

分类号: Q94

学校代码: 10363

密 级: 公开

学 号: 2210530121

铁皮石斛粉对面团特性和面包品质的影响

INFLUENCE OF DENDROBIUM OFFICINALE POWDER ON
DOUGH CHARACTERISTICS AND BREAD QUALITY

学生姓名: 聂风

指导教师: 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: 2024 年 5 月 30 日

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：

夏风

日期：2024 年 6 月 3 日

安徽工程大学学位论文版权使用授权书

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或部分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：

夏风

指导教师签名：

魏明

日期： 2024 年 6 月 3 日

日期： 2024 年 6 月 3 日

铁皮石斛粉对面团特性和面包品质的影响

摘 要

铁皮石斛是一种名贵中药材，其富含多种多糖、多酚及生物碱等多种活性成分，具有抗癌、保肝、降血糖、抗氧化和增强机体免疫力等多种功能。本实验选用优质的小麦粉和铁皮石斛粉为原料，探究铁皮石斛粉在面包制作中如何影响面团特性、面包品质和面包老化。主要内容及成果如下：

（1）铁皮石斛粉对面团的影响如下：引入铁皮石斛粉后，混合粉的持水性呈递进增长态势。淀粉糊化峰值黏度、谷值黏度、最终黏度、回生值和崩解值显著降低（ $p<0.05$ ）；面团硬度、弹性、胶黏性和咀嚼性均随铁皮石斛粉添加量增大有增大的趋势，但是延展性降低；面团的流变学分析表明：添加铁皮石斛粉后弹性模量和黏性模量显著增大（ $p<0.05$ ），面团的流变学特性逐渐转向固体状态；湿面筋含量随着铁皮石斛粉添加量的增加逐渐减小，面筋中的游离巯基含量增加，二硫键含量减小；面筋蛋白中 β -折叠和 α -螺旋含量下降，而 β -转角和无规卷曲含量上升，表明有序二级结构比例下降而无序二级结构比例上升。

（2）铁皮石斛粉对面包品质的影响如下：引入铁皮石斛粉后，面包皮与面包芯的明亮值均降低，表明由于铁皮石斛粉本身的色泽导致面包颜色变暗。同时，其体积大小会随铁皮石斛粉添加量的增加先增大后减少；面包的硬度、咀嚼性在逐渐增加。面包的 DPPH 和

ABTS 自由基消除率随着铁皮石斛粉的添加量增加而上升，这表明铁皮石斛粉能够有效地增强面包的抗氧化性能。添加了铁皮石斛粉后，延缓了面包中淀粉转化为葡萄糖的速率，提升了抗消化性能。

(3) 铁皮石斛粉对面包储藏的影响如下：当引入铁皮石斛粉后，面包的相变点温度及峰值温度、热焓值却下降。随着储存时间延长，面包的水分逐渐减少，硬度逐渐增加，弹性也随之变小。到第 7 天为止，与未加铁皮石斛粉的面包相比，所有添加了铁皮石斛粉的面包的失水速率和硬化速率变慢，面包的老化速度逐渐放缓，这意味着添加铁皮石斛粉可以有效地延迟面包的老化速率。铁皮石斛粉能提高面包的含水量并且阻碍淀粉的重结晶，因此具有延缓面包老化的功能。

总之，铁皮石斛粉对面团特性和面包品质有重要的影响，铁皮石斛粉添加量在 4%~6% 为宜，得到综合感官评分可接受范围内，富含石斛活性成分的功能性面包。

关键词：铁皮石斛粉；面团特性；流变学特性；抗氧化；面包品质；抗老化

INFLUENCE OF *DENDROBIUM OFFICINALE* POWDER ON DOUGH CHARACTERISTICS AND BREAD QUALITY

Abstract

Dendrobium officinale is a kind of valuable traditional Chinese medicine, which is rich in a variety of polysaccharides, polyphenols and alkaloids and other active ingredients, and it has a variety of functions such as anticancer, hepatoprotective, hypoglycemic, antioxidant and immunity-enhancing. In this experiment, the effects of *Dendrobium officinale* powder on dough properties bread quality and bread aging during storage period were investigated. The main results are as follows:

(1) The results of effect of *Dendrobium officinale* powder on the dough were as follows: The results indicated that the water holding capacity of mixed flour increased significantly. After adding *Dendrobium officinale* powder in wheat flour, the peak viscosity, trough viscosity, final viscosity, disintegration value and retrogradation value of starch decreased during starch gelatinization process, the yield of gluten decreased, the content of free thiol groups increased, and the content of disulfide bonds decreased in dough. The texture characteristics of dough showed that the hardness, resiliency, tackiness, masticatory of dough increased and its extensibility decreased after adding *Dendrobium officinale* powder in wheat flour. The rheological properties of the dough

gradually shift to a solid state .The elastic modulus and viscous modulus of dough both indicated an upward trend. The content of β -fold and α -helix in gluten proteins decreased, while the content of β -turns and random curls in gluten proteins increased. The results indicated that the proportion of ordered secondary structure of gluten proteins decreased while the proportion of disordered secondary structure of gluten proteins increased.

(2) The results of effect of *Dendrobium officinale* powder on the bread quality were as follows: The brightness values of both crust and core of the bread decreased after the increase addition of *Dendrobium officinale* powder, indicating a darkening of the bread color due to the color of the dendrobium powder itself. The size of bread volume increases and then decreases with the increase in addition of *Dendrobium officinale* powder, the hardness and chewiness of the bread increased. The free radicals scavenging capacity of bread against DPPH and ABTS increased with the increase in addition of *Dendrobium officinale* powder .The rate of starch conversion to glucose of bread decreased and the anti-digestive capacity increased of bread with the increase in addition of *Dendrobium officinale* powder.

(3) The result of effect of *Dendrobium officinale* powder on bread storage were as follows: The phase transition point temperature, peak temperature and enthalpy of the bread decreased when the *Dendrobium*

officinale powder was added. With the increase in time, the water content of the bread decreased, the hardness increased and the elasticity of bread decreased. The rate of water loss and the rate of hardening slowed down in all breads with the addition of *Dendrobium officinale* powder, the aging rate of bread was reduced. This means that the addition of *Dendrobium officinale* powder can effectively delay the aging rate of breads. The water content of bread was increased and recrystallization of starch was decreased with the increase in addition of *Dendrobium officinale* powder. Therefore, *Dendrobium officinale* powder has the function of slowing down the aging rate of bread.

In a word, *Dendrobium officinale* powder had changed the characteristics of wheat flour dough and bread baking quality to some extent. The functional bread with acceptable sensory quality and rich in bioactive ingredients was produced by addition of 4%~6% *Dendrobium officinale* powder to wheat flour.

Keyword: *Dendrobium officinale* powder; Dough properties; Rheological properties; Antioxidant; Bread quality; Anti-ageing

目录

目录

1.1 面包概述	1
1.1.1 面团的研究现状	2
1.1.2 功能性面包的研究进展	3
1.1.3 面包抗老化研究进展	4
1.2 铁皮石斛的概述	6
1.2.1 铁皮石斛中活性成分与功能	6
1.2.2 铁皮石斛在食品中的应用	7
1.3 研究目的与意义	8
1.4 主要研究内容	8
第二章 铁皮石斛粉对面团特性的影响	9
2.1 材料与设备	9
2.1.1 材料与试剂	9
2.1.2 仪器与设备	9
2.2 试验方法和测定指标	10
2.2.1 铁皮石斛—小麦混合粉的配制	10
2.2.2 面团的制备	10
2.2.3 混合粉持水测定	10
2.2.4 淀粉糊化特性测定	10
2.2.5 面团质构特性测定	10
2.2.6 面团拉伸特性测定	11
2.2.7 面团流变学特性测定	11
2.2.8 面筋蛋白的制备	11
2.2.9 湿面筋含量的测定	11
2.2.10 面筋蛋白二级结构的测定	11
2.2.11 面筋中二硫键、游离巯基和总巯基含量测定	11

2.3 数据处理和分析	13
2.4 结果与分析	13
2.4.1 铁皮石斛粉对小麦粉持水性的影响	13
2.4.2 铁皮石斛粉对小麦淀粉糊化特性的影响	13
2.4.3 铁皮石斛粉对面团质构的影响	14
2.4.4 铁皮石斛粉对面团拉伸特性的影响	14
2.4.5 铁皮石斛粉对小麦面团流变学特性的影响	15
2.4.6 铁皮石斛粉对湿面筋含量的影响	17
2.4.7 铁皮石斛粉对面筋蛋白二级结构的影响	17
2.4.8 铁皮石斛粉对面团中游离巯基和二硫键含量的影响	18
2.5 本章小结	19
第三章 铁皮石斛粉对面包品质的影响	20
3.1 材料与设备	20
3.1.1 材料与试剂	20
3.1.2 仪器与设备	20
3.2 实验方法与测定指标	20
3.2.1 面包制作	20
3.2.2 面包色泽的测定	21
3.2.3 面包比容的测定	21
3.2.4 面包质构的测定	21
3.2.4 面包纹理结构的测定	21
3.2.5 面包微观结构的测定	21
3.2.6 面包抗氧化能力的测定	21
3.2.7 面包抗消化能力的测定	22
3.2.8 面包的感官评价	22
3.3 数据处理与分析	22
3.4 结果与分析	23
3.4.1 铁皮石斛粉添加对面包色泽的影响	23
3.4.2 铁皮石斛粉添加对面包比容的影响	24

3.4.3 铁皮石斛粉添加对面包质构的影响	24
3.4.4 铁皮石斛粉对面包微观结的影响	25
3.4.5 铁皮石斛粉对面包纹理结构的影响	26
3.4.6 铁皮石斛粉添加对面包抗氧化能力的影响	27
3.4.7 铁皮石斛粉添加对面包抗消化特性的影响	28
3.4.8 铁皮石斛粉添加对面包综合感官评价的影响	29
3.5 结论	30
第四章 铁皮石斛粉对面包抗老化特性的影响	31
4.1 材料与设备	31
4.1.1 材料与试剂	31
4.1.2 仪器与设备	31
4.2 测试指标与方法	31
4.2.1 面包的制作方法	31
4.2.1 面包热力学性质（DSC）的测定	31
4.2.2 面包储藏过程保水性的测定	32
4.2.3 面包储藏过程含水量的测定	32
4.2.4 面包储藏过程质构的测定	32
4.2.5 面包储藏过程晶体学特性的测定	32
4.3 数据处理与分析	32
4.4 结果与分析	32
4.4.1 铁皮石斛粉添加量对面包热力学性质的影响	32
4.4.2 铁皮石斛粉添加量对面包储藏过程保水性的影响	33
4.4.3 铁皮石斛粉添加量对面包储藏过程水分含量的影响	34
4.4.4 铁皮石斛粉添加量对面包储藏过程硬度的影响	35
4.4.5 铁皮石斛粉添加量对面包储藏过程结晶特性的影响	36
4.5 本章小结	37
第五章 结论与展望	38
5.1 结论	38

5.2 展望	39
参考文献	40
致谢	49

第一章 绪论

1.1 面包概述

随着现代人生活水平的提高,生活节奏的加快,人们在日常生活中对于各种方便烘焙食品的需求不断增加,烘焙产业在我国食品行业中占有很大的比重,目前,我国面包市场已超千亿元,居亚洲首位,在全球范围仅次于美国^[1]。且我国近年来的烘焙食品产值还在逐年增长,其发展前景毋庸置疑。

面包是一种即食性方便食品,也是消费量较多的一类食品,但是一方面其营养成分比较单一。随着人们生活水平的不断提高,心脑血管疾病和糖尿病等慢性疾病的频发,对一些功能性营养健康食品的需求量日益增加^[2]。普通面包被人体摄取时,其淀粉被快速消化,导致血糖水平迅速升高,增加患糖尿病的风险^[3]。近年来,为提高面包的营养价值和保健功能,将药食同源植物或者其提取的活性成分部分替代小麦粉制作面包已成为研究热点^[4, 5]。研究表明,在面粉中添加适量的紫山药^[6]、葛根^[7]、藜麦^[8]、茶叶^[9]、杜仲^[10]、多酚类物质^[11]和膳食纤维^[12]可以提高面包的保健功能。另外一方面,由于无法完全消除的原因,如面包的水分流失、硬化程度增加、容易变形及味道成分丧失等问题^[13, 14],这些都与面包的老化过程有关^[15],这会导致面包保质期的缩减。这种质量上的退步对顾客口感的影响非常明显,同时也会为面包制造商带来巨大的财务负担,所以提升面包的质量已成为当前面包产业亟待解决的问题。DerDE^[16]等人研究了电阻烤炉相较于传统的烘焙更能保持面包在储藏过程中的水分含量。Liu^[17]等人发现亲水胶体能够很好的限制马铃薯小面粉面包中淀粉的回生,其中,羧丙基甲基纤维素和魔芋葡甘聚糖可以显著降低面包储藏期间硬度和咀嚼性。SHEN^[18]等人研究了多种糖类对于面包皮色泽的影响,发现核糖能提高美拉德反应程度,从而用于改善面包的色泽,使得面包的品相更优。顾苗苗^[19]等人的一项研究探讨了风味蛋白酶对面包风味的潜在影响。他们的发现表明,加入风味蛋白酶可以增加面包中的自由氨基酸及小分子的肽数量,从而显著提高其挥发性的风味。当最大化的使用量为 0.16%时,面包中心与外层的挥发性化学物质总体数值均有明显的增长,分别为 13.73%和 29.61%。

综上,目前面包研究已成为热门,但目前仍存在营养单一以及储藏期易变质等问题。

1.1.1 面团的研究现状

面包的高质量主要依赖其面团属性，所以深入探讨面团属性的重要性不容忽视。面团是一种兼具弹性和粘性的半固体物质，它既影响着食品在制作过程中的操作表现，也会对其最后的口感产生重大作用。这涉及到如面团的水分吸收能力、保持水分的能力、成型所需的时间、稳定程度及混合承受力等多种因素^[20]。因此，提高面团质量已经成为了当前的研究焦点。

目前冷冻面团、酸面团等研究较多。在面包的生产销售过程中，大量线下门店的烘焙产品在放置的过程中不可避免的出现产品水分散失，质构劣变等问题，从而导致面包的硬度增大，口感变差，而冷冻面团技术刚好可以弥补这一不足，冷冻面团具有方便快捷、保质期长、便于储藏运输、生产效率高、易实现产品质量标准化等优点^[21]。而冷冻面团的储藏时间和条件也会影响冷冻面团的品质，其中 Yang^[22]等发现随着冻藏时间的延长，未发酵冷冻面团的质构以及组织形态等方面出现了明显的下降，制作出来的面包品质较差，表皮易发生褶皱或坍塌。因此，一般会添加一种或多种改良剂来提高冷冻面团品质。ZHENG^[23]等人研究发现，谷氨酰胺转氨酶（TG）提升了冷冻面团中的蛋白质相互之间和蛋白质与淀粉交联程度，这样可以压缩面团内部的自由空间，增加其内聚力和弹性。面团可以形成相对致密、连续和稳定的蛋白质网络结构，提升面团品质。赵强忠^[24]等研究发现，通过添加适量的葡萄糖氧化酶（GOX）可以提升冷冻面团的弹性和回复性，降低成品面包的硬度和咀嚼性，减少冷冻面团和面包在冷冻储藏期间的质量下降幅度。但是过量 GOX 反而会导致面团筋力过大，面包硬度增加；同时由于消耗过多的糖类，导致美拉德反应降低，这会致使面包失去诱人的色泽。Liu^[25]等研究发现添加 2%的 MEL-A 能够提升面团中结合水的比例，是面团的可冻水量减少，从而提升冷冻面团的持水力，进一步提升面包的比容，改善质构特性。冷冻面团是通过物理手段改良面团特性，而酸面团则是通过微生物的作用来提升面团品质。酸面团发酵是利用发酵工艺中不同微生物相互作用的一种食品生物技术。酸面团发酵过程中微生物成分复杂，这些微生物相互作用能产生大量的风味物质^[26, 27]，且发酵过程中产生的一系列生物反应都会影响到面团特性和面包品质，研究表明酸面团发酵能够有效改善面包品质^[28]，提升面包的营养价值，降低面包的血糖生成指数^[29]（GI），同

时还能大大提升面包的风味^[30, 31]。Xu^[32]等采用中国白酒大曲中分离的酵母制作酸面团，这样制作而成的面包香味浓郁。Hansen^[33]等发现酸面团不同酵母所产生的氨基酸种类不一，对面包的风味影响显著。除了风味之外，面包的品质包括只够特性和色泽也至关重要。白雪^[34]等通过采样不同地区的 11 种酸汤子面团发酵制作面包，发现酸汤子面团中的乳酸菌和酵母菌含量越高，面包的硬度，咀嚼性越低，且储藏期硬度和水分变化越小，提升了面包品质的同时还延缓了面包的老化。coda^[35]等人利用植物乳杆菌发酵的蚕豆来制作酸面团，结果显示淀粉的消化效率减少，GI 值下降，同时其他营养指标也有所提升。

1.1.2 功能性面包的研究进展

面包是由面粉、酵母、食盐、砂糖和水等主要成分制成，同时加入适量的油脂、鸡蛋、添加剂等，然后经过发酵和烘烤而成为一种方便食品。近年来，面包行业已成为我国食品行业中的重要组成部分。面包以其方便美味等特点顺应了当今快节奏生活，但是其高热量，营养单一等多种问题同样不可忽视。同时，面包在制作过程中糖的含量在大多在 10%以上，快消化淀粉、糖、油脂等的摄入会导致高血压高血糖高血脂等健康问题^[36]。人们在满足基本的生活之后，就希望能够得到防止疾病和延年益寿的食品，俗称功能性食品^[37]，功能性食品又称保健食品或健康食品，而面包的体系较复杂，具有很好的包容性，可以成为很多具有保健功能和益生活性配料的载体，制成具有一般食品所不具备的功能性面包，可以起到调节人体生理活动的作用，或针对某些特定人群食用且不以治疗为其目的。

普通面包富含碳水化合物，食用过后这些物质被人体快速消化，导致血糖指数快速上升^[38]，有患糖尿病的风险，为了解决这一问题，许多低血糖生成指数（GI）功能性面包应运而生。血糖生成指数(GI)反映食品在餐后血糖升降的影响，GI 低于 55 称为低 GI 食品^[39]。采用低 GI 原料或特殊工艺可以制成符合低 GI 的功能性面包。徐箐^[40]等开发了鹰嘴豆淀粉面包，所制成的面包 GI 值为 45.9 ± 3.5 ，且当添加量为 20%时混合粉得到的面团形成时间短，稳定时间长。Mohebbi^[41]等发现通过添加燕麦 β -葡聚糖，可以显著降低面包 GI 值。通过某些工艺也可有效降低面包的 GI 值，Yaregal^[42]等进行了研究发现，将揉面时间控制在 15 分钟时制得面包的 GI 值小于揉面 10 分钟的面包，表明不同的加工方法

也会影响面包相关的血糖反应。

面包已成为很多国家和地区的主食，然而普通面包却不适合麸质不耐受人群食用，麸质的来源主要是小麦、大麦、黑麦和燕麦等禾本科植物中的蛋白质复合物^[43]，麸质不耐受人群食用后会导致小肠炎症，引发腹痛腹泻等症状^[44, 45]，因此开发无麸质面包具有重要的意义。制作无麸质面包原料主要来源于大米、小米、藜麦和高粱等谷物中，水稻在我国产量很大，其去壳加工后的大米不含面筋蛋白，营养价值高且易消化，很适合做无麸质面包的原材料^[46]。Hamada^[47]等制作了无麸质大米面包，且通过添加米曲霉增大了无麸质大米面包的比容，延缓面包的老化速度，延长面包货架期。Sciarin^[48]等用大米，大豆粉，玉米淀粉制成的无麸质面包，相比全大米面包有明显延缓老化效果，口感风味优良。除了利用这些无麸质主食原料外，还有一些食品加工过程中的副产品也得到了利用。如稻壳麸皮、燕麦麸皮和青稞麸皮等，Genevois^[49]等利用精米粉、糙米粉、麸皮制作无麸质面包，研究最佳配比：精米粉 45%、糙米粉 35%、麸皮 20%，此配比下的面包比容较高而硬度较低，且膳食纤维含量达到普通小麦面包的 4 倍。

当今市面上大多面包营养单一，为了提高面包的营养价值，往往会在面包中加入富含膳食纤维，多糖，多酚等的原料来改善面包的营养，如山药，黑米，茶叶等。山药是一种药食同源的药材，营养成分丰富，有抗氧化、抗衰老、降血糖血脂等功效^[50]，Hsu^[51]等报道用山药粉替代小麦粉制成的山药面包提升了面包的营养价值，同时还具有较高的抗氧化活性和较低的消化特性。苗清霞^[52]等在普通面包中加入了山楂粉和薄荷粉制成的山楂薄荷营养面包，表皮柔软金黄，内里气孔均匀，具有营养保健作用。

总的来看，随着面包制作工艺的不断完善和健康饮食理念的提倡，人们对高质量、有保健效果的功能性面包的需求正在逐渐增加，研发更多口感适宜、营养丰富的功能性面包在市场上有着很好的发展前景。

1.1.3 面包抗老化研究进展

面包因其口感和方便性广受消费者喜爱，新鲜出炉的面包香气四溢，吃起来柔软有韧性，但是随着存放时间变长，面包皮出现皱缩和塌陷，面包芯失去柔软性，逐渐变硬且硬化掉渣，面包中的风味逐渐散失，水分减少。影响面包

储存期间质变的关键因素在于其内部结构的变化——即所谓的“淀粉老化”现象：这是由原本以直链形式存在的淀粉逐渐转变为更具弹性的支链形式的这个进程的结果^[53]。为了提高产品特性并增长储存周期，我们需要寻找有效的策略去减慢这种自然发生的淀粉老化速度。有许多方法可以用来评估面包的新鲜程度或是面包的老化情况^[54]。例如人们为了评价面包的老化程度，引入了 Avrami 方程，对面包在储藏期间的硬度变化进行分析，能够直观的反应出面包的老化^[55, 56]。根据 Fearn 的研究成果表明，使用 Avrami 方程可对面包的硬度做出预测并且能得出关于直链淀粉及支链淀粉之间相互转化关系^[57]。此外 Armeor 也曾指出过 k 和 n 在面包老化动态模型里的重要角色，它们分别表示着老化速率的快慢^[58]。另外一些学者如肖瑜等人则运用 Avrami 方程探索出了各种蛋白对于抑制淀粉老化效果的重要性^[59]。淀粉老化最直接的原因就是水分的移动、淀粉重新排列组合还有那些大分子作用力的交互效应，不仅降低产品的口感而且会减少面包保存时间。研究显示加入像多酚类物质和膳食纤维这样的成分能够大大地增加面包的储藏时间^[41]。Bhise 等研究表明通过添加一定比例的葡萄皮、葡萄籽渣所制成的面包，其储藏时间在室温下增加一天，在冷藏条件增加 5 天^[60]。黄圣博^[61]等发现，在面包中添加 20%苦荞粉，明显地提升了面包的比容，同时降低了面包的硬度和老化速率。杨连战^[62]等通过正交实验得到的复配改良剂添加到面包中发现，在加入该种改良剂后，面包在储存七天后的淀粉结晶度与回生焓均有明显的下降，相较于未加改良剂的面包，这二者的数值减少幅度分别为 37.19%和 61.07%，从而有效延长了面包的保质期。张薇^[63]等通过天然酵母发酵制作而成的面包，其 12 种游离的氨基酸含量远高于市售面包，有效降低了储藏期间面包的硬度和淀粉结晶值，延缓面包老化。李秀婷等研究结果显示，适当增加耐热木聚糖酶可以显著改善面包的品质，同时减慢了面包的老化速度，老化速率常数相较于对照组下降了 48%之多^[64]。彭博^[65]等发现在面包中添加山梨醇可以提高面团的持水性，同时降低面包的硬度,并延缓面包的老化速率。魏超昆^[66]等人的研究表明，鸡油基起酥油能够在面包储存过程中减少硬度、降低老化焓值以及水分流失，从而延缓了面包的老化过程。

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显著提升面包的品质，减缓面包的老化速度，有利于面包的储藏。

1.2 铁皮石斛的概述

1.2.1 铁皮石斛中活性成分与功能

铁皮石斛(*Dendrobium officinale* Kimura et Migo) 是兰科石斛属植物, 为名贵中药材, 加工后可作药食两用。铁皮石斛富含多糖, 各种氨基酸, 还有石斛碱和多酚^[67]等活性成分。其核心成分为多糖, 同时也是该植物中最高含量的元素之一, 根据龚庆芳的研究, 他们通过检测铁皮石斛中的多糖质量构成并对其进行了详细分析。实验结果显示, 除去各种形式的葡萄糖、半乳糖与甘露糖之外, 还有阿拉伯糖的存在^[68]。最新的药物科学研究证实了石斛多糖具备对抗癌症^[69]、保护肝脏^[70]、降低糖尿病风险^[71]、抵抗氧化的能力^[72]、防止白内障形成^[73]、提升免疫力^[74]等多种功效。Luo^[75]等从铁皮石斛茎中提取的三种可溶性多糖(DDP-1、DDP-2、DDP-3), 发现 12.5mg 的 DDP-1 能促进 S180 小鼠体内抗体 IL-2、TNF- α 和 IFN- γ 的分泌, 增强免疫指数, 抑制肿瘤细胞的效果显著。铁皮石斛中含生物碱, 它是首个从石斛属植物中分离出来的化合物, 因其对受损组织修复和对抗氧化的能力受到广泛关注。此外, 它能够保肝护脑并能有效地预防神经系统疾病的发生^[76]。铁皮石斛中还含有多酚类物质, 是一种天然得抗氧化剂, 可以维持身体内的自由基稳态从而达到延缓老龄进程及增强抵抗力的效果^[77]。铁皮石斛中的氨基酸种类丰富。何铁光^[78]等人研究不同种类了铁皮石斛, 分析和比较不同铁皮石斛中所含的氨基酸种类, 结果表明原球茎石斛和野生品石斛都含有人体必需的 7 种氨基酸。铁皮石斛在调节人体免疫功能方面也有着显著的效果。谢唐贵^[79]等人构建了八份独特的铁皮石斛提取物的 HPLC 特征图像, 以探索其对免疫系统受损的小鼠巨噬细胞摄取能力的影响。结果显示, 铁皮石斛中的某些化合物能够阻碍小鼠单核巨噬细胞的活动力, 进而提升免疫力。铁皮石斛在调节血压血糖以及抗癌等方面的生理功能显著。罗颖懿^[80]等的研究表明, 铁皮石斛含有一种名为新西兰牡荆苷 II 的新黄酮成分, 它具备强大的抗氧化性能, 可以有效减缓 HepG2 细胞的生长速度, 并且有可能通过调节 MAPK 通道和 Bax/Bcl-2 路径实现 HepG2 细胞的自然消亡^[80]。此外, 铁皮石斛还能明显减少人类乳腺癌细胞繁殖期间多项周期的蛋白质依赖型激酶(CDK)的表达水平, 以此遏制乳腺癌细胞的发展。研究已经证实了铁皮石斛对于自然发生的高血压或代谢型高血压的大鼠有良好的降压效果^[81]。季爱兵^[82]等

发现, 使用铁皮石斛提取物可以有效的减少患有高脂肪的小白鼠血液中的总胆固醇 (TC) 和低密度的脂质蛋白质 (LDL-C), 而增加他们的高的密度脂质颗粒数目 (HDL-C); 并且它也可以明显地下降 LDL-C / HDL-C 的比例, 达到很好的降压效果。同时, 铁皮石斛提取物还能起到维持机体内血糖稳态的效果。铁皮石斛多糖不仅能缓解糖尿病小鼠的脂质代谢紊乱和肾脏损伤, 还能通过提高肝脏和胰腺的抗氧化能力、提高胰岛素水平和减轻糖尿病小鼠的胰岛素抵抗, 起到降低血糖水平的作用^[83]。

综上所述, 铁皮石斛因其广泛的生物活性, 备受科研工作者的关注, 成为当今研究的热点。

1.2.2 铁皮石斛在食品中的应用

随着消费者对铁皮石斛认知的加深, 铁皮石斛在食品中的应用越来越受到重视。目前, 利用铁皮石斛开发的产品有石斛酒、石斛面制品、石斛风味饮料^[84, 85]。巩卫琪^[86]等人采用植物乳杆菌发酵铁皮石斛叶制备饮料, 主要通过发酵工艺的优化, 制得的饮料具有独特的石斛风味, 且口感评分较高。邢建荣^[87]等人以铁皮石斛叶为主要原料, 同时还添加西洋参、石斛茎鲜条和杭白菊, 研究了铁皮石斛叶饮料加工工艺及产品配方。发现最优配方为: 石斛鲜茎添加量 0.50%, 杭白菊添加量 0.10%, 西洋参添加量 0.025%, 所制得铁皮石斛叶饮料不仅石斛多糖含量丰富, 且口感风味极佳。刘倩葶^[88]等通过单因素和正交试验优化, 以铁皮石斛花和乌龙茶质量比例为 1.00 : 0.75, 开发出感官特性优良且具有保健功能的铁皮石斛花固体饮料, 该固体饮料热水溶解后汤色微红透亮、香气怡人、具有优良的风味。根据夏雨等人的研究成果^[89], 他们利用铁皮石斛叶及苦荞作为主料, 并使用酒精浓度和总酸含量的标准来评估其效果。经过对单一变量的影响及其组合效应的研究后, 得出了最佳的苦荞石斛叶发酵酒制造流程。该过程的最优参数包括: 发酵时间为 9 天, 混合菌种比例为 1.5%, 发酵环境设定为 32℃, 添加 18%白砂糖。所得到的产品显示出总酸达到 8.8%, 酒精度数为 7.8%vol, 口感清爽且富有香气, 同时保持适当的酸度。另外, 孙传伯等^[90]也研制了一款铁皮石斛啤酒, 他们在啤酒制作过程中引入了铁皮石斛这一新颖成分, 从而创造了一款别具一格的高质量保健石斛啤酒。同样地, 张平^[91]也在他的研究中采用了新鲜的铁皮石斛作原料, 成功开发出一种既能消暑解

渴又带有石斛特有清新味道的健康饮品。

近期,一些由铁皮石斛叶制成的食品,例如"森山"铁皮石斛叶薄脆饼干和"宝润山"铁皮石斛叶挂面,受到了大众的热烈追捧。然而,对于石斛面包的相关研究却相对稀缺,仅有少数文献提及了其配方的设计^[92]。鉴于此,进一步探讨铁皮石斛在面包制作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

面包因其美味而广受欢迎,而面包的体系较复杂,具有很好的包容性。通过向其中加入含有多种有益成分如多糖与多酚等的铁皮石斛粉,可以增强面包的保健功能及营养含量。本篇论文旨在探讨铁皮石斛粉不同的添加比例对其混合粉、面团特性、面包质量及其储存过程中的衰老特征的影响,以期为其在面包制造过程中使用提供理论依据。

1.4 主要研究内容

本研究以铁皮石斛粉和小麦粉作为基础,探讨了不同的添加量的铁皮石斛粉对面团特性、面包质量以及储存期质量变化的影响。

(1) 探究铁皮石斛粉-小麦混合粉的物理特性

制备了 6 组铁皮石斛粉和小麦的混合物,其中铁皮石斛粉的比例分别为 0 %、2 %、4 %、6 %、8 %、10 %,探究其保水能力,分析混合粉的糊化特性等。

(2) 探究铁皮石斛粉添加量对面团特性的影响

研究对比了面团的流变学、质构特性,探讨铁皮石斛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。

(3) 探究铁皮石斛粉添加量对面包品质和抗老化效果的影响

分析铁皮石斛粉添加量对面包颜色、体积、质构特性、抗氧化能力、抗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,研究了铁皮石斛粉在面包储存期间的抗老化机制。

第二章 铁皮石斛粉对面团特性的影响

面包的营养成分比较单一，将药食同源植物或者其提取的活性成分部分替代小麦粉制作面包可以改善面包的营养品质和保健功能。药食同源植物在改善面包营养价值的同时，还会影响面包的加工特性，特别是面团的特性。大量研究表明，添加植物成分可以改变面团的操作特性和面包感官品质。螺旋藻能增加面团的硬度，降低面团的延展性，改变面团的流变学特性，对面团的发酵和后续加工造成一定的影响^[93]。添加百合粉使面团硬度、弹性模量和粘性模量增加，降低面团弹性，影响了面包的感官品质^[94]。柑橘纤维添加使混合粉质量变差，面团粘度增加，面筋蛋白总体性能降低，面团发酵产气量降低，发酵体积变小，导致面包比容下降，面包的适口性降低^[95]。由于铁皮石斛粉中含有大量的膳食纤维和多糖，影响面团的特性，最终影响面包的烘焙品质。面包的烘焙品质与面团的特性有关，关于铁皮石斛粉对面团特性的影响研究还不清楚。因此，本章重点研究铁皮石斛粉对小麦淀粉糊化特性、面筋形成的影响，并通过面团流变学和质构分析，综合探讨铁皮石斛粉如何影响面团，为开发铁皮石斛功能性面包提供参考。

2.1 材料与设备

2.1.1 材料与试剂

铁皮石斛粉：铁皮石斛，六安市九仙尊霍山石斛股份有限公司，铁皮石斛干燥后粉碎过 100 目筛后备用；高筋小麦粉，黄油：益海嘉里粮油工业公司；高活性干酵母：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。Tris（分析纯），甘氨酸（分析纯），L-半胱氨酸（分析纯）， β -巯基乙醇（分析纯），DTNB（5,5-二硫代-2-硝基苯甲酸）（分析纯），上海麦克林生化科技有限公司；EDTA（分析纯），尿素（分析纯），三氯乙酸（分析纯），上海国药集团。

2.1.2 仪器与设备

KOWKA 和面机，烤箱：深圳康家佳品智能电器有限公司；CT3 10K 质构仪：美国 Ametek Brookfield 公司；TADisconeryDHR-3 流变仪：美国 TA 公司；

H01-1A 磁力搅拌器：上海司乐仪器公司；TD5Z 高速离心机：湖南凯达有限公司；LGJ 冷冻干燥机：北京松源华兴科技发展有限公司；RVA4500 粘度分析仪：铂金埃尔默企业管理（上海）有限公司；LS-170 色差仪：深圳林上科技有限公司。

2.2 试验方法和测定指标

2.2.1 铁皮石斛—小麦混合粉的配制

将铁皮石斛粉替换成对应比例的小麦粉，其中铁皮石斛粉的比例分别为 0 %、2 %、4 %、6 %、8 %、10 %，，过筛混合均匀，并以未添加铁皮石斛粉的小麦粉作为参考。

2.2.2 面团的制备

称取一定量的 2.2.1 配制的混合粉，加入 55%混合粉质量的蒸馏水，用和面机和面 30 min，得到不同比例铁皮石斛粉添加量的混合粉面团。

2.2.3 混合粉持水测定

称取 3.0 g 的不同比例的混合粉置于 100 mL 烧杯中，添加 30 mL 蒸馏水混匀，在恒温磁力搅拌器中搅拌 30 min，稳定后置于离心管；设置 5000 r/min 离心 30 min，取将沉淀沥干，称取离心管与沉淀的总质量 M_2 ，根据以下公式计算：

$$\text{持水力} = \frac{(M_2 - M_1 - M_0)}{M_1} \times 100\%$$

其中， M_0 表示离心管的质量， M_1 表示混合粉的质量， M_2 表示离心管与沉淀的总质量。

2.2.4 淀粉糊化特性测定

从小麦粉中制备淀粉，分别用 0%，2%，4%，6%，8%，10% 的铁皮石斛粉替代相应比例的小麦淀粉混合均匀，准确称取混合粉 2.50 ± 0.01 g 放入样品桶中，加入 25 mL 蒸馏水，使用快速黏度分析仪测定。依照 GB24853-2010 的标准流程执行实验，利用温度模式对结果进行了测量，从而获取到 RVA 曲线的数据及糊化过程数据。通过观察糊化曲线，获得糊化温度、黏度峰值、谷值、崩解值和回生值各种指标。

2.2.5 面团质构特性测定

将制备好的的新鲜面团置于内径为 2.0 cm、高为 1.5 cm 的圆柱形模具中，制成固定形状，将面团从模具中取出置于质构仪测试平台上，选择质构轮廓分

析 (texture profile analysis, TPA) 模式, 使用 TA4/1000 探头, 参数设置: 启动速度设置 1.0 mm/s, 试验前后速度均为 2.0 mm/s, 测试形变量 50%。评价指标: 硬度、黏性、弹性、内聚性、胶着性、咀嚼性。

2.2.6 面团拉伸特性测定

将制备好的面团, 静置 5 min 使其应力松弛后, 取 20 g 面团进行拉伸试验, 将准备好的面团放置在模具里, 压成 10 mm×30 mm 的条状样品, 接着使用质构仪器对该样本执行拉伸操作直到它被撕裂为止, 重复三次实验。参数的设定如下: 测前后速度均为: 1.0 mm/s, 应变位移: 50.0 mm, 自动引发力: 5.0 g。

2.2.7 面团流变学特性测定

准备适量的面团放在一个直径为 20mm 且 1mm 间隔载物台, 去除边缘的面团, 并在其上面涂抹一层微量油脂来避免水分流失。静置 5min 置于流变仪中后进行测试, 测试条件如下, 频率范围: 0.1~20 HZ、0.5%应变力、25° C 温度。采用振荡模式进行频率扫描操作。

2.2.8 面筋蛋白的制备

将制备好的面团手洗得到湿面筋, 然后把湿面筋放入速冻机冷冻 30 min, 速冻好的湿面筋用真空冷冻干燥机干燥, 得到冻干的面筋蛋白, 用于面筋蛋白中二硫键以及面筋蛋白二级结构的测定。

将预处理过的面团手洗后得到湿面筋, 接着将湿面筋速冻 30min。然后用真空冷冻干燥器对这些速冻好的湿面筋进行冷冻干燥, 从而获取了冻干后的面筋蛋白。用于测定面筋蛋白中的巯基、二硫键和蛋白二级结构。

2.2.9 湿面筋含量的测定

参照 GB/T5506.1-2008, 采用手洗法制备湿面筋, 测定湿面筋得率后, 将面筋冷冻干燥。

$$G = \frac{M_1}{M_0}$$

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)。

2.2.10 面筋蛋白二级结构的测定

对面筋蛋白的二级结构进行测定, 将冻干的面筋蛋白与 KBr 混合压片处理后进行 FTIR 测定, 测试条件为: 扫描次数为 64 次, 分辨率 4cm。

2.2.11 面筋中二硫键、游离巯基和总巯基含量测定

2.2.11.1 游离巯基含量测定

制备 0.2mol/L 的 Tris-Gly 缓冲液（pH8.0，8mol/L 的尿素，1%的 SDS 和 3mmol/L 的 EDTA），将 L-半胱氨酸配置成 2mmol/L 的标准液，之后将标准液稀释成不同浓度的溶液。分别取 4mL 稀释后的标准液混合 0.1mL 10mmol/L 的 DTNB 溶液，在室温下反应 20min 后，在 412nm 处检测溶液的吸光度值，制作标准曲线。

参考了 Chan 的研究方法^[96]，我们对含有不同量铁皮石斛粉的面筋蛋白进行了实验处理。首先，我们将每种样品的重量设定为 100mg，然后将其放入 10mL 的 0.2mol/L Tris-Gly 缓冲溶液中，经过 5min 的摇晃和 5000r/min 下 10min 的高速离心过程。接着，从上层清液中取得 4mL 样本，再向其中滴入 0.1mL 10mmol/L DTNB 溶液，搅拌均匀后再放置 20min 以观察颜色变化，最后在 412nm 波长处测量其吸光值，并将结果与 L-半胱氨酸的标准曲线上数据相比较来推算面团中的自由硫醇浓度

$$SH_F = \frac{n}{c}$$

式中：n 代表通过标准曲线计算出的巯基浓度（ $\mu\text{mol/mL}$ ）；c 代表样品浓度（g/mL）。

2.2.11.2 总巯基含量

从 1.3.11.1 中的离心产物提取出 1mL 的上清液，并添加 1mL 的 β -巯基乙醇以确保均匀混合，接着在 60°C 的环境里静置 2h。随后，向其中加入 10mL 的 12%三氯乙酸来结束反应过程，并在低至 5000r/min 的速度下冷却分离 10 分钟，之后移除上层清液，再用 12%的三氯乙酸溶剂清洗沉淀两次，最后往沉淀中倒入 10mL 的 0.2mol/L Tris-Gly 缓冲液，。接下来，加入了 0.1mL 的 10mmol/L DTNB 试剂，让它在样品中停留二十分钟，测量 412nm 波长处的光吸收值，根据 L-半胱氨酸的标准曲线上计算得到总巯基含量的结果。

$$SH_T = \frac{nV_2}{cV_1}$$

在公式中，n 代表通过标准曲线计算出的巯基浓度（ $\mu\text{mol/mL}$ ），c 代表样品浓度（g/mL）， V_1 代表上清液的体积（mL）， V_2 代表沉淀复溶后的体积（mL）。

2.2.11.3 二硫键含量

可以通过计算总巯基和游离巯基的含量来确定二硫键的含量：

$$S-S = \frac{SH_T - SH_F}{2}$$

2.3 数据处理和分析

利用 SPSS25 软件处理并分析试验数据，将结果用平均值加减标准差的形式呈现。采用方差分析（ANOVA）中 Duncan 检验法进行显著性分析， $P<0.05$ 表示差异显著。采用 Origin2018 软件对数据进行绘图。

2.4 结果与分析

2.4.1 铁皮石斛粉对小麦粉持水性的影响

铁皮石斛粉添加量对小麦粉的持水性影响如图 2-1 所示。由图 2-1 可知，随着铁皮石斛粉添加量的增加，混合粉的持水性随之上升。铁皮石斛粉含有纤维素和多糖，纤维素具有较强的吸水性^[97]，石斛多糖含有很多亲水基团能形成凝胶，从而赋予面团良好的亲水性，提高面团的持水性。

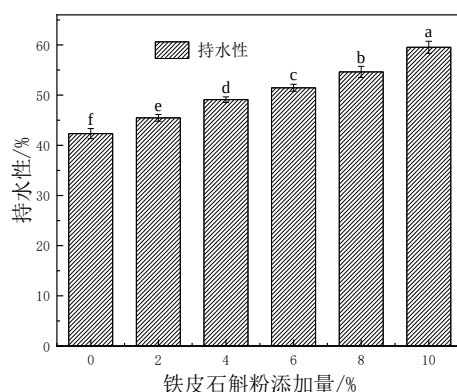


图 2-1 铁皮石斛粉对小麦粉持水性的影响

Fig.2-1 Effect of *Dendrobium officinale* flour on water holding capacity of mixed flour

2.4.2 铁皮石斛粉对小麦淀粉糊化特性的影响

淀粉糊化特性可用于面制品品质的评价，淀粉糊化主要受淀粉含量、组成以及面筋网络结构的影响。由表 2-1 可知，随着铁皮石斛粉添加量增多，峰值粘度、谷值粘度、崩解值和回生值均显著降低。这是因为铁皮石斛粉取代了一部分淀粉含量；同时由于铁皮石斛粉中富含多糖类和纤维素物质，纤维素亲水性强，多糖能形成凝胶，从而使面包体系内的水分减少，进而影响到面包体系

的稳定性和结构完整性。而对于回生值的变化来说，它的降低有助于延长淀粉的老化时间，并提升面包的防老化效果。

表 2-1 铁皮石斛粉对淀粉糊化特性的影响

Table 2-1 Effects of *Dendrobium officinale* flour on pasting properties of starch

铁皮石斛粉添加量/%	峰值/cp	谷值/cp	崩解值/cp	终粘度/cp	回生值/cp
0	1462±26.89 ^a	1158±5.57 ^a	298±8.89 ^a	1888±36.17 ^a	730±12.00 ^a
2	1446±12.12 ^a	1156±6.08 ^a	277±7.00 ^b	1781±18.33 ^b	625±19.47 ^b
4	1415±20.66 ^b	1145±27.73 ^a	270±2.00 ^{bc}	1740±4.36 ^c	595±15.39 ^c
6	1387±21.79 ^c	1136±5.29 ^b	263±2.65 ^c	1723±4.58 ^c	587±7.00 ^c
8	1357±18.03 ^d	1086±6.93 ^c	254±5.29 ^d	1658±9.64 ^d	572±7.21 ^{cd}
10	1290±58.41 ^e	1055±9.85 ^d	253±3.61 ^d	1602±8.72 ^e	547±9.85 ^d

注：同行不同字母表示存在显著性差异($P<0.05$)

2.4.3 铁皮石斛粉对面团质构的影响

铁皮石斛粉对面团质构的影响如表 2-2 所示。相较于未加铁皮石斛粉的样本，加入了铁皮石斛的面团硬度和咀嚼性逐步增强。这可能是由于铁皮石斛粉富含难以消化的不溶性膳食纤维，从而使得面团变得更硬且难以咀嚼；同时，它的黏性和弹性也得到了提升，这是因为铁皮石斛的多糖能与水分相结合产生凝胶，进而提高了面团的黏附能力；而混合粉制成的面包内聚性明显下降，表明过多的铁皮石斛粉会阻碍了面团的蛋白质网状结构的构建，因此使其凝聚性减弱。

表 2-2 铁皮石斛粉对面团质构特性的影响

Table 2-2 Effects of *Dendrobium officinale* flour on texture properties of dough

铁皮石斛添加量/%	硬度/g	粘力/g	粘性/mJ	弹性/mm	内聚性	胶着性/g	咀嚼性/mJ
0	370±30.66 ^e	72±1.00 ^e	9.13±0.32 ^c	13.06±0.38 ^b	0.75±0.35 ^a	264±9.17 ^e	33.8±0.29 ^e
2	472±21.73 ^d	78±1.54 ^d	9.52±1.62 ^b	12.93±0.40 ^b	0.72±0.93 ^a	365±33.05 ^d	39.2±2.74 ^d
4	557±15.63 ^c	82±0.58 ^c	9.74±3.79 ^b	13.12±0.40 ^b	0.69±1.84 ^a	420±4.58 ^c	43.3±2.02 ^c
6	587±9.29 ^c	88±2.00 ^b	10.03±1.85 ^a	13.25±0.15 ^b	0.64±0.64 ^b	453±2.65 ^b	55.1±2.72 ^b
8	676±4.51 ^b	90±2.08 ^a	10.25±1.04 ^a	13.42±0.11 ^a	0.62±1.21 ^b	487±7.21 ^a	59.6±0.44 ^a
10	788±7.00 ^a	94±2.00 ^a	10.38±0.45 ^a	13.64±0.30 ^a	0.58±0.43 ^b	502±7.94 ^a	62.4±0.66 ^a

注：同行不同字母表示存在显著性差异($P<0.05$)。

2.4.4 铁皮石斛粉对面团拉伸特性的影响

面团的拉伸特性反映了面团的强度和可塑性，铁皮石斛粉对面团拉伸特性的影响如图 2-2 所示。由图 2-2 可知，随着铁皮石斛粉添加量的增加，面团的强度增大，而最大断裂距离呈现明显的下降趋势。由于膳食纤维在铁皮石斛粉中的存在，其吸水膨胀并填充进面筋内部，从而提升了面团的强度。然而，这种纤维素也妨碍了面筋网络结构的建立，导致面团的柔韧性下降，延展性减弱，这与质构特征所显示出来的情况是一致的。

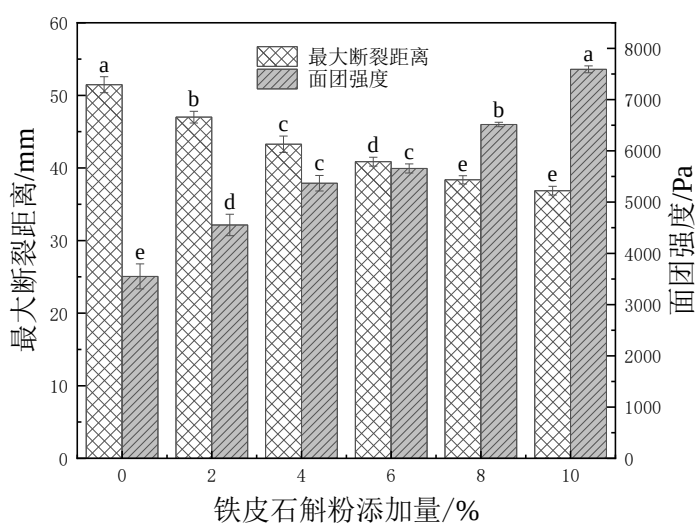


图 2-2 铁皮石斛粉对面团拉伸特性的影响

Fig. 2-2 Effect of *Dendrobium officinale* flour on tensile properties of dough

2.4.5 铁皮石斛粉对小麦面团流变学特性的影响

铁皮石斛粉对小麦面团流变学特性的影响见图 2-3。从图 2-3-a 和图 2-3-b 可知，随着频率的增大，面团的弹性模量和黏性模量均不断增大，且弹性模量大于黏性模量，面团呈现出类似于固体的流变学性质。添加铁皮石斛粉的面团，其弹性模量和粘性模量均高于对照组。铁皮石斛粉中含有纤维素，而随着铁皮石斛粉含量的提升，系统中的纤维素数量也在增多，这样使得面团系统的弹性占比更高，流动性能下降，从而导致弹性模量的提高，使其具备更加明显的近似固态属性。铁皮石斛粉中含有多糖，铁皮石斛多糖具有很强的亲水性，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粘性，使面团的弹性模量和粘性模量增大^[98]。铁皮石斛粉的加入增强了面团的吸水能力，提高了面团的含水量，增加了面团的粘性。从图 2-3c 中可以看出，所有样

本的损耗因子都在逐渐降低并低于 1，特别是在加入 10%的铁皮石斛粉后，其损耗因子达到了最小值。这说明随着铁皮石斛粉含量的提升，弹性和模量也在逐步增强，此时的面团系统呈现出更多的刚性特性。

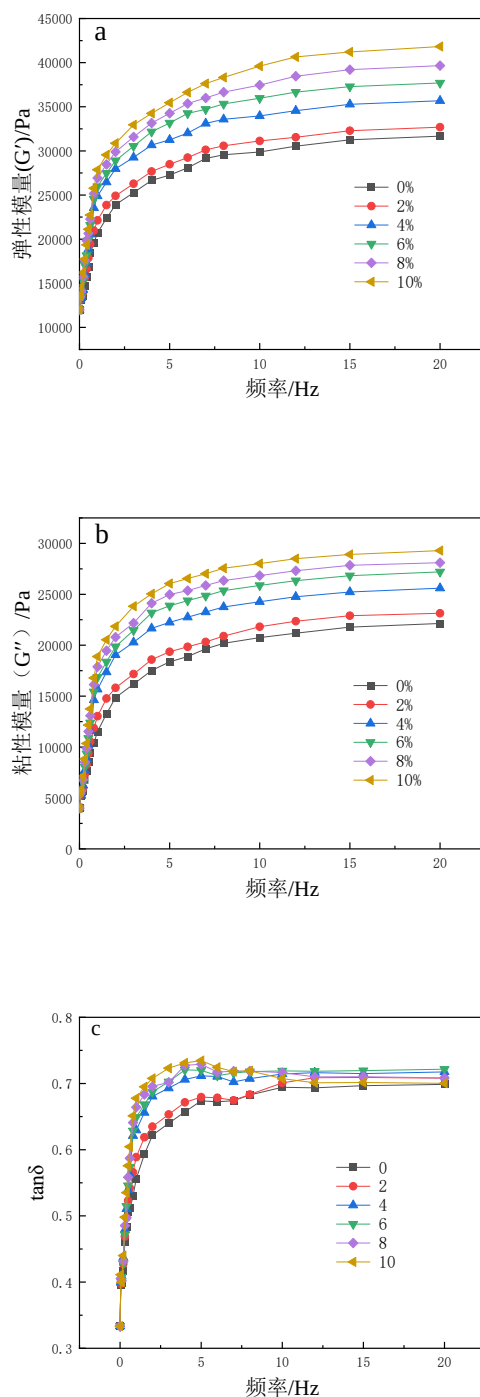


图 2-3 铁皮石斛粉对面团流变学特性的影响

Fig.2-3 Effect of *Dendrobium officinale* flour on rheological properties of dough

2.4.6 铁皮石斛粉对湿面筋含量的影响

面团的质构和流变学特性与面筋含量有关, 由图 2-4 可知, 添加铁皮石斛粉之后, 混合粉面团湿面筋含量逐渐降低 ($P < 0.05$)。一方面, 这是因为铁皮石斛粉取代了部分小麦粉, 能够形成湿面筋的麦谷蛋白和麦醇溶蛋白的含量降低。另一方面, 石斛粉中的纤维素可能会影响小麦粉内部的交联过程, 这将妨碍面筋的生成, 从而导致混合粉中湿面筋含量下降。

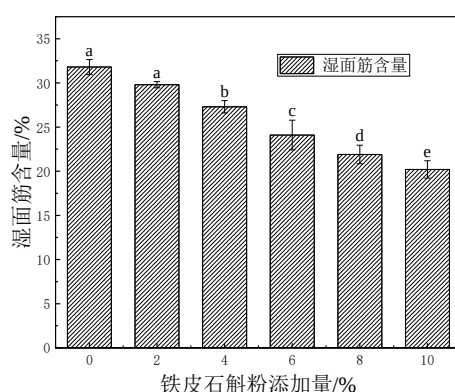


图 2-4 铁皮石斛粉对面团湿面筋含量的影响

Fig.2-4 Effect of *Dendrobium officinale* flour on wet gluten content of dough

2.4.7 铁皮石斛粉对面筋蛋白二级结构的影响

面筋蛋白的 FTIR 图谱如图 2-5 所示, 蛋白质的二级结构反映在波长为 1600-1700 阶段, 其中 1600-1640 反映 β 折叠, 1640-1650 反映无规则卷曲, 1650-1660 反映 α 螺旋, 1660-1670 反映 β 转角; 我们通过 Peakfit 软件分析得到其在二级结构所占的比例如表 2-3 所示, 其中 α 螺旋和 β 折叠属于有序蛋白结构, 其含量越大, 蛋白结构越趋于稳定, 而 β 转角和无规则卷曲属于无序蛋白结构, 其含量越大, 则蛋白结构就趋于不稳定。我们从表 2-3 中可以发现, 当引入铁皮石斛粉后, 面筋蛋白中的有序结构, 即 α 螺旋和 β 折叠的含量均低于无添加铁皮石斛粉的对照组, 反之无序结构 β 转角和无规则卷曲含量均高于对照。表明铁皮石斛粉的添加会影响蛋白二级结构的稳定性, 使面筋趋于不稳定, 导致面筋蛋白含量减少, 与我们之前测定的湿面筋含量结果吻合。

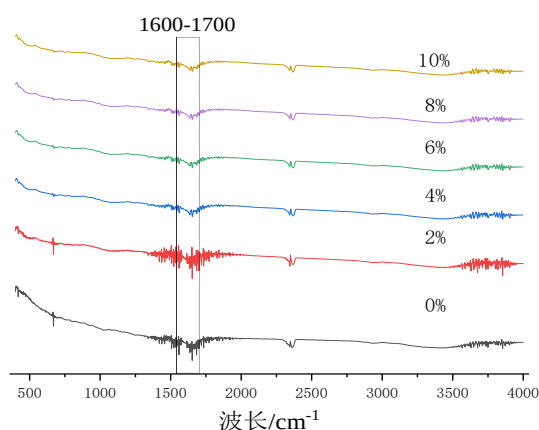


图 2-5 不同铁皮石斛添加量的面筋蛋白 FTIR 光谱图

Fig.2-5 FTIR spectra of gluten proteins with different *Dendrobium officinale* flour additions

表 2-3 不同铁皮石斛粉添加量面筋的蛋白二级结构

Table 2-3 Secondary structure of proteins in gluten with different amounts of *Dendrobium**officinale* flour additions

添加量/%	α 螺旋	β 折叠	β 转角	无规则卷曲
0	45.53%	36.84%	19.73%	13.58%
2	39.28%	32.27%	20.64%	15.26%
4	33.19%	27.81%	22.87%	18.64%
6	26.21%	25.37%	23.96%	20.83%
8	21.24%	23.72%	25.24%	22.65%
10	15.22%	20.75%	30.38%	25.49%

2.4.8 铁皮石斛粉对面团中游离巯基和二硫键含量的影响

在搅拌过程中，面粉充分吸收水分，导致面粉中的蛋白质与水发生化学反应，游离的巯基相互结合形成二硫键。面筋蛋白是由麦谷蛋白和麦醇溶蛋白通过二硫键交联而成的，面团中游离的巯基和二硫键含量可以反映面筋网络的形成情况，进而间接衡量面团的质量^[99]。据图表 2-5 的结果可知，与对照组相比，加入铁皮石斛粉的面团中游离巯基含量显著增加（ $P<0.05$ ），二硫键含量显著下降（ $P<0.05$ ）。主要原因是铁皮石斛粉替代了部分比例的小麦粉，导致小麦粉中总蛋白含量减少；同时铁皮石斛粉中含有纤维素，这阻碍了面筋蛋白二硫

键的形成。李平^[100]等的研究也表明，螺旋藻中的膳食纤维会导致面团中二硫键含量下降，游离巯基含量增加，从而减弱面筋蛋白的交联作用。本研究结果也解释了添加铁皮石斛粉会导致面团延展性减弱的现象。

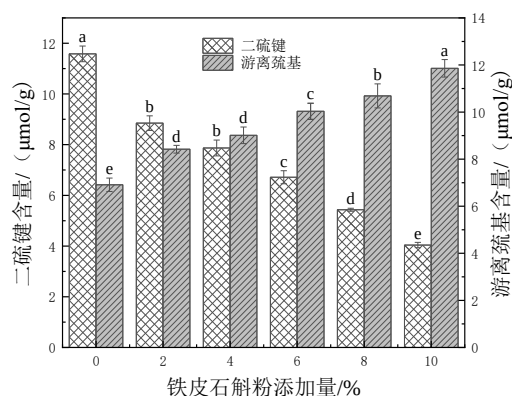


图 2-6 小麦面团中游离巯基和二硫键含量的变化

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

2.5 本章小结

(1) 铁皮石斛粉的添加对面团特性与面包品质具有一定的影响。铁皮石斛粉的添加导致小麦混合粉的持水性增强，混合粉粘度和回生值均降低，从而延缓淀粉老化。

(2) 随着铁皮石斛粉的添加量逐渐增多，面团的弹性和黏性模量也在持续上升。并且，这些弹性模量超过了黏性模量，使得面团展现出与固体相似的流变特性。

(3) 加入铁皮石斛粉会增加面团中的自由巯基数量，减少二硫键和湿面筋的比例，降低面筋蛋白中有序结构 α 螺旋和 β 折叠的含量，增加无序结构 β 转角和无规则卷曲的含量，进而破坏其内部的面筋网络构造，使得面团变得坚硬，这反过来又会影响到面包的烘焙品质。然而，这种变化有助于提升面包的抗老化、改进其营养成分并增强其健康效益。因此，为了进一步提升石斛面包的烘焙品质，我们需要对配料进行调整。目前仍需探索的是：铁皮石斛粉如何通过影响面筋的生成及面筋架构来影响面团的流动特性和面包质地。

第三章 铁皮石斛粉对面包品质的影响

铁皮石斛是一种药食同源的名贵植物，含有丰富的活性成分，主要包含多糖，多酚，各种人体所需氨基酸。将其替代部分面粉运用到面制品中，可以有效地提升其功能特性和延长保鲜期；同时也有助于减慢老化的速度并提高口感品质。在上一章的研究基础上，本章实验通过添加不同比例的铁皮石斛粉制作成面包，探究铁皮石斛粉对面包色泽、比容、质构、抗氧化能力、抗消化能力以及感官评价等方面的影响。

3.1 材料与设备

3.1.1 材料与试剂

铁皮石斛粉：铁皮石斛，六安市九仙尊霍山石斛股份有限公司，铁皮石斛干燥后粉碎过 100 目筛后备用；高筋小麦粉，黄油：益海嘉里粮油工业公司；高活性干酵母：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。胃蛋白酶，胰酶， α -淀粉酶：北京索莱宝科技有限公司；磷酸氢二钾（分析纯），甲醇（分析纯），乙醇（分析纯），葡萄糖，ABTS，DPPH：上海国药集团。

3.1.2 仪器与设备

KOWKA 和面机，烤箱：深圳康家佳品智能电器有限公司；CT3 10K 质构仪：美国 Ametek Brookfield 公司；TADisconeryDHR-3 流变仪：美国 TA 公司；H01-1A 磁力搅拌器：上海司乐仪器公司；TD5Z 高速离心机：湖南凯达有限公司；LGJ 冷冻干燥机：北京松源华兴科技发展有限公司；LS-170 色差仪：深圳林上科技有限公司；THZ-98A8 恒温振荡器：上海一恒科学仪器有限公司；S-4800 扫描电子显微镜：日本立本公司。

3.2 实验方法与测定指标

3.2.1 面包制作

面包配方：混合粉 200 g，酵母 2.4 g、糖 10 g、奶粉 8 g、黄油 16 g、盐 2 g、蛋清 20 g、水 110 g。将称取好的原料放入和面机中进行揉制，和面完成以后将面团于 38℃醒发箱中发酵发酵 90 min，将面团排气整形放入醒发箱中醒发 30 min，然后放入烤箱中烘烤，烘烤温度上火 160℃，下火 165℃，烘烤 20 min，

取出面包在室温下放置 2 h 备用。面包芯冻干进行后续测定。

3.2.2 面包色泽的测定

在面包室内冷却 60 分钟后，将其切割成 1 cm 厚的片状。然后使用 lscour 色彩测定系统来评估面包的颜色，并记录下面包皮和面包芯的 L^* 、 a^* 、 b^* 、 h^* 值。

3.2.3 面包比容的测定

根据 GB /T14611—2008 的规定，用菜籽替代法测定出炉后室温冷却 2 小时的制备好的面包的体积，除以质量即可得到面包比容(mL/g)。

3.2.4 面包质构的测定

取室温冷却 2 h 的面包样品，去除面包表皮，然后切出 75 mm 厚的面包构测试样品。选用 TA4/1000 探头，参数设置：触发力 5 g，测试速度 2 mm/s，测试后速度 2 mm/s，压缩程度 50%，间隔时间 5 s，取 3 个样品册 3 次取平均值。

3.2.4 面包纹理结构的测定

将面包纵向切开拍照，进行纹理结构的观察。

3.2.5 面包微观结构的测定

取适量面包冻干切片，用 S-4800 扫描电子显微镜观察面包的微观结构。

3.2.6 面包抗氧化能力的测定

3.2.6.1 提取液的制备

将面包芯经过 48 小时的真空冷冻干燥处理之后，对面包芯粉碎并过 80 目筛网，然后取 2 克的冻干样本与 40 mL 的 80%甲醇溶剂均匀混合，接着将其置于摇床中，设定温度为 37°C、转速为 130 r/min，并且持续振荡 2 h。最后，使用 3500 r/min 的速度对其进行 15 分钟的离心操作，收集得到的上层清液即可用于后续实验。

3.2.6.2 DPPH 自由基清除率测定

参考 Wang^[101]等方法，并进行适当修改。首先，使用无水乙醇制备浓度为 0.1mmol/L 的 DPPH 自由基溶液，然后取 1mL 的待测样品提取液与 3mL 的 DPPH 自由基溶液混合均匀，并在避光条件下反应 30 分钟。在波长为 517nm 处测定反应液的吸光度 A 样品。对照组用无水乙醇代替 DPPH 自由基溶液与待测样品提取液反应，空白组则用无水乙醇代替待测样品提取液与 DPPH 自由基溶

液反应，吸光度分别标记为 $A_{\text{对照}}$ 和 $A_{\text{空白}}$ 。按式（2）计算 DPPH 自由基清除率：

$$\text{DPPH 自由基清除率}/\% = 1 - (A_{\text{样品}} - A_{\text{对照}}) / A_{\text{空白}} \times 100\% \quad (2)$$

3.2.6.3 ABTS 阳离子自由基清除率测定

参考 Yeri^[102] 等的方法，并进行适当调整。首先分别配制 7 mmol/L 的 ABTS 溶液、2.4 mmol/L 的过硫酸钾溶液，体积一比一混合均匀，避光过夜 16h，得到 ABTS 阳离子自由基工作液。取 1mL 样品提取液、8mL ABTS 阳离子自由基工作液震荡混合均匀，避光反应 6 min，在波长 734 nm 处测定溶液吸光度，记为 $A_{\text{样品}}$ 。对照组为无水乙醇替代 ABTS 阳离子自由基工作液与样品提取液反应，空白组为无水乙醇替代样品提取液与 ABTS 阳离子自由基工作液反应，吸光度分别记为 $A_{\text{对照}}$ 和 $A_{\text{空白}}$ 。按式（3）计算 ABTS 阳离子自由基清除率：

$$\text{ABTS 阳离子自由基清除率}/\% = 1 - (A_{\text{样品}} - A_{\text{对照}}) / A_{\text{空白}} \times 100\% \quad (3)$$

3.2.7 面包抗消化能力的测定

分别取不同体积（0、0.1、0.2、0.4、0.6、0.8、1.0）的葡萄糖标准液（2mg/mL），加入适量蒸馏水使总体积为 1.0mL，然后逐一添加 2mL DNS 试剂，经沸水加热 2 分钟后冷却至常温，最后以水将总体积补至 15mL。利用 540nm 波长测定吸光度并绘制标准曲线。以 500mg 面包粉末放入 5mL 磷酸盐缓冲液中，再用 HCL 调节 pH 至 1.5。接着加入 4.3mg 胃蛋白酶，在 37℃ 水浴中反应 1 小时，反应结束后用 K_2CO_3 溶液将 pH 调至 6.9，加入 55.5mg α -淀粉酶并将混合物转移到截留分子质量为 7000Da 的透析袋中。将透析袋置于含 100mL 磷酸盐缓冲液的烧杯中进行模拟消化，消化时间为 3 小时，每 20 分钟取出一份透析液 1mL，用新缓冲液替代。利用 DNS 法测定还原糖含量，根据标准曲线计算透析液中葡萄糖含量，并对每个样品进行 3 次平行操作。

3.2.8 面包的感官评价

在面包烘烤完毕后，我们将其室温冷却 120 分钟，并根据 GB/T14611 - 2008 的面包烘焙质量评价标准进行感官测试。我们挑选了 10 名食品相关专业的研究生作为感官评估员对面包进行全方位的感官评估。

3.3 数据处理与分析

试验数据经 SPSS 24.0 软件处理和分析后, 结果用平均值加减标准差表示。利用方差分析 (ANOVA) 的 Duncan 检验法进行显著性分析, 当 $P < 0.05$ 时表示有显著差异。采用 Origin2018 软件对数据进行绘图。

3.4 结果与分析

3.4.1 铁皮石斛粉添加对面包色泽的影响

面包色泽是焙烤过程中一项重要的质量控制参数, 同时也是用来衡量面包感官品质的重要指标。

3.4.1.1 铁皮石斛粉添加对面包皮色泽的影响

由表 3-1 可知, 随着铁皮石粉的添加, 面包芯的 L^* 值 (明亮度)、 a^* 值 (红绿值)、 c^* (饱和度) 值逐渐减小, 而 b^* (黄蓝值) 则增大, 说明添加铁皮石斛粉会使面包色泽变暗, 色彩饱和度降低, 这是因为铁皮石斛粉中含有、黄酮和多糖等物质, 色素和黄酮使面包颜色变深, 而铁皮石斛本身的棕绿色在面包皮上表现得较为明显, 多糖和蛋白质在烘烤时产生美拉德反应使面包色泽加深。

表 3-1 铁皮石斛粉添加量对面包皮色度的影响

Table.3-1 Effect of *Dendrobium officinale* flour addition on the color of bread crusts

添加量/%	L^* 值	a^* 值	b^* 值	c^* 值	h^* 值
0	51.26±1.26 ^a	16.62±1.03 ^a	30.25±0.64 ^d	35.21±0.3 ^a	60.75±2.21 ^e
2	50.37±0.94 ^b	15.63±0.22 ^b	31.32±1.67 ^c	34.53±1.68 ^b	61.25±0.36 ^d
4	49.98±0.26 ^c	14.63±1.79 ^c	31.65±1.98 ^c	34.06±2.10 ^b	62.38±0.98 ^c
6	49.68±0.25 ^c	14.03±0.73 ^c	32.35±0.80 ^b	33.65±0.75 ^c	62.84±1.25 ^c
8	48.65±0.32 ^d	13.82±1.29 ^d	33.42±1.00 ^a	32.54±0.99 ^d	63.55±1.64 ^b
10	47.28±2.30 ^e	13.02±1.64 ^e	33.98±0.52 ^a	31.86±8.80 ^e	64.37±2.12 ^a

注: 同行不同字母表示存在显著性差异 ($P < 0.05$)。

3.4.1.1 铁皮石斛粉添加对面包芯色泽的影响

由表 3-2 可知, 随着铁皮石粉的添加, 面包芯的 L^* 值, c^* 值逐渐减小, 而 a^* 和 b^* 则增大, 说明添加铁皮石斛粉会使面包色泽变暗, 这是因为铁皮石斛粉中含有色素、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。色度值与面包皮变化一致。

表 3-2 铁皮石斛粉添加量对面包芯色度的影响

Table.3-2 Effect of the addition of *Dendrobium officinale* flour on the color of bread core

添加量/%	L*值	a*值	b*值	c*值	h*值
0	74.38±1.30 ^a	-2.67±1.33 ^c	12.19±0.44 ^e	12.52±0.68 ^e	102.21±5.64 ^a
2	70.80±0.94 ^b	-1.98±0.22 ^c	16.13±1.67 ^d	16.26±1.68 ^d	97.02±0.55 ^{ab}
4	63.89±0.56 ^c	-0.91±1.79 ^{bc}	18.89±1.98 ^c	18.96±2.10 ^c	92.38±4.89 ^{cd}
6	61.15±0.25 ^d	1.56±0.73 ^{ab}	22.24±0.80 ^b	22.31±0.75 ^b	85.92±1.99 ^{cd}
8	55.92±0.32 ^e	-0.40±1.29 ^{bc}	26.80±1.00 ^a	26.83±0.99 ^a	90.90±2.86 ^{cde}
10	52.13±2.30 ^f	2.62±2.04 ^a	21.94±0.52 ^b	22.15±8.80 ^b	83.29±5.01 ^d

注：同行不同字母表示存在显著性差异($P<0.05$)。

3.4.2 铁皮石斛粉添加对面包比容的影响

面包的比容反映了面包体积膨胀程度，也是衡量面包烘焙品质的重要指标。由图 3-1 可知，与对照相比，随着铁皮石斛粉的添加，面包比容呈现先增加后下降的趋势。这可能因为铁皮石斛粉中含有大量多糖，石斛多糖能与面筋蛋白结合，在面团发酵时，面筋能充分扩展使面包比容大于对照组。当铁皮石斛粉添加量大于 6% 时，面包比容小于对照组，这可能是由于铁皮石斛粉中含有膳食纤维，较多的膳食纤维会阻碍面筋网络的形成，最终导致面包比容降低。

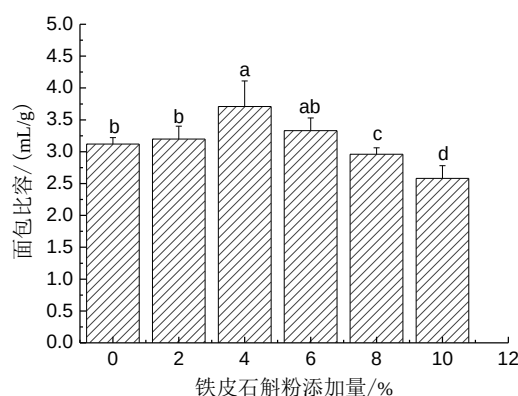


图 3-1 铁皮石斛粉对面包比容的影响

Fig.3-1 Effect of *Dendrobium officinale* flour on the microstructure of bread

3.4.3 铁皮石斛粉添加对面包质构的影响

面包的质构特征见表 2-4，与对照相比，添加铁皮石斛粉面包的硬度、胶着性、咀嚼性、弹性和内聚性均显著增加。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，这可能与铁皮石斛粉中的纤维素有关，纤维素含量的增加会引起面包加工操作性降低，导致面包适口性变差。铁皮石斛粉添加量在 0%~2%之间时，面包品质与对照差异不大，添加量在 4%~6%之间时，面包品质在可接受范围之内，继续增加会降低面包的感官品质。

表 3-3 铁皮石斛粉添加量对面包质构的影响

Table.3-3 Effect of different *Dendrobium officinale* flour additions on the texture of breads

添加量%	硬度/g	粘力/g	粘性/mJ	弹性/g	内聚性	胶着性/g	咀嚼性/mJ
0	64±7.94 ^d	4.67±0.58 ^a	0.47±0.30 ^{ab}	59.45±5.08 ^a	0.67±0.08 ^a	48.67±10.12 ^d	3.96±1.09 ^c
2	76±2.00 ^c	4.67±1.52 ^a	0.37±0.23 ^{ab}	49.35±14.20 ^a	0.67±0.24 ^a	64.00±5.57 ^{cd}	3.83±1.50 ^c
4	83±3.21 ^{bc}	4.67±1.52 ^a	0.40±0.00 ^{ab}	40.25±27.59 ^b	0.86±0.08 ^a	72.00±5.57 ^{bc}	7.00±1.85 ^a
6	92±9.21 ^b	4.00±1.00 ^a	0.33±0.12 ^{ab}	60.79±4.21 ^a	0.90±0.06 ^a	83.33±5.03 ^{abc}	4.90±0.44 ^{bc}
8	105±2.65 ^a	3.67±0.58 ^a	0.27±0.06 ^b	61.03±3.11 ^a	0.87±0.01 ^a	91.00±2.00 ^{ab}	8.33±0.31 ^a
10	115±4.93 ^a	3.67±1.15 ^a	0.67±0.12 ^a	64.57±0.33 ^a	0.82±0.09 ^a	101.33±2.09 ^a	6.40±1.41 ^{ab}

注：同行不同字母表示存在显著性差异($P<0.05$)。

3.4.4 铁皮石斛粉对面包微观结构的影响

面包纹理结构如图 3-2 所示，未添加铁皮石斛粉的微观结构下气孔较多且均匀，添加铁皮石斛粉后会影响到面包的气孔数量和分布程度，添加量过多会破坏面包的结构，这可能与铁皮石斛粉中的大量纤维素有关，过量添加铁皮石斛粉增加了面筋蛋白中的无序结构，导致烘烤出来的面包微观结构受到影响。

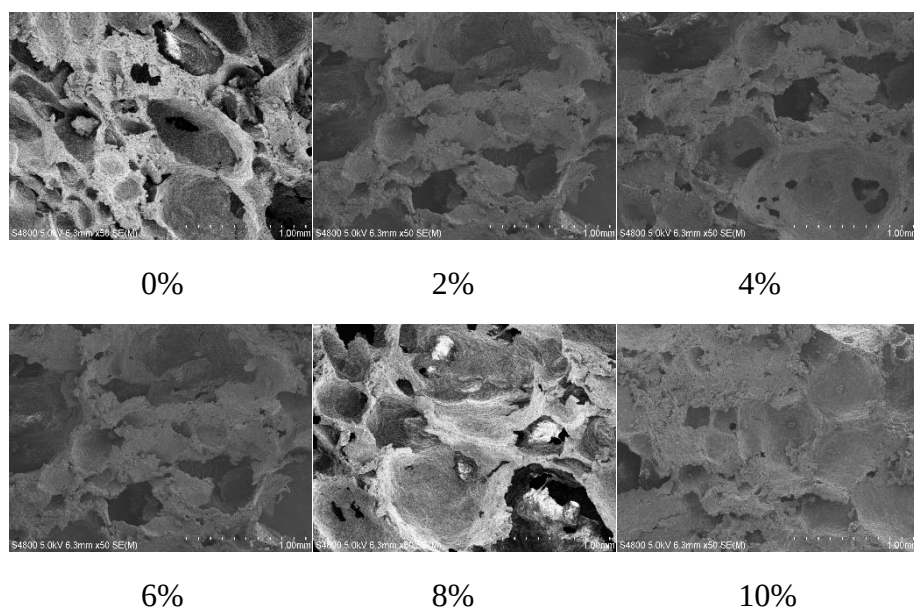


图 3-2 铁皮石斛粉对面包微观结构的影响

Fig.3-2 Effect of *Dendrobium officinale* flour on the microstructure of bread

3.4.5 铁皮石斛粉对面包纹理结构的影响

面包微观结构如图 3-3 所示，适量添加铁皮石斛粉与对照的纹理结构差异不显著，如 2%，4%这两组的纹理结构相对完整，当添加量增大到 6%之后的面包，部分区域纹理收到影响，出现一些较明显的塌陷和缺口，特别是 10%这一组，有几处较大的缺口和塌陷。与面筋网络结构有关，过量添加铁皮石斛粉可能会破坏面筋的网络结构，导致面包内部部分出现塌陷。

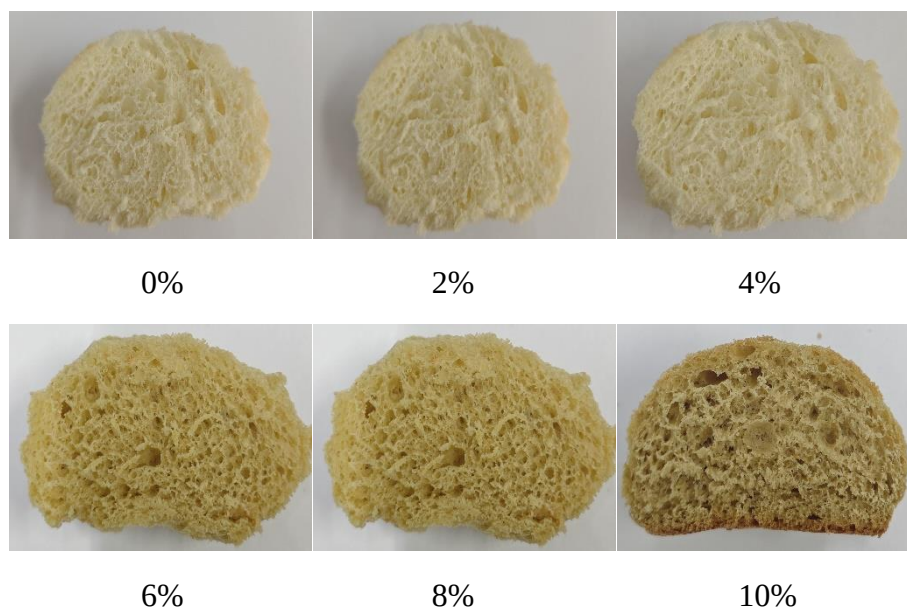


图 3-3 铁皮石斛粉对面包纹理结构的影响

Fig.3-3 Effect of *Dendrobium officinale* flour on the textural structure of breads

3.4.6 铁皮石斛粉添加对面包抗氧化能力的影响

3.4.6.1 铁皮石斛粉对面包 DPPH 自由基清除率的影响

图 3-2 为不同铁皮石斛粉添加量下面包 DPPH 自由基的清除效果。可以看到，随着铁皮石斛粉添加量的增加，面包 DPPH 自由基的清除效果逐渐增强。添加铁皮石斛粉后，DPPH 自由基清除率显著提高，表明铁皮石斛粉能够有效增强面包的抗氧化能力（ $P<0.05$ ）。另外，随着铁皮石斛粉含量的增加，面包对 DPPH 自由基的清除能力也相应增强。有报道指出，提取纯化的铁皮石斛多糖在体外具有显著的抗氧化活性，能有效清除 DPPH 自由基^[103]。

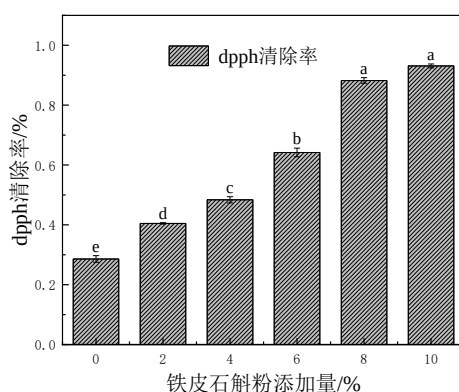


图 3-4 铁皮石斛粉对面包 DPPH 自由基清除率的影响

Fig.3-4 Effect of *Dendrobium officinale* flour on the scavenging rate of DPPH radicals in breads

3.4.6.2 铁皮石斛粉对面包 ABTS 自由基清除率的影响

图 3-3 为不同铁皮石斛粉添加量下面包 ABTS 自由基的清除效果。可以看到，随着铁皮石斛粉添加量的增加，面包 ABTS 自由基的清除效果逐渐增强。添加铁皮石斛粉后，ABTS 自由基清除率显著提高，表明铁皮石斛粉能够有效增强面包的抗氧化能力 ($P<0.05$)。另外，随着铁皮石斛粉含量的增加，面包对 ABTS 自由基的清除能力也相应增强。可能是因为铁皮石斛中含有的多糖，多酚等活性物质，增加了面包的抗氧化能力。

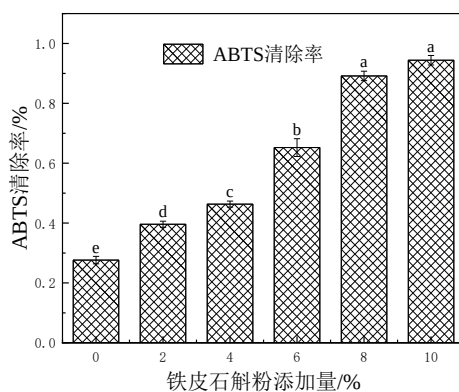


图 3-5 铁皮石斛粉对面包 ABTS 自由基清除率的影响

Fig.3-5 Effect of *Dendrobium officinale* flour on the free radical scavenging rate of bread ABTS

3.4.7 铁皮石斛粉添加对面包抗消化特性的影响

如表 3-4 所示，我们发现所有样品中的淀粉转化的葡萄糖量均随时间的推

移呈现出逐步上升的趋势。无论是在哪个取样时间，加入了不同量的铁皮石斛粉的面包其透析液中的葡萄糖含量都比未加铁皮石斛粉的对照组低。特别是在经过 90 分钟的消化之后，10%铁皮石斛粉含量的面包中淀粉转变为葡萄糖的比例相较于对照组有明显的下降，并且到了 180 分钟的时候，结果更加明显。这说明所有的样本都有助于减缓淀粉向葡萄糖的转换速度，而且这种关系和铁皮石斛粉的使用量有关联，其中以添加量为 10%铁皮石斛粉的面包表现最为突出，抗消化效果最佳。

表 3-4 铁皮石斛粉添加对面包抗消化特性的影响

Table.3-4 Effect of *Dendrobium officinale* flour addition on the antidigestive properties of bread

添加 量%	葡萄糖转化量/mg						
	0min	30 min	60 min	90 min	120 min	150 min	180 min
0	1.59±0.12 ^a	16.48±1.83 ^a	30.62±2.37 ^a	44.32±1.96 ^a	55.74±1.79 ^a	64.19±2.06 ^a	71.55±1.69 ^a
2	1.49±0.32 ^{ab}	16.02±0.42 ^b	29.13±2.11 ^b	43.62±1.61 ^a	53.13±1.85 ^b	63.32±1.43 ^a	69.96±0.28 ^{ab}
4	1.36±0.06 ^b	15.09±0.25 ^c	28.53±1.93 ^c	42.29±1.47 ^b	53.28±2.46 ^b	61.98±1.47 ^b	68.73±0.72 ^b
6	1.32±0.12 ^b	14.82±1.31 ^{cd}	28.57±0.12 ^{cd}	42.03±2.21 ^b	52.68±0.06 ^{bc}	60.25±1.03 ^{bc}	68.25±0.44 ^b
8	1.08±0.12 ^c	14.01±1.82 ^d	27.98±0.07 ^d	38.96±1.02 ^c	51.86±2.97 ^c	60.10±1.41 ^{bc}	66.38±0.25 ^c
10	0.68±0.07 ^d	13.73±0.05 ^d	27.42±1.67 ^d	38.57±0.43 ^c	47.57±2.32 ^d	56.91±0.15 ^c	63.43±1.51 ^d

注：同行不同字母表示存在显著性差异($P<0.05$)。

3.4.8 铁皮石斛粉添加对面包综合感官评价的影响

对面包的综合感官进行评价，结果如图 3-4 所示，首先在面包的比容方面，适量的铁皮石斛粉会提升面包的比容，4%，6%添加量的面包比容较佳，当添加量过多反而会降低面包的比容，10%添加量的面包比容低于所有组，评分最低。其中原因主要是铁皮石斛粉替代了一部分的面粉，其中纤维素的含量较多，过量的纤维素会影响面筋的形成，同时导致面包在纹理结构上表现不佳，面包质地较硬，口感不佳。导致 8%和 10%添加量的这两组面包在比容、质地、口感和纹理等方面评分较低。铁皮石斛粉本身为黄绿色，适量添加到面包中会让制作出的面包带有淡绿色，色泽评分较高，而过量添加会使面包暗沉。在面包的气味评分中由于添加量石斛粉，制作出的面包有石斛的清香，铁皮石斛粉添加量较多的如 8%，10%这两组在虽然在口感质地等方面评分较低，但是在气味评分中有优势，气味评分较高。虽然添加量较高的面包在感官评价总体评分不

高，但铁皮石斛中含有各种对人体有益的活性成分，受到部分评价员的好评。总的来说，添加量为 4%和 6%的面包总体感官评价评分较高，适量的铁皮石斛粉提高了面包的比容和风味，且在质地和口感等方面与对照组差异不明显，符合可接受范围。

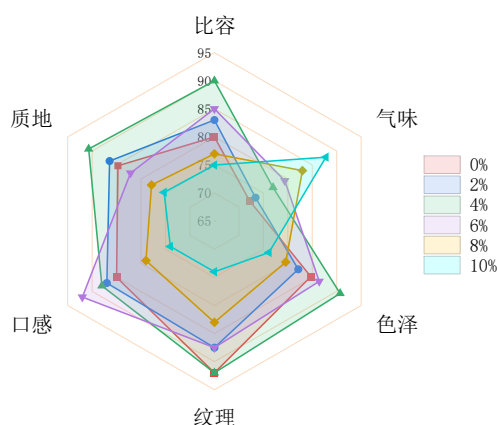


图 3-6 不同铁皮石斛粉添加量对面包感官评价的影响

Fig.3-6 Effect of *Dendrobium officinale* flour additions on the sensory evaluation of breads

3.5 结论

(1) 铁皮石斛粉中含有大量的纤维素等物质，添加铁皮石斛粉会导致后混合粉色泽变暗。从而使得面包皮和面包芯的颜色暗淡，而铁皮石斛中的多糖和膳食纤维影响了面包的质构和比容，面包的硬度和咀嚼性都在不断地增大，少量铁皮石斛粉会增大面包的比容，过量的添加导致面包比容反而减小。

(2) 在铁皮石斛粉中富含大量多糖，这会增强面包的抗氧化能力。随着铁皮石斛粉添加量的增加，面包的 DPPH 和 ABTS 自由基的清除能力也会增强，因此可以得出铁皮石斛粉可以提升面包的抗氧化能力的结论。

(3) 综合考虑下，铁皮石斛粉添加量在 4%~6%为宜，此时面包比容较大，色泽和硬度也在可接受范围之内。铁皮石斛粉添加量增大会导致面包感官品质降低。

第四章 铁皮石斛粉对面包抗老化特性的影响

铁皮石斛是我国传统名贵中药之一，是一种多年生草本植物，主要分布于安徽、浙江、湖南、云南、广西等地。它能够益胃生津、滋阴清热、免疫调节、延缓衰老等。铁皮石斛富含多糖类物质和多酚类等有益健康成分。在面包制作中，用铁皮石斛粉替代部分小麦粉，不仅能改善面包功能特性，还能延缓面包老化过程。研究表明，添加一些植物活性提取成分等可降低有效延缓面包老化程度，提升储藏时间。在前期研究基础上，本章节通过不同比例添加铁皮石斛粉制作面包，研究铁皮石斛粉对面包在储藏期间比容、质构、抗氧化能力、回生焓、感官评价，以及水分含量、硬度和结晶度等方面的影响。

4.1 材料与设备

4.1.1 材料与试剂

铁皮石斛粉：铁皮石斛，六安市九仙尊霍山石斛股份有限公司，铁皮石斛干燥后粉碎过 100 目筛后备用；高筋小麦粉，黄油：益海嘉里粮油工业公司；高活性干酵母：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。

4.1.2 仪器与设备

KOWKA 和面机，烤箱：深圳康家佳品智能电器有限公司；CT3 10K 质构仪：美国 Ametek Brookfield 公司；TD5Z 高速离心机：湖南凯达有限公司；LGI 冷冻干燥机：北京松源华兴科技发展有限公司；米德 QL-610A 快速水分测定仪：厦门米德电子科技有限公司；Smartlab SE 型 X 射线（粉末）衍射仪：日本理学公司；DSC-60A 差示热扫描仪：日本岛津公司。

4.2 测试指标与方法

4.2.1 面包的制作方法

同 3.2.1，将部分样品在 28℃的环境中储存 1、3、5、7 天以进行水分含量、保水性和质构的测定，或者在冷冻干燥之后进行 X 射线衍射和热力学特性（DSC）等的检测。

4.2.1 面包热力学性质（DSC）的测定

DSC 铝盘中放入 2.000mg 的面包冻干粉末，与 3 倍体积蒸馏水混合，封闭

后在 4℃冰箱中冷藏过夜，升温速率 10℃/min,由 25℃升温至 160℃。空的 DSC 铝盘为对照。

4.2.2 面包储藏过程保水性的测定

在面包储存到第 1、3、5、7 天时，我们分别测量了面包质量，并依照以下公式来计算面包的失水率：

$$W:=(M_1-M_2)/M_1\times 100\%$$

其中， M_1 代表起始的面包质量；而 M_2 为储藏 1、3、5、7 天的面包质量。

4.2.3 面包储藏过程含水量的测定

取出了 5.000g 克的面包内芯，并使用米德 QL-610A 快速水分测定仪来测量其含水量。在 130℃的环境下进行测试，并且重复了三次。

4.2.4 面包储藏过程质构的测定

在面包储存到第 1、3、5、7 天时，我们分别测量了面包的质构，方法同 3.2.4。

4.2.5 面包储藏过程晶体学特性的测定

准备新鲜的面包（第 0 天），储存面包 5 天后，取出面包芯进行冷冻干燥，接着研磨并磨碎；管压 40kV，管流 40mA，扫描速率为 5°/min，扫描范围在 5°~40°之间进行测定 X 射线衍射测定。

4.3 数据处理与分析

我们使用了 SPSS 24.0 来处理并分析实验数据，其表现形式为均值加减标准偏差。通过应用 Duncan 检验的 ANOVA 方法进行了显著性的评估，当 P 小于等于 0.05 时，被认为存在显著差异。最后，利用 Origin2018 软件绘图。

4.4 结果与分析

4.4.1 铁皮石斛粉添加量对面包热力学性质的影响

利用差示扫描量热仪（DSC）对淀粉进行升降温，检测其热量变化，能很好的反映淀粉的热力学性质^[104]，精确地测量淀粉的老化程度。表 4-1 显示的是第五天储存后的面包样本的相关热力学指标结果。由表 4-1 可知，添加铁皮石斛粉后，我们测得相变温度和峰值温度值均低于未添加得面包样品组，特别是铁皮石斛粉添加量为 10%的这一组，相变初始温（ T_o ）、峰值温度(T_p)和终止温度(T_c)以及焓变值(ΔH)均为所有组别面包中最低值，说明 10%铁皮石斛粉

添加量降低面包的结晶度效果最好，延缓面包老化程度最佳。面包中淀粉结晶增加存在于面包淀粉老化回生的过程中，随着铁皮石斛粉添加量的增加，焓变值(ΔH)在不断的减小，表明融化淀粉结晶所需的热量在降低，这就说明说明铁皮石斛粉的添加能有效降低淀粉结晶的形成。可能是直链淀粉的有序排列受到铁皮石斛粉添加量的影响，同时铁皮石斛粉中膳食纤维和淀粉之间的相互作用通过延缓淀粉的回生而起到抗老化作用。

表 4-1 不同铁皮石斛粉添加量对面包热力学性质的影响

Table.4.1 Effect of different additions of *Dendrobium officinale* flour on the thermodynamic properties of breads

铁皮石斛粉添加量/%	To/°C	Tp/°C	Tc/°C	$\Delta H/(J/g)$
0	106.38±8.62 ^{ab}	113.56±7.98 ^a	124.65±6.71 ^b	-1046.94±56.72 ^c
2	108.42±6.68 ^a	112.65±1.00 ^a	129.65±3.95 ^a	-1184.35±23.96 ^b
4	107.63±4.54 ^a	112.03±1.31 ^a	130.12±6.99 ^a	-1162.33±32.55 ^b
6	101.17±10.35 ^b	111.68±1.32 ^a	127.84±1.63 ^{ab}	-1129.87±32.76 ^c
8	101.64±4.86 ^b	110.34±2.30 ^a	124.85±1.62 ^b	-1159.32±17.65 ^c
10	92.16±3.28 ^c	108.75±1.69 ^a	118.64±4.68 ^c	-1274.03±27.64 ^a

注：同行不同字母表示存在显著性差异($P<0.05$)。

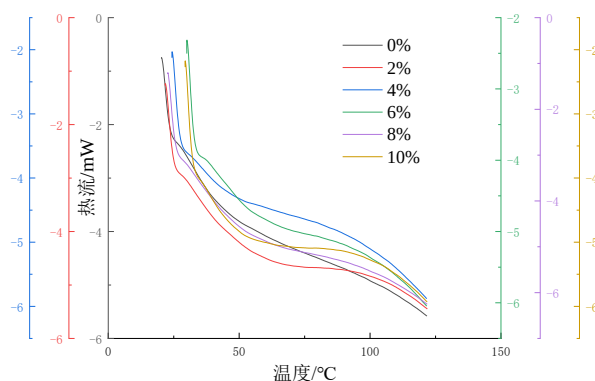


图 4-1 不同铁皮石斛粉添加量面包差示热图

Fig.4-1 Differential scanning calorimetry of bread with different *Dendrobium officinale* flour additions

4.4.2 铁皮石斛粉添加量对面包储藏过程保水性的影响

当储存的时间延长，面包中水的损失会变得更加明显，并且老化的程度也会加剧。通过观察图 4-1 可以看出，随著存储时间的增加，各种样本的失水情

况都在逐步加重。在前三天内，面包的失水过程相对平稳，但从第五天开始到第七天，它们的水分丢失速率加快。然而，向面包中添加一定比例的铁皮石斛粉能有效减缓这种趋势。与没有添加铁皮石斛粉的面包相比，所有含有铁皮石斛粉的面包都具有更低的失水率，而且这个效果随着铁皮石斛粉含量的提升而增强。特别是在 10%的比例下，它的失水率最小，这表明铁皮石斛粉对保持面包内的水分有积极影响。我们猜想这是因为铁皮石斛粉的引入增加了面包里的膳食纤维含量，从而加强了分子的水合效应，使结合水增多，减少了水分蒸发。

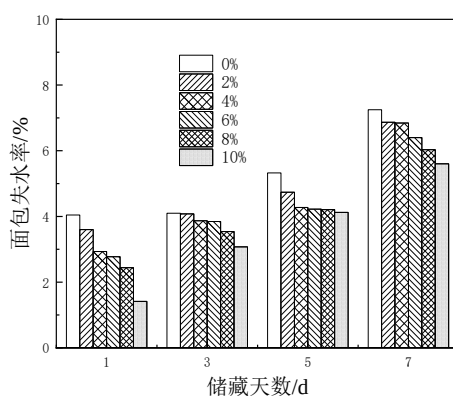


图 4-2 铁皮石斛粉添加量对面包储藏过程保水性的影响

Fig.4-2 Effect of the addition of *Dendrobium officinale* flour on water retention during bread storage

4.4.3 铁皮石斛粉添加量对面包储藏过程水分含量的影响

面包贮藏过程，面包中的水分通常会有所减损，所以面包中水分量被认为是来评估面包质量的变化的一個关键指标。当水分减少时，这意味着面包变得更硬^[104]。由图 4-2 可知，随著面包储存时间的长短，其水分含量逐渐减少。在前三天的存储时间内，这种变化相对较慢，但在第五到第七天之间，它迅速地大幅度下降了。此外，我们发现，随着铁皮石斛粉的添加量增多，面包在整个储存期内的水分含量都比未加铁皮石斛粉的面包要高，尤其是 10%这一组表现最为显著，表明出铁皮石斛粉能有效提升储存过程中的水分含量。主要原因可能是铁皮石斛粉中的多糖和纤维素能够阻碍水分的流动，有助于防止面包水分

的流失。

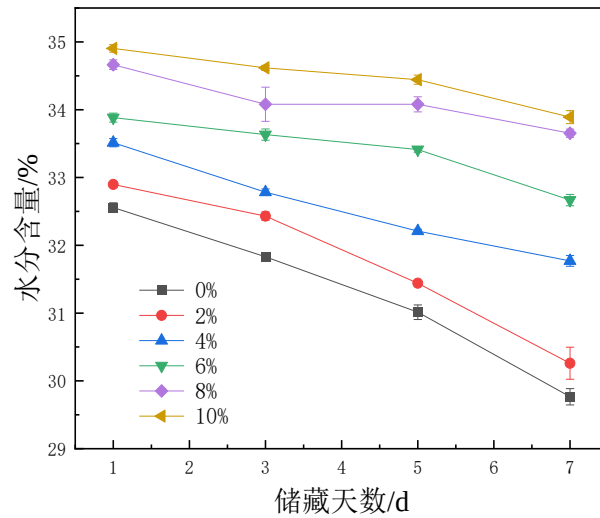


图 4-2 铁皮石斛粉添加量对面包储藏过程水分含量的影响

Fig.4-2 Effect of the addition of *Dendrobium officinale* flour on the moisture content of bread during storage

4.4.4 铁皮石斛粉添加量对面包储藏过程硬度的影响

面包在其保存过程总最为明显的变化就是其硬度的变化，如图 4-3 所示，不同铁皮石斛粉添加量的面包在储藏过程中，随着储藏时间的延长，各组添加量的面包硬度变化明显。总体上，所有的组别经过一天的放置，硬度均变大，储藏 1~3 天的面包硬度上升幅度较快，而储藏 5~7 天是硬度增加减缓。硬度的增加主要是面包中的水分在不断减少，储藏 1~3 天和 5~7 天面包硬度增加的速率与前面我们探究的储藏期间面包水分含量的变化一致。另外的，我们可以发现，随着面包储藏时间的增加，面包硬度增加的幅度会受到铁皮石斛添加量的影响，铁皮石斛粉的添加能延缓面包后期硬度增加速率，特别是添加量为 10% 这一组的面包，其在储藏 5~7 天的硬度增加速率低于对照组和其它组别。可能是因为铁皮石斛粉所含有的多糖和纤维素能够延缓水分流动，降低失水率，使面包的硬度增加速率减缓，有利于面包储藏。研究有指出，陈文平等发现，添加魔芋葡聚糖改良剂，能延缓馒头在储藏过程中水分的流动，延缓馒头的老化^[106]。此外，张苗制备了两种甘薯膳食纤维 SPDF1 和 SPDF2，均能改善馒头的品质，同时降低馒头的失水，降低馒头的硬度，有效延缓馒头老化^[107]。

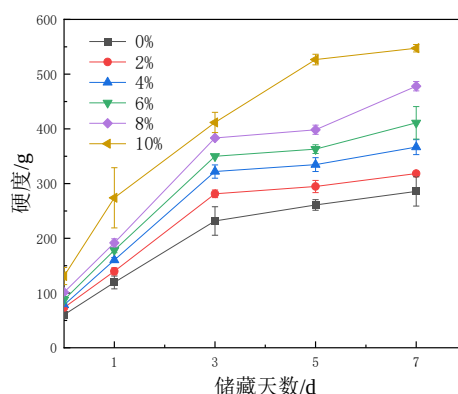


图 4-3 铁皮石斛粉添加量对面包储藏过程硬度的影响

Fig.4-3 Effect of the addition of *Dendrobium officinale* flour on the hardness of bread during storage

4.4.5 铁皮石斛粉添加量对面包储藏过程结晶特性的影响

淀粉回生的主要机制是其内部直链淀粉与支链淀粉发生转化，与内部水分子作用，导致重结晶的出现，X 射线能够作用于这些晶体物质，产生相应的衍射图案。而在衍射图中，强度峰所反映的就是结晶度，呈正比例相关。面包样品的衍射图能够很好的反映面包在储藏期间内部淀粉的结晶状况，即淀粉的回生。图 4-4 是储藏 5 天的面包样品 X 射线衍射图，从图中我们可以发现，面包样品在衍射角值为 17° 和 20° 时出现了很强的结晶峰，此处对应于 V 型晶体，主要与直链淀粉有关。面包储藏 5 天之后，添加了铁皮石斛粉的面包在 17° 和 22° 峰强度均高于对照，这与多糖链的重排和淀粉结晶增加相关。随着回生时间的延长，淀粉的衍射强度增强，说明样品组回生淀粉为 B+V 型。由图 4-4 可以看出，不同添加量的铁皮石斛粉面包淀粉的衍射峰强度减弱，即抑制了淀粉的重结晶。其中，V 型特征峰的峰强度的改变可能与铁皮石斛粉中膳食纤维有关，膳食纤维能抑制水分子的流失，同时在淀粉发生回生时，降低支链淀粉分子的结晶速度。孔祥珍^[108]等通过 X 衍射研究面包老化的实验中也报道过类似的现象。面包 X 衍射图谱的变化规律进一步印证了前述铁皮石斛粉能延缓面包的贮藏过程的老化。根据铁皮石斛粉面包储藏期间的保水性、硬度、热力学性质和结晶度等分析，推断出铁皮石斛粉通过增强面包保水性和抑制淀粉的重结晶，从而起到抗老化作用。

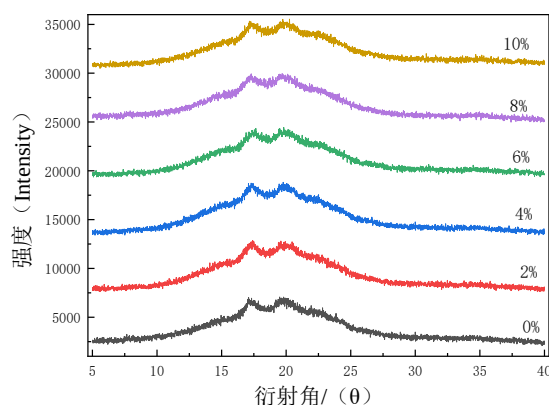


图 4-4 铁皮石斛粉添加量对面包储藏过程结晶特性的影响

Fig.4-4 Effect of the addition of *Dendrobium officinale* flour on the crystallization characteristics of bread during storage

4.5 本章小结

(1) 随着储藏时间的增加, 面包的水分含量逐渐减小, 硬度增加, 但添加了铁皮石斛粉的面包失水速率和硬化速率降低。

(2) 添加铁皮石斛粉使得面包储藏期间的的相变和峰值温度值减小, 而热焓值增大。加入不同添加量铁皮石斛粉面包淀粉的衍射峰强度减弱, 表明淀粉的重结晶速率减缓, 有助于延缓面包老化。

第五章 结论与展望

5.1 结论

本论文以铁皮石斛粉和高筋小麦粉为试验原料，研究了铁皮石斛粉对面团特性以及面包品质和面包储藏期的影响，具体结论如下：

(1) 大量的多糖与纤维素等多成分存在于铁皮石斛之中，其加入会使后续制成的面团颜色变得较深，当逐渐加大对铁皮石斛粉的使用时，面团的持水性呈递进增长态势。研究并探讨过铁皮石斛和小麦结合后的粉质特性及面团质构特性的变化情况。实验数据揭示：引入铁皮石斛粉之后，糊化过程中峰值粘度、谷值黏度、最终黏度、回生值和崩解值显著降低（ $p<0.05$ ）；面团硬度、弹性、胶粘性和咀嚼性均随铁皮石斛粉添加量增大有增大的趋势；面团的流变学分析表明：添加铁皮石斛粉后弹性模量和黏性模量显著增大（ $p<0.05$ ），面团的流变学特性向半固体偏移；湿面筋含量随着铁皮石斛粉添加量的增加逐渐减小，面筋中的游离巯基含量增加，二硫键含量减少；面筋蛋白中 β -折叠和 α -螺旋含量下降，而 β -转角和无规卷曲含量上升，表明有序二级结构比例下降而无序二级结构比例上升。

(2) 随着铁皮石斛粉的添加量的增大，面包的硬度、咀嚼性显著增大，同时，其体积大小会随铁皮石斛粉使用量的增长而减少；此外，面包的 DPPH 和 ABTS 自由基消除率也会随之提升，这表明铁皮石斛粉能够有效地增强面包的抗氧化性能。面包皮与面包芯的明亮值均降低，表明由于铁皮石斛粉本身的色泽导致面包颜色变暗。

(3) 当引入铁皮石斛粉后，面包的相变点温度、峰值温度和热焓值均下降。随着储存时间延长，面包的水分逐渐减少，硬度逐渐增加，弹性也随之变小。到第 7 天为止，与未加铁皮石斛粉的面包相比，所有添加了铁皮石斛粉的面包的失水速率和硬化速率变慢，面包的老化速度逐渐放缓，这意味着添加铁皮石斛粉可以有效地延迟面包的老化速率。铁皮石斛粉能提高面包的含水量并且阻碍淀粉的重结晶，因此具有延缓面包老化的功能。

总之，铁皮石斛粉对面团特性和面包品质有重要的影响，铁皮石斛粉添加量在 4%~6% 为宜，得到综合感官评分可接受范围内，富含石斛活性成分的功能性面包。

5.2 展望

本研究以铁皮石斛粉和小麦粉作为基础，探讨了不同铁皮石斛粉添加量对面团特性、面包质量以及储存期面包老化的影响，并阐述了其抗老化机制。然而，由于实验环境等因素的限制，部分研究仍需进一步深化。

（1）铁皮石斛粉中益生活性成分很多，可以进一步用来提取或分离膳食纤维和石斛多糖化合物等物质，更加细化的研究它们如何对淀粉产生作用。

（2）面包中添加了铁皮石斛粉，增加了面包的营养和功能性，但其硬度和感官质量仍需进一步提升。可以通过预处理铁皮石斛粉、使用改良剂或优化工艺来提升面包的品质。

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] BETORET E, ROSELL C M. Enrichment of bread with fruits and vegetables: Trends and strategies to increase functionality [J]. Cereal Chemistry, 2020, 97(1): 9-19.
- [3] RIZKALLA S W, BELLISLE F, SLAMA G. Health benefits of low glycaemic index foods, such as pulses, in diabetic patients and healthy individuals [J]. The British journal of nutrition, 2002, 88 Suppl 3: S255-62.
- [4] DZIKI D, ROZYLO R, GAWLIK-DZIKI U, et al. Current trends in the enhancement of antioxidant activity of wheat bread by the addition of plant materials rich in phenolic compounds [J]. Trends in Food Science & Technology, 2014, 40(1): 48-61.
- [5] MILLAR K A, BARRY-RYAN C, BURKE R, et al. Dough properties and baking characteristics of white bread, as affected by addition of raw, germinated and toasted pea flour [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2019, 56.
- [6] LIU X, LU K, YU J, et al. Effect of purple yam flour substitution for wheat flour on in vitro starch digestibility of wheat bread [J]. Food Chemistry, 2019, 284: 118-24.
- [7] 张首玉, 司俊娜. 葛根山药保健面包的工艺研究 [J] 食品研究与开发. 2016, 37(12): 74-8.
- [8] XU X J, LUO Z G, YANG Q Y, et al. Effect of quinoa flour on baking performance, antioxidant properties and digestibility of wheat bread [J]. Food Chemistry, 2019, 294: 87-95.
- [9] 宋振硕, 杨军国, 张磊, 等. 超微绿茶粉对面包品质与抗氧化特性的影响 [J] 茶叶学报. 2018, 59(04): 229-32.
- [10] ŚWIECA M, GAWLIK-DZIKI U, SĘCZYK Ł, et al. Interactions of green coffee bean phenolics with wheat bread matrix in a model of simulated in vitro digestion [J]. Food chemistry, 2018, 258: 301-7.
- [11] MA S, WANG Z, LIU H M, et al. Supplementation of wheat flour products with wheat

- bran dietary fiber: Purpose, mechanisms, and challenges [J]. Trends in Food Science & Technology, 2022, 123: 281-9.
- [12] URIBE-WANDURRAGA Z N, IGUAL M, GARCIA-SEGOVIA P, et al. Effect of microalgae addition on mineral content, colour and mechanical properties of breadsticks [J]. Food & Function, 2019, 10(8): 4685-92.
- [13] MOLLAKHALILI-MEYBODI N, SHEIDAEI Z, KHORSHIDIAN N, et al. Sensory attributes of wheat bread: a review of influential factors [J]. Journal of Food Measurement and Characterization, 2023, 17(3): 2172-81.
- [14] 吕隆重, 李波轮, 任传顺, 等. 无麸质大米面包加工技术研究进展 [J] 中国粮油学报 . 2022, 37(11): 279-87.
- [15] AOKI N, UMEMOTO T, OKAMOTO K, et al. Mutants that have shorter amylopectin chains are promising materials for slow-hardening rice bread [J]. Journal of Cereal Science, 2015, 61: 105-10.
- [16] DERDE L J, GOMAND S V, COURTIN C M, et al. Moisture Distribution during Conventional or Electrical Resistance Oven Baking of Bread Dough and Subsequent Storage [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2014, 62(27): 6445-53.
- [17] LIU X L, MU T H, YAMUL K D, et al. Evaluation of different hydrocolloids to improve dough rheological properties and bread quality of potato-wheat flour [J]. Journal of Food Science and Technology-Mysore, 2017, 54(6): 1597-607.
- [18] SHEN Y T, CHEN G J, LI Y H. Bread characteristics and antioxidant activities of Maillard reaction products of white pan bread containing various sugars [J]. Lwt-Food Science and Technology, 2018, 95: 308-15.
- [19] 顾苗苗. 风味蛋白酶对面包品质的影响研究 [D], 2022.
- [20] ROSELL C M, ROJAS J A, BENEDITO DE BARBER C. Influence of hydrocolloids on dough rheology and bread quality [J]. Food Hydrocolloids, 2001, 15(1): 75-81.
- [21] 张文雅, 徐丹, 吴凤凤, 等. 硬脂酰乳酸钠对冻融循环发酵面团及其油炸甜甜圈品质的影响 [J] 食品与生物技术学报. 2022, 41(02): 73-81.
- [22] ZHANG Y, ZHANG Y, AI Z, et al. Thermal, rheological properties and microstructure of hydrated gluten as influenced by antifreeze protein from oat (*Avena sativa* L.) [J]. Journal of cereal science, 2020, 93: 102934.

- [23] 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 & Technology*, 2022, 57(2): 1273-82.
- [24] 赵强忠, 杜翠, 蔡勇建, 等. HPMC 和 GOD 对冷冻面团及其烘烤面包品质的影响 [J] *华南理工大学学报(自然科学版)*. 2019, 47(08): 38-47.
- [25] LIU S Y, GU S M, SHI Y, et al. Alleviative effects of mannosylerythritol lipid-A on the deterioration of internal structure and quality in frozen dough and corresponding steamed bread [J]. *Food Chemistry*, 2024, 431.
- [26] DECOCK P, CAPPELLE S. Bread technology and sourdough technology [J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2005, 16(1): 113-20.
- [27] KATINA K, HEINIÖ R L, AUTIO K, et al. Optimization of sourdough process for improved sensory profile and texture of wheat bread [J]. *LWT - Food Science and Technology*, 2006, 39(10): 1189-202.
- [28] BRANDT M J, ROTH K, HAMMES W P. Effect of an exopolysaccharide produced by *Lactobacillus sanfranciscensis* LTH1729 on dough and bread quality [J]. *Sourdough from fundamentals to applications*, 2003, 80.
- [29] PLESSAS S. Innovations in Sourdough Bread Making [J]. *Fermentation-Basel*, 2021, 7(1).
- [30] HANSEN B. Volatile compounds in wheat sourdoughs produced by lactic acid bacteria and sourdough yeasts [J]. *Zeitschrift für Lebensmittel-Untersuchung und-Forschung*, 1994, 198(3): 202-9.
- [31] SCHIEBERLE P. Intense aroma compounds: Useful tools to monitor the influence of processing and storage on bread aroma [J]. *Advances in food sciences*, 1996, 18(5-6): 237-44.
- [32] XU D, ZHANG H, XI J, et al. Improving bread aroma using low-temperature sourdough fermentation [J]. *Food Bioscience*, 2020, 37: 100704.
- [33] HANSEN A, SCHIEBERLE P. Generation of aroma compounds during sourdough fermentation: applied and fundamental aspects [J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2005, 16(1-3): 85-94.
- [34] 白雪, 赵闪闪, 肖志刚, 等. 酸汤子面团对发酵面包品质的影响 [J] *食品科学*. 2021,

- 42(02): 135-42.
- [35] CODA R, VARIS J, VERNI M, et al. Improvement of the protein quality of wheat bread through faba bean sourdough addition [J]. LWT-Food Science and Technology, 2017, 82: 296-302.
- [36] 食品指南 张 [J]. 烘焙食品健康评估. 2009, (5): 42-3.
- [37] 田明, 王玉伟, 冯军, 等. 我国功能性食品与保健食品的比较研究 [J] 食品科学. 2023, 44(15): 390-6.
- [38] 柳芳伟, 张珊珊, 陈苏明, 等. 3 种富含多糖面包的体外消化酵解特性[J] 食品科学. 2021, 42(03): 143-9.
- [39] JENKINS D J A, WOLEVER T M S, KALMUSKY J, et al. Low glycemic index carbohydrate foods in the management of hyperlipidemia [J]. The American journal of clinical nutrition, 1985, 42(4): 604-17.
- [40] 徐箬. 低 GI 面包的研制及其终产品血糖生成指数的测定 [D]; 河北工程大学, 2020.
- [41] MOHEBBI Z, AZIZI-LALABADI M, HOSSEINI S J, et al. The effects of prebiotic bread containing oat β -glucan and resistant starch on the glycemic index and glycemic load in healthy individuals [J]. Nutrition & Food Science, 2019, 49(6): 1029-38.
- [42] YAREGAL Z, BAYE K, SOLOMON W K. The influence of dough kneading time and flour particle size distribution on white bread structure, glycemic response and aspects of appetite [J]. Clinical Nutrition ESPEN, 2022, 52: 68-77.
- [43] MELINI V, MELINI F. Gluten-free diet: Gaps and needs for a healthier diet [J]. Nutrients, 2019, 11(1): 170.
- [44] DIETERICH W, SCHUPPAN D, SCHINK M, et al. Influence of low FODMAP and gluten-free diets on disease activity and intestinal microbiota in patients with non-celiac gluten sensitivity [J]. Clinical Nutrition, 2019, 38(2): 697-707.
- [45] 周霖. 微生物转谷氨酰胺酶对小麦麸质蛋白中乳糜泻肽结构和功能的影响 [D]; 南昌大学, 2018.
- [46] 贺殷媛, 崔毓萱, 陈凤莲, 等. 大米面包品质改良的研究进展 [J] 食品工业科技 . 2022, 43(14): 484-92.
- [47] HAMADA S, SUZUKI K, AOKI N, et al. Improvements in the qualities of gluten-free bread after using a protease obtained from *Aspergillus oryzae* [J]. Journal of Cereal

- Science, 2013, 57(1): 91-7.
- [48] SCJARINI L S, RIBOTTA P D, LEÓN A E, et al. Influence of gluten-free flours and their mixtures on batter properties and bread quality [J]. Food and Bioprocess Technology, 2010, 3: 577-85.
- [49] GENEVOIS C E, GRENÓVERO M S, DE ESCALADA PLA M F. Use of different proportions of rice milling fractions as strategy for improving quality parameters and nutritional profile of gluten-free bread [J]. Journal of Food Science and Technology, 2021, 58: 3913-23.
- [50] 李涛,宋洪波,安凤平,等.紫山药抗性淀粉调节高脂血症金黄地鼠脂质代谢[J].中国食品学报,2021,21(03):95-101.
- [51] HSU C L, HURANG S L, CHEN W, et al. Qualities and antioxidant properties of bread as affected by the incorporation of yam flour in the formulation [J]. 2004, 39(2): 231-8.
- [52] 苗清霞,赵军武,刘清霞.山楂薄荷营养面包的制作工艺[J].食品研究与开发,2015,36(16):84-88.
- [53] 张超,卢艳,黄卫宁,等.面包老化抑制因素的研究[J].中国食品添加剂,2005(05):26-29.
- [54] 张晓娟,王强,钱平.面包长期贮存过程中的硬化研究[J].中国农学通报,2010,26(06):54-59.
- [55] HALLBERG L, CHINACHOTI P J J O F S. Dynamic mechanical analysis for glass transitions in long shelf-life bread [J]. 1992, 57(5): 1201-29.
- [56] MARTIN M, HOSENEY R J C C. A mechanism of bread firming. II. Role of starch hydrolyzing enzymes [J]. 1991, 68(5).
- [57] RUSSELL P L. A kinetic study of bread staling by differential scanning calorimetry and compressibility measurements. The effect of added monoglyceride [J]. Journal of Cereal Science, 1983, 1(4): 297-303.
- [58] ARMERO E, COLLAR C. Crumb firming kinetics of wheat breads with anti-staling additives [J]. Journal of cereal Science, 1998, 28(2): 165-74.
- [59] 肖瑜,杨新标,林楠,等.不同蛋白质对大黄米淀粉老化特性的影响[J].食品科学,2020,41(16):45-51.
- [60] SURESH B, AMARJEET K, POONAM A. Changes in baking and sensory properties of wheat bread and muffins with the addition of grapes [J]. HortFlora Research Spectrum,

- 2013, 2(1): 20-4.
- [61] 黄圣博,张瑶,俞玥,等.加工方法对苦荞粉添加吐司面包品质的影响研究[J].食品与发酵工业:1-9
- [62] 杨连战, 蔡金鑫, 孟宪伟, 等. 复配改良剂对面包烘焙品质及抗老化的影响[J].中国粮油学报. 2023, 38(03): 61-7.
- [63] 张薇, 程晓燕, 黄卫宁, 等. 含天然酵母粉发酵面包的营养与老化特性及风味化合物特征[J] 食品科学. 2014, 35(23): 33-8.
- [64] 李秀婷, 李里特, 江正强, 等. 耐热木聚糖酶对面包老化作用探讨[J].食品与发酵工业. 2006, (01): 23-7.
- [65] 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.
- [66] 魏超昆, 赵宇慧, 刘敦华, 等. 鸡油基起酥油对面包感官、风味及老化特性的影响[J]. 食品科学.2017, 38(03): 101-6.
- [67] 陶泽鑫, 陆宁姝, 吴晓倩, 等. 石斛的化学成分及药理作用研究进展药学研究.2021, 40(01): 44-51+70.
- [68] 龚庆芳, 周浩, 王新桂, 等. 7 种石斛多糖质量分数的测定及单糖组成分析[J].食品科技. 2013, 38(03): 172-5.
- [69] YU W, REN Z, ZHANG X, et al. Structural characterization of polysaccharides from *Dendrobium officinale* and their effects on apoptosis of HeLa cell line [J]. *Molecules*, 2018, 23(10): 2484.
- [70] NIE G, ZHANG Y, ZHOU Z, et al. Dynamic evaluation of the protective effect of *Dendrobium officinale* polysaccharide on acute alcoholic liver injury mice in vitro and in vivo by NIR fluorescence imaging [J]. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 2021, 413: 5715-24.
- [71] ZHENG H, PAN L, XU P, et al. An NMR-based metabolomic approach to unravel the preventive effect of water-soluble extract from *Dendrobium officinale* Kimura & Migo on streptozotocin-induced diabetes in mice [J]. *Molecules*, 2017, 22(9): 1543.
- [72] FAN Y, HE X, ZHOU S, et al. Composition analysis and antioxidant activity of polysaccharide from *Dendrobium denneanum* [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2009, 45(2): 169-73.

- [73] LUO J-P, DENG Y-Y, ZHA X-Q. Mechanism of polysaccharides from *Dendrobium huoshanense*. on streptozotocin-induced diabetic cataract [J]. *Pharmaceutical biology*, 2008, 46(4): 243-9.
- [74] ZENG Y-J, YANG H-R, WANG H-F, et al. Immune enhancement activity of a novel polysaccharide produced by *Dendrobium officinale* endophytic fungus *Fusarium solani* DO7 [J]. *Journal of functional foods*, 2019, 53: 266-75.
- [75] FAN Y, LUO A. Evaluation of anti-tumor activity of water-soluble polysaccharides from *Dendrobium denneanum* [J]. *African Journal of Pharmacy and Pharmacology*, 2011, 5(3): 415-20.
- [76] CHEN Y, WANG Y, LYU P, et al. Comparative transcriptomic analysis reveal the regulation mechanism underlying MeJA-induced accumulation of alkaloids in *Dendrobium officinale* [J]. *Journal of plant research*, 2019, 132(3): 419-29.
- [77] 林君, 黄友琴. 铁皮石斛生物活性成分及产品加工的研究进展[J]. *轻工科技*. 2022, 38(02): 21-3+56.
- [78] 何铁光, 苏江, 王灿琴, 等. 铁皮石斛不同来源材料多糖和氨基酸含量的比较[J]. *广西农业科学*. 2007, (01): 32-4.
- [79] 谢唐贵, 陈敬民, 李燕婧, 等. 铁皮石斛对免疫力低下小鼠巨噬细胞吞噬作用的谱效关系[J]. *广西医学*. 2019, 41(11): 1398-401+423.
- [80] 罗颖懿, 李运容, 雷胄熙, 等. 铁皮石斛共性黄酮类成分新西兰牡荆苷II的体外抗氧化与诱导 HepG2 细胞凋亡的作用[J]. *中国实验方剂学杂志*. 2019, 25(01): 43-50.
- [81] 颜美秋, 苏洁, 俞静静, 等. 铁皮石斛醇提取物对复合饮食因素所致代谢性高血压大鼠的作用及物质基础研究[J]. *中国中药杂志*. 2019, 44(22): 4896-904.
- [82] 季爱兵, 曾胤, 彭文书, 等. 铁皮石斛水提物对高脂血症小鼠血脂和血糖的影响[J]. *食品研究与开发*. 2017, 38(03): 176-80.
- [83] 王云威, 王景雪. 铁皮石斛多糖对 2 型糖尿病小鼠降糖降脂的作用[J]. *食品科学*. 2020, 41(21): 127-32.
- [84] 刘志勇, 赖华清, 熊耀坤, 等. 鲜铁皮石斛功能性饮品及其制备方法[J]. *食品工程*. 2019, (04): 11-5.
- [85] 任运红, 徐雅囡, 钟淳菲, 等. 铁皮石斛发酵酒品质特性研究[J]. *中国酿造*. 2020, 39(05): 92-6.

- [86] 巩卫琪, 薛娇. 响应面法优化铁皮石斛叶发酵饮料工艺[J]. 饮料工业. 2022, 25(06): 28-32.
- [87] 邢建荣, 郑美瑜, 杨颖, 等. 铁皮石斛叶饮料的加工工艺[J]. 浙江农业科学 2018, 59(05): 748-50.
- [88] 刘倩葶, 刘琨毅, 李崇萍, 等. 铁皮石斛花固体饮料工艺初探及功能性物质鉴定[J]. 美食研究 . 2020, 37(02): 70-6.
- [89] 夏雨, 吴姗姗, 王涌善, 等. 苦荞石斛叶复合发酵酒的工艺优化[J]. 农产品加工. 2020, (24): 32-5.
- [90] 孙传伯, 李双双, 刘丽莉, 等. 一种铁皮石斛啤酒的研制[J]. 中外酒业·啤酒科技. 2020, (13): 36-9.
- [91] 张平. 鲜榨铁皮石斛饮料的加工工艺研究[J]. 安徽农学通报. 2019, 25(22): 113-6.
- [92] 黄琼, 何燕萍. 铁皮石斛面包配方的优化[J]. 农产品加工 . 2023, (08): 9-12+5.
- [93] URIBE-WANDURRAGA Z N, IGUAL M, GARCÍA-SEGOVIA P, et al. Effect of microalgae addition on mineral content, colour and mechanical properties of breadsticks [J]. Food & function, 2019, 10(8): 4685-92.
- [94] 李嘉仪, 谭萱宇, 邹金浩, 等. 百合粉添加量对面团特性及面包品质的影响[J]. 食品与机械. 2020, 36(01): 198-203.
- [95] 黄梦凡, 温纪平, 展小彬. 柑橘纤维对面团特性及面包品质的影响[J]. 食品与发酵工业 . 2024, 50(02): 48-56.
- [96] 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]. Cereal Chemistry, 1993, 70: 22-.
- [97] 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): 435-43.
- [98] ZHANG Y, HONG T, YU W, et al. Structural, thermal and rheological properties of gluten dough: Comparative changes by dextran, weak acidification and their combination [J]. Food chemistry, 2020, 330: 127154.
- [99] 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.
- [100] 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.
- [101] WANG N, XU Y, CHAO H, et al. Effects of celery powder on wheat dough properties and textural, antioxidant and starch digestibility properties of bread [J]. Journal of food science and technology, 2020, 57: 1710-8.
- [102] SEO Y, MOON Y, KWEON M. Effect of purple-colored wheat bran addition on quality and antioxidant property of bread and optimization of bread-making conditions [J]. Applied Sciences, 2021, 11(9): 4034.
- [103] LUO Q-L, TANG Z-H, ZHANG X-F, et al. Chemical properties and antioxidant activity of a water-soluble polysaccharide from *Dendrobium officinale* [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2016, 89: 219-27.
- [104] 赵俊芳, 吕银德, 豆康宁, 等. 面包加工工艺中水分的变化研究[J].食品研究与开发. 2013, 34(17): 1-3.
- [105] 杨艺. 不溶性膳食纤维的添加对面包品质影响机制的研究 [D]; 江南大学, 2019.
- [106] 陈文平, 汪超, 蹇美云, 等. 魔芋葡甘聚糖改善馒头品质的研究[J].食品科学. 2011, 32(02): 324-7.
- [107] 张苗, 木泰华, 韩俊娟. 甘薯膳食纤维对馒头品质及老化的影响[J].江苏师范大学学报(自然科学版). 2016, 34(04): 20-4.
- [108] 孔祥珍, 周惠明, 吴刚. DSC、NMR、X-射线衍射三种技术在研究面包老化中的应用[J].食品工业科技. 2003, (02): 85-8.

致谢

人生是一场关于离别的漫长电影，我的研究生生涯亦是这样一场在 2024 年盛夏落幕的电影。走在去实验室的路上，回想这三年，无论悲喜，却在此时此刻与过去那些时光一一挥手告别了。

特别感谢我的导师魏明教授。对于刚来到实验室的我来说，科研路上并非一帆风顺，是您，在我迷茫时给我指点迷津；是您在我试验瓶颈期，给我信心和鼓励；是您在我生活上，给我家人般的关怀。感谢钱森和老师、赵世光老师、王洲老师的悉心教导，祝桃李芬芳，诸事顺意。

感谢我的同门，相逢不问时间长短，重要的是此刻相伴。在这与试验奋战的日日夜夜里，所幸我一直有你们的朝夕相伴。我们一起经历了失败的沮丧，成功的喜悦，共同分享了温热的面包和曲奇，也度过了生命中极具挑战，绝不平常的三年时光。衷心祝你们拥有灿烂的每一天。

感谢我的父母给予我无限的包容和呵护，在你们眼中我的快乐和健康是最珍贵的。你们的爱让我明白自己拥有着随时避风的港湾，和绝对的选择的权力，这份爱让我的生命更加自由。回想过去，那些困顿时的煎熬，好像都不再那么痛苦了，收获的是直面挑战的勇气以及无比珍贵的坚持。