

分类号：S37

单位代码：10363

密 级：公开

学 号：2210530126

苦荞麦芽苗粉加工工艺及低 GI 馒头研究

STUDY ON PROCESSING TECHNOLOGY OF TARTARY
BUCKWHEAT SPROUT POWDER AND LOW GI STEAMED
BREAD

学生姓名：王楠

指导教师：王顺民 教授

专 业：生物与医药

研究方向：功能性食品开发与研究

论文答辩日期：2024 年 6 月 3 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：王楠

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

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：王楠 指导教师签名：王楠

日期：2024 年 6 月 3 日 日期：2024 年 6 月 3 日

苦荞麦芽苗粉加工工艺及低 GI 馒头研究

摘要

苦荞麦 (*Fagopyrum tataricum*) 芽苗是一种富含黄酮类化合物、 γ -氨基丁酸、抗坏血酸、氨基酸和有机酸等活性营养成分的新型芽苗菜。与苦荞种子相比，苦荞麦芽苗中芦丁、槲皮素、黄皮素、异黄素等黄酮含量更高，且具有更强的抗氧化活性。有研究表明，食用苦荞麦芽苗具有良好的降低胆固醇和血糖的作用效果。故此，研究开发苦荞麦芽苗低血糖指数 (Glycemic Index, GI) 食品具有很大的应用前景。

本研究以苦荞麦芽苗为对象，采用护色 (Color-protecting, CP)、渗透 (Osmosis, OM)、烫漂 (Blanching, BC)、 β -环糊精 (β -cyclodextrin, β -CD) 及超声 (Ultrasound, US) 等预处理方法，结合不同温度 (50°C、60°C 和 70°C) 的热风对苦荞麦芽苗进行干燥脱水处理。探究不同处理下的苦荞麦芽苗的干燥特性，及其对粉碎制得的苦荞麦芽苗粉的物理特性，营养成分、抗氧化能力和消化特性的影响。进而研究筛选出最佳的苦荞麦芽苗预处理的方法并制得活性成分含量高、抗氧化能力强的苦荞麦芽苗粉，并对 β -环糊精的包合结构进行表征分析。此外，通过响应面优化，研究低 GI 苦荞麦芽苗粉馒头的最佳工艺配方。主要研究内容如下：

(1) 研究预处理结合热风干燥对苦荞麦芽苗的干燥特性及芽苗粉物理性质的影响。结果表明，随着干燥温度由 50°C 升高到 70°C，所有处理组的苦荞麦芽苗的干燥时间均减少而脱水速率增大。与对照 (Control check, CK) 组相比，在各个干燥温度下，OM、US 和 BC 处理均能有效缩短苦荞芽苗的干燥时间，而 BC 与 US 处理可以增大芽苗的干燥速率。CP、 β -CD 及 US 处理组的芽苗 L^* 值较高， a^* 值更低，呈现更好的绿色。其中在热风 60°C 条件下，CP、OM、BC、 β -CD 及 US 组的芽苗的复水性要高于 CK 组，且分别比对照增加 32.5%、40.3%、12.9%、70.9% 和 56.7%。

而在 70℃下的 US 组的溶解性最高，且为 40.05%。在不同温度的热风干燥下，BC 组苦荞麦芽苗粉的流动性均较好。 β -CD 与 US 组持水与持油性均较强，且可以有效改善芽苗粉的溶解性。

(2) 研究预处理结合热风干燥对苦荞麦芽苗的营养成分及抗氧化能力的影响。结果表明，不同组的苦荞麦芽苗的纤维素含量均随着干燥温度的升高呈现先降低后上升的趋势。相同干燥温度下，各处理组的纤维素含量均显著高于 CK 组 ($P<0.05$)，BC 组还原糖损失最为严重，CP 与 β -CD 组总叶绿素均含量最高 ($P>0.05$)。在热风 60℃条件下，CP、OM、 β -CD 和 US 组总黄酮含量较高分别为 91.12 mg/g、89.44 mg/g、94.12 mg/g 和 87.34 mg/g，对比 CK 组分别提高了 8.76%、6.76%、12.34%和 4.25%，且 β -CD 组总酚含量最高为 21.90 mg/g。CP、OM、 β -CD 和 US 组显著提高了芽苗对 ABTS、DPPH 自由基的清除能力。

(3) 研究预处理结合热风干燥对苦荞麦芽苗粉的消化特性，并对 β -环糊精包合结构进行表征分析。结果表明， β -CD 组在胃部及肠道消化阶段的黄酮的释放量均最高，且分别为 68.69 mg/g 和 85.78 mg/g，显著高于 CK 对照组 ($P<0.05$)。 β -CD 组在肠部消化后，DPPH 自由基清除能力为 405.84 $\mu\text{mol TE/g}$ ，比 CK 组提高了 9.71% ($P<0.05$)。 β -CD、US、OM 和 CP 组在肠部消化期 ABTS 自由基清除能力均显著高于 CK 组，分别提高了 33.03%、25.49%、9.35%和 7.27%。 β -CD 和 US 组在肠部消化期的总还原能力显著高于 CK 组，分别为 4.45 mmol/g Fe^{2+} 、4.33 mmol/g Fe^{2+} 。 β -CD 组的苦荞麦芽苗粉馒头的总淀粉水解率最低为 34.48%，比 CK 组低 23.83%。与 CK 组相比， β -CD、CP、OM、BC 和 US 组馒头的 eGI 值均降低，其中 β -CD 组最低为 58.64（对照 eGI 值为 67.12）。此外通过对 β -环糊精包合结构进行表征分析，发现苦荞麦芽苗干燥，粉碎过程中存在 β -CD 与芽苗内部活性物质结合的可能性，这也可能是导致 β -CD 组的活性成分含量较高，总淀粉水解率较低的原因之一。

(4) 研究单因素对添加苦荞麦芽苗粉馒头的比容、感官评分、质构及 eGI 的影响，并通过响应面法优化苦荞麦芽苗粉馒头最佳配方。单因素

试验结果表明，苦荞麦芽苗粉添加量 12%、燕麦 β -葡聚糖添加量 6%、谷朊粉添加量 0.8%时，苦荞馒头的比容、感官评分及 eGI 结果较好；苦荞麦芽苗粉的添加会导致馒头变硬，而燕麦 β -葡聚糖和谷朊粉的添加则可以在一定程度上增加馒头的弹性，使馒头变软。以 eGI 为响应值，通过响应面法试验优化确定了苦荞馒头的最佳配方为：苦荞麦芽苗粉添加量 13.50%、燕麦 β -葡聚糖添加量 6.10%、谷朊粉添加量 0.80%，在此配方下，馒头的 eGI 值为 53.62。

本研究发现，由 β -环糊精处理的苦荞麦芽苗经过 60℃热风干燥，可以有效减少芽苗热风干燥过程中活性成分的损失，提高抗氧化性及抑制淀粉水解的能力，降低产品的升糖指数。为苦荞芽苗粉生产加工提供数据参考。此外，苦荞麦芽苗粉低 GI 馒头最佳配方的研究，也为低 GI 食品的开发提供数据支持和理论支撑。

关键词：苦荞麦芽苗，热风干燥， β -环糊精，低 GI，馒头

STUDY ON PROCESSING TECHNOLOGY OF TARTARY BUCKWHEAT SPROUT POWDER AND LOW GI STEAMED BREAD

ABSTRACT

Tartary buckwheat (*Fagopyrum tataricum*) sprouts are a novel variety of sprouts enriched with active nutrients like flavonoids, γ -aminobutyric acid, ascorbic acid, amino acids, and organic acids. In comparison to Tartary buckwheat seeds, Tartary buckwheat sprouts exhibit higher concentrations of flavonoids such as rutin, quercetin, flavonoids, and isoflavins, resulting in enhanced antioxidant properties. Studies have shown that the consumption of Tartary buckwheat sprouts has a good effect on reducing cholesterol and blood sugar. Consequently, the exploration and production of low glycemic index (GI) foods derived from Tartary buckwheat sprouts hold significant promise for future applications.

This study focuses on the use of Color-protecting (CP), Osmosis(OM), Blanching (BC), β -cyclodextrin (β -CD), and Ultrasonic (US) pretreatment in combination with hot air at different temperatures (50°C, 60°C, and 70°C) to process Tartary buckwheat sprouts. The research explores the drying characteristics of Tartary buckwheat sprouts under various treatments and their impact on the physical properties, nutritional components, antioxidant capacity, and digestive properties of the resulting Tartary buckwheat sprout powder. The study identifies the most effective pretreatment method for Tartary buckwheat sprouts to produce a powder with high levels of active ingredients and strong antioxidant properties, while also examining the inclusion structure of β -cyclodextrin. Furthermore, through response surface optimization, the research

determines the optimal formula for low glycemic index Tartary buckwheat sprout powder steamed buns. The main focus areas of the study include these aspects.

(1) Investigation was conducted on the impact of pretreatment combined with hot air drying on the drying characteristics of Tartary buckwheat sprouts and the physical properties of sprout powder. Results indicated that with an increase in drying temperature from 50°C to 70°C, the drying time of Tartary buckwheat sprouts decreased across all treatment groups, leading to an increase in dehydration rate. Treatments such as OM, US, and BC were found to significantly reduce the drying time of Tartary buckwheat sprouts at different temperatures, with BC and US treatments showing enhanced drying rates. Sprouts treated with CP, β -CD, and US exhibited higher L^* values, lower a^* values, and displayed a more vibrant green color. Among them, under hot air conditions of 60°C, the rehydration properties of the sprouts in the CP, OM, BC, β -CD and US groups were higher than those in the CK group, and were respectively increased by 32.5%, 40.3%, 12.9%, 70.9% and 56.7% compared with the control. Furthermore, the BC groups displayed improved fluidity under different drying temperatures. The β -CD and US groups showcased strong water-holding and oil-holding capacities, effectively enhancing the solubility of sprout powder.

(2) Investigated the impact of pretreatment combined with hot air drying on the nutritional components and antioxidant capacity of Tartary buckwheat sprouts. Results indicated that the cellulose content of the sprouts initially decreased and then increased with rising drying temperature. Comparatively, each treatment group exhibited significantly higher cellulose content than the control group ($P<0.05$). Notably, the BC group experienced the most substantial reduction in reducing sugars, while the CP and β -CD groups demonstrated the highest total chlorophyll content ($P>0.05$). Under hot air conditions of 60 °C,

the total flavonoid contents of the CP, OM, β -CD and US groups were 91.12 mg/g, 89.44 mg/g, 94.12 mg/g and 87.34 mg/g respectively, which were higher than those of the CK group by 8.76%, 6.76%, 12.34% and 4.25%, and the total phenolic content of the β -CD group was the highest at 21.90 mg/g. The CP, OM, β -CD, and US groups notably enhanced the sprouts' ability to scavenge ABTS and DPPH free radicals.

(3) This study aimed to investigate the digestion characteristics of Tartary buckwheat sprout powder using pretreatment combined with hot air drying, as well as to characterize the β -cyclodextrin inclusion structure. The findings revealed that the β -CD group exhibited the highest flavonoid release during stomach and intestinal digestion stages, with values of 68.69 mg/g and 85.78 mg/g respectively, significantly surpassing those of the CK control group ($P<0.05$). Following intestinal digestion, the β -CD group demonstrated a DPPH free radical scavenging ability of 405.84 $\mu\text{mol TE/g}$, which was 9.71% higher than that of the CK group ($P<0.05$). Moreover, the ABTS free radical scavenging capabilities of the β -CD, US, OM, and CP groups during the intestinal digestive phase were notably higher than those of the CK group, showing increases of 33.03%, 25.49%, 9.35%, and 7.27%, respectively. The total reducing capacity of the β -CD and US groups during the intestinal digestive phase significantly exceeded that of the CK group, measuring 4.45 mmol/g Fe^{2+} and 4.33 mmol/g Fe^{2+} respectively. Furthermore, the total starch hydrolysis rate of Tartary buckwheat sprout powder steamed buns in the β -CD group was the lowest at 34.48%, indicating a 23.83% decrease compared to the CK group. The eGI values of steamed buns in the β -CD, CP, OM, BC, and US groups were all lower than those of the CK group, with the β -CD group showing the lowest value at 58.64 (the control eGI value was 67.12). Additionally, the characterization and analysis of the β -cyclodextrin inclusion structure suggested that during the drying and crushing process of Tartary buckwheat sprouts, there

was a possibility of β -CD binding to the active substances inside the sprouts, potentially contributing to the activity observed in the β -CD group. This could explain the higher ingredient content and lower total starch hydrolysis rate observed.

(4) The study examined the influence of individual factors on the specific volume, sensory score, texture, and eGI of steamed buns enriched with Tartary buckwheat sprout powder. Response surface methodology was employed to optimize the recipe for these buns. Findings from the single factor tests indicated that a combination of 12% Tartary buckwheat sprout powder, 6% oat β -glucan, and 0.8% gluten powder yields better specific volume, sensory score, and eGI results for the Tartary buckwheat steamed buns. Although the inclusion of Tartary buckwheat sprout powder might result in hardness, oat β -glucan and gluten powder contribute to improved elasticity and softness. By prioritizing eGI as a crucial parameter, the optimal recipe for Tartary buckwheat steamed buns was identified through experimental optimization using response surface methodology: 13.50% Tartary buckwheat sprout powder, 6.10% oat beta-glucan, and 0.80% gluten powder, leading to an eGI value of 53.62.

This study found that Tartary buckwheat sprouts treated with β -cyclodextrin were dried with hot air at 60°C, which could effectively reduce the loss of active ingredients during the hot air drying process of Tartary buckwheat sprouts, improve antioxidant capacity, inhibit starch hydrolysis, and reduce the product's sugar index. Provide data reference for the production and processing of Tartary buckwheat sprout powder. The research on the optimal formula of low GI steamed buns with Tartary buckwheat sprout powder also provided data support and theoretical support for the development of low GI foods.

KEY WORDS: Tartary buckwheat sprout, hot air dry, β -cyclodextrin, low GI, steamed bread

目录

摘要	I
ABSTRACT	IV
缩略词表	XII
第一章 绪论	1
1.1 苦荞麦芽苗概述	1
1.1.1 苦荞麦芽苗介绍	1
1.1.2 苦荞麦芽苗营养特性	1
1.2.3 苦荞麦芽苗功能特性	2
1.2 芽苗干燥预处理研究	2
1.2.1 护色预处理	3
1.2.2 渗透预处理	3
1.2.3 烫漂预处理	4
1.2.4 超声预处理	4
1.2.5 环糊精预处理	5
1.3 芽苗产品加工现状	5
1.3.1 芽苗加工	6
1.3.2 微粒化加工	6
1.3.3 熟制加工	7
1.4 苦荞麦芽苗低 GI 食品开发研究	7
1.4.1 低 GI 食品发展趋势	7
1.4.2 低 GI 食品研究现状	8
1.4.3 苦荞麦芽苗低 GI 食品开发	8
1.5 课题研究内容及目的意义	9
1.5.1 研究内容	9
1.5.2 研究方法	9
1.5.3 研究的目的及意义	9
第二章 预处理结合热风对苦荞麦芽苗干燥及物理特性的影响	11
2.1 引言	11
2.2 材料与设备	11
2.2.1 实验材料	11

2.2.2 实验试剂	12
2.2.3 实验设备	12
2.3 实验方法	12
2.3.1 苦荞麦芽苗的培育	12
2.3.2 苦荞麦芽苗预处理	13
2.3.3 热风干燥方法	13
2.3.4 干燥特性测定	13
2.3.5 物理特性测定	14
2.3.6 数据统计与分析	16
2.4 结果与分析	16
2.4.1 预处理对苦荞麦芽苗热风干燥水分曲线的影响	16
2.4.2 预处理对苦荞麦芽苗热风干燥速率曲线的影响	17
2.4.3 预处理结合热风干燥对苦荞麦芽苗色泽的影响	19
2.4.4 预处理结合热风干燥对苦荞麦芽苗复水性的影响	20
2.4.5 预处理结合热风干燥对苦荞麦芽苗粉休止角和滑动角的影响	21
2.4.6 预处理结合热风干燥对苦荞麦芽苗粉持水性和持油性的影响	21
2.4.7 预处理结合热风干燥对苦荞麦芽苗粉堆积密度的影响	22
2.4.8 预处理结合热风干燥对苦荞麦芽苗粉溶解度的影响	23
2.5 本章小节	23
第三章 预处理结合热风对苦荞麦芽苗活性成分及抗氧化能力的影响	25
3.1 引言	25
3.2 材料与设备	25
3.2.1 实验材料	25
3.2.2 实验试剂	25
3.2.3 实验设备	26
3.3 实验方法	26
3.3.1 样品制备	26
3.3.2 可溶性糖和还原糖含量测定	27
3.3.3 可溶性蛋白和淀粉含量测定	27
3.3.4 总黄酮、总酚含量测定	27
3.3.5 叶绿素含量测定	27
3.3.6 纤维素含量测定	27

3.3.7 DPPH 自由基清除能力测定	28
3.3.8 ABTS 自由基清除能力测定	28
3.3.9 FRAP 铁离子还原力的测定	28
3.3.10 数据统计与分析	28
3.4 结果与分析	28
3.4.1 预处理结合热风干燥对苦荞麦芽苗纤维素和还原糖含量的影响	28
3.4.2 预处理结合热风干燥对苦荞麦芽苗可溶性蛋白和淀粉含量的影响	29
3.4.3 预处理结合热风干燥对苦荞麦芽苗叶绿素含量的影响	30
3.4.4 预处理结合热风干燥对苦荞麦芽苗总黄酮和总酚含量的影响	31
3.4.5 预处理结合热风干燥对苦荞麦芽苗 DPPH 自由基清除能力的影响	32
3.4.6 预处理结合热风干燥对苦荞麦芽苗 ABTS 自由基清除能力的影响	32
3.4.7 预处理结合热风干燥对苦荞麦芽苗总还原力的影响	33
3.4.8 聚类热图分析	34
3.5 本章小节	35
第四章 预处理结合干燥对苦荞麦芽苗消化的影响及 β -CD/Rutin 包合物结构分析 ..	36
4.1 引言	36
4.2 材料与设备	36
4.2.1 实验材料	36
4.2.2 实验试剂	36
4.2.3 实验设备	37
4.3 实验方法	37
4.3.1 样品制备	37
4.3.2 总黄酮、总酚含量测定	38
4.3.3 抗氧化能力的测定	38
4.3.4 体外消化实验	38
4.3.5 淀粉体外消化及血糖生成指数测定	38
4.3.6 β -环糊精与芦丁包合物的制备与表征	38
4.4 结果与分析	39
4.4.1 体外消化对预处理结合热风干燥处理下总黄酮含量的影响	39
4.4.2 体外消化对预处理结合热风干燥处理下总酚含量的影响	40
4.4.3 体外消化对预处理结合热风干燥处理下 DPPH 自由基清除能力的影响 ..	41
4.4.4 体外消化对预处理结合热风下苦荞麦芽苗 ABTS 自由基清除能力的影响	41

4.4.5 体外消化对预处理结合热风干燥处理下 FRAP 自由基清除能力的影响 ..	42
4.4.6 预处理结合热风对芽苗粉馒头的淀粉体外消化及升糖指数的影响	43
4.4.7 β -环糊精包合结构分析	44
4.5 本章小节	47
第五章 低 GI 苦荞麦芽苗粉馒头的研究	48
5.1 引言	48
5.2 材料与设备	48
5.2.1 实验材料	48
5.2.2 实验试剂	49
5.2.3 实验设备	49
5.3 实验方法	49
5.3.1 馒头配方	49
5.3.2 馒头制作工艺	49
5.3.3 比容	49
5.3.4 感官评价	50
5.3.5 质构	50
5.3.6 体外消化	51
5.3.7 单因素试验设计	51
5.3.8 响应面试验设计	51
5.3.9 数据统计与分析	52
5.4 结果与讨论	52
5.4.1 单因素试验结果	52
5.4.2 响应面试验结果	57
5.5 本章小节	61
第六章 结论与展望	62
6.1 结论	62
6.2 创新点	63
6.3 展望	63
攻读硕士学位期间取得的成果	79
致谢	80

缩略词表

GI	Glycemic index	血糖生成指数
eGI	Expected glycemic index	估计血糖生成指数
CK	Control check	对照
CP	Color-protecting	护色
OM	Osmosis	渗透
BC	Blanching	烫漂
β -CD	β -cyclodextrin	β -环糊精
US	Ultrasound	超声
ABTS	2,2'-azino-bis(3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid)	2,2'-联氮-双-3-乙基苯并噻唑啉-6-磺酸
DPPH	1,1-diphenyl-1-2-picrylhydrazyl	1,1-二苯基-2-三硝基苯肼
FRAP	Ferric reducing ability of plasma	铁离子还原能力

第一章 绪论

1.1 苦荞麦芽苗概述

1.1.1 苦荞麦芽苗介绍

苦荞麦属双子叶蓼科荞麦属植物，学名鞑靼荞麦（*Fagopyrum tataricum*），是一种药食两用植物^[1]，是膳食的重要基础组成部分和各种营养素的重要食物来源。全世界共发现约有 20 种荞麦，其中主要的两个品种分别是甜荞麦和苦荞麦。苦荞富含多酚类化合物、类黄酮和维生素等生物活性物质，其芦丁的含量约为普通荞麦的 100 倍^[2]，而较高含量的黄酮则赋予苦荞麦较苦的味道^[3]。萌发后的苦荞胚芽及芽苗的营养成分含量增加，氨基酸组成更为合理，黄酮、酚酸等多酚类功能活性成分的含量也显著增加^[4]，并赋予了与籽粒完全不一样的口感和加工特性^[5]。基于苦荞胚芽和微绿芽苗菜丰富的营养价值和有趣的感官特性，其可作为营养食品、功能食品的关键成分或协同作用的特定药物^[6]，进而成为新型健康食品或配料生产的一个优质来源^[7]。

新鲜芽苗菜是一种健康食品，但货架期短，因此需要经过加工来保持其营养价值。但因活性成分物质的多样性和各种降解酶的影响，苦荞芽苗中的多酚类活性成分在加工过程中稳定性会发生变化^[8]，导致芦丁等酚类物质降解和酶促褐变发生。为最大程度减少苦荞麦芽苗在加工过程中酚类等活性成分的损失，优化苦荞麦芽苗的干燥脱水技术具有重大意义。

1.1.2 苦荞麦芽苗营养特性

苦荞麦作为谷物谷类作物中唯一集七大营养素于一身的作物，含有 18 种天然氨基酸、多肽、生物类黄酮、微量元素、植物甾醇、类胡萝卜素和不饱和脂肪酸等，被誉为“五谷之王”^[9]。与其他谷物相比，苦荞富含多种营养成分，如：淀粉、蛋白质、维生素、纤维素和包括铁、锌和硒等在内的矿物质^[10]。苦荞全谷中的酚类主要有黄酮类和酚酸类化合物，其中芦丁为主要的黄酮类化合物。但在高温及遇水等条件下芦丁会转化为槲皮素，而酚酸类物质主要为原儿茶酸和对羟基苯甲酸，其中绿原酸只在苦荞壳和发芽后的苦荞中被检出。

种子和谷物中的许多营养和生物活性化合物在发芽过程中会发生变化。由苦荞种子发芽长成的苦荞麦芽苗具有较高含量的类黄酮含量，如芦丁，槲皮素，牡荆素和异

黄酮等^[11]。Shin 等^[3]研究发现苦荞麦芽芦丁和其他黄酮类化合物在 6000 lux 光照强度下含量增加, 黄酮类和多酚总含量和抗氧化活性在 10,000 lux 时最高。有研究表明, 苦荞种子经微波^[12]和光照/黑暗逆境等^[13]处理的芽苗中芦丁含量增加了 5-8 倍, 曝气处理中 GABA 含量可达 379.00 g/g DW^[14], 并在萌发 6d 龄的芽苗中检测出了芦丁、槲皮素、表儿茶素、山奈酚及芸香糖苷和槲皮素糖苷等多种活性物质, 且芽苗的抗氧化活性显著提高^[15]。苦荞芽可食部分的芦丁含量是根或果皮的 3~31 倍, 萌发过程中可食部分的自由基清除活性显著提高^[16]。

1.2.3 苦荞麦芽苗功能特性

苦荞本身就具有降血压、降血脂和降血糖的“三降效果”, 以及抗氧化、抗肿瘤、抗炎等多种功能作用^[17]。而与苦荞种子相比, 苦荞麦芽富含更为丰富的生物活性物质, 故此它们被投资在各种促进健康的益处上, 如: 血管抑制剂, 血管舒张剂, 抗菌剂, 抗氧化剂和抗高血压特性^[18]。近年来, 研究表明, 发酵荞麦芽的热水提取物对自发性高血压大鼠 (SHR) 具有抗高血压作用, 其剂量为 600 mg/kg/d^[19]。Karki 等^[20]发现苦荞麦芽提取物能抑制血清氧化, 具有螯合活性, 可以有效抑制脂多糖刺激 RAW264.7 细胞产生 IL-6 和 TNF- α , 阻止一氧化氮合酶, 环氧合酶-2 的表达, 具有抗氧化, 抗炎特性。Chen 等^[21]通过对高血脂小鼠喂食酵母发酵的苦荞麦芽, 发现可以改善血脂参数, 并呈剂量依赖性, 恢复肝脏的抗氧化水平。

我们课题组前期已经开展了大量的关于苦荞萌发富集黄酮等多酚活性物质相关调控机理研究, 表明微波处理能够显著上调 FtPAL、FtCHI、FtFLS2 的表达量而促进芽苗中多酚 (总黄酮、芦丁、绿原酸、牡荆素、二氢杨梅素、杨梅素和槲皮素) 的积累 (5d 龄芽苗总黄酮含量最高达 5.15 g/100g DW)^[22, 23]和提高抗氧化活性 (7 d 龄芽苗的总还原力为种子的 4.12 倍)^[24], 以及促进蛋白质的分解和氨基酸的合成提高蛋白质的体外消化率和生物活性^[25]。说明苦荞胚芽及微绿芽苗是天然的抗氧化来源, 具有良好的营养开发价值及功能作用, 是开发新型健康功能性食品的不二之选。

1.2 芽苗干燥预处理研究

干燥是最常见的食品保存形式, 这个过程提高了食品的稳定性, 因为它大大降低了产品的水和微生物活性, 并最大限度地减少了储存过程中的物理和化学变化^[26, 27]。一些研究发现, 干燥方式显著影响谷物芽苗的活性成分。晒干是自古以来果蔬干制的传统方法, 但存在产品污染变质的危险, 长时间的干燥是不可取的^[28]。后来人们为进

一步提高干燥品质，利用冷冻、太阳能、热风干燥机械等工业机器取代传统干燥。冷冻干燥是一种干燥方法可以提高产品干燥质量，但工艺昂贵、成本高限制其在工业上的发展^[29]。太阳能干燥器的主要缺点是太阳辐射时间有限，对比之下热风干燥器的速度快得多，是工业食品干燥必不可少的助力^[30]。

热风干燥具有干燥速率快，设备简单，适用范围广的特点。但热风干燥过程中高温的不利影响往往会导致热敏性生物活性化合物的破坏，导致产品复水能力低，色泽劣质^[31]。高温热风干燥会使小麦胚芽苗中叶绿素的含量下降 60%，其中 40℃热风干燥 8h 的小麦胚芽粉活性成分含量最高^[32]，30℃热风干燥的藜麦芽菜的抗氧化活性是 45℃和 60℃的两倍，但总黄酮与总酚的含量无显著性差异^[33]。而 70℃和 80℃热风干燥会导致绿豆芽褐变，芦丁和对香豆酸的含量降低而咖啡酸的含量提高^[34]。

预处理技术是提高干燥效率、提升食品品质、提高产品附加值的常用方法^[35]。为提高热风干燥的品质，我们常常对产品进行预处理，即通过物理、化学、生物等技术手段在干燥前对物料进行处理，从而起到加快物料干燥速率、提高外观和营养品质、延长货架期以及添加功能性成分的作用^[36]。

1.2.1 护色预处理

护色预处理常通过各种化学试剂（酸、碱等），以酶失活来防止颜色损失，提高产品的稳定性和质构改性^[30]。果蔬褐变的主要原因包括酶促褐变和非酶促褐变。酶促褐变反应迅速，是导致新鲜果蔬变色的主要原因。而酶促褐变的发生与植物中的 PPO（多酚氧化酶）和 POD（过氧化物酶）密切相关^[37]。常见氢氧化钾、氢氧化钠、碳酸钾、焦硫酸钾、柠檬酸和抗坏血酸等被广泛用于许多作物的预处理^[38]。Fan 等^[39]人研究发现 L-抗坏血酸、柠檬酸和 D-异抗坏血酸钠对南瓜粉颜色有保护作用，添加柠檬酸和 L-抗坏血酸可降低 pH 值，从而减少挤压过程中氨基酸与还原糖之间美拉德反应的发生，从而减少 2, 5-二甲基吡嗪和 2-乙酰吡咯的产生。另有研究发现，经 1%-2%柠檬酸处理可以提高黄花菜干制品中总黄酮和多酚的含量，且产品色泽较优^[40]，0.4%CaCl₂ 处理能够改善脱水绿豆芽的综合品质^[41]。众所周知，抗坏血酸和柠檬酸等有机酸是公认的食品级抗氧化剂，常用于果蔬的防变色剂和质地改良剂，被视为常用亚硫酸盐的新替代品^[42]。故此在常见果蔬干燥研究中常以它们作为保护剂进行预处理。

1.2.2 渗透预处理

渗透脱水（osmotic dehydration, OD）是指果蔬在特定渗透压溶液中发生传质，果

蔬的水分在渗透压差驱动下进入溶液，溶质则进入果蔬组织^[35]。渗透脱水是最简单，最便宜的工艺之一，不仅节能，而且资本投资低^[43]。物料经过适当渗透预处理后再进行干燥，可以降低能耗，提高产品质量，并缩短干燥时间^[44]。最常用的渗透剂是葡萄糖，盐，蔗糖，甘油，山梨糖醇，和低聚果糖等^[45]，其中盐主要用于蔬菜加工，可以有效阻碍氧化和非酶褐变，为传质提供驱动力，阻碍表面收缩^[46]。如：氯化钠可以有效保持果蔬的颜色、质地与风味，降低水分活度延长保质期^[47]。Tsamo 等^[48]研究发现，与蔗糖溶液相比，盐溶液中渗透脱水的洋葱和番茄样品的水分损失要高得多。这种行为是由于较小的盐分子通过细胞膜而产生在细胞质和液泡处的压力梯度更大，从而导致细胞流失更多的水分。Ghosh 等^[49]观察到胡萝卜经渗透脱水预处理后，再用热风干燥，与对照样品比较，可以获得较好色泽，外观和气味。

1.2.3 烫漂预处理

热烫漂广泛用于果蔬干燥前，主要目的是灭活与腐坏有关的酶，减少新鲜农产品微生物的负荷，从而提高产品的保持性，软化组织来促进干燥过程，并消除细胞内的空气防止氧化^[49]。热水烫漂是一种传统常见的前处理方法，将新鲜的产品浸入 70℃到 100℃的热水中，通过灭活酶，破坏微生物，改善细胞组织渗透性等改善干燥品质^[50]。Lavelli 等^[51]人研究发现，烫漂的胡萝卜与未烫漂的相比， α -胡萝卜素、 β -胡萝卜素和叶黄素的含量分别高出 51%、76%和 87%。此外，热水烫漂过程中，如：糖、蛋白质、碳水化合物、水溶性矿物质和维生素等可溶性营养物质的大量损失溶解或浸入烫漂水中的问题不可忽视^[42]。Badwaik 等^[52]还发现热水烫漂对产品的质地和微观结构有负面影响，加剧了可溶性营养物质的损失，甚至增加了干燥时间。目前，有关热水烫漂对苦荞麦芽苗的影响仍为一片空白，存在研究价值。

1.2.4 超声预处理

超声波是一种非热处理技术，在食品干燥工业中具有广泛的应用。超声工艺通常涉及使用高频超声波通过声流、空化、海绵效应和微观通道形成等反应进行材料崩解^[53, 54]。超声波的干燥机理是通过减少完成热处理所需的时间来提高食品质量属性的保存^[55]。当高功率超声波在进行食品干燥预处理时，会产生以下影响：

(1) 空化效应：超声波可以是食品内部产生气泡，并且在超声波的作用下，气泡会不断振动、生长并聚集能量，导致温度和压力急剧上升，当能量达到某个阈值时，空化气泡会急剧崩溃^[56]。食品中空泡的崩溃导致细胞膜的弱化和破坏，从而使产品易

于释放水分。此外，空化机制可以有效地消除高束缚水分子^[57]。

(2) 海绵机制：声波穿过新鲜的水果和蔬菜，会产生一种类似海绵的机械效应，包括对样品的循环挤压^[58]。由于海绵效应的有效性主要取决于加工食品的结构，因此具有薄的、柔软的、多孔的组织的新鲜食品比较厚的、密度更大的生物制品更有可能成功地受益于这种效应^[59]。我们也可以根据这一特点来分析该技术的适配性。

目前有关超声波在干燥中常以预处理方式来改善果蔬的微孔通道，有利于质量与热量的传导，缩短干燥过程^[60]。Jin 等^[61]人发现对苦瓜进行超声预处理，然后进行热风干燥和射频热风干燥，结果发现热风干燥和射频热风干燥的时间分别减少了 11.2%和 33.4%，此外还改善了抗坏血酸和酚类含量的保留，增强了苦瓜的复水率。此外还有研究发现，菠萝经过 40kHz 超声处理后，在 40℃ 和 70℃ 的热风干燥温度下，干燥时间分别减少了 55%和 42%^[62]。石榴皮在经过（24 kHz、10 min）超声处理，在 70℃ 干燥，降低了总酚与抗氧化剂的降解^[63]。对于超声波于苦荞芽苗粉的深加工应用还需更多实验经验进行验证，后续仍有很大发展空间。

1.2.5 环糊精预处理

环糊精（Cyclodextrins, CD）是由 6~12 个 D-吡喃葡萄糖基团通过 α -1, 4 糖苷键连接而形成的大环分子，在糖基转移酶的作用下产生的环状低聚糖的总称^[64]。环糊精包合物能有效提高不溶或难溶物质在水中的溶解性，降低挥发性成分的挥发，增加材料中客体物质的化学稳定性，目前已在食品行业广泛应用^[65]。 β -环糊精是一种改善食品质量的包合剂，可以通过提高低溶性营养品的溶解速率、膜通透性和生物利用度来显著改变包裹分子的物理、化学和生物学特性^[66]。此外， β -环糊精还可作为一种风味载体，还可以防止氧化、光诱导分解和热诱导变化^[67]。有研究发现 20%的麦芽糊精和 β -环糊精处理可以有效提高冷冻干燥黄豆芽的复水率和产品得率^[68]。可食的环状糊精喷洒于某些易氧化而引起变质的蔬菜、食品等表面可抵挡住光线对它们的氧化、分解作用而达到保鲜、保色、保味、延长存放时间的目的。但目前 β -环糊精多是应用在喷雾干燥中，而其在热风干燥中的效果鲜有研究。

1.3 芽苗产品加工现状

目前市场上的苦荞麦产品主要为全谷籽粒加工而成，黄酮和槲皮素及 γ -氨基丁酸（GABA）等活性物质含量较低，食疗效果有限，但萌发后的苦荞芽苗中多酚类物质数量剧增而营养更为丰富。基于苦荞胚芽和微绿芽苗菜丰富的营养价值和有趣的感官

特性，其可作为营养食品、功能食品的关键成分或协同作用的特定药物^[69]，进而成为新型健康食品或配料生产的一个优质来源^[70]。

在苦荞籽粒中，芦丁主要分布在胚乳中，而芦丁降解酶和槲皮素糖苷水解酶分布在种皮中，这种组织特异性阻止了芦丁的损失。但在加工中，RDE 和 GH 与芦丁相互接触，并在很大程度上随着水分的添加，芦丁迅速被水解成槲皮素和芸香糖^[71]。而且煮制和蒸制过程中黄酮含量会因为是否与水直接接触而表现出差异，总黄酮会溶于水而流失，并且在高温条件下发生水解、裂解等反应^[72]。有研究显示，苦荞粉与水接触 30 s 时已有 55.2% 的芦丁被分解，3 min 后下降趋于平缓，而槲皮素的含量与芦丁刚好相反，提示芦丁会向槲皮素转换。但蒸煮处理 40~60 min 后，芦丁含量又提高，推测芦丁被 RDE 水解为槲皮素的同时会逆向发生槲皮素向芦丁转换的逆反应^[73, 74]，可能槲皮素先发生 3-糖基化反应生成异槲皮素，异槲皮素再经鼠李糖基化反应生成芦丁，但这一推论尚未得到证实。可见加工过程苦荞麦芽苗的活性成分转变与损失是重要研究方向。

1.3.1 芽苗加工

近十年来，荞麦芽苗一直被认为是一种新的蔬菜，芽菜味道温和，气味诱人，因此被用作新鲜蔬菜、沙拉等^[75]。此外，人们常常将新鲜苦荞麦芽苗直接以蔬菜以鲜榨、发酵等方法开发功能产品。苦荞芽苗发酵饮料是以苦荞芽苗茶为原料，利用发酵菌进行风味发酵所得的健康风味饮品。李俊等^[25]采用植物乳杆菌发酵苦荞芽苗茶饮料，研究发酵前后营养、风味及抗氧化活性的变化规律，得到发酵后 DPPH 和 ABTS 自由基清除率均升高，乳酸菌发酵可以提高苦荞芽苗茶饮料的抗氧化活性。苦荞芽苗松饼相对苦荞松饼的必需氨基酸、GABA 的含量更高，降低升糖指数，改善苦味^[76]。而将发芽 88 h 后富含槲皮素和牡荆素等酚类化合物的苦荞芽苗制粉后制作无麸质饼干，能够显著提高产品中总酚和槲皮素的含量，且产品的抗氧化活性较高而 GI 值较低 ($P < 0.05$)^[77]。苦荞芽苗含有多种多酚类物质且含水量较高，研究苦荞麦芽苗再不同加工方式下多酚类等活性成分的变化及其改变机制，对于芽苗加工发展尤为重要。

1.3.2 微粒化加工

制粉是多数苦荞产品加工的初始步骤，也是芽苗开发产品的预处理关键步骤。微粒化加工的种类、方法和粒度均会影响苦荞粉中多酚组成和含量。粉末加工过程中的干燥和研磨条件极大地影响了生物材料的质量属性。它不仅意味着营养的变化，还意

味着物理、质地、感官和功能的变化^[78]。有研究表明，干法粉碎苦荞粉中芦丁和黄酮的含量均较高^[79]而湿法粉碎中槲皮素含量较高^[80]。超微粉碎处理的样品因其粒径的减小，与提取剂接触面积增大而表现出较强的抗氧化活性，但粒径太小也会导致抗氧化活性降低^[81]。张明等^[82]研究发现 100 目的大麦苗粉 DPPH 的清除率最高且达 84.71%，而 300 目和 500 目的苗粉适宜制备固体饮料或作为食品配料添加到其它食品中，100 目和 200 目粉体适则宜进行片剂、胶囊等剂型产品开发。但目前关于预处理及微粒化等稳定化技术对苦荞芽苗粉加工中色泽、成分等品质劣变和活性成分衰减机理的研究未见报道。

1.3.3 熟制加工

植物芽菜含有丰富的抗氧化剂被视为功能性食品^[83]。其中苦荞麦芽苗由于含有较高的芦丁、槲皮素等保健成分，被认为是生产功能性食品的新原料。似芽苗类的蔬菜常经过微波、蒸煮和煮沸等各种烹饪方法后食用。根据烹饪方法的不同，蔬菜的组织结构、酶活性和生物活性成分可能会发生变化，从而影响其颜色、抗氧化活性和风味成分。Zhang 等^[84]研究表明，苦荞粉经过烘烤、蒸煮、煮沸和微波等不同热处理后，其总酚类物质、类黄酮含量和抗氧化活性均有所下降。研究表明，95℃热水制备的苦荞面团^[85]和高压处理制备的荞麦粉挂面^[86]均能很好的保存芦丁的含量。在苦荞蒸汽处理过程中，可能由于芦丁合成的反催化作用，使得芦丁含量增加^[87]。但是常见热加工会导致植物芽苗中活性成分的损失和品质劣变。而适当的稳态化处理能够提高加工后的芽苗的色泽、品质，并且提高其生物活性物质的保留。有关于保护剂处理对苦荞芽苗加工中多酚类物质的降解及提高其生物活性功能和改善芽苗粉的综合品质的研究需要进一步探究。

1.4 苦荞麦芽苗低 GI 食品开发研究

1.4.1 低 GI 食品发展趋势

个体的血糖反应因食物来源而异。为了明确食物对餐后血糖的影响，引入了血糖指数的概念，作为食物的血糖升高潜力的分类依据。有研究表明，食用低 GI（Glycemic index, GI）食物可最大限度地减少血糖波动，并有助于预防和管理糖尿病和糖尿病前期^[88]。众所周知，相比之下，药物治疗的费用和副作用促使人们探索食物疗法食物疗法可以显著降低健康风险，帮助控制高血压，减轻饮食负担^[89]。GI 强调了

饮食在维持健康和降低疾病风险方面的巨大潜力，这是影响血糖水平和碳水化合物消化的关键标志物^[90]。故此，低 GI 食品的开发符合当下人们健康饮食的生活方式，是目前的研究热点。任何食品的 GI 值都可以通过采用体内^[91]和体外方法^[92]来确定。本研究主要就是以体外消化模型预估血糖生成指数，故而称之为估计血糖生成指数（Expected glycemic index, eGI），由于技术成本的原因，本文将采用 eGI 值来代替 GI 值。

1.4.2 低 GI 食品研究现状

近几年我国糖尿病的发病率呈明显上升趋势，使人们逐渐关注到食品在控制糖分方面的作用。目前，中国食品发酵工业研究院食品研发部已建立全球认证的 GI 测试实验室，并成功研制出添加了燕麦纤维、菊粉或大豆低聚糖等功能性糖的特膳米产品。部门还进行了相关的动物试验，结果显示该产品能有效控制餐后血糖水平^[93]。T2DM 患者的主要特征是餐后胰岛素峰值延迟、分泌峰值降低，血糖上升过快，而低 GI 饮食有利于改善餐后血糖和胰岛素反应，从而降低糖尿和其他心脏代谢疾病的风险^[94]。食品的 eGI 与其所含有营养组分含量具有相关性，其中共挤压粉中蛋白质、膳食纤维、直链淀粉、抗性淀粉、脂肪/淀粉含量与 eGI 呈负相关^[95]。高婷婷^[96]等人通过双螺杆挤压技术，将玉米粉与苡麦、菊芋等辅助材料按比例混合制作出低 GI 高膳食纤维谷物再制米。李丹青等^[97]发现猪血粉添加量 7.5%，谷朊粉添加量 5%，黄原胶添加量 1%，荞麦粉添加量 30%，加水量为 38%，通过血糖指数试验测得复合苦荞面条的血糖指数 GI 为 45.4 ± 3.8 ，属于低 GI 食品。近年来，随着我国荞麦产量的提高，越来越多的荞麦低 GI 类食品涌入市场，但由于苦荞麦芽苗的口感不佳，在实际应用中受到一定程度的限制^[98]。那么如何在低 GI 食品市场将其很好地利用是目前研究的重点。

1.4.3 苦荞麦芽苗低 GI 食品开发

苦荞麦芽苗是一种新型的蔬菜类食材，除了直接以蔬菜的形式食用外，还可作为原材料，加工成其他新型的食品，由于此类食品一般都是以苦荞麦芽苗自身丰富的植物活性营养成分和高抗氧化能力为出发点，故加工所得的产品常具有高营养、降“三高”、抗氧化、抗衰老等保健功能^[78, 99]。吴昆明等^[100]研究表明，干燥方式对苦荞芽中的芦丁、槲皮素及绿原酸含量均具有显著性影响，冷冻干燥苦荞芽样品总黄酮及多酚含量显著高于其它干燥方式，且具有较强的抗氧化性，经 60℃热风干燥制得苦荞芽苗粉具有很好的降低 D-半乳糖氧化损伤模型鼠的血清中的 MDA 含量及提高 GSH-PX 及 SOD 活性^[100]。由此可以苦荞麦芽苗粉具有较好的降血糖特性。故此可用苦荞麦芽苗进

行低 GI 食品的开发。

1.5 课题研究内容及目的意义

1.5.1 研究内容

(1) 研究预处理(0.3%柠檬酸溶液浸泡 5 min, 3%NaCl 浸泡 30 min, 90℃烫漂 40 s, 1.5% β -环糊精溶液浸泡 30 s, 及超声(150 W, 40 Hz)处理 30 min)结合热风干燥(50℃、60℃和 70℃)对苦荞麦芽苗干燥曲线、色泽, 复水性及物理特性的影响。

(2) 研究预处理结合热风干燥对苦荞麦芽苗营养成分及抗氧化能力的影响并讨论各个成分之间的相关性, 并进行聚类分析, 筛选出活性成分含量较高、抗氧化能力较强的苦荞麦芽苗粉加工工艺。

(3) 根据前期数据比较, 在热风 60℃条件下, 不同预处理组的干燥品质, 活性成分保留较高。故在热风 60℃条件下, 研究不同预处理结合热风干燥对苦荞麦芽苗体外消化及 β -环糊精包合结构分析。

(4) 根据前文所选出的最佳苦荞麦芽苗粉与面粉比例混合, 并添加适量的燕麦 β -葡聚糖和谷朊粉, 辅助制作低 GI 苦荞麦芽苗粉馒头。研究低 GI 苦荞麦芽苗粉馒头的工艺配方

1.5.2 研究方法

本课题以苦荞芽苗为研究对象, 通过利用柠檬酸, 氯化钠, 烫漂, 超声, β -环糊精进行干燥预处理。研究预处理结合热风干燥对苦荞麦芽苗干燥品质的影响, 期望减少苦荞芽苗热风干燥过程中黄酮, 总酚等生物活性成分的损失, 提高抗氧化能力及开发可降低食品 GI 值的苦荞麦芽苗粉。此外还对 β -环糊精的包合机制进行探索。总结出, 不同预处理对苦荞芽苗热风干燥特性, 物理特性, 总黄酮, 总酚等指标的影响。观察预处理结合热风干燥制备的苦荞芽苗粉的体外消化特性, 并研究芽苗粉的添加对馒头体外淀粉消化的影响。以 eGI 值为衡量指标, 进行响应面优化试验以期望得到低 GI 苦荞麦芽苗粉馒头, 为低 GI 食品的开发提供一定的参考。

1.5.3 研究的目的及意义

杂粮芽苗已成为近年来新兴起的一种健康食品原料。开发苦荞芽苗类健康食品及相关功能性产品具有十分广阔产业价值和应用前景。但目前对于苦荞芽及幼苗的研究, 主要是集中在活性物质的富集, PAL 的酶活性及基因表达调节等方面, 而对芽苗

加工过程中多酚物质保留的稳定化技术的研究较少，特别是如何调控苦荞等杂粮芽苗的加工与多酚类物质的降解条件，减少黄酮等多酚物类产物降解和保持稳定缺乏研究报道。本研究采用不同预处理结合热风干燥降低芽苗水分及微生物活性。实现减少多酚类物质的损失，以提升苦荞芽苗粉的抗氧化能力，以此生产富含多酚的功能性苦荞芽苗粉类食品，使之成为苦荞麦芽苗等蔬菜精深加工的有效途径。

苦荞麦芽苗因其所含有丰富的黄酮类化合物，研究价值巨大，其保护心脑血管，消炎杀菌，抗病毒，净化血液等功能作用更是引起人们产生浓厚的研究兴趣，深加工产品的开发更是也符合当今世界人们由温饱饮食向保健饮食过渡的追求。但目前，国内外对苦荞产品的开发主要集中于苦荞籽粒，相关产品形式多样，对苦荞萌发后的芽苗研究却较少。苦荞芽苗菜作为一种符合人们追求“健康，绿色”食品要求的蔬菜，其深加工的研究进展意义深远，不仅促进我国食品深加工行业的技术进步发展，同时也是为荞麦芽在食品工业中的合理加工利用提供了有益的信息，为广大的消费者们提供更多的选择，丰富生活。

第二章 预处理结合热风对苦荞麦芽苗干燥及物理特性的影响

2.1 引言

作为保健品的原料，苦荞麦芽苗被列入《中华人民共和国新资源食品目录》^[101]。多酚类化合物（黄酮类和蒽醌类）是苦荞麦芽苗的主要活性成分，具有抗氧化、抗肿瘤、抗高血压和抗炎症等功能^[102]。目前苦荞麦芽苗常被人们用来鲜食利用，而有关苦荞麦芽苗脱水干燥保存的研究较少^[100]。干燥作为最常见的食品保存形式，可以有效提高食品的稳定性，并降低水和微生物活性，最大程度地减少食品贮存过程中物理和化学变化^[27]。但对于类似苦荞麦芽苗这样的蔬菜，在干制加工过程中，常存在能耗高，时间长，营养成分损失严重等问题^[36]。

热风干燥相较于其他干燥方法，具有热风干燥具有干燥速率快，设备简单，适用范围广的特点。但热风干燥过程中高温的不利影响往往会导致热敏性生物活性化合物的破坏，导致产品复水能力低，色泽劣质^[31]。有研究表明，黄花菜在经过 1%-2%柠檬酸预处理干燥后总黄酮和多酚的含量损失减少，且产品色泽较优^[40]；胡萝卜经过渗透脱水可以有限缩短干燥过程，减少营养成分损失^[49]；苦瓜在超声处理后进行热风干燥，干燥时间减少，复水性增强^[61]。预处理技术是提高干燥效率、提升食品品质、提高产品附加值的常用方法^[35]。为提高芽苗的热风干燥品质，我们准备探究预处理方法对苦荞麦芽苗热风干燥品质的影响，以期缓解芽苗干燥过程中品质劣变。

本章研究预处理（柠檬酸、氯化钠、烫漂、超声波和 β -环糊精）结合不同温度（50℃、60℃和 70℃）热风干燥对苦荞麦芽苗干燥特性的影响。并粉碎制得苦荞麦芽苗粉，分析芽苗粉的色泽、休止角、滑动角、堆积密度、持水性和持油性等物理特性，从而评价不同处理方案下所得苦荞麦芽苗粉的品质。

2.2 材料与设备

2.2.1 实验材料

苦荞种子：川荞二号，产自四川凉山，购买后置于-20℃冰箱贮存备用。

2.2.2 实验试剂

表 2-1 实验试剂
Table 2-1 Experimental reagent

试剂名称	规格	厂家
NaCl	AR	国药集团化学试剂有限公司
柠檬酸	AR	国药集团化学试剂有限公司
β -环糊精	AR	国药集团化学试剂有限公司
高锰酸钾	AR	国药集团化学试剂有限公司

2.2.3 实验设备

表 2-2 实验设备
Table 2-2 Experimental instruments and equipment

设备名称	型号	厂家
光照培养箱	YGR-150	上海合恒仪器设备有限公司
电子天平	JY1002	上海精密科学仪器有限公司
精密型手持色差仪	HP-C210	上海米远电气有限公司
热风干燥箱	DHG-9035 (A)	上海东麓仪器设备有限公司
医用离心机	TGL-16A	长沙平凡仪器仪表有限公司
磁力搅拌机	Feb-85	金坛市杰瑞尔电器有限公司
液晶超声波清洗器	LGJ-10	北京松原华兴科技有限公司

2.3 实验方法

2.3.1 苦荞麦芽苗的培育

种子预处理：筛选颗粒饱满的苦荞种子，用蒸馏水冲洗掉最上层漂浮的坏种子。并用 1 g/L 的高锰酸钾溶液浸泡 5 min，消毒。后用蒸馏水洗至澄清状态。在 25℃ 水浴中浸泡 4 h，每 2 h 换一次。最后将种子于 55℃ 恒温水浴 15 min，进行热激处理。

种子发芽：将处理过的苦荞麦种子均匀放置于育苗盘上。置于人工培养箱中在 25℃ 下避光培养，湿度为 85%，两天后见光，每天光照 12 h，定时 12 h 换一次水。培育 10 d，开始收苗备用。将收取的苦荞麦芽苗进行清洗，甩干明水，放入 4℃ 冰箱中，保存备用。

2.3.2 苦荞麦芽苗预处理

根据前期预实验探索结果，确定苦荞麦芽苗不同预处理条件如下：

表 2-3 热-风干燥预处理条件

Table 2-3 Hot air drying treatment conditions

预处理方法	操作方法	命名
对照 (Control check)	未经任何处理	CK
护色 (Color-protecting)	浸入盛有 0.3% 柠檬酸溶液中，料液比为 1: 20，常温浸泡 5 min 后沥出，擦干表面水分。	CP
渗透 (Osmosis)	浸入盛有 3%NaCl 溶液的烧杯中，浸没 30 min，料液比 1: 20，常温浸泡 30 min 后沥出，擦干表面水分。	OM
烫漂 (Blanching)	浸入盛有蒸馏水的烧杯中，料液比为 1: 20，在 85℃ 条件下烫漂 30 s 后沥出，并迅速用冷水冷却，擦干表面水分。	BC
β -环糊精 (β -cyclodextrin)	浸入盛有 1.5% β -环糊精溶液中，料液比 1: 20，常温浸泡 30 min 后沥出，擦干表面水分。	β -CD
超声 (Ultrasound)	浸入盛有蒸馏水的烧杯中，料液比为 1: 20，在 150 W，40 Hz，常温条件下处理 30 min 后沥出，擦干表面水分。	US

2.3.3 热风干燥方法

将经过预处理的苦荞麦芽苗（50 g），以 0.12 g/cm² 的载物量平铺到热风干燥网上，分别放置在温度已升至 50℃、60℃、70℃ 的热风干燥箱中，每隔 30 min 取出样品进行称量，干燥至恒重，即芽苗质量在 30 min 内变化为均值 $\pm$ 0.002 g。每种干燥重复三次。所得干燥样品粉碎过 80 目筛，备用。

2.3.4 干燥特性测定

2.2.7.1 干燥曲线

(1) 干基含水率，苦荞麦芽苗热风干燥过程中干基含水率按照 (2-1) 计算^[103]：

$$M_t = \frac{m_t - m_d}{m_d} \quad (2-1)$$

式中：M_t 是 t 时刻干基含水率，g/g；m_t 是 t 时刻样品的质量，g；m_d 是在 105℃ 干燥后的恒定质量，g。

(2) 干燥速率 (Drying Rate, DR) 表示物料脱水速度的快慢，其计算公式如式 (2-2) 所示^[31]：

$$DR = \frac{M_t - M_{t+\Delta t}}{M_0 - M_e} \quad (2-2)$$

式中： M_t 为物料 t 时刻干基含水率，g/g； $M_{t+\Delta t}$ 为物料 $t+\Delta t$ 时刻干基含水率，g/g； Δt 为相邻 2 次测量时间间隔，min。

2.2.7.2 复水比

称取适量的脱水苦荞麦芽苗于 500 mL 烧杯中，加入足量的沸水，塑料密封、在室温条件下放置 30 min 后沥出，用滤纸将芽苗表面的水分吸干，进行称重^[104]。复水比的计算公式如下：

$$\text{复水比} = m_2 / m_1 \quad (2-3)$$

式中： m_1 ， m_2 分别是吸水前后苦荞麦芽苗的质量，g。

2.2.7.3 色泽

利用色差仪进行色泽测定^[105]，依据 CIELAB 表色系统测定苦荞麦芽苗粉的明度值 L^* 、红绿值 a^* 、黄蓝值 b^* ，每个处理平行做 5 次。色彩饱和度 (C^*) 与色相 (h° -色相角)，根据以下公式计算：

$$C^* = \sqrt{a^{*2} + b^{*2}} \quad (2-4)$$

$$h^\circ = \arctan\left(\frac{a^*}{b^*}\right) + 180^\circ \quad (2-5)$$

2.3.5 物理特性测定

2.3.5.1 休止角和滑动角测定

休止角与滑动角参考李洁等和李素稳等人^[106, 107]的方法，并且稍作修改。称取 5 g 的芽苗粉，从玻璃漏斗上方倒入，垂直流下至玻璃板上，漏斗尾端与玻璃板之间的垂直距离为 2 cm。粉体流下形成圆锥，测量此圆锥表面与玻璃板的夹角即为粉体的休止角。每个样品重复测 3 次，取其平均值。计算公式如下：

$$\alpha = \arctan\left(\frac{H}{r}\right) \quad (2-6)$$

式中： α 为休止角，°； H 为圆锥粉体高度，cm； r 为圆锥体的半径，cm。

称取 5 g 粉体置于玻璃平板上，抬起平板一侧至粉末移动，测量此时玻璃板顶部与

水平面之间的垂直距离。计算公式如下：

$$\beta = \arcsin\left(\frac{H}{L}\right) \quad (2-7)$$

式中： β 为滑动角，°； H 为玻璃板顶部与水平面之间的垂直距离，cm； L 为粉末锥体的高度，cm。

2.3.5.2 堆积密度的测定

苦荞麦芽苗粉的堆积密度（ $\times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ）根据王崇队等人^[108]的方法。将芽苗粉装入量筒并测量体积。堆积密度按以下公式计算：

$$\text{堆积密度} = (m - m_1) / v_1 \quad (2-8)$$

式中： m 为粉末和量筒的总重量，g； m_1 为量筒的重量，g； v_1 为量筒的体积，mL。

2.3.5.3 持水性测定

持水性参照 Zhou 等人^[109]的方法，并且稍作修改。准确称取 0.5 g 的苦荞麦芽苗粉置于 10 mL 离心管内，加 9 mL 蒸馏水，室温（ 25 ± 1 ）°C 条件下振荡 30 min，立刻在 8000 r/min 条件下离心 15 min，弃上清液，称其质量。每个样品重复测 3 次，取其平均值。持水性（ $\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ ）计算公式如下：

$$\text{持水性} = \frac{m_2 - m_1 - m_0}{m_0} \quad (2-9)$$

式中： m_0 为芽苗粉的质量，g； m_1 为离心管的质量，g； m_2 为弃上清液后湿沉淀和离心管的质量，g。

2.3.5.4 持油性

持油性参照 Xiao 等人^[110]的方法，并且稍作修改。称取 0.5 g 苦荞麦芽苗粉置于 10 mL 离心管内，加 9 mL 食用油，室温（ 25 ± 1 ）°C 条件下振荡 30 min，立刻在 8000 r/min 条件下离心 15 min，弃上层油，称其质量。每个样品重复测 3 次，取其平均值。持油性（ $\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ ）计算公式如下：式中：

$$\text{持油性} = \frac{m_2 - m_1 - m_0}{m_0} \quad (2-10)$$

式中： m_0 为芽苗粉的质量，g； m_1 为离心管的质量，g； m_2 为弃上层食用油后湿沉淀和离心管的质量，g。

2.3.5.5 溶解性

参考王辉等^[111]的方法，并进行修改。称量 2.00 g 苦荞麦芽苗粉，记为 m_1 ，置于 50 mL 离心管中，加入 20 mL 蒸馏水，并在室温下振荡 30 min，使芽苗粉充分溶解。在离心机转速 8000 r/min 条件下，离心 10 min，取上清液，将其完全转入称量皿中，然后放入 105℃干燥箱中烘干至恒重，称重记为 m_2 。

$$\text{溶解度}(\%) = m_2 / m_1 \quad (2-11)$$

式中： m_1 为称取的苦荞麦芽苗粉的质量，g； m_2 为溶解干燥至恒重的质量，g。

2.3.6 数据统计与分析

每次试验进行 3 次重复，结果表示为平均值±标准差。在 SPSS 24.0 中利用 Tukey 进行显著性分析 ($P < 0.05$)。用 SigmaPlot 14.0, Origin 2021 进行绘图与分析。

2.4 结果与分析

2.4.1 预处理对苦荞麦芽苗热风干燥水分曲线的影响

如图 2-1 所示，为经过不同预处理的苦荞麦芽苗在不同热风干燥温度下的水分干燥曲线。可以看出，在 50℃、60℃、70℃热风温度条件下，预处理阶段除 OM 组外，所有处理组的含水量均有增加。芽苗在经过氯化钠渗透预处理后，细胞壁内外溶液浓度不同，发生交换，导致内部水分发生流失。预处理阶段，US 组样品含水量增加最多，这是由于超声导致芽苗的细胞组织被破坏，空隙增加，导致蒸馏水易于进入并填充在缝隙中^[112]。 β -CD 组的芽苗在进行预处理后也有较高的含水量，是因为 β -CD 本身就具有较高的持水性。可见不同的预处理对苦荞麦芽苗的影响效果不同，且作用机理也不一样。比较不同热风温度条件下，苦荞麦芽苗的水分含量变化，可以发现，随着热风干燥温度的增加，芽苗达到水分平衡的时间逐渐缩短。高温可以加快芽苗内部水分的迁移，导致水分子更快从芽苗内部迁移出去^[61]。

如图 2-1 (D) 所示，CK 组达到平衡水分含量的时间，在 50℃、60℃、70℃分别为 360 min、210 min、180 min。随着热风温度的增加，CK 组干燥时间逐渐缩短。在不同热风温度条件下，其中 OM、BC 与 US 组可以有效缩短干燥时间，且机理各不相同。 β -CD 与 CP 组对干燥时间的影响差异不显。

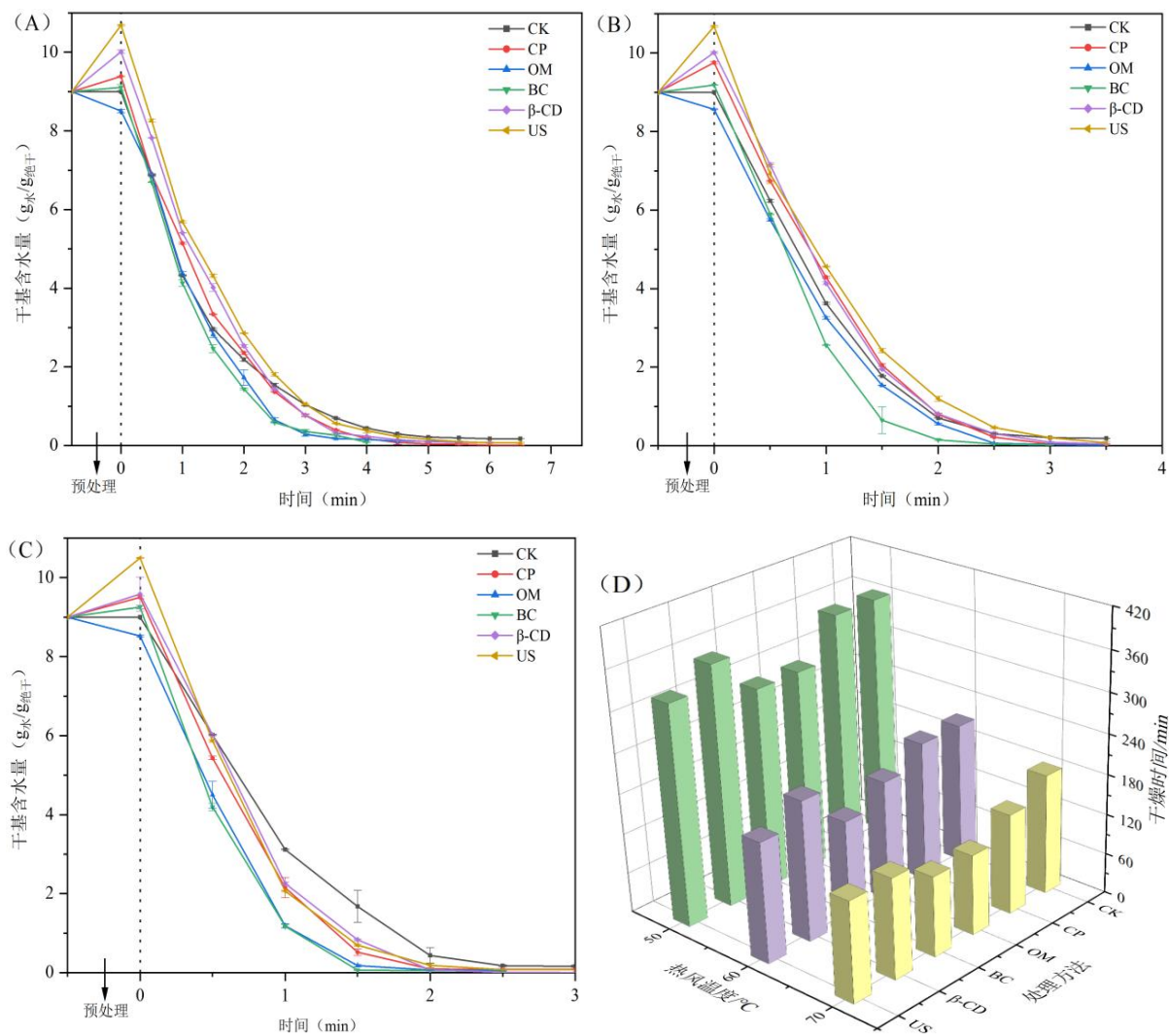


图 2-1 不同预处理下苦荞麦芽苗热风干燥水分曲线及干燥时间

注：（A）热风干燥温度：50℃；（B）热风干燥温度：60℃；（C）热风干燥温度：70℃；（D）：各处理组芽苗干燥时间。

Fig. 2-1 Hot air drying moisture curve and drying time of Tartary buckwheat sprouts under different pretreatment

Note: (A) hot air drying temperature: 50℃; (B) hot air drying temperature; 60℃, (C) hot air drying temperature: 70℃; (D): Drying time of the sprouts in each treatment group.

在相同热风干燥温度条件下，OM、BC 与 US 均可以有效减少芽苗的干燥时间，且与 50℃相比 60℃、70℃大幅下降。其中干燥时间最短的为热风 70℃下的 OM 与 BC 组为 120min，因为预处理过程中芽苗的组织结构遭到改变，使得水分更容易流失，促使芽苗可以更快达到干燥平衡。

2.4.2 预处理对苦荞麦芽苗热风干燥速率曲线的影响

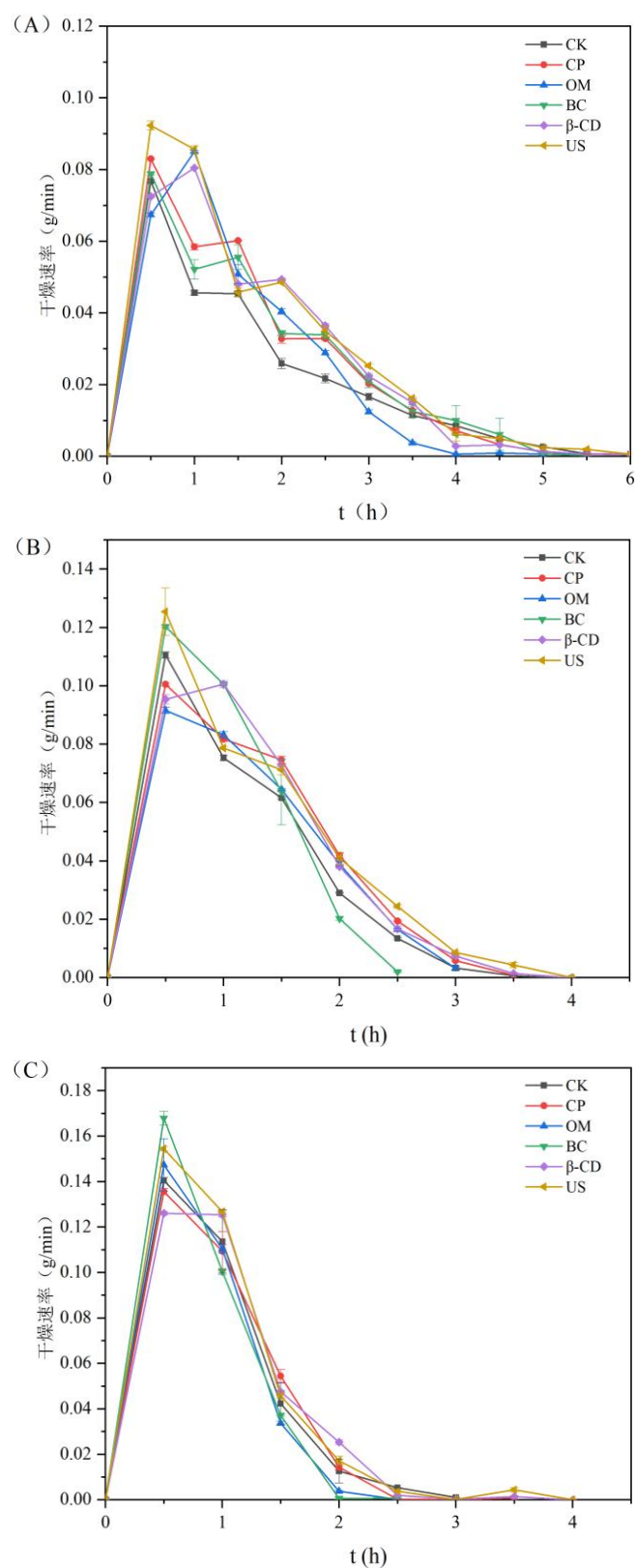


图 2-2 不同预处理下苦荞麦芽苗热风干燥速率曲线

注：（A）热风干燥温度：50°C，（B）热风干燥温度：60°C，（C）热风干燥温度：70°C。

Fig. 2-2 Hot air drying rate curve of Tartary buckwheat sprouts under different pretreatments

Note: (A) hot air drying temperature: 50°C, (B) hot air drying temperature: 60°C, (C) hot air drying temperature: 70°C.

不同热风温度下苦荞麦芽苗干燥速率如图 2-2 所示, 所有组别的芽苗干燥速率均随着干燥温度的升高而增加。所得结果与以往的研究一致^[113, 114], 高温可以加快水分的扩散, 促使芽苗内部的水分快速向表面迁移。在相同干燥温度条件下, US 与 BC 组苦荞麦芽苗的干燥速率明显高于 CK 组。超声处理可以在组织内形成微通道, 从而显著加快干燥速度。Liu 等^[112]和 Santos 等^[115]发现了类似的结果, 他们证明超声可以通过疏通样品的微通道从而促进水分的迁移, 增加干燥速率。此外, 烫漂增加干燥速率可能是因为, 组织在热烫过程中发生破坏可以导致水分容易迁移。而 OM 组干燥速率较低, 是因为水分扩散率的降低^[103]。

2.4.3 预处理结合热风干燥对苦荞麦芽苗色泽的影响

如表 2-4 是不同热风干燥方法下所得苦荞芽苗粉的色泽变化。随着热风温度的增加, 所有样品组的亮度值 (L^*) 均发生下降, BC 组则呈现先上升后下降的趋势。

表 2-4 苦荞麦芽苗色泽分析

Table 2-4 Color analysis of Tartary buckwheat sprouts

温度/°C	组别	L^*	a^*	b^*	C^*	h°
50	CK	64.67±0.77	5.73±0.60	17.97±0.26	18.87±0.42	72.37±1.52
	CP	66.05±0.55	4.44±0.60	18.71±0.84	19.24±0.77	76.65±2.03
	OM	63.64±0.61	4.51±0.44	17.77±0.97	18.34±0.83	75.73±2.03
	BC	58.03±0.70	9.35±0.64	11.23±0.30	14.62±0.53	50.26±1.83
	β -CD	66.00±0.88	3.92±0.36	17.48±0.03	17.92±0.10	77.39±1.12
	US	65.85±0.70	4.54±0.50	18.11±0.69	18.67±0.62	75.93±1.74
60	CK	62.53±0.14	6.43±0.88	17.64±0.32	18.79±0.16	70.00±2.80
	CP	65.48±0.88	5.60±0.57	17.95±0.38	18.81±0.19	72.68±2.00
	OM	65.39±0.81	5.83±0.47	19.06±0.08	19.94±0.09	73.04±1.33
	BC	60.02±2.31	10.18±1.33	12.21±0.85	15.95±0.23	50.26±5.59
	β -CD	65.78±1.09	5.63±0.62	18.30±0.38	19.15±0.41	72.95±1.80
	US	64.04±0.55	5.75±0.60	18.48±0.31	19.36±0.26	72.74±1.85
70	CK	59.61±1.25	10.44±0.79	17.06±0.17	20.01±0.36	58.58±2.06
	CP	62.23±1.01	8.09±0.56	17.81±0.33	19.56±0.46	65.61±1.35
	OM	59.78±0.62	11.69±0.51	16.65±0.61	20.35±0.24	54.94±2.15
	BC	56.41±1.11	14.61±0.61	10.62±0.75	18.08±0.26	36.02±2.95
	β -CD	61.52±0.82	9.97±0.84	17.28±0.49	19.97±0.32	60.04±2.62
	US	59.77±0.79	11.42±0.54	15.62±0.68	19.36±0.60	53.83±1.84

根据结果显示 50℃条件下, CP、 β -CD 和 US 组均可以提高苦荞麦芽苗的 L^* 值, 分别 66.00、66.05 和 65.85。为缓解样品的褐变。可能是 β -环糊精可以充当保护剂, 喷洒在蔬菜表面, 防止氧化褐变。而柠檬酸本身可以作为抗氧化剂, 防止样品干燥过程中的颜色变化。超声加快干燥速率, 减少样品暴露在热空气中的时间, 减少非酶褐变的发生^[116]。同时 a^* 较低, 表明在干燥过程中这三组的样品绿色损失较轻, BC 组 a^* 值最高, 是由于热烫过程会导致细胞破坏并释放出细胞质中的色素^[117]。颜色变化与失水、细胞结构崩解和营养物质降解有关^[118]。通过颜色饱和度 (C^*) 和色相角 (h°) 值监测苦荞麦芽苗加工过程中叶绿素色素的变化。相较于 CK 组, CP、OM、 β -CD 和 US 组 h° 明显增加, 说明绿色色调更强烈^[105]。

2.4.4 预处理结合热风干燥对苦荞麦芽苗复水性的影响

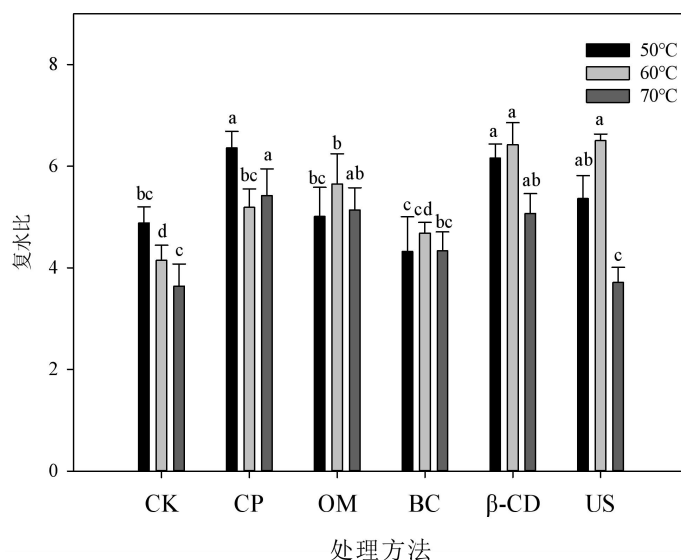


图 2-3 预处理结合热风干燥对苦荞麦芽苗复水性的影响

注: 不同小写字母表示相同干燥温度条件下不同处理组间差异显著 ($P < 0.05$), 下同

Fig. 2-3 Effect of pretreatment combined with hot air drying on rehydration of Tartary buckwheat sprouts

Note: Different lowercase letters indicate different treatment groups under the same drying temperature conditions ($P < 0.05$), the same below.

不同干燥方法对苦荞麦芽苗复水性的影响如图 2-2 所示。不同预处理的复水率随着干燥温度的升高而增加。随着热风干燥的温度增加, 对照组与柠檬酸组的复水特性逐渐降低。而其余各组则呈现先增加后降低的趋势, 在 60℃复水性最好。热风 60℃条件下, 与 CK 组相比, CP、OM、BC、 β -CD 与 US 组的芽苗复水特性分别提高 32.5%、40.3%、12.9%、70.9%和 56.7%。由此可知不同处理组均可改善苦荞芽苗的复水特性, 其中 β -环糊精效果最好。这可能是因为 β -环糊精本身的包合结构, 导致水分更容易被包

合吸收。而超声可以导致苦荞麦芽苗外部组织形成微孔，改善了复水过程中的吸水能力^[103]。此外，渗透过程，样品经过渗透压作用，细胞组织微通道发生改变，水分流通变易，故复水性得到改善^[119]。

2.4.5 预处理结合热风干燥对苦荞麦芽苗粉休止角和滑动角的影响

不同热风干燥处理下苦荞麦芽苗粉的休止角与滑动角如表 2-5 所示。休止角与滑动角能反映粉体的流动性，一般来说休止角与滑动角越小，则粉末的流动性越好^[120]。CK、US、 β -CD 和 CP 组苦荞麦芽苗粉的休止角随着热风干燥温度的增加，呈现先下降后降低的趋势，即 60℃ 下拥有较好的流动性。而相同温度条件下 BC 组样品的休止角最低，可能是样品在烫漂过程中组织被破坏，样品内营养损失严重，粘性较低^[120, 121]。而 US、 β -CD 和 OM 组的休止角较高可能就是因为组织研磨过程容易吸湿，导致样品流动性变差。滑动角与休止角的结果相似。BC 组最低，其余组相对于 CK 组均变高。同样的不同的处理组，随着热风温度的增加，其滑动角的变化规律也是不一样的。

表 2-5 预处理结合热风干燥对苦荞麦芽苗粉休止角和滑动角的影响

Table 2-5 Effects of pretreatment combined with hot air drying on resting Angle and sliding Angle of Tartary buckwheat sprout powder

	温度 /°C	组别					
		CK	CP	OM	BC	β -CD	US
休止角 /°	50	33.34±4.99	28.55±2.69	28.84±1.31	28.04±5.41	34.12±6.41	37.00±6.75
	60	27.00±3.69	26.43±1.43	28.74±2.55	26.14±2.28	27.12±1.47	28.16±2.08
	70	30.76±1.91	30.76±1.91	26.02±3.87	21.98±0.71	27.86±5.32	29.63±2.58
滑动角 /°	50	9.04±1.51	8.69±0.59	6.30±2.60	6.69±0.99	8.01±3.18	12.38±7.59
	60	7.85±2.09	8.56±4.17	10.24±0.77	7.58±4.33	8.31±2.90	9.91±3.26
	70	8.67±3.10	11.20±1.45	9.58±1.00	7.59±0.62	10.16±1.83	10.62±3.09

2.4.6 预处理结合热风干燥对苦荞麦芽苗粉持水性和持油性的影响

不同热风干燥方法下苦荞麦芽苗粉的持水力和持油力如表 2-6 所示。随着热风温度的增加苦荞麦芽苗粉持水性和持油性均呈现逐渐降低的趋势。可能是高温破坏细胞结构，细胞破损增加，造成其对水分子和油脂的束缚力减弱^[122]。相同温度条件下， β -CD 组持水性与持油性最高，分别为 7.63 和 6.23 g·g⁻¹。猜测应该是芽苗粉中存留的 β -环糊精本身就具有较高的持水与持油性，故此可以效对水分及食用油进行吸附。此外所有处理组相较于 CK 组均对于样品的持水性和持油性均有所改善。

表 2-6 预处理结合热风干燥对苦荞麦芽苗粉持水性和持油性的影响

Table 2-6 Effect of different hot air drying methods on water retention and oil retention of Tartary buckwheat sprout powder

	温度 /°C	组别					
		CK	CP	OM	BC	β -CD	US
持水性 /g·g ⁻¹	50	7.50±0.52	7.22±1.28	6.62±0.53	7.62±0.10	7.63±0.35	6.92±0.66
	60	5.72±0.63	6.14±1.67	6.07±0.24	6.16±0.32	7.02±1.01	6.67±0.69
	70	5.41±0.11	5.21±0.29	5.84±0.13	5.88±0.22	5.73±0.21	5.36±0.32
持油性 /g·g ⁻¹	50	5.41±0.11	5.21±0.29	5.84±0.13	5.88±0.22	6.23±0.21	5.36±0.32
	60	5.17±0.54	5.12±0.46	5.56±0.21	5.75±0.22	5.43±0.73	5.30±0.79
	70	4.26±0.93	4.51±0.38	4.68±0.17	4.75±0.35	4.89±0.44	4.30±0.27

2.4.7 预处理结合热风干燥对苦荞麦芽苗粉堆积密度的影响

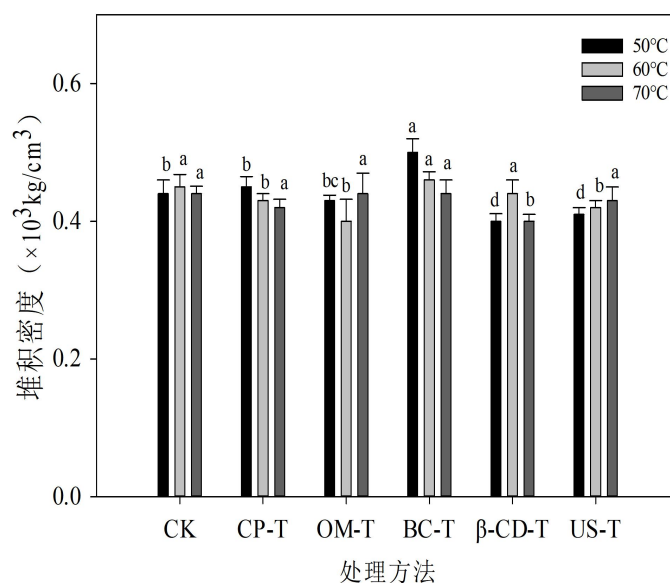


图 2-4 预处理结合热风干燥对苦荞麦芽苗粉堆积密度的影响

Fig. 2-4 Effect of pretreatment combined with hot air drying on the accumulation density of Tartary buckwheat sprout powder

堆积密度分析结果见图 2-4。结果说明，不同处理下的不同温度热风干燥堆积密度并不相同。这可能是不同热风干燥参数所引起的结构变化导致的^[123]。CK 组在随着热风干燥温度上升，其堆积密度先上升后下降。相同热风温度条件下，与 CK 组相比，BC 组可以提高芽苗粉的堆积密度，其中 50°C 条件下，BC 组的堆积密度最高为 $0.50 \times 10^3 \text{ kg/cm}^3$ 。可能是因为烫漂过程中样品细胞组织遭到破坏，组织在粉碎过程中存在不少大块组织碎片，故导致堆积具有更多的空隙。而 CP、OM、US 和 β -CD 组的

堆积密度发生下降。

2.4.8 预处理结合热风干燥对苦荞麦芽苗粉溶解度的影响

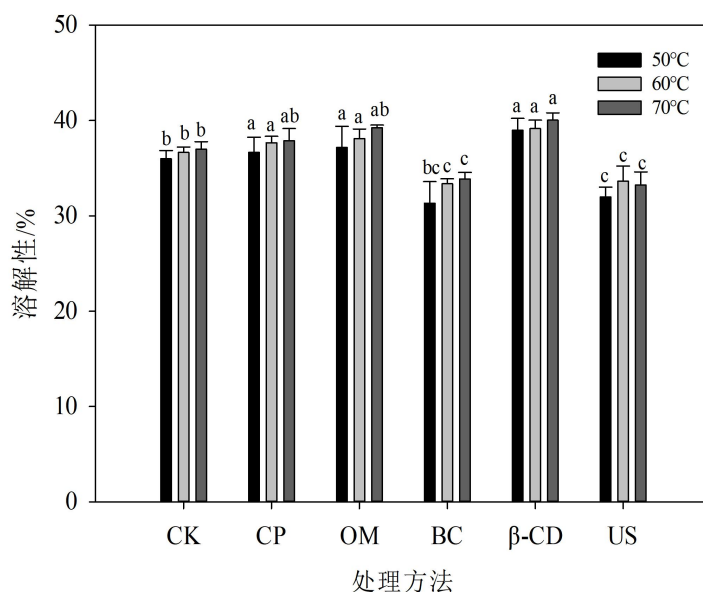


图 2-5 预处理结合热风干燥对苦荞麦芽苗粉溶解度的影响

Fig. 2-5 Effect of pretreatment combined with hot air drying on the solubility of Tartary buckwheat sprout powder

由图 2-5 所示为不同热风干燥方法对苦荞麦芽苗粉的溶解度的影响。除烫漂外，所有处理方法下的苦荞麦芽苗粉的溶解度都是随着热风温度的增加而逐渐增加的。其中 70°C 下的 US 组的溶解性最高为 40.05%。且与 CP 和 β-CD 组差异并不显著 ($P>0.05$)。与 CK 组相比，US、CP 与 β-CD 处理均可以提高样品的溶解性。超声可以有效粉碎样品内部组织结构导致其容易溶于水而 β-CD 可以对部分小分子物质进行包合从而提高其溶出，改善溶解性^[124]。而 BC 与 OM 组处理后则会导致苦荞麦芽苗粉的溶解度降低。可能是因为内部易溶性物质在预处理阶段发生更多的损失，故导致干燥后样品的可溶性物质减少，溶解度下降。

2.5 本章小节

本章研究采用柠檬酸、氯化钠、烫漂、β-环糊精和超声波等方法对苦荞麦芽苗进行预处理，并研究预处理后的芽苗在（50°C、60°C 和 70°C）热风干燥条件下其干燥特性的变化及所得苦荞麦芽苗粉物理性质的改变。结果表明，苦荞麦芽苗干燥至恒重的时间及干燥速率，均随着干燥温度的增加分别减少和加快。在相同热风干燥温度条件下，OM、US 和 BC 处理可以缩短芽苗干燥时间。BC 与 US 处理可以有效提高芽苗干

干燥速率。与 CK 组相比，CP、 β -CD 及 US 组可以提高 L^* 值，具有更强烈的绿色色调。热风 60℃ 条件下，与 CK 组相比，CP、OM、BC、 β -CD 与 US 的复水特性分别提高 32.5%、40.3%、12.9%、70.9% 和 56.7%。所有干燥温度条件下，BC 组苦荞麦芽苗粉的流动性较好。 β -CD 与 US 组持水与持油能力较强，且可以有效改善样品的溶解性。70℃ 下的 US 组的溶解性最高为 40.05%。由此可以发现不同预处理结合不同温度的热风干燥对苦荞麦芽苗粉的物理特性的影响是不同的。

第三章 预处理结合热风对苦荞麦芽苗活性成分及抗氧化能力的影响

3.1 引言

苦荞麦作为谷物谷类作物中唯一集七大营养素于一身的作物，含有 18 种天然氨基酸、多肽、生物类黄酮、微量元素、植物甾醇、类胡萝卜素和不饱和脂肪酸等，被誉为“五谷之王”^[9]。作为由发芽的苦荞麦种子形成的苦荞麦芽苗含有更为丰富的营养物质和生物活性化合物，如：黄酮类化合物和膳食纤维，其被人们当作为潜在的功能和健康蔬菜进行食用^[125]。萌发后的苦荞胚芽及芽苗的营养成分含量增加，氨基酸组成更为合理，黄酮、酚酸等多酚类功能活性成分的含量也显著增加^[4]。但人们通常直接食用新鲜苦荞麦芽苗，期望充分利用其营养价值。目前市面多是苦荞产品，反之苦荞麦芽苗的加工产品较为稀少，如：苦荞芽果味酵素^[126]，苦荞芽粉饮料^[127]等。可见目前大多是有关苦荞芽苗鲜榨复配或是直接以苦荞芽苗粉进行添加开发产品，而产品加工中间有关苦荞麦芽苗粉的加工工艺少有研究。为了保证果蔬的贮存，干燥脱水是最为常用的一种方法。但是干燥过程中活性营养物质的损失是不可避免的，减少损失，提高苦荞麦芽苗营养保留率，是一项十分有意义的研究工作。热风干燥作为目前市面上所用范围最广的一种干燥技术，其具有便捷，实惠等特点。为了改善芽苗干燥过程中活性物质的损失，我们准备采用不同的预处理方法来提高热风干燥工艺的收益

本章通过对不同预处理下苦荞麦芽苗热风干燥样品的总黄酮、总酚、可溶性蛋白、还原糖、纤维素、叶绿素、淀粉及抗氧化能力进行测定分析。研究不同预处理方法对苦荞麦芽苗热风干燥后各种营养成分及抗氧化能力的变化，并进行比较分析，得出活性营养成分损失最少，抗氧化能力最强的芽苗粉干燥工艺。

3.2 材料与设备

3.2.1 实验材料

苦荞麦芽苗：根据 2.3.1 节的芽苗培育方法所生产的芽苗作为原料。

3.2.2 实验试剂

表 3-1 实验试剂
Table 3-1 Experimental reagent

试剂名称	规格	厂家
蒽酮	AR	Sigma-Aldrich
硫脲	AR	Sigma-Aldrich
酒石酸钾钠	AR	Sigma-Aldrich
碳酸氢二钠	AR	Sigma-Aldrich
考马斯亮蓝	AR	天津市科密欧化学试剂有限公司
牛血清蛋白	A116563	阿拉丁
浓硫酸	AR	国药集团化学试剂有限公司
芦丁	AR	Sigma-Aldrich
福林酚溶液	AR	Sigma-Aldrich
碳酸钠	AR	国药集团化学试剂有限公司
没食子酸标准品	AR	Sigma-Aldrich
乙醇	AR	国药集团化学试剂有限公司

3.2.3 实验设备

表 3-2 实验设备
Table 3-2 Experimental instruments and equipment

设备名称	型号	厂家
光照培养箱	YGR-150	上海合恒仪器设备有限公司
电子天平	JY1002	上海精密科学仪器有限公司
精密型手持色差仪	HP-C210	上海米远电气有限公司
热风干燥箱	DHG-9035 (A)	上海东麓仪器设备有限公司
医用离心机	TGL-16A	长沙平凡仪器仪表有限公司
磁力搅拌机	Feb-85	金坛市杰瑞尔电器有限公司
可见分光光度计	L3S	上海棱光技术有限公司

3.3 实验方法

3.3.1 样品制备

样品预处理方法参考 2.3.2 节，并在热风干燥温度 60℃条件下进行干燥。

3.3.2 还原糖含量测定

采用 3, 5-二硝杨基水杨酸法^[128]测定还原糖。结果以每克苦荞芽中所含葡萄糖当量 (mg/g) 表示。

3.3.3 可溶性蛋白和淀粉含量测定

采用考马斯亮蓝染色法^[129]测定可溶性蛋白质含量。以牛血清白蛋白为标准蛋白做标准曲线。样品中以每克苦荞麦芽苗中所含葡萄糖当量 (mg/g) 表示测定样品。淀粉含量采用碘-淀粉比色法^[130]测定。

3.3.4 总黄酮、总酚含量测定

样品提取：称取 (0.200+0.005) g 苦荞芽苗粉，加入 5 mL 70% 乙醇溶液，用超声波清洗器在 60℃ 下超声提取 30 min，重复两次，然后在 8000 r/min 下离心 10 min，过滤备用。

总黄酮含量测定：利用亚硝酸钠-硝酸铝显色法^[22]，以芦丁标准品绘制标准曲线，总黄酮含量以结果以每克样品芦丁含量表示测定样品中总黄酮含量 (mg/g)。总酚含量测定：根据福林-酚比色法^[27]，以没食子酸标准品绘制标准曲线，结果以每克样品中没食子酸当量表示测定样品中总酚含量 (mg/g)。

3.3.5 叶绿素含量测定

根据 Diamante 等^[131]的方法，并进行一定修改。称取 0.2g 的苦荞麦芽苗粉，用 95% 乙醇浸提，取滤液，并以 95% 乙醇稀释一定倍数。在 665 nm、649 nm 处以 95% 乙醇为空白，测定吸光度值。按式 (3-1) - (3-3) 计算， c_a 、 c_b 、 c 分别是叶绿素 a、叶绿素 b 和总叶绿素的浓度，单位为 mg/L。植物组织叶绿素含量按式 3-4 计算。

$$c_a = 13.95A_{665} - 6.88A_{649} \quad (3-1)$$

$$c_b = 24.96A_{649} - 7.32A_{665} \quad (3-2)$$

$$c = c_a + c_b \quad (3-3)$$

$$\text{叶绿素含量(mg/g)} = (\text{浓度} \times \text{提取液体积} \times \text{稀释倍数}) / \text{样品干重} \quad (3-4)$$

3.3.6 纤维素含量测定

参考熊素敏等^[132]的方法测定纤维素含量，采用硫代硫酸钠滴定法（碘量法）对苦荞麦芽苗的纤维素含量进行测量。

3.3.7 DPPH 自由基清除能力测定

参考林钰虹等的方法^[133]，将 DPPH 自由基乙醇溶液（0.1 mM，4.5 mL）与样品中的 0.2 mL 的乙醇（70%，v/v）提取物混合。在 25℃ 下黑暗孵育 6 min 后，在 517 nm 处测定吸光度。以 0.2 mL，70%（v/v）乙醇和 3 mL，0.1 mM DPPH 自由基乙醇溶液作为空白对照。DPPH 自由基清除能力的计算公式如下：

$$\text{DPPH 自由基清除率}(\%) = \left(1 - \frac{\text{Abs}_{\text{样品}}}{\text{Abs}_{\text{空白}}} \right) \times 100 \quad (3-5)$$

3.3.8 ABTS 自由基清除能力测定

依据刘宇等^[134]的方法，混合等体积的 7 mM ABTS 原液和 2.45 mM 过硫酸钾溶液（12-16 h，黑暗，室温）。使用前，将 ABTS 储存的溶液用甲醇稀薄，在 734 nm 处的吸光度为 0.7 ± 0.02 。ABTS 测定，将 1.9 mL 稀释的 ABTS 溶液转移到 0.1 mL 芽苗提取物中，混合，在室温黑暗孵育 6 min 后，在 734 nm 处读取吸光度。将 0.1 mL 70%（v/v）乙醇与 1.9 mL ABTS 反应溶液混合制备空白对照。ABTS 自由基清除率的计算公式如下：

$$\text{ABTS 自由基清除率}(\%) = \left(1 - \frac{\text{Abs}_{\text{样品}}}{\text{Abs}_{\text{空白}}} \right) \times 100 \quad (3-6)$$

3.3.9 FRAP 铁离子还原力的测定

根据 Peng 等人^[135]实验方法，并进行一定修改。吸取 0.3 mL 样品稀释提取液和 2.7 mL 的 FRAP 试剂，混匀后 37℃ 水浴 40 min，在波长 595 nm 处测定其吸光度，蒸馏水调零。利用 Fe^{2+} 制作标准曲线。

3.3.10 数据统计与分析

每次试验进行 3 次重复，结果表示为平均值±标准差。在 SPSS 24.0 中利用 Tukey 进行显著性分析（ $P < 0.05$ ）。用 SigmaPlot 14.0，Origin 2021，chiplot 进行绘图与分析。

3.4 结果与分析

3.4.1 预处理结合热风干燥对苦荞麦芽苗纤维素和还原糖含量的影响

如图 3-1 为不同热风干燥方法下苦荞麦芽苗纤维素和还原糖含量的变化。苦荞麦芽苗的纤维素含量随着热风温度的增加先下降后上升。与 CK 组相比，相同温度条件下，各处理组的纤维素含量均显著高于对照组（ $P < 0.05$ ）。其中 70℃ 条件下纤维素含量较高

的为 US、OM 和 BC 组分别为 34.92%、32.58%和 33.98%，且三者之间差异并不显著。在干燥温度 70℃条件下，所有处理组的纤维素含量最高。猜测可能是高温条件下，芽苗干燥时间的缩短可以降低其内部纤维素的损失。

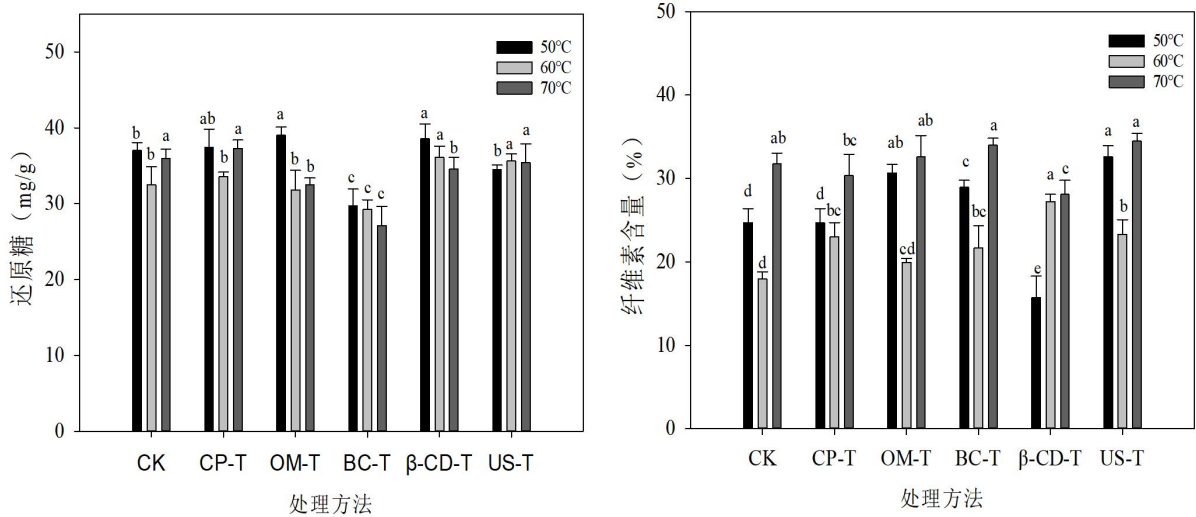


图 3-1 预处理结合热风干燥对苦荞麦芽苗纤维素和还原糖含量的影响

Fig. 3-1 Effect of pretreatment combined with hot air drying on the cellulose and reduced sugar content of Tartary buckwheat sprouts

对于还原糖来说，热风温度 50℃条件下，β-CD 和 OM 组还原糖较高分别为 38.55 和 39.03 mg/g，且两者之间无显著差异，且都比 CK 组要高 ($P<0.05$)。BC 组还原糖损失严重，烫漂过程中与热水的接触会导致还原糖发生水解、氧化等化学反应。同时还原糖还会与氮化合物的α-氨基酸发生美拉德反应，使苦荞麦芽苗色泽发生变化的同时造成还原糖含量的损失^[136]。

3.4.2 预处理结合热风干燥对苦荞麦芽苗可溶性蛋白和淀粉含量的影响

苦荞麦芽苗可溶性蛋白和淀粉含量的变化如图 3-2 所示。随着热风干燥温度的增加所有处理组的可溶性蛋白含量逐渐降低，BC 组除外。在 50℃条件下，β-CD 组可溶性蛋白含量最高为 15.16 mg/g，相比于 CK 组提高了 10.89%，且于 CP、OM 组之间无显著差异 ($P>0.05$)。BC 处理组可溶性蛋白损失最严重，可能是烫漂过程的高温条件，导致芽苗内部营养成分流失。对于芽苗内淀粉含量来说，干燥温度 50℃条件下，US 组含量最高为 45.86 mg/g，比对照组高 36.2%。在干燥温度 70℃条件下，BC 组淀粉含量最低为 17.20 mg/g。高温会导致带苦荞麦芽苗淀粉发生糊化，故此干燥的温度与时间也是影响苦荞麦芽苗淀粉含量的重要影响因素^[52]。

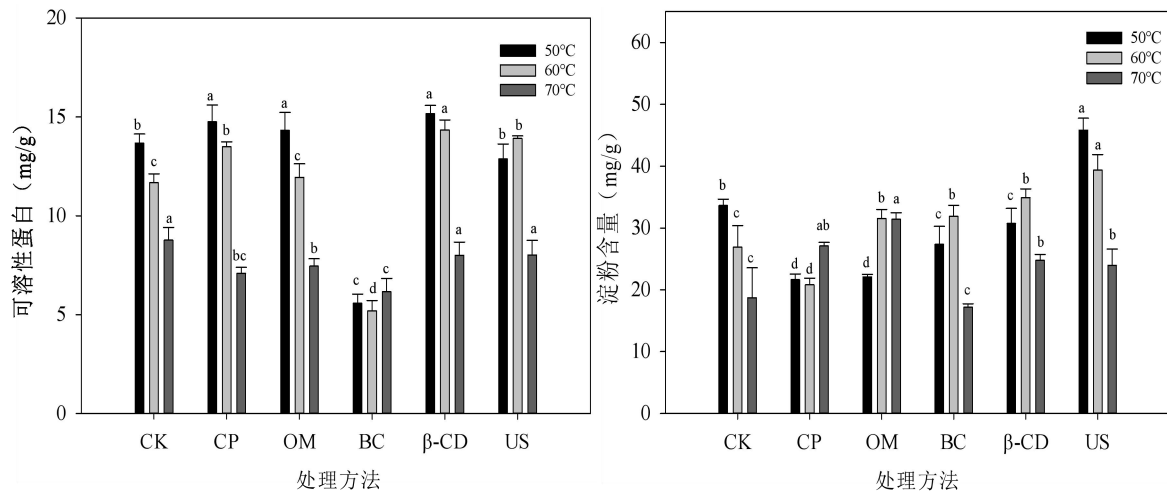


图 3-2 预处理结合热风干燥对苦荞麦芽苗可溶性蛋白和淀粉含量影响

Fig. 3-2 Effect of different hot air drying methods on soluble protein and starch content of Tartary buckwheat sprouts

3.4.3 预处理结合热风干燥对苦荞麦芽苗叶绿素含量的影响

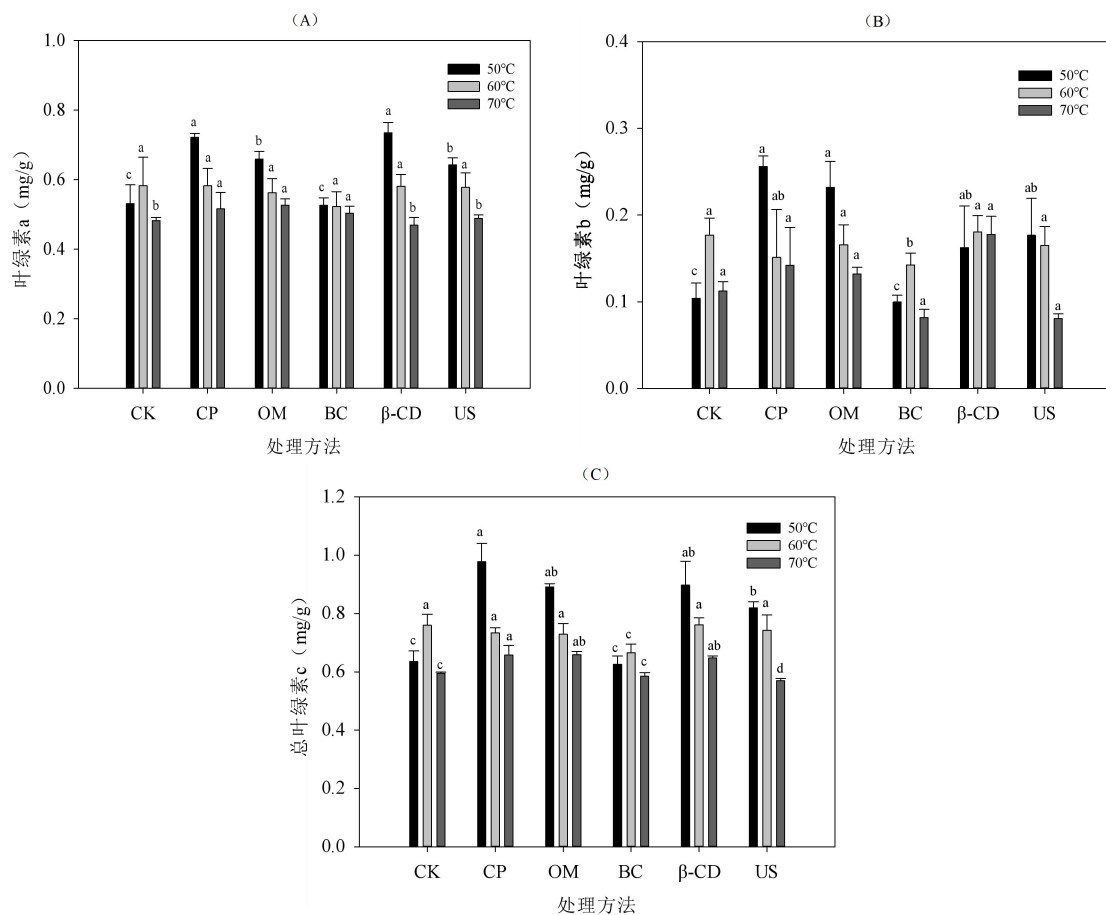


图 3-3 预处理结合热风干燥对苦荞麦芽苗叶绿素含量的影响

Fig. 3-3 Effect of different hot air drying methods on chlorophyll content of Tartary buckwheat sprouts

不同热风干燥方法对苦荞麦芽苗叶绿素含量的影响如图 3-3 所示。绿色植物体内的叶绿素很不稳定，容易通过光、热、酸、碱、氧气等分解成橄榄色的叶褐素和植绥螨

[137]。故此可以看到 70℃条件下，苦荞麦芽苗总叶绿素含量最低。在 50℃条件下， β -CD 组叶绿素 a 含量最高为 3.67 mg/g，比对照组高 37.4%；CP 组叶绿素 b 含量最高为 1.28 mg/g。CP 与 β -CD 组总叶绿素含量最高，之间无显著差别 ($P<0.05$)，且随着温度的增加逐渐减少。柠檬酸与 β -环糊精都具有充当保护剂，防止果蔬样品氧化的作用，故此可以有限减少叶绿素含量的损失。

3.4.4 预处理结合热风干燥对苦荞麦芽苗总黄酮和总酚含量的影响

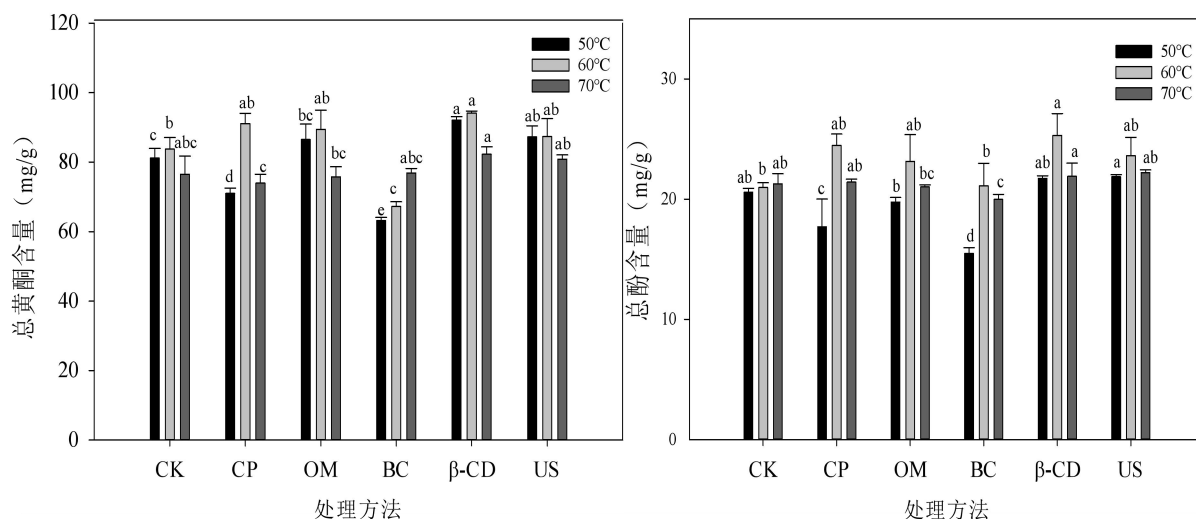


图 3-4 预处理结合热风干燥对苦荞麦芽苗总黄酮和总酚含量的影响

Fig. 3-4 Effect of different hot air drying methods on total flavonoid and total phenolic content of Tartary buckwheat sprouts

不同热风干燥方法对苦荞麦芽苗总黄酮和总酚含量的影响如图 3-3。随着温度的增加总黄酮与总酚含量先上升后增加。可知 60℃条件下，CP、OM、 β -CD 和 US 组总黄酮含量较高分别为 91.12 mg/g，89.44 mg/g，94.12 mg/g 和 87.34 mg/g，相比与 CK 组分别提高了 8.76%，6.76%，12.34%和 4.25%。BC 组总黄酮含量最小。烫漂热处理过程与水的接触，芦丁遇水在酶的作用下会转化为槲皮素，会导致类黄酮含量减少。对于总酚含量来说，60℃下， β -CD 组总酚含量最高为 21.90 mg/g。50℃条件下，BC 组总酚含量最少为 15.49 mg/g。根据试验结果，柠檬酸护色、氯化钠渗透、 β -环糊精处理及超声波处理均只可在一定程度上减少苦荞麦芽苗在热风干燥过程中活性成分的损失，其中 β -环糊精处理效果最好。

3.4.5 预处理结合热风干燥对苦荞麦芽苗 DPPH 自由基清除能力的影响

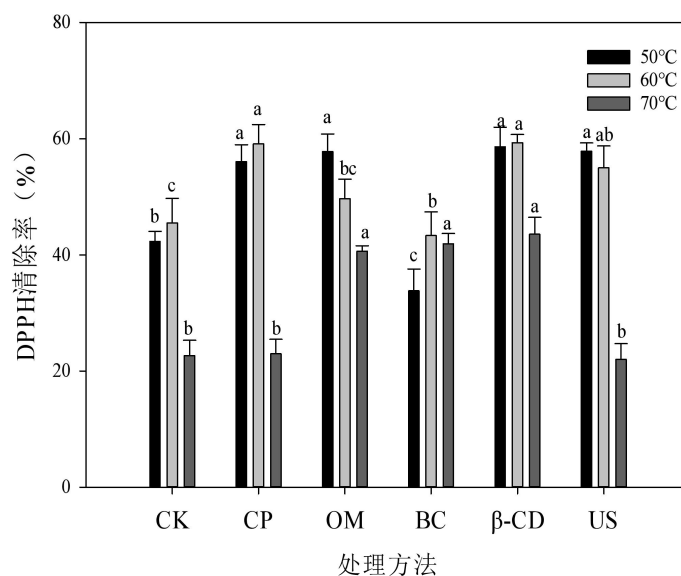


图 3-5 预处理结合热风干燥对苦荞麦芽苗 DPPH 自由基清除能力的影响

Fig. 3-5 Effect of different hot air drying methods on the scavenging ability of DPPH radicals in Tartary buckwheat sprouts

不同热风干燥方法条件下苦荞麦芽苗的 DPPH 自由基清除能力如图 3-5 所示。在 50°C 和 60°C 条件下，CP、OM、β-CD 和 US 组对比 CK 组均可以显著提高 DPPH 自由基清除能力 ($P < 0.05$)。而各预处理对苦荞麦芽苗热风干燥过程中作用原理是不同的，柠檬酸自身可以提高抗氧化效果，β-环糊精具有抗氧化的作用。而渗透与超声都是通过改善样品组织的微观通道，减少芽苗在干燥过程中发生非酶褐变的过程，减少干燥时间^[103]。其中 60°C 条件下，β-CD 组 DPPH 自由基清除率最高为 59.32%，且与 50°C 组差异不显著。70°C 条件下，OM、BC 与 β-CD 组可以有改善抗氧化能力。由此可知，不同处理组在不同热风干燥温度条件下其作用的效果也是不一样的，且热风干燥温度对苦荞麦芽苗的活性成分的影响更大。

3.4.6 预处理结合热风干燥对苦荞麦芽苗 ABTS 自由基清除能力的影响

不同热风干燥方法条件下苦荞麦芽苗的 ABTS 自由基清除能力如图 3-6 所示。从图中可以看出，BC 处理降低了苦荞麦芽苗的 ABTS 自由基清除能力。随着热风干燥温度的增加，CK 组的 ABTS 自由基清除能力逐渐降低，但差异并不显著 ($P > 0.05$)。在 50°C、60°C 热风温度条件下，CP、OM、β-CD 和 US 组均要高于 CK 组。

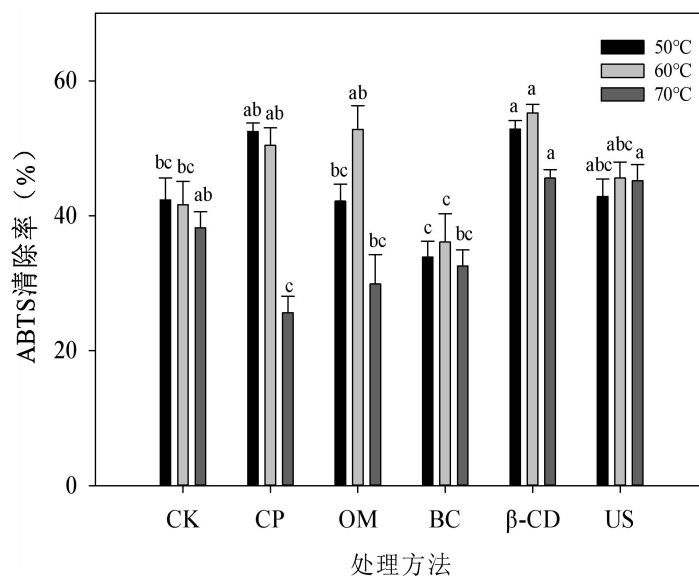


图 3-6 预处理结合热风干燥对苦荞麦芽 ABTS 自由基清除能力的影响

Fig. 3-6 Effect of different hot air drying methods on the scavenging ability of ABTS radicals in Tartary buckwheat sprouts

其中在热风干燥 60°C 条件下, β -CD 组 ABTS 自由基清除率最高为 55.23%。酚类等是水果和蔬菜抗氧化能力最重要的植物化学贡献^[138]。结合图 3-4 可见, 总黄酮、总酚含量与抗氧化之间存在很高的相关性。从整体来看热风干燥 60°C 条件下苦荞麦芽苗拥有较强的抗氧化能力。

3.4.7 预处理结合热风干燥对苦荞麦芽苗总还原力的影响

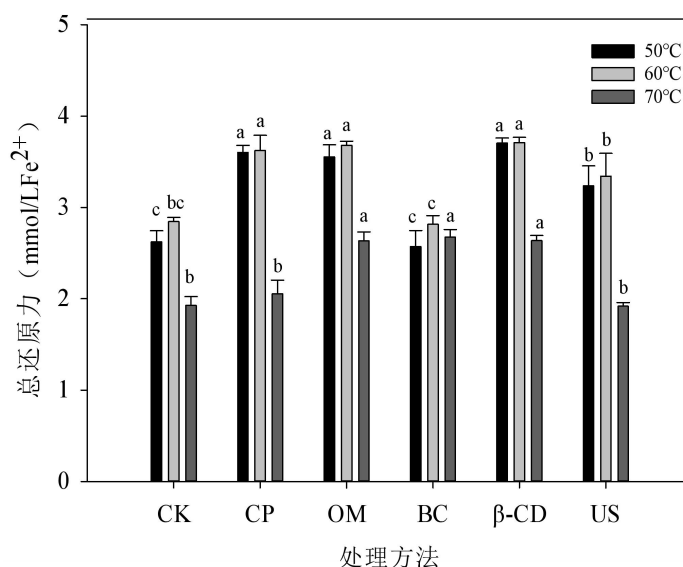


图 3-7 预处理结合热风干燥对苦荞麦芽总还原力的影响

Fig. 3-7 Effect of different hot air drying methods on the total reducing force of Tartary buckwheat sprouts

不同热风干燥方法条件下苦荞麦芽苗的总还原能力如图 3-7 所示。结果表明, 所有

处理组的总还原力随着热风温度增加,先上升后下降。各处理组在热风 50℃与 60℃下,总还原力差异不显著 ($P>0.05$)。与 CK 组相比、CP、OM、 β -CD 与 US 组均可以提高芽苗的总还原力。其中热风干燥 60℃条件下, β -CD 组的总还原力最高为 3.71 mmol/L Fe^{2+} 是 CK 组的 1.31 倍。且与 CP、OM 组之间差异不显著。由此可见,高温干燥会导致苦荞麦芽苗的抗氧化能力下降,与芽苗的总黄酮与总酚等成分存在高相关性。

3.4.8 聚类热图分析

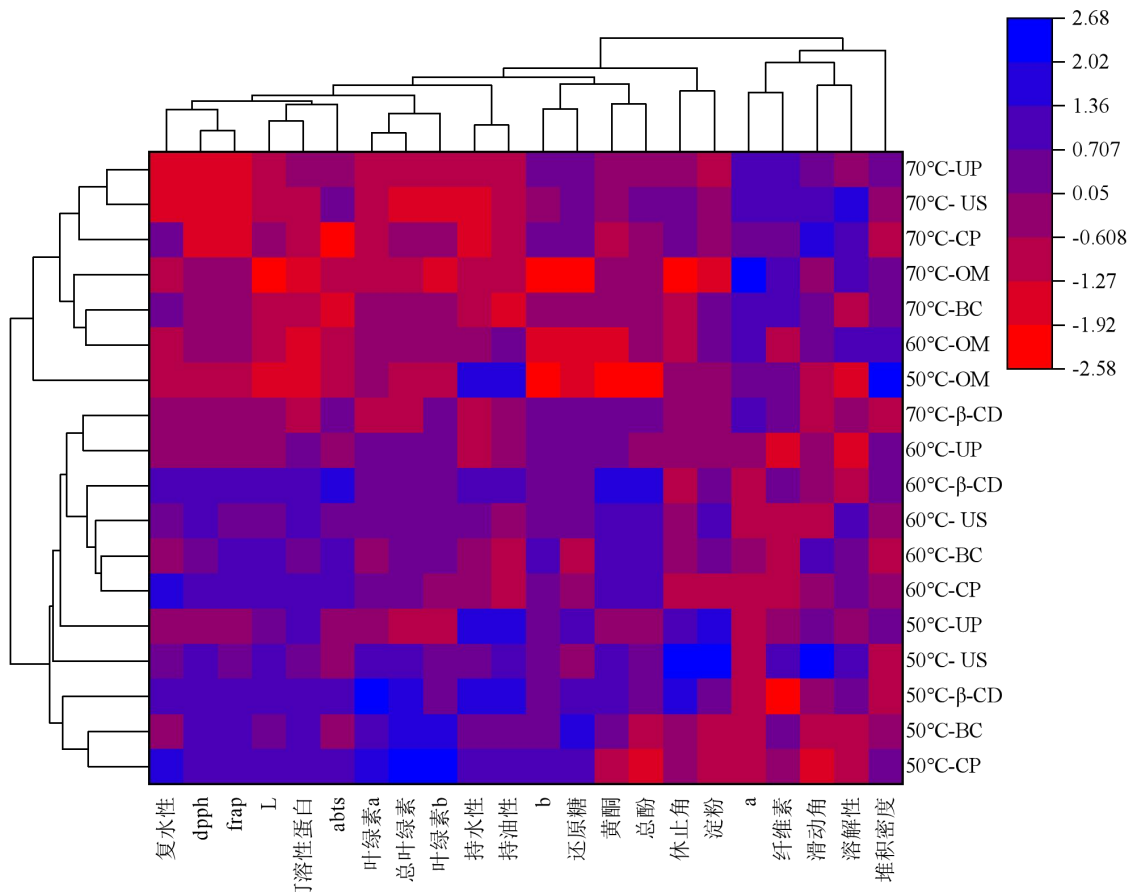


图 3-8 热图聚类分析图

Fig. 3-8 Heat map clustering analysis diagram

如图 3-8 所示为不同热风干燥方法下各项数据的热图聚类分析。由图中可以看各种热风干燥方法之间的差异分类及各种指标的表达相关。所有热风干燥方法可分为两类。第一类为热风干燥 70℃条件下 CP、OM、 β -CD、CK 和 US 及 50℃与 60℃下的 OM。第二类则是 70℃ β -CD 组、50℃与 60℃条件下预处理组。由此可知 50℃与 60℃具有相似的作用结果。且可见对于复水性、 L^* 、总黄酮、总酚及 ABTS、DPPH 和 FRAP 等抗氧化指标在热风干燥 60℃条件下含量表达较高。而淀粉与纤维素含量表达较低。

50℃条件下叶绿素、持水性、持油性等指标拥有较高的表达。故此可知在热风干燥60℃条件下苦荞苗芽苗的活性成分及抗氧化就有较高的优势， β -CD 组总黄酮、总酚含量最高。

3.5 本章小节

本章通过对不同预处理下苦荞麦芽苗热风干燥样品的总黄酮、总酚、可溶性蛋白、还原糖、纤维素、叶绿素和淀粉，并对抗氧化能力进行评估。研究经过不同预处理方法后对苦荞苗芽热风干燥后各种营养成分及抗氧化能力的影响，并结合第二章中的数据进行热图分析及主成分分析综合评价出各种不同热风干燥方式的优劣，并对于较好的干燥方式进行评价。结果发现，与 CK 组相比，相同温度条件下，各处理组的纤维素含量均显著高于对照组 ($P<0.05$)，BC 组还原糖损失严重。CP 与 β -CD 组总叶绿素含量最高，之间无显著差别 ($P<0.05$)。 β -CD 和 US 组总黄酮含量较高分别为 91.12 mg/g，89.44 mg/g，94.12 mg/g 和 87.34 mg/g，相比与 CK 组分别提高了 8.76%，6.76%，12.34%和 4.25%。 β -CD 组总酚含量最高为 21.90 mg/g。CP、OM、 β -CD 和 US 组对比 CK 组均可以显著提高 ABTS、DPPH 自由基清除能力，拥有较高的总抗氧化能力。由于本研究的目的是为了减少苦荞麦芽苗在热风干燥过程中活性成分及抗氧化能力的损失，故根据总黄酮、总酚及抗氧化能力的分析评定，及聚类热图分析、主成分分析结果来看。热风 60℃条件下苦荞麦芽的干燥品质较高，且相比较热风 50℃干燥时间更短，其中 β -CD 组活性物质保留率最高。故此，热风 60℃是苦荞麦芽苗较佳干燥温度。

第四章 预处理结合干燥对苦荞麦芽苗消化的影响及 β -CD/Rutin 包合物结构分析

4.1 引言

随着现代生活方式和饮食结构的改变，人们长时间久坐不动、能量消耗减少，这导致超重、肥胖患病率的增加，是糖尿病患病率攀升的重要因素^[139]。因此，人们在入场生活消费中也越来越倾向于低 GI 等具有独特功能特性的淀粉食品，健康功能饮食习惯也越来越符合当人的消费观念。

血糖生成指数（GI）指人体食用某种食物时血糖升高效应与食用等量葡萄糖血糖升高效应的比值^[140]，可以在一定程度上反应人们餐后血糖的波动程度。现如今低 GI 食品深入人心，而苦荞麦芽苗富含丰富的生物活性分子，具有降血糖，降血脂^[141, 142]等功效，是制作低 GI 食品的有效原材料。故此，低 GI 食品的开发符合当下人们健康饮食的生活方式，是目前的研究热点。任何食品的 GI 值都可以通过采用体内^[91]和体外方法^[92]来确定。本研究主要就是以体外消化模型预估血糖生成指数，故而称之为估计血糖生成指数（eGI），用 eGI 值来代替 GI 值。

本章根据前文分析，选择苦荞麦芽苗活性成分保留较高的干燥温度 60℃为干燥条件，并研究不同预处理下苦荞麦芽苗经过干燥后，对其进行体外模拟口腔、胃肠消化。探索消化过程中苦荞麦芽苗粉活性成分及抗氧化能力的变化。并对制成苦荞芽粉馒头进行体外淀粉消化，评估 eGI。同时通过以芦丁与 β -环糊精结合进行表征来分析其包合结构变化。

4.2 材料与设备

4.2.1 实验材料

苦荞麦芽苗：根据 2.3.1 节的芽苗培育方法所生产的芽苗作为原料。

4.2.2 实验试剂

表 4-1 实验试剂
Table 4-1 Experimental reagent

试剂名称	规格	厂家
过硫酸钾	AR	Sigma-Aldrich
ABTS	AR	国药集团化学试剂有限公司
DPPH	AR	国药集团化学试剂有限公司
6-羧基-2, 5, 7, 8-四甲基色烷-2-羧酸	AR	Aladdin-阿拉丁试剂（上海）有限公司
α -淀粉酶	A3176	Sigma-Aldrich
胃蛋白酶	P7000	Sigma-Aldrich
盐酸	AR	国药集团化学试剂有限公司
碳酸氢钠	AR	Sigma-Aldrich
胰蛋白酶	AR	Sigma-Aldrich
氯化钾	AR	国药集团化学试剂有限公司
氯化钙	AR	国药集团化学试剂有限公司
芦丁	95%	Sigma-Aldrich

4.2.3 实验设备

表 4-2 实验设备
Table 4-2 Experimental instruments and equipment

设备名称	型号	厂家
PH 计	PHS-3CB	上海元析仪器有限公司
水浴恒温振荡器	AHA-CA	金坛市杰瑞尔电器有限公司
X 射线（粉末）衍射仪	D8	德国布鲁克
傅里叶变换红外光谱仪	IRPrestige-21	日本岛津有限公司
自动差热热重同时测定装置	DSC-60A	日本岛津有限公司

其他设备同 3.2.2 节。

4.3 实验方法

4.3.1 样品制备

芽苗预处理方法：参考 2.2.5 节。根据前面的试验可见，不同热风干燥温度条件下，各组预处理 60℃条件下的芽苗具有较好的进行干燥。故干燥条件选择热风 60℃。

4.3.2 总黄酮、总酚含量测定

苦荞麦芽苗粉体外消化过程中，总黄酮与总酚的测量方法同 3.2.7 节。

4.3.3 抗氧化能力的测定

苦荞麦芽苗粉体外消化过程中，DPPH 自由基清除率、ABTS 自由基清除率和 FRAP 总还原力的测定方法分别同 3.2.10、3.2.11、3.2.12 节。同时 DPPH 与 ABTS 自由基清除率，以维生素 E 做标准曲线，单位为 $\mu\text{mol TE/g DW}$ （干基）。

4.3.4 体外消化实验

苦荞麦芽苗粉的体外模拟消化实验，参考田玲丽等^[143]的方法进行消化液的配制。根据马艺超^[144]等的方法进行消化实验。

4.3.5 淀粉体外消化及血糖生成指数测定

利用不同方法所得苦荞苗芽粉进馒头制作，并冻干研磨，参考 Buston 等^[145]的方法进行体外淀粉消化试验，并进行一定修改。准确称取 50 mg 样品粉末置于 25 mL 刻度试管中，加入含有 0.12 M NaCl、2.7 mM KCl 和 0.01 M 磷酸盐缓冲盐的 20 mL 磷酸盐缓冲盐水（PBS，pH 6.9）混合。然后将 pH 调节至 1.5（使用 8mol/L HCl），并向样品中加入 5 mL 胃蛋白酶溶液（115 U/mL），然后在 37°C 下孵育 30 min。然后用 10 g/100g NaOH 将 pH 重新调节至 6.9，并用 PBS pH 6.9、1 mL 猪胰 α 淀粉酶溶液（110 U/mL）将样品调至 49 mL；每个管在 37°C 下孵育 3 小时。在 3 小时内每 30 分钟从每个管中取出 1mL 等分试样，用于使用 3,5-二硝基水杨酸（DNS）方法分析还原糖含量。

结果以白面包为参考标准，定义白面包的水解率为 100。根据不同时间下淀粉的水解率，绘制水解动力曲线。通过 origin 21.0 计算每组曲线下的面积（AUC）、水解指数（HI）以及估计血糖指数 eGI。

4.3.6 β -环糊精与芦丁包合物的制备与表征

4.3.6.1 包合物的制备

β -环糊精/芦丁（ β -CD/Rutin）包合物的制备：称取 0.611 g（1 mmol）芦丁加入盛有 50 mL 无水乙醇的烧杯中溶解。之后利用 150 mL 去离子水将 1.135 g（1 mmol） β -环糊精搅拌溶解。随后将 50 mL 的芦丁溶液缓慢加至 150 mL 的 β -环糊精水溶液中，使用磁力搅拌器室温下搅拌 48 h。结束后用 0.45 μm 的亲水性微孔滤膜过滤混合溶液，在旋转蒸发仪上将滤液浓缩后使用冷冻干燥机干燥 24 h 即可得到淡黄色的 β -CD/Rutin 包

合物粉末。

4.3.6.2 X 射线衍射光谱分析 (XRD)

采用 X 射线衍射仪 (XRD) 对样品在波长为 0.154 nm 的 Ni 过滤 Cu-K (α) 辐射条件下照射。在 2 °/min 的扫描速率条件下, 5 θ 扫描范围为 70°至 5°。

4.3.6.3 傅里叶变换红外光谱分析 (FTIR)

采用溴化钾压片法, 利用 FTIR 光谱仪测定红外光谱, 测定条件: 波数范围: 4000 到 400 cm^{-1} , 以空气为背景, 分辨率设置为 4 cm^{-1} , 每个样品进行 64 次扫描。

4.3.6.4 差示扫描量热分析 (DSC)

采用差示扫描量热法 (DSC), 将样品密封在铝坩埚中, 然后在氮气气氛中以 50 °C/min 的速度将温度从 250°C 加热到 10°C。

4.3.7 数据统计与分析

每次试验进行 3 次重复, 结果表示为平均值 $\pm$ 标准差。在 SPSS 24.0 中利用 Tukey 进行显著性分析 ($P<0.05$)。用 SigmaPlot 14.0, Origin 2021 进行绘图与分析。

4.4 结果与分析

4.4.1 体外消化对预处理结合热风干燥处理下总黄酮含量的影响

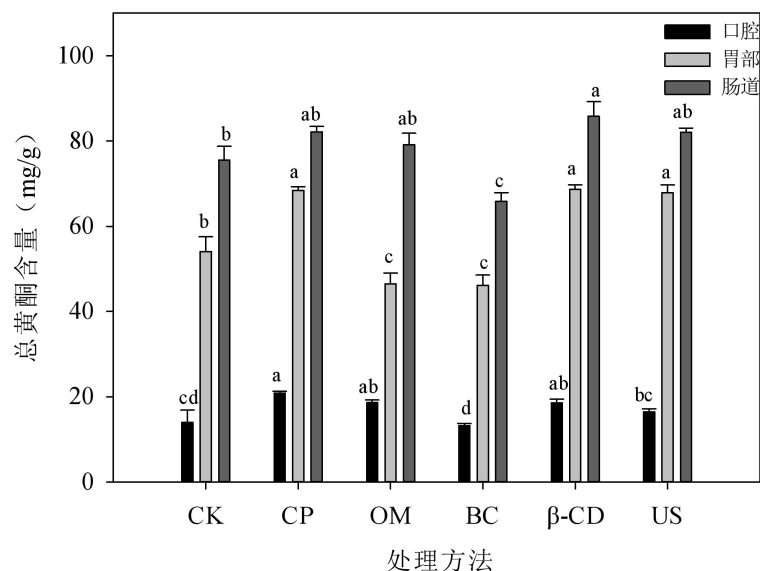


图 4-1 体外消化对预处理结合热风干燥下苦荞麦芽苗总黄酮含量的影响

Fig. 4-1 Effect of in vitro digestion on total flavone content of Tartary buckwheat sprouts under different hot air drying

苦荞麦芽苗在经过不同热风干燥处理后, 其经过体外模拟口腔、胃及小肠消化处

理总黄酮含量变化结果图 4-1 所示，所有不同的热风干燥处理方法所得苦荞麦芽苗粉，其体外模拟消化过程总黄酮的含量变化趋势是一致的，均随着消化的进行，呈现递增状态。 β -CD 组在胃部及肠道消化阶段的黄酮含量均达到最高分别为 68.69 mg/g 和 85.78 mg/g，显著高于 CK 对照组。对于 CP、OM 及 US 组在胃部及肠道消化阶段同样是高于 CK 组，且三组之间的差异不显著 ($P<0.05$)。

黄酮释放量降低变化趋势，可能是由于消化酶及酸、碱极端环境的影响下，黄酮类物质由结合态被水解为不稳定的游离态，这极大地增加了与淀粉、蛋白、多糖等成分的结合几率，减少了暴露在消化液环境中的官能团，导致其含量呈下降趋势^[146]。

4.4.2 体外消化对预处理结合热风干燥处理下总酚含量的影响

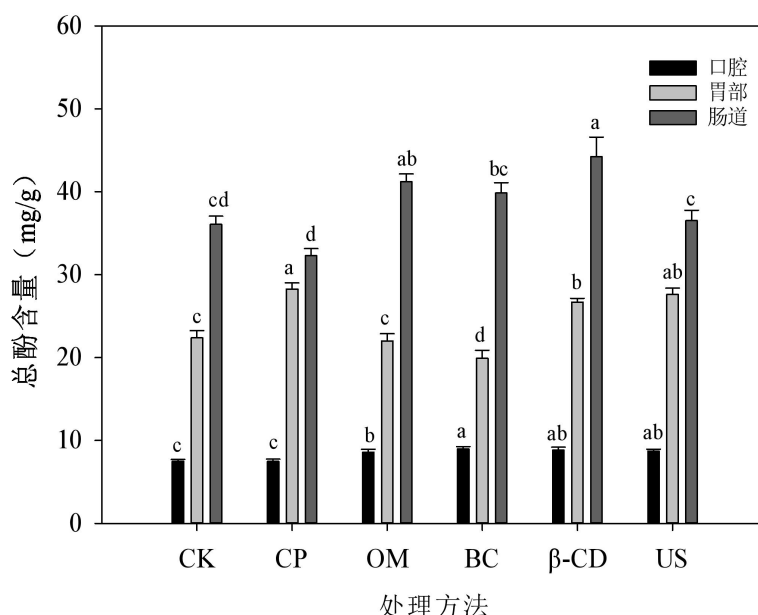


图 4-2 体外消化对预处理结合热风干燥下苦荞麦芽苗总酚含量的影响

Fig. 4-2 Effect of in vitro digestion on total phenolic content of Tartary buckwheat sprouts under different hot air drying

体外消化对不同热风干燥下苦荞麦芽苗总酚含量的影响如图 4-2 所示，总酚在体外消化过程的变化趋势与总黄酮一致，均是随着消化过程的进行逐渐增加。且 CK、OM、BC 和 β -CD 组口腔到胃部消化增加量要比胃部到肠部的消化增加量小。胃部总酚含量释放最高的是 CP 组为 7.48 mg/g。肠道总酚含量最高的是 β -CD 组为 44.24 mg/g，显著高于 CK 组 ($P<0.05$)。在体外模拟消化系统中，添加的酶及酸性条件可以有效添破坏了芽苗的细胞壁，促使酚类营养物质的释放。此外，胃酸和胃蛋白酶可分解酚酸与细胞壁间的酯键，释放出酚酸，胰蛋白酶可通过促进多酚和蛋白质间的共价键，释放出游离酚^[143]。本研究中发现 β -环糊精处理可以有效提高苦荞芽苗粉在消化过程中总

酚的释放，原因可能是 β -CD 组在干燥过程中总酚含量保留率较高，同时 β -CD 自身也具有提高活性成分溶出率的作用。

4.4.3 体外消化对预处理结合热风干燥处理下 DPPH 自由基清除能力的影响

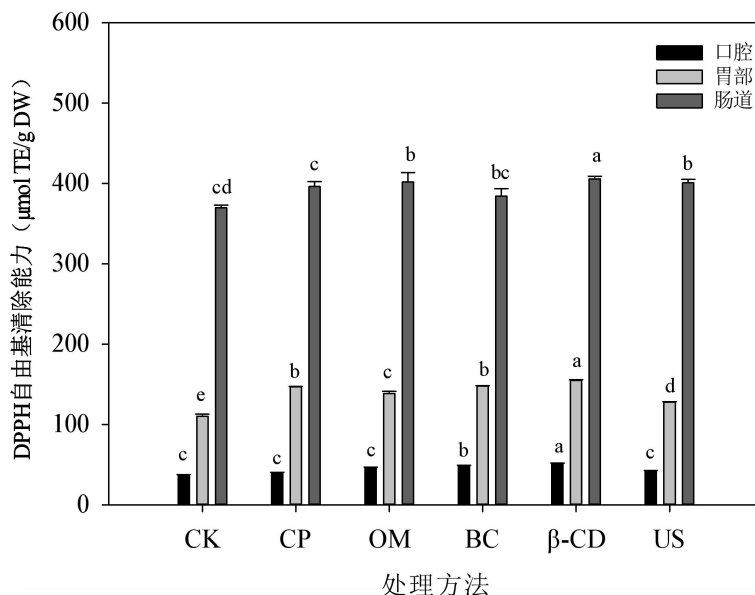


图 4-3 体外消化对预处理结合热风干燥下苦荞麦芽苗 DPPH 自由基清除能力的影响

Fig. 4-3 Effect of in vitro digestion on DPPH scavenging capacity of free radicals of Tartary buckwheat sprouts under different hot air drying

体外消化对不同热风干燥下苦荞麦芽苗 DPPH 自由基清除能力的影响如图 4-3 所示。抗氧化能力一般与芽苗体内总黄酮、总酚等活性成分具有高度相关性^[147]。苦荞麦芽苗粉在经过体外消化过程中，其 DPPH 自由基清除能力在逐渐增加。所有处理组且除 BC 组外均高于 CK 组，其中 β -CD 组在肠道消化后，DPPH 自由基清除能力为 405.84 $\mu\text{mol TE/g}$ 。相比于 CK 组，提高 9.71% ($P < 0.05$)。推测随着消化阶段的进行黄酮与总酚含量逐渐增加，故此抗氧化能力也随之增加，这与 Tagliazucchi 等^[148]的研究结论一致。

4.4.4 体外消化对预处理结合热风下苦荞麦芽苗 ABTS 自由基清除能力的影响

体外消化对不同热风干燥下苦荞麦芽苗 ABTS 自由基清除能力的影响如图 4-3 所示。苦荞麦芽苗粉在经过体外消化过程中，其 ABTS 自由基清除能力在逐渐增加。 β -CD、US、OM 和 CP 在肠道消化期 ABTS 自由基清除能力显著高于对照组，分别提高 33.03%、25.49%、9.35%和 7.27%。 β -CD 组最高，而胃部 OM 组则要小于 CK 组。

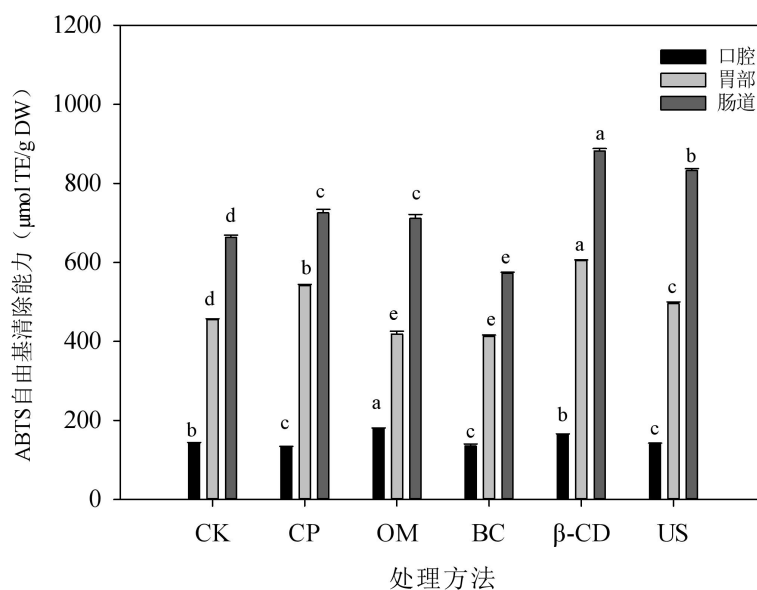


图 4-4 体外消化对预处理结合热风干燥下苦荞麦芽苗 ABTS 自由基清除能力的影响

Fig. 4-4 Effect of in vitro digestion on ABTS radical scavenging capacity of Tartary buckwheat sprouts under different hot air drying

与 DPPH 不同，CP 组的 ABTS 自由基清除能力在消化过程中要小于 CK 组。可见在不同消化阶段，不同处理组的 ABTS 自由基清除率也是不同的。故此可知不同的抗氧化指标存在不同的结果，所以在进行抗氧化能力评价是需要多种抗氧指标综合比较。

4.4.5 体外消化对预处理结合热风干燥处理下 FRAP 自由基清除能力的影响

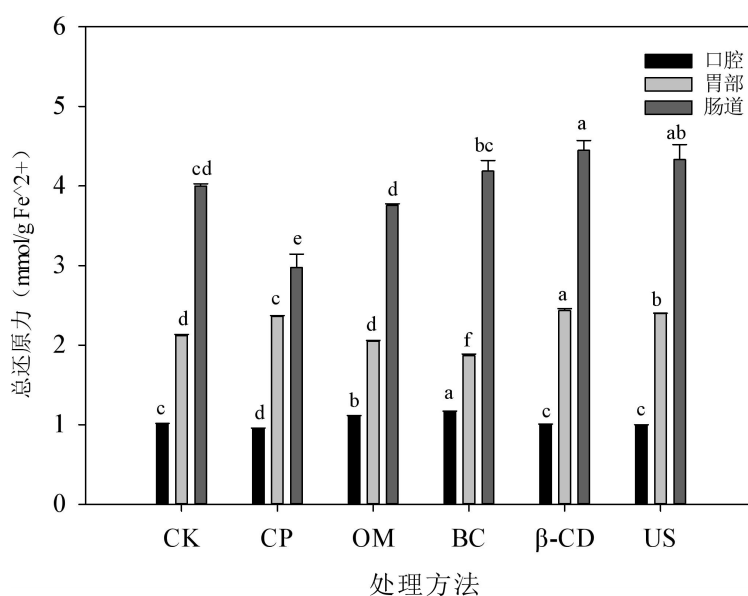


图 4-5 体外消化对预处理结合热风干燥下苦荞麦芽苗总还原力的影响

Fig. 4-5 Effect of in vitro digestion on the total reducing force of Tartary buckwheat sprouts under different hot air drying

体外消化对不同热风干燥下苦荞麦芽苗总还原能力的影响如图 4-3 所示。苦荞麦芽苗粉在经过体外消化过程中，其总还原能力在逐渐增加。 β -CD 和 US 在肠部消化期总还原能力显著高于对照组，分别为 $4.45 \text{ mmol/g Fe}^{2+}$ 、 $4.33 \text{ mmol/g Fe}^{2+}$ 。此外 BC 组总还原力在肠部也高于 CK 组，猜测可能是植物组织经过烫漂后内部细胞破坏，在进行消化过程当中活性物质更容易释放。酚类化合物是植物抗氧化能力的重要贡献^[149]。根据 4.3.2 节的总酚消化趋势可见其与总还原力的变化趋势相同。

4.4.6 预处理结合热风对芽苗粉馒头的淀粉体外消化及升糖指数的影响

不同热风干燥苦荞麦芽苗粉馒头体外水解速率见图 4-5。由图 4-5 可以看出，所有不同处理组的苦荞麦芽苗粉馒头的总淀粉水解率在前 30 min 内增长较快，特别是在前 20 min 的快速消化阶段淀粉的水解速率最快。而在后面的 160 min 内则呈现出缓慢增长的趋势。并且在前 20 min 内，各处理组的苦荞麦芽苗粉馒头的消化水解率相近，并在消化的中后期慢慢表现出差异。由此可以说明馒头的体外淀粉消化性的差异主要受慢速消化淀粉的影响，不同处理组所得的苦荞麦芽苗粉的添加均可以有效降低馒头的总淀粉水解率，其中 β -CD 组降低效果最好。

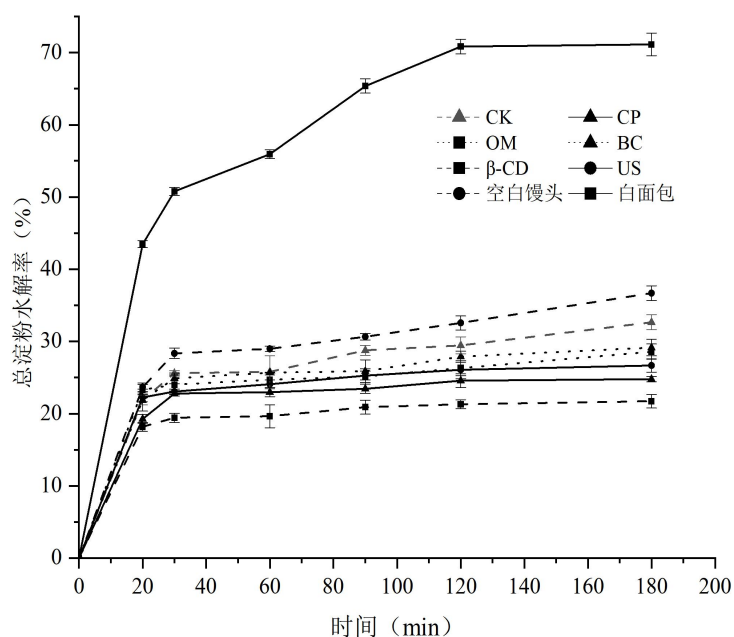


图 4-5 预处理结合热风干燥对苦荞麦芽苗粉馒头体外总淀粉水解率的影响

Fig. 4-5 Effect of pretreatment combined with hot air drying on total starch hydrolysis rate of Tartary buckwheat sprout powder steamed bread in vitro

如表 4-3 可见，在苦荞麦芽粉馒头体外消化过程， β -CD 组的苦荞麦芽苗粉馒头的总淀粉水解率最低为 34.48%，与 CK 组相比，降低了 23.83%。本文研究以预估血糖指

数 (eGI) 来代替 GI 值对淀粉类食品消化情况进行评判。正如表 4-3 中, 空白馒头的 eGI 值为 67.12。其中 CP、OM、BC、 β -CD 和 US 与 CK 组相比 eGI 均发生降低。可以见得不同处理组的苦荞麦芽苗粉的添加均可以有效降延缓馒头的淀粉水解, 降低血糖生成指数, 其中 β -CD 组的效果最好, eGI 值最低为 58.64。由此也可以看出, β -CD 处理可以更为有效保留芽苗干燥过程中功能活性成分。

表 4-3 预处理结合热风干燥对苦荞麦芽苗粉馒头淀粉水解指数 (HI)、血糖生成指数 (eGI)

Table 4-3 Effects of pretreatment combined with hot air drying on starch hydrolysis index (HI) and glycemic index (eGI) of Tartary Buckwheat malt flour steamed bread

组别	CK	CP	OM	BC	β -CD	US	空白馒头
HI	45.27 $\pm$ 0.73	37.71 $\pm$ 0.61	41.43 $\pm$ 0.42	42.56 $\pm$ 0.77	34.48 $\pm$ 0.82	40.22 $\pm$ 0.94	49.93 $\pm$ 0.39
eGI	64.56 $\pm$ 0.54	60.41 $\pm$ 0.91	62.45 $\pm$ 0.67	63.07 $\pm$ 0.75	58.64 $\pm$ 1.02	61.79 $\pm$ 0.62	67.12 $\pm$ 0.77

4.4.7 β -环糊精包合结构分析

4.4.7.1 X 衍射图分析

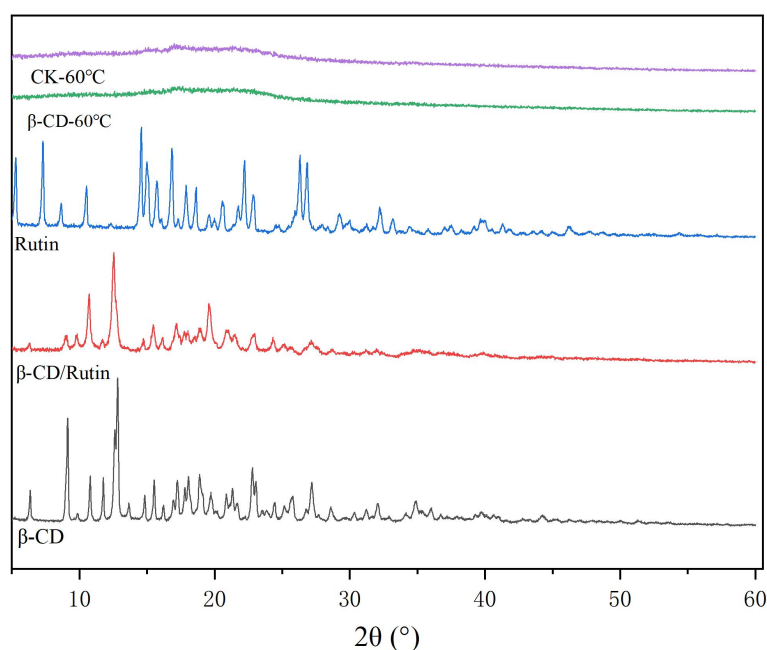


图 4-6 X 射线衍射图

注: CK-60°C: 热风 60°C, 未经预处理的芽苗粉; β -CD-60°C: 热风 60°C, β -环糊精预处理的芽苗粉; Rutin: 芦丁粉末; β -CD/rutin: β -环糊精与芦丁的包合物; β -CD: β -环糊精粉末。

Fig. 4-6 X-ray diffraction pattern

Note: CK-60°C: hot wind 60°C, unpretreated sprout powder; β -CD-60°C: 60°C, β -cyclodextrin pretreatment; Rutin; β -CD / rutin: β -cyclodextrin and rutin; β -CD: β -cyclodextrin powder.

从图 4-6 可以看出, Rutin 与 β -CD 的 X 射线衍射图呈现出一系列尖锐的强峰, 表

明了它们具有结晶结构。而 β -CD 与 Rutin 的包合物 X 射线衍射图的结晶峰减少, 表明包合物的结晶程度明显降低。由此可见 β -CD 与 Rutin 在进行包合过程会导致二者部分特征峰发生消失, 形成独属于包合物的特征峰。结果证明, 芦丁可能通过进入环糊精空腔中被环糊精分散, 从而导致结晶度降低, 包合物制作成功。而所作的 CK-60°C 与 β -CD-60°C 组的苦荞麦芽苗粉内部结构复杂, 没有出现明显的特征峰, 说明此两个样品是非晶属性或是样品的结晶性不好。

4.4.7.2 红外光谱分析

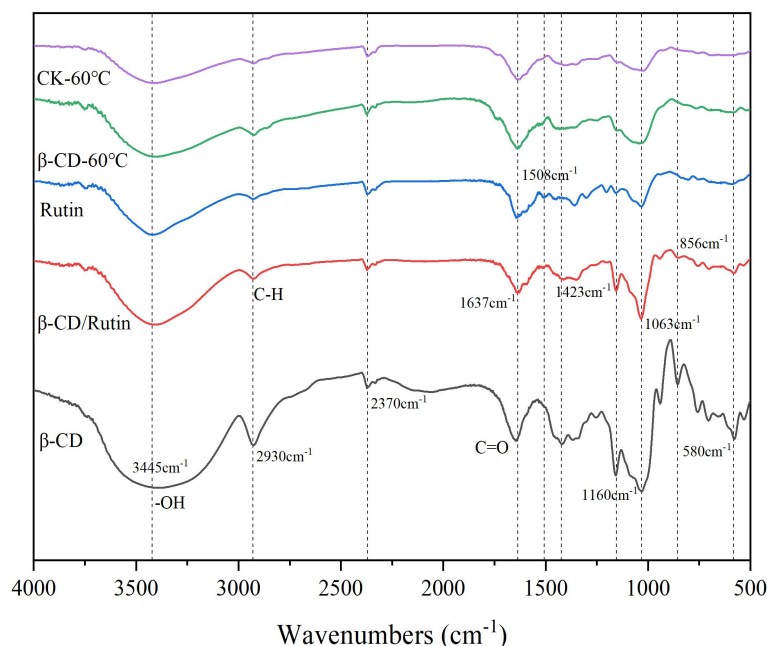


图 4-7 红外光谱图

注: CK-60°C: 热风 60°C, 未经预处理的芽苗粉; β -CD-60°C: 热风 60°C, β -环糊精预处理的芽苗粉; Rutin: 芦丁粉末; β -CD/rutin: β -环糊精与芦丁的包合物; β -CD: β -环糊精粉末。

Fig. 4-7 Infrared spectrogram

Note: CK-60°C: hot wind 60°C, unpretreated sprout powder; β -CD-60°C: 60°C, β -cyclodextrin pretreatment; Rutin; β -CD / rutin: β -cyclodextrin and rutin; β -CD: β -cyclodextrin powder.

通过红外光谱特征吸收峰的形状、位置和数目可以分析不同样品的分子结构变化, 各种粉末的红外光谱如图 2-3 所示, 3445 cm^{-1} 附近宽峰是由于 O-H 伸缩振动^[150], 2930 cm^{-1} 附近代表饱和的 C-H 键振动吸收峰, 1637 cm^{-1} 代表醛基 C=O 的吸收峰, 1423 cm^{-1} 处是苯环骨架的 C=C 振动峰^[151]。而在 2370 cm^{-1} 附近多是三键与积累双键。由图中可以看出 β -CD 在 1423 cm^{-1} 处存在独有的苯环骨架的 C=C 振动吸收峰。Rutin 则是没有, 而其是在 1508 cm^{-1} 处存在独有振动吸收峰。 β -CD/rutin 包合物的红外图谱中均在这两处存在微弱的震动, 说明包含二者的包合导致此处峰振动变弱。此外, 可以看到在 580

cm^{-1} 处 $\beta\text{-CD}$ -60 $^{\circ}\text{C}$ 、 $\beta\text{-CD}$ /rutin 与 $\beta\text{-CD}$ 组均存在震动, 说明这是 β -环糊精的一个特征结构。而对应的 Rutin 和 CK 组并没有。红外光谱分析表明环糊精与芦丁存在分子间相互作用, 证明了 $\beta\text{-CD}$ 与芦丁等活性物质结合的可能性。

4.4.7.3 差示扫描热图分析

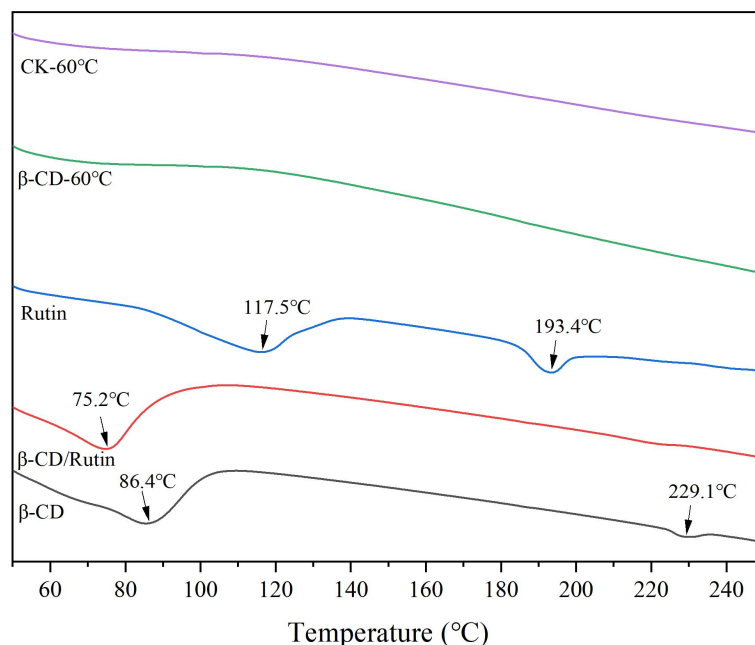


图 4-8 差示扫描热图

注: CK-60 $^{\circ}\text{C}$: 热风 60 $^{\circ}\text{C}$, 未经预处理的芽苗粉; $\beta\text{-CD}$ -60 $^{\circ}\text{C}$: 热风 60 $^{\circ}\text{C}$, β -环糊精预处理的芽苗粉; Rutin: 芦丁粉末; $\beta\text{-CD}$ /rutin: β -环糊精与芦丁的包合物; $\beta\text{-CD}$: β -环糊精粉末。

Fig. 4-8 Differential scan heat map

Note: CK-60 $^{\circ}\text{C}$: hot wind 60 $^{\circ}\text{C}$, unpretreated sprout powder; $\beta\text{-CD}$ -60 $^{\circ}\text{C}$: 60 $^{\circ}\text{C}$, β -cyclodextrin pretreatment; Rutin; $\beta\text{-CD}$ / rutin: β -cyclodextrin and rutin; $\beta\text{-CD}$: β -cyclodextrin powder.

当包合物形成后将破坏原有的结晶结构, 其熔点会移动或消失, 因此可以采用差示扫描量热分析法 (DSC) 来表征包合物结构的形成。如图 4-8 为不同粉末的差示扫描热图图谱, 从中可以看到, Rutin 在 117.5 $^{\circ}\text{C}$ 和 193.4 $^{\circ}\text{C}$ 分别具吸热峰; $\beta\text{-CD}$ 在 86.4 $^{\circ}\text{C}$ 和 229.1 $^{\circ}\text{C}$ 分别具吸热峰; 而 $\beta\text{-CD}$ /Rutin 的包合物仅在 75.2 $^{\circ}\text{C}$ 具有吸热峰。说明在 β -环糊精与芦丁进行包合的过程当中, 所形成包合物的形成改变了芦丁的结晶状态。CK-60 $^{\circ}\text{C}$ 与 $\beta\text{-CD}$ -60 $^{\circ}\text{C}$ 组的 DSC 曲线并没由熔融峰, 表明其具有非晶结构或者可能粉末成分复杂难以出现明显吸热峰, 这与 XRD 谱图的结果一致。DSC 结合上述 FT-IR 和 XRD 分析结果证明成功制备了 $\beta\text{-CD}$ /Rutin 包合物。同时也明确了 $\beta\text{-CD}$ 与活性成分存在包合的可能性, 由此可见, 苦荞麦芽苗干燥粉碎过程中可能存在 $\beta\text{-CD}$ 与其内部活性成分包合的可能性。

4.5 本章小节

通过研究不同热风干燥方法下苦荞麦芽苗粉消化过程中其活性成分及抗氧化能力的变化，并比较以他们为原料所制作的淀粉食品馒头的体外淀粉消化，并计算出 eGI 值来分析那种苦荞麦芽苗粉更为适合用来制作降血糖的低 GI 食品。研究发现， β -CD 组在胃部及肠道消化阶段的黄酮含量均达到最高分别为 68.69 mg/g 和 85.78 mg/g，显著高于 CK 对照组。 β -CD 组在肠部消化后，DPPH 自由基清除能力为 405.84 $\mu\text{mol TE/g}$ 。相比于 CK 组，提高 9.71% ($P < 0.05$)。 β -CD、US、OM 和 CP 在肠部消化期 ABTS 自由基清除能力显著高于对照组，分别提高 33.03%、25.49%、9.35%和 7.27%。 β -CD 和 US 在肠部消化期总还原能力显著高于对照组，分别为 4.45 mmol/g Fe^{2+} 、4.33 mmol/g Fe^{2+} 。 β -CD 组的苦荞麦芽苗粉馒头的总淀粉水解率最低为 34.48%。对比 CK 组降低了 23.83%。空白对照馒头的 eGI 值为 67.12。其中 β -CD、CP、OM、BC 和 US 与 CK 组相比 eGI 均发生降低。且 β -CD 为低为 58.64 显著低于 CK 组 ($P > 0.05$)。由此可见 β -CD 组所得苦荞麦芽苗粉在消化过程拥有最高的活性成分、抗氧化能力及抑制淀粉水解能力。

此外我们还对 β -CD 与芦丁的包合物进行表征分析，发现 β -CD 拥有对类似芦丁的活性成分具有包含的效果，表征结果对于苦荞麦芽苗粉样品中的结构变化却不明显，但却可以由此推测出，苦荞麦芽苗粉干燥，粉碎过程发生了 β -CD 与苦荞麦芽苗的内部活性物质进行结合从而导致 β -CD 组的活性成分及抗氧化能力较高，在消化过程中可以释放出更多的黄酮、总酚故而拥有较高的淀粉水解抑制能力。

第五章 低 GI 苦荞麦芽苗粉馒头的研究

5.1 引言

馒头 (steamed bread) 是中国传统发酵食品, 味道松软可口, 距今已有 1700 多年的历史, 是中国人民的主食^[152]。面粉经发酵制成馒头, 更易消化吸收, 同时其重要营养素是碳水化合物, 是人们补充能量的基础食物。但常见的馒头是由小麦面粉、水和酵母制成, 营养价值有限, 升糖指数较高。而食用较高 GI 的食物会导致餐后血糖水平波动很大, 这会增加肥胖、糖尿病和心血管疾病等慢性疾病的风险^[153]。

为有效提高主食食品的营养价值, 降低食物的 GI 水平, 预防和控制慢性疾病的发展, 许多研究者会尝试向馒头中添加慢消化淀粉及膳食纤维, 进而开发具有保健功效的新型功能性食品。而消费者对新产品的接受度, 口感品质是一个很重要的影响因素。实验室面制品的品质评价方法主要分为两种: 感官评定 (主观) 和仪器分析 (客观)。即分别是以具有丰富感官评价经验的专业人士的主观判断, 及粉质仪、拉伸仪和质构仪等仪器对食品的客观数据分析^[154]。从而综合评价一样食品的食用品质。

本研究以新鲜苦荞麦芽苗味原料, 进行 β -CD 预处理结合热风干燥进行脱水, 粉碎制得苦荞麦芽苗粉, 并结合燕麦 β -葡聚糖, 谷朊粉添加入小麦面粉蒸制成馒头。通过优化馒头的添加配方, 研制出一种低 GI 的苦荞芽苗粉馒头, 在保证馒头在兼顾低升糖效果的同时拥有较好的食用品质, 为苦荞制品的加工推广以及新型保健食品的开发和生产提供基础理论资料。

5.2 材料与设备

5.2.1 实验材料

苦荞芽粉: 根据 2.3 节中热风干燥 60℃条件下, β -CD 组处理方法制得。

酵母, 小麦面粉等原料以及不锈钢盆, 电磁炉, 蒸锅等均购自芜湖当地一家超市。

5.2.2 实验试剂

表 5-1 实验试剂
Table 5-1 Experimental reagents

试剂名称	规格	厂家
燕麦 β -葡聚糖	食品级	鸿诗生物科技
谷朊粉	食品级	卫辉市康迪粉业有限公司

5.2.3 实验设备

表 5-2 实验设备
Table 5-2 Experimental instruments and equipment

设备名称	型号	厂家
电磁炉	WK2102	美的集团
电子天平	JY1002	上海精密科学仪器有限公司

其他同 2.2.3 节。

5.3 实验方法

5.3.1 馒头配方

苦荞麦芽苗粉馒头：苦荞麦芽苗粉，燕麦 β -葡聚糖，谷朊粉，小麦面粉，酵母粉，水。

5.3.2 馒头制作工艺

（1）原料混合：将一定配比的苦荞麦芽苗粉、燕麦 β -葡聚糖、谷朊粉和小麦面粉倒在一起，总质量为 50 g，混合均匀。

（2）和面：将适量酵母溶解在一定量水（25℃）中，搅拌均匀，加入到配好的面粉中，进行滚揉，直至面团表面光滑，不粘手。

（3）静置：将揉好的面团放置在不锈钢盆中，盖上两层纱布静置 15 min。

（4）发酵：面团放置在 30℃，相对湿度 80%的恒温恒湿培养箱中发酵至成熟，时间为 1 h 左右。采用湿手指按压馒头坯边缘，看其是否缓慢回弹以确定发酵是否成熟。

（5）蒸制：将醒发好的面团，放进事先煮热的蒸锅中，中间要有一定的间隔。盖上盖，蒸十五分钟左右，时间到后关火，几分钟后再打开锅。

5.3.3 比容

参考 GB/T21118-2007 进行测定，并修改，采用体积测量法（小米排空法）测馒头

的体积。

5.3.4 感官评价

参照 GB/T35991-2018 及许芳溢^[154]等人的方法，结合苦荞麦芽苗粉馒头特性，对感官评分表稍作修改。苦荞麦芽苗粉馒头感官评分表如表 5-3。取蒸好的馒头于室温冷却 10 min，组织 15 名有经验的感官评分员对馒头进行打分，结果取平均值。

表 5-3 馒头感官评价评分表
Table 5-3 Scale of sensory evaluation of steamed bread

项目	评分标准	分数
外观形状	馒头挺立度好，形态完整，表皮光滑	16-20
	挺立度一般，表皮有少量孔隙，气泡	9-15
	形态差，扁平，不对称，表面有硬块	1-8
结构	纵剖面气孔细密而均匀，呈海绵状	11-15
	纵剖面气孔大小不均，有少量馒头碎渣	6-10
	纵剖面气孔大小不均，出现大的空穴，质地粗糙	1-5
弹韧性	手指按压回弹性较好	16-20
	手指按压回弹弱	9-15
	手指按压不回弹或按压困难	1-8
黏性	咀嚼爽口不黏牙，咀嚼次后能聚集成团，口感细腻	8-10
	咀嚼时略有黏牙，在口中能聚集成块，稍有牙碜	5-7
	咀嚼不爽口、发黏，馒头在口中散开	1-4
风味	馒头在鼻子范围内，能闻到苦荞麦芽苗的香气	16-20
	没有香气，也没有异味	9-15
	不能闻到香气，有异味	1-8
色泽	芽粉馒头呈现淡褐色，原粉馒头呈淡黄色	11-15
	芽粉馒头棕色，原粉馒头呈土黄色	6-10
	原粉发灰，发暗	1-5

5.3.5 质构

将蒸制好的荞麦馒头进行冷却个小时，然后进行切片。每个苦荞麦芽苗馒头样品切出 25 mm 厚的馒头片作为测试样品。

质构仪参数设定如下：

探头：P/36R 压盘式探头 操作模式：压力测定测试压缩比：50%。

操作类型：TPA (Texture Profile Analysis) 操作 操作测试前速度：2.0 mm/sec。

测试速度：1.0 mm/sec 测试后速度：1.0 mm/sec 感应力：Auto-5gTime：5 sec。

测定指标包括：硬度、粘着性、弹性、咀嚼度、内聚性、回复性。

5.3.6 体外消化

馒头的消化实验参考 4.3.5 节，将馒头进行冷冻干燥，称取 0.5 g 馒头进行体外淀粉消化，并计算 eGI 值。

5.3.7 单因素试验设计

采用 5.3.2 节的馒头制作工艺进行操作，以小麦面粉质量 (50g) 为基重，在水的用量为 50%，酵母的用量为 0.1% 的基础上，单因素试验设计如下：

1) 在 6% 燕麦 β -葡聚糖，0.4% 谷朊粉的基础上，测定苦荞麦芽苗粉添加量 (4, 8, 12, 16, 20%) 对馒头的比容、感官品质、质构及 eGI 的影响。

2) 在 12% 苦荞麦芽苗粉，0.4% 谷朊粉的基础上，测定燕麦 β -葡聚糖添加量 (2、4、6、8、10%) 对馒头的比容、感官品质、质构及 eGI 的影响。

3) 在 12% 苦荞麦芽苗粉，6% 燕麦 β -葡聚糖的基础上，测定谷朊粉添加量 (0.2、0.4、0.6、0.8、1%) 对馒头的比容、感官品质、质构及 eGI 的影响。CK 组为小麦面粉，酵母和水制作而成，无其他添加。

5.3.8 响应面试验设计

通过单因素试验确定馒头的试验水平，以 eGI 值为响应值，采用 Box-Behnken 实验设计进行 3 因素 3 水平试验，试验因素水平表如表 5-4 所示。

表 5-4 响应面试验因素水平表

Table 5-4 Seasoning Orthogonal Test Factor Levels

水平	因素		
	A (苦荞麦芽苗粉添加量) /%	B (燕麦 β -葡聚糖添加量) /%	C (谷朊粉添加量) /%
1	8	4	0.4
0	12	6	0.8
-1	16	8	1.2

5.3.9 数据统计与分析

每次试验进行 3 次重复，结果表示为平均值 $\pm$ 标准差。在 SPSS 24.0 中利用 Tukey 进行显著性分析 ($P<0.05$)。用 SigmaPlot 14.0, Origin 2021, Desgin expert 8.0 进行绘图与分析。

5.4 结果与讨论

5.4.1 单因素试验结果

5.4.1.1 苦荞麦芽苗粉的添加量对馒头比容及感官评分的影响

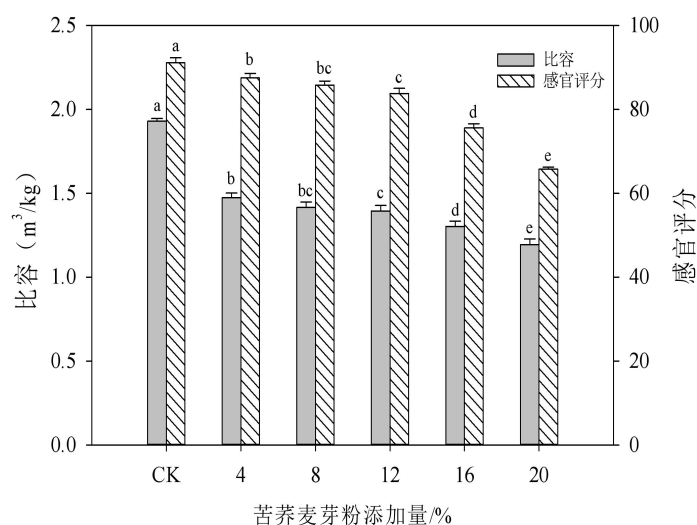


图 5-1 苦荞麦芽苗粉的添加量对馒头比容及感官评价的影响

Fig. 5-1 Effects of Tartary buckwheat sprout powder supplemental level on specific volume and sensory evaluation of steamed bread

苦荞麦芽苗粉添加量对馒头的影响如图 5-1 所示，与 CK 组相比，苦荞麦芽苗粉的添加会导致馒头的比容显著下降，且随着芽苗粉的添加量增加，一直呈现下降的趋势。当芽苗粉添加量为 12% 时，馒头的比容开始显著下降。4%、8% 与 12% 的苦荞芽馒头的比容差异大。馒头的感官评分呈现相同的趋势，同样从 12% 开始大幅度下降。这说明 12% 的苦荞麦芽苗粉添加量是在保证馒头感官品质变劣的最佳添加量。

5.4.1.2 苦荞麦芽苗粉的添加量对馒头质构的影响

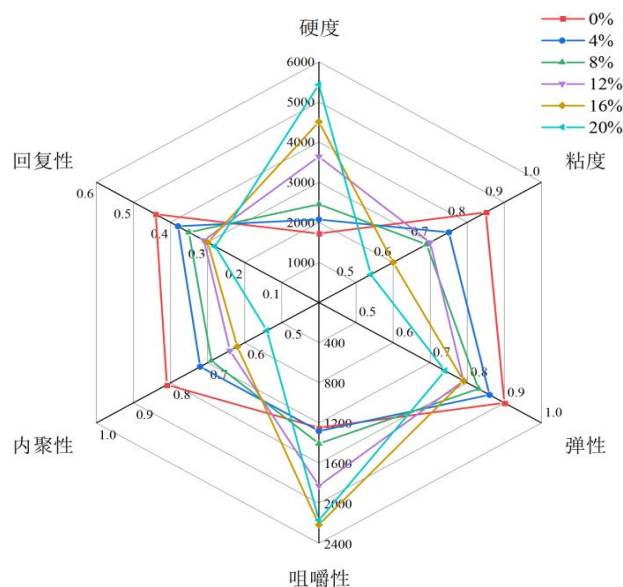


图 5-2 苦荞麦芽苗粉的添加量对馒头质构的影响

Fig. 5-5 Effect of the addition amount of Tartary buckwheat sprout powder on the texture of steamed bread

对不同苦荞芽苗粉添加量的馒头进行 TPA 质构测定所得结果见表 5-2。随着苦荞麦芽苗粉添加量不断增加，馒头的硬度在不断上升，而粘度也是出现下降，当添加量达到 20% 时，粘度仅为 0.54。对于弹性和咀嚼性来说不同量的苦荞麦芽粉的添加，会导致其发生下降。内聚性与回复性具有同样的趋势。由此苦荞麦芽苗粉的添加量越多，则会导致馒头的表皮和内部越硬，咀嚼感变差。故此可知在进行馒头制作的过程当中苦荞麦芽苗粉的添加量并不意味着越多越好。

5.4.1.3 苦荞麦芽苗粉的添加量对馒头 eGI 的影响

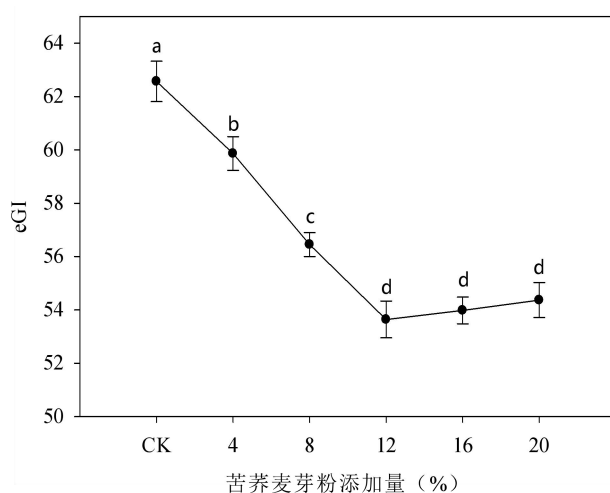


图 5-3 苦荞麦芽苗粉的添加量对馒头 eGI 的影响

Fig. 5-3 Effect of the added amount of Tartary buckwheat sprout powder on the eGI of steamed bread

苦荞麦芽苗粉的添加量对馒头 eGI 的影响如图 5-3 所示，随着苦荞麦芽苗粉添加量

的增加, 馒头的 eGI 呈现先下降后缓慢上升的趋势, 添加量为 12% 时, 馒头的 eGI 值最低。此时, 馒头的淀粉水解得到最大程度的抑制。所以可以得出添加 12% 的苦荞麦芽苗粉对馒头的淀粉水解抑制效果最好, 此时馒头的血糖生成指数最低, 功能性最强。

5.4.1.4 燕麦 β -葡聚糖的添加量对馒头比容及感官评分的影响

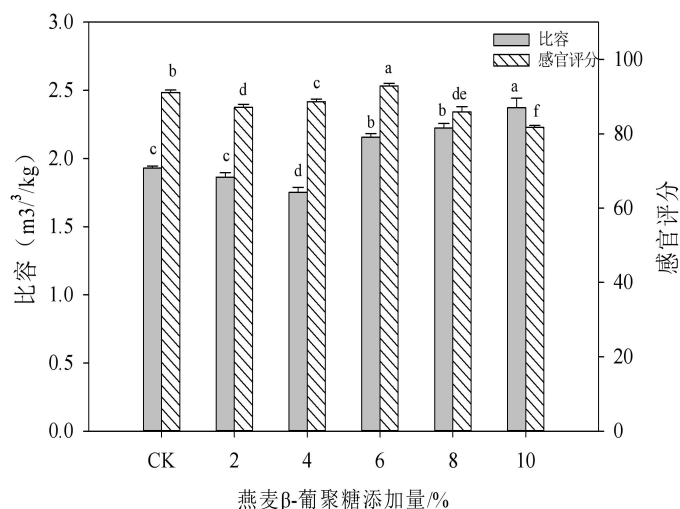


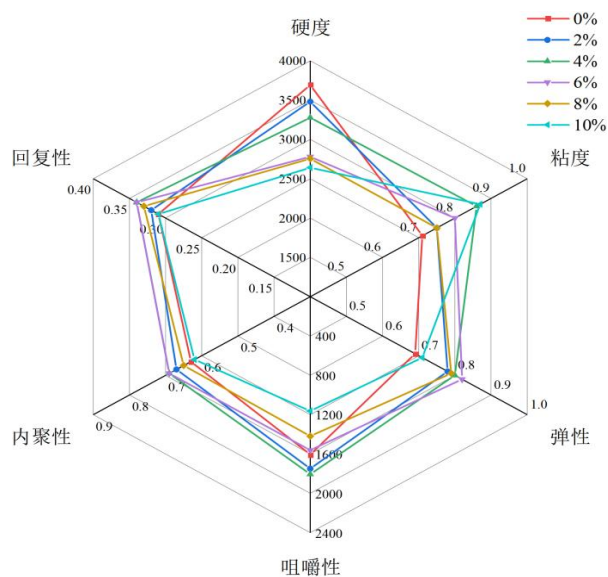
图 5-4 燕麦 β -葡聚糖的添加量对馒头比容及感官评价的影响

Fig. 5-4 Effects of oat β -glucan supplementation on specific volume and sensory evaluation of steamed bread

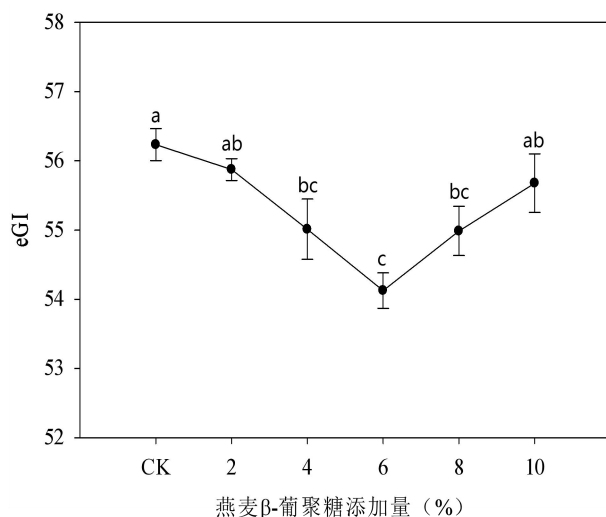
燕麦 β -葡聚糖添加量对馒头的影响如图 5-4 所示, 馒头的比容随着燕麦 β -葡聚糖添加量呈先减小后增大的趋势, 在添加量为 6% 时, 比容大于 CK 组, 由此可以燕麦 β -葡聚糖可以改善馒头品质。馒头的感官评分随着燕麦 β -葡聚糖的添加先下降后上升, 在 6% 时最高且高于 CK 组。综上所述添加 6% 的燕麦 β -葡聚糖可以改善馒头比容, 提高感官评价。

5.4.1.5 燕麦 β -葡聚糖的添加量对馒头质构的影响

对不同燕麦 β -葡聚糖添加量的馒头进行 TPA 质构测定所得结果见图 5-5。随着燕麦 β -葡聚糖的添加量不断增加, 馒头的硬度在不断降低。而粘度与弹性则是先增加后降低。当燕麦 β -葡聚糖添加量为 6% 时, 馒头的弹性最佳。4% 时拥有较好的咀嚼性。燕麦 β -葡聚糖的添加对于内聚性和回复性的影响并不显著。故此可知燕麦 β -葡聚糖的添加可以有效改善因添加苦荞麦芽苗粉所导致的馒头变硬的状况, 且在添加量为 6% 时, 馒头的弹性, 回复性, 内聚性最高。

图 5-5 燕麦 β -葡聚糖的添加量对馒头质构的影响Fig. 5-5 Effects of oat β -glucan supplementation on the texture of steamed bread

5.4.1.6 燕麦 β -葡聚糖的添加量对馒头 eGI 的影响

图 5-6 燕麦 β -葡聚糖的添加量对馒头 eGI 的影响Fig. 5-6 Effect of the addition amount of oat β -glucan on the eGI of steamed bread

燕麦 β -葡聚糖的添加量对馒头 eGI 的影响如图 5-6 所示，随着燕麦 β -葡聚糖添加量的增加，馒头的 eGI 呈现先下降后缓慢上升的趋势。当燕麦 β -葡聚糖的添加量为 6% 时，馒头的 eGI 值最低。此时，馒头的淀粉水解得到最大程度的抑制，猜测可能是，随着燕麦 β -葡聚糖的过量添加会导致馒头自身结构发生变化，导致不易水解。所以添加 6% 的燕麦 β -葡聚糖对馒头的淀粉水解抑制效果最好，此时功能性最强。

5.4.1.7 谷朊粉的添加量对馒头比容及感官评分的影响

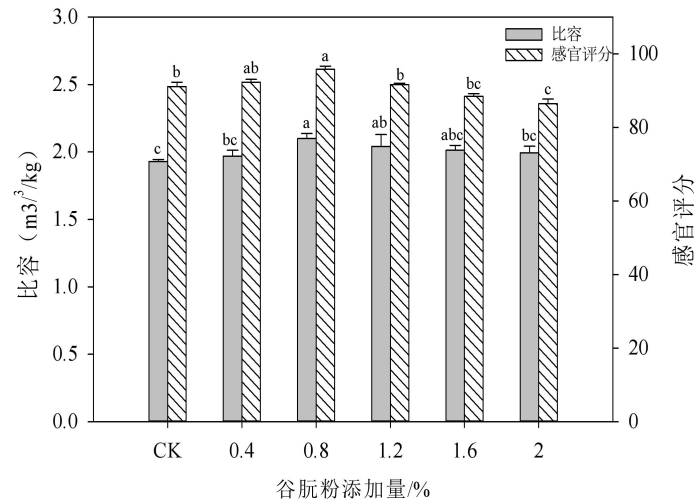


图 5-7 谷朊粉的添加量对馒头比容及感官评价的影响

Fig. 5-7 Effect of gluten dosage on specific volume and sensory evaluation of steamed bread

谷朊粉添加量对馒头的影响如图 5-7 所示，馒头的比容随着谷朊粉的添加量先上升后下降，在添加量为 0.8% 时，比容达到最大为 2.10。少量谷朊粉的添加可以有效改善面团强度，提高比容与感官评分。由上图可以看出，0.8% 的谷朊粉添加量的馒头感官评分最高。故此，可以谷朊粉的添加量在 8% 较好。

5.4.1.8 谷朊粉的添加量对馒头质构的影响

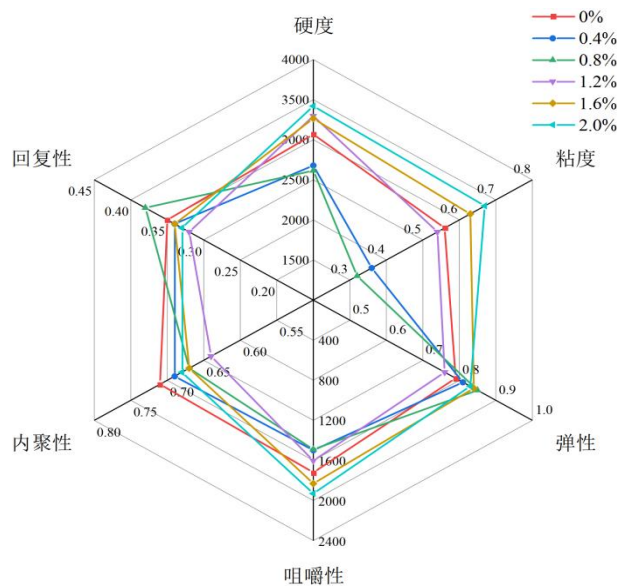


图 5-8 谷朊粉的添加量对馒头质构的影响

Fig. 5-8 Effect of gluten content on texture of steamed bread

对不同谷朊粉添加量的馒头进行 TPA 质构测定所得结果见表 5-8。与 0% 相比较，谷朊粉的添加可以有效降低馒头的硬度、粘度、内聚性和咀嚼性，同时弹性会发生增

加。随着谷朥粉的添加，馒头的硬度呈现先下降后增加的趋势。粘度的变化趋势与硬度相同。而弹性则是先上升后下降，在添加量为 0.8% 时达到最大值。回复性也是在 0.8% 的添加量达到最高。故此可知少量谷朥粉的添加同样可以有效改善因添加苦荞麦芽苗粉所导致的馒头变硬的状况，同时增加弹性，降低粘度。

5.4.1.9 谷朥粉的添加量对馒头 eGI 的影响

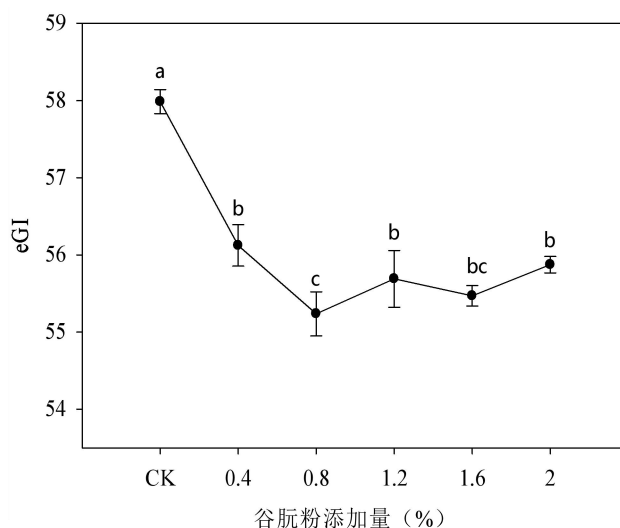


图 5-9 谷朥粉的添加量对馒头 eGI 的影响

Fig. 5-9 The effect of the amount of Grain powder added on the eGI of steamed bread

谷朥粉的添加量对馒头 eGI 的影响如图 5-9 所示。与 CK 组相比谷朥粉的添加具有降低馒头 eGI 值的效果。且随着谷朥粉的添加量的增加，馒头的 eGI 呈现先下降后缓慢上升的趋势。当谷朥粉的添加量为 0.8% 时，馒头的 eGI 值最低。但根据数据来看，谷朥粉的添加对馒头 eGI 的影响相对较小。

5.4.2 响应面试验结果

苦荞麦芽苗粉、燕麦 β -葡聚糖及谷朥粉对馒头感官评分和 eGI 的影响响应面结果如表 5-4 所示。

表 5-4 响应实验结果

Table 5-4 Response to experimental results

组别	A: 苦荞麦芽苗 (%)	B: 燕麦 β -葡聚糖 (%)	C: 谷朊粉 (%)	eGI
1	12	6	0.8	53.6
2	12	6	0.8	53.54
3	12	6	0.8	53.92
4	8	6	0.4	56.37
5	16	4	0.8	54.83
6	12	4	0.4	54.58
7	16	8	0.8	54.40
8	12	4	1.2	54.56
9	12	8	1.2	55.88
10	8	6	1.2	57.02
11	16	6	1.2	54.72
12	12	8	0.4	54.94
13	12	6	0.8	53.80
14	8	8	0.8	56.80
15	12	6	0.8	53.72
16	8	4	0.8	55.99
17	16	6	0.4	54.62

5.4.2.1 方差分析

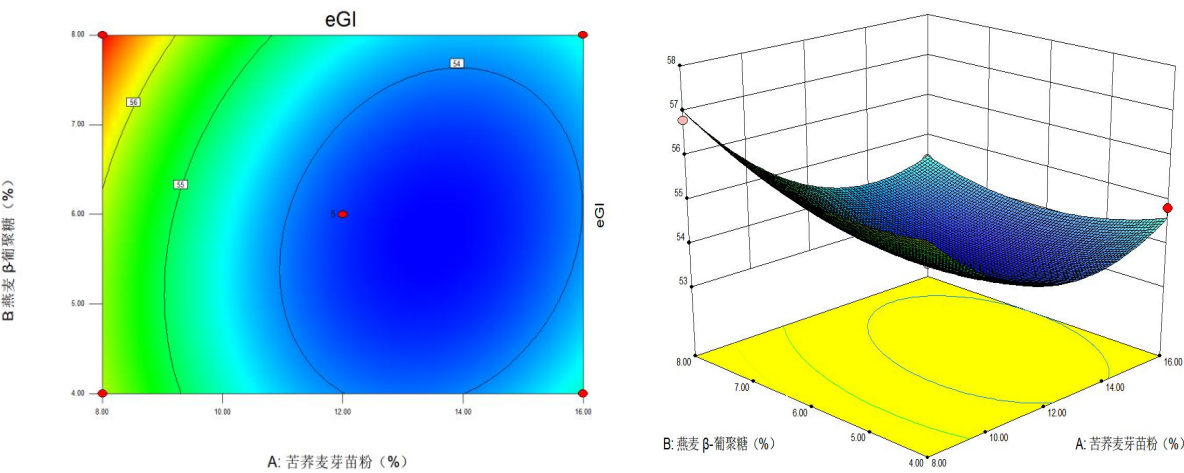
由方差分析表（表 5-5）可知，以 eGI 值为响应值的模型极显著（ $P < 0.0001$ ），修正相关系数平方（ R^2_{adj} ）为 0.9616， R^2 为 0.9832，失拟项为 0.1285 不显著，表明该模型选择合理，可以反应苦荞麦芽苗粉、燕麦 β -葡聚糖及谷朊粉对感官品质的影响，可以用该模型对低 eGI 馒头的配方进行优化，拟合模型为 $Y_1 = 53.72 - 0.95A + 0.26B + 0.21C - 0.31AB - 0.14AC + 0.24BC + 1.24A^2 + 0.55B^2 + 0.73C^2$ 。苦荞麦芽粉的添加量（A）、燕麦 β -葡聚糖（B）和谷朊粉（C）以及苦荞麦芽苗粉和燕麦 β -葡聚糖（AB）的交互作用影响程度从大到小依次为 $A > B > C > AB$ 。苦荞麦芽苗粉富含丰富的活性成分，随着添加量的增加可以有效降低馒头的 eGI 值。因此加入苦荞麦芽苗粉有利于降低馒头的 eGI 值，且燕麦 β -葡聚糖具有降低消化酶活性的能力，对抑制馒头淀粉的水解有显著影响。谷朊粉对于苦荞麦芽苗粉馒头的 eGI 值的影响最小。

表 5-5 方差分析表
Table 5-5 ANOVA table

来源	平方和	自由度	均方	F 值	Prob>F	显著性
Model	19.76	9	2.2	45.48	< 0.0001	significant
A-苦荞麦芽苗粉	7.24	1	7.24	149.92	< 0.0001	**
B-燕麦β-葡聚糖	0.53	1	0.53	10.99	0.0129	*
C-谷朊粉	0.35	1	0.35	7.22	0.0312	*
AB	0.38	1	0.38	7.96	0.0257	*
AC	0.076	1	0.076	1.57	0.251	
BC	0.23	1	0.23	4.77	0.0652	
A ²	6.48	1	6.48	134.24	< 0.0001	**
B ²	1.27	1	1.27	26.21	0.0014	**
C ²	2.22	1	2.22	45.93	0.0003	**
残差	0.34	7	0.048			
失拟项	0.24	3	0.082	3.51	0.1285	not significant
纯误差	0.093	4	0.023			
总差	20.1	16				
R-Squared	0.9832					
Adj R-Squared	0.9616					
C.V. %	0.40					

注：*表示显著（ $P<0.05$ ），**表示极显著（ $P<0.01$ ）

5.4.2.2 交互作用分析



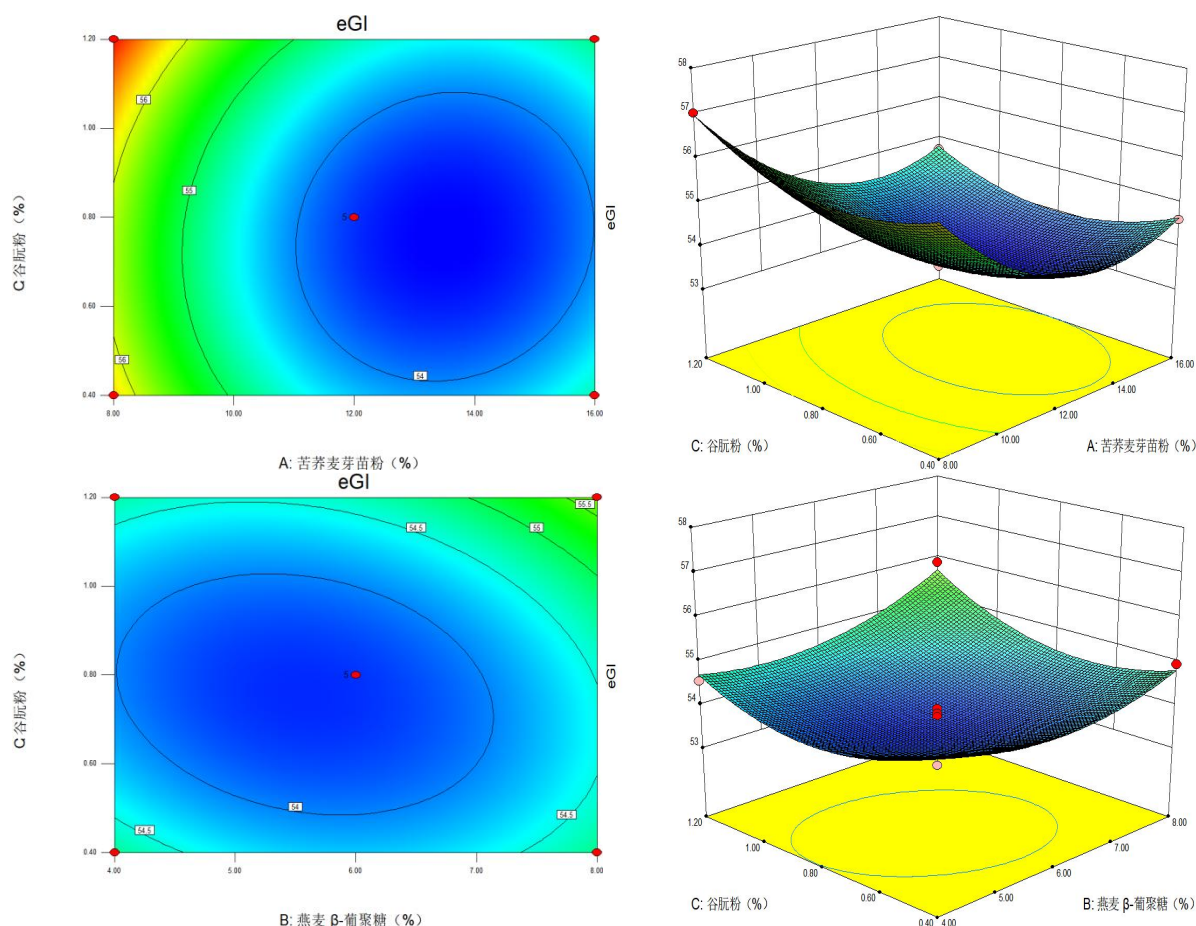


图 5-10 各因素对 eGI 的交互作用

Fig. 5-10 The interaction effect of each factor on the eGI

苦荞麦芽苗粉和燕麦 β -葡聚糖 (AB) 的交互作用、苦荞麦芽苗粉和谷朊粉 (AC) 的交互作用及燕麦 β -葡聚糖和谷朊粉 (BC) 的交互作用对 eGI 的影响如图 5-10 所示。苦荞麦芽苗粉及燕麦 β -葡聚糖、谷朊粉对馒头 eGI 的影响为响应面凹面图。随着苦荞麦芽苗粉的添加, eGI 降低, 添加燕麦 β -葡聚糖后效果更明显, 但苦荞麦芽苗粉与谷朊粉、燕麦 β -葡聚糖与谷朊粉的添加交互作用相对较弱。

5.4.2.3 响应面验证试验

根据模型拟合结果, 对响应面最优解进行验证。最优解为苦荞麦芽苗粉: 13.57%、燕麦 β -葡聚糖: 6.11%、谷朊粉: 0.79%, 预测 eGI 值为 53.53。根据实际操作, 苦荞麦芽苗粉添加量为 13.50%、燕麦 β -葡聚糖添加量为 6.10%、谷朊粉添加量为 0.80%, 试验测得, 苦荞麦芽苗粉 eGI 值为 53.62。与模型预测较吻合, 可以作为低 eGI 苦荞麦芽苗粉馒头配方。如图 5-11 所示, 为各种条件下的苦荞麦芽苗粉馒头的图片。可以看出 20% 的苦荞麦芽苗粉馒头比响应面优化配方馒头的组织更紧密, 有较大的气孔。10% 燕

麦 β -葡聚糖和 2%谷朊粉馒头，在表皮部分存在较大的空隙，组织结构不绵密。

A 空白馒头 B 13.5%苦荞麦芽苗粉、6.1%燕麦 β -葡聚糖、0.8%谷朊粉 C 12%苦荞麦芽苗粉、6%燕麦 β -葡聚糖、0.8%谷朊粉
D 20%苦荞麦芽苗粉、6%燕麦 β -葡聚糖、0.8%谷朊粉 E 12%苦荞麦芽苗粉、10%燕麦 β -葡聚糖、0.8%谷朊粉 F 12%苦荞麦芽苗粉、6%燕麦 β -葡聚糖、2%谷朊粉

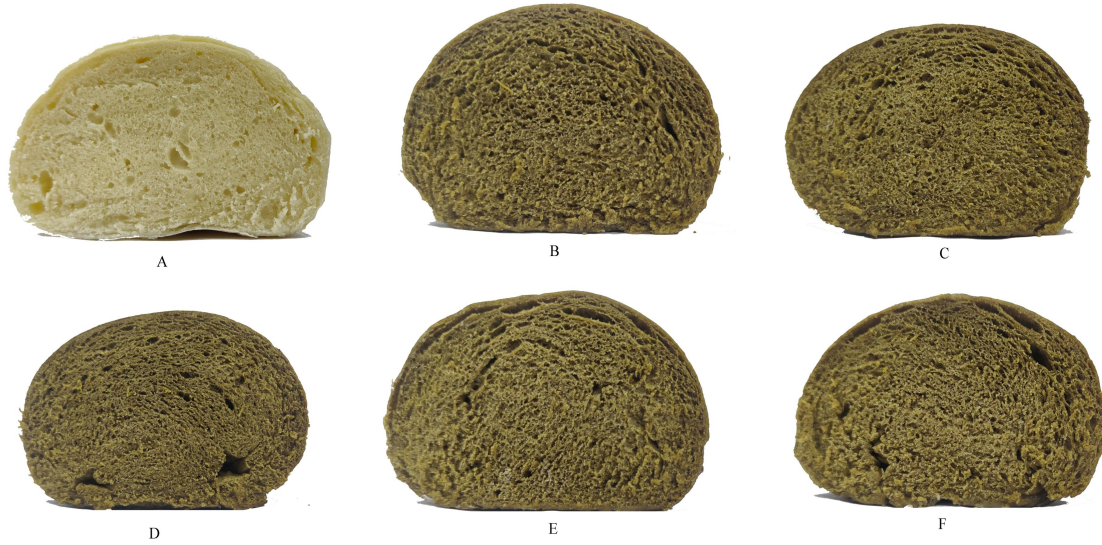


图 5-11 馒头图片

Fig. 5-11 Steamed bun picture

5.5 本章小节

本章采用单因素及响应面法优化确定低 GI 苦荞麦芽苗粉馒头的配方，结果如下：单因素试验表明，苦荞麦芽苗粉添加量 12%、燕麦 β -葡聚糖添加量 6%、谷朊粉添加量 0.8%时，馒头的比容、感官评分及 eGI 结果较好；且苦荞麦芽苗粉的添加量会导致馒头变硬，而通过燕麦 β -葡聚糖和谷朊粉的添加可以在一定程度上增加馒头的弹性，使馒头变软，增强馒头的咀嚼性，改善馒头的组织结构。采用响应面法优化馒头的配方，以 eGI 为响应值，确定馒头的配方为苦荞麦芽苗粉 13.57%、燕麦 β -葡聚糖：6.11%、谷朊粉：0.79%，预测 eGI 值为 53.53。据实际操作，苦荞苗芽苗粉添加量为 13.50%、燕麦 β -葡聚糖添加量为 6.10%、谷朊粉添加量为 0.80%，测得馒头的 eGI 值为 53.62。与模型预测较吻合，可以作为低 eGI 苦荞麦芽苗粉馒头配方。

第六章 结论与展望

6.1 结论

本研究在以往工作基础上，对苦荞麦芽苗进行加工工艺上的进一步研究。采用不同预处理结合不同温度的热风对苦荞麦芽苗进行干燥脱水处理。探究不同处理下的苦荞麦芽苗的干燥特性，及其对粉碎制得的苦荞麦芽苗粉的品质影响，并对 β -环糊精的包合结构进行分析。此外，通过响应面优化，研究低 GI 苦荞麦芽苗粉馒头的最佳配方。结果揭示 β -环糊精预处理可以有效减少苦荞麦芽苗热风干燥过程中活性成分的损失，提高抗氧化能力，抑制淀粉水解，降低产品的升糖指数。主要研究结果如下：

(1) 研究结果表明，随着干燥温度由 50℃升高到 70℃，所有处理组的苦荞麦芽苗的干燥时间均减少而脱水速率增大。与 CK 组相比，在各个干燥温度下，OM、US 和 BC 处理均能有效缩短苦荞芽苗的干燥时间，而 BC 与 US 处理可以增大芽苗的干燥速率。CP、 β -CD 及 US 处理组的芽苗 L^* 值较高， a^* 值更低，呈现更好的绿色。CP、OM、BC、 β -CD 及 US 组均可有效改善芽苗的复水性。在不同温度的热风干燥下，BC 组苦荞麦芽苗粉的流动性均较好。 β -CD 与 US 组持水与持油性均较强，且可以有效改善芽苗粉的溶解性。

(2) 研究结果表明，不同组的苦荞麦芽苗的纤维素含量均随着干燥温度的升高呈现先降低后上升的趋势。而还原糖、可溶性蛋白、可溶性糖则随着干燥温度的升高呈现一直下降的趋势。相同不同干燥温度下，各处理组可以有效减少芽苗干燥过程中还原糖的损失，BC 组除外，且 CP 与 β -CD 组总叶绿素均含量最高 ($P>0.05$)。在热风 60℃条件下，CP、OM、 β -CD 和 US 组总黄酮含量较高分别为 91.12 mg/g，89.44 mg/g，94.12 mg/g 和 87.34 mg/g，对比 CK 组分别提高了 8.76%，6.76%，12.34%和 4.25%，且 β -CD 组总酚含量最高为 21.90 mg/g。CP、OM、 β -CD 和 US 组显著提高了芽苗对 ABTS、DPPH 自由基的清除力及总还原力。由此可见，其中 β -CD 对于芽苗干燥过程减少活性成分损失的效果最好。

(3) 研究结果表明， β -CD 组在胃部及肠道消化阶段的黄酮的释放量均最高，且分别为 68.69 mg/g 和 85.78 mg/g，显著高于 CK 对照组 ($P<0.05$)。 β -CD 组在肠部消化后，DPPH 自由基清除能力为 405.84 μ mol TE/g，比 CK 组提高了 9.71% ($P<0.05$)。

β -CD、US、OM 和 CP 组在肠部消化期 ABTS 自由基清除能力均显著高于 CK 组，分别提高了 33.03%、25.49%、9.35%和 7.27%。 β -CD 和 US 组在肠部消化期的总还原能力显著高于 CK 组，分别为 4.45 mmol/g Fe^{2+} 、4.33 mmol/g Fe^{2+} 。 β -CD 组的苦荞麦芽苗粉馒头的总淀粉水解率最低为 34.48%，比 CK 组低 23.83%。与 CK 组相比， β -CD、CP、OM、BC 和 US 组馒头的 eGI 值均降低，其中 β -CD 组最低为 58.64（对照 eGI 值为 67.12）。此外通过 β -环糊精包合结构进行表征分析，发现苦荞麦芽苗干燥，粉碎过程中存在 β -CD 与芽苗内部活性物质结合的可能性，这也可能是导致 β -CD 组的活性成分含量较高，总淀粉水解率最低的原因之一。

（4）研究结果表明，苦荞麦芽苗粉添加量 12%、燕麦 β -葡聚糖添加量 6%、谷朊粉添加量 0.8%时，苦荞芽苗馒头的比容、感官评分及 eGI 结果较好；苦荞麦芽苗粉的添加会导致馒头变硬，而燕麦 β -葡聚糖和谷朊粉的添加则可以在一定程度上增加馒头的弹性，使馒头变软，促使馒头的组织结构，气孔分布更为均匀。以 eGI 为响应值，通过响应面优化确定了苦荞馒头的最佳配方为：苦荞麦芽苗粉添加量 13.50%、燕麦 β -葡聚糖添加量 6.10%、谷朊粉添加量 0.80%，在此配方下，馒头的 eGI 值为 53.62。

6.2 创新点

- （1）利用 β -环糊精对苦荞麦芽苗进行预处理，改善其热风干燥品质。
- （2）利用苦荞麦芽苗粉、燕麦 β -葡聚糖和谷朊粉开发低 GI 馒头食品。

6.3 展望

本研究探讨了柠檬酸、氯化钠、烫漂、 β -环糊精和超声波等预处理方法结合不同温度的热风干燥对苦荞麦芽苗干燥品质、物理特性，营养成分，抗氧化能力和消化特性的影响，额外对 β -环糊精与芦丁包合物的表征分析，并研究了苦荞麦芽苗粉馒头的配方。但仍存可深入研究的空间。

- （1）新型干燥技术，如射频干燥、对撞流干燥、红外干燥、旋转闪蒸干燥等对芽苗干燥品质的影响研究。
- （2）苦荞麦芽苗粉活性成分的提取，制备 β -环糊精与苦荞麦芽活性成分的包合物，进一步改善芽苗的营养利用。
- （3）开发苦荞麦芽苗粉加工的功能性健康食品，如：复合压片、功能饮料、速食产品等。

参考文献

- [1] 王丽娟, 刘苏萌, 李可, 等. 黑苦荞中黄酮类化合物的稳定性和抑菌活性研究 [J]. 粮食与油脂, 2015, 28(8): 62-65.
- [2] Suzuki T, Morishita T. Chapter twenty seven - Bitterness Generation, Rutin Hydrolysis, and Development of Trace Rutinosidase Variety in Tartary Buckwheat [J]. Molecular Breeding and Nutritional Aspects of Buckwheat, 2016: 345-353.
- [3] Shin J, Yang J, Yang J Y. Germination of tartary buckwheat at various light strengths to enhance flavonoid content and scale-up of the process using smart-farm systems [J]. Journal of Cereal Science, 2023, 112: 103727.
- [4] Mansur A R, Sang G L, Lee B H, et al. Phenolic compounds in common buckwheat sprouts: composition, isolation, analysis and bioactivities [J]. Food Science Biotechnol, 2022, 31(8): 935-956.
- [5] Zhou Y, Hong W, Cui L, et al. Evolution of nutrient ingredients in tartary buckwheat seeds during germination [J]. Food Chemistry, 2015, 186: 244-248.
- [6] Galieni A, Falcinelli B, Stagnari F, et al. Sprouts and Microgreens: Trends, Opportunities, and Horizons for Novel Research [J]. Agronomy, 2020, 10(9): 1424.
- [7] Renna M, Paradiso V M. Ongoing Research on Microgreens: Nutritional Properties, Shelf-Life, Sustainable Production, Innovative Growing and Processing Approaches [J]. Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2020, 9(6): 826.
- [8] 孙丹, 黄士淇, 蔡圣宝. 不同加工方式对苦荞中总酚、总黄酮及抗氧化性的影响 [J]. 食品与发酵工业, 2016, 42(1): 141-147.
- [9] Zhu F. Chemical composition and health effects of Tartary buckwheat [J]. Food Chemistry, 2016, 203: 231-245.
- [10] Nan G, Zhao H, Wu Q, et al. Comparative study of the effects of Tartary buckwheat seed and sprout consumption on the physiological indices and gut microbiota of C57BL/6J mice [J]. Food Science and Human Wellness, 2024, 13(2): 791-800.
- [11] Wang N, Dong Y, Wang S, et al. Changes in nutritional and antioxidant properties,

- p>structure, and flavor compounds of Tartary buckwheat (
- Fagopyrum tataricum*
- s) sprouts during domestic cooking [J]. International Journal of Gastronomy and Food Science, 2024, 36: 100914.
- [12] Ma H, Xu X, Wang S, et al. Effects of microwave irradiation on the expression of key flavonoid biosynthetic enzyme genes and the accumulation of flavonoid products in *Fagopyrum tataricum* sprouts、 [J]. Journal of Cereal Science, 2021, 101.
- [13] Hua X, Kim, Haeng, et al. Accumulation of Phenylpropanoids and Correlated Gene Expression in Hairy Roots of Tartary Buckwheat under Light and Dark Conditions [J]. Applied biochemistry biotechnology, 2014, 174(7): 2537-2547.
- [14] Guo Y, Zhu Y, Chen C, et al. Effects of aeration treatment on gamma-aminobutyric acid accumulation in germinated Tartary buckwheat (*Fagopyrum tataricum*) [J]. Journal of Chemistry, 2016, 2016(6): 1-9.
- [15] 孙坤坤, 卢奕霏, 侯泽豪, 等. 苦荞芽菜游离酚、结合酚及抗氧化活性研究 [J]. 西北农业学报, 2020, 29(7): 1035-1044.
- [16] Qin P, Wei A, Zhao D, et al. Low concentration of sodium bicarbonate improves the bioactive compound levels and antioxidant and α -glucosidase inhibitory activities of tartary buckwheat sprouts [J]. Food Chemistry, 2017, 224: 124-130.
- [17] 黄思苑, 罗嘉源, 叶俊锋, 等. 富含 γ -氨基丁酸的黑苦荞发芽的条件优化及成分分析 [J]. 食品工业科技, 2021, 42(24): 144-150.
- [18] Almuhayawi M S, Hassan A H A, Abdel-Mawgoud M, et al. Laser light as a promising approach to improve the nutritional value, antioxidant capacity and anti-inflammatory activity of flavonoid-rich buckwheat sprouts [J]. Food Chemistry, 2021, 345: 128788.
- [19] Nakamura K, Naramoto K, Koyama M. Blood-pressure-lowering effect of fermented buckwheat sprouts in spontaneously hypertensive rats [J]. Journal of Functional Foods, 2013, 5(1): 406-415.
- [20] Karki R, Park C-H, Kim D-W. Extract of buckwheat sprouts scavenges oxidation and inhibits pro-inflammatory mediators in lipopolysaccharide-stimulated macrophages (RAW264.7) [J]. Journal of Integrative Medicine, 2013, 11(4): 246-252.

- [21] Chen T, Piao M, Ehsanur Rahman S M, et al. Influence of fermentation on antioxidant and hypolipidemic properties of maifanite mineral water-cultured common buckwheat sprouts [J]. Food Chemistry, 2020, 321: 126741.
- [22] Ma H, Xu X, Wang S, et al. Effects of microwave irradiation on the expression of key flavonoid biosynthetic enzyme genes and the accumulation of flavonoid products in *Fagopyrum tataricum* sprouts [J]. J Cereal Sci, 2021, 101: 103275.
- [23] Hui M, Xianmeng X, Shunmin W, et al. Effects of microwave irradiation of *Fagopyrum tataricum* seeds on the physicochemical and functional attributes of sprouts [J]. Food Science and Technology, 2022, 165: 113738.
- [24] Bian Z-X, Wang J-F, Ma H, et al. Effect of microwave radiation on antioxidant capacities of Tartary buckwheat sprouts [J]. Journal of Food Science and Technology, 2020, 57(10): 3913-3919.
- [25] Wang S, Xu X, Wang S, et al. Effects of microwave treatment on structure, functional properties and antioxidant activities of germinated Tartary buckwheat protein [J]. Foods, 2022, 11(10): 1701427.
- [26] 肖亚冬, 杨慧珍, 李大婧, 等. 不同护色预处理对铁棍山药热风干燥特性及品质变化的影响 [J]. 江苏农业科学, 2020, 48(20): 6.
- [27] Korese J K, Achaglinkame M A, Chikpah S K. Effect of hot air temperature on drying kinetics of palmyra (*Borassus aethiopum* Mart.) seed-sprout fleshy scale slices and quality attributes of its flour [J]. Journal of Agriculture and Food Research, 2021, 6: 100249.
- [28] El-Beltagy A, Gamea G R, Essa A H A. Solar drying characteristics of strawberry [J]. Journal of Food Engineering, 2007, 78(2): 456-464.
- [29] Duan X, Zhang M, Mujumdar A S, et al. Microwave freeze drying of sea cucumber (*Stichopus japonicus*) [J]. Journal of Food Engineering, 2010, 96(4): 491-497.
- [30] Doymaz İ. Effect of citric acid and blanching pre-treatments on drying and rehydration of Amasya red apples [J]. Food and Bioproducts Processing, 2010, 88(2): 124-132.
- [31] Mirzaei-Baktash H, Hamdami N, Torabi P, et al. Impact of different pretreatments on drying kinetics and quality of button mushroom slices dried by hot-air or

- electrohydrodynamic drying [J]. Food Science and Technology, 2022, 155: 112894.
- [32] Gubanenکو G A, Rechkina E A, Naymushina L V, et al. Wheat sprouts processing technology and powder receiving from the marcs with high content of the biological active substances [J]. Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies, 2019, 81(2): 154-161.
- [33] Złotek U, Gawlik-Dziki U, Dziki D, et al. Influence of Drying Temperature on Phenolic Acids Composition and Antioxidant Activity of Sprouts and Leaves of White and Red Quinoa [J]. Journal of Chemistry, 2019, 2019: 1-8.
- [34] Gan R-Y, Lui W-Y, Chan C-L, et al. Hot Air Drying Induces Browning and Enhances Phenolic Content and Antioxidant Capacity in Mung Bean (*Vigna radiata L.*) Sprouts [J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2017, 41(1): e12846.
- [35] 邹少强. 渗透预处理对冷冻干燥苹果片物理品质的影响 [J]. 中国果菜, 2022, 42(09): 25-32+39.
- [36] 安可婧, 魏来, 唐道邦, 等. 果蔬干燥前处理技术的应用及研究进展 [J]. 现代食品科技, 2019, 35(6): 8.
- [37] 骆航, 孙兴力, 刘金凤, 等. 山药片干燥前的柠檬酸护色工艺研究 [J]. 武夷学院学报, 2020, 39(12): 31-35.
- [38] Akter J, Hassan J, Rahman M M, et al. Colour, nutritional composition and antioxidant properties of dehydrated carrot (*Daucus carota var. sativus*) using solar drying techniques and pretreatments [J]. Heliyon, 2024, 10(2): e24165.
- [39] Fan W, Zhao J, Li Q. Effect of different food additives on the color protection of instant pumpkin flour [J]. Food Chemistry Advances, 2023, 3: 100413.
- [40] 楚倩倩, 任广跃, 段续. 黄花菜热风干燥褐变抑制条件探究 [J]. 食品科学, 2022, 4(26): 4-26.
- [41] 党娅, 刘水英, 米桂. 脱水绿豆芽加工工艺优化 [J]. 南方农业学报, 2016, 47(2): 273-279.
- [42] Lyu Y, Bi J, Chen Q, et al. Color enhancement mechanisms analysis of freeze-dried carrots treated by ultrasound-assisted osmosis (*ascorbic acid-CaCl2*) dehydration [J].

- Food Chemistry, 2022, 381: 132255.
- [43] Prakash Maran J, Sivakumar V, Thirugnanasambandham K, et al. Artificial neural network and response surface methodology modeling in mass transfer parameters predictions during osmotic dehydration of Carica papaya L [J]. Alexandria Engineering Journal, 2013, 52(3): 507-516.
- [44] Feng Y, Yu X, Yagoub A E A, et al. Vacuum pretreatment coupled to ultrasound assisted osmotic dehydration as a novel method for garlic slices dehydration [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2019, 50: 363-372.
- [45] Tortoe C. A review of osmodehydration for food industry [J]. african journal of food science, 2010, 4(6): 303-324.
- [46] Tadesse T F, Abera S, Solomon W K. Nutritional and Sensory Properties of Solar-Dried Carrot Slices as Affected by Blanching and Osmotic Pre-Treatments [J]. International Journal of Food Science Nutrition Engineering, 2015, 5(1): 24-32.
- [47] 杨大恒, 赵宜范, 张丽红, 等. 物理场辅助渗透脱水技术及其在果蔬干燥中的应用 [J]. 食品工业科技, 2021, 42(13): 435-440.
- [48] Tsamo C V P, Bilame A-F, Ndjouenkeu R, et al. Study of material transfer during osmotic dehydration of onion slices (*Allium cepa*) and tomato fruits (*Lycopersicon esculentum*) [J]. LWT - Food Science and Technology, 2005, 38(5): 495-500.
- [49] Deng L Z, Mujumdar A S, Zhang Q, et al. Chemical and physical pretreatments of fruits and vegetables: Effects on drying characteristics and quality attributes – a comprehensive review [J]. Critical Reviews Food Science Nutrition, 2017, 59(9): 1408-1432.
- [50] Guida V, Ferrari G, Pataro G, et al. The effects of ohmic and conventional blanching on the nutritional, bioactive compounds and quality parameters of artichoke heads [J]. Food Science Technology, 2013, 53(2): 569-579.
- [51] Lavelli V, Zanoni B, Zaniboni A. Effect of water activity on carotenoid degradation in dehydrated carrots [J]. Food Chemistry, 2007, 104(4): 1705-1711.
- [52] Badwaik L S, Gautam G, Deka S C. Influence of blanching on antioxidant, nutritional and physical properties of bamboo shoot [J]. Journal of Agricultural Sciences 2015, 10(3): 140-150.

- [53] Wang L, Xu B, Wei B, et al. Low frequency ultrasound pretreatment of carrot slices: Effect on the moisture migration and quality attributes by intermediate-wave infrared radiation drying [J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2018, 40: 619-628.
- [54] Ercan S S, Soysal I. Use of ultrasound in food preservation [J]. *Natural Science*, 2013, 5(8B): 5-13.
- [55] Cárcel J A, Castillo D, Simal S, et al. Influence of temperature and ultrasound on drying kinetics and antioxidant properties of red pepper [J]. *Drying Technology*, 2019, 37(4): 486-493.
- [56] Tüfekci S, Zkal S G. Enhancement of drying and rehydration characteristics of okra by ultrasound pre-treatment application [J]. *Heat Mass Transfer*, 2017, 53(7): 1-8.
- [57] Andrés R R, Riera E, Gallego-Juárez J A, et al. Airborne power ultrasound for drying process intensification at low temperatures: Use of a stepped-grooved plate transducer [J]. *Drying Technology*, 2019, 39(2): 1-14.
- [58] Zhang Y, Abatzoglou N. Review: Fundamentals, applications and potentials of ultrasound-assisted drying - ScienceDirect [J]. *Chemical Engineering Research Design*, 2020, 154: 21-46.
- [59] Yuan Y, Pan, Wen D, et al. Applications of electromagnetic fields for nonthermal inactivation of microorganisms in foods: An overview [J]. *Trends in Food Science Technology*, 2017, 64: 13-22.
- [60] Bassey E J, Cheng J H, Sun D W. Novel nonthermal and thermal pretreatments for enhancing drying performance and improving quality of fruits and vegetables [J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2021, 112(1): 137-148.
- [61] Jin W, Zhang M, Shi W. Evaluation of ultrasound pretreatment and drying methods on selected quality attributes of bitter melon (*Momordica charantia* L.) [J]. *Drying Technology*, 2019, 37(3): 387-396.
- [62] Corrêa J L G, Rasia M C, Mulet A, et al. Influence of ultrasound application on both the osmotic pretreatment and subsequent convective drying of pineapple (*Ananas comosus*) [J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2017, 41: 284-291.
- [63] Niveditha A, Chidanand D V, Sunil C K. Effect of ultrasound-assisted drying on drying kinetics, color, total phenols content and antioxidant activity of pomegranate peel [J].

Measurement: Food, 2023, 12: 100114.

- [64] 李光辉. 环糊精包合物的制备方法及其在食品工业中的应用 [J]. 食品安全导刊, 2023, 2023(7): 151-153.
- [65] 王艳丽, 袁超, 刘亚伟. 环糊精在食品工业中的新应用 [J]. 中国食品添加剂, 2017, (11): 128-131.
- [66] Fernandes A, Rocha M a A, Santos L M N B F, et al. Blackberry anthocyanins: β -Cyclodextrin fortification for thermal and gastrointestinal stabilization [J]. Food Chemistry, 2018, 245: 426-431.
- [67] Cheng J-R, Xiang R, Liu X-M, et al. The effects of thermal processing and β -cyclodextrin on extractable polyphenols in mulberry juice-enriched dried minced pork slices [J]. LWT, 2019, 116: 108503.
- [68] 刘飞, 麻成金. 预处理对冻干黄豆芽品质的影响 [J]. 食品研究与开发, 2005, 26(6): 87-89.
- [69] Galieni A, Falcinelli B, Stagnari F, et al. Sprouts and Microgreens: Trends, Opportunities, and Horizons for Novel Research [J]. Agronomy, 2020, 10(9): 1424-1450.
- [70] Renna M, Paradiso V M. Ongoing research on microgreens: nutritional properties, shelf-life, sustainable production, innovative growing and processing approaches [J]. Foods, 2020, 9(6): 826-831.
- [71] Suzuki T, Honda Y, Funatsuki W, et al. Purification and characterization of flavonol 3-glucosidase, and its activity during ripening in tartary buckwheat seeds [J]. Plant Science, 2002, 163(3): 417-423.
- [72] Liu Y, Cai C, Yao Y, et al. Alteration of phenolic profiles and antioxidant capacities of common buckwheat and tartary buckwheat produced in China upon thermal processing [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2019, 99(12): 5565-5576.
- [73] Barber G A, Behrman E J. The synthesis and characterization of uridine 5'-(β -L-rhamnopyranosyl diphosphate) and its role in the enzymic synthesis of rutin [J]. Archives of Biochemistry & Biophysics, 1991, 288(1): 239-242.
- [74] Li D, Li X, Ding X, et al. A process for preventing enzymatic degradation of rutin in tartary buckwheat (*Fagopyrum tataricum* Gaertn) flour [J]. Food Sci Biotechnol, 2008,

- 17(1): 118-122.
- [75] Ghimeray A K, Sharma P, Phoutaxay P, et al. Far infrared irradiation alters total polyphenol, total flavonoid, antioxidant property and quercetin production in tartary buckwheat sprout powder [J]. *Journal of Cereal Science*, 2014, 59(2): 167-172.
- [76] Bhinder S, Singh N, Kaur A. Impact of germination on nutraceutical, functional and gluten free muffin making properties of Tartary buckwheat (*Fagopyrum tataricum*) [J]. *Food Hydrocolloids*, 2022, 124(A): 107268.
- [77] Molinari R, Costantini L, Timperio A M, et al. Tartary buckwheat malt as ingredient of gluten-free cookies [J]. *Journal of Cereal Science*, 2018, 80: 37-43.
- [78] Karam M C, Petit J, Zimmer D, et al. Effects of drying and grinding in production of fruit and vegetable powders: A review [J]. *Journal of Food Engineering*, 2016, 188: 32-49.
- [79] 何财安, 张珍, 王丽静, 等. 磨粉方式对苦荞粉粉质特性及体外消化特性的影响 [J]. *中国粮油学报*, 2017, 32(5): 19-25+49.
- [80] Yu D, Chen J, Ma J, et al. Effects of different milling methods on physicochemical properties of common buckwheat flour [J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2018, 92: 220-226.
- [81] 许青莲, 岳天义, 张萍, 等. 超微粉碎对苦荞物化性质的影响 [J]. *包装工程*, 2020, 41(11): 25-32.
- [82] 张明, 马超, 王崇队, 等. 不同粉碎粒度对大麦苗粉体品质和加工特性的影响 [J]. *食品科技*, 2019, 44(7): 224-228.
- [83] Golubkina N A, Seredin T M, Baranova H A, et al. Prospects of production of allium seeds sprouts fortified with selenium [J]. *Vegetable crops of Russia*, 2018, (6): 50-54.
- [84] Zhang M, Chen H, Li J, et al. Antioxidant properties of tartary buckwheat extracts as affected by different thermal processing methods [J]. *LWT - Food Science and Technology*, 2010, 43(1): 181-185.
- [85] Germ M, Árvay J, Vollmannová A, et al. The temperature threshold for the transformation of rutin to quercetin in Tartary buckwheat dough [J]. *Food Chemistry*,

- 2019, 283: 28-31.
- [86] Jambrec D, Sakač M, Mišan A, et al. Effect of autoclaving and cooking on phenolic compounds in buckwheat-enriched whole wheat tagliatelle [J]. *Journal of Cereal Science*, 2015, 66: 1-9.
- [87] Qin P, Wu L, Yao Y, et al. Changes in phytochemical compositions, antioxidant and α -glucosidase inhibitory activities during the processing of tartary buckwheat tea [J]. *Food Research International*, 2013, 50(2): 562-567.
- [88] Kaur B, Ranawana V, Teh A-L, et al. The impact of a low glycemic index (GI) breakfast and snack on daily blood glucose profiles and food intake in young Chinese adult males [J]. *Journal of Clinical & Translational Endocrinology*, 2015, 2(3): 92-98.
- [89] Zou, Ping. Traditional Chinese Medicine, Food Therapy, and Hypertension Control: A Narrative Review of Chinese Literature [J]. *American Journal of Chinese Medicine*, 2016, 44(8): 1-16.
- [90] Liu T, Gu Y, Waleed A L A, et al. Challenges and opportunities in developing low glycemic index foods with white kidney bean α -amylase inhibitor [J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2024, 147: 104397.
- [91] Ferrer-Mairal A, Peñalva-Lapuente C, Iglesia I, et al. In vitro and in vivo assessment of the glycemic index of bakery products: influence of the reformulation of ingredients [J]. 2012, 51(8): 947-954.
- [92] Ni C, Jia Q, Ding G, et al. Low-Glycemic Index Diets as an Intervention in Metabolic Diseases: A Systematic Review and Meta-Analysis [J]. *Nutrients*, 2022, 14(2): 307.
- [93] 徐箐. 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; 河北工程大学, 2020.
- [94] 靳玉龙. GI 值的测定方法和影响因素及低 GI 食品生理学功能的研究进展 [J]. *现代食品科技*, 2024, 5(2): 1-12.
- [95] 汪丽萍, 韩玲玉, 刘艳香, 等. 谷物配比对多谷物共挤压粉估计血糖生成指数的影响 [J]. *中国食品学报*, 2021, 21(2): 72-79.

- [96] 高婷婷, 刘静雪, 李凤林, 等. 低 GI 高膳食纤维谷物再制米工艺 [J]. 食品工业, 2019, 46(6): 166-170.
- [97] 李丹青, 郑华, 黄卫娟, 等. 低 GI 复合苦荞面条的研制 [J]. 农产品加工, 2024, (2): 1-5+11.
- [98] 钱召影, 李凤林, 张丽, 等. 荞麦在低 GI 食品中的开发及应用研究 [J]. 粮食问题研究, 2023, (6): 40-43.
- [99] 马麟, 彭镰心, 赵钢. 我国苦荞芽菜生产及其食品开发研究进展 [J]. 农产品加工, 2015, (21): 64-67+71.
- [100] 吴昆明. 苦荞芽粉的制备、体内抗氧化活性评价及产品开发 [D]; 陕西师范大学, 2017.
- [101] Yang W, Qian G, Chen Y, et al. Profiling of polyphenols for in-depth understanding of Tartary buckwheat sprouts: Correlation between cultivars and active components, dynamic changes and the effects of ultraviolet B stress [J]. Food Chemistry, 2022, 14: 100295.
- [102] Wu K, Ling A, Hu X, et al. Effects of drying methods on color, polyphenol content and antioxidant activity of tartary buckwheat sprouts [J]. Food Fermentation Industries, 2016, 42(11): 115-120.
- [103] Guo X, Hao Q, Qiao X, et al. An evaluation of different pretreatment methods of hot-air drying of garlic: Drying characteristics, energy consumption and quality properties [J]. LWT, 2023, 180: 114685.
- [104] 李泽珍, 李蔚, 狄建兵. 热风干燥苹果片超声波预处理工艺的优化 [J]. 山西农业大学学报(自然科学版), 2017, 37(9): 663-669.
- [105] Czarnowska-Kujawska M, Draszanowska A, Starowicz M. Effect of different cooking methods on the folate content, organoleptic and functional properties of broccoli and spinach [J]. LWT, 2022, 167: 113825.
- [106] 李洁, 冯怡, 徐德生, 等. 中药浸膏粉物理性质与干法制粒工艺的相关性研究 [J]. 中国中药杂志, 2010, 36(12): 1606-1609.

- [107] 刘素稳, 常学东, 李航航, 等. 不同粉碎方法对杏鲍菇超微粉体物化性质的影响 [J]. 现代食品科技, 2013, 29(11): 2722-2727.
- [108] 王崇队, 张明, 杨立风, 等. 牡丹花蕊超微粉体制备工艺及理化特性 [J]. 食品工业, 2021, 42(10): 140-144.
- [109] Zhou W, Cao X, Islam M N, et al. Comparison of hydrability, antioxidants, microstructure, and sensory quality of barley grass powder using ultra-micro- crushing combined with hot air and freeze drying [J]. Food Science Nutrition, 2021, 9(4): 1870-1880.
- [110] Xiaoyan, Zhao, Hongkai, et al. Effect of pressure grinding technology on the physicochemical and antioxidant properties of Tremella aurantialba powder [J]. Journal of Food Processing Preservation, 2018, 42(12): 13833.
- [111] 王辉, 句荣辉, 王丽, 等. 响应面法优化柿子多糖喷雾干燥制粉工艺研究 [J]. 农产品加工, 2022, (11): 46-50+57.
- [112] Liu Y-Y, Wang Y, Lv W-Q, et al. Freeze-thaw and ultrasound pretreatment before microwave combined drying affects drying kinetics, cell structure and quality parameters of Platycodon grandiflorum [J]. Industrial Crops and Products, 2021, 164: 113391.
- [113] Chen Y, Cui L, Li M, et al. Detection of water variation in rosebuds during hot-air drying by LF-NMR and MRI [J]. Drying Technology, 2019, 38(3): 304-312.
- [114] Zhang B, Li M, Qiao Y, et al. Potential use of low-field nuclear magnetic resonance to determine the drying characteristics and quality of Arctium lappa L. in hot-blast air [J]. Food Science Technology, 2020, 132: 109829.
- [115] Santos K C, Guedes J S, Rojas M L, et al. Enhancing carrot convective drying by combining ethanol and ultrasound as pre-treatments: Effect on product structure, quality, energy consumption, drying and rehydration kinetics [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2021, 70: 105304.
- [116] Nadery Dehsheikh F, Taghian Dinani S. Coating pretreatment of banana slices using carboxymethyl cellulose in an ultrasonic system before convective drying [J].

- Ultrasonics Sonochemistry, 2019, 52: 401-413.
- [117] An N-N, Lv W-Q, Li D, et al. Effects of hot-air microwave rolling blanching pretreatment on the drying of turmeric (*Curcuma longa L.*): Physiochemical properties and microstructure evaluation [J]. Food Chemistry, 2023, 398: 133925.
- [118] Deng L-Z, Pan Z, Mujumdar A S, et al. High-humidity hot air impingement blanching (HHAIB) enhances drying quality of apricots by inactivating the enzymes, reducing drying time and altering cellular structure [J]. Food Control, 2019, 96: 104-111.
- [119] Bai J-W, Zhang L, Aheto J H, et al. Effects of different pretreatment methods on drying kinetics, three-dimensional deformation, quality characteristics and microstructure of dried apple slices [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2023, 83: 103216.
- [120] 李艳艳, 史早, 冉莎, 等. 干燥方式对毛竹笋全粉理化特性及结构的影响 [J]. 食品工业科技, 2023, 8(3): 1-11.
- [121] Roongruangsri W S. Effect of air-drying temperature on physico-chemical, powder properties and sorption characteristics of pumpkin powders [J]. Food Chemistry, 2020, 117(4): 647-653.
- [122] 冯晶晶, 郭建峰, 马心茹, 等. 超微粉碎对沙棘茶粉颗粒结构及理化特性的影响 [J]. 食品与发酵工业, 2023, 49(7): 198-204.
- [123] Brzezowska J, Hendrysiak A, Wojdyło A, et al. Extraction-depended and thermally-modulated physical and chemical properties of powders produced from cranberry pomace extracts [J]. Current Research in Food Science, 2024, 8: 100664.
- [124] Nagaraj K, Karuppiiah C, Wadaan M A, et al. Synthesis, characterization, molecular modeling, binding energies of β -cyclodextrin-inclusion complexes of quercetin: Modification of photo physical behavior upon β -CD complexation [J]. Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy, 2024: 124091.
- [125] Wu D-T, Wang J, Li J, et al. Physicochemical properties and biological functions of soluble dietary fibers isolated from common and Tartary buckwheat sprouts [J]. LWT, 2023, 183: 114944.

- [126] 向达兵, 付小琴, 邹鑫, 等. 苦荞芽果味酵素产品及其品质评价研究 [D]. 成都大学, 2022.
- [127] 魏然, 马挺军, 聂子涵. 苦荞芽粉饮料工艺及芳香成分分析 [D]. 北京农学院学报, 2022.
- [128] 李俊, 卢阳, 刘永翔, 等. 乳酸菌发酵对苦荞芽苗饮料品质和营养成分的影响 [J]. 食品与机械, 2018, 34(12): 5.
- [129] Liu C, You X, Qiu Q, et al. Study on morphological traits, nutrient compositions and comparative metabolomics of diploid and tetraploid Tartary buckwheat sprouts during sprouting [J]. Food Research International, 2023, 164: 112334.
- [130] 唐云, 闫海彦, 赵亚雄, 等. 碘比色法测定高粱中直链淀粉和支链淀粉的方法探讨 [J]. 食品工业科技, 2023, 44(13): 272.
- [131] Diamante M S, Vanz Borges C, Minatel I O, et al. Domestic cooking practices influence the carotenoid and tocopherol content in colored cauliflower [J]. Food Chemistry, 2021, 340: 127901.
- [132] 熊素敏, 左秀凤, 朱永义. 稻壳中纤维素、半纤维素和木质素的测定 [J]. 粮食与饲料工业, 2005, (8): 40-41.
- [133] 林钰虹, 魏然, 方舟滔, 等. 干燥工艺对白茶品质及抗氧化活性的影响研究 [J]. 中国茶叶加工, 2022, (2): 33-38.
- [134] 刘宇, 戴沅霖, 马越, 等. 金银花粗多糖提取工艺优化及其抗氧化活性评价 [J]. 食品工业科技, 2023, 44(7): 188-196.
- [135] Peng W, Dong Y, Wang J, et al. Effects of exogenous solution treatment on germination, antioxidation and flavonoid biosynthesis of Tartary buckwheat (*Fagopyrum tataricum* (L.) Gaertn.) [J]. Food Bioscience, 2023, 56: 103367.
- [136] Xu F, Zheng Y, Yang Z, et al. Domestic cooking methods affect the nutritional quality of red cabbage [J]. Food Chemistry, 2014, 161: 162-167.
- [137] Oziewicz M D, Narwojsz A, Draszanowska A, et al. The effects of cooking method on

- selected quality traits of broccoli and green asparagus [J]. *International Journal of Food Science*, 2020, 55(1): 127-135.
- [138] Tian J, Chen J, Ye X, et al. Health benefits of the potato affected by domestic cooking: A review [J]. *Food Chemistry*, 2016, 202: 165-175.
- [139] 李蔼琪, 夏惠, 孙桂菊. 低 GI 饮食在 2 型糖尿病营养管理的研究进展及应用现状 [J]. *食品科学*, 2024, 8: 1-11.
- [140] 乔瀚, 高嫚, 孟翔烁, 等. 低 GI 米制品研究进展 [J]. *粮食与油脂*, 2023, 36(10): 8-10.
- [141] Kuwabara T, Han K-H, Hashimoto N, et al. Tartary Buckwheat Sprout Powder Lowers Plasma Cholesterol Level in Rats [J]. *Journal of Nutritional Science and Vitaminology*, 2007, 53(6): 501-507.
- [142] Lee D-G, Jang I S, Yang K E, et al. Effect of rutin from tartary buckwheat sprout on serum glucose-lowering in animal model of type 2 diabetes [J]. *Acta Pharmaceutica*, 3916, 66(2): 297-302.
- [143] 田玲丽, 马娇, 刘军, 等. 低 GI 枸杞杂粮代餐粉的体外消化特性 [J]. *食品工业科技*, 2024, 7: 1-13.
- [144] 马艺超. 不同热加工对苦荞制品功能成分、质构及体外消化的影响 [D]; 沈阳农业大学, 2019.
- [145] Bustos M C, Perez G T, León A E. Sensory and nutritional attributes of fibre-enriched pasta [J]. *LWT - Food Science and Technology*, 2011, 44(6): 1429-1434.
- [146] 李诺, 张东杰, 张桂芳, 等. 体外消化对苦荞酚类物质含量及抗氧化活性的影响 [J]. *黑龙江八一农垦大学学报*, 2023, 35(5): 43-50.
- [147] 邵雪花, 赖多, 肖维强, 等. 不同干燥方法对番石榴果实品质及抗氧化活性的影响 [J]. *中国农学通报*, 2022, 38: 134-140.
- [148] Tagliazucchi D, Verzelloni E, Bertolini D, et al. In vitro bio-accessibility and antioxidant activity of grape polyphenols [J]. 2010, 120(2): 599-606.
- [149] Ferreira C, Ribeiro C, Nunes F M. Effect of storage conditions on phenolic composition,

- vitamin C and antioxidant activity of 'Golden Delicious' and 'Red Delicious' apples [J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2024, 210: 112754.
- [150] Hu X, Wang Y, Zhang L, et al. Construction of self-assembled polyelectrolyte complex hydrogel based on oppositely charged polysaccharides for sustained delivery of green tea polyphenols [J]. *Food Chemistry*, 2020, 306: 125632.
- [151] 谌迪, 肖朝耿, 徐玲峰, 等. 喷雾干燥协同酶法制备对抗性藕粉的影响 [J]. *中国食品学报*, 2023, 23(4): 274-282.
- [152] Sun R, Zhang Z, Hu X, et al. Effect of wheat germ flour addition on wheat flour, dough and Chinese steamed bread properties [J]. *Journal of Cereal Science*, 2015, 64: 153-158.
- [153] Zhu Q, Yuan Z, Zhu Y, et al. Processing, physicochemical and nutritional properties of steamed bread fortified with Chinese Huai-shan Yam [J]. *Food Chemistry Advances*, 2023, 3: 100517.
- [154] 许芳溢. 苦荞芽粉馒头品质及体外模拟消化研究 [D]. 西北农林科技大学, 2014.

攻读硕士学位期间取得的成果

- [1] 第一作者. Changes in nutritional and antioxidant properties, structure, and flavor compounds of Tartary buckwheat (*Fagopyrum tataricum*s) sprouts during domestic cooking [J]. International Journal of Gastronomy and Food Science, 2024, 36: 100914.
- [2] 第二作者. Effects of microwave and exogenous l-phenylalanine treatment on phenolic constituents, antioxidant capacity and enzyme inhibitory activity of Tartary buckwheat sprouts[J]. Food Science and Biotechnology. 2023, 32(1): 11-9.
- [3] 第二作者 Effect of co-treatment of microwave and exogenous l-phenylalanine on the enrichment of flavonoids in Tartary buckwheat sprouts. Journal of the Science of Food and Agriculture. 2023 103(4): 2014-2022.
- [4] 2021 年安徽省大学生食品设计创新大赛“三等奖”。
- [5] 2022 年安徽工程大学第十届专利发明与创新大赛“三等奖”。

致谢

时光飞逝、光阴荏苒。研究生的三年生涯转瞬即逝，一路跌跌撞撞走到现在，有些许遗憾、些许不舍，对未来满怀热爱的我又要开始新的征程。

饮水思其源，学成念吾师。回想刚到实验室时，我的导师王顺民教授时常教导我在学习实验上要严谨、不做假，更多的是教我在为人处事方面的道理。我很感谢导师如父亲般的耐心教导，在这三年来，他以身作则，在学习处事方面会处处提点我，不仅传授我知识，更重要的是教会我做人做事的道理。我觉得这才是我这三年来最宝贵的财富，当然我还有许多不足之处，但我相信经过这三年您的教导，我以后会做的更好。其次，还要感谢食品院的各位老师，你们是我学习路上的灯塔，给了我方向，帮助我打下坚实的研究基础。

在研究生的生活中，首先，我要感谢我的师兄、师姐们：曹雪原、王思蒙、罗丽、彭文革和徐为雯，指导我学习与实验，为我答疑解惑。其次我要感谢一起学习讨论的同学们：胡成锐、聂风、周捷、陆新月和杜田莹，很感谢他们与我一起共同进步成长。最后，我也要感谢实验室的师弟师妹们：束志伟、董雨露、吴宁宁、徐雨蝶平时的陪伴。

千爱万恩百苦，疼我熟知父母。结尾我要感谢我的父母，在他们的支持与鼓励下我才可以披荆斩棘，奋勇向前。我爱你们！

作者：王楠

时间：2024年3月20日