

2022 届博（硕）士学位论文

小米太谷饼研制及体外功能特性研究

二〇二二年六月

中文摘要

小米作为营养价值高，保健功能强的谷物之一，开发的产品有小米饼干、小米发酵食品、小米饮料、小米锅巴等。随着人们生活水平的提高，人们更关注具有功能成分的食品。

太谷饼是深受人们喜爱的山西传统食品，本研究通过将小米加入到太谷饼中，利用模糊数学结合响应面法优化出小米太谷饼的最优配方，通过体外淀粉消化特性研究和模拟胃肠消化之后的抗氧化分析对小米太谷饼和传统太谷饼进行功能评价，旨在为新型功能性小米太谷饼的开发奠定基础。具体研究结果如下：

1. 小米富含营养，将其加入到太谷饼中开发出小米太谷饼，建立小米太谷饼模糊数学感官评价体系，设计单因素实验，考察了小米粉添加量、白砂糖添加量、植物油添加量对产品感官评分和硬度的影响，最后通过响应面优化出小米太谷饼最佳配方：小麦粉 74 g、小米粉 26 g、白砂糖 25 g、植物油 30 g、淀粉糖浆 12.5 g、水 17.5 g、食用小苏打 0.8 g、食用碱 0.3 g、鸡蛋 10 g，此时感官评分为 85.46 ± 2.12 分，产品色泽金黄，香气突出，口感酥松可口。

2. 通过研究小米太谷饼和传统太谷饼的体外淀粉消化特性，结果表明：小米太谷饼与传统太谷饼相比，快消化淀粉含量降低，慢消化淀粉含量升高，根据水解速率拟合得出小米太谷饼预估血糖生成指数比传统太谷饼低，这为小米太谷饼功能评价提供了数据支持。

3. 通过研究小米太谷饼和传统太谷饼模拟胃肠消化后的多酚含量变化和抗氧化分析，结果表明：模拟体外胃肠消化之后两组太谷饼的多酚含量均增加，但总体上小米太谷饼比传统太谷饼多酚含量要高。两组太谷饼 DPPH 自由基清除率、还原力、 $\cdot\text{OH}$ 自由基清除率均随消化的进行而逐渐增大，但 ABTS^+ 自由基清除率在胃消化阶段显著降低，总体上小米太谷饼的抗氧化活性更高。

关键词：小米太谷饼；模糊评判；体外消化；抗氧化

ABSTRACT

As one of the cereals with high nutritional value and strong health care function, millet has developed products such as millet biscuits, millet fermented foods, millet beverages, millet rice crackers, etc. With the improvement of people's living standards, people pay more attention to food with functional ingredients.

Taigu cake is a popular Shanxi traditional food. In this study, by adding millet to Taigu cake, the optimal formula of millet Taigu cake was optimized by fuzzy mathematics combined with response surface method. Antioxidant analysis after simulated gastrointestinal digestion was used to evaluate the function of millet Taigu cake and traditional Taigu cake, aiming to lay a foundation for the development of new functional millet Taigu cake. The specific research results are as follows:

1. Millet is rich in nutrients. It was added to Taigu cake to develop millet Taigu cake. A fuzzy mathematical sensory evaluation system for millet Taigu cake was established. A single factor experiment was designed. The effect of the amount of vegetable oil added on the sensory score and hardness of the product. Finally, the optimal formula of millet Taigu cake was optimized by response surface: 74 g of wheat flour, 26 g of millet flour, 25 g of white sugar, 30 g of vegetable oil, 12.5 g of starch syrup, water 17.5 g, edible baking soda 0.8 g, edible alkali 0.3 g, and egg 10 g, the sensory score is 85.46 ± 2.12 points, the product is golden in color, prominent in aroma, crispy and delicious in taste.

2. By studying the *in vitro* starch digestion characteristics of millet Taigu cake and traditional Taigu cake, the results show that: compared with traditional Taigu cake, millet Taigu cake has a lower content of fast-digestible starch and an increase of slow-digestible starch. According to the hydrolysis rate fitting, it is concluded that the estimated glycemic index of millet Taigu cake is lower than that of traditional Taigu cake, which provides data support for the function evaluation of millet Taigu cake.

3. By studying the changes of polyphenol content and antioxidant analysis of millet Taigu cake and traditional Taigu cake after simulating gastrointestinal digestion, the results showed that the polyphenol content of both groups of Taigu cakes increased after

simulating gastrointestinal digestion in vitro, but overall millet Taigu cake has higher polyphenol content than traditional Taigu cake. The DPPH free radical scavenging rate, reducing power and .OH free radical scavenging rate of Taigu cakes in both groups increased gradually with the progress of digestion, but the ABTS⁺ free radical scavenging rate decreased significantly in the gastric digestion stage. Overall, the antioxidant activity of millet Taigu cake was higher.

Keywords: Millet Taigu cake; Fuzzy judgment; In Vitro Digestion; Antioxidan

目 录

中文摘要	I
ABSTRACT	II
1 绪论	1
1.1 小米概述	1
1.1.1 小米起源与分布	1
1.1.2 小米营养成分介绍	1
1.1.3 小米功能介绍	2
1.1.4 小米产品介绍	2
1.2 太谷饼概述	3
1.2.1 太谷饼历史渊源	3
1.2.2 太谷饼传统工艺	3
1.2.3 太谷饼产品研究现状	3
1.3 淀粉消化特性概述	3
1.4 研究目的与意义	4
1.5 主要研究内容	5
2 模糊评判响应面法优化小米太谷饼配方	6
2.1 前言	6
2.2 材料与仪器	6
2.2.1 实验材料	6
2.2.2 实验仪器与设备	6
2.3 实验方法	6
2.3.1 小米粉的制备	6
2.3.2 小米太谷饼制作工艺	7
2.3.3 单因素实验设计	7
2.3.4 响应面优化实验	7
2.3.5 模糊数学感官评价体系建立	8
2.3.6 小米太谷饼品质测定	9
2.3.7 数据处理	10

2.4	结果与分析	10
2.4.1	感官评价指标权重的确定	10
2.4.2	小米太谷饼单因素实验结果与分析	10
2.4.3	响应面优化实验结果与分析	13
2.4.4	验证实验	18
2.5	结论	19
3	小米太谷饼体外淀粉消化特性研究	20
3.1	前言	20
3.2	材料与仪器	20
3.2.1	实验材料与试剂	20
3.2.2	实验仪器与设备	20
3.3	实验方法	20
3.3.1	体外淀粉消化特性测定	20
3.3.2	数据处理	22
3.4	结果与分析	22
3.4.1	两组太谷饼 RDS、SDS、RS 含量结果分析	22
3.4.2	模型拟合及血糖指数预测结果	23
3.5	结论	23
4	小米太谷饼模拟胃肠消化后抗氧化分析	24
4.1	前言	24
4.2	材料与仪器	24
4.2.1	实验材料与试剂	24
4.2.2	实验仪器与设备	24
4.3	实验方法	24
4.3.1	体外模拟胃肠消化模型	24
4.3.2	多酚含量测定	25
4.3.3	DPPH 自由基清除能力测定	25
4.3.4	ABTS+自由基清除能力测定	25
4.3.5	还原力测定	25
4.3.6	•OH 自由基清除能力测定	26
4.3.7	数据处理	26

4.4 结果与分析	26
4.4.1 胃肠消化对两组太谷饼多酚含量的影响	26
4.4.2 胃肠消化对两组太谷饼抗氧化能力的影响	27
4.5 结论	30
5 结论与展望	31
5.1 结论	31
5.2 展望	31
参考文献	33
攻读学位期间取得的研究成果	39
致谢	40
个人简介及联系方式	41
承诺书	42
学位论文使用授权声明	43

Contents

Chinese Abstract.....	I
ABSTRACT	II
Chapter 1 Introduction	1
1.1 Overview of millet.....	1
1.1.1 The origin and distribution of millet	1
1.1.2 Introduction to millet nutrition facts.....	1
1.1.3 Introduction to millet function.....	2
1.1.4 Introduction to millet product.....	2
1.2 Overview of Taigu cake	3
1.2.1 The history of Taigu cake.....	3
1.2.2 Traditional craft of Taigu cake	3
1.2.3 Research status of Taigu cake products	3
1.3 Overview of starch digestion properties.....	3
1.4 Research purpose and significance.....	4
1.5 Main research contents	5
Chapter 2 Fuzzy-judgment response surface method to optimize the formula of millet Taigu cake	6
2.1 Foreword	6
2.2 Materials and instruments	6
2.2.1 Experimental materials.....	6
2.2.2 Experimental instruments and equipment	6
2.3 Experimental method	6
2.3.1 Preparation of millet flour	6
2.3.2 Millet Taigu cake production process	7
2.3.3 Single factor experimental design	7
2.3.4 Response surface optimization experiment	7
2.3.5 Establishment of fuzzy mathematical sensory evaluation system.....	8
2.3.6 Determination of the quality of millet Taigu cake	9

2.3.7 Data processing	10
2.4 Results and Analysis	10
2.4.1 Determination of sensory evaluation index weights	10
2.4.2 Single factor experimental results of millet Taigu cake.....	10
2.4.3 Response surface optimization experimental results and analysis	13
2.4.4 Verification experiment.....	18
2.5 Conclusion.....	19
Chapter 3 In vitro starch digestion characteristics study of millet Taigu cake.....	20
3.1 Foreword	20
3.2 Materials and instruments	20
3.2.1 Experimental materials and reagents.....	20
3.2.2 Experimental instruments and equipment	20
3.3 Experimental method	20
3.3.1 Determination of starch digestion properties in vitro.....	20
3.3.2 Data processing	22
3.4 Results and Analysis	22
3.4.1 Analysis of RDS, SDS and RS contents in two groups of Taigu cakes	22
3.4.2 Model fitting and glycemic index prediction results.....	23
3.5 Conclusion.....	23
Chapter 4 Antioxidant analysis of millet Taigu cake after simulating	
gastrointestinal digestion	24
4.1 Foreword	24
4.2 Materials and instruments	24
4.2.1 Experimental materials and reagents.....	24
4.2.2 Experimental instruments and equipment	24
4.3 Experimental method	24
4.3.1 In vitro simulated gastrointestinal digestion model	24
4.3.2 Determination of polyphenol content.....	25
4.3.3 Determination of DPPH free radical scavenging ability	25
4.3.4 Determination of ABTS+ free radical scavenging ability.....	25
4.3.5 Determination of reducing power.....	25

4.3.6 Determination of •OH radical scavenging ability	26
4.3.7 Data processing	26
4.4 Results and analysis.....	26
4.4.1 Effects of gastrointestinal digestion on the polyphenol content of Taigu cakes in two groups	26
4.4.2 Effects of gastrointestinal digestion on antioxidant capacity of Taigu cake in two groups	27
4.5 Conclusion.....	30
Chapter 5 Conclusion and outlook	31
5.1 Conclusion.....	31
5.2 Outlook	31
Reference	33
Research achievements	39
Acknowledgment	40
Personal profiles	41
Letter of commitment	42
Authorization statement	43

1 绪论

1.1 小米概述

1.1.1 小米起源与分布

小米又称为谷子、粟，其种植历史悠久，在世界上属于古老农作物的一种。原产自中国北方黄河流域，属于我国传统谷物^[1,2]。对于小米而言，有很多优点，例如生育期短、适应性广、可以耐干旱、耐贫瘠、耐储存等^[3]。在我国北方，谷子属于重要的杂粮作物之一，并且种植面积广泛，有几个省份种植面积较大，例如：山西、内蒙古、陕西、河北等。其中，山西的产量、种植面积均为最大，内蒙古和河北排名第二^[4]。

1.1.2 小米营养成分介绍

小米的营养价值高，存在多种营养物质，例如淀粉、蛋白质、脂肪、维生素和矿物质等，其中还有很多功能成分，使其具有医药价值高的特点^[5]。淀粉为小米中最主要的成分，约占干物质的 57%~70%之间^[6]，成为决定加工特性和食用品质的主要因素。Qi 等^[7]选取我国 8 个小米品种进行比较，结果表明小米中直链淀粉的质量分数约为 16.8%~26.8%，抗性淀粉的质量分数约为 2.9%。

小米中有很多蛋白质，大部分存在于胚和胚乳细胞中，此外，它可以提供很多优质蛋白，其中大多是低过敏性蛋白。清蛋白、球蛋白、醇溶蛋白、谷蛋白和其他不溶性蛋白是其主要包括的成分，这些蛋白有很多作用，例如醇溶蛋白是治疗顽固性胃炎等胃肠疾病，并且效果显著的一种天然蛋白，小米中蛋白对于孕产妇和婴幼儿很适合^[8,9]。小米中蛋白质的质量通常优于其他谷物^[10]。小米中的色氨酸有很多作用，可以加快人体褪黑激素分泌和转化^[11]。据报道，在众多谷物食物里，小米功

效居多：有安眠、健脾、和胃等功效。失眠人群通过喝小米粥可以得到缓解。

小米主要脂肪酸有饱和、单不饱和、多不饱和脂肪酸^[12]。小米脂肪属于优质脂肪，含有人必需且不能自身合成的亚油酸、亚麻酸等^[13,14]。其中油酸具有软化血管功能^[15]。目前研究较多的为小米糠油，其含油可达 10%以上，优质不饱和脂肪酸占比很高可达 70%以上^[16]，其中亚油酸：“-亚麻酸为 6.5:1，符合 WHO 推荐的（5:1）

~ (10:1) 标准^[17]。

小米中维生素含量多且种类丰富^[18]，维生素 B₁ 含量高于一般作物，且含有一般粮食中缺少的胡萝卜素^[15]，除此之外，小米中还富含维生素 A、D、C、B₉、B₁₂ 等。这些维生素参与人的许多生理过程。

小米和其他粮食作物相比，多酚类物质更加丰富，具有较高的生物活性。有的通过加工成为保健品，有的直接加入食品中，以此来提高它的附加值。除此以外还有黄酮、肌醇和甾醇等多种营养成分，据文献研究，小米中的多酚物质含量为在 0.3%~3%^[19]，并且有一定的抗氧化活性^[20]。魏春红等^[21]使用酶法辅助提取小米多酚，具有很多特点，例如：条件简便、反应条件温和、可以降低经济成本、提高效率，对小米的深加工利用有帮助。

1.1.3 小米功能介绍

在《食疗本草》中提到：小米功效有很多，例如：可以健胃，改善睡眠质量，对于促进产妇分泌乳汁也有作用；喝小米粥还可以补虚损，开肠胃等^[22]。研究发现，小米粥表层漂浮的物质，常被称为“米油”，营养成分很丰富，有“代参汤”之美誉，一些产后妇女通过喝这些东西以达到调理身体的目的。可以缓解产妇体力不支，保养体质等^[23,24]。此外，小米还可以清热解渴，可以治疗脾胃不和、脾虚腹泻、消化不良等。五谷中小米的补肾作用较强，并且与其它谷物相比，小米的餐后血糖生成反应较缓慢，因此长期食用可以降低 II 型糖尿病的患病风险。Ren 等^[25]人通过研究表明小米膳食对糖耐量受损人群空腹血糖有一定降低作用。

1.1.4 小米产品介绍

目前市场上关于小米的加工产品有许多，如小米粥，小米锅巴，小米营养速溶粉，小米饮料^[26]等。姚垚等^[27]优化出了香味浓郁的小米豆渣低糖纤维饼干，任建军等^[28]研究小米方便米饭，在最佳的工艺条件下制得的产品有高复水率、高品质等特点。陈守超等^[29]将部分小麦粉换成小米等其他杂粮粉，研制出了小杂粮酸奶松饼；刘建垒^[30]等对小米粥的制作进行了研究，并确立了感官评价方法，优化出最佳煮粥方法。高晓丽等^[31]以小米为原料与茶叶混合发酵，研制出了小米发酵茶，并优化出了最佳工艺条件。郑燕丹等^[32]利用小米制备出小米婴幼儿营养辅食食品，并进行了营养强化；Rathi.A 等^[33]开发了脱色小米通心粉，感官品质较高；Onyango 等^[34]通过将玉米和小米混合发酵，生产营养断奶食品。

1.2 太谷饼概述

1.2.1 太谷饼历史渊源

太谷饼发源于三晋大地，是一种极具代表性的地方名优食品，至今已有数百年历史，是晋商鼎盛时期产物，与晋商生产、生活密切相关，是晋商显示其富有与社会地位，追求奢侈生活的产物。并且跟随晋商的足迹而闻名天下，曾作为皇宫贡品而闻名京师，并曾辐射到好多国家。太谷饼是晋商饮食文化的典型代表，用料考究，深受人们喜爱，传统工艺被列为山西省非物质文化遗产名录^[35]。由于它制作精细，具有香甜、酥软特点，深受大众喜欢。

1.2.2 太谷饼传统工艺

太谷饼制作技艺是山西面点技艺的典型代表，是汉民族借鉴西域面点制作技法的重要遗存，它不仅保留了传统的技艺，而且将其传承和延续。传统太谷饼是将面粉、白糖、食用植物油、饴糖、碳酸氢钠或碳酸钠等作为原料。通过将这些原辅料混合均匀，加入水之后，揉搓成面团，再将其进行切分，每个小面团重量差不多，在烘烤之前在其表面撒上芝麻。具有酥软、不容易破碎、口味香甜、久放绵软等特点，且其储存时间长^[36]。

1.2.3 太谷饼产品研究现状

在目前的市场上太谷饼种类众多，但最主要的是原味太谷饼，此外还有红枣、黑芝麻、核桃等口味的太谷饼。张倩茹等^[37]进行了功能性葡萄籽太谷饼工艺的研究，最后生产出口感松软，香味浓郁的葡萄籽太谷饼。随着人们生活消费水平的提高，人们的饮食结构开始发生变化，许多人们除了关注食物的口感外，开始对食物的功能进行追求。目前太谷饼的种类单一，功能略显单调。因此，开发具有一定功效的小米太谷饼，可更好满足消费者对“健康+美味”的消费需求。

1.3 淀粉消化特性概述

淀粉是小米中主要成分之一，需要被消化之后才能够被人体吸收利用。人体是一个复杂的系统，淀粉消化过程在这个系统中也很复杂，主要三个阶段为口腔、胃部和小肠，并在淀粉转葡萄糖苷酶、“-淀粉酶多种酶以及胆汁、胰液等消化液的共

同作用下，最终被降解成葡萄糖分子^[38]。在淀粉的整个消化过程中，有多种消化酶的参与，其中包括淀粉转葡萄糖苷酶和“ α -淀粉酶这两种主要的消化酶^[39]。

淀粉消化特性与人的健康有很大的关系。目前，体外淀粉消化模型较常用的有 Englyst^[40,41] 等方法。根据淀粉在体外消化的程度与速率，分为快速消化淀粉（RDS）、慢速消化淀粉（SDS）以及抗性淀粉（RS）^[42,43]。其中快速消化淀粉（RDS）是指消化开始阶段 0~20 min 水解淀粉的量，它可以在口腔和小肠中被迅速的消化，最终使人餐后血糖很快地升高。慢速消化淀粉（SDS）指的是开始消化阶段 20~120 min 分钟消化淀粉的量，它可以在小肠中被缓慢的消化，不会导致餐后血糖的迅速增加与此同时，可以缓慢释放能量，使人达到一个长时间饱腹的感觉，有利于控制血糖的人以及肥胖人群^[44]。长期摄食富含 SDS 的食物对降低餐后血糖有作用。抗性淀粉（RS）指的是消化开始之后，一些不能在小肠中被消化和吸收的淀粉的量，它对降低胆固醇，稳定餐后血糖有很大的作用^[45,46]。

食品血糖生成指数(Glycemic Index, GI)，近些年被专家学者广泛研究。最早由 Jenkins^[47]提出，表示食用 50 g 食物后，在 2 h 内引起的血糖反应曲线下的面积占参比样品（白面包）的血糖反应曲线面积下的面积的比值。根据测得的血糖生成指数值将食品分为高血糖生成指数食物（ $GI > 70$ ）、中血糖生成指数食物（ $55 \leq GI \leq 70$ ）和低血糖生成指数食物（ $GI < 55$ ）^[48]。

1.4 研究目的与意义

小米作为营养价值高，营养素搭配合理的一种药食两用的谷物，近些年来成为了研究的热点，越来越多的人开始研究其各种功能特性。乔玲等^[49]认为，小米对脾和胃有保健作用，反胃、呕吐等情况可以通过食用小米得到缓解。目前，市场上也有许多小米相关的开发产品。同时，越来越多的专家学者对小米各种功能成分进行了研究，小米具有很广阔应用前景。

太谷饼是山西传统产品，将小米与太谷饼相结合开发新产品是一个很好的创新点。目前尚没有将小米加入太谷饼中进行新产品开发的研究，因此将小米代替部分面粉加入到太谷饼中开发出新型、具有小米营养及风味的太谷饼，可以增加传统太谷饼种类，使小米营养功能在太谷饼中得到体现，并增加小米产品种类，同时推动太谷饼和小米产业的发展。因此本文将选取山西特色小杂粮—小米，将其添加到太谷饼中，开发出具有小米风味的太谷饼，并用质构仪和色差仪对其硬度和色度进行

评价，建立模糊数学感官评价对小米太谷饼进行感官评分，采用响应面实验得到小米太谷饼最佳配方，并进行体外功能特性研究，以期开发出营养丰富的功能性小米太谷饼，为之后的生产研究奠定基础，为我国传统食品和小米的进一步加工利用提供新思路。

1.5 主要研究内容

本研究采用模糊数学结合响应面法优化小米太谷饼配方；进行体外淀粉消化特性研究；采用模拟胃肠消化之后测定多酚含量和进行抗氧化分析。

主要研究内容如下：

1. 小米太谷饼配方优化。选取山西晋谷 21 号小米，进行小米太谷饼的研制。采用模糊数学的方法对小米太谷饼进行感官评分，并用质构仪对硬度进行评价，用色差仪对色度进行评价，设计响应面优化实验，得到小米太谷饼的最优配方，为新型小米太谷饼的开发提供新思路。

2. 小米太谷饼体外淀粉消化特性研究。对最优配方的小米太谷饼和传统太谷饼进行体外淀粉消化特性研究，测定快消化淀粉含量、慢消化淀粉含量、抗性淀粉含量以及体外消化速率，并对其进行水解动力学模型拟合以及预测血糖指数。比较两种太谷饼的淀粉消化特性，为科学评价其功能提供依据。

3. 小米太谷饼模拟胃肠消化后抗氧化分析。对最优配方的小米太谷饼和传统太谷饼进行模拟胃肠消化，测定不同阶段多酚含量、DPPH 自由基清除率、ABTS⁺ 自由基清除率、还原力以及·OH 自由基清除率。比较两种太谷饼之间的抗氧化活性，以及各阶段变化规律，为研究小米太谷饼功能特性奠定基础。

2 模糊评判响应面法优化小米太谷饼配方

2.1 前言

小米营养价值高，深受人们喜欢。目前市场上关于小米的加工产品有许多，如小米粥，小米锅巴，小米营养速溶粉，小米饮料^[50]等。牛宇等^[51]采用高压蒸煮方法与冷冻干燥结合在一起，研制出了速食小米粥，调溶性、复水性及口感较好。杨利玲等^[52]将部分面包粉换成小米粉和燕麦粉，研制小米燕麦粗杂粮面包，风味独特，营养价值高。虽说已有很多产品，但利用小米开发太谷饼尚属空白。

因此本章将小米代替部分面粉加入到太谷饼中，并运用模糊数学法进行感官评价，并结合质构仪和色差仪进行品质评价，优化出小米太谷饼最佳配方。最终开发出新型、具有小米营养及风味的太谷饼，增加传统太谷饼种类，使小米营养功能在太谷饼中得到体现，并增加小米产品种类，为小米加工利用提供一些新思路。

2.2 材料与仪器

2.2.1 实验材料

小麦粉、白砂糖、植物油、食用小苏打、食用碱、淀粉糖浆、鸡蛋、芝麻均来自超市；小米（晋谷 21 号）晋中市丰谷源种植专业合作社。

2.2.2 实验仪器与设备

YMD-20 烤箱 广州市钰麦烘焙设备有限公司；TMS-Pro 质构仪 北京盈盛恒泰科技有限责任公司；NS-A-1608 色差仪 深圳市三恩驰科技有限供公司。

2.3 实验方法

2.3.1 小米粉的制备

挑选干净完整的小米，将小米放入高速多功能粉碎机进行粉碎，粉碎之后过 100 目筛，密封避光保存，备用。

2.3.2 小米太谷饼制作工艺

辅料配制：将食用小苏打和纯碱用水融化后，再将白砂糖、食用油、鸡蛋和淀粉糖浆以及剩余水搅拌均匀备用。

和面步骤：将小麦粉和小米粉混合均匀（此后简称为“混粉”），将搅拌好的辅料加入，和成面团静置 15 min。

饼坯成型：将和好的面团揉光揉匀，制成 45 g 的饼坯，并在表面粘上芝麻仁。

烘烤过程：将烤箱提前预热，然后将制作好的饼坯整齐摆放于烤盘上，烤箱温度设定为 180 °C，烘烤时间为 15 min。

2.3.3 单因素实验设计

经预实验结果确定小米太谷饼初步配方：混粉为 100 g，分别添加鸡蛋、淀粉糖浆、水、食用小苏打、食用碱为混粉质量分数的 10%、12.5%、17.5%、0.8%、0.3%。单因素实验条件为：固定白砂糖添加量 20%，植物油添加量 25%，考察小米粉添加量（15%、20%、25%、30%、35%）对感官评分和硬度的影响，固定小米粉添加量 25%，植物油添加量 25%，考察白砂糖添加量（10%、15%、20%、25%、30%）对感官评分和硬度的影响，固定小米粉添加量 25%，白砂糖添加量 25%，考察植物油添加量（15%、20%、25%、30%、35%）对感官评分和硬度的影响。

2.3.4 响应面优化实验

根据单因素实验结果，对小米粉添加量（A）、白砂糖添加量（B）、植物油添加量（C）3 个因素进行 Box-Behnken 实验，实验设计见表 2.1。

表 2.1 小米太谷饼响应面实验因素水平表

Tab. 2.1 Factor level table of response surface experiment of millet Taigu cake

水平	因素		
	A 小米粉添加量 (%)	B 白砂糖添加量 (%)	C 植物油添加量 (%)
-1	20	20	25
0	25	25	30
1	30	30	35

2.3.5 模糊数学感官评价体系建立

2.3.5.1 对象集合Y的确定

对象集合指待评价的全部产品的集合，设评价对象集为 Y ， $Y=\{y_1, y_2, y_3, \dots, y_i\}$, y_i 表示各组待测小米太谷饼。

2.3.5.2 评价因素集 U 的确定

在本实验中建立小米太谷饼感官评价因素集 $U=\{u_1, u_2, u_3, u_4\}$ ，其中 u_1-u_4 分别代表小米太谷饼的色泽，香气，形态，口感。

2.3.5.3 分数集合 W 的确定

小米太谷饼评价等级需要赋予不同的分数，来组成一个集合。本实验将 A, B, C, D 四个等级按梯度赋予以下分数，因此本实验中 $W=\{w_1, w_2, w_3, w_4\}=\{90, 80, 70, 60\}$ 。

2.3.5.4 权重集 V 的确定

权重是指不同评级因素所占的比重^[53]。本实验中 $V=\{v_1, v_2, v_3, v_4\}$ ， v_1, v_2, v_3, v_4 分别表示小米太谷饼色泽，香气，形态，口感的权重系数值。运用二元对比法来确定权重，通过选取 10 名评价人员进行打分，各因素两两对比，认为重要的因素记 1 分，次要因素记 0 分，因素自身比较记 1 分，其中一个因素得分与总分 100 分的比值即为某因素的权重^[54]。

2.3.5.5 感官评价标准的确定

根据 GB/T 16291.1-2012 中的要求进行感官评价培训，评价环境参照 GB/T 13868-2009 中要求的环境进行设置。选取 10 名品评员（5 男 5 女）参照小米太谷饼感官评分标准（表 2.2）进行评价，在进行评价前，禁止抽烟、喝酒、不吃辛辣食物，将样品随机编码放入白色盘中，观察样品，看有无异物，闻其气味，品评其滋味，品评完一个之后进行漱口^[55]。

表 2.2 小米太谷饼感官评分标准

Tab. 2.2 Sensory scoring standards for millet Taigu cake

评价指标	评价标准及等级			
	A (90 分)	B (80 分)	C (70 分)	D (60 分)
色泽	表面色泽非常均匀, 呈金黄色, 无过焦现象	表面色泽较均匀, 黄色较浅, 基本无过焦现象	表面色泽不太均匀, 黄色不明显, 有少量过焦现象	表面色泽不均匀, 有大量过焦现象
香气	焙烤的香气和小米的香气浓郁, 无其他异味	焙烤的香气和小米的香气较浓郁, 无其他异味	焙烤的香气和小米的香气较淡, 无其他异味	无小米的香气, 有焦糊味
形态	大小厚度非常均匀, 形态完整, 无起泡现象	大小厚度较均匀, 形态较完整, 基本无起泡现象	大小厚度不太均匀, 形态不太完整, 有少量起泡现象	大小厚度不均匀, 形态不完整, 有大量起泡现象
口感	甜味适中, 口感酥松, 无粘牙感	甜味较适中, 口感较酥松, 无粘牙感	甜味不太适中, 口感不太酥松, 有点粘牙感	甜味不适中, 口感发硬, 粘牙感严重

2.3.6 小米太谷饼品质测定

质构测定: 用 TMS-Pro 质构仪对小米太谷饼进行测定, 选取 TPA 模式, 测定参数为: 探头: 5 mm 圆柱形金属探头, 测前速度: 60 mm/min, 测试速度: 60 mm/min, 回程速度: 60 mm/min, 起始力: 0.05 N, 压缩比例: 35%, 以硬度作为评价指标, 每个样品平行测定 3 次。

色泽测定: 在测定之前进行具有黑色和白色标准的校准。色泽采 CIE- $L^*a^*b^*$ 色空间方法表示, L^* , a^* , b^* 分别代表亮度, 红色-绿色之间和黄-蓝色之间的变化, 其中 $+a^*$ 为红色, $-a^*$ 为绿色; $+b^*$ 为黄色, $-b^*$ 为蓝色^[56]。每组测定 3 次, 计算平均值。

2.3.7 数据处理

每组实验重复三次，采用 Microsoft-Excel 2019 和 SPSS 23 进行基本数据处理和显著性分析，结果以平均数±标准差的形式表示，采用 Design-expert 8.0.6 进行响应面设计和分析。

2.4 结果与分析

2.4.1 感官评价指标权重的确定

表 2.3 小米太谷饼感官评价指标权重分配表

Tab. 2.3 Weight distribution table of sensory evaluation index of millet Taigu cake

指标	评价分值					权重
	色泽	香气	形态	口感	合计	
色泽	10	2	3	3	18	0.18
香气	7	10	8	5	30	0.30
形态	4	3	10	3	20	0.20
口感	8	6	8	10	32	0.32

由表 2.3 可知，各项感官评价指标权重分别为色泽 0.18，香气 0.30，形态 0.20，口感 0.32，即 $V=\{0.18, 0.30, 0.20, 0.32\}$ 。

2.4.2 小米太谷饼单因素实验结果与分析

2.4.2.1 小米粉添加量对产品感官评分和硬度的影响

由图 2.1 可知，在小米粉添加量逐渐增加的过程中，感官评分先增高后降低，在小米粉添加量为 25% 时，感官评分达到最高值，此时小米太谷饼具有良好的外观和口感，具有小米的香气。徐向波等^[57]在研究小米黄油曲奇饼干时也发现随着小米粉的增加感官评分先增加后降低。小米太谷饼的硬度随小米粉的增加而增加。这是因为小米粉几乎不含面筋蛋白，不利于面团形成面筋结构，使面团的持气性下降，太谷饼硬度增加^[58]。

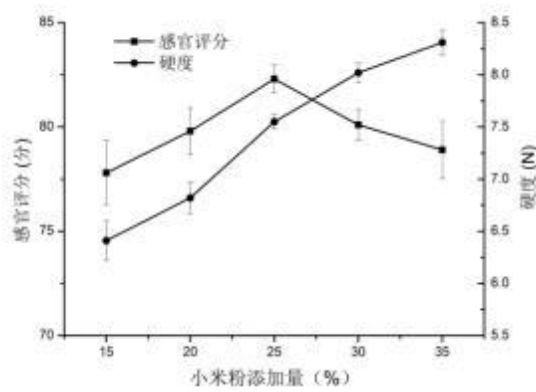


图 2.1 小米粉添加量对感官评分和硬度的影响

Fig. 2.1 Effects of millet flour addition on sensory scores and hardness

由表 2.4 可知, 小米太谷饼 L^* 和 b^* 值均随着小米粉添加量的增加而增加, 但对 a^* 值差异不显著, L^* 值增加表明小米太谷饼的亮度增加, b^* 值增加, 说明了产品向黄色方向变化^[59]; 产生这些变化的主要原因是: 小米自身是黄色, 添加到小麦粉中改变了色差值, 且随着小米粉的增加, 小米太谷饼不断变黄。综合感官评价和质构方面评价, 可知小米粉的添加量在 25% 左右最好。

表 2.4 小米粉添加量对小米太谷饼色度值的影响

Tab. 2.4. Effects of millet flour addition on chroma value of millet Taigu cake

小米粉添加量 (%)	L^*	a^*	b^*
15	60.50±0.39 ^d	6.41±0.17 ^a	29.69±0.43 ^d
20	63.57±0.05 ^c	6.42±0.21 ^a	32.38±0.28 ^c
25	64.31±0.35 ^b	6.54±0.22 ^a	33.76±0.74 ^b
30	64.74±0.15 ^{ab}	6.62±0.22 ^a	34.68±0.87 ^{ab}
35	65.17±0.35 ^a	6.34±0.12 ^a	35.87±0.68 ^a

注: 同列不同小写字母表示差异显著 ($r < 0.05$), 相同小写字母表示差异不显著 ($r > 0.05$)。

2.4.2.2 白砂糖添加量对产品感官评分和硬度的影响

由图 2.2 可知, 随着糖的增加, 小米太谷饼的硬度逐渐降低, 推测原因是: 在白砂糖的添加量逐渐增加的过程当中, 会产生反水化作用, 且会增强, 这种作用导致小米太谷饼的硬度降低。糖的作用必不可少, 可以让小米太谷饼具有甜味, 形成酥松的口感^[60]。感官评分先增加后降低, 在白砂糖添加量在 25% 左右感官评价值最高。这与郑艺梅等^[61]优化发芽糙米百香果曲奇饼干配方时认为随着糖粉增加, 感官

评分先增加，后降低结论一致。

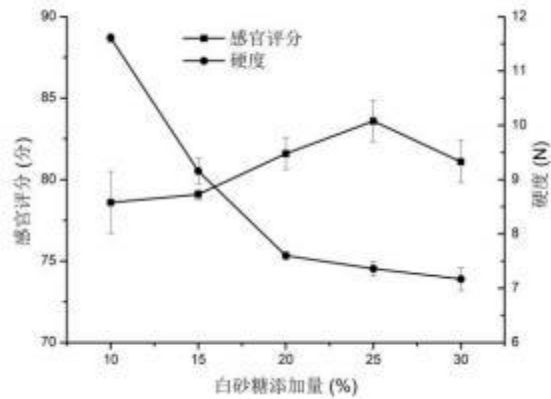


图 2.2 白砂糖添加量对感官评分和硬度的影响

Fig. 2.2 Effects of sugar addition on sensory scores and hardness

2.4.2.3 植物油添加量对产品感官评分和硬度的影响

由图 2.3 可知，随着植物油的增加，小米太谷饼的硬度逐渐降低，主要原因为：油添加量少时，小米太谷饼外表无光泽，面筋形成较多，硬度过大，口感差；油添加过多时，硬度变小，容易破碎，不易于运输。小米太谷饼感官评分随着油的添加量的增加呈先升高后降低趋势，在添加量为 30% 时感官评分最高。综合评定可知，选取添加量为 30% 最佳。这与陈倩^[62]研究随着油的增加复配薄脆饼干的感官评分先增加后降低的结论一致。

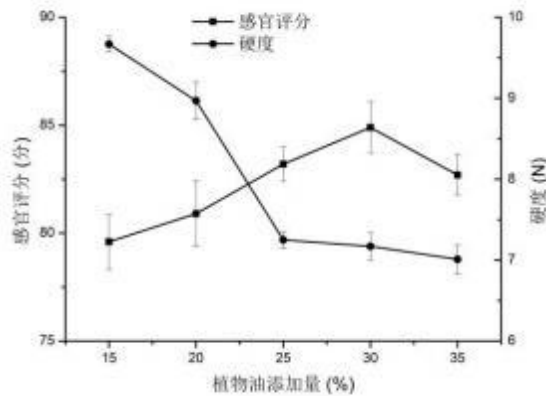


图 2.3 植物油添加量对感官评分和硬度的影响

Fig. 2.3 Effects of vegetable oil addition on sensory scores and hardness

2.4.3 响应面优化实验结果与分析

2.4.3.1 感官评价结果

表 2.5 小米太谷饼感官评价数据采集表

Tab. 2.5 Sensory evaluation data collection table of millet Taigu cake

实 验 号	感官评价															
	色泽				香气				形态				口感			
	W ₁	W ₂	W ₃	W ₄	W ₁	W ₂	W ₃	W ₄	W ₁	W ₂	W ₃	W ₄	W ₁	W ₂	W ₃	W ₄
1	6	3	1	0	4	4	1	1	5	4	1	0	2	5	2	1
2	6	4	0	0	7	3	0	0	5	4	1	0	5	4	1	0
3	5	5	0	0	3	6	1	0	3	4	2	1	2	5	3	0
4	6	3	1	0	3	6	1	0	5	4	1	0	2	4	3	1
5	7	3	0	0	7	2	1	0	6	3	1	0	4	5	1	0
6	3	5	2	0	3	5	2	0	5	4	1	0	4	4	2	0
7	6	4	0	0	4	4	2	0	4	5	1	0	3	5	1	1
8	5	5	0	0	4	6	0	0	3	3	3	1	3	5	1	1
9	8	2	0	0	6	4	0	0	5	4	1	0	4	5	1	0
10	6	3	1	0	4	5	1	0	3	3	3	1	2	5	2	1
11	6	4	0	0	3	5	2	0	4	4	1	1	3	4	2	1
12	7	3	0	0	4	4	2	0	3	5	1	1	4	4	1	1
13	6	4	0	0	5	5	0	0	4	5	1	0	6	4	0	0
14	7	2	1	0	5	4	1	0	4	5	1	0	2	5	3	0
15	6	4	0	0	2	6	1	1	4	4	2	0	2	7	1	0
16	7	3	0	0	5	4	1	0	6	4	0	0	5	4	1	0
17	5	4	1	0	1	6	3	0	5	4	1	0	3	5	1	1

注: w₁-w₄ 分别代表小米太谷饼感官评价指标的等级, 即 A、B、C、D, 代表的分数为 90、80、70、60。

2.4.3.2 模糊矩阵的建立

(1) 根据感官评分结果，对其建立模糊数学关系矩阵进行运算。即将各评价等级人数除以总人数，得到以下模糊矩阵 R。

$$\begin{aligned}
 R_1 &= \begin{pmatrix} 0.6 & 0.3 & 1 & 0 \\ 0.4 & 0.4 & 0.1 & 0.1 \\ 0.5 & 0.5 & 0.2 & 0.1 \\ 0.2 & 0.5 & 0.2 & 0.1 \end{pmatrix} & R_2 &= \begin{pmatrix} 0.6 & 0.4 & 0 & 0 \\ 0.7 & 0.3 & 0 & 0 \\ 0.5 & 0.4 & 0.1 & 0 \\ 0.5 & 0.4 & 0.1 & 0 \end{pmatrix} & R_3 &= \begin{pmatrix} 0.5 & 0.5 & 0 & 0 \\ 0.3 & 0.6 & 0.1 & 0 \\ 0.3 & 0.4 & 0.2 & 0 \\ 0.2 & 0.5 & 0.3 & 0.1 \end{pmatrix} \\
 R_4 &= \begin{pmatrix} 0.6 & 0.3 & 0.1 & 0 \\ 0.3 & 0.6 & 0.1 & 0 \\ 0.5 & 0.4 & 0.1 & 0 \\ 0.2 & 0.4 & 0.3 & 0.1 \end{pmatrix} & R_5 &= \begin{pmatrix} 0.7 & 0.3 & 0 & 0 \\ 0.7 & 0.2 & 0.1 & 0 \\ 0.6 & 0.3 & 0.1 & 0 \\ 0.4 & 0.5 & 0.1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} & R_6 &= \begin{pmatrix} 0.3 & 0.5 & 0.2 & 0 \\ 0.3 & 0.5 & 0.2 & 0 \\ 0.5 & 0.4 & 0.1 & 0 \\ 0.4 & 0.4 & 0.2 & 0 \end{pmatrix} \\
 R_7 &= \begin{pmatrix} 0.6 & 0.4 & 0 & 0 \\ 0.4 & 0.4 & 0.2 & 0 \\ 0.4 & 0.5 & 0.1 & 0 \\ 0.3 & 0.5 & 0.1 & 0.1 \end{pmatrix} & R_8 &= \begin{pmatrix} 0.5 & 0.5 & 0 & 0 \\ 0.4 & 0.6 & 0 & 0 \\ 0.3 & 0.3 & 0.3 & 0.1 \\ 0.3 & 0.5 & 0.1 & 0.1 \end{pmatrix} & R_9 &= \begin{pmatrix} 0.8 & 0.2 & 0 & 0 \\ 0.6 & 0.4 & 0 & 0 \\ 0.5 & 0.4 & 0.1 & 0 \\ 0.4 & 0.5 & 0.1 & 0 \end{pmatrix} \\
 R_{10} &= \begin{pmatrix} 0.6 & 0.3 & 0.1 & 0 \\ 0.4 & 0.5 & 0.1 & 0 \\ 0.3 & 0.3 & 0.3 & 0.1 \\ 0.2 & 0.5 & 0.2 & 0.1 \end{pmatrix} & R_{11} &= \begin{pmatrix} 0.6 & 0.4 & 0 & 0 \\ 0.3 & 0.5 & 0.2 & 0 \\ 0.4 & 0.4 & 0.1 & 0.1 \\ 0.3 & 0.4 & 0.2 & 0.1 \end{pmatrix} & R_{12} &= \begin{pmatrix} 0.7 & 0.3 & 0 & 0 \\ 0.4 & 0.4 & 0.2 & 0 \\ 0.3 & 0.5 & 0.1 & 0.1 \\ 0.4 & 0.4 & 0.1 & 0.1 \end{pmatrix} \\
 R_{13} &= \begin{pmatrix} 0.6 & 0.4 & 0 & 0 \\ 0.5 & 0.5 & 0 & 0 \\ 0.4 & 0.4 & 0 & 0 \\ 0.6 & 0.4 & 0 & 0 \end{pmatrix} & R_{14} &= \begin{pmatrix} 0.7 & 0.2 & 0.1 & 0 \\ 0.5 & 0.4 & 0.1 & 0 \\ 0.4 & 0.5 & 0.1 & 0 \\ 0.2 & 0.5 & 0.3 & 0 \end{pmatrix} & R_{15} &= \begin{pmatrix} 0.6 & 0.4 & 0 & 0 \\ 0.2 & 0.6 & 0.1 & 0 \\ 0.4 & 0.4 & 0.2 & 0.1 \\ 0.2 & 0.7 & 0.1 & 0 \end{pmatrix} \\
 R_{16} &= \begin{pmatrix} 0.7 & 0.3 & 0 & 0 \\ 0.5 & 0.4 & 0.1 & 0 \\ 0.6 & 0.4 & 0 & 0 \\ 0.5 & 0.4 & 0.1 & 0 \end{pmatrix} & R_{17} &= \begin{pmatrix} 0.5 & 0.4 & 0.1 & 0 \\ 0.1 & 0.6 & 0.3 & 0 \\ 0.5 & 0.4 & 0.1 & 0 \\ 0.3 & 0.5 & 0.1 & 0.1 \end{pmatrix}
 \end{aligned}$$

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/048057002053006062>