

分类号: Q94

密 级: 公开

单位代码: 10363

学 号: 2220520115

安徽工程大学

黄精粉对面包品质的影响以及低 GI 面包的开发

EFFECT OF POLYGONATUM POWDER ON BREAD QUALITY
AND DEVELOPMENT OF LOW GI BREAD

学生姓名: 吴坤伟

校内导师: 魏明 (教授)

校外导师: 刘志刚

专 业: 生物与医药

研究方向: 食品工程

论文答辩日期: 2025 年 5 月 15 日

二、安徽工程大学学位论文原创性声明

本人郑重声明：我恪守学术道德，崇尚严谨学风。所呈交的学位论文，是本人在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果。除文中已明确注明和引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的作品及成果的内容。论文为本人亲自撰写，我对所写的内容负责，并完全意识到本声明的法律后果由本人承担。

学位论文作者签名：



日期：2025 年 5 月 16 日

三、安徽工程大学学位论文版权使用授权书

学位论文作者完全了解学校有关保留、使用学位论文的规定，同意学校保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅或借阅。本人授权安徽工程大学可以将本学位论文的全部内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编本学位论文。

保密 ☐，在 ____ 年解密后适用本版权书。

本学位论文属于

不保密 ☒。

学位论文作者签名：吴坤伟
日期：2025 年 5 月 16 日

指导教师签名：魏明
日期：2025 年 5 月 16 日

黄精粉对面包品质的影响以及低 GI 面包的开发

摘 要

黄精是药食同源植物，其含有多糖、皂苷、黄酮、类固醇、氨基酸、木脂素等功能成分，这些成分赋予其抗氧化、抗糖尿病、免疫调节、抗肿瘤和保肝等作用。研究黄精粉对面团形成和面包加工特性的影响，结合抗氧化能力和体外模拟消化实验，评价其品质和功能特性。通过差示扫描量热法（DSC）和 X 射线衍射（XRD）表征淀粉回生特性，探讨黄精粉对面包老化的影响。此外，研究低 GI（Glycemic Index）黄精面包的工艺配方，开发低 GI 面包。主要结果如下：

（1）黄精粉添加量对面团特性的影响。结果表明，随着黄精粉的添加量逐渐增加，混合粉糊化温度显著提高，黏度、回生值和崩解值均显著降低。黄精粉能增加面团的硬度以及面团的弹性模量和黏性模量，降低面团发酵体积。添加黄精粉后，混合粉面团的湿面筋含量降低至 23.7%，面筋蛋白的二级结构发生变化， β -折叠和无规卷曲的含量增加， α -螺旋、 β -转角的含量降低，面筋中游离巯基含量显著增加至 60.03 $\mu\text{mol/L}$ ，而二硫键含量显著下降至 27.75 $\mu\text{mol/L}$ 。

（2）黄精粉添加量对面包品质的影响。结果表明，随着黄精粉添加量的增加，面包内部的颜色逐渐加深；面包结构更为疏松，气孔较大，且分布不均匀，部分区域有塌陷；面包比容呈先增加后降低的趋势；面包硬度、胶着性和咀嚼性显著增加。黄精粉添加量较高水平

($\geq 8\%$) 时, 面包感官评分降低。与对照组相比, 添加黄精粉面包的抗氧化能力显著提高; 黄精粉抑制了淀粉消化, eGI 显著降低 (最低至 58.99)。

(3) 黄精粉添加量对面包储藏特性的影响。结果表明, 所有面包的水分含量均随着储藏时间延长而逐渐降低, 添加了黄精粉的面包水分降低速率相较于对照组均显著降低; 所有面包硬度均呈增大趋势, 当黄精粉添加量达到 8% 之后, 相较于对照组, 硬化速率显著降低。添加黄精粉的面包回生焓值显著下降; 面包淀粉重结晶速率相较于对照组均显著降低, 并且在 8% 时, 淀粉重结晶率达到最低, 为 (13.67%)。

(4) 结合其他低 GI 食品原料, 研究低 GI 黄精面包的配方。添加黄精粉、杂粮豆粉和藤茶水会使面包 GI 值降低, 面包比容下降, 硬度升高, 引起面包感官品质降低, 而添加谷朊粉可以一定程度上缓解面包感官品质的劣变。综合研究结果, 以低 GI 为目的, 确定工艺配方为: 黄精粉 10 g、杂粮豆粉 (红豆:黑豆=1:1) 20 g、小麦粉 75 g、谷朊粉 5 g、酵母 1.2 g、甜叶菊粉 1 g、奶粉 4 g、黄油 8 g、盐 1.2 g、藤茶水 60 mL。在此配方下: 面包的 eGI 值为 49.07, 符合低 GI 食物的标准 ($GI < 55$)。

关键词: 黄精粉, 面团特性, 面包品质, 抗氧化, 抗老化, 低 GI

EFFECT OF POLYGONATUM POWDER ON BREAD QUALITY AND DEVELOPMENT OF LOW GI BREAD

ABSTRACT

Polygonatum sibiricum a kind of medicinal and edible homologous plant in China is rich in biologically active components, including polysaccharides, saponins, flavonoids, steroids, amino acids, lignans and so on. *Polygonatum sibiricum* has anti-fatigue, anti-oxidation, anti diabetes, immune regulation, anti-tumor and liver protection functions. In this study, the effect of *Polygonatum* powder on dough and bread processing properties were discussed. Its quality and functional characteristics were evaluated by combining antioxidant capacity and in vitro simulated digestion experiment of starch. The effect of *Polygonatum* powder on bread aging by analyzing retrogradation characteristics of starch using scanning calorimetry (DSC) and X-ray diffraction (XRD). In addition, low GI (Glycemic Index) *Polygonatum* bread was developed. The results are as follows:

(1) The effect of *Polygonatum* powder on dough characteristics were studied. The results indicated that the gelatinization temperature of the wheat flour showed an upward trend and the viscosity, retrogradation and

disintegration value of starch decreased significantly during starch gelatinization process with the increase in *Polygonatum* powder. The texture characteristics of dough showed that the hardness of dough increased after adding *Polygonatum* powder in wheat flour. The elastic modulus and viscous modulus of dough both indicated an upward trend. The dough fermentation volume decreased compared with control group. The yield of gluten decreased to 23.7% after adding *Polygonatum* powder in wheat flour. The *Polygonatum* powder changed gluten secondary structure which resulted in increasing in content of β -sheet and random coil in gluten protein while the content of α -helix and β -turn decreased. The content of free sulfhydryl groups in gluten increased significantly to 60.03 μ mol/L, while the content of disulfide bonds decreased significantly to 27.75 μ mol/L.

(2) The effect of *Polygonatum* powder on bread quality was studied. The results showed that the color inside the bread gradually deepens with the increase in the content of *Polygonatum* powder. The structure of bread was looser than that of control group. The pores in bread were larger and distributed unevenly. Partial areas in bread had collapsed. The specific volume of bread first increased and then decreased with increase in addition of *Polygonatum* powder. The hardness, stickiness and chewiness of bread increased significantly after adding *Polygonatum* powder. When the content of *Polygonatum* powder was higher, the sensory score of

bread decreased ($\geq 8\%$). Compared with the control group, the antioxidant capacity of bread added with *Polygonatum* powder was significantly improved. *Polygonatum* powder inhibited starch digestion and significantly reduced eGI (minimum to 58.99).

(3) The effect of *Polygonatum* powder on the storage characteristics of bread were studied. The results showed that the moisture content of all breads gradually decreased with the extension of storage time, and the moisture reduction rate in bread added with *Polygonatum* powder was significantly lower than that of the control group. The hardness of all bread showed an increasing trend. When the addition of *Polygonatum* powder reached 8%, the hardening rate of bread decreased significantly compared with the control group. The enthalpy of regeneration of bread added *Polygonatum* powder decreased significantly. The recrystallization rate of starch in bread added with *Polygonatum* powder was significantly lower than that of the control group, which was the lowest (13.67%) at 8%.

(4) Combining with other low GI food raw materials, the formula of low GI *Polygonatum* bread was studied. The results showed that the GI value of bread will be reduced by adding *Polygonatum* powder, mixed grains and bean flour, and vine tea water. The specific volume of bread decreased and the hardness of bread increased with the addition of *Polygonatum* powder, coarse grain soybean flour. While the addition of

gluten could alleviate the deterioration of sensory quality of bread to a certain extent. According to the comprehensive research results, for the purpose of low GI, the best process formula was determined as follows: *Polygonatum* powder 10g, coarse grain soybean powder (red beans: black beans =1:1) 20g, wheat flour 75g, gluten 5g, yeast 1.2g, stevia powder 1g, milk powder 4g, butter 8g, salt 1.2g, vine tea water 60ml. Under this conditions, the eGI of bread was 49.07, which conformed to the standard of low GI food ($GI < 55$).

KEYWORDS: *Polygonatum* powder, dough properties, bread quality, antioxidant, anti-aging, low GI

目 录

摘 要.....	I
ABSTRACT.....	III
第一章 绪论.....	1
1.1 面包概述.....	1
1.1.1 面团质量的研究现状.....	1
1.1.2 功能性面包的研究进展.....	2
1.1.3 面包抗老化研究进展.....	3
1.2 黄精的概述.....	4
1.2.1 黄精中活性成分与功能.....	4
1.2.2 黄精在食品中的应用.....	5
1.3 研究目的与意义.....	7
1.4 主要研究内容.....	7
第二章 黄精粉对面团特性的影响.....	8
2.1 引言.....	8
2.2 材料与设备.....	8
2.2.1 材料与试剂.....	8
2.2.2 仪器与设备.....	9
2.3 实验方法.....	9
2.3.1 黄精-小麦混合粉的配制.....	9
2.3.2 面团和面筋的制备.....	9
2.3.3 面粉糊化特性测定.....	9
2.3.4 面团质构特性测定.....	10
2.3.5 面团拉伸特性测定.....	10
2.3.6 面团流变学特性测定.....	10
2.3.7 面团发酵力测定.....	10
2.3.8 湿面筋测定.....	10
2.3.9 面筋中二硫键、游离巯基和总巯基含量测定.....	10
2.3.10 面筋蛋白 FTIR 分析.....	11
2.4 数据处理与分析.....	11
2.5 结果与分析.....	12
2.5.1 黄精粉对面粉糊化特性的影响.....	12
2.5.2 黄精粉对面团质构特性的影响.....	13
2.5.3 黄精粉对面团拉伸特性的影响.....	13
2.5.4 黄精粉对面团流变学特性的影响.....	14
2.5.5 黄精粉对面团发酵力的影响.....	16
2.5.6 黄精粉对湿面筋含量的影响.....	17
2.5.7 黄精粉对面筋中游离巯基和二硫键含量的影响.....	17
2.5.8 黄精粉对面筋蛋白质二级结构的影响.....	18
2.6 本章小结.....	19
第三章 黄精粉对面包品质的影响.....	21

3.1 引言.....	21
3.2 材料与设备.....	21
3.2.1 材料与试剂.....	21
3.2.2 仪器与设备.....	22
3.3 实验方法.....	22
3.3.1 面包制作配方.....	22
3.3.2 面包色泽测定.....	22
3.3.3 面包纹理结构测定.....	22
3.3.4 面包比容测定.....	22
3.3.5 面包质构测定.....	23
3.3.6 面包感官评定.....	23
3.3.7 面包抗氧化能力测定.....	23
3.3.8 面包淀粉消化性测定.....	23
3.4 数据处理与分析.....	24
3.5 结果与分析.....	24
3.5.1 黄精粉对面包色泽的影响.....	24
3.5.2 黄精粉对面包纹理结构的影响.....	24
3.5.3 黄精粉对面包比容的影响.....	25
3.5.4 黄精粉对面包质构的影响.....	26
3.5.5 黄精粉对面包感官评定的影响.....	26
3.5.6 黄精粉对面包抗氧化能力的影响.....	27
3.5.7 黄精粉对面包淀粉消化性的影响.....	28
3.6 本章小结.....	29
第四章 黄精粉对面包储藏特性的影响.....	31
4.1 引言.....	31
4.2 材料与设备.....	31
4.2.1 材料与试剂.....	31
4.2.2 仪器与设备.....	32
4.3 实验方法.....	32
4.3.1 面包样品制备.....	32
4.3.2 面包储藏过程水分含量测定.....	32
4.3.3 面包储藏过程质构测定.....	32
4.3.4 面包热力学性质的测定.....	33
4.3.5 面包淀粉结晶度测定.....	33
4.4 数据处理与分析.....	33
4.5 结果与分析.....	33
4.5.1 黄精粉对面包储藏过程水分含量的影响.....	33
4.5.2 黄精粉对面包储藏过程硬度的影响.....	34
4.5.3 黄精粉对面包热力学性质的影响.....	36
4.5.4 黄精粉对面包储藏过程淀粉结晶度的影响.....	37
4.6 本章小结.....	39
第五章 低 GI 黄精面包的开发.....	40
5.1 引言.....	40
5.2 材料与设备.....	40

5.2.1 材料与试剂.....	40
5.2.2 仪器与设备.....	40
5.3 实验方法.....	41
5.3.1 面包制作配方.....	41
5.3.2 面包比容测定.....	41
5.3.3 面包质构测定.....	41
5.3.4 面包淀粉消化性测定.....	41
5.3.5 改良后面包淀粉消化性测定.....	41
5.4 数据处理与分析.....	42
5.5 结果与分析.....	42
5.5.1 杂粮豆粉对面包品质的影响.....	42
5.5.2 藤茶水对淀粉消化性的影响.....	44
5.5.3 谷朊粉对面包品质的影响.....	45
5.5.4 改良后面包的淀粉消化性.....	46
5.6 本章小结.....	47
第六章 结论与展望.....	48
6.1 结论.....	48
6.2 创新点.....	49
6.3 展望.....	49
参考文献.....	50
致谢.....	60

第一章 绪论

1.1 面包概述

面包是以禾本科谷物粉体为基质,经酵母活化及多组分协同作用制备的固态发酵食品。面包是全球范围内非常受欢迎的食品之一。它不仅营养丰富,还可以根据不同的配方和口味制作出各种变种。随着现代生活节奏的加快,面包也逐渐成为很多人日常饮食中的重要组成部分。不仅是传统的早餐食品,现在很多人也会在午餐、晚餐甚至作为零食享用面包。目前,我国面包糕点市场已超千亿元,居亚洲首位,在全球范围内仅次于美国^[1]。近年来,中国的烘焙食品市场增长迅速,发展前景非常广阔。

1.1.1 面团质量的研究现状

面团的质量对面包的最终效果至关重要。面团的属性直接决定了面包的口感、外观、发酵表现等多个方面。面团制备是制作面粉产品的第一步和关键步骤,涉及复杂的物理和生化变化^[2]。在水-小麦粉混合物转变成面团的过程中,面筋蛋白通过大量水化、二硫键和离子键、氢键、疏水键等非共价相互作用,形成面筋网络,构建出面团的骨架结构^[3,4]。淀粉颗粒、脂肪和其他成分被困在这个面筋网络中。

为了提高最终产品的整体质量,以及满足不同面粉产品的需求,关于对面团质量的改进已经有了较多的研究。食品添加剂的使用是食品工业中常见的做法之一以减缓变质率、改善质地特性、保湿性、产品可接受性和保鲜性。Li^[5]等人研究发现果胶、瓜尔胶和木耳胶对面团具有积极作用,其使面团孔隙空间和持气的稳定性更高。Zheng^[6]等人研究发现,添加谷氨酰胺转氨酶和抗坏血酸可以增加面团的黏性和粘性,使面团相对致密,从而提高面团强度。谷氨酰胺转氨酶具有同时改变蛋白质功能和促进蛋白质交联的独特能力^[7],可以促进形成相对更连续和稳定的蛋白质网络。Fang^[8]等人发现,延长搅拌时间和调整加水量能使面筋结构更充分地水化和发育。加入异麦芽糖糊精后,改良的面团与对照组相比,面团弹性增强。并且异麦芽糖糊精也是良好的膳食纤维来源。罗登林^[9]等人研究了发现菊粉的添加增加了面团的产气量和面团的抗延伸阻力,而抗延伸阻力与面团发酵过程中持气性密切相关。Graca^[10]等研究发现,添加 3% 的小球藻对面团流变学和粘弹性特性有积极影响,并增强了面筋网络结构。Parenti^[11]等人发现糊化棕色

面粉和含水量对面包体积和面包屑硬度有显著的相互作用。糊化棕色面粉的加入改善了面团的流变性；面包样品的体积明显增大，硬度和嚼劲明显降低，很好地改善了面粉的烘焙性能。Correa^[12]等发现果胶能够降低面团的弹性和粘性模量，损耗因子相较于对照组有所增加。SEM 显微照片显示，含有果胶的面团具有丝状结构。在面包制作过程中，含有果胶的面团表现出更好的性能，使得新鲜和储存的面包中的比容更高，面包更软。Martins^[13]等人研究发现，橡子粉对面团的搅拌和糊化曲线有影响，提高了发酵面团的硬度、黏结性和粘弹性。此外橡子粉的添加使面团酸化，增加了面团的暗度，这将对面包的感官产生积极影响。Liu^[14]等人发现纤维素酶、木聚糖酶和 α -淀粉酶的组合对面团流变学具有协同作用，可使面团的延展性、软化性、混合耐受性和黏性提高到较高的水平。Guardianelli^[15]等人研究发现添加开心果副产物粉（PBF）的面团具有更高的水分和 pH 值，面团硬度和弹性也随 PBF 含量的增加而增加。通过上述研究发现，功能性组分的引入可有效优化面制品的加工特性。

1.1.2 功能性面包的研究进展

面包的体系较为复杂，是各类活性物质的良好载体，许多研究都以面包为载体，强化各类功能性成分。大部分面包是由精制小麦粉制成的，缺乏富含对人体健康有益的重要营养元素，如膳食纤维、脂肪、抗氧化营养素、矿物质、维生素、木脂素和酚类化合物^[16]。流行病学研究表明，在饮食中加入全谷物和谷物纤维可以预防慢性疾病，如心血管疾病、2 型糖尿病和各种癌症，还有助于调节体重^[17]。酚类化合物和膳食纤维对人体健康具有抗氧化、抗糖尿病、抗高脂血症、免疫调节、抗炎、抗肿瘤、抗肥胖、抗衰老、保肝和抗溃疡等多种有益作用^[18]。

果蔬等植物中因含有各类活性物质而应用于烘焙食品中，如紫米^[19]、羊肚菌^[19]、长链菊^[20]、金银花^[21]、柑橘^[22]和甘薯^[23]等均有用于面包加工的研究中。Chen^[24]等人研究发现芒果皮粉可以提高面包的含水率，使面包的硬度和咀嚼性增加，粘聚性降低。还可显著降低面包中淀粉的消化速率和消化程度，且降低程度与芒果皮粉用量呈正相关。Sui^[25]等人发现，添加了 1%、2%、4% 富含花青素的黑米提取物的面包消化率分别降低了 12.8%、14.1% 和 20.5%。Bourekoua^[26]等人的研究说明，随着石榴籽粉添加量的增加，面包的比容和弹性增加，酚类物质含量从 46% 增加到 181%。此外，含有石榴籽粉的面包的抗氧化活性显著提高。Peng^[27]等研

究结果表明,葡萄籽提取物强化面包具有相对较低的 N-ε-羧甲基赖氨酸相关健康风险,但具有较高的抗氧化活性。Lin^[28]等人发现槲皮素可显著提高面包的抗氧化能力和总酚含量,并且槲皮素面包抑制了体外糖基化过程,减少了晚期糖基化最终产物的形成。闫晨苗^[29]等研制了低 GI 马铃薯面包,所制面包 GI 值为 31.08。Hu^[30]等通过分别添加麦麸、燕麦麸和β-葡聚糖发现,面包 GI 值皆显著降低。同时,燕麦麸组慢消化淀粉含量最高,β-葡聚糖组抗性淀粉含量最高。对于麦麸、燕麦麸和β-葡聚糖组,它们对α-淀粉酶的抑制率分别为 9.25%、28.93%和 23.7%。β-葡聚糖通过与淀粉交织形成更稳定的凝胶网络结构来降低面包 GI 和α-淀粉酶活性,从而减少淀粉酶和淀粉之间的接触。综上所述,基于食品工业转型升级与健康消费升级的双重驱动,功能性烘焙产品的创新研发正进入新的发展阶段。具有营养强化特性的面包品类显著高于传统品类,具有良好的市场前景。

1.1.3 面包抗老化研究进展

随着储藏时间的延长,面包会出现水分减少、硬度增加、弹性减小、风味散失等现象。水分迁移和重新分配、淀粉回生和面筋转化是面包老化的主要原因^[31]。

近年来,利用 Avrami 方程对面制品等的老化机制进行分析的报道较多。Armeor^[32]等研究表明,面包老化动力学 k 值代表老化速率,k 值越大表示老化速度越快。Curti^[33]等研究了从马铃薯皮中提取的一种高保水能力纤维,即使在低水平下,它也能减少面包的变质。Ghoshal^[34]等研究木聚糖酶在室温(25±2℃)和冷藏温度(4±1℃)下储存期间对面包品质的影响,发现木聚糖酶的掺入减少了面包在储存过程中的水分损失。与不含酶的面包相比,添加木聚糖酶使面包保质期延长、储存过程中的老化减少、颜色更亮。色差随贮藏时间的增加而增加,但在补充木聚糖酶的面包中,增加的程度较低。与对照相比,添加木聚糖酶的面包在储存过程中的硬度增加率较低。Arslan-Tontul^[35]发现,以羧甲基纤维素作为抗老化剂加入到面包中,能够改善面包的质地特性并降低了储藏过程中的硬度。Tsai^[36]等人研究发现 15%的米粥面包提高了面包屑在储存过程中的比体积、质地和粘弹性。他们认为在大米煮熟的过程中产生的大量的低聚麦芽糖可能是延缓面包老化的原因。Fratelli^[37]等发现,在储存 72 h 期间,与对照组相比,洋车前子的添加使面包硬度值降低了 65-75%。Wang^[38]等人研究了荞麦壳粉在组织尺度(500~100 μm)和细胞尺度(50~10 μm)下对面包贮藏过程中物理和结构变化

的影响,发现细胞级荞麦壳粉在延缓面包贮藏过程中支链淀粉退化和淀粉重结晶的作用优于组织级荞麦壳粉。组织尺度荞麦壳粉使面包屑的气胞结构粗大开放,促进水分在贮藏过程中的蒸发。细胞尺度上的荞麦壳粉能具有更强的水结合能力,限制了水分的流失,抑制了面包的变质。Hong^[39]等人从面包品质、水分迁移、淀粉降解等方面研究可溶性大豆多糖(SSPS)和酸性条件对面包变质的影响。结果表明,SSPS和酸性条件显著改善了面包的贮藏品质,保持了面包屑的柔软性。在SSPS和酸性条件下的失水率比对照组降低了49.46%。SSPS和酸性条件限制了水分从面包芯向面包皮的迁移。SSPS与酸化之间的协同作用抑制了面包屑和面包皮在储存过程中的相对结晶度。研究结果显示,添加各类植物原料或生物活性成分等方法能够提升面包的品质,减缓面包的老化速度,有利于面包的储藏。

1.2 黄精的概述

黄精是天门冬科、黄精属多年生草本植物。根状茎为常用中药“黄精”。具有滋阴润燥、补气养血的功效。现代药理学研究证实,其活性成分对消化系统功能紊乱、呼吸系统炎症及代谢综合症具有显著改善作用。在食品应用领域,黄精展现出多元化的加工特性:鲜嫩根茎经蜜渍处理后可直接食用,呈现出独特的甘甜风味;通过热加工工艺可制备药膳基质,与禽类或菌菇搭配可增强滋补功效;其干燥粉末可作为功能性配料应用于烘焙食品、营养粥品及保健酒类开发。此外,幼嫩茎叶经焯水处理后可作为凉拌食材。

在当今社会,随着人口逐渐老龄化、生活节奏加快以及不健康的生活方式的普遍存在,越来越多的人处于亚健康状态^[40]。现代医学模式正逐步由以治疗疾病为目的的“治病型”转向以预防和保健为核心的“防病型”,人们的观念也从依赖药物逐渐转向更注重食疗的健康管理方式^[41]。截至目前,国家卫生健康委员会公布的药食同源中药共110种^[42],如黄精、人参、枸杞和当归等中药在延缓衰老方面展现了显著的功效,因此它们已广泛应用于临床预防和康复治疗。

1.2.1 黄精中活性成分与功能

黄精是药食同源植物,其活性成分如多糖、皂苷、黄酮等具有显著的药理作用。黄精多糖是黄精主要有效成分之一,多糖含量也作为评价黄精品质高低的标准之一。2020版《中华人民共和国药典》中认为黄精多糖含量不得低于7.0%^[43]。

王艳^[44]等人研究表明,黄精多糖主要是由半乳糖、阿拉伯糖、甘露糖、鼠李糖、木糖以及葡萄糖组成。有研究说明,目前从黄精、滇黄精和多花黄精中共分离到皂苷类化合物共 84 种,其中甾体皂苷类化合物 69 种,三萜类皂苷化合物 15 种^[45]。黄精属植物中黄酮类化合物大多是从根茎中分离得到。根据亚型母核结构的差异,可分为高异黄酮类、异黄酮类、黄酮类、查耳酮类、二氢黄酮类、紫檀烷类 6 种,其中高异黄酮类是黄精属植物中的一类特征性成分^[46]。

黄精含有多种化学成分如多糖、皂苷、黄酮、类固醇、氨基酸、木脂素等^[47],这些成分赋予其具有抗疲劳、抗氧化、抗糖尿病、免疫调节、抗肿瘤和保肝等作用^[48]。Wang^[49]等人研究评估黄精多糖对链脲佐菌素诱导的糖尿病大鼠眼部并发症的保护作用。结果显示黄精多糖降低了糖尿病大鼠的空腹血糖和血液中糖化血红蛋白的水平,并升高血浆中胰岛素的水平,减缓了糖尿病视网膜和白内障的病变。Jiang^[50]等人研究发现,添加黄精多糖处理可降低 CCl₄ 诱导的实验大鼠肝氧化损伤,有效降低 CCl₄ 的毒性。有研究报道,黄精多糖不仅可以调节正常小鼠血清中红细胞的数量^[51],还可以增加环磷酰胺诱导的免疫抑制模型(小鼠和鸡)胸腺和脾脏的重量,提高其单核巨噬细胞的吞噬能力,调节白细胞介素-2、肿瘤坏死因子- α 等免疫因子的表达水平^[51,52]。Li^[53]等比较了不同蒸煮处理的黄精多糖的抗氧化活性,发现随着蒸煮次数的增加,其清除 DPPH 和 ABTS 自由基的活性逐渐降低。黄精多糖还通过发挥抗氧化活性,降低丙二醛和 8-羟基脱氧鸟苷水平,提高超氧化物歧化酶水平,减轻小鼠心脏衰老和损伤^[54]。Long^[55]等研究发现 PSP 在荷瘤小鼠模型中抑制肿瘤生长,抑瘤率为 19.89%。Zeng^[56]等人发现,在高脂饮食诱导的肥胖大鼠模型中,黄精多糖干预可以降低它们的体重,减轻脂肪堆积引起的炎症和氧化应激,改善它们的脂质代谢和肝功能障碍状态。

1.2.2 黄精在食品中的应用

黄精及其提取物被广泛用作各种食品配方的原料。与“健康中国战略”一致,许多类似来源的草药已被纳入食品中,以增强其功能特性。黄精的多功能性使其可以加工成传统食品,如酒、饮料、饼干和汤,以满足不同消费者的喜好^[57]。刘刚强^[58]等以新鲜一年生黄精根茎为原料研制黄精泡菜,优化黄精泡菜加工工艺,生产的黄精泡菜酸甜适口、清爽脆嫩,具有较高的营养价值。张露萍等人^[59]采以 2 种药食同源中药材九制黄精和覆盆子为原料,通过单因素和响应面试验,对提

取工艺进行优化,制得营养功效丰富、口感风味俱佳的黄精覆盆子膏。傅航^[60]等以红心火龙果为主料,玉竹、黄精为辅料,酿造复合果酒。酿造出的果酒 ABTS+ 自由基清除率为 80.84%, DPPH 自由基清除率为 91.87%,酒体澄清透亮,呈酒红色,酒香和谐、丰富。杨莹莹^[61]以黄精、枸杞、山药为主要原料,添加一定量的木糖醇、柠檬酸、糊精等辅料,制备复方黄精枸杞咀嚼片。制备的咀嚼片风味独特、酸甜可口、营养丰富、口感俱佳。黄露玄^[62]等人以黄豆和黄精为原料,研制黄精内酯豆腐。以感官评分为考察指标,通过正交试验确定黄精内酯豆腐的制备工艺。制得的黄精内酯豆腐口感细腻爽滑,具有黄精特有的风味,黄精多糖含量为 3.13%,兼具营养和保健功效。张国泰^[63]在传统麦曲制作的过程中添加不同比例的黄精,探究黄精添加对麦曲微生物菌群结构、功能基因及其酿造黄酒风味的影响,在此基础上酿造黄精黄酒并对其的酿造工艺进行优化。Zheng^[64]等研究了黄精对年糕品质和特性的影响。在年糕中掺入黄精粉增加了产品的含水量和吸水率、抑制了年糕老化、降低了年糕的消化率,显示出 52.14 的低估计升糖指数。Zhao^[65]等人研究开发一种添加了人参和黄精粉的乳酸杆菌泡腾片配方,实现多种保健功能,为功能性益生菌产品的开发提供了新思路。于畅^[66]以黄精枸杞粗多糖为原料,辅以魔芋胶、卡拉胶、赤藓糖醇开发凝胶软糖。制备黄精枸杞凝胶软糖表面光滑,色泽均匀透亮、柔软富有弹性,具有独特的黄精枸杞风味、甜味适宜。张力丹^[67]选择了黄精、刺梨为原料,以《保健食品功能评价方法(2020 版)》为指导,开发出了具有肝保护作用的黄精刺梨复合饮料。程莹^[68]以杂粮粉和黄精粉为主要原料,以木糖醇替代蔗糖作为蛋糕甜味剂,制作的黄精杂粮蛋糕呈浅黄棕色,质地柔软富有弹性,具有黄精和杂粮的独特香气,并且相较于传统蛋糕,抗氧化和抗老化能力有所提高。王杰^[69]等研究了白砂糖、果胶、改性木薯淀粉和黄精多糖的添加对酸奶发酵特性的影响,发酵完成后所得到的黄精多糖酸奶品质良好,乳酸菌菌落总数显著高于对照组,且具有略微的黄精风味,酸甜适中,口感良好,形态稳定,无分层现象。刘明研^[70]将滇黄精和拐枣、苦荞皮等共同发酵,采用单因素比对方法发酵制成了保留原料功效成分的滇黄精醋。

然而,对于黄精面包的研究报道相对较少,仅有少数文献提及^[71,72]。因此,进一步探讨黄精在面包中潜在的作用具有广阔的市场潜力和社会效益。

1.3 研究目的与意义

黄精作为药食同源资源，其全粉富含膳食纤维与结构特异性多糖。本研究通过构建 0%~10%黄精粉添加梯度体系，系统解析其对复合面团特性、面包加工特性、抗氧化活性及体外消化特性，同步分析储藏期内老化动力学的影响规律。研究成果为开发兼具慢消化功能与抗氧化特性的烘焙产品提供数据支撑，为药食同源资源的高值化利用提供理论范式。

1.4 主要研究内容

本研究以黄精粉和小麦粉作为原料，研究了不同的添加量的黄精粉对面团特性、面包品质、面包储藏期老化机制以及尝试开发功能性面包。

（1）探究黄精粉添加量对面团特性的影响

研究对比了不同比例混合粉（0%、2%、4%、6%、8%、10%）的糊化特性、面团的流变学、质构特性，探讨黄精粉的添加量如何影响面团特性、面筋的形成以及面筋蛋白二级结构。

（2）探究黄精粉添加量对面包品质和抗老化效果的影响

分析黄精粉添加量对面包色泽、比容、质构特性、抗氧化能力、消化特性及综合感官评价的影响。利用差示量热扫描仪（DSC）和 X 射线衍射的方法，研究了黄精粉在面包储存期间的抗老化机制。

（3）低 GI 黄精面包的开发

根据黄精粉对面包消化的影响，结合红豆和黑豆等低 GI 原料开发低 GI 黄精面包。通过谷朊粉对面包感官品质进行改良，探讨低 GI 黄精杂粮面包的工艺配方。

第二章 黄精粉对面团特性的影响

2.1 引言

面团作为烘焙制品的基质体系,其流变特性、发酵性能及微观结构直接决定了最终产品的品质。淀粉和蛋白质是小麦粉的两种主要成分,对面团的加工和面包的品质起着关键作用。在面团中,蛋白质之间的共价和非共价相互作用形成的蛋白质基质构建形成面筋网络^[73],淀粉主要作为面筋网络中的填充材料。而添加天然植物成分会改变面团加工特性。有研究表明,添加菊粉可以降低面团的吸水率,面团的延伸性也随着菊粉含量的增加而降低^[74];添加马铃薯粉会导致面团糊化特性以及面条粘附性和弹性的恶化。此外它还降低了面团的水分活度^[75];添加麦麸膳食纤维会使面团的延展性和气体开始从面团中逸出的时间显著降低,但面团硬度显著增加,弹性模量和粘性模量呈上升趋势^[76];添加藜麦粉会使得面团稳定性、淀粉回生值、面团延展性、黏性、最高糊化温度和面包质量参数皆呈下降趋势^[77]。而黄精作为传统中药材,富含多糖、膳食纤维、黄酮类化合物及皂苷等活性成分,具有显著的抗氧化、抗炎及益生元特性。相较于黄精提取物,黄精全粉的添加不仅能保留完整的活性成分,其含有的天然纤维与胶体物质更可能对面团的理化特性产生协同调控作用。

本章研究不同黄精粉添加量(0%、2%、4%、6%、8%、10%)对小麦粉糊化特性、面筋形成的影响,并分析面团的质构特性、拉伸特性、流变学特性、发酵力等性质,结合傅里叶红外光谱分析面筋蛋白的二级结构来综合探讨黄精粉对面团特性的影响机制。

2.2 材料与设备

2.2.1 材料与试剂

黄精粉(黄精经过九蒸九晒,干燥粉碎过60目筛备用。其主要成分含量为膳食纤维54.75%,淀粉15.49%,可溶性多糖15.56%,蛋白质2.31%,黄酮0.41%);安徽省青阳县九华中药材科技有限公司;

高筋小麦粉,黄油:益海嘉里粮油工业公司;

高活性干酵母(耐糖型):安琪酵母股份有限公司;

白砂糖:常州市贯通食品有限公司;

奶粉：伊利乳业集团公司；

精制盐：安徽省盐业集团公司；

鸡蛋：市售；

甘氨酸、L-半胱氨酸、 β -巯基乙醇、5,5-二硫代-2-硝基苯甲酸（DTNB）、乙二胺四乙酸（EDTA）、三羟甲基氨基甲烷（Tris）、尿素、三氯乙酸：分析纯，国药集团化学试剂有限公司。

2.2.2 仪器与设备

HMJ-D5600 型和面机，北京利仁科技股份有限公司；

长帝 F40 型烤箱，佛山市伟仕达电器实业有限公司；

CT310K 型质构仪，美国 Ametek Brookfield 公司；

TADisconeryDHR-3 型流变仪，美国 TA 公司；

JIDI-5G 型台式离心机，广州吉迪仪器有限公司；

FD-304 型冷冻干燥机，上海培东冷冻干燥设备有限公司；

Rapid-20 型粘度分析仪，上海保圣实业发展有限公司；

NS800 型分光测色仪，深圳市三恩时科技有限公司；

IRPrestige-21 型傅里叶变换红外光谱仪，日本岛津公司。

2.3 实验方法

2.3.1 黄精-小麦混合粉的配制

通过将 0%、2%、4%、6%、8%和 10%的黄精粉（以总粉料的质量为基准）按比例替换小麦粉，制备出多种不同配比的小麦与黄精混合粉。

2.3.2 面团和面筋的制备

称取一定量的 2.3.1 混合粉，加入 55%质量的蒸馏水，用和面机揉制 30 min，得到不同黄精粉添加量的面团。

将面团手工搓洗以提取湿面筋，随后利用真空冷冻干燥机进行干燥，最终获得冻干的面筋蛋白，并对其二硫键及二级结构进行分析。

2.3.3 面粉糊化特性测定

按照 0%、2%、4%、6%、8%和 10%的比例，逐步用黄精粉替代小麦粉并充分混合。然后，精确称取 2.50 g 的混合粉，放入样品桶中，加入 25 mL 蒸馏水，接着将其放入快速黏度分析仪进行测试。采用温度模式进行测定，测得 RVA 曲

线。

2.3.4 面团质构特性测定

使用 TA4/1000 探头，将新鲜面团成型后置于质构仪的测试平台上，设置探头移动速度为 1.0 mm/s，并选择 50% 的压缩形变量。

2.3.5 面团拉伸特性测定

将准备好的面团静置 5 min 以使其应力松弛，然后取出面团进行拉伸测试。将面团压制成 10 mm×30 mm 的条状样品，随后使用质构仪进行拉伸试验。该试验重复进行三次，并对结果进行统计分析。设定的参数如下：测定速度 0.5 mm/s，应变位移 50.0 mm，触发点负载 5.0 g。

2.3.6 面团流变学特性测定

取适量面团放在直径 20 mm、夹缝 1 mm 的载物台上，涂薄层油以防脱水，在 0.1~20.0 Hz 频率、0.5% 应变力、25℃ 条件下进行测试，采用振荡模式进行频率扫描操作。

2.3.7 面团发酵力测定

取 2.3.2 制备的面团 100g 放入 250 mL 量筒内压实，38℃ 下进行发酵，每隔 30 min 记录面团体积和产气量，发酵时间 120 min。

2.3.8 湿面筋测定

依据 GB/T 5506.1-2008 标准，测定湿面筋的得率。

$$G/\% = \frac{M_1}{M_0} \quad (2-1)$$

式中：G 为湿面筋得率； M_1 为湿面筋质量 (g)； M_0 为面粉的实际质量 (g)。

2.3.9 面筋中二硫键、游离巯基和总巯基含量测定

(1) 游离巯基含量测定：用 0.2 mol/L Tris-Gly 缓冲溶液 (pH 8.0, 含有 8 mol/L 尿素，使用 1% SDS 和 3 mmol/L EDTA) 配制 2 mmol/L 的 L-半胱氨酸母液。量取 4 mL 不同浓度的 L-半胱氨酸溶液，定量加入 0.1 mL 的 10 mmol/L DTNB 并充分混合。然后在室温下静置 20 min 后于 412 nm 波长下测定吸光度，绘制标准曲线，其方程为： $y=1.8393x+0.0683$ ， $R^2=0.9963$ 。

参照 Chan 的方法^[78]进行修改，分别称 200 mg 面筋蛋白样品溶于 20 mL 的 0.2 mol/L Tris-Gly 缓冲溶液中，震荡 10 min，5000 r/min 离心 10 min。取 4 mL

上清液，加入 0.1 mL 10 mmol/L DTNB，充分摇匀后静置 20 min。然后在 412 nm 波长下测量吸光度，按公式（2-2）计算面筋中游离巯基的含量。

$$S_F/(\mu\text{mol/g}) = \frac{n}{c} \quad (2-2)$$

式中： S_F 为面筋中游离巯基含量（ $\mu\text{mol/g}$ ）； n 为根据标准曲线计算出的巯基浓度（ $\mu\text{mol/mL}$ ）； c 为样品浓度（ g/mL ）。

（2）总巯基含量测定：取（1）中离心后的上清液 10 mL，加入 10 mL β -巯基乙醇充分混匀，水浴 60°C 反应 2 h，加入 50 mL 12% 三氯乙酸，5000 r/min 离心 10 min 后，弃上清液。接着用 12% 的三氯乙酸洗涤沉淀，用 50 mL 0.2 mol/L 的 Tris-Gly 溶解沉淀，取该溶液 4 mL，加入 0.1 mL 10 mmol/L DTNB 充分摇匀，静置 20 min 后，在 412 nm 波长下测量吸光度，按公式（2-3）计算总巯基的含量。

$$S_T/(\mu\text{mol/g}) = \frac{nV_2}{cV_1} \quad (2-3)$$

式中： S_T 为面筋中总巯基含量（ $\mu\text{mol/g}$ ）； n 为根据标准曲线计算出的巯基浓度（ $\mu\text{mol/mL}$ ）； c 为样品浓度（ g/mL ）； V_1 为上清液体积（mL）； V_2 为沉淀复溶后体积（mL）。

（3）二硫键含量：二硫键含量按公式（2-4）计算。

$$D/(\mu\text{mol/g}) = \frac{S_T - S_F}{2} \quad (2-4)$$

式中： D 为二硫键含量（ $\mu\text{mol/g}$ ）； S_T 为面筋中总巯基含量（ $\mu\text{mol/g}$ ）； S_F 为面筋中游离巯基含量（ $\mu\text{mol/g}$ ）。

2.3.10 面筋蛋白 FTIR 分析

将冻干面筋与溴化钾混合后，进行快速研磨并手动压制成片。然后在 4000 至 400 cm^{-1} 的波段使用傅里叶变换红外光谱仪进行扫描。使用 Peak fit 4.12 软件分析酰胺 I 带（1700~1600 cm^{-1} ）中各类二级结构的占比。

2.4 数据处理与分析

采用 SPSS 24.0 软件处理实验数据，结果以平均值 $\pm$ 标准差的形式呈现。使用方差分析（ANOVA）中的 Duncan 检验法进行显著性分析，当 $P < 0.05$ 时，表

示差异显著。此外，使用 Origin 2018 软件进行数据绘图。

2.5 结果与分析

2.5.1 黄精粉对面粉糊化特性的影响

图 2-1 展示了不同样品的糊化过程。分析糊化曲线中可以提取糊化温度、粘度、崩解值和回生值等参数，具体数据见表 2-1。由表 2-1 可知，添加黄精的混合粉糊化温度显著提高 ($P<0.05$)，峰值黏度、最终黏度、回生值和崩解值均显著降低。添加了黄精粉，减少了混合粉中的淀粉比例，同时由于黄精粉中富含膳食纤维和多糖类物质，膳食纤维具有很强的亲水性，而多糖能够与水结合形成凝胶，这会降低体系中自由水的含量。这种变化影响了淀粉分子的溶胀和糊化过程，导致混合粉的糊化温度升高，同时黏度峰值下降。随着黄精粉添加量的继续增大，体系黏度值略有增加，可能是黄精粉中含有多糖形成凝胶反而增大了体系黏度。回生是糊化的淀粉重新结晶的现象，可以衡量淀粉短期老化程度，添加黄精粉能明显降低淀粉的回生值。回生值的降低则可延缓淀粉老化，提高面包抗老化能力^[79]。

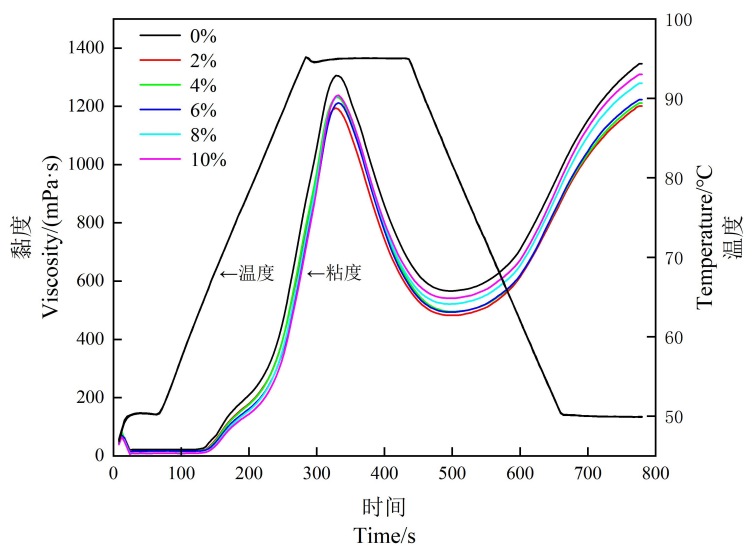


图 2-1 混合粉糊化过程中黏度的变化

Fig. 2-1 Change of viscosity of mixed powder during gelatinization

表 2-1 不同黄精粉添加量对面粉糊化特性的影响

Table 2-1 Effect of *Polygonatum* powder on pasting properties of wheat flour

黄精添加量/%	糊化温度/°C	峰值黏度/mPa·s	谷值黏度/mPa·s	最终黏度/mPa·s	回生值/mPa·s	崩解值/mPa·s
0	67.7±1.6 ^b	1307.5±11.5 ^a	566.0±18.0 ^a	1346.5±23.5 ^a	780.5±5.5 ^a	741.5±6.5 ^a
2	84.1±0.3 ^a	1194.5±2.5 ^c	483.0±6.0 ^c	1201.0±7.0 ^c	718.0±1.0 ^c	719.3±13.1 ^{ab}
4	84.1±0.4 ^a	1231.7±14.1 ^b	490.0±6.0 ^c	1211.3±14.6 ^c	715.7±6.3 ^c	736.0±6.2 ^a
6	84.7±0.1 ^a	1212.0±1.0 ^{bc}	493.5±3.5 ^c	1211.7±18.4 ^c	729.5±7.5 ^{bc}	718.5±2.5 ^{ab}
8	85.2±0.8 ^a	1235.5±7.5 ^b	501.3±3.1 ^{bc}	1239.0±16.0 ^{bc}	737.7±2.0 ^{bc}	714.5±21.5 ^{ab}
10	85.5±0.6 ^a	1240.0±19.0 ^b	514.0±6.0 ^b	1250.5±20.5 ^b	753.0±6.2 ^b	699.0±2.0 ^b

注：同列不同字母表示存在显著性差异($P<0.05$)。

2.5.2 黄精粉对面团质构特性的影响

从表 2-2 可以看出，与对照组相比，添加黄精粉后面团的硬度和弹性有所增加。这可能是由于黄精粉中丰富的不溶性膳食纤维能够填充面筋网络，从而增强面团的硬度和弹性。面团的咀嚼性和胶着性则呈现出先降低后增加的趋势，黄精粉中纤维素的增多可能导致咀嚼性的提升。另外，黄精中含有多糖，多糖与水结合形成凝胶增大了面团的胶着性^[80]。

表 2-2 黄精粉对面团质构的影响

Table 2-2 Effect of *Polygonatum* powder on texture properties of dough

黄精添加量/%	硬度/g	弹性/mm	咀嚼性/mJ	内聚性	胶着性
0	268.0±10.06 ^b	11.34±0.09 ^b	31.48±5.68 ^{ab}	0.73±0.04 ^a	208.7±3.3 ^{ab}
2	264.5±13.65 ^b	12.19±1.26 ^b	25.05±2.35 ^b	0.74±0.04 ^a	186.0±10.8 ^b
4	288.5±28.74 ^{ab}	12.61±1.67 ^b	25.25±3.26 ^b	0.75±0.07 ^a	212.7±4.9 ^{ab}
6	302.2±68.86 ^{ab}	13.04±1.81 ^{ab}	36.30±0.30 ^a	0.76±0.10 ^a	245.7±35.3 ^a
8	317.3±17.34 ^{ab}	15.14±0.72 ^a	36.43±3.32 ^a	0.79±0.06 ^a	237.8±26.6 ^a
10	329.8±12.95 ^a	13.30±1.01 ^{ab}	34.47±1.43 ^a	0.79±0.02 ^a	232.4±27.2 ^a

注：同列不同字母表示存在显著性差异($P<0.05$)。

2.5.3 黄精粉对面团拉伸特性的影响

面团的拉伸特性反映了其强度和可塑性，由图 2-2 可知，黄精粉添加量增加，面团强度提高，最大断裂距离先增后减。在添加 2%~6%的黄精粉时，面团更有延展性；超过 8%时，其延展性低于对照组。黄精粉中富含纤维素和多糖，在黄

精粉添加量较低时,多糖与水形成的凝胶增加了面团的延展性;而随着黄精添加量的增加,纤维素的存在会逐渐阻碍面筋网络的形成并且逐渐大于多糖对面团延展性的影响,导致面团的延展性下降。过量的黄精粉会降低面团的延展性,这一现象与质构特性分析的结果相符。

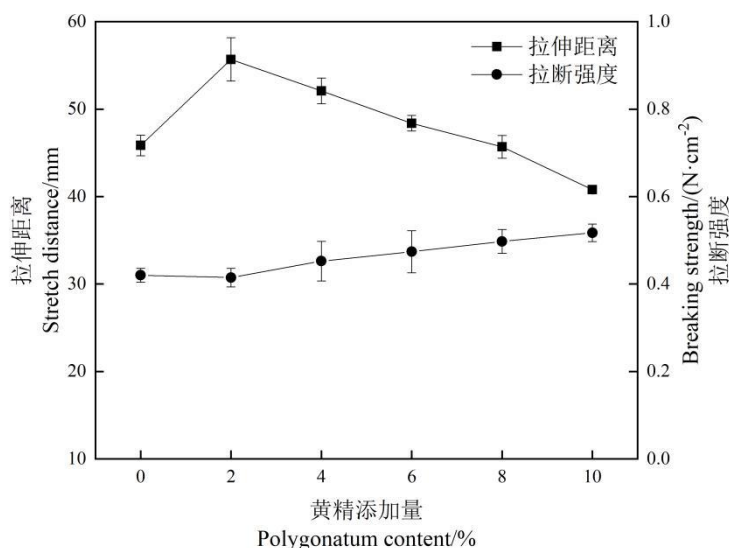


图 2-2 黄精粉对面团拉伸特性的影响

Fig. 2-2 Effect of *Polygonatum* powder on tensile properties of dough

2.5.4 黄精粉对面团流变学特性的影响

由图 2-3 可知,随着频率的增加,面团的弹性模量和黏性模量均在增加,且弹性模量高于黏性模量,损耗因子 $\tan\delta < 1$,表明面团的流变特性更加接近固体。同时,黄精粉添加使面团的弹性模量和黏性模量变大。黄精粉中含有纤维素,随着黄精粉添加量的增加,体系中纤维素含量增加,此时面团体系的弹性比例更大,弹性模量增大,类似固体的特性更为明显。黄精粉中还含有多糖,黄精多糖具有很强的亲水性,与水结合能形成凝胶。凝胶结构与面筋网络彼此交联,增强了面筋网络体系的弹性和黏性,使面团的弹性模量和黏性模量增大^[81]。黄精粉的添加促进了面团对水分的吸收,提高了面团含水量,使面团的黏性增大。黄精粉的添加使面团的黏弹性增大,影响面团的后续加工。

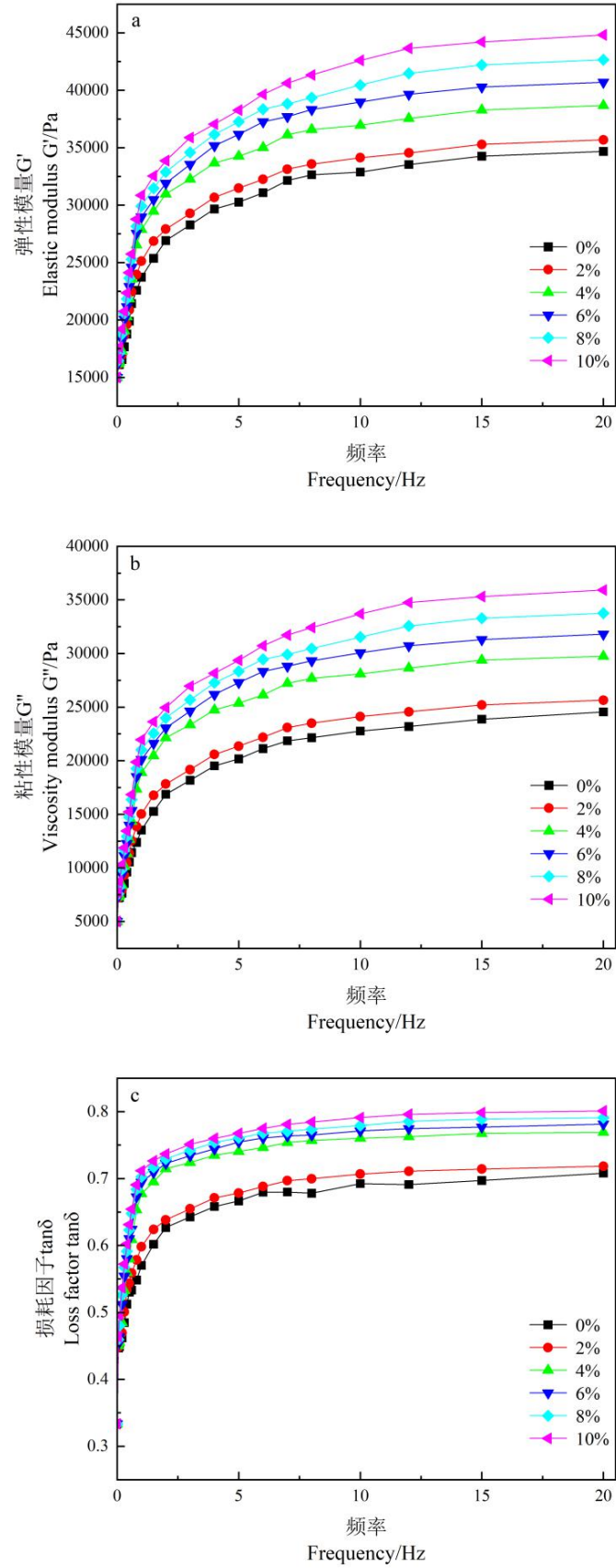


图 2-3 黄精粉对面团流变学特性的影响

Fig. 2-3 Effect of *Polygonatum* powder on rheological properties of dough

2.5.5 黄精粉对面团发酵力的影响

由图 2-4 (a) 可知,面团的体积随着发酵时间的延长而逐渐增大,但在发酵 90 min 后,体积不再增加。与对照组相比,添加黄精粉的面团发酵体积有所降低。由图 2-4 (b) 可知,添加黄精粉的面团产气量低于对照组。面团的体积取决于面团的产气量、面团的韧性和面筋网络的持气量。黄精粉的添加可能抑制了酵母菌的生长,导致产气量有所降低。另外,黄精粉中含有纤维素,纤维素与面筋蛋白争夺水分,导致蛋白质二级结构发生变化,使面筋网络难以展开,持气量降低,使面团发酵体积减小^[82]。

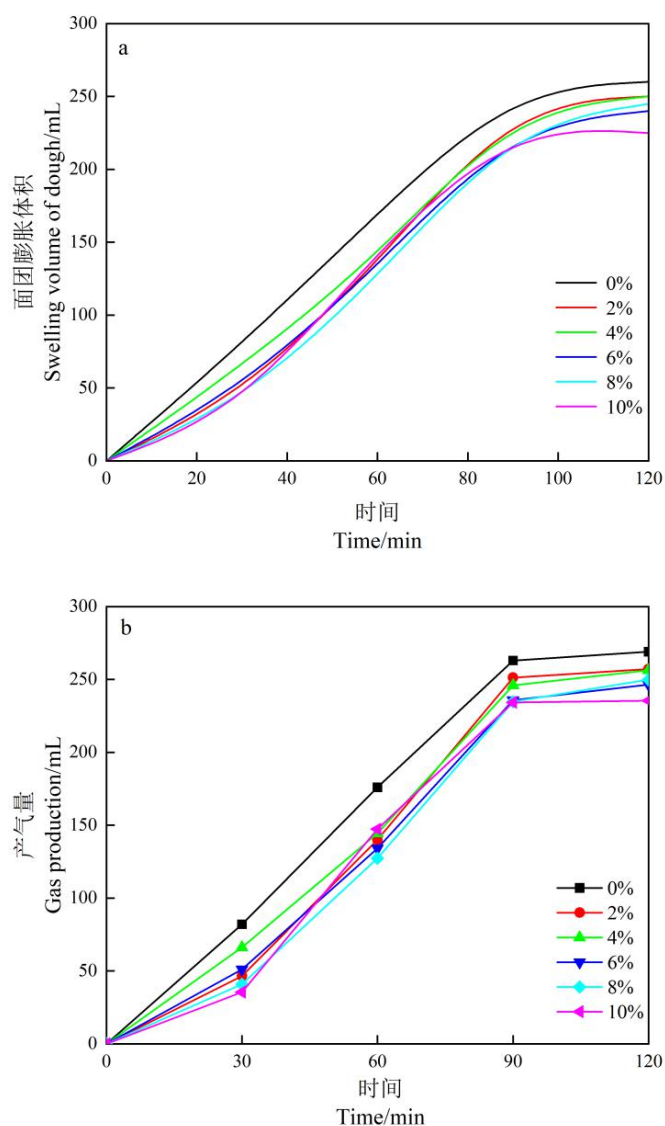


图 2-4 不同黄精粉添加量对面团发酵力的影响

Fig. 2-4 Effect of different *Polygonatum* content on the fermentation ability of dough

2.5.6 黄精粉对湿面筋含量的影响

由图 2-5 可知，黄精粉梯度添加使混合粉面团的湿面筋含量逐渐降低（ $P < 0.05$ ）。表面上看，黄精粉部分取代了小麦粉，导致麦谷蛋白和醇溶蛋白含量降低。为进一步解释黄精粉对面筋形成的影响机制，将混合粉面团的湿面筋含量和去除黄精粉的小麦粉面团（100%，98%，96%，94%，92%，90%）的湿面筋含量对比。一方面，因为黄精粉的加入在一定程度降低了能够形成湿面筋的蛋白质含量，但这种影响差异不显著；另一方面，黄精粉中含有纤维素，会影响小麦粉中麦谷蛋白和醇溶蛋白之间的交联，阻碍了面筋的形成，使混合粉中面团的湿面筋含量明显降低。

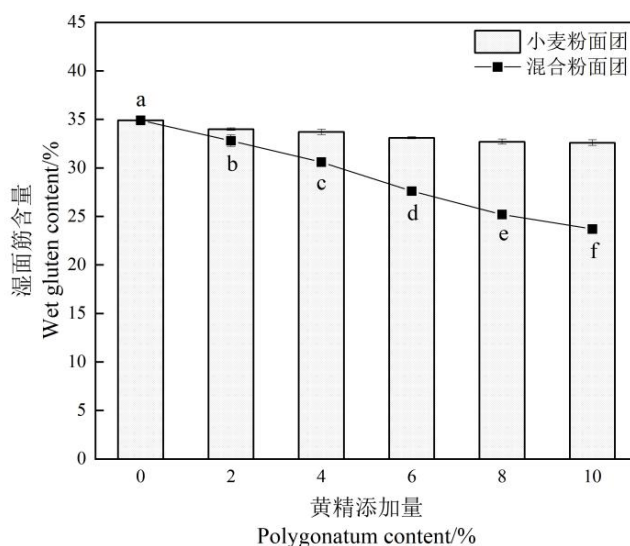


图 2-5 黄精粉对面团湿面筋含量的影响

Fig. 2-5 Effect of *Polygonatum* powder on wet gluten content of dough

2.5.7 黄精粉对面筋中游离巯基和二硫键含量的影响

蛋白质中的游离巯基通过形成二硫键来促进面筋网络的形成，二硫键含量可用来衡量面团质量^[83]。如图 2-6 所示，与对照组相比，黄精粉添加量增加使面筋中游离巯基含量显著上升（ $P < 0.05$ ），而二硫键含量显著下降（ $P < 0.05$ ）。可能是由于黄精中的膳食纤维阻碍了二硫键的形成，而黄酮类、酚类物质具有还原性，将二硫键还原成游离巯基有关。李平等^[84]的研究也表明，螺旋藻中的膳食纤维在减弱面筋蛋白交联作用的同时，使面筋中的二硫键含量下降，游离巯基含量升高。

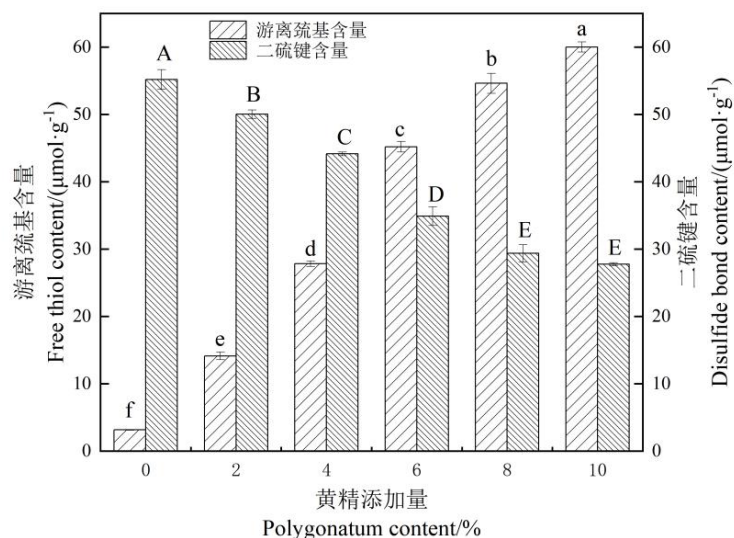


图 2-6 小麦面筋中游离巯基和二硫键含量的变化

Fig. 2-6 Changes of free thiol and disulfide bonds in gluten

2.5.8 黄精粉对面筋蛋白质二级结构的影响

面筋网络结构的稳定性对面包的烘焙品质具有重要影响，图 2-7 为不同面筋样品的红外光谱图。通过去卷积化方法可以计算酰胺 I 带 ($1700\sim 1600\text{ cm}^{-1}$) 中蛋白质的各二级结构的含量。由表 2-3 可知，黄精粉的添加增加了 β -折叠和无规卷曲的含量，降低了 α -螺旋、 β -转角的含量，表明黄精粉的添加对面筋网络结构的稳定性产生了影响。无规卷曲含量的增加和 α -螺旋含量的降低，主要由于黄精粉中的膳食纤维破坏了面筋蛋白的二级结构，导致面筋蛋白无序结构的增加和有序结构的降低^[85]。黄精粉中的膳食纤维引起面筋网络中水分的重新分配、部分蛋白质脱水，导致 β -折叠含量上升和 β -转角含量下降，而黄精粉中酚类物质的作用，也会促进 β -折叠的形成^[86]。

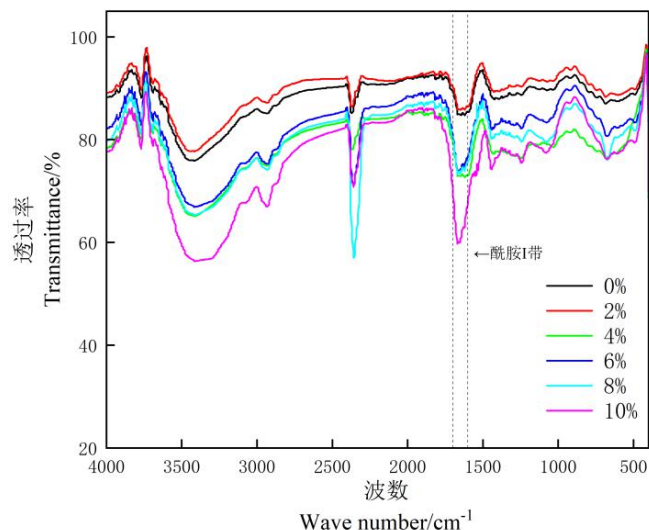


图 2-7 不同黄精添加量面筋的红外光谱图

Fig. 2-7 Infrared spectra of gluten proteins derived from dough prepared with different addition of *Polygonatum* flour

表 2-3 小麦面团面筋蛋白二级结构相对含量的变化

Table 2-3 Changes in relative content of secondary structure in gluten protein in wheat dough

黄精添加量/%	α -螺旋/%	β -折叠/%	β -转角/%	无规卷曲/%
0	24.08 $\pm$ 0.12 ^a	19.29 $\pm$ 0.16 ^d	37.61 $\pm$ 0.34 ^a	18.40 $\pm$ 0.04 ^c
2	23.65 $\pm$ 0.80 ^{ab}	22.03 $\pm$ 3.05 ^c	35.11 $\pm$ 1.62 ^b	19.20 $\pm$ 1.08 ^b
4	20.48 $\pm$ 0.43 ^b	24.20 $\pm$ 2.16 ^{bc}	35.86 $\pm$ 0.57 ^b	19.46 $\pm$ 1.16 ^b
6	20.42 $\pm$ 0.03 ^b	26.93 $\pm$ 0.23 ^b	33.09 $\pm$ 0.24 ^c	19.56 $\pm$ 0.06 ^b
8	18.64 $\pm$ 0.36 ^c	27.40 $\pm$ 0.09 ^b	32.54 $\pm$ 0.35 ^c	21.42 $\pm$ 0.13 ^a
10	16.69 $\pm$ 0.07 ^d	31.64 $\pm$ 0.31 ^a	29.38 $\pm$ 0.34 ^d	22.29 $\pm$ 0.01 ^a

注：同列不同字母表示存在显著性差异($P < 0.05$)。

2.6 本章小结

通过将 0%、2%、4%、6%、8%、10% 的黄精粉按比例替换小麦粉，研究对比了不同比例混合粉的糊化特性、面团特性、面团湿面筋含量、面筋中游离巯基和二硫键含量、面筋蛋白二级结构。结果表明，添加黄精的混合粉糊化温度显著提高，黏度、回生值和崩解值均显著降低，从而延缓淀粉老化。随着黄精粉的添加量逐渐增加，面团的硬度和弹性有所增加；添加 2%~6% 的黄精粉时，面团更有延展性，超过 8% 时，其延展性低于对照组；面团的弹性模量和黏性模量均增加，且弹性模量高于黏性模量，损耗因子 $\tan\delta < 1$ ，这表明面团的流变特性类似

于固体。与对照组相比，添加黄精粉的面团发酵体积有所降低。添加黄精粉后，混合粉面团的湿面筋含量逐渐降低；面筋中游离巯基含量显著增加，而二硫键含量显著下降； β -折叠和无规卷曲的含量增加， α -螺旋、 β -转角的含量降低，即无序结构的增加和有序结构的降低。由此可见，黄精粉的添加对面团特性具有一定的影响。

第三章 黄精粉对面包品质的影响

3.1 引言

面包作为全球消费量最大的主食之一，其营养强化和功能化改进具有重要的现实意义。黄精作为典型药食两用资源，其根茎含有结构异质性多糖、甾体皂苷及黄酮等生物活性组分。近年来，已有研究尝试将黄精提取物应用于食品加工，但针对其全粉形式在烘焙体系中的应用研究仍显不足。传统面包营养价值单一，难以满足现代消费者的需求。现有研究表明，添加车前子可降低面包硬度，增加其内聚性和弹性，同时也降低了面包的卡路里含量^[87]；添加杏仁粉使面包的比容、弹性显著降低，而面包的硬度增加^[88]；添加脱脂瓜子渣（DMSR）降低了面包的比容和面包芯中的气孔数，而增加了平均气孔大小，导致面包芯结构不均匀且致密。与对照面包相比，DMSR 面包的外壳颜色更深，面包屑偏黄，质地更坚硬^[89]；添加石榴全果甘蔗渣则显著提高了面包的抗氧化能力^[90]。然而，目前关于黄精粉对面包品质影响的研究仍存在以下局限：首先，黄精粉与小麦粉的适配比例缺乏系统研究；其次，其功能性成分在烘焙过程中的热稳定性及生物利用率尚未明确。

本章通过不同黄精粉添加量（0%、2%、4%、6%、8%、10%）系统探究黄精粉添加对面包加工特性、感官品质的影响规律。通过建立黄精粉-小麦粉复合体系，结合抗氧化能力测定和体外模拟消化实验，评价其品质和功能特性。研究结果将为功能性烘焙食品开发提供理论依据，同时拓展黄精资源的深加工途径，对推动传统药食资源的高值化利用具有重要实践意义。

3.2 材料与设备

3.2.1 材料与试剂

黄精粉（黄精经过九蒸九晒，干燥粉碎过 60 目筛备用。其主要成分含量为膳食纤维 54.75%，淀粉 15.49%，可溶性多糖 15.56%，蛋白质 2.31%，黄酮 0.41%）：安徽省青阳县九华中药材科技有限公司；

高筋小麦粉，黄油：益海嘉里粮油工业公司；

高活性干酵母（耐糖型）：安琪酵母股份有限公司；

白砂糖：常州市贯通食品有限公司；

奶粉：伊利乳业集团公司；

精制盐：安徽省盐业集团公司；

鸡蛋：市售；

甲醇、无水乙醇、抗坏血酸（VC）、1,1-二苯基-2-三硝基苯肼（DPPH）、2,2-联氮-二(3-乙基-苯并噻唑-6-磺酸)二铵盐（ABTS）、过硫酸钾、硫酸亚铁、水杨酸、过氧化氢、盐酸、磷酸二氢钠、磷酸氢二钠、胃蛋白酶、胰酶：分析纯，国药集团化学试剂有限公司。

3.2.2 仪器与设备

HMJ-D5600 型和面机，北京利仁科技股份有限公司；

长帝 F40 型烤箱，佛山市伟仕达电器实业有限公司；

CT310K 型质构仪，美国 Ametek Brookfield 公司；

NS800 型分光测色仪，深圳市三恩时科技有限公司；

JIDI-5G 型台式离心机，广州吉迪仪器有限公司；

FD-304 型冷冻干燥机，上海培东冷冻干燥设备有限公司。

3.3 实验方法

3.3.1 面包制作配方

面包配方：称取混合粉 200 g、酵母 2.4 g、糖 10 g、奶粉 8 g、黄油 16 g、盐 2 g、鸡蛋 20 g 和水 100 g，将全部原料放入和面机进行揉制。揉好后，将面团放入 38℃ 的条件下发酵 60 min。发酵后进行排气整形，再次醒发 30 min，最后放入烤箱进行烘焙，上火温度设定为 160℃，下火温度为 165℃。烘烤 25 min，取出面包在室温下放置 2 h 冷却备用，对照组不加黄精粉。

3.3.2 面包色泽测定

采用 LScolour 测色系统测定面包色泽，按公式（3-1）计算面包色差。

$$\Delta E = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2} \quad (3-1)$$

式中： ΔE —色差； L^* —黑白度； a^* —红绿度； b^* —黄蓝度。

3.3.3 面包纹理结构测定

分别选取不同黄精添加量的面包，然后切开，对其横截面进行拍照，比较不同黄精添加量的面包的纹理结构。

3.3.4 面包比容测定

依据 GB/T 14611-2008。面包称重后，使用菜籽置换法测量体积。面包的体

积与其质量的比值即为比容 (mL/g)。

3.3.5 面包质构测定

取面包样品, 去除面包外表皮, 切出 30 mm×30 mm×20 mm 的样品, 放在质构仪的载物台上。选用 TA4/1000 探头, 参数设置: 触发点负载 5.0 g, 测试速度为 1 mm/s, 压缩形变量 50%。2 次压缩时间间隔时间 5 s。

3.3.6 面包感官评定

感官评价参考 9 分嗜好评分法^[91], 面包出炉后冷却至室温, 随机选取 10 名食品相关专业学生作为感官评价员进行感官评价。1~9 分别代表极度不喜欢至极度喜欢。

3.3.7 面包抗氧化能力测定

(1) 面包提取液制备: 取 2.0 g 面包冻干粉末, 加入 25 mL 80% 的甲醇, 在 37℃, 1000 r/min 磁力搅拌下避光提取 2 h, 再超声 30 min。将提取液 5000 r/min 离心 10 min, 取上清液备用, 置于 4℃冰箱中避光保存。

(2) 总多酚含量的测定参考 Folin-Ciocalteu 法^[92]。

(3) 面包 DPPH 自由基清除能力的测定: 参考 Wang 等人的方法^[93]。以 VC 为标准对照, 做标准曲线, 面包 DPPH 自由基清除能力以 VC 当量 (mg VC/g 面包粉末质量) 表示。

(4) 面包 ABTS 自由基清除能力的测定: 参考 Świeca 等人的方法^[92]。ABTS 自由基清除能力以 VC 当量 (mg VC/g 面包粉末质量) 表示。

(5) 羟基自由基清除能力的测定: 参考 Sun 等人的方法^[94]。羟基自由基清除能力以 VC 当量 (mg VC/g 面包粉末质量) 表示。

3.3.8 面包淀粉消化性测定

面包淀粉水解率的测定: 称取 0.5 g 的面包冻干粉末加水均质, 吸取相当于 50 mg 面条的样液, 加入 10 mL PBS 缓冲液 (用 HCl 将 pH 调至 1.5) 和 0.2 mL 0.1 g/mL 胃蛋白酶溶液混匀, 于 40℃ 条件下水浴 1 h。然后加入 PBS 缓冲液 (pH 6.9) 补足体积至 25 mL, 再加入 5 mL 酶液 (其中含有 10 mg 胰酶和 1 mg α-淀粉酶), 放置于 37℃ 的水浴中振荡。在水解时间为 0、10、20、30、60、90、120、150、180 min 处各取 0.4 mL 消化样液, 于 100℃ 水浴 5 min 灭酶。以葡萄糖为标准品, 采用 DNS 法对取出的消化样液中的还原糖含量进行测定。

$$\text{淀粉水解率} / \% = \frac{\text{取样时间点消化液中葡萄糖含量} / \% \times 0.9}{\text{总淀粉含量} / \%} \times 100 \quad (3-2)$$

3.4 数据处理与分析

采用 SPSS 24.0 软件处理实验数据, 结果以平均值 $\pm$ 标准差的形式呈现。使用方差分析 (ANOVA) 中的 Duncan 检验法进行显著性分析, 当 $P < 0.05$ 时, 表示差异显著。此外, 使用 Origin 2018 软件进行数据绘图。

3.5 结果与分析

3.5.1 黄精粉对面包色泽的影响

由表 3-1 可知, 随着黄精粉添加量的增加, 面包内部的 L^* 值逐渐降低, 而 a^* 和 b^* 值则呈现上升趋势。面包的色差值 (ΔE) 也随着黄精添加量的增加而增大, 说明添加黄精粉会使面包色泽变暗。黄精粉中含有色素、黄酮和多糖等物质, 色素和黄酮使面包颜色变深, 多糖和蛋白质在烘烤时产生美拉德反应使面包色泽加深。随着黄精粉添加量的增加, ΔE 值逐渐增大, 表明面包芯的色差明显加大。

表 3-1 黄精粉对面包芯色度的影响

Table 3-1 Effect of *Polygonatum* powder on bread core color

黄精添加量/%	L^*	a^*	b^*	ΔE
0	81.1 $\pm$ 1.71 ^a	-1.08 $\pm$ 0.36 ^c	16.12 $\pm$ 0.29 ^d	-
2	54.5 $\pm$ 0.34 ^b	5.74 $\pm$ 0.14 ^b	28.54 $\pm$ 1.51 ^a	30.77 $\pm$ 2.03 ^c
4	49.1 $\pm$ 0.59 ^c	9.90 $\pm$ 0.75 ^a	28.10 $\pm$ 0.76 ^{ab}	35.84 $\pm$ 1.93 ^b
6	40.3 $\pm$ 0.65 ^d	9.95 $\pm$ 0.14 ^a	24.32 $\pm$ 2.01 ^c	43.05 $\pm$ 2.71 ^a
8	39.2 $\pm$ 0.55 ^d	9.44 $\pm$ 0.26 ^a	24.16 $\pm$ 3.12 ^c	44.07 $\pm$ 1.22 ^a
10	38.7 $\pm$ 0.28 ^d	10.39 $\pm$ 0.69 ^a	25.46 $\pm$ 0.41 ^{abc}	44.90 $\pm$ 2.00 ^a

注: 同列不同字母表示存在显著性差异 ($P < 0.05$)。

3.5.2 黄精粉对面包纹理结构的影响

由图 3-1 可知, 添加黄精粉在 2%~6% 时, 面包的纹理结构差异不大, 此时面包结构较为紧密, 气孔较小, 分布较均匀; 当黄精粉添加量 $> 6\%$ 时, 面包结构较为疏松, 气孔较大, 分布不均匀, 部分区域有塌陷, 这可能是添加黄精粉后, 黄精粉中的纤维素破坏了面筋蛋白的紧密结构, 导致面包的整体结构变得松散。

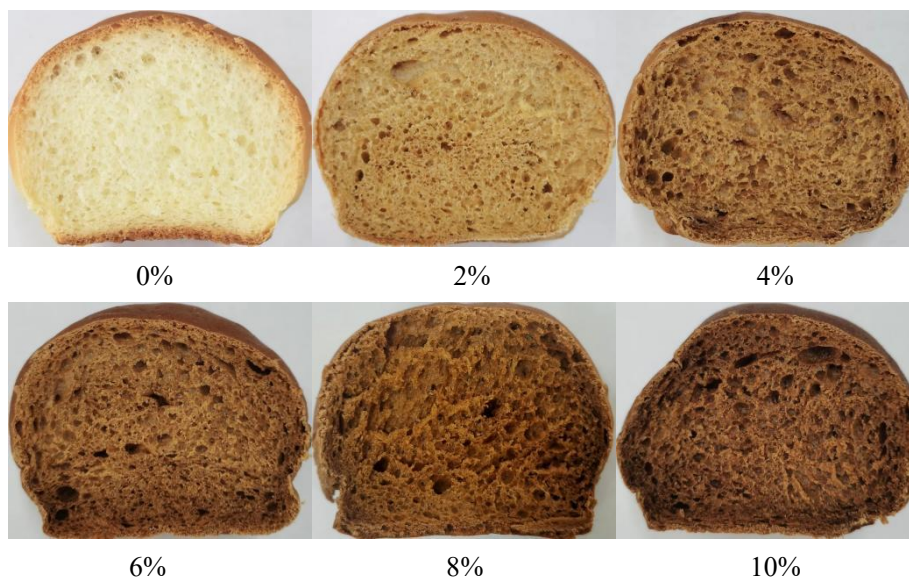


图 3-1 黄精粉对面包纹理结构的影响

Fig. 3-1 Effect of *Polygonatum* powder on the crumb structure of bread

3.5.3 黄精粉对面包比容的影响

由图 3-2 可知，随着黄精添加量增加，面包比容先升后降，可能是由于黄精粉中丰富的多糖能够与面筋蛋白结合，面筋能充分扩展，使面包比容大于对照组。当添加了 2% 以上的黄精粉后，面包比容随着黄精粉的增加而显著下降。这可能是因为膳食纤维的存在干扰了面筋网络的形成，从而导致比容降低，且膳食纤维对比容的负面影响逐渐大于多糖对比容的正面影响。所以从比容上看，黄精粉添加量在 2%~8% 较为适宜。

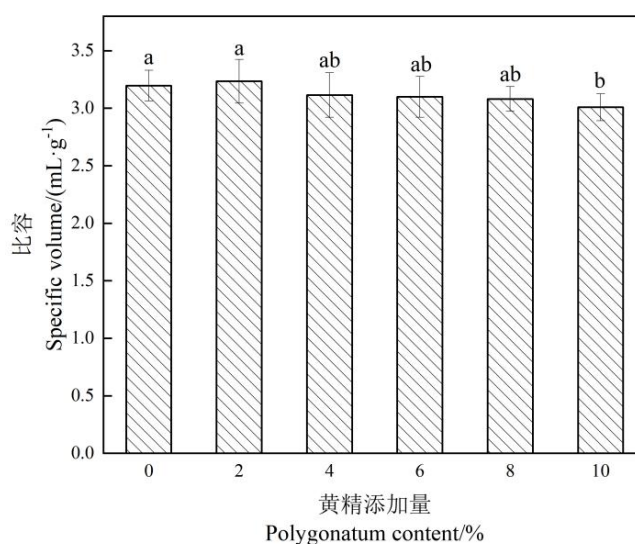


图 3-2 黄精粉对面包比容的影响

Fig. 3-2 Effect of *Polygonatum* powder on specific volume of bread

3.5.4 黄精粉对面包质构的影响

由表 3-2 可知, 添加黄精粉的面包硬度、胶着性和咀嚼性显著增加。面包硬度、胶着性和咀嚼性增加在一定程度上降低了面包的感官品质, 这可能与黄精粉中的纤维素有关, 纤维素含量的增加会降低面包的加工操作性, 从而使面包的适口性变差。加入 2% 的黄精粉时, 面包的弹性较大, 继续增加黄精粉, 面包的弹性降低, 内聚性有所降低。当黄精粉的添加量在 2%~6% 时, 面包的品质仍在可接受范围内; 但如果继续增加, 则会导致面包的感官品质下降。

表 3-2 黄精粉对面包质构的影响

Table 3-2 Effect of *Polygonatum* powder on texture properties of bread

黄精添加量/%	硬度/g	弹性/mm	咀嚼性/mJ	内聚性	胶着性
0	168.50±26.16 ^d	9.07±0.11 ^b	12.20±2.15 ^c	0.74±0.01 ^a	125.00±16.97 ^c
2	193.50±30.41 ^{cd}	14.24±4.76 ^a	14.10±1.13 ^{bc}	0.72±0.03 ^a	138.50±16.26 ^c
4	216.00±20.91 ^c	9.14±0.18 ^b	16.35±1.06 ^{bc}	0.71±0.03 ^a	165.70±29.67 ^c
6	241.50±3.54 ^{bc}	9.14±0.14 ^b	18.13±5.08 ^{bc}	0.70±0.03 ^a	171.00±12.73 ^c
8	269.00±5.57 ^b	9.11±0.02 ^b	20.60±0.57 ^b	0.67±0.02 ^{ab}	222.00±1.41 ^b
10	358.50±2.12 ^a	8.84±0.24 ^b	30.35±0.78 ^a	0.61±0.11 ^b	303.50±19.09 ^a

注: 同列不同字母表示存在显著性差异($P < 0.05$)。

3.5.5 黄精粉对面包感官评定的影响

由图 3-3 可知, 黄精粉的添加量为 2%~6% 时, 面包的外观、质地、口感、风味和整体接受程度较高; 黄精粉添加量超过 6% 时, 面包感官评分降低, 特别是面包质地和口感较差, 导致评价质量较低。黄精粉的添加增加了面包的风味, 但是过多的黄精粉会使外观、质地和口感变差。

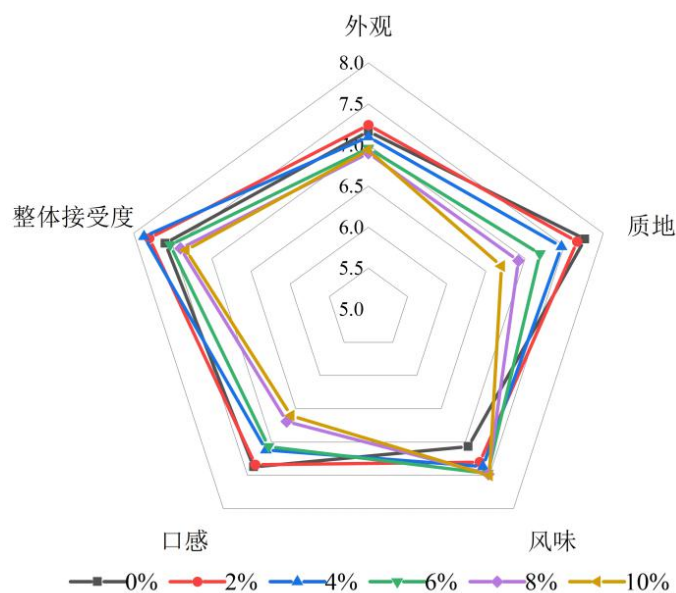
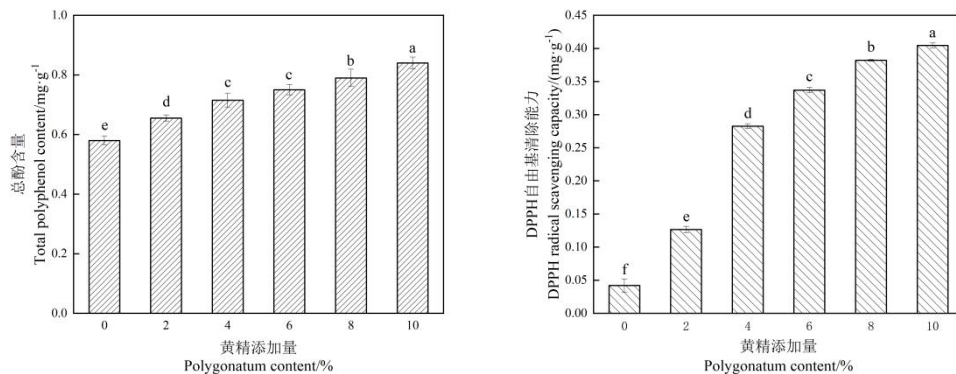


图 3-3 黄精粉对面包感官评定的影响

Fig. 3-3 Effect of *Polygonatum* powder on sensory evaluation of bread

3.5.6 黄精粉对面包抗氧化能力的影响

图 3-4 展示了不同黄精粉添加量的面包的多酚含量和自由基清除能力。面包样品的总多酚含量在 0.58~0.84 mg/g 之间并且面包总多酚含量随着黄精粉添加量的增加而上升。本研究中，我们以 DPPH、ABTS 和 OH 自由基的清除率来评估面包的抗氧化能力。实验数据表明，黄精粉添加量与抗氧化能力呈显著正相关 ($P < 0.05$)。虽然人体内的氧化过程是一种自然的生物反应，但随着时间的推移，体内自由基累计所造成的损害可能变得不可逆转，并导致某些疾病，包括心脏病、肝病和某些癌症^[95]。上述结果表明，黄精粉改良的小麦面包具有显著的抗氧化能力，在慢性病膳食干预策略中展现出独特的营养干预新路径。



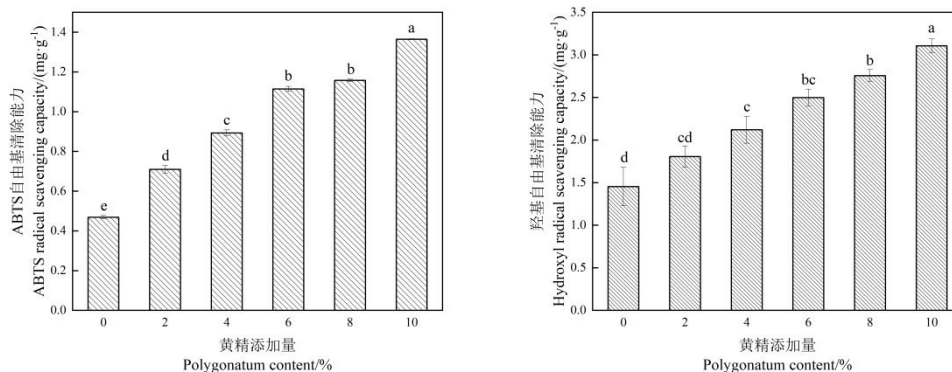


图 3-4 黄精粉对面包抗氧化能力的影响

Fig. 3-4 Effect of *Polygonatum* powder on antioxidant capacity of bread

3.5.7 黄精粉对面包淀粉消化性的影响

图 3-5 所示为面包中淀粉水解率曲线。总的来说，所有面包样品在 20 min 前的淀粉水解率上升显著，随后缓慢增长，在 180 min 左右逐渐达到平衡。通过计算可以得到消化模型的动力学参数 (C_{∞} 和 k)、曲线下方面积 (AUC)、水解指数 (HI) 以及估计血糖生成指数 (eGI)。由表 3-3 可得，随着黄精粉添加量的增加面包的 C_{∞} 和 k 值均减小，在黄精粉添加量达到 10%时， k 值略有回升，添加黄精粉的面包通过其活性组分调控淀粉消化，降低了可利用碳水化合物的释放速率。体外消化模型证实，HI 值与 eGI 值随黄精粉添加比例增加呈现剂量依赖性下降趋势。食品的血糖应答效应直接关联其 GI 值，高 GI 食品通过快速诱导餐后血糖波动，可引发胰岛素抵抗、糖脂代谢紊乱等病理过程，长期摄入显著增加肥胖、II型糖尿病及动脉粥样硬化等代谢综合症风险。综上，添加黄精粉的面包更有益于人体健康，表现为可消化淀粉含量减少，HI 和 eGI 值显著降低 ($P < 0.05$)。一方面，因为黄精粉中丰富的膳食纤维与淀粉竞争水分，抑制了淀粉的糊化，从而抑制其消化；另一方面，有研究表明将膳食纤维添加到面包中通过阻碍消化介质中酶的流动来减少淀粉消化^[96]。

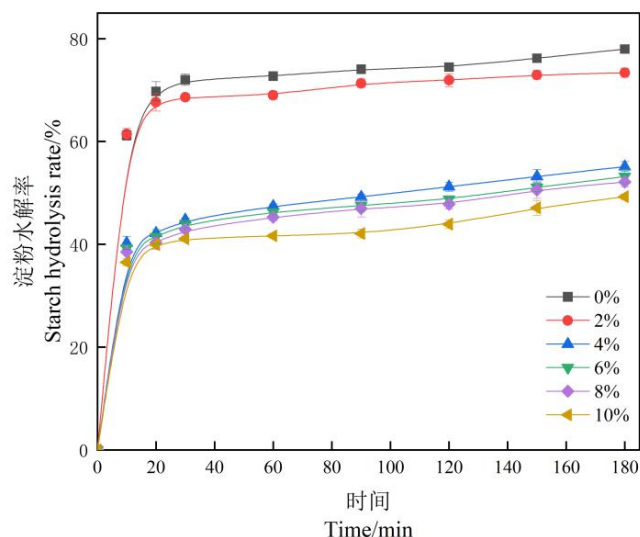


图 3-5 黄精粉对面包淀粉水解率的影响

Fig. 3-5 Effect of *Polygonatum* powder on hydrolysis rate of bread starch

表 3-3 不同黄精粉添加量的面包消化模型参数

Table 3-3 Digestive model parameters of bread with different addition of *Polygonatum* powder

黄精添加量/%	$C_{\infty}/\%$	k	AUC	Calculated HI	eGI
0	77.98±0.22 ^a	0.17±0.01 ^a	12841.31±36.99 ^a	100 ^a	94.40 ^a
2	73.37±0.91 ^b	0.19±0.02 ^a	12318.94±151.11 ^b	95.93±1.18 ^b	90.89±1.01 ^b
4	55.13±0.93 ^c	0.13±0.03 ^a	8576.90±145.84 ^c	66.76±1.14 ^c	65.77±0.98 ^c
6	53.18±1.34 ^c	0.14±0.03 ^a	8295.36±73.68 ^{cd}	64.60±0.57 ^{cd}	63.88±0.49 ^{cd}
8	52.13±0.95 ^c	0.14±0.03 ^a	8145.92±145.45 ^d	63.44±1.16 ^d	62.88±0.99 ^d
10	48.26±0.52 ^d	0.16±0.03 ^a	7567.12±81.55 ^e	58.93±0.64 ^e	58.99±0.55 ^e

注：同列不同字母表示存在显著性差异($P<0.05$)。

3.6 本章小结

本章通过以不同比例的黄精粉替换小麦粉制作面包样品，并研究对比不同添加量的黄精粉对面包色泽、纹理结构、比容、质构特性、抗氧化能力、淀粉消化性和面包感官评定的影响。结果表明，随着黄精粉添加量的增加，面包内部的 L^* 值逐渐降低，而 a^* 和 b^* 值呈上升趋势；面包的色差值 (ΔE) 也随着黄精添加量的增加而增大；当黄精粉添加量 $>6\%$ 时，面包结构更为疏松，气孔较大，分布不均匀，部分区域有塌陷；当添加了 2% 以上的黄精粉后，面包比容随着黄精粉的增加而逐渐下降；面包质构方面，添加了黄精粉的面包硬度、胶着性和咀嚼性显著增加；感官评定方面，黄精粉添加量较高水平时，面包感官评分降低。与

对照组相比,添加黄精粉面包的抗氧化能力显著提高;淀粉消化性方面,随着黄精粉添加量的增加,面包的 C_{∞} 、HI 和 eGI 显著降低。综上,添加黄精粉会使面包的物理特性有所下降,而抗氧化能力与抗淀粉消化性显著提高,说明添加黄精粉的面包更有益于人体健康。此外,黄精粉的添加增加了面包的风味,但是过多的黄精粉会使面包的质地和口感下降。

第四章 黄精粉对面包储藏特性的影响

4.1 引言

面包作为高水分烘焙食品，在储藏期间易发生淀粉回生、质地硬化、风味损失和货架期缩短等问题。据国际烘焙协会统计，全球每年因面包老化造成的经济损失约占烘焙行业总产值的 5%-8%。而黄精作为药食同源植物，富含多糖、酚类化合物及功能性膳食纤维，其多糖组分可通过氢键竞争抑制淀粉分子重排，酚类物质则具有显著的抗氧化与抑菌活性。尽管已有研究证实天然植物及其成分在食品保鲜中的应用潜力，例如 Zhou^[97]等研究发现，海带多糖可以降低小麦淀粉的相对结晶度并且能够抑制水分迁移；Su^[98]等人发现，铁皮石斛多糖也能抑制水分迁移，抑制了可冻结水分含量的上升，并减少了冷冻储存过程中的水分损失；Jia^[99]等发现麸皮的存在抑制了水分子的迁移、大冰晶的形成和重结晶，并降低了储存过程中面包质量恶化的速度。但针对黄精全粉在面包储藏体系中的多维度作用机制尚未系统阐明。当前面包抗老化技术面临双重困境：一方面，化学防腐剂（如丙酸盐）虽能有效抑菌却与清洁标签趋势相悖；另一方面，天然抗老化剂（如菊粉、壳聚糖）的添加常导致面包初始比容下降或风味劣化。

本章系统探究黄精粉（添加量 0%~10%）对面包储藏特性的调控机制。通过差示扫描量热法（DSC）和 X 射线衍射（XRD）表征淀粉回生特性；结合质构分析（TPA）构建老化动力学模型，为面包抗老化研究提供理论依据。

4.2 材料与设备

4.2.1 材料与试剂

黄精粉（黄精经过九蒸九晒，干燥粉碎过 60 目筛备用。其主要成分含量为膳食纤维 54.75%，淀粉 15.49%，可溶性多糖 15.56%，蛋白质 2.31%，黄酮 0.41%）：安徽省青阳县九华中药材科技有限公司；

高筋小麦粉，黄油：益海嘉里粮油工业公司；

高活性干酵母（耐糖型）：安琪酵母股份有限公司；

白砂糖：常州市贯通食品有限公司；

奶粉：伊利乳业集团公司；

精制盐：安徽省盐业集团公司；

鸡蛋：市售。

4.2.2 仪器与设备

HMJ-D5600 型和面机，北京利仁科技股份有限公司；

长帝 F40 型烤箱，佛山市伟仕达电器实业有限公司；

CT310K 型质构仪，美国 Ametek Brookfield 公司；

JIDI-5G 型台式离心机，广州吉迪仪器有限公司；

FD-304 型冷冻干燥机，上海培东冷冻干燥设备有限公司；

QL-610A 型快速水分测定仪，北京中西远大科技有限公司；

DSC-60A 型差示热量扫描仪，日本岛津仪器公司；

D8 Focus 型 X 射线衍射仪，德国布鲁克 AXS 公司。

4.3 实验方法

4.3.1 面包样品制备

按照 3.3.1 制备面包，并在 4℃条件下储藏 0d、1d、3d、5d、7d。

4.3.2 面包储藏过程水分含量测定

称取第 0d、1d、3d、5d、7d 面包，使用快速水分测定仪检测面包中的水分含量。重复 3 次。按公式（4-1）计算水分含量：

$$\text{水分含量} / \% = \frac{m_0 - m_1}{m_0} \times 100 \quad (4-1)$$

式中： m_0 为烘干前所称质量； m_1 为烘干后所称质量。

按公式（4-2）计算水分含量变化速率：

$$\text{水分含量变化速率} / \% = \frac{W_0 - W_7}{W_0} \times 100 \quad (4-2)$$

式中： W_0 为储藏 0d 的面包水分含量； W_7 为储藏 7d 的面包水分含量。

4.3.3 面包储藏过程质构测定

取第 0d、1d、3d、5d、7d 面包样品进行质构测定（同 3.3.5）。利用 Avrami 方程拟合面包质构硬度数据，分析其储藏期间的硬化动力学。将 Avrami 方程变形可得到式（4-3）：

$$R = \frac{F_t - F_0}{F_\infty - F_0} = 1 - \exp(-kt^n) \quad (4-3)$$

式中： R 为面包老化度； F_∞ 、 F_t 、 F_0 为分别代表储藏时间为 ∞ 、 t 和 0 天时面包硬度； k 为速率常数； n 为 Avrami 指数。

4.3.4 面包热力学性质的测定

称取冷冻干燥面包（储藏 7d）样品于 DSC 铝盘中，以 10°C/min 的升温速率由 25°C 升温至 200°C。对照组为空的 DSC 铝盘。测定并计算焓变值 ΔH 。

4.3.5 面包淀粉结晶度测定

分别切取 4°C 储藏 0d 和 7d 的面包芯冷冻干燥，并研磨捣碎；采用 X 射线衍射仪测定淀粉结晶度。测定条件：工作电压 40 kV，电流 30 mA，扫描速度 3.000 (°)/min，扫描范围 5°~45°。样品的相对结晶度（RC）按公式（4-4）计算：

$$RC/\% = \frac{A_c}{A_a + A_c} \times 100 \quad (4-4)$$

式中： A_a 为非结晶区面积； A_c 为结晶区面积。

淀粉重结晶速率按照公式（4-5）计算：

$$\text{淀粉重结晶速率}/\% = \frac{RC_7 - RC_0}{RC_0} \times 100 \quad (4-5)$$

式中： RC_0 为储藏 0d 时的相对结晶度； RC_7 为储藏 7d 时的相对结晶度。

4.4 数据处理与分析

采用 SPSS 24.0 软件处理实验数据，结果以平均值±标准差的形式呈现。使用方差分析（ANOVA）中的 Duncan 检验法进行显著性分析，当 $P < 0.05$ 时，表示差异显著。此外，使用 Origin 2018 软件进行数据绘图。

4.5 结果与分析

4.5.1 黄精粉对面包储藏过程水分含量的影响

在面包储藏过程中，水分散失是引发面包品质劣变的核心因素之一。随着储藏时间的延长，面包的水分含量逐渐降低，水分从面包芯迁移到面包皮被认为是造成这种现象的主要原因^[100]。结合图 4-1 和图 4-2 可知，所有面包的水分含量均随着储藏时间延长而逐渐降低，但添加了黄精粉的面包水分降低速率相较于对照组均显著降低（ $P < 0.05$ ），且黄精粉添加量达到 6% 时面包的水分降低速率达到最低，一定程度上说明其老化速率最低。黄精中富含的膳食纤维具有较强的吸水性和持水性，可在一定程度上延缓面包中的水分散失。当物料体系水分含量较高时，自由水比例提升，导致水分快速散失。但添加 6% 以上的黄精粉可能导致面

筋网络稳定性遭到破坏,降低了其固定水分的能力,使面包水分含量降低速率回升。

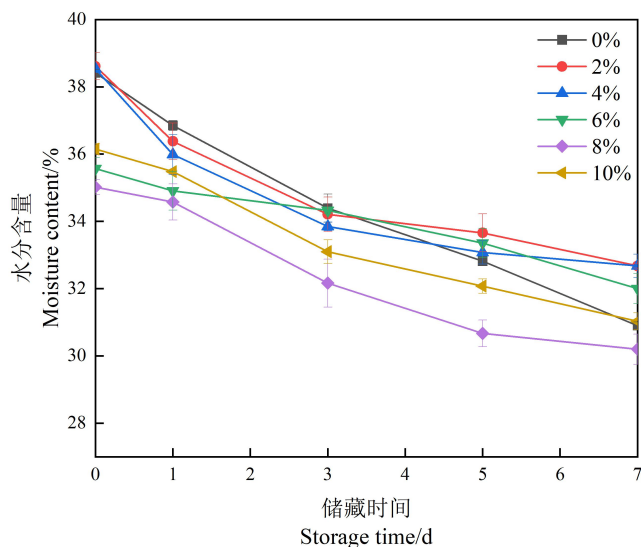


图 4-1 黄精粉对面包储藏过程水分含量的影响

Fig. 4-1 Effect of *Polygonatum* powder on moisture content of bread during storage

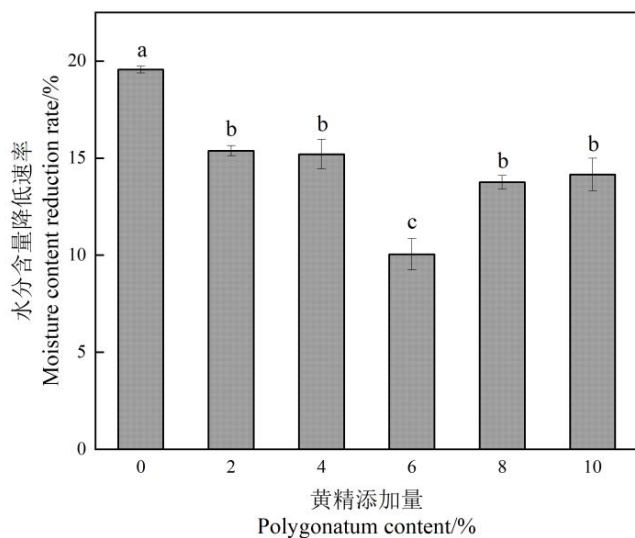


图 4-2 黄精粉对面包储藏过程水分含量降低速率的影响

Fig. 4-2 Effect of *Polygonatum* powder on moisture content reduction rate of bread during storage

4.5.2 黄精粉对面包储藏过程硬度的影响

在面包的储藏过程中会伴有硬化的情况。硬度增加越多,老化程度越大;硬化速率越快,老化速率越快。面包在储藏过程中的质地硬化现象本质上是淀粉老化动力学与水分迁移协同作用的结果,导致面包质构特性的不可逆劣变。由图 4-3 可知,随着储藏时间的延长,所有面包硬度都呈增大趋势。储藏至第 7 天,

对照组面包硬度比时增大了 7.23 倍，而 2%至 10%黄精粉添加量的面包硬度分别增大了 7.01、4.35、4.11、4.41、3.86 倍，表明黄精粉延缓了储藏期间面包硬度的增大。储藏期间硬度持续增大与前述的含水量持续降低的结果密切相关，这是由于黄精粉具有大量膳食纤维，降低了水分的迁移从而使面包老化速度下降。

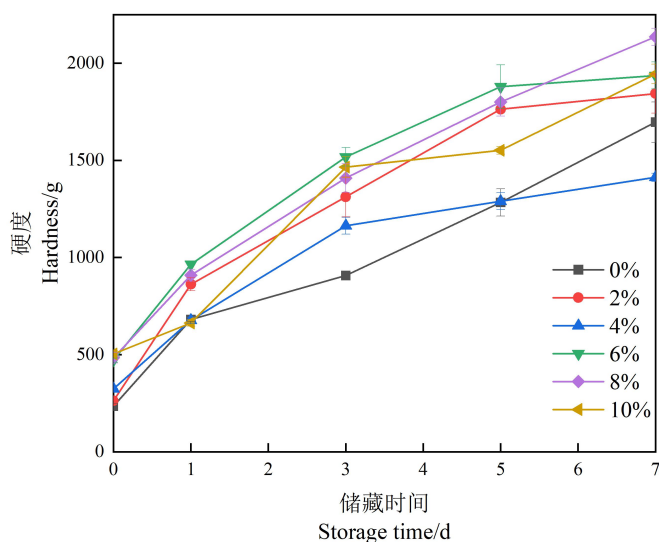


图 4-3 黄精粉对面包储藏过程硬度的影响

Fig. 4-3 Effect of *Polygonatum* powder on the hardness of bread during storage

Avrami 方程常用于淀粉老化动力学模型的研究中，主要包括 k 和 n 这 2 个参数，其中 k 为速率常数，代表面包储藏过程中的硬化速率， k 值越大，说明面包硬化速率越快； n 为 Avrami 指数，其描述了晶体生长的类型^[101]。由表 4-1 可知，随着黄精粉添加量的增加， k 值先增加后减小。当黄精粉添加量达到 8%之后，相较于对照组， k 值显著降低 ($P < 0.05$)，说明添加一定黄精粉后面包储藏期间的老化现象有所减缓。此外，添加了黄精粉的面包 n 值均显著高于对照组 ($P < 0.05$)。有研究表明，当 $n \leq 1$ 时，晶体成核方式为瞬间成核，在淀粉回生早期形成；而 $1 < n \leq 2$ 时，晶体成核方式以自发成核为主，在回生过程中不断形成^[102]。由表 4-1 可见，添加黄精粉的面包 n 值均 > 1 ，即晶体是在淀粉回生过程中不断形成的；对照组的 n 值 < 1 ，说明其晶体是在淀粉回生早期形成的。

表 4-1 基于 Avrami 方程的面包硬度老化动力学参数
Table 4-1 Kinetic parameters of bread hardness aging based on Avrami equation

黄精添加量/%	Avrami 方程	k	n	R ²
0	$y=0.725x-1.075$	0.341 ± 0.025^c	0.725 ± 0.222^c	0.914
2	$y=1.077x-0.827$	0.437 ± 0.033^a	1.077 ± 0.291^{bc}	0.932
4	$y=1.088x-0.905$	0.405 ± 0.012^{ab}	1.088 ± 0.106^{bc}	0.991
6	$y=1.239x-0.950$	0.387 ± 0.023^b	1.239 ± 0.200^b	0.974
8	$y=1.023x-1.239$	0.290 ± 0.010^d	1.023 ± 0.089^{bc}	0.992
10	$y=1.578x-2.019$	0.133 ± 0.046^e	1.578 ± 0.409^a	0.937

注：同列不同字母表示存在显著性差异($P<0.05$)。

4.5.3 黄精粉对面包热力学性质的影响

基于差示扫描量热法(DSC)的热力学分析技术可精准表征淀粉重结晶过程的相变特性,为量化面包老化程度提供可靠依据。如图 4-4 所示,通过测定 7d 储藏周期下面包的回生焓值发现:相较于对照组,添加 2%~10%黄精粉的实验组回生焓值显著下降($P<0.05$),其中 8%添加量样品的回生焓值达到最低水平,表明该添加比例对淀粉回生具有最优抑制效果。当淀粉老化回生时淀粉结晶增加,融化淀粉结晶所需的热量增加,而本实验结果说明黄精粉的添加对面包老化起到了一定抑制效果。这可能是多酚类物质的羟基与淀粉侧链结合,阻碍了淀粉分子间的结合,使其难以排列和形成晶体结构;而膳食纤维能够与面包中的淀粉结合形成稳定的复合物,从而延缓面包的老化^[103]。然而当黄精添加量过高,其所富含的膳食纤维会破坏面筋网络结构,使得老化略有加剧,导致回生焓值有所回升。

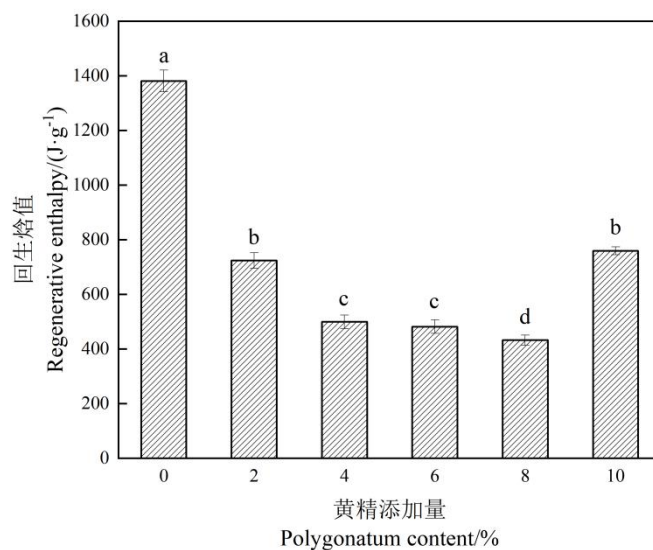


图 4-4 黄精粉对面包回生焓值的影响

Fig. 4-4 Effect of *Polygonatum* powder on the retrogradation enthalpy of bread

4.5.4 黄精粉对面包储藏过程淀粉结晶度的影响

图 4-5 分别展示了不同黄精粉添加量的面包储藏 0 天和 7 天时淀粉的 X 射线衍射图谱。由图 4-5 可知，新鲜面包仅呈现 V 型结晶特征（ 20° ）；经 7 天储藏后，衍射图谱新增 B 型结晶峰（ 17° ），形成 B+V 型复合结晶体系。这种变化源于淀粉分子的多阶段重排：高温热加工诱导淀粉糊化，破坏其天然晶体构型，形成无定形态；冷却过程中，直链淀粉通过分子间氢键重组与水分子协同作用，优先形成热力学稳定的 V 型晶体；长期储藏则促进支链淀粉双螺旋结构的缓慢组装，最终形成 B 型结晶域。不同的淀粉以不同的阶段和速率发生老化结晶：直链淀粉在几分钟到几小时内首先发生结晶，而支链淀粉的结晶在几天内以较慢的速度发生^[104]。在老化过程中，直链淀粉能与脂类形成复合物，形成 V 型晶体结构，这一过程可在较短的时间内完成^[105]。

如图 4-6 所示，通过计算后，添加了黄精粉的面包淀粉重结晶速率相较于对照组均显著降低，并且在 8% 时达到最低（13.67%）。这可能是由于：黄精粉中的膳食纤维通过水合竞争效应与空间位阻作用双重调控淀粉老化进程。其强亲水性导致水分优先结合纤维表面，降低淀粉分子水合程度。储藏期间，受限的水分迁移环境延缓了淀粉分子链的定向重排，阻碍 B 型晶体的有序堆积。同时，纤维网络通过物理屏障效应干扰淀粉分子间氢键缔合，形成非均质界面结构，进一步抑制有序结晶的形成有效延缓了淀粉回生动力学进程。但黄精添加量过高时，

膳食纤维破坏了面筋网络结构,使得水分从面筋网络迁移至淀粉分子,导致结晶度略有回升,与前文结果统一。

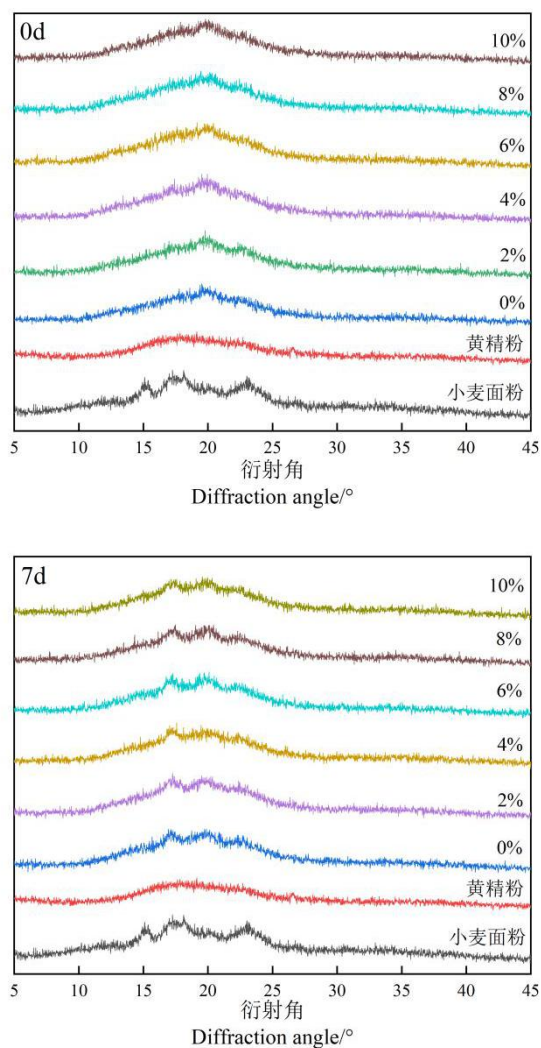


图 4-5 储藏 0 天和 7 天时面包 X 射线衍射图谱

Fig. 4-5 X-ray diffraction patterns of bread stored for 0 and 7 days

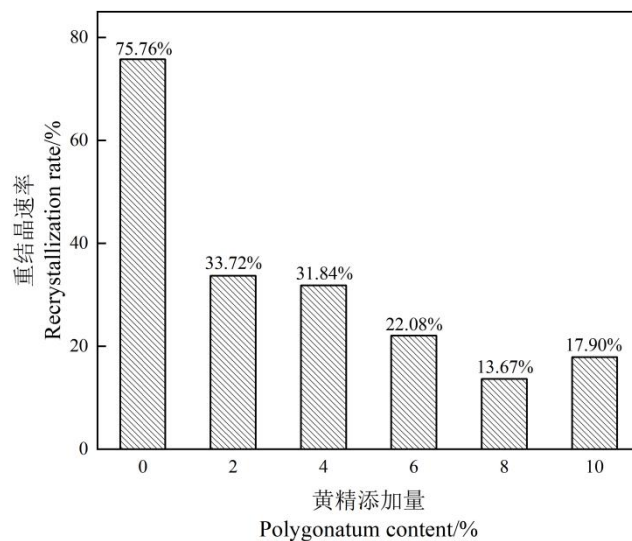


图 4-6 黄精粉对储藏 7 天面包重结晶速率的影响

Fig. 4-6 Effect of *Polygonatum* powder on recrystallization rate of bread stored for 7 days

4.6 本章小结

本章系统探究黄精粉（添加量 0%-10%）对面包储藏特性的调控机制。通过差示扫描量热法（DSC）定量表征淀粉重结晶过程的焓变特征，结合 X 射线衍射（XRD）分析淀粉晶体结构演变规律；同时结合质构分析（TPA）获取硬度参数构建老化动力学模型并分析面包水分含量的变化。结果表明，所有面包的水分含量均随着储藏时间延长而逐渐降低，但添加了黄精粉的面包水分降低速率相较于对照组均显著降低（ $P<0.05$ ），且黄精粉添加量达到 6% 时面包的水分降低速率达到最低；面包质构方面，随着储藏时间的延长，所有面包硬度都呈增大趋势，当黄精粉添加量达到 8% 之后，相较于对照组，硬化速率显著降低（ $P<0.05$ ）；热力学性质方面，相较于对照组，添加 2%~10% 黄精粉的实验组回生焓值显著下降（ $P<0.05$ ），其中 8% 添加量样品的回生焓值达到最低水平；淀粉结晶度方面，通过计算后，添加了黄精粉的面包淀粉重结晶速率相较于对照组均显著降低，并且在 8% 时达到最低（13.67%）。综上所述，添加黄精粉能够对面包老化起到一定抑制效果，有利于面包产品的储藏，延长其货架期。

第五章 低 GI 黄精面包的开发

5.1 引言

面包作为西方国家的主食，因其营养丰富、食用方便等优点受到全球消费者的欢迎。随着各类慢性疾病患病率的全球性攀升（国际糖尿病联盟 2023 年数据显示全球糖尿病患者达 5.37 亿），基于血糖调控的营养干预策略成为食品科学领域的前沿课题。低血糖生成指数（Glycemic Index, $GI < 55$ ）面包作为碳水基质改良的典型载体，其研发突破了传统烘焙食品的营养功能局限。

在第三章中，我们发现黄精粉的添加能够显著降低面包的血糖生成指数。有研究表明，低 GI 饮食能够有效预防和改善糖尿病和心血管疾病等慢性病，并且提出开发低 GI 谷物食品应首选富含膳食纤维的食品原料^[106]。因此，这一章我们将通过添加黄精粉和其他低 GI 食品原料将改良后面包的比容、质构特性、淀粉消化性进行研究分析，从而为黄精在功能性面包方面的研究提供理论基础和依据。

5.2 材料与设备

5.2.1 材料与试剂

黄精粉（黄精经过九蒸九晒，干燥粉碎过 60 目筛备用。其主要成分含量为膳食纤维 54.75%，淀粉 15.49%，可溶性多糖 15.56%，蛋白质 2.31%，黄酮 0.41%）：安徽省青阳县九华中药材科技有限公司；

红豆、黑豆（经过醋制，干燥粉碎过 60 目筛备用。）：市售；

高筋小麦粉，黄油：益海嘉里粮油工业公司；

谷朊粉：封丘县华丰粉业有限公司；

高活性干酵母（耐糖型）：安琪酵母股份有限公司；

奶粉：伊利乳业集团公司；

精制盐：安徽省盐业集团公司。

盐酸、磷酸二氢钠、磷酸氢二钠、胃蛋白酶、胰酶：分析纯，国药集团化学试剂有限公司。

5.2.2 仪器与设备

HMJ-D5600 型和面机，北京利仁科技股份有限公司；

长帝 F40 型烤箱, 佛山市伟仕达电器实业有限公司;

CT310K 型质构仪, 美国 Ametek Brookfield 公司;

NS800 型分光测色仪, 深圳市三恩时科技有限公司;

JIDI-5G 型台式离心机, 广州吉迪仪器有限公司;

FD-304 型冷冻干燥机, 上海培东冷冻干燥设备有限公司。

5.3 实验方法

5.3.1 面包制作配方

混合粉配方: 通过将 0%、5%、10%、15%和 20%的杂粮豆粉(红豆: 黑豆=1: 1)和 0%、1%、2%、3%、4%和 5%的谷朊粉按比例替换小麦粉, 制备出多种不同配比的混合粉。

藤茶提取液: 藤茶叶粉碎处理, 60 目过筛。取藤茶粉加入蒸馏水(固液比 1: 30), 超声 10 min, 60℃水浴 30 min, 4000 r/min 下离心 15 min, 取上清液。

面包配方: 称取混合粉 100 g、酵母 1.2 g、甜叶菊粉 1 g、奶粉 4 g、黄油 8 g、盐 1.2 g、藤茶提取液 60 mL, 将全部原料放入和面机进行揉制。揉好后, 将面团放入 38℃的条件下发酵 60 min。发酵后进行排气整形, 再次醒发 30 min, 最后放入烤箱进行烘焙, 上火温度设定为 160℃, 下火温度为 165℃。烘烤 25 min, 取出面包在室温下放置 2 h 冷却备用。

5.3.2 面包比容测定

具体方法参考 3.3.4。

5.3.3 面包质构测定

具体方法参考 3.3.5。

5.3.4 面包淀粉消化性测定

具体方法参考 3.3.7。

5.3.5 改良后面包淀粉消化性测定

面包配方: 称取黄精粉 10g、杂粮豆粉(红豆: 黑豆=1: 1) 20g、小麦粉 75 g、谷朊粉 5 g、酵母 1.2 g、甜叶菊粉 1 g、奶粉 4 g、黄油 8 g、盐 1.2 g、藤茶提取液 60 mL。面包制作同 5.3.1。

淀粉消化性测定参考 3.3.7。

5.4 数据处理与分析

采用 SPSS 24.0 软件处理实验数据，结果以平均值 $\pm$ 标准差的形式呈现。使用方差分析（ANOVA）中的 Duncan 检验法进行显著性分析，当 $P < 0.05$ 时，表示差异显著。此外，使用 Origin 2018 软件进行数据绘图。

5.5 结果与分析

5.5.1 杂粮豆粉对面包品质的影响

5.5.1.1 杂粮豆粉对面包比容的影响

由图 5-1 可知，与对照组相比，添加杂粮豆粉使面包比容显著下降($P < 0.05$)，可能是由于杂粮豆粉通常含有较高的膳食纤维，膳食纤维不溶于水，破坏了面筋网络的形成；杂粮豆粉中非面筋蛋白通过疏水作用与麦谷蛋白竞争结合位点，削弱面筋网络的连续性交联，降低持气能力；膳食纤维通过强持水性引发水分再分配，减少面筋有效水合，抑制淀粉颗粒的塑化膨胀；杂粮颗粒形成了结构缺陷，加速气泡合并，导致气体保留效率下降，最终导致面包比容降低。

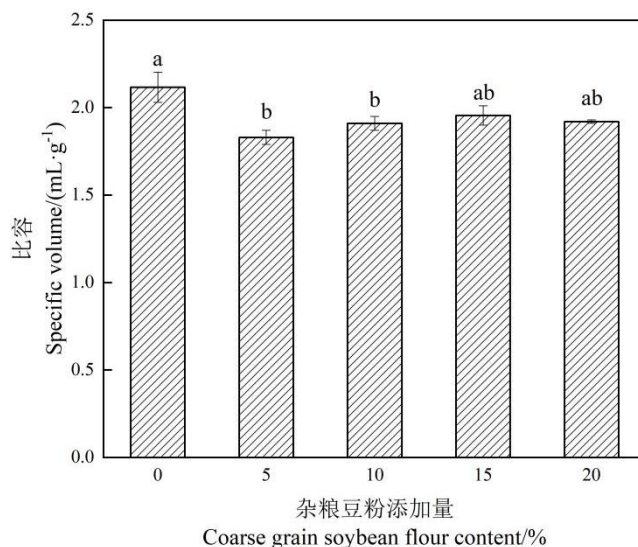


图 5-1 杂粮豆粉对面包比容的影响

Fig. 5-1 Effect of coarse grain bean powder on specific volume of bread

5.5.1.2 杂粮豆粉对面包质构的影响

由表 5-1 可知，添加杂粮豆粉的面包硬度显著增大 ($P < 0.05$)，咀嚼性和胶着性略有上升，而弹性略有下降。面包硬度、胶着性和咀嚼性增加在一定程度上降低了面包的感官品质，这可能与杂粮豆粉中的膳食纤维有关，膳食纤维通过水分竞争性结合降低体系塑化度，促使淀粉形成高密度凝胶；杂粮颗粒的物理剪

切作用破坏面筋延展性，同时增强淀粉-纤维复合体的刚性，导致面包的物理特性发生劣变。

表 5-1 杂粮豆粉对面包质构的影响

Table 5-1 Effect of coarse grain bean powder on texture properties of bread

豆粉添加量/%	硬度/g	弹性/mm	咀嚼性/mJ	内聚性	胶着性
0	961.00±34.00 ^b	9.34±0.16 ^a	76.50±0.40 ^a	0.69±0.01 ^a	836.00±10.00 ^a
5	1247.00±12.00 ^a	9.28±0.01 ^a	76.80±2.20 ^a	0.68±0.02 ^a	844.50±24.50 ^a
10	1248.00±99.00 ^a	9.19±0.10 ^a	80.10±3.80 ^a	0.70±0.02 ^a	941.00±20.00 ^a
15	1329.00±71.00 ^a	9.31±0.09 ^a	90.65±1.75 ^a	0.67±0.03 ^a	991.50±119.50 ^a
20	1306.50±112.5 ^a	9.20±0.02 ^a	98.75±8.55 ^a	0.71±0.01 ^a	972.50±28.50 ^a

注：同列不同字母表示存在显著性差异($P<0.05$)。

5.5.1.3 杂粮豆粉对淀粉消化性的影响

图 5-2 所示为面包淀粉水解率曲线。总的来说，所有面包样品在前 20 min 淀粉水解率显著增加，随后缓慢增长，并在 180 min 左右达到平衡。通过计算得到各消化模型动力学参数和估计血糖生成指数 (eGI)。由表 5-2 可知，随着杂粮豆粉添加量的增加，面包的 C_{∞} 、HI 和 eGI 显著降低 ($P<0.05$)。添加杂粮豆粉使面包中可消化淀粉的含量降低；膳食纤维形成致密网络屏障，限制淀粉酶的可及性，抑制淀粉消化，更有利于人体健康。

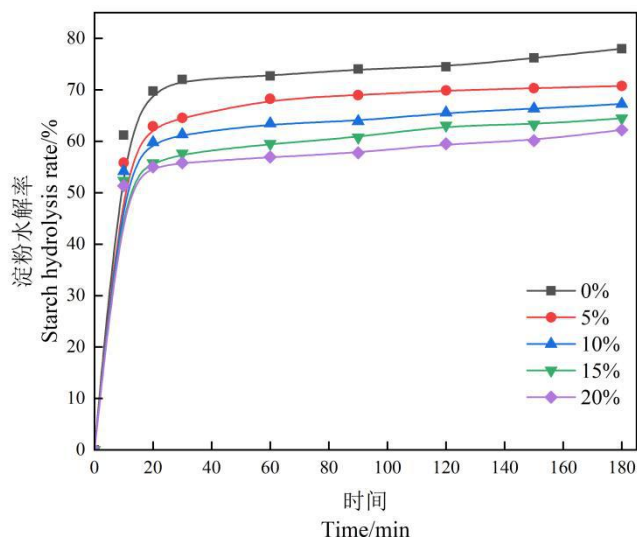


图 5-2 杂粮豆粉对面包淀粉水解率的影响

Fig. 5-2 Effect of coarse grain bean powder on hydrolysis rate of bread starch

表 5-2 不同杂粮豆粉添加量的面包消化模型参数

Table 5-2 Digestive model parameters of bread with different addition of coarse grain bean powder

豆粉添加量/%	$C_{\infty}/\%$	k	AUC	Calculated HI	eGI
0	77.98±0.22 ^a	0.17±0.01 ^b	12841.31±36.99 ^a	100 ^a	94.40 ^a
5	70.76±0.44 ^b	0.16±0.01 ^b	11862.64±73.76 ^b	92.38±0.57 ^b	87.83±0.55 ^b
10	67.24±0.76 ^c	0.17±0.02 ^{ab}	11153.49±126.07 ^c	86.86±0.98 ^c	83.07±0.94 ^c
15	64.49±0.93 ^d	0.18±0.03 ^{ab}	10600.43±152.87 ^d	82.55±1.19 ^d	79.36±1.14 ^d
20	62.21±0.64 ^e	0.20±0.03 ^a	10142.76±104.35 ^e	78.99±0.81 ^e	76.29±0.78 ^e

注：同列不同字母表示存在显著性差异($P<0.05$)。

5.5.2 藤茶水对淀粉消化性的影响

图 5-3 所示为面包淀粉水解率曲线。总的来说，所有面包样品在前 20 min 淀粉水解率增加明显，随后增长较为缓慢，并在 180 min 左右达到平衡。通过计算得到各消化模型动力学参数和估计血糖生成指数 (eGI)。由表 5-3 可知，用藤茶水制作的面包 (AB) 相较于用自来水制作的面包 (WB) 的 C_{∞} 、HI 和 eGI 值显著降低 ($P<0.05$)。藤茶中含有丰富的黄酮类物质，其可以抑制淀粉酶的活性，降低酶催化效率，此外黄酮类物质和淀粉结合阻碍了淀粉水解，从而导致 eGI 降低。

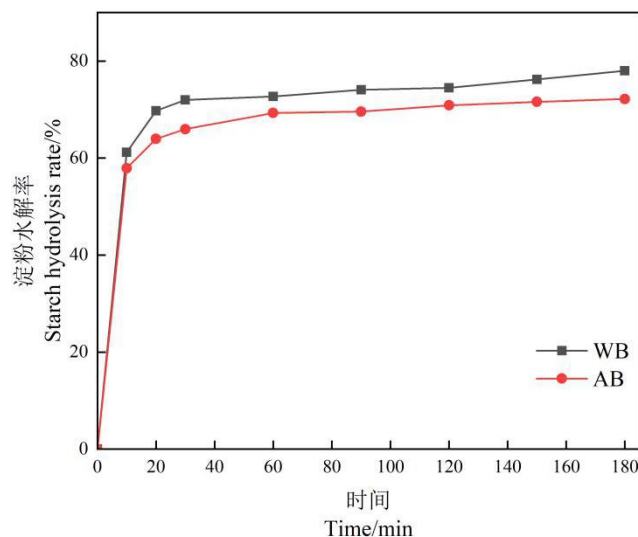


图 5-3 藤茶水对面包淀粉水解率的影响

Fig. 5-3 Effect of vine tea water on hydrolysis rate of bread starch

表 5-3 不同配方的面包消化模型参数

Table 5-3 Digestive model parameters of bread with different recipes

面包样品	$C_{\infty}/\%$	k	AUC	Calculated HI	eGI
WB	77.98±0.22 ^a	0.17±0.01 ^b	12841.31±36.99 ^a	100 ^a	94.40 ^a
AB	72.18±0.29 ^b	0.16±0.02 ^b	12060.26±48.45 ^b	93.92±0.38 ^b	89.16±0.36 ^b

注：同列不同字母表示存在显著性差异($P<0.05$)。

5.5.3 谷朮粉对面包品质的影响

5.5.3.1 谷朮粉对面包比容的影响

如图 5-4 所示，与对照组相比，添加谷朮粉使面包的比容有所上升，在 4% 时达到最高水平，说明适量添加谷朮粉可有效提高面包的比容。通过加入谷朮粉提高物料中的蛋白质含量，促进了面团加工过程中面筋蛋白网络结构的形成，有利于面团发酵时的膨胀，最终实现使面包比容上升。

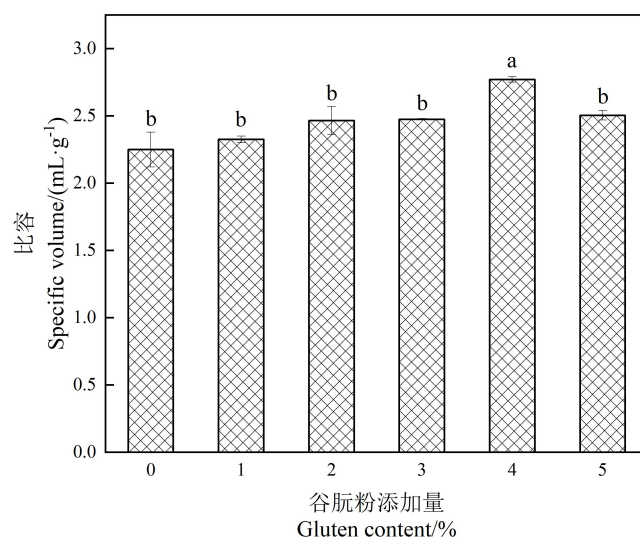


图 5-4 谷朮粉对面包比容的影响

Fig. 5-4 Effect of gluten on specific volume of bread

5.5.3.2 谷朮粉对面包质构的影响

由表 5-4 可知，与对照组相比，当添加谷朮粉的比例 2%~5% 的时的面包硬度、咀嚼性和胶着性显著降低 ($P<0.05$) 并呈现先下降后升高的趋势，而弹性和内聚性无明显变化。面包硬度、胶着性和咀嚼性的降低在一定程度上提高了面包的感官品质。故此添加适量的谷朮粉可以有效改善因黄精粉和杂粮豆粉所导致的面包物理特性的劣变。

表 5-4 谷朮粉对面包质构的影响

Table 5-4 Effect of gluten on texture properties of bread

谷朮粉添加量/%	硬度/g	弹性/mm	咀嚼性/mJ	内聚性	胶着性
0	574.00±70.71 ^{ab}	9.32±0.04 ^a	37.15±3.61 ^a	0.71±0.03 ^a	406.50±37.48 ^a
1	586.00±42.42 ^a	9.27±0.01 ^a	37.90±2.40 ^a	0.70±0.04 ^a	419.50±19.09 ^a
2	489.50±17.68 ^{bc}	9.18±0.10 ^a	31.50±0.28 ^b	0.72±0.01 ^a	350.00±7.07 ^b
3	470.50±4.95 ^c	9.30±0.04 ^a	30.95±0.21 ^b	0.73±0.01 ^a	339.50±0.71 ^b
4	349.00±5.66 ^d	9.18±0.04 ^a	23.30±0.71 ^c	0.74±0.01 ^a	259.00±8.49 ^c
5	505.50±14.85 ^{abc}	9.29±0.11 ^a	32.40±0.57 ^b	0.71±0.02 ^a	355.50±2.12 ^b

注：同列不同字母表示存在显著性差异($P<0.05$)。

5.5.4 改良后面包的淀粉消化性

以降低食物的 GI 值为目的，添加 10%的黄精粉、20%的杂粮豆粉、5%的谷朮粉和藤茶提取液制作低 GI 黄精面包 (LPB) 并与对照组面包 (WB)、仅添加藤茶提取液的面包 (AB)、添加 10%的黄精粉和藤茶提取液的面包 (PAB)、添加 20%的杂粮豆粉和藤茶提取液的面包 (BAB) 进行对比。图 5-5 所示为面包淀粉水解率曲线。总的来说，与前文趋势相同，面包样品在前 20 min 淀粉水解率显著增加，随后缓慢增长，并在 180 min 左右逐渐达到平衡。通过计算得到消化模型动力学参数 (C_{∞} 和 k)、曲线下方面积 (AUC)、水解指数 (HI) 以及估计血糖生成指数 (eGI)。由表 5-5 可知，改良后面包 (LPB) 的 eGI 值达到了 49.07 ± 0.37 ，符合低 GI 食物的标准 ($GI<55$)。

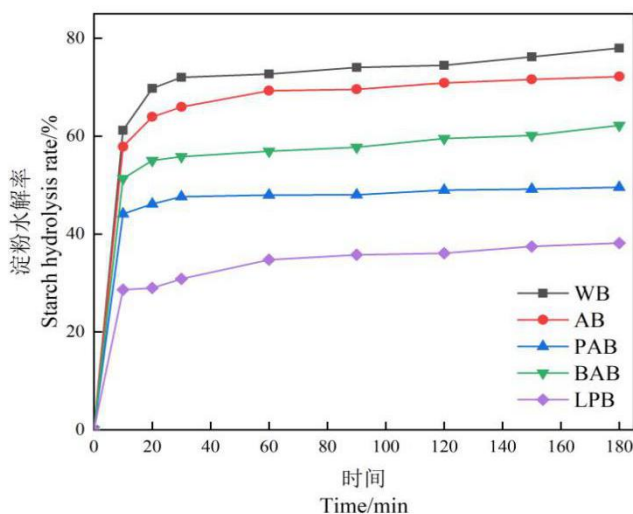


图 5-5 改良后面包的淀粉水解率

Fig. 5-5 Starch hydrolysis rate of improved bread

表 5-5 改良后面包消化模型参数

Table 5-5 Ddigestion model parameters of improved bread

面包样品	$C_{\infty}/\%$	k	AUC	Calculated HI	eGI
WB	77.98±0.22 ^a	0.17±0.01 ^b	12841.31±36.99 ^a	100 ^a	94.40 ^a
AB	72.18±0.29 ^b	0.16±0.02 ^b	12060.26±48.45 ^b	93.92±0.38 ^b	89.16±0.36 ^b
PAB	49.55±0.34 ^d	0.24±0.02 ^a	8423.18±57.80 ^d	65.59±0.45 ^d	64.74±0.44 ^d
BAB	62.21±0.64 ^c	0.20±0.03 ^{ab}	10142.76±104.35 ^c	78.99±0.81 ^c	76.29±0.78 ^c
LPB	38.14±0.17 ^c	0.13±0.03 ^c	6088.51±38.38 ^c	47.41±0.42 ^c	49.07±0.37 ^c

注：同列不同字母表示存在显著性差异($P<0.05$)。

5.6 本章小结

本章通过以不同比例杂粮豆粉和谷朊粉替换小麦粉、藤茶提取液替换水制作面包样品，分析面包的比容、质构特性，并重点研究对比不同面包淀粉消化性和GI值，并以此为目的结合前文开发低GI黄精面包。结果表明，添加杂粮豆粉和藤茶提取液会使面包比容下降，硬度升高，而添加谷朊粉可以一定程度上缓解面包物理特性的劣变。结合第三章的研究结果，选取10%的黄精粉、20%的杂粮豆粉以及5%的谷朊粉替代小麦粉、藤茶提取液替代水制作面包，制作出的面包的具有独特的黄精和豆类的混合风味，eGI值达到49.07±0.37，符合低GI食物的标准（GI<55），适合糖尿病人食用。

第六章 结论与展望

6.1 结论

本研究以黄精全粉为对象,通过测定面团的质构特性、拉伸特性、流变学特性、发酵力等性质,结合傅里叶红外光谱分析面筋蛋白的二级结构,探讨黄精粉对面团特性的影响机制;系统探究黄精粉添加对面包加工特性、感官品质的影响规律。通过建立黄精-小麦粉复合体系,结合抗氧化能力测定和体外模拟消化实验,评价其品质和功能特性;通过差示扫描量热法(DSC)和X射线衍射(XRD)表征淀粉回生特性,结合质构分析(TPA)构建老化动力学模型,为面包抗老化研究提供理论依据。此外,以开发低GI食品为目的,研究低GI黄精面包的工艺配方。主要结果如下:

(1) 研究表明,随着黄精粉的添加量逐渐增加,混合粉糊化温度显著提高,黏度、回生值和崩解值均显著降低,从而延缓淀粉老化;面团的硬度和弹性有所增加;添加2%~6%的黄精粉时,面团更有延展性,超过8%时,其延展性低于对照组;面团的弹性模量和黏性模量均增加,且弹性模量高于黏性模量,损耗因子 $\tan\delta < 1$,说明面团流变特性类似于固体。与对照组相比,面团发酵体积有所降低。添加黄精粉后,混合粉面团的湿面筋含量逐渐降低;面筋中游离巯基含量显著增加,而二硫键含量显著下降; β -折叠和无规卷曲的含量增加, α -螺旋、 β -转角的含量降低。

(2) 研究表明,随着黄精粉添加量的增加,面包内部的 L^* 值逐渐降低,而 a^* 和 b^* 值呈上升趋势;面包的色差值(ΔE)增大;当黄精粉添加量 $>6\%$ 时,面包结构更为疏松,气孔较大,分布不均匀,部分区域有塌陷;当添加了2%以上的黄精粉后,面包比容随着黄精粉的增加而逐渐下降;面包质构方面,面包硬度、胶着性和咀嚼性显著增加;感官评定方面,黄精粉添加量较高水平时,面包感官评分降低。与对照组相比,添加黄精粉面包的抗氧化能力显著提高;淀粉消化性方面,面包的 C_{∞} 、HI和eGI显著降低。

(3) 研究表明,所有面包的水分含量均随着储藏时间延长而逐渐降低,添加了黄精粉的面包水分降低速率相较于对照组均显著降低;面包质构方面,所有面包硬度均呈增大趋势,当黄精粉添加量达到8%之后,相较于对照组,硬化速率显著降低;热力学性质方面,添加黄精粉的实验组回生焓值显著下降;淀粉

结晶度方面, 添加了黄精粉的面包淀粉重结晶速率相较于对照组均显著降低, 并且在 8% 时达到最低 (13.67%)。

(4) 研究表明, 添加黄精粉、杂粮豆粉和藤茶提取液会使面包比容下降, 硬度升高, 而添加谷朊粉可以一定程度上缓解面包物理特性的劣变。综合研究结果, 以低 GI 为目的, 确定工艺配方为: 黄精粉 10 g、杂粮豆粉 (红豆:黑豆=1:1) 20 g、小麦粉 75 g、谷朊粉 5 g、酵母 1.2 g、甜叶菊粉 1 g、奶粉 4 g、黄油 8 g、盐 1.2 g、藤茶提取液 60 mL。在此配方下: 面包的 eGI 值为 49.07, 符合低 GI 食物的标准 ($GI < 55$)。

6.2 创新点

(1) 在小麦粉中混入黄精全粉分析其对面团特性、面包品质和面包储藏特性的影响。

(2) 利用黄精粉、红豆粉和黑豆粉开发低 GI 面包食品。

6.3 展望

本研究以黄精全粉为对象, 探讨黄精粉对面团特性的影响机制; 探究黄精粉添加对面包加工特性、感官品质的影响规律, 结合抗氧化能力测定和体外模拟消化实验, 评价其品质和功能特性; 构建老化动力学模型, 探究面包储藏特性。此外, 研究了低 GI 黄精面包的工艺配方。但仍然存在可深入研究的空间。

(1) 黄精富含各类活性成分, 可进一步提取优化分离其活性物质并探讨在食品方面的应用。

(2) 黄精全粉的添加虽然增加了面包的营养和功能特性, 但是在面包感官方面出现不可避免的劣变。可通过对黄精粉进行预处理、添加改良剂或优化工艺改善其感官品质。

参考文献

- [1] 田晓红, 姜平, 刘明, 等. 我国市场全麦面包品质现状分析[J]. 中国粮油学报. 2023, 38(09): 57-64.
- [2] Sciarini L S, Ribotta P D, León A E, et al. Incorporation of several additives into gluten free breads: Effect on dough properties and bread quality[J]. Journal of Food Engineering, 2012, 111: 590-597.
- [3] Amend T, Belitz H D. Microstructural studies of gluten and a hypothesis on dough formation. Food Structure, 1991, 10: 277-288.
- [4] Wang P, Jin Z, Xu X. Physicochemical alterations of wheat gluten proteins upon dough formation and frozen storage - A review from gluten, glutenin and gliadin perspectives[J]. Trends in Food Science and Technology, 2015, 46: 189-198.
- [5] Li J X, Zhu Y P, Yadav M P, et al. Effect of various hydrocolloids on the physical and fermentation properties of dough[J]. Food Chemistry, 2018, 271: 165-173.
- [6] Zheng Q, Wei T, Song Y, et al. Comparative study on composite buckwheat dough and steamed bread modified by transglutaminase and ascorbic acid[J]. International Journal of Food Science and Technology, 2022, 57(2): 1273-82.
- [7] Manhivi V E, Amonsou E O, Kudanga T. Transglutaminase and tyrosinase as potential cross-linking tools for the improvement of rheological properties of gluten-free amadumbe dough[J]. International Journal of Food Science and Technology, 2020, 55: 2399-2407.
- [8] Fang F, Diatta A, Simsek S, et al. Effect of isomaltodextrin on dough rheology and bread quality[J]. International Journal of Food Science and Technology, 2022, 57(3): 1554-1562.
- [9] 罗登林, 赵影, 徐宝成, 等. 天然菊粉对面团发酵流变学和面包品质的影响[J]. 食品科学, 2018, 39(6): 26-31.
- [10] Graca C, Fradinho P, Sousa I, et al. Impact of *Chlorella vulgaris* on the rheology of wheat flour dough and bread texture[J]. LWT-Food Science and Technology, 2018, 89: 466-474.
- [11] Parenti O, Guerrini L, Canuti V, et al. The effect of the addition of gelatinized

- flour on dough rheology and quality of bread made from brown wheat flour[J]. LWT-Food Science and Technology, 2019, 106: 240-246.
- [12] Correa M J, Perez G T, Ferrero C. Pectins as Breadmaking Additives: Effect on Dough Rheology and Bread Quality[J]. Food and Bioprocess Technology, 2012, 5(7):2889-2898.
- [13] Martins R B, Nunes M C, Ferreira L M M, et al. Impact of Acorn Flour on Gluten-Free Dough Rheology Properties[J]. Foods, 2020, 9(5).
- [14] Liu W J, Brennan M A, Serventi L, et al. Effect of cellulase, xylanase and α -amylase combinations on the rheological properties of Chinese steamed bread dough enriched in wheat bran[J]. Food Chemistry, 2017, 234: 93-102.
- [15] Guardianelli L, Puppo M C, Salinas M V. Influence of pistachio by-product from edible oil industry on rheological, hydration, and thermal properties of wheat dough[J]. LWT-Food Science and Technology, 2021, 150.
- [16] Khalid K H, Ohm J B, Simsek, S. Whole wheat bread: Effect of bran fractions on dough and end-product quality[J]. Journal of Cereal Science, 2017, 78: 48-56.
- [17] Ye E, Chacko S, Chou E, et al. Greater whole-grain intake is associated with lower risk of type 2 diabetes, cardiovascular disease, and weight gain[J]. Journal of Nutrition, 2012, 142(7): 1304-1313.
- [18] Ayeleso T B, Ramachela K, Mukwevho E. A review of therapeutic potentials of sweet potato: Pharmacological activities and influence of the cultivar. Tropical Journal of Pharmaceutical Research, 2016, 15, 2751–2761.
- [19] 覃宇悦, 余虹达, 陈柯君, 等. 紫米粉和羊肚菌粉添加对面团及面包品质的影响[J]. 食品工业科技, 2025, 46(04): 42-49.
- [20] 车家新, 罗登林, 李佩艳, 等. 长链菊粉面包配方的优化及品质分析[J]. 食品与发酵工业, 2024, 50(16): 118-124.
- [21] 申飞, 梁新红, 汤高奇, 等. 金银花粉对面团特性及面包品质的影响[J]. 食品与机械, 2024, 40(10): 204-209.
- [22] 黄梦凡. 柑橘纤维对面包品质的影响及其作用机制研究[D]. 河南工业大学, 2023.

- [23] 索文静. 甘薯生浆对面团加工特性及面包品质的影响研究[D]. 山东理工大学, 2023.
- [24] Chen Y, Zhao L, He T, et al. Effects of mango peel powder on starch digestion and quality characteristics of bread[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2019, 140: 647-652.
- [25] Sui X N, Zhang Y, Zhou W B. Bread fortified with anthocyanin-rich extract from black rice as nutraceutical sources: Its quality attributes and in vitro digestibility[J]. *Food Chemistry*, 2016, 196: 910-916.
- [26] Bourekoua H, Rozylo R, Gawlik-Dziki U, et al. Pomegranate seed powder as a functional component of gluten-free bread (Physical, sensorial and antioxidant evaluation)[J]. *International Journal of Food Science and Technology*, 2018, 53(8): 1906-1913.
- [27] Peng X F, Ma J Y, Cheng K W, et al. The effects of grape seed extract fortification on the antioxidant activity and quality attributes of bread[J]. *Food Chemistry*, 2010, 119(1): 49-53.
- [28] Lin J, Zhou W B. Role of quercetin in the physicochemical properties, antioxidant and antiglycation activities of bread[J]. *Journal of Functional Foods*, 2018, 40: 299-306.
- [29] 闫晨苗. 低 GI 马铃薯面包工艺的研究及品质分析[D]. 河北工程大学, 2020.
- [30] Hu H, Lin H H, Xiao L, et al. Impact of Native Form Oat β -Glucan on the Physical and Starch Digestive Properties of Whole Oat Bread[J]. *Foods*, 2022, 11(17).
- [31] Choi Y J, Kim B Y, Baik M Y. Analytical Methodology for Bread Staling. *Journal of the Korean Society for Applied Biological Chemistry*, 2010, 53(4): 389-400.
- [32] Armero E, Collar C. Crumb firming kinetics of wheat breads with anti-staling additives[J]. *Journal of Cereal Science*, 1998, 28(2): 165-174.
- [33] Curti E, Carini E, Diantom A, et al. The use of potato fibre to improve bread physico-chemical properties during storage[J]. *Food Chemistry*, 2016, 195: 64-70.

- [34] Ghoshal G, Shivhare U S, Banerjee U C. Effect of Xylanase on Quality Attributes of Whole-wheat bread[J]. Journal of Food Quality, 2013, 36(3): 172-180.
- [35] Arslan-Tontul S. Correlation of Bread Staling and Starch Digestibility and Role of Carboxymethyl Cellulose[J]. Starch-Starke, 2023, 75: 11-12.
- [36] Tsai C L, Sugiyama J, Shibata M, et al. Changes in the Texture and Viscoelastic Properties of Bread Containing Rice Porridge during Storage[J]. Bioscience Biotechnology and Biochemistry, 2012, 76(2): 331-355.
- [37] Fratelli C, Santos F G, Muniz D G, et al. Psyllium Improves the Quality and Shelf Life of Gluten-Free Bread[J]. Foods, 2021, 10(5).
- [38] Effect of buckwheat hull particle-size on bread staling quality[J]. Food Chemistry, 2023, 405(A).
- [39] Hong T T, Wang L L, Xu Y, et al. Comparative study of soluble soybean polysaccharides on bread staling under acidic conditions[J]. Food Chemistry, 2023, 400.
- [40] 陈祚, 李苏宁, 王馨, 等. 我国中年人群高血压、超重和肥胖的发病率及其与心血管事件的关系[J]. 中华高血压杂志, 2020, 28(11): 1100.
- [41] 史艳财, 韦霄. 大健康背景下广西药食同源产业创新发展战略研究[J]. 广西科学院学报, 2023, 39(1): 1-10.
- [42] 杨明翰, 梁政亭, 葛亮, 等. 药食同源历史源流及其药性规律研究[J]. 中国民族民间医药, 2022, 31(22): 11-16.
- [43] 国家药典委员会. 中华人民共和国药典:一部[S]. 2020年版. 北京: 中国医药科技出版社, 2020: 319.
- [44] 王艳, 董鹏, 金晨钟, 等. 黄精多糖组成及其抗氧化活性分析[J]. 基因组学与应用生物学, 2019, 8(5): 2191-2199.
- [45] 翟玉凤, 丁兰, 余叶敏, 等. 黄精皂苷的化学成分、生物合成及药理作用研究进展[J]. 中国农学通报, 2024, 40(29): 21-30.
- [46] 陶爱恩, 张晓灿, 杜泽飞, 等. 黄精属植物中黄酮类化合物及其药理活性研究进展[J]. 中草药, 2018, 49(09): 2163-2171.
- [47] Zhao X, Li J. Chemical constituents of the genus Polygonatum and their role in

- medicinal treatment[J]. *Natural Product Communications*, 2015, 10(4), 683–688.
- [48] Cui X W, Wang S Y, Cao H, et al. A review: the bioactivities and pharmacological applications of *Polygonatum sibiricum* polysaccharides[J]. *Molecules* 23(5).
- [49] Potential ocular protection and dynamic observation of *Polygonatum sibiricum* polysaccharide against streptozocin-induced diabetic rats' model[J]. *Experimental Biology and Medicine*, 2017, 242(1): 92-101.
- [50] Jiang Q G, Lv Y X, Dai W D, et al. Extraction and bioactivity of *polygonatum* polysaccharides[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2013, 54: 131-135.
- [51] Chen Z B, Liu J J, Kong X, et al. Characterization and immunological activities of polysaccharides from *Polygonatum sibiricum*[J]. *Biological & Pharmaceutical Bulletin*, 2020, 43(6): 959-967.
- [52] Shu G, Xu D, Zhao J, et al. Protective effect of *Polygonatum sibiricum* polysaccharide on cyclophosphamide-induced immunosuppression in chickens[J]. *Research in Veterinary Science*, 2021, 135: 96-105.
- [53] Li Q Y, Zeng J, Gong P X, et al. Effect of steaming process on the structural characteristics and antioxidant activities of polysaccharides from *Polygonatum sibiricum* rhizomes[J]. *Glycoconjugate Journal*, 2021, 38(5), 561-572.
- [54] Ma W J, Wei S S, Peng W J, et al. Antioxidant effect of *Polygonatum sibiricum* polysaccharides in D-galactose-induced heart aging mice[J]. *Biomed Research International*, 2021, 2021.
- [55] Long T T, Liu Z J, Shang J C, et al. *Polygonatum sibiricum* polysaccharides play anti-cancer effect through TLR4-MAPK/NF- κ B signaling pathways[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2018, 111: 813-821.
- [56] Zeng L, Zhong F W, Chen Z L, et al. *Polygonatum sibiricum* polysaccharides protect against obesity and non-alcoholic fatty liver disease in rats fed a high-fat diet[J]. *Food Science and Human Wellness*, 2022, 11(4): 1045-1052.
- [57] Li M, Xie B Z, Li L W, et al. A comprehensive review on the potential applications of medicine *Polygonatum* species in the food sector[J]. *Food*

Bioscience, 2024, 60.

- [58] 刘刚强, 樊淑淼, 李嘉瑜, 等. 响应面法优化黄精泡菜制备工艺[J]. 湖北农业科学, 2024, 63(11): 147-152.
- [59] 张露萍, 丁兰, 贾巧君. 黄精覆盆子膏的工艺优化与成型研究[J]. 食品科技, 2024, 49(10): 97-107.
- [60] 傅航, 谢晓莹, 杨雯雯, 等. 玉竹、黄精、火龙果复合果酒酿造工艺优化及品质研究[J]. 粮油科学与工程, 2024, 38(05): 27-34.
- [61] 杨莹莹, 林伟欣, 陈磊, 等. 一种复方黄精枸杞咀嚼片的制备[J]. 农产品加工, 2024, (15): 23-26.
- [62] 黄露玄, 李逢振. 黄精内酯豆腐制备工艺研究[J]. 保鲜与加工, 2024, 24(07): 78-83.
- [63] 张国泰. 黄精黄酒酿造工艺及其对小鼠高脂血症改善作用研究[D]. 陕西理工大学, 2024.
- [64] Zheng T, Chen H Y, Yu Y G, et al. Property and quality of japonica rice cake prepared with Polygonatum cyrtonema powder[J]. Food Chemistry-X, 2024, 22.
- [65] Zhao F, Li M, Meng L L, et al. Characteristics of Effervescent Tablets of Lactobacilli Supplemented with Chinese Ginseng (*Panax ginseng* CA Meyer) and Polygonatum sibiricum[J]. Applied Sciences-Basel, 2020, 10(9).
- [66] 于畅. 黄精枸杞凝胶软糖的制备工艺及降糖作用研究[D]. 成都大学, 2024.
- [67] 张力丹. 黄精刺梨复合饮料的制备工艺及肝保护研究[D]. 成都大学, 2024.
- [68] 程莹. 黄精杂粮蛋糕的研制及其品质研究[D]. 成都大学, 2023.
- [69] 王杰, 江润生, 王秋艳, 等. 黄精多糖酸奶的研制及其品质分析[J]. 农产品加工, 2019, (01):4-9.
- [70] 刘明研, 黄秋正, 冯亚娟, 等. 滇黄精醋的研制[J]. 食品科技, 2022, 47(08): 75-80.
- [71] 王轩, 张涛, 蒋德佳, 等. 老年人专用面包的工艺研究[J]. 农产品加工, 2024, (18): 78-84.
- [72] 杨显辉, 代培春, 曾磊, 等. 黄精渣膳食纤维功能面包配方的应用研究[J]. 轻工科技, 2019, 35(10): 18-21.
- [73] Kokawa M, Fujita K, Sugiyama J, et al. Quantification of the distributions of

- gluten, starch and air bubbles in dough at different mixing stages by fluorescence fingerprint imaging[J]. *Journal of Cereal Science*, 2012, 55(1): 15-21.
- [74] Luo D L, Kou X R, Zhang T, et al. Effect of inulin on rheological properties of soft and strong wheat dough[J]. *International Journal of Food Science and Technology*, 2018, 53(7): 1648-1656.
- [75] Tao C S, Shi W T, Bai Q, et al. Effects of potato powder on wheat dough properties and fresh noodles quality[J]. *CYTA-Journal of Food*, 2021, 19(1): 588-595.
- [76] Ma S, Wang Z, Liu N, et al. Effect of wheat bran dietary fibre on the rheological properties of dough during fermentation and Chinese steamed bread quality[J]. *International Journal of Food Science and Technology*, 2021, 56(4): 1623-1630.
- [77] Cotovanu I, Mironease S. An Evaluation of the Dough Rheology and Bread Quality of Replacement Wheat Flour with Different Quinoa Particle Sizes[J]. *Agronomy-Basel*, 2022, 12(10).
- [78] Chan K Y, Wasserman B P. Direct colorimetric assay of free thiol groups and disulfide bonds in suspensions of solubilized and particulate cereal proteins[J]. *Cereals Chemistry*, 1993, 70(1): 22-26.
- [79] Villarino C B J, Jayasena V, Coorey R, et al. The effects of Australian sweet lupin (ASL) variety on physical properties of flours and breads[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2015, 60(1): 435-443.
- [80] 王小媛, 王文静, 丁俊豪, 等. 红枣粉对小麦面团特性以及微观结构的影响[J]. *食品工业科技*, 2018, 39(09): 30-32.
- [81] Zhang Y, Hong T T, Yu W J, et al. Structural, thermal and rheological properties of gluten dough: Comparative changes by dextran, weak acidification and their combination[J]. *Food Chemistry*, 2020, 330.
- [82] Guo J Y, Liu F, Gan C F, et al. Effects of Konjac glucomannan with different viscosities on the rheological and microstructural properties of dough and the performance of steamed bread[J]. *Food Chemistry*, 2022, 368.
- [83] Shobha D, Joshi N, Benherlal P S. Spirulina enriched gluten free quality protein maize (QPM) pasta as functional food[J]. *Emirates Journal of Food and*

- Agriculture, 2022, 34(4): 279-288.
- [84] 李平, 吕莹果, 李雪琴, 等. 螺旋藻粉对面团流变性质及面筋结构的影响[J]. 食品科学, 2023, 44(14): 63-71.
- [85] Fan L, Wang H P, Li M Y, et al. Impact of wheat bran dietary fiber on gluten aggregation behavior in dough during noodle processing[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 257: 128765.
- [86] Świeca M, Gawlik-dziki U, Dziki D, et al. The influence of protein–flavonoid interactions on protein digestibility in vitro and the antioxidant quality of breads enriched with onion skin[J]. Food Chemistry, 2013, 141(1): 451-458.
- [87] Franco M, Gómez M. Effect of Psyllium on Physical Properties, Composition and Acceptability of Whole Grain Breads[J]. Foods, 2022, 11(12).
- [88] Nie G M, Zhang C X, Liu M J, et al. Development of bread with partial substitute of wheat flour by apricot kernel flours and effects of apricot kernel proteins on bread quality[J]. Journal of Food Measurement and Characterization, 2024, 18(10): 8720-8732.
- [89] Zhang G Q, Chatzifragkou A, Charalampopoulos D. Effect of defatted melon seed residue on dough development and bread quality[J]. LWT-Food Science and Technology, 2023, 183.
- [90] Bhol S, Lanka D, Bosco S J D. Quality characteristics and antioxidant properties of breads incorporated with pomegranate whole fruit bagasse[J]. Journal of Food Science and Technology-mysore, 2016, 53(3): 1717-1721.
- [91] YOUSIF A, NHEPERA D, JOHNSON S. Influence of sorghum flour addition on flat bread in vitro starch digestibility, antioxidant capacity and consumer acceptability[J]. Food Chemistry, 2012, 134(2): 880-887.
- [92] Świeca M, Sęczyk Ł, Gawlik-Dziki U, et al. Bread enriched with quinoa leaves—The influence of protein–phenolics interactions on the nutritional and antioxidant quality[J]. Food Chemistry, 2014, 162: 54-62.
- [93] Wang P-P, Luo Z-G, Peng X-C. Encapsulation of Vitamin E and Soy Isoflavone Using Spiral Dextrin: Comparative Structural Characterization, Release Kinetics, and Antioxidant Capacity during Simulated Gastrointestinal Tract[J]. Journal of

- Agricultural and Food Chemistry, 2018, 66(40): 10598-10607.
- [94] Sun Y, Li T, Liu J. Structural characterization and hydroxyl radicals scavenging capacity of a polysaccharide from the fruiting bodies of *Auricularia polytricha*[J]. Carbohydrate Polymers, 2010, 80(2): 377-380.
- [95] Kalinina I, Fatkullin R, Naumenko N, et al. The Influence of Flavonoid Dihydroquercetin on the Enzymatic Processes of Dough Ripening and the Antioxidant Properties of Bread[J]. Fermentation-basel, 2023, 9(3).
- [96] Bilgic H, Sensoy I. Effect of psyllium and cellulose fiber addition on the structure and the starch digestibility of bread and crackers[J]. Food Structure-netherlands, 2023, 35.
- [97] Zhou J J, Jia Z Y, Wang M, et al. Effects of *Laminaria japonica* polysaccharides on gelatinization properties and long-term retrogradation of wheat starch[J]. Food Hydrocolloids, 2022, 133.
- [98] Su J P, Fang J Q, Liu C, et al. Alleviative effects of *Dendrobium officinale* polysaccharide on the quality deterioration of frozen dough and corresponding bread[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2025, 304(1): 140705.
- [99] Jia X W, Chen Z H, Pan Q M, et al. Effect of extruded wheat bran on the volatility and physical-chemical properties of bread during frozen storage[J]. Cereal Chemistry, 2024, 101(4): 847-857.
- [100] Ronda F, Caballero P A, Quilez J, et al. Staling of frozen partly and fully baked breads. Study of the combined effect of amylopectin recrystallization and water content on bread firmness[J]. Journal of Cereal Science, 2011, 53(1): 97-103.
- [101] Ronda F, Quilez J, Pando V, et al. Fermentation time and fiber effects on recrystallization of starch components and staling of bread from frozen part-baked bread[J]. Journal of Food Engineering, 2014, 131: 116-123.
- [102] 彭博, 刘琴, 丁士勇. 山梨糖醇对面包储藏期间品质的影响[J]. 中国粮油学报, 2018, 33(01): 19-25.

- [103] Han S H, Liu X J, Chen S M, et al. Quality and staling characteristics of wheat bread improved by adding *Eucommia ulmoides* olive leaf micropowder[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2024, 198.
- [104] Sullivan W R, Hughes J G, Cockman R W, et al. The effects of temperature on the crystalline properties and resistant starch during storage of white bread[J]. *Food Chemistry*, 2017, 228: 57-61.
- [105] Shi M M, Gao Q Y. Recrystallization and in vitro digestibility of wrinkled pea starch gel by temperature cycling[J]. *Food Hydrocolloids*, 2016, 61: 712-719.
- [106] Bjorck I, Elmstahl H L. The glycaemic index: importance of dietary fibre and other food properties[J]. *Proceedings of the Nutrition Society*, 2003, 62(1): 201-206.

致谢

当光标停驻在这行文字的末端，忽然意识到，那些曾以为孤独跋涉的日夜里，原来有无数隐形的力量在托举着这段旅程。它们不具姓名，却早已渗入每一寸思考的肌理，化作纸上墨痕与心中的光。

感谢这校园里的四季轮回，感谢实验室陪伴我最久的烤箱，和面机内壁上残留的水珠见过我无数次失败的实验，离心机转动的轨迹记得某个深夜的顿悟。数据波动时的焦灼与狂喜，最终都沉淀为对科研本质的理解——真理往往诞生在与不确定性的漫长对话中。

感谢父母在背后默默支持我读研以及家里那盏永远为我留着的灯；感谢我的导师魏明教授，不厌其烦地督促我的学习，对我的课题与论文不断精益求精；感谢聂风师兄帮助我解决在实验中遇到的各种意外，一起探讨实验的日子也挺愉快；感谢三位室友：孙武、韩红祥和孙佳成，你们的名字就是欢乐的代名词；最后，感谢我的女朋友焦佳蕊，在我最焦虑难过的时候陪在我身边。

最后，向时间本身致意。它慷慨地允许我浪费无数个小时寻找错误路径，又仁慈地在某个雪夜将破碎的灵感突然焊接完整。当文献综述里纵横交错的引用脉络终于织成星图，才懂得所谓学术传承，不过是人类在永恒面前的谦卑与接力。

合卷时，墨香中升起无形的冠冕。这不是终点，而是向更浩瀚未知发出的请柬——以此刻为原点，愿此行，终抵群星。