风味物质的影响较大。陈焱芳等^[50]研究发现，糙米及发芽糙米经过挤压膨化处理后，整体风味强度均上升。而谢仲寅等^[51]研究发现，挤压后的小米粉比小米生粉风味好，原因是挤压膨化过程中产生较多的醛类等挥发性风味物质。

1.4 米粉辅料概述

木糖醇是一种天然存在的五碳糖醇^[52]，现代研究表明木糖醇具有降血糖等功能，可以在食品加工生产中代替蔗糖。西兰花是一种营养齐全的常见蔬菜，富含硫代葡萄糖苷、蛋白质、胡萝卜素、维生素及矿物质等^[53]。科学研究表明，西兰花对多种癌症、糖尿病等具有预防和治疗的作用。魔芋粉由魔芋加工获得，其主要的成分是葡甘聚糖，是一种可溶性膳食纤维^[54]，具有降压、降糖、减肥等多种功效。鸡胸肉是良好的动物蛋白质来源，于人体来说也是理想的健康食品，鸡胸肉的脂肪具有较高的营养价值，且含量较低。

1.5 工厂设计

工厂设计是实现产品生产加工的基础，可以分为两部分，工艺与非工艺设计。工艺设计的依据是产品生产工艺，生产工艺对设计提供数据支持，其内容主要包括：车间设计、方案设计、对设备的选择、原辅料等衡算以及经济核算等。而非工艺设计是依据工艺设计的要求去进行的，主要包括：厂区设计、环保、土建以及供电等方面的设计。

1.6 主要研究内容

本文通过对比不同的加工方式对加工后小米粉溶解度等指标的影响，确定米粉的加工方式，采用单因素试验优化米粉挤压膨化工艺，通过单因素与响应面试验进行小米营养粉配方工艺优化，并对小米营养粉进行基本成分、溶解性、淀粉体外消化特性以及抗氧化性等研究，最后在此工艺条件下进行小米营养粉的工厂设计，旨在为小米营养粉的开发与食品工厂设计的研究提供理论数据参考。主要研究内容如下：

1、米粉加工工艺实验。本研究以小米为原料，通过测定糊化度、溶解性以及淀粉体外消化特性的探究，比较蒸煮工艺、炒制工艺与挤压膨化工艺三种加工方式对小米粉重要指标的影响，确定较优的加工方式，通过单因素实验，确定较适加工参数。

2、营养米粉配方实验。采用挤压膨化技术，通过探究单因素（冲调温度和木糖醇、西兰花粉、鸡胸肉粉、魔芋粉的添加量）对感官评分的影响，再进行响应面优化实验，得出最优营养米粉配方。

3、营养米粉特性分析。对成品小米营养粉的基本成分、溶解性、淀粉体外消化特性、微生物指标及抗氧化性进行探究。

4、营养米粉生产工厂设计。根据小米营养粉的工艺流程，从厂区选址、方案设计、车间设计、设备选型以及经济分析等方面，设计出年产 300 吨的小米营养粉的工厂设计。

2 小米粉加工方式的比较与优化

2.1 前言

小米，又称为粟，北方称谷子，谷子脱壳为小米，是亚洲广泛种植的一类谷物作物，在中国北方半干旱地区具有特殊的意义^[55]。小米富含营养物质，如蛋白质、维生素等^[56-57]，营养参数优于普通谷物，小米营养配比合理^[58]，利于人体消化吸收。目前小米的加工方式有滚筒干燥、蒸煮、炒制和挤压膨化等，小米的蒸煮通常用于家庭式烹饪^[59-60]，而炒制工艺在小米加工中并不常见。挤压膨化技术是常见的谷物食品加工技术，也是一种高温短时杀菌工艺^[61]，在食品工业中发挥重要作用，经过挤压膨化后得到的产物，因为其独特风味和方便食用性备受欢迎。

现以小米为原料，通过探究糊化度、WSI、WAI以及淀粉体外消化特性，比较蒸煮工艺、炒制工艺与挤压膨化工艺三种加工方式，得出挤压膨化工艺更优。通过单因素实验，研究挤压温度、水分含量、进料速度、螺杆转速对挤压膨化小米粉糊化度的影响，得出较优的小米粉挤压膨化参数值。

2.2 材料与方法

2.2.1 材料

小米：晋谷 21 号，山西省榆社县，由山西五福农产品开发有限公司提供；玉米粉：市售，晋之坊。

2.2.2 仪器与设备

表 2.1 仪器设备表

Table 2.1 Equipment list

| 名称 | 型号 | 公司 |
|----------|---------|-----------------|
| 不锈钢蒸锅 | T1 | 美的集团股份有限公司 |
| 紫外分光光度计 | UV-5100 | 上海元析仪器有限公司； |
| 挤压膨化机 | DS32-II | 济南赛信机械有限公司 |
| 高速多功能粉碎机 | 800Y | 永康市铂欧五金制品有限公司 |
| 电热烤箱 | — | 广州市钰麦烘焙设备有限公司 |
| 离心机 | SC-3614 | 安徽中科中佳科学仪器有限公司 |
| 水浴锅 | — | 上海博讯实业有限公司医疗设备厂 |

2.2.3 实验方法

2.2.3.1 工艺流程

通过预实验，得到工艺如下：

蒸煮工艺：小米挑选、清洗——隔水蒸 30 min——烘烤(150℃， 1.5 h)——粉碎——过筛（80 目）——密封包装——成品

炒制工艺：小米清洗——小火炒制 40 min——粉碎——过筛（80 目）——密封包装——成品

挤压膨化工艺：小米——粉碎——过筛（60 目）——与玉米粉配比（1:1）——调节水分——挤压膨化（膨化温度： I 区 70℃， II 区 100℃）——85℃干燥 2 h——粉碎过筛（80 目）——密封包装——成品

实验时，将蒸煮与炒制工艺得到的小米粉与相同条件下挤压得到的纯玉米粉同比例混合。

2.2.3.2 单因素实验

研究挤压膨化参数：膨化温度、水分含量、螺杆转速、进料速度，对小米粉糊化度的影响，单因素试验物料水分 8%、10%、12%、14%、16%，螺杆转速 14 Hz、18 Hz、22 Hz、26 Hz、30 Hz，进料速度分别为 10 Hz、15 Hz、20 Hz、25 Hz、30 Hz，挤压温度 140、150、160、170、180℃。

2.2.3.3 水溶性指数（water solubility index, WSI）与吸水性指数（water absorption index, WAI）测定

参考 Benhur 等^[62]的方法，稍作改变，准确称取样品 2.5 g (m_0)，置于离心管中，加入 30 mL 蒸馏水，摇晃混匀，摇床振荡（275 r/min，30 min），4500 r/min 离心 15 min，将上清液与沉淀分离。称量沉淀质量 (m_1)，将上清液倒入培养皿中 (m_2)，于 100℃烘箱中，干燥，得恒定质量 (m_3)。计算公式如 (2.1) ~ (2.2) 所示，

$$\text{WSI}/\% = (m_3 - m_2) / m_0 \times 100 \quad (2.1)$$

$$\text{WAI}/(\text{g/g}) = m_1 / m_0 \quad (2.2)$$

2.2.3.4 糊化度测定

酶水解法^[63]测定。

2.2.3.5 淀粉体外消化特性的测定

参考 Englyst^[64]等和赵志浩等^[65]的方法，稍作改变。于锥形瓶中，加入米粉 0.5 g，10 mL 的 0.2 mol/L、pH 5.2 醋酸缓冲液，10 mL 300 U/mL 的猪胰 α -淀粉酶，以及 50 μ L 10000 U/mL 糖化酶，混匀，摇床振荡（37°C、170 r/min）。待反应 0、20、120 min 后，各取 1 mL，用二硝基水杨酸法测定其还原糖含量。计算公式如（2.3）~（2.5），

$$\text{RDS}/\% = [(G_{20} - \text{FG}) \times 0.9] / \text{TS} \times 100 \quad (2.3)$$

$$\text{SDS}/\% = [(G_{120} - G_{20}) \times 0.9] / \text{TS} \times 100 \quad (2.4)$$

$$\text{RS}/\% = 100\% - \text{RDS} - \text{SDS} \quad (2.5)$$

式中： G_{20}/mg 、 G_{120}/mg 、 FG/mg ——分别为消化 20 min、120 min、0 min 后样品溶液中还原糖的质量；

TS/mg ——样品总淀粉的质量；

RDS 、 SDS 、 $\text{RS}/\%$ ——分别为快消化淀粉、慢消化淀粉、抗性淀粉比例。

2.2.3.6 数据处理

本实验中涉及的实验做 3 次平行，结果用平均值 \pm 标准偏差表示，运用 Origin 绘图。

2.3 结果分析

2.3.1 不同加工方式对糊化度的影响

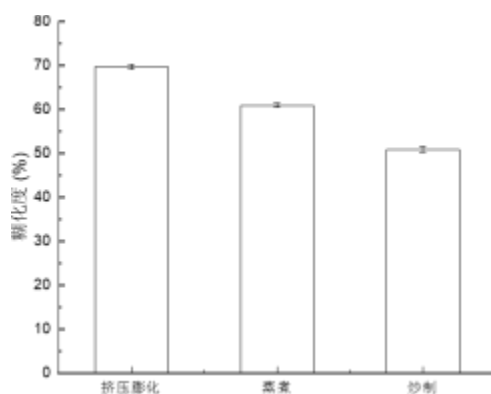


图 2.1 不同加工方式对糊化度的影响

Fig. 2.1 The influence of different processing methods on gelatinization

糊化度是指淀粉糊化后，糊化淀粉与总淀粉的比例^[66]，是用来衡量谷物类食品熟化程度的指标，糊化后的淀粉与酶之间，易反应，有利于人体的消化吸收，对食

品的品质和营养价值^[67]有所影响。如图 2.1 所示，三种加工方式对糊化度的影响是挤压膨化>蒸煮>炒制，其原因可能是因为在挤压膨化过程中，是处于高温高压条件下，在此条件下，水分与物料中淀粉颗粒结合，破坏淀粉的氢键，使得淀粉结构发生变化，淀粉分子间结构遭到破坏，米粉中淀粉发生膨胀，从而达到糊化。结果表明，经过挤压膨化处理后的米粉熟化程度最高，优于其他两种加工方式。

2.3.2 不同加工方式对 WSI、WAI 的影响

吸水性指数（WAI）和水溶性指数（WSI）可以用来作为米粉类或冲调类产品衡量溶解性的指标^[68]。WAI 可反映样品的持水性能；WSI 可以反映样品在水中的溶解能力，也可反映淀粉颗粒降解程度^[69]。如图 2.2 所示，挤压膨化处理后的米粉的 WAI 和 WSI 高于炒制与蒸煮加工工艺，原因可能是因为在挤压膨化过程中，物料在机筒类受到高温高压等作用，破坏了淀粉大分子的结构，使得淀粉糊化，使得挤压后的米粉与水结合能力增强，并且由于糊化，淀粉颗粒降解转化出可溶性物质增多，因此膨化后的米粉 WAI、WSI 数值高于其他两种加工方式。

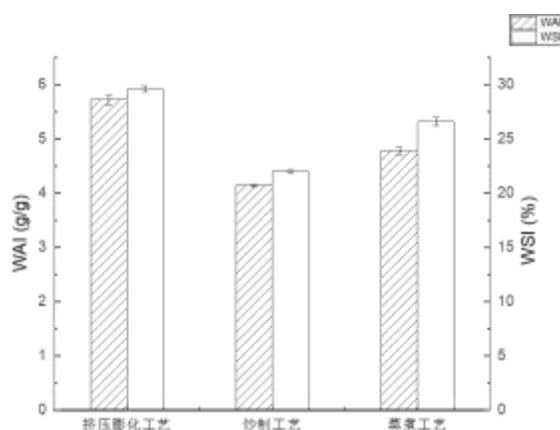


图 2.2 不同加工方式对 WSI、WAI 的影响

Fig. 2.2 The influence of different processing methods on WSI and WAI

2.3.3 不同加工方式对淀粉体外消化特性的影响

淀粉可以为人体提供能量，依据其在人体内的消化速率，可将其分为慢消化淀粉（SDS），快消化淀粉（RDS）和抗性淀粉（RS）^[70]。SDS 在人体内分解过程很缓慢，对机体血糖水平影响小，RDS 能迅速水解为葡萄糖为机体快速升高血糖，RS 是一种功能性淀粉，不能被酶解在小肠中，是一种纤维，对肠道健康有利，还可以

增加饱腹感^[69]。由图 2.3 可知，RDS 比例是挤压膨化>炒制>蒸煮；SDS 比例是蒸煮>炒制>挤压膨化；RS 比例是炒制>蒸煮>挤压膨化。其原因可能是蒸煮与炒制加工后的米粉中淀粉的糊化程度低于挤压膨化，糊化程度增大，糊化后的淀粉水解速率也就变大，并且由于挤压膨化过程中的热效应作用，淀粉结构被破坏，被酶水解后，分解的葡萄糖等物质含量增大，因此膨化后的米粉 RDS 比例高于蒸煮与炒制的米粉，而 SDS 比例低于其他两种，表明膨化后的米粉更有利于人体的消化吸收。

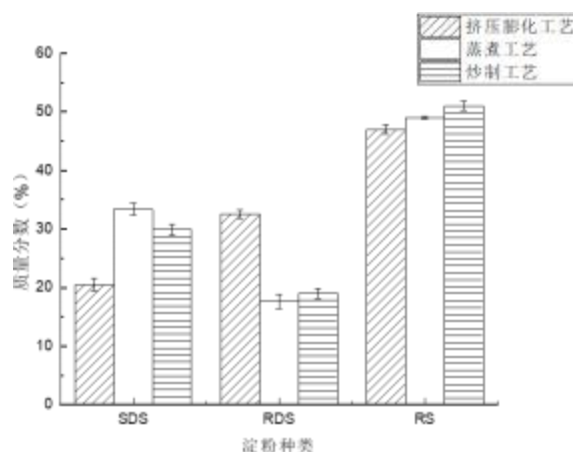


图 2.3 不同加工方式对淀粉体外消化特性的影响

Fig. 2.3 The effect of different processing methods on the in vitro digestibility of starch

2.3.4 挤压膨化工艺参数对小米粉糊化度的影响

2.3.4.1 膨化温度对糊化度的影响

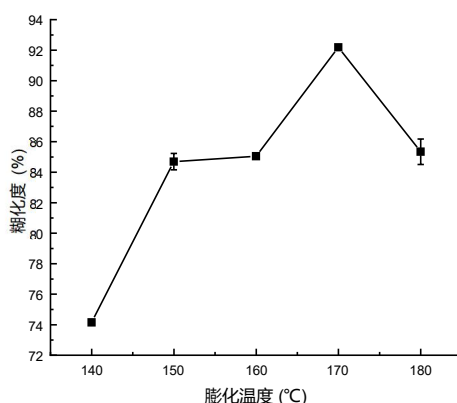


图 2.4 膨化温度对糊化度的影响

Fig. 2.4 Influence of puffing temperature on gelatinization degree

从图 2.4 可以看出，随着膨化温度的升高，糊化度不断增加。在膨化温度 170℃ 时，糊化度达到最大值(92.18%)，超过 170℃，糊化度又开始下降。这可能是在膨化温度 140~170℃ 范围内，随着温度的升高，水分子更加容易渗入到淀粉大分子的结构中，导致淀粉糊化越完全；但是若膨化温度过高，物料中淀粉和蛋白质等营养物质被过度降解，挤出物发生褐变，甚至碳化结焦，堵塞模孔。因此，在本试验条件下米粉挤压膨化时最佳膨化温度为 170℃。

2.3.4.2 水分含量对糊化度的影响

从图 2.5 可以看出，随着物料水分含量的不断上升，米粉的糊化度的增长呈上升趋势，当水分含量为 10% 时达到最大值(94.98%)，然后当水分含量持续增大，糊化度反而减小。这可能主要是由于物料本身水分含量有限，当含量增大时，小米中淀粉、蛋白质等主要营养物质的吸收水分的量增大，并且因为高温高压下的蛋白质变性，使得物料的粘稠度增加，导致机筒内，物料在机筒内停留时间变长，所以糊化度升高。但是当物料水分含量高于 10% 时，由于物料的水分含量较高，物料中的水分会降低物料在机筒中的摩擦作用，物料在机筒内未能被充分糊化，糊化度就变低。因此，在本试验条件米粉挤压膨化时最佳水分含量为 10%。

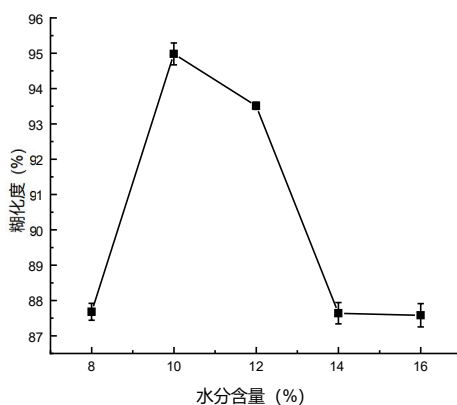


图 2.5 水分含量对糊化度的影响

Fig. 2.5 The effect of moisture content on gelatinization degree

2.3.4.3 螺杆转速对糊化度的影响

从图 2.6 可以看出，螺杆转速在 14 Hz—26 Hz 范围内时，米粉的糊化度呈现上升趋势，当螺杆转速为 26 Hz 时，糊化度达到最大值(89.7%)，而转速超过 26 Hz 时，

糊化度则呈现下降趋势。这可能是因为转速较低时，物料在机筒内所受的作用力小，当螺杆转速增加，物料在机内停留时间减少，压力增大，有利于增加物料与螺杆机筒壁的剪切和摩擦作用，物料在强烈的挤压作用下，使淀粉分解与糊化过程快。但是如果转速过大，物料在机筒内停留的时间变短，受热时间变短，从而使淀粉的糊化不完全，糊化度就低。因此，在本试验条件下最佳的螺杆转速为 26 Hz。

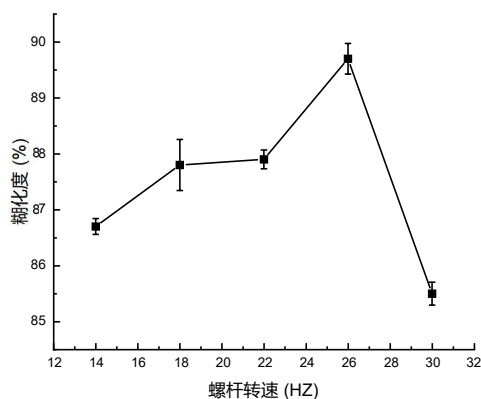


图 2.6 螺杆转速对糊化度的影响

Fig.2.6 Influence of screw speed on gelatinization degree

2.3.4.4 进料速度对糊化度的影响

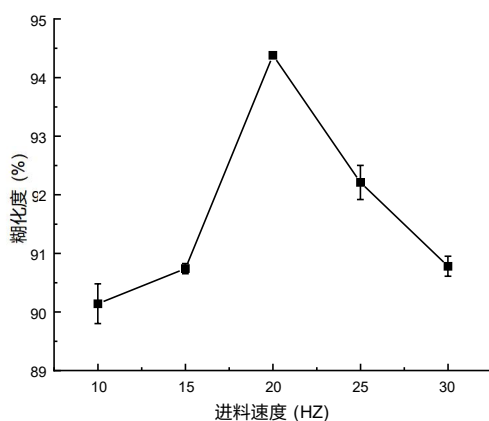


图 2.7 进料速度对糊化度的影响

Fig. 2.7 Influence of feed speed on gelatinization degree

从图 2.7 可以看出，在进料速度 15 Hz—20 Hz 范围内，糊化度随速度的增加而

增加，在速度 20 Hz 时，达到最大值(94.38%)，进料速度超过 20 Hz，糊化度随速度的增加而下降。这主要是在其他条件不变的情况下，进料量增加，会使机体内被物料充满程度增大，压力也会随之增大。若是物料的进料速度过低，机筒类压力过小，就会导致产品得不到完全膨化，糊化度就低。加大进料速度，就会增大物料在机筒中的作用力，但是过快的进料速度会造成进料口堵塞、淀粉碳化以及出料困难等问题。因此，在本试验条件下最佳的螺杆转速为 20 Hz。

2.4 小结

(1) 本文通过测定糊化度、WAI、WSI 以及淀粉的体外消化特性指标，来比较蒸煮、炒制与挤压膨化工艺三种加工方式，结果表明挤压膨化处理后的小米粉糊化度、WAI、WSI、快消化淀粉比例均高于蒸煮和炒制工艺，而慢消化淀粉比例低于蒸煮和炒制工艺，从而说明挤压膨化更有利于机体对米粉的消化吸收。

(2) 通过实验确定了小米挤压膨化的较优参数：水分含量 10%、螺杆转速 26 Hz、挤压温度 170℃、进料速度 20 Hz，在此参数下得到的米粉较佳。

3 小米营养粉配方工艺优化

3.1 前言

现如今，小米作为一种滋补食品备受青睐，各式各样的小米深加工产品出现在日常生活中，如小米锅巴^[71]、婴幼儿辅食、小米营养粉^[72]等。其中小米速溶加工产品因其营养丰富、种类多、原料利用率高等优点^[73-74]，受到众多人们的喜爱，具有一定的市场前景。

现使用木糖醇代替传统蔗糖，加以魔芋粉可调节人体胃肠环境，添加富含蛋白质等营养成分的西兰花粉和鸡胸肉粉，增加米粉的营养含量，探究适宜的冲泡温度。采用单因素与响应面优化实验，得出最优米粉配方。

3.2 材料与方法

3.2.1 材料

小米：山西五福农产品开发有限公司提供；木糖醇：浙江华康药业股份有限公司；西兰花粉：麦顿食材；魔芋粉：亳州市华芝堂生物科技有限公司；玉米粉、鸡胸肉购于太原市美特好超市。

3.2.2 仪器与设备

表 3.1 仪器设备表

Table 3.1 Equipment list

| 名称 | 型号 | 公司 |
|----------|---------|---------------|
| 挤压膨化机 | DS32-II | 济南赛信机械有限公司 |
| 高速多功能粉碎机 | 800Y | 永康市铂欧五金制品有限公司 |
| 电热烤箱 | — | 广州市钰麦烘焙设备有限公司 |

3.2.3 实验方法

3.2.3.1 单因素实验

称取小米米粉 10 g，将木糖醇的添加量按 5%、10%、15%、20%、25%的比例进行添加，鸡胸肉粉、魔芋粉、西兰花粉的添加量按 1%、2%、3%、4%、5%的比

例分别进行添加，以及冲调温度按 50、60、70、80、90℃进行冲泡，以感官评价为指标，进行试验。

其中鸡胸肉粉由鸡胸肉制作而成， 制作工艺：鸡胸肉——清洗——切丁——烘烤(140℃， 1h)——粉碎过筛（80 目）——鸡胸肉粉

3.2.3.2 响应面实验

在单因素实验的基础上确定木糖醇的添加比例与冲调温度，选择鸡胸肉添加量、魔芋粉添加量和西兰花粉添加量 3 个因素，设计 3 因素 3 水平的响应面实验，并对实验结果进行分析， 确定小米营养粉的最佳工艺。

表 3.2 Box-Behnken 设计因素水平表

Table 3.2 Box-Behnken design factor level table

| 编码值 | A 鸡胸肉粉添加量/% | B 西兰花粉添加量/% | C 魔芋粉添加量/% |
|-----|-------------|-------------|------------|
| -1 | 3.5 | 2.5 | 1.5 |
| 0 | 4 | 3 | 2 |
| 1 | 4.5 | 3.5 | 2.5 |

3.2.3.3 感官评价

选择十位感官评价人员， 年龄在 20-40 岁之间。从滋味、气味、 色泽、 组织状态和冲调性五个方面对冲调后的米粉进行评分， 每项评分为 20 分。最终感官评分取平均值， 标准如表。

表 3.3 感官评定标准表

Table 3.3 Sensory evaluation standard table

| 项目 | 特征 | 得分 |
|------------|----------------|-------|
| 滋味（20 分） | 甜味适中， 口感细腻 | 20—15 |
| | 甜味较高或较低， 口感一般 | 14—8 |
| | 甜味不纯正， 口感粗糙 | 7—1 |
| 气味（20 分） | 有明显香味， 无异味 | 20—15 |
| | 香气平淡， 无异味 | 14—8 |
| | 无香味或有其他异味 | 7—1 |
| 色泽（20 分） | 色泽均匀 | 20—15 |
| | 色泽一般 | 14—8 |
| | 色泽差 | 7—1 |
| 组织状态（20 分） | 无结块， 流动性好 | 20—15 |
| | 少量结块， 流动性一般 | 14—8 |
| | 较多结块， 流动性较差 | 7—1 |
| 冲调性（20 分） | 吸水性好， 易冲调， 无结块 | 20—15 |
| | 吸水较慢， 冲调有少量结块 | 14—8 |
| | 吸水慢， 冲调后结块较多 | 7—1 |

3.2.3.4 数据处理

实验结果以平均值表示，运用 Origin 8.5 与 Design-Expert 软件绘制与分析数据。

3.3 结果分析

3.3.1 不同工艺因素对米粉感官品质的影响

选择冲调温度、木糖醇、鸡胸肉粉、西兰花粉、魔芋粉添加量 5 个因素，进行单因素实验，感官评定结果如下。

3.3.1.1 木糖醇添加量对感官评价得分的影响

由图 3.1 可以看出，当木糖醇添加量处于 5%-20% 时，米粉的感官评分随木糖醇添加量增大而增大，当到达最高值 20% 时，再添加过量的木糖醇，米粉的感官评分随之降低。原因是添加量太少，米粉的滋味过于清淡，添加量过多，滋味太甜，因此当木糖醇添加量为 20% 时，小米粉甜味纯正，无不良后味，口感好，感官评分最高。

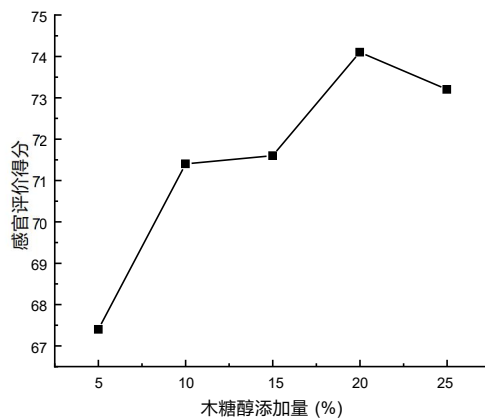


图 3.1 木糖醇添加量对小米粉感官评分的影响

Fig. 3.1 Effects of xylitol supplemental level on sensory score of millet flour

3.3.1.2 西兰花粉添加量对感官评价得分的影响

由图 3.2 可以看出，西兰花添加量处于 1%-2% 之间时，感官评价得分数值相近，下降趋势略缓，而后随着西兰花添加量的增加，在添加量 3% 时，感官评价得分达到最高值，后随着添加量增大呈下降趋势，因此可以得出西兰花粉的最佳添加量为 3%。

时，感官得分较佳，添加量过多，会使米粉的颜色较绿，并使米粉增加一些苦味，而影响产品的色泽和滋味。

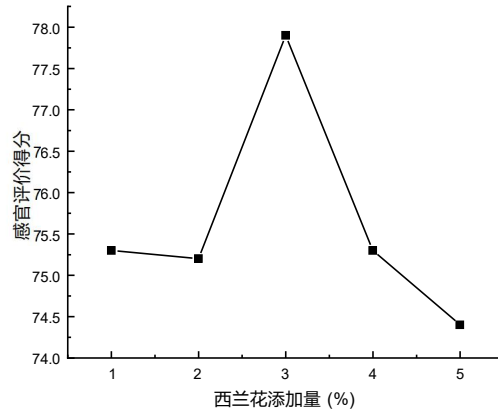


图 3.2 西兰花添加量对小米粉感官评价得分的影响

Fig. 3.2 Effects of addition amount of broccoli on sensory evaluation score of millet flour

3.3.1.3 鸡胸肉粉添加量对感官评价得分的影响

由图 3.3 可以看出，当鸡胸肉粉添加量增加时，感官评分呈现先增后降的趋势，这可能是由于鸡胸肉粉本身含有肉腥味，当添加量达到一定值时会体现出来，因此鸡胸肉粉的最佳添加量为 4% 时感官得分较佳，添加量过多，会使米粉的肉味较重，以至于对小米粉的气味和滋味产生影响。

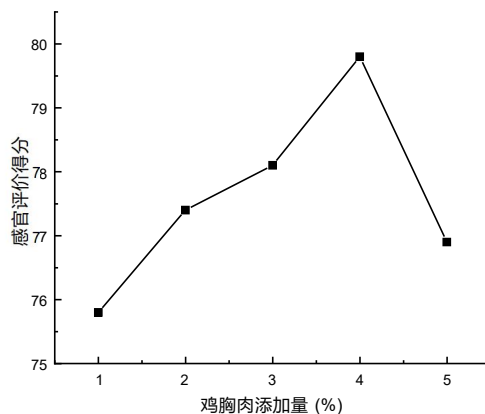


图 3.3 鸡胸肉粉添加量对小米粉感官评价得分的影响

Fig. 3.3 Effects of chicken breast meal supplementation on the sensory evaluation score of millet flour

3.3.1.4 魔芋粉添加量对感官评价得分的影响

由图 3.4 可以看出，感官评分随着魔芋粉添加量的增大，呈现先增后降的趋势，可能时因为魔芋粉本身具有亲水能力，溶于水后黏度很高，可以起到稳定剂的效果，但添加量过多，会导致米粉冲调时易结块、浓稠，影响产品的口感与冲调性。因此魔芋粉的最佳添加量为 2%，此时米粉的气味和滋味醇厚，色泽和溶解度较好，

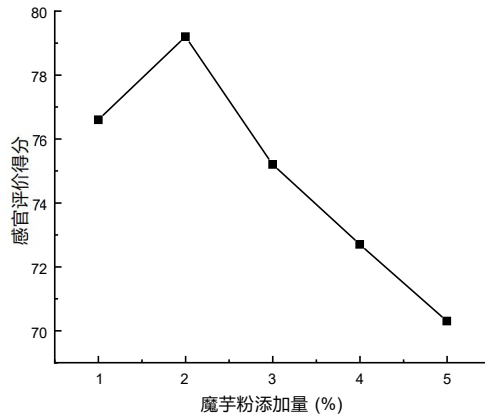


图 3.4 魔芋粉添加量对小米粉感官评价得分的影响

Fig.3.4 Effects of konjac powder supplementation on sensory evaluation score of millet flour

3.3.1.5 冲调温度对感官评价得分的影响

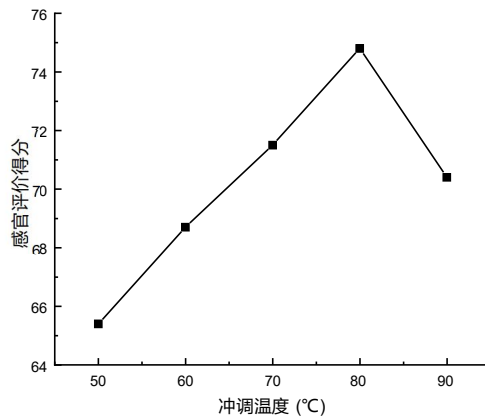


图 3.5 冲调温度对小米粉感官评价得分的影响

Fig. 3.5 Effects of brewing temperature on sensory evaluation scores of millet flour

由图 3.5 可知，当冲调温度从 50℃到 80℃时，感官评分随着冲调温度的升高，呈上升趋势，当冲调温度高于 80℃时，感官评分开始降低，其原因是当冲调米粉的水温过高，会使部分米粉迅速糊化，产生结块，且产生结块严重的现象；而冲调温

度过低，则会导致米粉中的淀粉不能糊化或糊化不完全，产生分层现象，因此，米粉冲调水温选择 80℃为宜。

3.3.2 多元回归模型的建立与显著性分析

利用响应面软件的 BBD 中心组合设计，获得小米营养粉工艺的三因素三水平试验设计和结果，如表 3.4 所示。对实验结果进行多元回归拟合分析，建立鸡胸肉粉、西兰花粉及魔芋粉 3 个因素对小米营养粉感官评分影响的二次多项式回归方程如下：感官评价平均分

$$Y=+83.30+0.75*A+0.21*B+0.59*C+1.08*A*B-0.025*A*C+0.050*B*C-2.45*A^2-1.83*B^2-1.52*C^2。$$

表 3.4 响应面实验设计及结果

Table 3.4 Response surface test design and results

| 实验号 | 配方参数 | | | 响应值 |
|-----|-------------|-------------|------------|--------|
| | A 鸡胸肉粉添加量/% | B 西兰花粉添加量/% | C 魔芋粉添加量/% | 感官评分/分 |
| 1 | 0 | 1 | -1 | 79.4 |
| 2 | -1 | 1 | 0 | 77.6 |
| 3 | 1 | -1 | 0 | 78.3 |
| 4 | 0 | 1 | 1 | 80.6 |
| 5 | -1 | 0 | -1 | 77.9 |
| 6 | 1 | 0 | -1 | 79.5 |
| 7 | 0 | -1 | -1 | 79.4 |
| 8 | -1 | 0 | 1 | 79.2 |
| 9 | 0 | 0 | 0 | 82.4 |
| 10 | 0 | 0 | 0 | 83.5 |
| 11 | 0 | 0 | 0 | 83.7 |
| 12 | 1 | 0 | 1 | 80.7 |
| 13 | 0 | -1 | 1 | 80.4 |
| 14 | 1 | 1 | 0 | 81.2 |
| 15 | 0 | 0 | 0 | 83.4 |
| 16 | -1 | -1 | 0 | 79 |
| 17 | 0 | 0 | 0 | 83.5 |

由表 3.5 可知，回归方程模型极显著 ($p < 0.0001$)，失拟项 $p = 0.8340 > 0.05$ ，不显著，所以该模型可行。由表可知，相关系数 $R^2 = 0.9811$ ， $R^2_{Adj} = 0.9568$ ， $R^2_{Pred} = 0.9222$ ，说明该模型拟合效果好。然后通过回归方程，可以比较三个因素的响应主次，结果表明，影响米粉感官评分的主次顺序是 $A > C > B$ ，即鸡胸肉粉添加量 $>$ 魔芋粉添加量 $>$ 西兰花粉添加量。从表中可以看出因素 A、C，即鸡胸肉粉与魔芋粉添加量，对米粉感官评分差异极显著 ($p < 0.01$)， A^2 、 B^2 、 C^2 对米粉的感官评分也差异极显著 ($p < 0.01$)，而交互项 AB 对小米营养粉的感官评分影响极显著 ($p < 0.01$)，交互项 CD、交互项 BD 以及因素 B 对感官评分无显著性影响。

表 3.5 回归模型方差分析

Table 3.5 Analysis of variance of regression model

| 来源 | 平方和 | 自由度 | 均方 | F 值 | p 值 | 显著性 |
|-------|----------|-----|----------|--------|----------|-----|
| 模型 | 66.81 | 9 | 7.42 | 40.36 | < 0.0001 | ** |
| A | 4.50 | 1 | 4.50 | 24.47 | 0.0017 | ** |
| B | 0.36 | 1 | 0.36 | 1.96 | 0.2038 | |
| C | 2.76 | 1 | 2.76 | 45.01 | 0.0061 | ** |
| AB | 4.62 | 1 | 4.62 | 25.13 | 0.0015 | ** |
| AC | 2500E-03 | 1 | 2500E-03 | 0.014 | 0.9105 | |
| BC | 0.010 | 1 | 0.010 | 0.054 | 0.8223 | |
| A^2 | 25.27 | 1 | 25.27 | 137.41 | < 0.0001 | ** |
| B^2 | 14.02 | 1 | 14.02 | 76.25 | < 0.0001 | ** |
| C^2 | 9.79 | 1 | 9.79 | 53.24 | < 0.0002 | ** |
| 残差 | 1.29 | 7 | 0.18 | | | |
| 失拟 | 0.23 | 3 | 0.076 | 0.29 | 0.8340 | |
| 纯误差 | 1.06 | 4 | 0.26 | | | |
| 总和 | 68.10 | 16 | | | | |

注: **差异极显著 ($p < 0.01$); *差异显著 ($0.01 < p < 0.05$)

3.3.3 响应面因素交互作用分析

用响应面软件可以得到的不同因素的响应面分析图，如图 3.6-3.8。由图可知，在交互相对感官评价评分的影响中，鸡胸肉粉添加量与西兰花粉添加量之间交互作

用明显，而西兰花粉与魔芋粉以及魔芋粉与鸡胸肉粉添加量之间交互作用并不明显，此结果与方差分析结果一致。

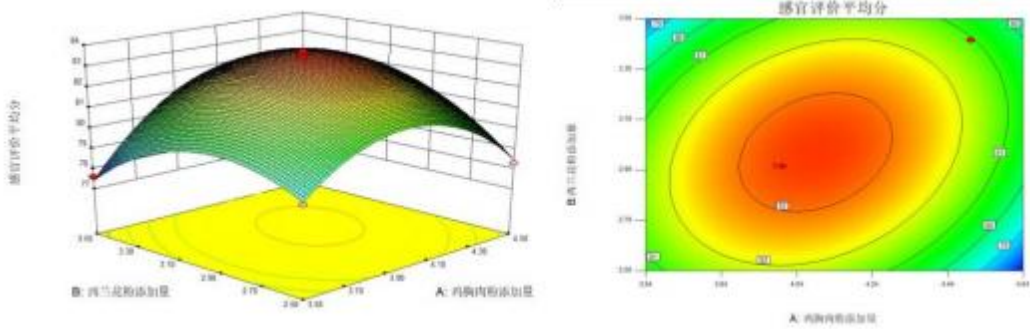


图 3.6 西兰花粉添加量与鸡胸肉粉添加量对小米粉感官评价得分响应面图与等高线图

Fig. 3.6 Response surface map and contour map of the sensory evaluation scores of millet flour with the addition of broccoli powder and chicken breast powder

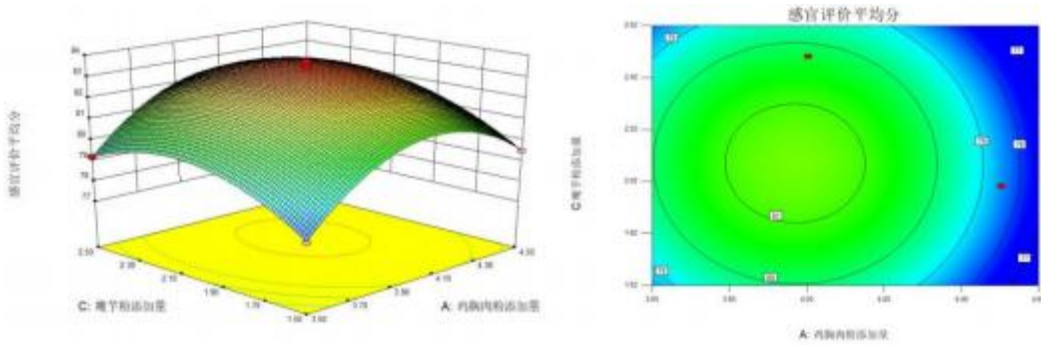


图 3.7 魔芋粉添加量与鸡胸肉粉添加量对小米粉感官评价得分响应面图与等高线图

Fig. 3.7 Response surface map and contour map of the sensory evaluation scores of millet flour with the addition of konjac flour and chicken breast meat

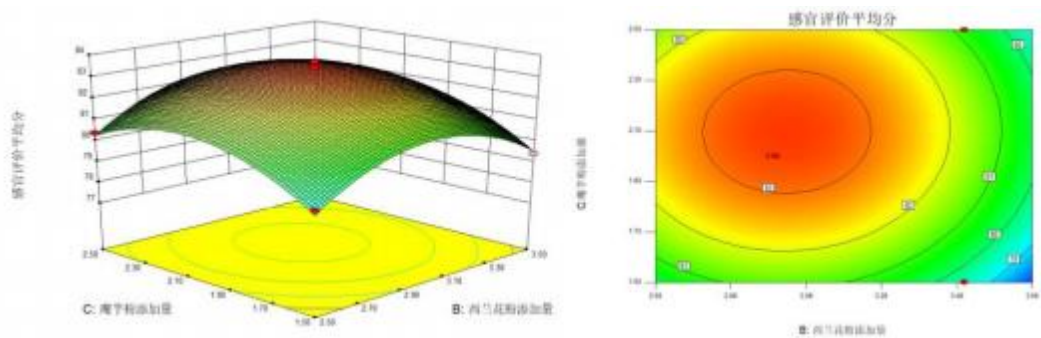


图 3.8 魔芋粉添加量与西兰花粉添加量对小米粉感官评价得分响应面图与等高线图

Fig. 3.8 Response surface map and contour map of the sensory evaluation scores of millet flour with the addition of konjac flour and broccoli powder

3.3.4 工艺优化与验证实验

通过单因素与响应面实验，得到小米营养粉感官评分最优的参数：冲调温度 80℃，木糖醇添加量 20%、西兰花粉添加量 3.06%、魔芋粉添加量 2.10%、鸡胸肉粉添加量 4.09%，此时感官评分为 83.435。为了便于实际操作，将工艺条件修改为木糖醇添加量 20%、西兰花粉添加量 3%、鸡胸肉粉添加量 4 %、魔芋粉添加量 2%，冲调温度 80℃，在此工艺参数进行验证实验，3 次重复。实际测得小米营养粉的感官评分为 (83.067 ± 1.026) 分，与理论预测值吻合率为 99.5%。这说明该响应面模型优化得到小米营养粉的工艺参数可靠，具有实际意义。

4 营养米粉的特性分析

4.1 前言

小米粉在添加辅料后其营养成分更全面，口感更好，并且小米富含维 E、超氧化物歧化酶与多酚物质等^[76]，而辅料中西兰花粉也含有丰富的维生素，尤其是维 C，都具有强抗氧化活性。本章对成品小米营养粉的基本成分、溶解性、淀粉体外消化特性、抗氧化性以及微生物指标进行探究，测定其营养成分、溶解性、微生物指标和对 DPPH 自由基、羟基自由基、ABTS+· 自由基的清除能力以及总还原力。

4.2 材料与方法

4.2.1 材料

材料：与 3.2.1 中材料一致。试剂：抗坏血酸（VC），天津市天新精细化工开发中心，>99.7%；邻二氮菲，天津市光复科技发展有限公司；DPPH，ALDRICH 公司；ABTS，北京索莱宝科技有限公司；过硫酸钾，天津市光复科技发展有限公司；三氯乙酸，天津市大茂化学试剂厂；浓硫酸，鑫顺源科贸有限公司。

4.2.2 仪器与设备

与 2.2.2 仪器与设备一致。

4.2.3 实验方法

4.2.3.1 基本成分测定

锌 GB 5009.14-2017（第一法）；硒 GB 5009.93-2017（第一法）；膳食纤维 GB 5009.88-2014；蛋白质 GB 5009.5-2016（第一法）；脂肪 GB 5009.6-2016。

4.2.3.2 溶解性测定

参考刘芳宏^[77]的方法稍作修改，取一定量的用 80℃ 水冲调后的均匀米糊 W_0 g，置于离心管（ W_1 ）中，在 3000 r/min 的条件下离心 15 分钟，弃去上清液，得到离心管与沉淀重量 W_2 ，将其置于 100℃ 干燥箱中干燥 4 小时，得到离心管与沉淀干重 W_3 ，公式如下，

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/077065013061006101>